



Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau

Rapport d'avancement

BRGM/RP-63719-FR

Juin 2014



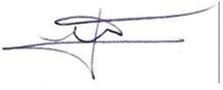
Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau

Rapport d'avancement

BRGM/RP-63719-FR
Juin 2014

Étude réalisée dans le cadre du projet de Service public du BRGM 13RSE1300

B. Mougins, B. Bourguine, F. Lucassou, F. Mathieu, J-M. Schroetter et R. Wyls
Avec la collaboration de
L. Ardito, J-M. Baltassat, G. Guizouarn, F. Koch

<p>Vérificateur :</p> <p>Nom : Y. CABALLERO</p> <p>Date : 15/07/2014</p> <p>Signature : </p>
--

<p>Approbateur :</p> <p>Nom : E. PALVADEAU</p> <p>Date : 17/07/2014</p> <p>Signature : </p>

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : eaux souterraines, géologie, roches altérées, milieu fissuré, hydrogéologie, géophysique, sondages, Résonance Magnétique Protonique, panneaux électriques, quantité eau, cartographie, modélisation géostatistique, Ille-et-Vilaine, Bretagne

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

B. Mougin, B. Bourgine, F. Lucassou, F. Mathieu, J-M. Schroetter et R. Wyns, avec la collaboration de L. Ardito, J-M. Baltassat, G. Guizouarn, F. Koch (2014) – Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau. Rapport d'avancement. BRGM/RP-63719-FR, 77 pages, 38 illustrations, 8 annexes (volume séparé) dont 12 planches A3.

Synthèse

Ce rapport constitue l'état d'avancement de la première année du projet « Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau ». Ce projet, d'une durée de 2 ans (juillet 2013 à juin 2015), est réalisé grâce à la collaboration du Syndicat intercommunal des eaux de la Forêt du Theil (SIEFT), de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, et du BRGM.

Deux secteurs d'étude, situés au Sud de l'Ille-et-Vilaine, ont été définis en accord avec les partenaires : un bassin Tertiaire de 300 m de diamètre sur la commune de Coësmes, et la partie du bassin versant de l'Aron située sur le territoire du SIEFT (superficie d'environ 45 km²).

L'étude du bassin Tertiaire a permis d'évaluer sa géométrie et la faisabilité de l'exploitation des eaux souterraines. Compte-tenu de sa faible dimension (extension et profondeur), du faible volume d'eau souterraine qu'il contient (environ 5 327 m³ en hautes eaux) et de la nature argileuse de son remplissage (faible perméabilité), il apparaît que l'exploitation du bassin serait très peu rentable.

Sur le bassin de l'Aron, implanté dans des roches de socle, l'étude se décompose en deux phases : une première phase de cartographie des volumes d'eau souterraine sur les 100 premiers mètres du sous-sol et une seconde phase de réalisation de 2 forages semi-profonds (à 200-300 m de profondeur).

La 1^{ère} phase a permis de produire les documents suivants :

- une cartographie de la géométrie des réservoirs aquifères : altérites et milieu fissuré (modélisation fondée sur les données de forages et des observations de surface (affleurements), en utilisant les méthodes de géostatistique : krigeage) ;
- une reconstitution de la surface piézométrique (qui permet de calculer l'épaisseur de chaque couche située en zone saturée) ;
- le calcul des teneurs moyennes en eau de chaque couche de l'aquifère pour chacune des formations géologiques grâce à 10 sondages de Résonance Magnétique Protonique ;
- une cartographie des volumes d'eau souterraine stockés dans les 100 premiers mètres des aquifères (épaisseur de réservoir mouillé x teneur en eau = hauteur d'eau contenue dans l'aquifère d'altération sur une maille de 50 m) ;
- une estimation des temps de vidange des aquifères (temps qu'une goutte d'eau met à s'écouler du sol à la nappe, puis de la nappe à la rivière).

Les principaux résultats obtenus après cette phase sont :

- les volumes des réserves en eau souterraine existantes sur les 45 km² du bassin de l'Aron ont été estimés à 57.7 ± 2.5 millions de m³ ;
- les zones les plus riches en eau et les plus favorables à l'exploitation se situent au Nord du bassin versant dans la Formation des Grès Armoricaïn ;
- les temps de renouvellement de l'eau souterraine présente dans les 100 premiers mètres des aquifères (temps de transit de l'eau dans la zone non saturée + temps de vidange de l'aquifère saturé) sont d'environ 11.5 ans.

Durant la 2^{ème} phase de l'étude du bassin de l'Aron (prévue de juillet 2014 à juin 2015), 2 forages semi-profonds à 200-300 m de profondeur seront réalisés. Ces ouvrages seront implantés dans des zones associant : la présence d'une structure drainante (fracturation du socle assurant une bonne perméabilité) et une hauteur d'eau maximale dans l'aquifère d'altération (assurant une alimentation pérenne de cette structure drainante).

Sommaire

1. Contexte, objectif et déroulement du projet	9
1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF.....	9
1.2. ORGANISATION DU PROJET EN 3 ETAPES.....	10
2. Localisation et contexte des secteurs d'étude	11
2.1. LE BASSIN TERTIAIRE SUR LA COMMUNE DE COËSMES.....	11
2.2. LE BASSIN DE L'ARON.....	13
2.2.1. Choix du bassin étudié.....	13
2.2.2. Contexte géologique simplifié.....	13
2.2.3. Hiérarchisation des aquifères de socle à partir des forages.....	14
2.2.4. Contribution des eaux souterraines au débit de l'Aron.....	16
3. Géométrie du bassin Tertiaire et examen de la faisabilité de l'exploitation des eaux souterraines	19
3.1. RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE PAR PANNEAUX ELECTRIQUES.....	19
3.1.1. Objectif.....	19
3.1.2. Acquisitions et traitements.....	20
3.1.3. Résultats et interprétations.....	22
3.2. ESTIMATION DU VOLUME D'EAU SOUTERRAINE PRESENT DANS LE BASSIN	26
3.2.1. Géométrie du bassin et volume des formations tertiaires.....	26
3.2.2. Estimation du volume d'eau souterraine.....	27
3.3. EXAMEN DE LA FAISABILITE D'UNE RECHERCHE EN EAU.....	27
4. Reconnaissances de terrain sur le bassin versant de l'Aron	29
4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN DE L'ARON ET CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES.....	29
4.1.1. Géologie du sous-bassement du bassin de l'Aron.....	29
4.1.2. Géologie des formations superficielles.....	32
4.1.3. Cadre structural.....	34
4.1.4. L'altération des roches.....	37
4.2. REALISATION DE SONDAGES A LA TARIERE MECANIQUE.....	41
4.2.1. Déclarations de travaux et autorisations.....	41
4.2.2. Dispositif utilisé.....	41
4.2.3. Implantation des sondages.....	43
4.2.4. Résultats obtenus.....	45

4.3. CAMPAGNE DE SONDAGES DE RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE (RMP)	46
4.3.1. Objectifs de la campagne géophysique.....	46
4.3.2. Implantation des sondages RMP	46
4.3.3. Programme technique.....	47
4.3.4. Acquisition et traitement des données.....	48
4.3.5. Résultats obtenus	49
5. Cartographie des volumes d'eau souterraine sur le bassin versant de l'Aron	53
5.1. CONDITIONS DE REALISATION	53
5.2. MODELISATION GEOMETRIQUE DES INTERFACES	54
5.2.1. Méthodologie mise en œuvre.....	54
5.2.2. Modélisation de la surface piézométrique	56
5.2.3. Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place	60
5.2.4. Modélisation de la base de l'horizon fissuré supérieur et inférieur.....	61
5.2.5. Calcul de l'épaisseur des horizons situés en zone saturée	62
5.3. CALCUL DE LA RESERVE EN EAU SOUTERRAINE	62
5.3.1. Synthèse des mesures RMP.....	62
5.3.2. Calcul de la carte de la réserve en eau souterraine	64
5.3.3. Discussion et commentaires	65
5.4. UTILISATIONS DES CARTES.....	67
5.4.1. Utilisation des cartes pour la recherche des eaux souterraines en vue de leur exploitation	67
5.4.2. Utilisation des cartes pour la protection des eaux souterraines et des eaux de surface.....	67
6. Travail prévu pour la 3^{ème} étape du projet	71
7. Conclusion.....	73
8. Bibliographie	75

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation du territoire du SIEFT et des captages AEP souterrains	9
Illustration 2 - Localisation du bassin Tertiaire (en rose) sur fond IGN 1/25 000	11
Illustration 3 - Extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50 000 de Chateaubriand (feuille 389), avec localisation du bassin Tertiaire.....	12
Illustration 4 - Délimitation de la zone étudiée.....	13

Illustration 5 - Schéma géologique à 1/250 000 du bassin de l'Aron	14
Illustration 6 - Résultats de l'approche statistique sur les formations géologiques du bassin de l'Aron	15
Illustration 7 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle du bassin de l'Aron	15
Illustration 8 - Localisation du bassin de l'Aron par rapport au bassin modélisé avec GARDENIA®	16
Illustration 9 - Résultats de la modélisation GARDENIA® sur l'Aron.....	17
Illustration 10 - Localisation des panneaux électriques sur fond IGN à 1/25 000	19
Illustration 11 - Caractéristiques des panneaux électriques réalisés	20
Illustration 12 - Panneau électrique COES1 – Coupe de résistivité inversée	23
Illustration 13 - Panneau électrique COES2 – Coupe de résistivité inversée	23
Illustration 14 - Extension du bassin tertiaire du Matz et ébauche de schéma structural	25
Illustration 15 - Cône de révolution tronqué et retourné (à gauche : figure théorique, à droite : géométrie simplifiée du bassin du Matz)	26
Illustration 16 - Géologie simplifiée du centre Bretagne et coupe géologique (Le Corre, 1977, dans Gumiaux, 2003) ; en rouge, localisation et position structurale du bassin de l'Aron ; en vert, les formations géologiques du Paléozoïque.....	29
Illustration 17 - Successions sédimentaires du Paléozoïque Inférieur en Bretagne et en Normandie (Ballèvre et al., 2013), en rouge celles présentes sur le bassin de l'Aron.....	31
Illustration 18 - Répartition des faciès tertiaires au voisinage de Teillay (notice de la carte géologique Bain-de-Bretagne (n°388)).....	32
Illustration 19 - Extrait des cartes géologiques harmonisées à 1/50 000 des départements d'Ille-et-Vilaine et de Loire-Atlantique (légèrement modifiées, BRGM).....	33
Illustration 20 - Coupe géologique transversale Nord-Sud du bassin de l'Aron (le Nord est à gauche de la coupe et le Sud à droite) extrait de la carte géologique de Bain-de-Bretagne (n°388), les numéros correspondent aux descriptions des roches dans le texte ci-dessus.....	34
Illustration 21 - Carte structurale interprétative du bassin de l'Aron, déduite d'observations de terrain et de la carte de l'illustration 4.	36
Illustration 22 - Schéma de principe de l'observation in situ du développement possible du profil d'altération sur les grès armoricains.	38
Illustration 23 - Cartographie des bases des altérites meubles sur le bassin de l'Aron (le chiffre central correspond à l'altitude moyenne interprétée à partir de la campagne de terrain).....	40
Illustration 24 - Aperçu de la sondeuse utilisée sur le bassin du Nançon	42
Illustration 25 - Tige hélicoïdale en diamètre 152 mm et remontée des déblais	43
Illustration 26 - Localisation des sondages à la tarière réalisés sur fond IGN 1/25 000 (à gauche : sondage sur la commune de Coesmes, à droite : sondages sur le bassin de l'Aron sur fond de cartographie des altérites (en hachuré rouge))	44
Illustration 27 - Numéros BSS et profondeur des tarières réalisées sur le bassin de l'Aron	45
Illustration 28 - Volume des travaux géophysiques RMP réalisés	47
Illustration 29 - Implantation des sondages RMP. Les croix bleues indiquent les implantations prévisionnelles ; les carrés rouges les sondages réalisés munis de leur n° en étiquette. En fond la carte IGN à 1/25 000.	48

Illustration 30 - Caractéristiques des sondages RMP. Tous les enregistrements ont été réalisés avec le système NUMIS ^{POLY} . Les boucles d'émission (TX) et de réception (RX1) sont coïncidentes et sont en forme de huit formé de deux carrés de 37.5 m de côté. Les boucles RX2 sont pour la mesure de bruit. La qualité des sondages est indiqué par les valeurs 1 à 3 : 3 pour bon ; 2 pour moyen ; 1 pour mauvais.	50
Illustration 31 - Localisation des sondages RMP. En fond, la carte géologique à 1/50 000 de Bain-de-Bretagne.	50
Illustration 32 - Résultats RMP en fonction de la géologie (S/N = signal/noise, et EN/IN = external noise / instrumental noise).	51
Illustration 33 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine	54
Illustration 34 - Principe de modélisation de la surface piézométrique	57
Illustration 35 - 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 (bassin de l'Aron)	59
Illustration 36 - 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 (bassin de l'Aron)	61
Illustration 37 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Aron).....	63
Illustration 38 - Evaluation du volume d'eau souterraine renouvelable annuellement sur le bassin de l'Aron (cf. rapport BRGM/RP-56457-FR)	68

Liste des annexes (volume séparé)

Annexe 1 - Localisation des forages présents autour du bassin versant de l'Aron

Annexe 2 - Principe du panneau électrique

Annexe 3 - Paramètres d'inversion utilisés dans Res2DInv

Annexe 4 - Coupes géologiques des sondages mécaniques Aron (A1 à A12)

Annexe 5 - Principe des sondages par résonance magnétique des protons (RMP)

Annexe 6 - Données mesurées et résultats d'interprétation des sondages RMP - Inversion automatique en quarante couches

Annexe 7 - Planches A3

Annexe 8 - Géostatistique et interpolation par la géostatistique

1. Contexte, objectif et déroulement du projet

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF

Le Syndicat Intercommunal des Eaux de la Forêt du Theil (SIEFT) assure la gestion et la desserte en eau potable sur 42 communes situées au Sud du département de l'Ille-et-Vilaine (cf. Illustration 1). Ces collectivités sont représentées par 103 délégués élus des conseils municipaux des communes adhérentes. En 2008, le SIEFT comptait 22 970 compteurs d'eau pour une population d'environ 45 000 habitants et une consommation de 2 400 000 m³ par an.

Le SIEFT exploite 5 captages souterrains pour l'alimentation en eau potable (AEP) situés dans des bassins tertiaires sur la commune du Theil-de-Bretagne (3 forages au lieu-dit « La Cité » au Sud-Est de la commune et 2 forages à « La Grousinière » à l'Ouest ; cf. Illustration 1). Le captage de Bonne Fontaine est situé sur le territoire du SIEFT (sur la commune de Teillac, cf. Illustration 1) mais il est utilisé par le Syndicat Intercommunal d'alimentation en eau potable du Pays de la Mée en Loire-Atlantique.

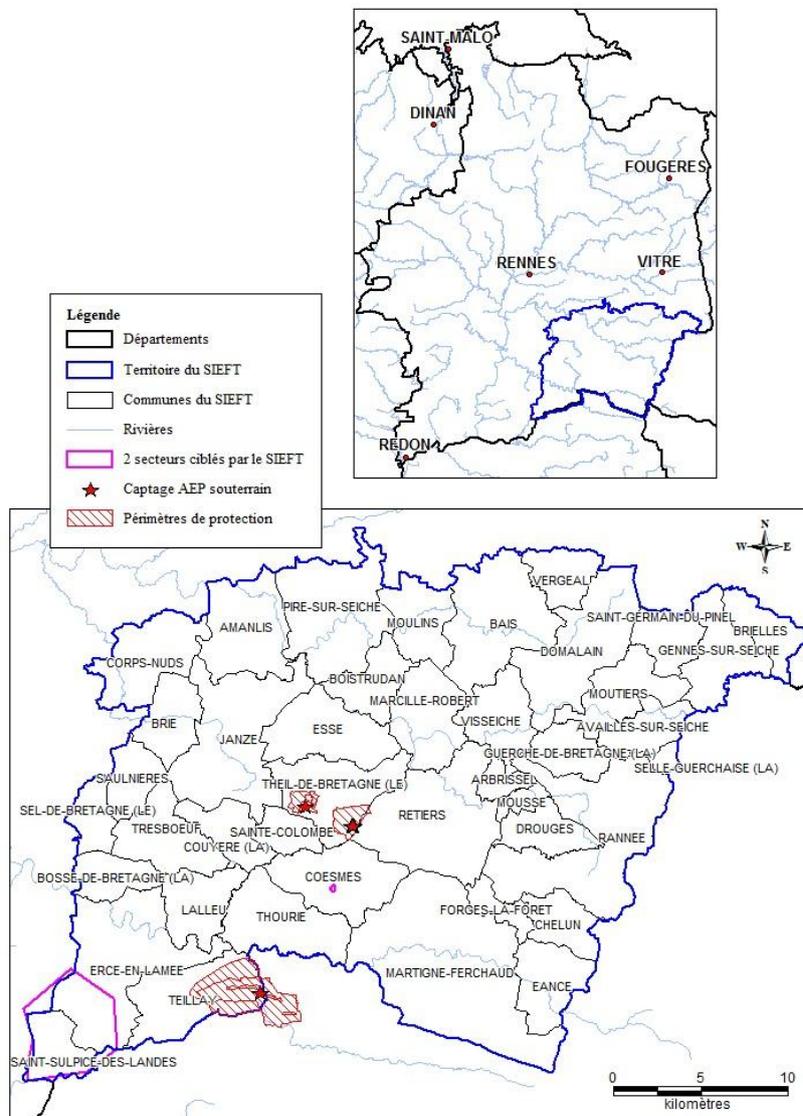


Illustration 1 - Localisation du territoire du SIEFT et des captages AEP souterrains

Jusqu'en 2003 les besoins du SIEFT étaient assurés à 50% par sa propre production et à 50% via l'achat à 2 autres Syndicats. Depuis 2004, les achats représentent 65% des besoins et la situation ne s'améliorera sans doute pas puisque les aquifères exploités dans les bassins tertiaires (« La Cité » et « La Grousinière ») montrent des signes d'appauvrissement.

Le SIEFT, qui recherche donc des alternatives en eau souterraine à des fins d'alimentation en eau potable, s'est rapproché du BRGM pour bénéficier de sa connaissance des eaux souterraines en milieu de socle. Le Syndicat a notamment eu connaissance des études suivantes du BRGM : SILURES Bretagne, RAPSODI et CASPAR¹.

Suite à différentes présentations des expériences du BRGM au Bureau du SIEFT, le Syndicat, soucieux de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères bretons, a décidé en Comité Syndical de lancer une étude de recherche en eau souterraine sur deux secteurs géographiques : un bassin Tertiaire de 300 m de diamètre sur la commune de Coësmes, et un secteur de 25 km² à cheval sur les communes d'Ercée-en-Lamée et de Saint-Sulpice-des-Landes (cf. Illustration 1).

Pour réaliser le projet intitulé « Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau », le BRGM a établi une convention de recherche et développement partagés avec le SIEFT (convention du 02/05/2013). Par ailleurs, le projet bénéficie d'une subvention financière de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (dossier n°120410201, décision référence 2013C002 du 25/03/2013).

1.2. ORGANISATION DU PROJET EN 3 ETAPES

Le projet de recherche en eau souterraine se décompose en 3 étapes :

- 1 étape sur le premier site :
 - étude du bassin Tertiaire « du Matz » sur la commune de Coësmes : géométrie et faisabilité de l'exploitation des eaux souterraines
- 2 étapes successives sur le second secteur :
 - étude de type « SILURES bassin versant² » : cartographie des volumes d'eau souterraine sur les 100 premiers mètres du sous-sol ;
 - étude de type « RAPSODI³ » : réalisation de 2 forages semi-profonds à 200-300 m de profondeur.

La durée du projet a été estimée à 2 ans de juillet 2013 à juin 2015.

Ce rapport présente l'état d'avancement de la première année du projet qui a permis de réaliser la 1^{ère} étape du projet sur le premier site (cf. chapitre 3) et la 2^{nde} étape du projet sur le second secteur (cf. chapitre 4 et 5). La 3^{ème} et dernière étape du projet, qui reste à réaliser, sera décrite dans le chapitre 6.

¹ Cf. rapports BRGM/RP-56457-FR (SILURES Bretagne) et RP-56749-FR (RAPSODI), et thèse de C. Roques 2014 (CASPAR)

² Cf. rapport BRGM/RP-56318-FR (SILURES Bassin versant)

³ Cf. rapport BRGM/RP-56749-FR (RAPSODI)

2. Localisation et contexte des secteurs d'étude

Le BRGM a édité fin 2008, une carte indiquant des zones potentielles d'intérêt hydrogéologique sur le territoire du SIEFT. Celle-ci s'appuyait notamment sur les résultats du projet SILURES Bretagne et les contours provenaient de la carte géologique simplifiée du BRGM à l'échelle du 1/250 000. Le SIEFT a superposé sur cette carte ses cibles prioritaires en fonction de la maîtrise du foncier et de la proximité de conduites AEP. Sur la base de ces échanges, les élus du SIEFT ont choisi deux zones pour affiner les recherches en eau souterraine :

- un bassin Tertiaire sur la commune de Coësmes,
- un secteur de 25 km² à cheval sur les communes d'Ercée-en-Lamée et de Saint-Sulpice-des-Landes (faisant partie du bassin versant de la rivière de l'Aron).

Dans le cadre du conventionnement avec le SIEFT, les partenaires ont agrandi la seconde zone d'étude pour se rapprocher des conditions des expériences précédentes « SILURES bassins versants » sur environ 50 km². La 2^{ème} zone est donc composée d'une partie du bassin versant de l'Aron située sur le territoire du SIEFT (superficie d'environ 45 km²).

2.1. LE BASSIN TERTIAIRE SUR LA COMMUNE DE COËSMES

Le bassin Tertiaire est situé au lieu-dit « le Matz » au Centre de la commune de Coësmes (cf. Illustration 2).

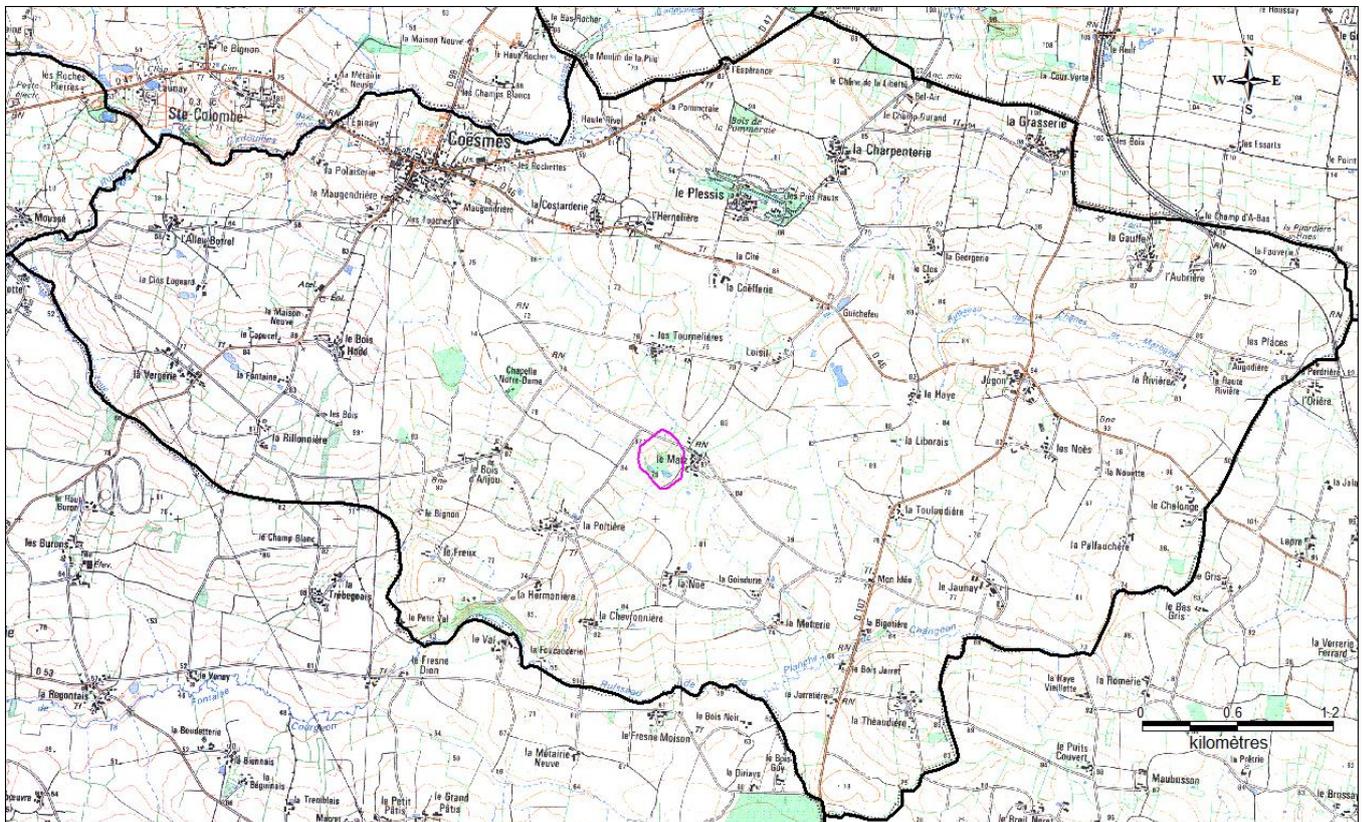


Illustration 2 - Localisation du bassin Tertiaire (en rose) sur fond IGN 1/25 000

D'après la carte géologique de Chateaubriand (n°389), les formations tertiaires affleurent en surface sur une forme se rapprochant d'un cercle de 300 m de diamètre (cf. Illustration 3).

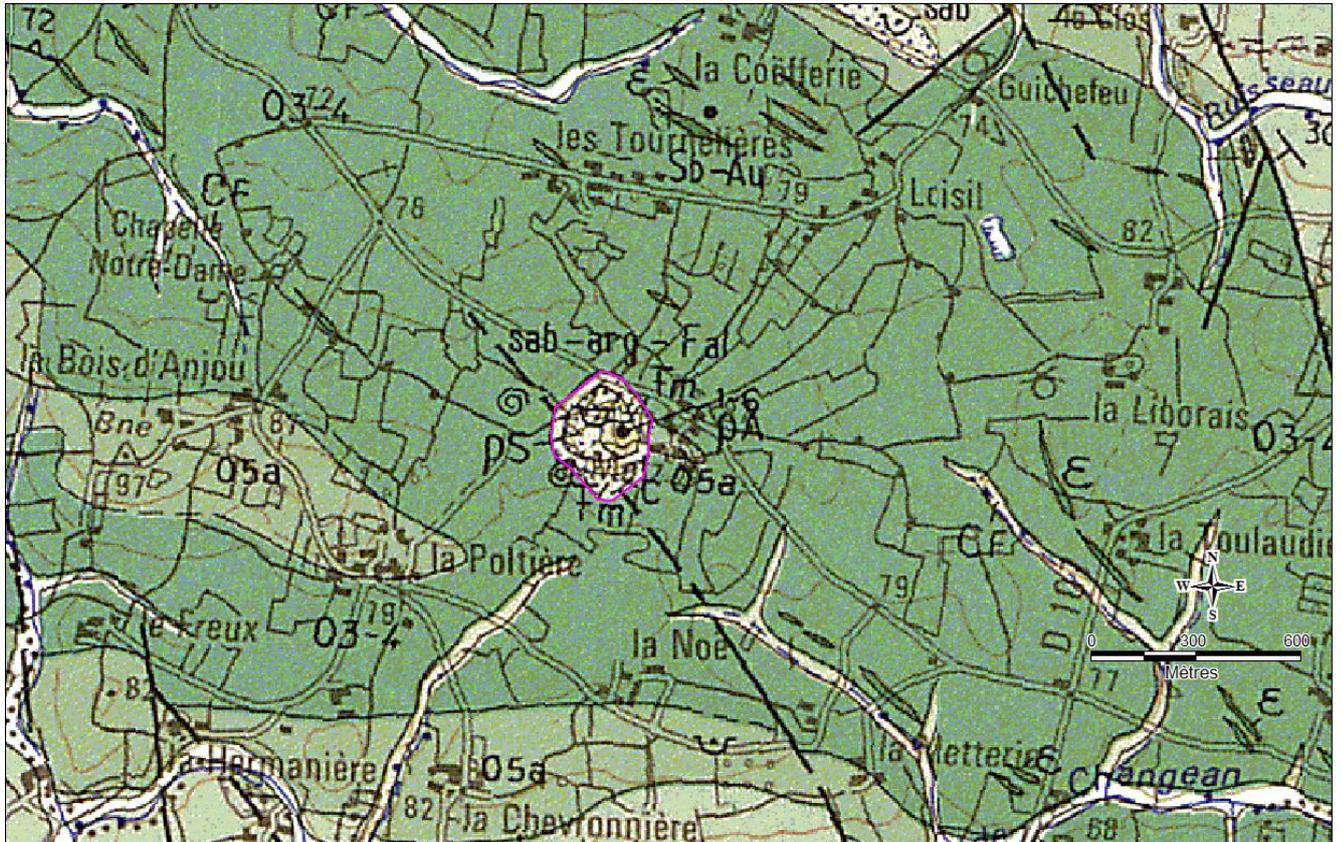


Illustration 3 - Extrait de la carte géologique du BRGM au 1/50 000 de Chateaubriand (feuille 389), avec localisation du bassin Tertiaire

La carte géologique évoque la succession suivante du bassin (du plus récent au plus ancien) :

- Colluvions indifférenciées (c)
- Pliocène (pS et pA) : respectivement faciès sableux et faciès argileux coquiller ;
- Miocène (m) : faluns d'âge incertain.

Ce bassin est positionné sur des formations de socle (du plus récent au plus ancien) :

- Ordovicien (o5a) : Formation du Châtellier composée de grès verts micacés chlorito-feldspathiques et lentilles de quartzites blancs ;
- Ordovicien (o3-4) : Formation de Traveusot avec pélites siltiteuses subardoisières, sombres à quartz, chlorite et séricite.

Le bassin semble être traversé par une faille orientée N140.

La notice de la carte géologique de Chateaubriand (n°389) évoque un bassin d'environ 12 m de profondeur dont la géométrie n'est pas arrêtée. Le sondage n°1-6 (cf. Illustration 3), réalisé lors de l'établissement de la carte géologique, a rencontré successivement des sables, des argiles noires coquillières (2 m) et des faluns.

2.2. LE BASSIN DE L'ARON

2.2.1. Choix du bassin étudié

La rivière de l'Aron prend sa source à une altitude de 54 m NGF sur la commune de Teillay (département de l'Ille-et-Vilaine), elle s'écoule sur une longueur d'environ 26 km avant sa confluence avec la Chère sur la commune de Derval (département de la Loire-Atlantique) à une altitude de 12 m NGF. Le bassin versant de la rivière de l'Aron de sa source à la confluence a une superficie de 118 km².

L'illustration 4 permet de visualiser la partie du bassin de l'Aron concerné par cette étude (polygone en vert foncé) : c'est la partie du bassin versant (polygone à la limite orange) située dans le territoire du SIEFT (polygone vert clair avec limites en pointillé vert). Sur cette illustration est rappelé le contour rose du secteur de 25 km² visible sur l'illustration 1.

Le bassin étudié s'étend sur 3 communes (de l'Ouest vers l'Est : Saint-Sulpice-des-Landes, Ercé-en-Lamée et Teillay) et il a une superficie de 44.7 km². Dans la suite de ce rapport, cette zone d'étude sera appelée « le bassin de l'Aron ».

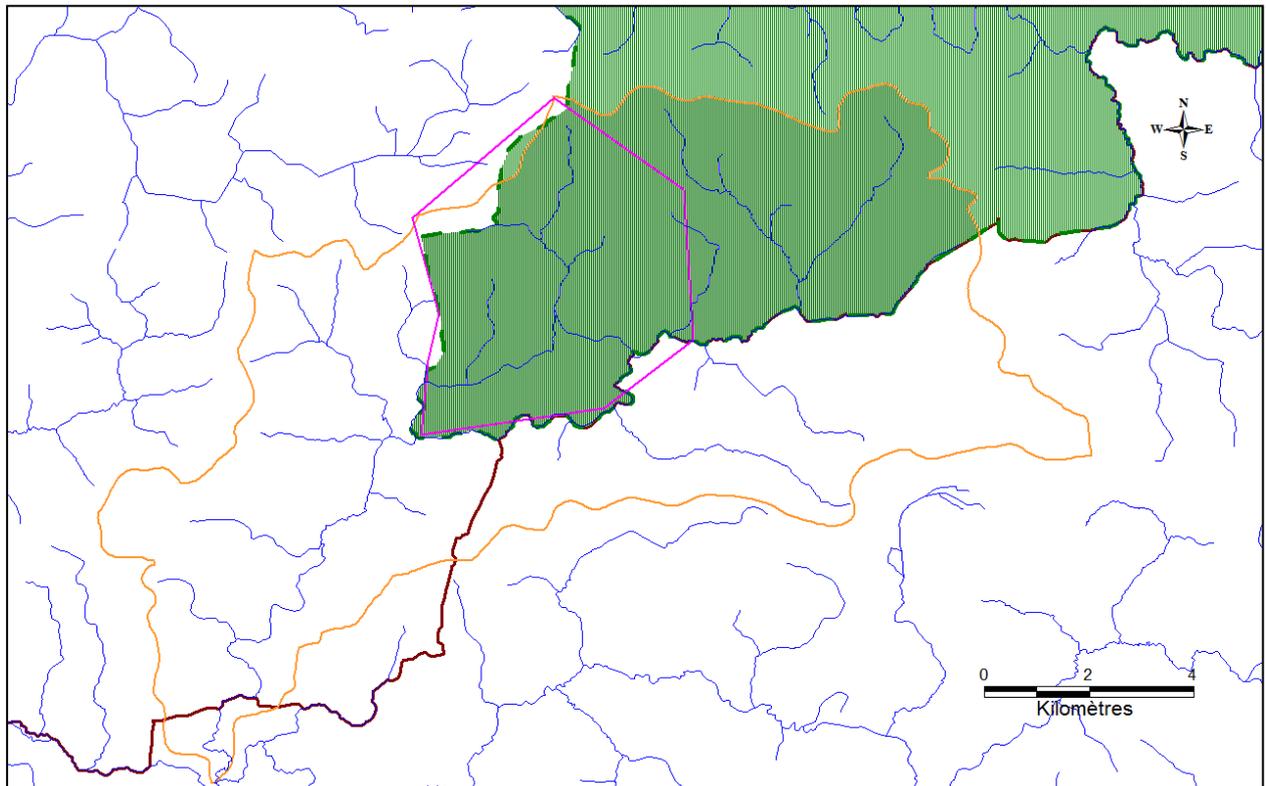


Illustration 4 - Délimitation de la zone étudiée

2.2.2. Contexte géologique simplifié

Ce paragraphe décrit la répartition géologique simplifiée des formations présentes dans le bassin de l'Aron (cf. Illustration 5). Les descriptions et les caractéristiques des formations géologiques du bassin seront détaillées dans le chapitre 4.1.

Le bassin versant de l'Aron est principalement constitué par des terrains schisto-gréseux ; on distingue du Nord au Sud : la Formation du Grès Armoricaïn, les schistes de la Formation de Traveusot, et les schistes et grès de la Formation de Riadan-Renazé. On note la présence de Formations superficielles composant plusieurs lentilles dans le bassin.

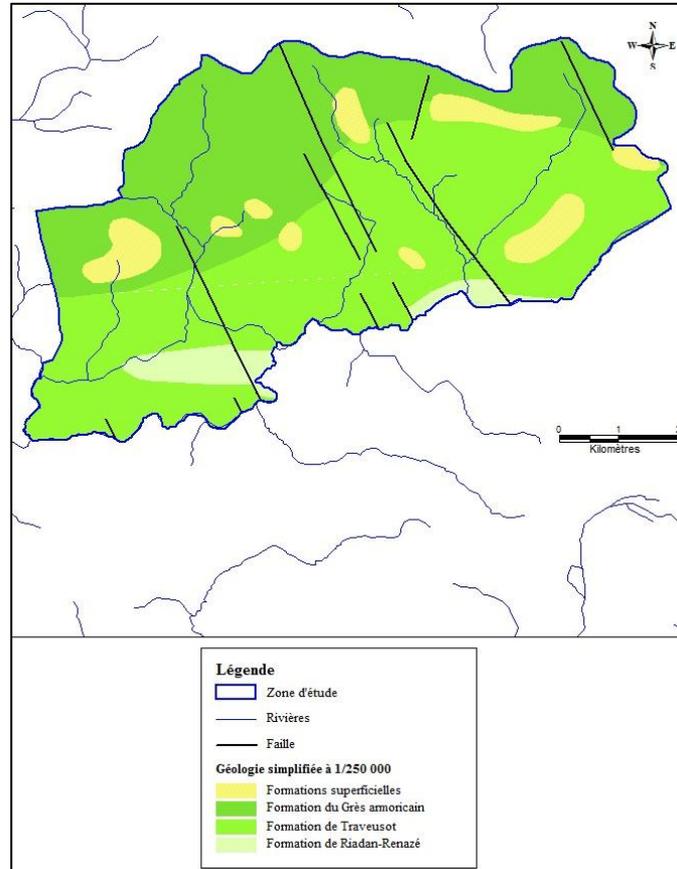


Illustration 5 - Schéma géologique à 1/250 000 du bassin de l'Aron

2.2.3. Hiérarchisation des aquifères de socle à partir des forages

Les points d'eau recensés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM autour du bassin de l'Aron sont localisés sur la carte de l'Annexe 1. 28 points d'eau sont localisés dans un rayon de 7 km autour du centre du bassin.

Une valorisation des données des forages (profondeur, débit, formation géologique) a été réalisée en cartographiant l'intérêt potentiel hydrogéologique des aquifères de socle. Les différentes formations géologiques de socle sont caractérisées et hiérarchisées par un indice global calculé en multipliant :

- le pourcentage de forages (de la formation) ayant fourni un débit instantané au moins égal à $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce critère peut être considéré comme une image des probabilités de succès ;
- et le débit moyen du quartile supérieur (moyenne des débits des 25 % « meilleurs forages »). Ce paramètre peut être représentatif de la perméabilité des axes de drainage souterrain.

Cette approche statistique a été menée sur les formations géologiques du bassin étudié, à deux niveaux d'échelles :

- autour du bassin de l'Aron,
- et sur l'étendue de la formation géologique à l'échelle de la Bretagne (résultats du projet SILURES Bretagne Année 4, rapport BRGM/RP-55001-FR).

L'illustration 6 montre les résultats de l'approche statistique. L'illustration 7 présente, en cartographiant les classes d'indice global, les résultats de l'approche statistique. Le mode de représentation des couleurs des formations est détaillé au niveau de la légende.

Formation géologique	Statistiques sur la formation géologique							
	Statistiques autour du bassin				Statistiques sur la région Bretagne			
	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global	Nombre de forages	% de forages > 10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile (m3/h)	Indice global
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	20	30.0	18.7	5.6				
Schistes d'Angers-Traveusot	4	/	/	/				
Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	2	/	/	/				
Formation du Grès armoricain					223	33.2	29.1	9.6
Formation de Traveusot					71	18.3	12.5	2.3
Formation de Riadan-Renazé					40	25.0	13.7	3.4
	Valeur retenue pour la cartographie de l'indice global de la formation géologique							

Illustration 6 - Résultats de l'approche statistique sur les formations géologiques du bassin de l'Aron

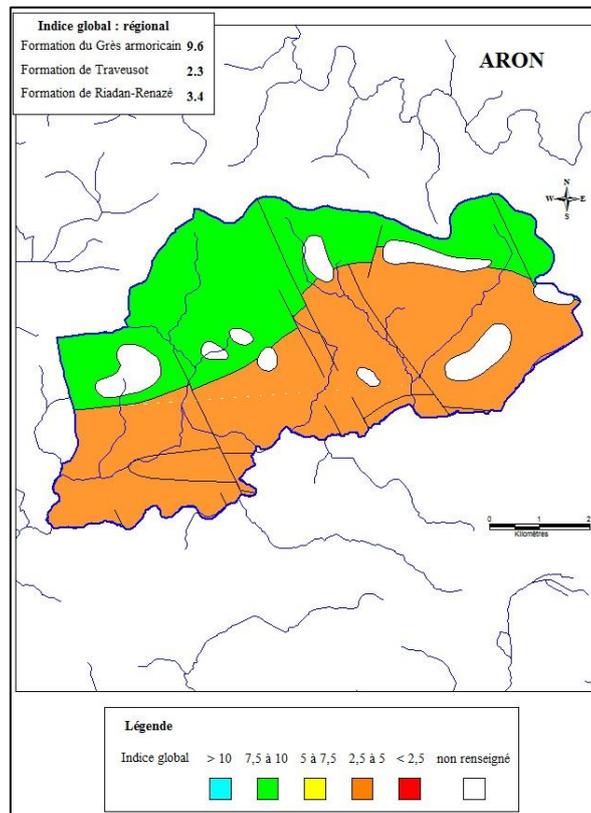


Illustration 7 - Intérêt hydrogéologique des aquifères de socle du bassin de l'Aron

Le bassin de l'Aron présente des formations plus perméables au Nord (Grès Armoricain, indice de 9.6 en haut de la classe 7.5 à 10) qu'au Sud (deux autres formations, indices de 2.3 et 3.4). La circulation des eaux souterraines doit donc être plus rapide au Nord du cours d'eau. En dehors de ce secteur, le renouvellement des réserves doit être plus lent (temps de réponse plus longs).

Les résultats obtenus localement dépendent d'un faible nombre de forage (≤ 20). La perméabilité locale de ces formations n'est donc pas appréciable avec cette méthode.

2.2.4. Contribution des eaux souterraines au débit de l'Aron

Une modélisation des écoulements mesurés dans l'Aron à la station hydrométrique du Grand-Fougeray (Bernardais, J7824010, superficie 118 km²) a été effectuée avec le logiciel GARDENIA[®], dans le cadre du projet SILURES Bretagne (BRGM/RP-56457-FR), afin d'évaluer la participation du ruissellement et des écoulements souterrains à l'écoulement global.

La modélisation du bassin versant a été réalisée avec un modèle à deux réservoirs profonds pour simuler les deux régimes d'écoulement existant dans les socles bretons : un écoulement dans les roches altérées et un écoulement plus profond dans le milieu fissuré.

L'illustration 8 localise la superposition du bassin étudié (en rouge) sur le bassin modélisé (en fond gris et contour vert) au droit de la station hydrométrique (en jaune).

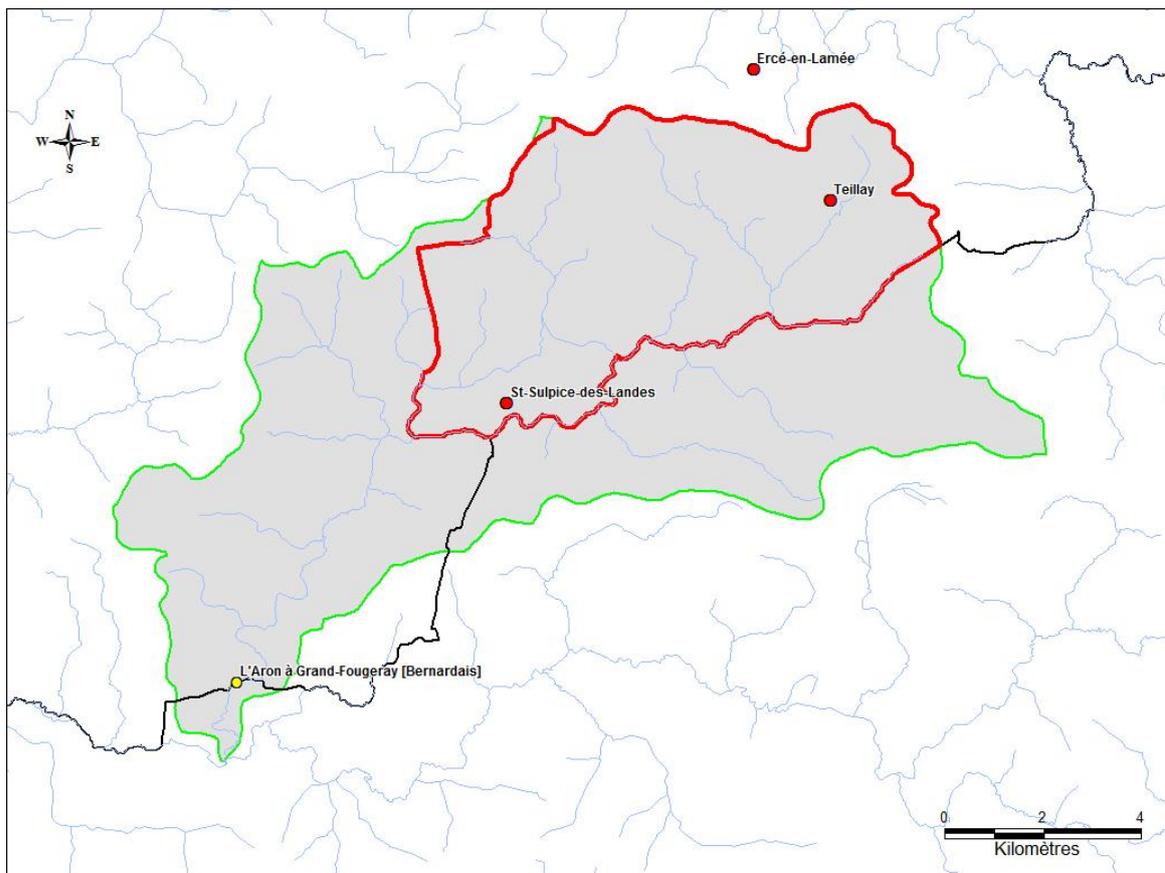


Illustration 8 - Localisation du bassin de l'Aron par rapport au bassin modélisé avec GARDENIA[®]

Le bassin de l'Aron étudié est donc la partie amont du bassin versant en rive droite de la rivière.

Le bassin modélisé est situé sur les mêmes formations géologiques que celles du bassin étudié. Les résultats de la modélisation sont donc transposables.

Compte-tenu de la disponibilité des données, la modélisation a été réalisée pour la période 1995-2003. L'illustration 9 rassemble les résultats de cette modélisation :

Pluie totale mm/an	Evapo- transpiration mm/an	Pluie efficace mm/an	Ecoulement au Grand-Fougeray [Bernardais]				
			Rapide		Lent		Bassin
			mm/an	%	mm/an	%	
832	565	267	137.5	51.5	129.5	48.5	Aron

Illustration 9 - Résultats de la modélisation GARDENIA® sur l'Aron

Les résultats de la modélisation indiquent que la lame d'eau écoulee à la station du Grand-Fougeray [Bernardais] est alimentée, en moyenne, par les eaux souterraines à hauteur de 48.5%.

3. Géométrie du bassin Tertiaire et examen de la faisabilité de l'exploitation des eaux souterraines

La 1^{ère} étape du projet a été menée selon les tâches suivantes :

- étude géophysique de terrain permettant de connaître la géométrie du bassin,
- estimation du volume d'eau souterraine présent dans le bassin,
- comparaison de ce volume à la pluie efficace qui s'infiltré annuellement,
- examen de la faisabilité d'une recherche en eau dans ce secteur.

3.1. RECONNAISSANCE GEOPHYSIQUE PAR PANNEAUX ELECTRIQUES

3.1.1. Objectif

La reconnaissance géophysique a consisté en la réalisation de 2 panneaux électriques en croix* (de 96 électrodes avec 5 m entre électrodes, soit 475 m pour chaque panneau) recoupant l'ensemble du bassin Tertiaire et ses bordures (cf. Illustration 10).

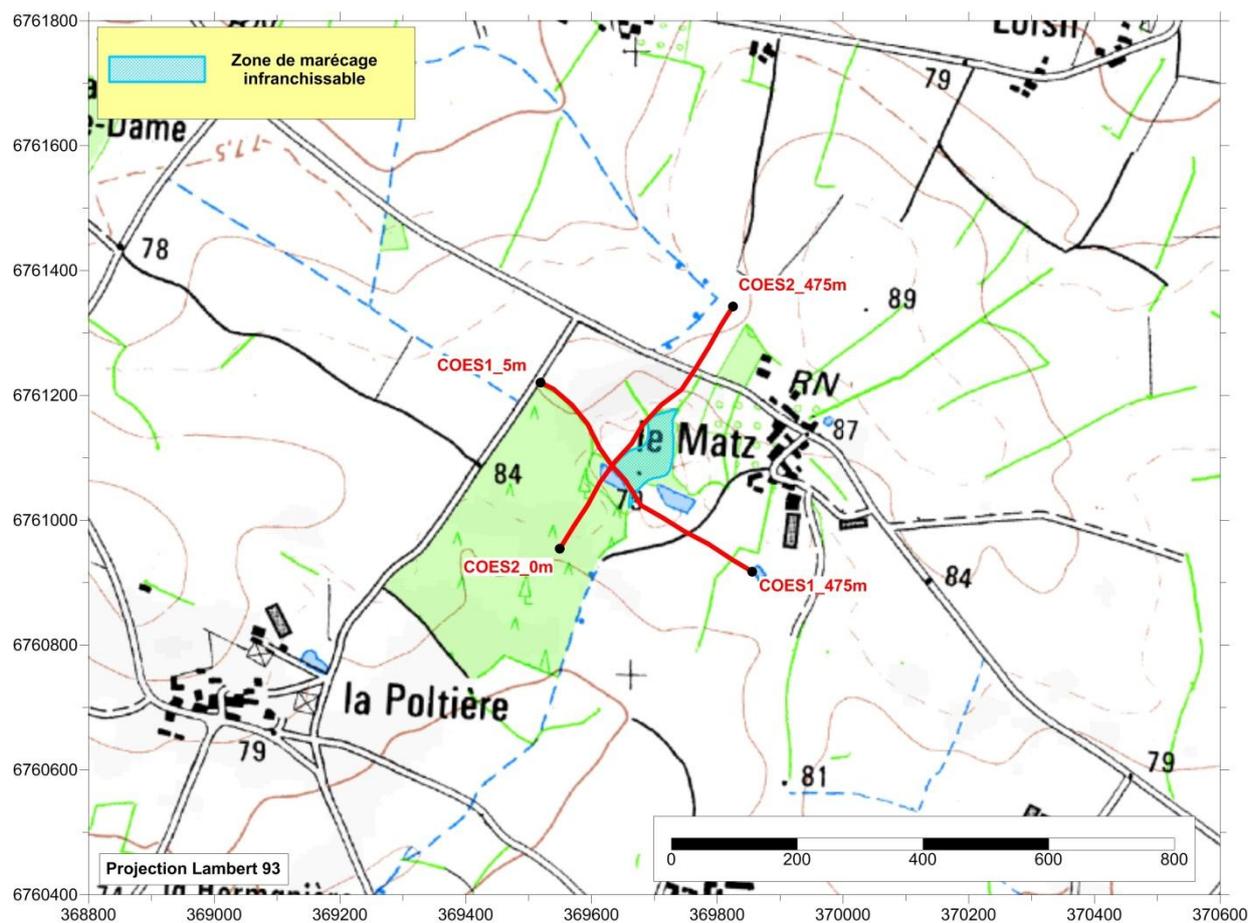


Illustration 10 - Localisation des panneaux électriques sur fond IGN à 1/25 000

(*) En raison de la présence d'un marécage infranchissable situé au Centre de la zone d'étude (cf. délimitation sur l'illustration 10), les droites des 2 profils ont dû être ajustées par rapport au positionnement prévisionnel.

L'objectif principal de la reconnaissance géophysique par panneaux électriques est de caractériser la distribution des résistivités électriques en profondeur sous les profils de mesure en vue d'imager les principales formations géologiques et en particulier les différents dépôts constituant le bassin tertiaire ainsi que les principales structures tectoniques (failles, couloir de fractures...) les affectants.

3.1.2. Acquisitions et traitements

Travaux réalisés

Suite à l'implantation prévisionnelle des panneaux électriques, le BRGM a formalisé avec le SIEFT un courrier avertissant le Maire de la commune de Coësmes des travaux à venir. Avant toute intervention sur le terrain, le BRGM a pris contact avec les propriétaires des parcelles concernés et a obtenu leurs autorisations.

Les mesures sur le terrain ont été réalisées du 02/12 au 03/12/2013 par F. Mathieu, géophysicien au BRGM à DRP/RAI. G. Guizouarn, technicien au BRGM à DGR/MIN, assistait le géophysicien pour la mise en place des dispositifs de mesures.

Les caractéristiques des panneaux électriques réalisés sont présentées dans l'illustration 11.

Au total 2 profils de 475 m de long ont été mesurés en 2 jours de terrain.

Profil	Date d'acquisition	Longueur (m)	Orientation	Configuration d'acquisition	Spacing (levels)	Nb mesures exploitables	Profondeur d'investigation max. atteinte (m)
COES1	03/12/2013	470	NW - SE	Dipôle-dipôle	5 m (9)	2365	70
				Wenner-Schlumberger	10 m (7)	1810	90
COES2	02/12/2013	475	SW - NE	Dipôle-dipôle	20 m (6)	2125	70
				Wenner-Schlumberger	30 m (6)	1672	90
					40 m (9)		

Illustration 11 - Caractéristiques des panneaux électriques réalisés

Configuration d'acquisition des panneaux électriques

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant et de potentiel en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant des avantages et des inconvénients, notamment en temps d'acquisition. La mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet, dans un contexte géologique complexe, de mieux appréhender la géométrie des différentes formations en présence.

Durant cette prospection, deux configurations d'acquisition ont été mises en œuvre lors de la réalisation des panneaux électriques : un dispositif dipôle-dipôle pour la résolution des terrains de surface ainsi qu'un dispositif Wenner-Schlumberger pour la profondeur.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et pour les discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux (coulées parallèles au profil, ravines ou crêtes parallèles au profil) que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre le rapport signal/bruit décroît rapidement et de ce fait la profondeur d'investigation est réduite.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80 m pour un dispositif de 475 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

Les principes de la méthode géophysique des panneaux électriques sont présentés en annexe 2.

Topographie

Les panneaux électriques ont été positionnés au GPS portable avec une mesure tous les 80 m en moyenne. La précision du positionnement varie de +/- 2m à +/- 5m en fonction de la couverture végétale.

L'altitude des stations a été interpolée à partir des courbes de niveau de la carte IGN au 1/25 000. Dans ce contexte de faibles variations altimétriques, la précision sur Z est de l'ordre du mètre.

Moyens mis en œuvre

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 6 flûtes de 16 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 5 mètres sur 475 m. L'énergie provenait d'une batterie externe. L'espacement inter-électrodes de 5 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 80 m. Le matériel utilisé comprend :

- 1 Syscal Pro
- 6 flûtes de 16 traces
- 96 électrodes
- 96 cordons
- 3 massettes
- 2 claies de portages
- 2 batteries de voiture 70 Ah
- 4 connecteurs de flûtes
- Câbles divers
- 1 GPS portable
- 2 véhicules

Traitement et inversion

Après filtrage des données de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré, celles-ci sont ensuite traitées avec le logiciel X2IPI (Bobachev Alexey, Moscow University) pour corriger les artéfacts dus aux à-coups de prise puis inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke & Barker 1996). Les profils de topographie sont inclus lors des inversions de chaque panneau électrique.

La section de résistivité « vraie » (3^{ème} image des figures présentées en annexe 2), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation géologique. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion ont été choisis (cf. annexe 3) de manière à optimiser la réponse du modèle.

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations des affleurements...).

3.1.3. Résultats et interprétations

Présentation des résultats

Les figures présentant les résultats des inversions des données de résistivité apparentes mesurées sur le terrain sont construites de la manière suivante :

- L'illustration montre le résultat de l'inversion des données acquises selon le dispositif dipôle-dipôle.
- Les horizons ou structures géo-électriques identifiés sont notés :
 - C pour conducteur ;
 - R pour résistant ;
 - D pour discontinuité (faille, zone de fractures, brusque changement de lithologie...) ;
 - Les chiffres 0, 1, 2 identifient des horizons différents et/ou sont en relation, si possible, avec la notion de superposition de différents terrains (0 étant le terrain de surface).

Résultats

Le schéma géo-électrique mis en évidence sur les 2 coupes de résistivité inversée COES1 (de direction NW-SE, cf. Illustration 12) et COES2 (de direction SW-NE, cf. Illustration 13) intégrerait de haut en bas les horizons décrits ci-dessous.

Un premier horizon de sub-surface dont la résistivité est comprise entre 30 et 100 ohm.m. L'épaisseur de cet horizon varie de 0 à un maximum de 20 m. La cuvette présentant cette épaisseur maximale de 20 m est centrée sur l'abscisse 350 m du panneau COES2 (au droit de la route d'accès au Matz) et sa largeur est d'environ 70 m. Cet horizon conducteur C0 correspondrait aux dépôts tertiaires signalés sur la carte géologique (cf. Illustration 3).

Panneau électrique : COES1 Coupe de résistivité inversée

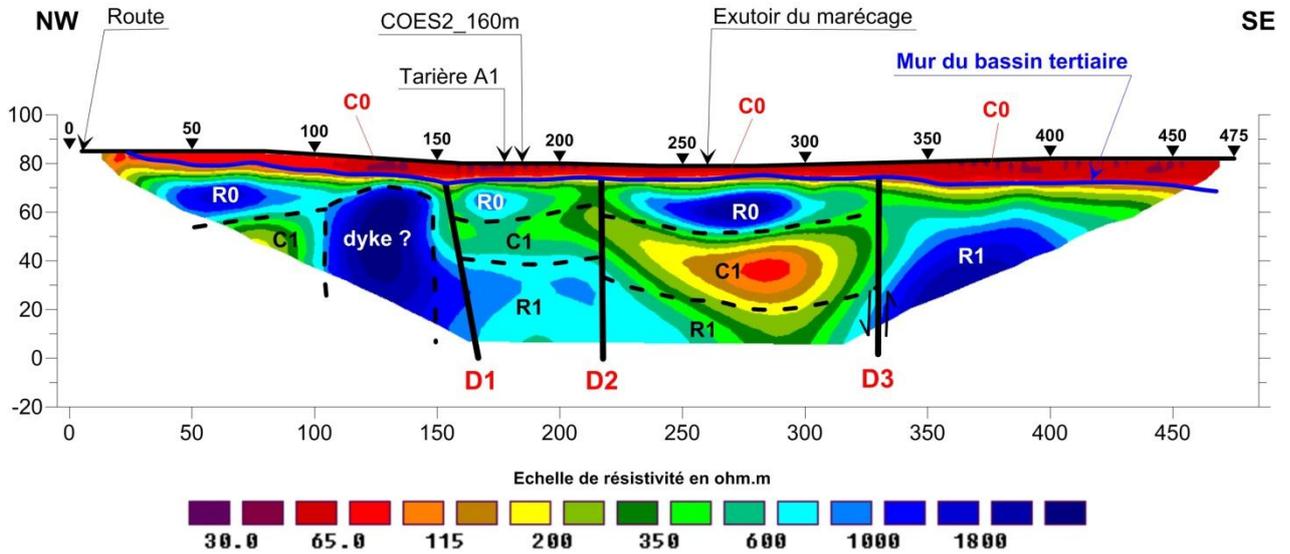


Illustration 12 - Panneau électrique COES1 – Coupe de résistivité inversée

Panneau électrique : COES2 Coupe de résistivité inversée

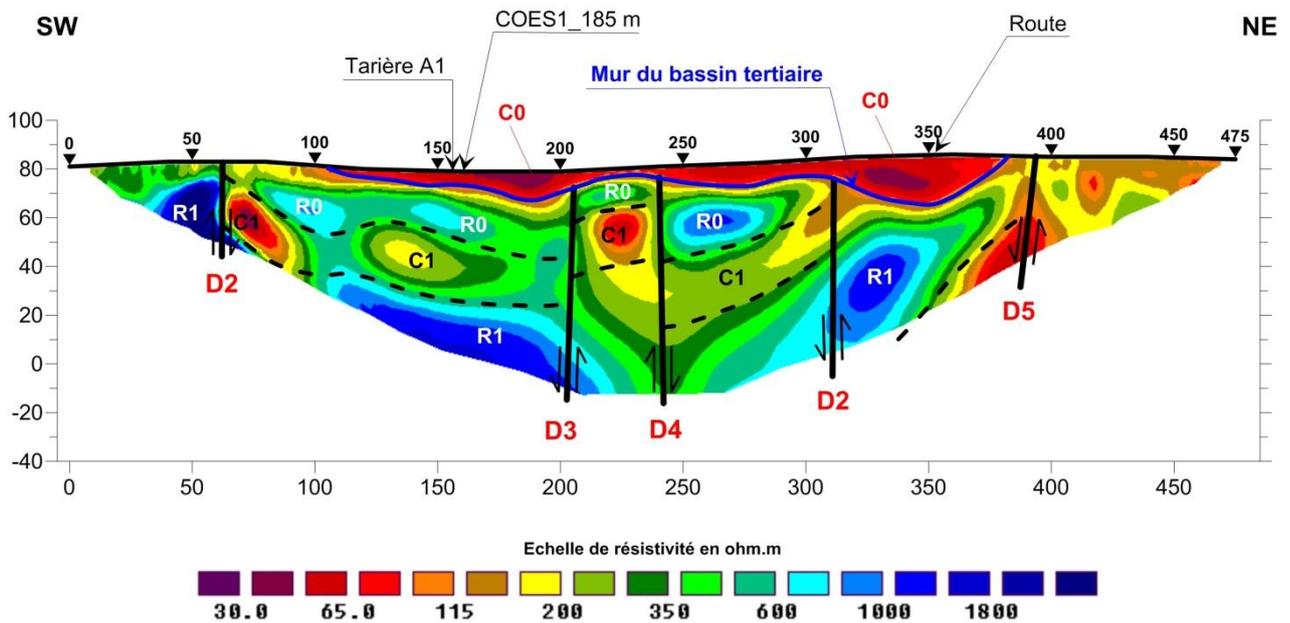


Illustration 13 - Panneau électrique COES2 – Coupe de résistivité inversée

D'après les informations géologiques disponibles (sondage à la tarière datant du lever de la carte géologique, et sondage à la tarière A1 réalisé dans le cadre de cette étude⁴ ; cf. coupe géologique en annexe 4 et localisation sur l'illustration 14) les différents dépôts sont quel que soit leur âge très argileux. Ceci explique le caractère très conducteur de l'horizon C0 et l'impossibilité de différencier les différents dépôts (Pliocène, Miocène, Oligocène ?) sur les coupes inversées (absence de contrastes de résistivité). Il est d'ailleurs probable que les argiles d'altération des formations de socle (schistes de Traveusot et grès du Châtellier), qui constituent le substratum de ce bassin tertiaire, soient également incluses dans l'horizon conducteur C0.

La carte géologique au 1/50 000 et le sondage à la tarière A1 montrent également que les matériaux sableux d'âge Pliocène (notés « pS », cf. chapitre 2.1.) ont dû être exploités et qu'ils ne sont plus aujourd'hui présents dans ce bassin Tertiaire.

Le mur de ces dépôts argileux appartenant au tertiaire serait à une cote moyenne de l'ordre de +75 m NGF ; cote estimée d'après les résultats du sondage à la tarière datant du lever de la carte géologique et du sondage à la tarière A1 réalisé dans le cadre de cette étude.

D'un point de vue cartographique, les limites d'extension de ce bassin tertiaire, ont pu être mises en évidence (cf. Illustration 14) :

- au niveau du panneau électrique COES2, la bordure SW du bassin se situe à l'abscisse 100 m et celle du NE à l'abscisse 380 m soit une largeur de 280 m ;
- au niveau du panneau électrique COES1, la limite NW correspondrait à l'abscisse 25 m. Vers le SE, la limite d'extension du bassin tertiaire n'aurait pas été atteinte.

Les limites d'extension de ce bassin tertiaire mises en évidence en géophysique coïncident parfaitement avec celles de la carte géologique sauf en direction du SE. Dans cette direction, l'extension du bassin tertiaire serait plus importante que sur la carte géologique et semble contrôlée par la structurale (couloir de fracturation entre les failles présumées D3 et D5).

Un deuxième horizon résistant R0 dont la résistivité est supérieure à 500 ohm.m et dont l'épaisseur est de l'ordre de 25 m est observé. Cet horizon, qui est sub-horizontale, présente des décrochements verticaux significatifs qui peuvent atteindre des valeurs de 15 à 20 m et qui caractériseraient la présence de failles.

Cet horizon correspondrait au faciès sain des grès appartenant à la Formation du Châtellier.

Un troisième horizon conducteur C1 dont la résistivité est comprise entre 75 et 500 ohm.m est visible. Son épaisseur est de l'ordre de 25 à 30 m et il présente une morphologie relativement identique à celle de l'horizon sus-jacent. L'interprétation en termes de géologie conduit à penser qu'il pourrait s'agir du faciès d'altération argileux des schistes de la Formation de Traveusot.

Dans la partie centrale des 2 coupes de résistivité, le mur de cet horizon conducteur est à une profondeur de l'ordre de 60 m alors que sur les bordures, il serait absent.

⁴ Les conditions de réalisation de ce sondage à la tarière A1 sont décrites au chapitre 4.2. de ce rapport.

Un substratum géophysique R1 résistant est visible en bas des deux coupes. Cet horizon géo-électrique dont la résistivité est supérieure à 500 ohm.m correspondrait au faciès sain de schistes de Traveusot.

D'un point de vue structurale (cf. Illustration 14), ces deux panneaux électriques mettent en évidence pas moins de 5 discontinuités D1, D2, D3, D4 et D5 qui peuvent être assimilés à des failles (décrochements verticaux des horizons géo-électriques). A partir de ces éléments, une ébauche de schéma structurale a été tentée. Avec seulement 2 panneaux électriques en croix, ce schéma n'est pas univoque mais sa construction tient tout de même compte des directions régionales des failles dans le secteur d'étude.

Ce schéma structural montre donc la présence de deux familles de failles, l'une de direction NW-SE (D3, D4 et D5) en parfaite corrélation avec une faille signalée sur la carte géologique (D3) et l'autre de direction NE-SW (D1-D2) appartenant au système conjugué.

Les failles D3, D4 et D5 délimiteraient une structure en graben d'orientation NW-SE qui contrôlerait en partie la mise en place du bassin tertiaire.

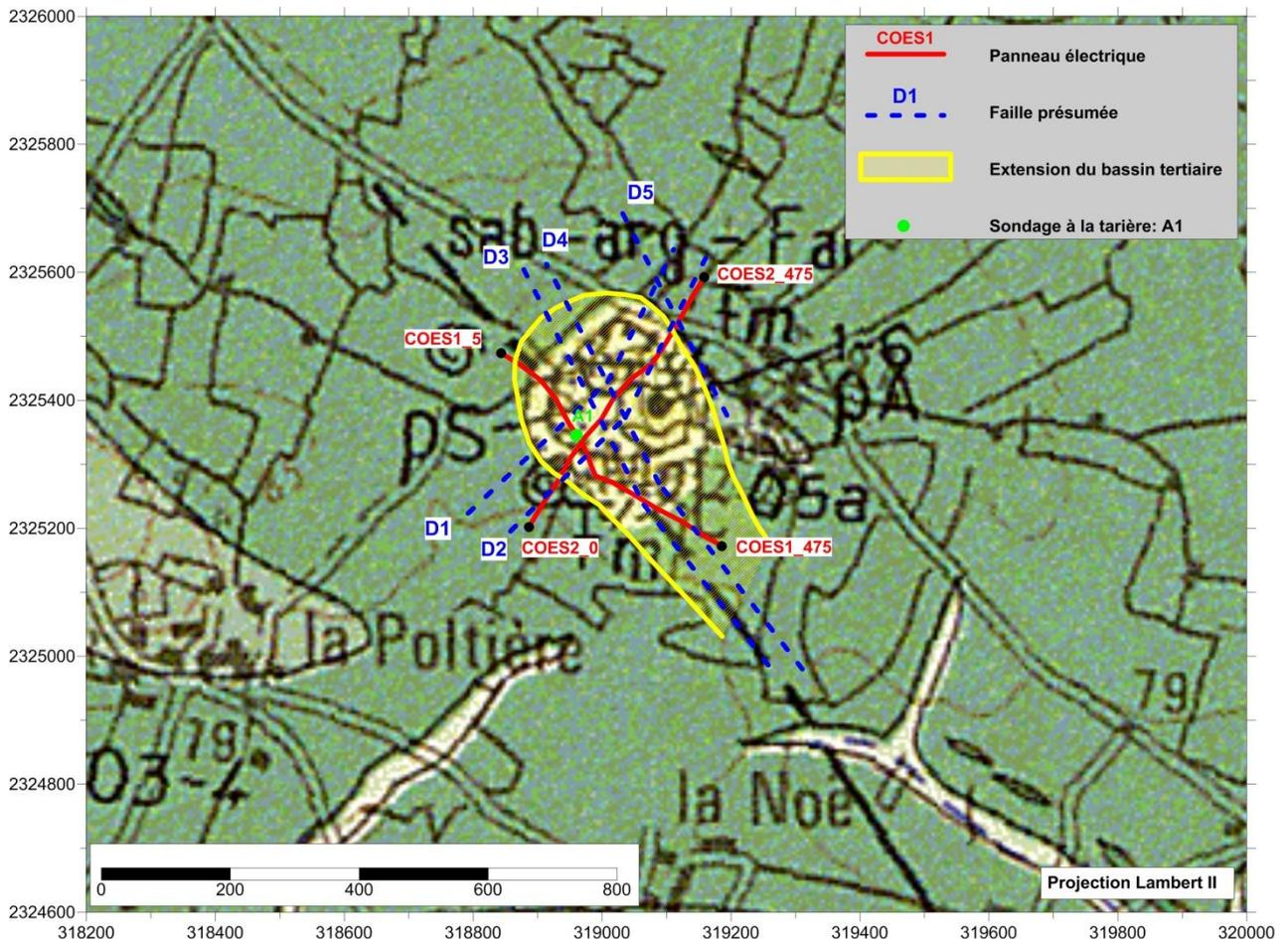


Illustration 14 - Extension du bassin tertiaire du Matz et ébauche de schéma structural

3.2. ESTIMATION DU VOLUME D'EAU SOUTERRAINE PRESENT DANS LE BASSIN

Pour réussir à estimer le volume d'eau souterraine présent dans le bassin, il faut passer par les étapes préalables suivantes :

- connaissance de la géométrie du bassin pour calculer le volume des formations tertiaires ;
- approximation du coefficient d'emmagasinement de ces formations tertiaires (caractérise la fonction réservoir/stockage de l'aquifère) pour estimer le volume d'eau souterraine maximal présent dans le bassin ;
- hypothèse sur la profondeur moyenne du niveau de la nappe pour connaître le volume de roches mouillées et ainsi aboutir au volume d'eau souterraine recherché.

3.2.1. Géométrie du bassin et volume des formations tertiaires

Compte-tenu de la géométrie complexe du bassin Tertiaire du Matz (extension supposée vers le Sud-Est, épaisseur variable de 0 à 20 m, recoupement par des failles ; cf. Illustration 13) et de façon à simplifier le calcul des volumes, la structure sera assimilée à un cône de révolution tronqué et retourné (cf. Illustration 15).

C'est un cône auquel on a enlevé la partie supérieure coupée par un plan parallèle à la base (cf. Illustration 15). Il possède une face courbe et deux faces circulaires : la grande base de rayon « R » correspondra à la surface d'affleurement du bassin et la petite base de rayon « r » sera le toit du substratum des formations de socle (qui est aussi la base des formations tertiaires). La hauteur du cône de révolution tronqué est « h ».

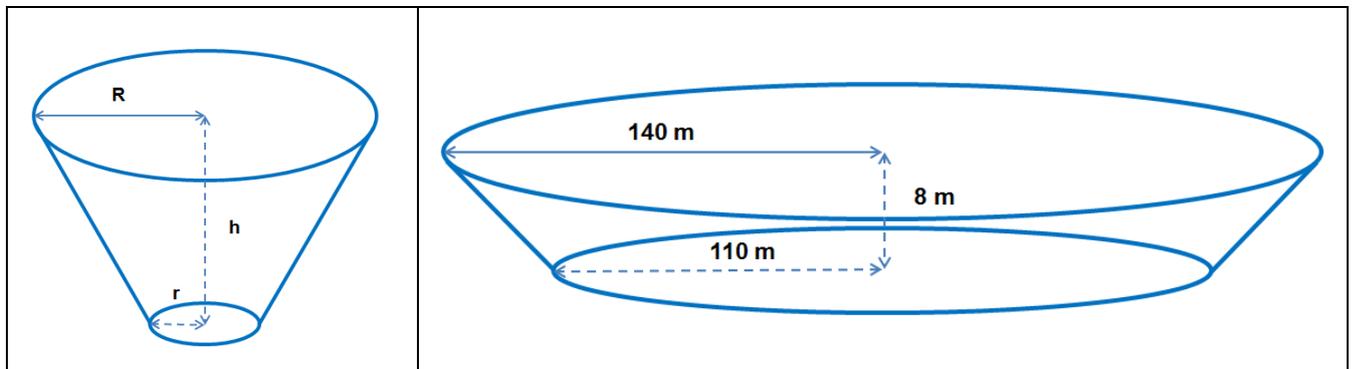


Illustration 15 - Cône de révolution tronqué et retourné
(à gauche : figure théorique, à droite : géométrie simplifiée du bassin du Matz)

De façon à s'approcher au plus près de la géométrie complexe du bassin Tertiaire du Matz, les dimensions suivantes seront retenues :

- $R=140$ m : rayon de la surface d'affleurement du bassin qui correspond à un cercle de diamètre 280 m selon les résultats du panneau électrique COES2 (cf. Illustration 13) ;
- $h=8$ m : hauteur moyenne du bassin d'après les coupes des 2 panneaux électriques (profondeur du Tertiaire entre 0 et 20 m ; cf. Illustration 13 et Illustration 14) ;
- $R=110$ m : rayon moyen de la base du bassin à la côte 75 m NGF (côte moyenne du mur des dépôts argileux appartenant au tertiaire, cf. chapitre 3.1.3.), estimé compte-tenu des pentes des bordures du bassin montrés par les coupes des 2 panneaux électriques (la

base du bassin correspond à un cercle de diamètre d'environ 210 m sur la coupe COES1 et d'environ 230 m sur la coupe COES2).

La formule mathématique du volume d'un cône de révolution tronqué est notée ci-dessous :

$$V = (h \times \Pi/3) \times (R^2 + r^2 + R \times r)$$

En utilisant cette formule où $R = 140$ m, $r = 110$ m et $h = 8$ m, le volume des formations tertiaires est égal à : $394\,584.04 \text{ m}^3$.

3.2.2. Estimation du volume d'eau souterraine

Pour estimer le volume d'eau souterraine maximal présent dans le bassin, il faut connaître la porosité des formations tertiaires.

Celle-ci a été estimée suite aux résultats des pompages d'essai menés en 1972 sur les forages de la Groussinière (03538X0005/P et 03538X0011/S) dans un contexte géologique Tertiaire (sables fins plus ou moins argileux Pliocène). L'interprétation des pompages permet d'approcher un coefficient d'emménagement moyen de 2.7 % (valeurs variant de 1 à 6 % calculée sur 5 piézomètres ; cf. rapport 72-SGN-175 BPL).

Comme la nappe est libre, le coefficient d'emménagement est égal à la porosité efficace de l'aquifère (rapport volume d'eau libre sur volume des vides).

En appliquant ce pourcentage au volume des formations tertiaires, on trouve un volume d'eau souterraine maximal présent dans le bassin égal à : $10\,653.77 \text{ m}^3$.

Suite à la réalisation du sondage à la tarière A1 (cf. annexe 4), un niveau piézométrique a été mesuré en décembre 2013 à 0.7 m de profondeur. La nappe était donc située à la cote 79 m NGF. Ceci indique qu'en période de hautes eaux le bassin est rempli d'eau souterraine sur 4 de ses 8 m de hauteur.

Le volume des formations tertiaires mouillées (reprise du calcul du volume du cône de révolution tronqué avec $h=4$ m) est alors égal à : $197\,292.02 \text{ m}^3$

Le volume d'eau souterraine disponible (sous le niveau de nappe en hautes eaux) est égal à : environ $5\,327 \text{ m}^3$.

En période d'étiage, le niveau de la nappe descendra vraisemblablement de quelques mètres et donc le volume d'eau souterraine disponible sera moindre.

3.3. EXAMEN DE LA FAISABILITE D'UNE RECHERCHE EN EAU

Avant de parler d'exploitation d'une ressource, il faut s'interroger sur son renouvellement par l'infiltration des eaux de pluie.

Les données pluviométriques journalières de Météo-France à la station de « LA NOE BLANCHE (35202001) » donnent sur la période 1994-2012 (18 ans) une pluviométrie moyenne égale à 800 mm/an.

Les résultats issus de la modélisation Gardénia sur le bassin versant de l'Aron à l'amont de la station hydrologique du Grand-Fougeray [Bernardais] (cf. chapitre 2.2.4.) montrent qu'environ 32% de la pluie est efficace et que 48.5% de cette pluie efficace s'infiltré dans le sous-sol. Ceci donnerait une pluie efficace de 256 mm/an et une infiltration de 124 mm/an.

En tenant compte de la surface d'infiltration du bassin Tertiaire (cercle d'un rayon de 140 m), le volume d'eau infiltré annuellement serait égal à : environ 7 635 m³/an.

Ce volume annuel est donc suffisant pour remplir la totalité du volume d'eau disponible dans le bassin (5 327 m³ en hautes eaux).

Le volume d'eau souterraine disponible dans le bassin Tertiaire du Matz pourrait être pompé en exploitant un forage captant les formations tertiaires. Le débit pompé dans ce forage amènerait à une exploitation d'un débit égal à :

0.61 m³/h 24h/24 ou bien 1.22 m³/h 12h/24.

On peut signaler que ces débits sont très faibles et très inférieurs aux débits connus dans les formations tertiaires d'Ille-et-Vilaine (plus de 50 m³/h ; cf. rapport BRGM/RP-60977-FR).

L'étude du bassin Tertiaire a donc permis d'évaluer sa géométrie et la faisabilité de l'exploitation des eaux souterraines qu'il contient. Compte-tenu de sa faible dimension (extension et profondeur), du faible volume d'eau souterraine disponible (environ 5 327 m³ en hautes eaux) et de la nature argileuse de son remplissage (faible perméabilité), il apparaît que l'exploitation du bassin serait très peu rentable.

4. Reconnaissances de terrain sur le bassin versant de l'Aron

4.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE DU BASSIN DE L'ARON ET CARTOGRAPHIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

4.1.1. Géologie du sous-bassement du bassin de l'Aron

Le bassin de l'Aron est contenu sur la carte géologique à 1/50 000 de Bain-de-Bretagne (n°388). Il est situé au-dessus de roches sédimentaires d'âge Paléozoïque. Ces séries sédimentaires se retrouvent à l'échelle de tout le Massif Armoricain, depuis la presqu'île de Crozon dans le Finistère, en passant par le centre de la Bretagne, à la Normandie (Illustration 16, Ballèvre et al ; 2013).

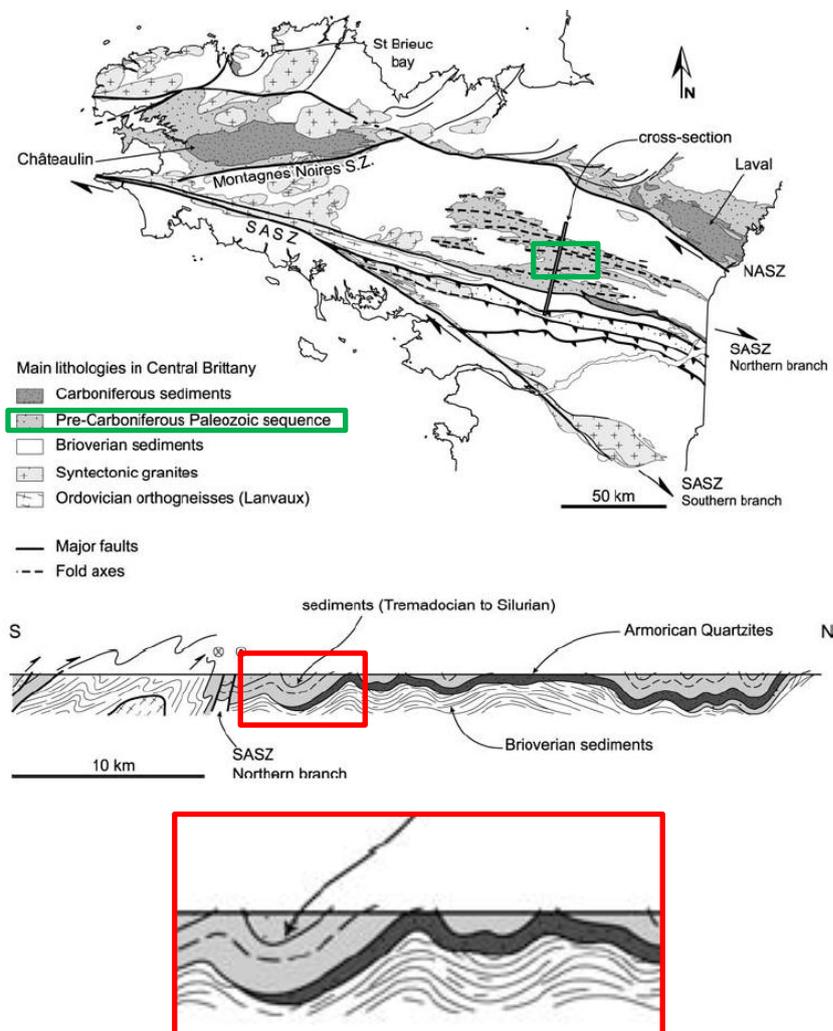


Illustration 16 - Géologie simplifiée du centre Bretagne et coupe géologique (Le Corre, 1977, dans Gumiaux, 2003) ; en rouge, localisation et position structurale du bassin de l'Aron ; en vert, les formations géologiques du Paléozoïque.

L'interprétation actuelle de ces dépôts sédimentaires, est qu'ils constituent des dépôts en discordance sur les schistes du Briovérien sous-jacent (n°1 sur l'illustration 19), qu'ils ont été déformés au cours de la formation de la chaîne de montagne cadomienne, et qu'ils se sont déposés à la faveur d'une période d'extension (étirement de la croûte terrestre : rifting), ayant formé des bassins en héli-grabens ou des blocs basculés (Ballard et al., 1986 ; Brun et al., 1991 ; Dabard et Simon, 2011).

Les premières roches à se déposer, sont celles de la **Formation de Pont-Réan**, caractérisée par sa couleur rouge pourpre. En fonction de la proximité de la source de sédiments, la Formation de Pont-Réan est composée soit par un conglomérat de base, soit par des grès, soit encore par une alternance de pélites et argilites. L'ensemble est le plus souvent de couleur rouge-pourpre, mais proche du contact avec le Briovérien, une alternance de rouge pourpre et vert olive est possible. Cette Formation de Pont-Réan n'est pas présente partout comme c'est le cas ici dans le secteur du bassin de l'Aron.

Directement au-dessus des schistes du Briovérien, présents sur la carte au Nord-Ouest (en l'absence de cette Formation de Pont-Réan), la sédimentation s'homogénéise avec la venue de la **Formation du Grès Armoricaïn**. Celle-ci est aussi composée d'un faciès très caractéristique de grès de couleur blanche-beige, mature, contenant de nombreuses traces de fossiles tels que des terriers horizontaux comme verticaux. De la base au sommet la Formation du Grès Armoricaïn est composée de trois membres (Illustration 16) :

- Le *membre inférieur* composé de quartzites blancs ou beiges, massifs, séparés par des interlits argileux, et de niveaux de grès à siltites riches en micas (les psammites) et contenant des niveaux de minerai de fer. Ces niveaux ont donné lieu à des exploitations de fer. L'épaisseur donnée par la carte géologique est de 200 à 300 m pour ce membre. Un rapide calcul fait à partir des éléments présents sur la carte géologique (épaisseur apparente et pendage des couches) donne des épaisseurs bien supérieures (n°2a sur l'illustration 19) ;
- Le *membre intermédiaire* ou schistes intermédiaires, correspond à une alternance de niveaux gréseux et de niveaux argileux micacés, bariolés à grésocalcaireux. Les grès sont des psammites c'est-à-dire des grès riches en micas. L'épaisseur de ce membre donnée par la carte géologique est de 80 à 120 m (n°2b sur l'illustration 19) ;
- La série de la Formation du Grès Armoricaïn, se termine par des quartzites fins à très fins, quartz-arénites, et de psammites en petits bancs blancs à interlits argileux, qui forment le *membre supérieur*. Des microconglomérats, contenant des niveaux à zircon-rutile sont observables dans ce membre dont l'épaisseur est estimée à 80 à 120 m (n°2c sur l'illustration 19).

Sur le bassin de l'Aron, la Formation du Grès Armoricaïn arme les collines qui le bordent au Nord, avec une altitude qui flirte avec les 100 m NGF. Comme souvent en Bretagne, cette formation géologique est en relief positif (surface correspondant à un profil d'altération). La rupture de pente au Sud de ces collines, correspond au contact stratigraphique avec la **Formation de Traveusot**.

Au-dessus de la Formation du Grès Armoricaïn, la sédimentation paléozoïque se poursuit par une sédimentation de matériel détritique plus fin, caractérisée par la Formation de Traveusot, composée de « pélites et siltites » (sables fins compactés), riches en micas, gris-bleu à sombres et contenant du quartz, de la chlorite et de la séricite, ayant une structure sub-ardoisière prononcée. Cette formation est aussi connue sous le nom de « schistes d'Angers » ou « schistes à calymènes », par ses propriétés mécaniques à fournir des ardoises de grande

qualité. D'âge Lanvirnien à Caradocien inf. (450 ma), son épaisseur d'après la notice de la carte géologique est de 400 à 500 m (n°3 sur l'illustration 19).

La Formation de Traveusot correspond sur le bassin, à la partie située entre la rupture de pente (citée ci-dessus) et approximativement la rivière de l'Aron.

Au-dessus des schistes d'Angers-Traveusot, la **Formation du Châtellier** est composée de grès verts, ici aussi micacés, chlorito-feldspathiques et des quartzites blancs micacés à interlits d'argiles sombres. L'âge de cette formation est Caradocien inf. (448 Ma) et l'épaisseur donnée par la carte géologique est de 70 à 110 m (n°4 sur l'illustration 19). Cette formation géologique forme au niveau du bassin de l'Aron, une indentation au Sud du Bassin dont Saint-Sulpice-des-Landes est à la terminaison. Cette formation est légèrement en relief positif par rapport aux schistes d'Angers, conséquence de la résistance des grès à l'érosion.

Enfin, la série paléozoïque du bassin de l'Aron se termine par la **Formation de Riadan-Renazé**, constituée de schistes siltiteux, micacés et chloriteux à niveaux de grès plus ou moins calcaireux. Elle est aussi connue sous le nom de « schistes à Trinucleus », et datée du Caradocien sup. à Ashgill (440 – 435 Ma). L'épaisseur de cette formation d'après la carte géologique est de 200 à 280 m (n°5 sur l'illustration 19).

L'illustration 17, synthétise cet empilement stratigraphie paléozoïque de Bretagne centrale, et l'encadré en rouge indique les roches qui concernent le bassin de l'Aron.

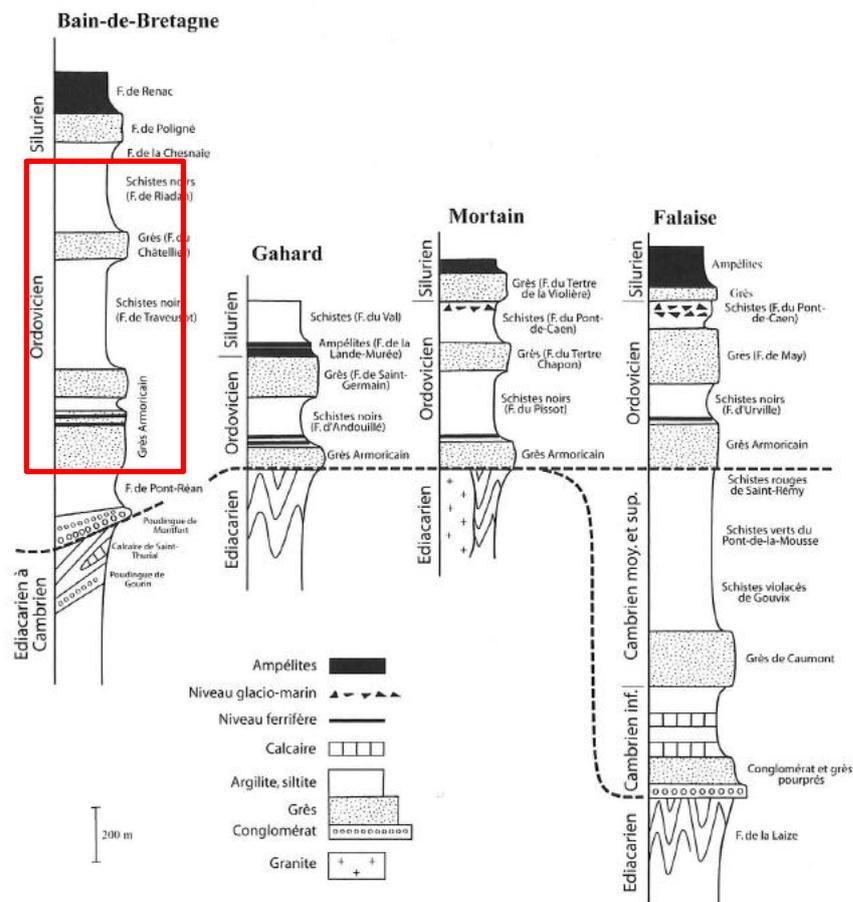


Illustration 17 - Successions sédimentaires du Paléozoïque Inférieur en Bretagne et en Normandie (Ballèvre et al., 2013), en rouge celles présentes sur le bassin de l'Aron.

4.1.2. Géologie des formations superficielles

Si l'histoire ancienne entre 700 et 300 Ma du Massif Armoricaïn est une histoire plutôt marine, contenant l'ouverture et la fermeture d'océans, accompagnées de magmatismes et sédimentations abondants, son histoire récente (entre 65 et 45 Ma) est plutôt continentale.

A la fin du Crétacé supérieur ou à l'Eocène inférieur (entre 65 et 50 Ma), les roches du Massif Armoricaïn sous des climats chauds et humides (Durand, 1960 ; Estéoule-Choux, 1967 ; Ollivier-Pierre, 1980) vont subir une altération profonde, entraînant une transformation *in situ* des roches en altérites et un développement de véritables profils latéritiques à kaolinite.

Il est fait mention sur la carte géologique à 1/50 000 de Bain-de-Bretagne (n°388), de la présence d'altérites kaoliniques (n°6 sur l'illustration 19), ferruginisées quand l'altération a opéré sur des faciès gréseux, et peu ferruginisées sur les autres formations géologiques. Lorsqu'elles sont ferruginisées, il est possible d'observer des cuirasses ferrugineuses très dures, localement exploitées par de nombreuses carrières de fer.

L'autre formation géologique présente sur le bassin de l'Aron, est décrite comme des épandages ou colluvions de dalles ferruginisées, indurées, et dont l'âge proposée est Eocène (n°7 sur l'illustration 19). Ces dalles indurées sont des blocs très importants de sables grossiers ferruginisés (micro-conglomératiques) et de grès ferruginisés à grains anguleux. Il est décrit à partir de la matrice de ces dalles, plusieurs épisodes de silicification et de ferruginisation (Illustration 18).

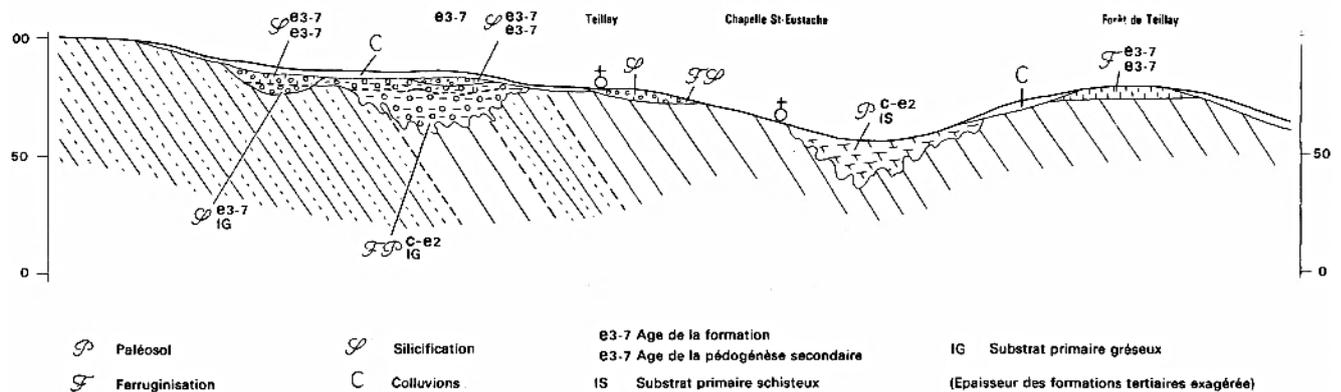


Illustration 18 - Répartition des faciès tertiaires au voisinage de Teillay (notice de la carte géologique Bain-de-Bretagne (n°388))

Enfin, beurrant les versants et alimentant les alluvions des cours d'eau, l'ensemble de ces formations superficielles, est redistribué sur les pentes des versants et au niveau des lits des cours d'eau, et constitue les formations les plus récentes de la carte (d'âge Quaternaire, en gris sur l'illustration 19).

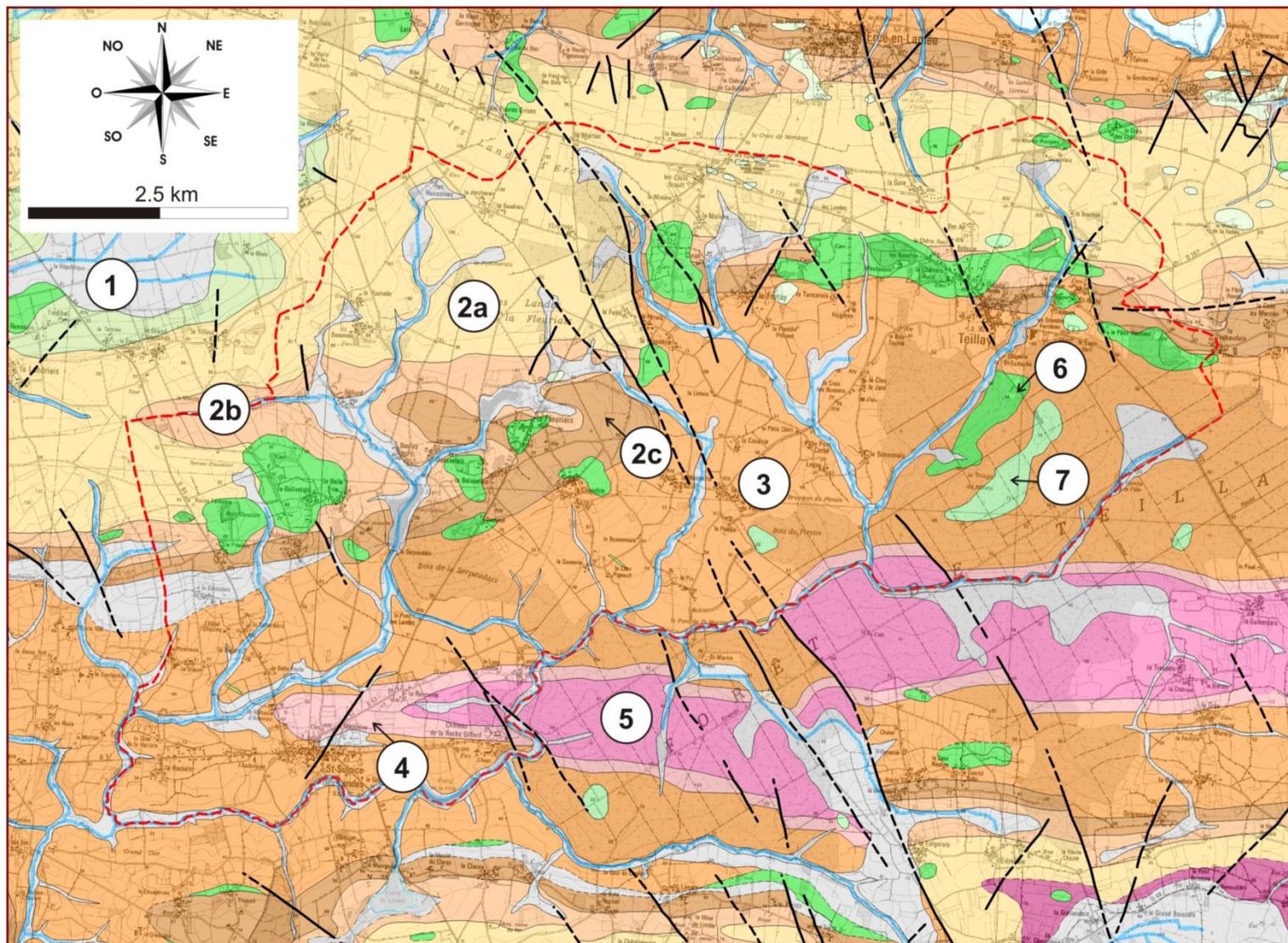


Illustration 19 - Extrait des cartes géologiques harmonisées à 1/50 000 des départements d'Ille-et-Vilaine et de Loire-Atlantique (légèrement modifiées, BRGM)

4.1.3. Cadre structural

Les plis

Les roches du Briovérien (n°1 sur l'illustration 19) et les roches paléozoïques (n°2 à 5 sur l'illustration 19), ont subi une déformation dite « plicative » (formation de plis), pendant la formation de la chaîne cadomienne pour les premières roches et hercynienne pour les secondes.

Deux évènements pourraient être présents.

Un évènement observable dans les schistes du Briovérien, donnant des directions de plis N065/075 E et un évènement observable dans les roches du Paléozoïque, donnant des directions de plis N100/110 E.

La Formation du Grès Armoricaïn présente sur le Nord du bassin de l'Aron, en position altimétrique haute (100 m NGF), correspond à la charnière anticlinale d'un pli régional, correspondant à l'évènement N100/110 E. A l'inverse le Sud du bassin où coule l'Aron, correspond à la charnière inverse dite « synclinale ». La Formation du Grès Armoricaïn, et notamment le membre inférieur, par le fait qu'elle est composée de niveaux de grès épais, compétents, génère des plis dit « cylindriques » de grande longueur d'ondes alors que les deux autres membres intermédiaire et supérieur et les séries qui leur sont superposées, génèrent des plis de plus petites longueurs d'ondes (Illustration 20).

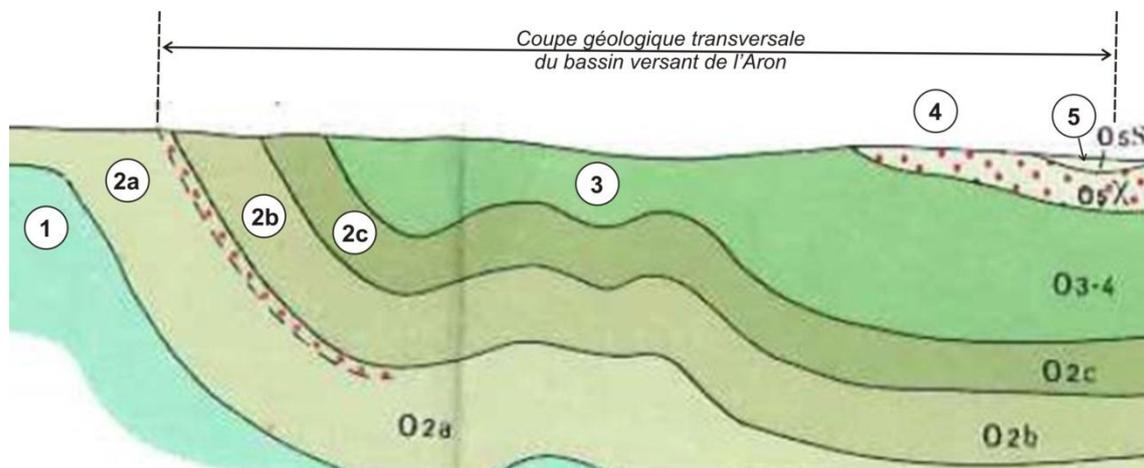


Illustration 20 - Coupe géologique transversale Nord-Sud du bassin de l'Aron (le Nord est à gauche de la coupe et le Sud à droite) extrait de la carte géologique de Bain-de-Bretagne (n°388), les numéros correspondent aux descriptions des roches dans le texte ci-dessus.

Le canevas structural du bassin de l'Aron montre ainsi une alternance d'axes de plis anticlinaux et synclinaux N100/110, qui peuvent être résumés par la figure ci-dessous (Illustration 21).

Les axes des plis anticlinaux sont soulignés par des traits bleus, interrompus de croix (x) alors que les axes des plis synclinaux sont soulignés par des traits bleus, interrompus de « plus » (+).

Cette analyse structurale pourra être superposée à l'évaluation de la ressource en eau souterraine du bassin de l'Aron, et permettra de superposer le bassin versant topographique de l'Aron et celui hydrogéologique.

La fracturation

Enfin, l'ensemble de ces plis sont affectés par une fracturation avec une orientation dominante N 150-160° E, dont les failles ont un jeu cartographique décrochant dextre. Elles sont accompagnées de failles conjuguées de moindre importance, mais à rejet senestre, d'orientation N 20-30° E (traits noirs épais sur l'illustration 21).

Les investigations de terrain ont confirmé la présence de ces structures et certaines ont pu être ajoutées à ce canevas structural (traits en bleu épais sur l'illustration 21).

Clairement, ces structures affectent les plis N100/110, qu'elles décalent et facilitent probablement les circulations hydrauliques souterraines.

L'histoire géologique de ces fractures montre qu'elle pourrait avoir subi **4 à 5** événements tectoniques : **(1)** des dykes de petites tailles, hypovolcaniques et doléritiques, de direction moyenne N 130-140° E, soulignent l'existence une période d'extension post-Ordovicien supérieur à post-Silurien inférieur ; **(2)** des observations en mer, sur les marges continentales armoricaines, font que J.P. Lefort (1973) propose un âge permo-triasique des premières déformations N150E ; mais plus clairement c'est au Tertiaire, que ces failles vont être réutilisées, provoquant l'individualisation de bassins Éocène moyen **(3)** ; Ces bassins éocènes auraient été repris par un épisode de compression Nord-Sud post-paléogène ; **(4)** avant qu'enfin, un nouvel épisode à jeu vertical ne survienne à l'Oligocène.

Pour le période paléogène de ces failles, Gros et Limasset (1984) proposent 4 épisodes tectoniques distincts : **(1)** au Crétacé supérieur à l'Éocène moyen à supérieur, compression Nord-Sud (correspondant à la phase pyrénéenne) avec rejeu des failles tardi-hercyniennes décrochantes en failles inverses ; **(2)** à l'Éocène supérieur - Oligocène, une distension Est-Ouest et formation de grabens NNW-SSE par rejeu en faille normale des fractures tardihercyniennes ; **(3)** au Miocène, distension Est-Ouest (?) avec grabens Nord-Sud ; **(4)** et enfin, au Plio-Quaternaire, une compression NNW-ESE à NW-SE, avec jeu en failles normales des accidents parallèles à la compression et formation de grabens Nord-Sud.

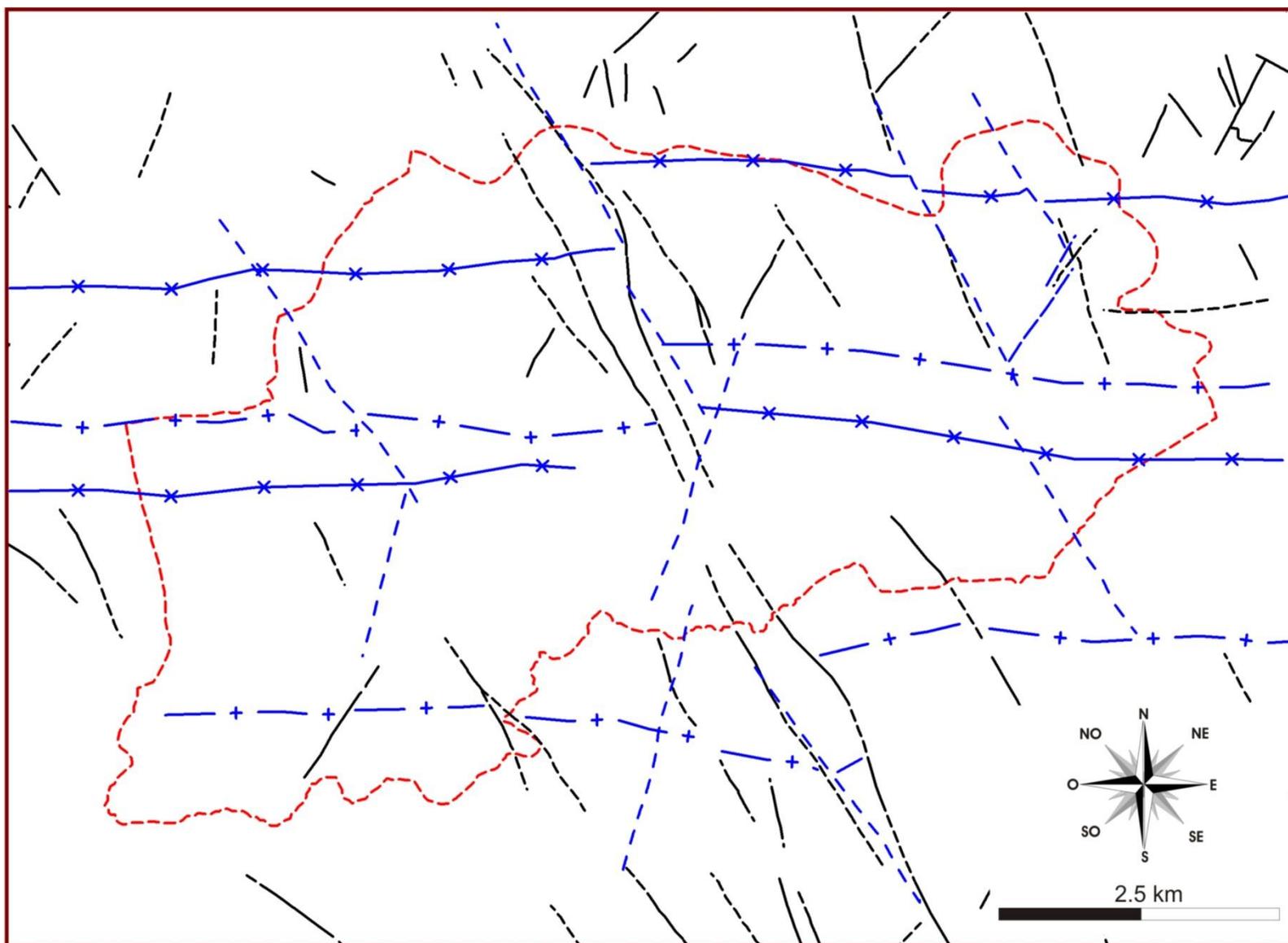


Illustration 21 - Carte structurale interprétative du bassin de l'Aron, déduite d'observations de terrain et de la carte de l'illustration 4.

4.1.4. L'altération des roches

Des développements récents d'amélioration de la connaissance des altérites sur les massifs anciens au BRGM ont permis de proposer une mise en carte de ces formations géologiques essentielles pour l'évaluation de la ressource en eau des bassins versants (Wyns, 1998 ; Mougin et al., 2008). A partir de l'organisation tripartite des altérites (décrite ci-dessous), une carte de présence/absence des altérites (limite entre les altérites meubles et dures) peut être établie.

Les reconnaissances de terrain et la cartographie qui en découle ont été établies par un géologue du BRGM spécialiste des formations superficielles en octobre 2013.

Le profil d'altération (altérites et zone fissurée)

Les formations d'altération dérivent, par modifications *in situ* des propriétés physiques et chimiques, de roches mères (méta-)sédimentaires ou plutoniques sous l'action principale des eaux météoriques.

Ce processus dit « supergène » (qui se déroule en surface) est la conséquence de climats chauds et humides du Tertiaire (Durand, 1960 ; Estéoule-Choux, 1967 ; Ollivier-Pierre, 1980) qui ont pu être d'excellents catalyseurs des transformations physico-chimiques, engendrant, sur tout le Massif Armoricaire, de véritables profils latéritiques à kaolinite, épais de 40 m en moyenne. La position altimétrique de la surface continentale par rapport au niveau marin relatif, et à une échelle régionale (Wyns, 1991 ; Quesnel, 1996 ; Thomas, 1999) l'absence de pentes fortes (Wyns et Guillocheau, 1999), ont pu conditionner très largement le développement ou la destruction des profils d'altération, peut-être même sous des climats dits « hydrolysants » et en milieu essentiellement acide, ce qui est attesté par l'apparition de formations siliceuses (silcrètes), interprétées comme des lambeaux de paléo-surfaces continentales, localement préservées.

L'accumulation de ces formations siliceuses, consécutivement à l'altération, souligne une mobilisation lente de la silice, un drainage relativement limité et par conséquent une accumulation de silice en base de profil (Meyer, 1987).

Schématiquement, sur le Massif Armoricaire, un profil d'altération complet se décrit comme la superposition de trois ensembles à passages verticaux graduels. De la base au sommet on distingue ainsi : (1) le domaine fissuré, (2) les isaltérites et (3) les allotérites. Faisant partie de ce profil mais rarement conservées, on associe les formations cuirassées sommitales (silcrètes, ferricrètes).

Zone fissurée

Vers la surface, au-dessus de la roche-mère, s'individualise le domaine fissuré. Il est caractérisé, sur tout type de lithologie, par une fracturation importante qui décroît en profondeur et qui provient de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes produites par l'altération au sens large, correspondant aux changements de phases de ses minéraux (hydratation des ferro-magnésiens - biotite - avec augmentation de volume, oxydation des sulfures etc.). Si cette zone fissurée, particulièrement bien mise en évidence sur les roches plutoniques grenues (granites) où cette fissuration horizontale est assez clairement identifiable (roches isotropes ou semi-isotropes) ; elle est beaucoup plus difficile à caractériser dans les domaines métasédimentaires (Briovérien) et sédimentaires du Paléozoïque.

Sur une formation géologique du type de la Formation du Grès Armoricaïn, les observations de leur altération (faites sur le terrain dans le cadre de ce projet), montraient le développement de l'altération à partir des joints argileux séparant les niveaux de grès (Illustration 22 à gauche). Les argiles originelles contenues dans ces joints semblaient gonfler par leur réhydratation, entraînant un changement de volume de la roche. Ce gonflement semble ensuite dilater des fractures inter-bancs de grès, hérités lors du relâchement des contraintes lors de la formation des plis ou de dilater des fractures simplement tectoniques (Illustration 22 à droite).

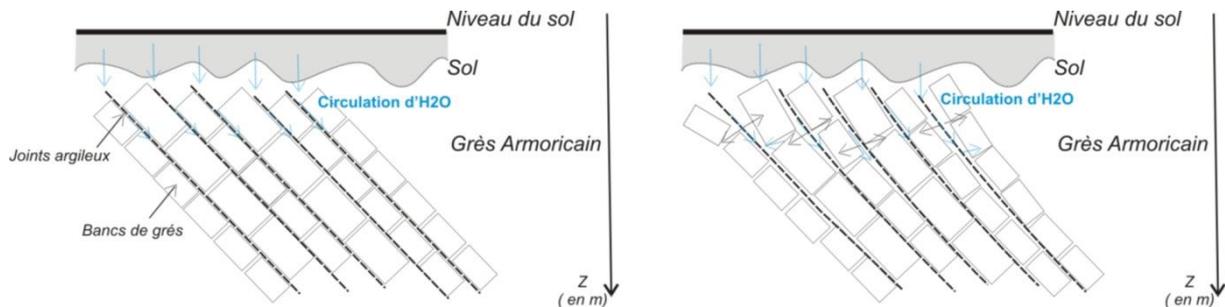


Illustration 22 - Schéma de principe de l'observation in situ du développement possible du profil d'altération sur les grès armoricains.

La répétition de ce phénomène, entrainera un approfondissement du profil au fur et à mesure que l'hydratation pourra se propager plus en profondeur, à travers cette nouvelle porosité créée par l'altération.

En ce qui concerne les autres formations géologiques, l'altération pour les formations schisteuses (schistes d'Angers, à Calymènes ou à Trinucleus etc.) semblent avoir le même principe de fonctionnement que celui qui est communément observé sur les schistes du Briovérien. Les différences dans le développement du profil, pourraient résider dans la proportion plus ou moins importante de minéraux gonflants (biotite etc.) ou de sulfures (pyrite etc.), contenue dans la roche.

Sur la Formation du Châtellier, les observations sur le terrain, montrent que cette formation géologique semble ne pas avoir développé un profil important d'altération sur la partie la plus gréseuse.

En fonction de ces propriétés mécaniques et physico-chimiques, chaque formation développera un profil d'altération plus ou moins important et des isaltérites et allotérites plus ou moins bien individualisées.

Isaltérites

Les isaltérites sont des roches meubles où la texture originelle de la roche et les relations spatiales entre les minéraux sont préservées. En théorie, lors de l'altération, les minéraux sont remplacés par des minéraux secondaires ou par des pores qui possèdent la forme du minéral primaire remplacé. Les relations spatiales entre minéraux préexistants et le volume de la roche sont maintenues. Il s'avère cependant que dans le détail, la conservation du volume d'origine n'est pas toujours respectée. L'apparition de néosilicates tels que ceux du groupe des montmorillonites ou de celui des vermiculites introduit des perturbations dans l'assemblage minéralogique puisque ces minéraux « gonflent » ou se « contractent » en fonction du degré d'hydratation du profil.

Allotérites

Le terme d'allotérites est employé pour désigner les horizons altérés où les structures de la roche mère (stratification, litages schistosité ou foliation...) ne sont plus visibles. Certains minéraux, stables dans les parties profondes du profil d'altération ne le sont pas dans les parties les plus superficielles. Ces minéraux argileux sont alors remplacés par des minéraux argileux plus stables, des oxydes et hydroxydes. Ceci s'accompagne généralement d'une disparition progressive de la structure de la roche originelle (c.-à-d. des isaltérites sous-jacentes) et d'une modification (perte) de volume.

Géométrie des surfaces d'altération

La cartographie des altérites passe par l'identification sur le terrain de la limite entre les altérites meubles (isaltérites – allotérites) et le domaine fissuré. Cette limite chimique, est souvent marquée géomorphologiquement mais elle ne peut pas être simplement réduite à cette seule observation. Cette cartographie dépend également de la nature des formations géologiques observées à l'affleurement.

A l'issue de la cartographie de terrain, plusieurs surfaces ont été identifiées, à différentes altitudes (Illustration 23).

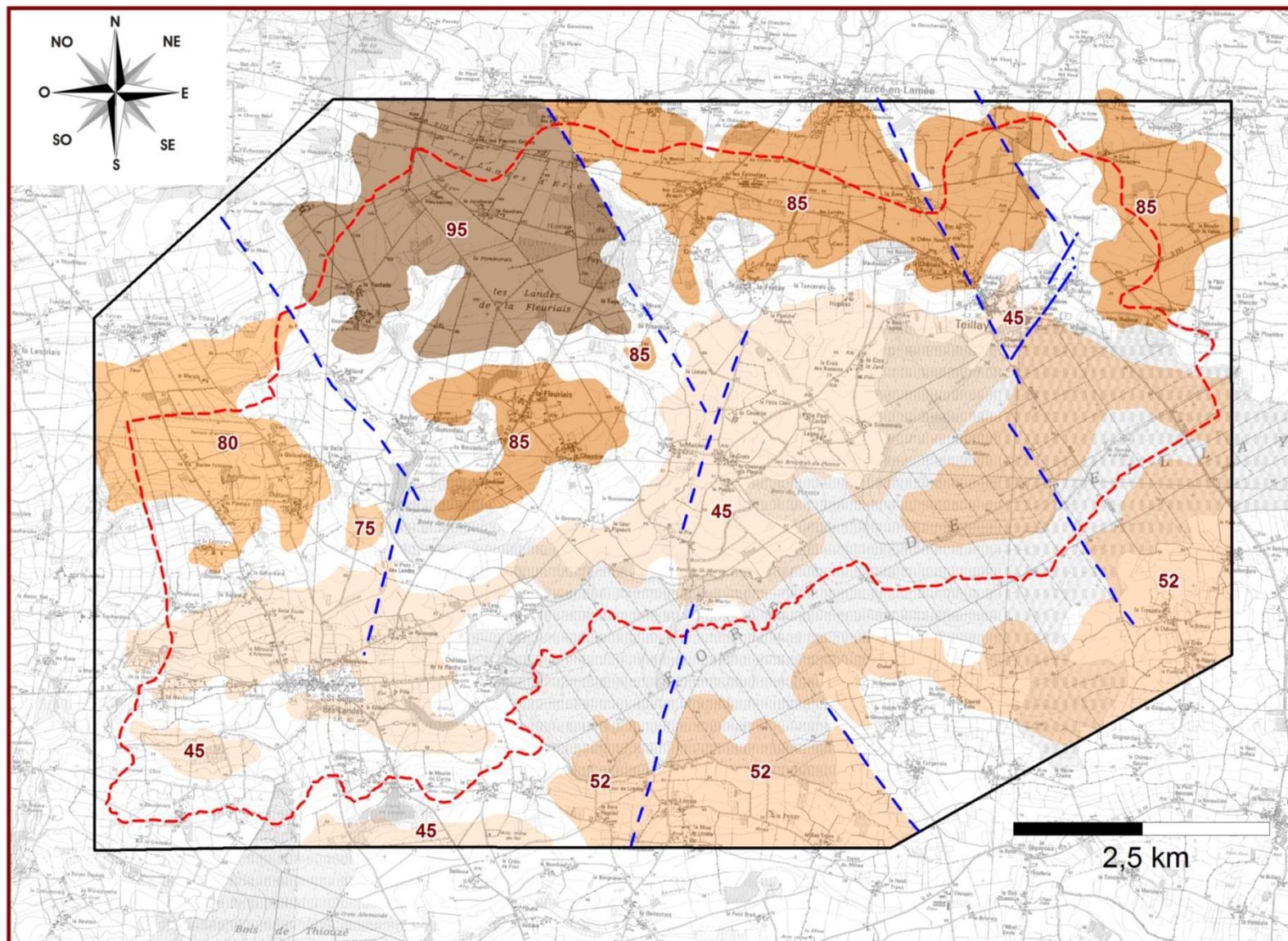
La surface la plus haute, se situe en moyenne à environ 95 m NGF, au Nord-Ouest du bassin de l'Aron (Illustration 23). Elle est encadrée par deux autres surfaces, légèrement moins élevées. L'une au Nord-Est à une altitude de 85 m NGF, et une seconde au Sud à une altitude de 75 à 80 m NGF. Ces surfaces forment le plateau qui borde le Nord du bassin.

La confrontation entre l'analyse structurale et la cartographie de cette surface, a abouti à l'interprétation qu'il pourrait s'agir d'une seule et même surface affectée par la tectonique cassante des failles de direction N150 et de leurs conjuguées.

La seconde surface principale, est une surface à 45 m NGF en moyenne, située directement au Centre du bassin de l'Aron. Alors que la première (les premières), correspondait à un plateau ; cette seconde surface a une forme convexe dont la bordure Sud est la côte altimétrique 45 et sa bordure Nord une transition avec les premières, à la faveur d'un talus de raccordement à 60 m NGF.

Enfin, une dernière surface a été identifiée à la côte altimétrique 52 m NGF, au Sud du bassin de l'Aron.

On remarque que le lit de la rivière Aron est situé dans la zone fissurée.



*Illustration 23 - Cartographie des bases des altérites meubles sur le bassin de l'Aron
(le chiffre central correspond à l'altitude moyenne interprétée à partir de la campagne de terrain)*

4.2. REALISATION DE SONDAGES A LA TARIERE MECANIQUE

4.2.1. Déclarations de travaux et autorisations

Une déclaration préalable de travaux souterrains au titre du code minier a été rédigée en précisant les informations suivantes : maître d'ouvrage, entrepreneur, adresse de la mission sur le terrain, objectifs, géologues dirigeant les travaux, date et durée... Le document complet a été envoyé par courrier à la DREAL Bretagne et à la DREAL Pays-de-la-Loire le 22 octobre 2013.

Suite à l'implantation prévisionnelle des sondages à la tarière, le BRGM a formalisé avec le SIEFT un courrier avertissant les Maires des 9 communes concernés par les travaux à venir (COESMES, ERCE-EN-LAMEE, SAINT-SULPICE-DES-LANDES, TEILLAY, BAIN-DE-BRETAGNE, LA DOMINELAIS (en Ille-et-Vilaine), et RUFFIGNE, SION-LES-MINES, ROUGE (en Loire-Atlantique)). Avant toute intervention sur le terrain, le BRGM a pris contact avec les propriétaires des parcelles concernés et a obtenu leurs autorisations.

Enfin, une autorisation a été obtenue, en novembre 2013 auprès du Groupement Forestier de la Forêt de Teillay, pour réaliser des sondages mécaniques et géophysiques dans la Forêt privée de Teillay (cf. localisation en annexe 1).

Pour chaque ouvrage prévisionnel, le BRGM s'est chargé de la Déclaration de projet de Travaux (DT) et de la Déclaration d'Intention de Commencement de Travaux (DICT).

4.2.2. Dispositif utilisé

L'atelier Sondage du BRGM a été mobilisé pour réaliser les travaux de sondages à la tarière mécanique sur le bassin de l'Aron.

Les travaux ont été réalisés du 9 au 12 décembre 2013, avec une foreuse Bonne Espérance munie de tarière mécanique hélicoïdale de diamètre 152 mm (cf. Illustration 24). L'objectif de la campagne était de réaliser au moins 10 sondages et de caractériser la profondeur des altérites sur le bassin versant.

Trois agents du BRGM étaient présents sur place (sondeur, aide-sondeur et technicien géologue) pour l'implantation des sondages et le lever des coupes géologiques.

La foreuse montée sur IVECO 6x6 permet de descendre au maximum à 20 m de profondeur.

Le dispositif a traversé la base des altérites jusqu'à un « refus » de pénétration, correspondant au sommet du milieu fissuré. Le suivi géologique de terrain a permis de repérer ce contact et de caractériser les formations en place (cf. Illustration 25).



Illustration 24 - Aperçu de la sondeuse utilisée sur le bassin du Nançon



Illustration 25 - Tige hélicoïdale en diamètre 152 mm et remontée des déblais

4.2.3. Implantation des sondages

Au cours des 4 jours de foration, 13 sondages ont été réalisés sur le bassin de l'Aron et 1 sondage a été effectué dans le bassin Tertiaire du Matz sur la commune de Coësmes.

Le sondage A1 sur la commune de Coësmes avait pour objectif de connaître la profondeur du bassin Tertiaire (cf. chapitre 3.1.3).

Les sondages du bassin de l'Aron ont été implantés dans des secteurs dépourvus d'affleurement afin de caractériser l'épaisseur des altérites. Ces zones sont généralement en configuration haute topographiquement (plateaux ou pentes) et renseignent les principales formations géologiques du bassin. Trois sondages ont été réalisés dans la Forêt privée de Teillay (A3, A4 et A4bis).

Les résultats obtenus ont permis d'affiner la cartographie des formations superficielles.

Le positionnement des sondages à la tarière est représenté sur l'illustration 26.

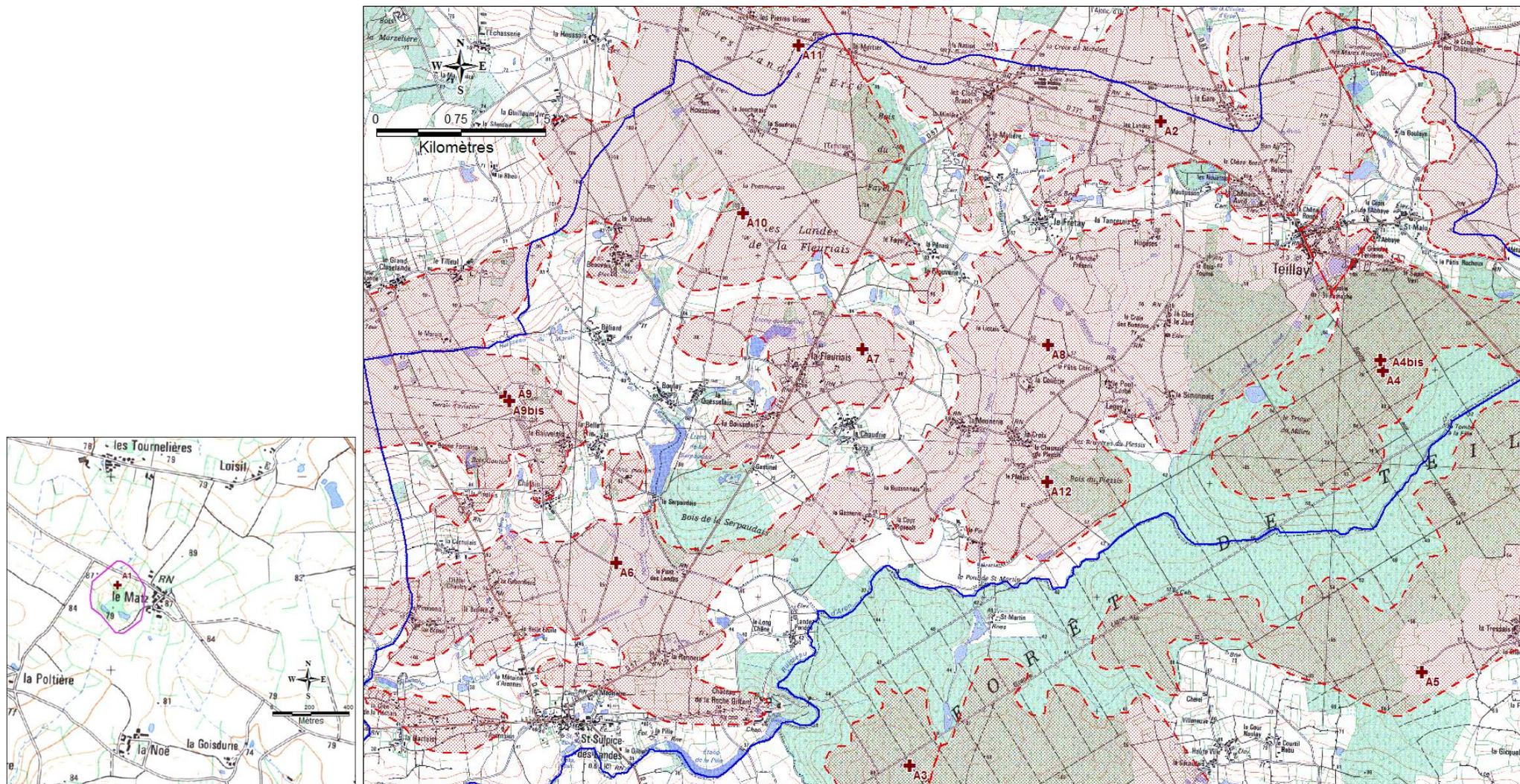


Illustration 26 - Localisation des sondages à la tarière réalisés sur fond IGN 1/25 000
(à gauche : sondage sur la commune de Coësmes, à droite : sondages sur le bassin de l'Aron sur fond de cartographie des altérites (en hachuré rouge))

4.2.4. Résultats obtenus

Suivi géologique

Les sondages ont fait l'objet d'un suivi géologique des terrains traversés, détaillé en annexe 4 sous la forme de coupes géologiques. Les dossiers BSS⁵ de chaque tarière ont été créés.

Sur le bassin de l'Aron, 14 sondages ont été réalisés, totalisant 77.2 mètres de foration. L'épaisseur des altérites varie de 1.4 à 13.5 m avec en moyenne 5.5 m.

Le nom et la profondeur de chaque sondage sont détaillés dans l'illustration 27.

N° BSS	Numéro	Profondeur du refus (m)	Commune	Département
03891X0528	A1	4.00	COESMES	35
03883X0070	A2	4.70	TEILLAY	35
03887X0011	A3	4.00	RUFFIGNE	44
03884X0509	A4	1.40	TEILLAY	35
03884X0510	A4bis	1.40	TEILLAY	35
03888X0035	A5	3.70	RUFFIGNE	44
03887X0009	A6	5.80	SAINT-SULPICE-DES-LANDES	35
03883X0071	A7	5.70	ERCE-EN-LAMEE	35
03883X0072	A8	8.80	ERCE-EN-LAMEE	35
03882X0123	A9	1.40	SAINT-SULPICE-DES-LANDES	35
03882X0124	A9bis	11.00	SAINT-SULPICE-DES-LANDES	35
03883X0073	A10	7.50	ERCE-EN-LAMEE	35
03883X0074	A11	4.30	ERCE-EN-LAMEE	35
03887X0010	A12	13.50	TEILLAY	35

Illustration 27 - Numéros BSS et profondeur des tarières réalisées sur le bassin de l'Aron

Comme précisé au chapitre 4.1.4., les altérites sont très largement représentées sur le bassin de l'Aron (elles couvrent une surface importante, environ 58 % de la superficie totale cartographiée) et elles présentent parfois des épaisseurs supérieures à 10 m. La plupart des sondages de reconnaissance ont réussi à atteindre la base des formations meubles (altérites). Cependant par endroit, les tarières ont buté sur les zones de ferruginisation (tarières A4 et A4bis).

Les faciès varient selon la formation géologique traversée (voir coupes de sondages en annexe 4). Dans les schistes de la Formation de Traveusot, le faciès est sablo-argileux ocre avec des éléments grossiers de schiste rouge, puis argilo-sableuse bleu anthracite avec éléments de schistes pourris et des nodules de schistes sains (tarières A3-A4-A4bis-A6-A8-A12). Dans les grès micacés de la Formation du Châtellier, le faciès est argilo-sableux avec blocs de grès sains et avec des passages plus argileux de couleur gris-beige (tarière A5). Dans le Membre gréseux inférieur des Grès Armoricaïn, on observe une argile bariolée blanche-ocre avec des éléments grossiers (concrétions de fer, nodules de grès sains, quartzites), sablo-limoneuse (tarières A2-A9-A9bis-A10-A11). Et dans le Membre gréseux supérieur des Grès Armoricaïn, le

⁵ Les dossiers BSS et la localisation précise des tarières est consultable sur le site <http://infoterre.brgm.fr/>

faciès d'altération est sableux de couleur blanchâtre avec des passages plus sablo-argileux avec blocs de grès sains et tâches d'oxydation (tarière A7).

Relevés piézométriques

Les niveaux piézométriques ont été relevés lorsque le sondage contenait de l'eau (7 tarières sur 13 du bassin de l'Aron). Ces résultats sont reportés sur les coupes de l'annexe 4.

Les niveaux piézométriques ont été mesurés à la fin de la réalisation de chaque ouvrage. Dans certains sondages, ces niveaux sont assez bas car les ouvrages ont été rebouchés avant d'atteindre l'équilibre du niveau piézométrique avec la pression de l'air (niveaux dans les sondages A6 et A12). Ceci peut s'expliquer par la faible perméabilité de la formation recoupée (circulation assez lente des eaux souterraines).

4.3. CAMPAGNE DE SONDAGES DE RESONANCE MAGNETIQUE PROTONIQUE (RMP)

4.3.1. Objectifs de la campagne géophysique

Cette campagne géophysique entre dans le cadre d'une étude de type « SILURES bassin versant ». Son objectif est la cartographie des volumes d'eau souterraine sur les 100 premiers mètres du sous-sol, en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

10 sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été effectués sur le bassin de l'Aron dans le but de caractériser la porosité et la teneur en eau des altérites (constituant le réservoir supérieur) et de l'horizon fissuré sous-jacent (réservoir profond) (Illustration 29).

La méthode des sondages RMP se distingue des autres méthodes géophysiques du fait que son principe est basé sur les propriétés électromagnétiques des molécules d'eau et permettent ainsi une caractérisation directe de l'eau du sous-sol. Les principes du sondage RMP sont exposés en annexe 5.

Les teneurs en eau moyennes pondérées sont calculées à partir des données RMP pour chaque horizon et chaque lithologie. Bien que la teneur en eau obtenue en résultat des sondages RMP reste encore mal définie (Vouillamoz et al. 2007), les développements réalisés notamment dans le cadre du projet « SILURES Bretagne » ont montré qu'il était possible d'évaluer les réserves en eau souterraine en utilisant les résultats des sondages RMP (Wyns et al. 2004). Les épaisseurs saturées sont modélisées spatialement à partir des données de piézométrie, de la topographie de surface et des données de la BSS complétées par des forages à la tarière. La combinaison de ces différents paramètres conduit à évaluer les réserves en eaux souterraines pour chaque horizon.

4.3.2. Implantation des sondages RMP

Les sondages RMP ont été implantés en respectant les critères suivants : une répartition des sondages selon l'importance des formations géologiques, le recoupement de l'ensemble du profil d'altération (formations altérées et fissurées), une réalisation en période humide afin

d'avoir un niveau piézométrique haut et un éloignement suffisant par rapport aux points susceptibles de parasiter le signal (lignes électriques, clôtures électriques des fermes...).

Le BRGM a sollicité la Direction Territoriale Ille et Vilaine d'ERDF en septembre 2013 pour récupérer une carte des lignes électriques moyennes et basses tensions. Les lignes hautes tensions sont visibles sur les fonds IGN au 1/25 000. Les données ont été fournies sous la forme de plusieurs cartes au format PDF en octobre 2013.

En raison du bruit électrique assez présent sur le bassin de l'Aron, l'implantation de chaque sondage RMP a été prévue en double (exemple : RMP1 et RMP1bis ; Illustration 29).

Suite à cette implantation prévisionnelle des sondages RMP, le BRGM a formalisé avec le SIEFT un courrier avertissant les Maires des communes concernés par les travaux à venir. Avant toute intervention sur le terrain, le BRGM a pris contact avec les propriétaires des parcelles concernés et a obtenu leurs autorisations.

La répartition des sondages selon les formations géologiques est la suivante : 4 sondages RMP dans les Grès Armoricaïn, 4 RMP dans la Formation de Traveusot, et 2 RMP dans la Formation de Riadan-Renazé (cf. Illustration 31).

4.3.3. Programme technique

Conformément au cahier des charges, il était prévu de réaliser 10 sondages RMP sur l'ensemble du bassin de l'Aron (Illustration 29). Les trois principales formations géologiques présentes sur ce bassin versant ont été investiguées par 2 à 4 sondages RMP (cf. Illustration 28 et planche 1 en annexe 7).

L'Illustration 28 résume les travaux réalisés.

SITE	LAMBERT 93		LAMBERT II		Z	Géologie
	X	Y	X	Y		
SIEFT1	357715.91	6750930.6	307126.47	2315074.8	53	Altérites - Schistes et quartzites de Riadan-Renazé
SIEFT2	359448.28	6751666.1	308854	2315825	55	Altérites - Schistes et quartzites de Riadan-Renazé
SIEFT3	360967.77	6753772	310357.29	2317944.8	76	Altérites - Schistes d'Angers-Traveusot
SIEFT4	358827.66	6752769.2	308223.93	2316923.8	52	Altérites - Schistes d'Angers-Traveusot
SIEFT5	358267.58	6754221.2	307651.57	2318372.2	60	Altérites - Schistes d'Angers-Traveusot
SIEFT6	354391.51	6752210.5	303789.3	2316328.4	55	Altérites - Schistes d'Angers-Traveusot
SIEFT7	360745.13	6756282.6	310113.95	2320455.3	85	Altérites - Formation du Grès armoricaïn (schistes, grès, quartzites)
SIEFT8	356447.98	6755303	305821.87	2319439.9	104	Altérites - Formation du Grès armoricaïn (schistes, grès, quartzites)
SIEFT9	353579.16	6753821.4	302963.2	2317933.7	91	Altérites - Formation du Grès armoricaïn (schistes, grès, quartzites)
SIEFT10	356565.61	6753962.4	305950.55	2318099.3	88	Altérites - Formation du Grès armoricaïn (schistes, grès, quartzites)

Illustration 28 - Volume des travaux géophysiques RMP réalisés

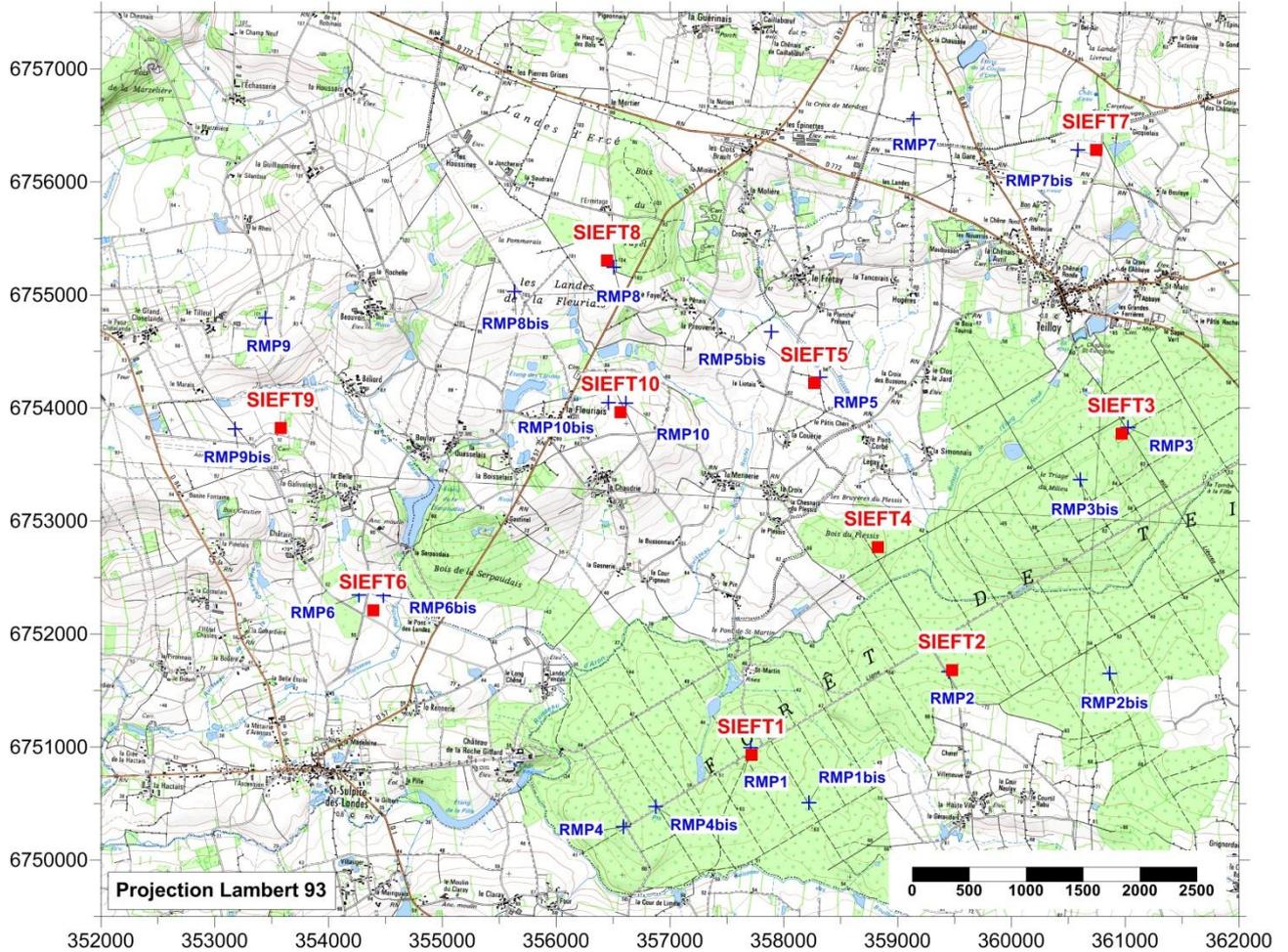


Illustration 29 - Implantation des sondages RMP.
Les croix bleues indiquent les implantations prévisionnelles ;
les carrés rouges les sondages réalisés munis de leur n° en étiquette. En fond la carte IGN à 1/25 000.

4.3.4. Acquisition et traitement des données

Personnel et calendrier

L'intervention géophysique s'est déroulée 25 au 30 novembre 2013, à raison de 2 sondages par 24h et elle a été effectuée par F. Mathieu, géophysicien au BRGM dans l'unité DRP/RAI assisté de G. Guizouarn, technicien au BRGM dans l'unité DGR/MIN.

Méthodologie

Le nouveau système d'acquisition RMP NUMIS^{POLY} a été utilisé pour la seconde fois (les premiers tests ayant été effectués dans le cadre du projet « SILURES Limousin » ; rapport BRGM/RP-61419-FR) de manière opérationnelle pour la mesure des sondages RMP en contexte de socle lors de cette campagne.

Développé dans le cadre du projet REMAPRO (Girard 2011, Girard et al. 2011), le système NUMIS^{POLY} utilise plusieurs boucles de mesure simultanées qui ouvrent la possibilité de traiter statistiquement les signaux et bruits cohérents ou non cohérents (dans les différentes boucles) et permettent des acquisitions à émetteur-récepteur séparés.

Des tests avec enregistrement du bruit sur une deuxième boucle (RX2, carré de 10 m et 7 tours) ont été réalisés sur les sondages SIEFT1 et SIEFT8. Les conclusions de ces tests sont les suivantes :

- Le traitement par référence à un capteur (RX2) localisé à proximité de la boucle d'injection (mais en dehors de son influence) ne s'est pas révélé efficace ;
- Par contre, comme le système NUMIS^{POLY} permet de retraiter les enregistrements postérieurement à l'acquisition, la suppression des pics par le logiciel Proview lors du retraitement des enregistrements NUMIS^{POLY} s'avère dans les conditions de cette étude, comme le plus efficace.
- Le traitement par rejection des enregistrements les plus bruités au-delà d'un seuil est apparu également efficace mais plus long à mettre en œuvre du fait de la nécessité de définir le seuil de rejection pour chaque pulse.

Suite à ces tests, la méthodologie retenue est de réaliser les mesures avec une boucle en forme de 8 (2 carrés de 37.5 m) et de traiter postérieurement les enregistrements en supprimant les pics.

Equipement

L'acquisition des mesures a été réalisée à l'aide du système NUMIS^{POLY} (Iris Instruments, France) connecté à deux boucles (1 pour la mesure et 1 pour le traitement du bruit).

Le matériel utilisé comprend :

- 1 système de mesure RMP NUMIS^{POLY} ;
- 16 câbles de mesure de 75 m de long ;
- 1 magnétomètre à proton ;
- 15 batteries 12V, 100 Ah ;
- 1 jeu de câbles pour la mesure du bruit ;
- 2 PC portables ;
- 2 véhicules.

4.3.5. Résultats obtenus

Travaux réalisés

Les 10 sondages RMP réalisés recoupent trois formations géologiques différentes du bassin versant (Illustration 31). De deux à quatre sondages ont été mesurés sur chaque formation.

Les caractéristiques des sondages sont données dans l'illustration 30. Les sondages sont généralement de bonne qualité (3) ou de qualité moyenne (2).

SITE	TX : RX1	RX2	Bruit ambiant (Prodiviner) en nV	Fréquence Larmor (Hz)	Nombre de pulses	Nombre de stack	Traitement	Qualité	Profondeur d'investigation (m)
SIEFT1	8 carré - 37.5m	10 m	5 - 200	2020.20	1 à 13	300.0	SP	3	40
SIEFT2	8 carré - 37.5m	non	5 - 75	2021.80	1 à 13	250.0	SP	3	75
SIEFT3	8 carré - 37.5m	non	2 - 10	2023.30	1 à 13	300.0	SP	3	70
SIEFT4	8 carré - 37.5m	non	2 - 50	2020.90	1 à 10	250.0	SP	3	75
SIEFT5	8 carré - 37.5m	non	5 - 100	2023.00	1 à 10	250.0	\	2	\
SIEFT6	8 carré - 37.5m	non	5 - 250	2022.10	1 à 10	300.0	SP	2	40
SIEFT7	8 carré - 37.5m	non	20 - 450	2022.00	1 à 9	250.0	SP	2	30
SIEFT8	8 carré - 37.5m	10 m	35 - 175	2019.50	1 à 13	400.0	SP	3	50
SIEFT9	8 carré - 37.5m	non	50 - 250	2015.80	1 à 13	400.0	SP	2	35
SIEFT10	8 carré - 37.5m	non	7 - 175	2023.30	1 à 13	400.0	SP	2	45

Illustration 30 - Caractéristiques des sondages RMP. Tous les enregistrements ont été réalisés avec le système NUMIS^{POLY}. Les boucles d'émission (TX) et de réception (RX1) sont coïncidentes et sont en forme de huit formé de deux carrés de 37.5 m de côté. Les boucles RX2 sont pour la mesure de bruit. La qualité des sondages est indiqué par les valeurs 1 à 3 : 3 pour bon ; 2 pour moyen ; 1 pour mauvais.

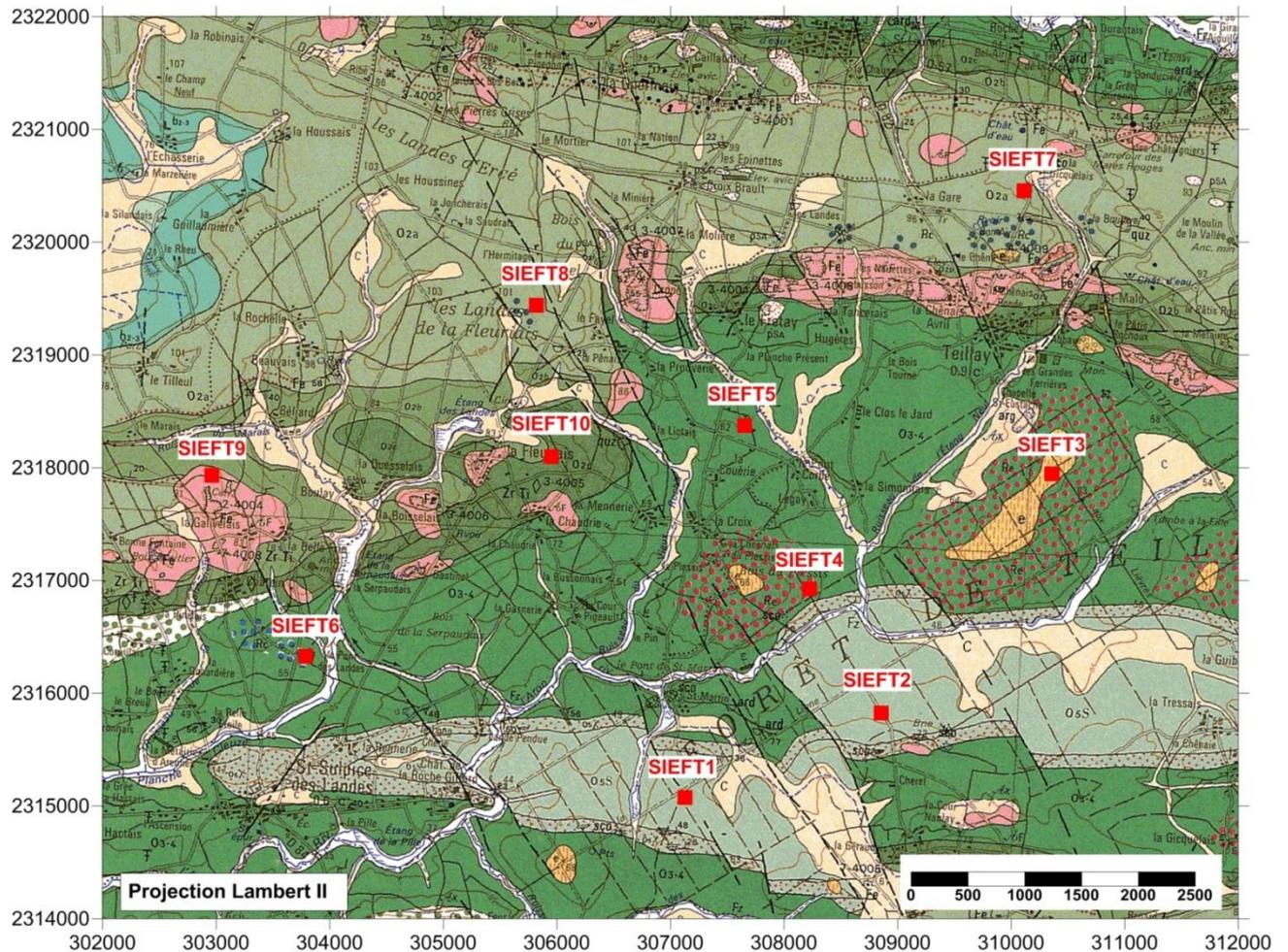


Illustration 31 - Localisation des sondages RMP. En fond, la carte géologique à 1/50 000 de Bain-de-Bretagne.

Traitement

Les données mesurées et les résultats d'inversion des sondages RMP sont fournis en annexe 6.

L'inversion des données s'applique essentiellement sur le premier lobe de la courbe de sondage en amplitude et définit en conséquence des résultats (teneur en eau RMP et temps de décroissance T1) qui s'appliquent au premier niveau aquifère du sous-sol. Il serait possible de traiter de manière plus complète la queue des sondages en considérant plusieurs hypothèses sur le déphasage en fin de sondage (Legchenko 2004). Néanmoins, l'incertitude conséquente à ces hypothèses conjuguée aux conditions limites de rapport signal/bruit qui prévalent en fin de sondage rendrait cet exercice vain. En d'autres termes, l'incertitude sur le bénéfice attendu ne justifie pas les efforts importants que nécessiteraient l'interprétation détaillée des queues de sondage.

Les teneurs en eau moyennes présentées en résultats dans l'illustration 32 correspondent au premier niveau aquifère, il en va de même pour les temps de décroissance T1 présentés dans le même tableau.

SITE	Géologie	S/N	EN/IN	Qualité	Teneur en eau moyenne, W (%)	T1 (ms)	Tranche de terrain concernée (m)
SIEFT1	Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	0.43	3.46	3	0.8	200	5 à 25
SIEFT2	Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	1.54	0.69	3	0.9	??	0 à 7
SIEFT3	Schistes d'Angers-Traveusot	1.31	0.72	3	0.8	200	3 à 20
SIEFT4	Schistes d'Angers-Traveusot	3.57	0.39	3	1.2	125	8 à 20
SIEFT5	Schistes d'Angers-Traveusot	0.31	18.54	2	7.0	??	18 à 32
SIEFT6	Schistes d'Angers-Traveusot	1.07	6.14	2	2.5	??	10 à 20
SIEFT7	Formation du Grès armoricain	0.65	10.56	2	4.0	150	0 à 10
SIEFT8	Formation du Grès armoricain	0.64	3.09	3	4.5	200	8 à 18
SIEFT9	Formation du Grès armoricain	0.44	7.40	2	5.5	250	6 à 20
SIEFT10	Formation du Grès armoricain	1.26	4.84	2	5.5	150	7 à 35

*Illustration 32 - Résultats RMP en fonction de la géologie
(S/N = signal/noise, et EN/IN = external noise / instrumental noise).*

On peut signaler que les résultats mentionnés dans l'illustration 32 (teneur en eau, T1, et tranche de terrain), commentés dans ce paragraphe et dans le suivant, constituent un dégrossissage du travail d'interprétation des données. En effet, dans le chapitre 5 de ce rapport les teneurs en eau seront plus finement interprétées en tenant compte de l'épaisseur des altérites et de l'horizon fissuré de chaque formation géologique.

Résultats

Les résultats des sondages RMP sont relativement cohérents au sein d'une même formation géologique.

Les schistes et quartzites de Riadan-Renazé ont une teneur en eau inférieure à 1% et un T1 qui serait de l'ordre de 200 ns.

Les schistes d'Angers-Traveusot ont une teneur en eau moyenne de l'ordre de 1.5%. Le temps de relaxation T1 serait compris entre 100 et 200 ns. Ces valeurs sont issues de l'inversion des sondages RMP SIEFT 3 et SIEFT 4 ; sur les 2 autres sondages, la qualité des mesures n'a pas permis d'appréhender la valeur de ce paramètre. On notera que la tranche de terrain saturée sur les sondages 3, 4 et 6 est relativement identique (environ 5 à 20 m) alors que sur le sondage SIEFT 5, l'horizon saturé est beaucoup plus profond (entre 18 et 32 m). Sur ce sondage la teneur en eau est également anormalement élevée (7%) ce qui laisserait supposer que ce site est implanté sur le passage d'une faille.

La formation des grès armoricain possède une teneur en eau moyenne qui est de l'ordre de 5% ce qui est largement supérieur à la teneur en eau des formations précédentes. Le T1 est en moyenne de l'ordre de 200 ns. L'épaisseur et la profondeur de la tranche d'eau saturée est assez variable d'un site à l'autre.

5. Cartographie des volumes d'eau souterraine sur le bassin versant de l'Aron

5.1. CONDITIONS DE REALISATION

Afin de réaliser un modèle géométrique des aquifères de socle et de la surface piézométrique sur le bassin de l'Aron, les données de forages de la BSS ont été collectées et ajoutées aux données fournies par les sondages mécaniques à la tarière.

Ces données de forage ont fourni l'altitude du contact altérites/milieu fissuré sur 26 points, et l'altitude de la surface piézométrique sur 31 points.

Les données provenant des sondages mécaniques à la tarière ont fourni l'altitude du contact altérites/milieu fissuré sur 13 points et l'altitude de la surface piézométrique sur 7 points.

Elles ont été complétées par le lever de terrain (en octobre 2013) destiné à déterminer l'altitude de la base des altérites sur le bassin versant ; les observations d'affleurements sur le terrain ont permis d'ajouter 881 points de calage supplémentaires du contact altérites/milieu fissuré aux données de forages et sondages (cf. chapitre 4.1.4. et planche 5 en annexe 7).

10 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés en novembre 2013 sur le bassin de l'Aron. Les trois principales formations géologiques présentes sur ce bassin versant (Riadan-Renazé / Traveusot / Grès Armoricain) ont été investiguées par 2 à 4 sondages RMP (respectivement 2 / 4 / 4).

Ces 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 4.3.5.

La modélisation spatiale de la géométrie des aquifères, de la piézométrie et de la lame d'eau stockée a été réalisée dans l'environnement ArcMap version 10.0 d'ESRI, en utilisant un modèle de grille à la maille de 50 m. Les données géométriques de topographie proviennent du MNT de l'IGN à la maille de 25 m (MNT BD ALTI 25 m IGN 2010) qui a été régénéré au pas de 50 m pour correspondre à la maille du modèle. Le tracé du réseau hydrographique pérenne est issu de la BD CARTHAGE⁶ de l'IGN (version 2008 du 22 juillet 2008, téléchargée sur le site Internet du SANDRE⁷).

Les cartes remises dans ce rapport sont représentées sur des pages A3 à l'échelle du 1/50 000 (cf. annexe 7).

Les étapes suivies pour réaliser la cartographie des volumes d'eau souterraine sur le bassin versant de l'Aron sont développées ci-dessous.

⁶ Base de Données sur la CARTographie THématique des AGences de l'eau et du ministère de l'Environnement

⁷ Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau

5.2. MODELISATION GEOMETRIQUE DES INTERFACES

5.2.1. Méthodologie mise en œuvre

Principe

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 (Illustration 33).

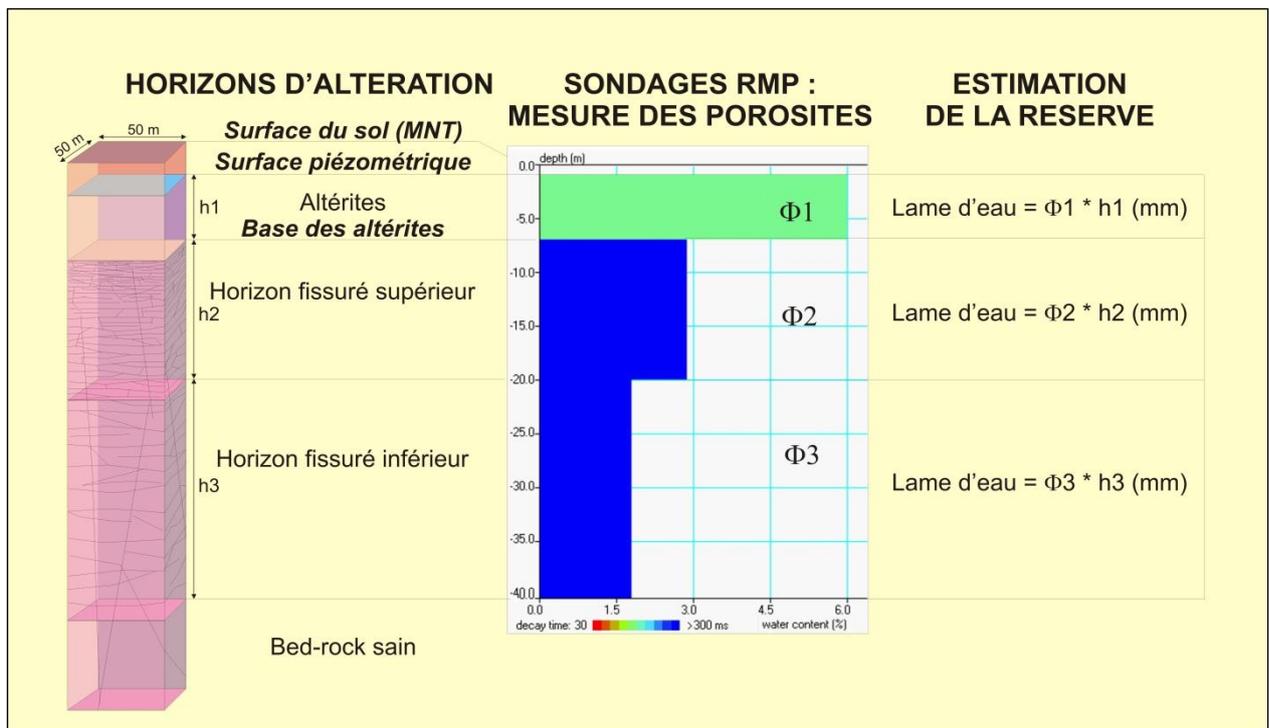


Illustration 33 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

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 (sous la surface piézométrique), 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 moyenne en eau 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 moyennes en eau 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 la hauteur 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.

Regroupements géologiques sur le secteur

On rappelle que 2 sondages RMP ont été réalisés dans la Formation de Riadan-Renazé (SIEFT1-2), 4 dans la Formation de Traveusot (SIEFT3-4-5-6), et 4 dans les Grès Armoricaïn (SIEFT7-8-9-10) (cf. Illustration 31).

La Formation du Châtellier étant faiblement représentée à l'affleurement sur le bassin de l'Aron, elle n'a pas fait l'objet d'investigation par sondages RMP. Pour la réalisation de la carte des volumes d'eau souterraine, cette formation sera associée à celle de Riadan-Renazé. Ce regroupement se justifie par le fait : que cette Formation du Châtellier occupe 2.5% de la superficie du bassin, et que sur le terrain la différence entre les 2 lithologies n'est pas distinguable (« similitude des constituants minéralogiques » selon la notice de la carte géologique).

Le nombre de sondage RMP est insuffisant pour caractériser chaque membre de la Formation du Grès Armoricaïn (2 sondages RMP pour « o2a », 1 pour « o2b » et 1 pour « o2c »). Pour la réalisation de la carte des volumes d'eau souterraine, les 3 faciès seront associés.

Choix de la méthode d'interpolation

Pour modéliser la géométrie des interfaces : surface piézométrique et surface de base des altérites, un recours à l'interpolation est nécessaire.

Plusieurs techniques d'interpolation existent parmi lesquelles nous avons choisi le krigeage (un des outils fondamentaux de la géostatistique, cf. détail en annexe 8). Un avantage essentiel du krigeage par rapport aux interpolateurs classiques réside dans la quantification de l'incertitude associée à l'interpolation, rendue possible par la modélisation de la structure spatiale. Cette incertitude qui est un indicateur de la qualité d'une interpolation est représentée généralement par la carte d'écart-types de krigeage (ou carte d'iso-incertitudes).

Dans le cadre de cette étude, à partir d'un semis de points caractérisant une altitude, l'approche géostatistique mise en œuvre va permettre :

- de caractériser la variabilité spatiale des paramètres étudiés ; c'est l'objectif de l'analyse variographique ;
- d'interpoler par krigeage les variables de travail aux nœuds d'un maillage régulier.

Pour chaque secteur géographique étudié, la grille interpolée contient, au droit de chaque nœud, les informations suivantes :

- l'altitude krigée,
- et l'écart-type de krigeage (l'erreur associée) (exemple : 100 m \pm 2.5 m).

Une carte d'iso-incertitudes est ensuite établie sur le secteur étudié. Cette carte est un indicateur de la qualité de l'interpolation ; de ce point de vue elle permet de bien identifier les zones peu ou mal reconnues.

De manière générale, l'écart-type de krigeage :

- prend des valeurs minimales dans le voisinage des points de mesures et l'estimation est de bonne qualité,
- augmente lorsque l'on s'éloigne des données ; cette augmentation est fonction de la variabilité spatiale du phénomène et donc des paramètres d'ajustement du variogramme adopté (cf. planches des chapitres 5.2.2. et 5.2.3.).

5.2.2. Modélisation de la surface piézométrique

Récupération des données piézométriques

Suite à une recherche au niveau de la BSS sur les 329 points d'eau recensés dans un périmètre de 12 km autour du centre du bassin de l'Aron (forages, puits, sondages, sources, piézomètres), 31 mesures de la profondeur du niveau de nappe ont été relevées dans ces points d'eau.

Les niveaux relevés en BSS varient entre 0 et 44.6 m de profondeur (moyenne : 10.4 m).

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 faites trop rapidement, avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les profondeurs mesurées du niveau de nappe sont alors sur-estimées (c'est le cas de la mesure à 44.6 m et de la seconde mesure plus profonde à 40.6 m).

Les profondeurs du niveau de nappe mesurées sur les 13 sondages mécaniques à la tarière réalisés sur le bassin ont permis de rassembler 7 mesures.

Les niveaux mesurés dans les tarières varient de 1 à 8.4 m de profondeur (moyenne : 3.7 m).

Certaines mesures, dans les tarières, ont été effectuées juste après réalisation de l'ouvrage c'est à dire avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les profondeurs mesurées du niveau de nappe sont alors sur-estimées (c'est le cas de la mesure à 8.4 m).

L'ensemble de ces 38 points d'observation représente une densité d'environ 1 point pour 9.3 km² sur le secteur de recherche de l'Aron (superficie : 354 km²).

Campagne piézométrique

Une campagne de mesures piézométriques a été réalisée en mai 2014 afin d'obtenir une meilleure densité d'observation et une répartition plus homogène sur l'Aron.

Cette campagne a été préparée en avril 2014 afin de sélectionner les forages susceptibles de permettre une mesure de la profondeur de la nappe (sélection des communes et repérage des lieux-dits). Au cours de la campagne piézométrique, 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 35 mesures ont pu être effectuées.

Les niveaux relevés varient entre 0 et 15 m de profondeur.

L'ensemble de ces 73 points d'observation (66 en forage et 7 en tarière) représente une densité d'environ 1 point pour 4.8 km² sur le secteur de recherche de l'Aron.

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 et tarière. Le MNT au pas de 50 m provient de l'Institut Géographique National (IGN).

La méthode appliquée a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al., 2004) ; son principe est rappelé ci-dessous (Illustration 34).

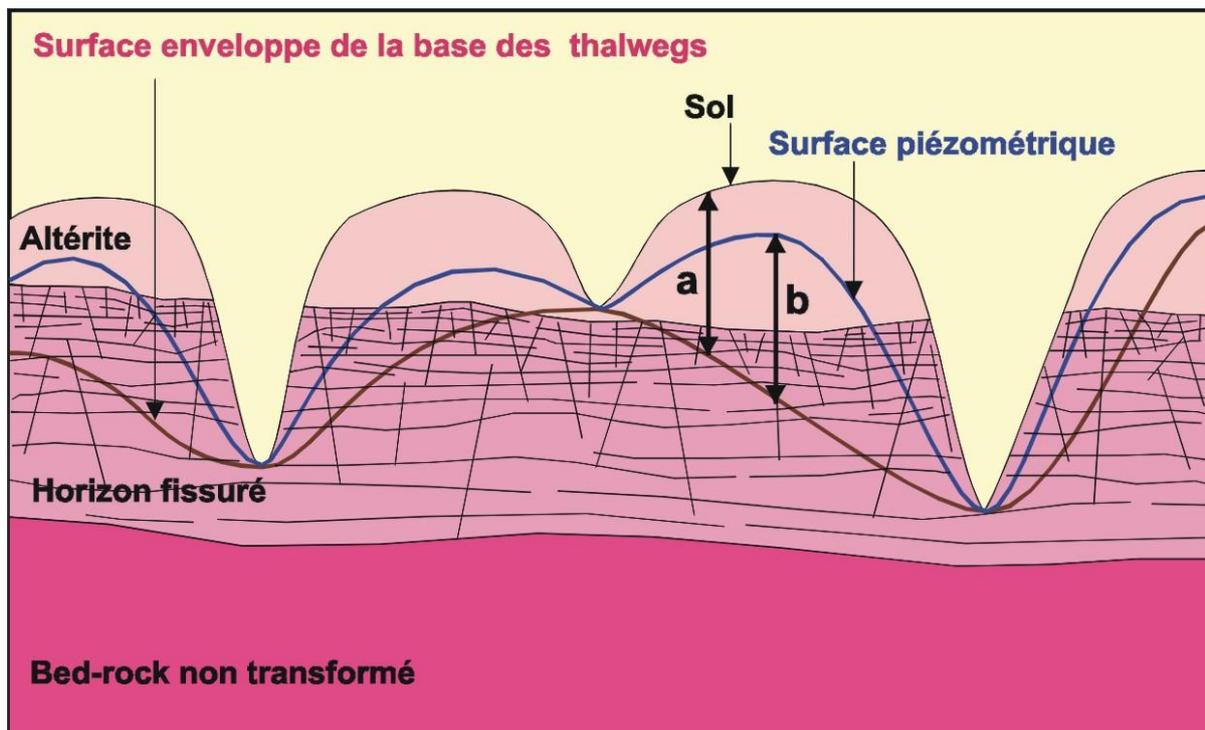


Illustration 34 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

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 l'illustration 34), et d'autre part, la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface-enveloppe des rivières (« b » sur l'illustration 34). L'équation de cette droite permet de calculer en tout point l'altitude de la surface piézométrique à partir de l'altitude du sol (donnée par le MNT) et de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.

Cette 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 25 m linéaires,
- croisement du semis de points avec le MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne,
- analyse variographique 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, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 0 et 9.4 m, avec une moyenne de 2.2 m.

La variabilité spatiale n'est pas très forte et les incertitudes sont assez faibles ; elles s'expliquent par la configuration spatiale des données intervenants dans le voisinage de krigeage (réseau hydrographique très dense).

La surface du sol est fournie par le MNT.

Sur la grille englobant la zone d'étude, 73 mesures piézométriques ont été utilisées.

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 73 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 14 points s'éloignaient de la droite $b=f(a)$.

Plusieurs raisons expliquent ce comportement éloigné par rapport à 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 (points proches des vallées) ;
- points à ordonnée trop faible : points influencés par des pompages ou par une absence de remontée de la nappe ; les niveaux piézométriques sont alors inférieurs à ce qu'ils devraient être (niveaux non remontés, ouvrages pompés).

Après élimination des valeurs aberrantes (14 mesures), 59 mesures piézométriques ont pu être utilisées.

Le report des couples de variables a et b sur un diagramme binaire (cf. Illustration 35) a permis de calculer les équations suivantes :

Bassin de l'Aron

$$b = 0.9311 * a - 1.3872$$

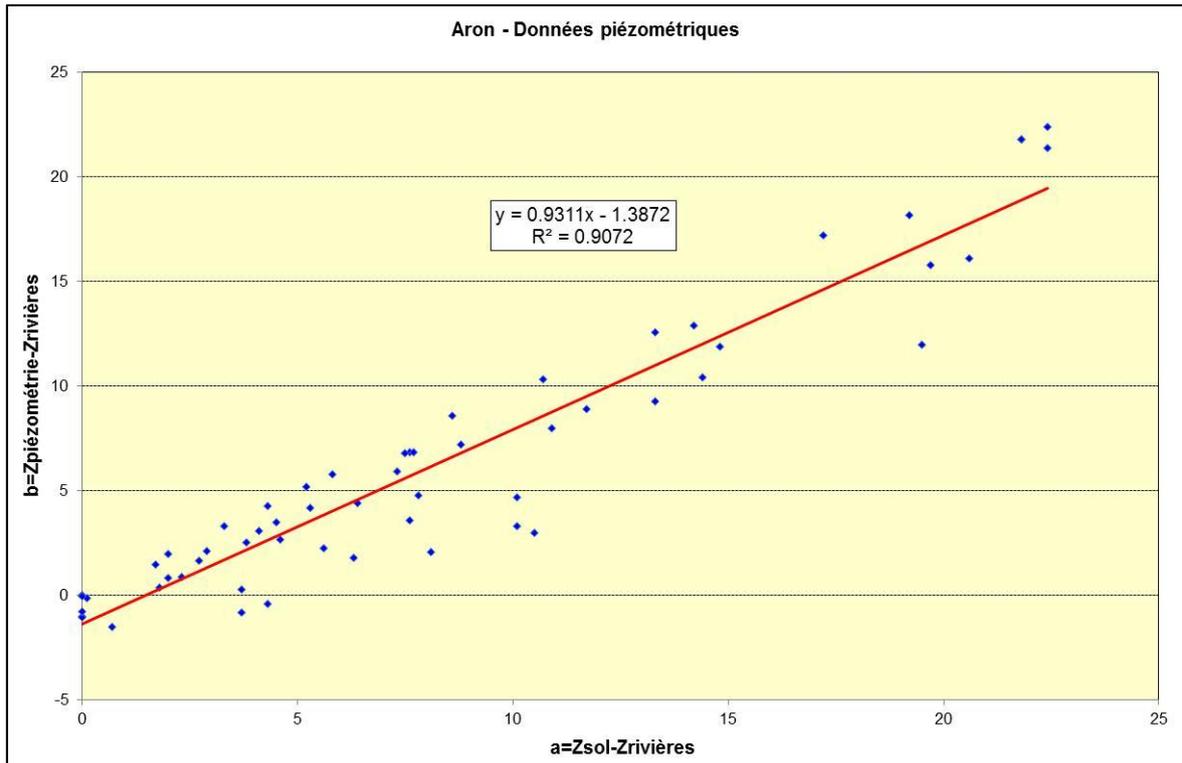


Illustration 35 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Aron)

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.

La pente de la droite $b=f(a)$ (0.93) est représentative de la perméabilité en grand des roches présentes sur le bassin versant. Plus la pente est proche de 1 plus le massif est imperméable ($Z_{sol} \simeq Z_{piézométrie}$) et inversement plus la pente se rapproche de 0 plus le massif est perméable ($Z_{rivières} \simeq Z_{piézométrie}$). Ainsi on note que le bassin de l'Aron est assez peu perméable par rapport à d'autres bassins (Oust pente de 0.85, Dourduff 0.91, Maudouve 0.79, et Nançon 0.81 ; cf. rapports RP-53742-FR et RP-56318-FR).

L'ordonnée à l'origine négative (-1.4 m) représente l'encaissement moyen des rivières par rapport à leurs berges.

Une altitude moyenne étant affectée à la maille de 50 m située au niveau de la rivière, l'altitude d'une maille située dans une vallée relativement encaissée comporte plus d'erreur qu'une maille située dans une vallée à fond plat.

La carte de l'altitude de la surface piézométrique sur le bassin versant est représentée sur la planche 2 de l'annexe 7.

L'écart-type de krigeage de la surface-enveloppe des rivières pérennes, qui représente l'essentiel de l'incertitude associée au calcul de l'altitude de la surface piézométrique, est représenté pour le bassin versant sur la planche 3.

Cette carte montre que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point issu du réseau hydrographique servant de base à la modélisation, tandis que cet écart-type augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne vers les plateaux.

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

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de 899 points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré sur l'Aron.

Ces points proviennent :

- de données des 7 forages recensés dans la BSS et qui ont recoupé la base des altérites,
- d'observations des tarières réalisées sur le bassin (11 points),
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de 881 points).

L'ensemble des 899 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0.08 km² (secteur étudié pour la cartographie des altérites : 74 km²).

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 1.1 et 12.9 m, avec une moyenne de 3.6 m.

L'altitude de la surface de base des altérites obtenue sur le bassin est représentée sur la planche 4 de l'annexe 7.

Au niveau du bassin, 12 failles ont été utilisées pour le krigeage de la base des altérites car elles décalaient localement cette surface.

L'incertitude (écart-type de krigeage) sur l'altitude de cette surface pour le bassin versant est représentée sur la planche 5 de l'annexe 7.

Cette carte montre que l'écart-type de krigeage est faible à proximité de chaque point servant de base à la modélisation (altitude de la base des altérites connue), tandis que cet écart-type augmente dans les secteurs où la densité de points est plus faible (notamment en limite du secteur étudié, et à proximité des failles).

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 de l'annexe 7.

L'épaisseur des altérites varie entre 0 et 28.1 m, avec une moyenne de 2.19 m.

Cette planche montre que le bassin de l'Aron est relativement bien pourvu en altérites.

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

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 du bassin étudié.

Les épaisseurs moyennes, pour chaque lithologie, ont été calculées sur le bassin (cf. Illustration 36) à partir des résultats d'inversion des sondages RMP réalisés.

Géologie	RMP	EPAISSEURS	
		Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	SIEFT1	14.60	78.40
Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	SIEFT2	12.71	86.93
Moyenne		13.66	82.67
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT3	9.64	79.40
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT4	14.60	74.44
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT5	24.28	67.22
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT6	13.51	77.03
Moyenne		15.51	74.52
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT7	9.30	93.04
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT8	9.14	79.40
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT9	16.91	75.59
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT10	37.69	53.85
Moyenne		18.26	75.47

Illustration 36 - 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 (bassin de l'Aron)

L'horizon fissuré supérieur, caractérisé par une porosité et une perméabilité maximales, présente une épaisseur moyenne comprise entre 13.7 et 18.3 m, sur le bassin de l'Aron.

Ces valeurs sont conformes aux résultats obtenus dans d'autres régions sur des lithologies comparables (Wyns et al., 2004).

Les épaisseurs obtenues pour l'horizon fissuré inférieur varient entre 74.5 et 82.7 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.

La 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 de l'annexe 7 : cette profondeur représente l'épaisseur approximative de l'aquifère d'altération.

Les valeurs varient entre 68.7 et 121.7 m, avec une moyenne de 92.68 m.

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

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.

Pour le bassin de l'Aron, la somme de l'ensemble, correspondant à l'épaisseur saturée de l'aquifère d'altération, est représentée sur la planche 8 de l'annexe 7.

Cette épaisseur varie entre 67.3 et 119.6 m, avec une moyenne de 90.65 m.

5.3. CALCUL DE LA RESERVE EN EAU SOUTERRAINE

5.3.1. Synthèse des mesures RMP

Les résultats de la campagne de sondages de Résonance Magnétique Protonique sont présentés dans l'annexe 6.

10 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 multicouches 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 dans l'illustration 37.

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 \times signal/bruit) par la somme des rapports signal/bruit.

Les résultats sont présentés dans l'illustration 37.

Géologie	RMP	signal/bruit	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDÉREES		
			Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	SIEFT1	0.43	0.52	0.86	0.14	0.22	0.37	0.06
Schistes et quartzites de Riadan-Renazé	SIEFT2	1.54	/	0.75	0.51	/	1.16	0.79
Moyenne			0.52	0.81	0.33	0.52	0.78	0.43
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT3	1.31	0.40	1.09	0.46	0.52	1.43	0.60
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT4	3.57	0.19	1.01	0.27	0.66	3.61	0.98
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT5	0.31	1.45	4.48	0.70	0.45	1.39	0.22
Schistes d'Angers-Traveusot	SIEFT6	1.07	2.41	1.90	1.14	2.58	2.03	1.22
Moyenne			1.11	2.12	0.64	0.67	1.35	0.48
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT7	0.65	/	6.85	1.52	/	4.46	0.99
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT8	0.64	/	4.72	0.18	/	3.02	0.11
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT9	0.44	2.16	3.86	0.52	0.95	1.70	0.23
Formation du Grès armoricain (schistes, grès, quartzites)	SIEFT10	1.26	1.46	5.10	3.36	1.84	6.43	4.24
Moyenne			1.81	5.14	1.40	1.64	5.22	1.86

Illustration 37 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Aron)

/ : les altérites sont i) soit absentes au droit du sondage, ii) soit dénoyées (l'altitude de la surface piézométrique est située en-dessous de l'altitude de la base des altérites).

Ce tableau permet de classer les formations géologiques du bassin de l'Aron par ordre de teneurs en eau décroissante de la manière suivante :

- La Formation du Grès armoricain (grès, quartzites, schistes), avec des teneurs en eau de 1.6 % pour les arènes, 5.2 % pour l'horizon fissuré supérieur et 1.9 % pour l'horizon fissuré inférieur (*), constitue la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'altérite argilo-sableuse à grains fins avec quelques blocs de grès résiduels est moyennement poreuse et l'horizon fissuré a une bonne teneur en eau moyenne liée à sa fracturation importante observée sur les affleurements de terrain (origine multiple probable : lors du plissement des couches, pendant la décompression et liée à la tectonique N150 et N25) ;
- Les schistes d'Angers-Traveusot : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau plus faibles de 0.7 %, 1.4 % et 0.5 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; les altérites sont argilo-sableuses à kaoliniques et l'horizon fissuré est moyennement riche en eau en raison d'une fracturation non négligeable et d'un pendage de stratification assez vertical (50-60°) favorisant l'expression de joints d'altération un peu ouverts ;
- Les schistes et quartzites de Riadan-Renazé présentent les teneurs en eau les plus faibles (0.5 %, 0.8 % et 0.4 %). Les altérites sont très argileuses (plus faible teneur en eau du bassin) et l'horizon fissuré a une teneur en eau moyenne liée à sa fracturation diffuse plus faible.

(*) Au niveau de la réalisation des cartes de volumes d'eau, la fracturation du Grès armoricain, qui n'est vraisemblablement pas liée à l'altération, sera assimilée à un horizon fissuré (supérieur et inférieur).

Les teneurs en eau des grès armoricain sont assez semblables à celles obtenues au niveau du bassin de l'Yvel (cf. rapport BRGM/RP-56318-FR).

Les teneurs en eau des formations d'Angers-Traveusot et de Riadan-Renazé sont assez semblables, néanmoins les schistes d'Angers-Traveusot ont un horizon fissuré supérieur légèrement plus fracturé procurant une porosité en grand légèrement plus forte par rapport à l'autre formation. Ceci peut s'expliquer par le débit local plus ou moins ardoisier des schistes, et le positionnement des schistes et quartzites de Riadan-Renazé au cœur d'un synclinal (la compression resserre la fracturation).

Les sondages RMP SIEFT3 et SIEFT6 montrent des teneurs en eau anormales au niveau de l'horizon fissuré inférieur (respectivement 1.6 et 5.5 %) qui pourraient s'expliquer par une structure aquifère à fort pendage (couloir de fracturation) existant localement à environ 40-50 m de profondeur et suivant la direction N140-150. En raison de l'aspect très local de ces phénomènes, la cartographie des volumes d'eau souterraine ne les prendra pas en compte.

5.3.2. Calcul de la carte de la réserve en eau souterraine

Pour le bassin de l'Aron et dans 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 ainsi exprimée en hauteur d'eau (ou lame d'eau).

Sur les 44.7 km² du bassin de l'Aron, les altérites (planche 9 de l'annexe 7) contiennent globalement un stock d'eau souterraine totalisant environ 0.6 millions de m³, avec des lames d'eau atteignant localement 0.22 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 10) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 20 millions de m³, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0.95 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 11) contient un stock d'eau encore plus important en raison de son épaisseur : 37.1 millions de m³, pour une lame d'eau maximale de 1.40 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 12) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 57.7 millions de m³, avec une lame d'eau maximale de 2.58 m.

5.3.3. Discussion et commentaires

Épaisseur de l'aquifère du bassin versant

La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 92.05 m, et saturé sur 90.09 m en moyenne, sur le bassin de l'Aron.

Le calcul est réalisé sur les 100 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP (cf. chapitre 4.3.1.). Le volume total d'eau souterraine est donc un peu sous-estimé par rapport à la réalité, malgré une caractérisation de la majeure partie de la quantité d'eau souterraine sur ces 100 premiers mètres (cf. atténuation franche des teneurs en eau mesurées par les RMP à 100 m de profondeur en annexe 6).

Néanmoins, la répartition des réserves en eau souterraine reflète largement la réalité.

Répartition de la réserve en eau souterraine sur le bassin versant

- **Répartition géographique**

Au sein du bassin de l'Aron et dans la tranche 0-100 m de profondeur, 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 celles des Grès Armoricaïn, et la formation comprenant le moins de réserve est celle de Riadan-Renazé.

- **Répartition dans les aquifères du sous-sol**

Sur le bassin de l'Aron, la répartition de l'eau souterraine au sein de l'aquifère multicouches montre qu'environ 99 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré (35 % dans l'horizon fissuré supérieur, 64 % dans l'horizon fissuré inférieur, et 1 % dans les altérites).

Ceci est principalement lié à la meilleure préservation de l'horizon fissuré, les altérites ayant été plus largement érodées sur le bassin (épaisseurs moyennes de 4.3 m), ainsi que par la position de la surface piézométrique au sein des horizons d'altération. En effet, sur 65 % du bassin de l'Aron, la surface piézométrique se situe au sein de l'horizon fissuré (contre 35 % pour les altérites). Par ailleurs, la teneur en eau des altérites est plus faible que celle de l'horizon fissuré supérieur.

Sur le bassin, la quantité d'eau souterraine contenue à proximité des couloirs de fracturation est considérée comme négligeable par rapport à la quantité présente dans l'aquifère d'altération. En effet, ce dernier est présent sur toute la superficie du bassin tandis les couloirs fracturés sont locaux et contiennent des volumes plus faibles.

Par ailleurs, il existe vraisemblablement des eaux souterraines en-dessous de l'horizon fissuré inférieur caractérisé par la méthode (cf. certains graphiques des teneurs en eau de l'annexe 6). En raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP (0-100 m), le volume de cette ressource n'est pas calculé et sa répartition n'est pas connue.

Incertitudes concernant le calcul du volume d'eau souterraine

Le krigeage a été retenu comme technique d'interpolation de la géométrie de deux interfaces : la surface piézométrique et la surface de base des altérites. Chaque krigeage a permis de quantifier l'incertitude associée à chaque interpolation.

A l'intérieur du bassin de l'Aron, les résultats sont les suivants :

- incertitude moyenne associée au calcul de l'altitude de la surface piézométrique : de 0 à 4.2 m, avec une moyenne de 2.1 m (rappel sur toute la zone d'étude : de 0 à 9.4 m, avec une moyenne de 2.2 m),
- incertitude moyenne associée au calcul de l'altitude de la base des altérites : de 1.1 à 9.3 m, avec une moyenne de 3.1 m (rappel sur la zone d'étude : de 1.1 à 12.9 m, avec une moyenne de 3.6 m).

La lame d'eau souterraine, sur le bassin de l'Aron, a été calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 92.05 m, et saturé sur 90.09 m en moyenne.

En tenant compte, au niveau de chaque grille du bassin versant, d'un niveau de nappe plus l'incertitude, puis d'un niveau de nappe moins l'incertitude (donc d'un aquifère respectivement plus saturé puis moins saturé), la lame d'eau totale a été recalculée. Les résultats ont montré une différence de +3.6 et -3.9 millions de m³. Un aquifère plus saturé comporte plus d'altérites mouillées, et un aquifère moins saturé dénoie les altérites et un peu l'horizon fissuré supérieur.

En tenant compte, au niveau de chaque grille du bassin, d'une altitude de la base des altérites plus l'incertitude, puis d'une altitude de la base des altérites moins l'incertitude, et en évaluant la nouvelle épaisseur mouillée des altérites, la lame d'eau totale a été recalculée. Les résultats ont montré une différence de +0.6 et -1.7 millions de m³. Une altitude de la base des altérites plus haute entraîne une plus grande épaisseur de fissuré mouillé sur le bassin (la lame d'eau est donc plus forte). Une altitude de la base des altérites plus basse permet d'obtenir une plus grande épaisseur d'altérites mouillées et un peu moins de fissuré mouillé (la lame d'eau totale diminue car la teneur en eau des altérites est plus faible que celle du fissuré).

Compte-tenu de ces calculs, l'incertitude moyenne associée au calcul du volume souterrain peut donc être évaluée à environ 2.5 millions de m³.

Les volumes des réserves en eau souterraine existantes sur les 44.7 km² du bassin de l'Aron sont donc estimés à 57.7 ± 2.5 millions de m³.

5.4. UTILISATIONS DES CARTES

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

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

Mise en évidence des formations géologiques favorables

Une étude statistique a été réalisée à partir des données de forages d'eau disponibles dans la BSS pour caractériser l'intérêt hydrogéologique des formations géologiques (cf. chapitre 2.2.3.). Celle-ci a mis en évidence l'intérêt de la Formation du Grès armoricain qui occupe toute la partie Nord du bassin de l'Aron. Les résultats statistiques des deux autres formations (Schistes de Traveusot et Formation de Riadan-Renazé) présentaient un intérêt un peu moins important.

La répartition des réserves en eau souterraine, dans la tranche 0-100 m de profondeur, (cf. chapitre 5.3.2.) et la perméabilité relative des formations géologiques, caractérisée par l'intérêt hydrogéologique de ces dernières, font apparaître la Formation du Grès armoricain comme formation géologique intéressante pour la recherche d'eau souterraine (cf. planche 12 de l'annexe 7) ; les deux autres formations comportant nettement moins d'eau souterraine.

Remarque et recommandation

Dans ce contexte de socle 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'envoyer 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 exploitables : les perméabilités les plus fortes seront obtenues dans des couloirs drainants liés à des fractures tectoniques (pouvant affecter la roche au-delà des 100 m de profondeur) 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 pour la recherche d'eau souterraine.

L'implantation de forages pour exploiter l'eau souterraine dans ce type de contexte passe donc par l'identification de ces fractures drainantes : les meilleurs débits de forage devraient être obtenus dans des fractures ouvertes traversant les zones de ressource en eau maximale.

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

Estimation du temps de vidange de l'aquifère

Pour estimer le temps de vidange des aquifères sur le bassin de l'Aron, il faut rapporter le volume de la réserve en eau souterraine au débit souterrain sortant du bassin.

La participation des eaux souterraines au débit de la rivière de l'Aron a été modélisée dans le cadre du projet SILURES Bretagne (rapport BRGM/RP-56457-FR et chapitre 2.2.4.). L'illustration 8 localise la superposition du bassin étudié (l'Aron à St-Sulpice-des-Landes) sur le bassin modélisé (l'Aron au Grand-Fougeray) au droit de la station hydrométrique (Bernardais, J7824010, superficie 118 km²).

Le bassin de l'Aron à St-Sulpice de la présente étude est contenu dans le bassin modélisé avec le logiciel GARDENIA[®].

La modélisation du projet SILURES Bretagne permet de calculer le débit souterrain participant à l'écoulement de la rivière. Cette valeur permet d'évaluer le volume d'eau souterraine évacué annuellement du bassin versant modélisé (cf. Illustration 38).

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	56.4	78.2	134.6	15 882 800	9 227 600
1997	53.6	57.7	111.3	13 133 400	6 808 600
1998	102.6	100.1	202.7	23 918 600	11 811 800
1999	100.4	126.9	227.3	26 821 400	14 974 200
2000	124	122.4	246.4	29 075 200	14 443 200
2001	380.6	290.6	671.2	79 201 600	34 290 800
2002	38.8	53.2	92	10 856 000	6 277 600
2003	141.4	142.6	284	33 512 000	16 826 800
			Moyenne	29 050 125	14 332 575

Illustration 38 - Evaluation du volume d'eau souterraine renouvelable annuellement sur le bassin de l'Aron (cf. rapport BRGM/RP-56457-FR)

Le volume moyen interannuel d'eau souterraine renouvelé est donc de 14 332 575 m³ pour l'Aron au Grand-Fougeray (période 1996-2003).

Ce volume a été rapporté à la superficie du bassin de l'Aron à St-Sulpice (superficie 44.7 km²) ; le résultat est le suivant : 5 436 662 m³.

Cette « règle de trois » peut être considérée comme valable au vu de la similitude de couverture géologique entre les deux bassins.

La cartographie de la réserve en eau souterraine effectuée au chapitre 5.2. a été extraite sur le bassin de l'Aron à St-Sulpice (44.7 km²). La réserve totale de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) représente un volume approximatif d'environ 57.7 millions de m³, ramené à une lame d'eau moyenne de 1.288 m.

Ce volume de réserve en eau souterraine existant sur le bassin peut être comparé au volume moyen d'eau souterraine renouvelable annuellement (5 436 662 m³ sur l'Aron à St-Sulpice) afin d'estimer le temps de vidange des stocks d'eau sur le bassin étudié.

La réserve totale en eau souterraine du bassin de l'Aron modélisé est donc vidangée en 10 ans et 7 mois.

Estimation du temps de renouvellement

Afin de calculer le temps de renouvellement de l'eau (temps qu'une goutte d'eau met à s'écouler du sol à la nappe, puis de la nappe à la rivière), l'épaisseur de la zone non saturée doit être connue pour calculer le temps de transit de l'eau entre la surface du sol et la surface de la nappe.

Une comparaison de la planche 2 (altitude de la surface piézométrique) avec l'altitude de la surface du sol (fournie par les MNT) permet de calculer la profondeur moyenne de la nappe qui est de 1.91 m sur l'Aron.

Dans la bibliographie (Gascuel et al. 1986, Mougin et al. 2012), la vitesse de circulation de l'eau dans la zone non saturée varie généralement entre 1.75 et 2.5 mètres/an.

En considérant une valeur moyenne de 2.125 m/an et la profondeur moyenne de la nappe sur le bassin, le temps de transit de l'eau entre la surface du sol et la surface de la nappe est de : 11 mois.

Le temps de renouvellement de l'eau souterraine qui en découle (temps de transit de l'eau dans la zone non saturée + temps de vidange de l'aquifère saturé) est d'environ : 11.5 ans (11 ans et 6 mois) pour l'Aron à St-Sulpice.

Ce temps est à prendre en compte pour évaluer la durée de reconquête de la qualité de l'eau souterraine et par conséquent de l'eau superficielle. La reconquête sera bien plus longue que 11.5 ans en raison des phénomènes de mélange d'eaux souterraines de qualités différentes : entre l'eau souterraine qui se vidange annuellement (zone saturée) et l'eau qui s'infiltre jusqu'à la nappe (zone non saturée).

6. Travail prévu pour la 3^{ème} étape du projet

La 3^{ème} étape du projet s'appuie sur les résultats de la 2^{nde} étape (étude de type « SILURES bassin versant »). A l'issue du travail de cartographie des volumes d'eau souterraine, il sera vérifié que le secteur de 25 km² situé au Nord du bassin versant de l'Aron⁸ présente des conditions favorables à l'exploitation des eaux souterraines situées dans les profils d'altération du socle (altérites et milieu fissuré). Si c'est bien le cas, une partie de ce secteur restreint à 10 km² dans les Grès Armoricaïn sera retenu comme zone d'étude de type « RAPSODI » sinon une autre zone devra être validée auprès des élus.

Durant la 3^{ème} étape du projet (2^{ème} phase de l'étude du bassin de l'Aron prévue de juillet 2014 à juin 2015), deux forages semi-profonds à 200-300 m de profondeur seront réalisés à l'intérieur de ce secteur de 10 km².

Auparavant, il faudra définir sur la zone d'étude, les secteurs fracturés semi-profonds favorables à l'obtention de débits intéressants pour l'exploitation des eaux souterraines.

L'objectif est d'implanter les forages semi-profonds dans des endroits cumulant les avantages mis en évidence par les deux étapes successives : eaux souterraines très présentes dans les altérites et le milieu fissuré (identification avec l'étape de type « SILURES bassin versant »), et dans le milieu fracturé semi-profond (identification avec l'étape de type « RAPSODI »). Ces ouvrages bénéficieront ainsi : de la présence d'une structure drainante (fracturation du socle assurant une bonne perméabilité), et d'une hauteur d'eau maximale dans l'aquifère d'altération (assurant une alimentation pérenne de cette structure drainante).

La réalisation des forages par une entreprise compétente sera financée par le SIEFT. Le BRGM assistera le SIEFT dans les démarches successives suivantes : positionnement des ouvrages et validation par les élus, consultation puis choix de l'entreprise, suivi des travaux de forage et rédaction d'un rapport de fin de travaux.

⁸ Secteur de 25 km² choisi par les élus du SIEFT à cheval sur les communes d'Ercée-en-Lamée et de Saint-Sulpice-des-Landes.

7. Conclusion

Ce rapport constitue l'état d'avancement de la première année du projet « Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau ». Ce projet s'intéresse donc à deux secteurs d'étude : le bassin Tertiaire du Matz sur la commune de Coësmes, et la partie du bassin versant de l'Aron située sur le territoire du SIEFT (superficie d'environ 45 km²).

Après avoir caractérisé la géométrie du bassin Tertiaire grâce à des reconnaissances de terrain (2 panneaux électriques et 1 sondage à la tarière), les volumes d'eau souterraine présents ont été estimés à un peu plus de 5 000 m³. Compte-tenu de la faible dimension du bassin Tertiaire du Matz (extension et profondeur), du faible volume d'eau souterraine disponible et de la nature argileuse de son remplissage (faible perméabilité), il apparaît que l'exploitation du bassin serait très peu rentable.

Le présent rapport détaille également l'avancement de la 1^{ère} année du projet (2013-2014) sur le bassin de l'Aron situé en zone de socle. Les travaux suivants ont été réalisés :

- cartographie de l'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle,
- examen de la contribution des eaux souterraines au débit de la rivière,
- cartographie et description des formations superficielles,
- réalisation de 13 sondages mécaniques à la tarière,
- réalisation et interprétation de 10 sondages géophysiques RMP,
- modélisation de la géométrie des réservoirs aquifères (milieu altéré et fissuré),
- édition d'une carte piézométrique,
- cartographie des volumes d'eau souterraine stockés (estimés à 57.7 ± 2.5 millions de m³).

La cartographie de la répartition spatiale des réserves en eau souterraine, réalisée dans le cadre de ce projet, contribue à orienter l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation dans les meilleures conditions de préservation de la qualité de la ressource. A ce titre, la Formation du Grès armoricain qui occupe toute la partie Nord du bassin de l'Aron montre un potentiel intéressant. Cette cartographie peut en outre constituer un atout majeur pour une politique de protection de la qualité des nappes et des eaux de rivières.

Le projet mené pour le compte du SIEFT se poursuit en 2014-2015 et il doit aboutir à la réalisation de deux forages d'eau semi-profonds à 200-300 m de profondeur.

8. Bibliographie

BALLARD J.F., BRUN J.P., DURAND J. (1986) - La discordance Briovérien-Paléozoïque inférieur en Bretagne Centrale : signature d'un épisode de distension ordovicienne. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 303, p. 1327-1332.

M. BALLEVRE, V. BOSSE, M-P. DABARD, C. DUCASSOU, S. FOURCADE, J-L. PAQUETTE, J-J. PEUCAT, P. PITRA (2013). Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche. Bull. Soc. géol. minéral. Bretagne, 2012-2013, (D), 10-11, 5-96

BALTASSAT J.M., GIRARD J.F., A. BONJOUR, D. LEQUIN (2012) – Caractérisation par sondage de Résonance Magnétique des Protons (RMP) des altérites de socle en région Limousin – Bassins versants de la Gartempe (Creuse), de la Doustre (Corrèze) et de la Roselle (Hte-Vienne). BRGM/RP-61419-FR, 154 p., 15 fig., 4 ann.

BAUER H., SAINT-MARC P., SCHROETTER J.M., MOUGIN B., PETELET-GIRAUD E., et DEWANDEL B. (2012). CINERGY : Etudes menées en 2011. Rapport BRGM/RP-60977-FR

BRUN J.-P., BALLARD J.-F. et LE CORRE C., 1991. Identification of Ordovician block-tilting in the Hercynian foldbelt of Central Brittany (France) : field evidence and computer models. Journal of Structural Geology 13, 419-429.

A. CARN-DHEILLY et E. THOMAS (2008) - RAPSODI - Recherche d'aquifères profonds dans le socle du département de l'Ille et Vilaine. Rapport final - BRGM/RP-56749-FR

DABARD M.-P. et SIMON B., 2011. Discordance des Séries Rouges Initiales sur le socle briovérien : exemple de la carrière des Landes. Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne (D) 8, 33-44.

DADET P., HERROUIN Y., LAVILLE P., PARIS F. (1987) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Bain-de-Bretagne (388) –Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Notice explicative par HERROUIN Y., DADET P., GUIGUES J., LAVILLE P., TALBO H. (1989), 82 p.

DURAND S. (1960) - Le tertiaire en Bretagne. Étude stratigraphique et tectonique. Thèse, Rennes et Mém. Soc. géol. Bretagne, n° 12, 389 p.

ESTÉOULE-CHOUX J. (1967) - Contribution à l'étude des argiles du Massif armoricain. Argiles des altérations et argiles des bassins sédimentaires tertiaires. Thèse, Rennes et Mém. Soc. géol. minéral. Bretagne, 1970, n° 14, 319p.

C. GASCUEL-ODOUX, P. MÉROT (1986). Variabilité du transfert de l'eau dans le sol : utilisation du traçage et analyse géostatistique. Journal of Hydrology, n°89, 93-107.

GIRARD J-F. (2011), ANR-PRECODD 2005 REMAPRO – Développement d'une méthodologie de cartographie 3D de la perméabilité des aquifères par REsonance MAGnétique PROtonique pour mieux gérer les sites pollués et prévoir le transfert des polluants. 6^{èmes} Journées Ecotechnologies 2011, ANR, ADEME, 8-10 Novembre 2011, Orléans.

GIRARD J-F., BERNARD J., TEXIER B. (2011) - Application of remote filtering to Magnetic Resonance Sounding using multi-channel data acquisition, SAGEEP Symposium on the

Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Charleston, South Carolina April 13, 2011.

GROS Y., LIMASSET O. (1984) - Déformations récentes dans les socles cristallins. Exemple du Massif armoricain. Doc. BRGM, n°84, p. 51-65.

GUMIAUX C., 2003. Modélisation du cisaillement hercynien de Bretagne centrale : déformation crustale et implications lithosphériques. Mémoires de Géosciences Rennes 106, 266 p.

HERROUIN Y., DADET P., GUIGUES J., LAVILLE P., TALBO H. (1989) Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Bain-de-Bretagne (388) – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 82 p. Carte géologique par DADET P., HERROUIN Y., LAVILLE P., PARIS F. (1987).

HERROUIN Y., RABU D., avec la collaboration de CHANTRAINE J., CHAUVEL J.J., ETIENNE H. (1990) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Châteaubriant (389) – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières, 51 p. Carte géologique par HERROUIN Y., RABU D., FOURNIGUET J. (1988)

HERROUIN Y., RABU D., FOURNIGUET J. (1988) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Châteaubriant (389) – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Notice explicative par HERROUIN Y., RABU D. et coll. (1990), 51 p.

KUKLAN S. et TALBO H. (1972) - Bassin Tertiaire de la Groussinière (Ille-et-Vilaine) - Compte-rendu du pompage d'essai réalisé du 12 avril 1972 au 19 avril 1972 - Rapport BRGM/72-SGN-175-BPL

LE CORRE C. (1977) - Le Briovérien de Bretagne centrale. Essai de synthèse lithologique et structurale. Bull. BRGM, 1, n°3, p. 219-254.

LEGCHENKO A., BALTASSAT J-M., BOBACHEV A., MARTIN C., ROBIN H., and VOUILAMOZ J-M., (2004), - Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization, Journal of Ground Water, vol. 42, Number 3, May-June 2004, pp. 363-373.

LOKE M.H. and BARKER R.D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152.

LOKE M.H. and BARKER R.D., 1996, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting, 44, 499-523.

MEYER, R., 1987, Paléolittorales et paléosols : L'empreinte du continent dans les séries sédimentaires, Manuels & Méthodes, BRGM Editions, n°13, 163 p.

B. MOUGIN, E. THOMAS, F. MATHIEU, R. BLANCHIN et R. WYNS (2005) - SILURES Bassins Versants - Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22) - Rapport final Année 2 - BRGM/RP-53742-FR

MOUGIN B., collaboration : CARN A., JEGOU J-P. et QUEMENER G. (2006) - SILURES Bretagne - Rapport d'avancement de l'année 4 - BRGM/RP-55001-FR

B. MOUGIN, J-M. BALTASSAT, R. BLANCHIN, E. PUTOT, J-M. SCHROETTER et R. WYNS (2008) - SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon - Rapport final - Année 2 - BRGM/RP-56318-FR

B. MOUGIN, D. ALLIER, R. BLANCHIN, A. CARN, N. COURTOIS, C. GATEAU, E. PUTOT, collaboration J-P. JEGOU, P. LACHASSAGNE, P. STOLLSTEINER et R. WYNS (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR

B. MOUGIN, J-M. BALTASSAT, R. BLANCHIN, F. MATHIEU, E. PUTOT, J-M. SCHROETTER, E. THOMAS and R. WYNS (2012) - Calculation of groundwater response times in eleven Brittany catchments. Groundwater dating meeting (GDAT), Rennes (France), 15-19 october 2012

OLLIVIER-PIERRE M.-F. (1980) – Etude palynologique (spores et pollens) de gisements paléogènes du Massif Armoricaïn. Stratigraphie et paléogéographie. Mém. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, 25, 239p.

QUESNEL F. (1996) – Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Doc BRGM, 263, 266 p.

ROQUES C. - Hydrogéologie des zones de faille du socle cristallin : implications en terme de ressources en eau pour le Massif Armoricaïn. 270 p. (2014) - Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1 soutenue le 22/11/2013 - Mémoire de Géosciences Rennes n°148

THOMAS E. (1999) – Evolution cénozoïque d'un domaine de socle : le Massif Armoricaïn. Thèse d'Université, Rennes 1, 126 p.

VOUILLAMOZ J-M., BALTASSAT J-M., GIRARD J-F., PLATA J. and LEGCHENKO A., (2007) - Hydrogeological experience in the use of MRS. Experiencia en la utilizacion de los SRM in Hidrogeologia, Boletín Geológico y Minero, vol. 118, num. 3, Julio-Septiembre 2007, pp.531-550.

WYNS R. (1991) – Evolution tectonique du bâti armoricaïn oriental au Cénozoïque d'après l'analyse des paléosurfaces continentales et des formations géologiques associées. Géol. de la France, 3, 11-42.

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.

WYNS R. & GUILLOCHEAU F. (1999) – Géomorphologie grande longueur d'onde, altération, érosion et bassins épicontinentaux., in Résultats et perspectives, LEDRU.P. (Ed), GéoFrance 3D - résultats et perspectives - ENS - Lyon - France - 23-24/11/1999, Documents BRGM, Orléans : Editions BRGM, N° 293, pp.103-108.

WYNS, R., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J. and MATHIEU F. (2004) - Application of proton magnetic resonance soundings for groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- Bull. Soc. Géol. Fr., t. 175, n°1, pp. 21-34



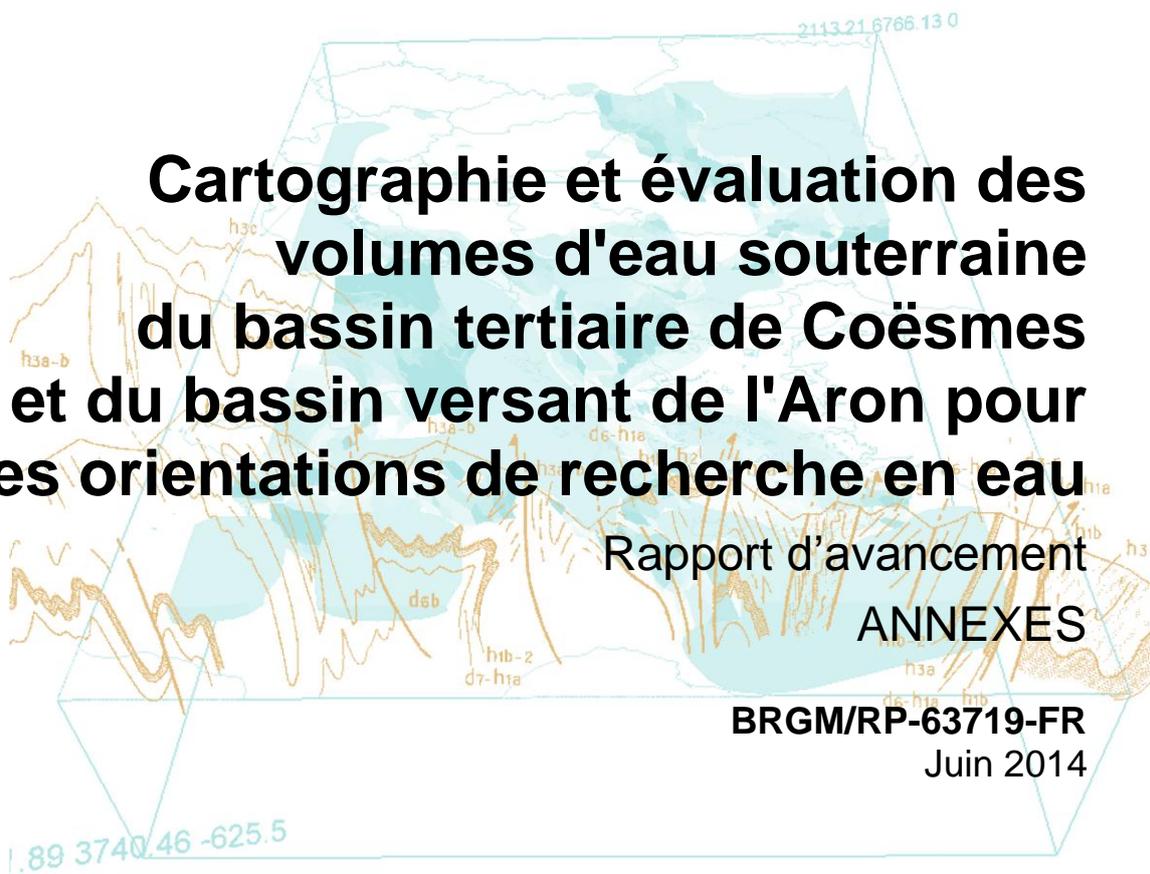
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 Rennes - France
Tél. : 02 99 84 26 70

Document public



Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du bassin versant de l'Aron pour des orientations de recherche en eau

Rapport d'avancement
ANNEXES

BRGM/RP-63719-FR
Juin 2014

SYNDICAT
INTERCOMMUNAL



Établissement public du ministère
chargé du développement durable



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Liste des annexes

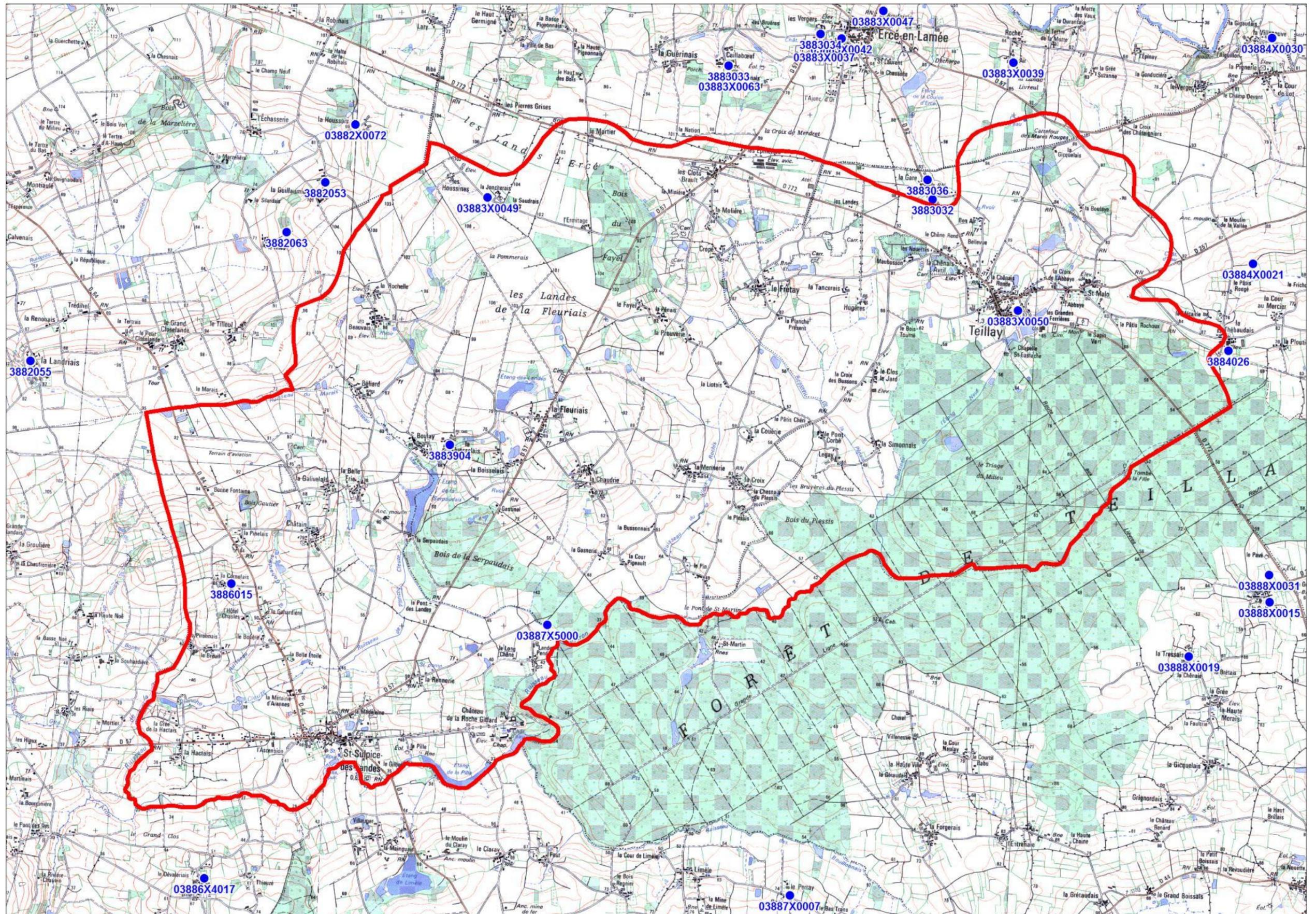
Annexe 1 Localisation des forages présents autour du bassin versant de l'Aron.....	5
Annexe 2 Principe du panneau électrique.....	9
Annexe 3 Paramètres d'inversion utilisés dans Res2DInv.....	17
Annexe 4 Coupes géologiques des sondages mécaniques Aron (A1 à A12)	21
Annexe 5 Principe des sondages par résonance magnétique des protons (RMP)	39
Annexe 6 Données mesurées et résultats d'interprétation des sondages RMP - Inversion automatique en quarante couches	49
Annexe 7 Planches A3	71
Annexe 8 Géostatistique et interpolation par la géostatistique	85

Liste des planches A3 (annexe 7)

Planche 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Aron)
Planche 2 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Aron)
Planche 3 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Aron)
Planche 4 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Aron)
Planche 5 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Aron)
Planche 6 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Aron)
Planche 7 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Aron)
Planche 8 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Aron)
Planche 9 - Lamme d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Aron)
Planche 10 - Lamme d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Aron)
Planche 11 - Lamme d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Aron)
Planche 12 - Lamme d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Aron)

Annexe 1

Localisation des forages présents autour du bassin versant de l'Aron



Localisation des forages présents autour du bassin de l'Aron

Annexe 2

Principe du panneau électrique

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (figure 1).

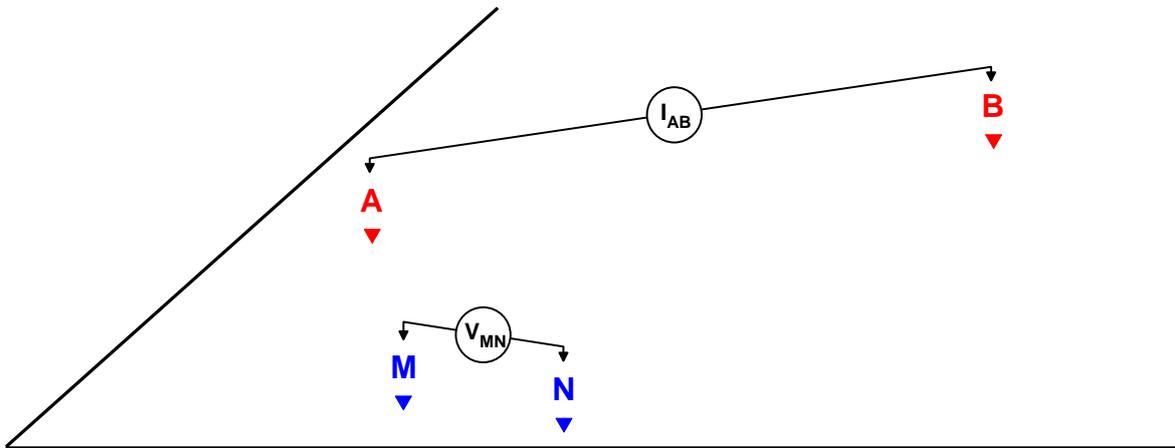


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (figure 2) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

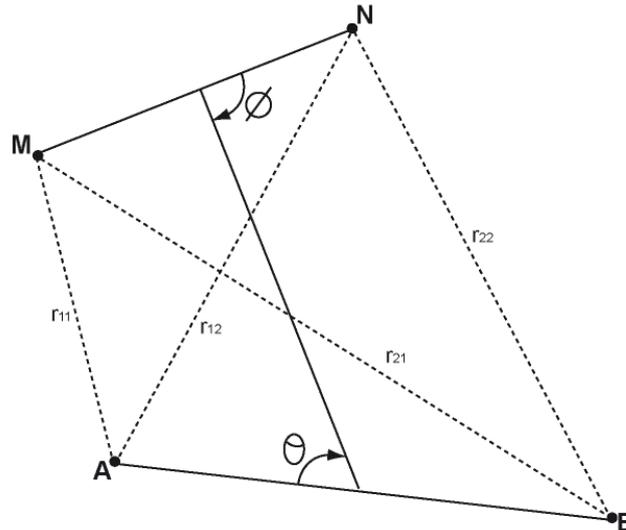


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$)

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔV . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (figure 3).

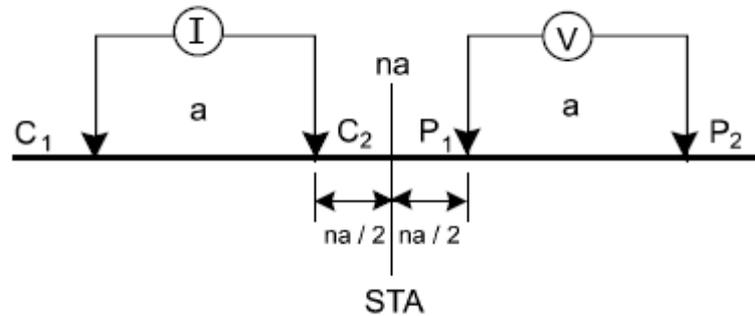


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte grâce à un meilleur rapport signal/bruit (figure 4).

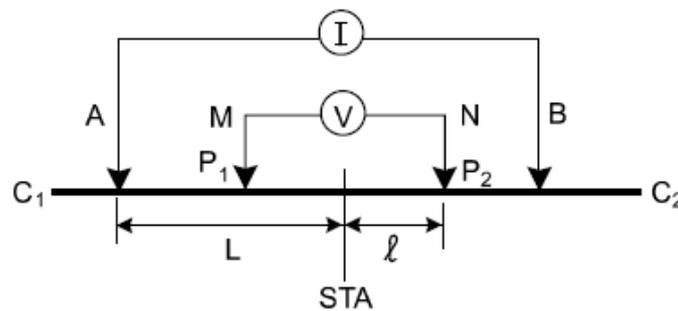


Figure 4 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (figure 5).

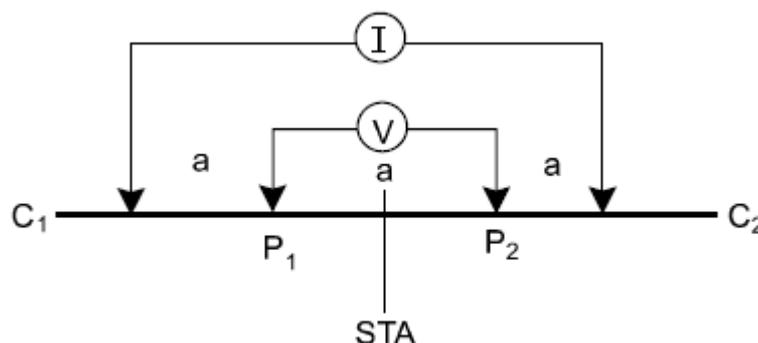


Figure 5 : Configuration de Wenner

Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (figure 6).

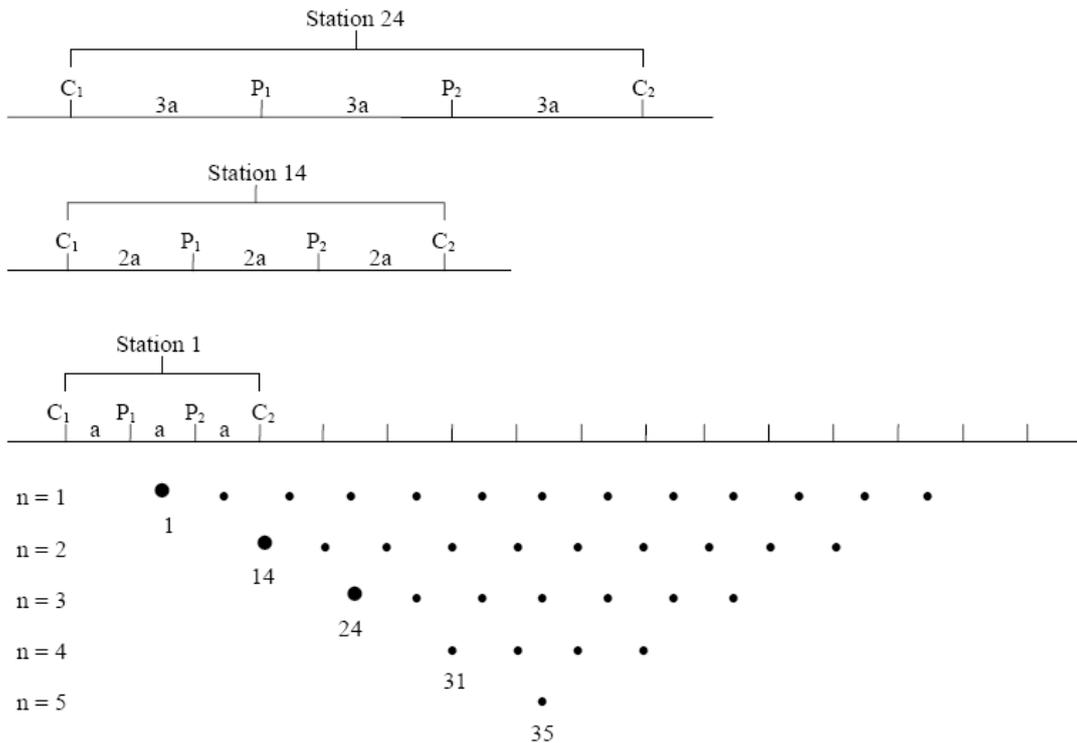


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

Traitement et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (figure 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (figure 8).

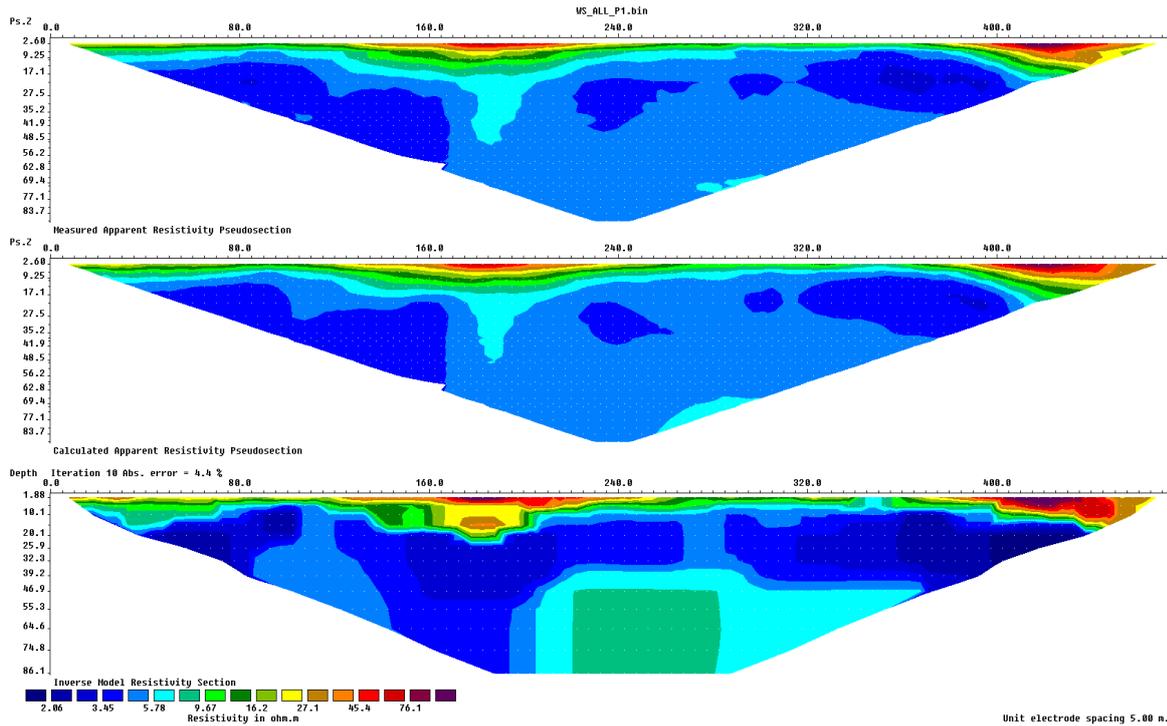


Figure 7: Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La section de résistivité « vraie » (illustration du bas de la figure 7), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

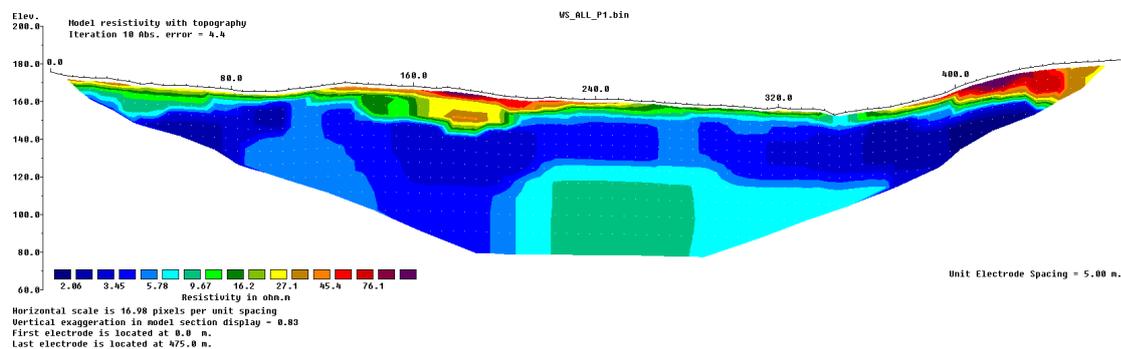


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

Applications

La tomographie électrique proche surface (< 100m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés.

- **Hydrogéologie (épaisseur d'aquifère), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier**
- Volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales
- **Géologie : identification de contact géologique ou tectonique**
- Environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère
- Risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain
- Dans le domaine minier (associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés
- En archéologie pour l'identification de structures enterrées
- Risques naturels : recherche de cavité en proche surface
- Géotechnique : qualité de fondations

Annexe 3

Paramètres d'inversion utilisés dans Res2DInv

Inversion settings
Initial damping factor (0.01 to 1.00)
0.1500
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
0.0300
Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always)
2
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to 20)
1.0000
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
0.5000
Number of iterations (1 to 30)
10
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
1.0000
Model for increase in thickness of layers(0=default 10, 1=default 25,
2=user defined)
2
Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)
4
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model
changes only,1=directly on model)
1
Reduce number of topographical datum points? (0=No,1=Yes. Recommend leave
at 0)
0
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)
1
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to end)
1
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton,
2=Mixed)
2
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)
1.0200
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do not
use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM with
inverse Swartz-Christoffel)
4
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
0.0100
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
0.0010
Allow number of model parameters to exceed datum points? (0=No, 1=Yes)
1
Use extended model? (0=No, 1=Yes)
0
Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very Severe)
2

```

Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)
2
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None,1=Least-squares,2=Smooth,3=Robust)
0
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.7500
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.0500
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)
1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRUPLE,
5=QUINTIPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
1.000
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT RESISTIVITY,
1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
0
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
0
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00100
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES(0=No,1=Yes)
1
Upper limit factor (10-50)
40.000
Lower limit factor (0.02 to 0.1)
0.025
Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
0
Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
1.00
Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
0
Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
2
Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
0.010
Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
0
Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
0

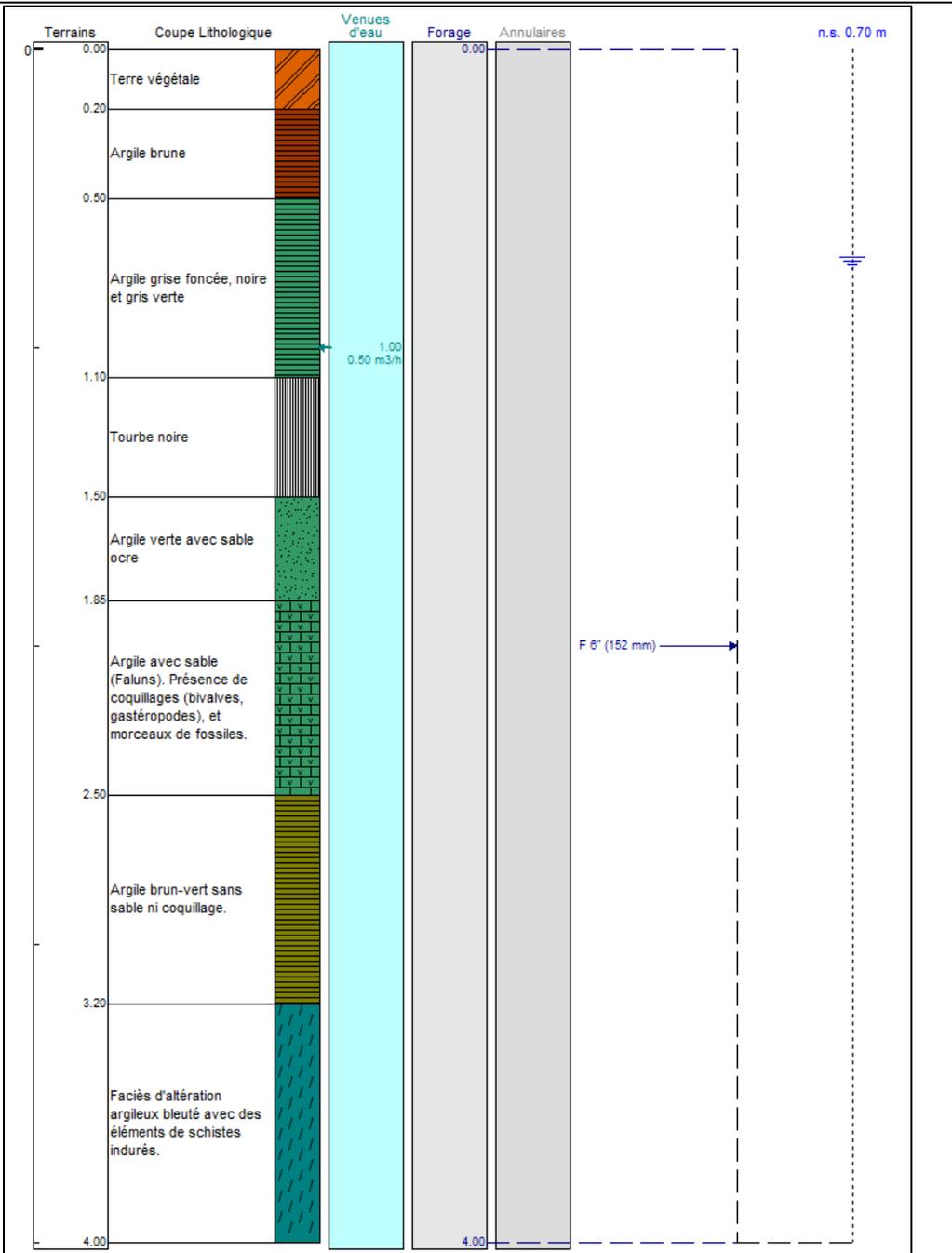
```

Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)
0.05000
Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
1
Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
0
Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
2.50000
Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
0
Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
1.000
Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
0
Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced (2
to 100)
5.0
Factor to control variation of borehole damping factor with distance (0.5
to 5.0)
1.0
Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer,
1=Incorporate water layer into the model)
0
Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary
freely,1=minimise variation)
1
Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
0
Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)
0
Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No,
1=Yes)
1
Force resistance value to be consistant with the geometric factor (0=No,
1=Yes)
0
Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
0
Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No,1=Yes)
1
Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
0.4000
Upper damping factor limit for active constraints
2.5000
Water resistivity variation damping factor
4.0000

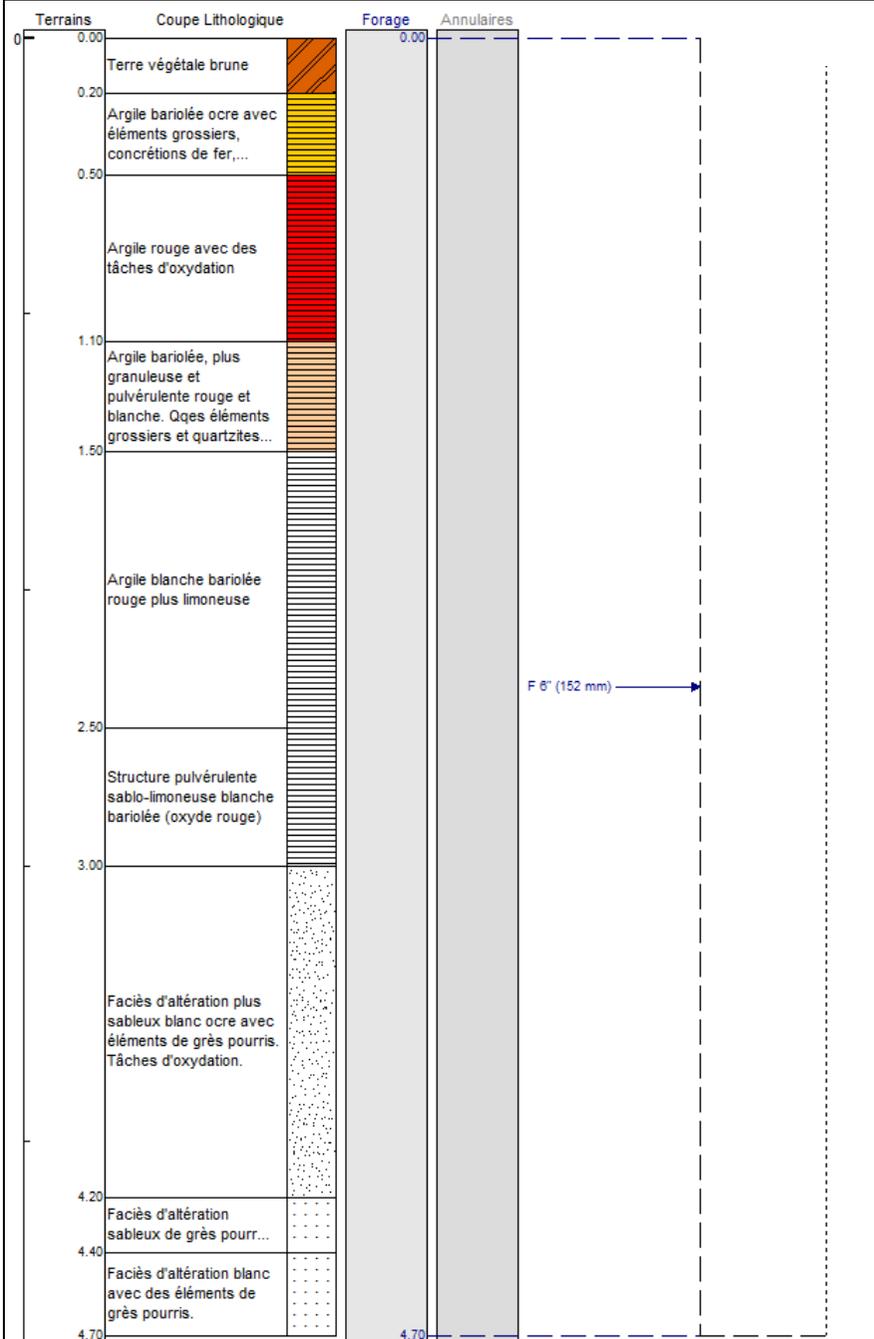
Annexe 4

Coupes géologiques des sondages mécaniques Aron (A1 à A12)

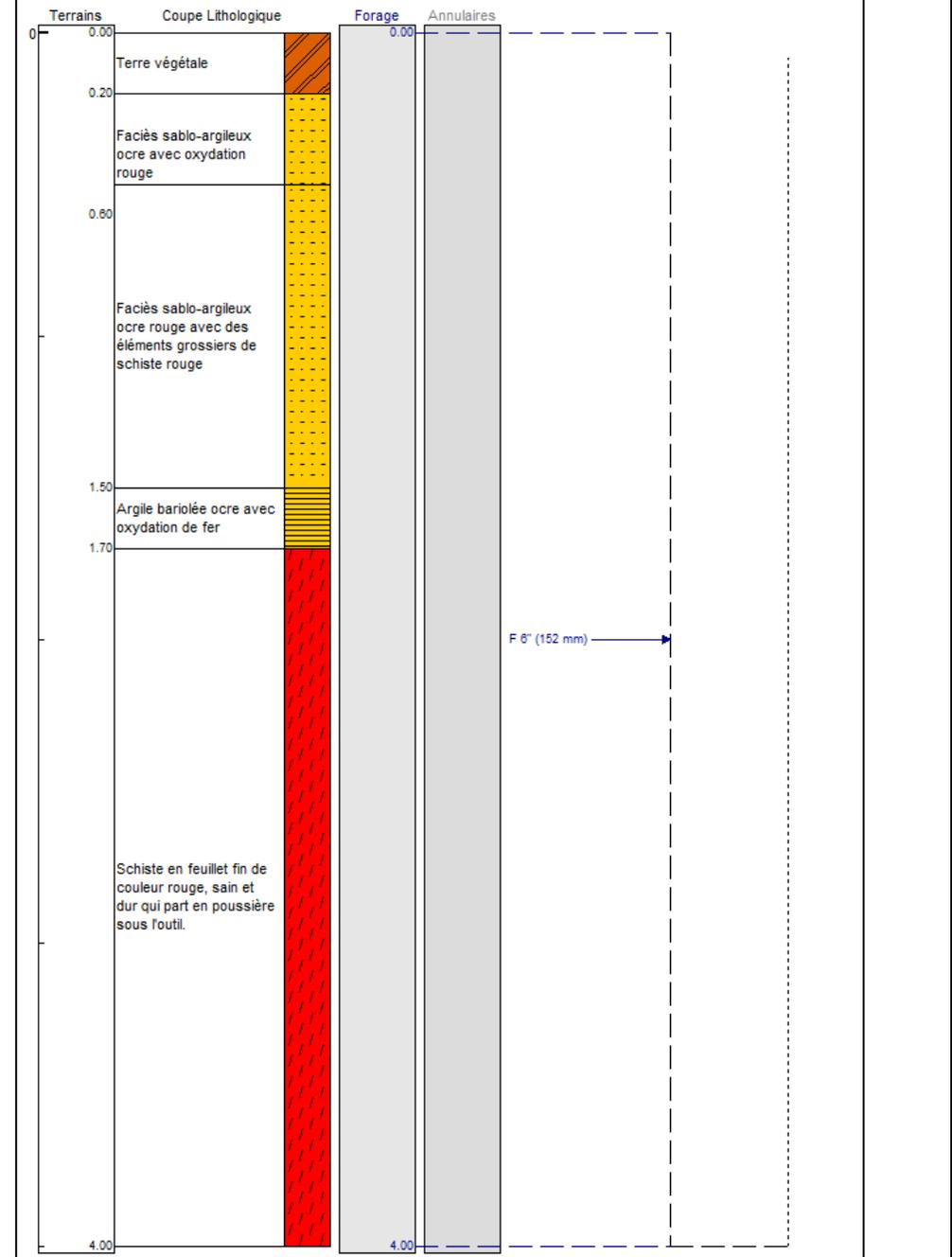
A1	Date : 11/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np: 0,70m	Nbre de tige : 2	
Heure début :	16h00	Heure de fin :	17h02	Profondeur 1ère arrivée d'eau : 1m	
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire		
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			Pliocène
1	0,20 - 0,50	Argile brune			
1	0,50 - 0,60	Argile grise foncée, noire			
1	0,60 - 1,10	Argile grise verte	Eau à 1m		Miocène
1	1,10 - 1,50	Tourbe noire			
2	1,50 - 1,85	Argile verte avec sable ocre			
2	1,85 - 2,50	Argile avec sable (Faluns). Présence de coquillages (bivalves, gastéropodes), et morceaux de fossiles.			Oligocène ?
2	2,50 - 3,20	Argile brun-vert sans sable ni coquillage			
2	3,20 - 4,00	Faciès d'altération argileux bleuté avec des éléments de schistes indurés	Refus machine à 4m		



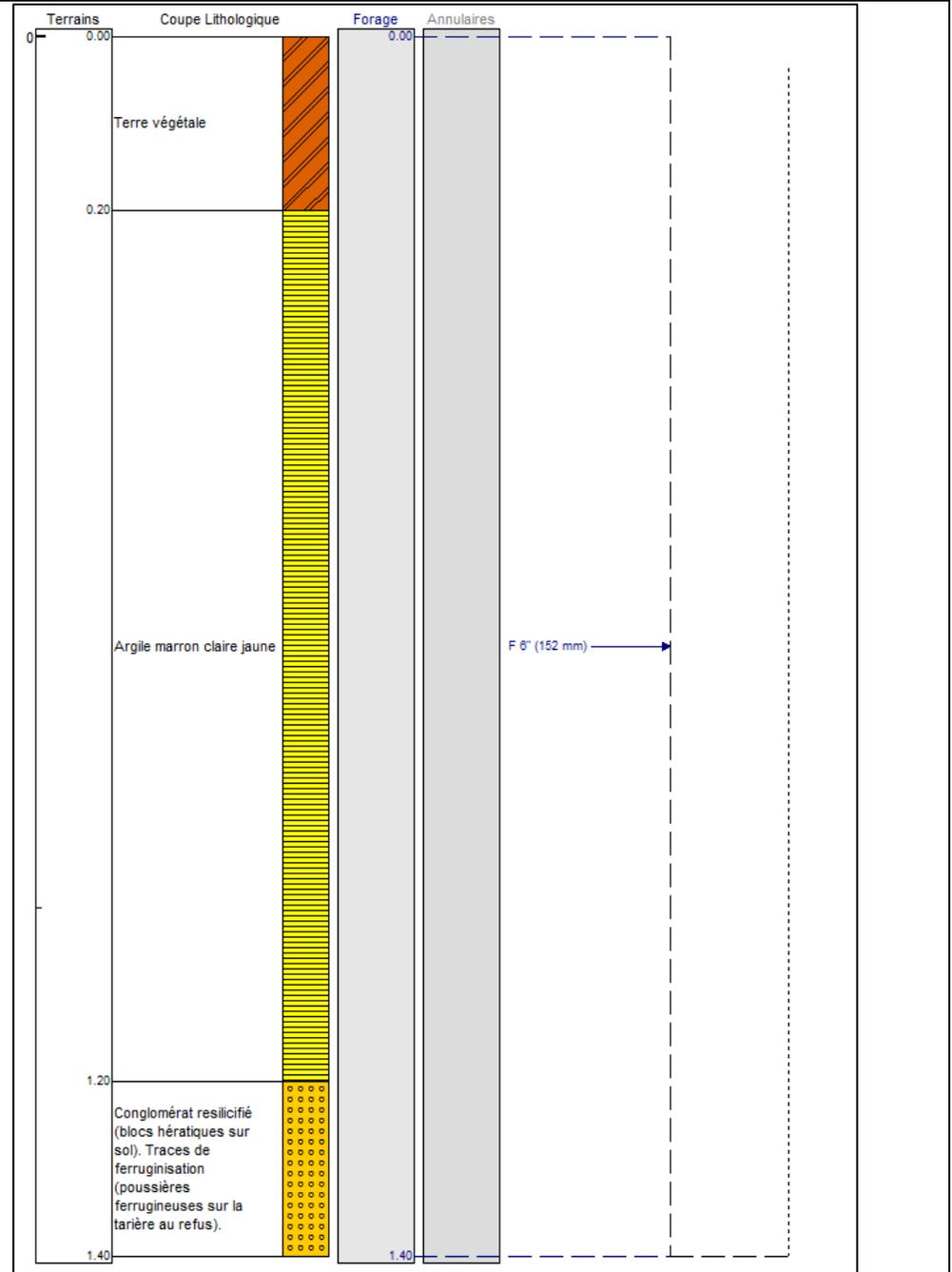
A2	Date : 09/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 3
Heure début :	13h45	Heure de fin :	14h45	Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire		
1	0,00 - 0,20	Terre végétale brune			
1	0,20 - 0,50	Argile bariolée ocre avec éléments grossiers, concrétions de fer, nodules de grès (diamètre centimétrique).			
1	0,50 - 1,10	Argile rouge avec des tâches d'oxydation			
1	1,10 - 1,50	Argile bariolée, plus granuleuse et pulvérulente rouge et blanche. Quelques éléments grossiers et quartzites ferrugineuses (diamètre centimétrique).			
2	1,50 - 2,50	Argile blanche bariolée rouge plus limoneuse			
2	2,50 - 3,00	Structure pulvérulente sablo-limoneuse blanche bariolée (oxyde rouge)			
2	3,00 - 4,20	Faciès d'altération plus sableux blanc ocre avec éléments de grès pourris. Tâches d'oxydation.			
3	4,20 - 4,40	Faciès d'altération sableux de grès pourris. Des éléments plus durs à 4,25 (grès plus sain).	Foration difficile à 4,25m		
3	4,40 - 4,70	Faciès d'altération blanc avec des éléments de grès pourris.	Refus à 4,70m		



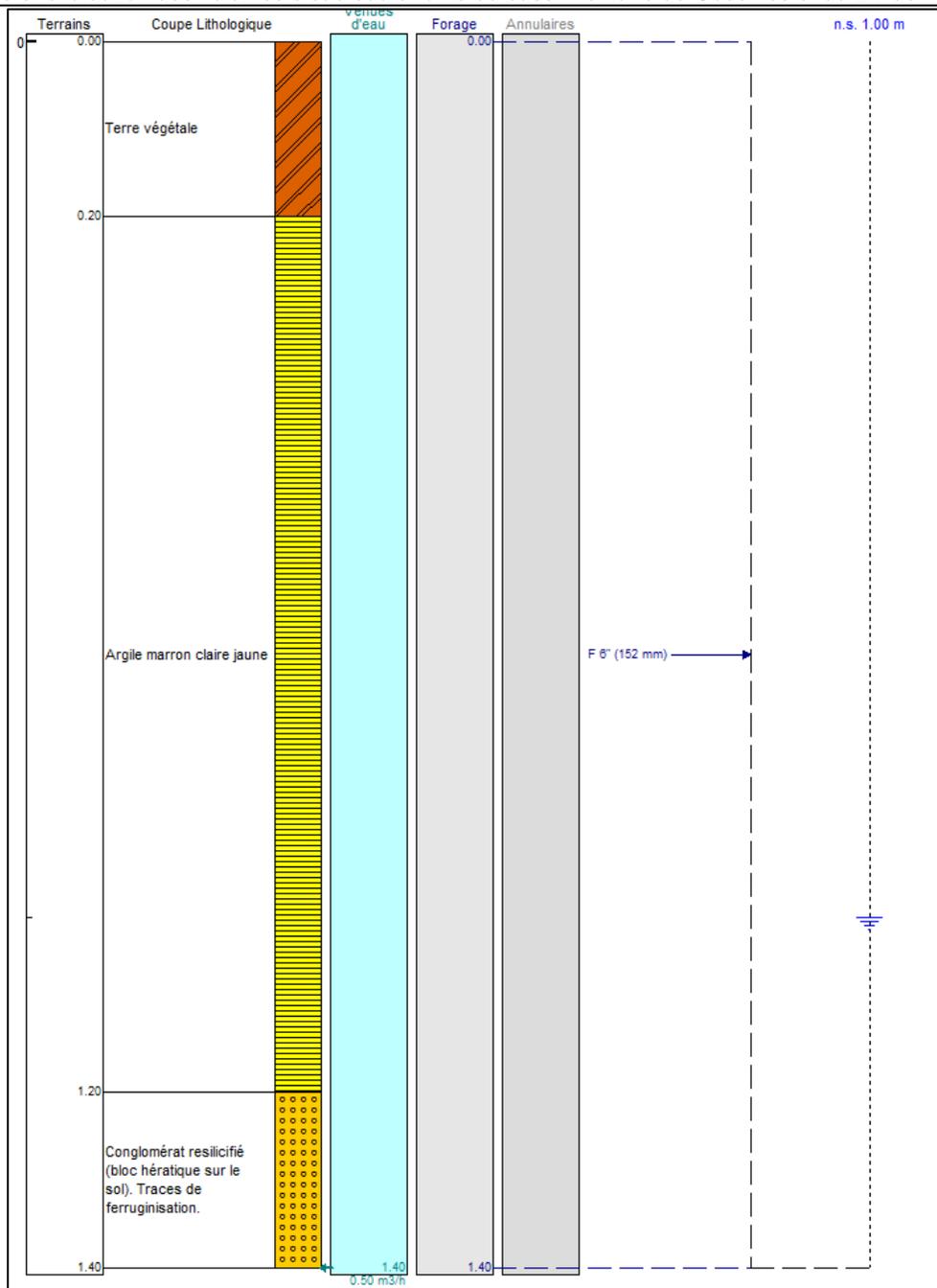
A3	Date : 12/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 2
Heure début :	09h40	Heure de fin :	10h20	Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 0,60	Faciès sablo-argileux ocre avec oxydation rouge			
1	0,60 - 1,50	Faciès sablo-argileux ocre rouge avec des éléments grossiers de schiste rouge			
2	1,50 - 1,70	Argile bariolée ocre avec oxydation de fer			
2	1,70 - 4,00	Schiste en feuillet fin de couleur rouge, sain et dur qui part en poussière sous l'outil.		Arrêt à 4m sur roche saine et dure	



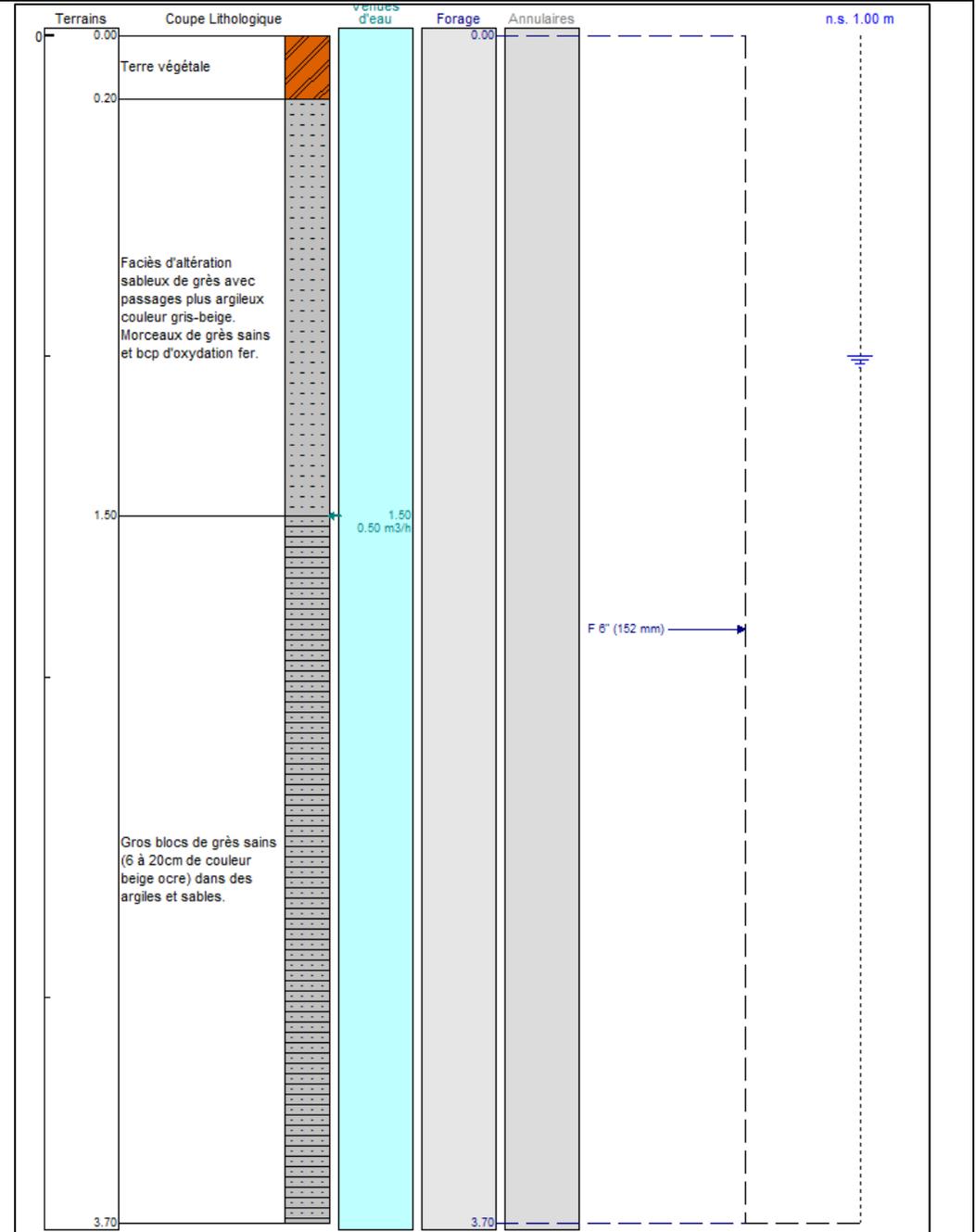
A4	Date : 12/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 1
Heure début :	08h45	Heure de fin :	09h05	Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie			Commentaire
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,20	Argile marron claire jaune			
1	1,20 - 1,40	Conglomérat resilié (blocs hératiques sur le sol). Traces de ferruginisation (poussières ferrugineuses sur la tarière au refus).			Refus à 1,40m



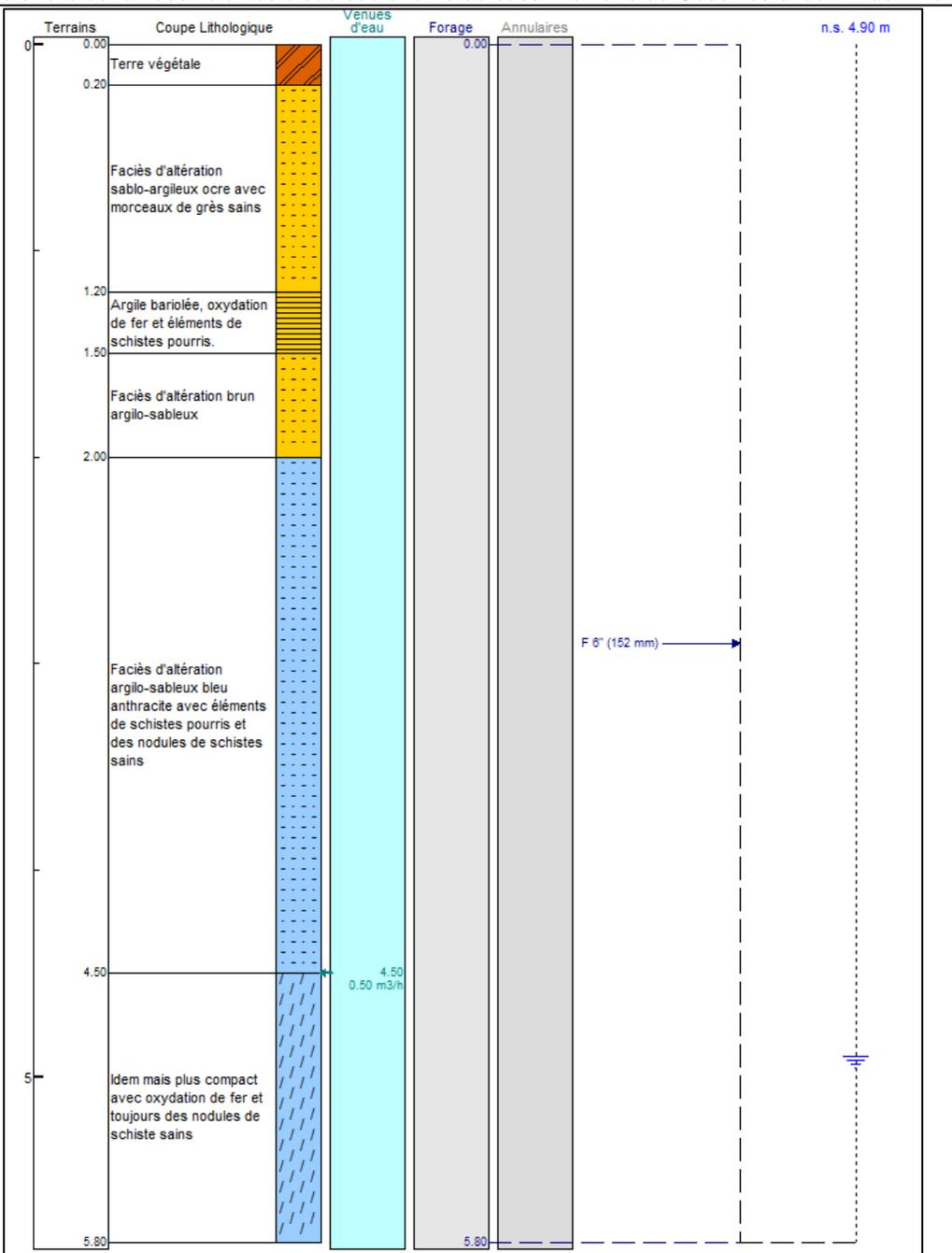
A4 bis	Date : 12/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np: 1,00m	Nbre de tige : 1
Heure début :	09h10	Heure de fin :	9h30	Profondeur 1ère arrivée d'eau : humidité à 1,4m
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire
1	0,00 - 0,20	Terre végétale		
1	0,20 - 1,20	Argile marron claire jaune		
1	1,20 - 1,40	Conglomérat resiliçifié (bloc h�ratique sur le sol). Traces de ferruginisation.		Refus � 1,40m



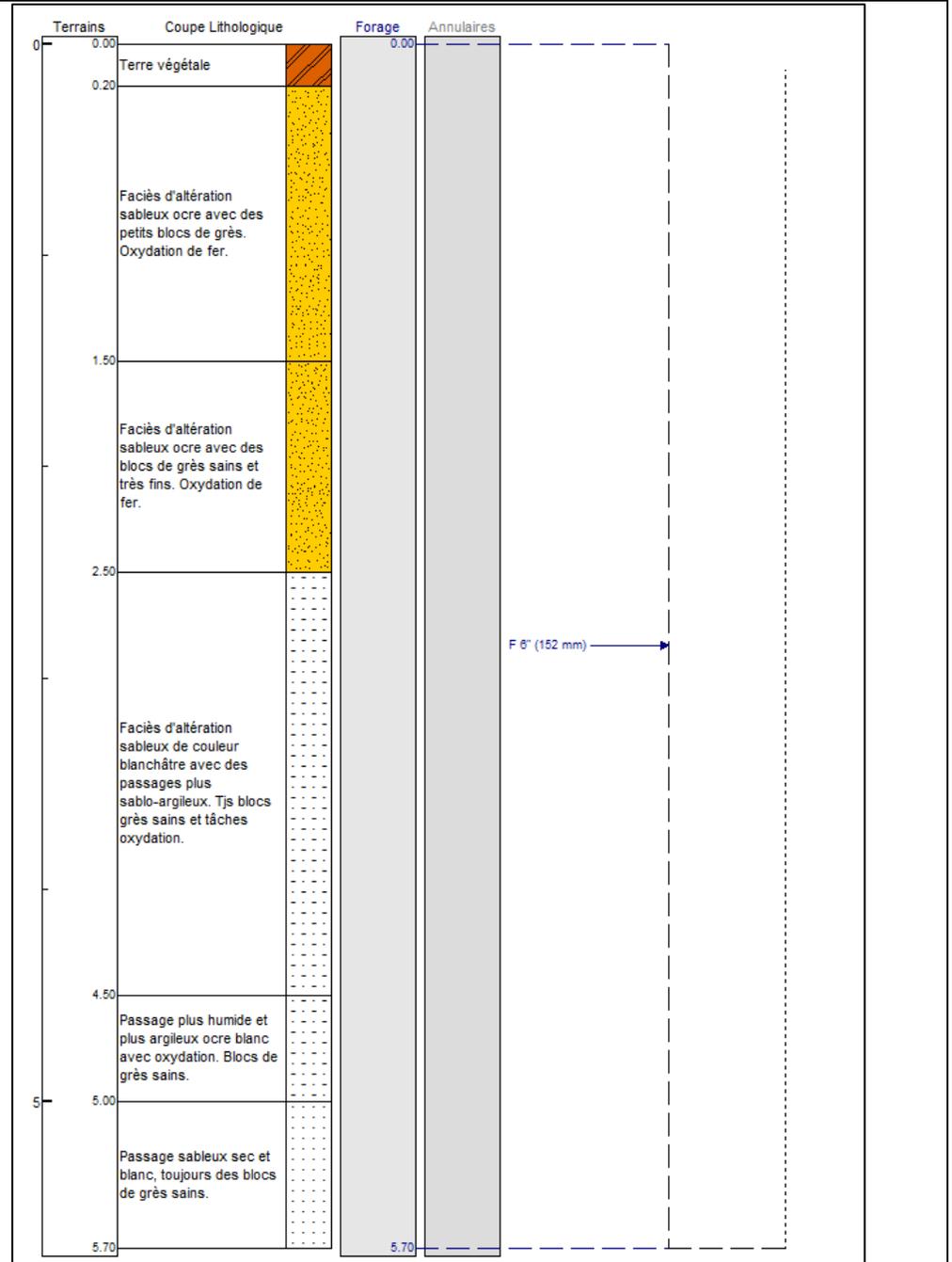
A5	Date : 10/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	1,00m?	Nbre de tige : 2
Heure début :	10h00	Heure de fin :	10h30	Profondeur 1ère arrivée d'eau : 1,50m	
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire		
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,50	Faciès d'altération sableux de grès avec des passages plus argileux de couleur gris-beige. Des morceaux de grès sains et beaucoup d'oxydation de fer.	Terrain mouillé à 1,50m.		
2	1,50 - 3,70	Gros blocs de grès sains (6 à 20cm de couleur beige ocre) dans des argiles et sables.	De 2 à 3m zone dure et passage plus tendre de 3 à 3,5m. Pas de mesure piézo (effondrement du trou). Refus à 3,70m.		



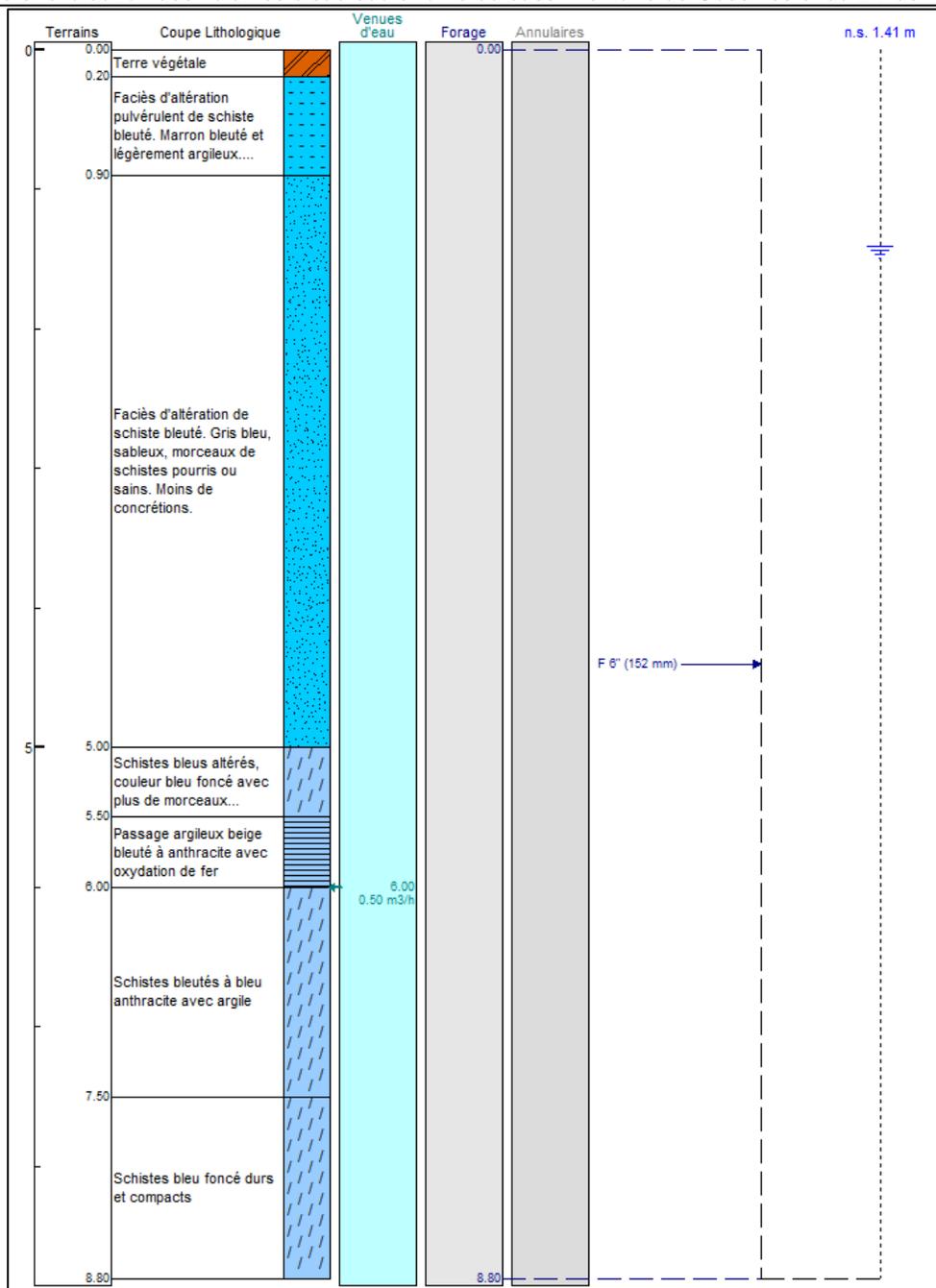
A6	Date : 10/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np: 4,90m	Nbre de tige : 3
Heure début :	15h30	Heure de fin :	16h40	Profondeur 1ère arrivée d'eau : Humidité à 4,20 / eau à 4,50m
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale		
1	0,20 - 1,20	Faciès d'altération sablo-argileux ocre avec morceaux de grès sains (en place ou charruage ?)		
1	1,20 - 1,50	Argile bariolée, oxydation de fer et éléments de schistes pourris.		
2	1,50 - 2,00	Faciès d'altération brun argilo-sableux		
2	2,00 - 4,50	Faciès d'altération argilo-sableux bleu anthracite avec éléments de schistes pourris et des nodules de schistes sains de plus en plus nombreux sur la fin. Traces d'oxydation.	Humidité à 4,20m. Eau à 4,50m.	
3	4,50 - 5,80	Idem mais plus compact avec oxydation de fer et toujours des nodules de schiste sains	Refus à 5,80m. 1ère mesure piézo 5,20 et 2ème mesure 4,90m (après 10 minutes).	



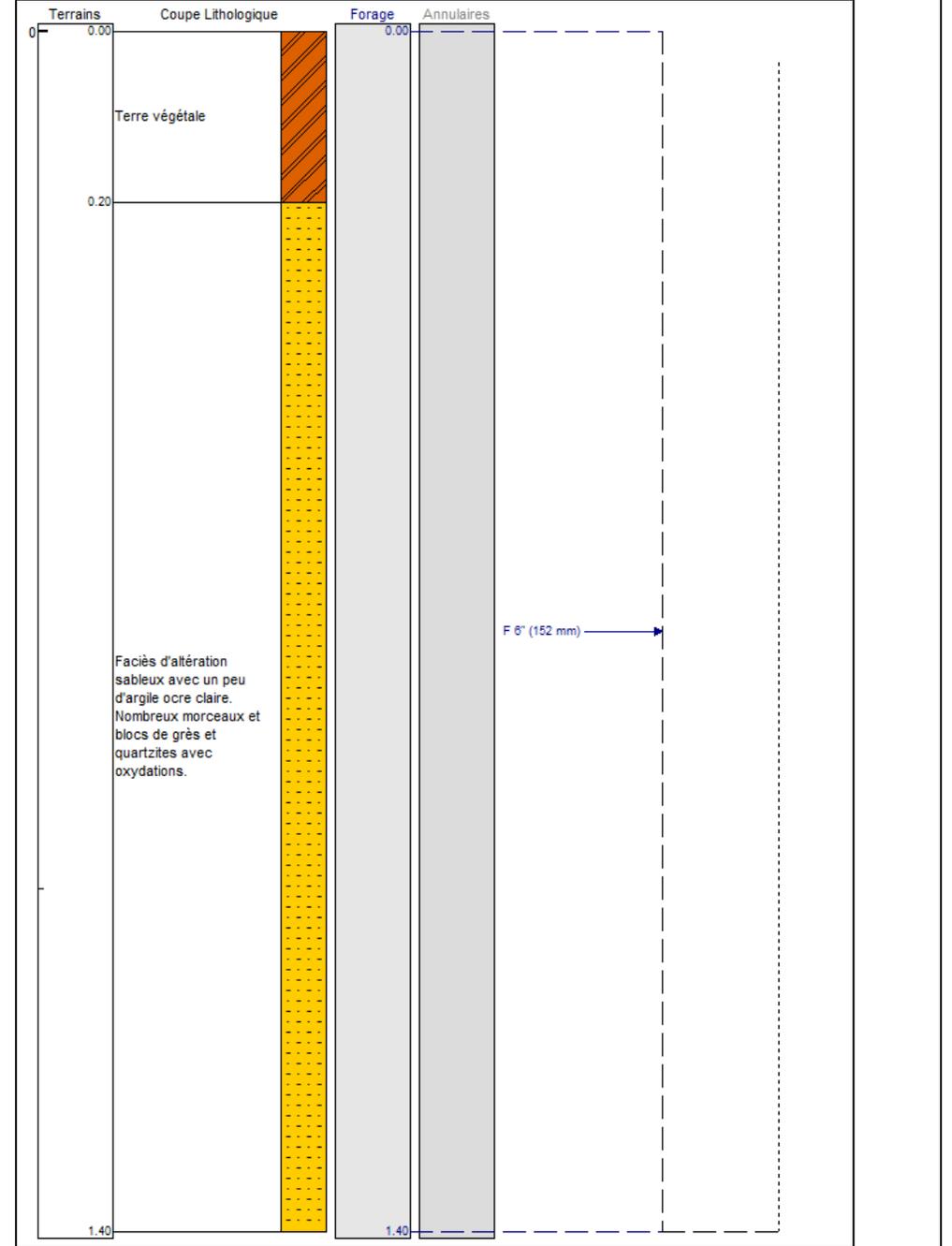
A7	Date : 10/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 3
Heure début : 08h50		Heure de fin : 09h25		Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie			Commentaire
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,50	Faciès d'altération sableux ocre avec des petits blocs de grès. Oxydation de fer.			
2	1,50 - 2,50	Faciès d'altération sableux ocre avec des blocs de grès sains et très fins. Oxydation de fer.			
2	2,50 - 4,50	Faciès d'altération sableux de couleur blanchâtre avec des passages plus sablo-argileux. Toujours des blocs de grès sains et tâches d'oxydation.			
3	4,50 - 5,00	Passage plus humide et plus argileux ocre blanc avec oxydation. Blocs de grès sains.			
3	5,00 - 5,70	Passage sableux sec et blanc, toujours des blocs de grès sains.			Refus à 5,70m



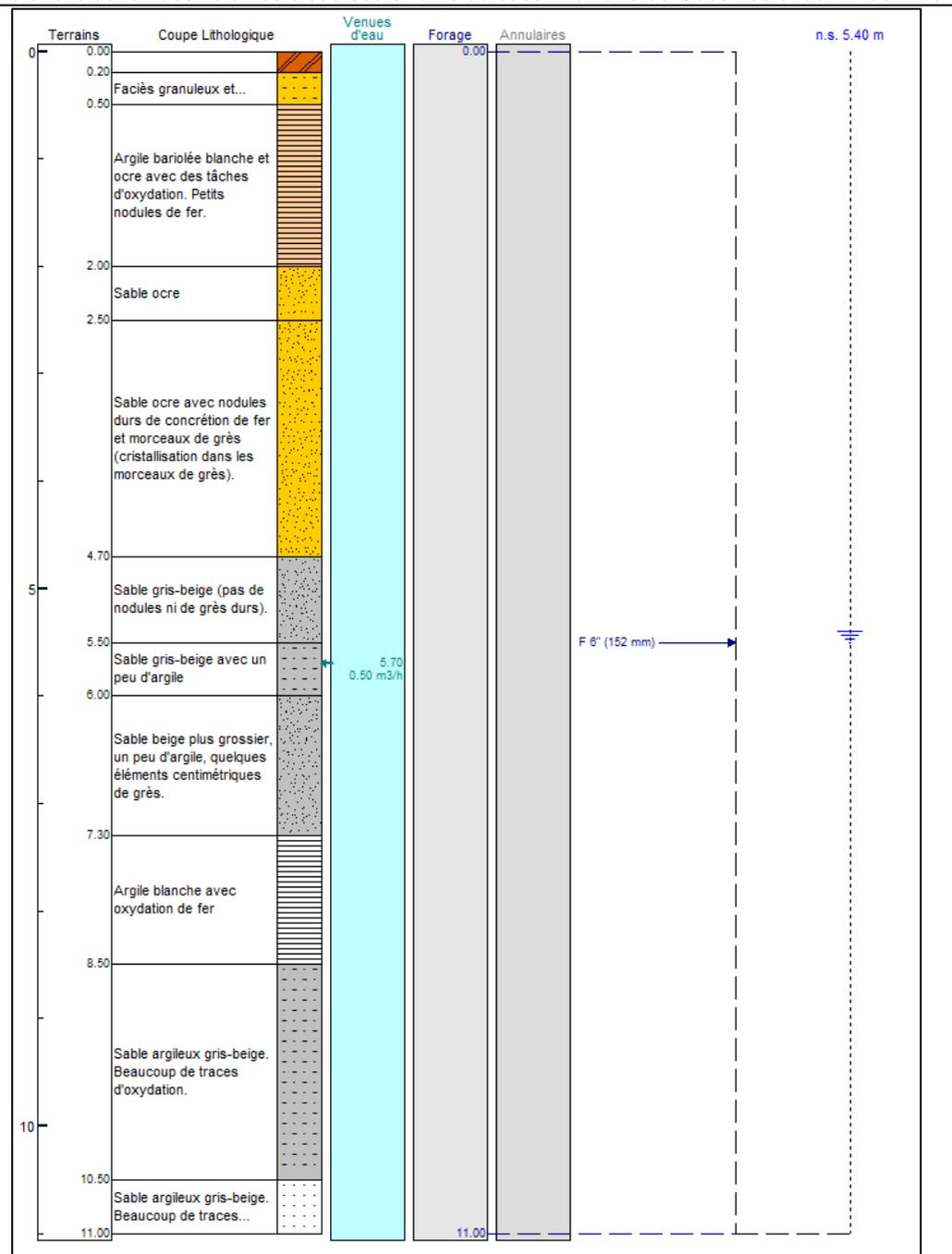
A8	Date : 09/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	1,41m	Nbre de tige : 4
Heure début :	15h30	Heure de fin :	16h30	Profondeur 1ère arrivée d'eau : 6m	
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 0,90	Faciès d'altération pulvérulent de schiste bleuté. Marron bleuté et légèrement argileux. Traces de rouille et concrétions noires.			
1	0,90 - 1,50	Faciès d'altération de schiste bleuté. Gris bleu, sableux, morceaux de schistes pourris. Moins de concrétions.			
2	1,50 - 2,00	Idem mais plus de morceaux de schistes non altérés de diamètre centimétrique			
2	2,00 - 3,00	Idem mais plus de morceaux sains gris bleutés et sables			
2	3,00 - 4,50	Idem schistes bleutés altérés, sableux avec morceaux sains.			
3	4,50 - 5,00	Idem			
3	5,00 - 5,50	Schistes bleus altérés, couleur bleu foncé avec plus de morceaux argileux.			
3	5,50 - 6,00	Passage argileux beige bleuté à anthracite avec oxydation de fer		Traces d'humidité à 6m	
3	6,00 - 7,50	Schistes bleutés à bleu anthracite avec argile			
4	7,50 - 8,80	Schistes bleu foncé durs et compacts		Refus à 8,80m	



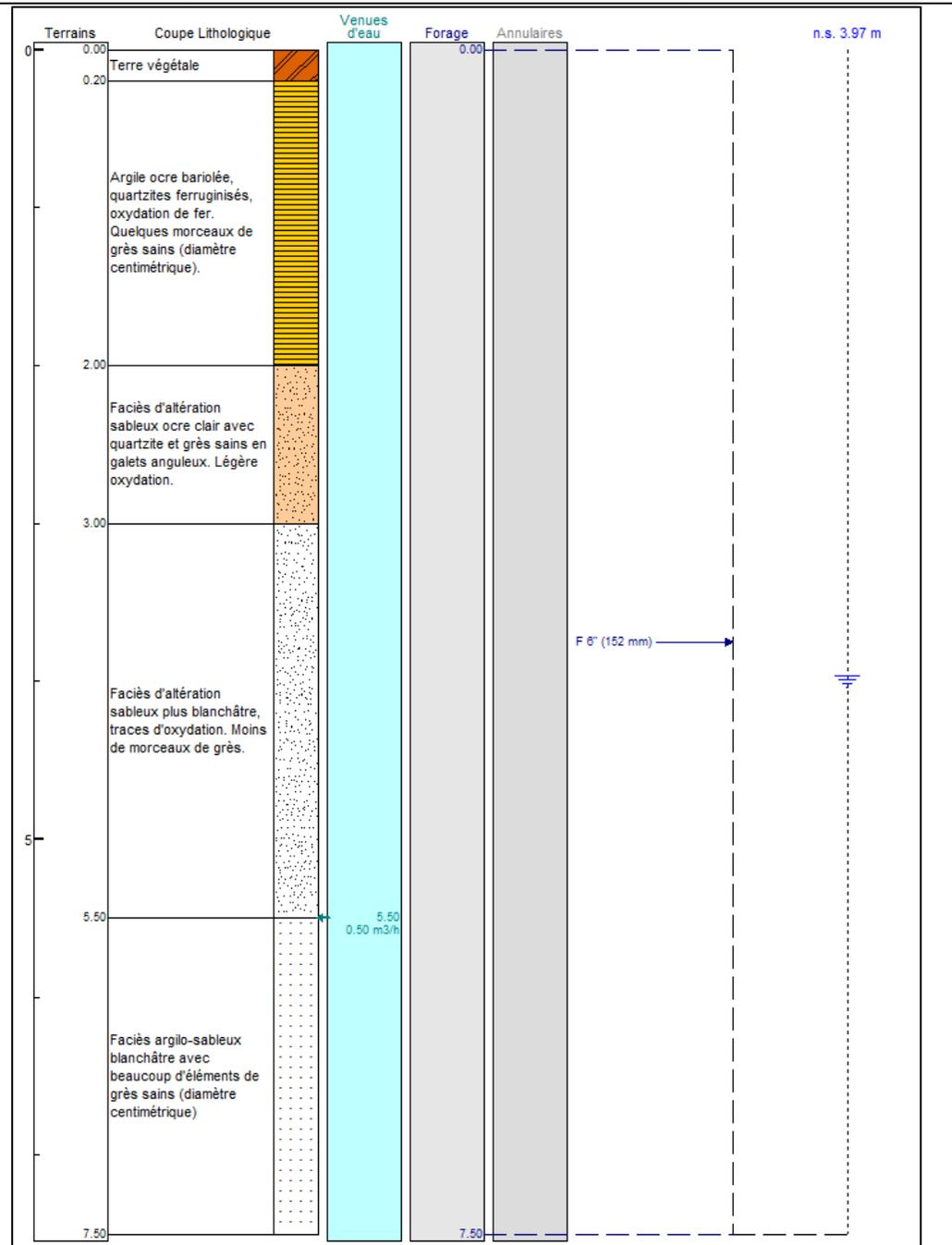
A9	Date : 11/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 1
Heure début :	10h20	Heure de fin :	10h35	Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,40	Faciès d'altération sableux et granuleux avec un peu d'argile ocre claire. Très nombreux morceaux et blocs de grès et quartzites avec oxydations et concrétions de fer.		Refus à 1,40m	



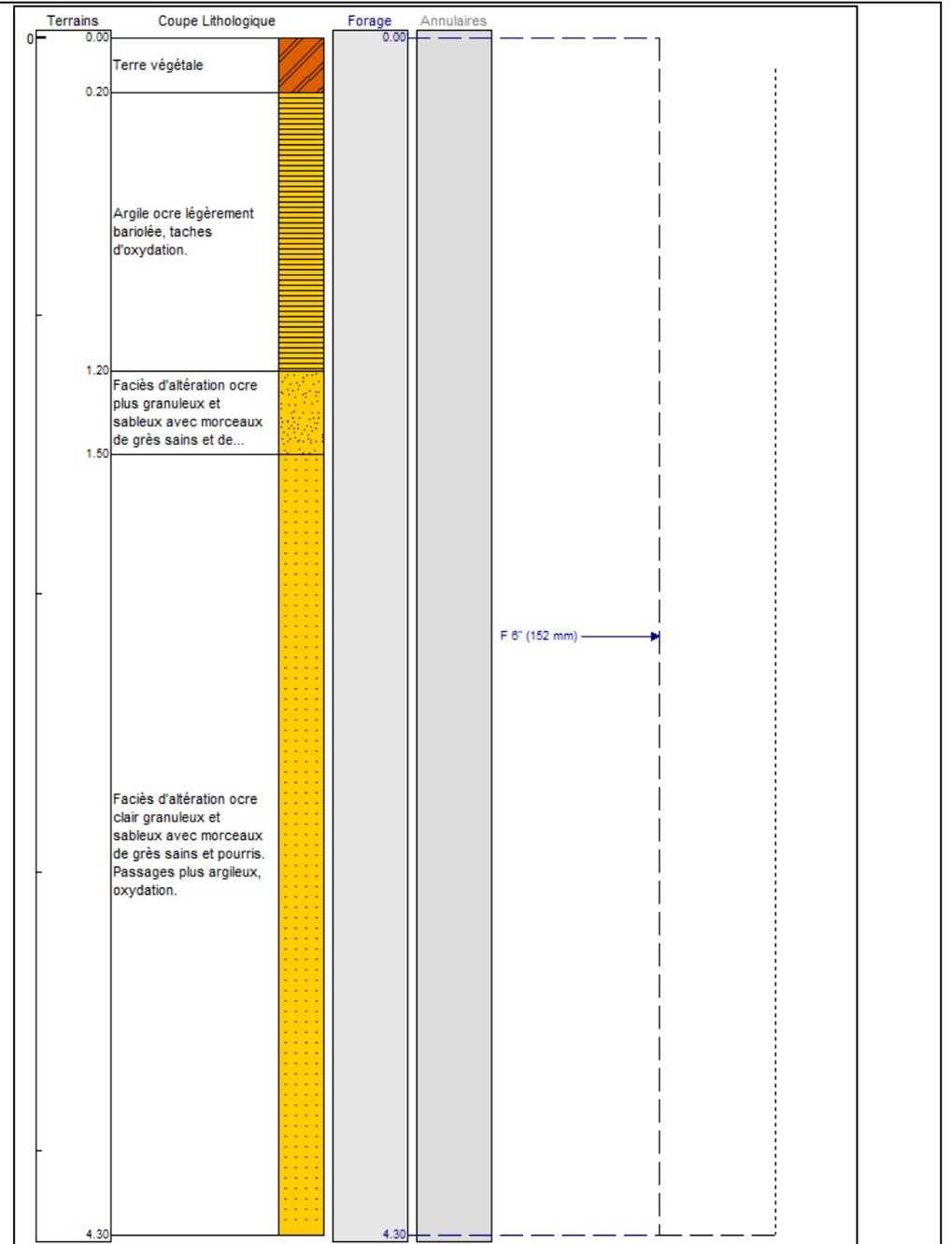
A9 bis	Date : 11/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np: 5,40m	Nbre de tige : 5
Heure début :	10h40	Heure de fin :	13h00	Profondeur 1ère arrivée d'eau : 5,70m
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale		
1	0,20 - 0,50	Faciès granuleux et sableux ocre avec un peu d'argile. Nodules de fer (diamètre 6 à 7cm) et morceaux de grès sains (quartzite).		
1	0,50 - 1,50	Argile bariolée blanche et ocre avec des tâches d'oxydation. Petits nodules de fer.		
2	1,50 - 2,00	Idem		
2	2,00 - 2,50	Sable ocre		
2	2,50 - 4,50	Sable ocre avec nodules durs de concrétion de fer et morceaux de grès (cristallisation dans les morceaux de grès).		
3	4,50 - 4,70	Sable ocre		
3	4,70 - 5,50	Sable gris-beige (pas de nodules ni de grès durs).		
3	5,50 - 6,00	Sable gris-beige avec un peu d'argile	Arrivée d'eau à 5,70m	
3	6,00 - 7,30	Sable beige plus grossier, un peu d'argile, quelques éléments centimétriques de grès.		
3	7,30 - 7,50	Argile blanche avec oxydation de fer		
4	7,50 - 8,50	Idem		
4	8,50 - 10,50	Sable argileux gris-beige. Beaucoup de traces d'oxydation.		
5	10,50 - 11,00	Sable argileux gris-beige. Beaucoup de traces d'oxydation et des nodules en galets ferreux.	Arrêt à 11m. L'outil racle, la roche saine ne semble pas encore atteinte mais avancement impossible.	



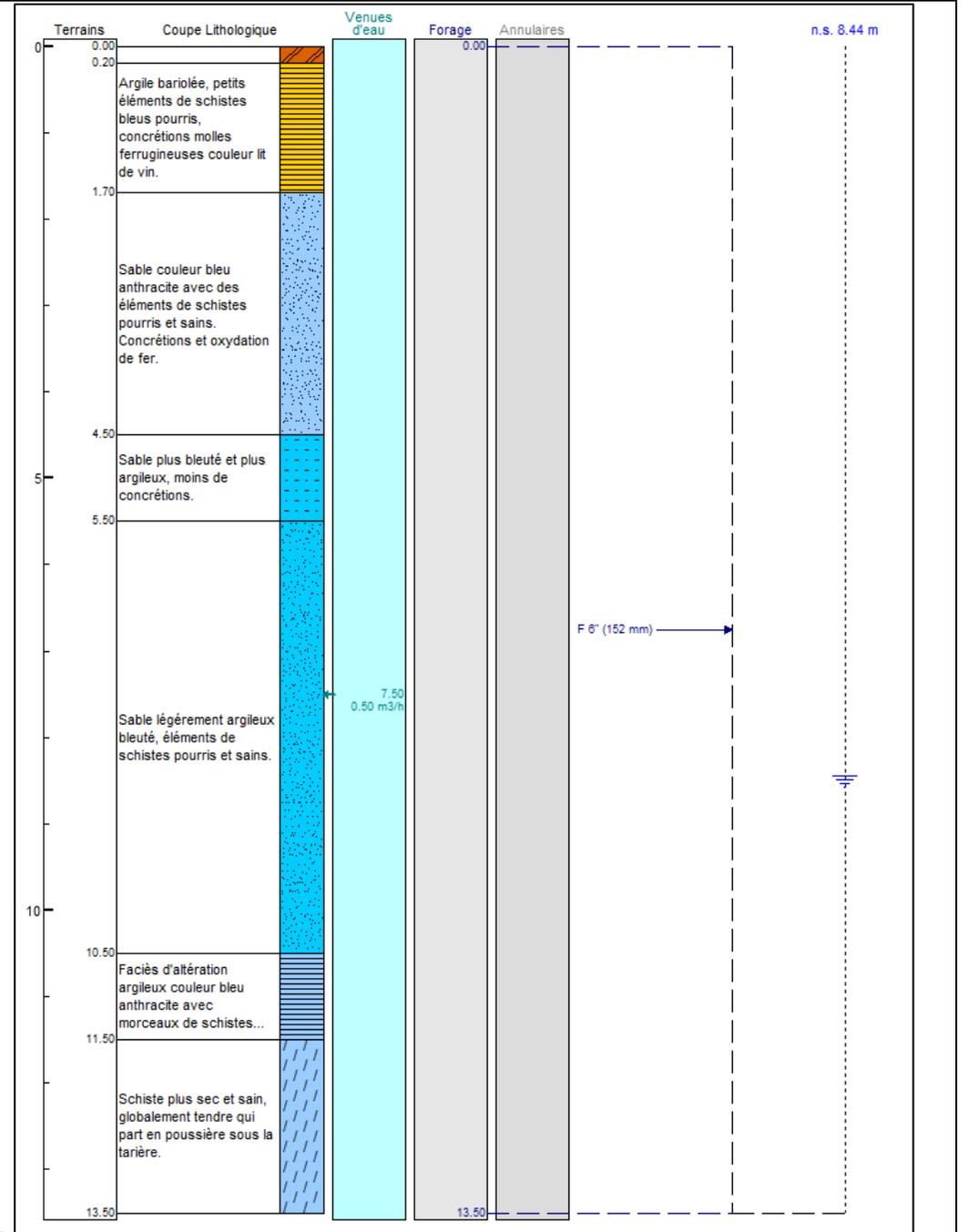
A10	Date : 10/12/2013 11/12/13	Diamètre hélice 152mm	Np:	3,97m	Nbre de tige : 3
Heure début : 17h20 le 10/12/13		Heure de fin : 08h50 le 11/12/13		Profondeur 1ère arrivée d'eau : 5,50m	
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,50	Argile ocre bariolée, quartzites ferruginisés, oxydation de fer. Quelques morceaux de grès sains (diamètre centimétrique).			
2	1,50 - 2,00	Idem			
2	2,00 - 3,00	Faciès d'altération sableux ocre clair avec quartzite et grès sains en galets anguleux. Légère oxydation.			
2	3,00 - 4,50	Faciès d'altération sableux plus blanchâtre, traces d'oxydation. Moins de morceaux de grès.			
3	4,50 - 5,50	Idem		Eau à 5,50m	
3	5,50 - 7,50	Faciès argilo-sableux blanchâtre avec beaucoup d'éléments de grès sains (diamètre centimétrique)		Refus à 7,50m	



A11	Date : 11/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np:	sec	Nbre de tige : 2
Heure début :	09h10	Heure de fin :	09h40	Profondeur 1ère arrivée d'eau :	
Tige	Profondeur	Lithologie		Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale			
1	0,20 - 1,20	Argile ocre légèrement bariolée, taches d'oxydation.			
1	1,20 - 1,50	Faciès d'altération ocre plus granuleux et sableux avec morceaux de grès sains et de quartzite (diamètre centimétrique), taches d'oxydation.			
2	1,50 - 4,30	Faciès d'altération ocre clair granuleux et sableux avec morceaux de grès sains et pourris de plus en plus gros sur la fin. Des passages plus argileux, taches d'oxydation.		Refus machine à 4,30m	



A12	Date : 10/12/2013	Diamètre hélice 152mm	Np: 8,44m	Nbre de tige : 5
Heure début :	11h10	Heure de fin :	12h20	Profondeur 1ère arrivée d'eau : 7,50m
Tige	Profondeur	Lithologie	Commentaire	
1	0,00 - 0,20	Terre végétale		
1	0,20 - 1,50	Argile bariolée, petits éléments de schistes bleus pourris, concrétions molles ferrugineuses couleur lit de vin.		
2	1,50 - 1,70	Niveau de concrétions ferrugineuses molles à dures couleur lit de vin		
2	1,70 - 4,50	Sable couleur bleu anthracite avec des éléments de schistes pourris et sains. Concrétions et oxydation de fer.		
3	4,50 - 5,50	Sable plus bleuté et plus argileux, moins de concrétions.		
3	5,50 - 7,50	Sable légèrement argileux bleuté, éléments de schistes pourris et sains.	Eau à 7,50m	
4	7,50 - 9,50	Idem		
4	9,50 - 10,50	Idem		
5	10,50 - 11,50	Faciès d'altération argileux couleur bleu anthracite avec morceaux de schistes sains		
5	11,50 - 13,50	Schiste plus sec et sain, globalement tendre qui part en poussière sous la tarière.	Refus à 13,50m dans le schiste sain	



Annexe 5

Principe des sondages par résonance magnétique des protons (RMP)

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structure ou de paramètres physiques dépendant de 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 (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

À la différence de 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 (Figure 1).

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 exciteur, 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 sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique 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.

La constante de temps de relaxation longitudinale, T_1 , caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de T_1 correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de T_1 indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale, T_2 , caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ H_0 alors que T_1 correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ H_0 . Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante T_2^* .

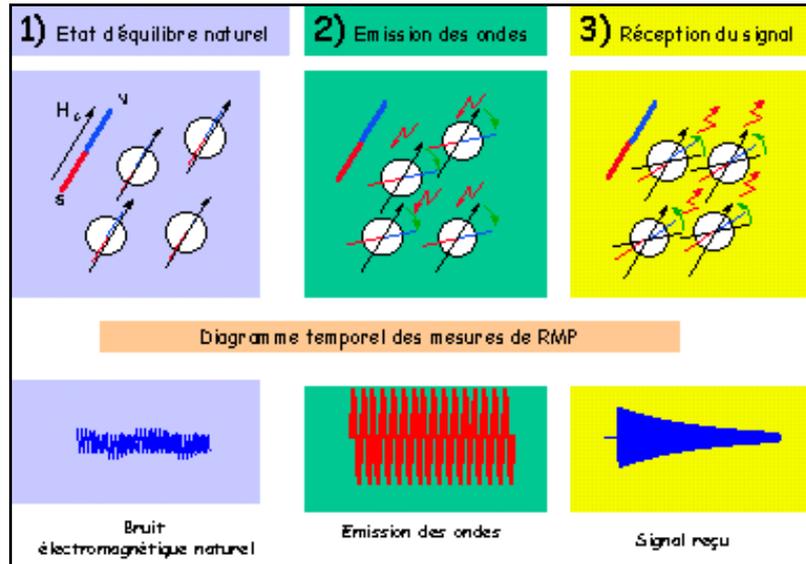


Figure 1 - Principe de mesure RMP.

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent. Ainsi T_2^* est en outre lié aux conditions géophysiques du réservoir.

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 (Figure 2).

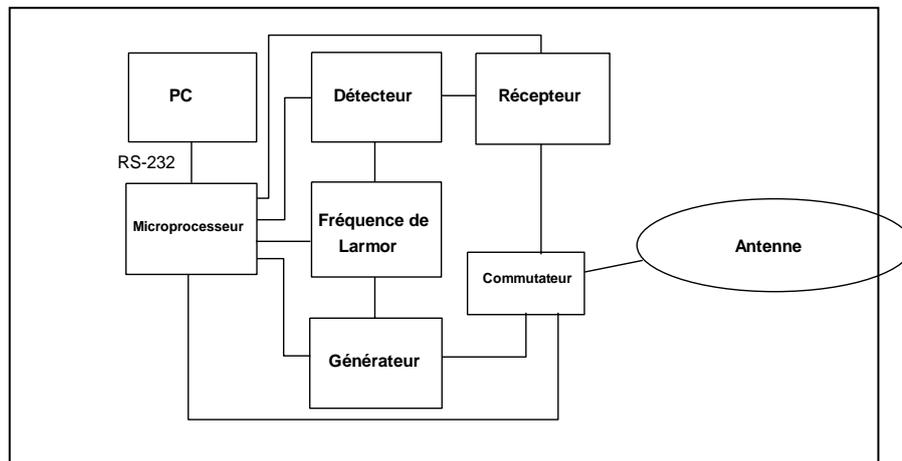


Figure 2 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

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 (Figure 3).



Figure 3 - Équipement 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 150 m selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer (par commodité d'installation, une antenne carrée est souvent utilisée à la place du cercle). 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 » (composé de deux boucles de polarité opposée) afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin *et al.*, 1994). Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle

$$I(t) = I_0 \cos(\omega_0 t), 0 < t \leq \tau \quad (1)$$

I_0 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 dans la figure 4.

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t, q)$ (appelé aussi free induction decay, FID) a une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation $q = I_0 \tau$:

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

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

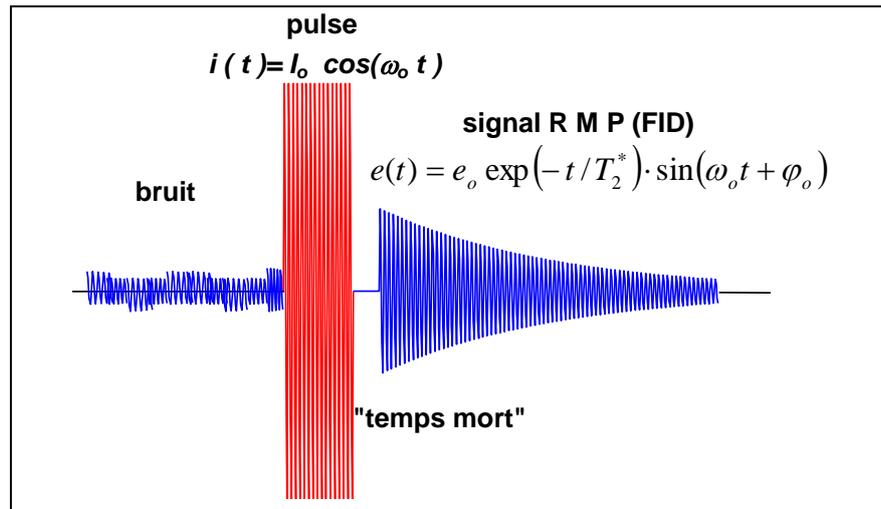


Figure 4 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

L'augmentation du paramètre q permet d'augmenter le volume investigué et un ensemble de mesures $e(t, q)$ pour des q croissants constitue un sondage RMP en profondeur.

Pour la mesure de T_1 une adaptation de la technique d'« inversion recovery » (Farrar *et al.*, 1971) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives séparées par un délai ($\Delta t < T_1$) et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de déduire la constante de relaxation T_1 à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (figure 5) tel que :

$$e_{0-FID2} / e_{0-FID1} = 1 - \exp(-\Delta t / T_1) \quad (3)$$

Avec e_{0-FID1} et e_{0-FID2} , les amplitudes à l'origine des signaux FID1 et FID2 respectivement et Δt le délai séparant les deux pulses.

Les paramètres $e(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\phi_o(q)$ sont les paramètres significatifs 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 5 nV. Différents facteurs influencent 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.*, 1997).

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 est de l'ordre de 150 m dans les conditions les plus favorables. Elle est 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 varie entre 2 h et 12 h selon les conditions de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

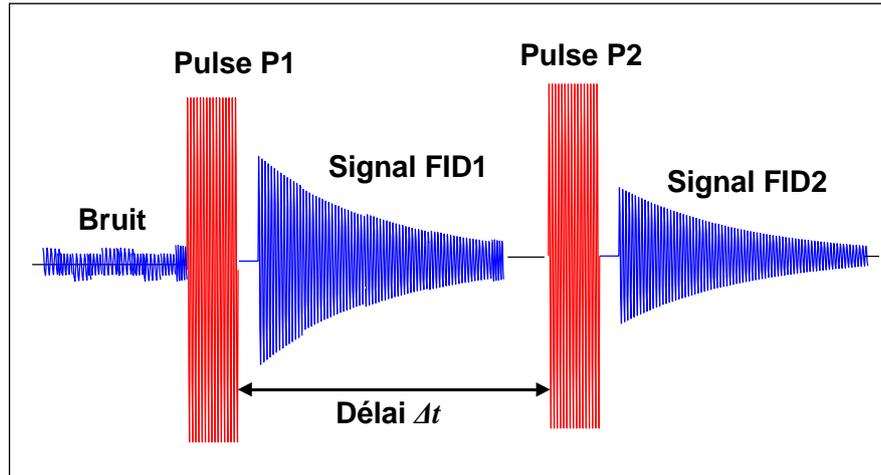


Figure 5 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1 .

Interprétation des données

a) Inversion des sondages RMP

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans 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 **d'amplitude** $e_o(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau.

Le sous-sol est subdivisé en N couches homogènes dont la réponse est pondérée par la teneur en eau RMP W_{RMP} qui varie de 0 à 100%. C'est une teneur en eau volumique, $W=100\%$ correspond à un lac (par ex. sondage RMP sur lac gelé en surface) et $W=0\%$ correspond à un niveau sec.

Mais cette définition ne tient pas compte de la relaxation pendant le temps mort instrumental et une partie de l'eau dont les constantes de temps de relaxation sont faibles n'est pas prise en compte dans la mesure RMP.

L'expérience d'application des sondages RMP (Schirov, *et al.*, 1991) a montré que dans bien des cas le temps de décroissance, T_2^* de l'eau liée est inférieur à 20-30 ms et que celui de l'eau libre est compris entre 30 et 1 000 ms. Comme les caractéristiques des équipements de mesures actuels ne permettent pas de mesurer des temps inférieurs à 30 ms, il est généralement admis que la teneur en eau RMP correspond à la teneur volumique en eau libre. Selon ces considérations, si l'eau dans les pores non connectés et dans les pores en cul de sac peut être négligée, la teneur en eau RMP serait une estimation de la porosité cinématique. Si la capacité de rétention est négligeable, la teneur en eau RMP serait une bonne estimation de la teneur en eau gravitaire.

La constante T_2^* dépend du contexte géologique et dans certains milieux particulièrement peu magnétiques, tel que la craie ou les calcaires, les temps de décroissance T_2^* de l'eau capillaire peuvent être proches voire supérieurs à 40 ms. Dans la zone non saturée, la teneur en eau RMP correspondrait à l'eau gravitaire et à tout ou partie de l'eau capillaire. L'eau de la zone non saturée pourrait ainsi être observée par RMP.

Il faut aussi ajouter que dans des conditions de milieux, au contraire, très magnétiques, le temps de décroissance T_2^* de l'eau libre peut être réduit de telle manière qu'une partie seulement de l'eau libre est observée par RMP voire pas du tout. La méthode est alors mise en défaut.

- les **constantes de temps de relaxation** (T_1 ou T_2 représentées ici par T) sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Shirov et al., 1991 ; Chang et al., 1997 ; Kenyon, 1997) et peuvent être décrites en fonction des caractéristiques des pores (en milieu saturé) tel que :

$$1/T = (1/T_a) + (\rho S / V) \quad (4)$$

avec T_a la constante de temps décrivant la décroissance en milieu liquide, V et S le volume et la surface des pores et ρ la capacité de la surface à induire la relaxation des protons autrement appelée indice de relaxation.

Mais T_2^* dépend aussi des hétérogénéités du champ géomagnétique ΔH_0 tel que :

$$1/T_2^* = (1/T_{2a}) + (\rho S / V) + \gamma(\Delta H_0 / 2) \quad (5)$$

avec T_{2a} la constante de temps transversale en milieu liquide et γ le facteur gyromagnétique des protons.

Comme les hétérogénéités du champ géomagnétique dépendent des conditions géologiques, le temps de relaxation T_2^* est moins fiable que T_1 pour caractériser la taille moyenne des pores dans différents milieux. T_1 lui est généralement préféré pour l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

- la **phase** $\varphi_o(q)$ 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 inverse 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 de données théoriques est présenté à la figure 6.

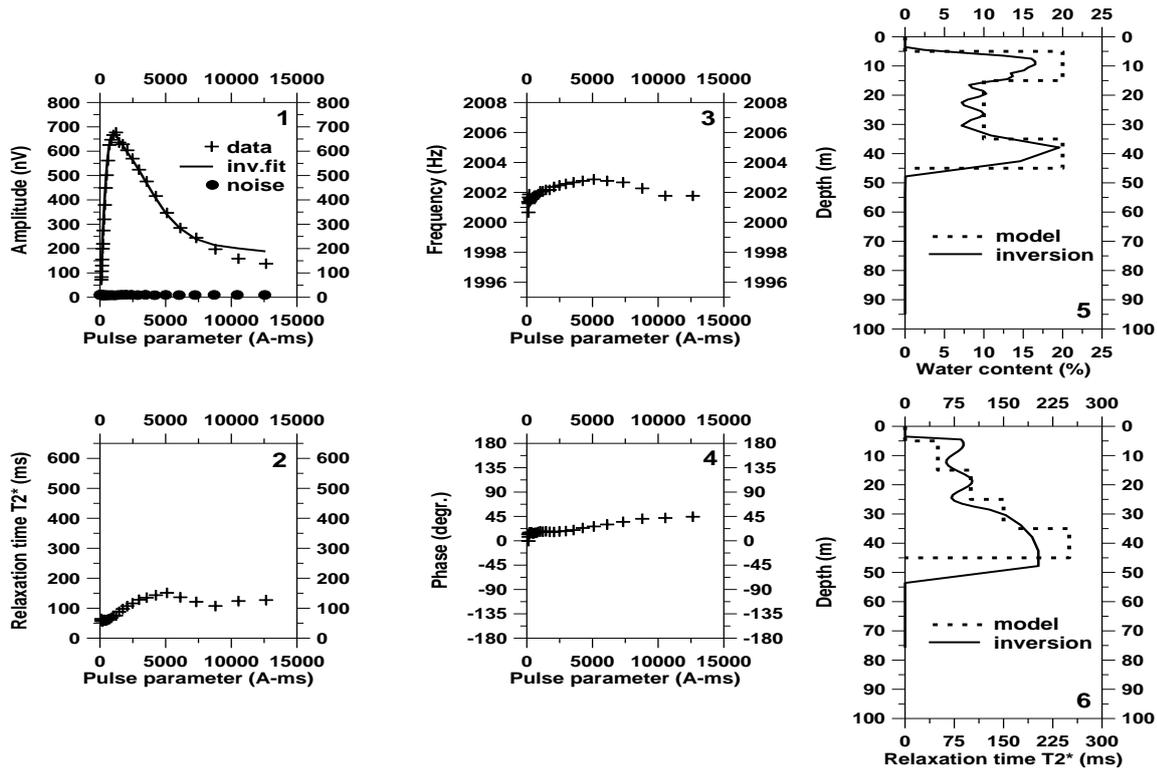


Figure 6 - Résultats d'inversion des données théoriques.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle du tableau 1 :

Profondeur		Teneur en eau	T_2^*
de (m)	à (m)	(%)	(ms)
5	15	20	50
15	25	10	100
25	35	10	150
35	45	20	250

Tableau 1 - Paramètres du modèle.

b) Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP

En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997), la perméabilité peut être liée aux paramètres RMP en utilisant une relation empirique telle que :

$$K = C_k W^a T_I^b \quad (6)$$

où K est la perméabilité, W est la teneur en eau RMP, T_I est la constante de 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 réalisés dans différents milieux, 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 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.

Le résultat d'un sondage RMP mesuré avec l'équipement NUMIS est présenté généralement avec les informations suivantes :

- 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 K .

Le BRGM et ses partenaires ont développés dans le bassin parisien d'abord puis dans différents environnements hydrogéologiques une méthodologie empirique basée sur la comparaison des résultats RMP avec les pompages d'essais, visant à définir les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères sur la base des résultats RMP. Des fonctions de transferts sont ainsi établies entre la transmissivité obtenue en résultat des pompages d'essai et une transmissivité RMP calculée comme la combinaison des paramètres RMP teneur en eau, W et temps de décroissance T_n (figure 7 et 8). Les transmissivités RMP sont d'autant plus fiables que des étalonnages auront été établis localement avec des pompages d'essais réalisés dans le réservoir hydrogéologique d'intérêt. En l'absence de calage local, les fonctions transferts définies dans des formations hydrogéologiques similaires peuvent être utilisées avec une incertitude acceptable.

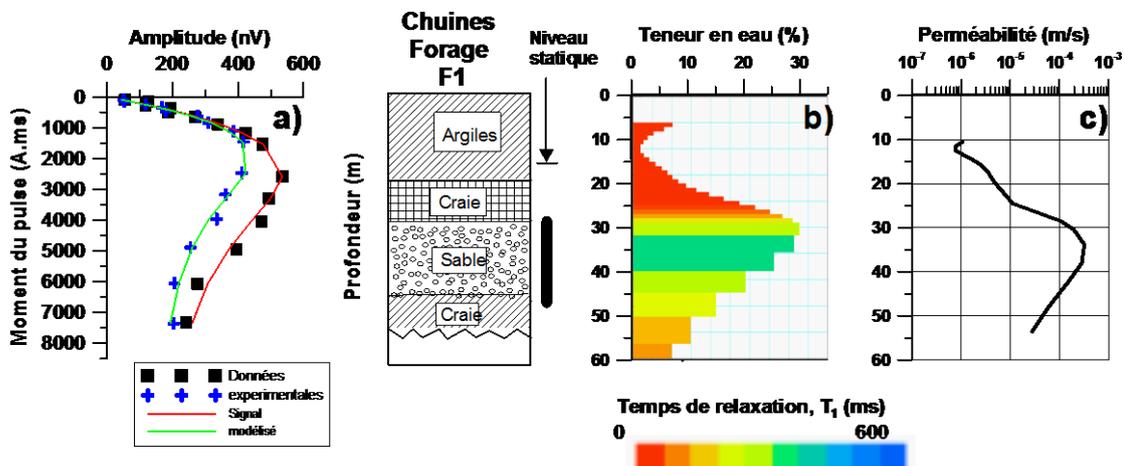


Figure 7 : Exemple de Sondage RMP en milieu sédimentaire. a) courbes de sondage ; b) log vertical de teneur en eau, W et de temps de décroissance, T_1 obtenu par inversion du sondage RMP; c) log de perméabilité RMP obtenue par combinaison des paramètres RMP W et T_1 .

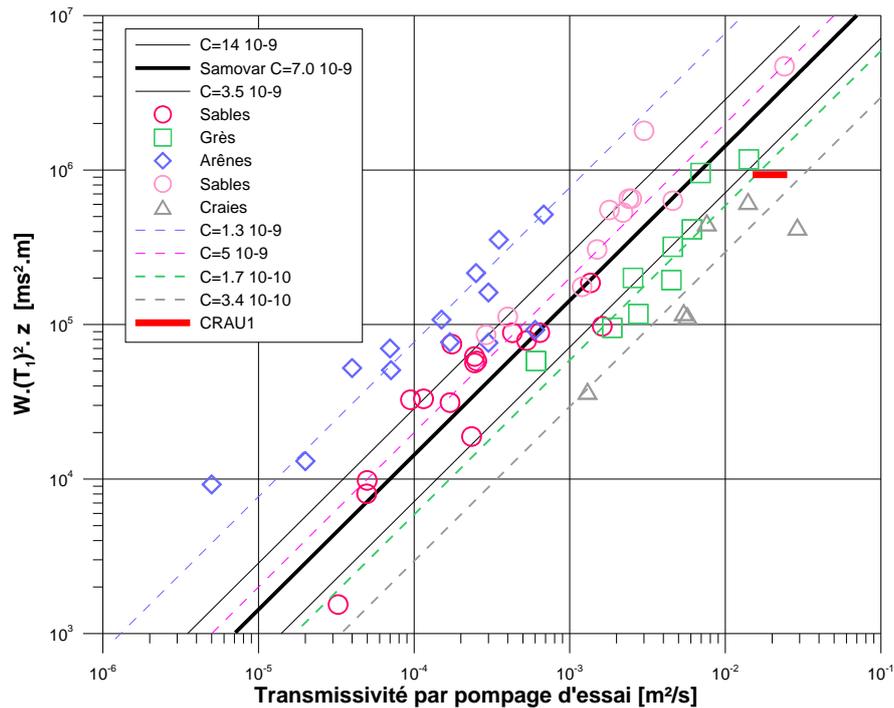


Figure 8 : Fonctions de transfert entre résultats RMP et transmissivité par pompage obtenues dans différents environnements géologiques (modifié d'après Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans).

Conditions et limites d'application de la méthode RMP

Les sondages RMP sont souvent utilisés en complément des mesures électriques et électromagnétiques, pour estimer les propriétés hydrodynamiques sur les zones d'intérêt révélées par ces méthodes à plus grand rendement. Les sondages RMP permettent généralement de lever les ambiguïtés de l'interprétation des résistivités électriques : distinguer, par exemple, les anomalies conductrices causées par une teneur en argile élevées et généralement non aquifères de celles causées par une teneur eau de formation conductrice potentiellement aquifères.

La méthode RMP mesure de très faibles signaux (de l'ordre du nV) et est sensible à toutes les sources de bruit électromagnétique. En conséquence, il convient de limiter les zones d'investigation aux zones rurales, à plus de 750 m des lignes électriques Haute Tension et plus de 300 m des lignes Moyenne Tension, à l'écart des clôtures électriques, des transformateurs et des pompes en fonctionnement.

Dans le contexte de nappes superposées, la réponse RMP de la nappe supérieure peut interférer avec les signaux de la nappe inférieure et augmenter l'incertitude sur les résultats.

Annexe 6

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

Sondage RMP SIEFT1

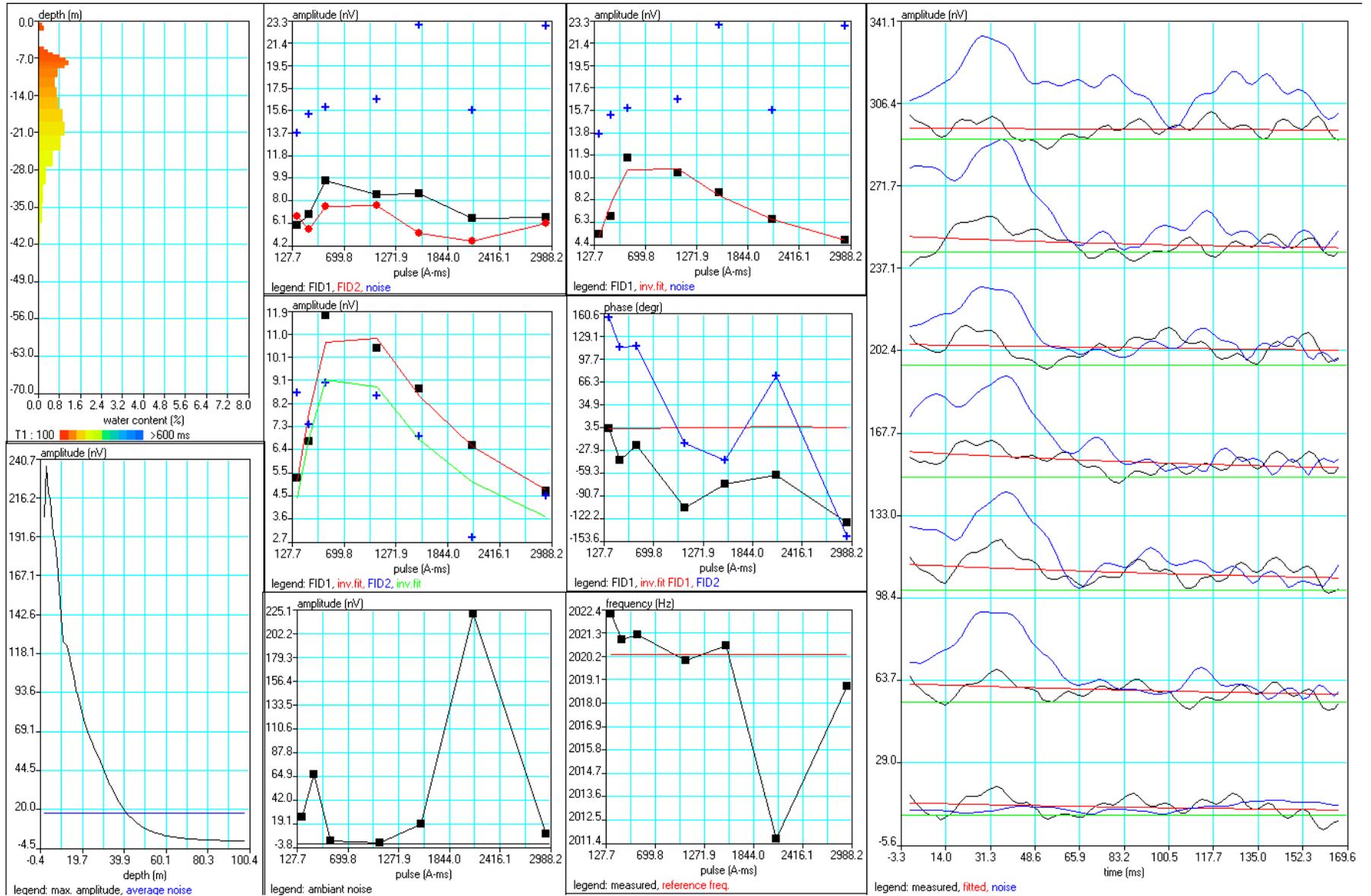
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 329.2 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT1 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT1\SIEFT1a_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47424.88 nT

filtering window = 178.2 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 0.43; EN/IN = 3.46
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 41.5 m
inversion RMSE : FID1 = 0.75 nV; FID2 = 1.90 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 1.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Sondage RMP SIEFT2

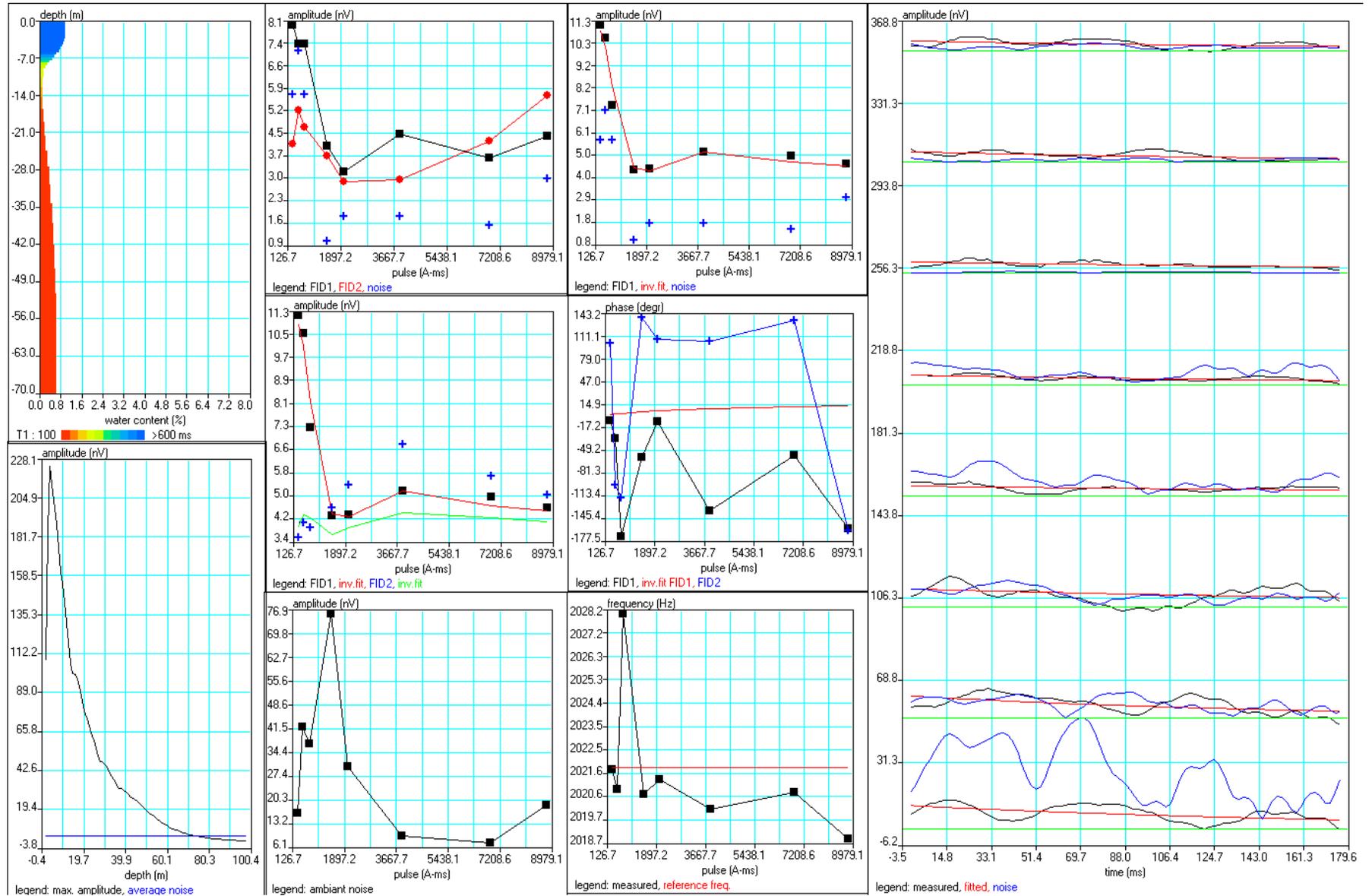
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.9 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT2 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT2\SIEFT2_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47460.09 nT

filtering window = 178.1 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 1.54; EN/IN = 0.69
estimated vertical resolution: 5 layers
estimated max. depth of investigation = 74.5 m
inversion RMSE : FID1 = 0.38 nV; FID2 = 1.19 nV;
smoothing factor: SF1 = 25.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 0.5 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Sondage RMP SIEFT3

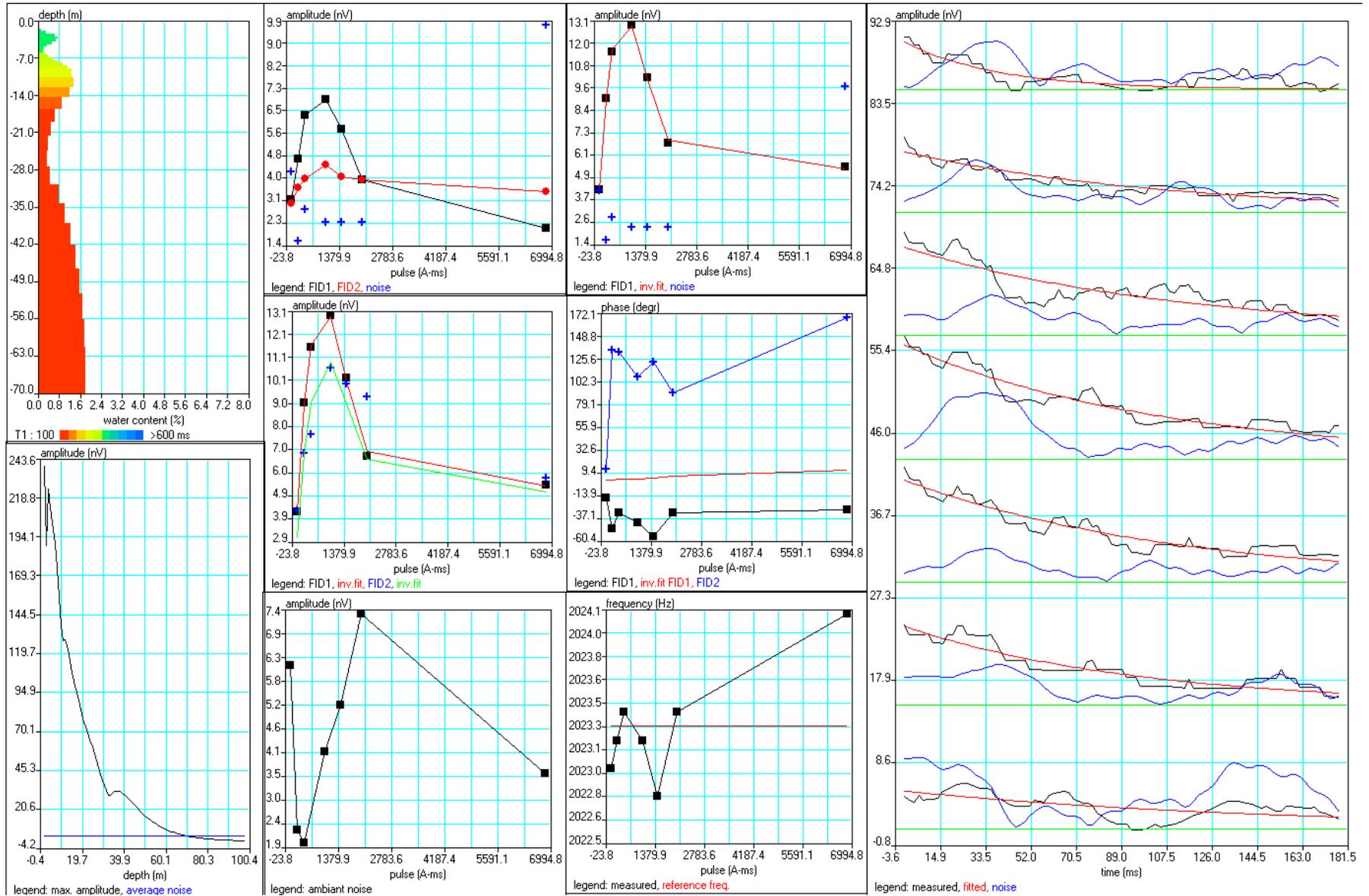
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.7 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT3 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT3\SIEFT3_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47495.31 nT

filtering window = 179.9 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 1.31; EN/IN = 0.72
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 70.5 m
inversion RMSE : FID1 = 0.11 nV; FID2 = 1.33 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 0.5 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



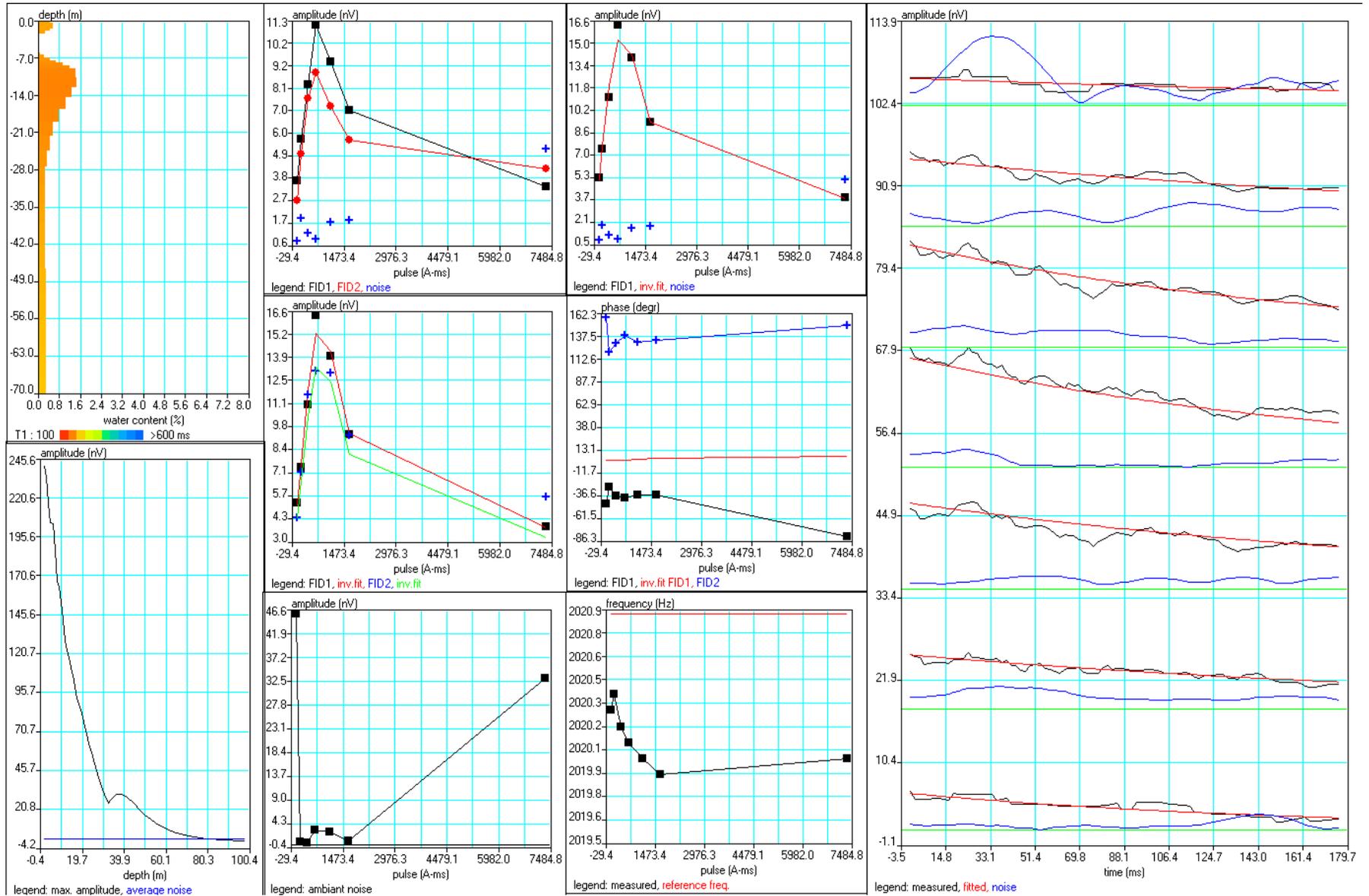
Sondage RMP SIEFT4

This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 329.1 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT4 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 30/11/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT4\SIEFT4_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47438.97 nT

filtering window = 178.1 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 3.57; EN/IN = 0.39
estimated vertical resolution: 5 layers
estimated max. depth of investigation = 79.5 m
inversion RMSE : FID1 = 0.54 nV; FID2 = 1.15 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 2.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09



Sondage RMP SIEFT5

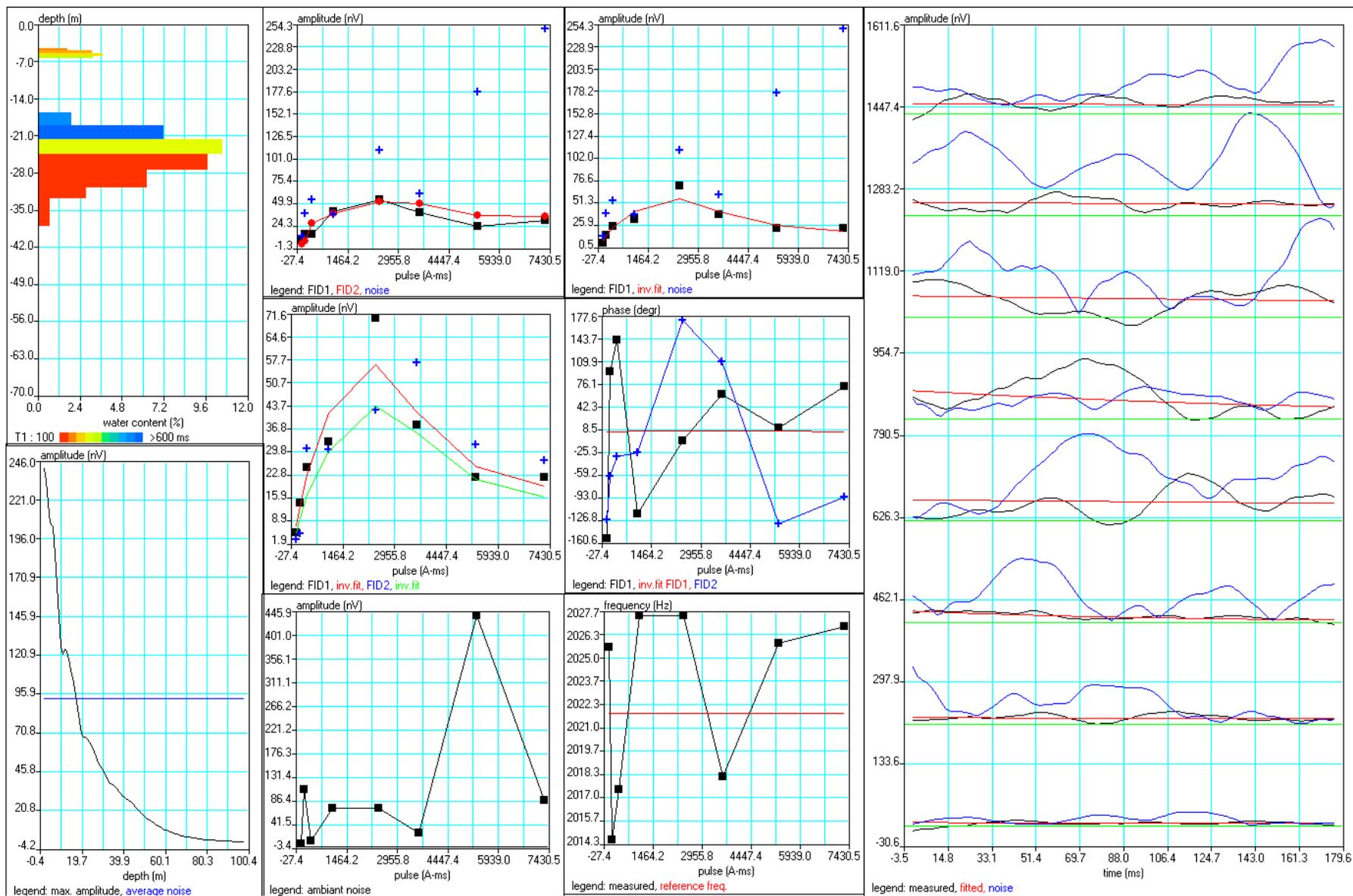
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.9 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT5 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 29/11/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT5\SIEFT5\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47460.09 nT

filtering window = 178.1 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 0.31; EN/IN = 18.54
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 16.5 m
inversion RMSE : FID1 = 6.32 nV; FID2 = 10.66 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 1.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Sondage RMP SIEFT6

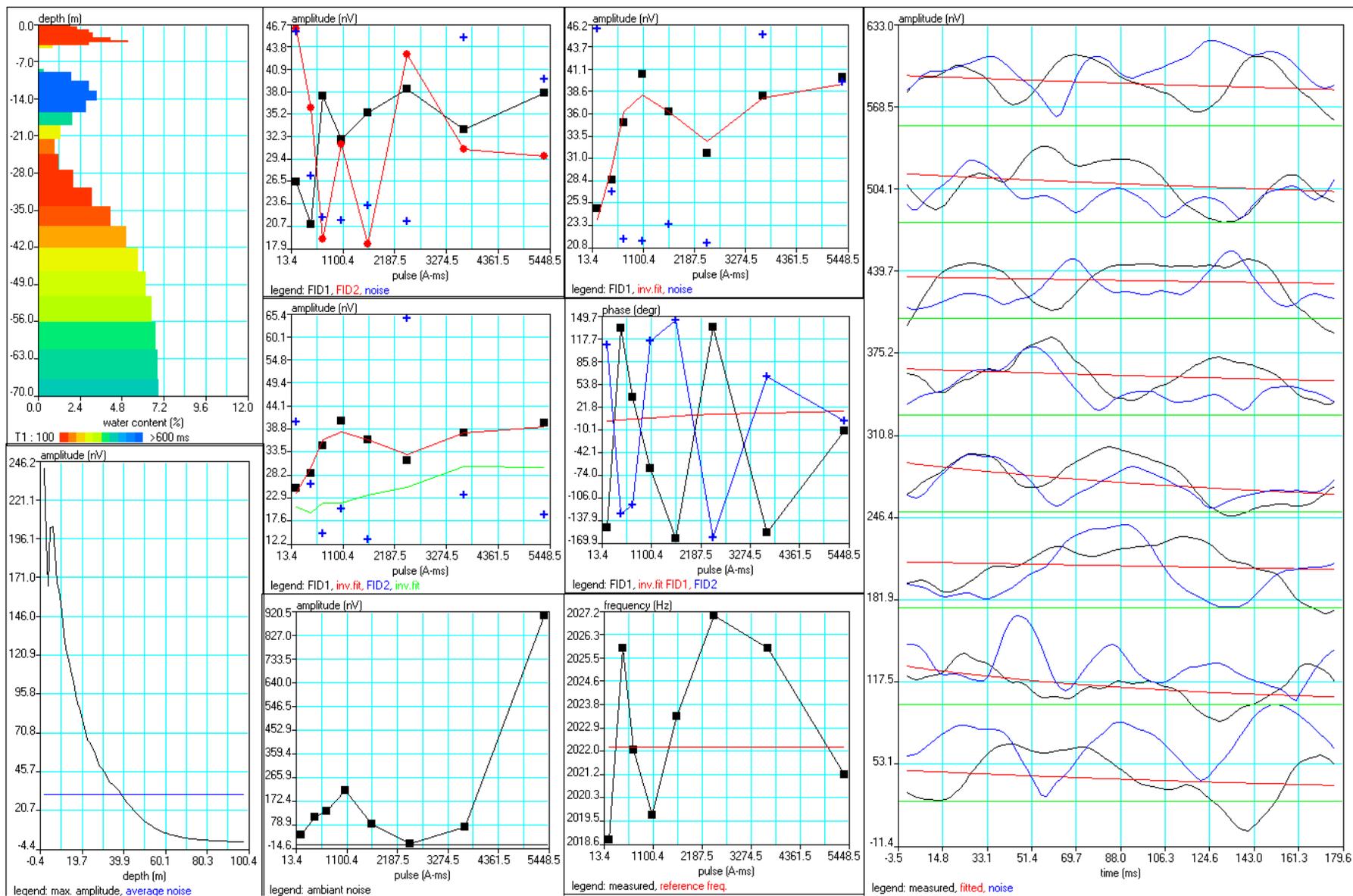
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.8 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT6 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT6\SIEFT6_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47469.48 nT

filtering window = 178.0 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 1.07; EN/IN = 6.14
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 38.5 m
inversion RMSE : FID1 = 1.29 nV; FID2 = 16.83 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 1.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



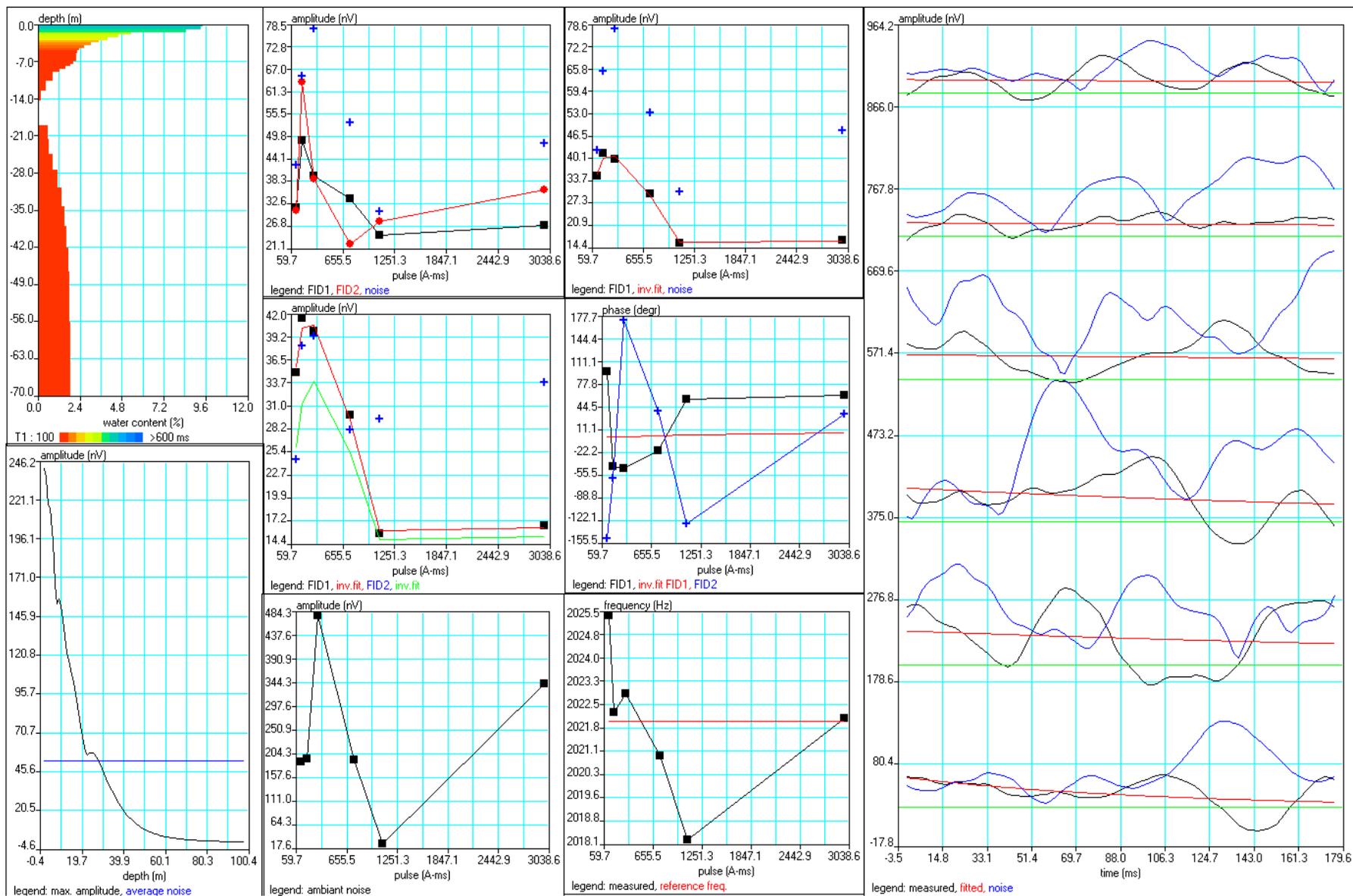
Sondage RMP SIEFT7

This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.9 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT7 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT7\SIEFT7_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47464.79 nT

filtering window = 178.0 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 0.65; EN/IN = 10.56
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 27.5 m
inversion RMSE : FID1 = 0.69 nV; FID2 = 10.29 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 1.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09



Sondage RMP SIEFT8

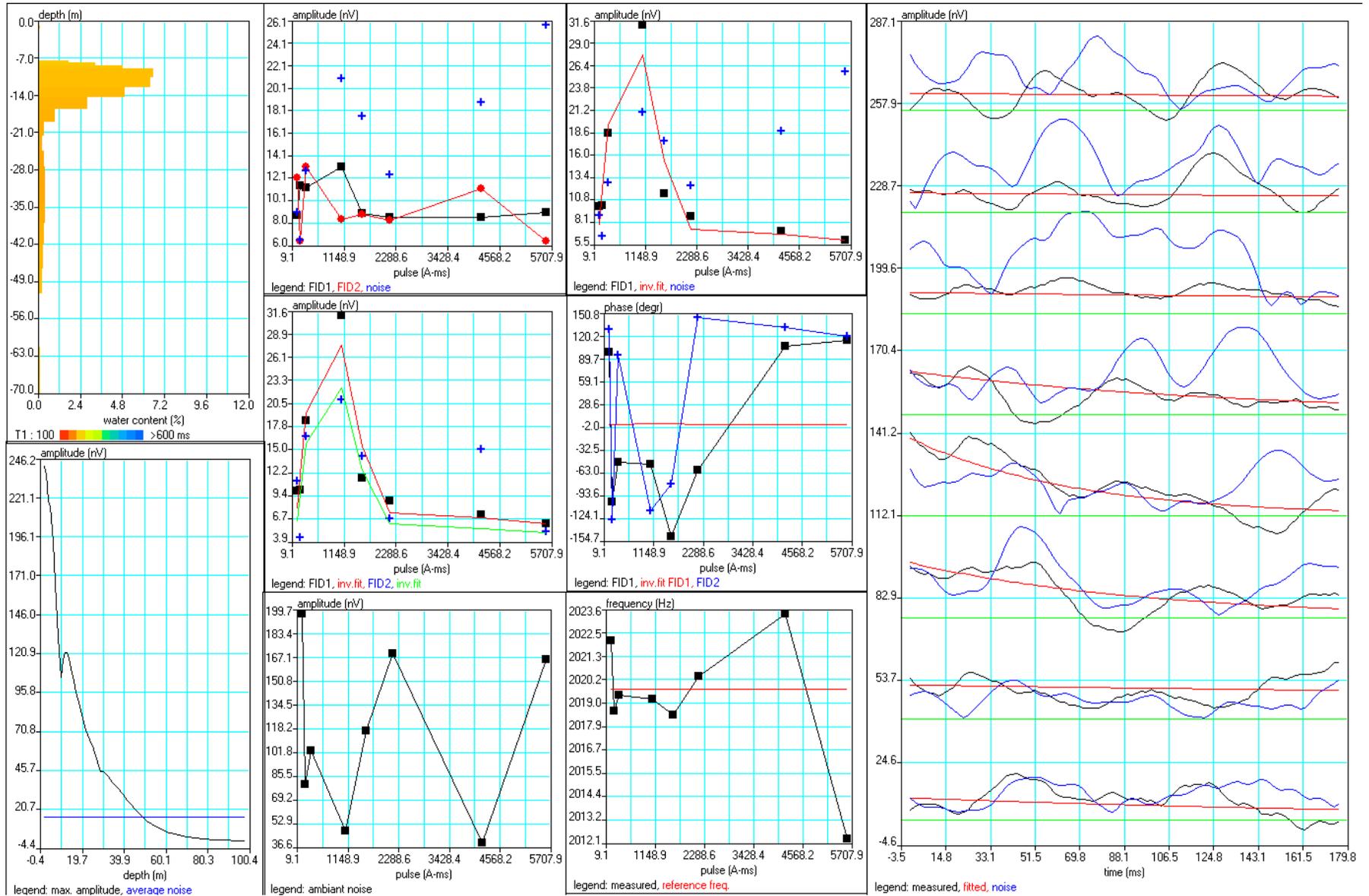
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 329.3 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT8 8sq38m C4/C3 50HzW Rx2sq10m2T
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT8\SIEFT8_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47410.80 nT

filtering window = 178.2 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 0.64; EN/IN = 3.09
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 48.5 m
inversion RMSE : FID1 = 2.17 nV; FID2 = 4.30 nV;
smoothing factor: SF1 = 5.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 2.0 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Sondage RMP SIEFT9

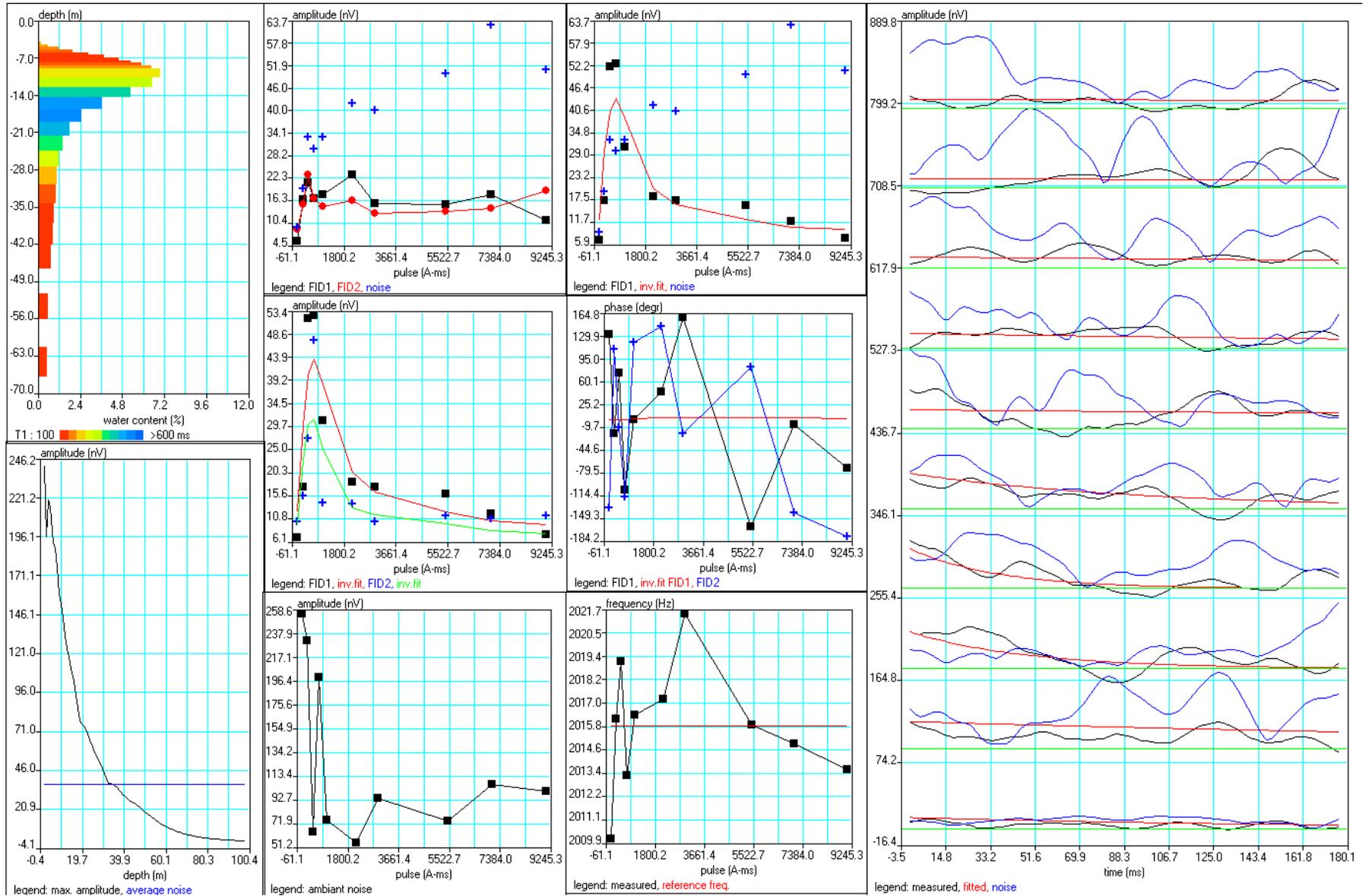
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 327.4 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT9 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT9\SIEFT9_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47319.25 nT

filtering window = 178.6 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 0.44; EN/IN = 7.40
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 34.5 m
inversion RMSE : FID1 = 6.94 nV; FID2 = 6.89 nV;
smoothing factor: SF1 = 25.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 0.5 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Sondage RMP SIEFT10

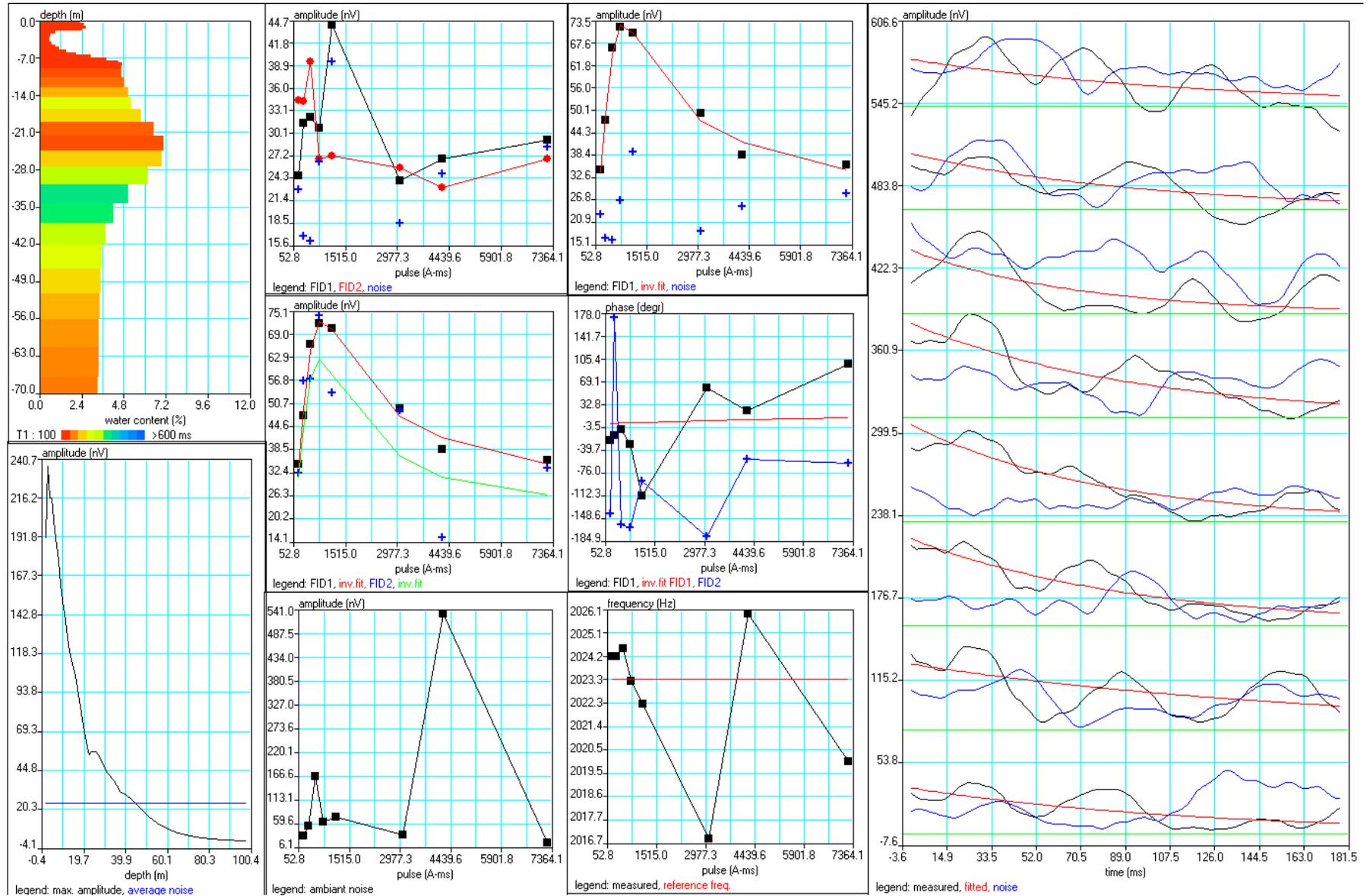
This data set has been processed using SAMOVAR-11.31 software
measuring scheme: free induction decay, delay(P1,P2)= 328.7 ms
inversion scheme: smooth inversion
optimization: complex signal inversion with the amplitude optimization

Site: SIEFT10 8sq38m C4/C3 50HzW
Loop: 4 - 38.0 Date: 05/12/2013 Time: 00:00:00

NUMIS data set: D:\Documents\mathieu\Travail\SIEFT35_2013\RMP\SIEFT10\SIEFT10_f\NumisData.inp
linear filter: D:\Documents\mathieu\PROGRAMMES\RMP_JMB\RMP Pour
Francis\soft_RMP_Samovar_2013\data\sieft_8sq38m.mrm
loop: eight square, side = 38.0 m
geomagnetic field:
inclination= 63N degr, magnitude= 47495.31 nT

filtering window = 179.9 ms
time constant = 15.00 ms
static phase shift = 0 degr.
average S/N = 1.26; EN/IN = 4.84
estimated vertical resolution: < 4 layers
estimated max. depth of investigation = 44.5 m
inversion RMSE : FID1 = 1.60 nV; FID2 = 9.79 nV;
smoothing factor: SF1 = 10.0 (0.0 - 0.0); SF2 = 0.5 (0.0 - 0.0)
permeability constant Cp = 7.00e-09

Cartographie et évaluation des volumes d'eau souterraine du bassin tertiaire de Coësmes et du BV de l'Aron



Annexe 7

Planches A3

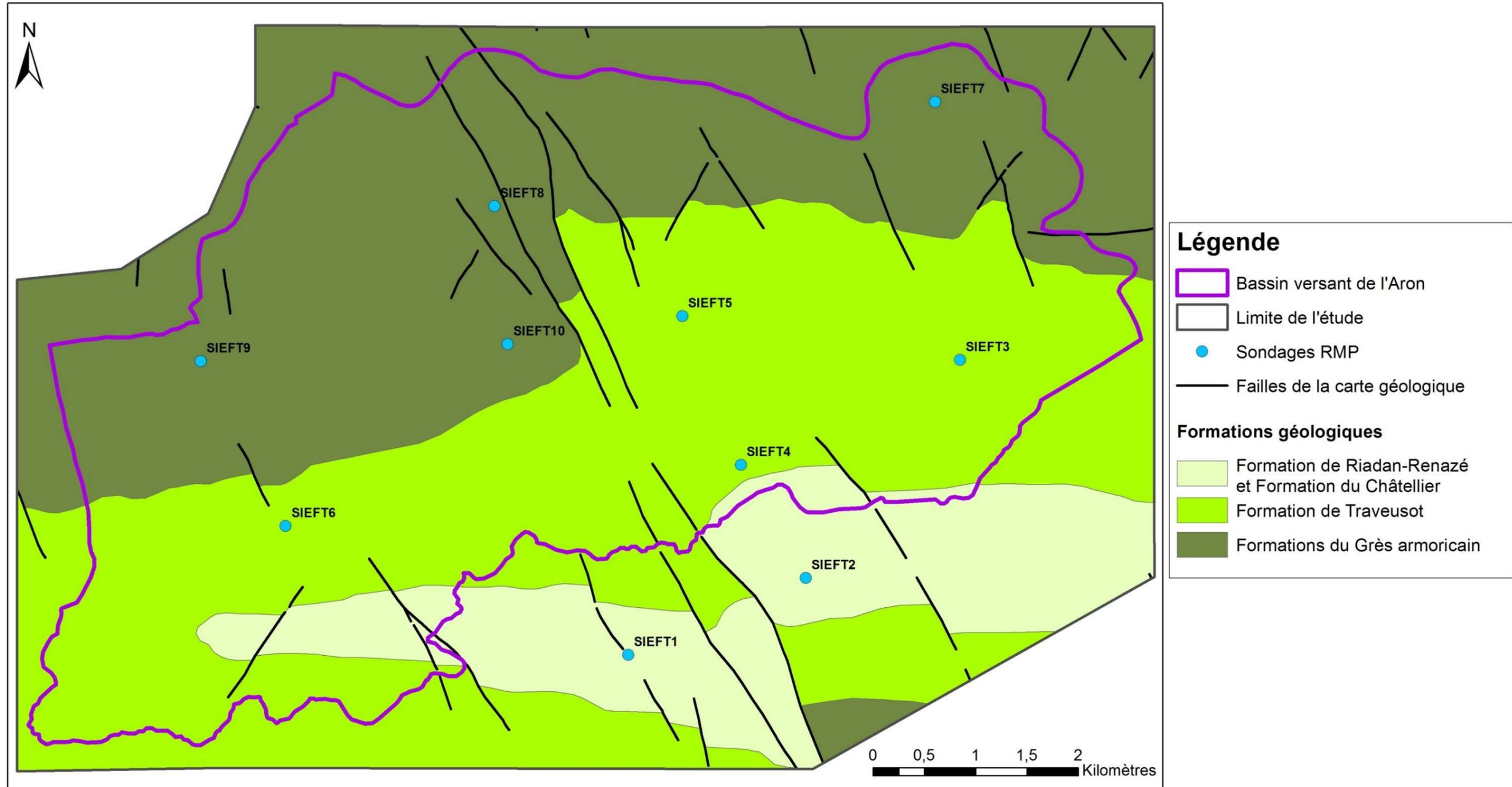


Planche 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Aron)

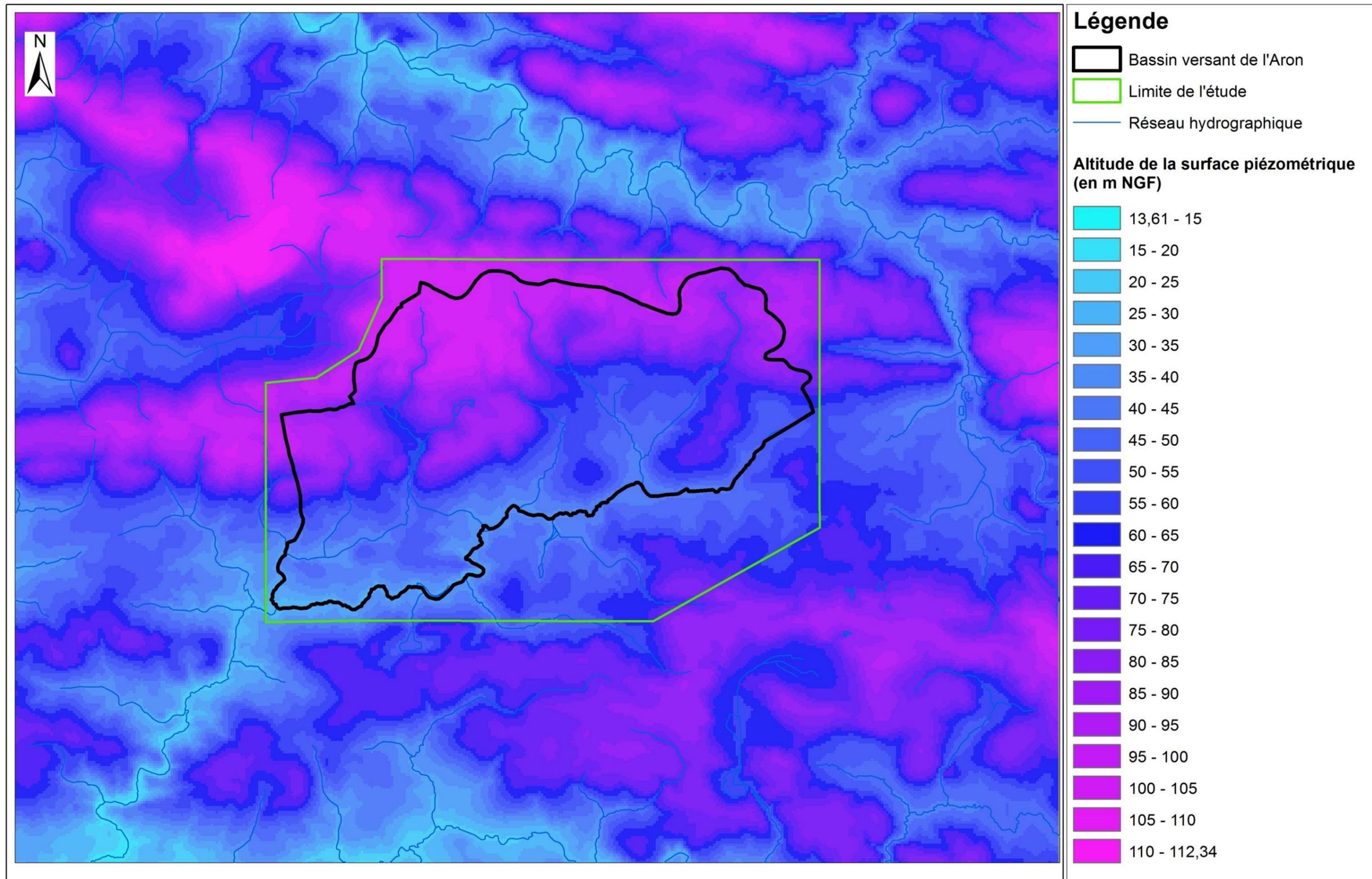


Planche 2 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Aron)

0 1 2 3 4 Kilomètres

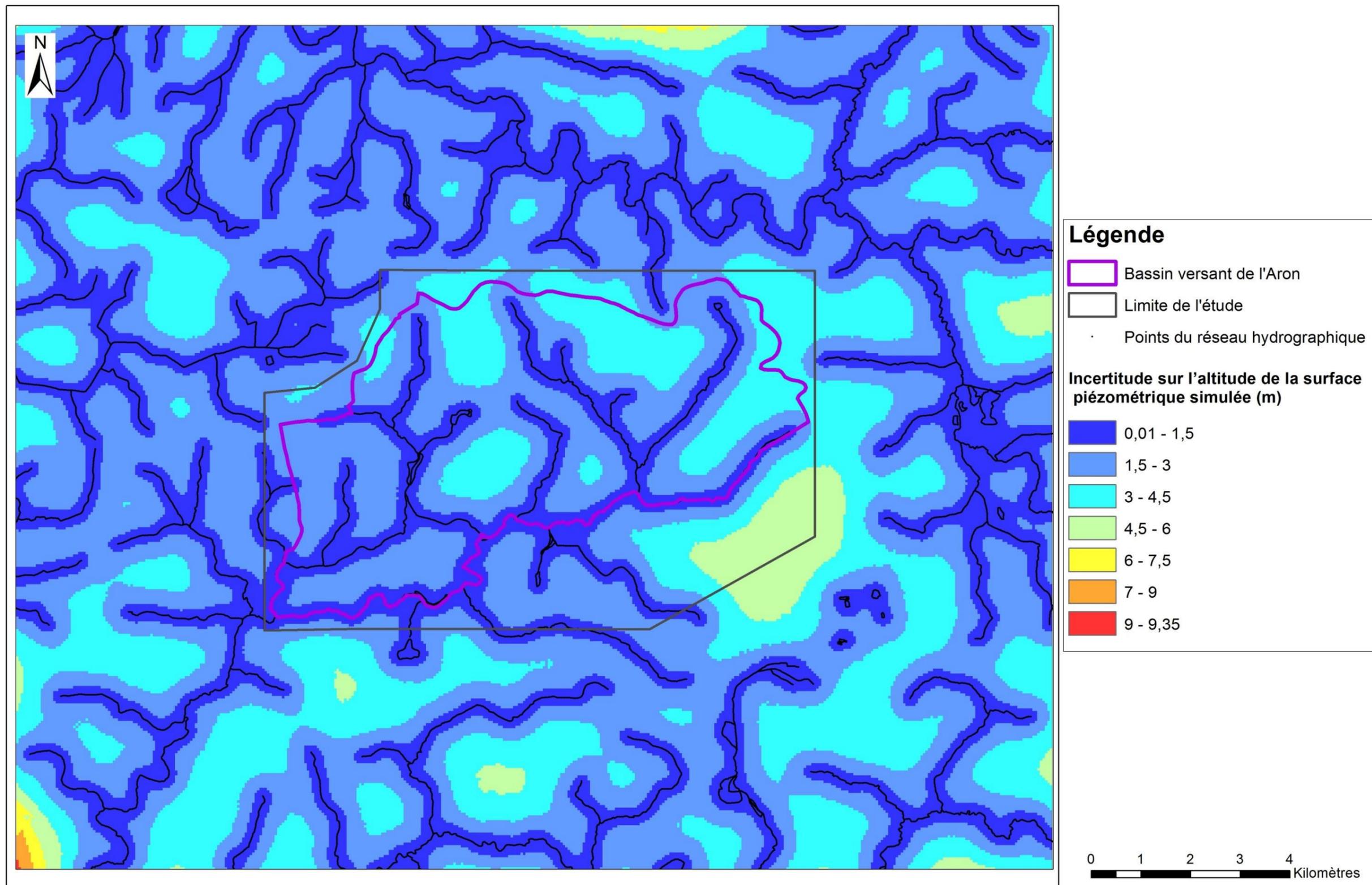


Planche 3 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Aron)

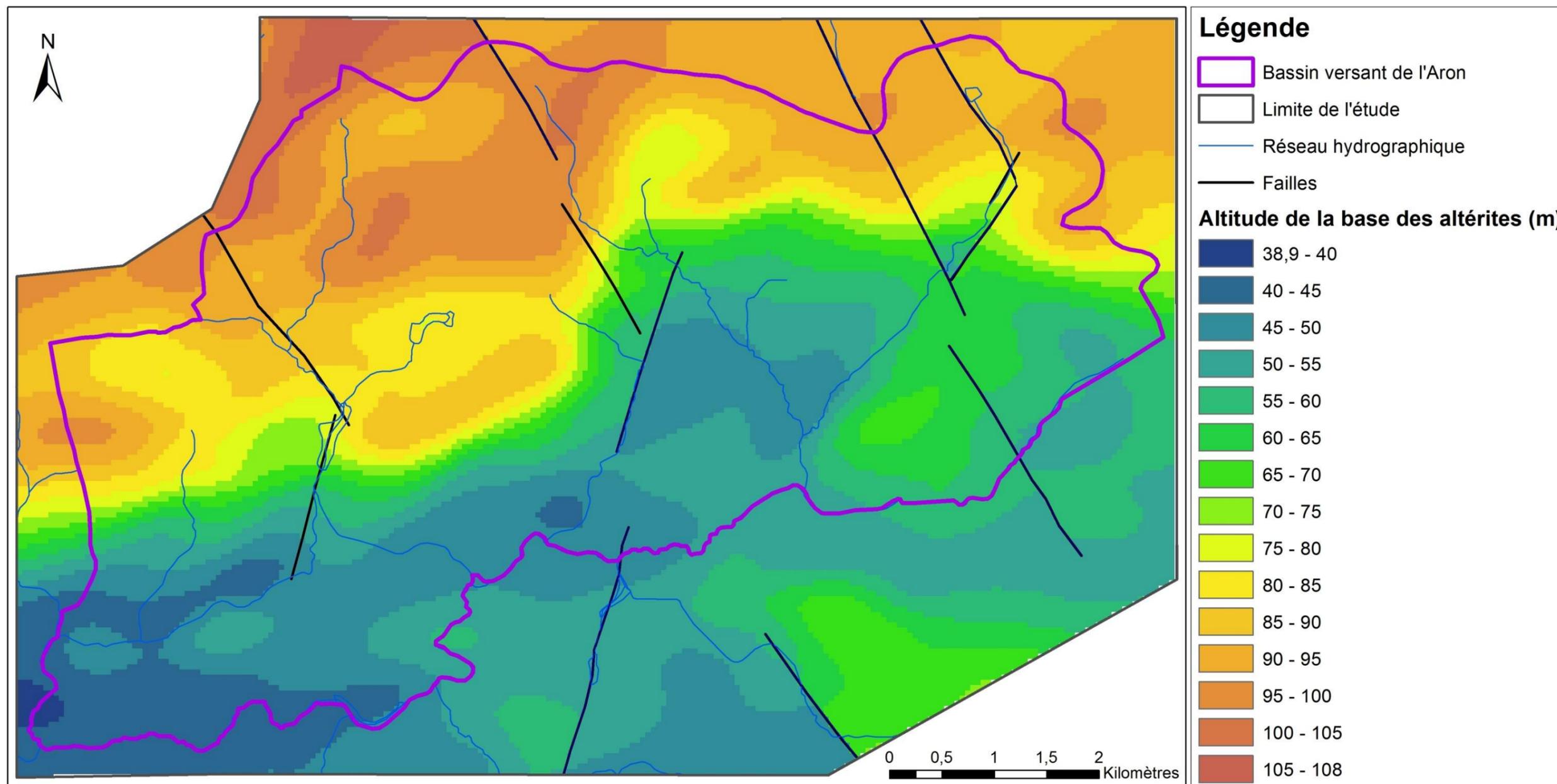


Planche 4 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Aron)

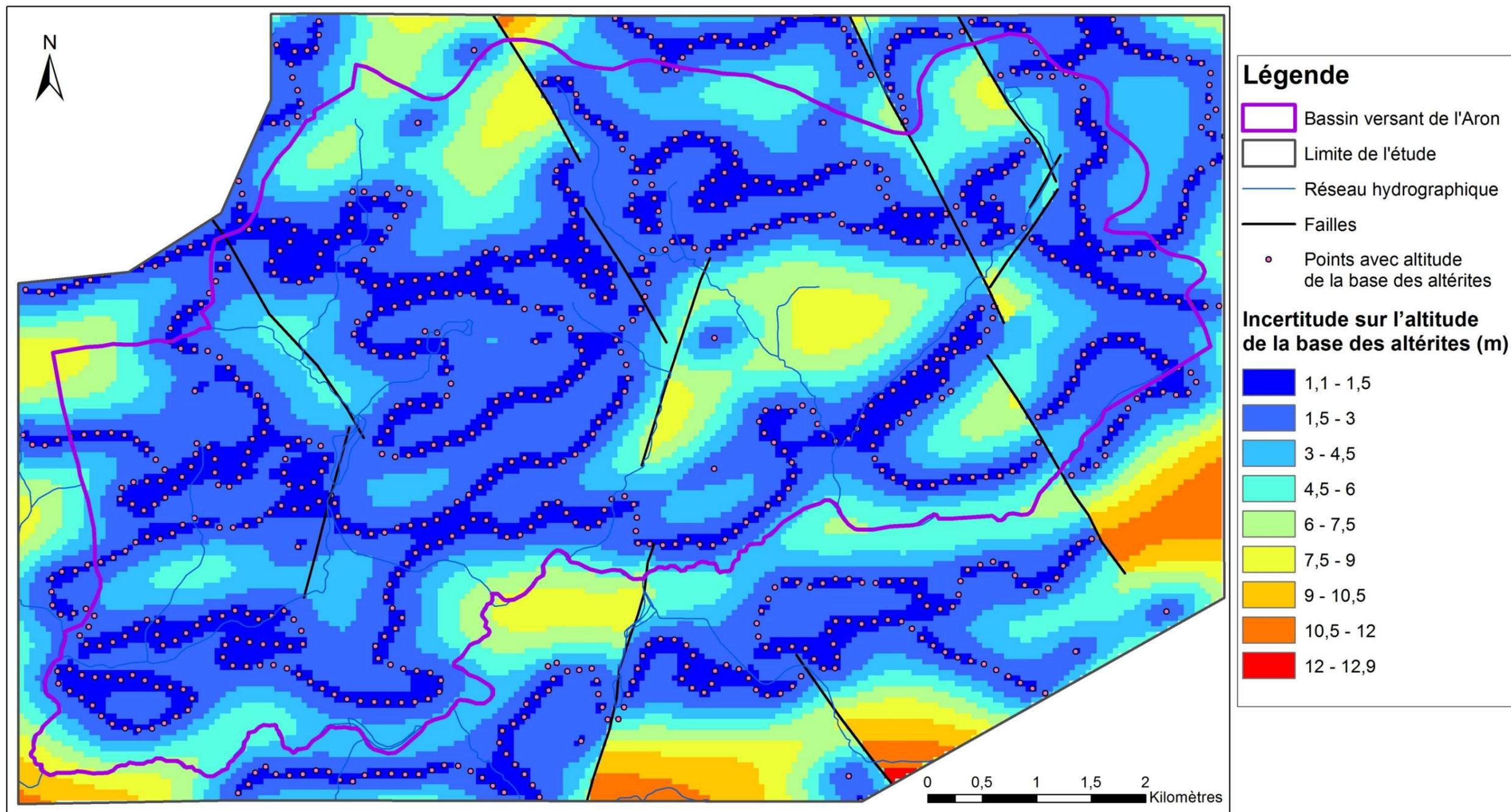


Planche 5 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Aron)

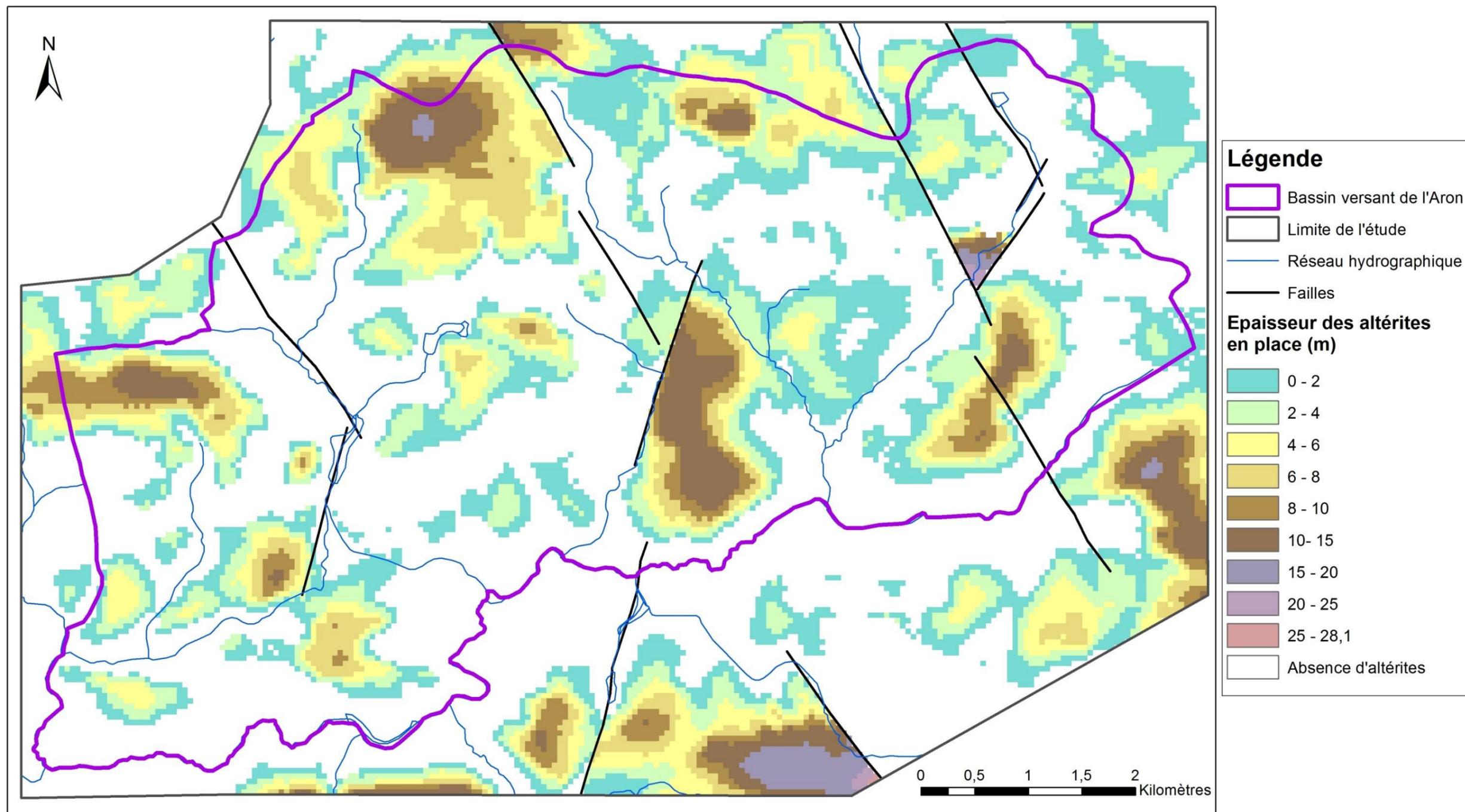


Planche 6 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Aron)

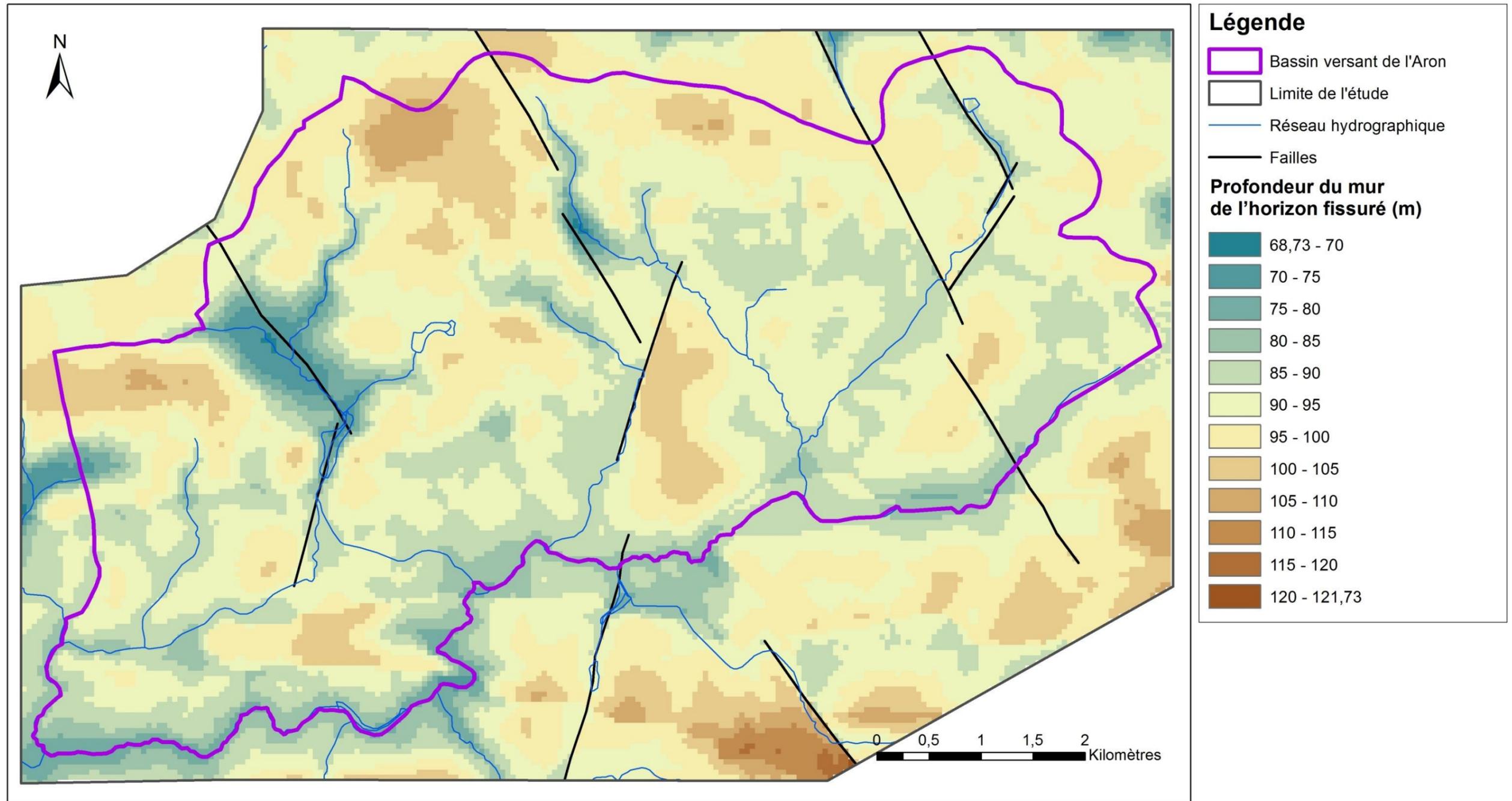


Planche 7 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Aron)

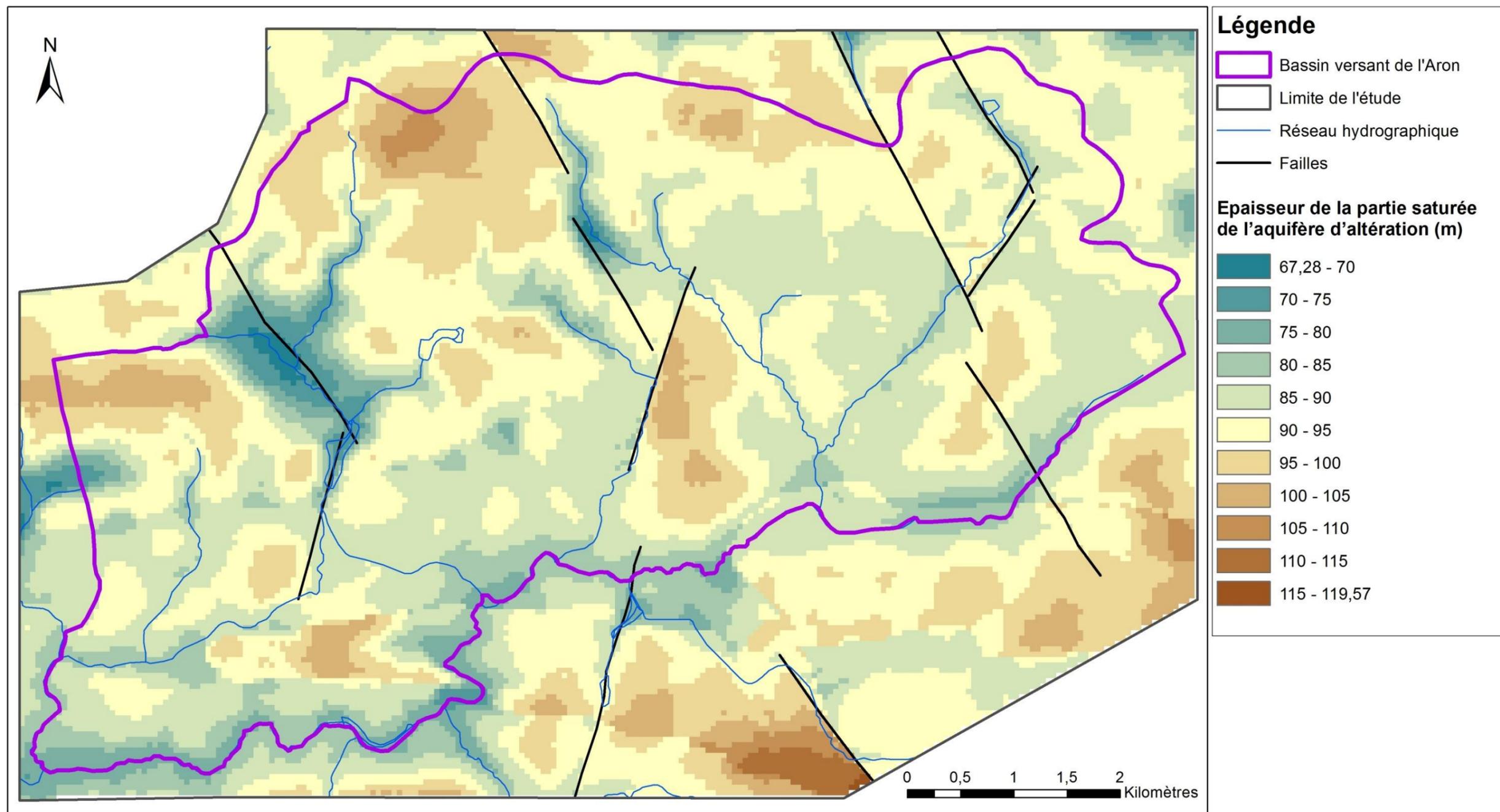


Planche 8 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Aron)

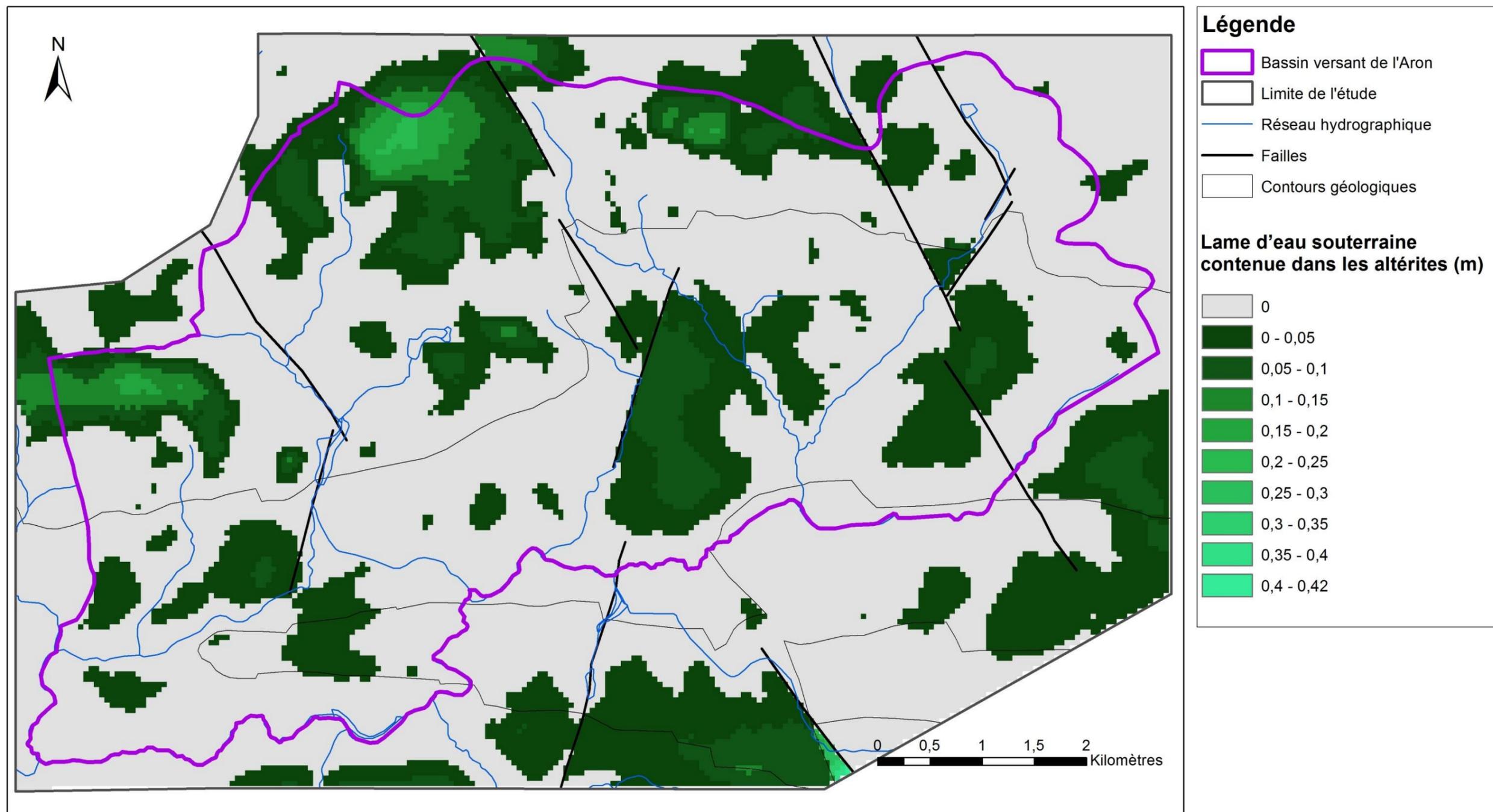


Planche 9 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Aron)

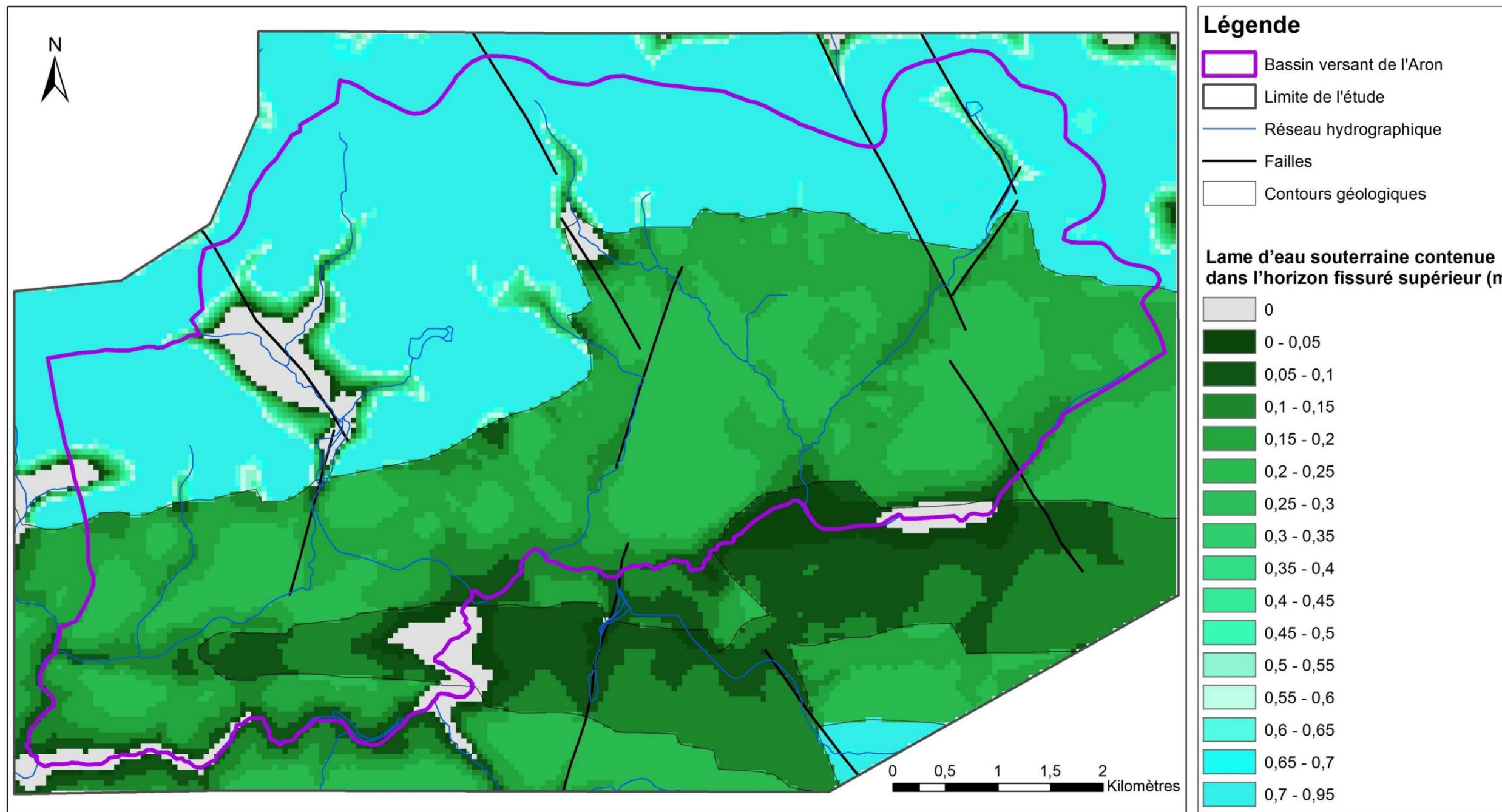


Planche 10 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Aron)

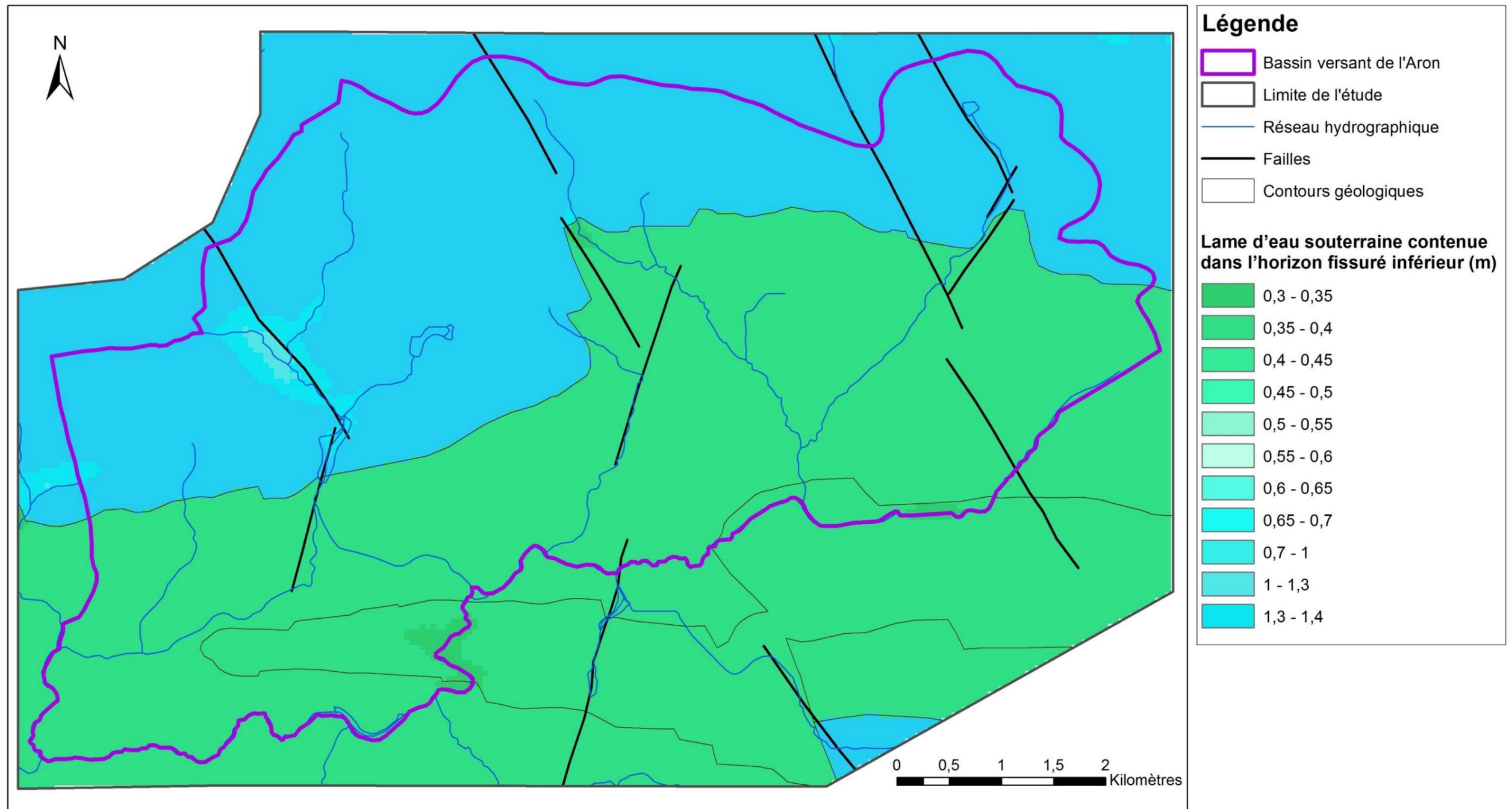


Planche 11 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Aron)

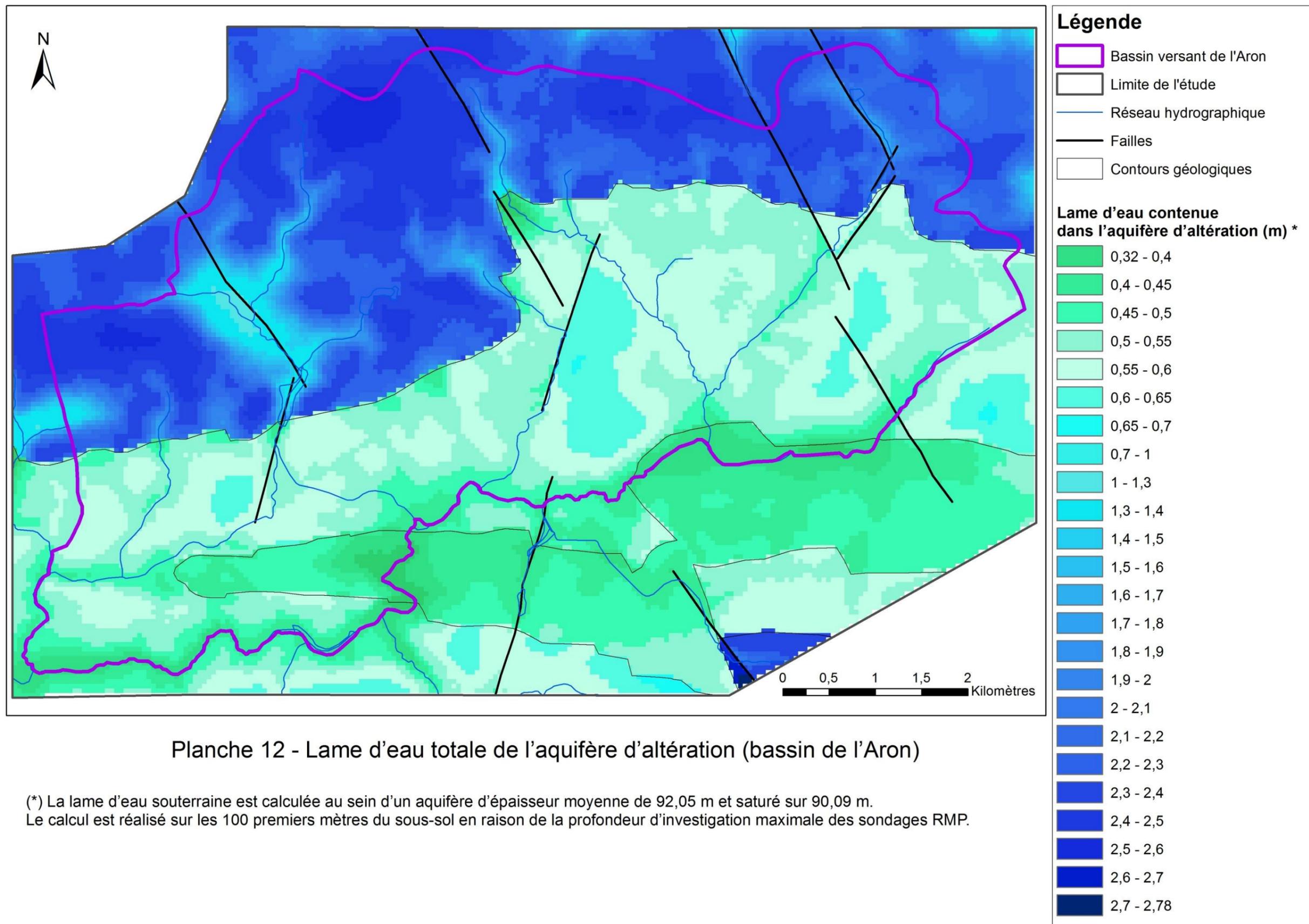


Planche 12 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Aron)

(*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 92,05 m et saturé sur 90,09 m. Le calcul est réalisé sur les 100 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

Annexe 8

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

Géostatistique et interpolation par la géostatistique

Les formations lithologiques présentent un comportement global que l'on pourrait modéliser par une approche déterministe, néanmoins elles présentent aussi des variations et des irrégularités locales qui échappent à toute représentation fonctionnelle simple et qu'il est plus rigoureux de modéliser par une approche probabiliste.

La géostatistique est une théorie et une méthodologie, fondée sur l'analyse statistique des corrélations spatiales, pour étudier les variables dites régionalisées c'est à dire dont l'évolution dans l'espace (et/ou le temps) présente un caractère à la fois aléatoire et structuré.

Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- Elle permet de caractériser la variabilité spatiale du phénomène que l'on étudie, à savoir le comportement des formations retenues. L'outil utilisé est le **variogramme** qui synthétise la structure de la variable. Pour une direction donnée, il indique comment varie l'écart des valeurs prises en 2 points X et X+h en fonction de la distance h. Il renseigne sur les anisotropies éventuelles et sur le degré de régularité de la variable.
- Elle permet de résoudre le problème de l'interpolation optimale, c'est à dire de l'estimation optimale d'une valeur Z(x₀) inconnue à partir des informations disponibles. L'interpolateur utilisé est le **krigeage**, seule technique qui fournit simultanément la valeur estimée et l'erreur associée caractérisée par l'écart-type de krigeage.

Le variogramme

Dans un phénomène naturel comme la topographie ou la cote piézométrique, les cotes mesurées en différents points, bien que variables d'un point à l'autre, ne sont pas indépendantes de leur localisation. La différence de cote Z entre deux points x et x + h est d'autant plus faible que la distance h qui les sépare est petite. D'un point de vue statistique, il y a donc une corrélation spatiale entre les données. Cette corrélation est d'autant plus forte que les points expérimentaux sont rapprochés et que le phénomène est continu et régulier. Pour quantifier le degré de corrélation spatiale, ou plutôt la détérioration de cette corrélation avec la distance, la géostatistique fait appel à la fonction variogramme $\gamma(h)$. Cette fonction donne, en fonction de la distance h qui sépare deux points, la valeur moyenne de $1/2[Z(x+h)-Z(x)]^2$.

La figure ci-dessous illustre ce calcul.

5	6	4	3	5	7	
x1	x2	x3	x4	x5	x6	<-- valeurs mesurées en xi: Z(xi)
						<-- points de mesure xi (ici régulièrement espace
h = 1						
$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N(h)} Z(x_i) - Z(x_i+h)^2}{N(h)}$						avec : h = distance ; Z(x) = valeur au point x
						et : N(h) = nombre de couples de points distants de h
à la distance h=1 (5 couples de points distants de la distance 1) :						
$\begin{aligned} \gamma(1) &= 1/2 \text{ Moyenne}[Z(x_{i+1})-Z(x_i)]^2 \\ &= 1/2 [(Z(x_2)-Z(x_1))^2 + (Z(x_3)-Z(x_2))^2 + \dots + (Z(x_6)-Z(x_5))^2] / 5 \\ &= 1/10 \cdot [(6-5)^2 + (4-6)^2 + \dots + (7-5)^2] = 1.4 \end{aligned}$						
à la distance h=2 (4 couples de points distants de la distance 2) :						
$\begin{aligned} \gamma(2) &= 1/2 \text{ Moyenne}[Z(x_{i+2})-Z(x_i)]^2 \\ &= 1/2 [(Z(x_3)-Z(x_1))^2 + (Z(x_4)-Z(x_2))^2 + (Z(x_5)-Z(x_3))^2 + (Z(x_6)-Z(x_4))^2] / 4 \\ &= 1/8 \cdot [(4-5)^2 + (3-6)^2 + (5-4)^2 + (7-3)^2] = 3.375 \end{aligned}$						
etc...						

Principe de calcul du variogramme

Le variogramme est d'abord un outil d'analyse des phénomènes naturels. En effet, l'allure et le comportement du variogramme expérimental fournissent une image synthétique des principaux traits structuraux du phénomène étudié :

- **Continuité à l'origine.** En principe Z(x) et Z(x+h) sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet, il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de pépité ». Elle traduit la part de variabilité du phénomène que l'on ne peut expliquer soit en raison de la maille d'échantillonnage, qui ne permet pas de mettre en évidence des variabilités locales, soit en raison d'erreurs de mesure. La figure A (b) ci-dessous montre un exemple d'effet de pépité.
- **Continuité spatiale au-delà de l'origine,** traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure A (a) ci-dessous ; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine (Z(x) et Z(x+h) sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible) et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre Z(x) et Z(x+h) n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,
 - **anisotropie** (la continuité spatiale n'est pas nécessairement la même dans toutes les directions. Il y a isotropie lorsque le variogramme est identique dans toutes les directions de l'espace ; dans le cas contraire, on parle d'anisotropie),

- **imbrication d'échelles de variabilité,**
- **absence de portée finie** - figure A (b) ci-dessous, dérive ou tendance régionale, phénomène non stationnaire.

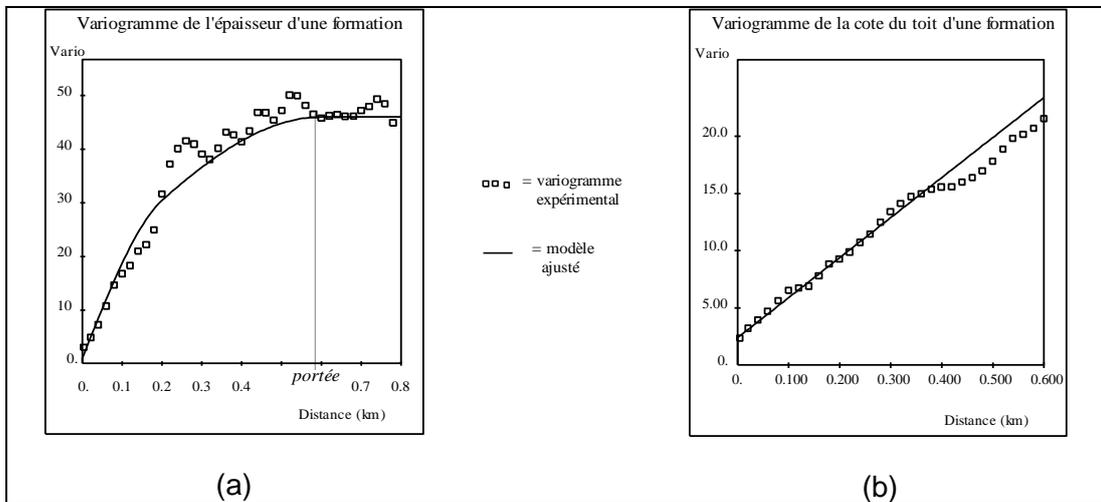


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

La méthode d'interpolation spécifique à la géostatistique est le krigeage. Par rapport aux autres méthodes d'interpolation automatique, les algorithmes du krigeage reposent sur une interprétation du phénomène à travers l'étude variographique préalable. Le krigeage présente un double intérêt :

- Il remplace le dessin par un calcul qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre étudié. Cette interpolation prend en compte :
 - la densité et la répartition des données sur le domaine étudié,
 - la plus ou moins grande continuité spatiale modélisée par le variogramme,
 - les diverses erreurs de mesure et incertitudes associées aux données.
- Il quantifie l'incertitude qui entache toute valeur interpolée. Cette incertitude, qui est une mesure de la qualité locale de la carte obtenue, est essentielle dans tous les projets où les risques encourus doivent être connus, et minimisés le cas échéant par de nouvelles mesures.

Formalisme du krigeage « ordinaire »

Le krigeage le plus utilisé est le « krigeage ordinaire ». Il s'agit d'une interpolation par combinaison linéaire des données de base $Z(x_i)$. La valeur interpolée au point x , notée $Z^*(x)$, est donnée par :

$$Z^*(x) = \sum_{i=1,n} \lambda_i Z(x_i)$$

Le non biais est assuré à la condition que la somme des poids ou pondérateurs λ_i soit égale à 1 :

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

Les pondérateurs sont alors choisis de façon à minimiser la variance d'estimation. Ceci conduit aux équations du krigeage ordinaire suivantes :

$$\sum_{j=1,n} \lambda_j \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_i, x) \quad \forall i \text{ (n équations)}$$

$$\sum_{i=1,n} \lambda_i = 1$$

n	=	nombre d'informations disponibles,
i, j	=	indices des points de mesure ; i et j varient de 1 à n,
x_i, x_j	=	points de mesure x_i et x_j ,
$Z(x_i), Z(x_j)$	=	valeurs mesurées en x_i et x_j ,
x	=	volume à estimer (point ou bloc),
λ_i (ou λ_j)	=	pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en x_i ,
μ	=	paramètre de Lagrange,
$\gamma(x_i, x_j)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x_j ,
$\gamma(x_i, x)$	=	valeur du variogramme $\gamma(h)$ pour h = distance entre x_i et x , si x est un volume, on prend la valeur moyenne de γ entre x_i et ce volume.

Enfin la variance de l'erreur d'estimation, appelée **variance d'estimation** ou **variance de krigeage**, vaut :

$$S_k^2 = \sum_{i=1,n} \lambda_i \gamma(x_i, x) - \bar{\gamma}(x, x) + \mu$$

$\bar{\gamma}(x, x)$ est la valeur moyenne du variogramme entre deux points appartenant au volume x. Si le volume se réduit à un point, la distance qui sépare ces points est nulle et on a $\bar{\gamma}(x, x) = 0$.

Dans les expressions ci-dessus on voit que dans le krigeage interviennent :

- les positions des informations x_i par rapport au volume ou au point à estimer x, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x)$;
- la répartition des informations, par le biais des valeurs de $\gamma(x_i, x_j)$;
- la fonction structurale variogramme γ .



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 Rennes - France
Tél. : 02 99 84 26 70