



SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon

Rapport final - Année 2

BRGM/RP-56318-FR
mai 2008



Établissement public du ministère
chargé du développement durable





SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon

Rapport final - Année 2

BRGM/RP-56318-FR
mai 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 EAU A06

B. Mougin, J-M. Baltassat, R. Blanchin, E. Putot, J-M. Schroetter et R. Wyns



Établissement public du ministère
chargé du développement durable

Vérificateur :

Nom : Anne CARN

Date : 27/05/2008

(Original signé)

Approbateur :

Nom : Michel LECLERCQ

Date : 30/05/2008

(Original signé)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : SILURES, eaux souterraines, hydrogéologie, sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique, roches altérées, milieu fissuré, cartographie, modélisation géostatistique, Ille-et-Vilaine, Bretagne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : 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 - 82 p., 29 ill., 3 ann. dont 14 planches (vol. séparé).

Synthèse

Ce document constitue le rapport final du projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine. Ce projet, d'une durée de 2.5 ans, a été réalisé grâce à la collaboration de la Région Bretagne, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine, du Syndicat Mixte départemental de Gestion des eaux d'Ille-et-Vilaine, et du BRGM.

Le projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine a pour objectif de produire des documents utilisables à l'échelle des groupements de communes (échelle 1/50 000) pour permettre la prise en compte raisonnée des ressources en eau du sous-sol dans les stratégies d'exploitation et de reconquête de la qualité des eaux. Ce projet s'appuie sur le projet régional SILURES Bretagne.

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires : il s'agit du bassin versant du Nançon, situé en Ille-et-Vilaine au Nord de Fougères (sur une superficie de 57 km²).

Sur le bassin, l'étude 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 9 sondages de Résonance Magnétique Protonique,
- une cartographie des volumes d'eau souterraine stockés dans les 50 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),
- une localisation des zones favorables à l'implantation de forage d'eau ayant les meilleures chances de réussite en terme de débit,
- une cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (document utile pour définir des secteurs à protéger afin d'obtenir de bons résultats de reconquête de la qualité des eaux souterraines et des eaux de surface).

Les principaux résultats obtenus sont :

- les volumes des réserves en eau souterraine existantes sur les 57 km² du bassin versant du Nançon ont été estimés à 43.4 ± 5 millions de m³ ;
- les temps de renouvellement de l'eau souterraine présente dans les 50 premiers mètres des aquifères (temps de transit de l'eau dans la zone non saturée + temps de vidange de l'aquifère saturé) sont de un peu moins de 6 ans ;
- le bassin versant du Nançon est riche en eaux souterraines et il se vidange lentement. Ceci s'explique par des perméabilités moyennes des roches (granodiorites) qui drainent cependant un volume d'eau assez important vers la rivière (participation des eaux souterraines au débit du Nançon : 58 %).

Le temps annoncé ci-dessus 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 6 ans en raison des phénomènes de mélange entre l'eau souterraine qui se vidange annuellement et l'eau qui s'infiltre jusqu'à la nappe.

Pour localiser des zones favorables à l'implantation de forage d'eau, la conjonction entre 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) a été recherchée. Cette fracturation est signalée par les discontinuités géophysiques présentes sur le bassin. La limite d'influence des discontinuités sur les forages est limitée à un périmètre de 400 mètres.

Ces zones favorables sont situées au Nord-Est et au Sud-Ouest du bassin du Nançon.

La cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration, effectuée sur le bassin étudié, montre un découpage amont/aval : la partie amont a une capacité d'absorption des eaux d'infiltration moyenne à forte et la partie aval est moins favorable à ces eaux (le ruissellement devient majoritaire).

L'ensemble des cartes réalisées dans le cadre du projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine constitue un type nouveau de données utilisables :

- pour la localisation des eaux souterraines en vue de leur exploitation par forage,
- par les politiques de protection et de reconquête de la qualité des eaux souterraines et de surface.

Sommaire

1. Déroulement du projet.....	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF.....	10
1.3. ORGANISATION DU PROJET.....	12
1.4. RAPPEL DES RESULTATS ACQUIS	12
1.5. CONDITIONS DE REALISATION	13
2. Contexte géologique et géomorphologique.....	15
2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM.....	15
2.2. GEOLOGIE DE LA SURFACE ET GEOMORPHOLOGIE	19
2.3. MODELE CONCEPTUEL DES AQUIFERES DE SOCLE	20
3. Campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP).....	25
3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	25
3.2. METHODES ET MOYENS.....	27
3.3. TRAVAUX REALISES.....	39
3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES.....	43
4. Modélisation géométrique des interfaces	47
4.1. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE	47
4.2. MODELISATION DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE.....	49
4.3. MODELISATION DE LA BASE DES ALTERITES ET DE L'EPAISSEUR DES ALTERITES EN PLACE	53
4.4. MODELISATION DE LA BASE DE L'HORIZON FISSURE SUPERIEUR ET INFERIEUR.....	54
4.5. CALCUL DE L'EPAISSEUR DES HORIZONS SITUES EN ZONE SATUREE	55

5. Calcul de la réserve en eau souterraine	57
5.1. SYNTHÈSE DES MESURES RMP	57
5.2. CALCUL DE LA CARTE DE LA RÉSERVE EN EAU SOUTERRAINE	60
5.3. DISCUSSION ET COMMENTAIRES.....	60
6. Utilisations des cartes	63
6.1. UTILISATION DES CARTES POUR LA RECHERCHE DES EAUX SOUTERRAINES EN VUE DE LEUR EXPLOITATION	63
6.2. UTILISATION DES CARTES POUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET DES EAUX DE SURFACE	69
6.3. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR LES QUATRE AUTRES BASSINS VERSANTS.....	75
7. Conclusion	79
8. Bibliographie	81

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation du bassin versant retenu en Ille-et-Vilaine	11
Illustration 2 - Coupe théorique de l'accumulation de Landéan à partir des données de forages.....	18
Illustration 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)	21
Illustration 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité	23
Illustration 5 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.	24
Illustration 6 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP (coordonnées en Lambert II étendu)	26
Illustration 7 - Principe de mesure RMP	28
Illustration 8 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental	29
Illustration 9 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site	29
Illustration 10 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception	30
Illustration 11 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1	32
Illustration 12 - Résultats d'inversion des données théoriques	34
Illustration 13 - Paramètres du modèle	34
Illustration 14 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.....	36
Illustration 15 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP.....	37
Illustration 16 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassin versant du Nançon)	41
Illustration 17 - Coupe de résistivité interprétée à l'aplomb du sondage RMP NAN7A	42
Illustration 18 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine.....	47
Illustration 19 - Principe de modélisation de la surface piézométrique	50
Illustration 20 - 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 du Nançon)	52
Illustration 21 - 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 du Nançon).....	54
Illustration 22 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Nançon)	58
Illustration 23 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne	65

Illustration 24 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur le bassin du Nançon.....	67
Illustration 25 - Localisation du bassin versant étudié par rapport au bassin modélisé	69
Illustration 26 - Evaluation du volume d'eau souterraine renouvelable annuellement sur le bassin versant du Nançon.....	70
Illustration 27 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P	72
Illustration 28 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration	73
Illustration 29 - Localisation des cinq bassins versants ayant fait l'objet d'une étude SILURES Bassins versants	76

Liste des annexes (volume séparé)

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

Annexe 2 - Planches A3

Annexe 3 - Interpolation par la géostatistique

Liste des planches A3 (annexe 2 du volume séparé)

Planche 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Nançon)

Planche 2 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Nançon)

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

Planche 4 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Nançon)

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

Planche 6 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Nançon)

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

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

Planche 9 - Lamme d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Nançon)

Planche 10 - Lamme d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Nançon)

Planche 11 - Lamme d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Nançon)

Planche 12 - Lamme d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Nançon)

Planche 13 - Lamme d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin du Nançon)

Planche 14 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Nançon)

1. Déroulement du projet

1.1. CONTEXTE

La gestion des ressources en eau implique la prise en compte des eaux souterraines. Celles-ci interviennent de façon non négligeable, voire prépondérante, dans l'alimentation des rivières, le transfert des éléments dissous et la satisfaction des besoins.

En milieu de socle, comme l'est la Bretagne, la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sous-sol et des paramètres qui régissent l'emmagasinement et l'écoulement des eaux souterraines reste difficile.

Des données existent (forages recensés, régimes des cours d'eau...), des méthodologies ont été mises au point et testées (typologie des bassins versants, modélisation des écoulements...), et des outils d'acquisition des paramètres de terrain tels que la porosité sont disponibles (géophysique par Résonance Magnétique Protonique - RMP). De plus, une campagne de prospection géophysique aéroportée a été réalisée au cours de l'été 1998 pour le compte du Ministère de l'Industrie. L'ensemble constitue une importante source d'informations sur la constitution et la nature du sous-sol.

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

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

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

Le projet SILURES Bassins versants, d'une durée de 2 ans, s'est achevé en début d'année 2005 (rapports BRGM/RP-51891-FR et RP-53742-FR). Le travail a été mené sur quatre bassins versants d'une superficie d'environ 50 km² : Maudouve et Noë Sèche (Côtes d'Armor), Dourduff (Finistère), Oust et Yvel (Morbihan).

En 2006, une étude spécifique appelée « SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine » a été décidée sur un bassin versant du département d'Ille-et-Vilaine. Ce projet, d'une durée initialement prévue de 2 ans, est réalisé grâce à la collaboration de la Région Bretagne, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, du Conseil Général d'Ille-et-Vilaine, du Syndicat Mixte départemental de Gestion des eaux d'Ille-et-Vilaine, et du BRGM.

Le présent rapport détaille les résultats obtenus à l'issue du projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine.

1.2. OBJECTIF

Le projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine a pour objectif de produire des documents utilisables à l'échelle des communes ou des groupements de communes pour permettre la prise en compte raisonnée des paramètres physiques du sous-sol dans les stratégies d'exploitation et de reconquête de la qualité des eaux. Pour ce faire, le projet s'intéresse au bassin suivant (cf. illustration 1) :

- au Nord de Fougères (en Ille-et-Vilaine), le bassin versant du Nançon, de sa source jusqu'à la station de Lécousse (Pont aux Anes) d'une superficie de 57 km² en enlevant le ruisseau du Gué Pérou et ses affluents¹. Ce bassin est situé dans un contexte géologique magmatique.

Le volet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine utilise les données obtenues dans le cadre de SILURES Bretagne, tout en les complétant par l'acquisition de paramètres spécifiques nécessaires à la définition et à la modélisation des réservoirs aquifères :

- une cartographie détaillée des formations superficielles,
- la réalisation de sondages mécaniques et géophysiques (RMP),
- une cartographie de la surface piézométrique théorique.

Ces différentes étapes permettent ensuite de créer les livrables finaux du projet :

- une cartographie de la géométrie des réservoirs,
- une cartographie des volumes d'eau stockés au niveau de chacun des bassins versants,
- une estimation des temps de vidange des aquifères.

¹ Le ruisseau a été supprimé pour obtenir une superficie en adéquation avec les objectifs du programme (environ 50 km²)

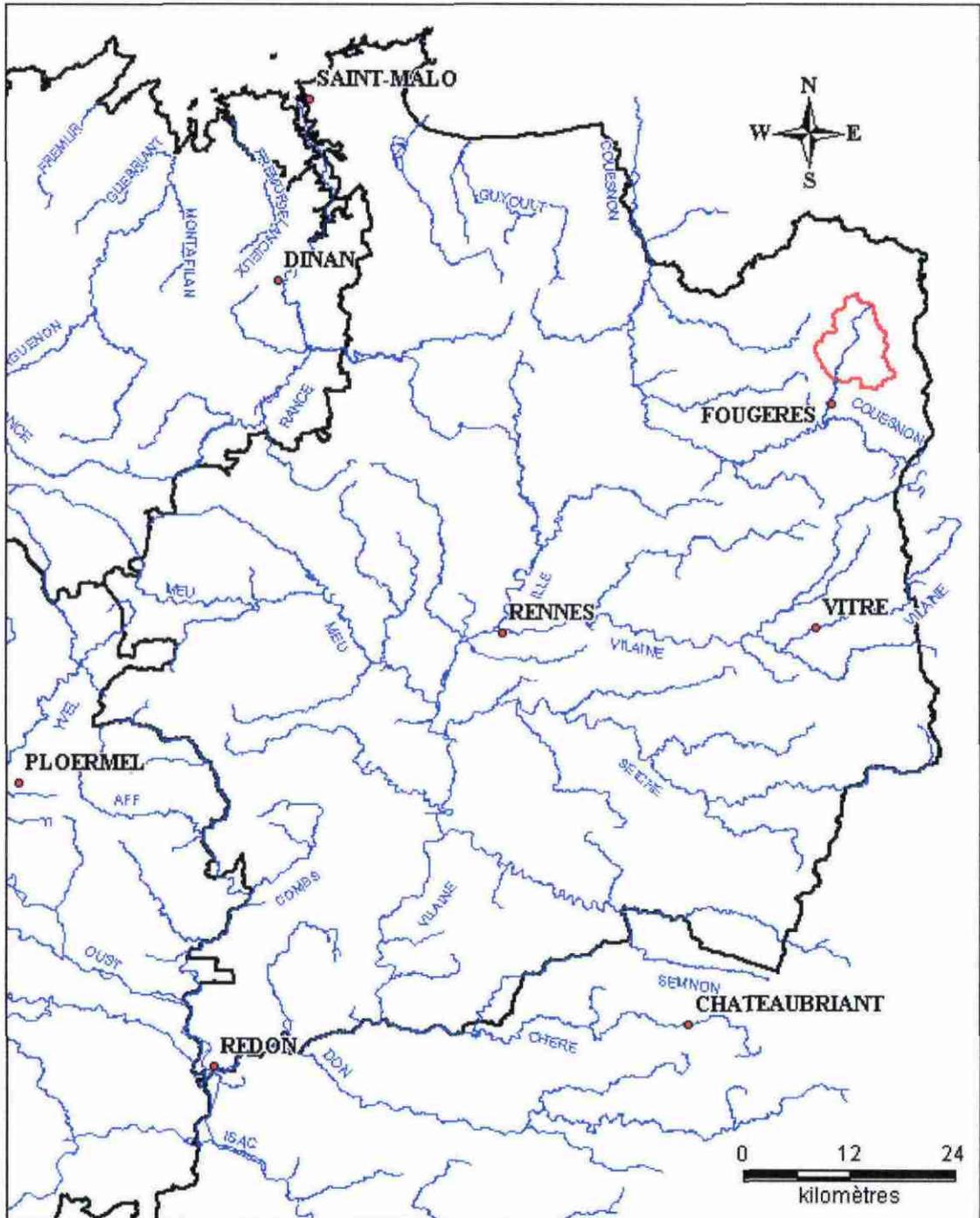


Illustration 1 - Localisation du bassin versant retenu en Ile-et-Vilaine

1.3. ORGANISATION DU PROJET

Initialement, il était prévu que le projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine se déroule sur les deux années 2006-2007 :

- la première année est entièrement dédiée au travail de terrain : cartographie des formations superficielles, réalisation de sondages mécaniques à la tarière puis des sondages géophysiques RMP sur le bassin versant,
- la deuxième année est consacrée à l'interprétation des sondages géophysiques puis à la création et à l'édition des documents de synthèse.

En raison de la réalisation urgente, par le BRGM pour le compte du Ministère de l'Écologie et de la Préfecture de Bretagne, de l'étude sur les bassins versants bretons en contentieux européen (nitrates dans les prises d'eau potable - eaux brutes), le projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine a pris six mois de retard et il s'est achevé fin juin 2008. Ce délai supplémentaire a été acté par les partenaires financiers lors du 6^{ème} comité de pilotage du programme SILURES le 28 juin 2007.

1.4. RAPPEL DES RESULTATS ACQUIS

Dans le cadre de ce projet, un rapport d'avancement en fin de première année a été remis en décembre 2006 : rapport BRGM/RP-55113-FR. Ce rapport détaille le travail accompli sur le bassin : cartographie des formations superficielles, réalisation de 13 sondages mécaniques et description des terrains recoupés, et utilisation des données du projet SILURES Bretagne (cartographie de l'intérêt hydrogéologique des aquifères de socle, et examen de la contribution des eaux souterraines au débit de la rivière).

La valorisation des données de forages (intérêt des aquifères de socle) a montré que le bassin du Nançon, géologiquement homogène (deux granodiorites à compositions minéralogiques légèrement différentes), présente néanmoins des formations plus perméables au Nord qu'au Sud.

Les résultats de la modélisation réalisée dans le cadre du projet SILURES Bretagne ont indiqué que la contribution globale annuelle des eaux souterraines au débit du Nançon s'élève à hauteur d'un peu plus de 58 %.

La cartographie des formations superficielles, ainsi que les résultats de 13 sondages mécaniques à la tarière, ont montré que les altérites sont très largement représentées sur le bassin versant du Nançon. Elles couvrent une surface importante, supérieure à 50 % de la superficie totale cartographiée.

Au cours de la deuxième année du projet, des campagnes de sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisées pour caractériser la porosité et les teneurs en eau des formations géologiques. L'interprétation de ces

sondages combinée à la modélisation de l'épaisseur des réservoirs aquifères a permis de cartographier les volumes d'eau stockés.

Ce rapport final présente, pour le bassin du Nançon, l'ensemble des cartes réalisées et détaille les résultats et conclusions obtenus.

1.5. CONDITIONS DE REALISATION

Afin de réaliser un modèle géométrique des aquifères de socle et de la surface piézométrique sur le bassin versant, les données de forages 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 64 points, et l'altitude de la surface piézométrique sur 58 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 8 points.

Elles ont été complétées par les levés de terrain (en juin et juillet 2006) destinés à déterminer l'altitude de la base des altérites sur le bassin versant ; les observations d'affleurements sur le terrain ont permis d'ajouter 1345 points de calage supplémentaires du contact altérites/milieu fissuré aux données de forages et sondages (cf. chapitre 4.3.).

11 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés (en novembre et décembre 2006) sur le bassin versant.

9 sondages ont fourni des résultats utilisables afin de déterminer les profils verticaux de teneurs en eau sur les différents faciès lithologiques représentatifs de la zone d'étude. Les résultats de ces mesures géophysiques sont présentés dans le chapitre 3.

La modélisation spatiale de la géométrie des aquifères, de la piézométrie et de la lame d'eau stockée a été réalisée dans les environnements ArcView version 3.2 et ArcMap version 9.0 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 50 m (BDALTI 2005). Le tracé du réseau hydrographique pérenne est issu de la BD CARTHAGE de l'IGN (version 2.4 de juin 2000).

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

Ce rapport fait l'état d'avancement de la 2^{ème} et dernière année du projet qui a permis :

- de réaliser des sondages RMP,
- de modéliser la géométrie des réservoirs aquifères,

- de reconstituer la piézométrie du secteur,
- de cartographier les volumes d'eau souterraine,
- de synthétiser l'ensemble des travaux dans ce rapport.

Ces points sont développés ci-dessous.

2. Contexte géologique et géomorphologique

2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM

La planche 1 de l'annexe 2 représente la carte géologique du secteur du bassin versant du Nançon.

Les formations géologiques rencontrées sur le bassin versant du Nançon sont peu nombreuses. Pour les formations dites de « socle », elles se limitent surtout au Massif de Fougères, qui fait partie d'un ensemble de plutons formant le batholite mancellien. Ces intrusions granodioritiques d'âge tardi-cadomien (540 Ma) se mettent en place en contexte anorogénique, postérieurement à la déformation cadomienne *sensus stricto*, dans un encaissant grésopélitique (Briovérien) qu'ils métamorphosent (modifications des roches par action de la température et de la pression). Sur le secteur concerné par cette étude, deux faciès granodioritiques très proches sont observés : le faciès type Louvigné-du-Désert correspondant à une granodiorite à biotite et le faciès type Vire correspondant à une granodiorite à biotite et cordiérite (la cordiérite est un silicate alumineux ferro-magnésien, c'est un minéral du métamorphisme de contact). Quelques filons mineurs sont localement observés ; il s'agit essentiellement de leucogranites et d'aprites, d'âge indéterminé, qui se mettent en place au sein du Massif très tardivement par rapport aux deux faciès principaux. Aucune formation sédimentaire antérieure à l'Oligocène ne peut être observée sur le secteur cartographié. Les premiers dépôts cénozoïques sont représentés par les argiles rupéliennes de Landéan, largement étudiées par le passé. Il existe de nouveau une grande lacune entre l'Oligocène et le Quaternaire. Les dépôts quaternaires correspondent à des formations limono-loessiques dont l'origine primaire est à rechercher dans les sédiments exondés de la Manche à plusieurs reprises au cours des périodes glaciaires.

Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)

La granodiorite blanche du type Louvigné-du-Désert (M. Jonin, 1973) est une roche claire, homogène, de granulométrie moyenne (2 à 4 mm). Sa texture est isogranulaire et équante. Elle est composée de quartz en amas généralement globulaires, de feldspaths, de biotite et accessoirement de sulfures. Le début de l'altération se marque par une coloration jaune verdâtre des plagioclases, ce qui les distingue des feldspaths alcalins et assombrit la roche. Les enclaves, centimétriques à décimétriques, réparties de façon homogène, sont de trois types :

- enclaves microgrenues sombres, arrondies, à contact net avec la granodiorite ;
- enclaves de roches métamorphiques surmicacées et alumineuses, généralement allongées, parfois plissées et boudinées, à contact net ou diffus avec interpénétration ;
- enclaves monominérales.

La notice de la carte géologique de Saint-Hilaire-du-Harcouët (P. Dadet et al. 1984) mentionne une étude pétrographique, qui a porté sur l'analyse de lames minces provenant du faciès granodioritique type Louvigné-du-Désert. Sa composition minéralogique, donnée par la moyenne calculée à partir de 20 analyses modales, est la suivante : quartz (27,7% : 22 à 38%), feldspaths alcalins (17% : 9 à 26%), plagioclase (37,5 % : 30 à 45%), biotite (16,5% : 10 à 25%) et divers (1,3%).

Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)

La granodiorite grise, du type Vire (M. Jonin, 1973), est le type plus répandu dans tout le batholite. La teinte de la roche est un peu plus sombre, avec granulométrie et texture analogues à celles de l'autre faciès. Elle s'en distingue essentiellement par la présence de cordiérite (minéral du métamorphisme), très souvent en prismes de 1 à 4 mm, et de muscovite subordonnée. Les enclaves sont les mêmes que la granodiorite à biotite seule, celles d'origine métamorphique sont plus abondantes.

Un faciès porphyrique, à rares phénocristaux de feldspaths dans une matrice assez fine, semble être un simple faciès de bordure, localisé au toit du massif. On l'observe surtout à l'Est de la Bazouge-du-Désert, mais aussi localement ailleurs dans la même situation.

La composition minéralogique de la granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire) diffère de celle de la granodiorite à biotite seule. La composition moyenne, calculée à partir de 9 analyses modales, est la suivante : quartz (27,8% : 19 à 34%), feldspath alcalin (11,4% : 4 à 22%), plagioclase (34,2% : 28 à 38%), biotite (12,7% : 8 à 16%), cordiérite (7,6% : 3 à 13%), muscovite (4,5% : 0.5 à 7%) et divers (1,8%).

Cornéennes et micaschistes (Unité de Fougères)

Les sédiments briovériens ont été transformés suite au métamorphisme de contact des granitoïdes cadomiens. Le terme de « cornéennes » est employé pour désigner des roches ayant totalement (ou presque) recristallisé sous l'effet du thermo-métamorphisme. Les cornéennes de Fougères constituent donc la partie la plus interne de l'auréole de contact. Du point de vue morphologique leur résistance à l'érosion fait qu'elles affleurent en plateau dominant le pourtour du massif granitique.

Sur le bassin du Nançon, les cornéennes affleurent sur la partie Sud de la zone cartographiée vers Laignelet et également à la Bazouge-du-Désert. A l'affleurement les cornéennes se reconnaissent facilement par leur aspect plus « cristallin » et micacé, leur dureté ou bien leur altération rougeâtre. La roche est fréquemment rubannée ou litée car, malgré la recristallisation, les différences lithologiques originelles sont conservées : les niveaux quartzo-feldspathiques à cordiérite peu abondante correspondent aux lits gréseux ; les niveaux à cordiérite dominante et muscovite abondante constituent les équivalents des lits silto-argileux.

Un dépôt rouge à blocs provient en partie au moins de l'altération des cornéennes. L'étude granulométrique montre qu'il s'agit d'un sable fin, limoneux et argileux ou d'un

limon argilo-sableux. La fraction fine est toujours constituée par une argile micacée, de la vermiculite, un interstratifié mica-vermiculite, auxquels s'ajoutent de la kaolinite, une chlorite et quelques feuillets gonflants dans certains échantillons. Les blocs et fragments de roches sont de nature variée : quartz, roches métamorphiques, schistes rouges.

Argiles oligocènes de Landéan

Le petit bassin de Landéan est situé à une altitude avoisinant 140 m sur la granodiorite de Fougères. Sa préservation par un jeu de faille est supposée bien qu'elle n'ait jamais été démontrée formellement avant cette étude ; la description et l'interprétation qu'en donne Estéoule-Choux, 1967, ne fait pas mention de failles bordières (mais d'une « chute brutale du substratum granitique »). Les sondages (par exemple, sondage P2 ou puits de Parigné, cf. illustration 2) ont montré (Choux, 1959 ; Estéoule-Choux 1967) la profondeur importante du bassin puisque, sous les accumulations sédimentaires, le granite kaolinisé apparaît vers 40 mètres, le granite fissuré étant atteint aux alentours de 70 mètres. La succession observée dans le puits de Parigné est la suivante : à la base, des argiles kaoliniques non transportées provenant de l'altération du granite sous-jacent. Au-dessus, des marnes et argiles blanches, grises ou vertes avec localement des niveaux tourbeux et des niveaux montmorillonite et attapulгите. Un niveau bien particulier se différencie aux alentours de 11,5 mètres (épaisseur : 1,5 m) : il s'agit d'argiles noires à kaolinite et attapulгите, ligniteuses, riches en débris végétaux et restes d'insectes renfermant de nombreux gastéropodes d'eau douce. Ce niveau a permis à Rey (1959, 1974) de proposer un âge oligocène (équivalent horizon à Striatelles du « Sannoisien ») pour ce dépôt.

La coupe présentée du Sud-Ouest au Nord-Est (cf. illustration 2) est basée sur l'analyse de sondages relativement bien documentés dont les faciès étaient assez facilement corrélables latéralement. Nous avons interprété en fonction du contexte régional la brusque chute du socle granitique comme le résultat d'une faille qui est par ailleurs reportée sur la carte géologique au 1/50 000 de Fougères.

Mise à part la coupe géologique détaillée sur l'illustration 2, la géométrie du bassin des argiles de Landéan est très difficile à cartographier (délimitations géographique et en profondeur). De plus, les sondages actuellement disponibles dans la Banque du Sous-Sol du BRGM ne permettent pas d'interpréter sur tout le bassin l'altitude de la base des altérites (contact marnes / argiles kaoliniques).

Par ailleurs, les tentatives de réalisation de sondages géophysiques RMP (cf. chapitre 3) ont échoué en raison de la présence de zones humides marécageuses et de parcelles complètement détrempées.

Enfin, l'aquifère des argiles de Landéan semble assez pauvre en raison de sa faible extension et de sa perméabilité très faible.

Pour toutes les raisons citées ci-dessus, le BRGM a retenu l'idée de ne pas cartographier les volumes d'eau souterrains présents dans cette formation.

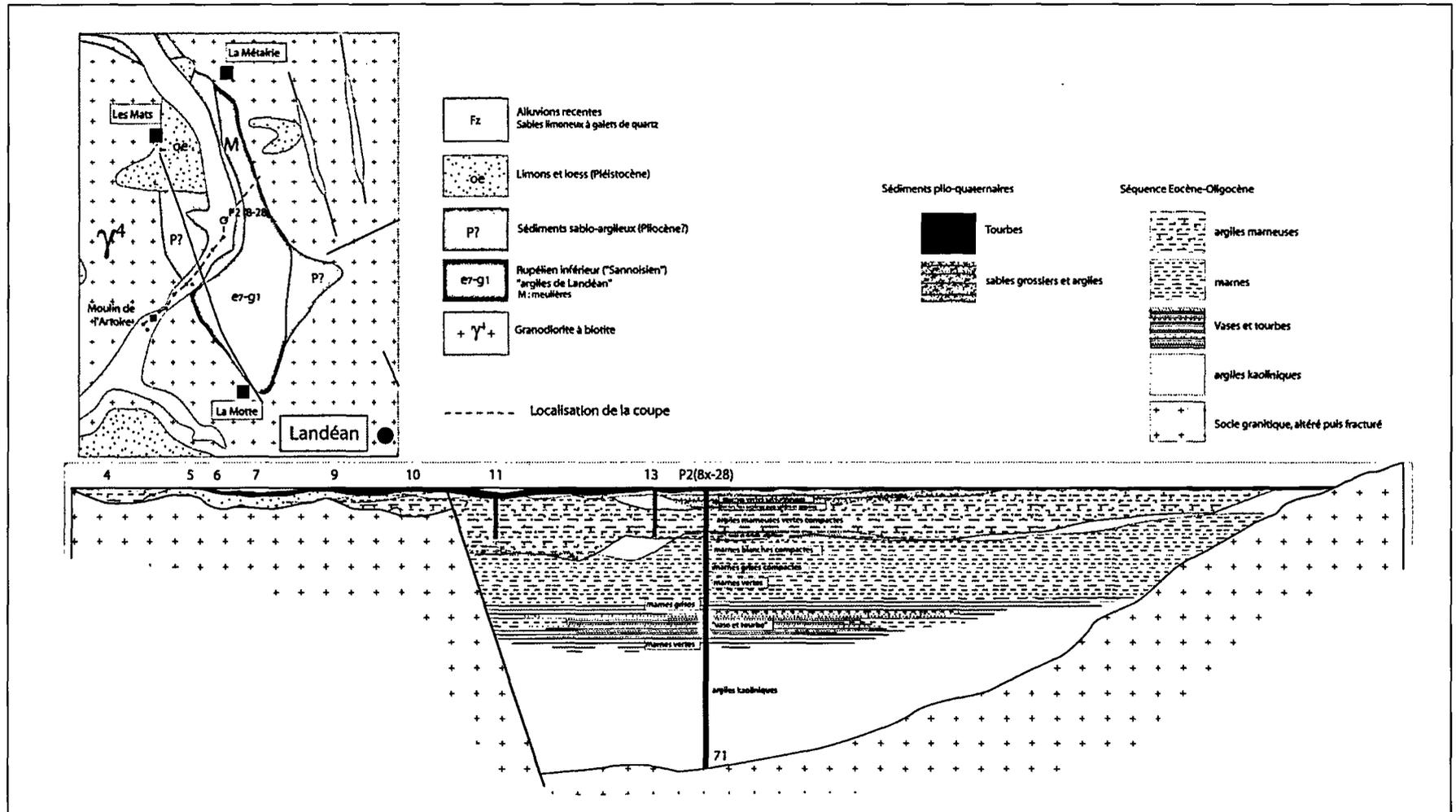


Illustration 2 - Coupe théorique de l'accumulation de Landéan à partir des données de forages

2.2. GEOLOGIE DE LA SURFACE ET GEOMORPHOLOGIE

Le bassin versant du Nançon correspond à une zone où le relief est peu marqué : il n'y a pas de fortes ruptures des pentes, de domaines à incision des vallées. Au Sud en revanche, hors de la zone d'étude, le relief est bien prononcé aux approches de Fougères. Les différences altitudinales restent cependant bien exprimées avec des hauts topographiques situés vers 230 m à l'Est de Laignelet et des bas topographiques aux environs de Landéan. Le côté Ouest est relativement monotone depuis Lécousse à Villamée en passant par Parigné. Le secteur Nord-Est (Nord-Ouest de Bazouge-du-Désert) présente des variations plus importantes liées aux « dômes » granitiques qui réapparaissent au sein des arènes plus meubles.

La cartographie des formations meubles effectuée sur le bassin versant du Nançon a montré que le recouvrement en formations superficielles peut être divisé en trois ensembles, correspondant vraisemblablement à trois surfaces continentales anciennes. Les altérites portées par ces surfaces ont rigoureusement des faciès identiques, seule la position altitudinale de la surface qui les porte permet de les différencier.

La surface la plus haute se situe à l'Est de Laignelet où les arènes sont observées pour des altitudes globalement comprises entre 185 et 230 m. Il s'agit de la surface la plus ancienne observable dans cette partie Est du Massif armoricain. Au-dessus de 230 m, la granodiorite saine réapparaît. De 155 à 175 m avec quelques variations locales, la deuxième surface se met en place. Elle est déconnectée de la précédente par une « bande » où réapparaît la roche saine correspondant à un talus de raccordement entre deux paléosurfaces. C'est cette surface intermédiaire qui porte les profils parmi les plus complets. En continuité avec la précédente, c'est à dire sans talus de raccordement, la troisième surface succède à la seconde surface. Cette surface, la plus récente, porte aussi des altérites entre environ 130 et 155 m.

Sur toutes ces surfaces qui portent des altérites, la base des formations meubles n'est pas horizontale : certains domaines granodioritiques ont été plus ou moins altérés au cours de leur histoire ; il est ainsi fréquent d'observer des variations qui peuvent être relativement brutales à l'échelle locale ; pour pouvoir appréhender cette géométrie très complexe, il aurait fallu multiplier les sondages, ce qui n'était pas possible dans le cadre de cette étude. Ainsi, au sein de domaines altérés, la granodiorite saine réapparaît assez fréquemment, formant des « bosses » bien repérables dans le paysage. Un nombre important de carrières exploitant la granodiorite comme matériau de construction ont été ouvertes dans ces domaines particuliers. Ces secteurs ont été pris en compte lors de la modélisation de la base des altérites.

Dans une direction Nord-Ouest - Sud-Est, la cartographie de la base des altérites permet de définir un couloir de quelques centaines de mètres de large où les lois d'altimétrie énoncées plus haut ne semblent plus s'appliquer : les différences d'altitude entre les surfaces restent globalement les mêmes mais l'ensemble des surfaces semble affaissé d'une dizaine à une quinzaine de mètres dans ce couloir. Cette zone particulière correspond vraisemblablement à un graben d'effondrement articulé autour

de deux ou trois failles principales que seule la cartographie des formations superficielles permet de mettre en évidence.

2.3. MODELE CONCEPTUEL DES AQUIFERES DE SOCLE

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

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

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

Les zones où préexistaient des réseaux de fractures d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

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

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

quelques mètres, car la surface d'érosion qui supporte les dépôts marins miocènes et pliocènes de ces régions n'est pas altérée.

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

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

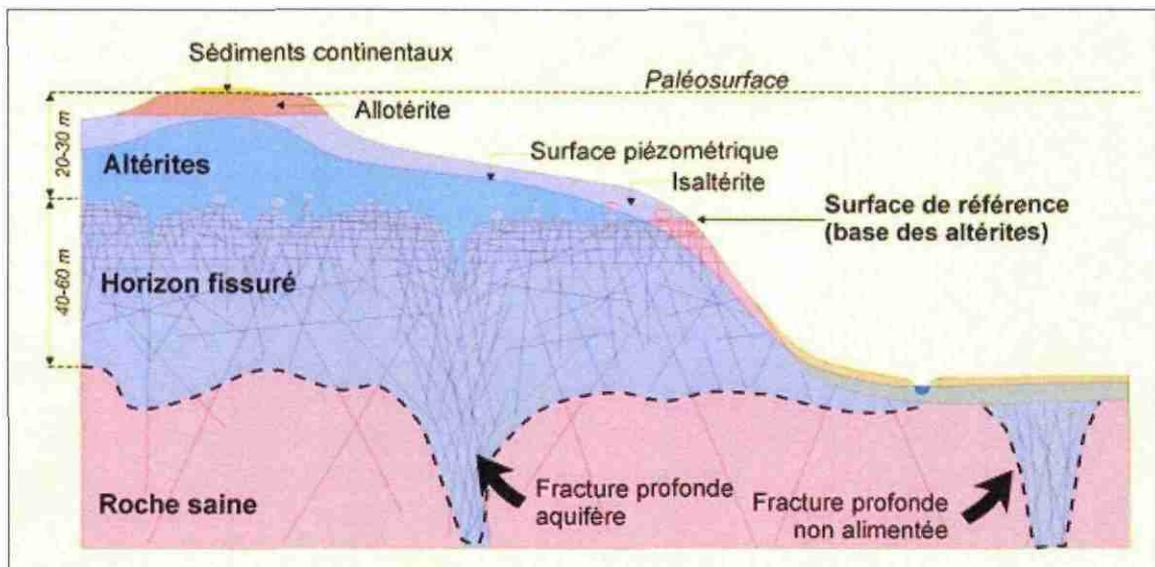


Illustration 3 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

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

- cuirasse latéritique (0 à quelques m) : rarement préservée, par suite de la troncature du profil par l'érosion ou de sa destruction par évolution vers un latosol (non représentée sur l'illustration 3) ;
- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée. En contexte schisteux, il s'agit d'une argile

imperméable ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace.

- isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante, permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte schisteux, cet horizon, à dominante silto-argileuse, est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles, de diamètre souvent plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité.
- zone fissurée (40 à 70 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (illustration 4) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par les changements de phase minéralogique, principalement l'hydratation de la biotite, qui se transforme avec augmentation de volume en chlorite, puis vermiculite, avant d'évoluer vers des minéraux argileux. Dans les 15 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

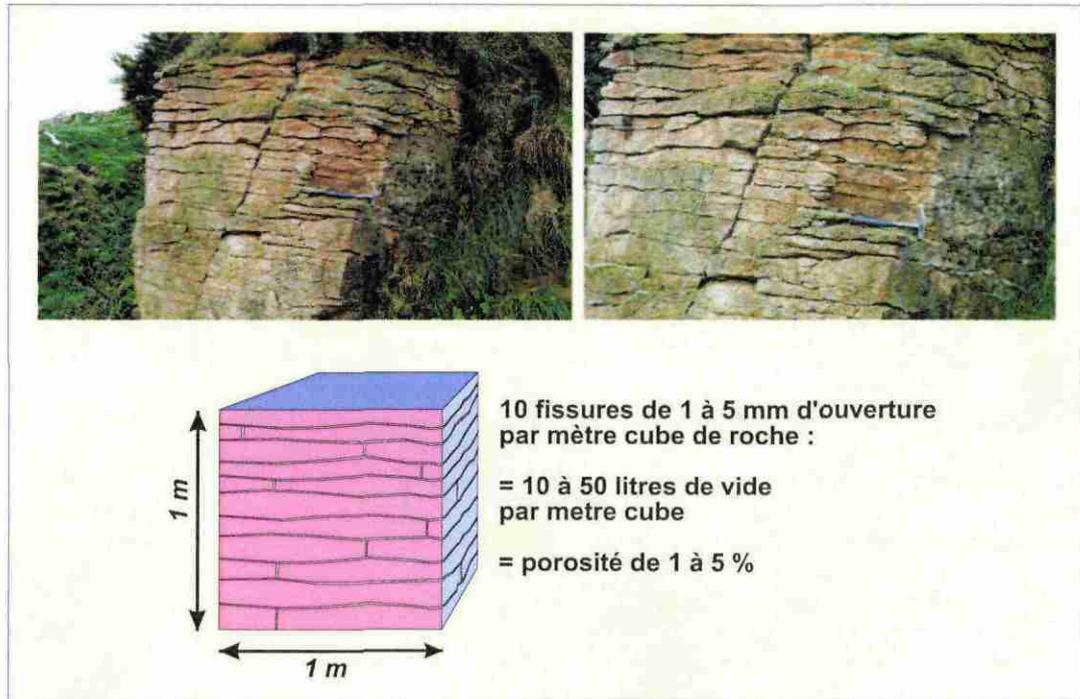


Illustration 4 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

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

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique (illustration 4). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur (σ_1 et σ_2) sont horizontales, tandis que la composante minimale (σ_3) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

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

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

Ainsi, dans le Finistère nord, une étude récente (Wyns et al., 2004) a mis en évidence que 80% de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré. En Corée, des données de forage montrent que l'essentiel de la productivité de ces forages est fourni par l'horizon fissuré (50 à 100 premiers mètres sous la base des altérites) (cf. illustration 5).

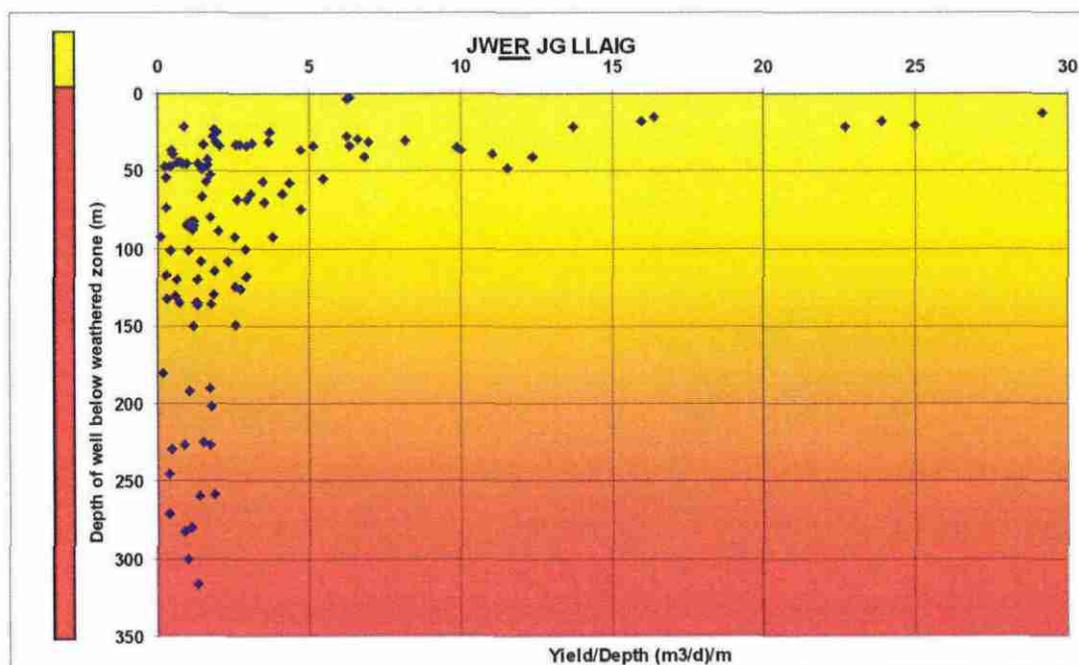


Illustration 5 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

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

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

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

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

Remarque : ce chapitre décrit comment les teneurs en eau des différentes roches, constituant le sous-sol du bassin du Nançon, ont été obtenues. Ces teneurs sont essentielles pour calculer les volumes d'eau souterraine. C'est la raison pour laquelle il nous semble important d'intégrer, dans le corps du rapport plutôt qu'en annexe, l'explication (fastidieuse) de la méthode d'acquisition.

A la demande du BRGM Bretagne et dans le cadre du projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine, une reconnaissance géophysique par sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) a été effectuée par l'unité ARN/MRS du BRGM sur le territoire du bassin versant du Nançon.

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

11 sondages RMP ont été effectués sur le bassin versant et à proximité immédiate (cf. planche 1 en annexe 2) lors de 2 campagnes de mesures sur le terrain (en novembre puis décembre 2006). Les coordonnées de ces sondages sont données en Lambert II étendu dans l'illustration 6.

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Sur le bassin versant du Nançon, les deux principaux ensembles géologiques ont chacun fait l'objet d'une reconnaissance par au moins 2 sondages RMP : Granodiorite à biotite type Louvigné-du-Désert (2 sondages et 2 tentatives inexploitable, du fait des contraintes de bruit électromagnétique ambiant) et Granodiorite à biotite et cordiérite type Vire (5 sondages). Les Cornéennes de Fougères n'ont pu être renseignées que par un sondage RMP. Un dernier sondage a été réalisé à la limite des Argiles de Landéan et de la Granodiorite à biotite.

Néanmoins sur le bassin versant, les formations filoniennes (quartz et dolérites) n'ont pas pu être renseignées par des sondages RMP (cf. contours en blanc de la planche 1 en annexe 2). En raison de cette absence de renseignement, ces formations ne seront pas valorisées sur les planches suivantes.

Le contexte géologique présent au niveau de chaque sondage RMP est indiqué dans l'illustration 6.

Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Contexte géologique	Lieu-dit
NAN01	339883	2386723	145	Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	Les Mâts - Le Haut Bourg
NAN02A	344313	2388604	150	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	La Bâtardière - La Bourdière
NAN03	340015	2388526	145	Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	Ville Gérard - La Censerie
NAN03B	341007	2384183	161	Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	Route forestière de Clairdouet
NAN04	342438	2383876	190	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	Route forestière des Hauts Vents
NAN05	340098	2383446	147	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	Route forestière du Rocher - Carrefour des Serfilières
NAN06	340482	2381272	177	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	Route forestière du Halay
NAN7A	340382	2386306	137	Argiles de Landéan/Granodiorite à biotite (type L-du-D)	Les Mâts
NAN07A	341907	2386751	150	Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	Pierre Aube - La Vieuville
NAN08	340118	2384618	135	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	Chemin forestier Les Fontaines - Ruisseau des Serfilières
NAN10	343969	2379918	165	Coméennes de Fougères	La Tuchennerie

Illustration 6 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP (coordonnées en Lambert II étendu)

3.2. METHODES ET MOYENS

3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP)

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

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

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

Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (cf. illustration 7). 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 proviennent des molécules d'eau. Ceci implique donc 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^* .

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.

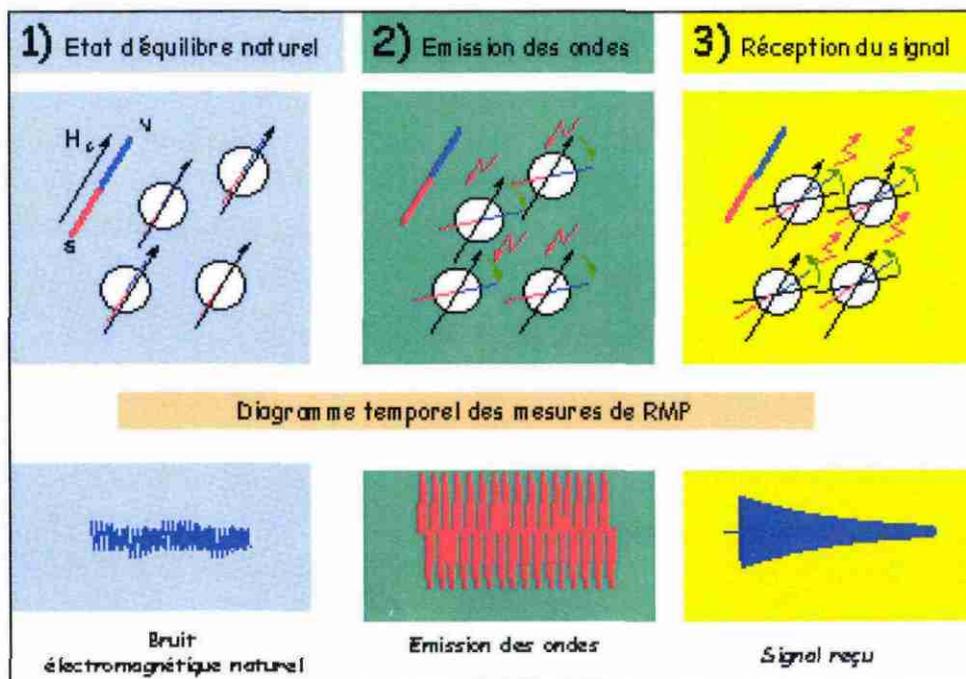


Illustration 7 - Principe de mesure RMP

L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (cf. illustration 8).

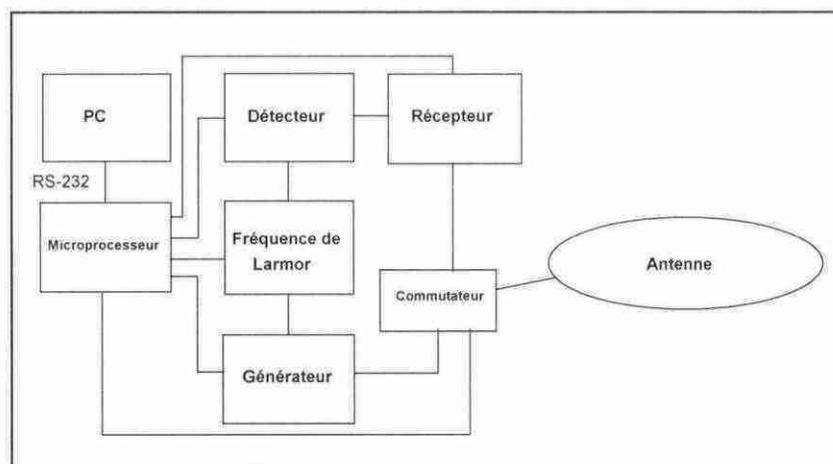


Illustration 8 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (cf. illustration 9).

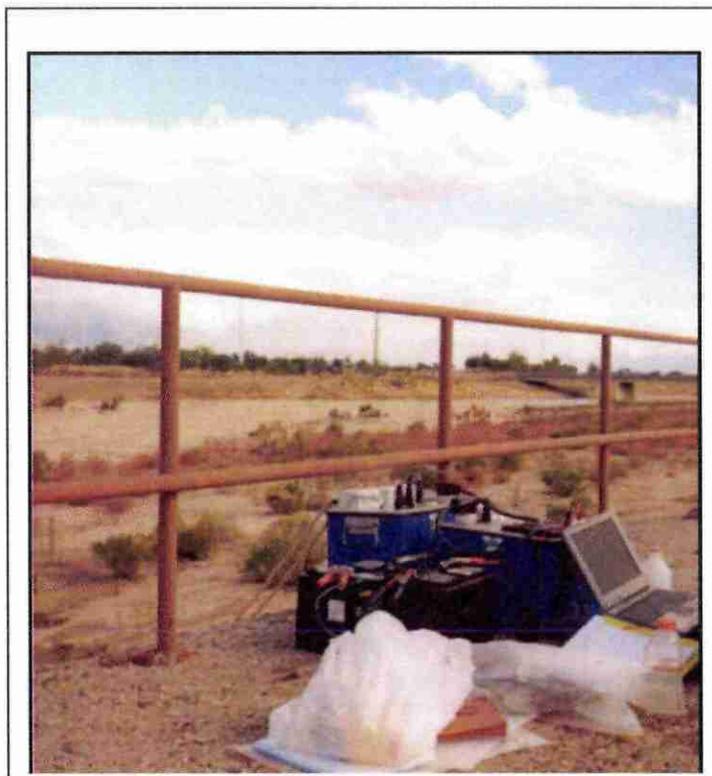


Illustration 9 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site

Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 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.

Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle :

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

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 sur l'illustration 10.

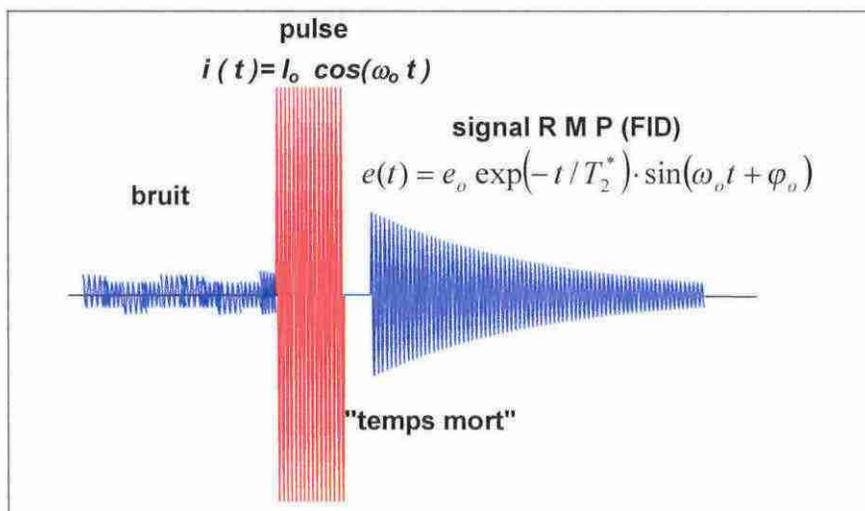


Illustration 10 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

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

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

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

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 (constante de temps de relaxation longitudinale), une adaptation de la technique d'« inversion recovery » (Farrar *et al.*, 1971) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives séparée par un délai ($\Delta t < T_1$) et en 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 (cf. illustration 11) tel que :

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

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 $\varphi_0(q)$ 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 sensiblement diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m.

La durée de réalisation d'un sondage RMP est d'environ 2 h dans des conditions favorables de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

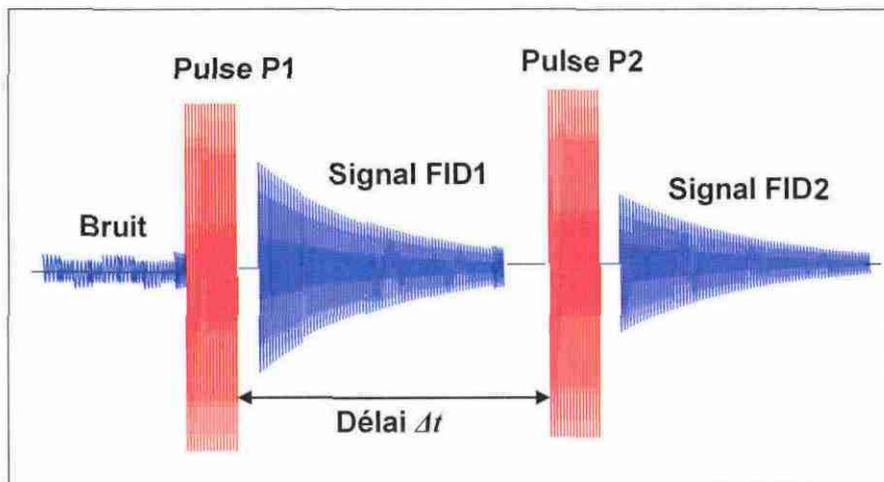


Illustration 11 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1

Interprétation des données

• Inversion des sondages RMP

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

- **l'inversion des données** $e_o(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau.

La teneur en eau RMP, W est définie comme le rapport entre l'amplitude initiale, e_{0-m} du signal mesuré (pour une couche horizontale d'extension infinie) et l'amplitude théorique calculée, e_{0-c} pour une même couche contenant 100 % d'eau :

(équation 4)
$$W = e_{0-m} / e_{0-c}$$

C'est une teneur en eau volumique.

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 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, l'eau non connectée et l'eau en cul de sac peut être négligée et la teneur en eau RMP serait une estimation de la porosité cinématique.

Mais la constante T_2^* dépend du contexte géologique et dans certains milieux particulièrement peu magnétiques, tels que la craie ou les calcaires, il est possible que les temps de décroissance T_2^* de l'eau liée soient supérieurs à 40 ms et qu'en conséquence, l'eau liée ou l'eau de la zone non saturée puisse être observée par RMP en plus de l'eau libre.

Il faut aussi ajouter que, dans des conditions opposées de milieux très magnétiques, le temps de décroissance T_2^* de l'eau libre peut être réduit de telle manière qu'une partie 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** sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) et peuvent être décrites en fonction des caractéristiques des pores (en milieu saturé) tel que :

(équation 5)
$$1/T = (1/T_a) + (\rho S / V)$$

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 :

(équation 6)
$$1/T_2^* = (1/T_{2a}) + (\rho S / V) + \gamma (\Delta H_0 / 2)$$

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

Comme il dépend des conditions géologiques au travers des hétérogénéités du champ géomagnétique, 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.

Alors que dans la zone saturée, ces constantes dépendent, notamment, de la taille moyenne des pores aquifères, dans la zone non saturée, elles sont liées à la saturation et à la pression capillaire.

- la **phase** $\omega_o(q)$ 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 dans l'illustration 12.

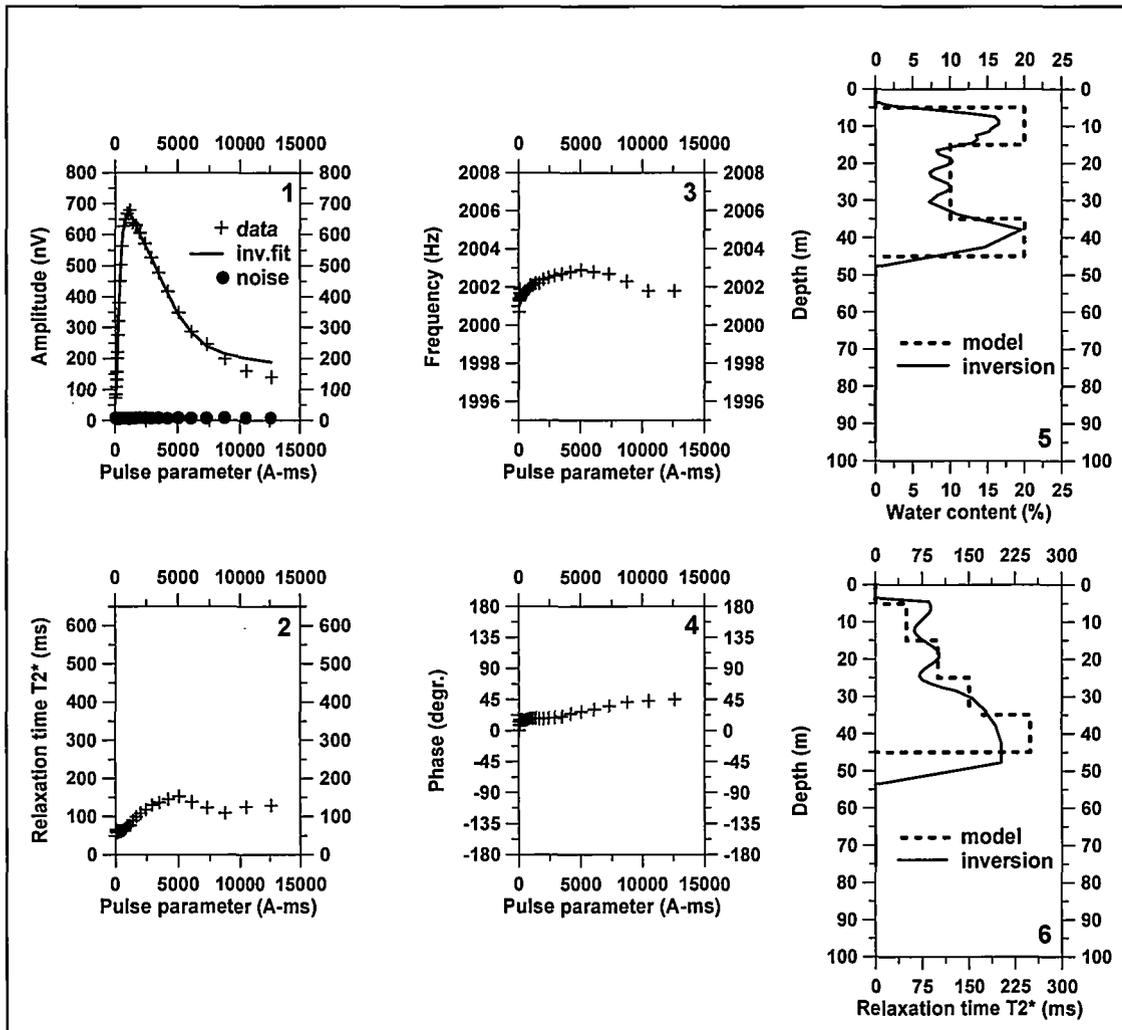


Illustration 12 - Résultats d'inversion des données théoriques

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle (cf. illustration 13) :

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

Illustration 13 - Paramètres du modèle

• Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP

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

$$K = C_k W^a T_1^b \quad (1)$$

où K est la perméabilité, W est la teneur en eau RMP, T_1 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, 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 .

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté dans l'illustration 14.

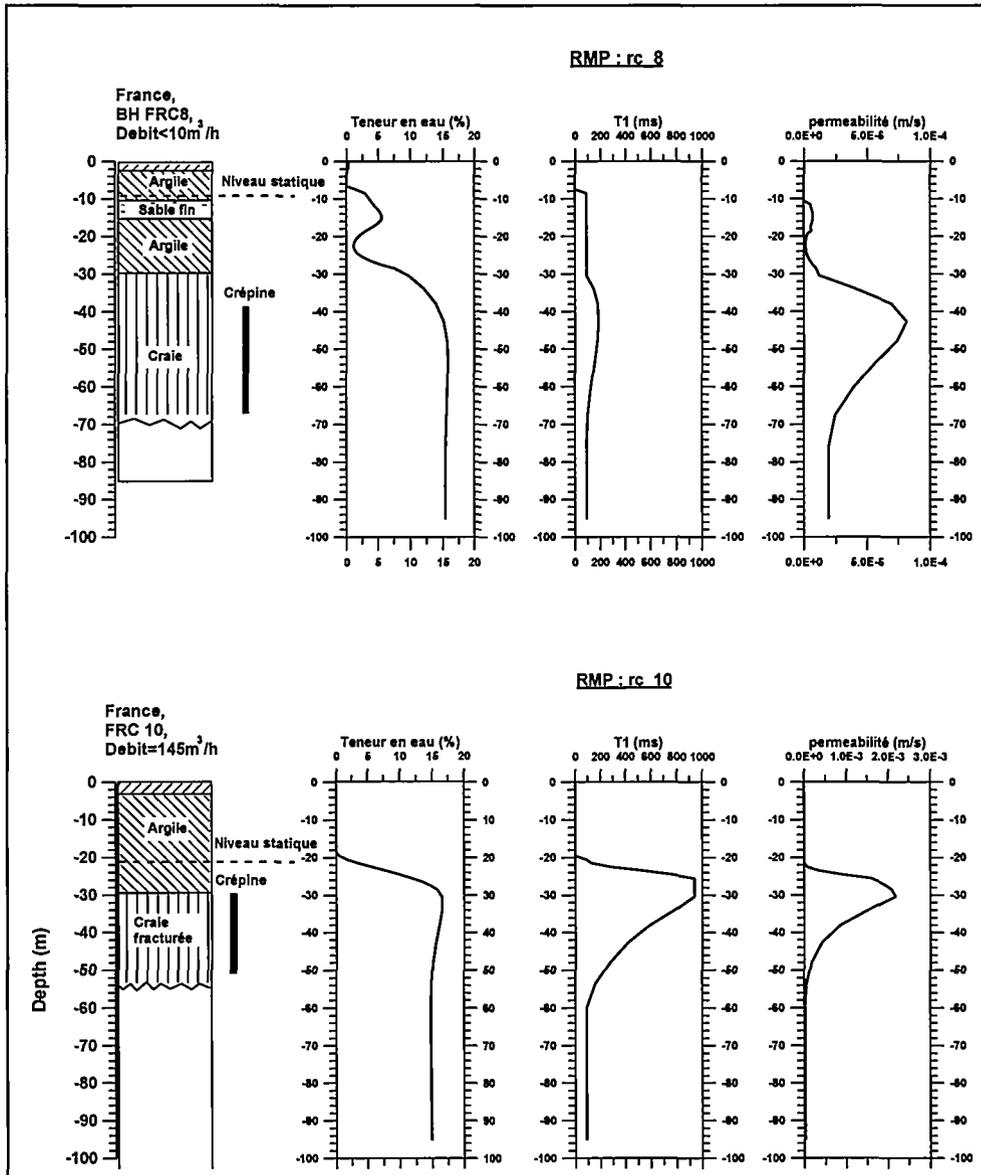


Illustration 14 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie

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

Dans ce rapport (cf. annexe 1), les données et les résultats RMP sont présentés comme sur l'illustration 15.

En tête de la feuille, on trouve des informations générales sur le sondage et les paramètres d'interprétation.

Site: Fougères La Batardiere NAN02a
 Loop: 4 - 37.5 Date: 13.12.2006 Time: 12:15

NUMIS data set:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN02A.inp
 matrix:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 169.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.21; EN/IN = 2.42
 fitting error: FID1 = 36.31%; FID2 = 46.11 %
 param. of regular.: E, T2* = 5000.0; T1* = 0.715
 permeability constant Cp = 7.00e-09

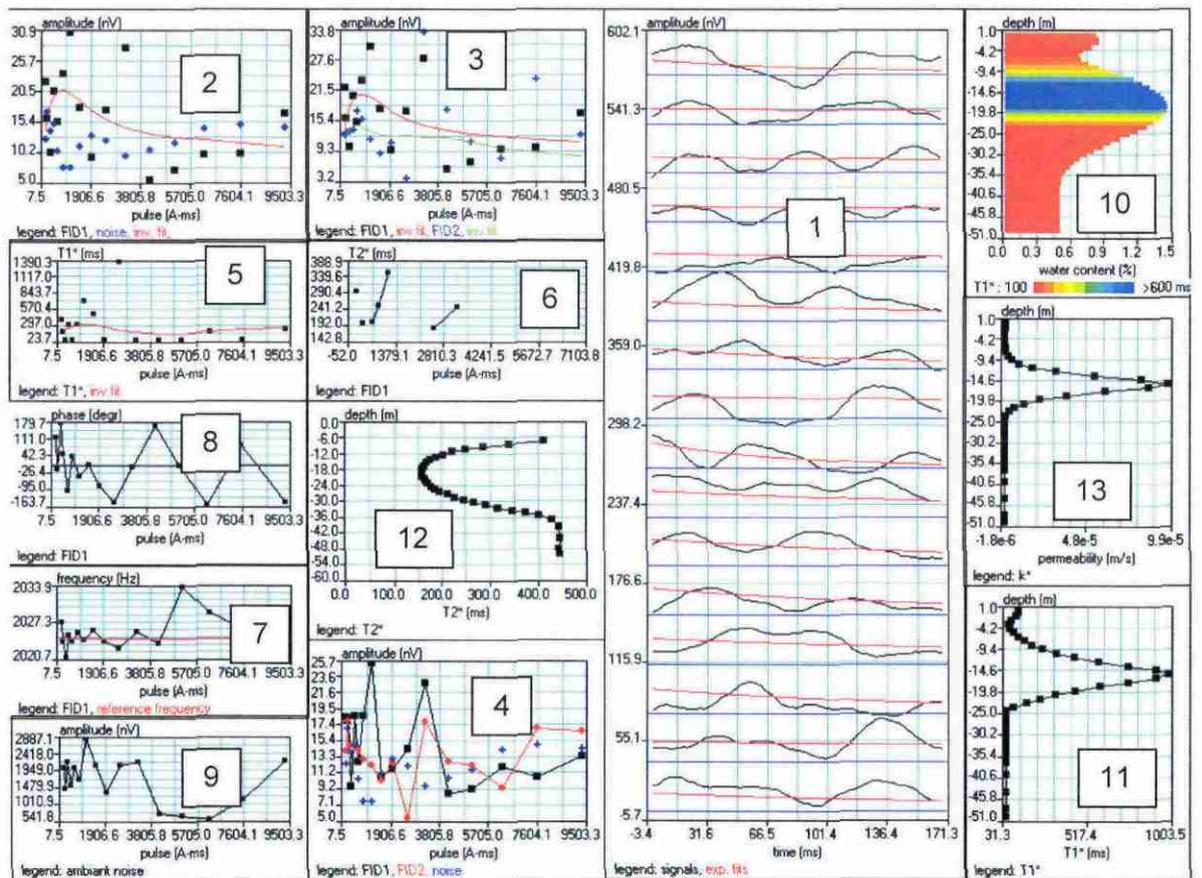


Illustration 15 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP

Les résultats graphiques sont (voir numérotation sur l'illustration 15) :

- 1) les signaux RMP $e(t,q)$ enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation, q (croissant de bas en haut du graphique) en fonction du temps t ;
- 2) l'amplitude initiale du signal RMP (FID1) et l'amplitude moyenne du bruit après traitement (stack, filtrages) en fonction du paramètre d'excitation (the pulse parameter en anglais) ;
- 3) les amplitudes initiales des signaux RMP (FID1 et FID2) et l'amplitude moyenne du bruit après traitement, en fonction du paramètre d'excitation ;
- 4) les amplitudes moyennes (dans le temps sur la fenêtre de mesure) des signaux RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- 5) le temps de relaxation, $T_1^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- 6) le temps de relaxation $T_2^*(q)$ en fonction du paramètre d'excitation ;
- 7) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 8) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 9) le bruit ambiant avant traitement mesuré pour les différents paramètres d'excitation ;
- 10) la distribution verticale de la teneur en eau $w(z)$ et du temps de relaxation $T_1^*(z)$, en couleur ;
- 11) la distribution verticale du temps de relaxation $T_1^*(z)$;
- 12) la distribution verticale du temps de relaxation $T_2^*(z)$;
- 13) la distribution verticale de la perméabilité $K_{rmp}(z)$.

3.2.2. Moyens mis en œuvre

Personnel et calendrier

Les campagnes de mesure sur le terrain se sont déroulées du 14 au 17 novembre 2006 (soit 4 jours de mesures) puis du 11 au 15 décembre 2006 (soit 5 jours de mesures). Les sondages ont été réalisés par F. MATHIEU aidé de G. RICHALET, puis par J.M. MIEHE aidé de F. DUPONT, tous géophysiciens de l'unité ARN/MRS du BRGM.

Les sites potentiels ont été implantés par B. MOUGIN sur carte IGN à 1/25 000, suite à la consultation des plans de lignes électriques (hautes, moyennes et basses tension ; aériennes et souterraines) fournies par l'entreprise EDF, de sorte que l'environnement électromagnétique (proximité de lignes de courants) ne soit pas trop bruyé et permette des mesures de qualité.

Le permittage des sites ayant fait l'objet d'un sondage RMP, a été effectué par G. RICHALET et F. DUPONT.

Équipement

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

3.3. TRAVAUX REALISES

3.3.1. Acquisition des mesures

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

Cette procédure est la suivante :

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

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

L'acquisition complète du sondage est ensuite lancée avec un nombre de stacks supérieur ou égal à 200 et un maximum de temps d'acquisition de sept heures afin de permettre la mesure de 2 sondages par jour.

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec les paramètres suivants :

- boucle en huit carrés de 37,5 m de côté (300 m de câble)
- nombre de pulses : 2 (mesure de T1)
- paramètre d'excitation, q : 1 à 16
- puissance : 55 %
- noise : 240 ms
- P1 : 40 ms
- FID 1 : 240 ms
- D1 : 15 ms
- P2 : 42 ms
- FID 2 : 240 ms
- D2 : 0
- optimisation du stack : oui
- filtre 50 Hz : oui
- nombre de stacks : 200 à 350.

3.3.2. Volume des travaux

Pendant les 9 jours d'intervention sur le terrain (7 jours d'acquisitions et 2 jours de permittage), 11 sondages RMP ont été réalisés sur le bassin versant, ce qui représente un rendement d'environ 1.5 sondages RMP par jour.

L'illustration 16 présente un récapitulatif des principales caractéristiques de ces sondages RMP. 9 sondages RMP ont finalement pu être mesurés.

Sur les 20 sites potentiels ont été identifiés initialement, beaucoup de secteurs n'étaient pas propices à la réalisation de sondages RMP en raison d'un environnement électromagnétique trop bruité (réseau de clôtures électriques très dense) lié à la très grande densité d'implantation rurale (une ferme tous les 500 m) et à une agriculture d'élevage bovins en plein air, et parfois de difficultés d'accès (zones humides marécageuses et de parcelles complètement détrempées).

Tout cela a conduit à un permittage long (nombreuses fermes à contacter) en raison des niveaux de bruit élevé, puis à un déplacement des mesures au niveau de la Forêt Domaniale de Fougères. Les sondages ont été réalisés après autorisation des agents locaux de l'Office National des Forêts (ONF). Ces événements expliquent les 2 campagnes de mesures réalisées en novembre et décembre 2006.

Sondage RMP	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit ext./bruit instr. (EN/IN)	Exploitabilité
NAN01	/	/	?	?	non
NAN02A	2000	250	1.21	2.42	W
NAN03	/	/	?	?	non
NAN03B	450	150	1.37	2.24	W,T1,T2*
NAN04	350	200	2.01	1.13	W,T1,T2*
NAN05	350	250	2.65	1.78	W,T1,T2*
NAN06	450	150	1.32	1.61	W,T1
NAN7A	3000	250	1.86	4.09	W
NAN07A	600	120	2.41	2.49	W,T1,T2*
NAN08	400	200	8.68	1.55	W,T1,T2*
NAN10	500	250	0.99	4.48	W _{max}

Illustration 16 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassin versant du Nançon)

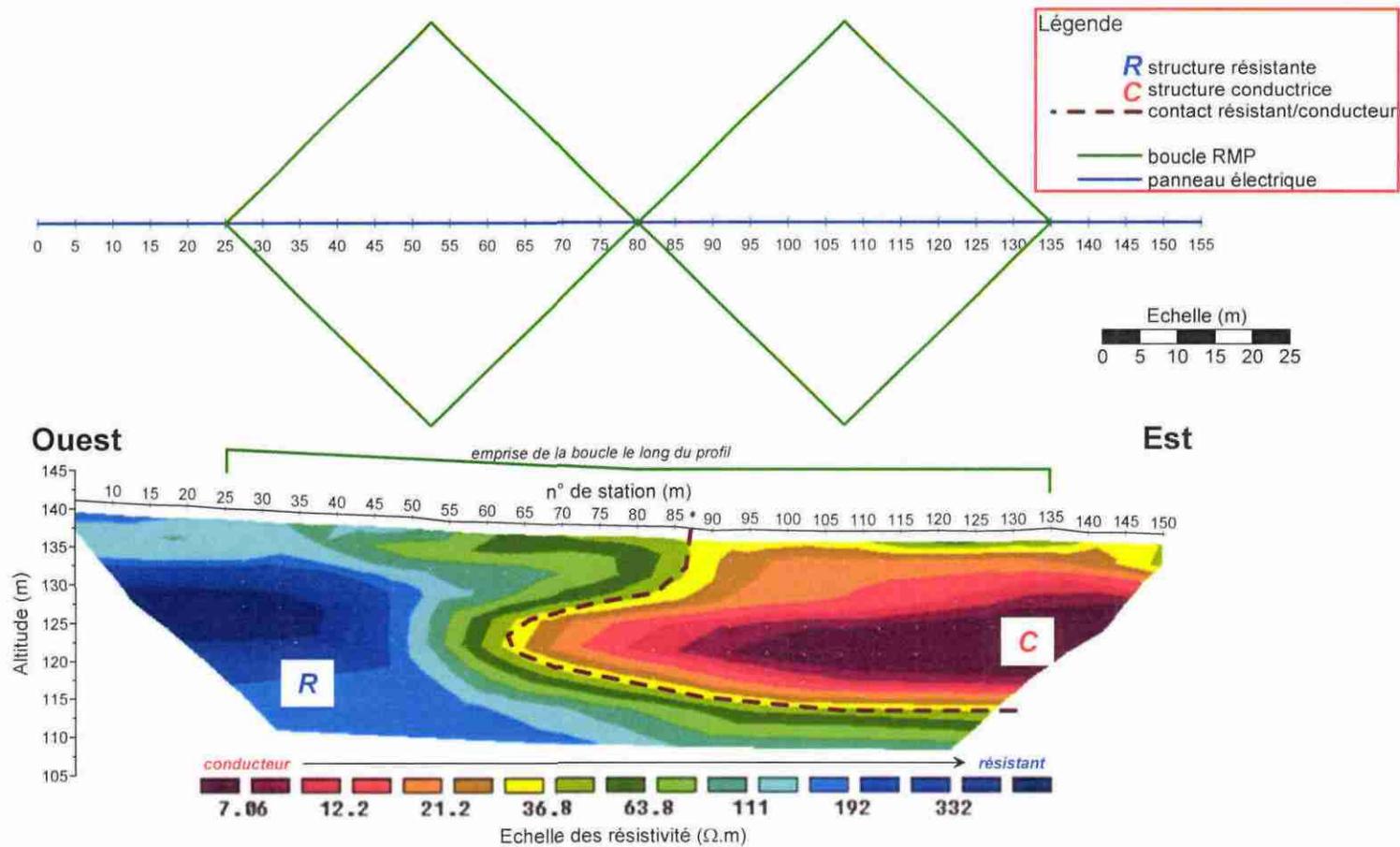
Chaque sondage est caractérisé par son exploitabilité. Selon la qualité des différents paramètres mesurés, l'interprétation des données produit des résultats partiels :

- non exploitable : aucun résultat ne peut être extrait de l'interprétation des données ;
- W_{max} : seule une teneur maximale en eau peut être estimée ;
- W : seule la distribution verticale de la teneur en eau peut-être déduite ;
- W, T₂* : la distribution verticale de la teneur en eau et le temps de relaxation T₂* peuvent être évalués ;
- W, T₂*, T₁ : l'ensemble des caractéristiques RMP peut être estimé (distribution verticale de teneur en eau, des temps de décroissance T1 et T2, de la perméabilité et de la transmissivité).

Pour chaque sondage, la géométrie de la boucle était en huit, avec 2 carrés de 37,5 m de côté. Avec ce dispositif, la profondeur d'investigation réelle est de 50 m.

3.3.3. Réalisation d'un panneau électrique

Comme expliqué précédemment, le sondage RMP NAN7A a été réalisé à la limite des Argiles de Landéan et de la Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert). Pour ce sondage, un panneau électrique a été réalisé pour évaluer la distribution des résistivités en profondeur sous le sondage RMP (cf. illustration 17) qui est un paramètre à prendre en compte lors de l'interprétation dans le cas de terrains très conducteurs (< 10 ohm.m) comme les argiles.



III. 2 - Coupe de résistivité interprétée à l'aplomb du sondage RMP NAN7A.

Illustration 17 - Coupe de résistivité interprétée à l'aplomb du sondage RMP NAN7A

3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

3.4.1. Qualité des mesures

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

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

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

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

$$EN/IN = \text{external noise} / \text{instrumental noise} = \text{noise} / 5.$$

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

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

$$S/N = \text{signal/noise}.$$

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

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

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

- 3) La fréquence du signal RMP doit être stable et proche de la fréquence de Larmor donnée par le magnétomètre. La différence peut être de l'ordre de 3 à 4 Hz.
- 4) La phase du signal RMP doit être stable ou varier de façon progressive.
- 5) Le temps de relaxation T2 doit être stable ou varier de façon progressive en restant compris entre 50 et 400 ms.

L'illustration 16 présente un récapitulatif des principales caractéristiques des sondages RMP.

Pour l'ensemble des 9 sondages mesurés, le rapport signal sur bruit varie de 0.99 à 8.68. L'amplitude maximale du signal mesuré s'échelonne entre 30 et 125 nV. La plupart des sondages sont de bonne qualité et ont permis d'observer un signal RMP permettant une interprétation quantitative. Fait exception le site de la Tuchennerie (NAN10) où le signal RMP n'émerge pas du bruit. Dans ces conditions, seule une valeur maximale possible de teneur en eau peut être estimée faisant l'hypothèse que si le sous-sol recélait de l'eau, le signal RMP pourrait au maximum atteindre le niveau du bruit enregistré.

L'analyse de la qualité des mesures pour les 11 sondages RMP donne la répartition suivante :

- bonne : 6 55 %
- moyenne : 3 27 %
- inexploitable : 2 18 %.

3.4.2. Matrice pour l'inversion

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

- eight square side : 37,5 m ;
- geomagnetic field inclination : 63 degr.°;
- Larmor frequency : 2020 Hz ;
- Max. depth : 50 m ;
- Qmax. : 6500 A.ms ;
- Geoelectrical section
 - 0 - 20 m 100 ohm.m ;
 - 20 - 50 m 1000 ohm.m.

3.4.3. Inversions automatiques

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

Les 9 sondages RMP exploitables ont fait l'objet d'une inversion automatique en quarante couches (cf. annexe 1), avec ajustement manuel au cas par cas. Cet ajustement consiste essentiellement à éliminer certains pulses pour lesquels les valeurs d'amplitude semblent aberrantes et à ne pas tenir compte des mesures à partir du moment où la phase présente un décrochement brutal de l'ordre de 90° (remontée en « queue » de courbe).

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

Les teneurs en eau du niveau le plus profond sont a priori moins bien déterminées que celles du premier niveau, du fait de l'effet de masque de l'aquifère supérieur et de possibles effets connexes dus aux décalages entre la fréquence transmise et la fréquence de Larmor. Des modélisations et inversions supplémentaires ont été tentées en prenant en compte ce dernier effet pour les sondages NAN03B et NAN07A. Pour ces cas, où la fréquence de Larmor est supérieure à la fréquence transmise, on observe que les teneurs en eau du deuxième niveau sont diminuées (jusqu'à plus de 50 %) quand l'effet est pris en compte. Considérant par ailleurs que l'effet d'écran du premier aquifère n'est généralement pas bien géré dans le processus d'inversion, les teneurs en eau du deuxième aquifère doivent être considérées comme entachées d'une incertitude jamais inférieure à 50 %. Dans le chapitre 5, les interprétations des inversions avec décalage de fréquence seront retenues, car elles apportent un plus réel : l'interprétation que l'on peut en tirer a plus de vraisemblance.

3.4.4. Interprétation du panneau électrique

Le sondage NAN7A a été mesuré sur un site caractérisé par la présence des argiles de Landéan et des granodiorites. La coupe de résistivité interprétée est présentée sur l'illustration 17. L'interprétation des mesures électriques met en évidence un contact géoélectrique qui matérialise deux ensembles géoélectriques distincts :

- vers l'ouest, une formation résistante (jusqu'à plus de 400 ohm.m) subaffleurante, ouverte vers l'ouest, qui s'étend jusqu'à au moins 30 m de profondeur (limite d'investigation du dispositif) et se prolonge vers l'est en s'approfondissant, avec un toit situé au-delà de 25 m.
- vers l'est, une structure conductrice (minimum à 7 ohm.m) subaffleurante, ouverte vers l'est et surmontant la structure résistante. Le cœur de ce conducteur (résistivités < 10 ohm.m) est épais d'environ 10 m et s'épaissit vers l'est (15 m entre les stations 110 et 135).

Le résistif correspondrait aux granodiorites, tandis que la structure conductrice caractérise vraisemblablement les argiles de Landéan.

L'implantation de la boucle RMP (boucle en huit carrés de 37,5 m de côté, cf. illustration 17) a été contrainte par l'accessibilité de la parcelle complètement

détrempée ainsi que par la proximité de la ferme des Mâts et d'une ligne électrique située à 100 m de distance. Compte tenu de la position de la boucle RMP par rapport au contact géoélectrique, deux matrices ont été calculées : l'une correspond à un conducteur (10 ohm.m) épais de 20 m surmontant un substratum résistant (200 ohm.m), l'autre représente un milieu plus résistant (50 ohm.m) surmontant le substratum résistant à 200 ohm.m (cf. annexe 1, sondage NAN7A).

Bien que les mesures soient bruitées, l'interprétation du sondage RMP avec l'un ou l'autre des modèles électriques (résistant et conducteur) change peu et laisse entrevoir également deux niveaux. Comme la mesure RMP porte sur l'ensemble des deux formations, ce résultat pourrait être une sorte de moyenne des caractéristiques des deux formations, qu'il est impossible de caractériser séparément à partir de ce seul sondage.

4. Modélisation géométrique des interfaces

4.1. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

4.1.1. 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 18).

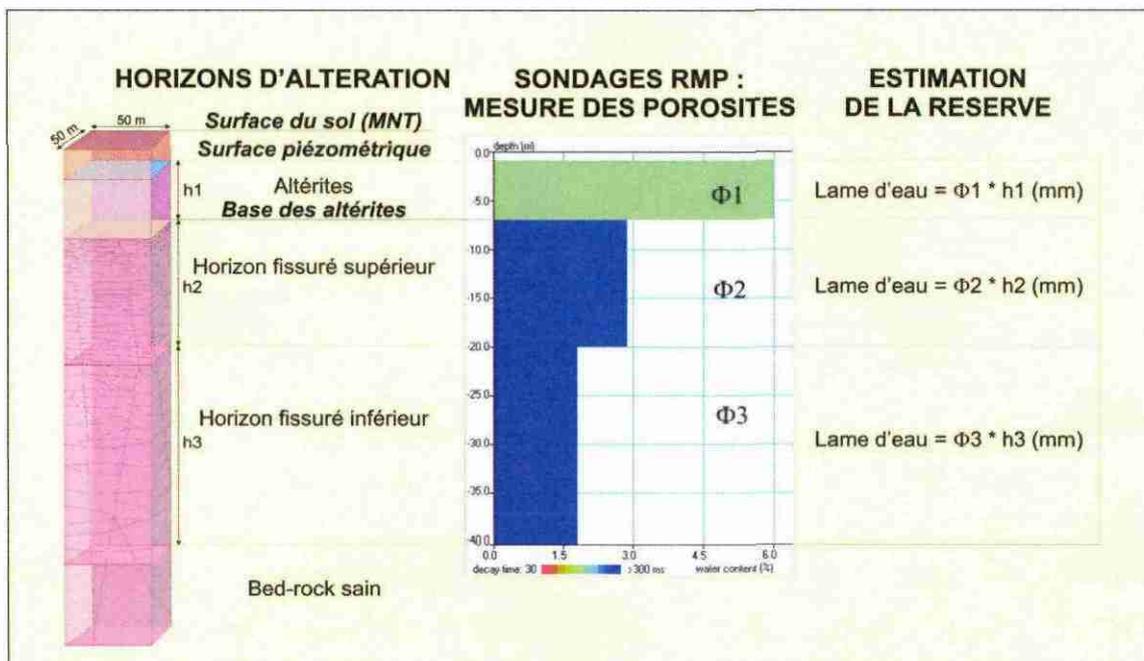


Illustration 18 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

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

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

La troisième étape consiste à calculer, pour chaque formation géologique, la teneur 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.

4.1.2. 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 3). 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 : $100 \text{ m} \pm 2.5 \text{ m}$).

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 4.2.2. et 4.3.).

4.2. MODELISATION DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

4.2.1. Récupération des données piézométriques

Suite à une recherche au niveau de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sur les 241 points d'eau recensés aux alentours du bassin versant (forages, puits, sondages, sources, piézomètres, drains ; cf. rapport Année 1 RP-55113-FR), 58 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 46.3 m de profondeur (moy. : 7.7 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 46.3 m et de la seconde mesure plus profonde à 22.3 m).

Les profondeurs du niveau de nappe mesurées sur les 13 sondages mécaniques à la tarière réalisés sur le bassin versant ont permis de rassembler 9 mesures.

Les niveaux mesurés dans les tarières varient entre 2 et 14.6 m de profondeur (moyenne : 7.9 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 14.6 m).

L'ensemble de ces 67 points d'observation représente une densité d'environ 1 point pour 3.5 km² sur le Nançon (secteur de recherche : 236 km²).

4.2.2. Modélisation

En l'absence de carte piézométrique sur la zone d'étude, l'altitude du toit de la nappe a été modélisée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des mesures de la profondeur du niveau de nappe en forage et tarière. Le MNT au pas de 50 m provient de l'Institut Géographique National.

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 19).

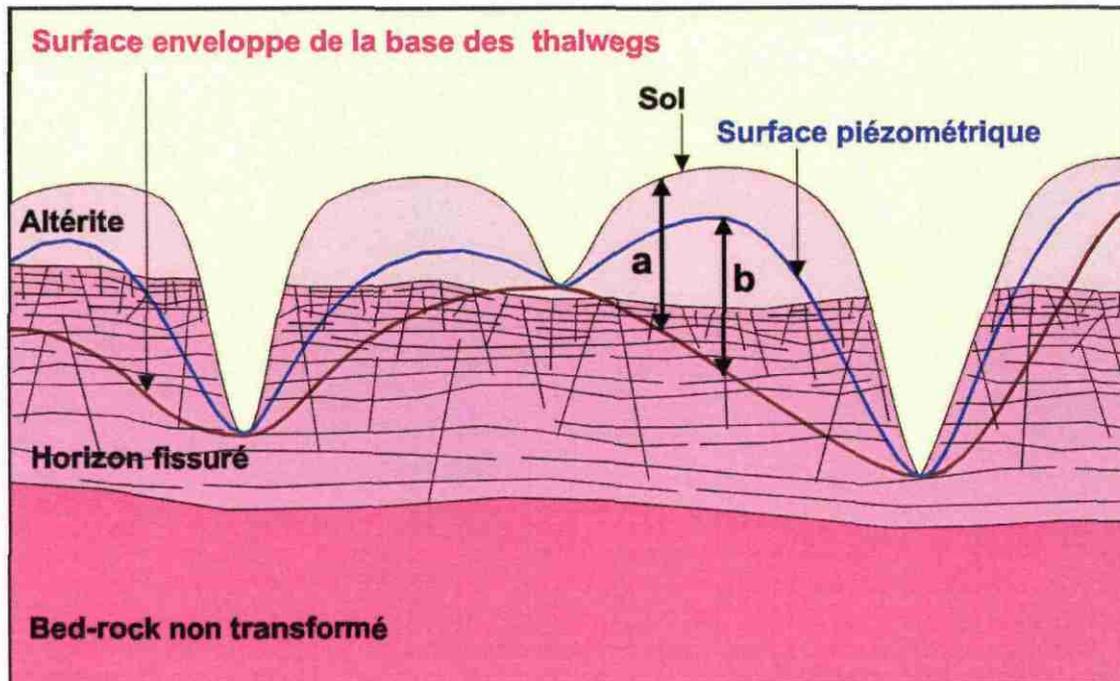


Illustration 19 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

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 19), 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 19). L'équation de cette droite permet de calculer en tout point l'altitude de la surface piézométrique à partir de l'altitude du sol et de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.

Sur chaque bassin versant, la surface-enveloppe des rivières pérennes a été obtenue de la manière suivante :

- à partir du réseau hydrographique pérenne issu de la BD Carthage, échantillonnage d'un point tous les 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 0.4 et 9.8 m, avec une moyenne de 4.4 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, 67 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 67 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 34 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).

Par ailleurs, quelques points redondants ont été supprimés (forages positionnés au même endroit).

Après élimination des valeurs aberrantes (34 mesures), 33 mesures piézométriques ont pu être utilisées.

Le report des couples de variables a et b sur un diagramme binaire (cf. illustration 20) a permis de calculer les équations suivantes :

Bassin du Nançon

$$b = 0.8089 * a - 3,6660$$

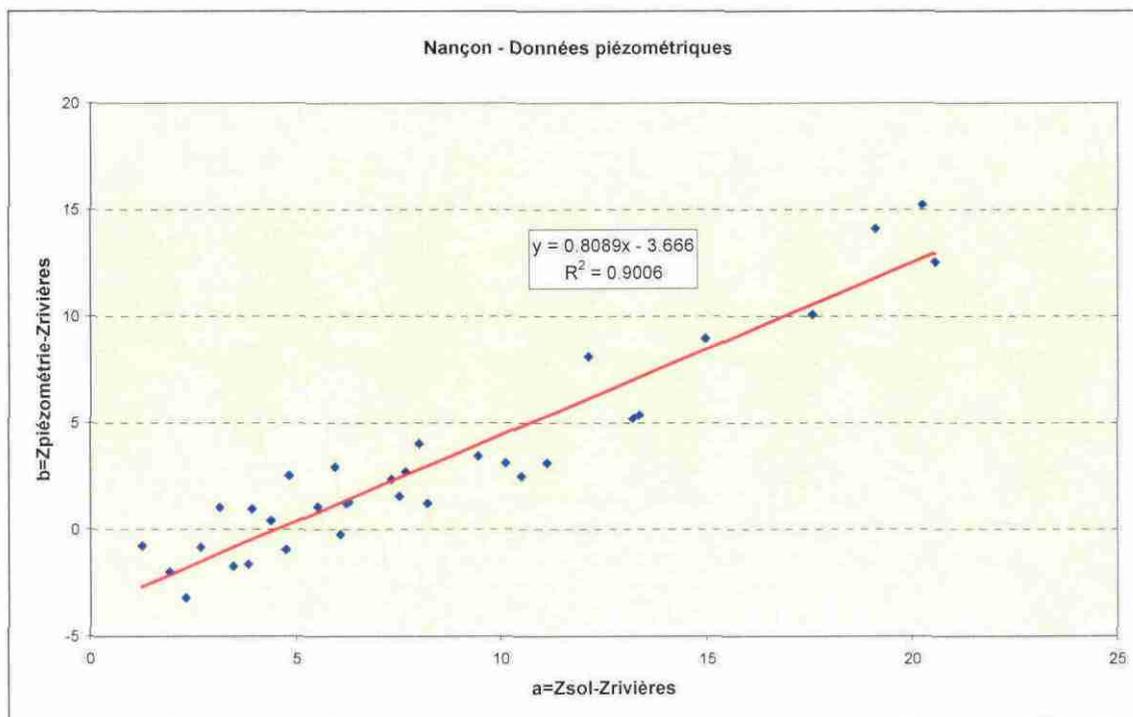


Illustration 20 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Nançon)

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 $b=f(a)$ (0.81) 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 du Nançon est assez perméable par rapport à d'autres bassins (Yvel pente de 0.98, Oust 0.85, Dourduff 0.91 ; cf. rapport RP-53742-FR).

L'ordonnée à l'origine négative (-3.7 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 (cas du bassin du Nançon) comporte plus d'erreur qu'une maille située dans une vallée à fond plat. La maille du MNT est donc parfois trop large par rapport à la morphologie existante.

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

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.

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

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de 1727 points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré sur le Nançon.

Ces points proviennent :

- de données des 64 forages recensés dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et qui ont recoupé la base des altérites,
- d'observations des tarières réalisées sur les bassins versants (13 points),
- d'observations des affleurements présents sur la zone d'étude (585 points),
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de 1065 points).

L'ensemble des 1727 points représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0.06 km² (secteur étudié : 109 km²).

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie entre 1.6 et 13.6 m, avec une moyenne de 5.7 m.

L'altitude de la surface de base des altérites obtenue sur le bassin versant est représentée sur la planche 4 de l'annexe 2.

Au niveau du bassin versant, 9 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.

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 bordure 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 2.

L'épaisseur des altérites varie entre 0 et 35.1 m, avec une moyenne de 3.77 m.

Cette planche montre que le bassin versant est relativement bien pourvu d'altérites.

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

Par ses propriétés hydromécaniques (porosité, perméabilité), l'horizon fissuré peut être divisé en deux parties. Toutefois, la base de ces compartiments correspondant à des limites probabilistes (la base de l'horizon fissuré inférieur correspond au seuil de percolation dans la théorie de la percolation), leur altitude ne peut faire l'objet de mesure directe par forage ou par observation visuelle. L'épaisseur de ces deux compartiments a donc été déduite des mesures de Résonance Magnétique Protonique.

Pour une lithologie donnée, on peut considérer que l'épaisseur moyenne de chacun des deux compartiments de l'horizon fissuré ne varie pas sensiblement à l'échelle des bassins versants étudiés.

Les épaisseurs moyennes, pour chaque lithologie, ont été calculées sur le bassin versant (cf. illustration 21) à partir des résultats d'inversion des sondages RMP réalisés.

EPAISSEURS			
Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	NAN03B	15.00	25.00
granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	NAN07A	8.00	32.00
Moyenne		11.50	28.50
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN02A	10.00	30.00
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN04	15.00	20.00
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN05	20.00	15.00
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN06	10.00	25.00
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN08	11.00	33.00
Moyenne		13.20	24.60
cornéennes de Fougères	NAN10	6.00	40.00
Moyenne		6.00	40.00

Illustration 21 - 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 du Nançon)

L'horizon fissuré supérieur, caractérisé par une porosité et une perméabilité maximales, présente une épaisseur moyenne comprise entre 6 et 13.2 m, sur le bassin du Nançon.

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 24.6 et 40 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 2 : cette profondeur représente la profondeur approximative du mur de l'aquifère d'altération.

Les valeurs varient entre 9.3 et 76.6 m, avec une moyenne de 40.29 m.

4.5. 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 versant, la somme de l'ensemble, correspondant à l'épaisseur saturée de l'aquifère d'altération, est représentée sur la planche 8 de l'annexe 2.

Cette épaisseur varie entre 6 et 66.7 m, avec une moyenne de 35.46 m.

5. Calcul de la réserve en eau souterraine

5.1. SYNTHÈSE DES MESURES RMP

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

8 sondages ont fourni des résultats utilisables après inversion (le sondage NAN7A n'a pas été utilisé, voir explications en bas de page*). 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 22.

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 22.

* Le sondage RMP NAN7A, placé à cheval sur la bordure des argiles de Landéan, semble renseigner la formation sédimentaire (teneur en eau d'environ 3 %). Ce sondage est placé sur une bordure faillée (graben), la faille étant incluse dans l'emprise du dispositif d'après le profil électrique réalisé (cf. illustration 17 du chapitre 3.3.3.). Comme la mesure RMP porte sur un mélange de deux formations (argiles et granodiorites), la teneur en eau pourrait être une sorte de moyenne des caractéristiques des deux formations qu'il est impossible de caractériser séparément à partir de ce seul sondage (cf. chapitre 3.4.4.). Pour toutes les raisons précisées ci-dessus, le sondage n'a pas été pris en compte dans le calcul des teneurs en eau des roches de socle (granodiorites et cornéennes).

Géologie	RMP	signal/bruit	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES		
			Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	NAN03B	1.37	3.20	1.47	?	4.39	2.02	?
granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	NAN07A	2.41	2.44	5.22	2.23	5.89	12.58	5.37
Moyenne			2.82	3.35	2.23	2.72	3.86	2.23
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN02A	1.21	0.81	1.36	0.76	0.98	1.64	0.91
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN04	2.01	1.49	4.06	1.06	2.99	8.16	2.13
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN05	2.65	1.40	3.67	0.20	3.71	9.74	0.54
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN06	1.32	1.58	2.30	1.02	2.09	3.03	1.35
granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	NAN08	8.68	5.15	7.17	?	44.70	62.21	?
Moyenne			2.09	3.71	0.76	3.43	5.34	0.31
cornéennes de Fougères	NAN10	0.99	1.81	1.25	0.73			
Moyenne			1.81	1.25	0.73	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Illustration 22 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Nançon)

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

ns : le calcul des teneurs en eau pondérées n'a pas de sens dans les formations caractérisées par un seul sondage RMP

Ce tableau permet de classer les formations géologiques du bassin versant par ordre de teneurs en eau décroissantes de la manière suivante :

- les Granodiorites à biotite et cordiérite (type Vire), avec des teneurs en eau de 3.4 % pour les arènes, 5.3 % pour l'horizon fissuré supérieur et 0.3 % pour l'horizon fissuré inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'arène est sableuse à sablo-argileuse (altération des minéraux de feldspath plagioclase et muscovite) à grain moyen et donc poreuse, et l'horizon fissuré, issu de l'altération de la biotite bien présente dans une roche à grain moyen, a également une bonne teneur en eau ;
- les Granodiorites à biotite (type Louvigné-du-Désert) : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 2.7 %, 3.9 % et 2.2 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; l'arène est sablo-argileuse (altération des minéraux de feldspath plagioclase), et l'horizon fissuré, issu de l'altération de la biotite bien présente dans une roche à grain moyen, a une teneur en eau un peu plus faible que l'autre granodiorite, mais restant dans les mêmes gammes ; La fissuration, liée à des fissures horizontales plus resserrées, est un peu plus faible dans ce type de granodiorite ;
- les Cornéennes et micaschistes (Unité de Fougères) présentent des teneurs en eau plus faibles que les deux granodiorites (1.8 %, 1.3 % et 0.7 %). Les teneurs en eau sont logiquement plus faibles car la taille des biotites est plus petite (ces minéraux entraînent une fissuration horizontale de la roche ; fissuration moins développée que dans les granodiorites) ; les altérites sont assez poreuses puisqu'elles sont limono-argilo-sableuses à blocs, et l'horizon fissuré a également une teneur en eau non négligeable ; Ceci s'explique par un pendage de stratification quasi vertical (> 80°) favorisant l'expression de joints d'altération bien ouverts ;

Les 13 tarières effectuées dans les deux granodiorites montrent une nature similaire des arènes : sables micacés bruns à ocres plus ou moins argileux et sables homogènes bruns. Ces derniers sables, plus présents dans le faciès type Vire, peuvent expliquer les teneurs en eau un peu plus élevées (3.4 par rapport à 2.7 %).

Les teneurs en eau variables de l'horizon fissuré supérieur des deux granodiorites (de 1.4 à 7.2 % pour les différents sondages RMP) peuvent s'expliquer par des variations locales des faciès des roches (enclaves, faciès porphyrique, faciès microgrenu...).

Les teneurs en eau des deux granodiorites présentes sur le bassin versant sont conformes à ce que l'on connaît par ailleurs, et elles sont moyennes par rapport à d'autres formations granitiques bretonnes (Massifs de Kersaint, Commana, Huelgoat, Brest, Ponthou, Loguivy, Guerlesquin et Quintin). Ceci s'explique par des cristaux de biotite abondants (13 à 17% de la composition de la roche) et de faible taille (millimétriques) entraînant une fissuration plus faible que dans certaines autres formations granitiques.

Le sondage RMP NAN08 n'a pas permis de mesurer de teneurs en eau de l'horizon fissuré inférieur en raison des fortes teneurs en eau de l'horizon fissuré supérieur (environ 7 %).

Le sondage RMP NAN03B montre de fortes teneurs en eau au niveau de l'horizon fissuré inférieur (environ 2 %) qui peuvent s'expliquer par un couloir de fracturation drainant existant localement à environ 25 m de profondeur. En raison de l'aspect très local de ce phénomène, la cartographie des volumes d'eau souterraine ne le prendra pas en compte.

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

Pour le bassin versant 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 56 km² renseignés du bassin versant du Nançon (superficie 57 km²), les altérites (planche 9 de l'annexe 2) contiennent globalement un stock d'eau souterraine totalisant environ 3.4 millions de m³, avec des lames d'eau atteignant localement 0.92 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 10) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 21.5 millions de m³, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,70 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 11) contient un stock d'eau un peu moins important : 17.5 millions de m³, pour une lame d'eau maximale de 0,64 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 12) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 42.4 millions de m³, avec une lame d'eau maximale de 1.70 m.

5.3. DISCUSSION ET COMMENTAIRES

5.3.1. Epaisseur de l'aquifère du bassin versant

La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 40.29 m, et saturé sur 35.46 m en moyenne, sur le bassin du Nançon.

Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP (cf. chapitre 3.4.3.). Le volume total d'eau souterraine est donc sous-estimé par rapport à la réalité, malgré une caractérisation de la majeure partie de la quantité d'eau souterraine sur ces 50 premiers mètres (cf. atténuation franche des teneurs en eau mesurées par les RMP à 50 m de profondeur en annexe 1).

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

5.3.2. Répartition de la réserve en eau souterraine sur le bassin versant

Répartition géographique

Au sein du bassin versant et dans la tranche 0-50 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 les deux granodiorites, et la formation comprenant le moins de réserve est celle des cornéennes.

Répartition dans les aquifères du sous-sol

Sur le bassin versant du Nançon, la répartition de l'eau souterraine au sein de l'aquifère multicouches montre qu'environ 92 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré (51 % dans l'horizon fissuré supérieur, 41 % dans l'horizon fissuré inférieur, et 8 % 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 versant (épaisseurs moyennes de 4.1 m), ainsi que par la position de la surface piézométrique au sein des horizons d'altération. En effet, sur 66 % du bassin du Nançon, la surface piézométrique se situe au sein de l'horizon fissuré (contre 34 % 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 1). En raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP (0-50 m), le volume de cette ressource n'est pas calculé et sa répartition n'est pas connue.

5.3.3. 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 versant du Nançon, les résultats sont les suivants :

- incertitude moyenne associée au calcul de l'altitude de la surface piézométrique : de 0.4 à 7.1 m, avec une moyenne de 3.8 m (rappel sur toute la zone d'étude : de 0.4 à 9.8 m, avec une moyenne de 4.4 m, cf. chapitre 4.2.2.),
- incertitude moyenne associée au calcul de l'altitude de la base des altérites : de 1.8 à 13.6 m, avec une moyenne de 6.1 m (rappel sur la zone d'étude : de 1.6 à 13.6 m, avec une moyenne de 5.7 m, cf. chapitre 4.3.).

La lame d'eau souterraine, sur le bassin du Nançon, a été calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 40.29 m, et saturé sur 35.46 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 +6.4 et -5.0 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 versant, 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 -4.8 et +2.4 millions de m³. Une altitude de la base des altérites plus haute entraîne une moins grande densité d'altérites mouillées sur le bassin et donc une lame d'eau plus faible. 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 augmente car la teneur en eau des altérites est plus forte que celle du fissuré).

Compte-tenu de ces calculs, l'incertitude moyenne associée au calcul du volume souterrain peut donc être évaluée à environ 5 millions de m³.

Les volumes des réserves en eau souterraine existantes sur les 57 km² du bassin versant du Nançon sont donc estimés à 42.4 ± 5 millions de m³.

6. Utilisations des cartes

6.1. 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 versant étudié, les régions les plus favorables à la recherche d'eau souterraine, après avoir identifié la structure des aquifères.

6.1.1. Mise en évidence des formations géologiques favorables

Le rapport d'étape de l'année 1 de ce projet (BRGM/RP-55113-FR) a permis de réaliser une étude statistique, à partir des données de forages d'eau disponibles, pour caractériser l'intérêt hydrogéologique des formations géologiques (cf. chapitre 1.4.). Ce rapport met en évidence l'intérêt des cornéennes de Fougères qui occupent malheureusement une toute petite superficie au Sud du bassin, puis des granodiorites à biotite (type Louvigné-du-Désert) à l'amont du bassin. Les résultats statistiques des granodiorites à biotite et cordiérite (type Vire) présentaient un intérêt un peu moins important.

La répartition des réserves en eau souterraine, dans la tranche 0-50 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 des formations géologiques intéressantes pour la recherche d'eau souterraine (cf. planche 12) : tout d'abord les granodiorites type Louvigné-du-Désert, puis les granodiorites type Vire ; les cornéennes comportant nettement moins d'eau souterraine.

Parmi les formations géologiques présentes sur le bassin versant du Nançon, ces granodiorites offrent des réserves en eau souterraine qui semblent intéressantes et des perméabilités plus ou moins favorables à leur exploitation.

6.1.2. 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 : les perméabilités les plus fortes seront obtenues dans des couloirs drainants liés à des fractures tectoniques (pouvant affecter la roche au-delà des 50 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.

La recherche en eau souterraine 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).

6.1.3. Utilisation des données fournies par les levés géophysiques aéroportés : identification de zones favorables

Rappel des résultats du projet SILURES Bretagne

Dans le cadre du projet SILURES Bretagne (année 3, rapport BRGM/RP-53621-FR), une étude s'est focalisée sur l'interprétation des données géophysiques aéroportées mesurées en 1998 (magnétisme et spectrométrie).

Le travail réalisé a permis, à partir des données brutes mesurées (magnétisme des roches, et contrastes de concentration en Uranium Potassium et Thorium = radiométrie spectrale), de tracer sur toute la Bretagne des discontinuités structurales (*) grâce à un outil automatique développé dans le cadre d'un programme de recherche du BRGM.

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

Ces discontinuités ont ensuite été corrélées avec les résultats des forages d'eau bretons (débit obtenu rapporté à la profondeur) pour mettre en évidence des directions de discontinuités favorables ou défavorables à l'implantation de forages d'eau. L'illustration 23 montre les résultats de cette étude (le « 0 » indique la direction du Nord géographique), menée sur toute la région Bretagne.

Dans le cadre de cette étude, aucun affinage local n'a été réalisé. Ce travail aurait pu, par exemple, permettre d'identifier d'autres directions favorables sur le territoire du Nançon, alors que celles-ci étaient neutres régionalement.

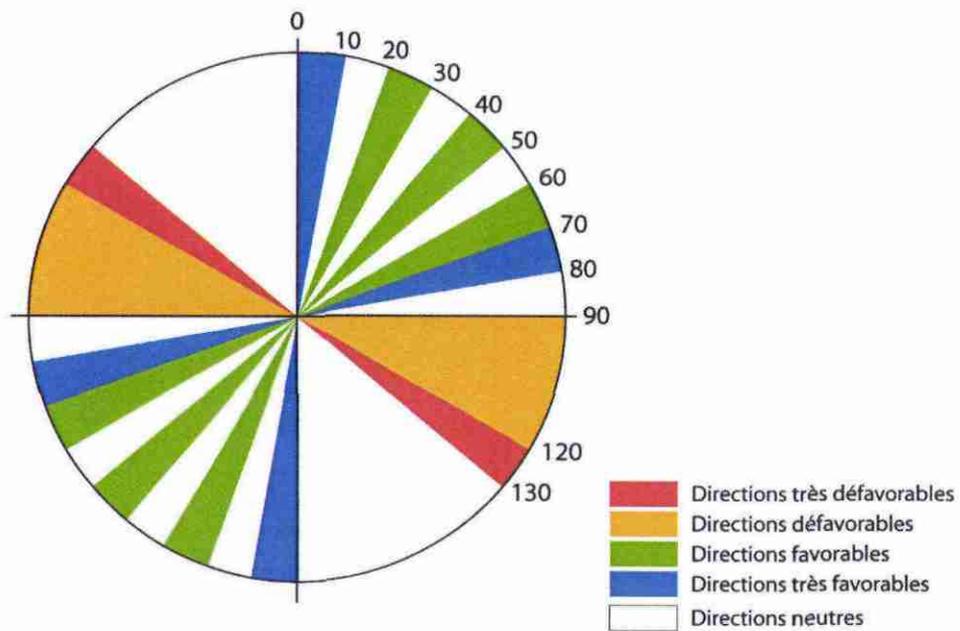


Illustration 23 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne

Application au projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine

Les discontinuités géophysiques (magnétisme et spectrométrie) issues d'un tracé automatique réalisé à une échelle détaillée ont été extraites sur le bassin versant étudié. L'illustration 24 montre les résultats de ce travail.

Sur cette illustration, les linéaments naturels déduits du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 125 m ont également été reportés (tracé des fractures supposées existantes et recoupant la surface du sol).

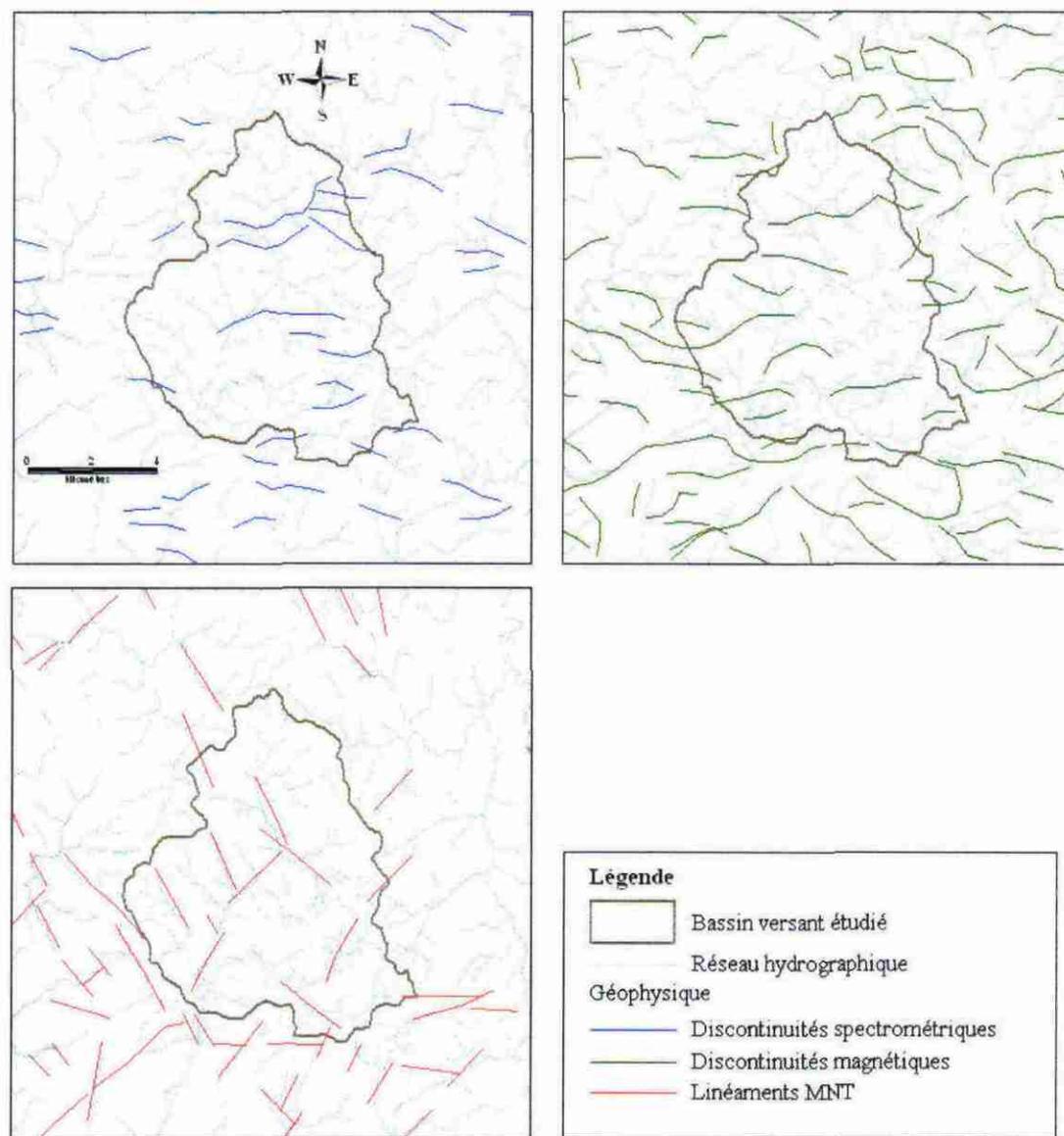


Illustration 24 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur le bassin du Nançon

Sur le bassin versant, les discontinuités ont été corrélées entre elles et avec les linéaments tracés à partir du MNT. Ceci a permis de mettre en évidence des accidents communs susceptibles de signaler une fracturation du socle potentiellement drainante.

Ces discontinuités géophysiques ont ensuite été superposées à la carte de la lame d'eau totale du bassin étudié (cf. planche 13).

Cette planche a permis d'isoler des zones favorables à l'implantation de forage d'eau ayant les meilleures chances de réussite en terme de débit. Ces zones correspondent à un périmètre de 400 mètres situé autour des discontinuités orientées dans une direction favorable régionalement (cf. illustration 23) et recoupant des zones de ressource en eau maximale.

Description des zones favorables (cf. planche 13)

La zone la plus favorable à l'implantation de forage d'eau est située au Nord-Est, à proximité immédiate du bassin dans les granodiorites type Louvigné-du-Désert (1^{ère} formation plus riche en eau) à proximité d'une discontinuité supposée être favorable régionalement (orientée à N60) marquant le prolongement d'une vallée faillée. Le secteur favorable est surtout localisé au Sud-Ouest du périmètre de 400 m autour de la discontinuité, près des lieux-dits « La Basse et la Haute Chérulais ». Aucun forage n'est recensé dans cette zone.

Une seconde zone favorable est localisée au Sud-Ouest du bassin versant dans les granodiorites type Vire. La formation géologique est recoupée par une discontinuité orientée à N70 (favorable à très favorable régionalement à l'implantation de forage d'eau) marquant une vallée faillée. La 2^{ème} zone favorable est située à l'Ouest du périmètre de 400 m près de « La Porcherie ». On peut remarquer que celle-ci est positionnée à 1.7 km de la prise d'eau superficielle « Fontaine la Chaise » sur le Nançon. Un puits, dont le débit n'est pas connu, est recensé à l'Est du périmètre de 400 m autour de la discontinuité.

Régionalement, les discontinuités orientées à N75 sont très favorables ; une de ces discontinuités est positionnée entre deux vallées au Nord-Est du bassin versant sur les granodiorites type Louvigné-du-Désert (1^{ère} formation plus riche en eau). La 3^{ème} zone favorable est localisée à l'Est du périmètre de 400 m, près de « La Haute Gendrais ». Six forages à débits médiocres (de 0 à 4 m³/h, pour des profondeurs de 91 à 109 m) sont recensés au Nord du périmètre. D'après les planches de l'annexe 2, ces forages ne traversent pas d'altérites et recoupent un horizon fissuré décapé de sa partie supérieure, la plus productive. Une faible épaisseur d'aquifère et un éloignement relatif de la discontinuité expliqueraient les résultats médiocres de ces forages.

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

6.2.1. Estimation du temps de transfert

Estimation du temps de vidange de l'aquifère

Pour estimer le temps de vidange des aquifères sur le bassin versant du Nançon, 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 du Nançon a été modélisée dans le cadre de la quatrième année du projet SILURES Bretagne (rapports BRGM/RP-55001-FR) ; l'illustration 25 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). Le bassin modélisé est celui du Nançon au droit de la station de Lécousse (Pont Aux Anes, J0014010, superficie 67 km²).

Le bassin du Nançon de la présente étude est contenu dans le bassin modélisé.

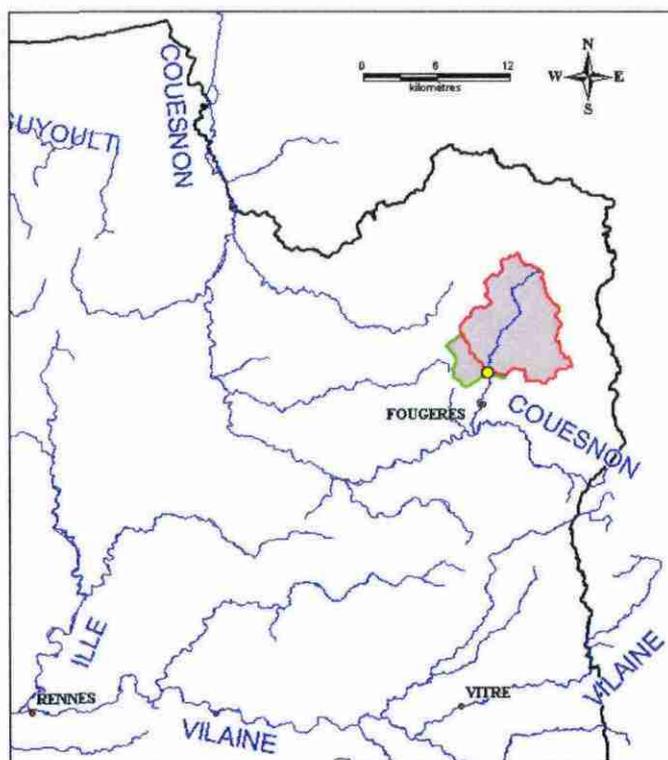


Illustration 25 - Localisation du bassin versant étudié par rapport au bassin modélisé

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 26).

Année hydrologique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	62.9	148	210.9	14130300	9916000
1997	12.9	50.4	63.3	4241100	3376800
1998	77.4	124.8	202.2	13547400	8361600
1999	263.9	327.3	591.2	39610400	21929100
2000	160	232.2	392.2	26277400	15557400
2001	394.1	411.5	805.6	53975200	27570500
2002	81.1	186.7	267.8	17942600	12508900
2003	154.3	212.1	366.4	24548800	14210700
Moyenne				24284150	14178875

Illustration 26 - Evaluation du volume d'eau souterraine renouvelable annuellement sur le bassin versant du Nançon

Le volume moyen interannuel d'eau souterraine renouvelé est de 14 178 875 m³ pour le Nançon (période 1996-2003, superficie 67 km²).

Ce volume a été rapporté à la superficie du bassin étudié ; le résultat est le suivant : 12 111 299 m³ pour le Nançon (superficie 57 km²).

Cette « règle de trois » est argumentée par la couverture géologique semblable du bassin modélisé et du bassin étudié.

La cartographie de la réserve en eau souterraine effectuée au chapitre 5.2. a été extraite sur le bassin versant. La réserve totale de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) représente, sur 98 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 42.4 millions de m³, ramené à une lame d'eau moyenne de 0.758 m.

En extrapolant le résultat ci-dessus à l'ensemble de la superficie du bassin versant (100 %), la réserve en eau souterraine totale est de : 43 377 809 m³ sur les 57 km² du bassin versant du Nançon.

Ce volume de réserve en eau souterraine existant sur le bassin peut être comparé au volume moyen renouvelé annuellement (12 111 299 m³ sur le Nançon) afin d'estimer le temps de vidange des stock d'eau sur le bassin étudié.

La réserve totale en eau souterraine du bassin versant modélisé est donc vidangée en 3 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 4.69 m sur le Nançon.

Dans la bibliographie, la vitesse de circulation de l'eau dans la zone saturée varie 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 : 2 ans et 2 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 de : un peu moins de 6 ans (5 ans et 9 mois) pour le Nançon.

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 6 ans en raison des phénomènes de mélange entre l'eau souterraine qui se vidange annuellement et l'eau qui s'infiltré jusqu'à la nappe.

6.2.2. Sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration

Participation des eaux souterraines au débit d'étiage

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

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

En effet, la lecture de la planche 12 permet de déduire que, parmi les aquifères présents dans les formations géologiques étudiées, c'est l'aquifère contenu dans les granodiorites à biotite (type Louvigné-du-Désert) qui contribue le plus aux débits d'étiage du Nançon.

Afin d'améliorer la qualité chimique de l'eau de la rivière, les mesures préventives susceptibles d'obtenir les meilleurs résultats de reconquête seront à mener principalement à l'amont du bassin dans cette formation géologique qui est à protéger vis à vis de l'infiltration de polluants jusqu'à la nappe.

Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Une cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration peut être approchée à partir des informations fournies par les forages recensés sur et à proximité du bassin versant étudié.

Ces informations sont les suivantes :

- débits instantanés des forages d'eau (débit exhauré, par l'émulsion air-eau produite par la méthode du marteau fond de trou) qui fournissent une bonne image de la perméabilité locale du sous-sol ;
- profondeur des ouvrages.

Afin de réaliser cette cartographie, il a été considéré que, toutes choses égales par ailleurs, notamment les pentes et l'état des sols :

- la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est d'autant plus forte que l'épaisseur de la zone non saturée est importante (la nappe est profonde donc la possibilité d'emmagasinement est importante) et les débits souterrains notables (vidanges permettant de reconstituer la capacité d'accueil de l'aquifère entre deux périodes de recharge),
- à l'inverse, la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est d'autant plus faible que l'épaisseur de la zone non saturée et les écoulements souterrains sont faibles (la nappe proche du sol et les faibles écoulements souterrains entraînent une certaine imperméabilisation du sous-sol).

Le rapport d'étape de l'année 1 de ce projet (BRGM/RP-55113-FR) a permis de caractériser la perméabilité du sous-sol à partir de statistiques issus des résultats des forages d'eau (cf. chapitre 1.4.).

Cette caractérisation a été actualisée en utilisant le paramètre débit sur profondeur (Q/P) représentatif de la perméabilité relative du sous-sol.

Les formations géologiques présentes sur le bassin étudié ont été valorisées par une valeur moyenne de Q/P issue des caractéristiques des forages présents dans chaque formation. L'illustration 27 détaille ce classement.

BV	Géologie	Nbre forages	Q/P (m ³ /h/m)
Nançon	Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)	35	0.224
Nançon	Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)	35	0.156
Nançon	Cornéennes de Fougères	34	0.265

Illustration 27 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P

La planche 2 représentant l'altitude de la surface piézométrique a permis de calculer une carte représentant l'épaisseur de la zone non saturée (par différence de l'altitude du MNT et de la surface piézométrique). Cette épaisseur correspond à la profondeur de la nappe.

Sur le bassin versant, cette surface piézométrique est proche du sol au niveau des vallées (l'épaisseur de la zone non saturée est faible ou nulle au niveau des cours d'eau) tandis qu'elle s'approfondit au niveau des plateaux (épaisseur forte > 10 m). Ces observations sont cohérentes avec le schéma de l'illustration 19.

Les cartes précédentes (Q/P et épaisseur zone non saturée) ont été croisées afin d'établir une carte présentant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration.

Cette carte, représentée en planche 14 de l'annexe 2 utilise les critères de l'illustration 28.

		Production des forages de chaque formation géologique exprimée en indice Q/P (m ³ /h/m foré)		
		< 0,175	0,175 à 0,25	> 0,25
Epaisseur de la zone non saturée (m)	< 3,5	Capacité d'absorption très faible	Faible	Moyenne
	3,5 à 5	Faible	Moyenne	Forte
	> 5	Moyenne	Forte	Capacité d'absorption très forte

Illustration 28 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Sur le bassin du Nançon, la planche 14 montre un découpage amont/aval du bassin versant : la partie amont a une capacité d'absorption des eaux d'infiltration moyenne à forte et la partie aval est moins favorable à ces eaux (faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration).

Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont (par ordre décroissant) : les cornéennes de Fougères au Sud, les granodiorites à biotite (type Louvigné-du-Désert) au Nord du bassin versant. Les cornéennes ont un niveau de nappe moyen à profond et une perméabilité plus élevée que les autres formations ; ceci permet au sous-sol d'absorber une part importante d'infiltration.

Les granodiorites à biotite et cordiérite (type Vire) sont plutôt « imperméables » aux eaux d'infiltration. Cette formation a un niveau de nappe assez proche du sol (notamment au droit des vallées) et une perméabilité faible par rapport aux autres formations ; le sous-sol se remplit difficilement et le ruissellement intervient.

Perspectives

La planche 14 a été établie en croisant l'épaisseur de la zone non saturée par la perméabilité relative des formations géologiques.

Afin de réaliser une cartographie précise de la sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration, les paramètres suivants devront être utilisés : pentes, occupation du sol, différence de perméabilité altérites-milieu fissuré.

En effet, on peut considérer que :

- l'aptitude à l'infiltration est la plus marquée dans des secteurs où :
 - les pentes sont faibles ou nulles,
 - la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est forte,
 - l'occupation du sol est de nature à retenir les eaux de ruissellement (bois, forêts, landes...),
 - les perméabilités des altérites et du milieu fissuré sont notables (circulation des eaux souterraines, renouvellement du stock d'eau),
- à l'inverse, la sensibilité au ruissellement est la plus grande dans des zones où :
 - les pentes sont fortes,
 - la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration est faible,
 - l'occupation du sol est de nature à favoriser l'écoulement des eaux de ruissellement (villes, parcelles agricoles...),
 - les perméabilités des altérites et du milieu fissuré sont faibles (infiltration difficile des eaux de pluie, renouvellement lent du stock d'eau).

Afin d'améliorer la qualité chimique de l'eau des cours d'eau étudiés, les mesures préventives susceptibles d'obtenir les résultats de reconquête les plus rapides seront à mener principalement sur les formations géologiques favorisant le ruissellement de polluants.

Néanmoins, des mesures préventives, menées en parallèle sur les formations géologiques à protéger vis à vis de l'infiltration de polluants jusqu'à la nappe, seront nécessaires pour reconquérir la qualité des eaux souterraines sur le long terme et par conséquent reconquérir la qualité des eaux de surface (les eaux souterraines participant de manière non négligeable à l'écoulement des rivières).

Les cartes pourront avoir une précision suffisante pour une utilisation à l'échelle communale (taille de la maille : 50 x 50 m).

6.3. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS SUR LES QUATRE AUTRES BASSINS VERSANTS

6.3.1. Rappel d'un objectif du projet

Dans le cadre du projet SILURES Bassins versants (rapports BRGM/RP-51891-FR et RP-53742-FR), une des idées de départ était de choisir 4 bassins dans des contextes géologiques et climatiques variés, afin de comparer leurs réserves en eau souterraine (cf. illustration 29).

En effet, les bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche sont situés dans un contexte magmatique (granites et migmatites), le bassin du Dourduff est localisé sur un domaine métamorphique complexe (granites, gabbros, amphibolites, schistes et quartzites, grès, laves...), tandis que les bassins de l'Yvel et de l'Oust sont caractérisés par des terrains schisto-gréseux (pélites, grès, siltites).

De plus, la pluviométrie est contrastée entre les bassins versants étudiés : parmi les bassins schisteux, le bassin de l'Oust est plus arrosé que celui de l'Yvel, et parmi les bassins magmatiques et métamorphiques le bassin du Dourduff est plus arrosé que celui de la Maudouve et la Noë Sèche.

Le bassin du Nançon est situé en contexte magmatique (granites), il est aussi arrosé que le Dourduff et un peu plus arrosé que les 3 autres bassins versants.

6.3.2. Comparaison des quantités d'eau souterraine

Le calcul de la réserve en eau souterraine totale a donné les résultats suivants :

- 8 811 589 m³ sur les 28.6 km² du bassin versant de la Maudouve (soit 308 098 m³/km²), 1 612 839 m³ sur les 6.8 km² du bassin versant de la Noë Sèche (237 182 m³/km²),
- 16 971 057 m³ sur les 43.9 km² du bassin versant du Dourduff (386 584 m³/km²),
- 11 449 738 m³ sur les 53.8 km² du bassin versant de l'Yvel (212 820 m³/km²),
- 32 410 912 m³ sur les 55 km² du bassin versant de l'Oust (587 154 m³/km²),
- 43 377 809 m³ sur les 57 km² du bassin versant du Nançon (761 014 m³/km²).

Si l'on rapporte chaque volume à la superficie du bassin versant, on met en évidence l'ordre suivant en terme de quantité d'eau souterraine :

Nançon > Oust > Dourduff > Maudouve > Noë Sèche > Yvel
--

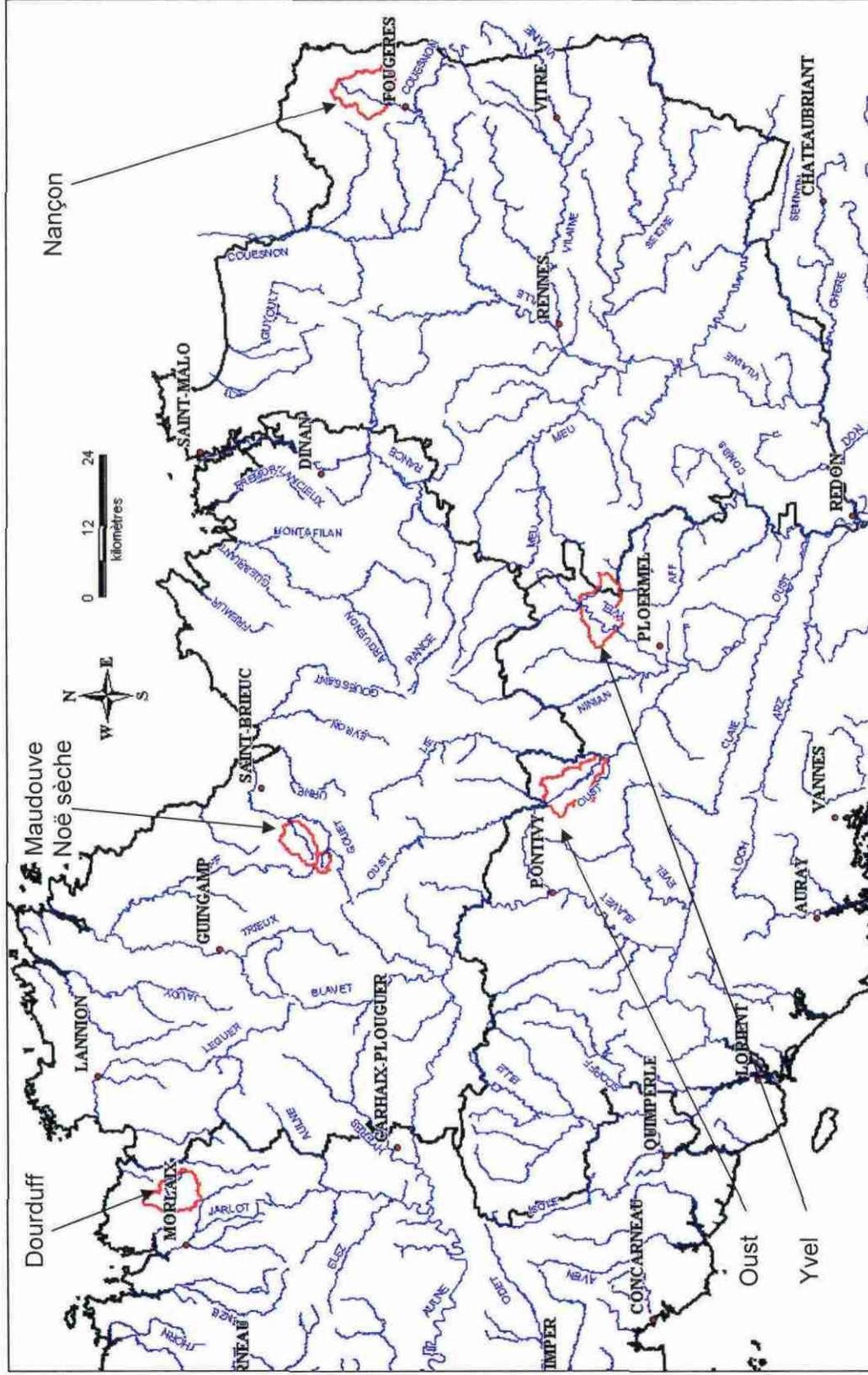


Illustration 29 - Localisation des cinq bassins versants ayant fait l'objet d'une étude SILURES Bassins versants

Le bassin du Nançon est celui qui comporte le plus d'eau souterraine et à l'inverse celui de l'Yvel est le moins riche en eau.

Si l'on compare les bassins par géologie voisine (schistes / granites), ces résultats sont cohérents avec la pluviométrie efficace de chaque bassin (Louvrier et Margat, 1983 : moyenne annuelle 1946-1976) :

- l'Oust comporte plus d'eau souterraine car il reçoit une pluie efficace de 250 mm/an contre 150 mm/an pour l'Yvel,
- le Dourduff et le Nançon reçoivent une pluie efficace de 400 mm/an (bassins les plus arrosés) et sont plus riches en eau souterraine, tandis que la Maudouve en reçoit 275 mm/an et la Noë Sèche 325 mm/an.

6.3.3. Comparaison des temps de renouvellement de l'eau souterraine

L'estimation des temps de renouvellement de l'eau souterraine a fourni les résultats suivants :

- un peu moins de 3 ans (2 ans et 8 mois) pour la Maudouve, et un peu plus de 2 ans (2 ans et 3 mois) pour la Noë Sèche,
- un peu plus de 3 ans (3 ans et 2 mois) pour le Dourduff,
- un peu moins de 4 ans (3 ans et 8 mois) pour l'Yvel,
- de 6 ans pour l'Oust,
- un peu moins de 6 ans (5 ans et 9 mois) pour le Nançon.

Si l'on rapporte sur chaque bassin la réserve en eau souterraine totale à ce temps de renouvellement, puis rapporté à la superficie du bassin versant, on met en évidence l'ordre suivant en terme de rapidité de renouvellement :

Yvel > Oust > Noë Sèche > Maudouve > Dourduff > Nançon					
160	271	291	313	339	360 m ³ /jour/km ²

Le bassin de l'Yvel est celui où l'eau souterraine se renouvèle le plus vite et à l'inverse celui du Nançon est le plus lent.

La rapidité (ou la lenteur) du temps de renouvellement est liée à la quantité d'eau souterraine présente dans le sous-sol des bassins et à la perméabilité relative des formations géologiques qui composent les bassins. Par exemple, le bassin de l'Yvel est le plus pauvre en eaux souterraines et la perméabilité moyenne des roches le constituant entraîne un renouvellement plus rapide.

6.3.4. Synthèse

Le bassin versant de la Maudouve comporte une quantité d'eau souterraine moyenne et il se vidange moyennement bien. Ceci s'explique par des perméabilités moyennes des roches (granites et migmatites) qui drainent cependant un volume d'eau important à la rivière (participation des eaux souterraines au débit de la Maudouve : 78 %).

Le bassin versant magmatique de la Noë Sèche est constitué d'une quantité d'eau souterraine faible et il se vidange relativement bien. Le relargage des eaux souterraines dans la rivière doit être régulier puisque leur participation s'élève à 83%.

Le bassin versant du Dourduff comporte une quantité d'eau souterraine moyenne et il se vidange plutôt lentement. La partie Sud du bassin présente des formations assez perméables (schistes et quartzites, amphibolites et granite) par rapport à celles du Nord et du Centre ; c'est dans cette zone à forte capacité d'absorption que l'infiltration de l'eau dans le sous-sol doit être la plus élevée. Tout cela explique une bonne participation des eaux souterraines au débit du Dourduff à hauteur de 59 %.

Le bassin versant de l'Yvel est le plus pauvre en eaux souterraines et c'est aussi le bassin qui se vidange le moins lentement. Les formations géologiques briovériennes et paléozoïques ont une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration et des perméabilités respectivement moyennes et faibles. Le bassin peut donc être soumis aux phénomènes de ruissellement entraînant une faible participation des eaux souterraines au débit de l'Yvel (47 %).

Le bassin versant de l'Oust est assez riche en eaux souterraines et il se vidange relativement bien. La capacité d'absorption des eaux d'infiltration oscille de faible à fort selon les formations géologiques du Briovérien, de même que la perméabilité de ces roches. Tout ceci explique une participation moyenne des eaux souterraines au débit de l'Oust à hauteur de 49.5 %.

Le bassin versant du Nançon est le plus riche en eaux souterraines et il se vidange lentement. Ceci s'explique par des perméabilités moyennes des roches (granodiorites) qui drainent cependant un volume d'eau assez important vers la rivière (participation des eaux souterraines au débit du Nançon : 58 %).

7. Conclusion

Ce rapport final présente la synthèse des travaux menés dans le cadre du projet SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine.

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

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

La cartographie de la répartition spatiale des réserves en eau souterraine, réalisée dans le cadre de ce projet, peut contribuer à orienter l'exploration des eaux souterraines en vue de leur exploitation dans les meilleures conditions de préservation de la qualité de la ressource.

Cette cartographie peut en outre constituer un atout majeur d'une politique de protection de la qualité des nappes et des eaux de rivières.

En fin de rapport, il est proposé d'approfondir les connaissances acquises en réalisant une cartographie de la sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration, sur le bassin versant étudié, en utilisant des paramètres complémentaires (pentes, occupation du sol...).

Cette carte permettrait de repérer, à l'échelle communale, des zones où des mesures préventives, susceptibles d'obtenir les meilleurs résultats de reconquête de la qualité de l'eau, pourront être mises en œuvre.

8. Bibliographie

- CHANG D., VINEGAR H., MORRISS C., STRALEY C. (1997) - Effective porosity, producible fluid and permeability from NMR logging. *The Log Analyst*. March-April, p. 60-72.
- CHOUX J. (1959) - La cuvette de Landéan (Ille-et-Vilaine). Etude des sédiments et des formations résiduelles. *Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne*, 2, p. 1-34.
- P. DADET, M. BEURRIER, J-P. LAUTRIDOU (1984). - Notice explicative de la feuille Saint-Hilaire-du-Harcouët à 1/50 000 (feuille n°247). Orléans : BRGM, 26 p. Carte géologique par P. DADET et al., 1983.
- ESTEOULE-CHOUX J. (1967) - Contribution à l'étude des argiles du Massif armoricain. Argiles d'altération et argiles sédimentaires tertiaires. Thèse, Rennes, 1967, 307 p.
- FARRAR T.C., BECKER E.D. (1971) - Pulse and Fourier transform NMR: Academic Press, New York.
- JONIN M. (1973) - Les différents types granitiques de la Mancellia et l'unité du batholite manceau (Massif armoricain). *C.R. Acad. Sci.*, 277, p. 281-284, Paris.
- KENYON W.E. (1997) - Petrophysical principles of applications of NMR logging. *The Log Analyst*, March-April : p.21-43.
- LACHASSAGNE, P., WYNS R., BÉRARD P., BRUEL T., CHÉRY L., COUTAND T., DESPRATS J.-F., LE STRAT P. (2001) - Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones - *Groundwater*, vol. 39, (4), p. 568-581
- LEGCHENKO A., BEAUCE A., GUILLEN A., VALLA P., BERNARD J. (1997) - Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics*. 2 : p. 173-190.
- LEGCHENKO A.V., BALTASSAT J.M., BEAUCE A., MAKKI M.A., and AL-GAYDI B.A. (1998) - Application of the surface proton magnetic resonance method for the detection of fractured granite aquifers : *Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section)*, September 14-17, 1998, Barcelona (Spain), pp. 163-166
- LOUVRIER M. et MARGAT J. (1983) - Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1946-1976) ; carte à 1/500 000 - Rapport BRGM 83 SGN 003 EAU, Orléans

MOUGIN B., collaboration : THOMAS E., JEGOU J-P. (2002) - SILURES Bassins versants - Dourduff (29), Maudouve et Noë Sèche (22), Oust (56), Yvel (56) - Etat d'avancement de l'année 1 - BRGM/RP-51891-FR - 43 p., 3 tab., 11 fig., 3 annexes.

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 - 98 p., 20 tabl., 21 fig., 3 ann. dont 56 planches (vol. séparé).

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

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 - 61 p., 23 ill., 5 ann.

MOUGIN B. et THOMAS E. (2006) - SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon - Rapport d'avancement de l'année 1 - BRGM/RP-55113-FR - 54 p., 17 ill., 2 ann.

REY R. (1959) - La faunule malacologique de Landéan (Ille-et-Vilaine). Bull. Soc. Géol. Minéral. Bretagne, 2, p. 35-70.

REY R. (1974) - Notes malacologiques. Gastéropodes continentaux et hyposalins de l'Oligocène et du Miocène inférieur. Revue Scientifique du Bourbonnais, 69-124.

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

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., BALTASSAT J.M., LACHASSAGNE P., LEGCHENKO A., VAIRON J., (2004) - Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- Bull. Soc. Géol. Fr., t. 175, (1) (accepté)



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Service géologique régional Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70



SILURES Bassin versant Ille-et-Vilaine - Bassin du Nançon

Rapport final - Année 2
ANNEXES

BRGM/RP-56318-FR
mai 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 EAU A06

B. Mougin, J-M. Baltassat, R. Blanchin, E. Putot, J-M. Schroetter et R. WYNS



Établissement public du ministère
chargé du développement durable

Vérificateur :

Nom : Anne CARN

Date : 27/05/2008

(Original signé)

Approbateur :

Nom : Michel LECLERCQ

Date : 30/05/2008

(Original signé)

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.





Liste des annexes

Annexe 1 Données et résultats d'interprétation des sondages RMP - Inversion automatique en quarante couches	5
Annexe 2 Planches A3	19
Annexe 3 Interpolation par la géostatistique	49

Annexe 1

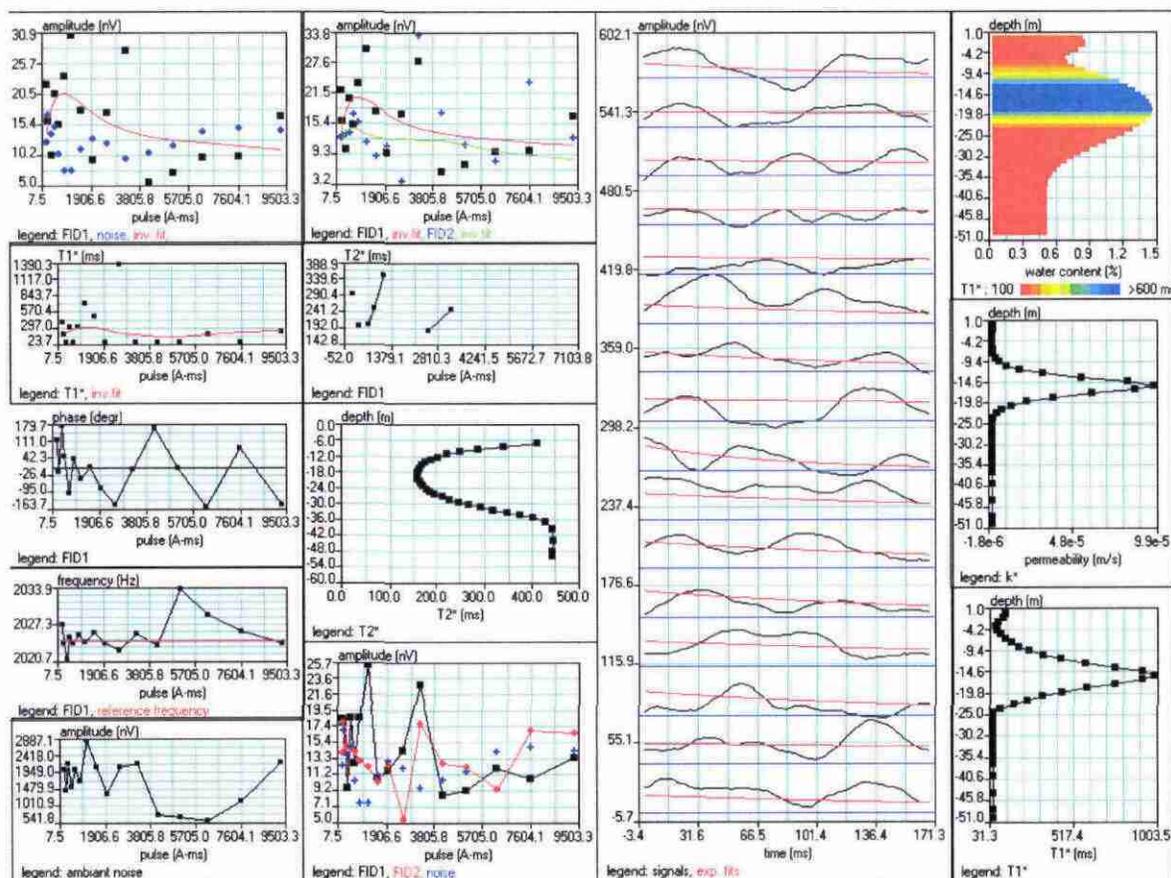
Données et résultats d'interprétation des sondages RMP - Inversion automatique en quarante couches

Site: Fougères La Batardiere NAN02a
 Loop: 4 - 37.5 Date: 13.12.2006 Time: 12:15

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN02A.inp
 matrix:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 169.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.21; EN/IN = 2.42
 fitting error: FID1 = 36.31%; FID2 = 46.11 %
 param. of regular.: E, T2* = 5000.0; T1* = 0.715
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: NAN03b (1/3)

Loop: 4 - 37.5

Date: 16.11.2006

Time: 09:50

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN03B.inp

matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 63 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 199.7 ms

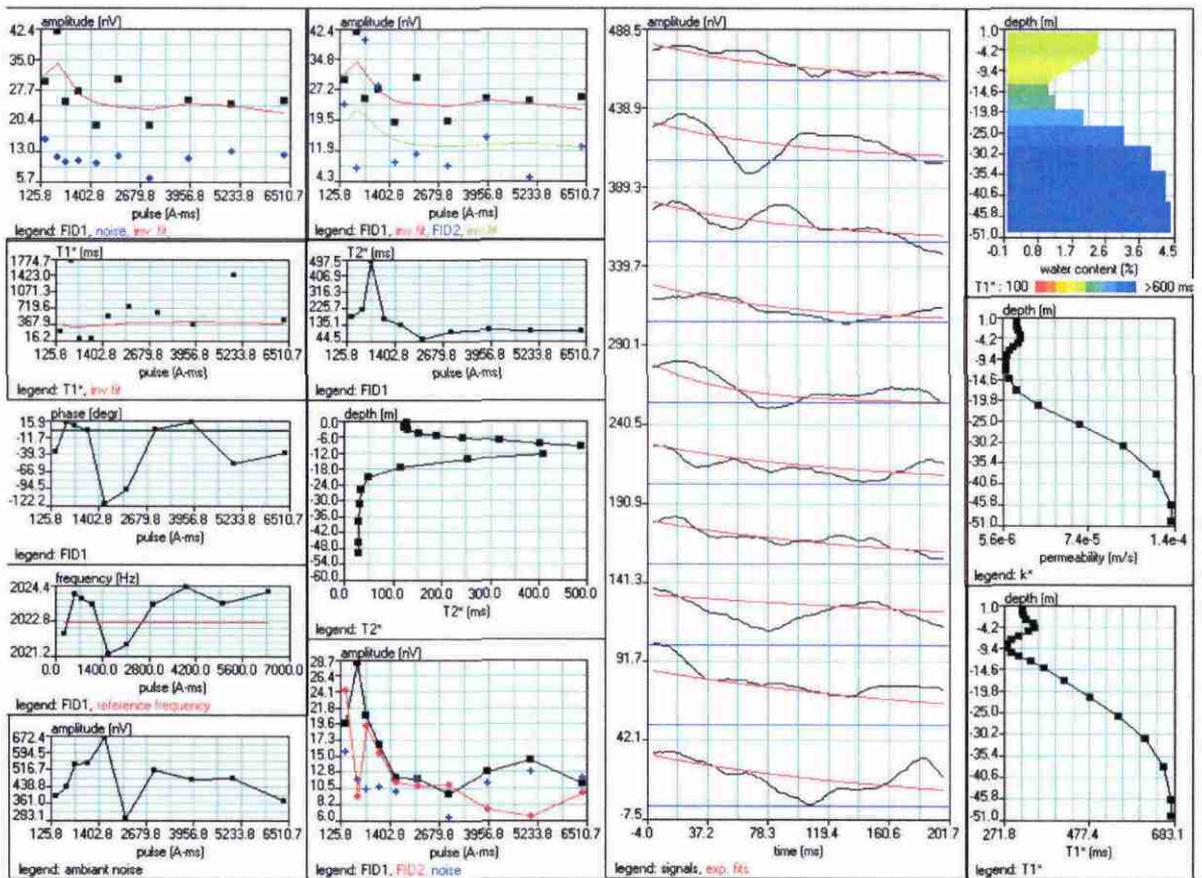
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.39; EN/IN = 2.25

fitting error: FID1 = 16.33%; FID2 = 48.28 %

param. of regular.: E, T2* = 5000.0; T1* = 10.000

permeability constant Cp = 7.00e-09

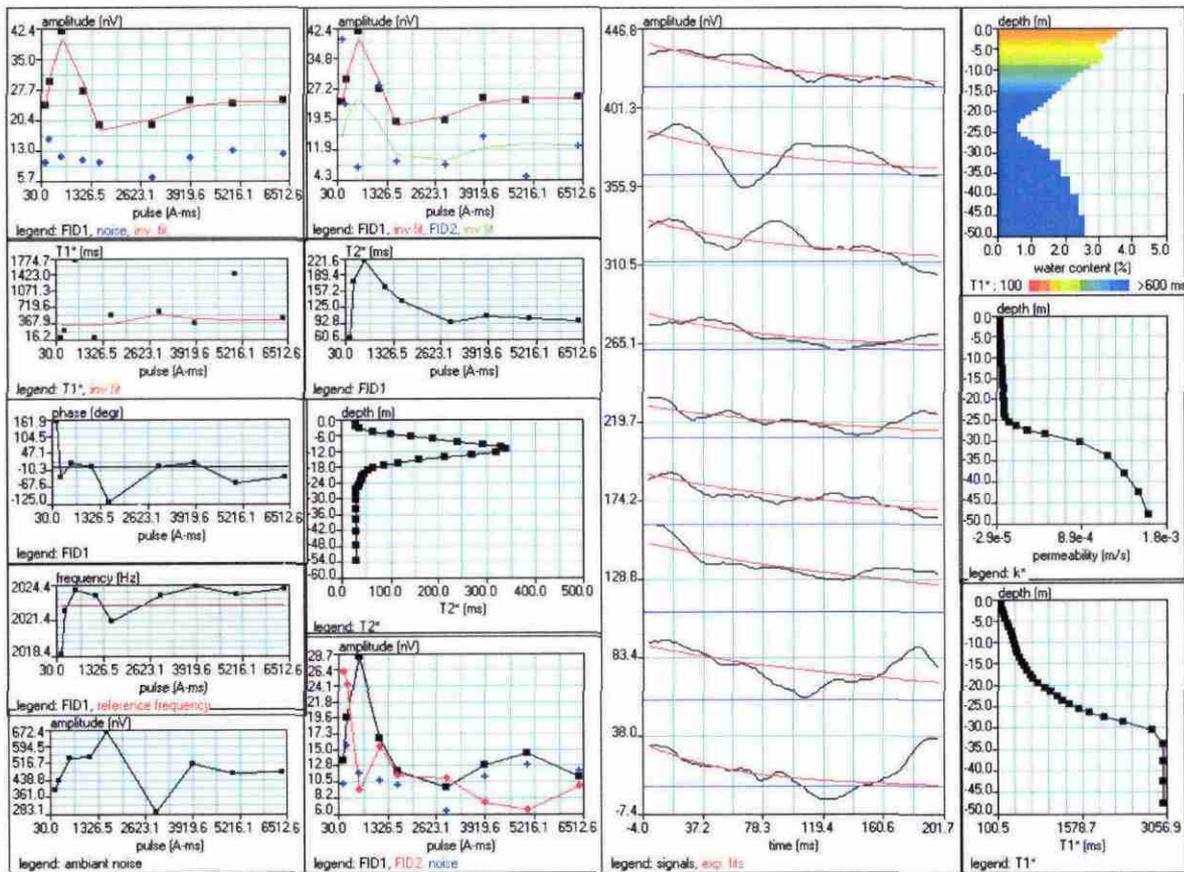


Site: NAN03b (2/3)
 Inversion avec décalage en fréquence

Loop: 4 - 37.5 Date: 16.11.2006 Time: 09:50

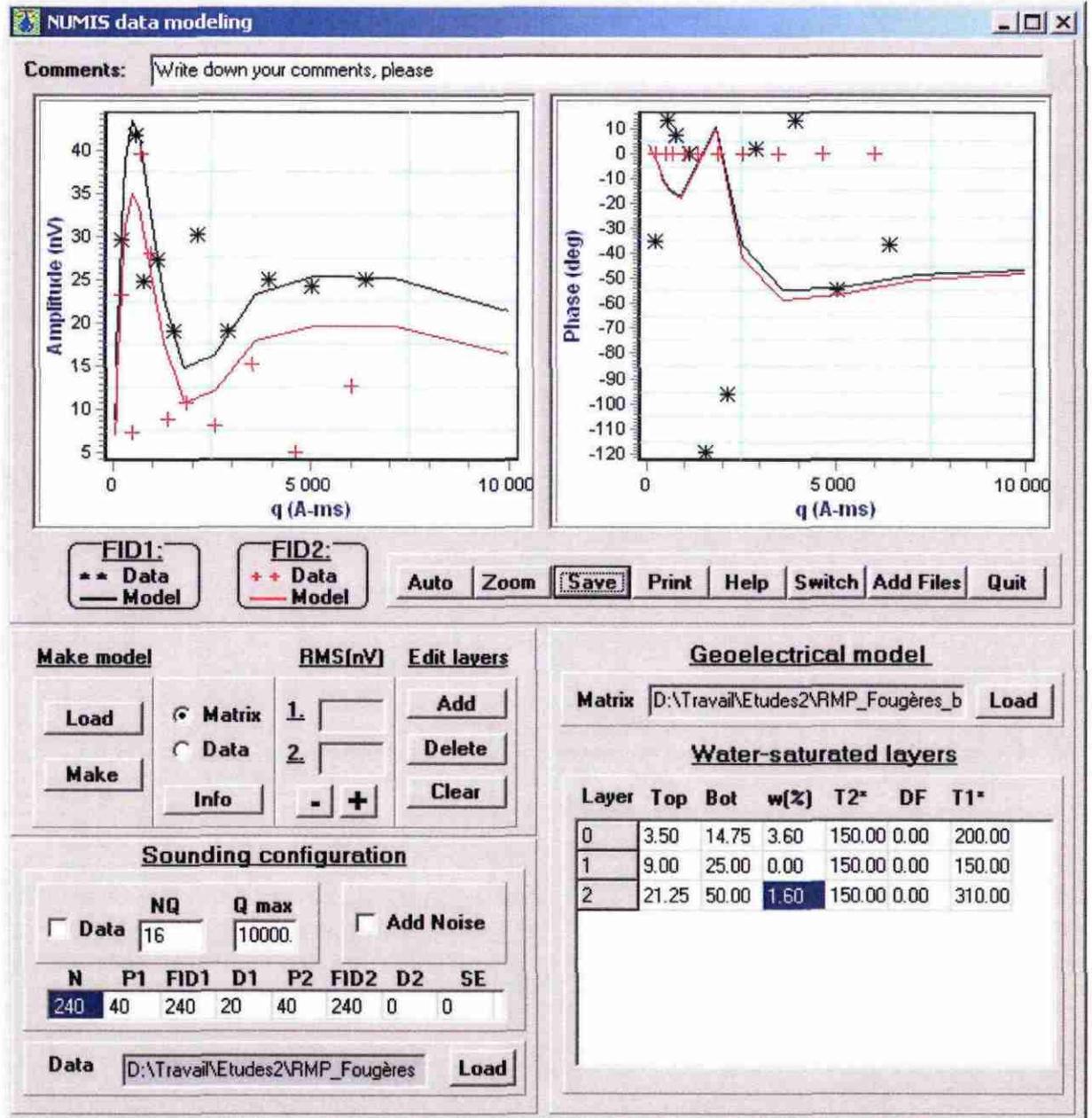
NUMIS data set:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\DECAL_interpretationJMB\NAN03B.inp
 matrix:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_3B.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination=-63 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 199.7 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.37; EN/IN = 2.24
 fitting error: FID1 = 4.51%; FID2 = 55.80 %
 param. of regular.: E, T2* = 200.0; T1* = 10.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: NAN03b (3/3)

Interprétation en 2 couches avec décalage en fréquence.



Site: NAN04

Loop: 4 - 37.5

Date: 15.11.2006

Time: 17:04

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN04.inp

matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 63 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 199.7 ms

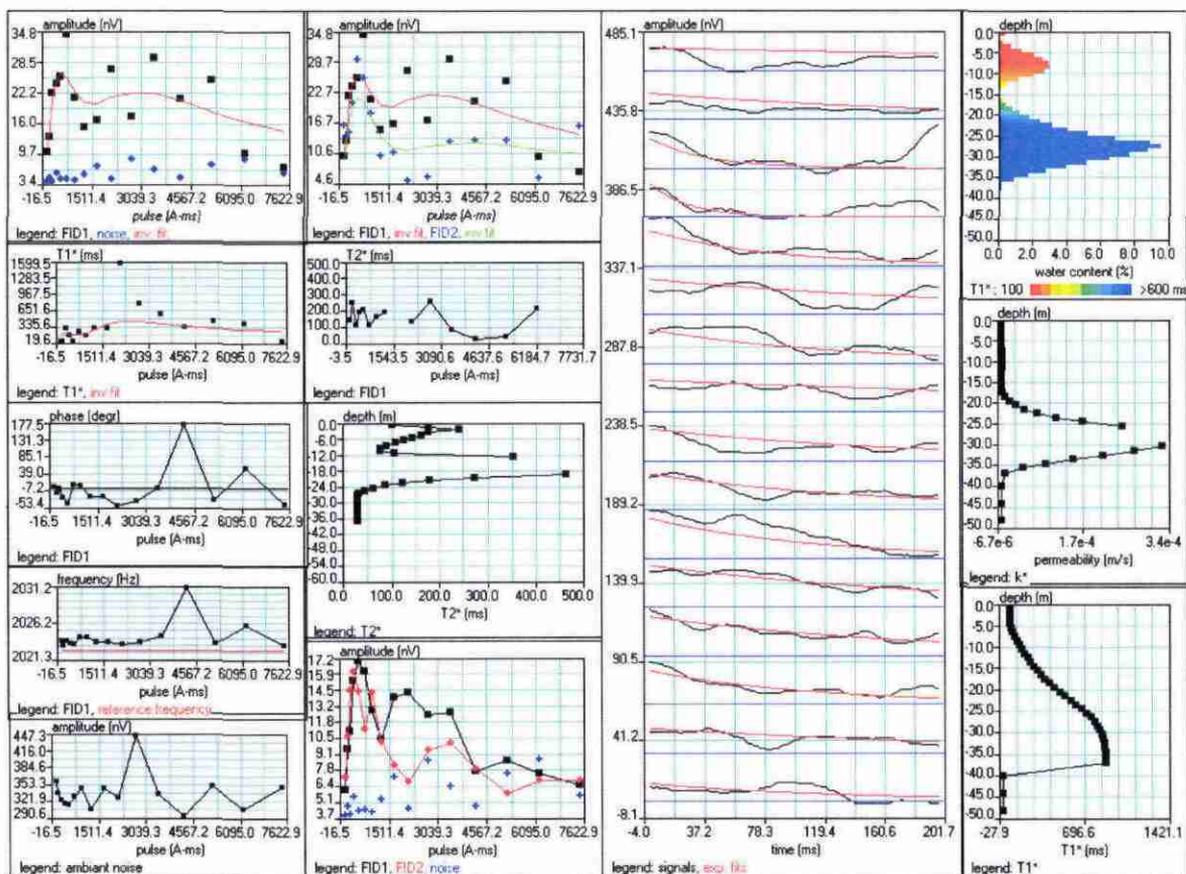
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.01; EN/IN = 1.13

fitting error: FID1 = 22.94%; FID2 = 26.58 %

param. of regular.: E, T2* = 305.2; T1* = 7.868

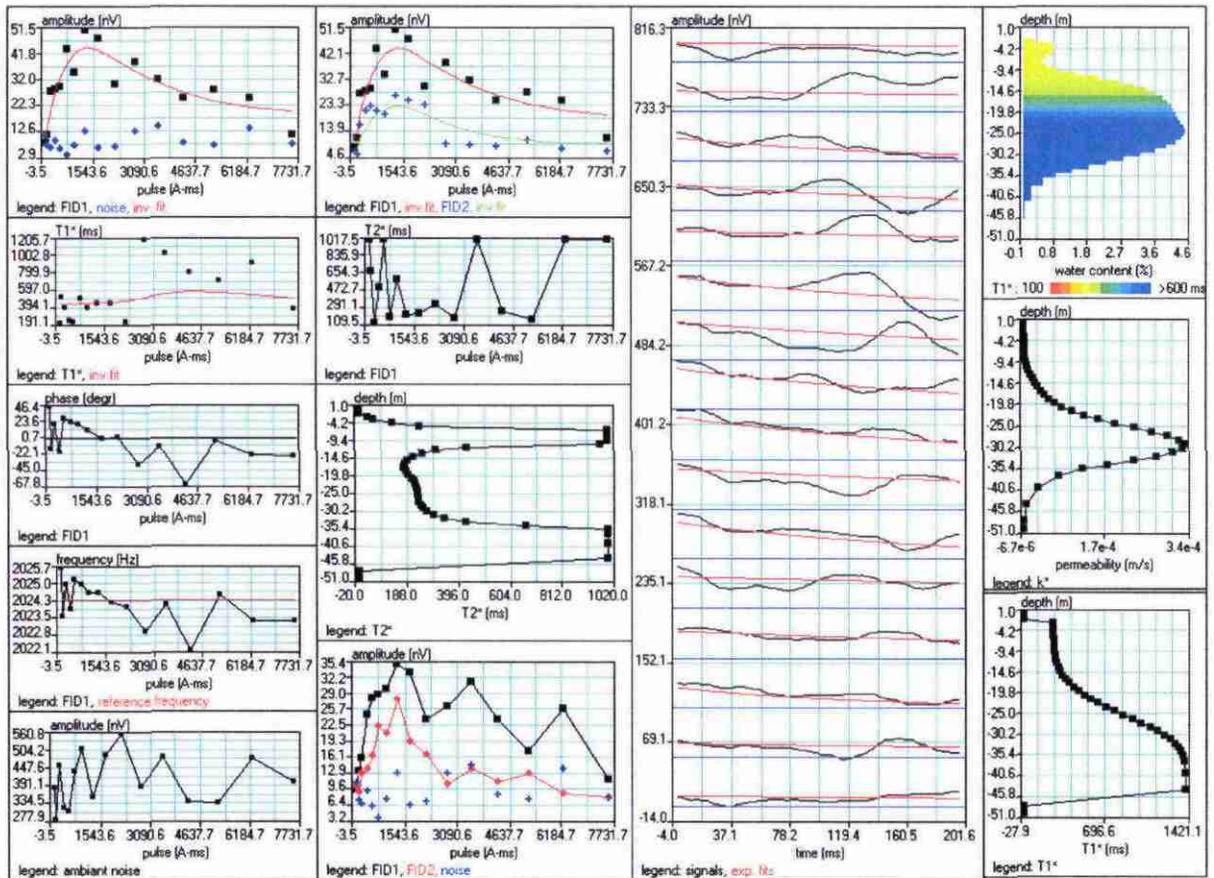
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: NAN05
 Loop: 4 - 37.5 Date: 16.11.2006 Time: 16:12

NUMIS data set:
 D:\Travail\2006\RMP_Fougères\Data_InterprtationALL\NAN05.inp
 matrix: D:\SOFTWARE\RMP\RMP_LOGICIEL2005\Foug837_63_r_0_0.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 199.6 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.65; EN/IN = 1.78
 fitting error: FID1 = 16.27%; FID2 = 22.72 %
 param. of regular.: E, T2* = 244.1; T1* = 11.206
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: NAN06

Loop: 4 - 37.5

Date: 17.11.2006

Time: 09:35

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN06.inp

matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 63 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 199.7 ms

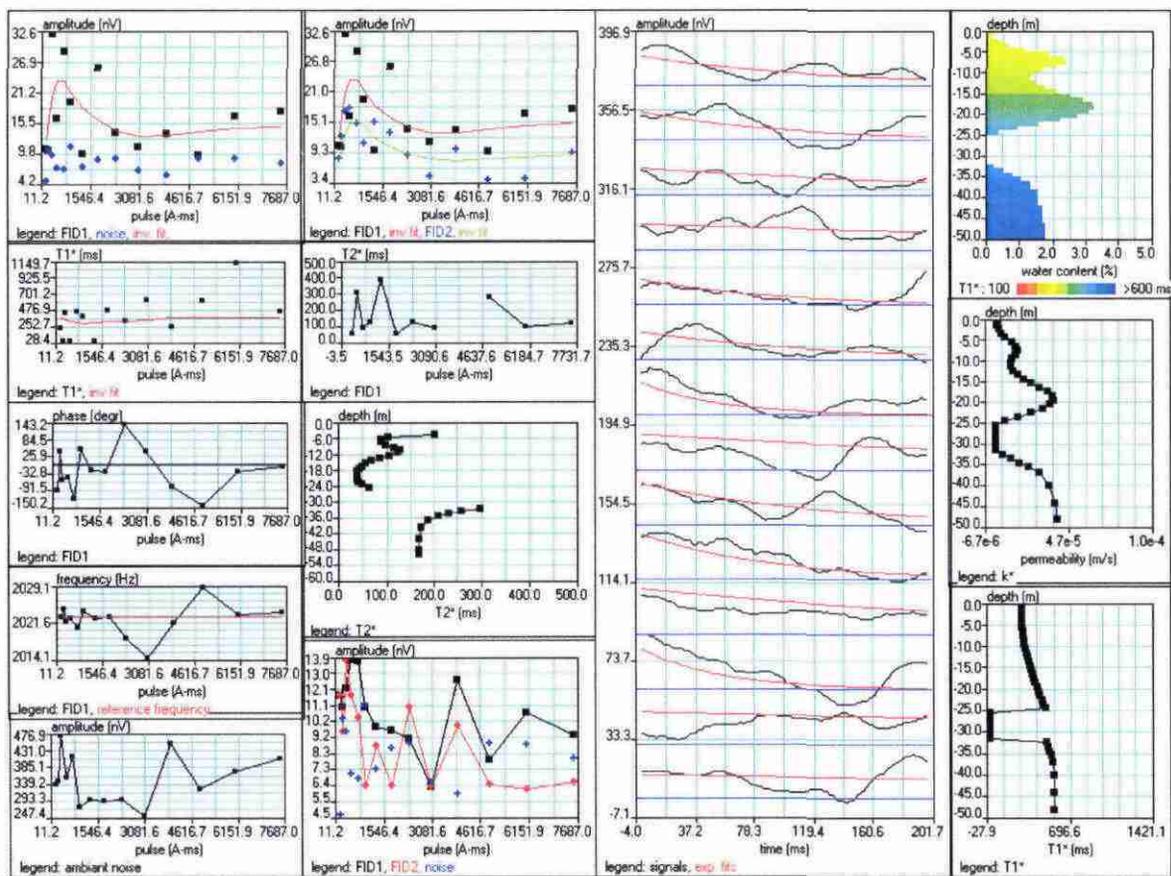
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.32; EN/IN = 1.61

fitting error: FID1 = 31.33%; FID2 = 24.41 %

param. of regular.: E, T2* = 500.0; T1* = 10.000

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: Fougères Les Mats NAN7A (1/2)
 Interprétation en milieu résistant

Loop: 4 - 37.5 Date: 14.12.2006 Time: 10:40

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN7A.inp
 matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 98.8 ms

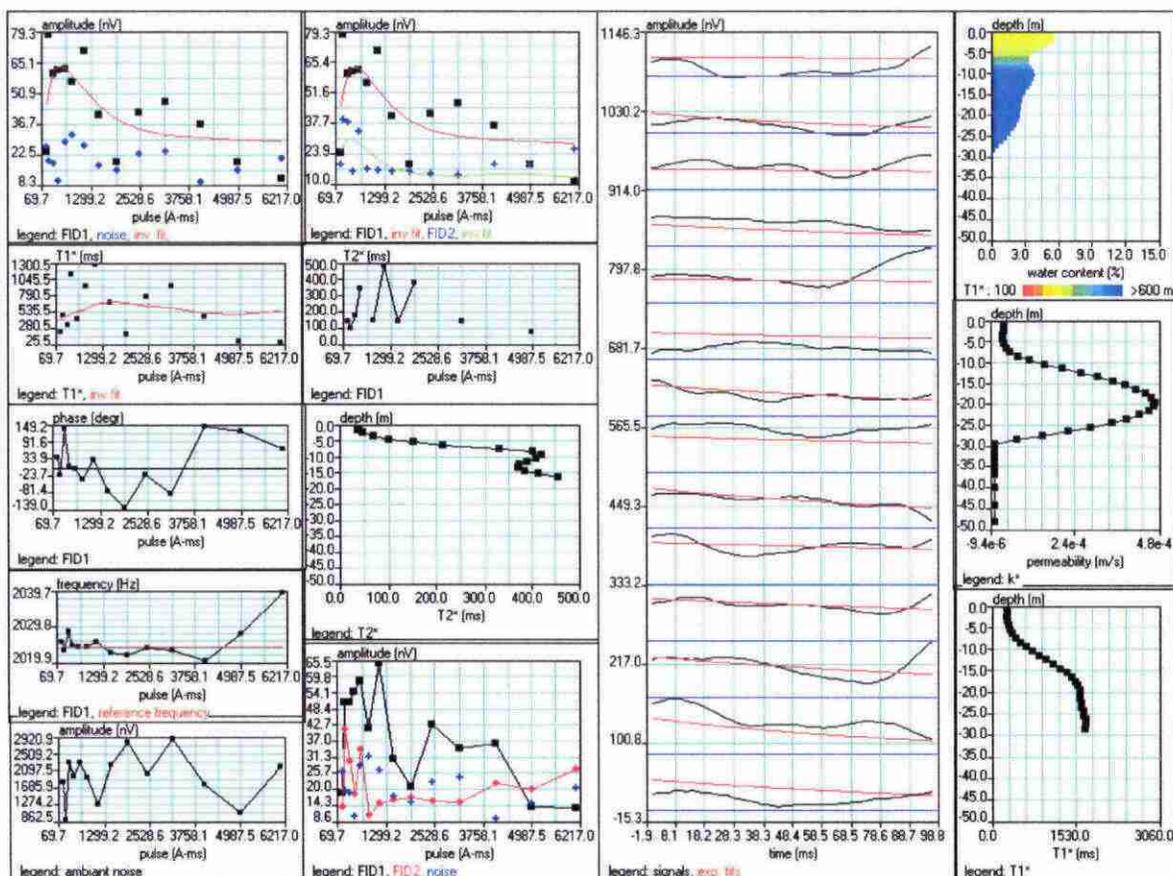
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.86; EN/IN = 4.09

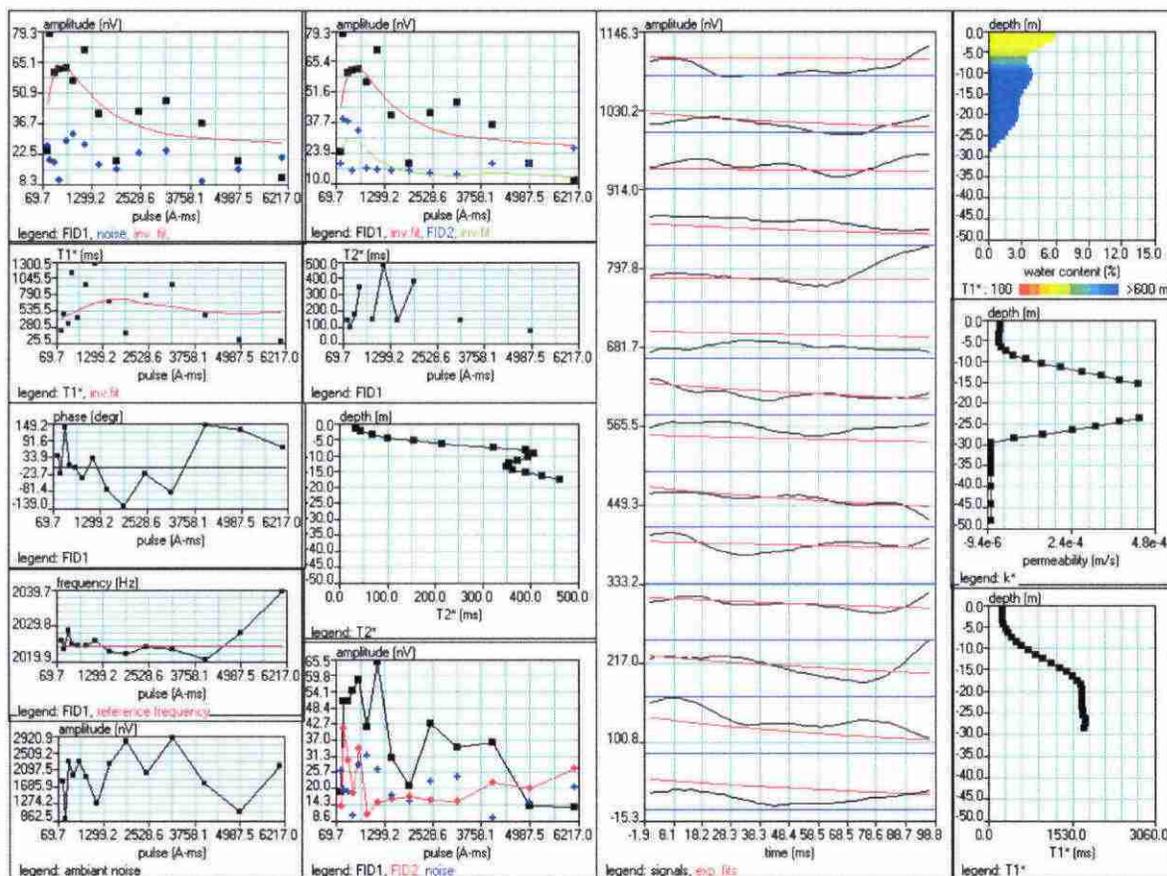
fitting error: FID1 = 27.56%; FID2 = 31.81 %

param. of regular.: E, T2* = 1000.0; T1* = 10.000

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: Fougères Les Mats NAN7A (2/2)
 Interprétation en milieu conducteur.



Site: Fougères La Vieuville NAN07a (1/2)
 Loop: 4 - 37.5 Date: 12.12.2006 Time: 11:08

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN07A.inp
 matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_3B.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination=-63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 199.6 ms

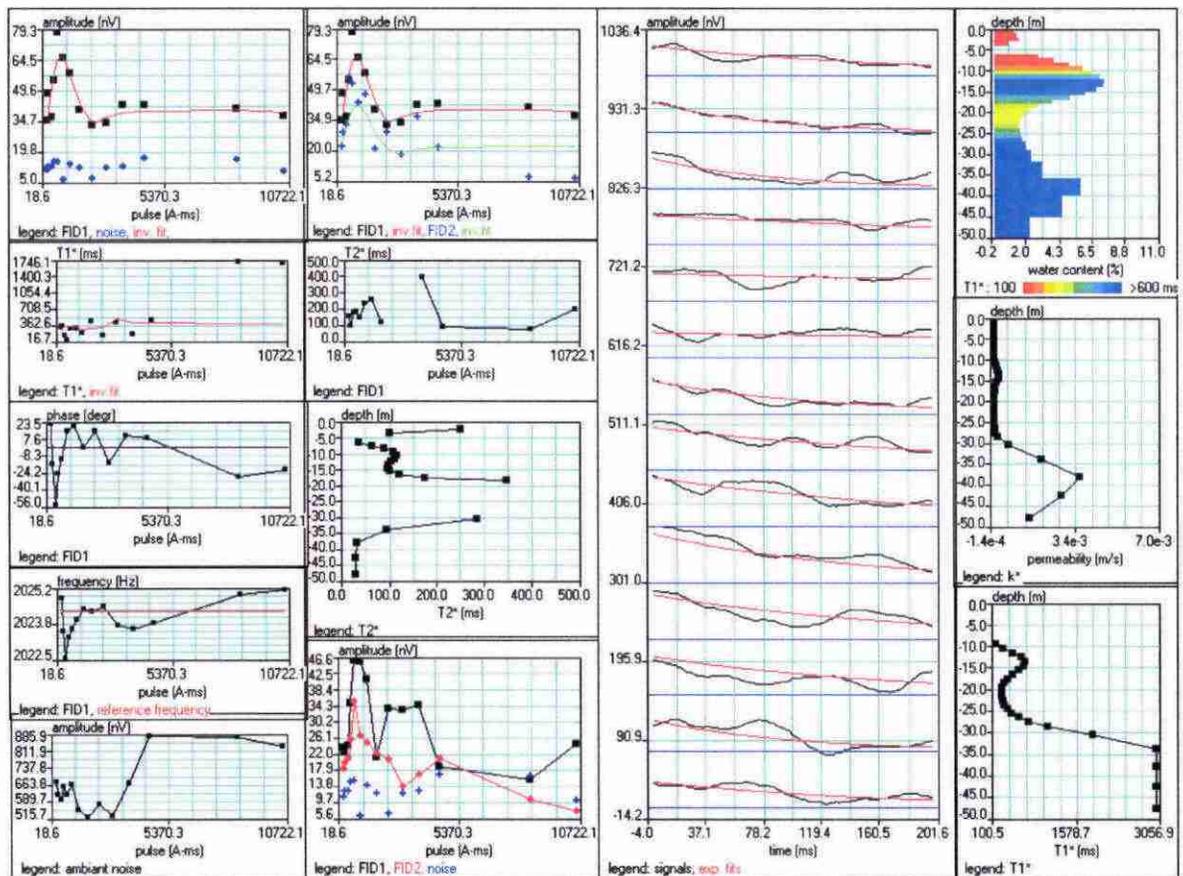
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.41; EN/IN = 2.49

fitting error: FID1 = 12.54%; FID2 = 29.83 %

param. of regular.: E, T2* = 200.0; T1* = 0.238

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: Fougères La Vieuville NAN07a (2/2)
 Inversion avec décalage en fréquence

Loop: 4 - 37.5 Date: 12.12.2006 Time: 11:08

NUMIS data set:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\DECAL_interpretationJMB\NAN07A.inp
 matrix:

D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_7A.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination=-63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 199.6 ms

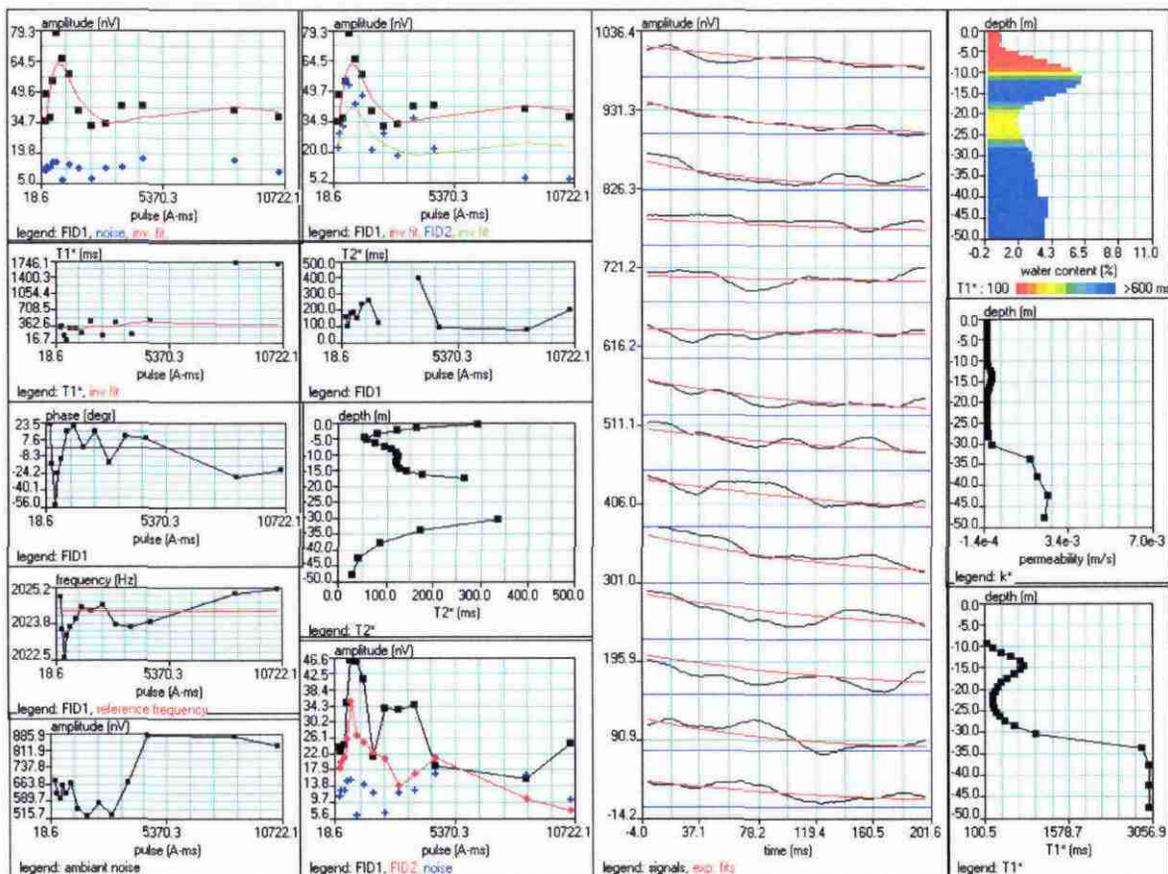
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.41; EN/IN = 2.49

fitting error: FID1 = 15.05%; FID2 = 30.80 %

param. of regular.: E, T2* = 500.0; T1* = 0.238

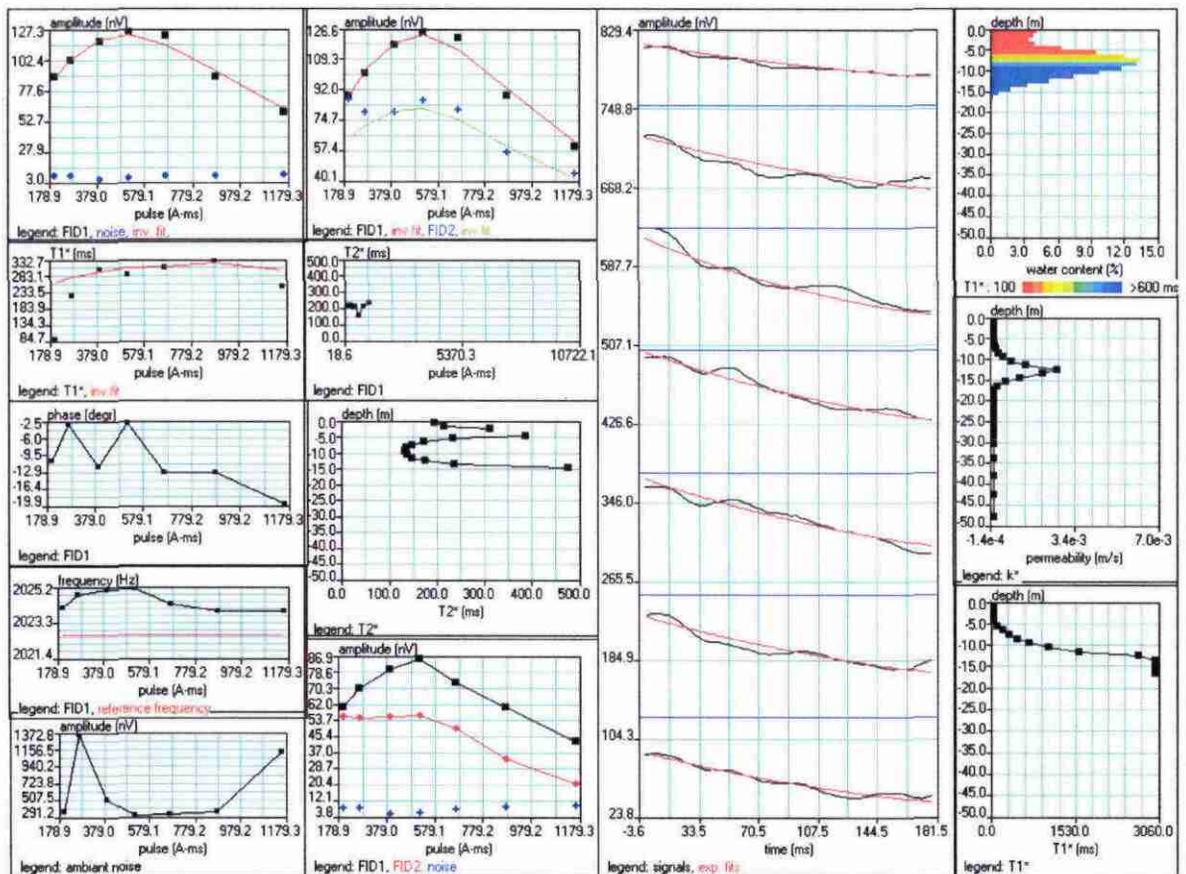
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: Fougères Serfilieres NAN08
 Loop: 4 - 37.5 Date: 12.12.2006 Time: 19:52

NUMIS data set:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN08.inp
 matrix:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_3B.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination=-63 degr, magnitude= 47481.22 nT

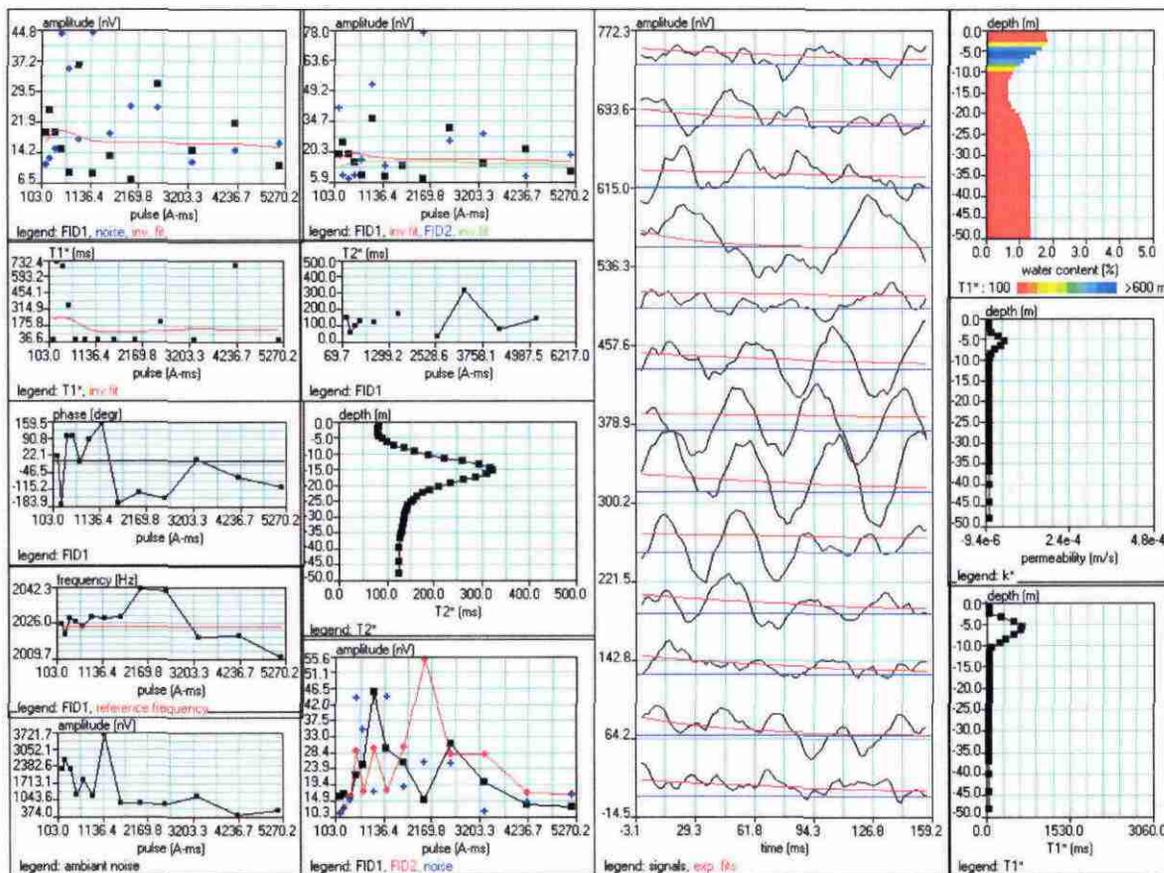
filtering window = 180.0 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 8.68; EN/IN = 1.55
 fitting error: FID1 = 3.26%; FID2 = 12.91 %
 param. of regular.: E, T2* = 145.0; T1* = 20.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: Fougères La Tuchenniere NAN10
 Loop: 4 - 37.5 Date: 14.12.2006 Time: 19:21

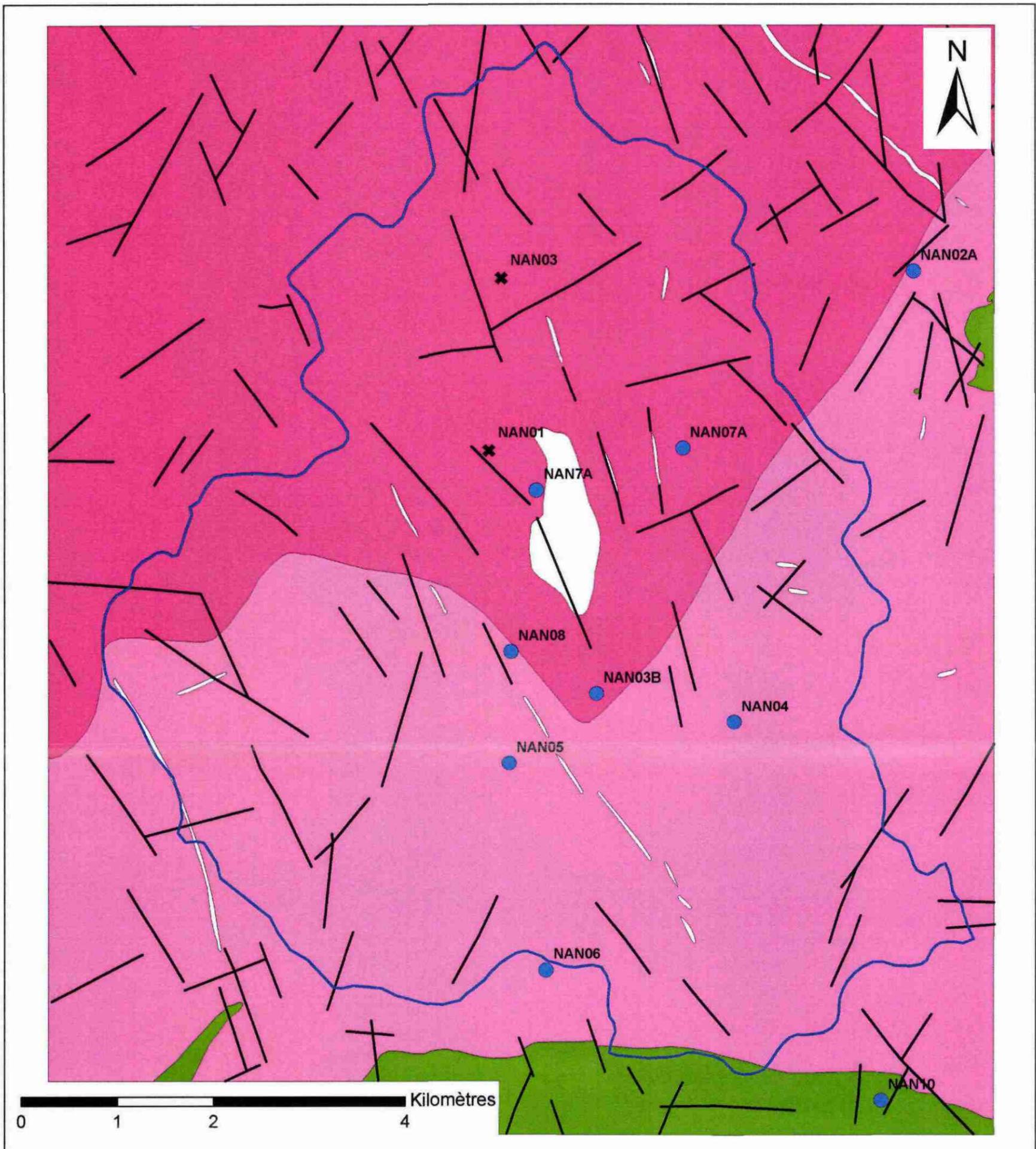
NUMIS data set:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Data_interpretationJMB\NAN10.inp
 matrix:
 D:\Travail\Etudes2\RMP_Fougères_bis\Matrices\Foug837_63_r_0_0.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 63 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 158.1 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 0.99; EN/IN = 4.48
 fitting error: FID1 = 42.88%; FID2 = 94.30 %
 param. of regular.: E, T2* = 10000.0; T1* = 100.000
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Annexe 2

Planches A3



Légende

Bassin versant du Nançon

Sondages RMP

- Résultats RMP inexploitable
- Résultats RMP exploitables

Formations géologiques

- Granodiorite à biotite (type Louvigné-du-Désert)
- Granodiorite à biotite et cordiérite (type Vire)
- Cornéennes et micaschistes (Unité de Fougères)
- Formations géologiques non renseignées par RMP (Argiles de Landéan, filons de quartz et de dolérites)
- Failles de la carte géologique

Planche 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Nançon)

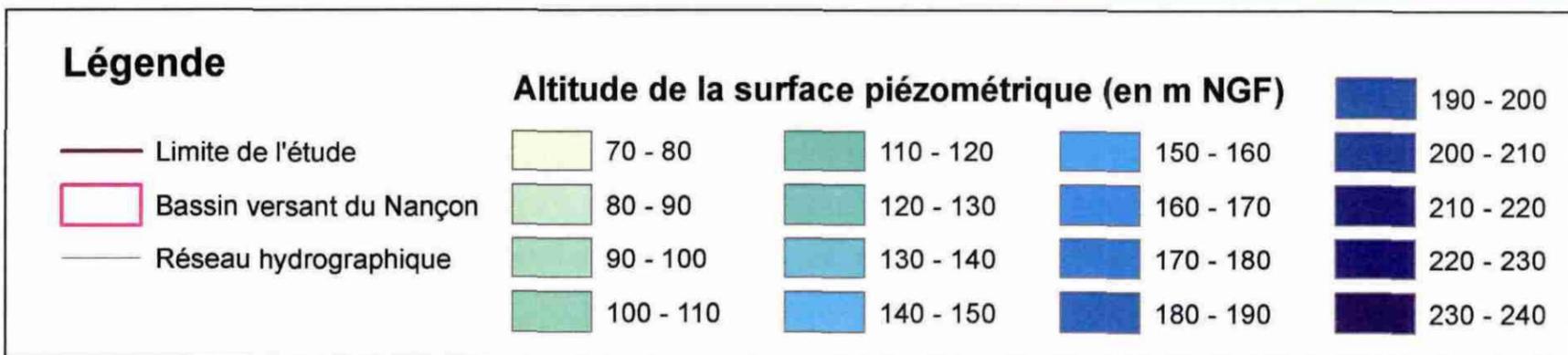
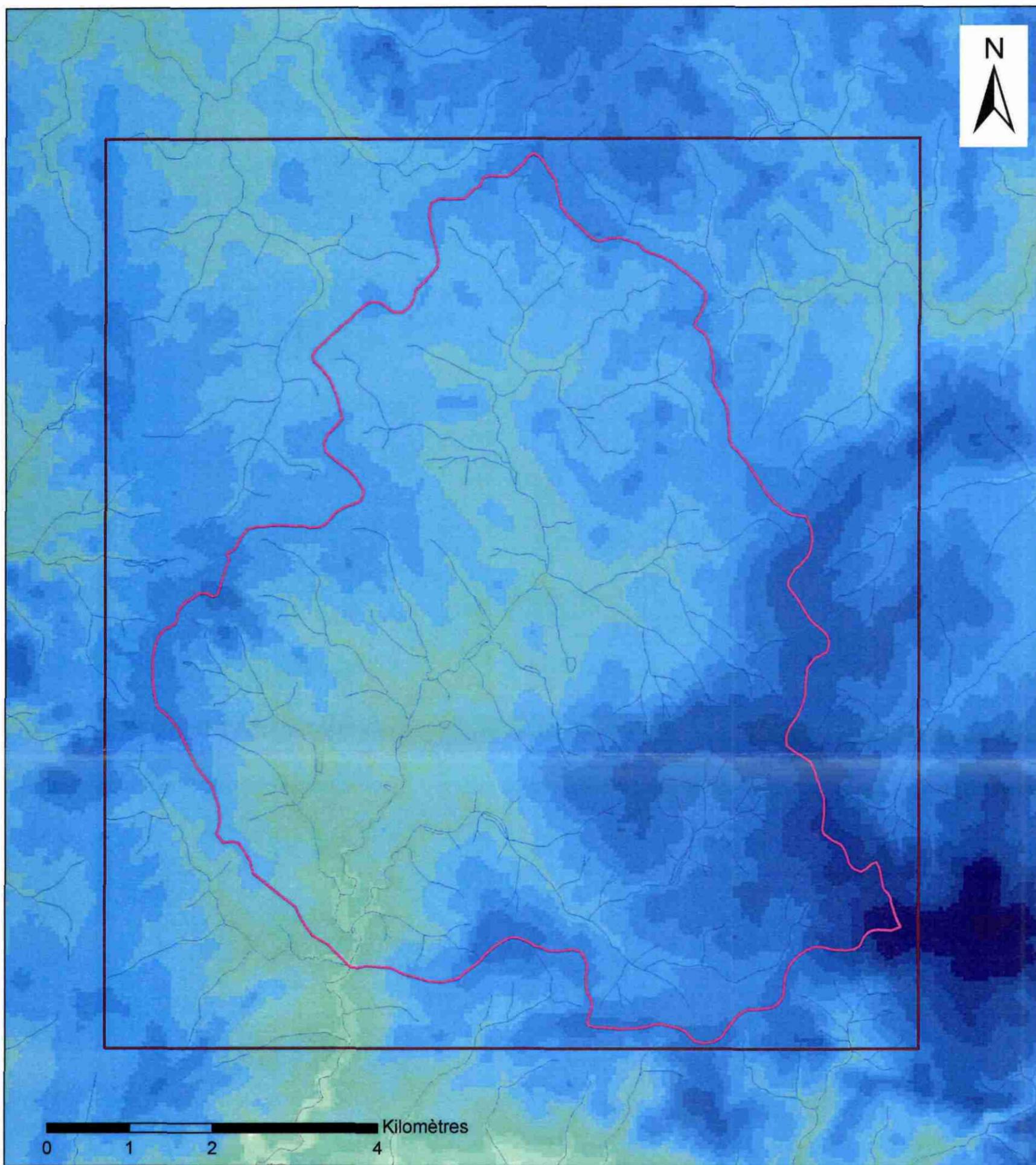


Planche 2 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Nançon)

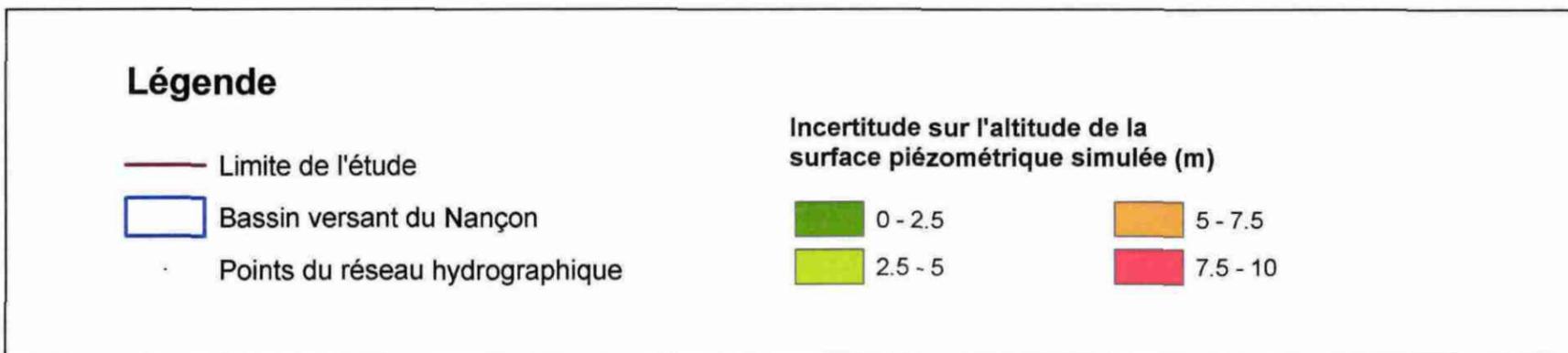
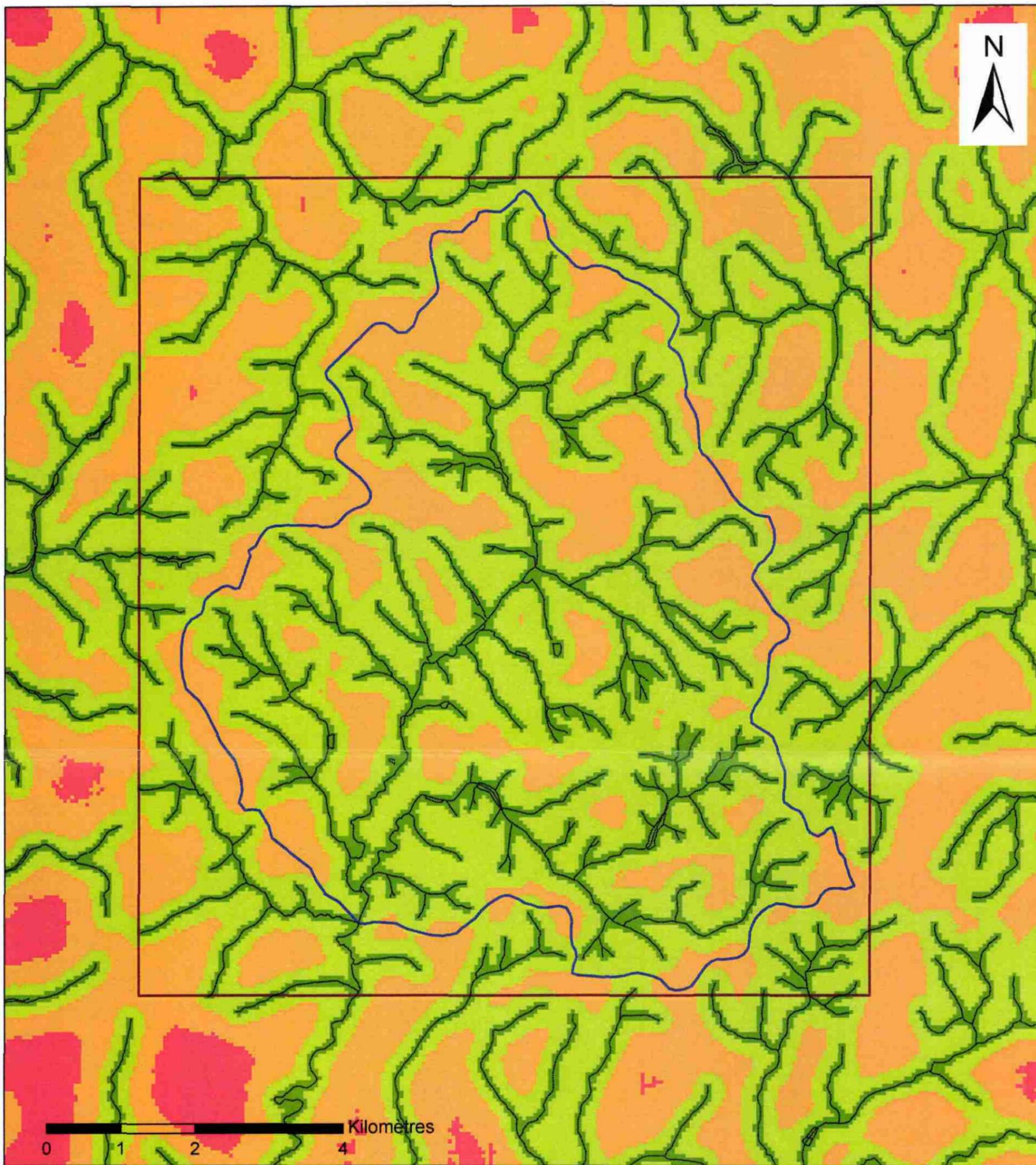


Planche 3 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Nançon)

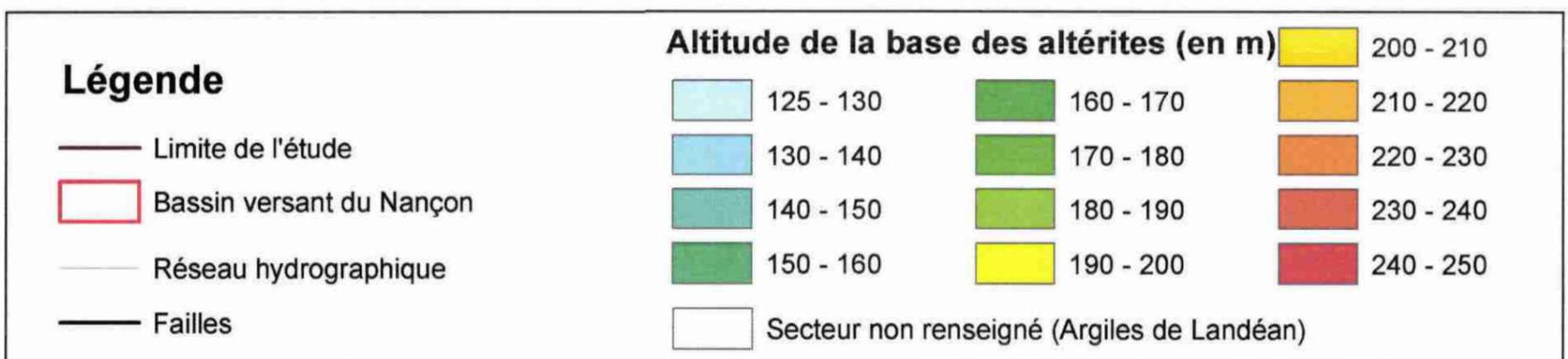
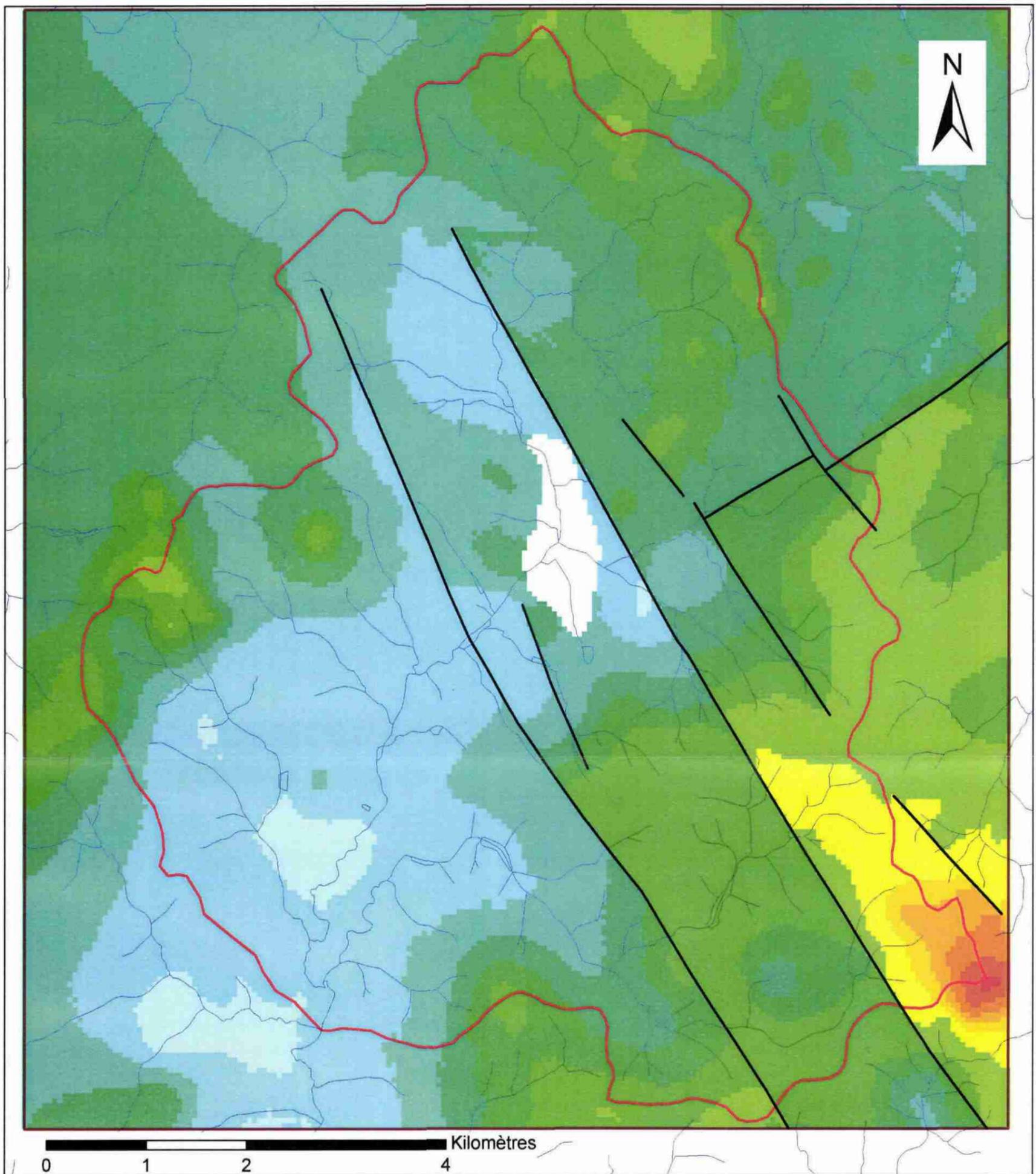
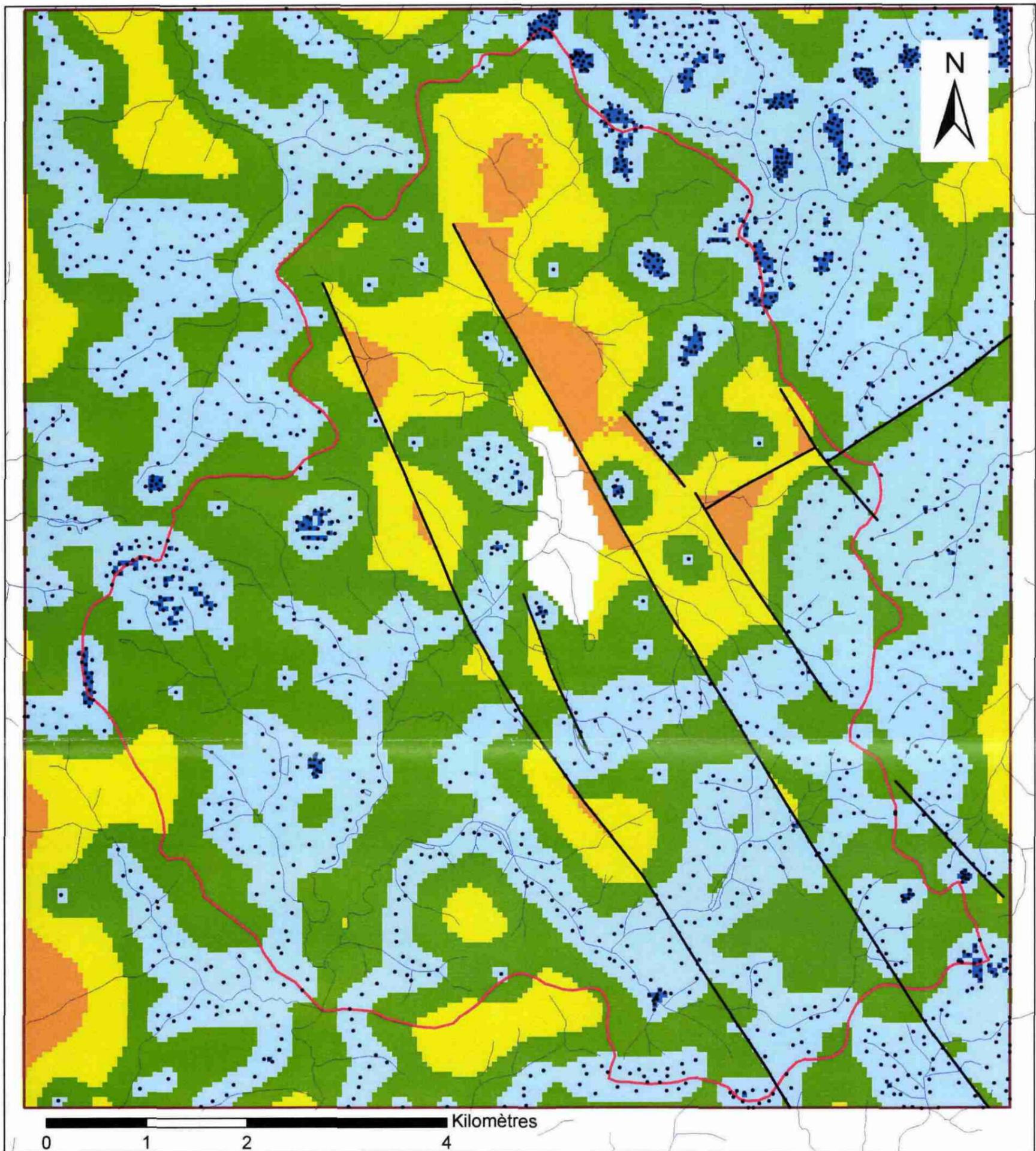


Planche 4 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Nançon)



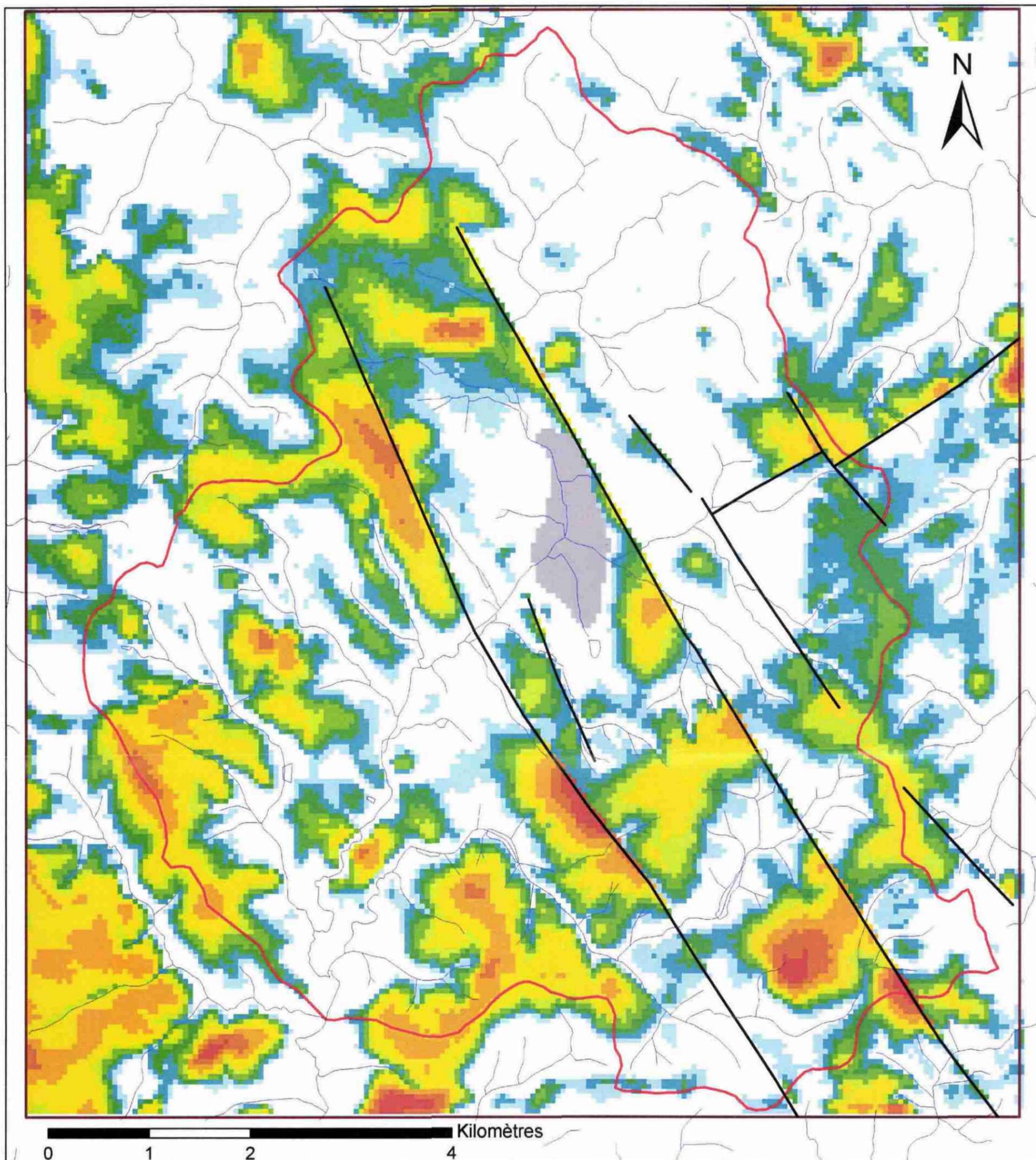
Légende

- Limite de l'étude
- ▭ Bassin versant du Nançon
- Réseau hydrographique
- Failles
- Points avec altitude de la base des altérites

Incertitude sur l'altitude de la base des altérites (m)

- | | | |
|--|------------|-------------|
| ▭ 1.5 - 2.5 | ▭ 5 - 7.5 | ▭ 10 - 13.6 |
| ▭ 2.5 - 5 | ▭ 7.5 - 10 | |
| ▭ Secteur non renseigné (Argiles de Landéan) | | |

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



Légende		Epaisseur des altérites en place (m)	
— Limite de l'étude		0 - 2	10 - 15
▭ Bassin versant du Nançon		2 - 4	15 - 20
— Réseau hydrographique		4 - 6	20 - 25
— Failles		6 - 8	25 - 35
		8 - 10	▭ Absence d'altérites
		▭ Secteur non renseigné (Argiles de Landéan)	

Planche 6 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Nançon)

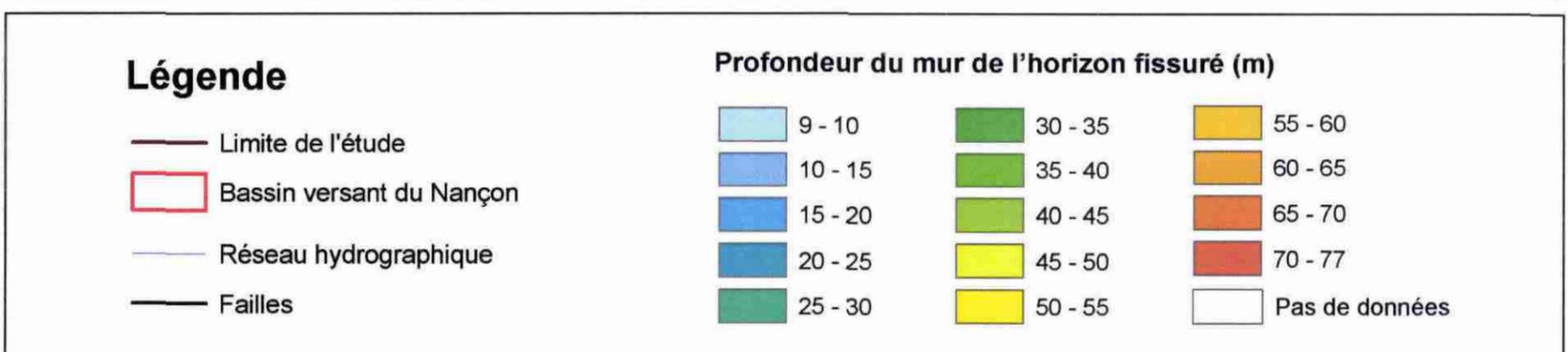
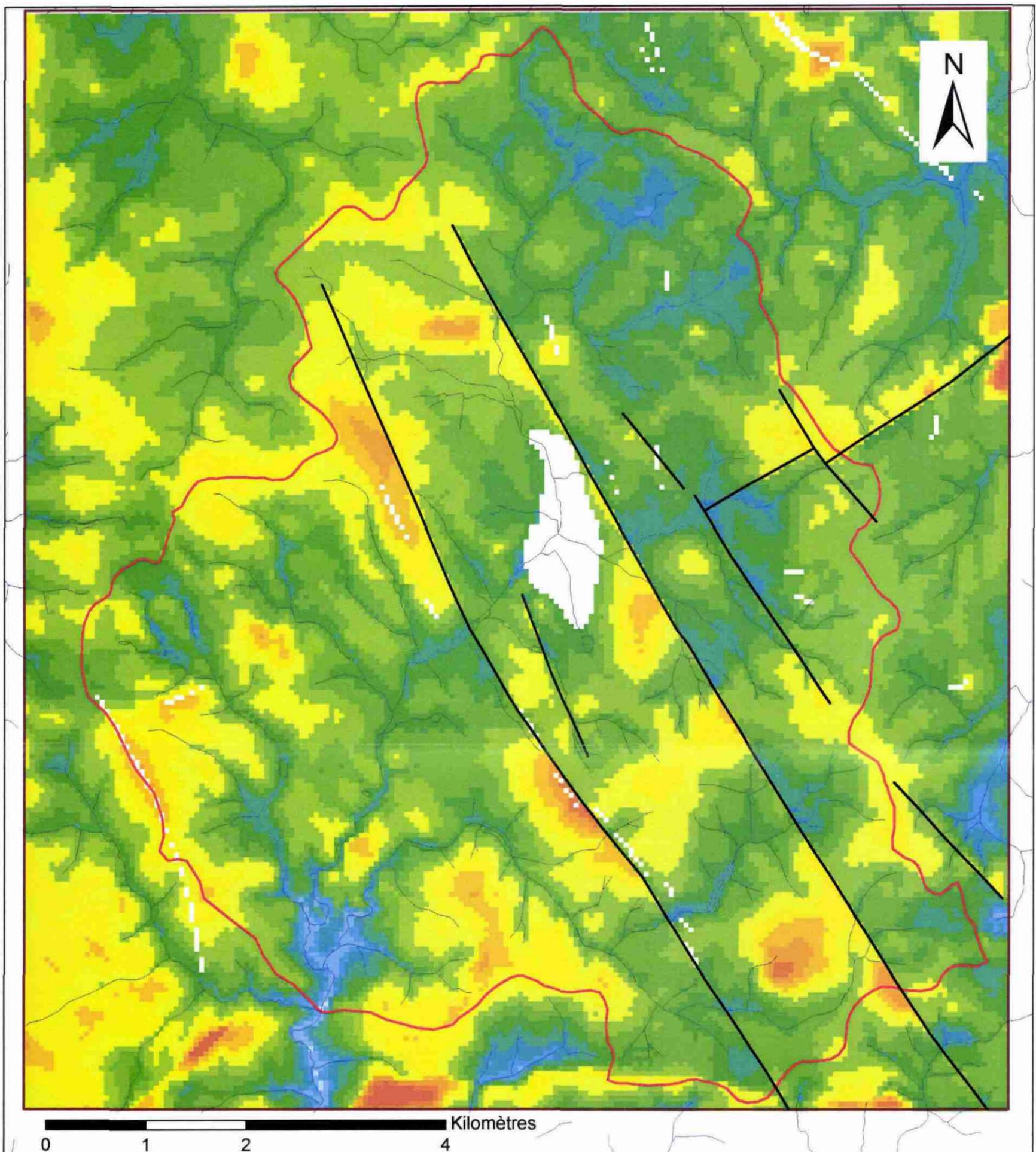


Planche 7 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Nançon)

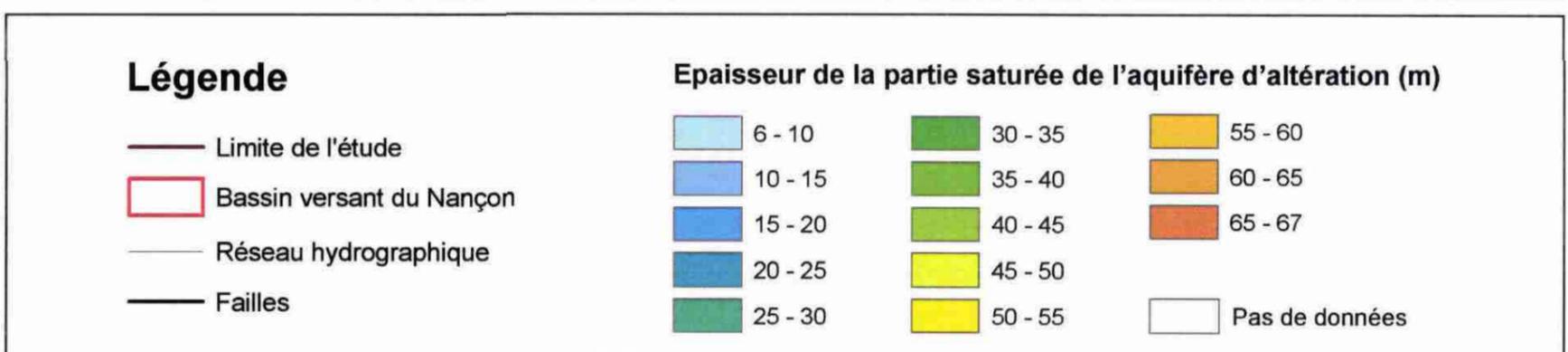
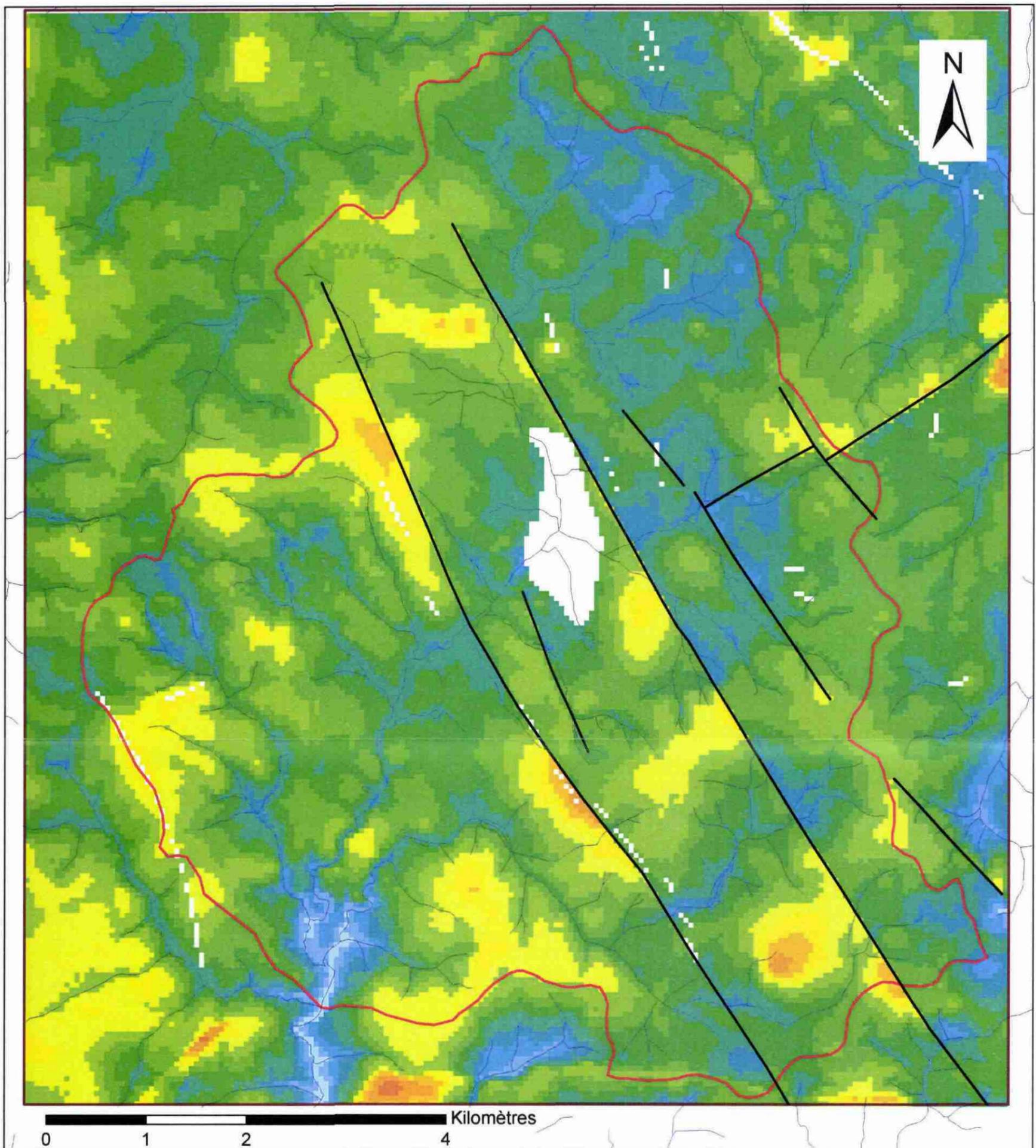


Planche 8 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Nançon)



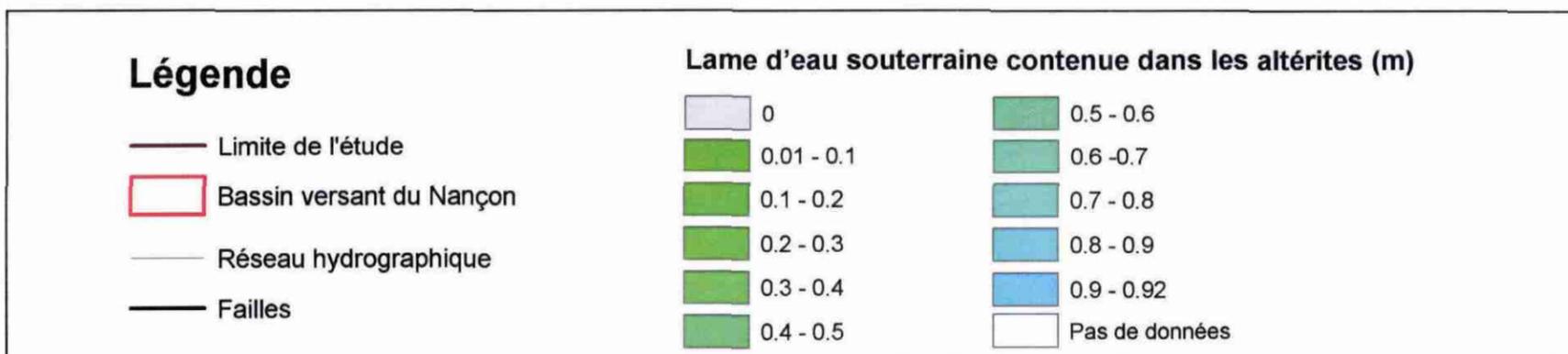
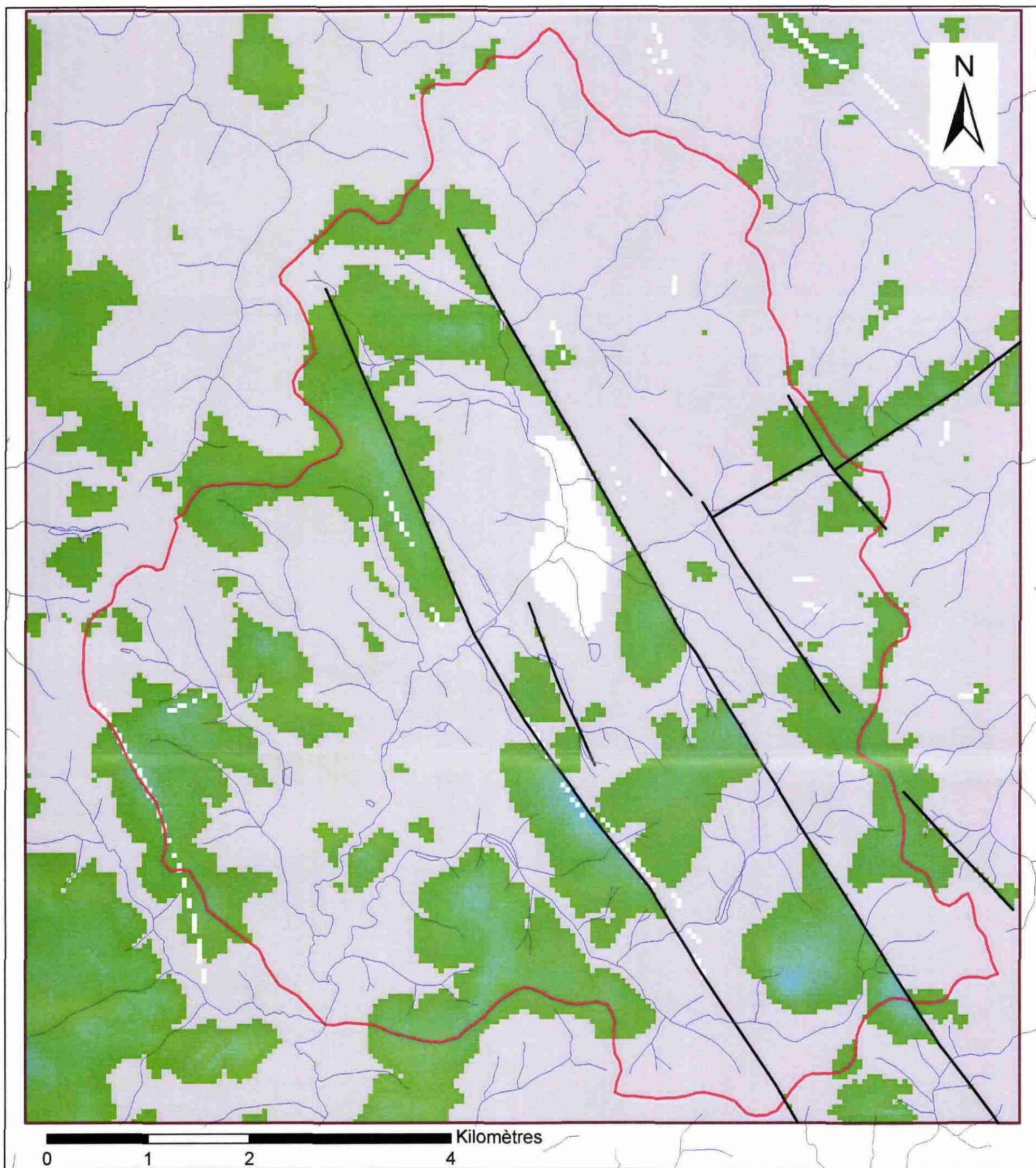


Planche 9 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Nançon)



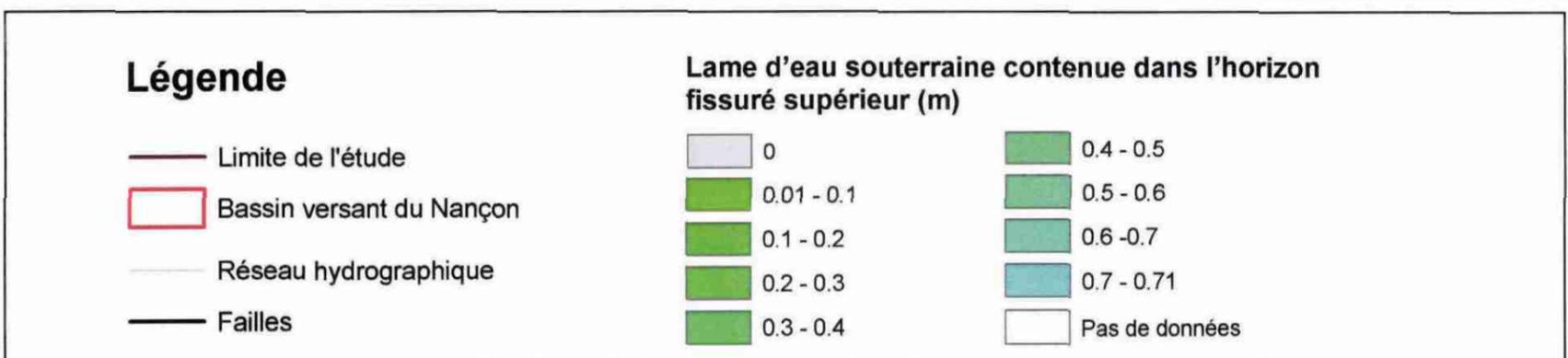
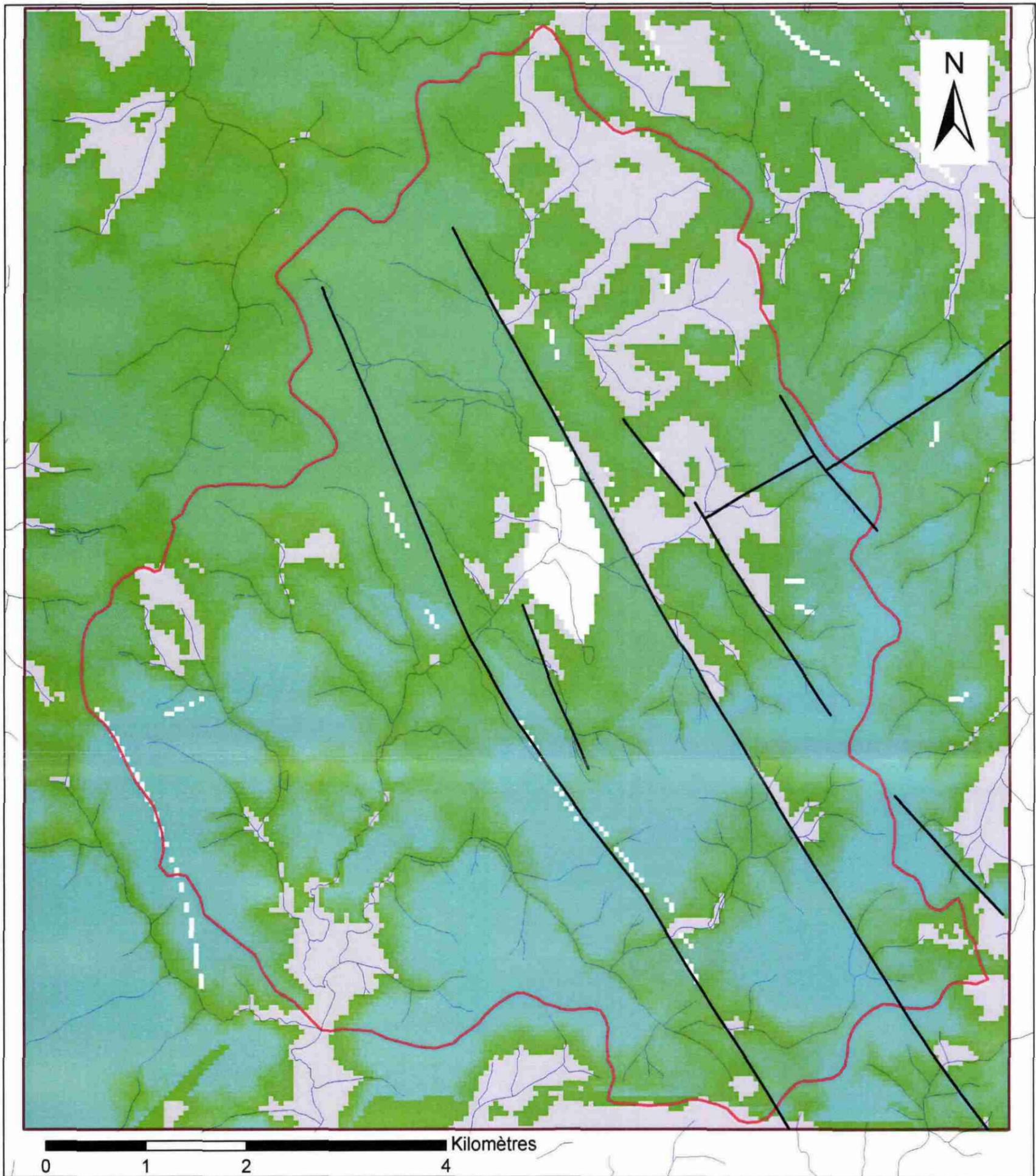
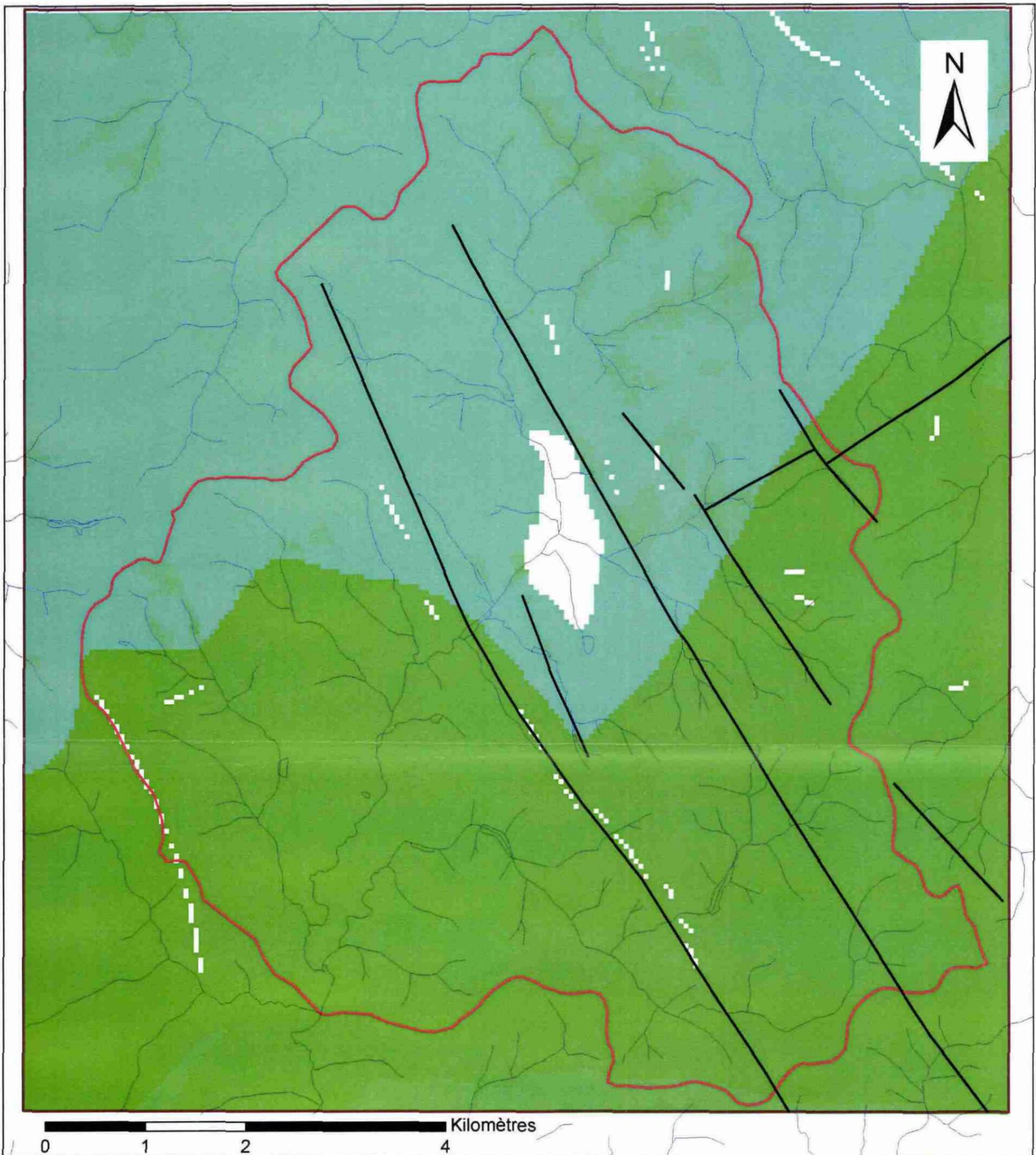


Planche 10 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Nançon)





Légende

- Limite de l'étude
- Bassin versant du Nançon
- Réseau hydrographique
- Failles

Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (m)

- | | |
|--------------|------------------|
| ■ 0.01 - 0.1 | ■ 0.4 - 0.5 |
| ■ 0.1 - 0.2 | ■ 0.5 - 0.6 |
| ■ 0.2 - 0.3 | ■ 0.6 - 0.64 |
| ■ 0.3 - 0.4 | □ Pas de données |

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

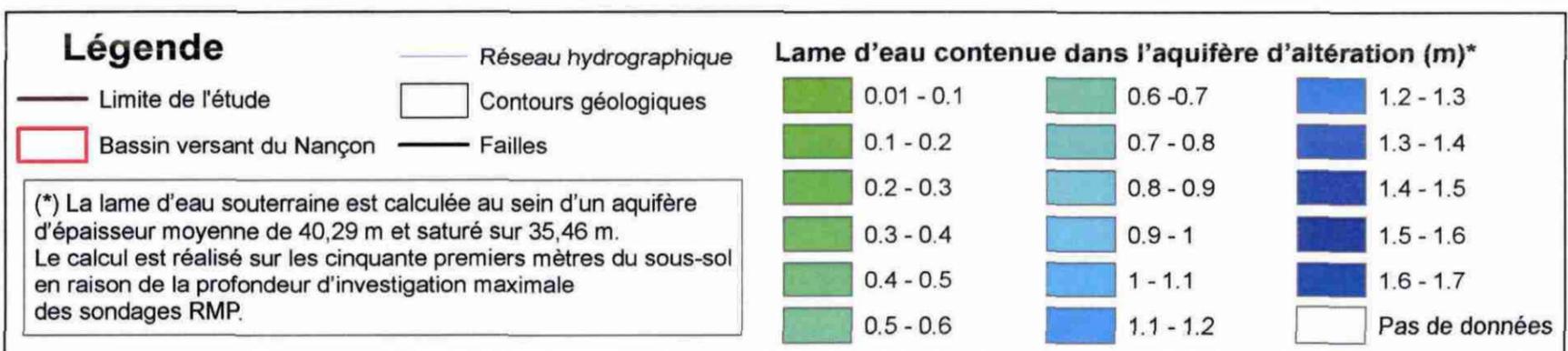
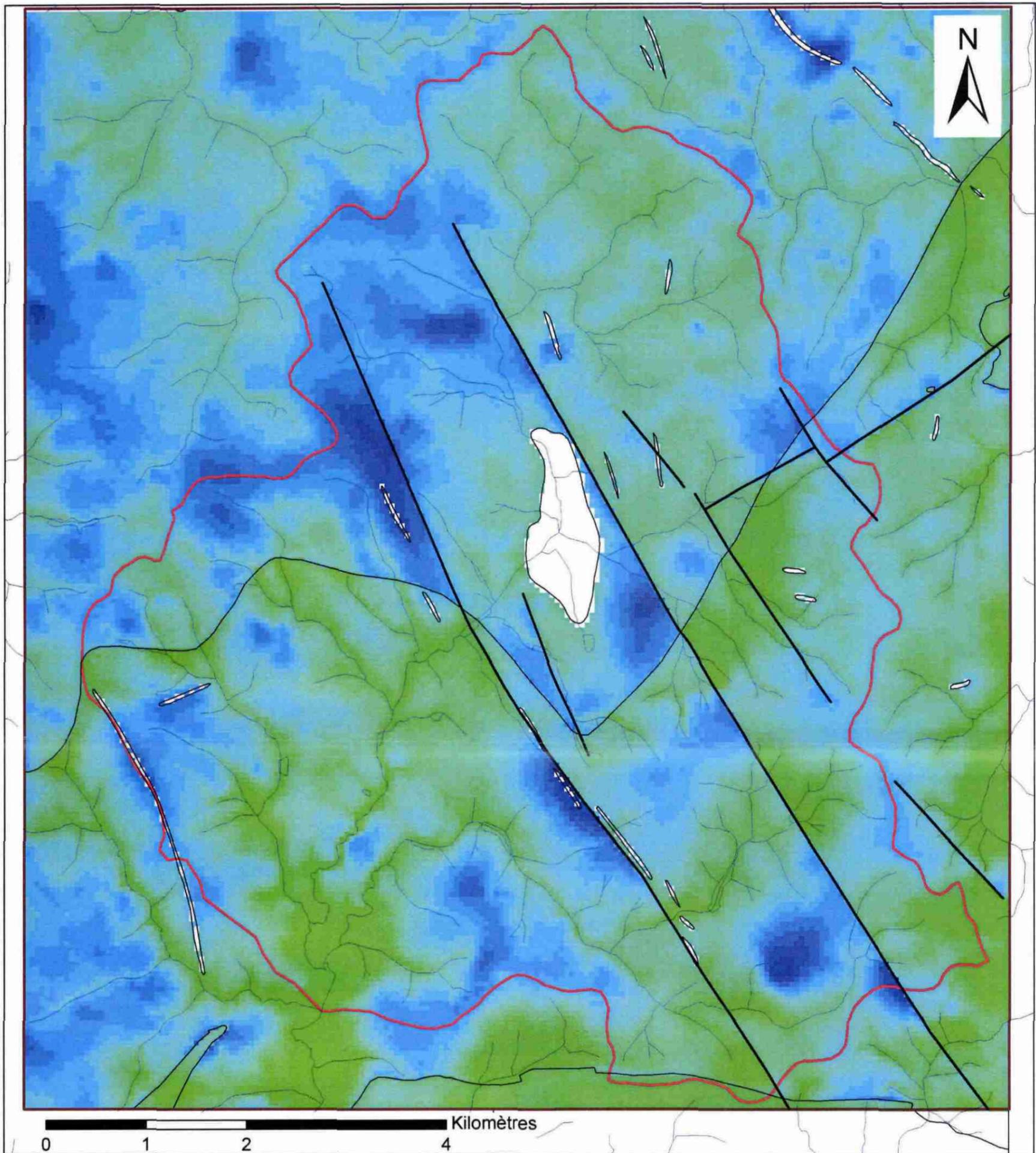


Planche 12 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Nançon)

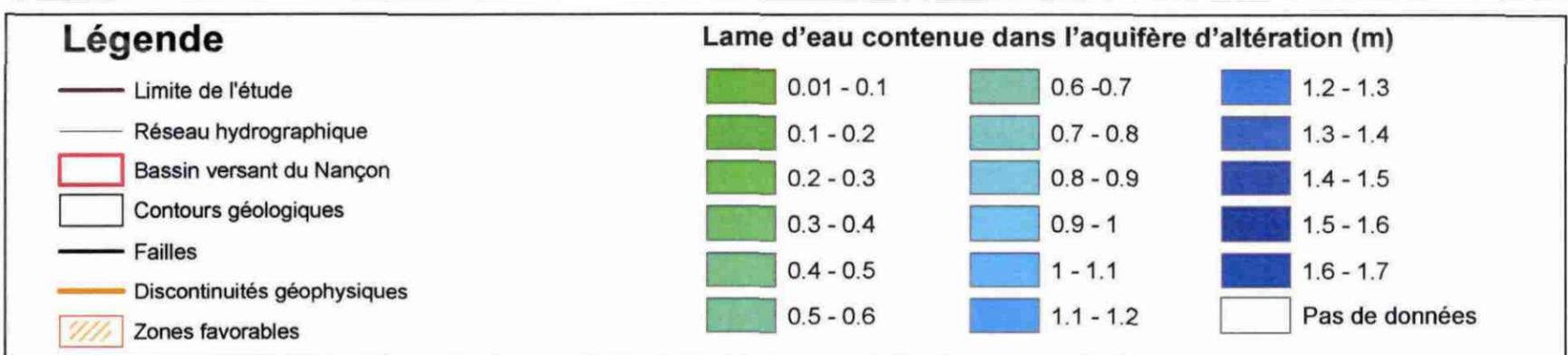
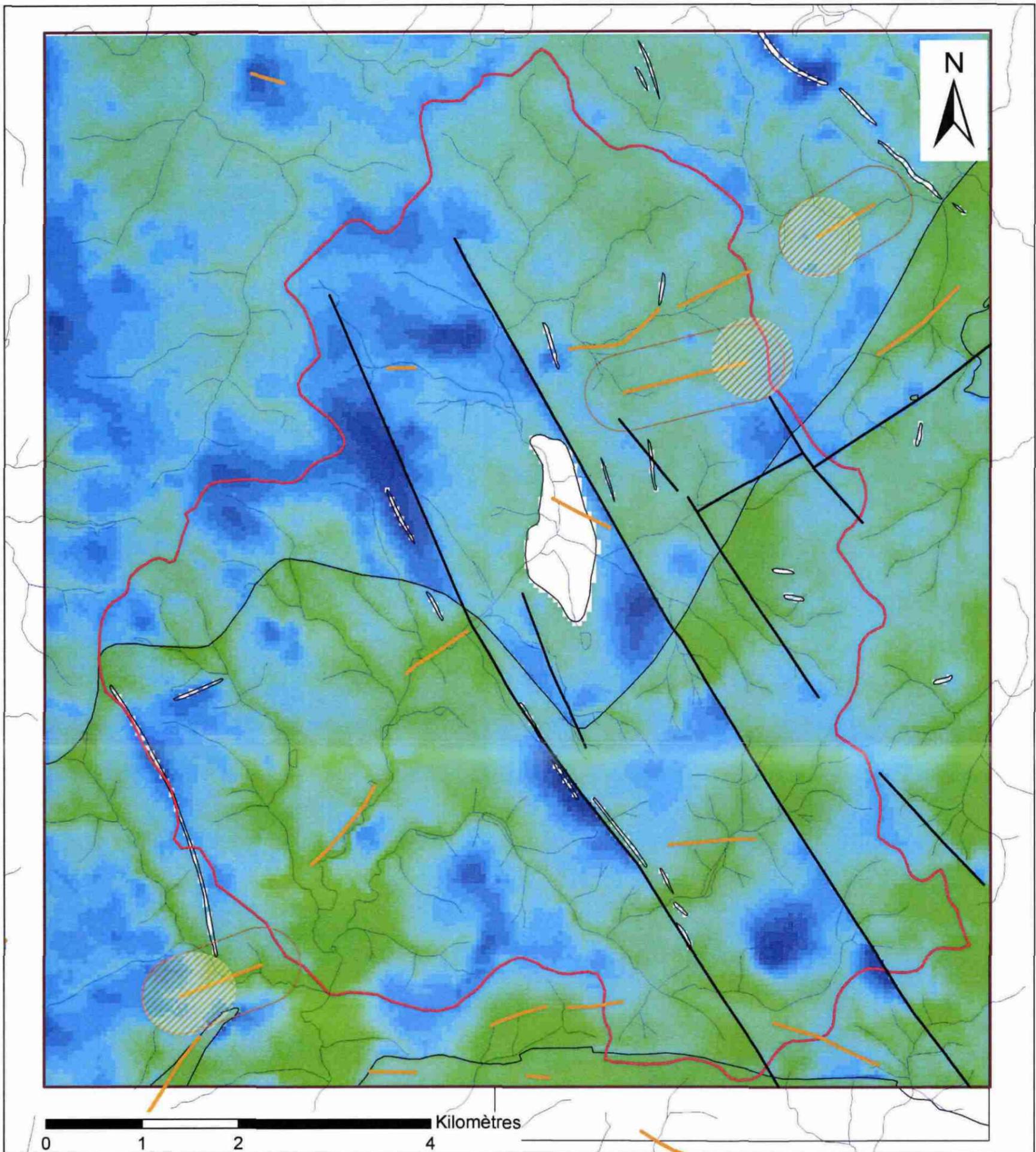


Planche 13 - Lame d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin du Nançon)

1. Introduction

2. Methodology

3. Results

4. Discussion

5. Conclusion

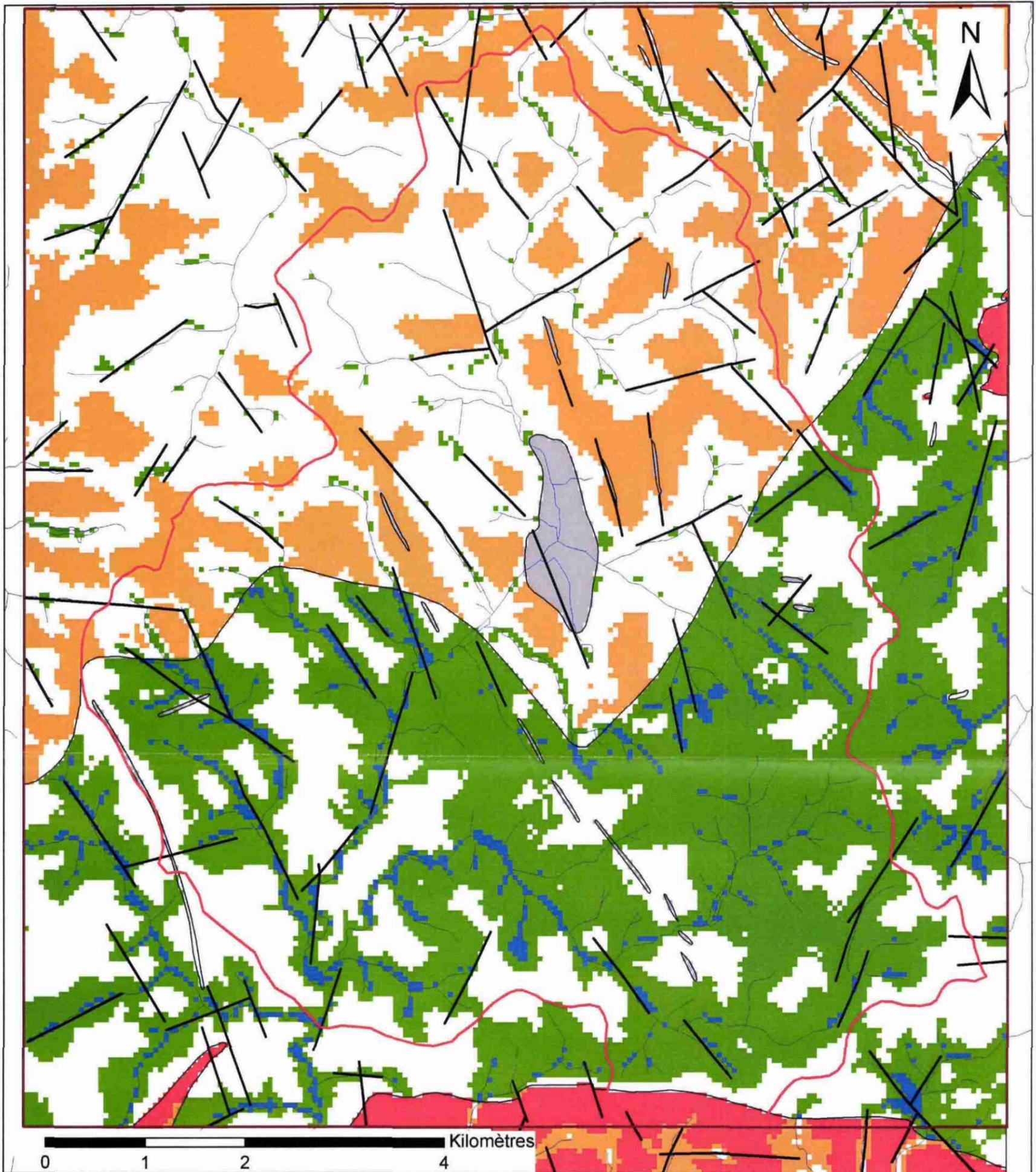
6. References

7. Appendix

8. Acknowledgements

9. Contact Information

10. Author Biographies



Légende

- Limite de l'étude
- Réseau hydrographique
- Bassin versant du Nançon
- Contours géologiques
- Failles de la carte géologique

Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (*)

- Très faible
- Faible
- Moyenne
- Forte
- Très forte
- Secteur non renseigné

(*) Cette carte a été établie en croisant l'épaisseur de la zone non saturée par la perméabilité relative des formations géologiques. Les paramètres suivant n'ont pas été pris en compte : pentes, occupation du sol, différence de perméabilité altérites-milieu fissuré.

Planche 14 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Nançon)

Annexe 3

Interpolation par la géostatistique

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.

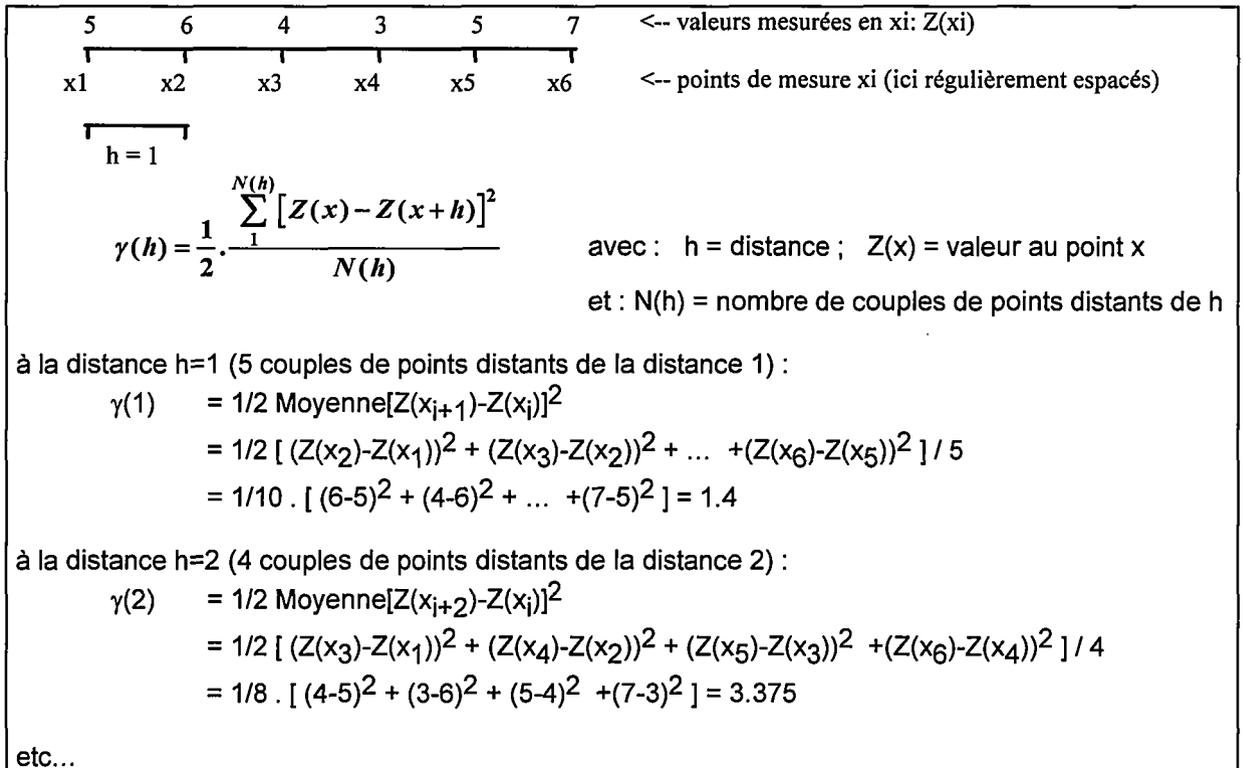
Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- 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 $Z(x_0)$ 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, 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 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.



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

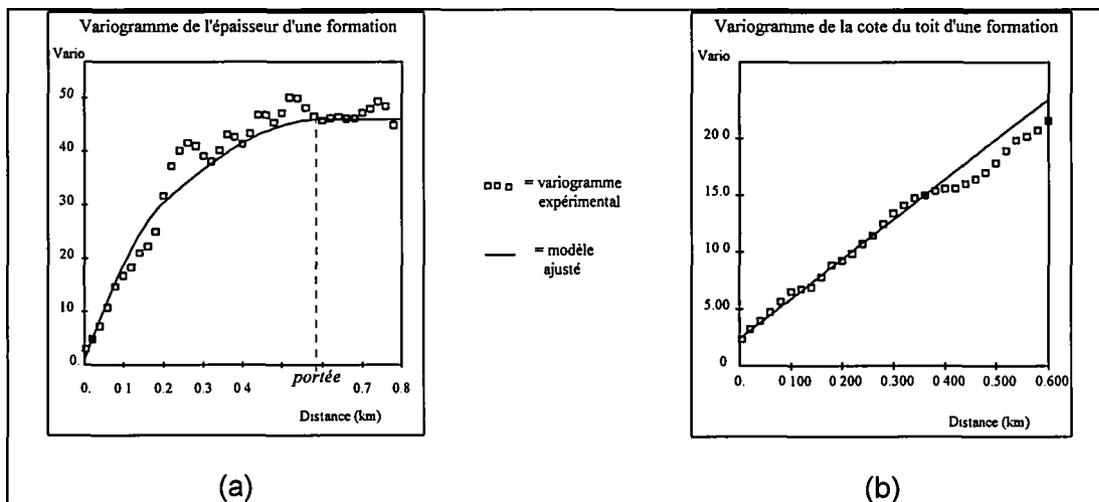


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

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

Service géologique régional Bretagne
Rennes Atalante Beaulieu
2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70