



# SILURES Bassins Versants Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22)

Rapport final - Année 2

BRGM/RP-53742-FR  
Mars 2005



**brgm**

Géosciences pour une Terre durable

# SILURES Bassins Versants Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22)

Rapport final - Année 2

BRGM/RP-53742-FR

Mars 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 2005 EAUC09

B. Mougín, E. Thomas, F. Mathieu, R. Blanchin et R. Wyns

**Mots clés :** SILURES, eaux souterraines, sondages géophysiques par Résonance Magnétique Protonique, roches altérées, milieu fissuré, cartographie, modélisation géostatistique, Côtes d'Armor, Finistère, Morbihan, Bretagne.

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

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

## Synthèse

Ce document constitue le rapport final du projet SILURES Bassins Versants. Ce projet, d'une durée de 2 ans, a été réalisé grâce à la collaboration de la Région Bretagne, des Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et du BRGM.

Le projet SILURES Bassins Versants a pour objectif de produire des documents utilisables à l'échelle des groupements de communes (échelle 1/40 000) 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.

Des secteurs d'étude ont été définis en accord avec les partenaires ; il s'agit de quatre bassins versants contrastés de part leur géologie et leur pluviométrie : bassin du Dourduff (dans le Finistère), bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche (Côtes d'Armor), bassin de l'Oust (Morbihan), et bassin de l'Yvel (Morbihan).

Sur chaque 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 45 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 volumes des réserves en eau souterraine existantes sur chaque bassin sont de :

- 8 811 589 m<sup>3</sup> sur les 28.6 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Maudouve, 1 612 839 m<sup>3</sup> sur les 6.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Noë Sèche,
- 16 971 057 m<sup>3</sup> sur les 43.9 km<sup>2</sup> du bassin versant du Dourduff,

- 11 449 738 m<sup>3</sup> sur les 53.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Yvel,
- 32 410 912 m<sup>3</sup> sur les 55 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Oust.

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 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.

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 chaque bassin. La limite d'influence des discontinuités sur les forages est limitée à un périmètre de 400 mètres.

Ces zones favorables sont situées au Centre du bassin Maudouve - Noë Sèche, au Nord et au Sud du bassin du Dourduff, au Nord du bassin de l'Yvel, et au Nord-Est du bassin de l'Oust.

La cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration, effectuée sur chaque bassin étudié, met en évidence les points suivants :

- l'ensemble du bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche n'a qu'une faible capacité d'absorption (le ruissellement est majoritaire), à l'exception des plateaux où la capacité d'absorption devient moyenne ;
- le bassin du Dourduff montre un découpage amont/aval : la partie amont a une forte capacité d'absorption des eaux d'infiltration (plateaux au Sud) et la partie aval est plus « imperméable » à ces eaux (le ruissellement devient majoritaire) ;
- l'ensemble du bassin de l'Yvel n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement peut être majoritaire), à l'exception des plateaux à l'Est du bassin où la capacité d'absorption devient moyenne ;
- le bassin de l'Oust est dans une situation où la capacité d'absorption des eaux d'infiltration oscille de faible à fort selon les formations géologiques.

Les résultats obtenus ont permis de comparer les bassins versants étudiés entre eux :

- 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 de la Noë Sèche est constitué d'une quantité d'eau souterraine faible et il se vidange très lentement. Le relargage des eaux souterraines dans la rivière doit malgré tout être progressif et continu puisque leur participation s'élève à 83% ;
- le bassin versant du Dourduff comporte une bonne quantité d'eau souterraine et il se vidange relativement bien. 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 plus vite. 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 le plus riche en eaux souterraines et il se vidange lentement. 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 %.

L'ensemble des cartes réalisées dans le cadre du projet SILURES Bassins Versants constituent un type nouveau de données utilisables :

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

## Sommaire

<b>1. Déroulement du projet.....</b>	<b>13</b>
1.1. CONTEXTE.....	13
1.2. OBJECTIF.....	14
1.3. ORGANISATION DU PROJET.....	16
1.4. RAPPEL DES RÉSULTATS ACQUIS.....	16
1.5. CONDITIONS DE RÉALISATION.....	17
<b>2. Contexte géologique et géomorphologique .....</b>	<b>19</b>
2.1. GÉOLOGIE DU SUBSTRATUM.....	19
2.2. GÉOLOGIE DE LA SURFACE ET GÉOMORPHOLOGIE .....	24
2.3. MODÈLE CONCEPTUEL DES AQUIFÈRES DE SOCLE.....	26
<b>3. Campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP).....</b>	<b>31</b>
3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	31
3.2. MÉTHODES ET MOYENS .....	33
3.3. TRAVAUX RÉALISÉS .....	43
3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES .....	47
<b>4. Modélisation géométrique des interfaces .....</b>	<b>50</b>
4.1. MÉTHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE .....	50
4.2. MODÉLISATION DE LA SURFACE PIÉZOMÉTRIQUE .....	52

4.3. MODÉLISATION DE LA BASE DES ALTÉRITES ET DE L'ÉPAISSEUR DES ALTÉRITES EN PLACE .....	58
4.4. MODÉLISATION DE LA BASE DE L'HORIZON FISSURÉ SUPÉRIEUR ET INFÉRIEUR .....	60
4.5. CALCUL DE L'ÉPAISSEUR DES HORIZONS SITUÉS EN ZONE SATURÉE .....	63
<b>5. Calcul de la réserve en eau souterraine .....</b>	<b>64</b>
5.1. SYNTHÈSE DES MESURES RMP.....	64
5.2. CALCUL DE LA CARTE DE LA RÉSERVE EN EAU SOUTERRAINE .....	72
5.3. DISCUSSION ET COMMENTAIRES.....	73
<b>6. Utilisations des cartes .....</b>	<b>76</b>
6.1. UTILISATION DES CARTES POUR LA RECHERCHE DES EAUX SOUTERRAINES EN VUE DE LEUR EXPLOITATION .....	76
6.2. UTILISATION DES CARTES POUR LA PROTECTION DES EAUX SOUTERRAINES ET DES EAUX DE SURFACE .....	83
6.3. COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS SUR LES QUATRE BASSINS VERSANTS.....	93
<b>7. Conclusion.....</b>	<b>96</b>
<b>8. Bibliographie .....</b>	<b>97</b>

## Liste des figures

Figure 1 - Localisation des bassins versants étudiés.....	15
Figure 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998).....	27
Figure 3 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité.....	28
Figure 4 - 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.....	29
Figure 5 - Principe de mesure RMP.....	34
Figure 6 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.....	34
Figure 7 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site.....	35
Figure 8 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.....	36
Figure 9 - Résultats d'inversion des données théoriques.....	38
Figure 10 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.....	40
Figure 11 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP.....	41
Figure 12 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine.....	50
Figure 13 - Principe de modélisation de la surface piézométrique.....	53
Figure 14 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de la Maudouve et la Noë Sèche).....	56
Figure 15 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Dourduff).....	56
Figure 16 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Yvel).....	57
Figure 17 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Oust).....	57
Figure 18 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne.....	78
Figure 19 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur les bassins de la Maudouve-Noë Sèche et du Dourduff.....	79
Figure 20 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur les bassins de l'Yvel et de l'Oust.....	80
Figure 21 - Localisation des bassins versants étudiés par rapport aux bassins modélisés.....	84

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP (coordonnées en Lambert II étendu).....	32
--	----

Tableau 2 - Paramètres du modèle .....	38
Tableau 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassins versants de la Maudouve et du Dourduff).....	45
Tableau 4 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassins versants de l'Yvel et de l'Oust).....	46
Tableau 5 - Répartition des mesures piézométriques.....	52
Tableau 6 - Répartition des points d'observation du contact altérites/milieu fissuré .....	58
Tableau 7 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche) .....	60
Tableau 8 - 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 Dourduff).....	61
Tableau 9 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de l'Yvel) .....	61
Tableau 10 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de l'Oust) .....	62
Tableau 11 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche) .....	65
Tableau 12 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Dourduff).....	66
Tableau 13 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Yvel) .....	67
Tableau 14 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Oust).....	67
Tableau 15 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur les bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche .....	85
Tableau 16 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Dourduff.....	85
Tableau 17 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Yvel .....	85
Tableau 18 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Oust.....	86
Tableau 19 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P .....	90
Tableau 20 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration .....	91

## 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 (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 2 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Dourduff)

Planche 3 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Yvel)

Planche 4 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Oust)

Planche 5 - Altitude de la surface piézométrique (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 6 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Dourduff)

Planche 7 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Yvel)

Planche 8 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Oust)

Planche 9 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 10 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Dourduff)

Planche 11 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Yvel)

Planche 12 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Oust)

Planche 13 - Altitude de la surface de base des altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 14 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Dourduff)

Planche 15 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Yvel)

Planche 16 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Oust)

Planche 17 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 18 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Dourduff)

Planche 19 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Yvel)

Planche 20 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Oust)

Planche 21 - Epaisseur des altérites en place (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

- Planche 22 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Dourduff)
- Planche 23 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Yvel)
- Planche 24 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Oust)
- Planche 25 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 26 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Dourduff)
- Planche 27 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Yvel)
- Planche 28 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Oust)
- Planche 29 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 30 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Dourduff)
- Planche 31 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Yvel)
- Planche 32 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Oust)
- Planche 33 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 34 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 35 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 36 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)
- Planche 37 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Dourduff)
- Planche 38 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Dourduff)
- Planche 39 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Dourduff)
- Planche 40 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Dourduff)
- Planche 41 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Yvel)
- Planche 42 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Yvel)
- Planche 43 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Yvel)
- Planche 44 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Yvel)
- Planche 45 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Oust)
- Planche 46 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Oust)
- Planche 47 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Oust)
- Planche 48 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Oust)

Planche 49 - Lamé d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 50 - Lamé d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin du Dourduff)

Planche 51 - Lamé d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin de l'Yvel)

Planche 52 - Lamé d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin de l'Oust)

Planche 53 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

Planche 54 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Dourduff)

Planche 55 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Yvel)

Planche 56 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Oust)

# 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 tel que la Bretagne, la prise en compte de la variabilité spatiale des caractéristiques du sous-sol et des paramètres qui régissent l'emmagasinement et l'écoulement des eaux souterraines reste difficile.

Des données existent (forages recensés, 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 le Conseil Régional Bretagne, les Conseils Généraux du Morbihan, du Finistère et des Côtes d'Armor, l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, la Direction Régionale de l'Environnement Bretagne.

Le programme 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 va concevoir un réseau de surveillance pour palier au manque de données fiables concernant l'amplitude des fluctuations saisonnières des différentes entités aquifères du territoire breton, et ainsi anticiper certaines mesures et avoir une meilleure appréciation de la réserve.

Le présent rapport détaille les résultats obtenus à l'issue du projet SILURES Bassins versants.

## 1.2. OBJECTIF

Le projet SILURES Bassins Versants 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 à quatre bassins versants bretons d'une superficie d'environ 50 km<sup>2</sup> (cf. figure 1) dans des contextes géologiques variés :

- Département du Finistère :
  - ① à l'Est de Morlaix, le bassin du Dourduff, de sa source jusqu'à la station hydrométrique de Garlan, d'une superficie d'environ 45 km<sup>2</sup>, en domaine métamorphique complexe ;
- Département des Côtes d'Armor :
  - ② au Sud-Ouest de St-Brieuc, le bassin est divisé en deux parties :
    - le bassin versant de la Maudouve, de sa source jusqu'à sa confluence avec le Gouët, d'une superficie d'environ 30 km<sup>2</sup>, en domaine magmatique,
    - le bassin versant de la Noë Sèche de sa source jusqu'à sa confluence avec le Gouët, d'une superficie d'environ 10 km<sup>2</sup>, en domaine magmatique ;
- Département du Morbihan :
  - ③ à l'Est de Pontivy, le bassin de l'Oust, de la confluence avec le ruisseau du Larhon (amont) à la confluence avec la rivière Lié (aval), d'une superficie d'environ 55 km<sup>2</sup>, en domaine métasédimentaire ;
  - ④ au Nord de Ploërmel, le bassin de l'Yvel, de sa confluence avec le Doueff et le Rézo (amont) jusqu'à la station hydrométrique de Loyat (aval), d'une superficie d'environ 54 km<sup>2</sup>, en domaine métasédimentaire.

Le volet SILURES Bassins versants 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.

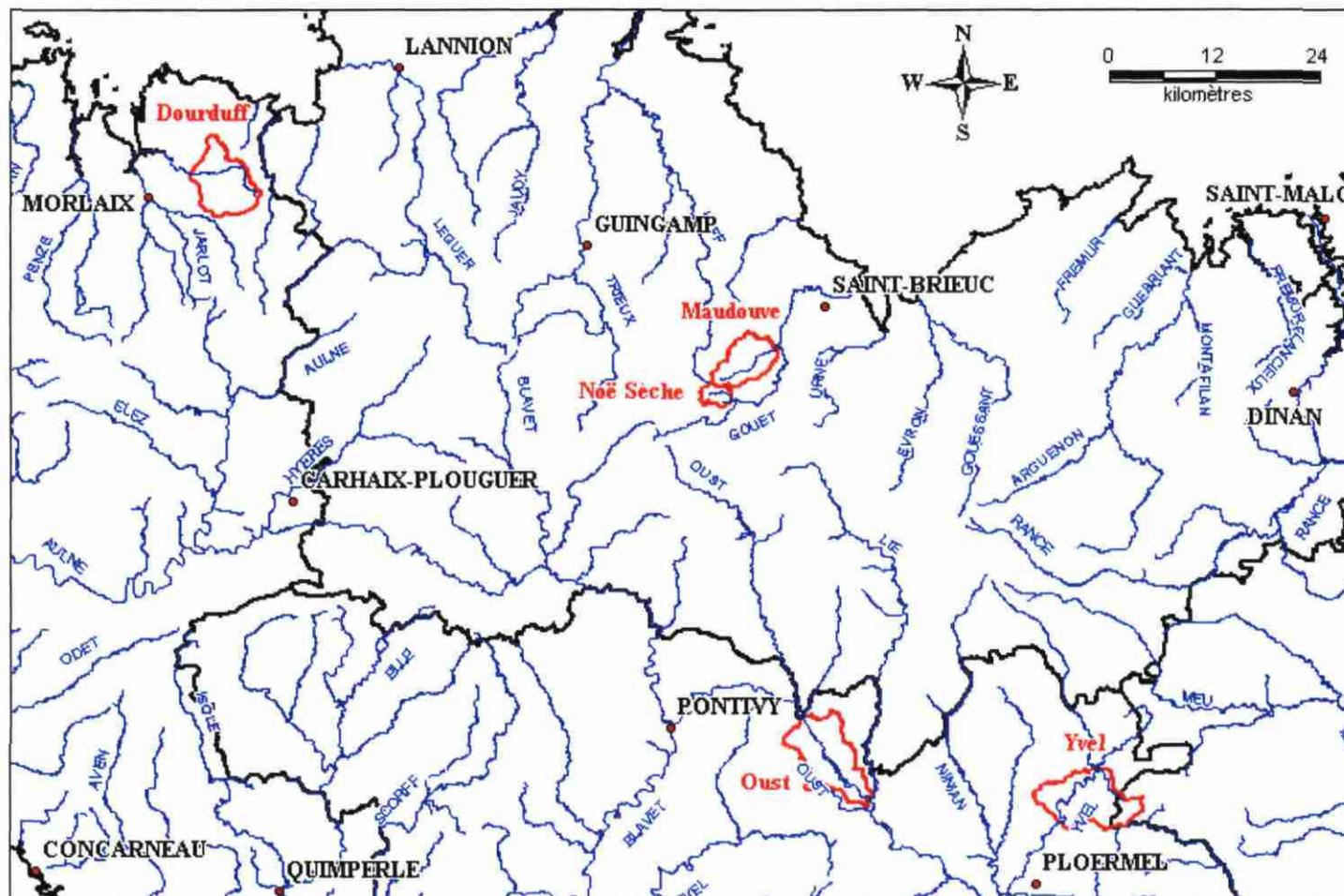


Figure 1 - Localisation des bassins versants étudiés

### 1.3. ORGANISATION DU PROJET

Initialement, il était prévu que le projet SILURES Bassins versants se déroule sur les deux années 2002-2003 :

- la première année étant entièrement dédiée au travail de terrain : cartographie des formations superficielles, réalisation de sondages mécaniques sur les quatre bassins et réalisation de sondages géophysiques sur deux bassins versants,
- la deuxième année étant consacrée à la fin des sondages géophysiques (deux autres bassins) puis à la création et à l'édition des documents de synthèse.

En raison de la sollicitation de fonds FEDER et de la non sanctuarisation du projet, celui-ci a pris un an de retard et il s'est achevé fin 2004 début 2005.

### 1.4. RAPPEL DES RÉSULTATS ACQUIS

Dans le cadre de ce projet, un rapport d'avancement en fin de première année a été remis en novembre 2002 : rapport BRGM/RP-51891-FR. Ce rapport détaille le travail accompli sur chaque bassin : cartographie des formations superficielles (à 1/25 000), réalisation de 89 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 aux débits des rivières).

La valorisation des données de forages du projet SILURES Bretagne ont montré que :

- le bassin du Dourduff (en domaine métamorphique) présente des formations plus perméables au Sud, par rapport à celles du Nord et du Centre ;
- sur les bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche, le secteur aval est peu perméable (granitoïdes) et le secteur amont un peu plus conducteur (granites) ;
- le bassin de l'Oust est constitué d'alternances de formations briovériennes assez perméables localement et de formations briovériennes peu perméables ailleurs ;
- les formations du bassin de l'Yvel semblent être moyennement perméables, à l'exception des siltites rouges moins conductrices à l'Est du bassin.

Les résultats des modélisations SILURES Bretagne ont indiqué que les eaux souterraines alimentent les cours d'eau à hauteur : d'un peu moins de 50 % pour les bassins de l'Oust (49.5 %) et de l'Yvel (47 %), de 59 % pour le bassin du Dourduff, et d'environ 80 % pour les bassins de la Maudouve (78 %) et de la Noë Sèche (83 %).

La cartographie des formations superficielles ainsi que la réalisation des sondages mécaniques ont permis d'observer la répartition des altérites sur les quatre bassins : sur le bassin de l'Yvel les altérites sont rares (érosion, décapage...) par rapport aux trois autres bassins versants où la plus grande partie des secteurs est recouverte par des formations d'altération.

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 de synthèse présente, pour chaque bassin, l'ensemble des cartes réalisées et détaille les résultats et conclusions obtenus.

## 1.5. CONDITIONS DE RÉALISATION

Afin de réaliser un modèle géométrique des aquifères de socle et de la surface piézométrique sur chacun des 4 bassins versants, 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 31 points (5 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 20 sur le Dourduff, 0 sur l'Yvel et 6 sur l'Oust), et l'altitude de la surface piézométrique sur 132 points (56 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 19 sur le Dourduff, 19 sur l'Yvel et 38 sur l'Oust).

Les données provenant des sondages mécaniques à la tarière ont fourni l'altitude du contact altérites/milieu fissuré sur 36 points (12 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 11 sur le Dourduff, 1 sur l'Yvel et 12 sur l'Oust), et l'altitude de la surface piézométrique sur 56 points (11 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 12 sur le Dourduff, 8 sur l'Yvel et 25 sur l'Oust).

Elles ont été complétées par les levés de terrain (janvier et avril 2002) destinés à déterminer l'altitude de la base des altérites sur chacun des 4 bassins versants ; les observations d'affleurements sur le terrain ont permis d'ajouter 1272 points de calage supplémentaires (571 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 161 sur le Dourduff, 300 sur l'Yvel et 240 sur l'Oust) du contact altérites/milieu fissuré aux données de forages et sondages (cf. chapitre 4.3.).

45 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés (24 RMP en octobre et novembre 2002, puis 21 RMP en janvier 2003) sur les 4 bassins versants avec la répartition suivante : 12 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 12 sur le Dourduff, 10 sur l'Yvel et 11 sur l'Oust.

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

La modélisation spatiale de la géométrie des aquifères, de la piézométrie et de la lame d'eau stockée a été réalisée dans l'environnement ArcView version 3.2. 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. Le tracé du réseau hydrographique pérenne est issu de la BD Carthage (version 2.4 de juin 2000).

Les cartes remises dans ce rapport sont représentées sur des pages A3 à l'échelle du 1/40 000.

Ce rapport fait l'état d'avancement de la 2<sup>ème</sup> 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. GÉOLOGIE DU SUBSTRATUM

#### ***Bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche (cf. planche 1 en annexe 2)***

Les deux bassins versants sont caractérisés par des formations magmatiques. Il s'agit du granite de Quintin, des migmatites de Guingamp et des granitoïdes de Ploufragan. Dans le détail, le granite de Quintin peut être subdivisé en trois sous-ensembles : un granite porphyroïde à biotite, un monzogranite isogranulaire à biotite et un granite à grain moyen à fin de teinte claire. Les migmatites de Guingamp et les granitoïdes de Ploufragan sont, sur le secteur étudié, de composition homogène.

Le bassin de la Noë Sèche est localisé entièrement sur des terrains granitiques (granite clair au Nord et granite porphyroïde de Quintin au Sud). Le bassin de la Maudouve a une géologie légèrement plus contrastée avec dans ses parties centrale et Sud des granites (granite porphyroïde de Quintin au centre, granite clair plus au Sud, et monzogranite à biotite au Sud) et dans sa partie Nord les migmatites de Guingamp, et les granitoïdes de Ploufragan au Nord-Est.

Les formations magmatiques peuvent être décrites de la façon suivante :

- Le Massif granitique de Quintin est un massif intrusif hercynien ( $291 \pm 9$  Ma). Il recoupe, en les affectant localement par métamorphisme de contact, les migmatites de Guingamp et les granitoïdes de Ploufragan. Ce granite peut être bien observé aux bourg de Plaine-Haute ainsi que dans la partie sud de la ville de Quintin. Ailleurs, il présente des arénisations en sables grossiers, localement plus argileux au sommet. Des différences apparaissent dans la granulométrie des arènes en fonction du faciès considéré (porphyroïde, isogranulaire à grain fin, ou granite clair). Des analyses, effectuées lors du levé de la feuille Guingamp montrent que ces arènes sont caractérisées entre autres par la présence d'interstratifiés irréguliers de type chlorite-vermiculite avec peu de vermiculite et par une faible quantité d'illite et de kaolinite désordonnée. Ces arènes se répartissent principalement sur les hauts topographiques (ici entre 170 et 185 mètres environ) et ont été très largement érodées sur les flancs des vallées du Gouët et de la Maudouve. Les pointements rocheux (zone fissurée) au sein des ensembles altérés sont fréquents, ils constituent les zones hautes du granite de Quintin, jusqu'à 210 m à la Ville Neuve, St-Catherine ou Kergrois ;
- Les migmatites de Guingamp sont des roches rubanées constituées d'alternances millimétriques à centimétriques de niveau clair quartzo-feldspathiques et de niveaux sombres à biotites dérivant vraisemblablement de la fusion partielle de grauwackes. Un âge cadomien est généralement admis puisqu'elles sont cornéifiées (métamorphisme de contact) par les granitoïdes de la Formation de Ploufragan dont l'âge est voisin de 530 Ma. Ces roches sont particulièrement bien observables dans la vallée de la Maudouve, à la jonction avec le Gouët, ainsi que

dans le bourg de St-Donan. Ailleurs, les migmatites de Guingamp sont progressivement (zone intermédiaire) transformées en un sable à grain moyen (arènes), localement argileux. Les arènes sont présentes à plusieurs altitudes : un niveau bien caractérisé aux alentours de 190-200 m au nord de St-Donan et au nord de Plaine-Haute et un niveau vers 150-160 m au sud de St-Donan ; les deux niveaux étant localement en continuité ;

- La formation de Ploufragan est constituée de granitoïdes et de migmatites dont l'aspect macroscopique est très voisin de celui des migmatites de Guingamp. Ce sont des roches à grain fin qui présentent des alternances formant soit des rubans soit des amas ou traînées à contours plus ou moins diffus de niveaux sombres biotitiques et de niveaux clairs quartzo-feldspathiques. Ces roches renferment régulièrement des rognons de quartz gris clair dont la présence permet une distinction d'avec les migmatites de Guingamp. La Formation de Ploufragan est circonscrite à la partie nord-est de la zone d'étude. Ce secteur n'est pas représentatif du caractère sain ou altéré de la Formation puisqu'elle affleure très largement à la confluence de la Maudouve et du Gouët, à la faveur de l'incision relativement profonde des vallées. Les roches qui composent cet ensemble (excepté les filons doléritiques) s'altèrent en une arène sablo-argileuse sombre, fine à moyennement grossière à la base évoluant au sommet vers des niveaux franchement argileux, de couleur ocre-clair à blanchâtre.

### ***Bassin versant du Dourduff (cf. planche 2 en annexe 2)***

Le bassin versant amont du Dourduff est localisé sur un domaine métamorphique complexe. On distingue des roches sédimentaires, des roches volcano-sédimentaires, de nombreuses manifestations magmatiques (gabbros, granites) et des formations métamorphiques (amphibolites).

Le bassin du Dourduff a le contexte géologique le plus varié des bassins étudiés, avec du Nord au Sud : les gabbros de Saint-Jean, les laves et tufs de l'Armorique, la Formation de Garlan (schistes, arkoses, quartzites), les schistes et quartzites de Plouigneau. Dans ce bassin se trouvent également des intrusions d'amphibolites Paléozoïques et des granites de Coat-Lescoat au Sud-Est et du Runiou au Nord-Ouest.

Les formations géologiques peuvent être rassemblées en trois ensembles :

#### 1) Les roches d'origine sédimentaire, volcano-sédimentaire et volcanique

- Les formations paléozoïques sédimentaires forment l'essentiel de la partie méridionale du plateau de Plouigneau (Sud du bassin). Il s'agit principalement de séries siluro-dévonniennes. Ces formations se présentent comme des alternances schisteuses et quartzitiques. Elles ne sont quasiment pas observables dans un état non altéré, excepté pour les quartzites au nord-est de Plouigneau. Ailleurs, ces formations ne se présentent que sous leurs faciès d'altération : formations argileuses, souvent sombres ou grises. En bordure de vallée, les altérites ont souvent été déplacées le long des versants en des dépôts épais qui masquent généralement la transition entre les altérites et la roche saine.

- Les formations briovériennes se localisent entre les formations paléozoïques au Sud et les formations gabbroïques au Nord du bassin. Elles sont de natures variées :
  - sédimentaires pour une partie de la Formation de Garlan (schistes grésopélitiques) et une partie de la Formation du Bois de la Roche (siltites noires),
  - volcanosédimentaires pour une autre partie de la Formation de Garlan (grès volcanoclastiques), et une partie de la Formation du Bois de la Roche (grès et tufs),
  - et nettement volcaniques pour la Formation de l'Armorique (laves et tufs).

Ces roches ne se présentent dans un état non altéré qu'aux abords immédiats du Dourduff. Sur le plateau, elles sont altérées en des complexes argileux s'enrichissant localement en sables (grès). Des plaquettes des schistes ou des fragments de quartzites ou de grès sont parfois identifiables au sein des altérites.

## 2) Les roches d'origine magmatique

- Les formations des gabbros occupent la partie nord du bassin étudié. Elles font partie de l'ensemble gabbroïque des « Gabbros de St-Jean » qui présente des faciès variés allant localement jusqu'à des faciès à gros grain ou des faciès de mélange gabbro-granite. Ces gabbros se présentent généralement sous leur forme altérée et les affleurements de roches saines sont rares. Les gabbros sont des roches sombres, vertes, composées dans leurs parties originelles, par de l'augite, du labrador et accessoirement de la biotite, de la hornblende brune... Ces formations basiques ou acido-basiques sont généralement représentées par leur faciès altéré qui est très varié.
- Les formations granitiques sont faiblement représentées sur le domaine étudié. Dans le nord-ouest du secteur étudié se localise la terminaison orientale du granite du Runiou qui jalonne la bordure sud du massif gabbroïque de St-Jean. Il s'agit d'une roche grenue à quartz et feldspaths potassiques, albite et oligoclase. La roche est généralement intensément déformée voire mylonitisée. Ce granite affleure extrêmement mal sur le secteur d'étude. Au nord du Bois de la Roche, seuls quelques rares affleurements peuvent être observés au niveau de la rupture de pente. Ailleurs, le granite est soit recouvert de formations de pente, soit altéré en une arène grossière de couleur claire.
- Le granite le mieux représenté est un petit corps granitique localisé au nord-est de Plouigneau appelé granite de Coat-Lescoat. Il s'agit d'un granite monzonitique porphyroïde qui ne s'observe à l'état non altéré que dans la petite combe qui descend vers la vallée du Douron, au sud du Château d'Encremer. Ailleurs, sur le plateau, le granite sain n'est pas visible. Des travaux récents d'aménagement routier au sud du hameau de Coat-Lescoat et une ancienne carrière de nouveau exploitée immédiatement à l'ouest du hameau montrent une arène de couleur ocre-blanche, très rarement argileuse.

## 3) Les roches métamorphiques

- Deux bandes amphibolitiques encadrent au nord et au sud le granite de Coat-Lescoat. Elles font partie des roches volcano-plutoniques basiques du petit

Trégor et se rattachent aux amphibolites de Barnévez. Une autre petite bande jalonne le sud du complexe gabbroïque de St-Jean, à l'est du Bois de la Roche. Cette petite bande se rattache aux amphibolites de Plestin. Ce sont des roches de couleur sombre, verdâtres le plus souvent. Les amphibolites ne sont visibles dans un état non altéré que très localement, en bordure des petites vallées qui descendent vers le Dourduff. Ailleurs, elles sont représentées par une arène à grain moyen, sombre.

### ***Bassin versant de l'Yvel (cf. planche 3 en annexe 2)***

Le bassin versant de l'Yvel est constitué de terrains sédimentaires protérozoïques et paléozoïques. Les sédiments protérozoïques font partie de l'ensemble du « Briovérien de Bretagne centrale ». Les sédiments paléozoïques constituent ici la terminaison de plis de faible amplitude mais de longueur d'onde plurihectométrique à kilométrique connus régionalement sous le nom des « synclinaux du Sud de Rennes ».

Le bassin de l'Yvel est localisé majoritairement sur des alternances de schistes et grès briovériens. A l'Est du bassin, le substratum est représenté par les siltites rouges Paléozoïque et par la Formation du Grès armoricain.

Les formations sont rassemblées dans deux ensembles d'âge différent :

#### **1) Le Briovérien**

- Alternances silto-gréseuses de Néant-sur-Yvel : à l'affleurement, ce faciès se présente sous forme d'alternances de bancs millimétriques d'argilites grises homogènes présentant un débit caractéristique en « baïonnette » ou « prismatique » avec des bancs de siltites fines rubanées et des bancs de grès moyens à grossiers. Les grès sont riches en quartz et contiennent quelques grains de phtanite et de rares fragments lithiques de roches sédimentaires et de roches métasédimentaires. Les minéraux accessoires sont essentiellement l'albite et l'oligoclase et quelques micas (muscovite et biotite). Les siltites fines, riches en quartz, présentent des passées plus grossières qui soulignent la stratification où l'on observe également l'abondance de micas.
- Alternances silto-gréseuses à siltites dominantes : ce faciès, constitué d'alternances de niveaux argilo-silteux et de niveaux gréseux, est caractérisé par un rapport argilite/grès élevé (>1). Les bancs de grès sont relativement fréquents mais d'épaisseur généralement inférieure à la dizaine de centimètres. A l'échelle de l'affleurement, les bancs sont subparallèles, d'épaisseur constante et les contacts en base et sommet de bancs sont nets.
- Alternances silto-gréseuses à grès dominants : il s'agit de l'association de faciès la plus répandue sur la zone cartographiée. Celle-ci, qui se marque particulièrement bien dans la topographie, se caractérise par l'abondance des niveaux métriques ou plurimétriques de grès grossiers mal classés. Par opposition à l'ensemble b2S, l'association de faciès b2G se caractérise par un rapport argilite/grès faible (<1). Les grès sont majoritairement massifs, homogènes et sans structures.
- Altérites du Briovérien : les isaltérites sur Briovérien silto-gréseux correspondent à une roche verdâtre, à structures conservées (stratification et

schistosité encore visibles), partiellement transformée en argiles de couleur blanche à ocre (kaolinite, chlorite, argiles micacées, illite) pour les niveaux fins et en sables et argiles plus ou moins consolidés pour les niveaux les plus gréseux. Le passage entre les isaltérites et le socle sain est très graduel et se matérialise par une zone de socle très fracturé où les plaquettes de schistes et les fragments gréseux sont emballés dans une matrice argileuse, localement plus sableuse.

- Conglomérats : ils sont bien représentés sur le secteur cartographié. Bien que ces conglomérats soient très rarement observés à l'affleurement de nombreuses « pierres volantes », ils marquent leur présence et permettent ainsi une cartographie assez précise. Ces conglomérats ont été observés de façon récurrente et « arment » généralement les hauts topographiques. Les éléments de ces conglomérats sont constitués de quartz blancs souvent arrondis, de quartz noirs, de phtanite et localement de grès. Les isaltérites développées sur les conglomérats se caractérisent par ensemble à galets plus ou moins jointifs, mais désolidarisées par rapport au faciès sain et par une pâte argileuse constituée de kaolinite dominante, associée à de l'illite et localement de la chlorite. Ces isaltérites se rencontrent rarement à l'affleurement et se distinguent généralement à la surface des champs par d'abondants galets de quartz arrondis emballés dans une argile blanche à ocre.

## 2) Le Paléozoïque

- Arénig inférieur - Formation de Pont-Réan : les siltites micacées pourpres également appelées « Série Rouges » sont grossières, à classement granulométrique variable, à quartz (parfois d'origine volcanique) anguleux ou arrondis, fragments de quartzites, micas blancs, zircons, tourmalines et minéraux opaques. La matrice recristallisée est constituée de quartz, de muscovite, de chlorite et de séricite. Leur couleur lie de vin typique est liée à la présence d'un pigment d'hématite. Les isaltérites sur siltites paléozoïques sont rares. Elles se limitent à quelques petits affleurements. Localement, des indices (« terre rouge » argileuse, absence d'affleurement) témoignent en faveur de la présence d'altérites mais elles n'ont, dans le secteur concerné, jamais pu être observées directement.
- Arénig moyen - Formation du Grès armoricain : la Formation du Grès armoricain est constituée d'alternances de grès quartzitiques et de psammites. Les grès sont visibles sur les hauteurs de la Forêt de Paimpont. Malgré la rareté et le mauvais état des affleurements, le Grès armoricain peut être décrit comme une succession de bancs décimétriques à métriques de grès et de quartzites fins, à matrice réduite. Ces grès et quartzites sont composés de grains de quartz, de grains lithiques, et de micas de type muscovite. Les interbancs sont formés par des lits centimétriques de psammites blanchâtres. La Formation du Grès armoricain est largement affectée par les phénomènes d'altération si bien qu'elle se présente rarement sous sa forme saine. Les altérites présentent un faciès caractéristique : ce sont des argiles blanches (kaolinite) qui emballent de nombreux blocs de grès quartzites anguleux issus du Grès armoricain sous-jacent.

### ***Bassin versant de l'Oust (cf. planche 4 en annexe 2)***

Le bassin versant de l'Oust est caractérisé par des formations métasédimentaires de Centre Bretagne dans la région du Rohan.

Le bassin de l'Oust a le contexte géologique le plus homogène des bassins retenus : il est constitué uniquement de schistes et grès briovériens.

La description des terrains reconnus sur ce secteur ne sera pas reprise intégralement car ces derniers correspondent aux terrains briovériens décrits pour le bassin versant de l'Yvel.

Pour les roches de socle, il a été possible de distinguer au sein du Briovérien trois ensembles :

- des pélites fines et homogènes dont la couleur varie du gris clair au noir. Les grès sont très minoritaires dans cet ensemble et sont généralement représentés par des grès à grain fin en bancs millimétriques à centimétriques ;
- des alternances de pélites fines, localement plus sableuses et de grès verts grossiers (comparable à la formation de l'Yvel). Les grès sont minoritaires (rapport pélites/grès <1) et les bancs ne dépassent que rarement le mètre de puissance ;
- des alternances de bancs de grès et de bancs d'un assemblage silto-argileux et peut être comparé à celui rencontré au voisinage de l'Yvel. Les grès francs sont majoritaires et les épaisseurs des bancs peuvent dépasser le mètre.

Les altérites sont en revanche beaucoup plus présentes que dans le secteur de l'Yvel. Excepté aux abords immédiats de la vallée de l'Oust et à proximité de la confluence de l'Oust et du Lié, le domaine, au dessus d'une côte moyenne de 100 m est recouvert par les formations issues de l'altération météorique des sédiments du Briovérien. Localement, la côte s'abaisse jusqu'à atteindre celle des cours d'eau (rives de l'Oust et du Lié) ; il ne s'agit plus ici d'altérites en place mais de formations issues du démantèlement du manteau d'altérites (solifluxion). Les altérites sont présentes sur toutes les formations du briovérien. Elles nappent les interfluves de façon assez homogène. Seul des pointements rocheux situés à la Croix Jégou, à l'ouest de Rohan et à la Ville Au Vent à l'est de St-Samson semblent s'individualiser. Ces altérites sont des roches meubles très argileuses pour les deux premiers ensembles et sablo-argileuses ocres pour l'ensemble plus gréseux.

## **2.2. GÉOLOGIE DE LA SURFACE ET GÉOMORPHOLOGIE**

### ***Bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche***

Les deux bassins versants sont situés sur un large plateau incliné du Sud-Ouest vers le Nord-Est ; ce plateau est incisé par la Maudouve et nettement plus par le Gouët. La Noë Sèche entaille très peu ce plateau au Sud-Ouest de la zone d'étude.

La cartographie de l'altitude de la base des altérites montre qu'elle suit régionalement la même logique que la topographie du secteur en s'inclinant du Sud-Ouest (altitude

260 m) vers le Nord-Est (130 m). Une faille d'orientation N30-50 située sur le bassin de la Maudouve a décalé la base du profil d'altération de 5 à 10 mètres. Localement, des buttes isolées de granite et granitoïde non altéré réapparaissent au sein des domaines altérés. Ces secteurs ont été pris en compte lors de la modélisation de la base des altérites.

### ***Bassin versant du Dourduff***

Le bassin versant du Dourduff se présente comme une succession du sud vers le nord de deux plateaux inclinés vers le nord séparés par une rupture de pente relativement marquée au pied de laquelle s'est installé le lit du fleuve. Le secteur correspond à la prolongation orientale du plateau du Léon : plateau incliné doucement du sud vers le nord, localement profondément entaillé par les vallées des fleuves côtiers (Abers, Horn, Dourduff...).

La cartographie des altérites montre que leur base s'étire de 75 m d'altitude environ à 170 m d'altitude au Sud du bassin versant mais avec une complexité relativement importante. Trois niveaux à transitions brutales sont mis en évidence, ce qui permet de conclure soit à des décalages (effondrements) par des failles difficilement distinguables sur le terrain (Sud-Est du bassin), soit à des discontinuités lithologiques majeures (contact Formation de l'Armorique et Formation de Garlan). Ces décalages sont postérieurs au développement des altérites que l'on situe ici, comme ailleurs en Bretagne, au Tertiaire. Les failles mises en évidence sont orientées selon deux directions : N60-70 et N140-150.

### ***Bassin versant de l'Yvel***

Le canevas géomorphologique de la région de l'Yvel montre deux morphologies distinctes séparées par le contact géologique parfois faillé Paléozoïque-Briovérien. La première morphologie correspond à celle d'un plateau situé à l'Ouest du bassin assez largement incisé par l'Yvel et ses affluents. A l'Est, les séries paléozoïques offrent des étagements successifs jusqu'à des lambeaux de plateaux sommitaux constitués par les reliques de la formation du Grès armoricain. La cartographie des altérites a été représentée de part et d'autre d'une discontinuité lithologique majeure d'orientation moyenne N30-40 (contact Formation de Pont-Réan et formations du Briovérien).

A l'Est de cette discontinuité l'altitude de la base des altérites décroît rapidement de 260 m (Est du bassin sur les grès armoricains) jusqu'à 100 m à proximité du contact ; les altérites en place occupent le plateau à partir d'une altitude de 225 m. A l'Ouest de la discontinuité lithologique, la base des altérites est inclinée du Nord-Est vers le Sud-Ouest (de 100 à 70 m) ; les altérites affleurent uniquement sur les buttes topographiques au Centre (à partir de 95-100 m), au Sud (90 m) et surtout au Nord-Est du bassin (80 voir 100 m).

### ***Bassin versant de l'Oust***

Le canevas géomorphologique de la région de l'Oust est relativement simple. La vallée de l'Oust est une vallée assez large ; l'incision des plateaux par le réseau hydrographique est marquée. Les flancs des vallées s'organisent en vastes glacis inclinés vers le cours d'eau où ont glissé et se sont accumulés les produits de démantèlement des altérites.

Les altérites en place occupent les plateaux à partir d'altitudes fluctuant autour de 105-110 m à l'Ouest du bassin, et autour de 95-100 m au Nord-Est du bassin. Une faille d'orientation N130-140 située dans la moitié Sud du bassin a décalé la base du profil d'altération de 5 à 10 mètres.

### **2.3. MODÈLE CONCEPTUEL DES AQUIFÈRES DE SOCLE**

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

La fracturation d'origine tectonique favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes 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 fracture d'origine tectonique permettant la circulation de l'eau ont constitué, par la multiplication des surfaces de contact entre eau et roche, des lieux privilégiés où l'action de l'altération a été décuplée. Cette addition de phénomènes (fracturation tectonique, altération et fissuration) a particulièrement fragilisé les lieux où elle s'appliquait, conduisant à la formation de couloirs fracturés et fissurés où l'altération a pénétré plus profondément. Ces couloirs constituent des drains privilégiés pour l'eau souterraine, alimentés par les horizons altérés et fissurés plus superficiels. Comme ils constituent des zones de faiblesse, ils ont été fréquemment empruntés par l'érosion lors du creusement des vallées, et se présentent dans le paysage actuel sous la forme de dépressions allongées gouvernant souvent les écoulements visibles en surface (thalwegs, vallées).

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

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

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

Un nouveau modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré a été élaboré ces dernières années, dans le cadre de projets de Recherche du BRGM. Il est représenté de manière schématique sur la figure 2.

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 la figure 2) ;
- 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.

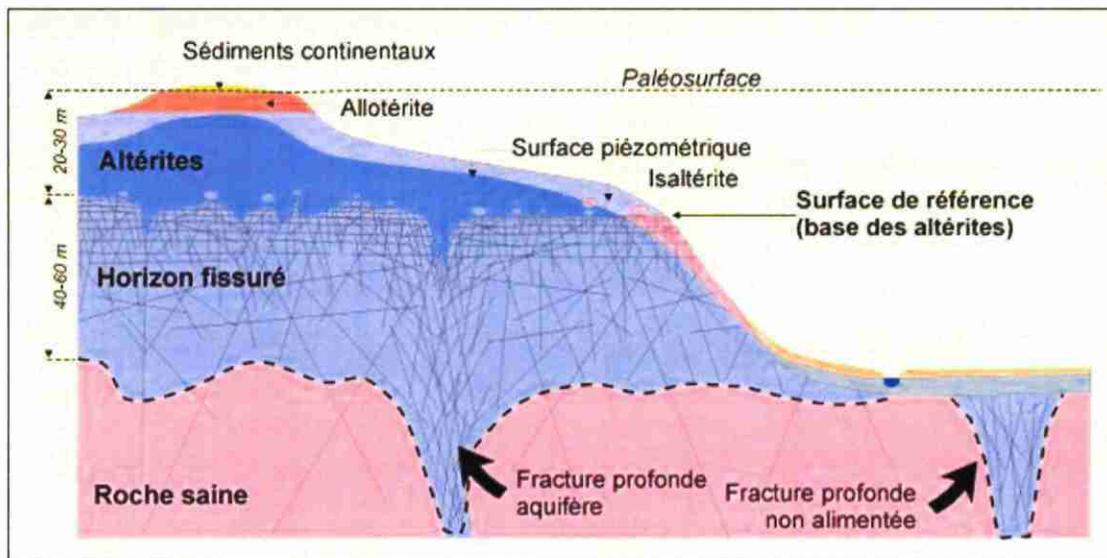


Figure 2 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

- isaltérites (plusieurs dizaines de mètres) : altérite isovolumique où la texture de la roche initiale est préservée. Les éléments chimiques évacués par dissolution sont remplacés par des vides. Il en résulte une porosité importante, permettant à cet horizon de jouer un rôle capacitif vis à vis des eaux d'infiltration. En contexte

schisteux, cet horizon, à dominante silto-argileuse, est faiblement perméable bien que très poreux. En contexte granitique, il correspond à une arène sableuse beaucoup plus perméable. A la base des isaltérites se rencontrent fréquemment des boules granitiques résiduelles, de diamètre souvent plurimétrique. Lorsqu'elles sont en place, elles sont en général isolées dans leur matrice d'arène. Lorsque les arènes ont été évacuées par l'érosion, les boules deviennent affleurantes et peuvent être plus ou moins remaniées sur les versants par gravité.

- zone fissurée (40 à 70 m) : cet horizon, situé dans la partie supérieure du substratum, est caractérisé par une très forte fissuration (figure 3) 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.

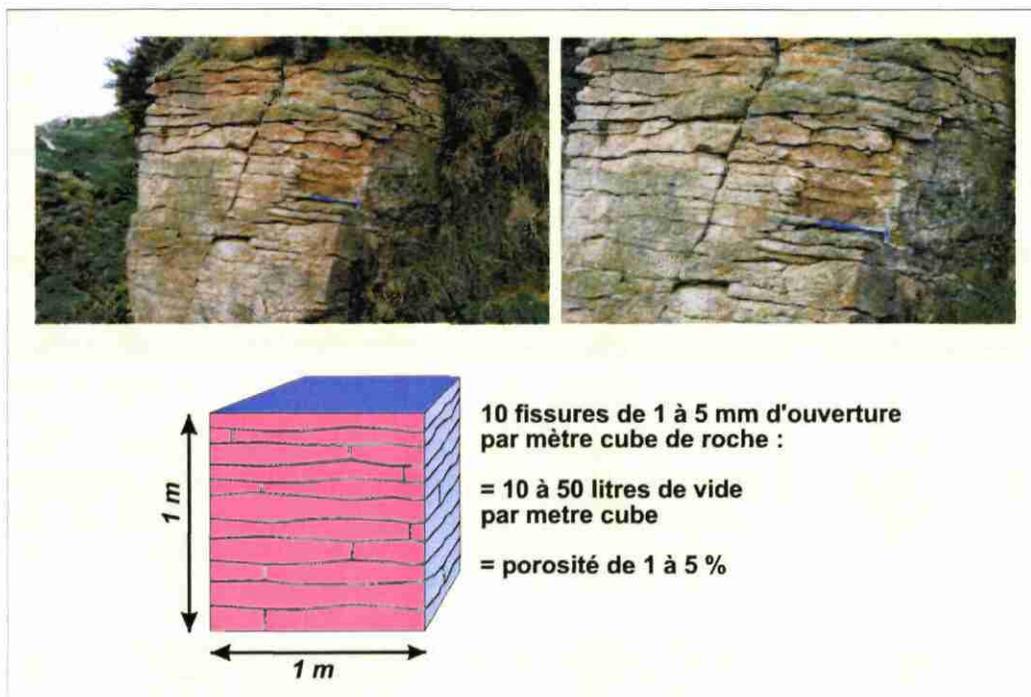


Figure 3 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

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

Lorsque la roche-mère est isotrope (cas des granites), cet horizon est caractérisé par une fissuration horizontale caractéristique (figure 3). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la

dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur ( $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ ) sont horizontales, tandis que la composante minimale ( $\sigma_3$ ) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

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

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

Ainsi, dans le Finistère nord, une étude précédente (Wyns et al., 2004) a montré que 80% de la réserve en eau souterraine était contenue dans l'horizon fissuré. En Corée, Les données de forage montrent que l'essentiel de la productivité des forages est fourni par l'horizon fissuré (50 à 100 premiers mètres sous la base des altérites) (cf. figure 4).

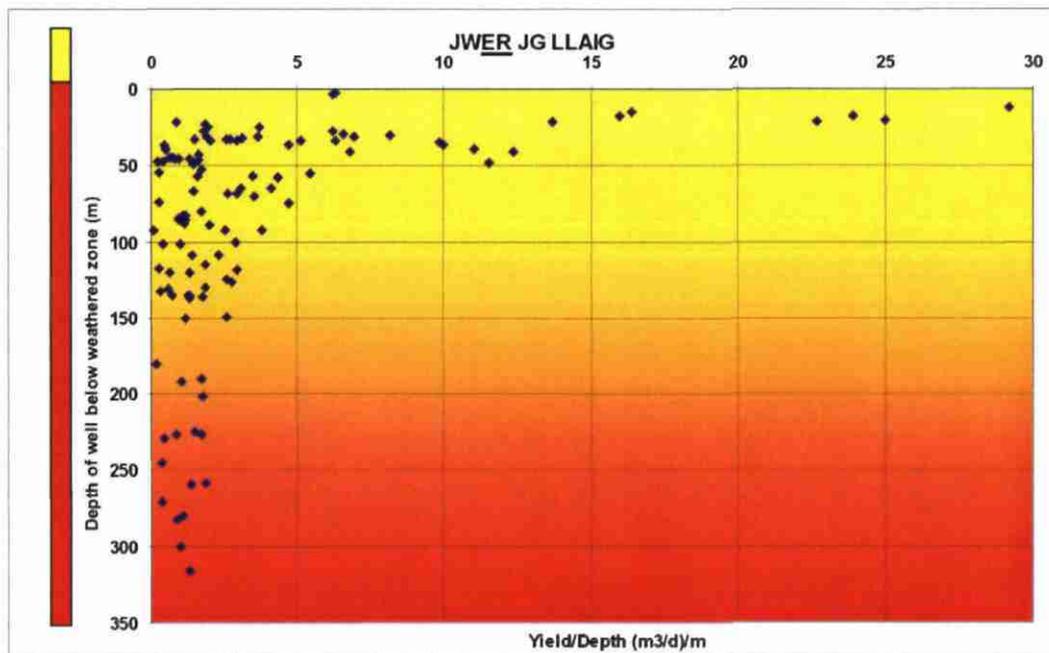


Figure 4 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

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

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

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

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

A la demande du BRGM Bretagne et dans le cadre du projet SILURES Bassins Versants, une reconnaissance géophysique par sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) a été effectuée par l'unité ARN/MRS du BRGM sur les 4 bassins versants étudiés (Maudouve - Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust).

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

45 sondages RMP ont été effectués sur l'ensemble des bassins versants (cf. planches n°1 pour le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche, n°2 pour le Dourduff, n°3 pour l'Yvel et n°4 pour l'Oust en annexe 2) lors de 2 campagnes de mesures sur le terrain (24 sondages en octobre et novembre 2002, puis 21 en janvier 2003). Les coordonnées de ces sondages sont données en Lambert II étendu dans le tableau 1.

#### 3.1. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Sur le bassin versant de la Maudouve et de la Noë Sèche, quatre ensembles géologiques ont chacun fait l'objet d'une reconnaissance par 2 sondages RMP : Migmatites de Guingamp, Granite porphyroïde, Granite clair et Monzogranite à biotite de Quintin. Seuls les granitoïdes de Ploufragan n'ont pu être renseignés que par un sondage RMP.

Sur le bassin versant du Dourduff, trois formations géologiques ont fait l'objet d'une reconnaissance par 2 ou 3 sondages RMP : Gabbros de St-Jean, Formation de Garlan, Schistes et quartzites de Plouigneau ; les quatre autres formations sont renseignés par un seul sondage RMP : Formation de l'Armorique, Amphibolites Paléozoïque, Granite du Runiou et de Coat-Lescoat.

Sur le bassin versant de l'Yvel, les cinq formations géologiques ont été renseignées par 2 sondages RMP : Formation du Grès armoricain, Formation de Pont-Réan (siltites rouges), et les trois formations du Briovérien.

Sur le bassin versant de l'Oust, deux ensembles géologiques ont chacun fait l'objet d'une reconnaissance : pélites fines et grès fins du Briovérien (5 sondages RMP), et pélites et grès grossiers du Briovérien (3 sondages). Malgré trois tentatives, les pélites fines du Briovérien n'ont pu être renseignées que par un sondage RMP.

Néanmoins sur les bassins versant du Dourduff, de l'Yvel et de l'Oust, les formations filoniennes n'ont pas pu être renseignées par des sondages RMP (cf. contours en blanc des planches 2, 3 et 4). En raison de cette absence de renseignement, ces formations ne seront pas valorisées sur les cartes suivantes.

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

Bassin versant	Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Contexte géologique
MAUDOUVE - NOE SECHE	MAUD02	216006	2400824	144	Granitoïde de Ploufragan
	MAUD03	210695	2400479	193	Migmatites de Guingamp
	MAUD03A	211366	2400121	192	Migmatites de Guingamp
	MAUD04	214224	2397718	160	Migmatites de Guingamp
	MAUD04A	213777	2400178	206	Migmatites de Guingamp
	MAUD05	208457	2392740	246	Granite porphyroïde de Quintin
	MAUD05A	208887	2392532	236	Granite porphyroïde de Quintin
	MAUD06	209759	2392034	232	Granite porphyroïde de Quintin
	MAUD07	211838	2395981	188	Granite clair de Quintin
	MAUD08	210517	2396277	220	Granite clair de Quintin
	MAUD09	212645	2393513	199	Monzogranite à biotite de Quintin
MAUD10	209532	2394444	238	Monzogranite à biotite de Quintin	
DOURDUFF	DOUR01	153255	2419887	105	Gabbros de St-Jean
	DOUR02	152360	2421215	121	Gabbros de St-Jean
	DOUR03	154933	2420603	117	Formation de l'Armorique
	DOUR04	152868	2416024	113	Formation de Garlan
	DOUR05	153613	2417497	89	Formation de Garlan
	DOUR06	154029	2415708	115	Schistes et quartzites de Plouigneau
	DOUR07	156704	2414497	170	Schistes et quartzites de Plouigneau
	DOUR07A	154421	2415129	126	Schistes et quartzites de Plouigneau
	DOUR08	150893	2420299	111	Granite du Runiou
	DOUR09	154118	2416089	112	Amphibolites Paléozoïque
	DOUR10	157110	2415688	144	Granite de Coat-Lescoat
DOUR11	153682	2417798	91	Formation de Garlan	
YVEL	YVEL01	263802	2347676	168	Formation du Grès armoricain
	YVEL02	261983	2347251	185	Formation du Grès armoricain
	YVEL03	257055	2342810	184	Formation de Pont-Réan (siltites rouges)
	YVEL04	256175	2346687	137	Formation de Pont-Réan (siltites rouges)
	YVEL05	253315	2346840	108	Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)
	YVEL06	248331	2344677	70	Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)
	YVEL07	249101	2348559	90	Briovérien : pélites et grès grossiers
	YVEL08	249303	2347739	101	Briovérien : pélites et grès grossiers
	YVEL09	254850	2348743	91	Briovérien : pélites fines et grès fins
	YVEL10	248326	2346757	88	Briovérien : pélites fines et grès fins
OUST	OUST01	224440	2355490	122	Briovérien : pélites fines et grès fins
	OUST02	217490	2353390	132	Briovérien : pélites et grès grossiers
	OUST03	222410	2356430	133	Briovérien : pélites fines et grès fins
	OUST04	223480	2352540	115	Briovérien : pélites fines et grès fins
	OUST05	222250	2355180	130	Briovérien : pélites fines et grès fins
	OUST06	226720	2349250	102	Briovérien : pélites fines et grès fins
	OUST07	224760	2347170	117	Briovérien : pélites et grès grossiers
	OUST08	223160	2355850	130	Briovérien : pélites et grès grossiers
	OUST09	224490	2353960	122	Briovérien : pélites fines
	OUST09A	222690	2352770	97	Briovérien : pélites fines
OUST10	218570	2351900	131	Briovérien : pélites fines	

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

## 3.2. MÉTHODES ET MOYENS

### 3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP)

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

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

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

#### ***Principe de la méthode***

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique  $H_0$  (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal  $H_0$  (cf. figure 5).

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

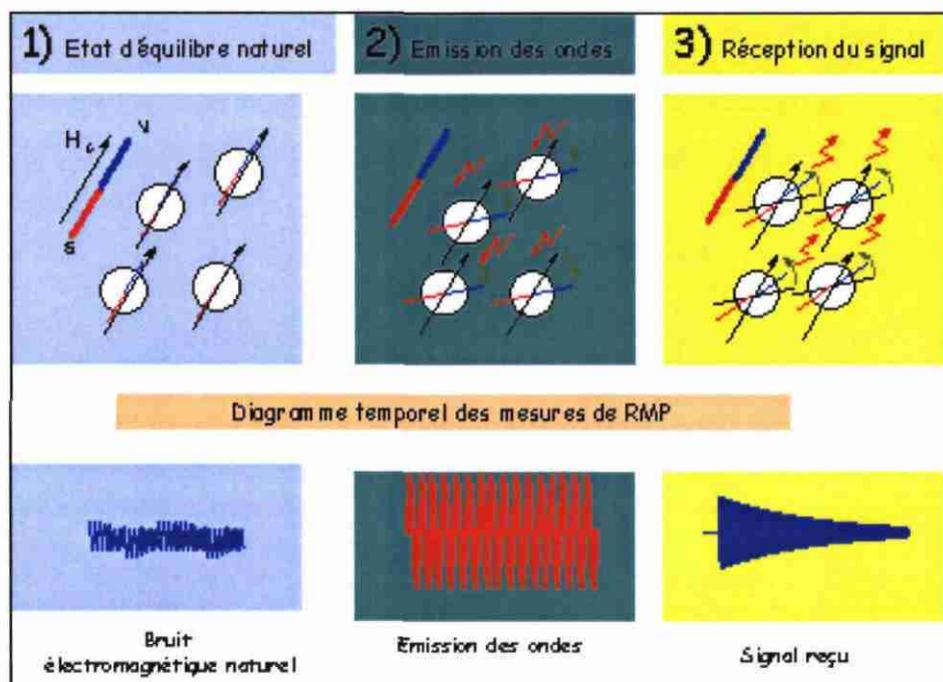


Figure 5 - Principe de mesure RMP

### 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. fig. 6).

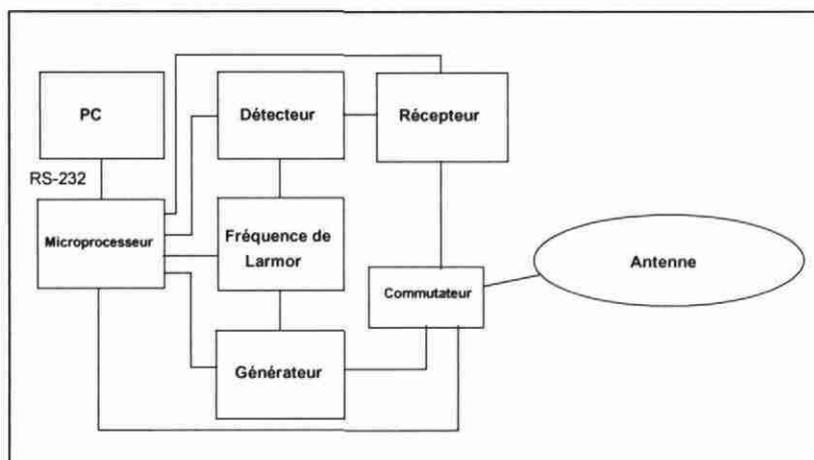


Figure 6 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (cf. figure 7).

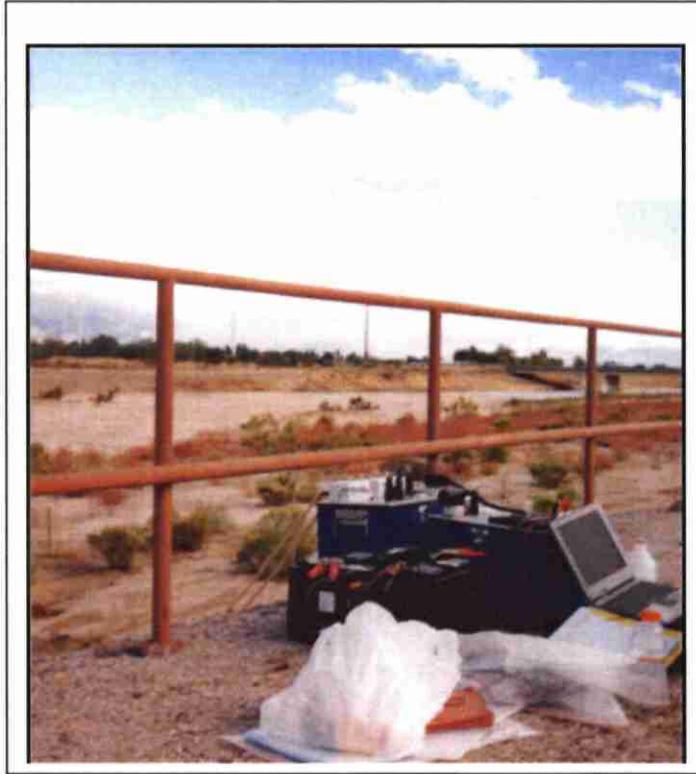


Figure 7 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site

### **Le sondage RMP**

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

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

$I_0$  et  $\tau$  caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis  $\omega_0$  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  $\gamma$  le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée

pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la figure 8.

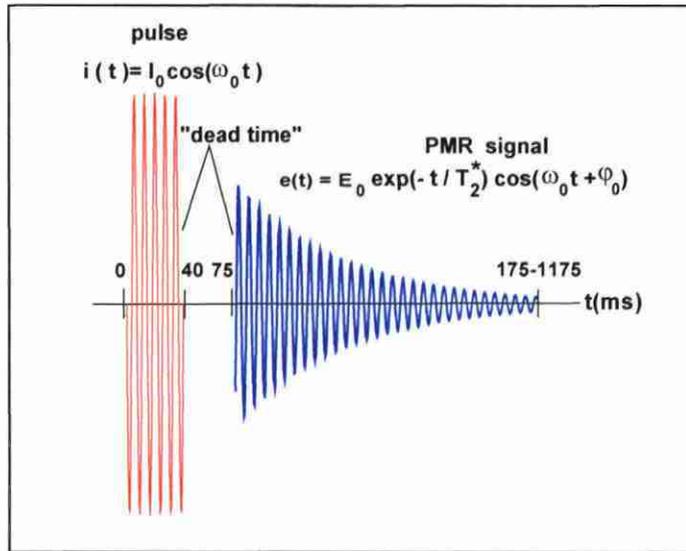


Figure 8 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

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

$$e(t, q) = e_0(q) \exp(-t/T_2^*) \cos(\omega_0 t + \phi_0), \quad (2)$$

avec  $e_0(q)$  l'amplitude initiale RMP,  $T_2^*$  le temps de relaxation spin-spin, et  $\phi_0$  la phase du signal RMP.

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

$E(q)$ ,  $T_2^*(q)$ ,  $T_1(q)$  et  $\phi_0(q)$  sont les paramètres mesurés par l'antenne de réception en faisant varier le paramètre d'excitation  $q$ ; ce dernier paramètre agissant sur la profondeur d'investigation du sondage. Ces quatre paramètres sont ceux qui sont ensuite interprétés et qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ

géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko et al., 1998).

Un signal RMP provenant de l'eau contenue dans des argiles a un temps de décroissance ou de relaxation inférieur au délai instrumental et n'est ainsi pas détectable.

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

### **Interprétation des données**

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

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

Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm.m.

Le problème de l'inversion des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 9.

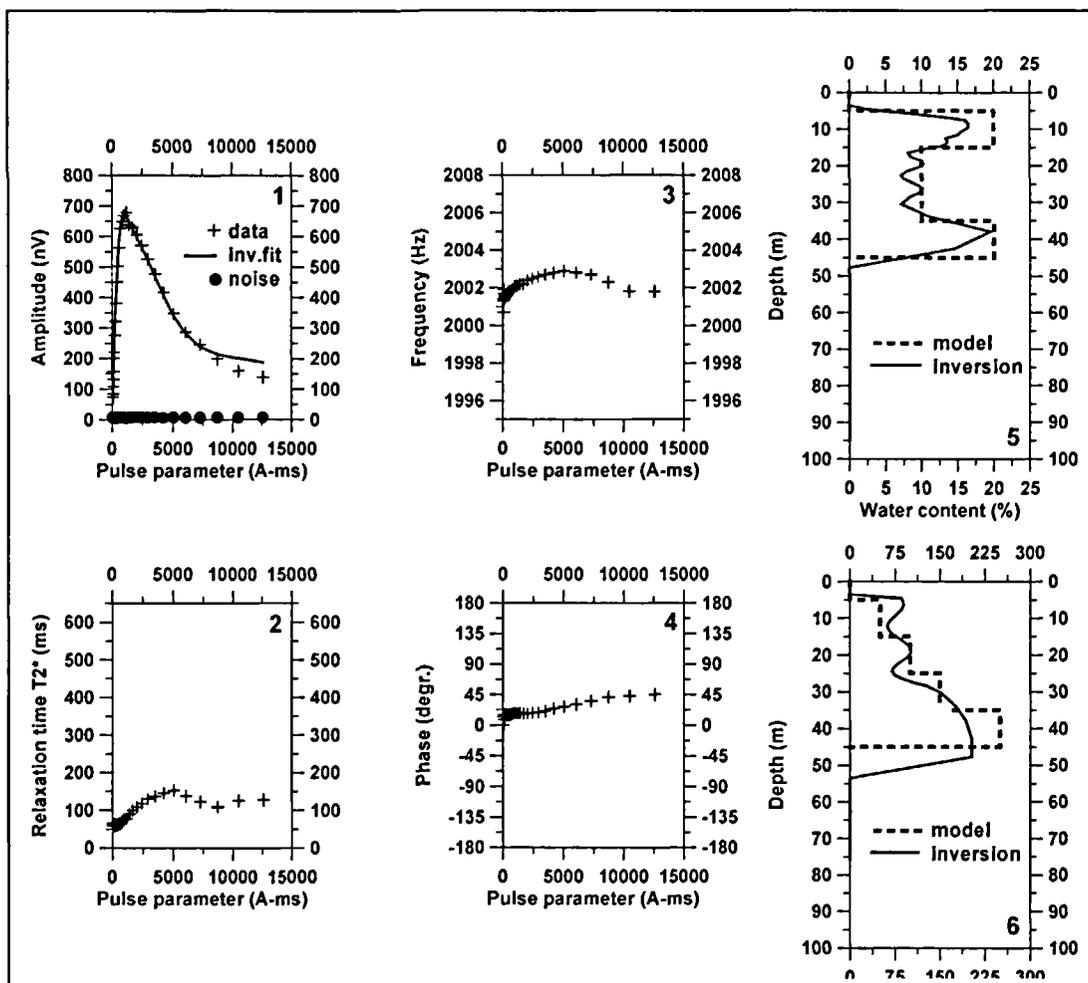


Figure 9 - Résultats d'inversion des données théoriques

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

Profondeur		Teneur en eau (%)	$T_2^*$ (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

Tableau 2 - Paramètres du modèle

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- 1) distribution verticale de la teneur en eau,
- 2) distribution verticale du temps de décroissance  $T_2^*$ ,
- 3) distribution verticale du temps de décroissance  $T_1$ ,
- 4) distribution verticale de la perméabilité,
- 5) distribution verticale de la transmissivité.

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la figure 10.

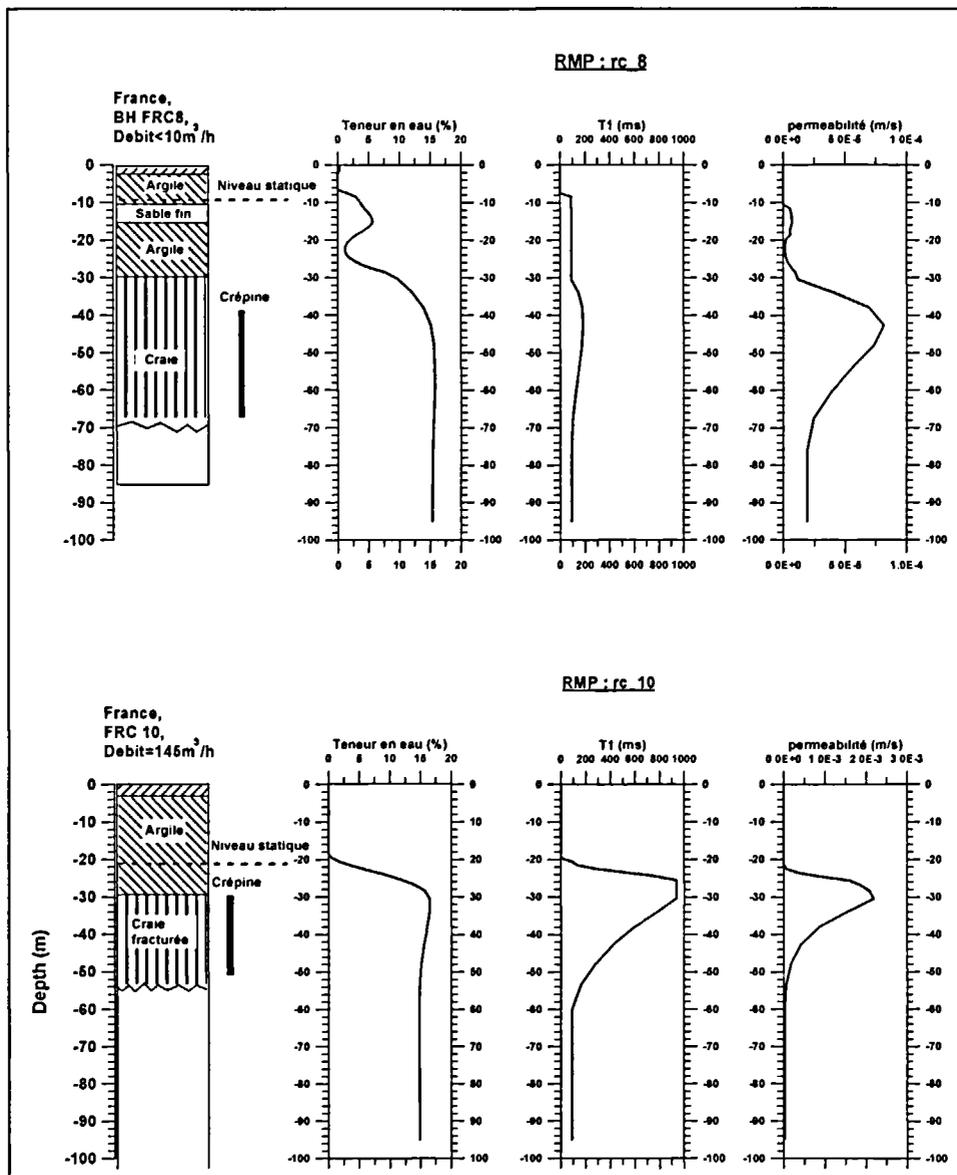


Figure 10 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie

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

Dans ce rapport (cf. annexe 1), les données et les résultats RMP sont présentés comme sur la figure 11.

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

Site: SILURES DOURDUFF DOUR09  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 06.11.2002 Time: 17:08

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour09.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 179.8 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 2.30; EN/IN = 1.25  
 fitting error: FID1 = 28.28%; FID2 = 47.71 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09

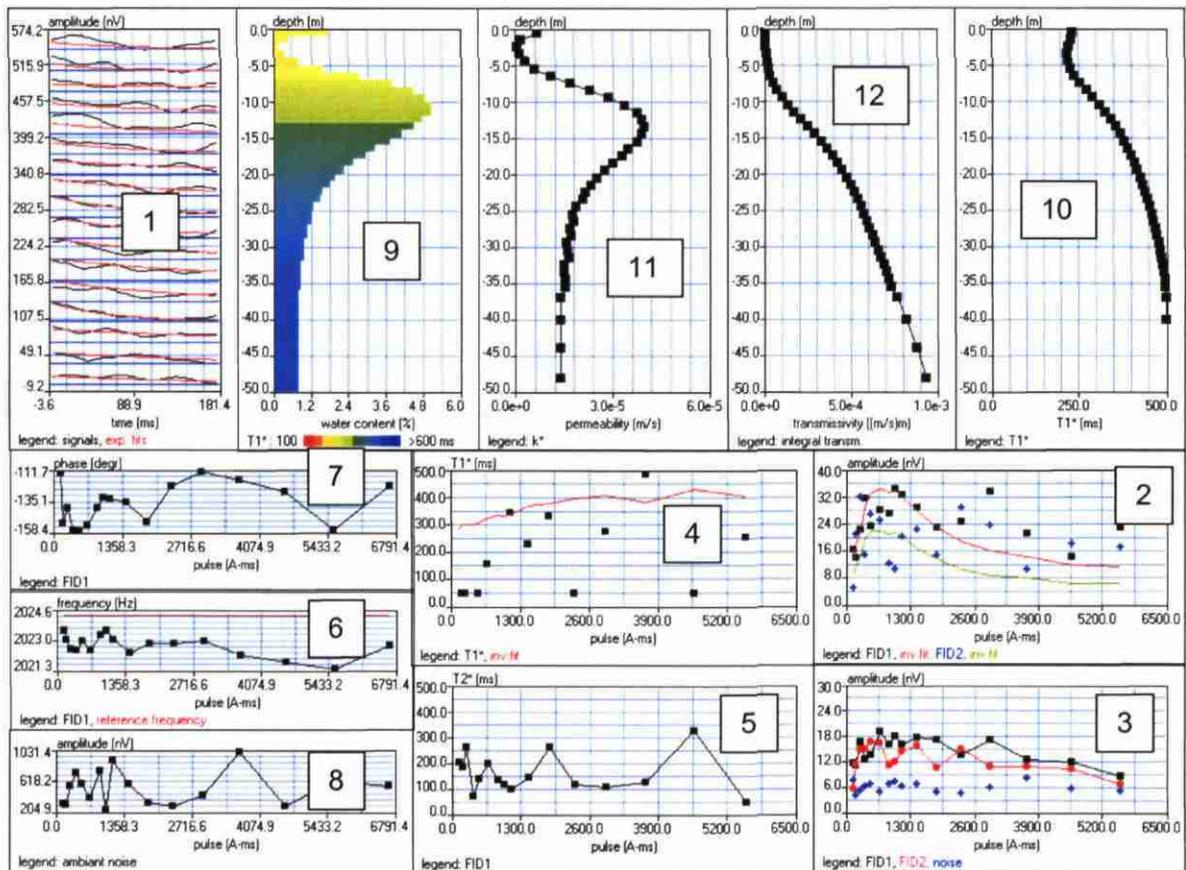


Figure 11 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP

Les résultats graphiques sont :

- 1) les signaux RMP  $e(t,q)$  enregistrés pour chaque valeur du paramètre d'excitation,  $q$  (croissant de bas en haut du graphique) en fonction du temps :  $t$  ;
- 2) les amplitudes initiales des signaux RMP (FID1 et FID2) et l'amplitude moyenne du bruit ambiant en fonction du paramètre d'excitation ;
- 3) les amplitudes moyennes des signaux RMP (FID1 et FID2) et du bruit en fonction du paramètre d'excitation ;
- 4) le temps de relaxation,  $T_1^*(q)$  en fonction du paramètre d'excitation ;
- 5) le temps de relaxation  $T_2^*(q)$  en fonction du paramètre d'excitation ;
- 6) la fréquence du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 7) la phase du signal RMP en fonction du paramètre d'excitation ;
- 8) le bruit ambiant avant traitement mesuré pour les différents paramètres d'excitation.
- 9) la distribution verticale de la teneur en eau  $n(z)$  ;
- 10) la distribution verticale du temps de relaxation  $T_1^*(z)$  ;
- 11) la distribution verticale de la perméabilité  $k_{rmp}(z)$  ;
- 12) la distribution verticale de la transmissivité cumulée.

### 3.2.2. Moyens mis en œuvre

#### *Personnel et calendrier*

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

Les sites potentiels ont été implantés sur carte IGN à 1/25 000 suite à la consultation des plans de lignes électriques (hautes, moyennes et basses tension ; aériennes et souterraines) fournies par l'entreprise EDF-GDF.

Le permittage des sites ayant fait l'objet d'un sondage RMP, a été effectué par F. LE JEUNE.

Le planning des campagnes de mesures était le suivant :

- bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche : du 28 octobre au 6 novembre 2002, soit 6.5 jours de mesures ;
- bassin versant du Dourduff : du 6 au 13 novembre 2002, soit 6.5 jours de mesures ;
- bassin versant de l'Yvel : du 13 au 18 janvier 2003, soit 5 jours de mesures ;
- bassin versant de l'Oust : du 20 au 25 janvier 2003, soit 5 jours de mesures.

### **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 RÉALISÉS**

### **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 indiquée ci-dessous.

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

L'acquisition complète du sondage est ensuite lancée avec un nombre de stacks supérieur ou égal à 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 23 jours d'intervention sur le terrain, 45 sondages RMP ont été réalisés sur les quatre bassins versants, ce qui représente un rendement d'environ deux sondages RMP par jour.

La répartition de ces sondages RMP est la suivante :

- bassin versant de la Maudouve et de la Noë sèche : 12,
- bassin versant du Dourduff : 12,
- bassin versant de l'Yvel : 10,
- bassin versant de l'Oust : 11.

Les tableaux 3 et 4 présentent un récapitulatif des principales caractéristiques de ces sondages RMP.

Bassin versant	Sondage RMP	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit exter./bruit instr. (EN/IN)	Qualité des mesures	Interprétation
MAUDOUE	MAUD02	400/700	350	1.09	2.7	moyenne	optimiste
	MAUD03	700/1500	200	?	?	inexploitable	
	MAUD03A	250/900	250	2.69	1.38	bonne	quantitative
	MAUD04	7000/10000	200	?	?	inexploitable	
	MAUD04A	250/350	300	2.11	0.68	bonne	quantitative
	MAUD05	1300/6000	300	?	?	inexploitable	
	MAUD05A	300/1500	200	1.04	1.87	moyenne	optimiste
	MAUD06	400/700	200	0.86	3.05	médiocre	optimiste
	MAUD07	500/1500	300	1.18	4.52	médiocre	optimiste
	MAUD08	2200/3000	200	1.17	1.26	moyenne	optimiste
	MAUD09	700/1300	300	1.45	0.91	bonne	estimative
MAUD10	900/1500	350	1.25	3.37	médiocre	optimiste	
DOURDUFF	DOUR01	1000/1700	200	1.12	5.3	médiocre	optimiste
	DOUR02	500/700	200	0.99	1.99	moyenne	optimiste
	DOUR03	250/350	300	2.02	0.91	bonne	estimative
	DOUR04	350/700	400	1.49	1.41	bonne	estimative
	DOUR05	700/1500	200	1.36	2.34	moyenne	estimative
	DOUR06	250/350	150	1.35	1.56	bonne	estimative
	DOUR07	700/2000	200	?	?	inexploitable	
	DOUR07A	9000/10000	350	0.98	2.35	médiocre	optimiste
	DOUR08	500/700	300	1.49	1	bonne	estimative
	DOUR09	300/750	300	2.3	1.25	bonne	quantitative
	DOUR10	300/700	300	1.29	2.79	moyenne	optimiste
DOUR11	350/400	250	1.13	2.06	moyenne	optimiste	

Tableau 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassins versants de la Maudouze et du Dourduff)

Bassin versant	Sondage RMP	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit exter./bruit instr. (EN/IN)	Qualité des mesures	Interprétation
YVEL	YVEL01	800/1000	350	1.64	1.14	bonne	estimative
	YVEL02	400/650	200	4.99	1	bonne	quantitative
	YVEL03	200/400	350	1.23	1.2	moyenne	optimiste
	YVEL04	140/170	250	1.12	0.78	bonne	quantitative
	YVEL05	350/550	200	3.9	1.16	bonne	quantitative
	YVEL06	350/400	350	1.83	0.69	bonne	quantitative
	YVEL07	1000/1200	350	2.71	1.03	bonne	quantitative
	YVEL08	200/350	200	1.56	1.25	bonne	estimative
	YVEL09	200/350	200	2.7	0.91	bonne	quantitative
	YVEL10	200/250	200	1.51	1.15	bonne	estimative
OUST	OUST01	350/400	350	3.95	1.8	bonne	quantitative
	OUST02	250/400	350	1.91	1.05	bonne	quantitative
	OUST03	500/700	350	2.48	0.86	bonne	quantitative
	OUST04	650/950	350	1.13	1.85	moyenne	estimative
	OUST05	1150/1300	200	1.16	1.43	moyenne	estimative
	OUST06	300/550	200	1.77	1.84	bonne	quantitative
	OUST07	300/400	200	2.43	1.13	bonne	quantitative
	OUST08	450/800	200	1.39	1.33	moyenne	estimative
	OUST09	400/1700	200			inexploitable	
	OUST09A	400/700	200			inexploitable	
OUST10	600/800	200	1.07	1.94	moyenne	optimiste	

Tableau 4 - Principales caractéristiques des sondages RMP (bassins versants de l'Yvel et de l'Oust)

## 3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNÉES

### 3.4.1. Qualité des mesures

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

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

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

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

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

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  $EN/IN \simeq 1$ . Dans cette configuration, une interprétation quantitative des mesures RMP est possible.

Si  $EN/IN \simeq 1$  et  $S/N \simeq 1$ , 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.

Les tableaux 3 et 4 présentent un récapitulatif des principales caractéristiques des sondages RMP.

L'analyse de la qualité des mesures pour les 45 sondages RMP donne la répartition suivante :

- bonne : 22 49 %
- moyenne : 12 27 %
- médiocre : 5 11 %
- inexploitable : 6 13 %.

En ce qui concerne l'interprétation des 39 sondages exploitables la répartition est la suivante :

- interprétation quantitative : 14 36 %
- estimation : 12 31 %
- optimiste : 13 33 %

L'analyse des rapports EN/IN montre que les mesures effectuées en automne sur les bassins versants de la Maudouve et du Dourduff ( $EN/IN \simeq 2$ ) sont deux fois plus bruitées que celles réalisées en hiver sur les bassins versants de l'Yvel et de l'Oust ( $EN/IN \simeq 1$ ). Cette différence serait, a priori, en relation avec l'activité des clôtures électrifiées qui est nettement moins importante en hiver que le reste de l'année. La qualité des mesures est étroitement liée à ce phénomène : 67 % des sondages RMP effectués sur les bassins versants de l'Yvel et de l'Oust sont de bonne qualité pour seulement 33 % sur les bassins versants de la Maudouve et du Dourduff.

### 3.4.2. Matrice pour l'inversion

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

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

### 3.4.3. Inversions automatiques

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

Les 39 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° (remonté en « queue » de courbe).

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

## 4. Modélisation géométrique des interfaces

### 4.1. MÉTHODOLOGIE 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 (figure 12).

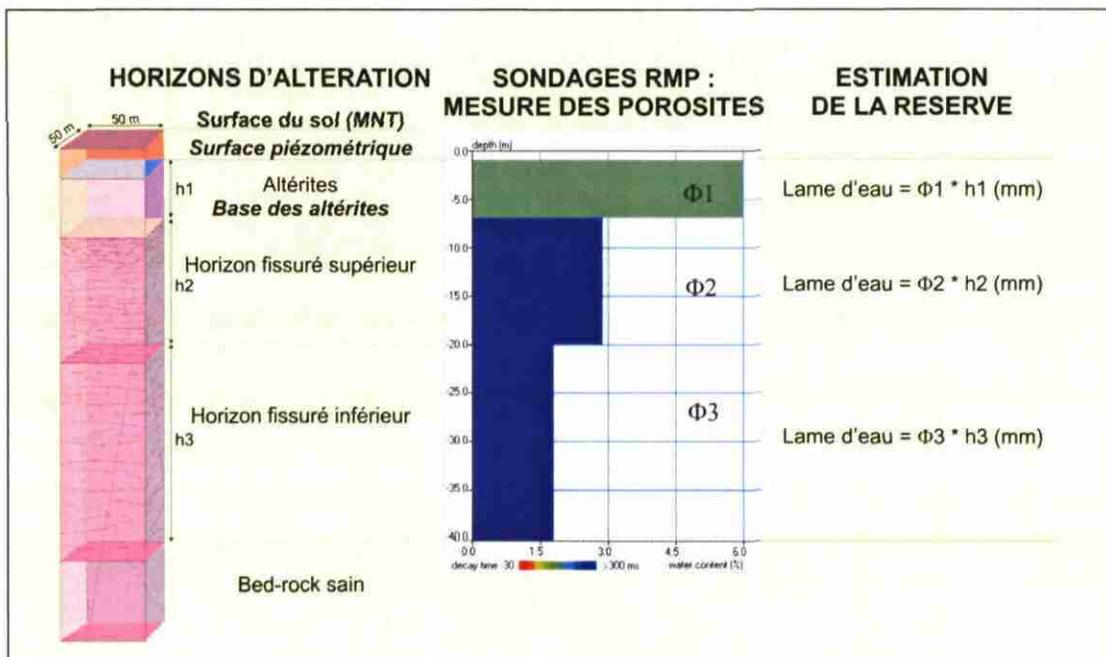


Figure 12 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

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 l'épaisseur de la lame d'eau contenue dans chaque horizon (altérites, horizon fissuré supérieur, horizon fissuré inférieur), la somme de l'ensemble correspondant à la lame d'eau souterraine totale.

#### 4.1.2. 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 point caractérisant une altitude, l'approche géostatistique mise en œuvre va permettre :

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

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

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

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

- prend des valeurs minimales dans le voisinage des points de mesures et l'estimation est de bonne qualité,
- augmente lorsque l'on s'éloigne des données ; cette augmentation est fonction de la variabilité spatiale du phénomène et donc des paramètres d'ajustement du variogramme adopté (cf. planches des chapitres 4.2.3. et 4.3.).

## 4.2. MODÉLISATION DE LA SURFACE PIÉZOMÉTRIQUE

### 4.2.1. Récupération des données piézométriques

Suite à une recherche au niveau de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sur les 426 forages recensés aux alentours des 4 bassins versants (77 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 95 sur le Dourduff, 98 sur l'Yvel et 156 sur l'Oust), 115 mesures de la profondeur du niveau de nappe ont été relevées dans des forages d'eau (cf. répartition par bassin versant dans le tableau 5).

Au Nord-Est du bassin de la Noë Sèche (site de Maupertuis), le Conseil Général des Côtes d'Armor suit en continu depuis 1999 la profondeur du niveau de la nappe sur 17 ouvrages (14 piézomètres et 3 forages). 17 mesures moyennes ont été intégrées aux 115 mesures effectuées en forage (soit un total de 132 mesures, cf. tableau 5).

Les niveaux relevés en BSS varient entre 0 et 16.5 m de profondeur sur la Maudouve et la Noë Sèche, entre 2 et 12 m sur le Dourduff, entre 1 et 13 m sur l'Yvel et entre 1 et 25 m sur l'Oust.

Ces mesures sont effectuées par des foreurs ou des bureaux d'étude après réalisation de l'ouvrage. Cependant, il arrive parfois que ces mesures soient effectuées trop rapidement avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les profondeurs mesurées du niveau de nappe sont alors sur-estimées.

Nombre de mesures (total)	Bassin de la Maudouve	Bassin du Dourduff	Bassin de l'Yvel	Bassin de l'Oust
En forage (132)	56 *	19	19	38
En tarière (56)	11	12	8	25 *
Total (188)	67	31	27	63
Remarques	* : dont 17 forages CG22			* : dont 19 tarières Naizin

Tableau 5 - Répartition des mesures piézométriques

Les profondeurs du niveau de nappe mesurées sur les 89 sondages mécaniques à la tarière réalisés sur les 4 bassins versants (cf. rapport BRGM/RP-51891-FR : 28 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 19 sur le Dourduff, 21 sur l'Yvel et 21 sur l'Oust) ont permis de rassembler 37 mesures (cf. répartition dans le tableau 5).

Au Sud-Ouest du bassin de l'Oust (bassin du Naizin), le BRGM avait réalisé 38 tarières en l'an 2000 et mesuré un niveau d'eau dans 19 d'entre elles (cf. rapport BRGM/RP-52731-FR). Ces 19 mesures ont été intégrées aux 37 mesures effectuées dans les tarières SILURES Bassins Versants (total : 56 mesures, cf. tableau 5).

Les niveaux mesurés dans les tarières varient entre 2 et 7.5 m de profondeur sur la Maudouve et la Noë Sèche, entre 1 et 5 m sur le Dourduff, entre 2 et 16 m sur l'Yvel et entre 1 et 14.5 m sur l'Oust.

Certaines mesures ont été effectuées juste après réalisation de l'ouvrage soit donc trop rapidement avant la mise en équilibre du niveau de nappe ; les profondeurs mesurées du niveau de nappe sont alors sur-estimées.

L'ensemble de ces 188 points d'observation (cf. tableau 5) représente une densité d'environ 1 point pour 3 km<sup>2</sup> sur la Maudouve et la Noë Sèche, 1 point pour 6.5 km<sup>2</sup> sur le Dourduff, 1 point pour 8 km<sup>2</sup> sur l'Yvel et 1 point pour 5.5 km<sup>2</sup> sur l'Oust.

#### 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 (figure 13).

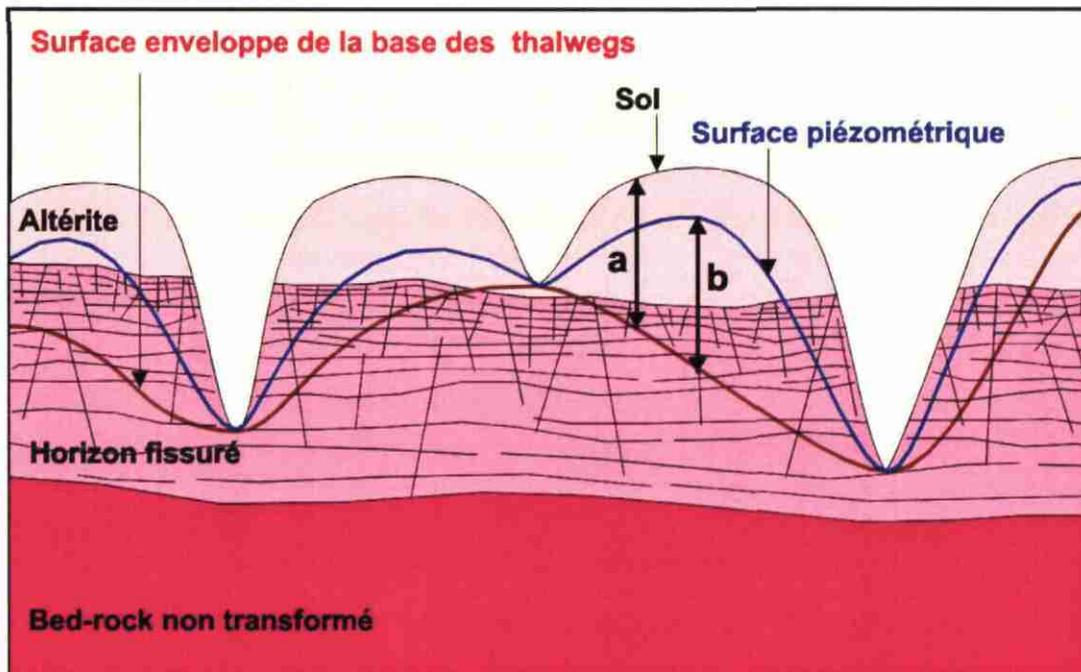


Figure 13 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

En contexte de nappe libre où les débits d'étiage des rivières sont fournis par la nappe, on peut considérer que les rivières pérennes représentent des zones d'affleurement de la surface piézométrique. Les rivières représentant les exutoires de la nappe, la surface piézométrique remonte donc sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. La surface piézométrique est donc toujours comprise entre la surface topographique et la surface enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Une corrélation linéaire relie d'une part la dénivellation entre l'altitude du sol et celle de la surface-enveloppe des rivières (« a » sur la figure 13), et d'autre part la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface-enveloppe des rivières (« b » sur la figure 13). 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 :

- pour le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche entre 0.7 et 22.9 m, avec une moyenne de 8.7 m ;
- pour le bassin du Dourduff entre 2.1 et 27.7 m, avec une moyenne de 11.7 m ;
- pour le bassin de l'Yvel entre 0.2 et 19.6 m, avec une moyenne de 8.1 m ;
- pour le bassin de l'Oust entre 1 et 9.3 m, avec une moyenne de 3.4 m.

Au vue de ces résultats, on constate que la variabilité spatiale est sensiblement plus forte sur les bassins de la Maudouve, du Dourduff et de l'Yvel ce qui se traduit par des incertitudes plus fortes par comparaison au bassin de l'Oust.

Le bassin versant du Dourduff est caractérisé localement par de fortes incertitudes ; elles s'expliquent par la configuration spatiale des données intervenants dans le voisinage de krigeage (réseau hydrographique assez lâche).

La surface du sol est fournie par le MNT.

Sur les grilles englobant les zones d'étude, 188 mesures piézométriques ont été utilisées (67 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 31 sur le Dourduff, 27 sur l'Yvel et 63 sur l'Oust).

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 188 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 52 points (14 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 5 sur le Dourduff, 6 sur l'Yvel et 27 sur l'Oust) 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 (cf. explications au chapitre 4.2.1.).

Après élimination des valeurs aberrantes (52 mesures), 136 mesures piézométriques ont pu être utilisées (53 sur la Maudouve et la Noë Sèche, 26 sur le Dourduff, 21 sur l'Yvel et 36 sur l'Oust).

Le report des couples de variables a et b sur un diagramme binaire (cf. figures 14, 15, 16 et 17) a permis de calculer les équations suivantes :

Bassin de la Maudouve et la Noë Sèche  $b = 0.7909 * a - 0,5013$

Bassin du Dourduff  $b = 0.9128 * a - 2,5923$

Bassin de l'Yvel  $b = 0.9814 * a - 3,4018$

Bassin de l'Oust  $b = 0.8516 * a - 3,0253$

Ces équations permettent 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.

Les pentes des droites  $b=f(a)$  (0.79, 0.91, 0.98 et 0.85) sont représentatives de la perméabilité en grand des roches présentes sur chaque bassin versant. Plus la pente est proche de 1 plus le massif est imperméable ( $Z_{sol} \simeq Z_{piézométrie}$ ) et inversement plus la pente se rapproche de 0 plus le massif est perméable ( $Z_{rivières} \simeq Z_{piézométrie}$ ). Ainsi on note que le bassin de la Maudouve est le plus perméable (pente=0.79) et celui de l'Yvel est le moins perméable (0.98), et que les formations schisteuses de l'Oust (0.85) sont plus perméables que celles de l'Yvel.

Les ordonnées à l'origine négatives (-0.5, -2.6, -3.4 et -3 m) représentent 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 encaissée (bassin de l'Yvel) comporte plus d'erreur qu'une maille située dans une vallée à fond plat (bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche). La maille du MNT est donc parfois trop large par rapport à la morphologie existante.

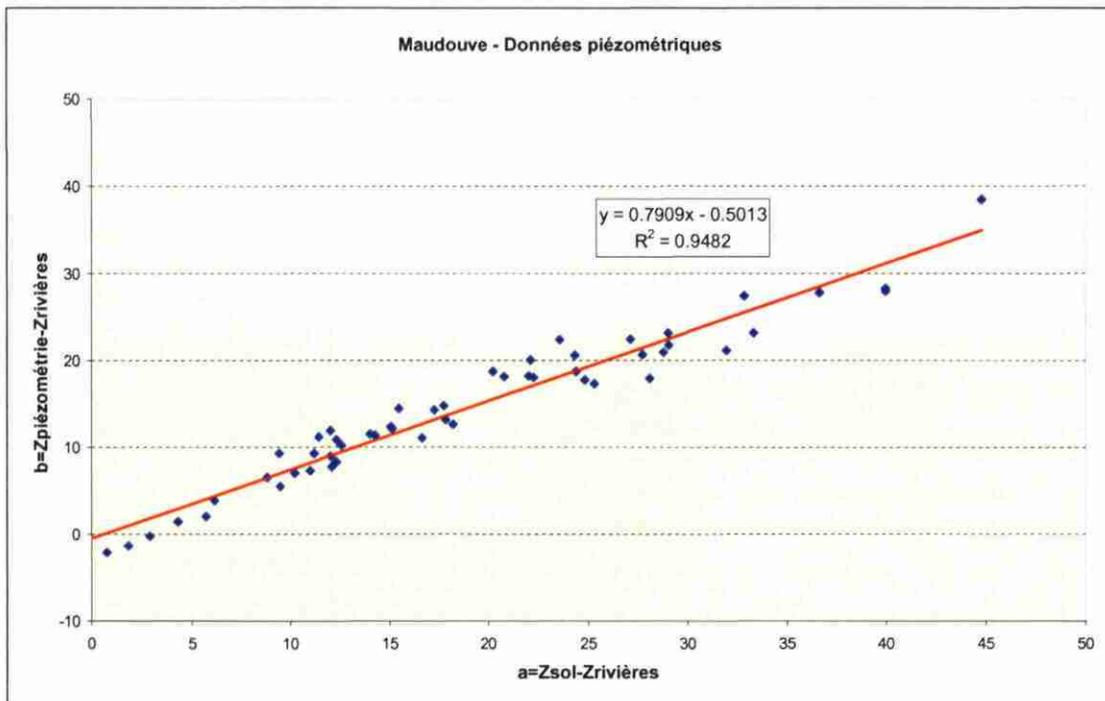


Figure 14 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de la Maudouze et la Noë Sèche)

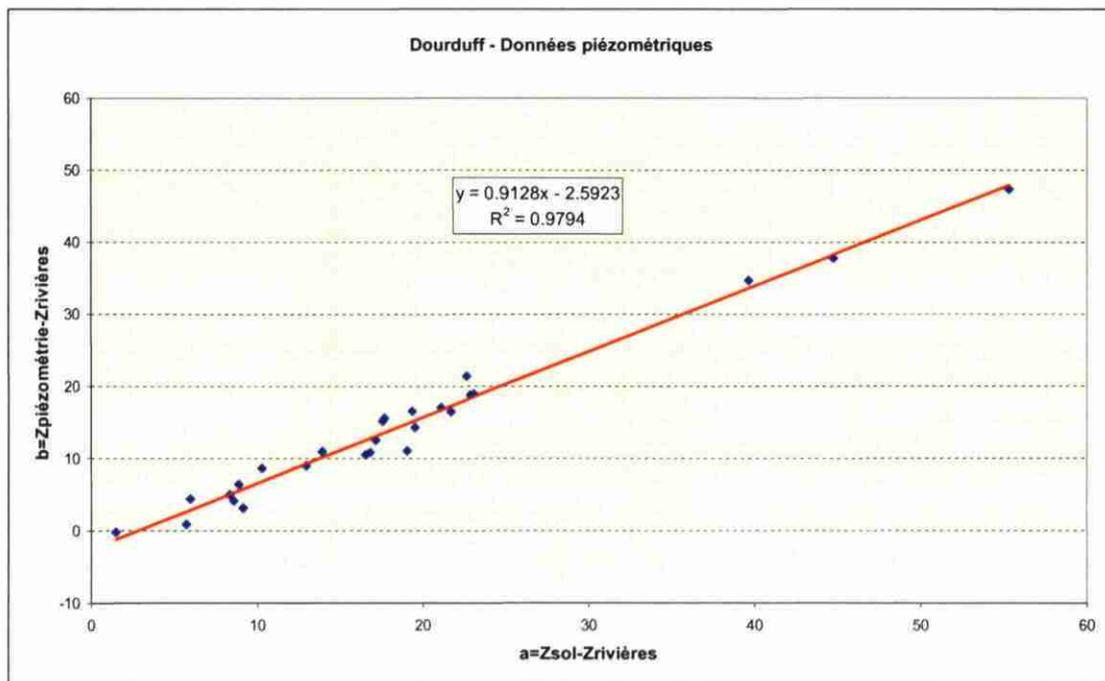


Figure 15 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Dourduff)

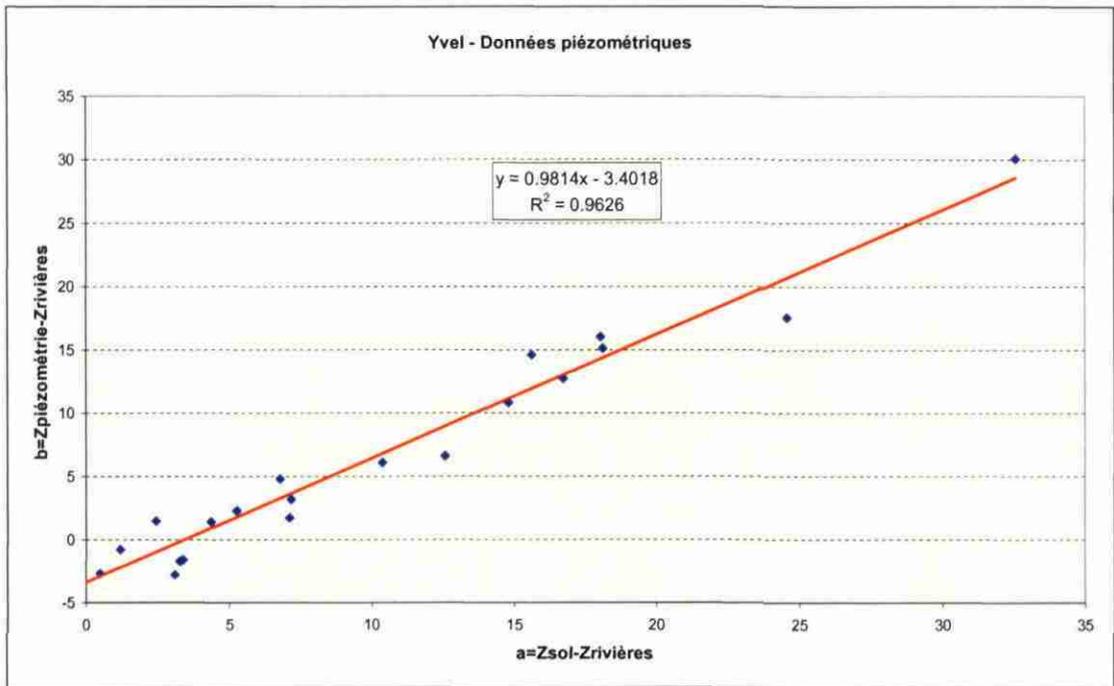


Figure 16 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Yvel)

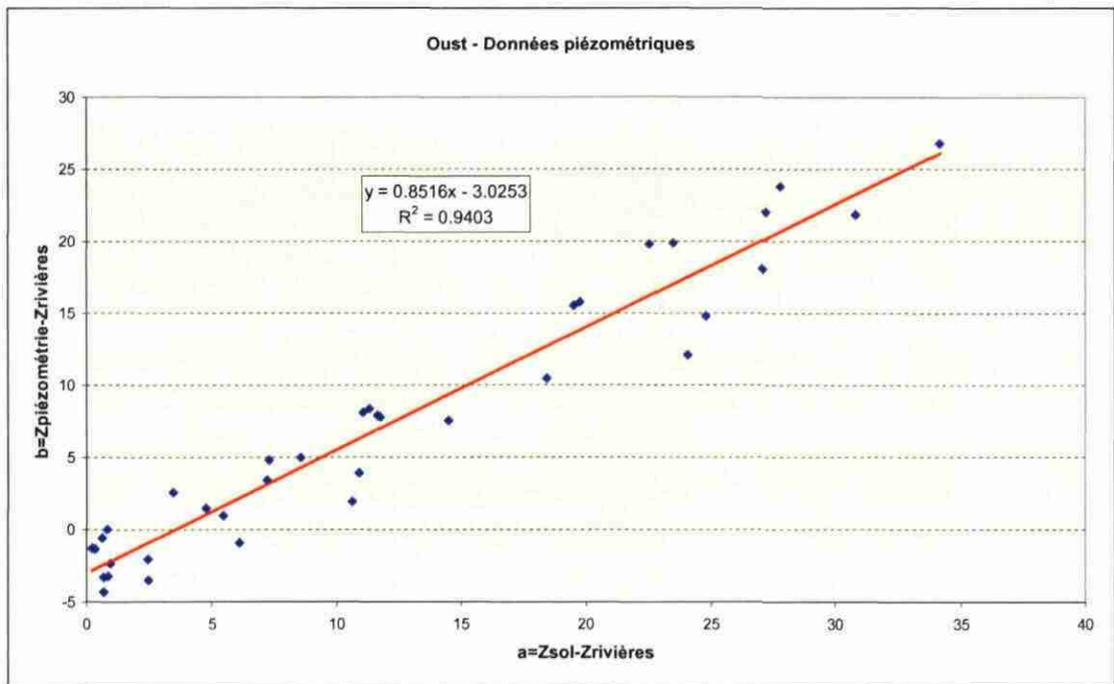


Figure 17 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Oust)

Les cartes de l'altitude de la surface piézométrique sur les 4 bassins versants (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) sont respectivement représentées sur les planches 5, 6, 7 et 8.

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 les 4 bassins versants (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) sur les planches 9, 10, 11 et 12.

Ces cartes montrent 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. MODÉLISATION DE LA BASE DES ALTÉRITES ET DE L'ÉPAISSEUR DES ALTÉRITES EN PLACE

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré : 2036 points sur la Maudouve et la Noë Sèche, 321 points sur le Dourduff, 1358 points sur l'Yvel et 322 points sur l'Oust.

Ces points proviennent (cf. répartition par bassin versant dans le tableau 6) :

- de données des 31 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 (36 points),
- d'observations des affleurements présents sur les zones d'étude (1272 points),
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de 2698 points).

Nombre de points d'observation (total)	Bassin de la Maudouve et Noë Sèche	Bassin du Dourduff	Bassin de l'Yvel	Bassin de l'Oust
De forage (31)	5	20	0	6
De tarière (36)	12	11	1	12
D'affleurements (1272)	571	161	300	240
D'après la digit du contact (2698)	1448	129	1057	64
Total (4037)	2036	321	1358	322

Tableau 6 - Répartition des points d'observation du contact altérites/milieu fissuré

L'ensemble des 4037 points (cf. tableau 6) représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0.04 km<sup>2</sup> sur la Maudouve et la Noë Sèche, 1 point pour 0.26 km<sup>2</sup> sur le Dourduff, 1 point pour 0.07 km<sup>2</sup> sur l'Yvel, et 1 point pour 0.44 km<sup>2</sup> sur l'Oust.

L'écart-type de krigeage, quantifiant l'erreur associée à la variable interpolée, varie :

- entre 0.4 et 21 m, avec une moyenne de 5.9 m, pour le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- entre 0.4 et 24.8 m, avec une moyenne de 5.4 m, pour le bassin du Dourduff ;
- entre 2 et 32.1 m, avec une moyenne de 8.3 m, pour le bassin de l'Yvel ;
- entre 1 et 7 m, avec une moyenne de 5.1 m, pour le bassin de l'Oust.

L'altitude de la surface de base des altérites obtenue sur les 4 bassins versants (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) est respectivement représentée sur les planches 13, 14, 15 et 16.

Au niveau des bassins versants, des failles (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff et Oust) et des discontinuités géologiques (Yvel : contact siltites rouges et pélites et grès du Briovérien) 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 les 3 bassins versants (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) est respectivement représentée sur les planches 17, 18, 19 et 20.

Ces cartes montrent 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.

Sur le bassin de l'Oust (planche 20), on remarque une anisotropie directionnelle orientée Nord-Ouest Sud-Est dans le sens de la vallée.

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 les planches 21, 22, 23 et 24 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust).

L'épaisseur des altérites varie :

- sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche entre 0 et 19.1 m, avec une moyenne de 1.24 m ;
- sur le bassin du Dourduff entre 0 et 25.4 m, avec une moyenne de 3.02 m ;
- sur le bassin de l'Yvel entre 0 et 13.9 m, avec une moyenne de 0.64 m ;

- sur le bassin de l'Oust entre 0 et 43.4 m, avec une moyenne de 3.66 m.

Ces planches montrent que les bassins de l'Oust et du Dourduff sont mieux pourvus d'altérites que les deux autres bassins versants et que les altérites y sont plus épaisses. Le bassin de l'Yvel est le plus pauvre en altérites.

Sur le bassin de l'Oust (planche 24), l'épaisseur maximum des altérites (43.4 m) est très locale et surévaluée (extrême Nord en dehors du bassin). Ceci est lié à l'absence de contrainte du modèle de la base des altérites (écart-type de krigeage maximum).

#### 4.4. MODÉLISATION DE LA BASE DE L'HORIZON FISSURÉ SUPÉRIEUR ET INFÉRIEUR

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

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

Les épaisseurs moyennes pour chaque lithologie ont été calculées sur chacun des 4 bassins versants (cf. tableaux 7, 8, 9 et 10 : Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) à partir des résultats d'inversion des sondages RMP réalisés.

Géologie	RMP	EPAISSEURS	
		Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Granitoïde de Ploufragan	MAUD02	10.00	34.00
<b>Moyenne</b>		<b>10.00</b>	<b>34.00</b>
Migmatites de Guingamp	MAUD03A	18.00	25.00
Migmatites de Guingamp	MAUD04A	16.00	29.00
<b>Moyenne</b>		<b>17.00</b>	<b>27.00</b>
Granite porphyroïde de Quintin	MAUD05A	20.00	25.00
Granite porphyroïde de Quintin	MAUD06	21.00	20.00
<b>Moyenne</b>		<b>20.50</b>	<b>22.50</b>
Granite clair de Quintin	MAUD07	23.00	25.00
Granite clair de Quintin	MAUD08	27.00	20.00
<b>Moyenne</b>		<b>25.00</b>	<b>22.50</b>
Monzogranite à biotite de Quintin	MAUD09	16.00	28.00
Monzogranite à biotite de Quintin	MAUD10	16.00	27.00
<b>Moyenne</b>		<b>16.00</b>	<b>27.50</b>

Tableau 7 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche)

## EPAISSEURS

Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Gabbros de St-Jean	DOUR01	22.00	20.00
Gabbros de St-Jean	DOUR02	21.00	20.00
<b>Moyenne</b>		<b>21.50</b>	<b>20.00</b>
Formation de l'Armorique	DOUR03	15.00	31.00
<b>Moyenne</b>		<b>15.00</b>	<b>31.00</b>
Formation de Garlan	DOUR04	20.00	25.00
Formation de Garlan	DOUR05	17.00	30.00
Formation de Garlan	DOUR11	19.00	23.00
<b>Moyenne</b>		<b>18.67</b>	<b>26.00</b>
Schistes et quartzites de Plouigneau	DOUR06	10.00	35.00
Schistes et quartzites de Plouigneau	DOUR07A	8.00	39.00
<b>Moyenne</b>		<b>9.00</b>	<b>37.00</b>
Granite du Runiou	DOUR08	13.00	28.00
<b>Moyenne</b>		<b>13.00</b>	<b>28.00</b>
Amphibolites Paléozoïque	DOUR09	20.00	25.00
<b>Moyenne</b>		<b>20.00</b>	<b>25.00</b>
Granite de Coat-Lescoat	DOUR10	12.00	33.00
<b>Moyenne</b>		<b>12.00</b>	<b>33.00</b>

Tableau 8 - 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 Dourduff)

## EPAISSEURS

Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Formation du Grès armoricain	YVEL01	22.00	16.00
Formation du Grès armoricain	YVEL02	22.00	23.00
<b>Moyenne</b>		<b>22.00</b>	<b>19.50</b>
Formation de Pont-Réan (siltites rouges)	YVEL03	34.50	27.00
Formation de Pont-Réan (siltites rouges)	YVEL04	36.00	23.00
<b>Moyenne</b>		<b>35.25</b>	<b>25.00</b>
Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)	YVEL05	18.00	27.00
Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)	YVEL06	20.00	26.00
<b>Moyenne</b>		<b>19.00</b>	<b>26.50</b>
Briovérien : pélites et grès grossiers	YVEL07	27.00	15.00
Briovérien : pélites et grès grossiers	YVEL08	26.00	20.00
<b>Moyenne</b>		<b>26.50</b>	<b>17.50</b>
Briovérien : pélites fines et grès fins	YVEL09	26.00	15.00
Briovérien : pélites fines et grès fins	YVEL10	25.00	21.00
<b>Moyenne</b>		<b>25.50</b>	<b>18.00</b>

Tableau 9 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de l'Yvel)

**EPAISSEURS**

Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST01	-	-
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST03	20.00	15.00
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST04	20.00	20.00
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST05	15.00	18.00
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST06	18.00	31.00
<b>Moyenne</b>		<b>18.25</b>	<b>21.00</b>
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST02	23.00	19.00
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST07	19.00	26.00
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST08	16.00	30.00
<b>Moyenne</b>		<b>19.33</b>	<b>25.00</b>
Briovérien : pélites fines	OUST10	15.00	29.00
<b>Moyenne</b>		<b>15.00</b>	<b>29.00</b>

*Tableau 10 - Détermination de l'épaisseur moyenne des deux compartiments de l'horizon fissuré pour chaque famille lithologique à partir des résultats d'inversion des sondages RMP (bassin de l'Oust)*

(-): il n'est pas possible de calculer l'épaisseur de l'horizon fissuré supérieur et inférieur en raison du bruit qui est plus important que le signal

L'horizon fissuré supérieur, caractérisé par une porosité et une perméabilité maximales, présente une épaisseur moyenne :

- comprise entre 10 et 25 m, sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- comprise entre 9 et 21.5 m, sur le bassin du Dourduff ;
- comprise entre 19 et 35,25 m, sur le bassin de l'Yvel ;
- comprise entre 15 et 19,33 m, sur le bassin de l'Oust.

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 22.5 et 34 m, sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- varient entre 20 et 37 m, sur le bassin du Dourduff ;
- varient entre 17.5 et 26.5 m, sur le bassin de l'Yvel ;
- varient entre 21 et 29 m, sur le bassin de l'Oust.

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.

Les cartes de la profondeur de la base de l'horizon fissuré inférieur par rapport à la surface du sol sont présentées sur les planches 25, 26, 27 et 28 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust) : cette profondeur représente la profondeur approximative du mur de l'aquifère d'altération.

Les valeurs varient :

- entre 0 et 63.1 m, avec une moyenne de 41.80 m, sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- entre 0 et 71.4 m, avec une moyenne de 42.63 m, sur le bassin du Dourduff ;
- entre 4 et 62.9 m, avec une moyenne de 37.42 m, sur le bassin de l'Yvel ;
- entre 0 et 77.9 m, avec une moyenne de 33.87 m, sur le bassin de l'Oust.

#### **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 chaque bassin versant, la somme de l'ensemble, représentant l'épaisseur saturée de l'aquifère d'altération, est représentée sur les planches 29, 30, 31 et 32 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust).

Cette épaisseur varie :

- entre 0 et 58.1 m, avec une moyenne de 38.85 m, sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- entre 0 et 64.7 m, avec une moyenne de 39.15 m, sur le bassin du Dourduff ;
- entre 0.6 et 59.2 m, avec une moyenne de 33.82 m, sur le bassin de l'Yvel ;
- entre 0 et 71 m, avec une moyenne de 29.01 m, sur le bassin de l'Oust.

## 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 (sondages de la Maudouve et de la Noë Sèche, du Dourduff, de l'Yvel et de l'Oust).

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

L'interprétation géologique des sondages est présentée sous forme synthétique sur chacun des 4 bassins versants dans les tableaux 11, 12, 13 et 14 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust).

Pour chaque sondage est présenté le rapport signal/bruit qui constitue un indice de qualité global du sondage, dépendant des conditions de bruit électromagnétique sur le site au moment de l'acquisition (lignes électriques hautes, moyennes et basses tension, et clôtures à vaches).

Les teneurs en eau brutes ont été calculées en faisant la moyenne des teneurs en eau sur l'épaisseur de chaque compartiment de l'aquifère. Une teneur en eau brute moyenne a été calculée à partir de ces résultats pour chaque formation géologique. Afin de tenir compte de la qualité variable des sondages, des teneurs moyennes en eau pondérées ont été calculées dans les 3 colonnes de droite : en face de chaque sondage figure le produit de la teneur en eau brute par le rapport signal/bruit ; les teneurs en eau pondérées pour chaque formation géologique correspondent au quotient de la somme des produits (teneurs en eau brute \* signal/bruit) par la somme des rapports signal/bruit.

Les résultats sont présentés dans les tableaux 11, 12, 13 et 14.

Géologie	RMP	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES			
		signal/bruit	Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Granitoïde de Ploufragan	MAUD02	1.09	0.10	1.12	0.12			
<b>Moyenne</b>			<b>0.10</b>	<b>1.12</b>	<b>0.12</b>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Migmatites de Guingamp	MAUD03A	2.69	2.36	3.03	1.56	6.35	8.14	4.19
Migmatites de Guingamp	MAUD04A	2.11	1.03	1.00	0.23	2.17	2.11	0.48
<b>Moyenne</b>			<b>1.69</b>	<b>2.01</b>	<b>0.89</b>	<b>1.77</b>	<b>2.14</b>	<b>0.97</b>
Granite porphyroïde de Quintin	MAUD05A	1.04	0.42	0.56	0.56	0.44	0.58	0.58
Granite porphyroïde de Quintin	MAUD06	0.86	0.10	0.96	0.37	0.09	0.82	0.32
<b>Moyenne</b>			<b>0.26</b>	<b>0.76</b>	<b>0.46</b>	<b>0.27</b>	<b>0.74</b>	<b>0.47</b>
Granite clair de Quintin	MAUD07	1.18	1.30	1.55	0.14	1.54	1.83	0.17
Granite clair de Quintin	MAUD08	1.17	0.68	0.68	0.03	0.80	0.80	0.04
<b>Moyenne</b>			<b>0.99</b>	<b>1.12</b>	<b>0.09</b>	<b>0.99</b>	<b>1.12</b>	<b>0.09</b>
Monzogranite à biotite de Quintin	MAUD09	1.45	0.10	0.98	0.20	0.15	1.42	0.29
Monzogranite à biotite de Quintin	MAUD10	1.25	0.30	2.23	0.28	0.38	2.79	0.35
<b>Moyenne</b>			<b>0.20</b>	<b>1.61</b>	<b>0.24</b>	<b>0.19</b>	<b>1.56</b>	<b>0.24</b>

Tableau 11 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche)

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

Géologie	RMP	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES			
		signal/bruit	Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Gabbros de St-Jean	DOUR01	1.12	1.69	4.42	?	1.90	4.95	?
Gabbros de St-Jean	DOUR02	0.99	1.11	1.41	0.22	1.10	1.40	0.22
<b>Moyenne</b>			<b>1.40</b>	<b>2.91</b>	<b>0.22</b>	<b>1.42</b>	<b>3.01</b>	<b>0.22</b>
Formation de l'Armorique	DOUR03	2.02	0.30	1.02	0.17			
<b>Moyenne</b>			<b>0.30</b>	<b>1.02</b>	<b>0.17</b>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Formation de Garlan	DOUR04	1.49	0.45	1.61	0.74	0.67	2.39	1.11
Formation de Garlan	DOUR05	1.36	0.20	1.44	1.12	0.27	1.96	1.52
Formation de Garlan	DOUR11	1.13	0.67	0.73	0.52	0.76	0.83	0.59
<b>Moyenne</b>			<b>0.44</b>	<b>1.26</b>	<b>0.79</b>	<b>0.43</b>	<b>1.30</b>	<b>0.81</b>
Schistes et quartzites de Plouigneau	DOUR06	1.35	-	2.33	0.77	-	3.14	1.04
Schistes et quartzites de Plouigneau	DOUR07A	0.98	0.15	2.13	0.15	0.15	2.09	0.14
<b>Moyenne</b>			<b>0.15</b>	<b>2.23</b>	<b>0.46</b>	<b>0.15</b>	<b>2.24</b>	<b>0.51</b>
Granite du Runiou	DOUR08	1.49	0.70	2.24	0.11			
<b>Moyenne</b>			<b>0.70</b>	<b>2.24</b>	<b>0.11</b>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Amphibolites Paléozoïque	DOUR09	2.3	0.74	3.20	0.89			
<b>Moyenne</b>			<b>0.74</b>	<b>3.20</b>	<b>0.89</b>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Granite de Coat-Lescoat	DOUR10	1.29	1.48	0.69	0.85			
<b>Moyenne</b>			<b>1.48</b>	<b>0.69</b>	<b>0.85</b>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Tableau 12 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Dourduff)

- ? : 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
- : le sondage RMP nommé DOUR06 n'a pas recoupé d'altérites

Géologie	RMP	signal/bruit	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES		
			Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Formation du Grès armoricain	YVEL01	1.64	0.71	0.51	0.50	1.17	0.84	0.83
Formation du Grès armoricain	YVEL02	4.99	3.62	2.76	0.36	18.08	13.77	1.81
<b>Moyenne</b>			<b>2.17</b>	<b>1.64</b>	<b>0.43</b>	<b>2.90</b>	<b>2.20</b>	<b>0.40</b>
Formation de Pont-Réan (siltites rouges)	YVEL03	1.23	-	0.35	0.06	-	0.43	0.08
Formation de Pont-Réan (siltites rouges)	YVEL04	1.12	-	0.35	0.10	-	0.39	0.11
<b>Moyenne</b>			<b>-</b>	<b>0.35</b>	<b>0.08</b>	<b>-</b>	<b>0.35</b>	<b>0.08</b>
Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)	YVEL05	3.9	1.83	1.73	?	7.15	6.75	?
Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)	YVEL06	1.83	0.35	0.54	0.48	0.65	0.99	0.87
<b>Moyenne</b>			<b>1.09</b>	<b>1.14</b>	<b>0.48</b>	<b>1.36</b>	<b>1.35</b>	<b>0.48</b>
Briovérien : pélites et grès grossiers	YVEL07	2.71	1.38	1.40	1.41	3.75	3.78	3.81
Briovérien : pélites et grès grossiers	YVEL08	1.56	0.58	0.79	1.18	0.90	1.23	1.85
<b>Moyenne</b>			<b>0.98</b>	<b>1.09</b>	<b>1.29</b>	<b>1.09</b>	<b>1.18</b>	<b>1.33</b>
Briovérien : pélites fines et grès fins	YVEL09	2.7	1.62	1.13	0.42	4.37	3.05	1.14
Briovérien : pélites fines et grès fins	YVEL10	1.51	0.55	0.90	0.40	0.83	1.36	0.61
<b>Moyenne</b>			<b>1.08</b>	<b>1.02</b>	<b>0.41</b>	<b>1.23</b>	<b>1.05</b>	<b>0.42</b>

Tableau 13 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Yvel)

Géologie	RMP	signal/bruit	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES		
			Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST01	3.95	4.98	?	?	19.69	?	?
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST03	2.48	2.08	4.12	2.69	5.16	10.21	6.66
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST04	1.13	1.82	?	?	2.06	?	?
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST05	1.16	1.98	1.00	0.68	2.29	1.17	0.79
Briovérien : pélites fines et grès fins	OUST06	1.77	2.23	2.43	?	3.95	4.29	?
<b>Moyenne</b>			<b>2.62</b>	<b>2.52</b>	<b>1.68</b>	<b>3.16</b>	<b>2.90</b>	<b>2.05</b>
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST02	1.91	2.54	2.62	1.35	4.84	5.00	2.58
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST07	2.43	5.15	3.01	1.32	12.53	7.31	3.21
Briovérien : pélites et grès grossiers	OUST08	1.39	0.84	3.15	?	1.17	4.38	?
<b>Moyenne</b>			<b>2.84</b>	<b>2.93</b>	<b>1.33</b>	<b>3.24</b>	<b>2.91</b>	<b>1.33</b>
Briovérien : pélites fines	OUST10	1.07	0.77	1.60	0.49			
<b>Moyenne</b>			<b>0.77</b>	<b>1.60</b>	<b>0.49</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>	<b>ns</b>

Tableau 14 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Oust)

? : les teneurs en eau de l'horizon fissuré supérieur et 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

Ces tableaux permettent de classer les formations géologiques des bassins versants par ordre de teneurs en eau décroissantes de la manière suivante :

- **Bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche :**

- Les Migmatites de Guingamp, avec des teneurs en eau de 1,8 % pour les arènes, 2,1 % pour l'horizon fissuré supérieur et 1,0 % pour l'horizon fissuré inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'arène est sablo-argileuse à grain moyen et donc poreuse, et l'horizon fissuré, issu de l'altération de la biotite dominante dans une roche à grain moyen, a également une teneur en eau non négligeable ; Ceci s'explique également par un pendage de foliation fréquemment élevé (> 45°) favorisant l'expression de joints d'altération bien ouverts ;
- Le Granite clair de Quintin : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 1,0 %, 1,1 % et 0,1 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; l'arène est argilo-sableuse (altération des minéraux de muscovite dominante et de feldspath plagioclase), et l'horizon fissuré est peu riche en eau en raison d'une roche à grains moyens (parfois fins) et en raison de la faible abondance de biotite ;
- Le Monzogranite à biotite de Quintin vient ensuite avec respectivement 0,2 %, 1,6 % et 0,2 % ; l'arène est argileuse (altération des minéraux de biotite et de plagioclase) et l'horizon fissuré est légèrement plus riche en eau que celui du Granite clair ; cette porosité en grand s'explique par la présence de biotite entraînant une fissuration horizontale du granite ;
- Le Granite porphyroïde à biotite de Quintin présente des teneurs en eau relativement faibles pour un granite (0,3 %, 0,7 % et 0,5 %) liées à une arène argileuse et un horizon fissuré peu poreux ; cette formation est proche du Monzogranite à biotite malgré une fissuration un peu plus faible liée à des fissures horizontales plus resserrées ;
- Le Granitoïde de Ploufragan présente des teneurs en eau faibles (0,1 %, 1,1 % et 0,1 %), dues à la faible taille du grain de la roche et à une arène très argileuse (altération des minéraux de biotite et de feldspath plagioclase).

Les teneurs en eau des trois faciès du Granite de Quintin présents sur les deux bassins versants sont faibles par rapport à d'autres formations granitiques bretonnes (Massifs de Kersaint et Huelgoat). Ceci s'explique par des cristaux de biotite peu abondants et de faible taille entraînant une fissuration plus faible que dans les autres formations granitiques.

- **Bassin du Dourduff :**

- Les Amphibolites Paléozoïque, avec des teneurs en eau de 0,7 % pour les arènes, 3,2 % pour l'horizon fissuré supérieur et 0,9 % pour l'horizon fissuré

inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'arène silto-argileuse est un peu poreuse, et l'horizon fissuré a une teneur en eau importante ;

- Les Gabbros de St-Jean : ce faciès vient en deuxième position (quasi ex æquo) avec des teneurs en eau de 1,4 %, 3,0 % et 0,2 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; l'arène sablo-argileuse a des teneurs en eau plus importantes que les Amphibolites Paléozoïque, et l'horizon fissuré est riche en eau en raison de l'importance de la biotite dans une roche à gros grains ;
- Le Granite du Runiou vient ensuite avec respectivement 0,7 %, 2,2 % et 0,1 % ; l'horizon fissuré étant plus riche en eau que les altérites argilo-sableuses ; cette porosité en grand s'explique par la nature cataclastique de la roche et la présence en biotite en quantité non négligeable (fissuration horizontale) ;
- Le Granite de Coat-Lescoat présente des teneurs en eau de 1,5 %, 0,7 % et 0,9 % ; les altérites sont des arènes sableuses peu argileuses relativement riches en eau (meilleure teneur en eau du bassin) et l'horizon fissuré est moins poreux que le Granite du Runiou puisque la roche présente une faible teneur en biotite (peu de fissuration horizontale) ;
- Les Schistes et quartzites de Plouigneau présentent des teneurs en eau plus faibles (0,2 %, 2,2 % et 0,5 %) ; les altérites sont argileuses (plus faible teneur en eau du bassin) et l'horizon fissuré a une teneur en eau moyenne liée à sa fracturation non négligeable (alternances de bancs massifs de schistes et quartzites) ; malgré une faible épaisseur, l'horizon fissuré supérieur a une teneur en eau non négligeable ;
- La Formation de Garlan présente des faciès variés (arkoses, quartzites, schistes, grès...) mais assez homogènes en terme de teneurs en eau (0,4 %, 1,3 % et 0,8 %) ; les altérites argileuses parfois argilo-sableuses (grès) ont une teneur en eau faible et l'horizon fissuré est moyennement riche en eau en raison d'une présence de roches à fracturation très resserrée (débit en dalle des schistes verts) malgré quelques faciès plus fracturés (arkoses notamment) ;
- La Formation de l'Armorique (laves et tufs) présente les teneurs en eau les plus faibles du bassin (0,3 %, 1,0 % et 0,2 %) liées à une altérite très argileuse (roche microgrenue peu siliceuse à biotite) et un horizon fissuré pauvre en eau en raison d'une roche à grains fins et d'une schistosité assez serrée.

Les teneurs en eau des Schistes et quartzites de Plouigneau sont semblables à celles obtenues au niveau de la Rade de Brest dans les Schistes et quartzites de Plougastel.

- **Bassin de l'Yvel :**

- La Formation du Grès armoricain (grès quartzitiques, interbancs de psammites quasi absents), avec des teneurs en eau de 2,9 % pour les altérites, 2,2 % pour

l'horizon fissuré supérieur et 0,4 % pour l'horizon fissuré inférieur (\*), est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'altérite argilo-sableuse avec quelques blocs de grès résiduels est moyennement poreuse, et l'horizon fissuré a également une teneur en eau moyenne liée à sa fracturation importante (origine tectonique probable) ;

- Les pélites et grès grossiers briovériens : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 1,1 %, 1,2 % et 1,3 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; les altérites sont sableuses et argileuses, et l'horizon fissuré est moyennement riche en eau en raison d'une roche à grains fins et d'une fracturation diffuse plus faible ; les teneurs en eau augmentent très légèrement en profondeur, ce qui pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité lithologique (niveaux gréseux plus riches en eau) ;
- Les siltites du Briovérien viennent ensuite avec respectivement 1,4 %, 1,4 % et 0,5 % ; les altérites sont très argileuses et localement plus sableuses (bancs de grès) ;
- Les pélites fines et grès fins briovériens présentent des teneurs en eau de 1,2 %, 1,1 % et 0,4 % ; cette formation est très proche des pélites et grès grossiers ;
- Les siltites rouges ne présentent pas d'altérites et les formations fissurées ont des teneurs en eau très faibles (0,4 % et 0,1 %) ; ceci s'explique par la rareté d'une fracturation nette dans la roche.

Les teneurs en eau des trois formations briovériennes sont assez semblables, néanmoins les siltites ont un horizon fissuré supérieur légèrement plus fracturé procurant une porosité en grand légèrement plus forte par rapport aux autres formations. Ceci peut s'expliquer par le débit local en « baïonnette » des bancs s'opposant au délitage fin des pélites.

Les altérites des formations briovériennes sont des argiles avec des passages plus ou moins consolidés et sablonneux pour les niveaux les plus gréseux.

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

- **Bassin de l'Oust :**

- Les pélites fines et grès fins briovériens, avec des teneurs en eau de 3,2 % pour les altérites, 2,9 % pour l'horizon fissuré supérieur et 2,1 % pour l'horizon fissuré inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; les altérites, argilo-sableuses avec quelques blocs de schistes résiduels friables, sont moyennement poreuses, et l'horizon fissuré a également une teneur en eau moyenne liée à sa fracturation non négligeable ;

- Les pélites et grès grossiers briovériens : ce faciès vient en deuxième position (quasi ex æquo) avec des teneurs en eau de 3,2 %, 2,9 % et 1,3 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; les altérites sont argileuses (altération des pélites) et sableuses (altération des grès) ; cette formation est très proche des pélites et grès fins ;
- Les pélites fines du Briovérien présentent des teneurs en eau plus faibles de 0,8 %, 1,6 % et 0,5 % ; les altérites sont très argileuses.

Les deux premières formations (pélites et grès fins/grossiers) ont un horizon fissuré un peu plus fracturé procurant une porosité en grand légèrement plus importante par rapport aux pélites fines. Ceci est observable au niveau des affleurements des roches saines où on observe notamment que les pélites fines sont plus compactes (taille des grains et vides intergranulaires plus petits et fracturation moins ouverte).

Les formations briovériennes du bassin de l'Oust contiennent plus d'eau que celles du bassin de l'Yvel.

Les sondages RMP OUST01 et OUST06 (cf. annexe 1) montrent de fortes teneurs en eau au niveau de l'horizon fissuré (17 et 6 %) qui s'expliquent par un couloir de fracturation drainant existant localement à 20 m de profondeur.

Le sondage OUST04 (cf. annexe 1) est quant à lui situé aux abords immédiats d'un filon de quartz qui procure un transit facilité de l'eau le long du contact filon/pélites où la roche est localement plus fracturée.

En raison de l'aspect très local de ces phénomènes, la cartographie des volumes d'eau souterraine ne les prendra pas en compte.

## 5.2. CALCUL DE LA CARTE DE LA RÉSERVE EN EAU SOUTERRAINE

Pour chaque 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).

### ***Bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche***

Sur les 35.4 km<sup>2</sup> renseignés des bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche (superficies : 28.6+6.8 km<sup>2</sup>), les altérites (planche 33) contiennent globalement un stock d'eau souterraine assez faible totalisant environ 0.2 millions de m<sup>3</sup>, dû au faible degré d'enneigement des altérites dans la nappe, malgré des lames d'eau atteignant localement 0,25 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 34) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 6.2 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,36 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 35) contient un stock d'eau un peu moins important : 4.0 millions de m<sup>3</sup>, pour une lame d'eau maximale de 0,26 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 36) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 10.4 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau maximale de 0,88 m.

### ***Bassin versant du Dourduff***

Sur les 43.9 km<sup>2</sup> renseignés du bassin versant du Dourduff (superficie 45 km<sup>2</sup>), les altérites (planche 37) contiennent globalement un stock d'eau souterraine totalisant environ 0.4 millions de m<sup>3</sup>, avec des lames d'eau atteignant localement 0,13 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 38) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 9.5 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,65 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 39) contient un stock d'eau un peu moins important : 6.8 millions de m<sup>3</sup>, pour une lame d'eau maximale de 0,28 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 40) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 16.7 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau maximale de 0,98 m.

### ***Bassin versant de l'Yvel***

Sur les 53.8 km<sup>2</sup> renseignés du bassin versant de l'Yvel (superficie 54 km<sup>2</sup>), les altérites (planche 41) contiennent globalement un stock d'eau souterraine assez faible

totalisant environ 0.1 millions de m<sup>3</sup>, dû au faible degré d'enneigement des altérites dans la nappe, malgré des lames d'eau atteignant localement 0,11 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 42) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 6.0 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,48 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 43) contient un stock d'eau un peu moins important : 5.2 millions de m<sup>3</sup>, pour une lame d'eau maximale de 0,23 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 44) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 11.3 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau maximale de 0,64 m.

### ***Bassin versant de l'Oust***

Sur les 55 km<sup>2</sup> renseignés du bassin versant de l'Oust (superficie 55 km<sup>2</sup>), les altérites (planche 45) contiennent globalement un stock d'eau souterraine totalisant environ 3.0 millions de m<sup>3</sup>, avec des lames d'eau atteignant localement 0,93 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 46) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 13.5 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,56 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 47) contient un stock d'eau un peu moins important : 15.8 millions de m<sup>3</sup>, pour une lame d'eau maximale de 0,43 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 48) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 32.3 millions de m<sup>3</sup>, avec une lame d'eau maximale de 1,89 m.

## **5.3. DISCUSSION ET COMMENTAIRES**

### **5.3.1. Epaisseur des aquifères des bassins versants**

La lame d'eau souterraine est calculée :

- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 41.80 m, et saturé sur 38.85 m en moyenne, sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche ;
- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 42.63 m, et saturé sur 39.15 m en moyenne, sur le bassin du Dourduff ;
- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 37.42 m, et saturé sur 33.82 m en moyenne, sur le bassin de l'Yvel ;
- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 33.87 m, et saturé sur 29.01 m en moyenne, sur le bassin de l'Oust.

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 les bassins versants**

#### ***Répartition géographique***

Au sein de chaque bassin versant, 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 :

- sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche (ordre décroissant) : les Migmatites de Guingamp au Nord, et le Granite clair de Quintin au Centre ;
- sur le bassin du Dourduff (ordre décroissant) : les Amphibolites Paléozoïque au Sud-Est, et les Gabbros de St-Jean au Nord ;
- sur le bassin de l'Yvel (ordre décroissant) : la Formation du Grès armoricain à l'Est, les pélites et grès grossiers du Briovérien au Nord et au Sud ;
- sur le bassin de l'Oust (ordre décroissant) : les pélites fines et grès fins, et les pélites et grès grossiers du Briovérien sur tout le bassin.

Les formations comprenant un peu moins de réserve sont :

- sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche (ordre décroissant) : le Monzogranite à biotite au Centre puis le Granite porphyroïde de Quintin au Centre et au Sud, et le Granitoïde de Ploufragan au Nord-Est ;
- sur le bassin du Dourduff (ordre décroissant) : la Formation de Garlan au Centre, les Schistes et quartzites de Plouigneau au Sud, les granites de Coat-Lescoat et du Runiou, et la Formation de l'Armorique au Nord ;
- sur le bassin de l'Yvel (ordre décroissant) : les pélites fines et grès fins du Briovérien au Nord et au Sud, les « Dalles de Néant » (siltites du Briovérien) au Centre, et les siltites rouges de la Formation de Pont-Réan à l'Est ;
- sur le bassin de l'Oust (ordre décroissant) : les pélites fines du Briovérien sur le bassin.

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

Sur les bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche, et de l'Yvel, la répartition de l'eau souterraine au sein de l'aquifère multicouches montre qu'environ 98-99 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré (60 % dans l'horizon fissuré supérieur, 38 % dans l'horizon fissuré inférieur, et 2 % dans les altérites pour la Maudouve et la Noë Sèche, et respectivement 53 %, 46 % et 1 % pour l'Yvel).

Ceci est principalement lié à la meilleure préservation de l'horizon fissuré, les altérites ayant été plus largement érodées sur les bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche et de l'Yvel (épaisseurs moyennes faibles de 1.2 m la Maudouve et la Noë Sèche et 0.6 m sur l'Yvel, et répartition inégale sur les bassins versants), ainsi que par la position de la surface piézométrique au sein des horizons d'altération. En effet, sur 81 % du bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche et 93 % du bassin de l'Yvel, la surface piézométrique se situe au sein de l'horizon fissuré (contre 19 % et 7 % pour les altérites de la Maudouve et de la Noë Sèche et de l'Yvel).

A l'inverse, sur les bassins versants du Dourduff et de l'Oust cette érosion des altérites est nettement moins importante (épaisseurs moyennes 3 et 3.7 m) ; la surface piézométrique étant à 33 et 25 % comprise dans les altérites. Par ailleurs, 9 % de la réserve en eau souterraine de l'Oust est contenue dans les altérites (42 % dans l'horizon fissuré supérieur, 49 % dans l'horizon fissuré inférieur).

Sur le bassin du Dourduff, seulement 2 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans les altérites (57 % dans l'horizon fissuré supérieur, 41 % dans l'horizon fissuré inférieur). Cette différence (par rapport au bassin de l'Oust) s'explique par la plus faible teneur en eau des altérites du Dourduff (entre 0.2 et 1.4 % ; celles de l'Oust atteignent 3 %).

Sur ces bassins versants, la quantité d'eaux souterraines contenue à proximité des couloirs de fracturation est considérée comme négligeable par rapport à la quantité présente dans l'aquifère d'altération.

Par ailleurs, il existe vraisemblablement des eaux souterraines en dessous de l'horizon fissuré inférieur caractérisé par la méthode (cf. 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.

## 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 les bassins versants étudiés, 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-51891-FR) a permis, pour chaque bassin versant, 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 Migmatites de Guingamp situées à l'aval du bassin de la Maudouve ; les résultats statistiques des autres formations géologiques présentaient un intérêt moins important : les trois Granites de Quintin et les Granitoïdes de Ploufragan ;
- dans les formations situées à l'amont du bassin du Dourduff, avec par intérêt décroissant : les Schistes et quartzites de Plouigneau, le Granite de Coat-Lescoat, et les Amphibolites Paléozoïque ; les résultats statistiques des autres formations géologiques présentaient un intérêt moins important : Formation de Garlan, Gabbros de St-Jean et Formation de l'Armorique ;
- des trois formations briovériennes situées au Centre et à l'Ouest du bassin de l'Yvel, mais aussi de la Formation du Grès armoricain à l'Est ; les résultats statistiques de la Formation de Pont-Réan (siltites rouges) présentaient un intérêt moins important ;
- des pélites et grès grossiers et des pélites fines situées un peu partout sur le bassin de l'Oust ; les résultats statistiques des pélites fines et grès fins présentaient un intérêt moins important.

La répartition des réserves en eau souterraine (cf. chapitre 5.3.2.) et la perméabilité relative des formations géologiques, caractérisée par l'intérêt hydrogéologique de ces dernières (cf. ci-dessus), font apparaître des formations géologiques intéressantes pour la recherche d'eau souterraine (cf. planches 36, 40, 44 et 48) :

- sur le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche (ordre décroissant) : les Migmatites de Guingamp au Nord, et le Granite clair de Quintin au Centre ;

- sur le bassin du Dourduff (ordre décroissant) : les Amphibolites Paléozoïque au Sud-Est, la Formation de Garlan au Centre et éventuellement les Gabbros de St-Jean au Nord ;
- sur le bassin de l'Yvel (ordre décroissant) : les pélites et grès grossiers du Briovérien au Nord et au Sud ;
- sur le bassin de l'Oust (ordre décroissant) : les pélites et grès grossiers du Briovérien, et les pélites fines et grès fins sur tout le bassin.

Parmi les formations géologiques présentes sur les bassins versants étudiés, ces formations offrent des réserves en eau souterraine qui semblent intéressantes et des perméabilités 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 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), 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. La figure 18 montre les résultats de cette étude (le « 0 » indique la direction du Nord géographique) :

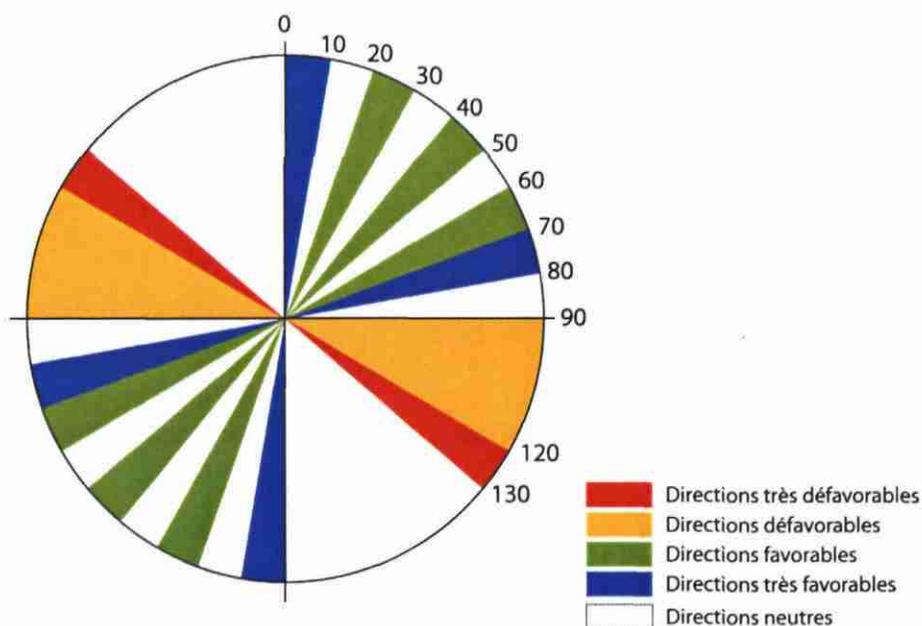


Figure 18 - Rosace des familles d'orientations favorables/défavorables sur la Bretagne

### Application au projet SILURES Bassins Versants

Les discontinuités géophysiques (magnétisme et spectrométrie) issues d'un tracé automatique réalisé à une échelle détaillée ont été extraites sur les bassins versants étudiés. Les figures 19 et 20 (Maudouve-Noë Sèche et Dourduff, Yvel et Oust) montrent les résultats de ce travail.

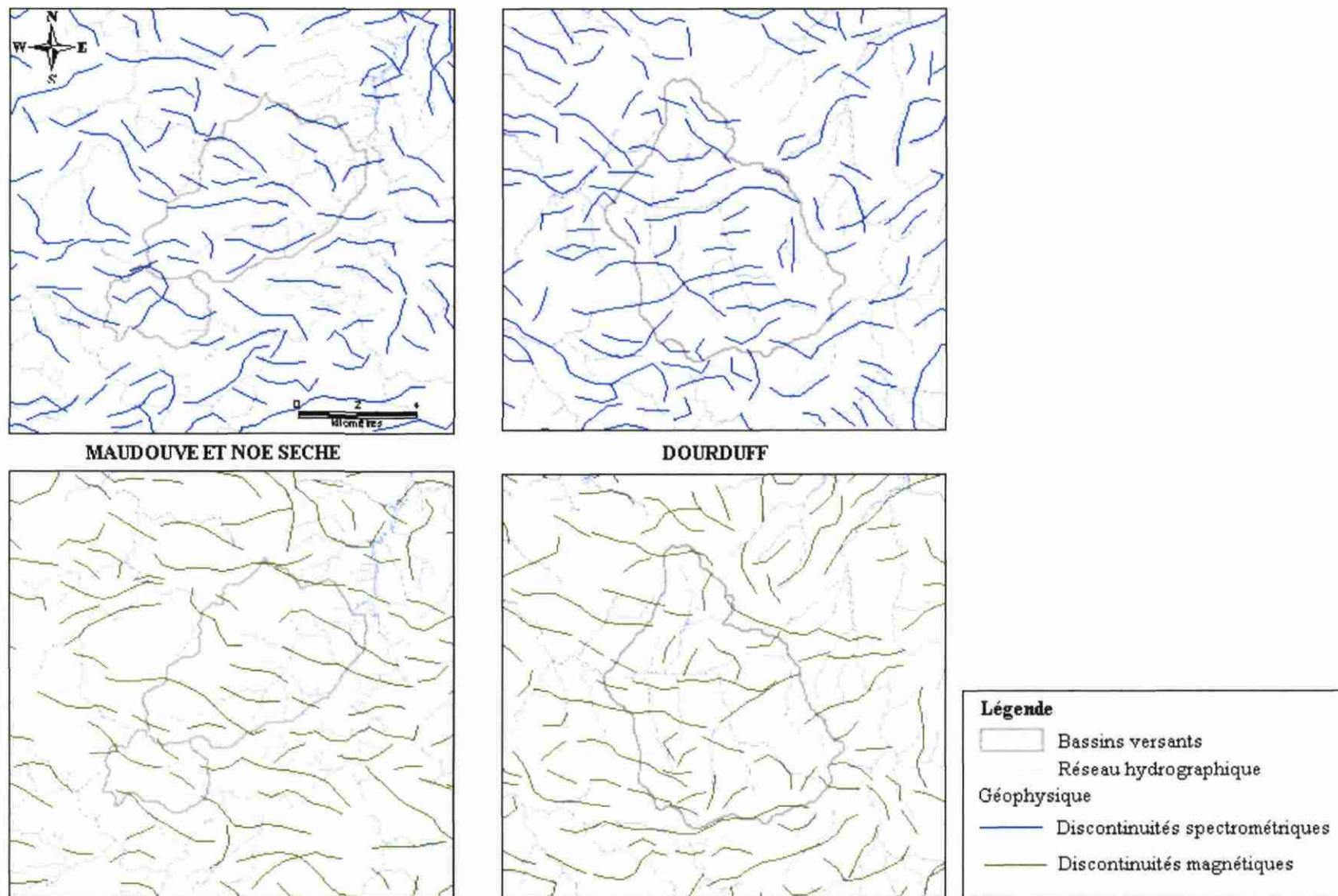


Figure 19 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur les bassins de la Maudouve-Noë Sèche et du Dourduff

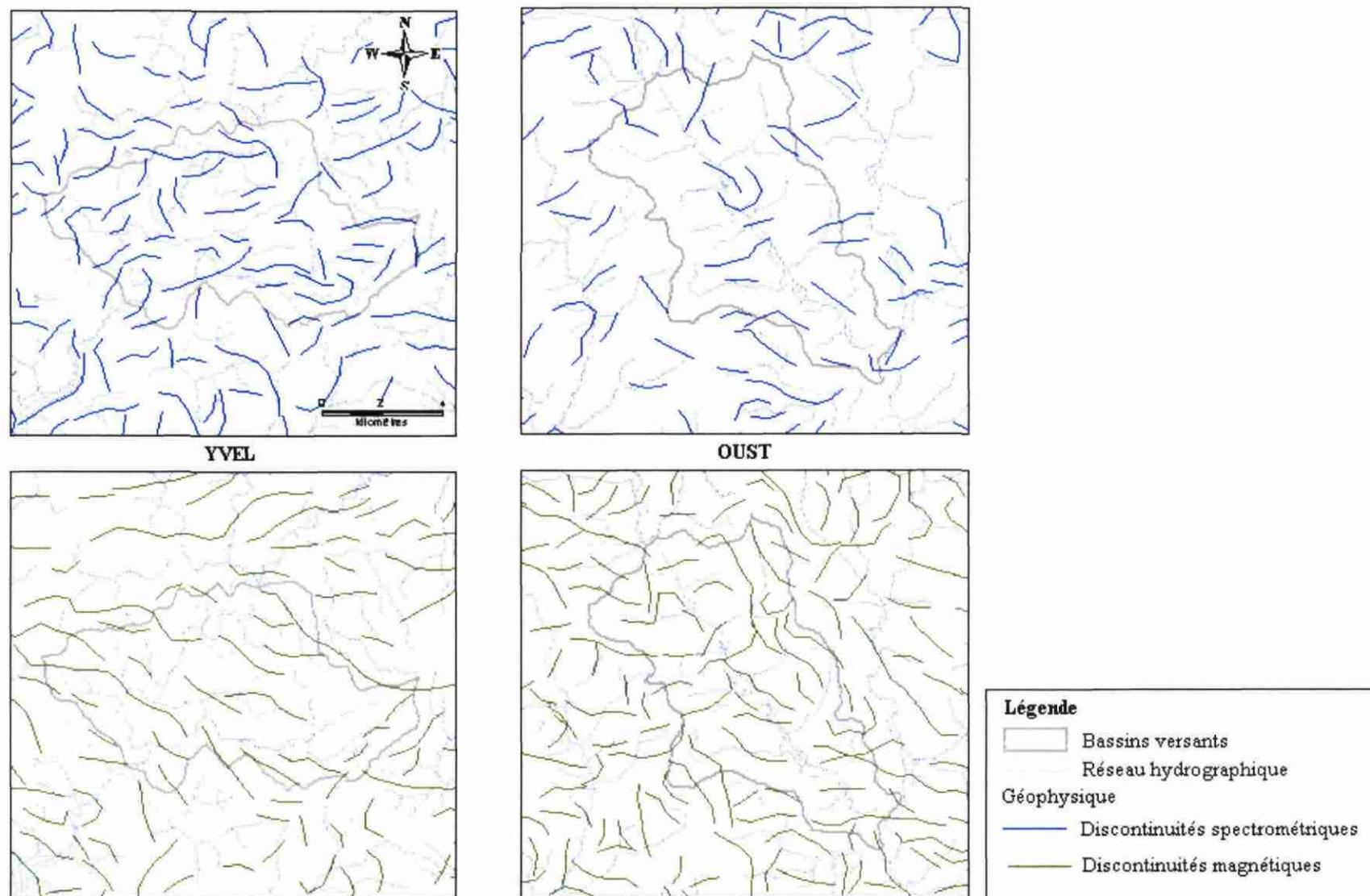


Figure 20 - Résultats de l'analyse structurale automatique détaillée sur les bassins de l'Yvel et de l'Oust

Sur chaque bassin versant, les discontinuités ont été corrélées entre elles et avec les linéaments tracés à partir des Modèles Numériques de Terrain (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 aux cartes des lames d'eau totale des bassins étudiés (Cf. planches 49, 50, 51 et 52 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust)).

Ces planches ont 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. figure 18) et recoupant des zones de ressource en eau maximale.

### ***Description des zones favorables***

#### **Bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche (cf. planche 49)**

La formation géologique la plus riche en eau (Migmatites de Guingamp) n'est recoupée que par des discontinuités orientées à N100-120 défavorables à l'implantation de forage d'eau.

Les zones favorables à l'implantation de forage d'eau sont situées dans le Granite clair de Quintin (2<sup>ème</sup> formation plus riche en eau) à proximité de discontinuités sensées être neutres régionalement (orientées à N30-40 et N130-140) non distinguables sur le terrain donc pas représentées sur la carte géologique.

Les secteurs favorables sont donc localisés (par ordre de priorité, et du Nord au Sud) : à côté du « Petit Branguais » où la discontinuité est perpendiculaire à une vallée, vers « St-Adrien » où la discontinuité prolonge une vallée, et à proximité de « Malher ». Aucun forage n'est recensé dans ces trois secteurs.

#### **Bassin du Dourduff (cf. planche 50)**

La zone la plus favorable à l'implantation de forage d'eau est située au Nord du bassin dans les Gabbros de St-Jean (2<sup>ème</sup> formation plus riche en eau) à proximité d'une discontinuité supposée être neutre régionalement (orientée à N140-150) non distinguable sur le terrain. Le secteur est localisé à l'Ouest de Lanmeur près du lieu-dit « Rupulven ». Un forage à bon débit (30 m<sup>3</sup>/h à 25 m) est d'ailleurs recensé à « Ruvarc » au Nord de cette zone.

La formation géologique la plus riche en eau (Amphibolites Paléozoïque) est recoupée par une discontinuité orientée à N140-150 (neutre à l'implantation de forage d'eau) marquant une vallée faillée au Sud du bassin. La 2<sup>ème</sup> zone favorable est située dans la formation géologique près de « Lannigou ». Deux forages à bon débit (72 m<sup>3</sup>/h à 52.5 m, 50 m<sup>3</sup>/h à 63 m) sont recensés au Sud du périmètre de 400 m autour de la discontinuité.

Régionalement les discontinuités orientées à N0-10 sont favorables ; une de ces discontinuités marque une vallée faillée sur La Formation de Garlan (3<sup>ème</sup> formation plus riche en eau) au Sud de Plouégat-Guérand près de « Quinquis » à l'Est du bassin. Un forage à débit correct (10 m<sup>3</sup>/h à 46 m) est recensé au Sud de cette 3<sup>ème</sup> zone favorable.

### **Bassin de l'Yvel (cf. planche 51)**

Sur le secteur d'étude, la formation géologique la plus riche en eau (Formation du Grès armoricain) n'est pas recoupée par une discontinuité drainante.

Deux zones favorables à l'implantation de forage d'eau sont situées dans les pélites et grès grossiers du Briovérien (2<sup>ème</sup> formation plus riche en eau, au Nord du bassin) à proximité de discontinuités sensées être favorables régionalement (orientées à N40-50), non distinguables sur le terrain donc pas représentées sur la carte géologique. La zone la plus favorable est localisée au Sud du Bois de la Roche vers « Vausserin », aux alentours d'une discontinuité perpendiculaire à la vallée. La 2<sup>ème</sup> zone favorable est située au Sud-Est de Guillers et marque une vallée faillée. Un seul forage a débit moyen (10 m<sup>3</sup>/h à 62 m) est recensé dans la 1<sup>ère</sup> zone.

Au niveau de « la Ville aux Feuves » dans les pélites fines et grès fins du Briovérien (3<sup>ème</sup> formation plus riche en eau, au Centre du bassin), une discontinuité orientée à N40-50 (favorable régionalement) a été repérée. Elle marque une 3<sup>ème</sup> zone favorable, perpendiculaire à la vallée. Elle reste moins intéressante car sa partie Sud est à cheval sur la Formation de Pont-Réan (formation la plus pauvre en eau du bassin).

### **Bassin de l'Oust (cf. planche 52)**

Le bassin de l'Oust est recoupé par peu de discontinuités drainantes. Les zones favorables à l'implantation de forage d'eau sont situées au Nord-Est du secteur d'étude à proximité du bassin versant. Ces zones sont délimitées par un périmètre de 400 m autour de trois discontinuités orientées à N40-50 (favorables régionalement).

La zone la plus favorable à l'implantation de forage d'eau est située dans les pélites fines et grès fins du Briovérien (formation géologique la plus riche en eau) au Nord du bassin près de « La Gourhan » et du « Tertre ». La discontinuité n'est pas distinguable sur le terrain et n'est donc pas représentée par une faille sur la carte géologique

Les 2 autres zones favorables sont voisines (à côté des lieux-dits « la Noë Blanche » et « Coëthuan »). Les discontinuités qui délimitent les zones sont perpendiculaires à la vallée et sont orientées à N40-50 (favorable régionalement). Ces zones comportent cependant moins d'eau que la 1<sup>ère</sup> zone favorable (les pélites fines du Briovérien étant moins riches en eau).

Aucun forage n'est recensé dans ces trois zones favorables.

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

### 6.2.1. Estimation des temps de transfert

#### *Estimation des temps de vidange de l'aquifère*

Pour estimer le temps de vidange des aquifères sur chacun des 4 bassins versants étudiés, il faut rapporter le volume de la réserve en eau souterraine au débit souterrain sortant de chaque bassin.

La participation des eaux souterraines au débit des rivières a été modélisée dans le cadre des deux premières années du projet SILURES Bretagne (rapports BRGM/RP-51481-FR et BRGM/RP-52825-FR) ; la figure 21 localise la superposition des bassins étudiés (en rouge) sur les bassins modélisés (en fond gris) au droit des stations hydrométriques (en vert). Les bassins modélisés sont les suivants :

- bassin versant de la Maudouve au droit de la station de Saint-Donan (J1524010, superficie de 24.2 km<sup>2</sup>), bassin versant de la Noë Sèche au droit de la station de Quintin (superficie de 8.1 km<sup>2</sup>),
- bassin versant du Dourduff au droit de la station de Garlan (J2514010, superficie de 45 km<sup>2</sup>),
- bassin versant de l'Yvel au droit de la station de Loyat (J8363110, superficie de 315 km<sup>2</sup>),
- et bassin versant de l'Oust au droit de la station de Pleugriffet [La Tertraie] (J8202310, superficie de 929 km<sup>2</sup>).

La délimitation des bassins de la Maudouve, de la Noë Sèche et du Dourduff modélisés sont identiques aux bassins étudiés. Par contre, les bassins de l'Yvel et de l'Oust étudiés sont situés à l'extrémité aval des bassins modélisés.

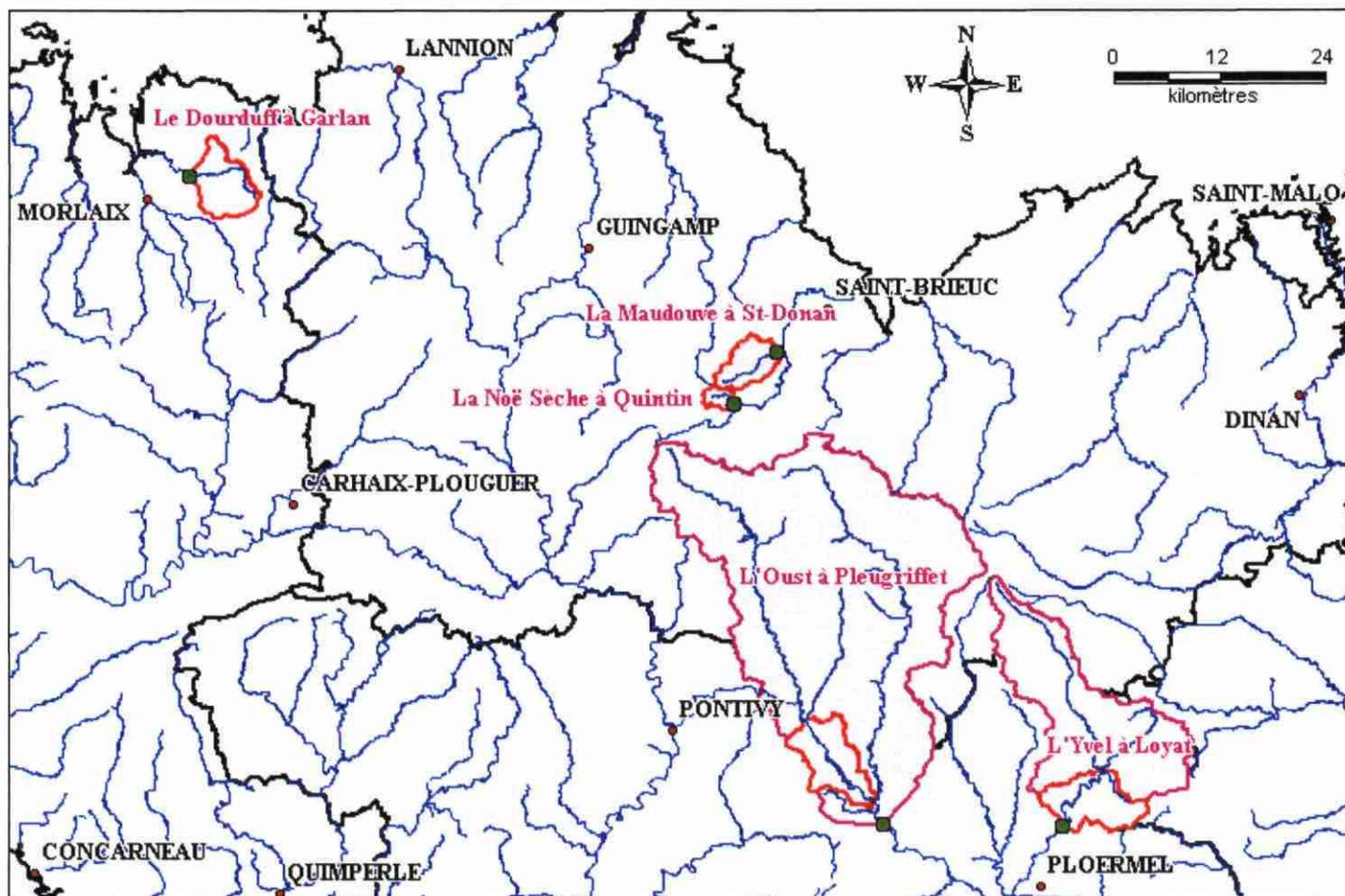


Figure 21 - Localisation des bassins versants étudiés par rapport aux bassins modélisés

Les modélisations du projet SILURES Bretagne permettent de calculer les débits souterrains participant à l'écoulement des rivières. Ces valeurs permettent d'évaluer les volumes d'eaux souterraines évacués annuellement de chaque bassin versant modélisé (cf. tableaux 15, 16, 17 et 18).

**Maudouve**

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	27.8	153.2	181	4380200	3707440
1997	27.1	132.3	159.4	3857480	3201660
1998	82.7	259.9	342.6	8290920	6289580
1999	74.4	324.2	398.6	9646120	7845640
2000	86.1	277.7	363.8	8803960	6720340
<b>Moyenne</b>				6995736	5552932

**Noë Sèche**

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
2000	61.8	291.8	353.6	2864160	2363580
2001	111.7	494.6	606.3	4911030	4006260
2002	19.4	147.9	167.3	1355130	1197990
2003	39.8	263.8	303.6	2459160	2136780
<b>Moyenne</b>				2897370	2426152.5

*Tableau 15 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur les bassins versants de la Maudouve et de la Noë Sèche*

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	72.7	157.6	230.3	10363500	7092000
1997	67.8	142.1	209.9	9445500	6394500
1998	130.4	198.9	329.3	14818500	8950500
1999	227	337.8	564.8	25416000	15201000
2000	237.9	337.1	575	25875000	15169500
<b>Moyenne</b>				17183700	10561500

*Tableau 16 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Dourduff*

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1995	213	146.9	359.9	113368500	46273500
1996	61	75.5	136.5	42997500	23782500
1997	19.6	26.6	46.2	14553000	8379000
1998	109.4	103.6	213	67095000	32634000
1999	97.2	115.3	212.5	66937500	36319500
2000	196.2	181.1	377.3	118849500	57046500
<b>Moyenne</b>				70633500	34072500

*Tableau 17 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Yvel*

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	112.1	147.4	259.5	241075500	136934600
1997	43.1	58.9	102	94758000	54718100
1998	186	185	371	344659000	171865000
1999	174.4	216.8	391.2	363424800	201407200
2000	220.2	239.2	459.4	426782600	222216800
			<b>Moyenne</b>	294139980	157428340

Tableau 18 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Oust

Les volumes moyens interannuels d'eau souterraine renouvelés sont les suivants :

- 5 552 932 m<sup>3</sup> pour la Maudouve (période 1996-2000), et 2 426 152.5 m<sup>3</sup> pour la Noë Sèche (période 2000-2003),
- 10 561 500 m<sup>3</sup> pour le Dourduff (période 1996-2000, superficie 45 km<sup>2</sup>),
- 34 072 500 m<sup>3</sup> pour le bassin complet de l'Yvel (période 1995-2000, superficie 315 km<sup>2</sup>),
- 157 428 340 m<sup>3</sup> pour le bassin complet de l'Oust (période 1996-2000, superficie 929 km<sup>2</sup>).

Pour les bassins de la Maudouve, de la Noë Sèche et du Dourduff, les volumes ont été ajustés à la superficie des bassins étudiés ; les résultats sont les suivants :

- 6 562 556 m<sup>3</sup> pour la Maudouve (superficie 28.6 km<sup>2</sup>), et 2 036 770 m<sup>3</sup> pour la Noë Sèche (superficie 6.8 km<sup>2</sup>),
- 10 303 330 m<sup>3</sup> pour le Dourduff (superficie 43.9 km<sup>2</sup>).

Pour les bassins de l'Yvel et de l'Oust, les volumes ont été rapportés à la superficie des bassins étudiés ; les résultats sont les suivants :

- 5 813 958 m<sup>3</sup> pour l'Yvel (superficie 53.8 km<sup>2</sup>),
- 9 345 719 m<sup>3</sup> pour l'Oust (superficie 55 km<sup>2</sup>).

Cette « règle de trois » est argumentée par la couverture géologique semblable des bassins modélisés et des bassins étudiés.

La cartographie de la réserve en eau souterraine effectuée au chapitre 5.2. a été extraite sur chacun des bassins versants.

Sur le bassin de la Maudouve, la réserve totale de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) représente, sur 100 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 8.8 millions de m<sup>3</sup>, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,308 m. Sur le bassin de la Noë Sèche, la réserve totale de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) représente, sur 100 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 1.6 millions de m<sup>3</sup>, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,237 m.

Sur le bassin du Dourduff, la réserve totale de l'aquifère représente, sur 98.3 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 16.7 millions de m<sup>3</sup>, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,387 m.

Sur le bassin de l'Yvel, la réserve totale de l'aquifère représente, sur 99 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 11.3 millions de m<sup>3</sup>, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,214 m.

Sur le bassin de l'Oust, la réserve totale de l'aquifère représente, sur 99.7 % du bassin renseigné, un volume approximatif d'environ 32.3 millions de m<sup>3</sup>, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,588 m.

En extrapolant les résultats ci-dessus à l'ensemble de la superficie des bassins versants, la réserve en eau souterraine totale est de :

- 8 811 589 m<sup>3</sup> sur les 28.6 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Maudouve, 1 612 839 m<sup>3</sup> sur les 6.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Noë Sèche,
- 16 971 057 m<sup>3</sup> sur les 43.9 km<sup>2</sup> du bassin versant du Dourduff,
- 11 449 738 m<sup>3</sup> sur les 53.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Yvel,
- 32 410 912 m<sup>3</sup> sur les 55 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Oust.

Ces volumes des réserves en eau souterraine existantes sur chaque bassin peuvent être comparés aux volumes moyens renouvelés annuellement (6 562 556 m<sup>3</sup> sur la Maudouve et 2 036 770 m<sup>3</sup> sur la Noë Sèche, 10 303 330 m<sup>3</sup> sur le Dourduff, 5 813 958 m<sup>3</sup> sur l'Yvel et 9 345 719 m<sup>3</sup> pour l'Oust) afin d'estimer les temps de vidange des stock d'eau sur les bassin étudiés.

La réserve totale en eau souterraine :

- du bassin versant modélisé de la Maudouve est donc vidangée en 1 an et 4 mois, et celle du bassin versant modélisé de la Noë Sèche se vidange plus rapidement en 10 mois,
- celle du Dourduff se vidange en 1 an et 8 mois,
- celle de l'Yvel se vidange un peu plus lentement en 2 ans,
- tandis que celle de l'Oust se vidange nettement plus lentement en 3 ans et 6 mois.

### ***Estimation des 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 des planches 5, 6, 7 et 8 (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 2.88 m sur la Maudouve et 3.07 m sur la Noë Sèche, 3.14 m sur le Dourduff, 3.58 m sur l'Yvel et 5.26 m sur l'Oust.

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 chaque bassin, les temps de transit de l'eau entre la surface du sol et la surface de la nappe sont de :

- 1 an et 4 mois pour la Maudouve, et 1 an et 5 mois pour la Noë Sèche,
- 1 an et 6 mois pour le Dourduff,
- 1 an et 8 mois pour l'Yvel,
- 2 ans et 6 mois pour l'Oust.

Les temps de renouvellement de l'eau souterraine qui en découlent (temps de transit de l'eau dans la zone non saturée + temps de vidange de l'aquifère saturé) sont de :

- 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.

Ces temps sont à prendre en compte pour évaluer la durée de reconquête de la qualité de l'eau souterraine et par conséquent de l'eau superficielle.

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

#### ***Participation des eaux souterraines aux débits d'étiage***

Les cartes réalisées donnent une vision probablement correcte de la répartition spatiale des réserves 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 des planches 36, 40, 44 et 48 permet de déduire que, parmi les aquifères présents dans les formations géologiques étudiées :

- c'est l'aquifère contenu dans les Migmatites de Guingamp qui contribue le plus aux débits d'étiage de la Maudouve,
- pour le Dourduff, c'est celui des Amphibolites Paléozoïque et des Gabbros de St-Jean,
- pour l'Yvel, c'est celui des pélites et grès grossiers du Briovérien,
- et ce sont les aquifères des pélites fines et grès fins, et des pélites et grès grossiers du Briovérien qui contribuent le plus aux débits d'étiage de l'Oust.

Afin d'améliorer la qualité chimique de l'eau de la rivière, les mesures préventives susceptibles d'obtenir les meilleurs résultats de reconquête seront à mener principalement dans ces formations géologiques qui sont à protéger vis à vis de l'infiltration de 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 de chaque 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-51891-FR) a permis, pour chaque bassin versant, 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 (parfois regroupées en raison d'un nombre insuffisant de forages, cf. cases grisées du tableau 19) présentes sur les bassins étudiés ont été valorisées par une valeur moyenne de Q/P issue des caractéristiques des forages présents dans chaque formations (ou groupe de formations) géologiques.

Le tableau 19 détaille ce classement.

BV	Géologie	Nbre forages	Q/P (m <sup>3</sup> /h/m)
Maudouve	Granitoïde de Ploufragan	20	0.172
Maudouve	Migmatites de Guingamp	21	0.155
Maudouve	Granite porphyroïde de Quintin	46	0.106
Maudouve	Granite clair de Quintin		0.106
Maudouve	Monzogranite à biotite de Quintin		0.106
Hourduff	Gabbros de St-Jean	10	0.182
Hourduff	Formation de l'Armorique	10	0.136
Hourduff	Formation de Garlan	34	0.161
Hourduff	Schistes et quartzites de Plouigneau	38	0.304
Hourduff	Granite du Runiou	1	-
Hourduff	Amphibolites Paléozoïque	13	0.232
Hourduff	Granite de Coat-Lescoat	9	0.172
Yvel	Formation du Grès armoricain	20	0.198
Yvel	Formation de Pont-Réan (siltites rouges)	27	0.093
Yvel	Briovérien : "Dalles de Néant" (siltites)	68	0.159
Yvel	Pélites et grès grossiers briovériens		0.159
Yvel	Pélites fines et grès fins briovériens		0.159
Oust	Pélites fines et grès fins briovériens	134	0.134
Oust	Pélites et grès grossiers briovériens	22	0.191
Oust	Pélites fines du Briovérien		0.191

Tableau 19 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P

Quatre formations situées sur le bassin du Hourduff ne sont pas suffisamment renseignées (nombre de forages < 20) : Gabbros de St-Jean, Formation de l'Armorique, Amphibolites Paléozoïque et Granite de Coat-Lescoat. Les résultats sur

ces formations seront donc à prendre sous réserve (capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration). Par ailleurs sur le même bassin, le Granite du Runiou n'a pas pu être renseigné en raison de la présence d'un seul forage sur cette formation.

Les planches 5, 6, 7 et 8 représentant l'altitude de la surface piézométrique ont permis de calculer, pour chacun des bassins versants étudiés, des cartes représentant l'épaisseur de la zone non saturée (par différence des altitudes du MNT et de la surface piézométrique). Cette épaisseur correspond à la profondeur de la nappe.

Sur les bassins versants, 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 la figure 13.

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 sur chaque bassin versant.

Ces cartes, représentées en planches 53, 54, 55 et 56 (Maudouve et Noë Sèche, Dourduff, Yvel et Oust), utilisent les critères du tableau 20.

		Production des forages de chaque formation géologique exprimée en indice Q/P (m <sup>3</sup> /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

Tableau 20 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

La planche 53 montre que tout le bassin de la Maudouve et de la Noë Sèche n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement est majoritaire), à l'exception des plateaux où la capacité d'absorption devient moyenne.

Sur le bassin du Dourduff, la planche 54 montre un découpage amont/aval du bassin versant : la partie amont a une forte capacité d'absorption des eaux d'infiltration (plateaux au Sud) et la partie aval est plus « imperméable » à ces eaux (le ruissellement devient majoritaire).

Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont (par ordre décroissant) : les Schistes et quartzites de Plouigneau et les Amphibolites Paléozoïque au Sud, les Gabbros de St-Jean au Nord du bassin versant. Les Schistes et quartzites de Plouigneau 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 formations géologiques « imperméables » aux eaux d'infiltration sont (par ordre décroissant) : le Granite de Coat-Lescoat au Sud-Est, la Formation de Garlan au Centre, et la Formation de l'Armorique au Nord du bassin. Ces formations ont un niveau de nappe proche du sol (notamment au droit des vallées) et une perméabilité faible par rapport aux autres formations ; la capacité de remplissage du sous-sol est atteinte et le ruissellement peut intervenir.

La planche 55 montre que tout le bassin de l'Yvel n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement peut être majoritaire), à l'exception des plateaux sur la Formation du Grès armoricain où la capacité d'absorption devient moyenne.

La planche 56 montre que le bassin de l'Oust est dans une situation où la capacité d'absorption des eaux d'infiltration oscille de faible à fort selon les formations géologiques.

Les zones peu favorables aux eaux d'infiltration sont situées sur les Pélites fines et grès fins briovériens (faible épaisseur de la zone non saturée et perméabilité faible par rapport aux autres formations).

Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont : les Pélites et grès grossiers briovériens, et les Pélites fines du Briovérien ; les zones moins favorables aux eaux d'infiltration étant situées dans les vallées de ces formations.

### **Perspectives**

Les planches 53, 54, 55 et 56 ont été établies 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 RÉSULTATS OBTENUS SUR LES QUATRE BASSINS VERSANTS**

#### **6.3.1. Rappel d'un objectif du projet**

Une des idées de départ du projet SILURES Bassins Versants était de choisir 4 bassins dans des contextes géologiques et climatiques variés, afin de comparer leurs réserves en eau souterraine.

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.

### 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 m<sup>3</sup> sur les 28.6 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Maudouve, 1 612 839 m<sup>3</sup> sur les 6.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de la Noë Sèche,
- 16 971 057 m<sup>3</sup> sur les 43.9 km<sup>2</sup> du bassin versant du Dourduff,
- 11 449 738 m<sup>3</sup> sur les 53.8 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Yvel,
- 32 410 912 m<sup>3</sup> sur les 55 km<sup>2</sup> du bassin versant de l'Oust.

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 :

Oust (589 289 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>) > Dourduff > Maudouve > Noë Sèche > Yvel (212 820 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>).

Le bassin de l'Oust 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 reçoit une pluie efficace de 400 mm/an (bassin le plus arrosé) et est plus riche en eau souterraine, tandis que la Maudouve en reçoit 375 mm/an et la Noë Sèche 275 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.

Si l'on rapporte chaque temps à la superficie du bassin versant, on met en évidence l'ordre suivant en terme de rapidité de renouvellement :

Yvel (24 jours/km <sup>2</sup> ) > Dourduff > Maudouve > Oust > Noë Sèche (118 jours/km <sup>2</sup> ).
---

Le bassin de l'Yvel est celui où l'eau souterraine se renouvèle le plus vite et à l'inverse celui de la Noë Sèche 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 de la Noë Sèche est constitué d'une quantité d'eau souterraine faible et il se vidange très lentement. Le relargage des eaux souterraines dans la rivière doit malgré tout être progressif et continu puisque leur participation s'élève à 83%.

Le bassin versant du Dourduff comporte une bonne quantité d'eau souterraine et il se vidange relativement bien. 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 plus vite. 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 le plus riche en eaux souterraines et il se vidange lentement. 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 %.

## 7. Conclusion

Ce rapport final présente la synthèse des travaux menés dans le cadre du projet SILURES Bassins Versants.

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 chacun des bassins versants étudiés, en utilisant des paramètres complémentaires (pentes, occupation du sol...).

Ces cartes permettraient 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

LACHASSAGNE, P., WYNS R., BÉRARD P., BRUEL T., CHÉRY L., COUTAND T., DESPRATS J.-F., LE STRAT P. (2001) - Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones - *Groundwater*, vol. 39, (4), p. 568-581

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

LEGCHENKO A.V., BALTASSAT J.M., BEAUCE A., MAKKI M.A., and AL-GAYDI B.A. (1998) - Application of the surface proton magnetic resonance method for the detection of fractured granite aquifers : Proceedings of the IV Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society (European Section), September 14-17, 1998, Barcelona (Spain), pp. 163-166

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

MOUGIN B., collaboration : CARN A., THOMAS E., JEGOU J.-P. (2002) - SILURES Bretagne - Etat d'avancement de l'année 1 - BRGM/RP-51481-FR - 53 p., 18 tab., 24 fig., 6 annexes

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

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.

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

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

WYNS, R. (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)



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

**Service géologique de Bretagne**  
**Atalante Beaulieu**  
2 rue de Jouanet  
35700 RENNES  
Tél. 02.99.84.26.70.





# SILURES Bassins Versants Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22)

Rapport final - Année 2

ANNEXES

BRGM/RP-53742-FR

Mars 2005



**brgm**

Géosciences pour une Terre durable

# SILURES Bassins Versants Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22)

Rapport final - Année 2

ANNEXES

BRGM/RP-53742-FR

Mars 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM 2005 EAUC09

B. Mougou, E. Thomas, F. Mathieu, R. Blanchin et R. Wyns

## Liste des annexes

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

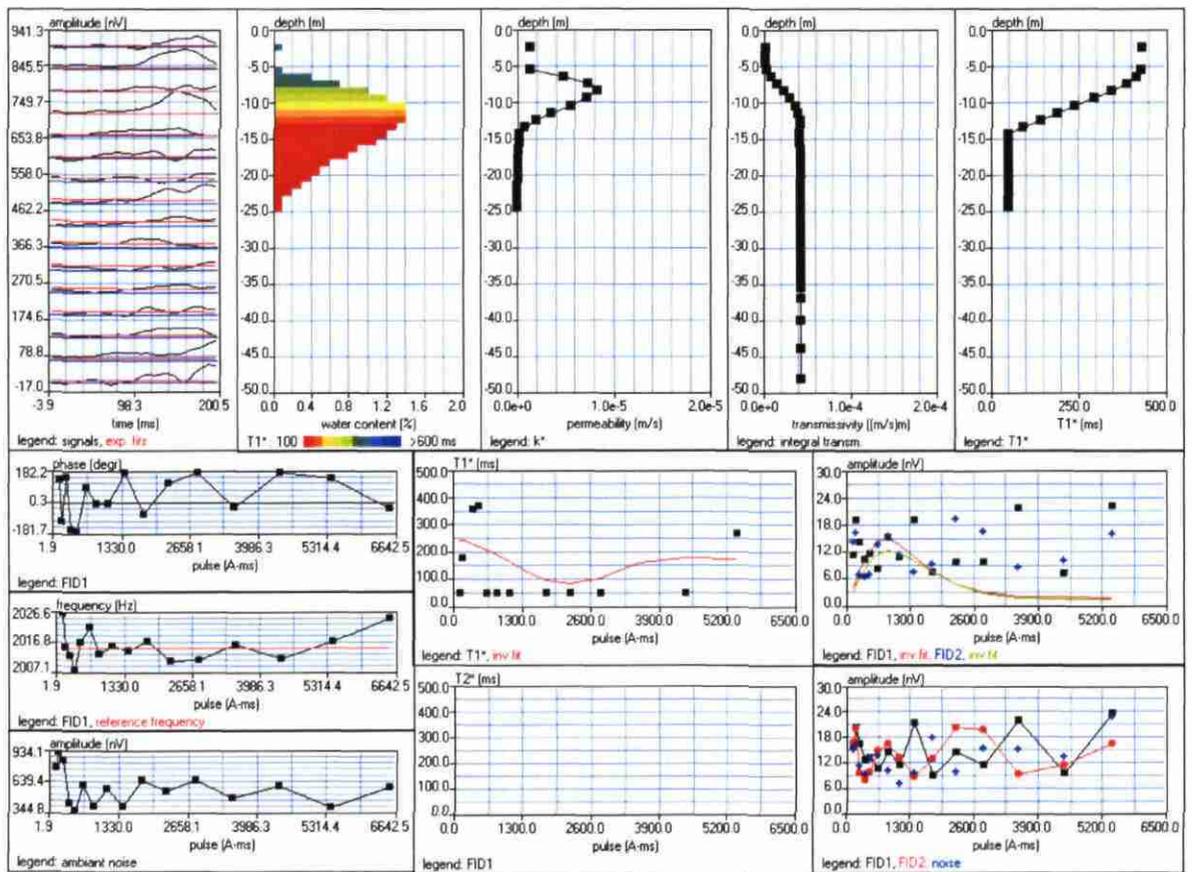
## **Annexe 1**

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

Site: SILURES MAUDOUVE MAUD02  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 04.11.2002 Time: 13:01

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud02.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window = 198.5 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.09; EN/IN = 2.70  
 fitting error: FID1 = 65.98%; FID2 = 66.95 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD03A

Loop: 4 - 37.5 Date: 06.11.2002 Time: 09:34

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud03a.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window = 158.6 ms

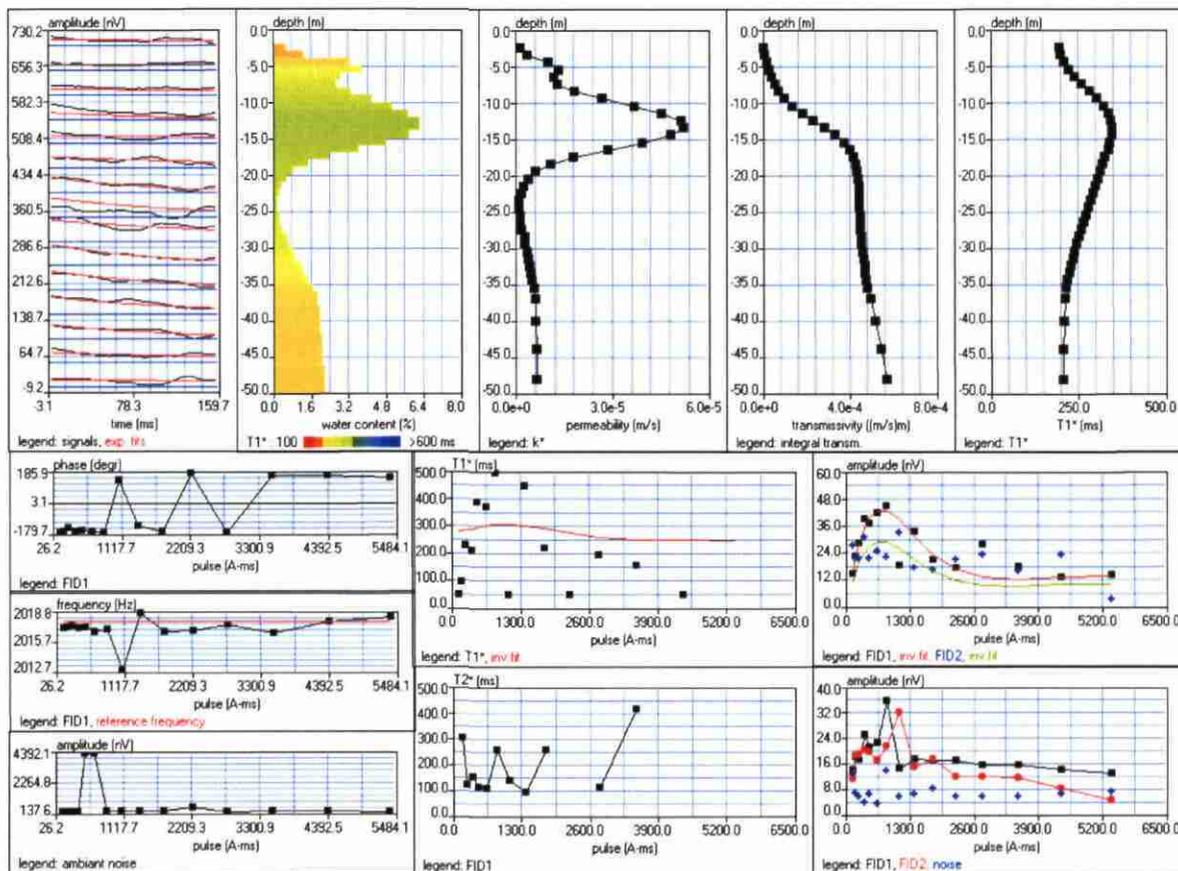
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.69; EN/IN = 1.38

fitting error: FID1 = 24.57%; FID2 = 36.67 %

param. of regular.: modeling

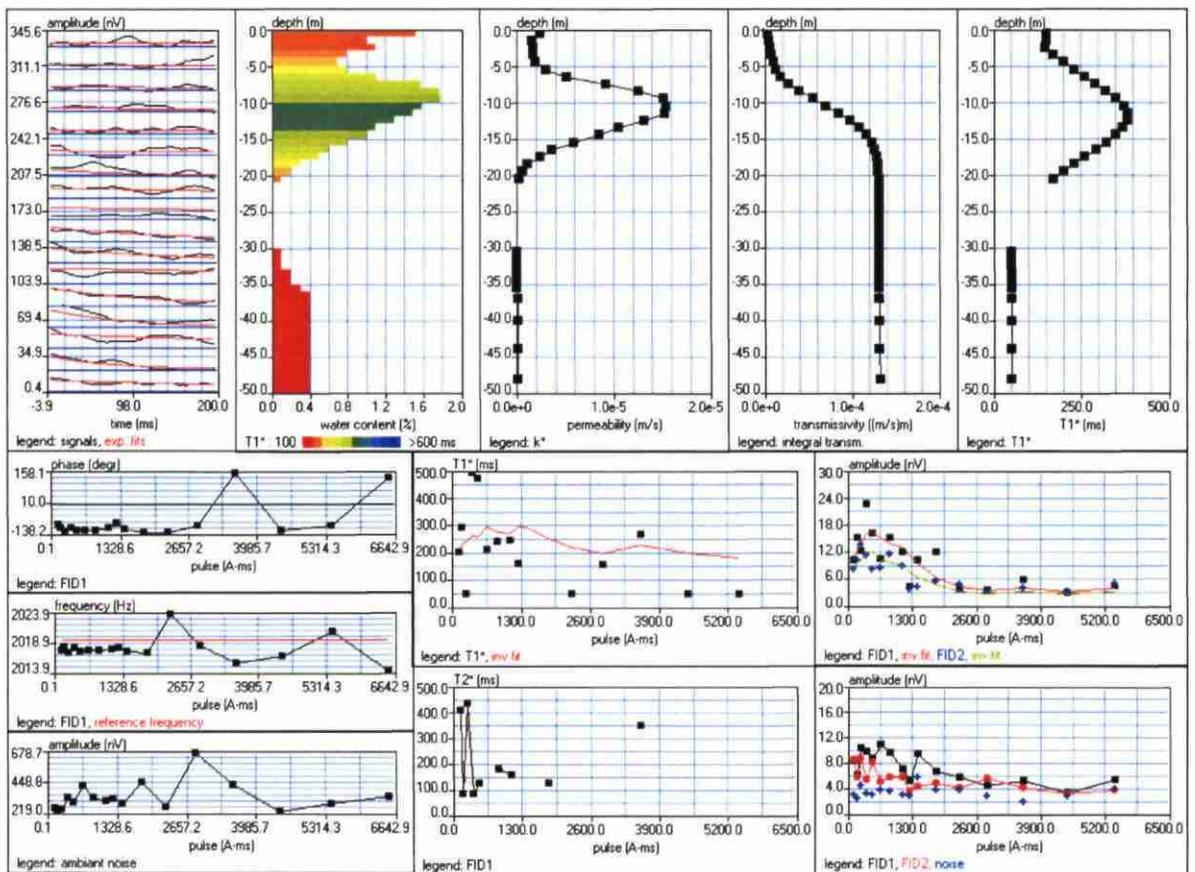
permeability constant  $C_p = 7.00e-09$



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD04A  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 05.11.2002 Time: 16:46

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud04a.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47403.76 nT

filtering window = 198.1 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 2.11; EN/IN = 0.68  
 fitting error: FID1 = 27.68%; FID2 = 32.29 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD05A

Loop: 4 - 37.5 Date: 05.11.2002 Time: 09:29

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud05a.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window = 198.2 ms

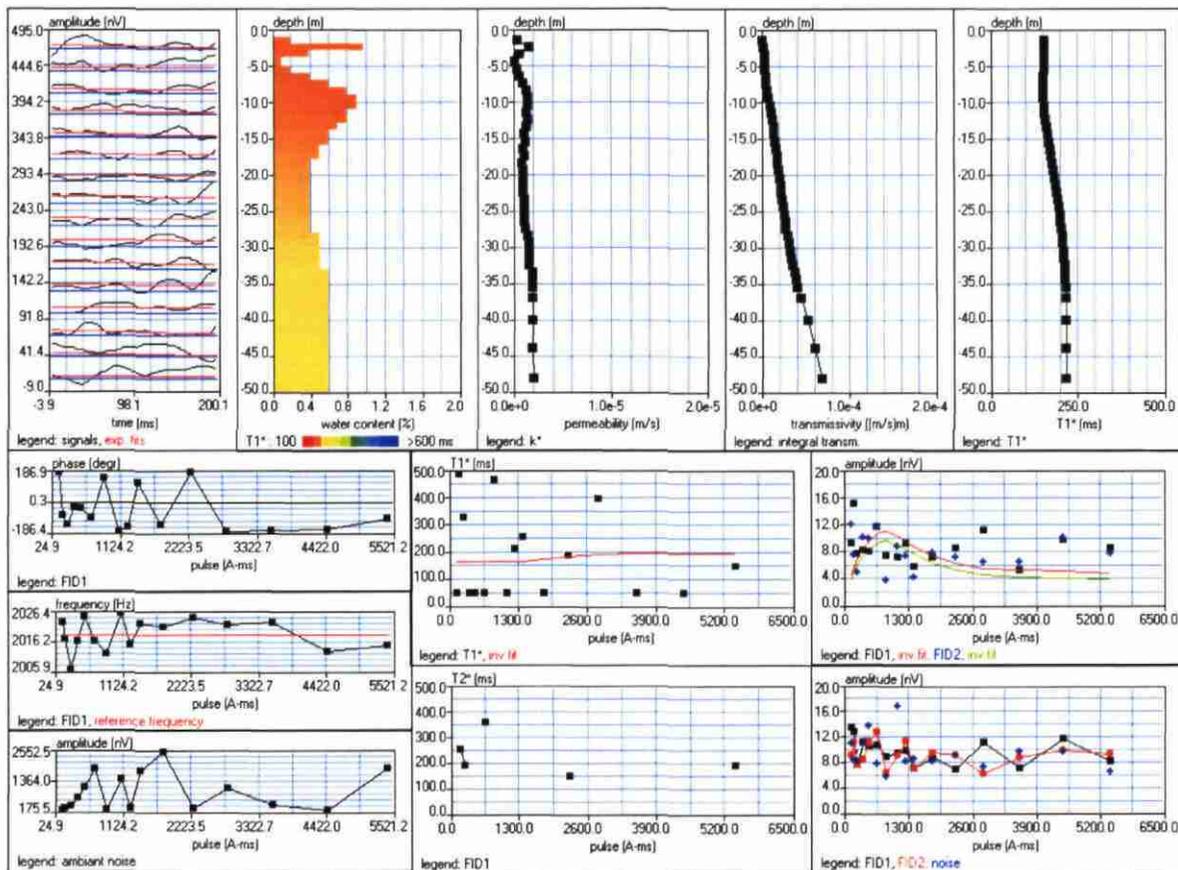
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.04; EN/IN = 1.87

fitting error: FID1 = 41.30%; FID2 = 43.04 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD06

Loop: 4 - 37.5 Date: 29.10.2002 Time: 08:56

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud06.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window = 178.4 ms

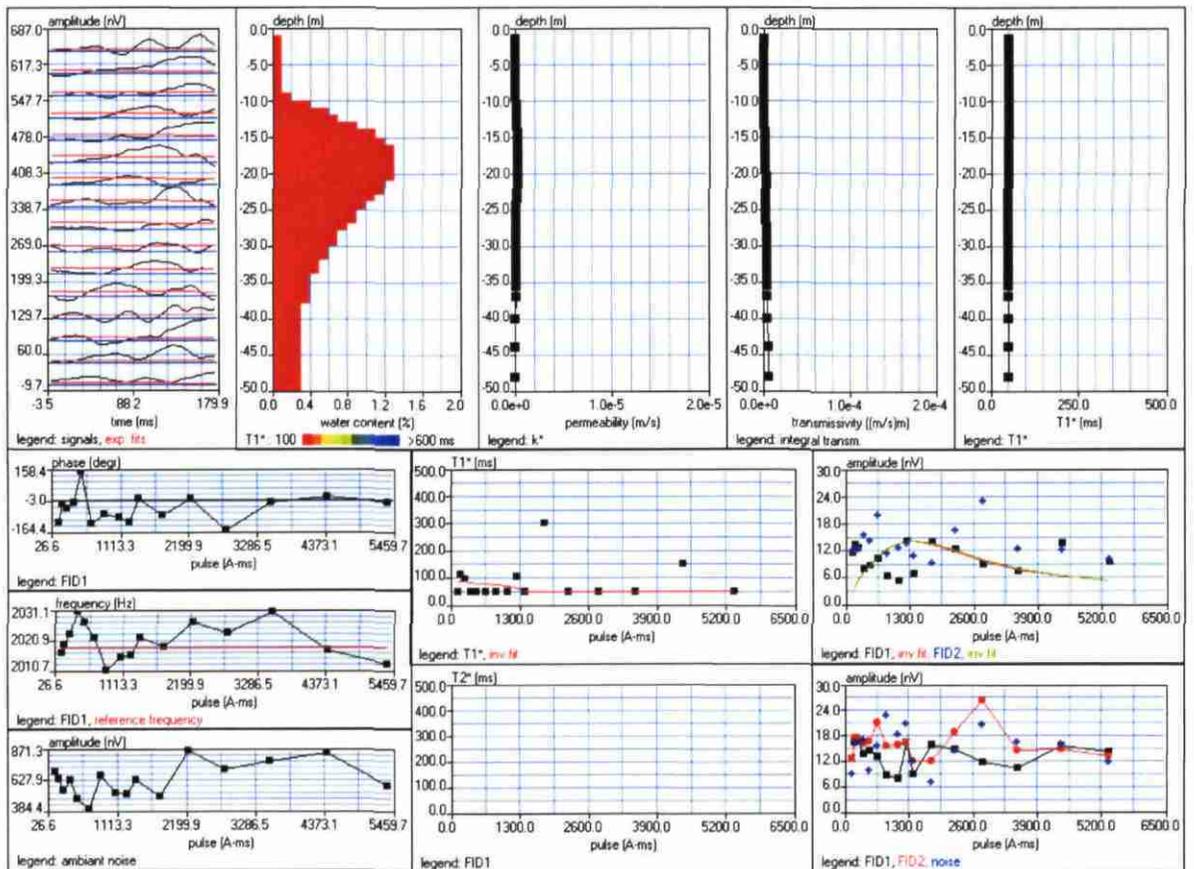
time constant = 15.00 ms

average S/N = 0.86; EN/IN = 3.05

fitting error: FID1 = 49.17%; FID2 = 45.79 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD07

Loop: 4 - 37.5 Date: 30.10.2002 Time: 16:24

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud07.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window = 198.2 ms

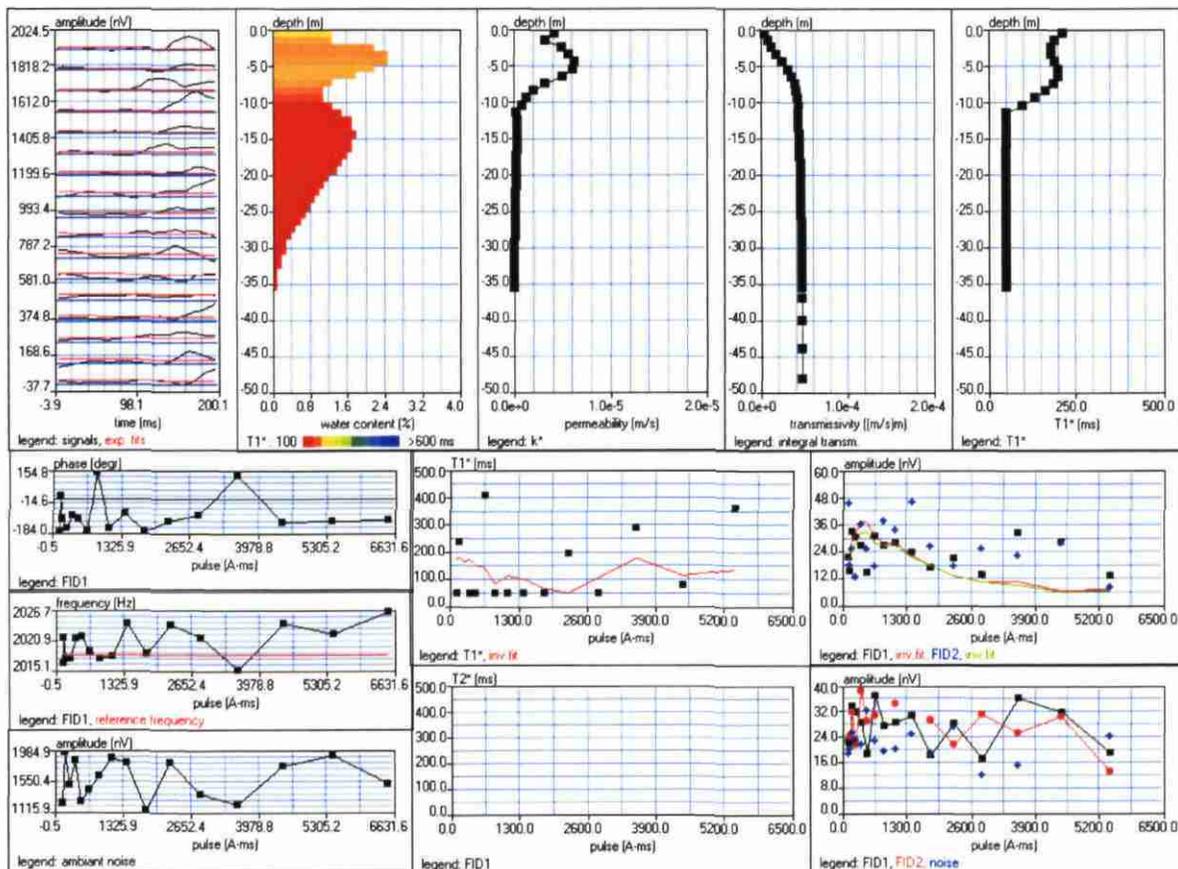
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.18; EN/IN = 4.52

fitting error: FID1 = 43.08%; FID2 = 46.95 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD08

Loop: 4 - 37.5 Date: 30.10.2002 Time: 08:51

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud08.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47403.76 nT

filtering window = 168.4 ms

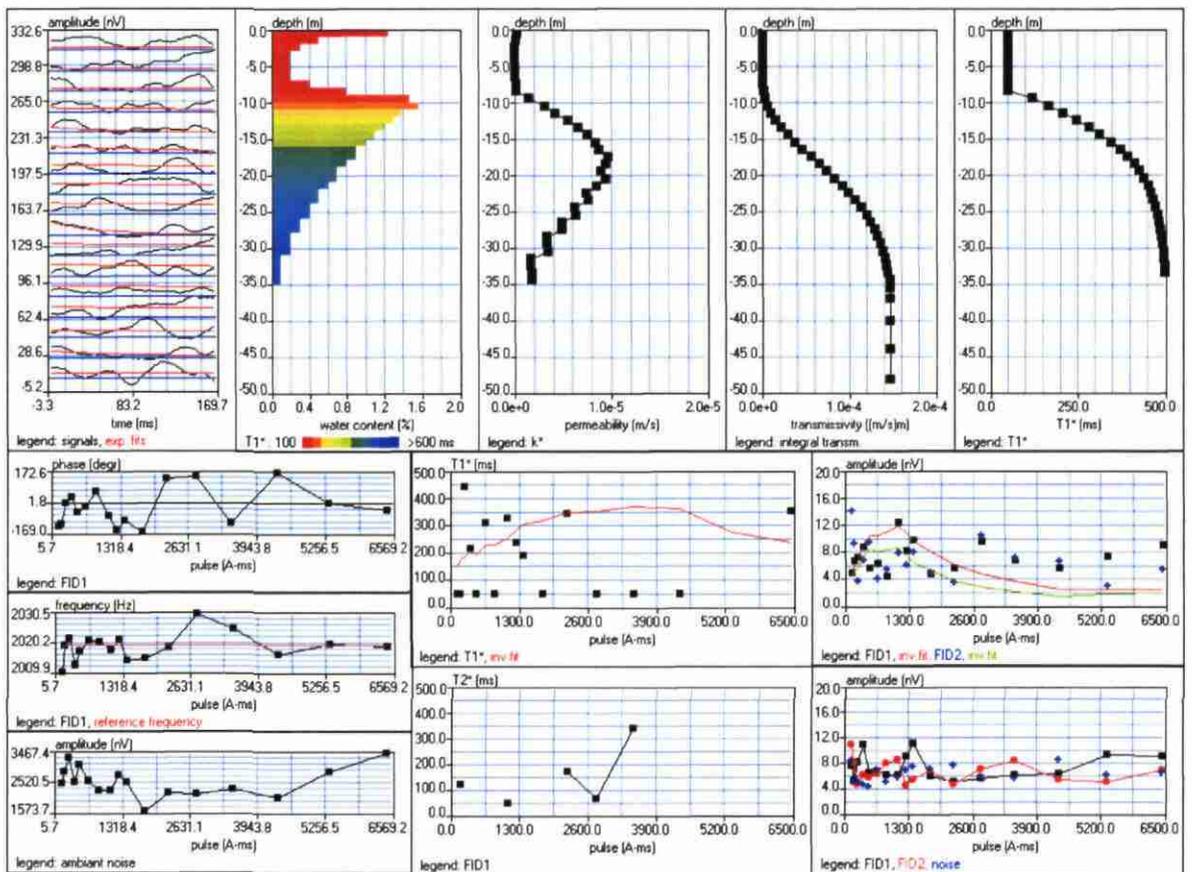
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.17; EN/IN = 1.26

fitting error: FID1 = 47.26%; FID2 = 53.54 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD09

Loop: 4 - 37.5 Date: 28.10.2002 Time: 17:11

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud09.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window = 178.4 ms

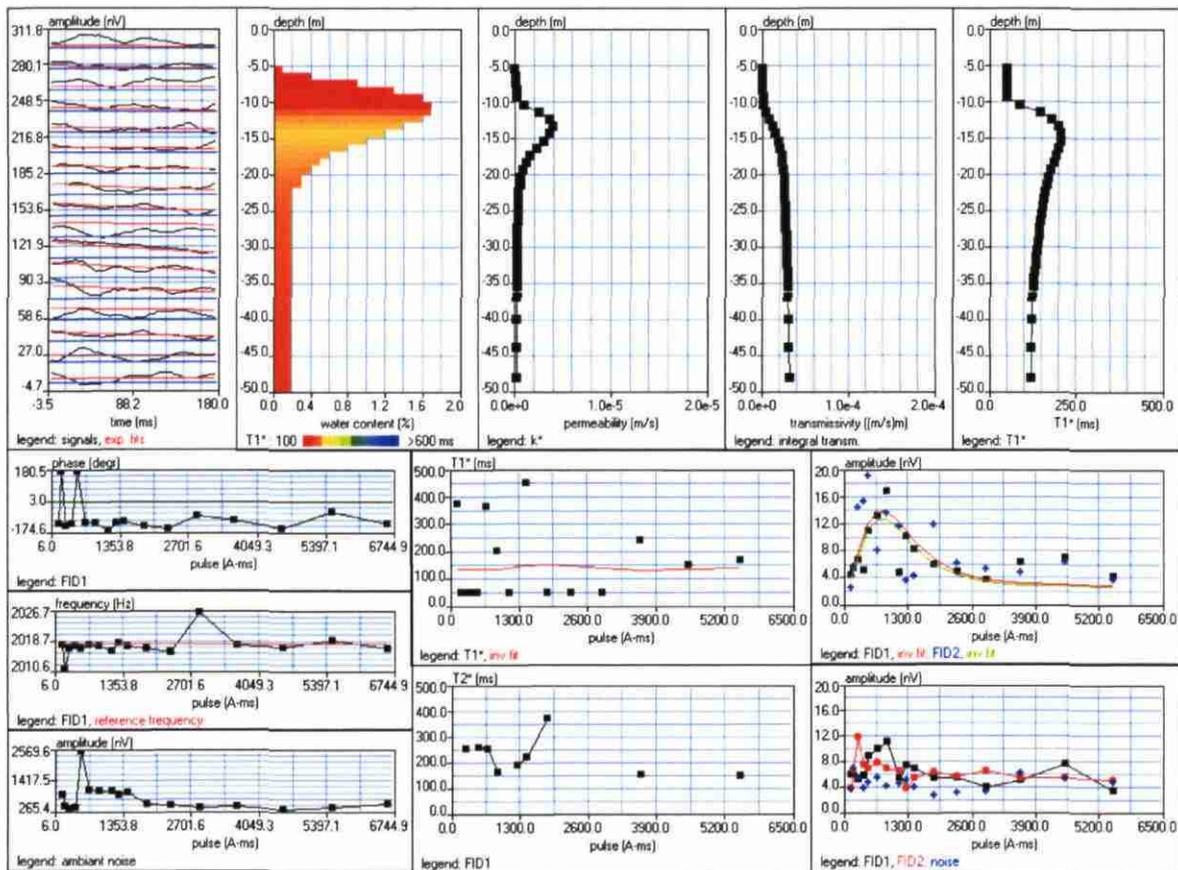
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.43; EN/IN = 0.91

fitting error: FID1 = 37.56%; FID2 = 43.44 %

param. of regular.: modeling

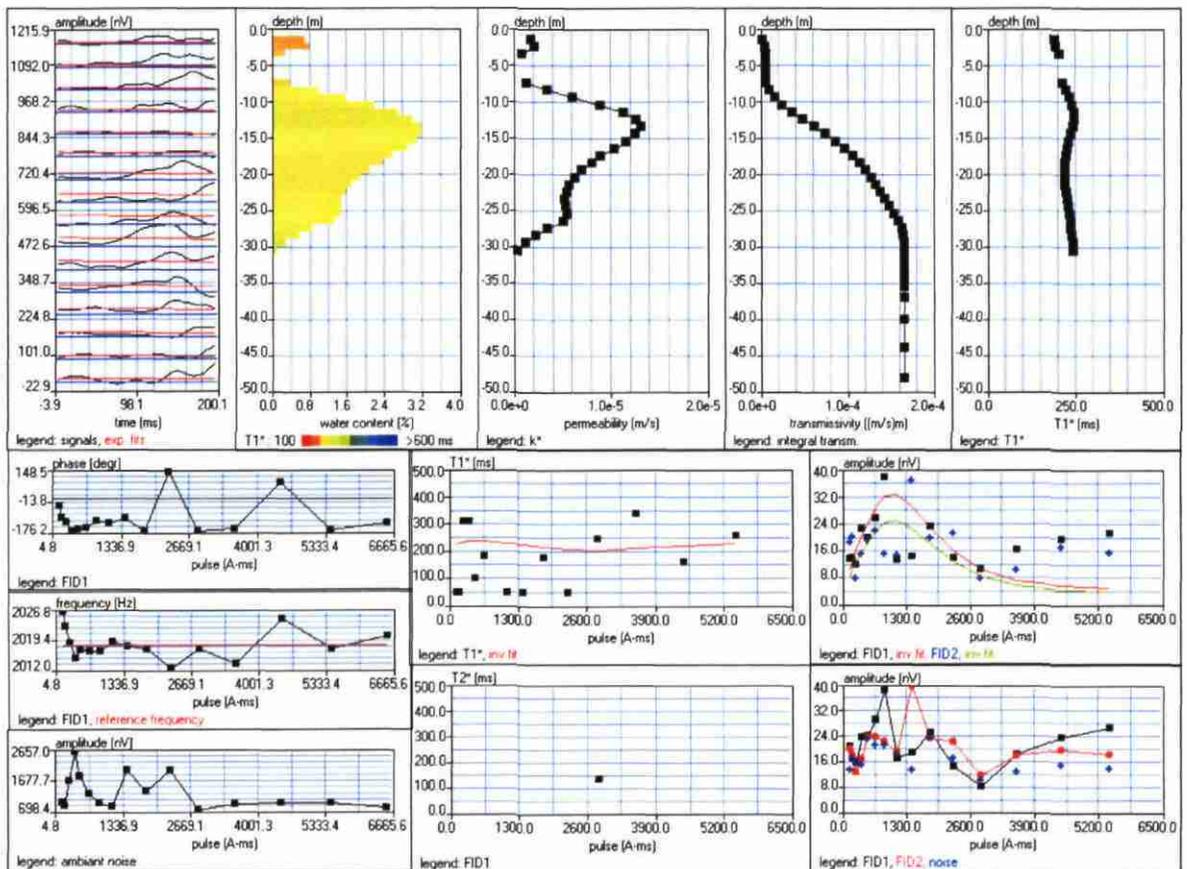
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES MAUDOUVE MAUD10  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 29.10.2002 Time: 16:50

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Maud10.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window = 198.2 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.25; EN/IN = 3.37  
 fitting error: FID1 = 46.25%; FID2 = 47.63 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR01

Loop: 4 - 37.5 Date: 11.11.2002 Time: 08:58

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour01.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side ≈ 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 179.8 ms

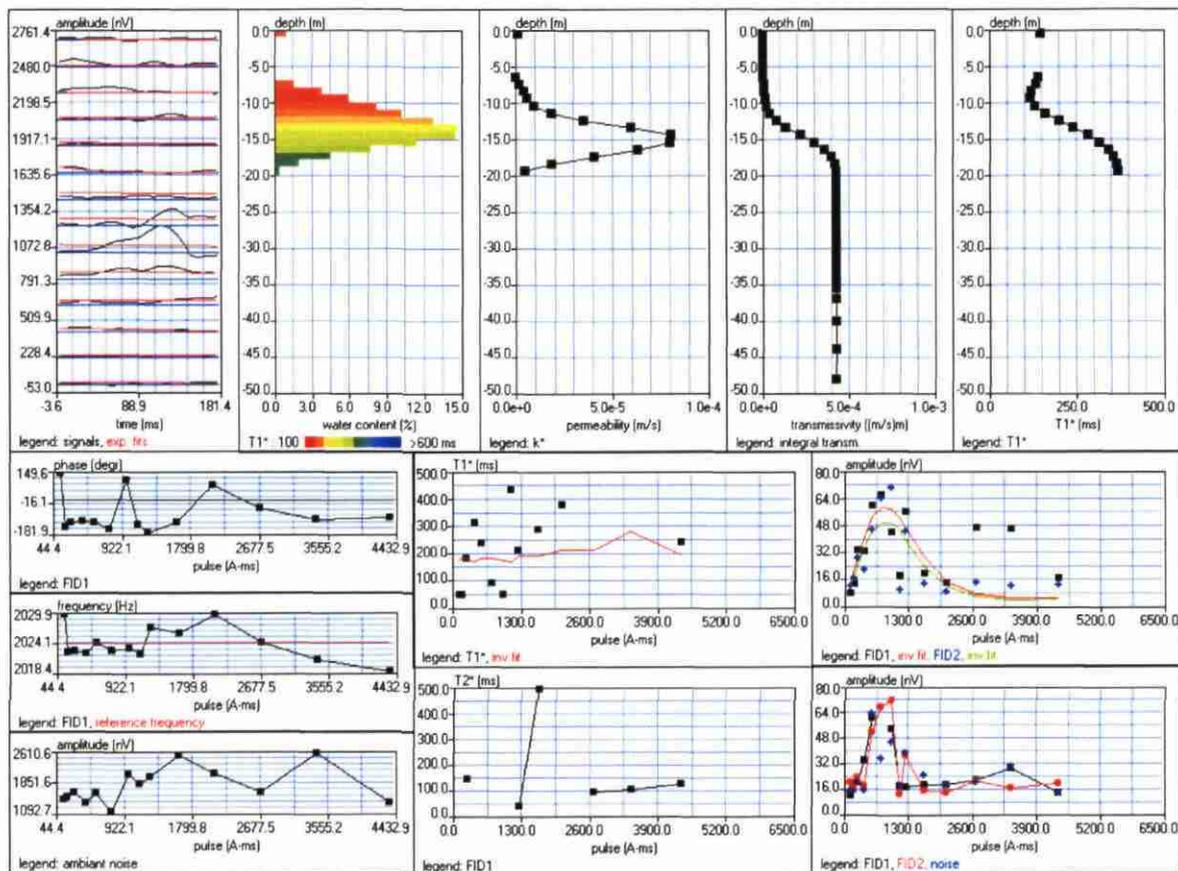
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.12; EN/IN = 5.30

fitting error: FID1 = 50.13%; FID2 = 39.96 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR02

Loop: 4 - 37.5 Date: 12.11.2002 Time: 09:25

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour02.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47596.24 nT

filtering window = 159.8 ms

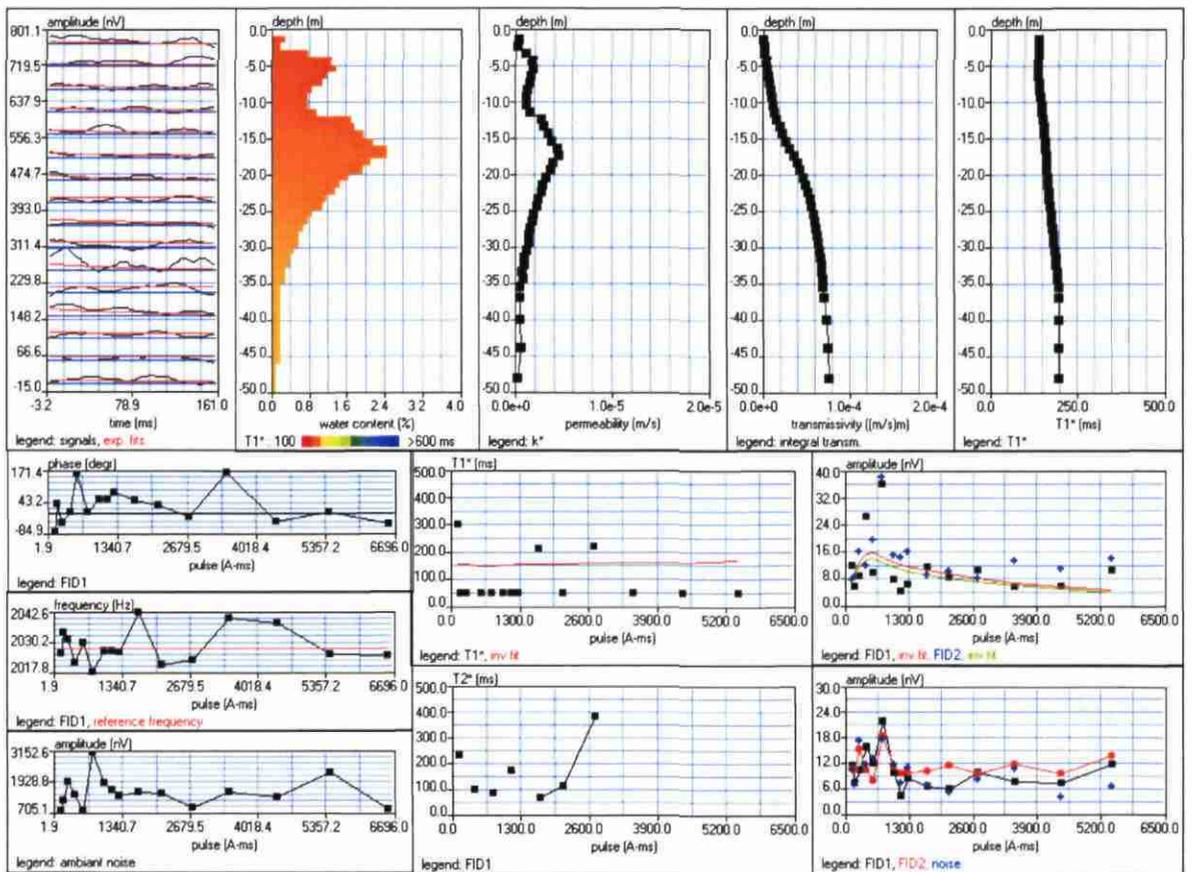
time constant = 15.00 ms

average S/N = 0.99; EN/IN = 1.99

fitting error: FID1 = 56.48%; FID2 = 50.04 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR03

Loop: 4 - 37.5 Date: 09.11.2002 Time: 15:15

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour03.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 158.1 ms

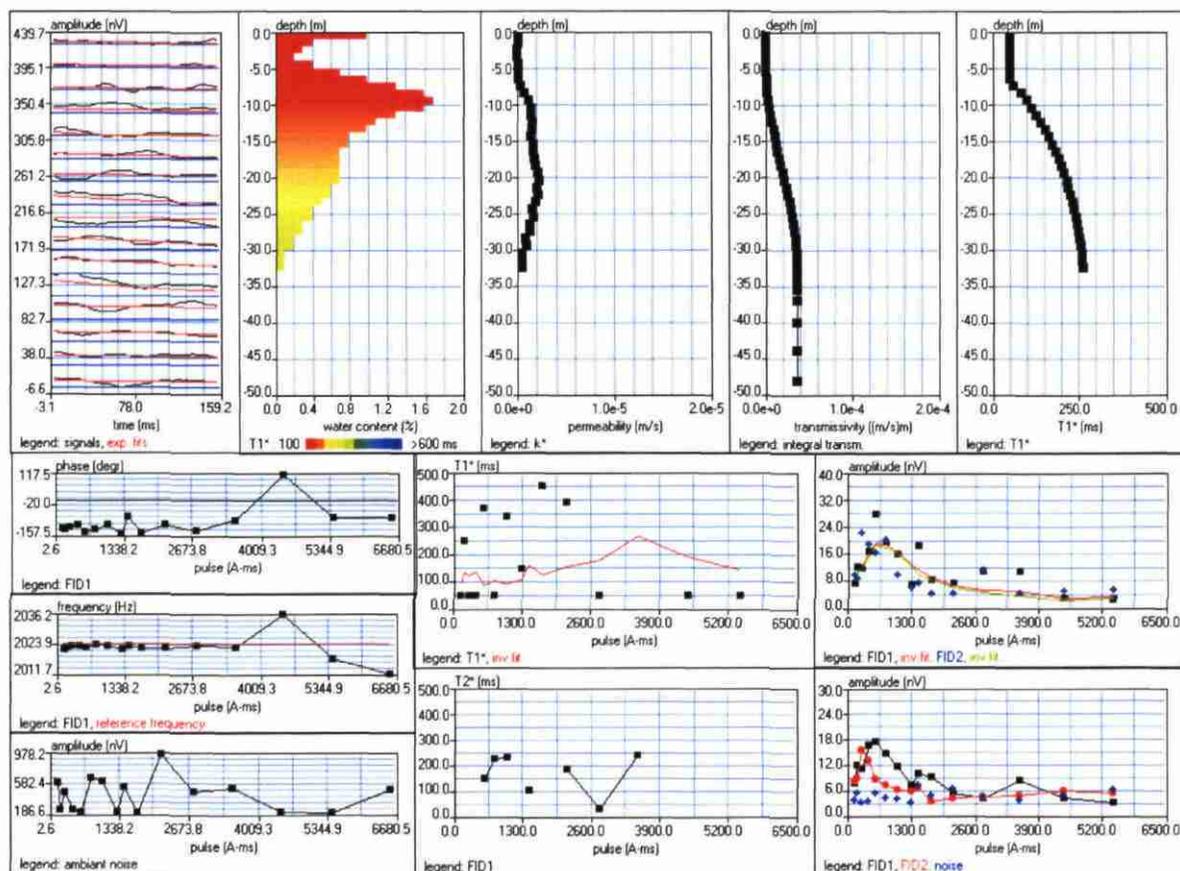
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.02; EN/IN = 0.91

fitting error: FID1 = 28.91%; FID2 = 36.69 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR04

Loop: 4 - 37.5 Date: 07.11.2002 Time: 15:31

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour04.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 158.2 ms

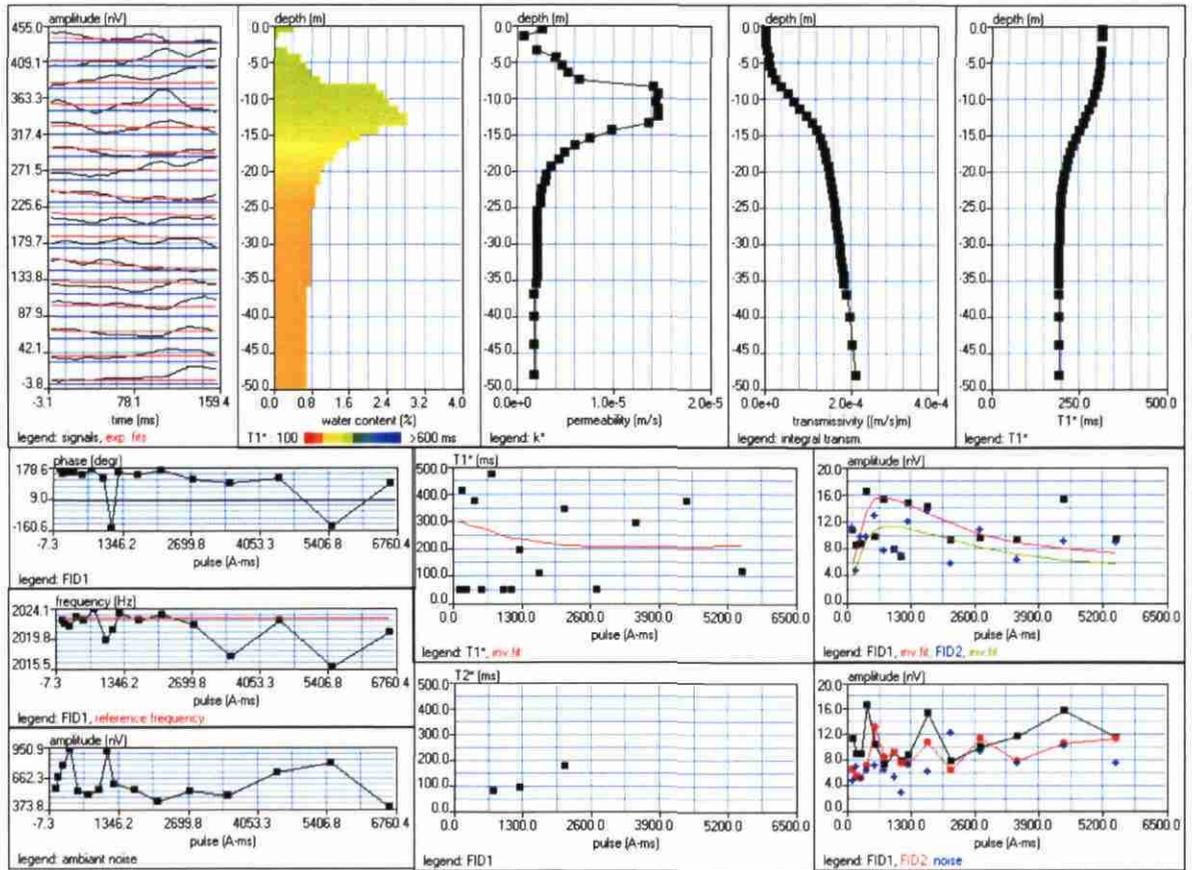
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.49; EN/IN = 1.41

fitting error: FID1 = 36.70%; FID2 = 33.94 %

param. of regular.: modeling

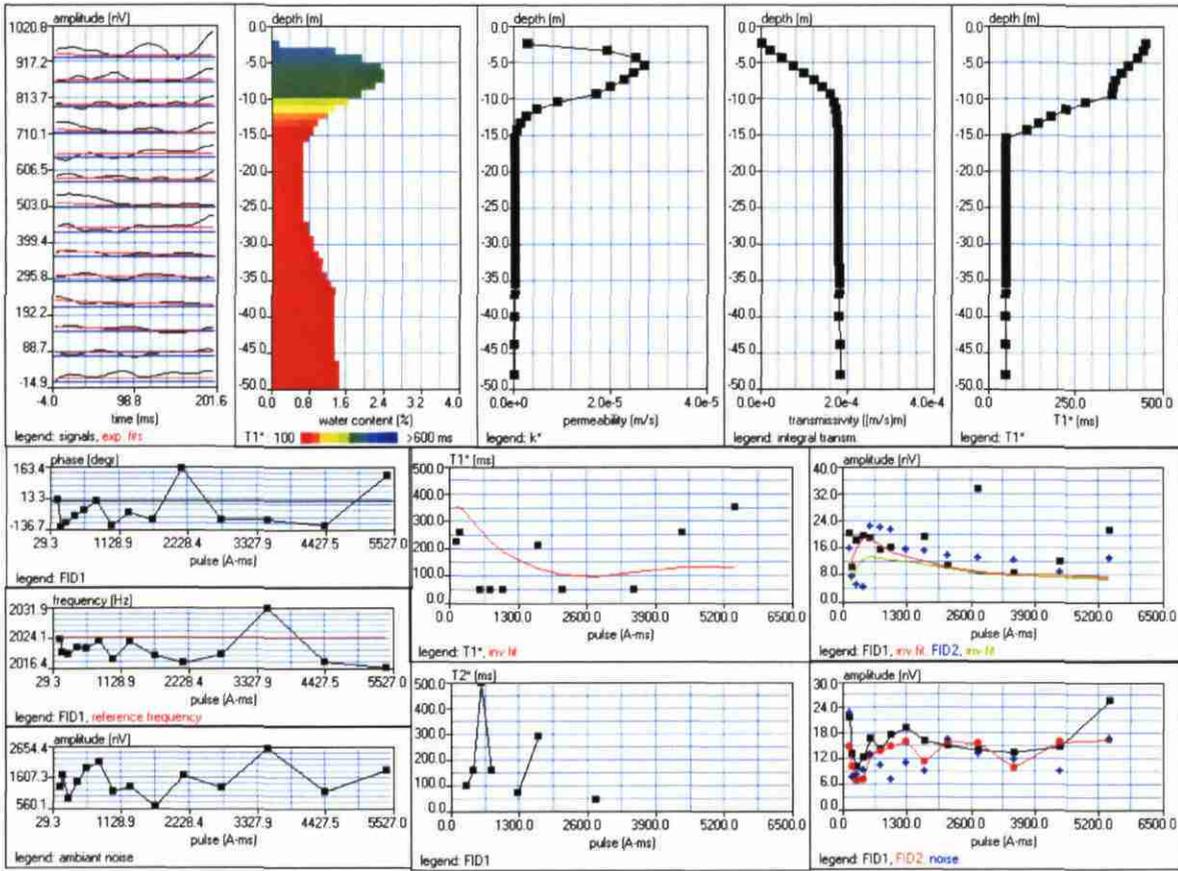
permeability constant  $C_p = 7.00e-09$



Site: SILURES DOURDUFF DOU05  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 08.11.2002 Time: 10:10

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour05.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

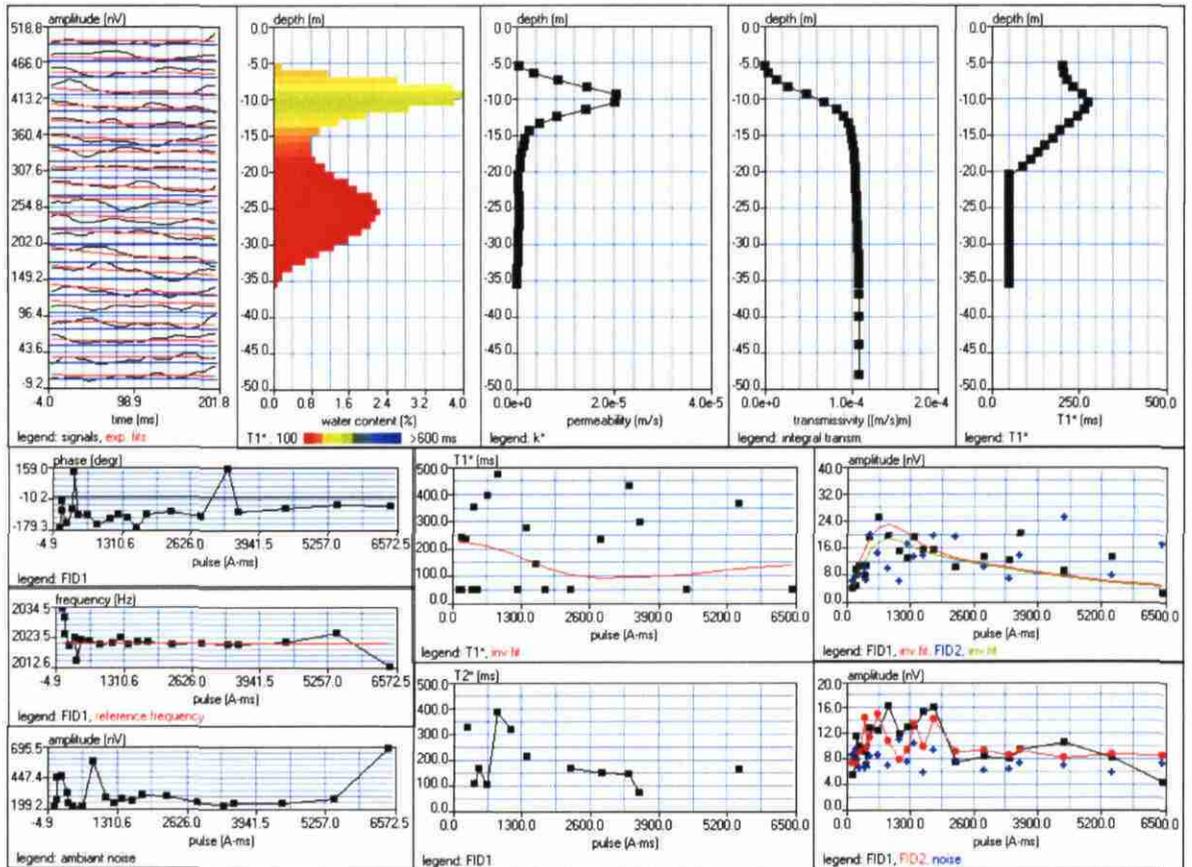
filtering window = 199.6 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.36; EN/IN = 2.34  
 fitting error: FID1 = 55.51%; FID2 = 43.67 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR06  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 07.11.2002 Time: 08:50

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour06.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47450.70 nT

filtering window = 199.9 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.35; EN/IN = 1.53  
 fitting error: FID1 = 31.95%; FID2 = 48.41 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR07

Loop: 4 - 37.5 Date: 12.11.2002 Time: 16:28

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour07.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47375.59 nT

filtering window = 158.6 ms

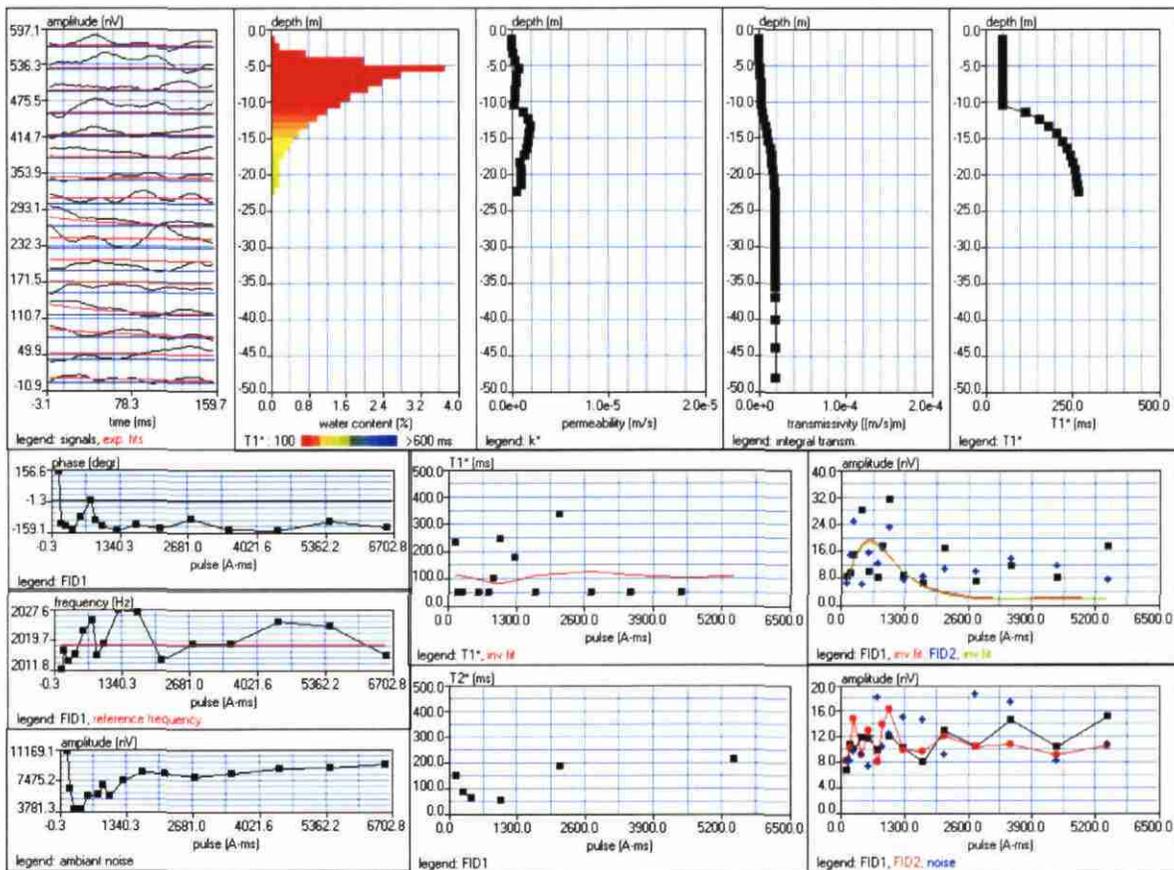
time constant = 15.00 ms

average S/N = 0.98; EN/IN = 2.35

fitting error: FID1 = 57.24%; FID2 = 53.60 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR08

Loop: 4 - 37.5 Date: 11.11.2002 Time: 16:37

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour08.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47528.17 nT

filtering window = 179.8 ms

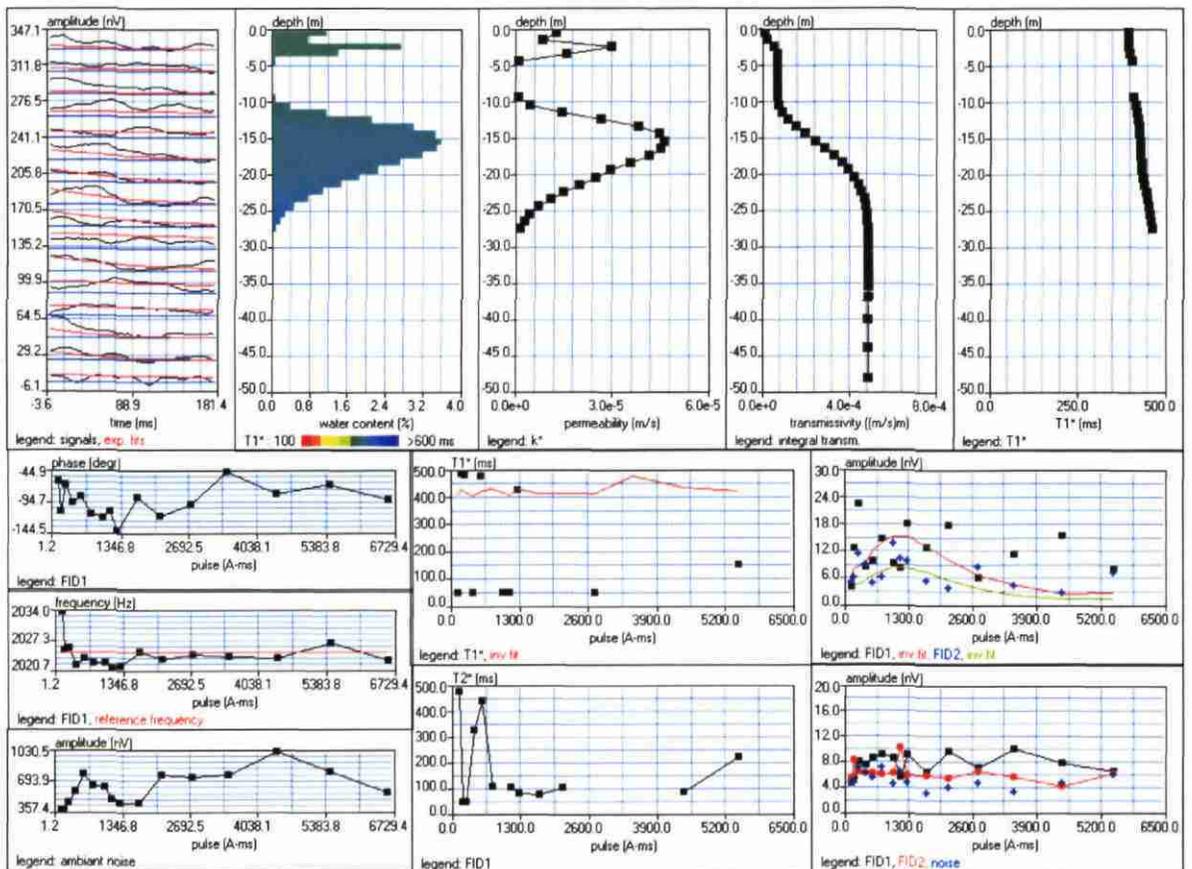
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.49; EN/IN = 1.00

fitting error: FID1 = 52.27%; FID2 = 46.70 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR09

Loop: 4 - 37.5 Date: 06.11.2002 Time: 17:08

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour09.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 179.8 ms

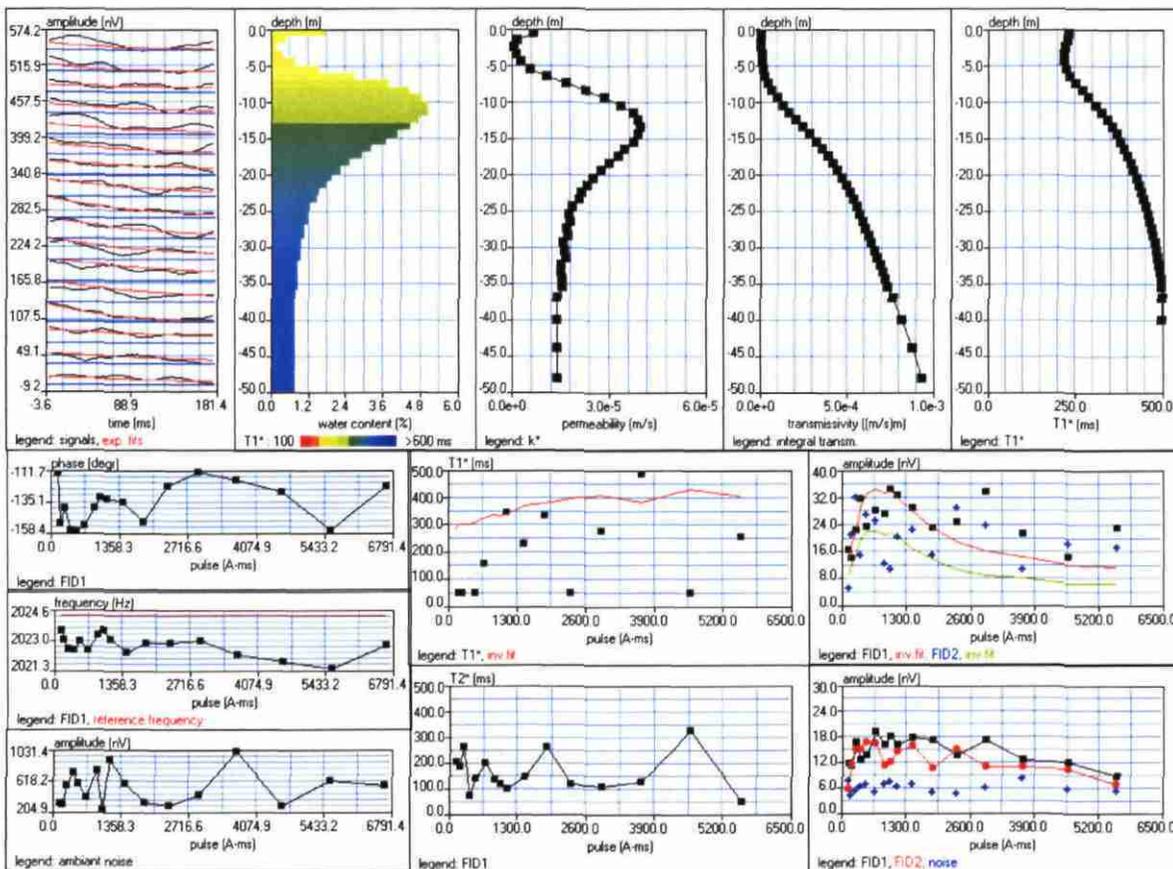
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.30; EN/IN = 1.25

fitting error: FID1 = 28.28%; FID2 = 47.71 %

param. of regular.: modeling

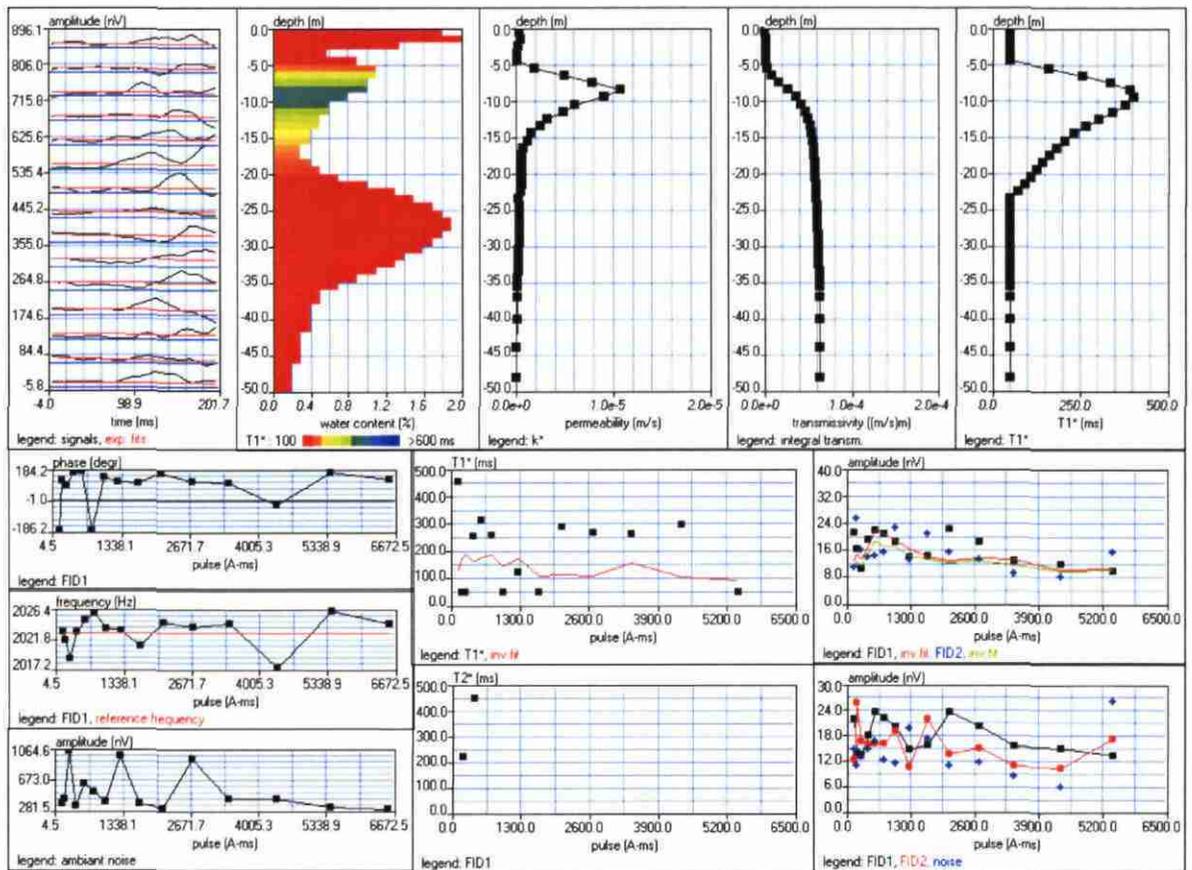
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR10  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 08.11.2002 Time: 17:42

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour10.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47481.22 nT

filtering window = 199.7 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.29; EN/IN = 2.79  
 fitting error: FID1 = 22.76%; FID2 = 30.20 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES DOURDUFF DOUR11

Loop: 4 - 37.5 Date: 13.11.2002 Time: 09:32

NUMIS data set: C:\Silures\DATABRUTES\Dour11.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 158.1 ms

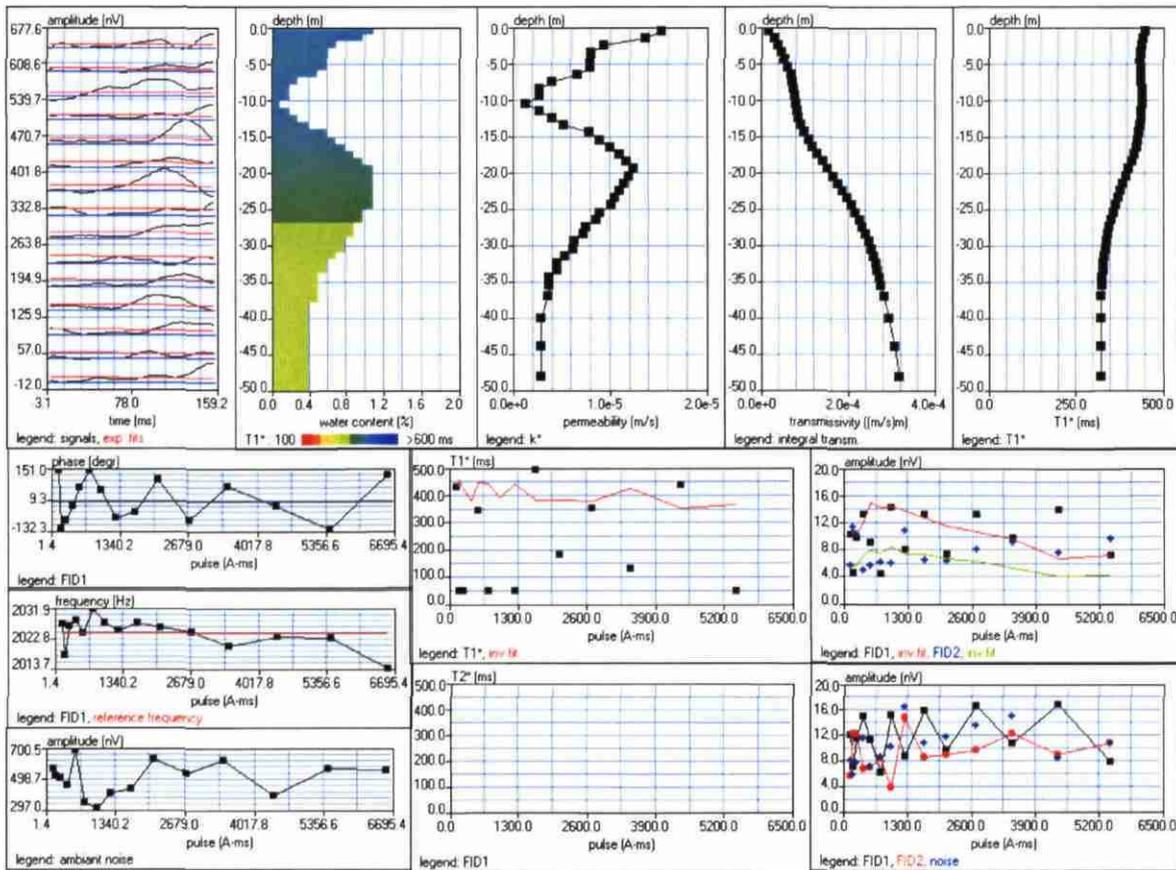
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.13; EN/IN = 2.06

fitting error: FID1 = 42.50%; FID2 = 39.83 %

param. of regular.: modeling

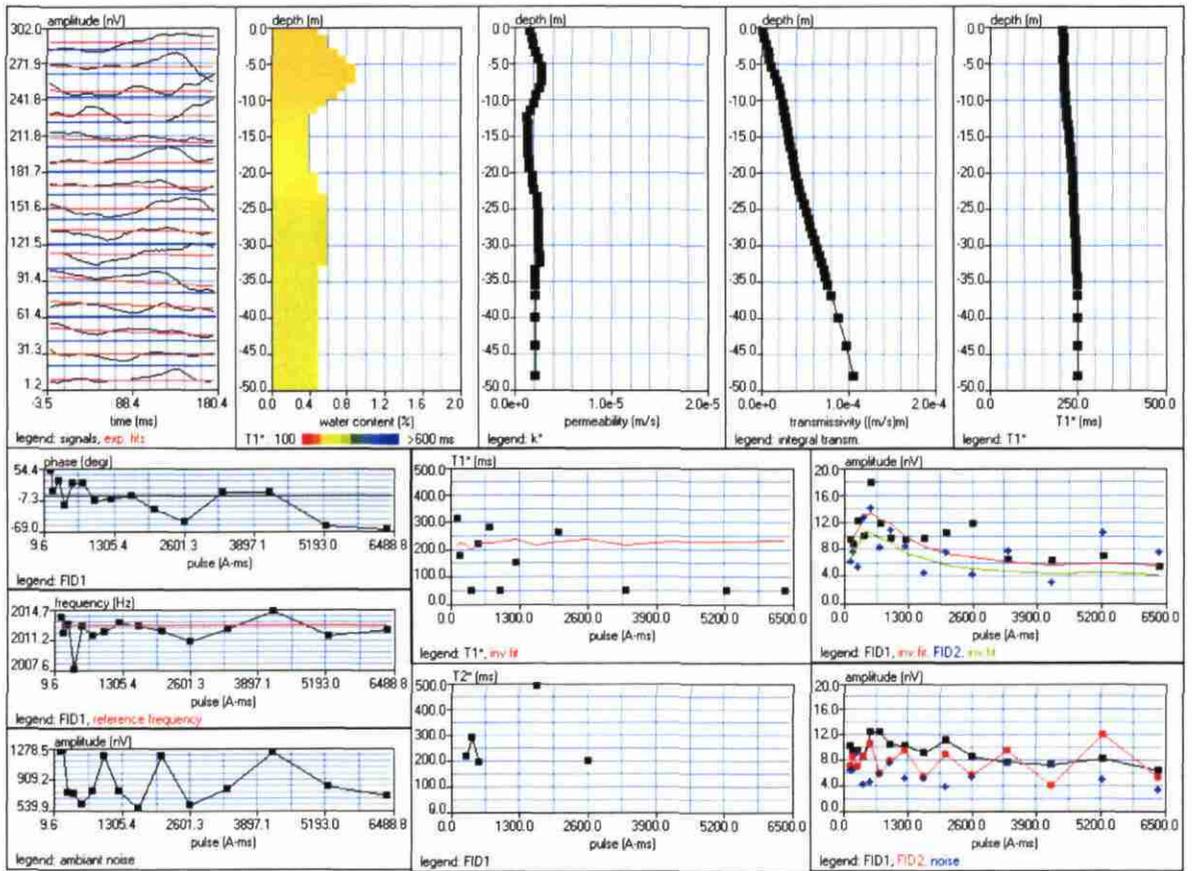
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL01  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 14.01.2003 Time: 15:37

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel01.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window = 178.8 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.64; EN/IN = 1.14  
 fitting error: FID1 = 22.43%; FID2 = 30.78 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL02

Loop: 4 - 37.5 Date: 15.01.2003 Time: 08:13

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel02.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window = 198.7 ms

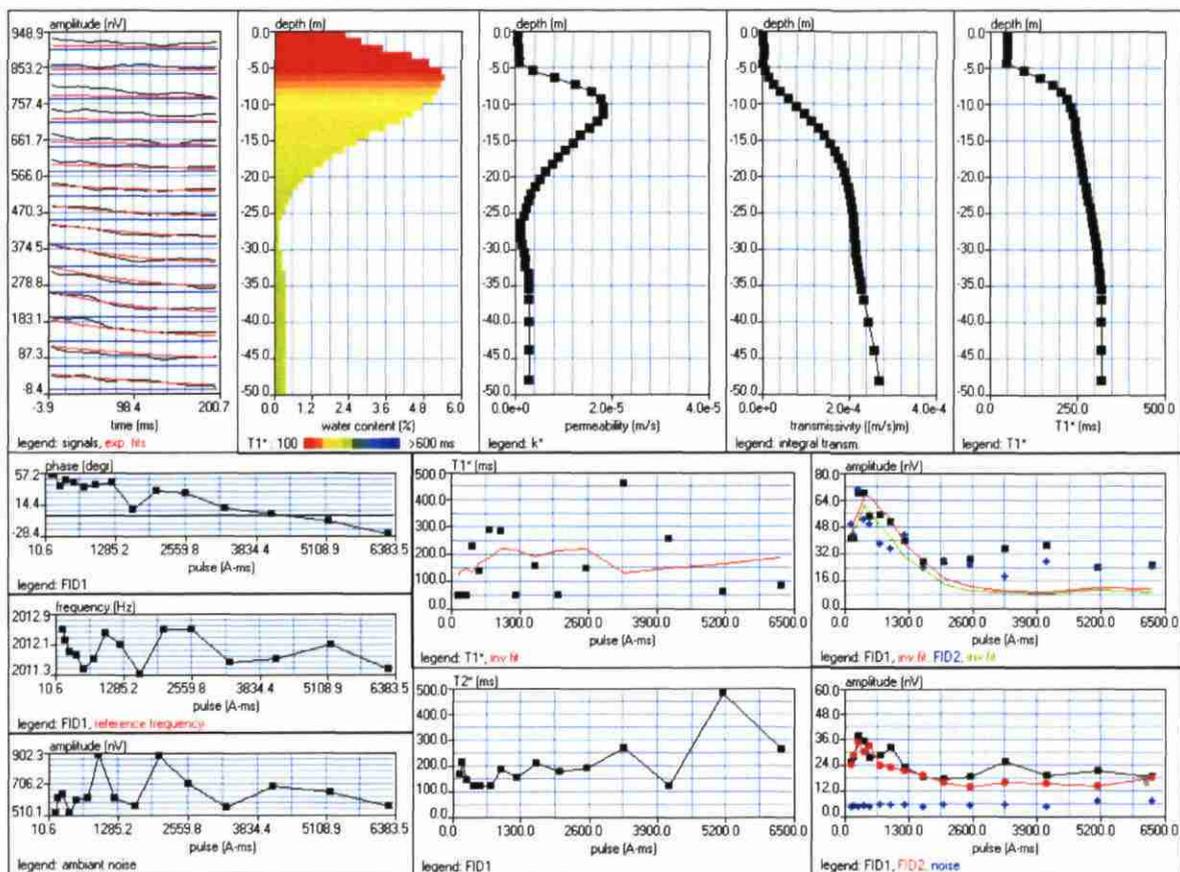
time constant = 15.00 ms

average S/N = 4.99; EN/IN = 1.00

fitting error: FID1 = 28.88%; FID2 = 30.88 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL03

Loop: 4 - 37.5 Date: 15.01.2003 Time: 14:54

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel03.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47223.00 nT

filtering window = 99.4 ms

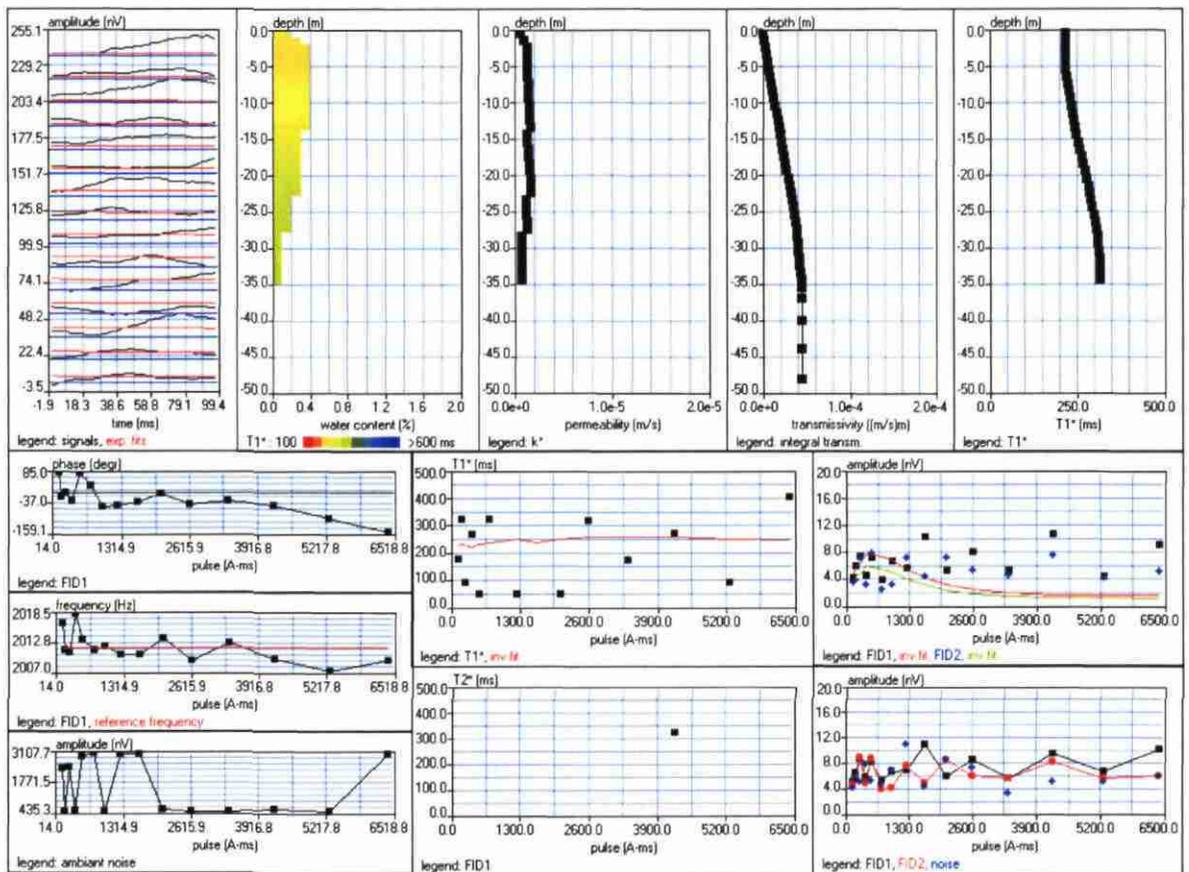
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.23; EN/IN = 1.20

fitting error: FID1 = 58.91%; FID2 = 58.22 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL04

Loop: 4 - 37.5 Date: 13.01.2003 Time: 09:13

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel04.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window = 198.7 ms

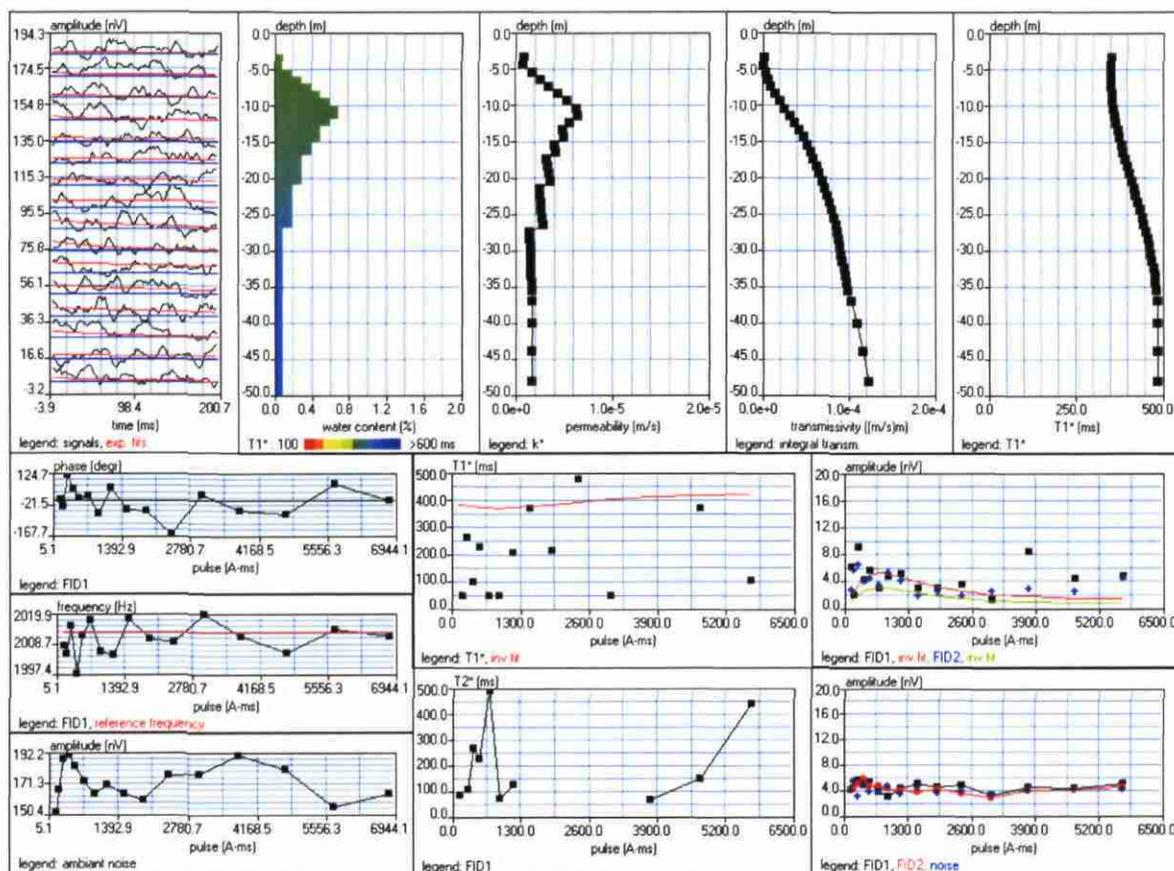
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.10; EN/IN = 0.81

fitting error: FID1 = 56.43%; FID2 = 57.33 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL05

Loop: 4 - 37.5 Date: 16.01.2003 Time: 07:36

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel05.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47223.00 nT

filtering window = 198.8 ms

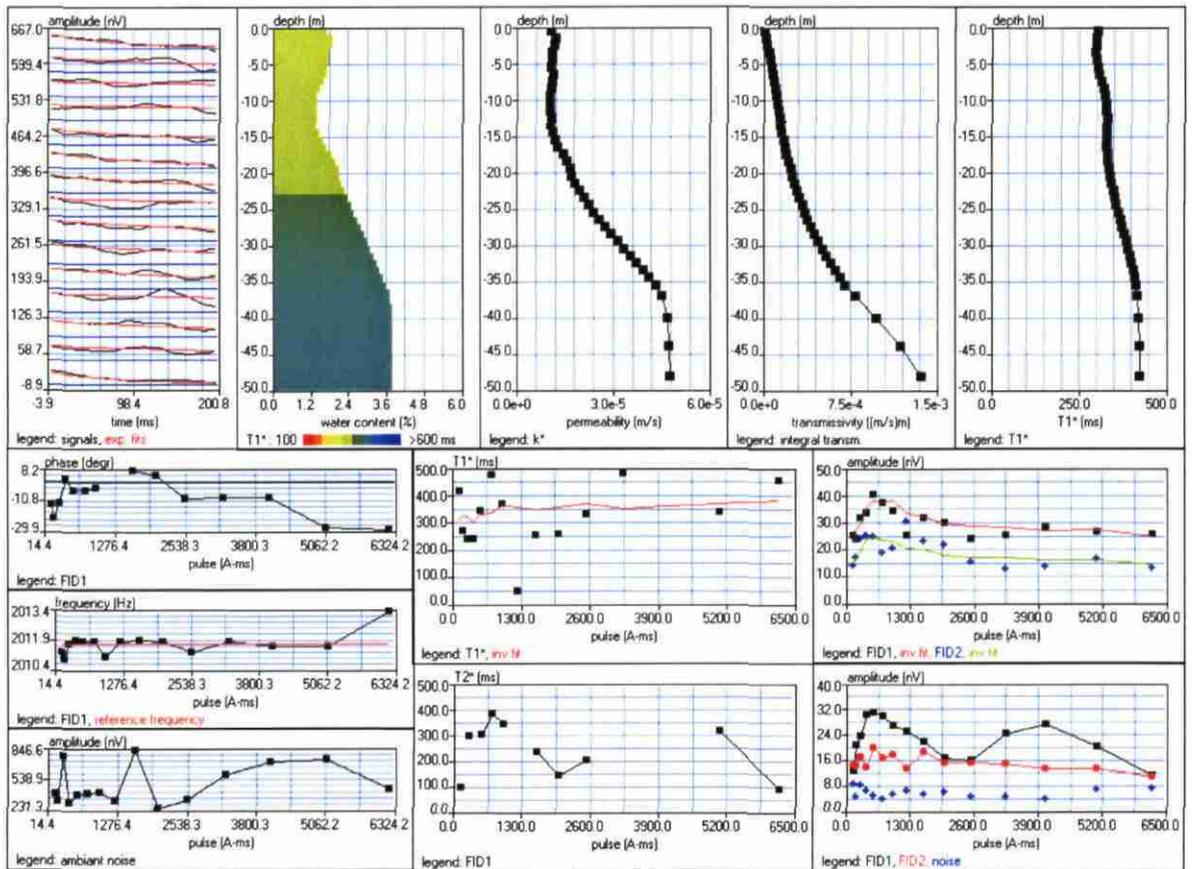
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.90; EN/IN = 1.16

fitting error: FID1 = 10.26%; FID2 = 18.67 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL06

Loop: 4 - 37.5 Date: 16.01.2003 Time: 13:07

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel06.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47223.00 nT

filtering window = 198.8 ms

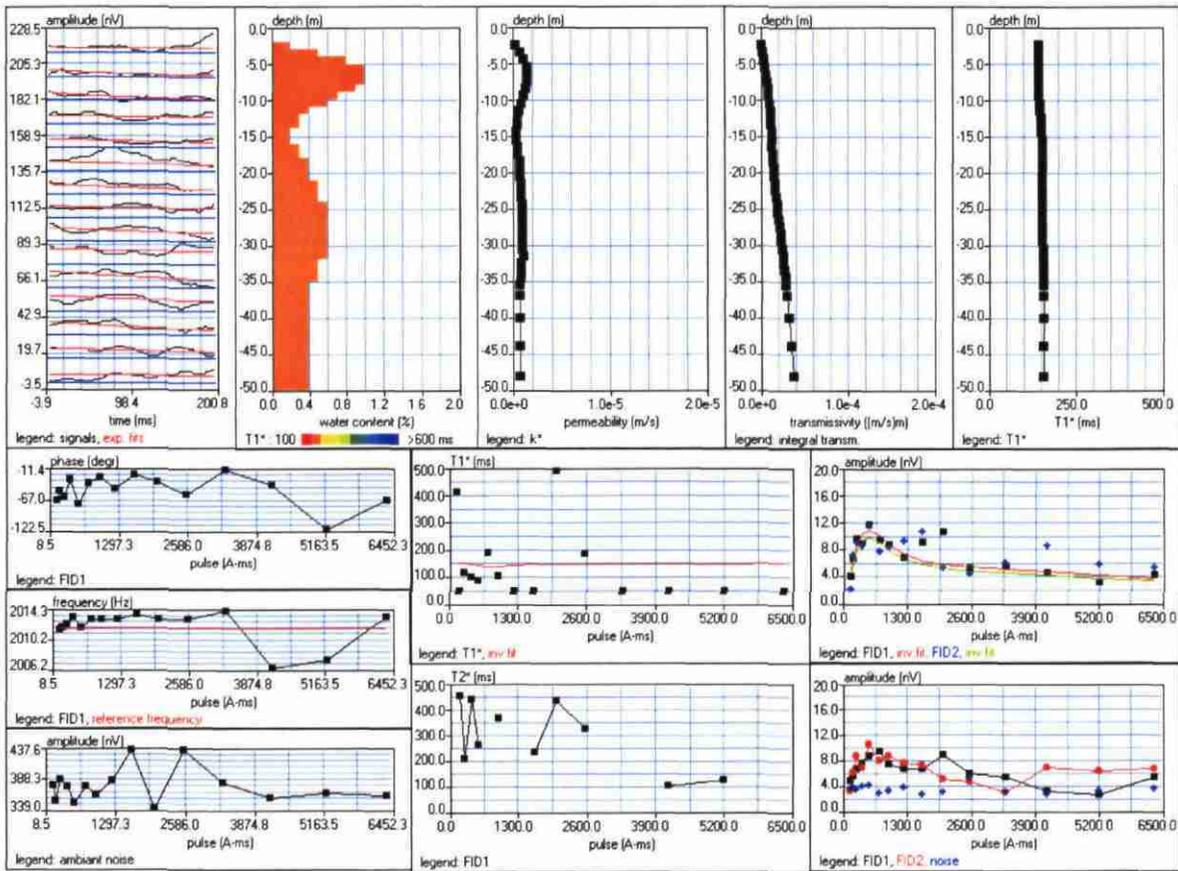
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.83; EN/IN = 0.69

fitting error: FID1 = 20.68%; FID2 = 28.56 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL07

Loop: 4 - 37.5 Date: 17.01.2003 Time: 14:49

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel07.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47288.73 nT

filtering window = 198.6 ms

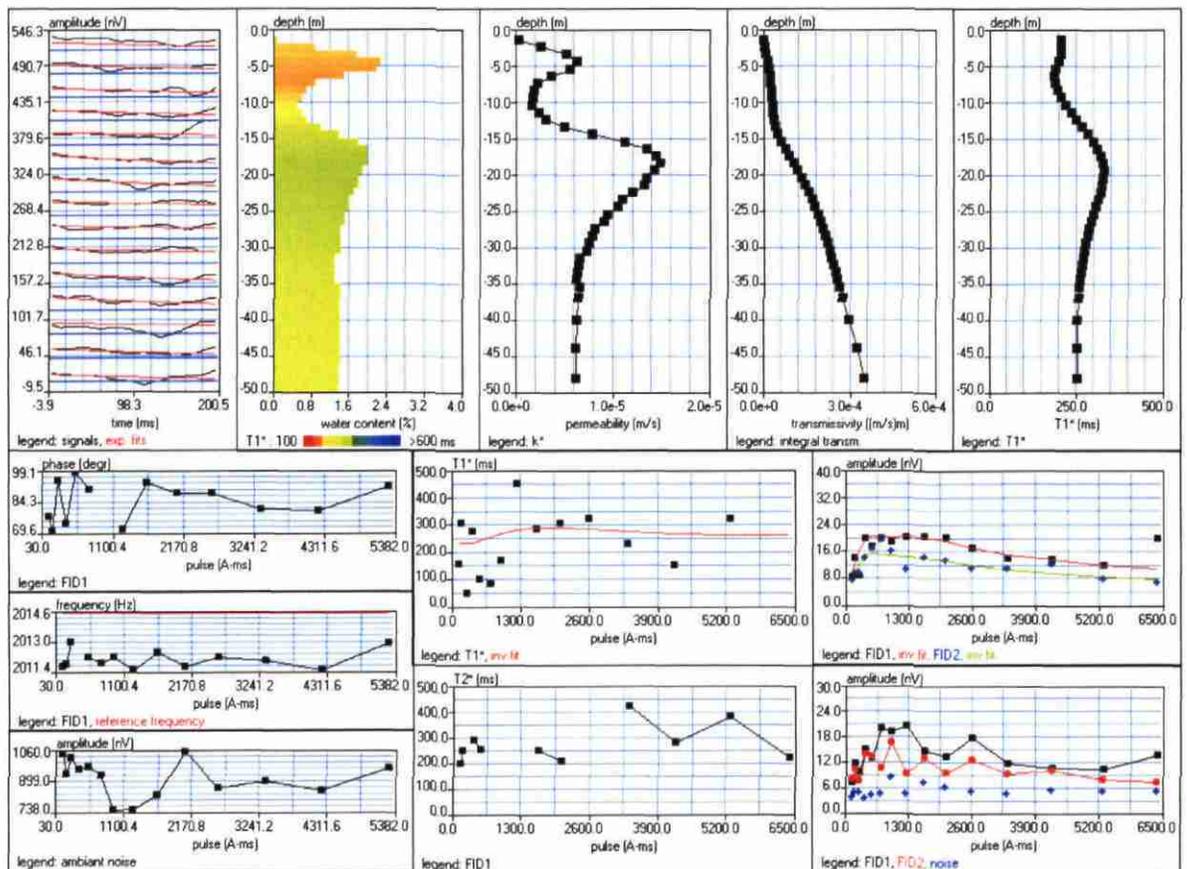
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.70; EN/IN = 1.03

fitting error: FID1 = 19.42%; FID2 = 15.82 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL08

Loop: 4 - 37.5 Date: 18.01.2003 Time: 07:42

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel08.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side ≈ 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47260.56 nT

filtering window = 139.1 ms

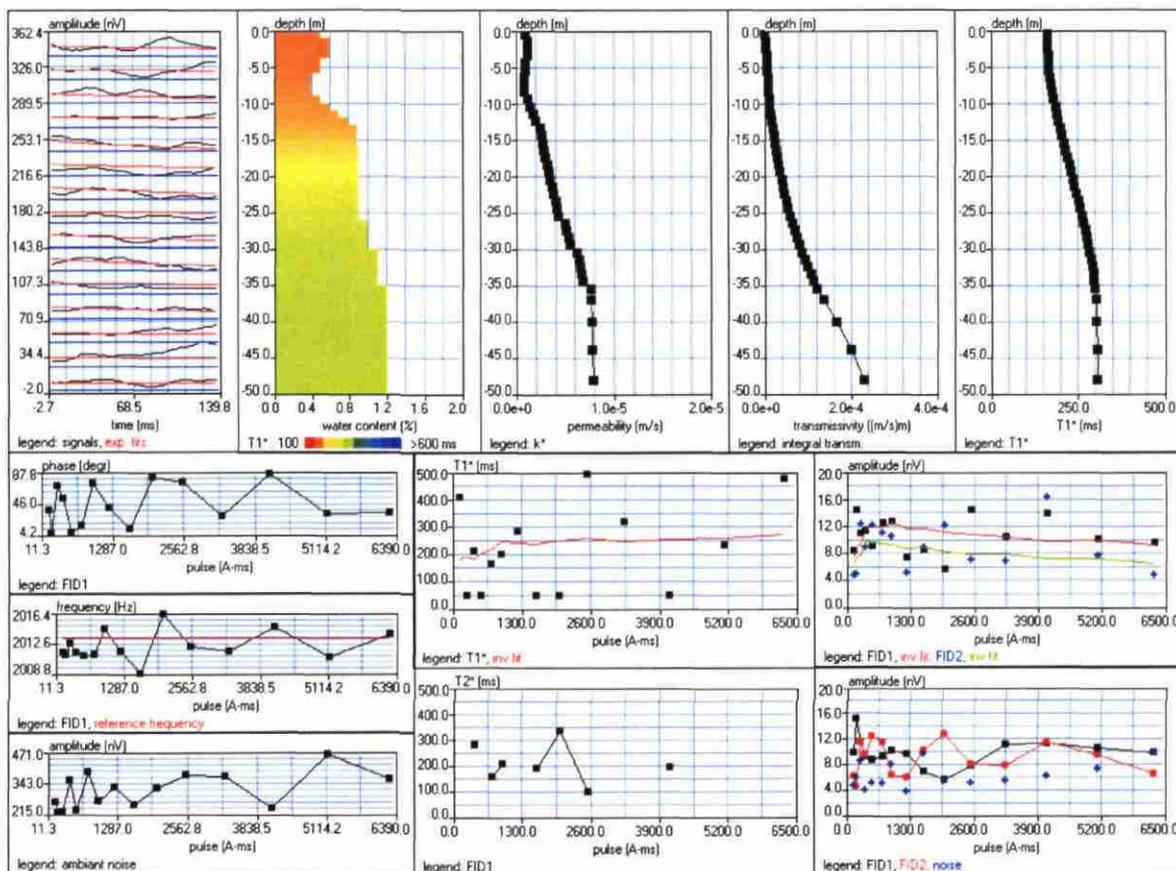
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.56; EN/IN = 1.25

fitting error: FID1 = 26.91%; FID2 = 34.21 %

param. of regular.: modeling

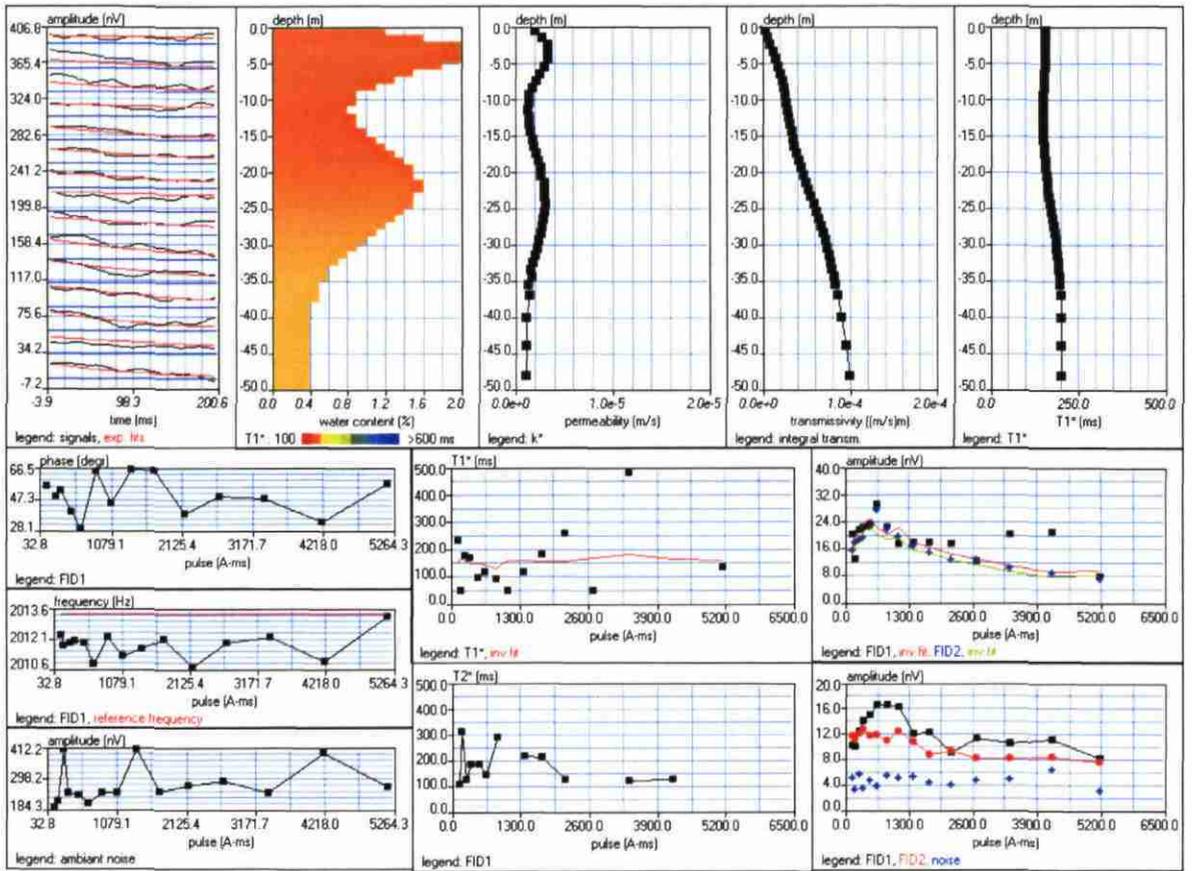
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL09  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 14.01.2003 Time: 10:05

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvel09.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47260.56 nT

filtering window = 198.7 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 2.70; EN/IN = 0.91  
 fitting error: FID1 = 25.29%; FID2 = 13.03 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES YVEL YVEL10

Loop: 4 - 37.5 Date: 17.01.2003 Time: 09:10

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Yvell10.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window = 178.8 ms

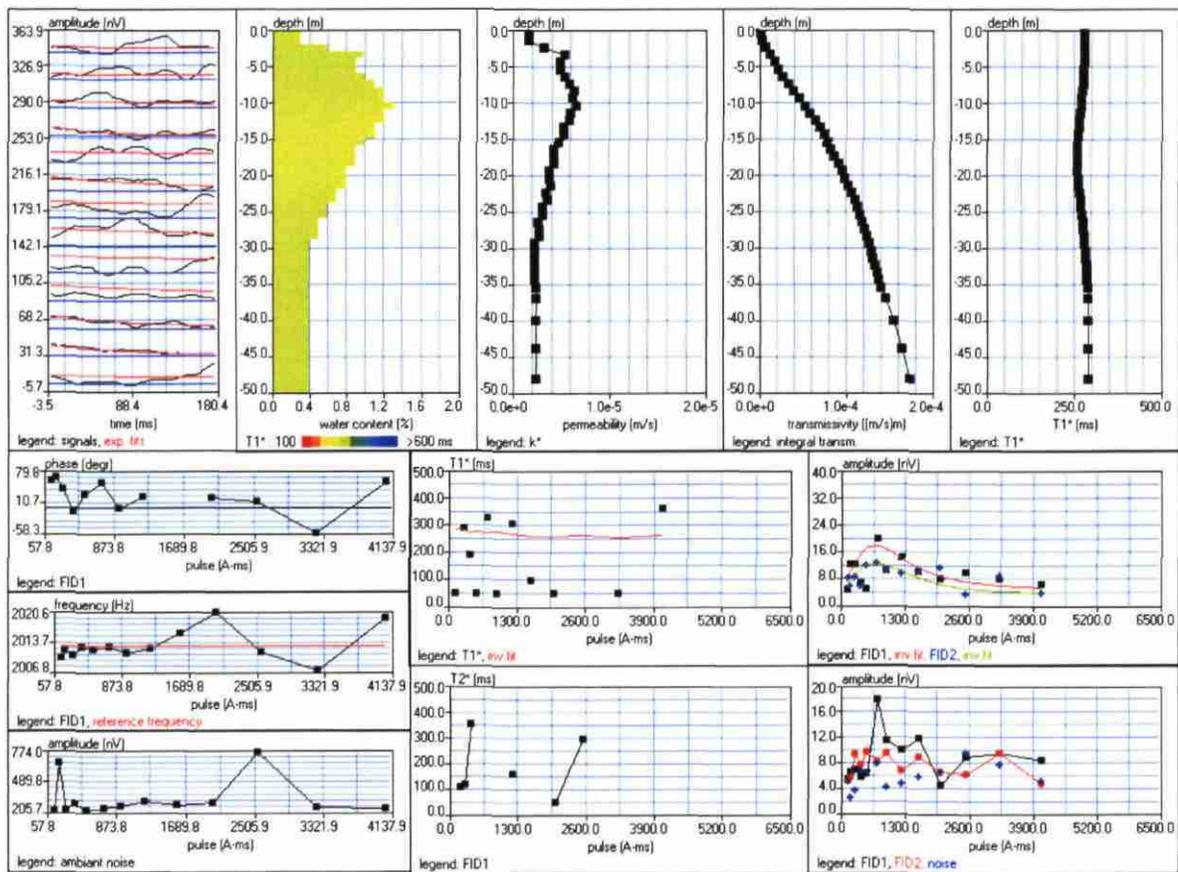
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.51; EN/IN = 1.15

fitting error: FID1 = 46.04%; FID2 = 29.69 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST01

Loop: 4 - 37.5 Date: 21.01.2003 Time: 13:44

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust01.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47145.54 nT

filtering window = 199.2 ms

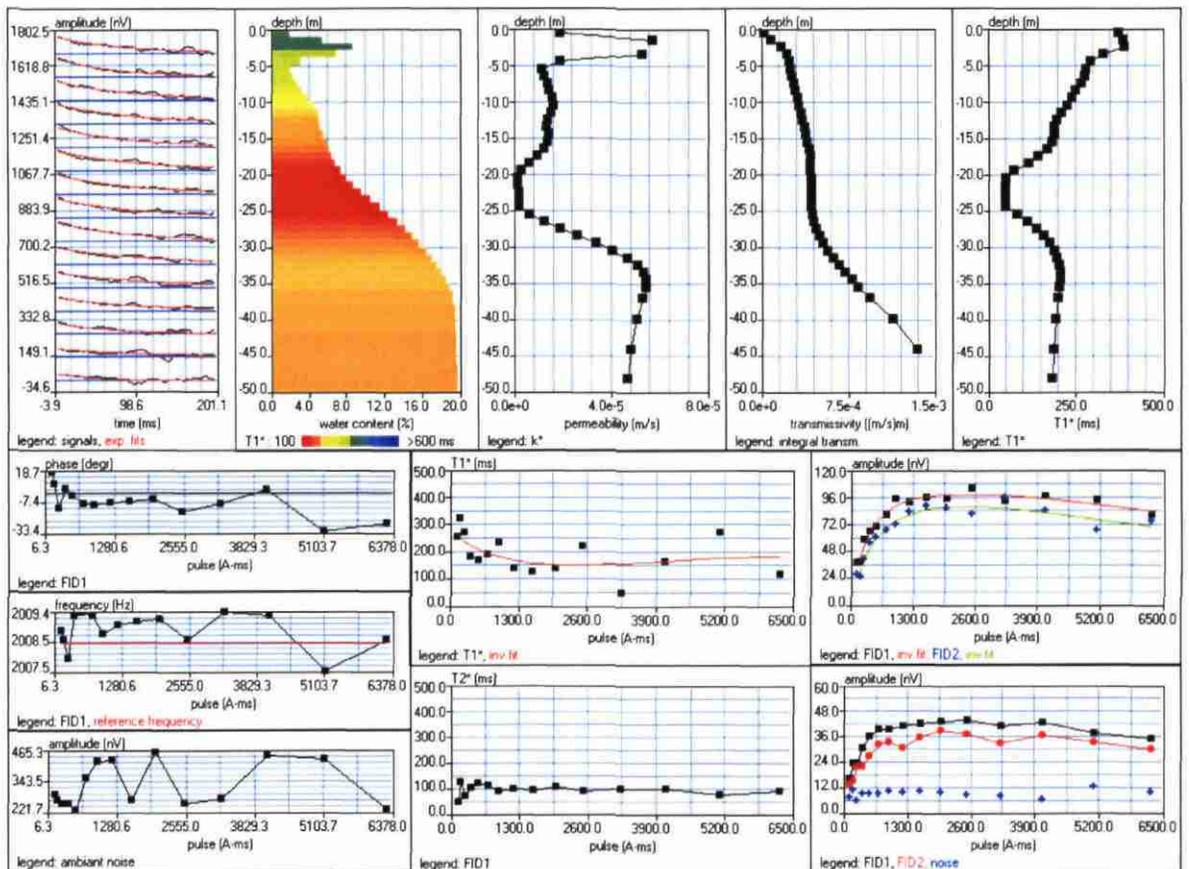
time constant = 15.00 ms

average S/N = 3.95; EN/IN = 1.80

fitting error: FID1 = 4.55%; FID2 = 6.88 %

param. of regular.: E, T2\* = 122.1; T1\* = 0.238

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST02

Loop: 4 - 37.5 Date: 22.01.2003 Time: 15:25

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust02.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window = 178.7 ms

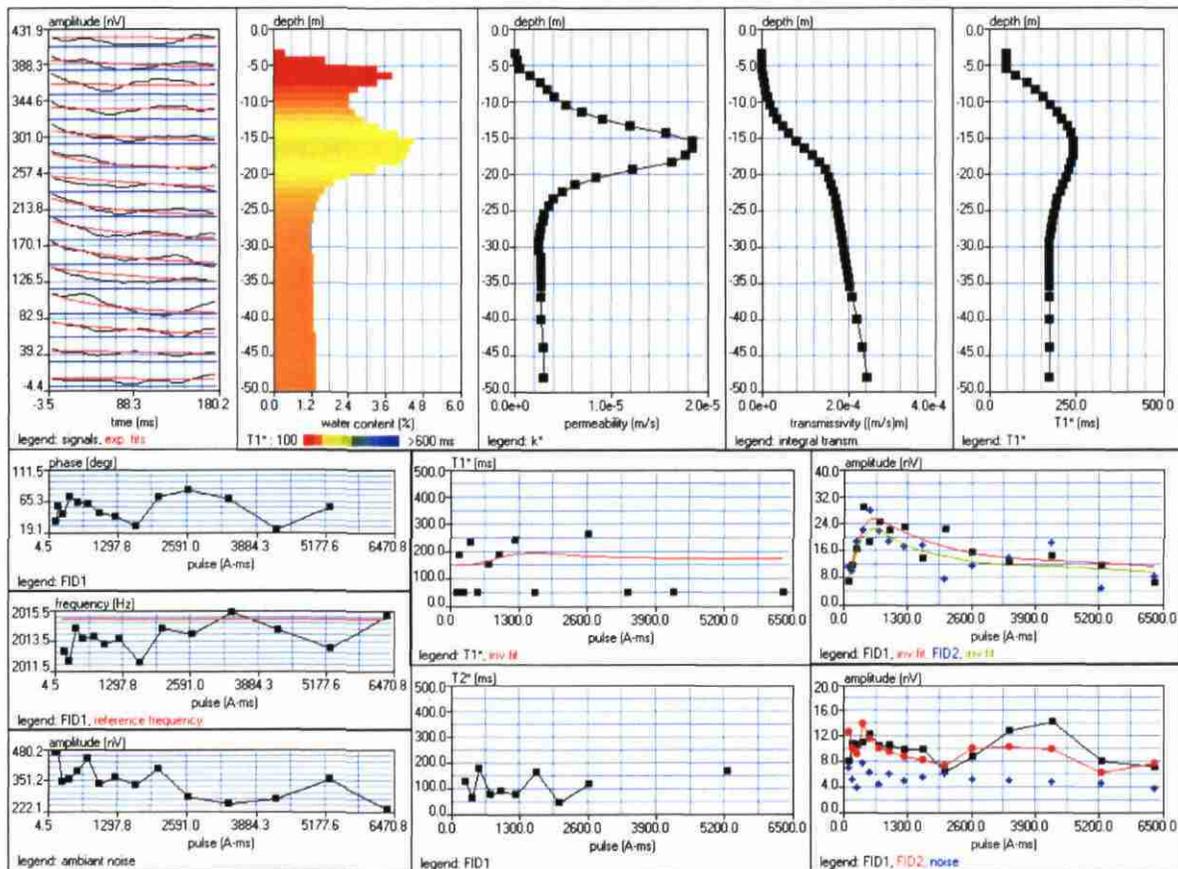
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.91; EN/IN = 1.05

fitting error: FID1 = 19.94%; FID2 = 21.58 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST03

Loop: 4 - 37.5 Date: 24.01.2003 Time: 10:33

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust03.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47213.62 nT

filtering window = 179.0 ms

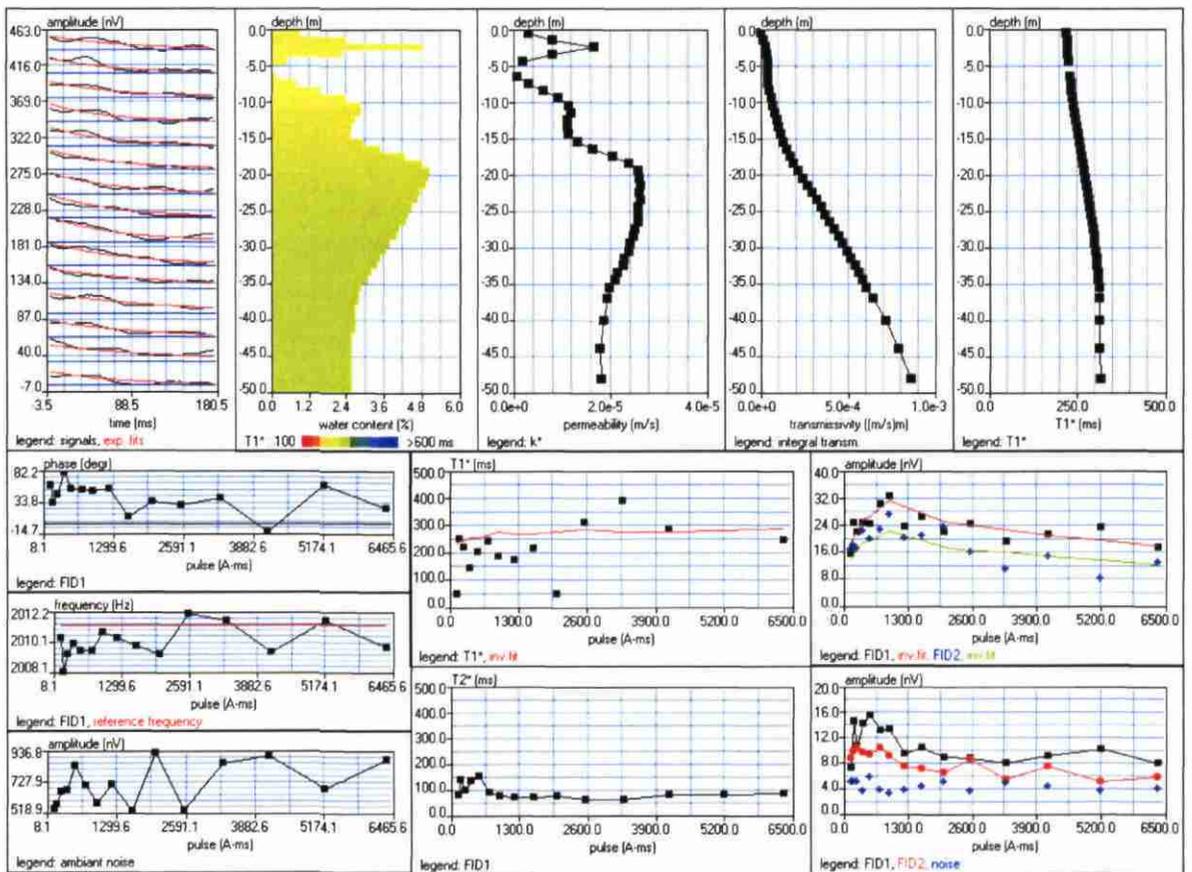
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.48; EN/IN = 0.86

fitting error: FID1 = 10.89%; FID2 = 16.90 %

param. of regular.: modeling

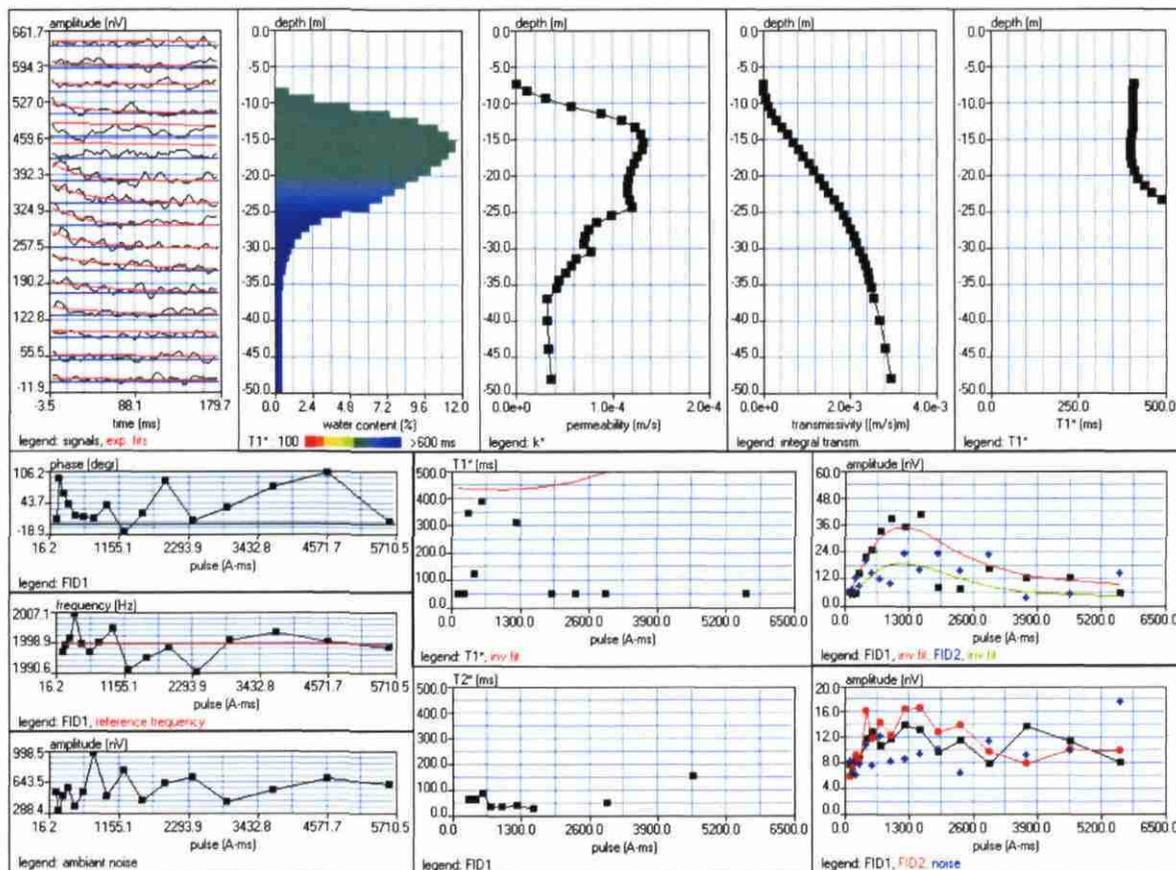
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST04  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 20.01.2003 Time: 15:53

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust04.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 46910.80 nT

filtering window = 178.1 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.13; EN/IN = 1.85  
 fitting error: FID1 = 33.72%; FID2 = 42.41 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST05

Loop: 4 - 37.5 Date: 23.01.2003 Time: 11:57

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust05.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47335.68 nT

filtering window = 138.9 ms

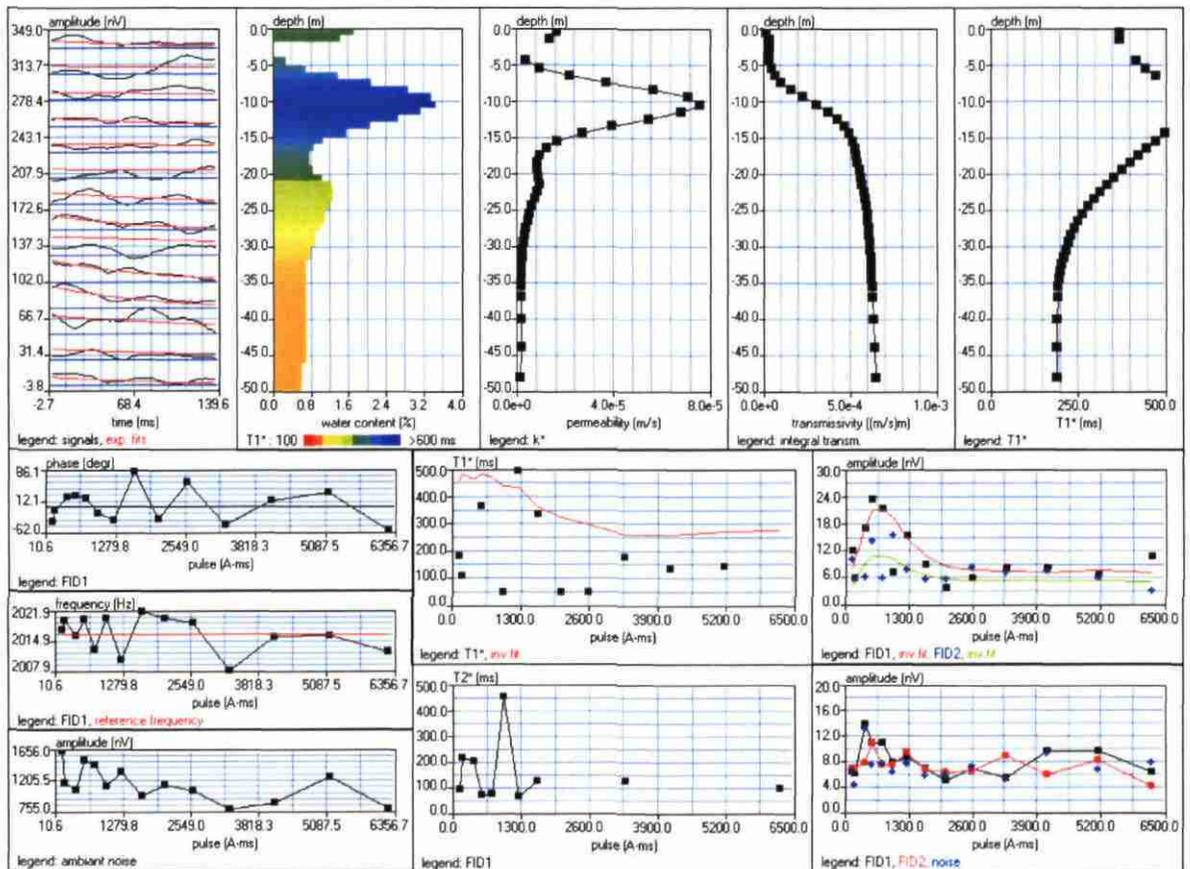
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.14; EN/IN = 1.44

fitting error: FID1 = 32.51%; FID2 = 35.85 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST06

Loop: 4 - 37.5 Date: 20.01.2003 Time: 10:06

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust06.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47061.03 nT

filtering window = 169.6 ms

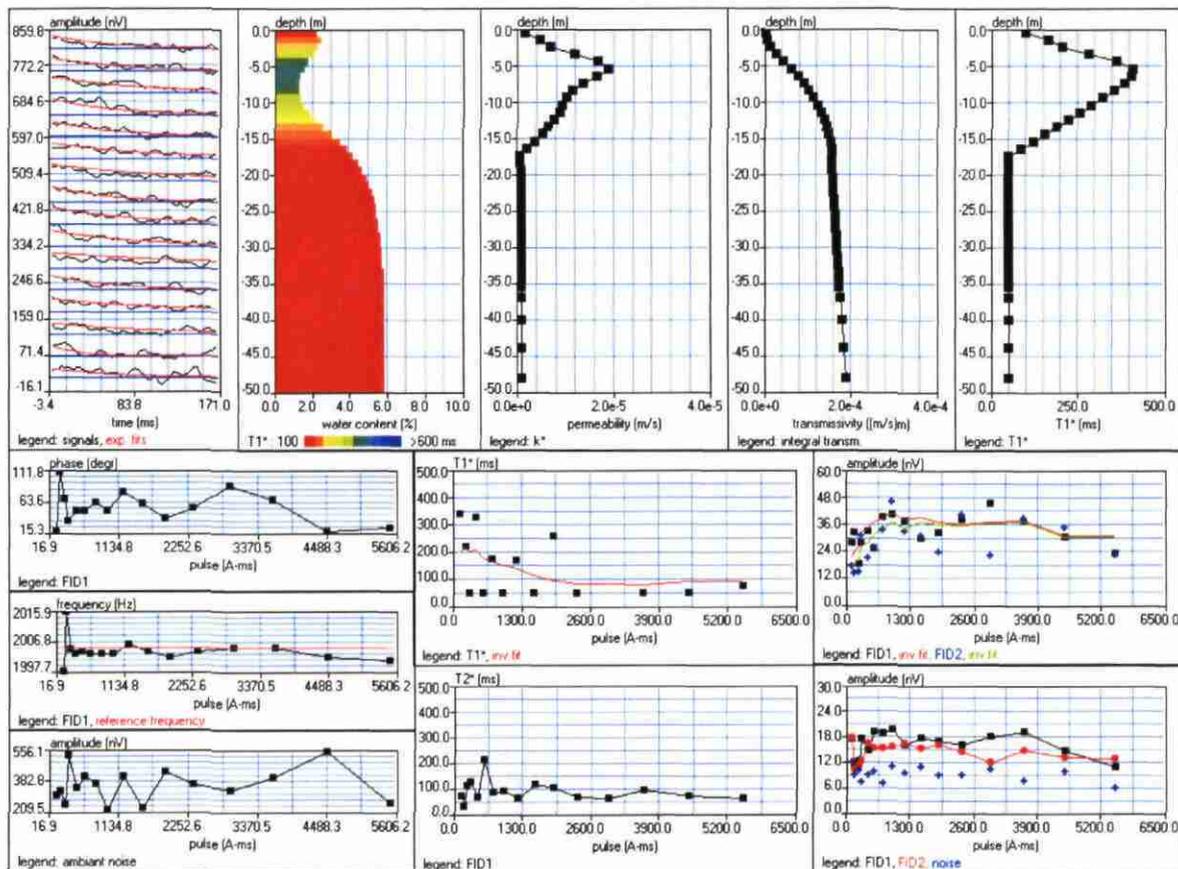
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.77; EN/IN = 1.84

fitting error: FID1 = 18.00%; FID2 = 23.13 %

param. of regular.: modeling

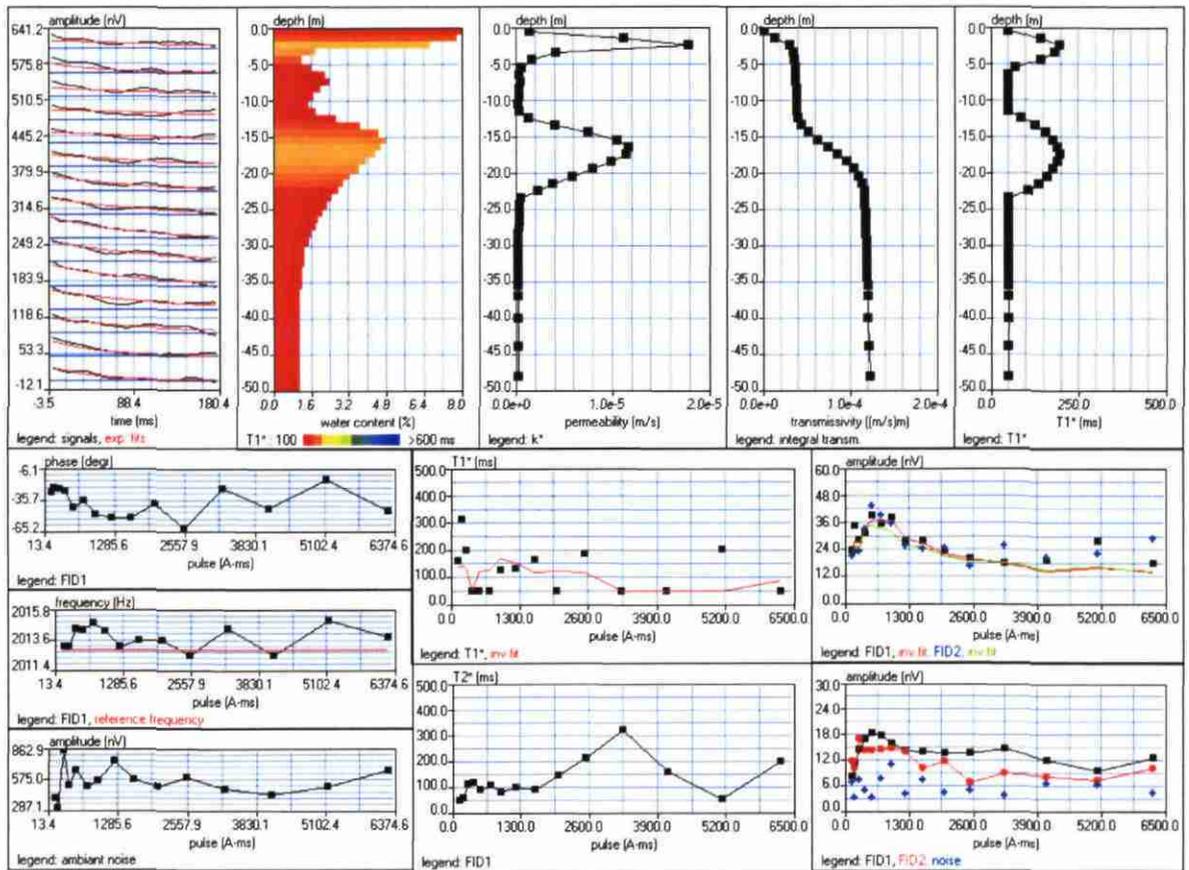
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST07  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 25.01.2003 Time: 03:56

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust07.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47251.17 nT

filtering window = 178.8 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 2.43; EN/IN = 1.13  
 fitting error: FID1 = 13.75%; FID2 = 20.39 %  
 param. of regular.: modeling  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST08

Loop: 4 - 37.5 Date: 22.01.2003 Time: 07:41

NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust08.inp

matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47366.20 nT

filtering window = 148.7 ms

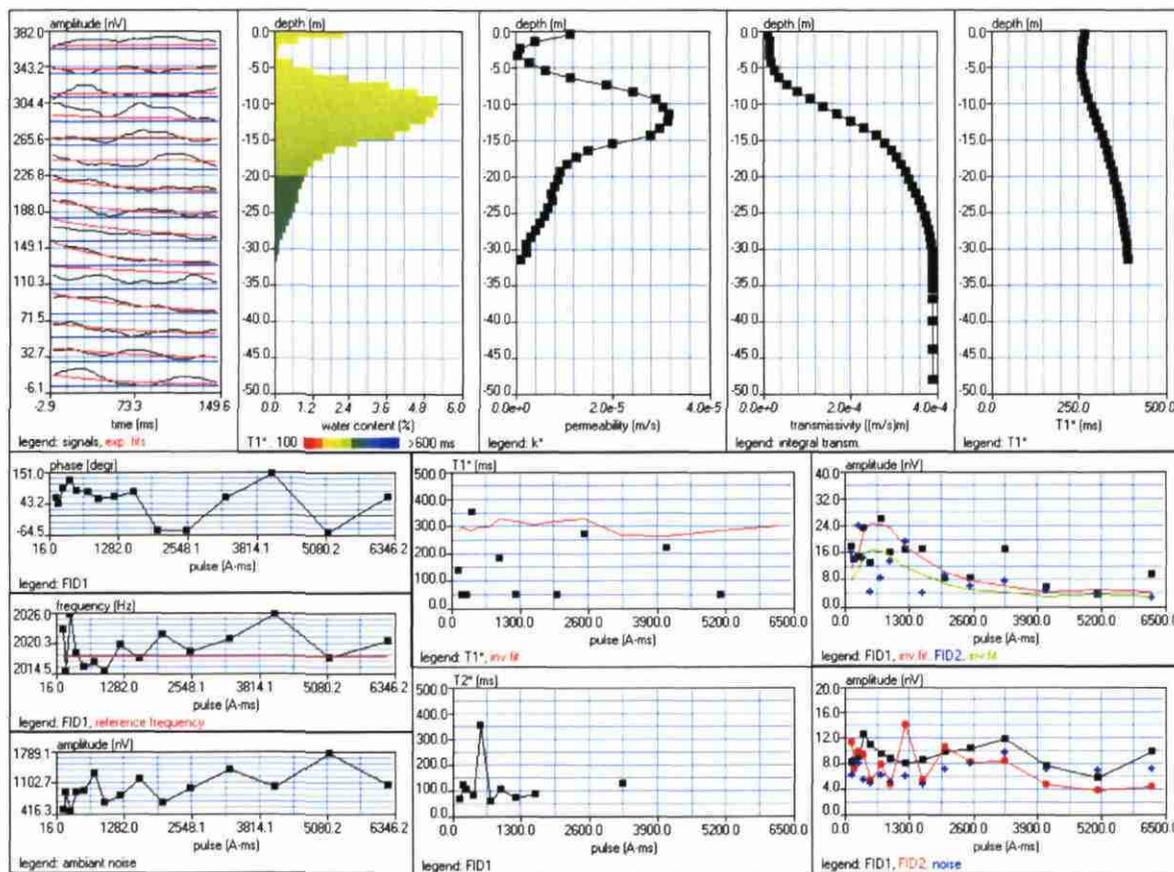
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.39; EN/IN = 1.33

fitting error: FID1 = 34.15%; FID2 = 52.96 %

param. of regular.: modeling

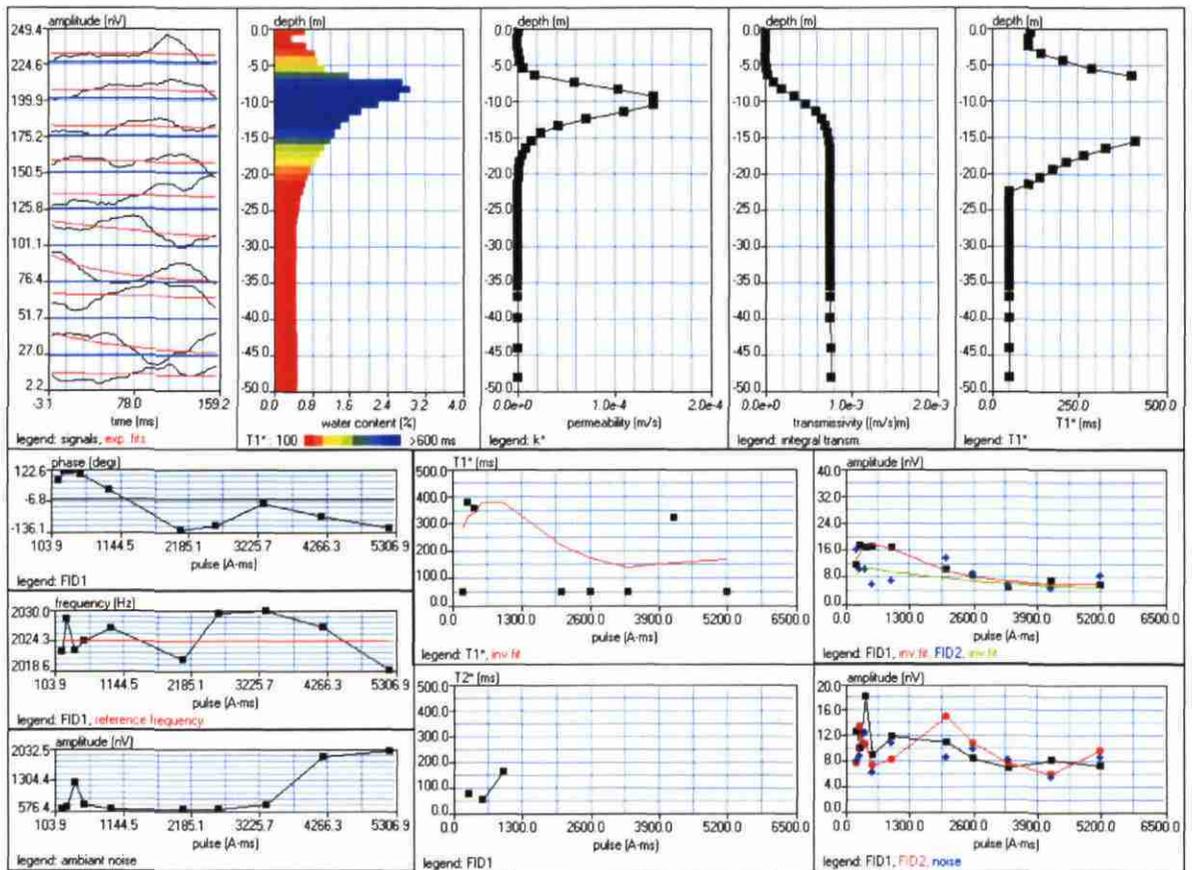
permeability constant Cp = 7.00e-09



Site: SILURES OUST OUST10  
 Loop: 4 - 37.5 Date: 23.01.2003 Time: 06:14

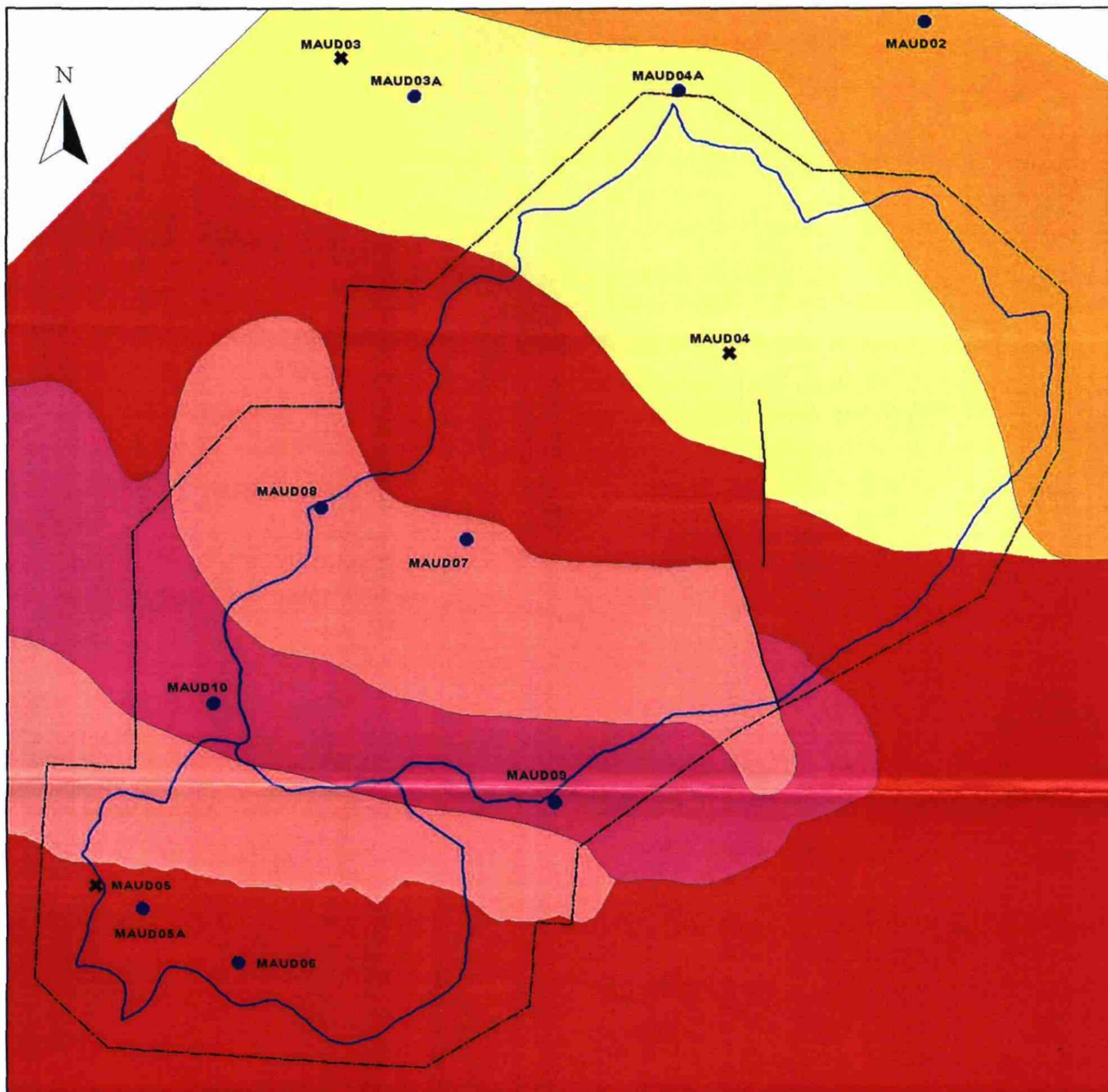
NUMIS data set: C:\silures2003\databrutes\Oust10.inp  
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm  
 loop: eight square, side = 37.5 m  
 geomagnetic field:  
 inclination= 64 degr, magnitude= 47518.78 nT

filtering window = 158.1 ms  
 time constant = 15.00 ms  
 average S/N = 1.19; EN/IN = 1.73  
 fitting error: FID1 = 8.02%; FID2 = 38.25 %  
 param. of regular.: E, T2\* = 244.1; T1\* = 0.715  
 permeability constant Cp = 7.00e-09



# **Annexe 2**

## **Planches A3**



0 1 2 Kilomètres

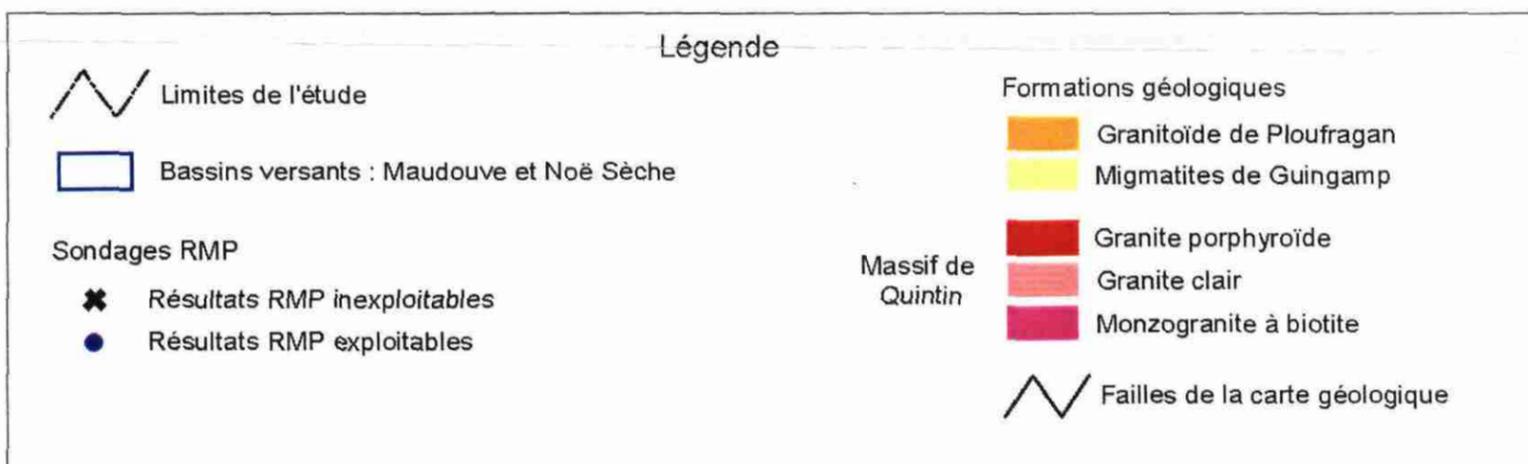


Planche 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

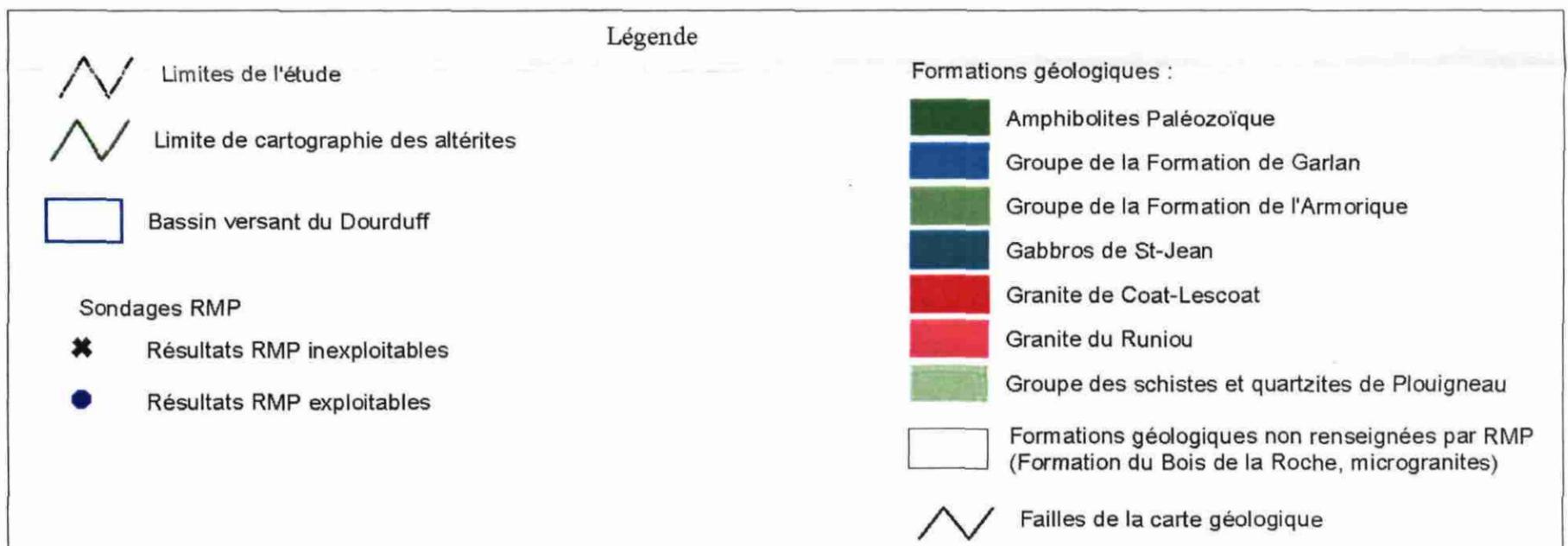
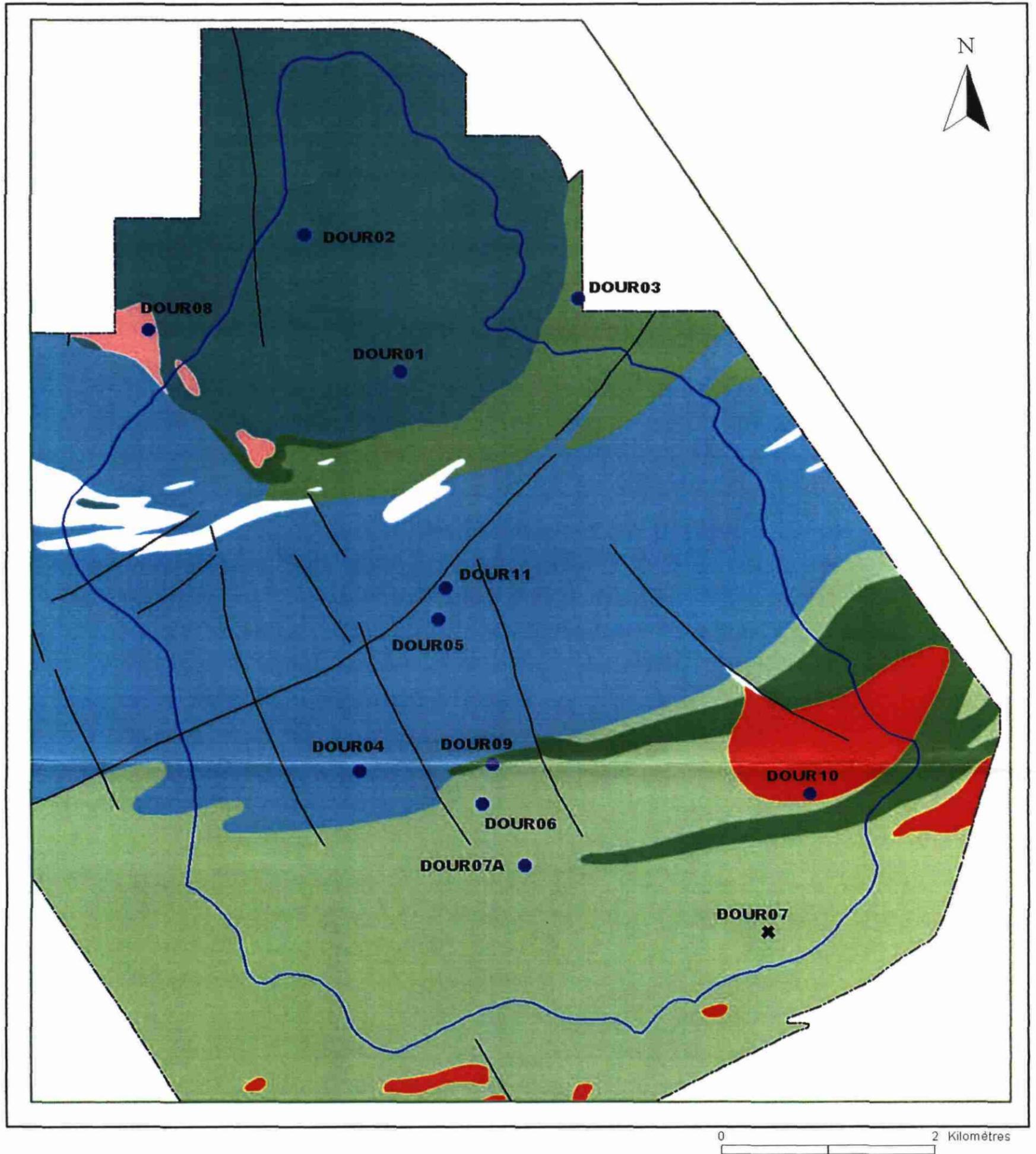


Planche 2 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Dourduff)

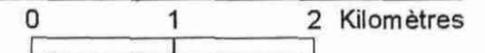
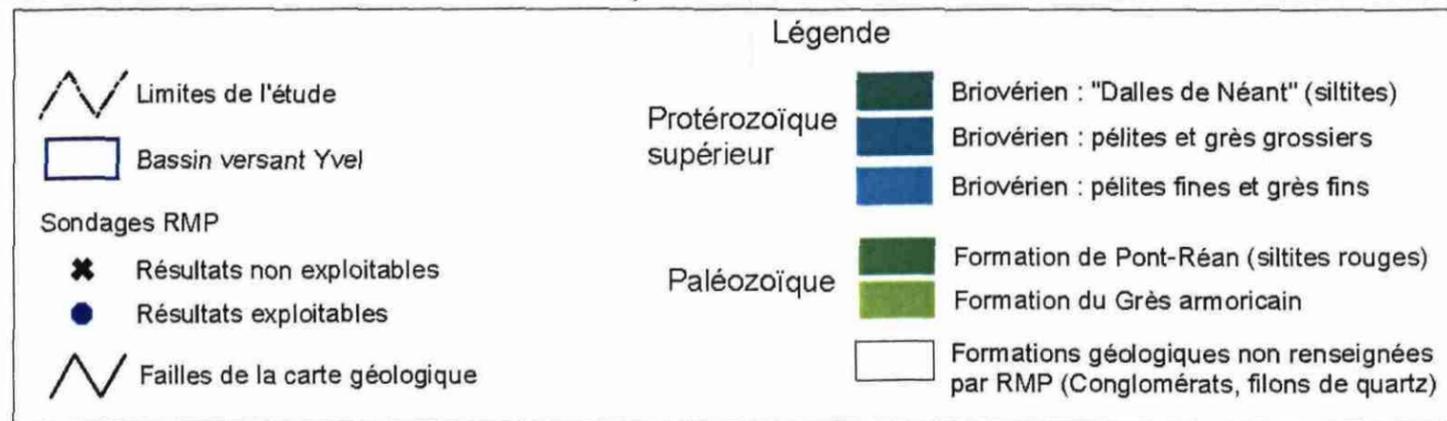
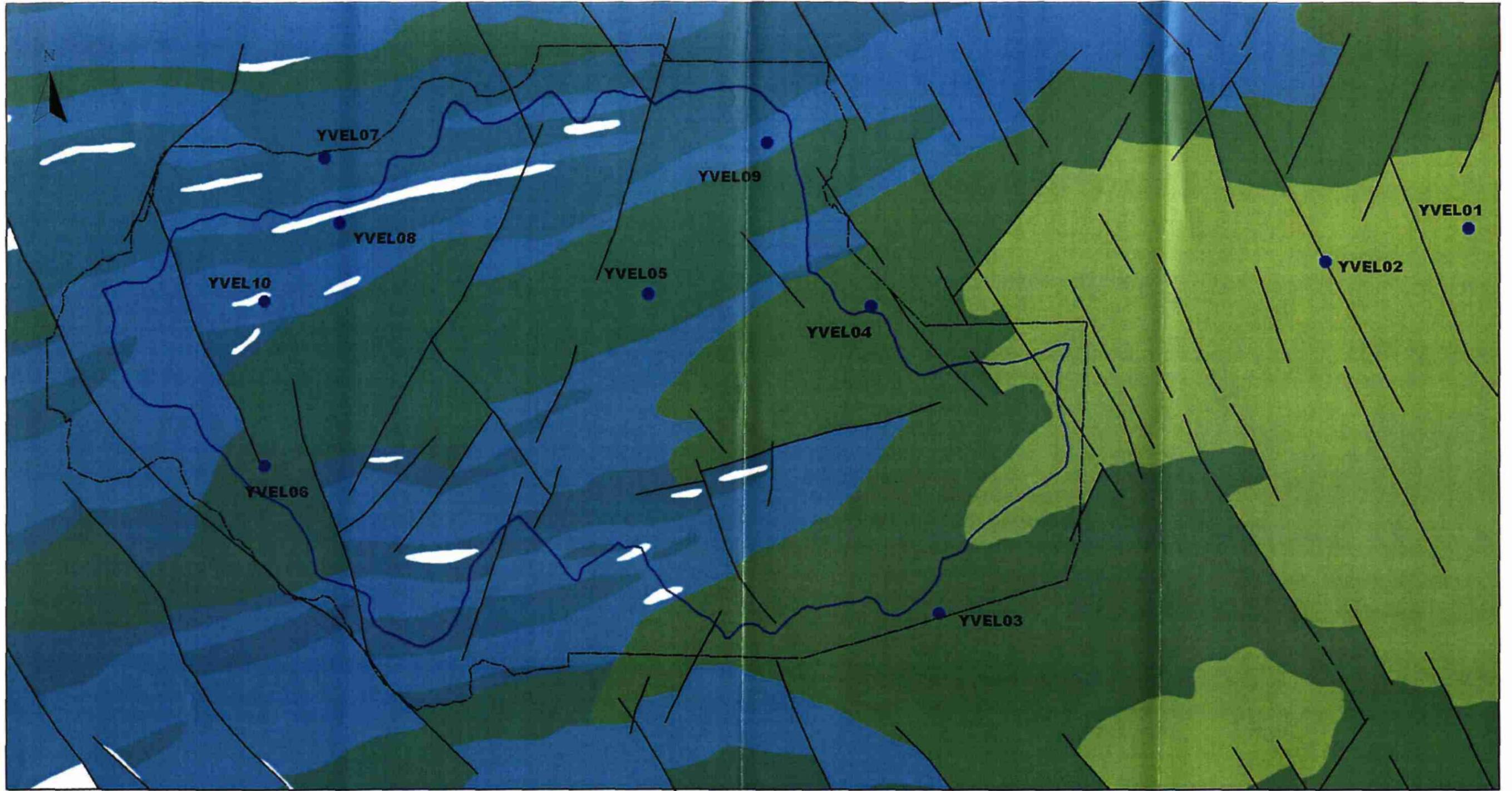


Planche 3 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Yvel)

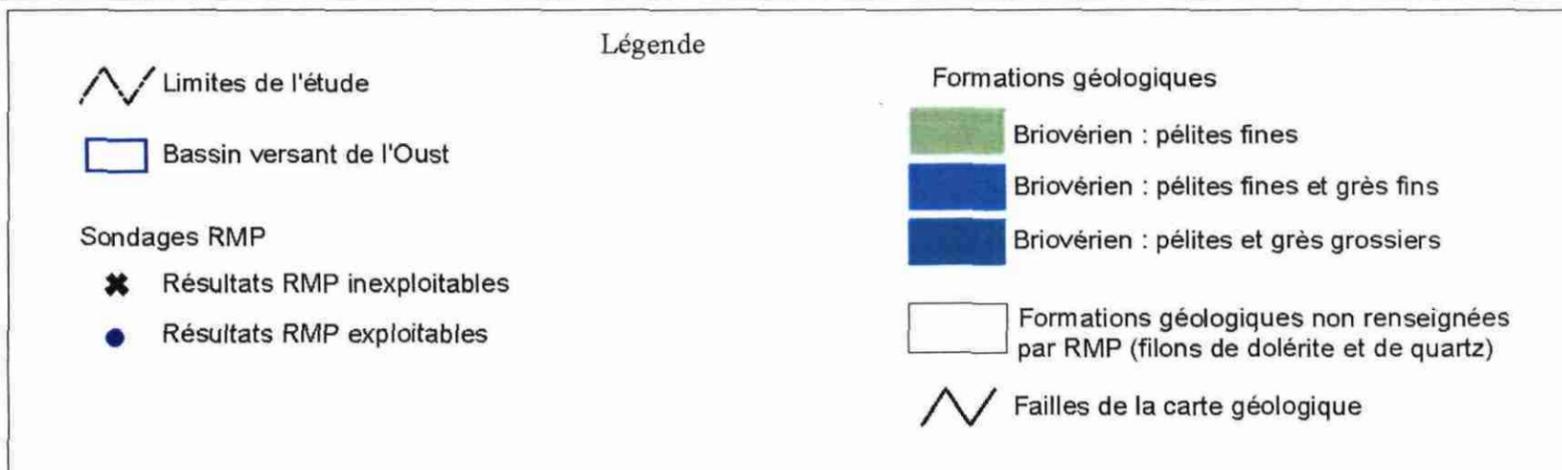
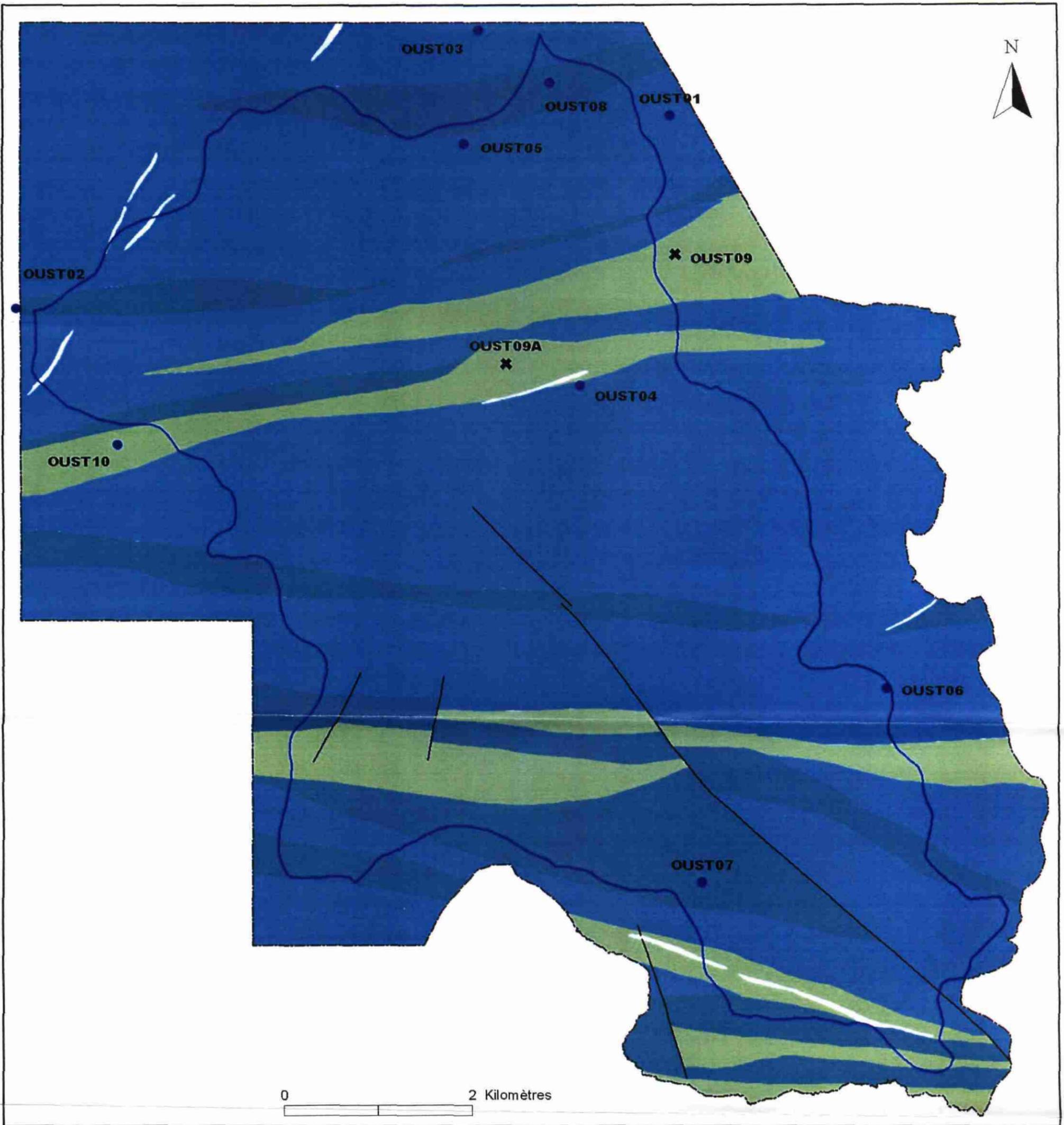
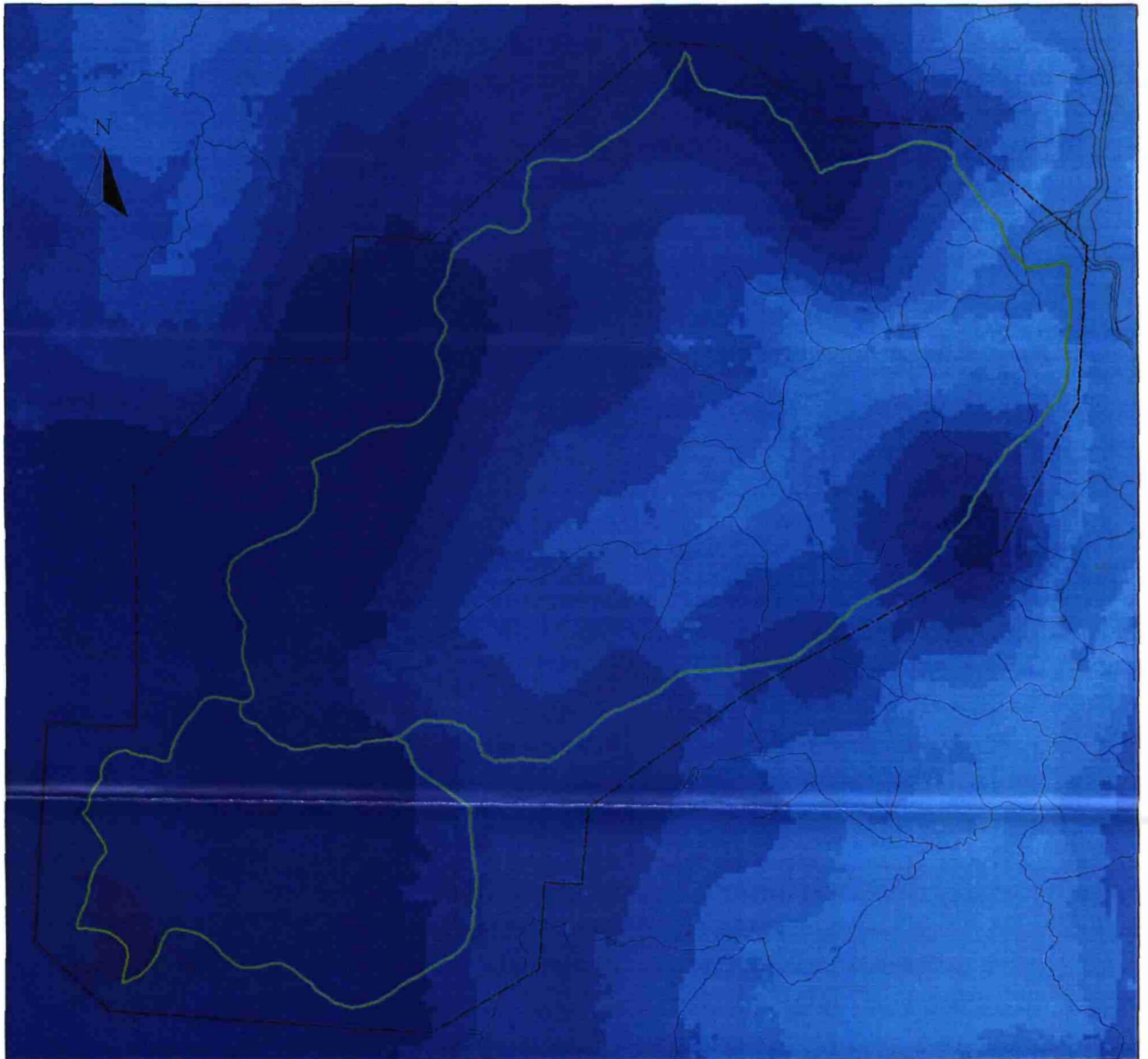


Planche 4 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

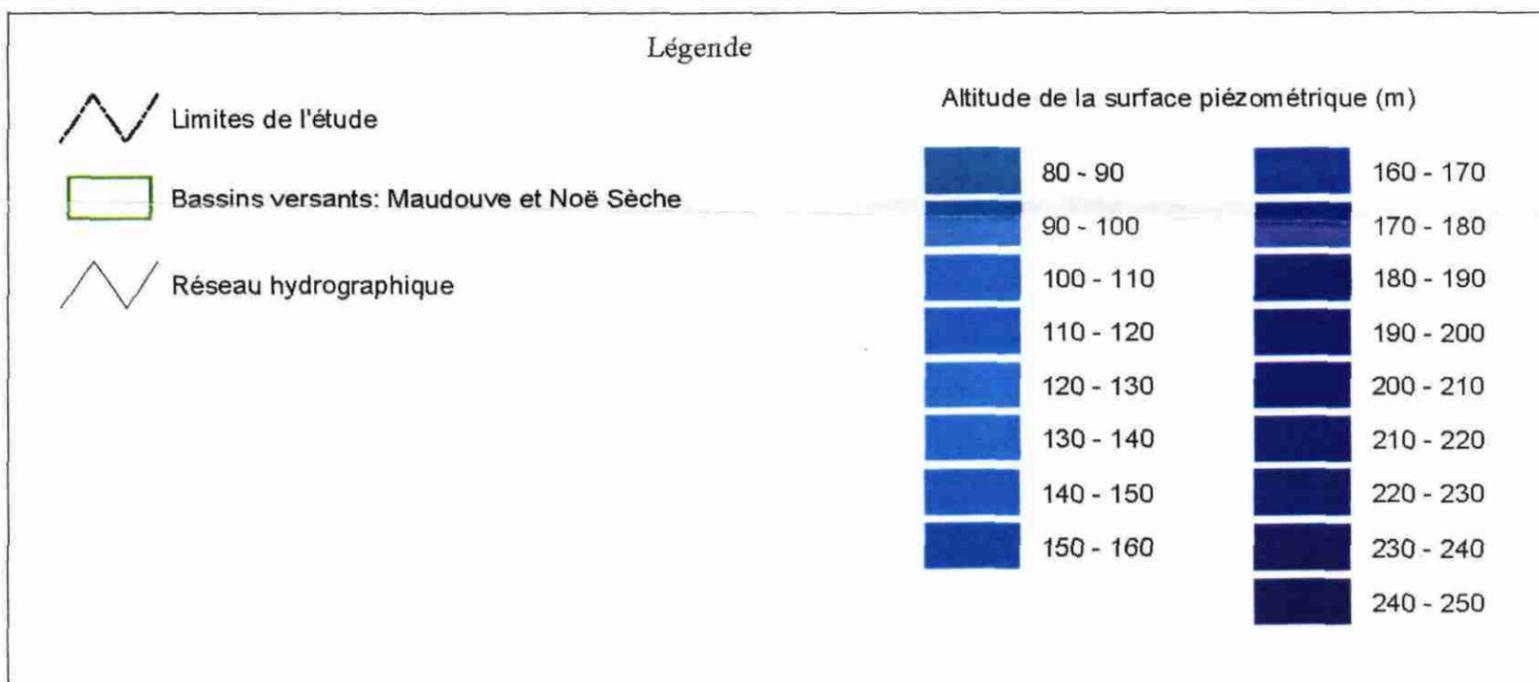
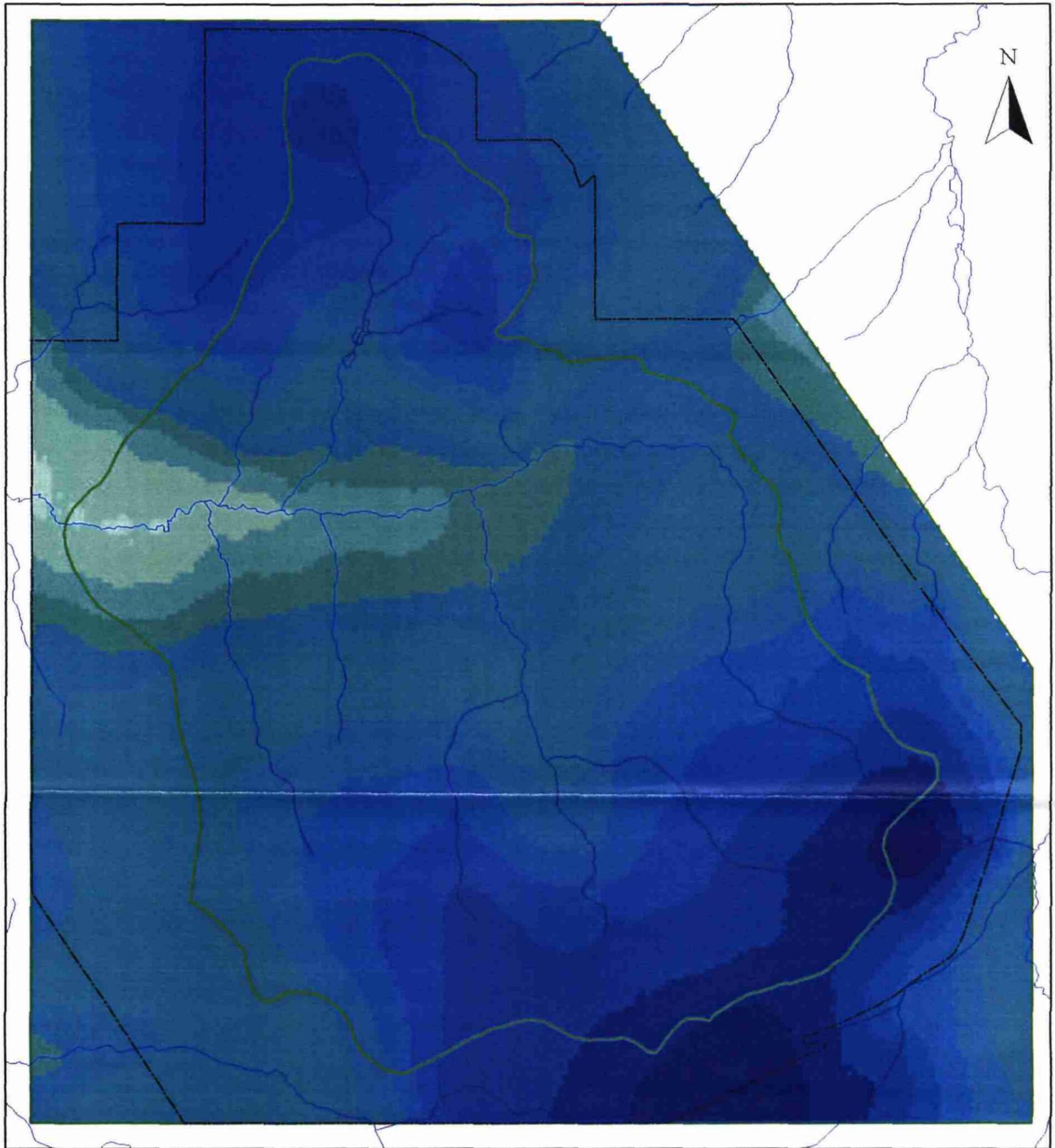


Planche 5 - Altitude de la surface piézométrique (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

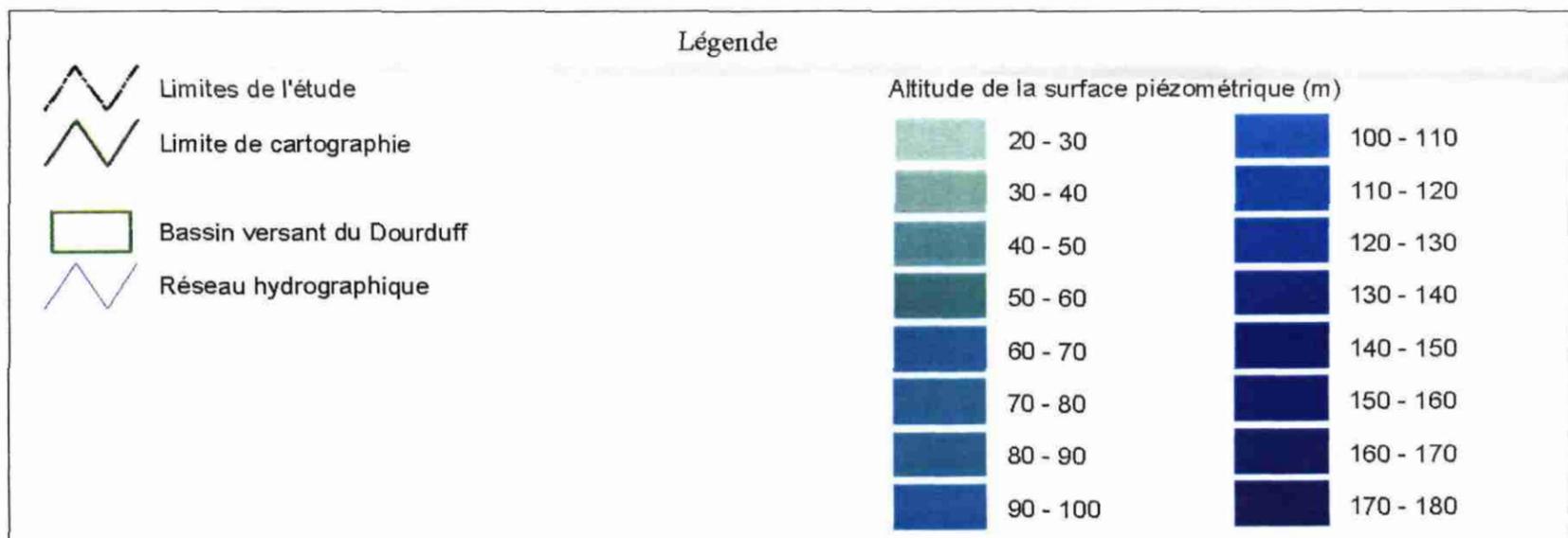


Planche 6 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Dourduff)

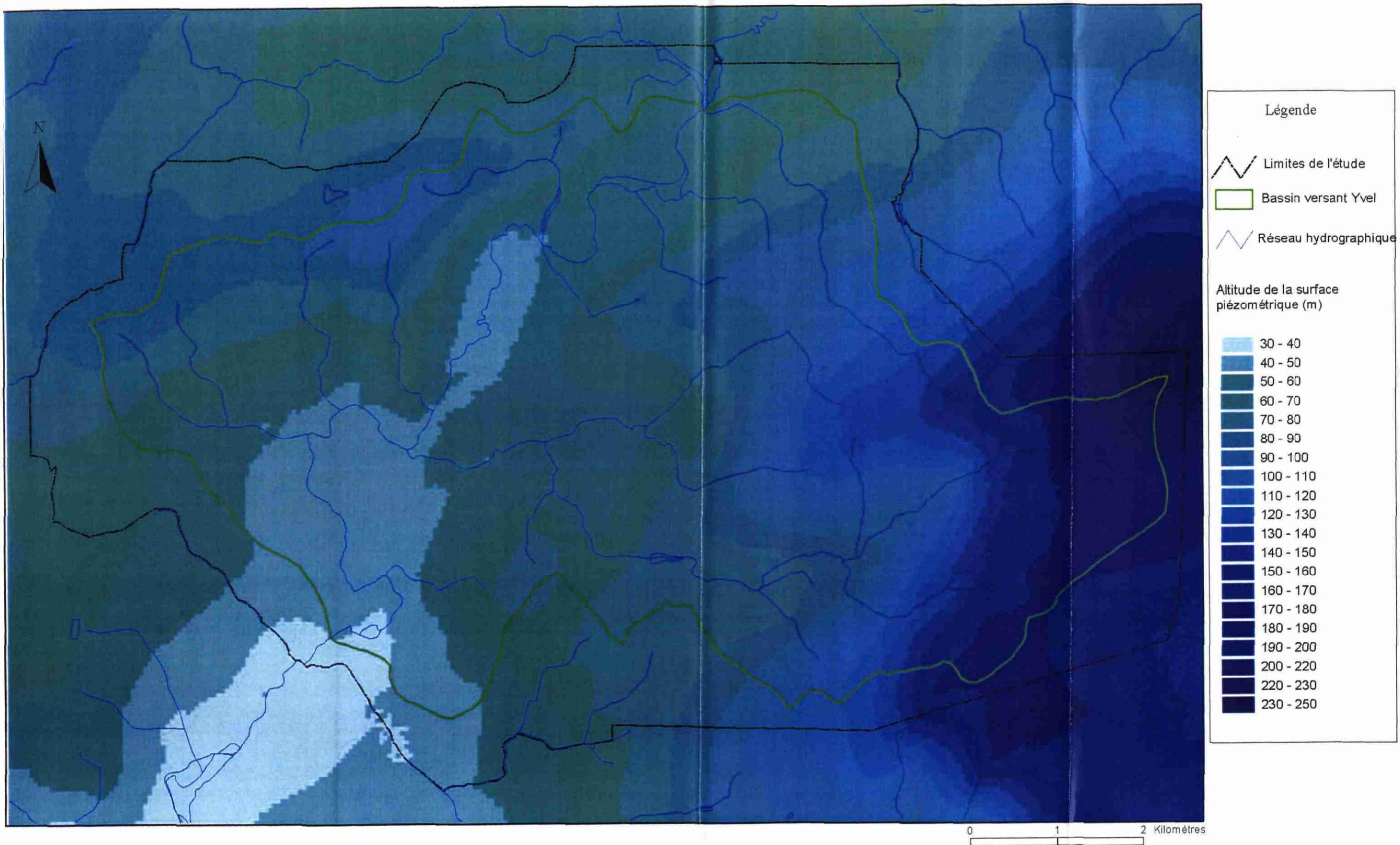


Planche 7 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Yvel)

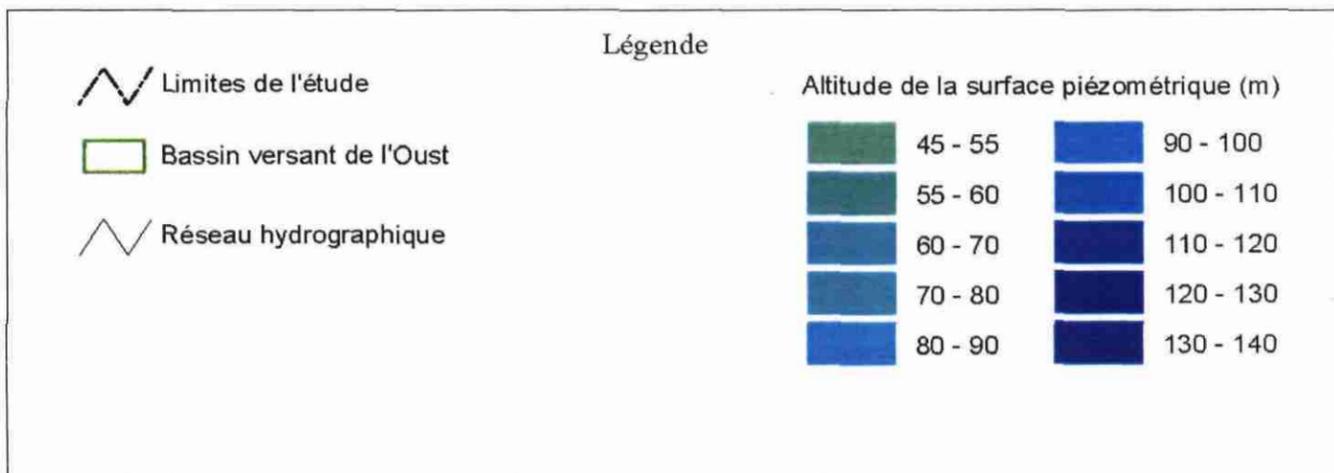
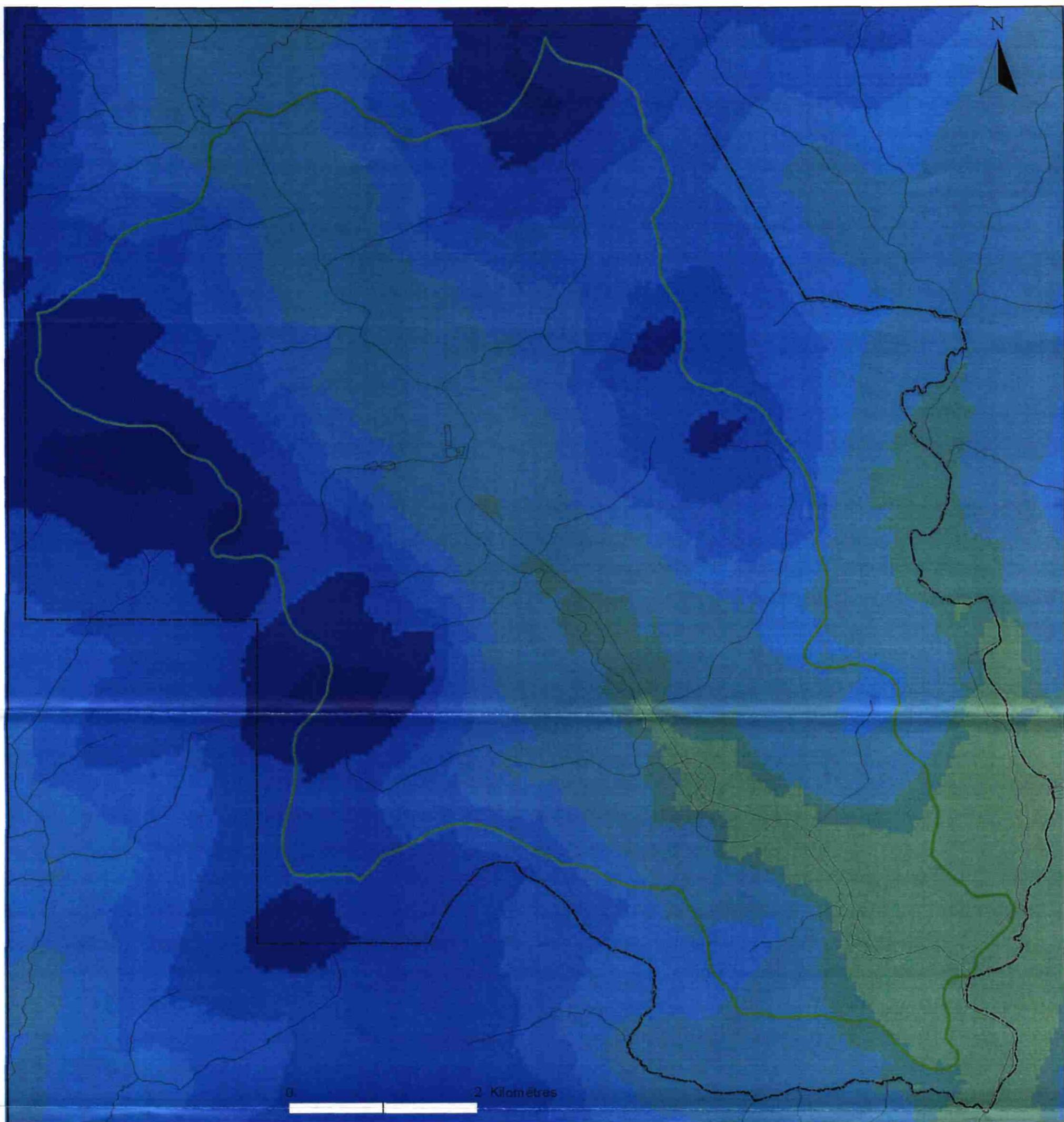
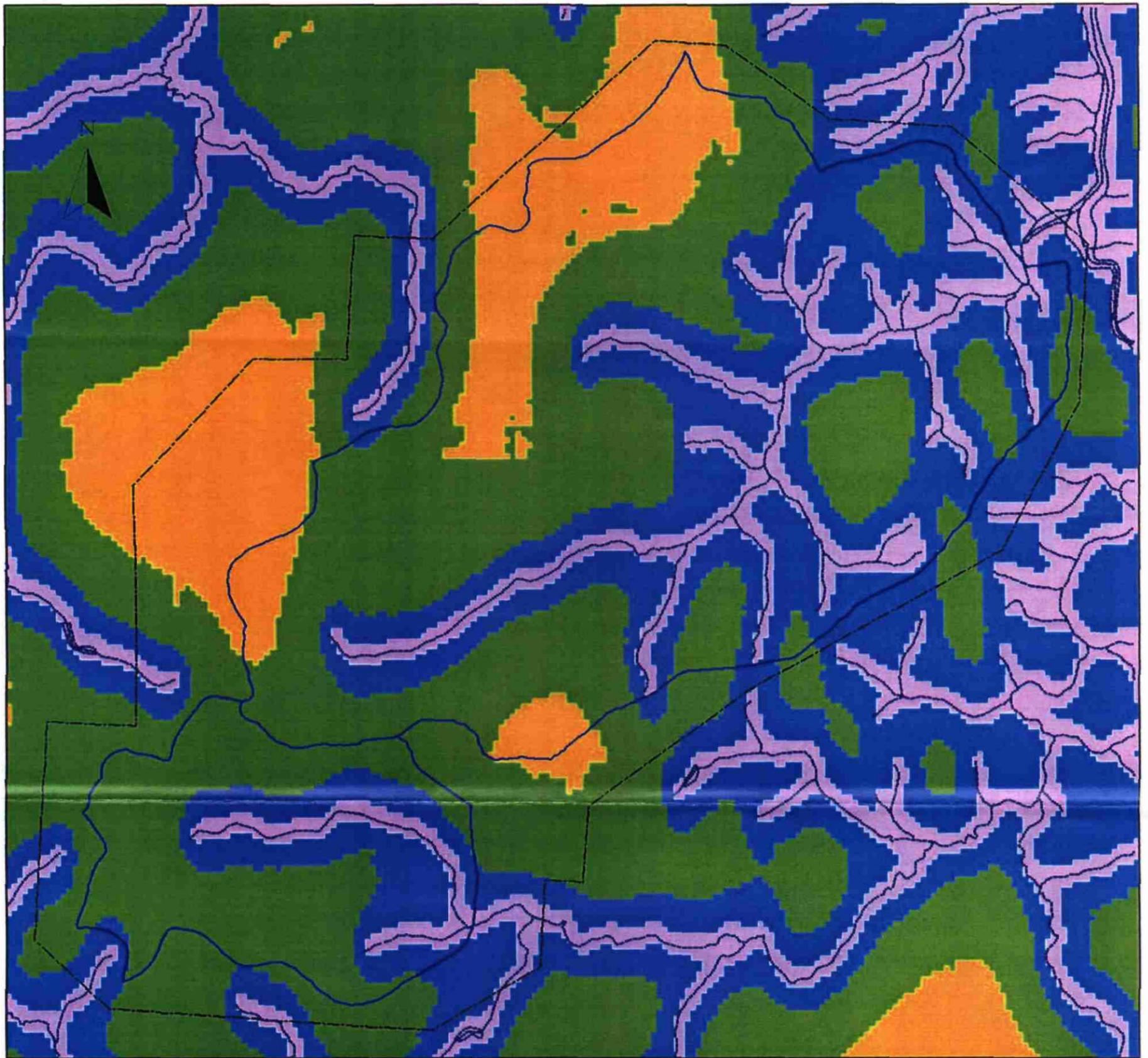


Planche 8 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

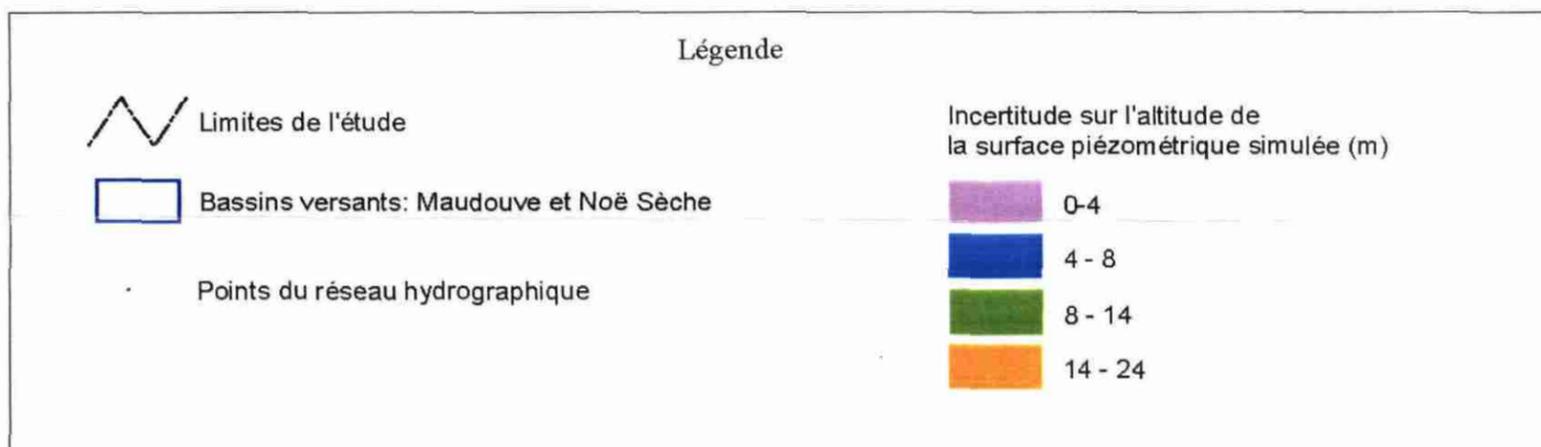


Planche 9 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

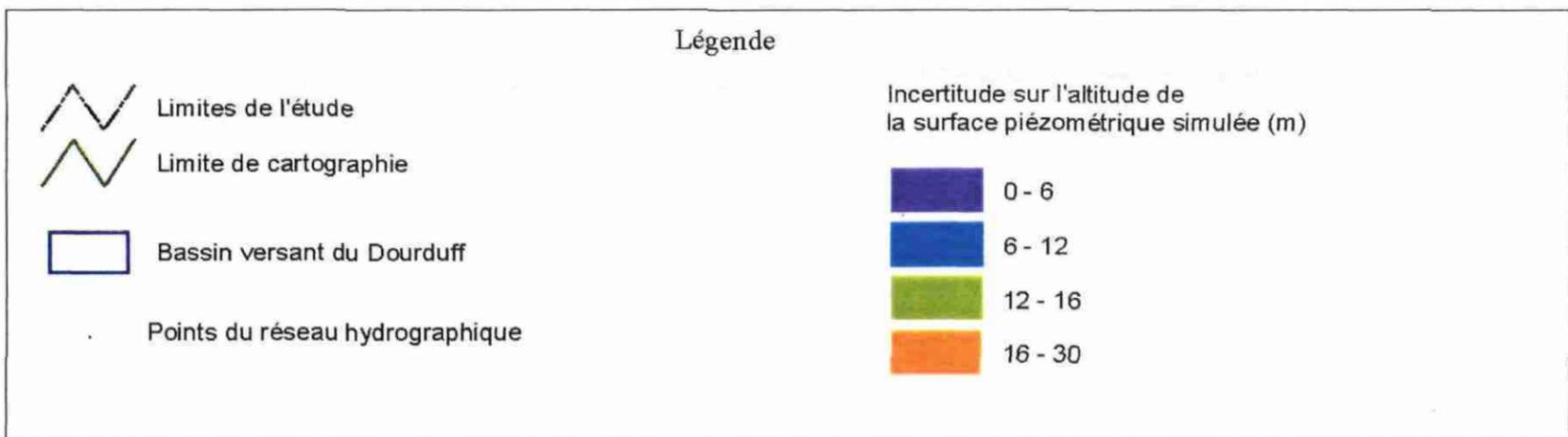
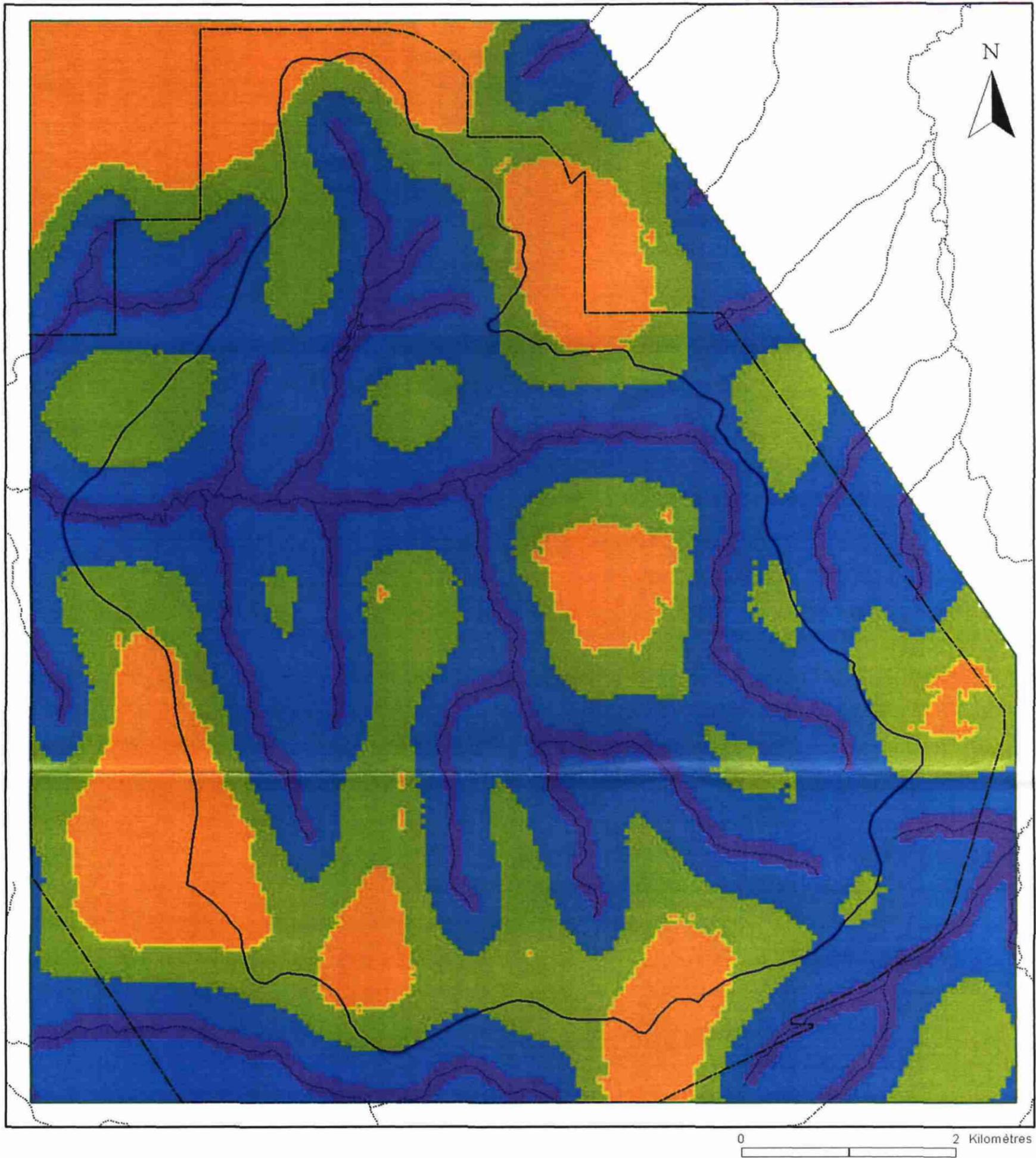
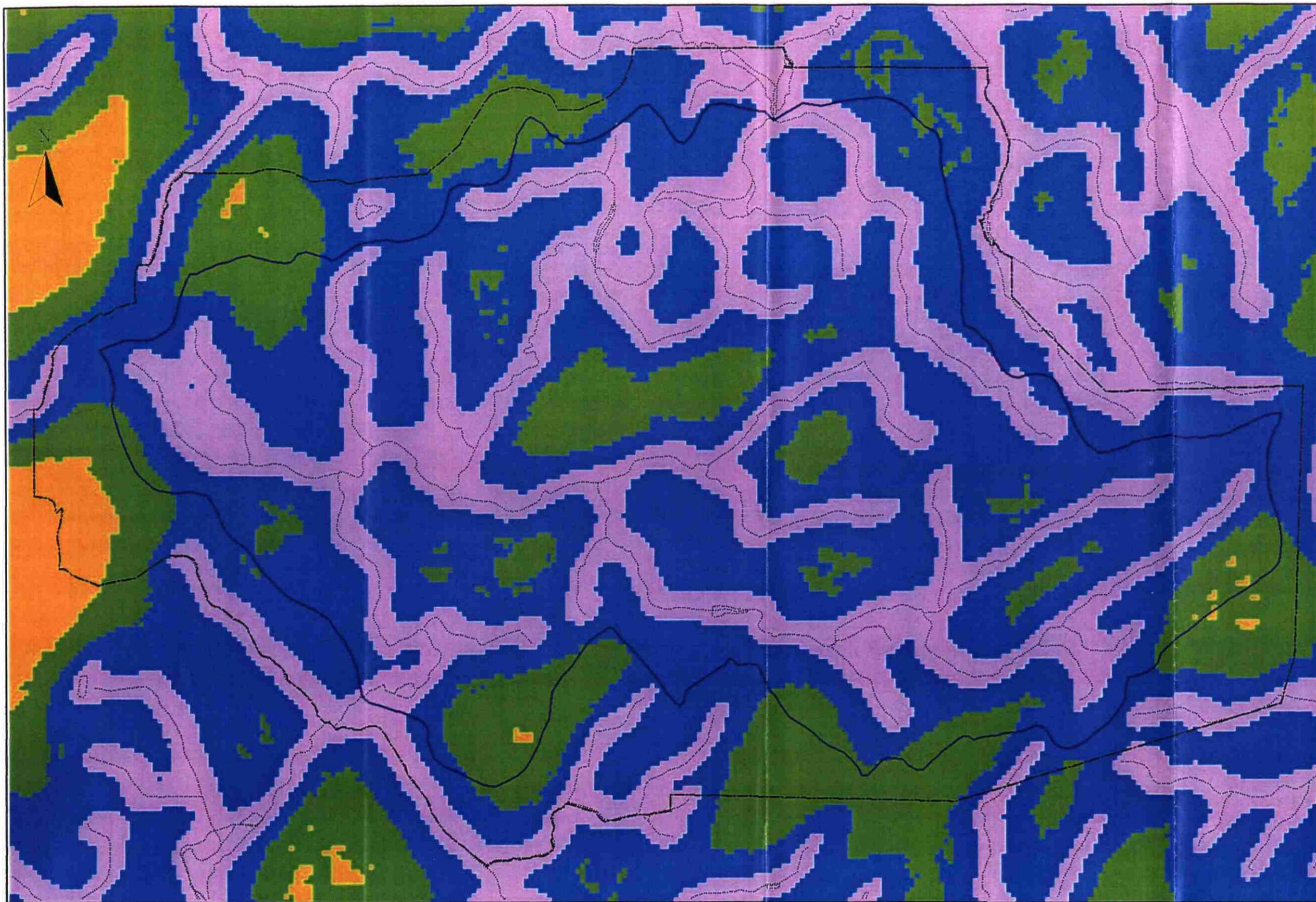


Planche 10 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Dourduff)



**Légende**

-  Limites de l'étude
-  Bassin versant Yvel
-  Points du réseau hydrographique

Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique simulée (m)

-  0 - 6
-  6 - 10
-  10 - 14
-  14 - 20

0 1 2 Kilomètres

Planche 11 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Yvel)

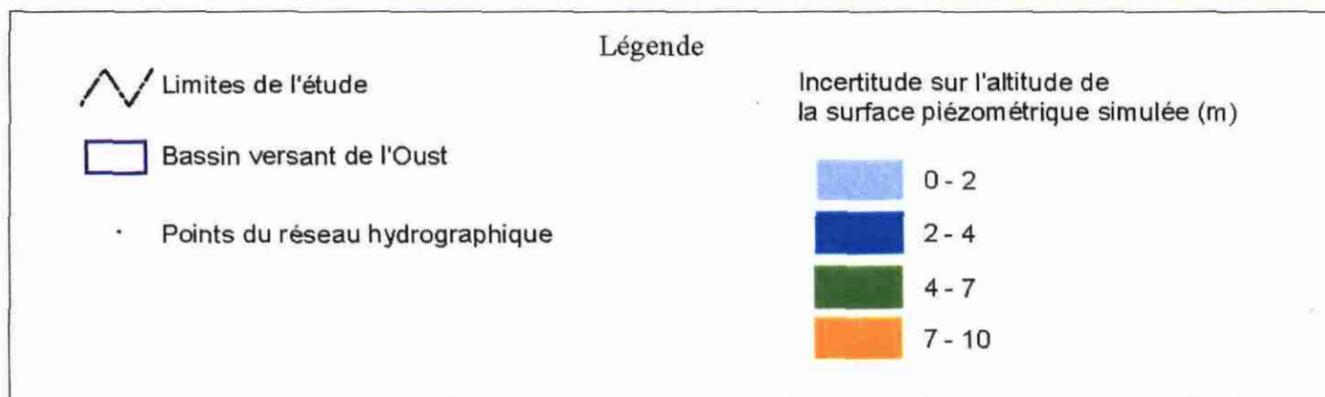
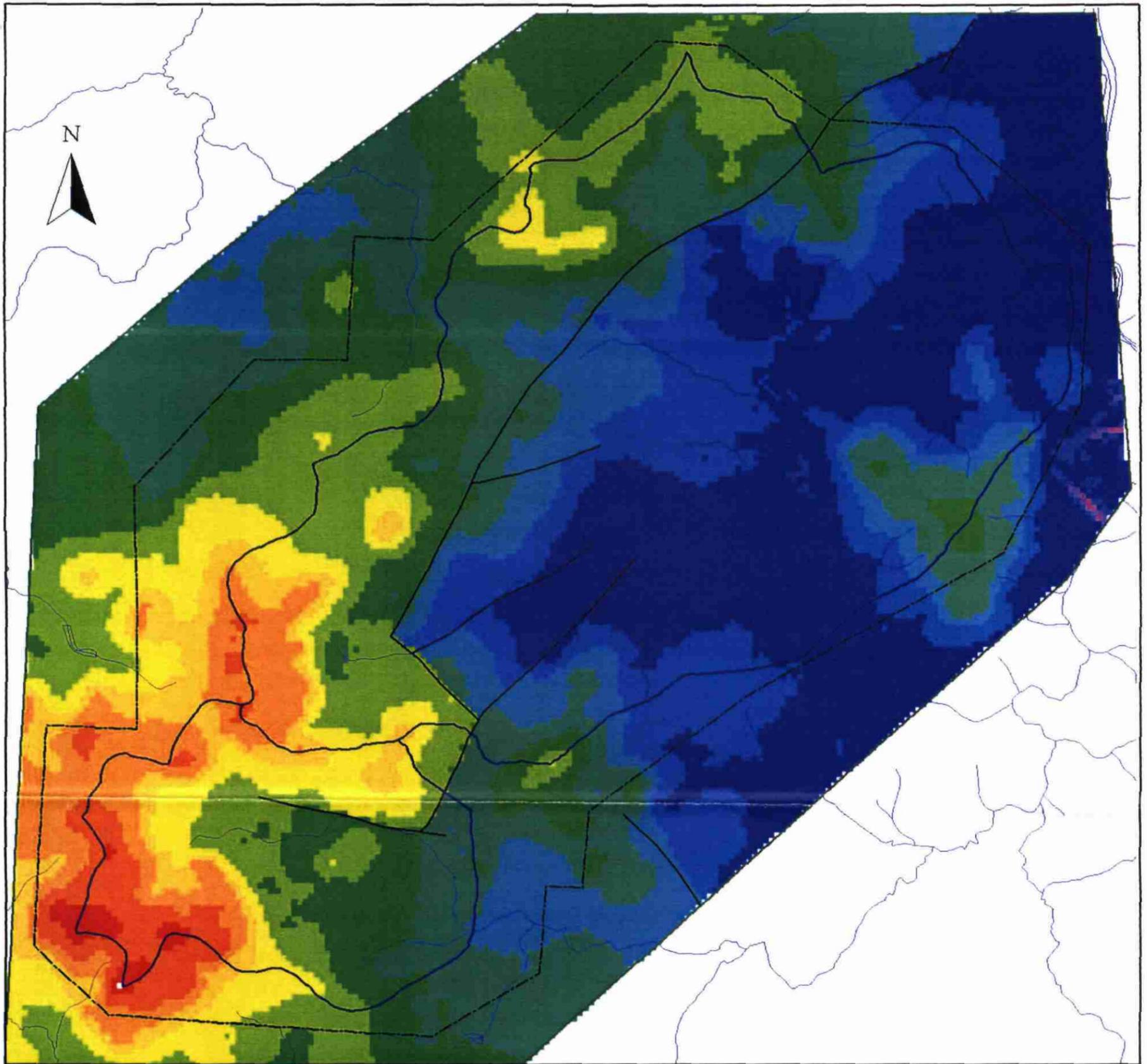


Planche 12 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

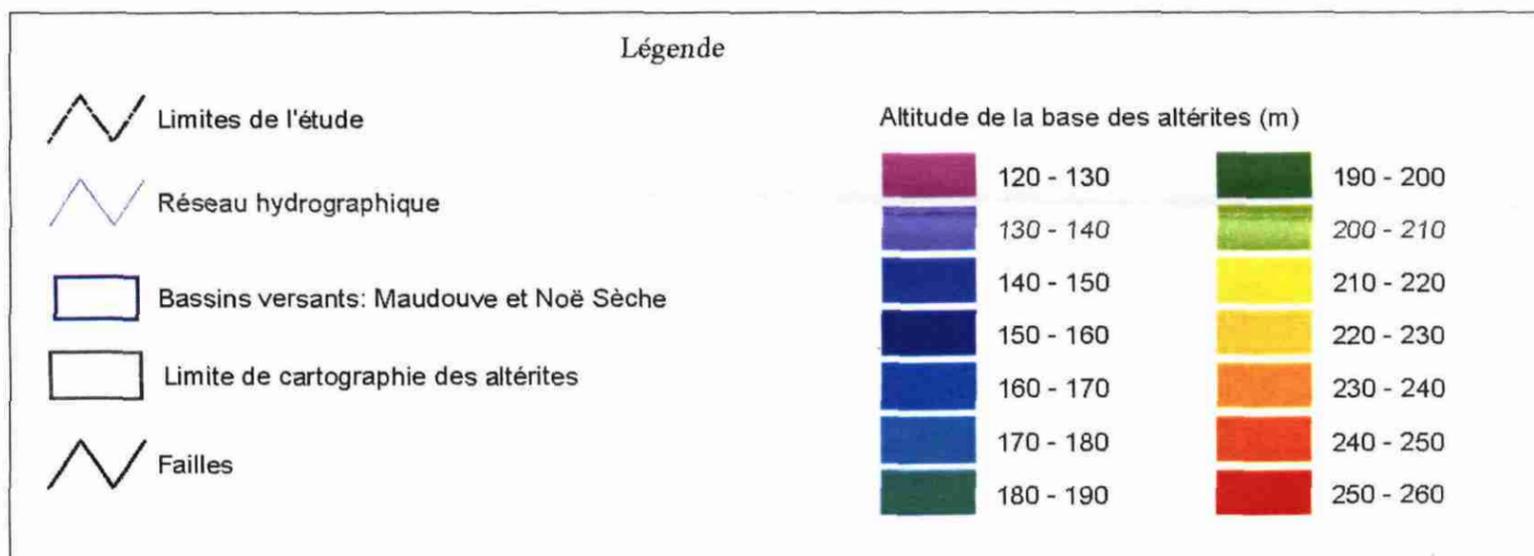


Planche 13 - Altitude de la surface de base des altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)

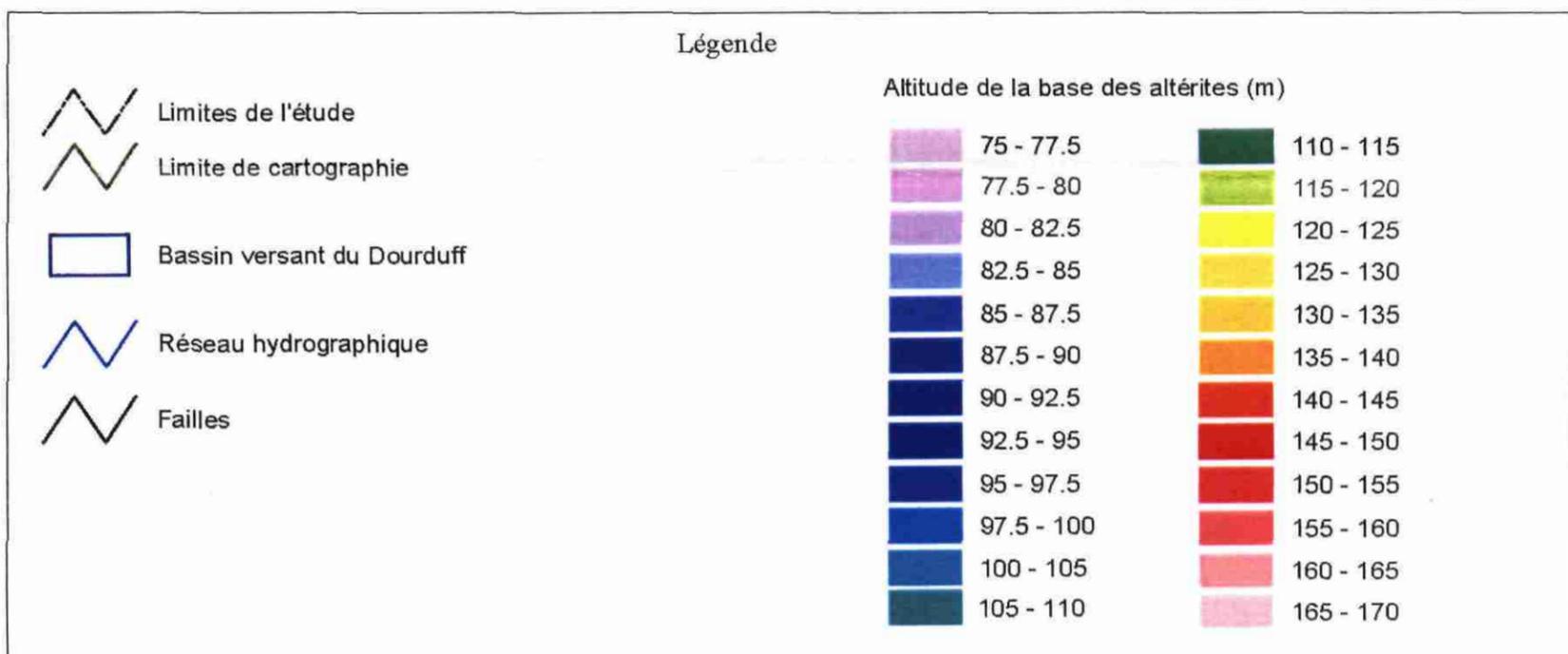
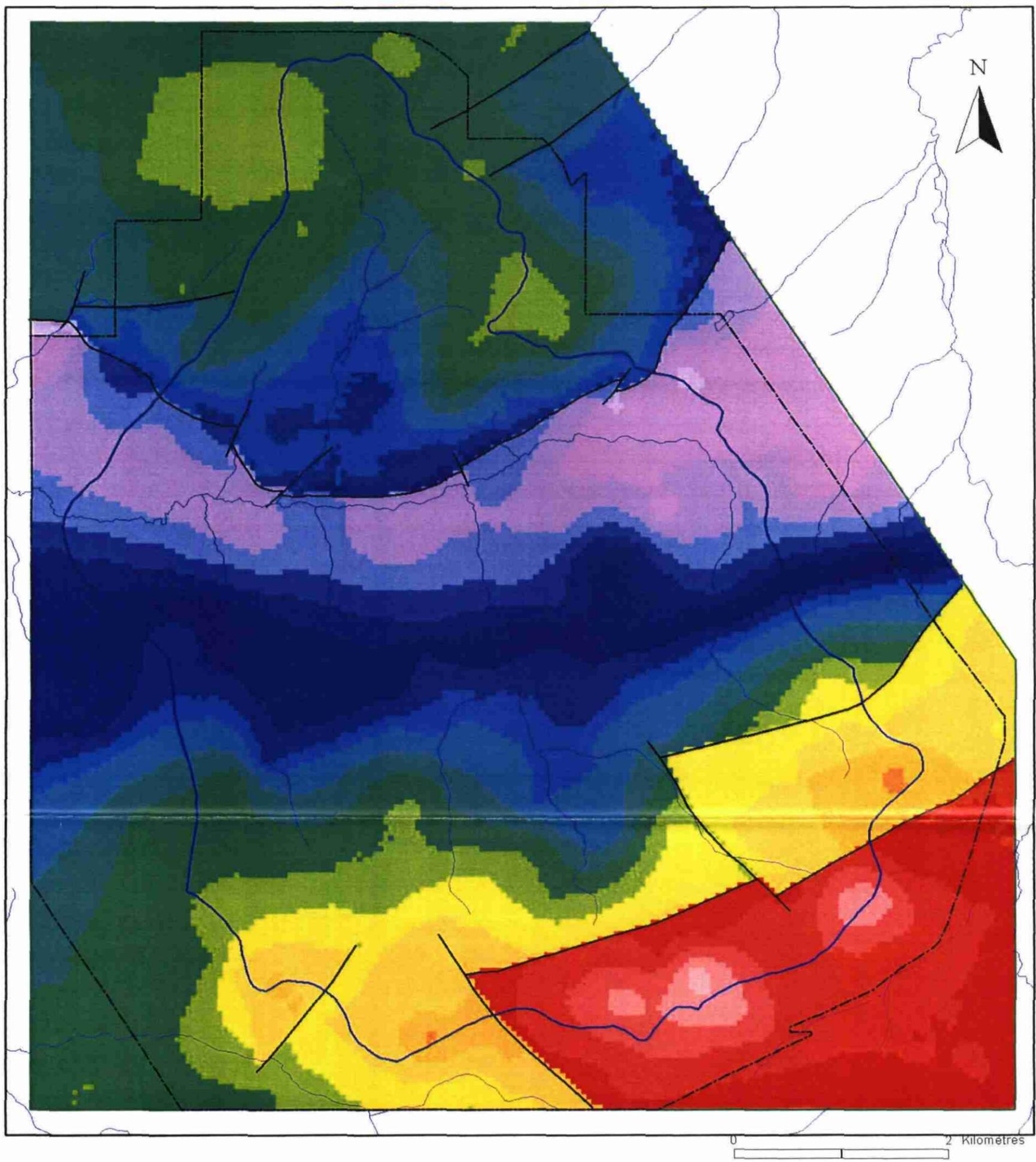


Planche 14 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Dourduff)

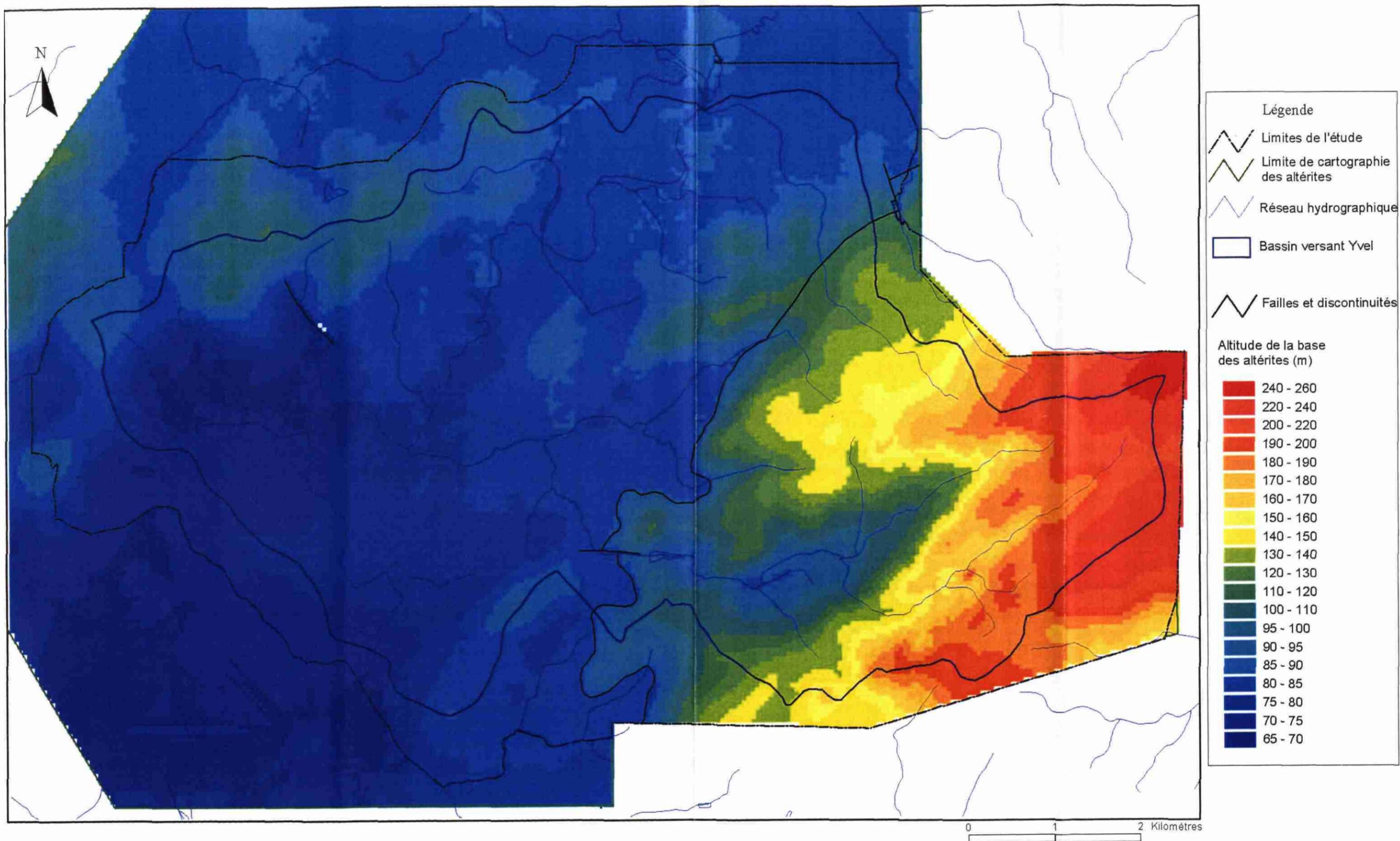


Planche 15 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Yvel)

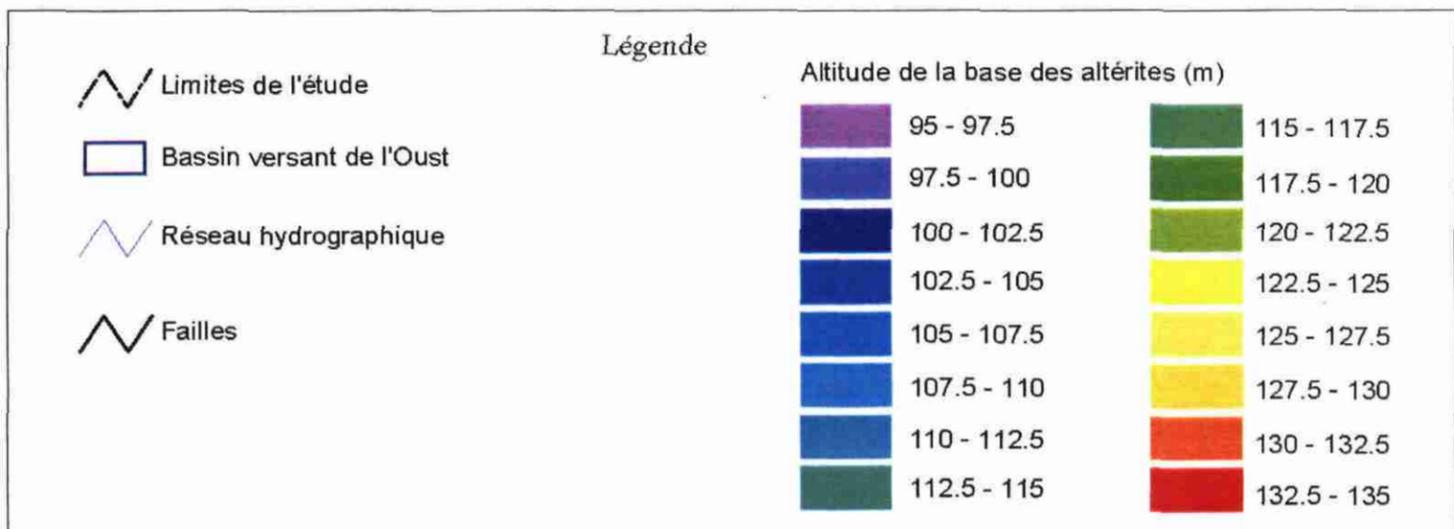
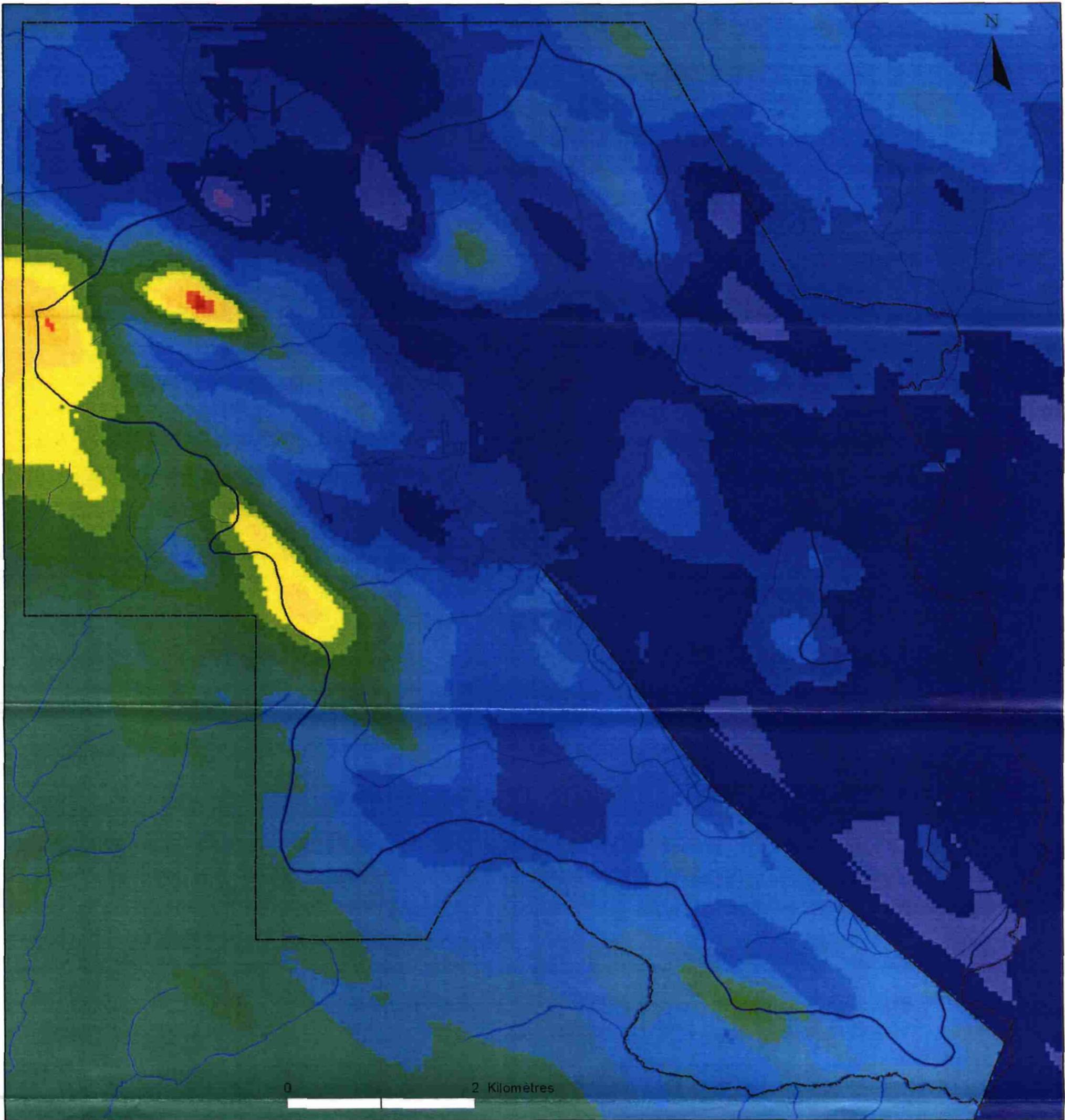
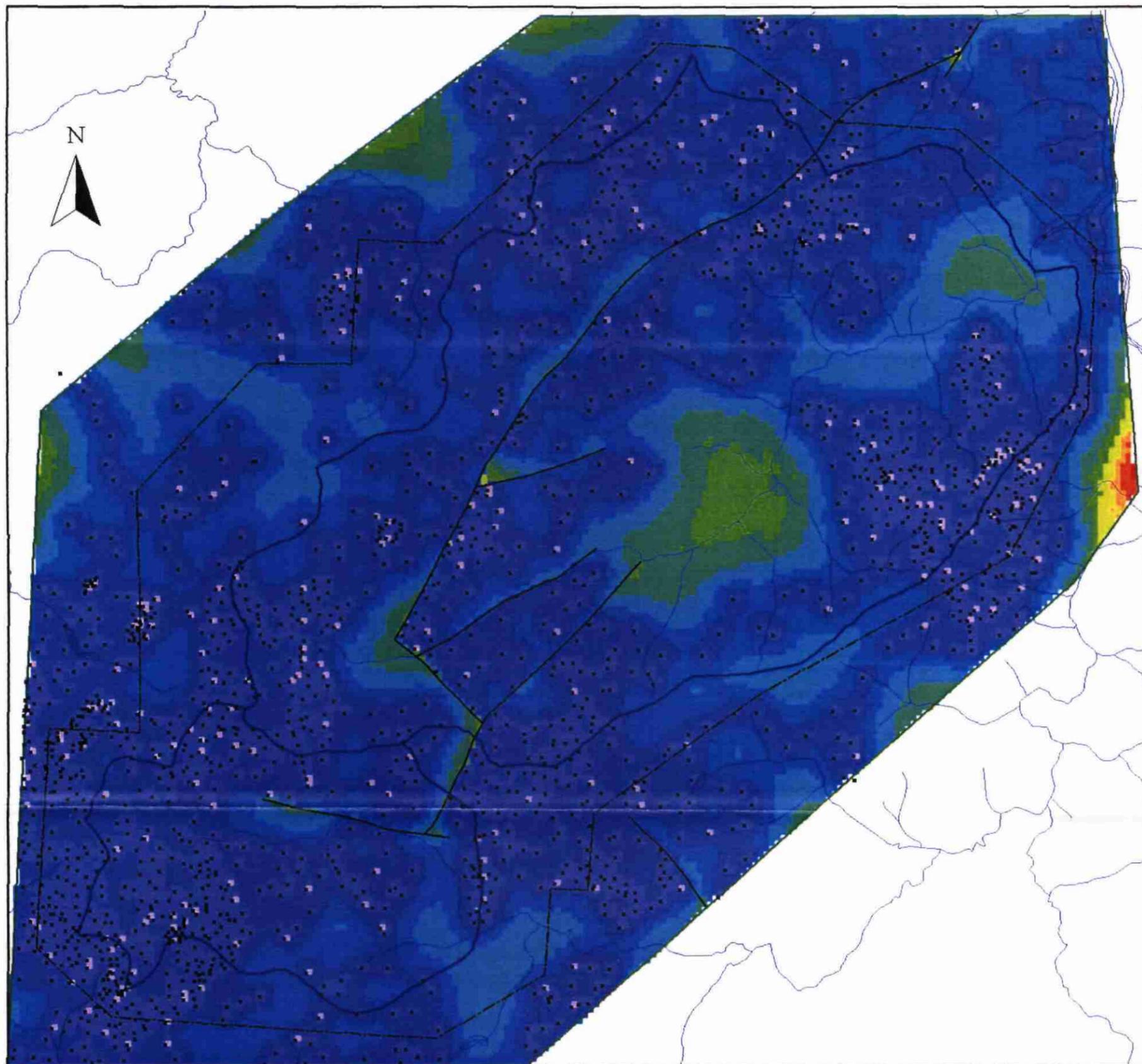


Planche 16 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

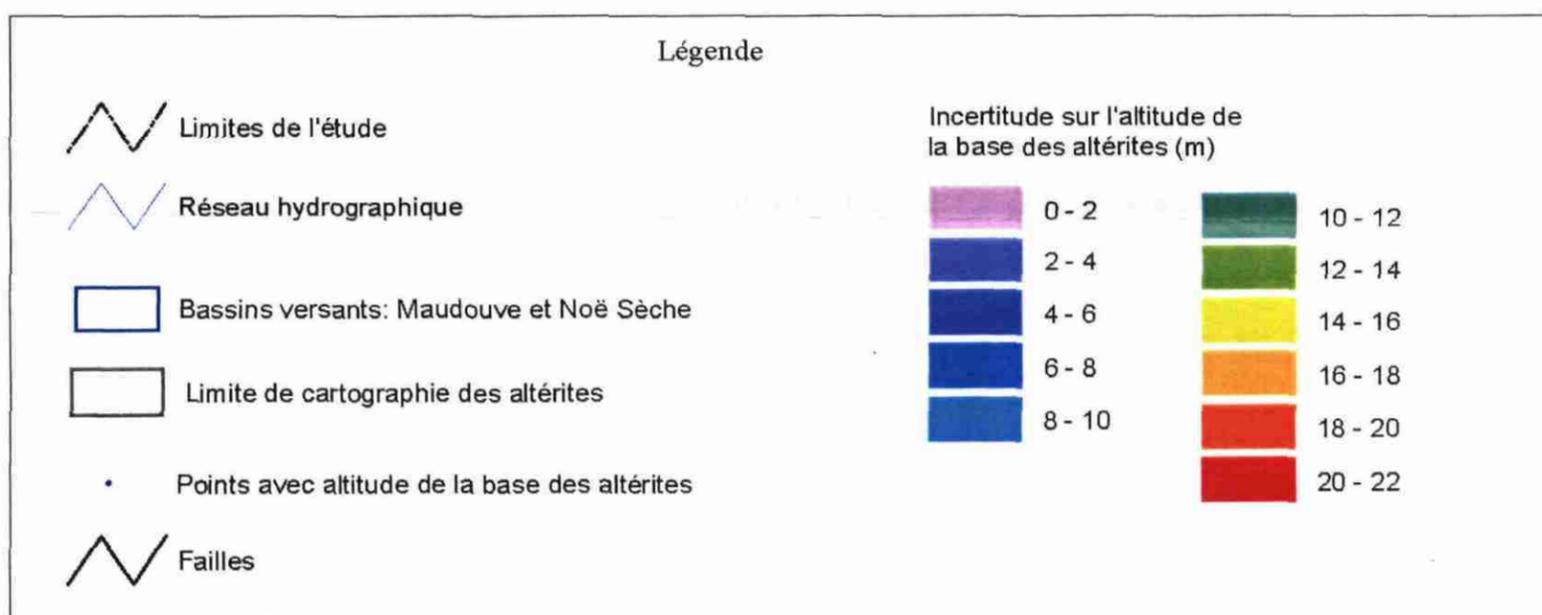
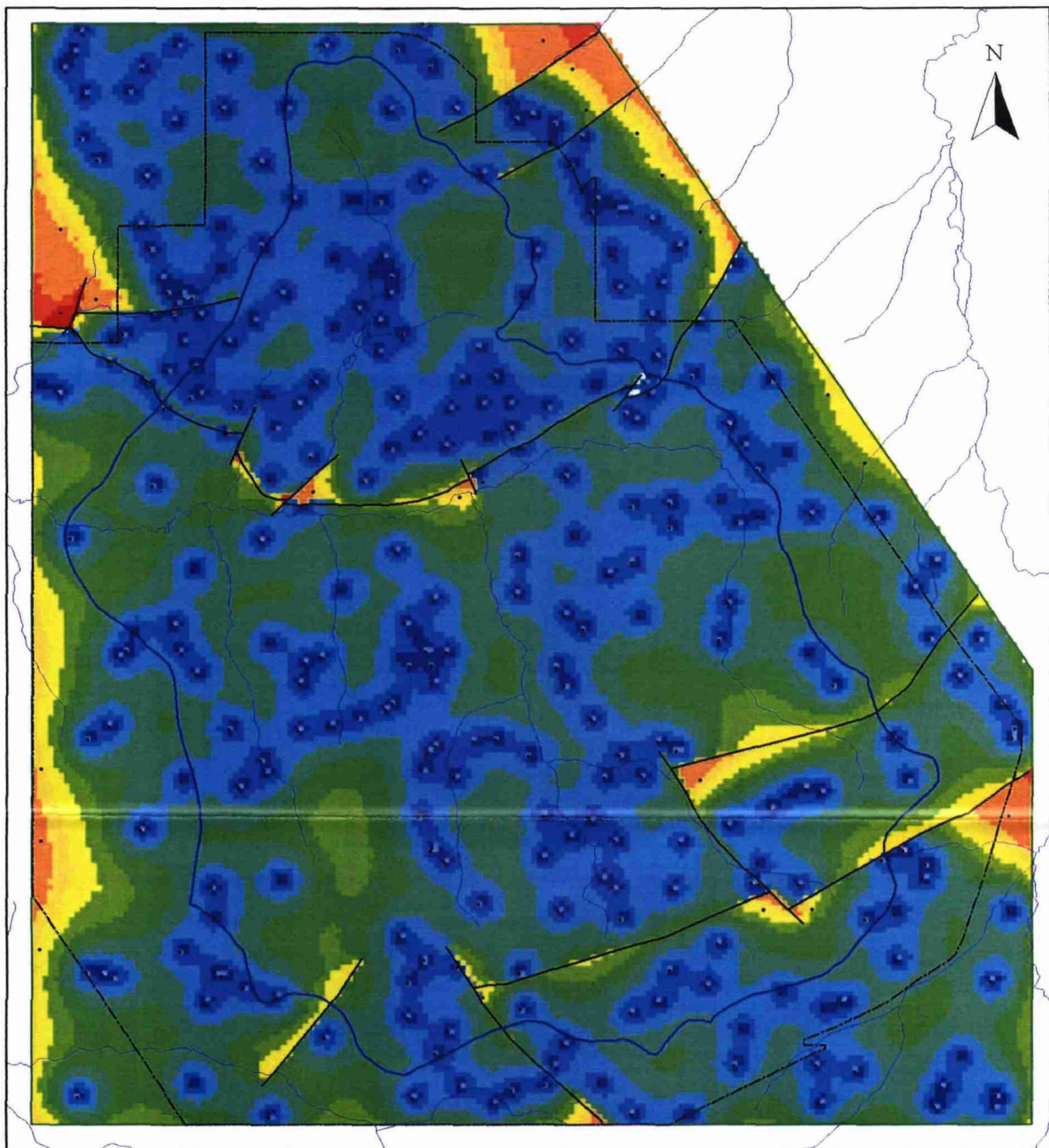


Planche 17 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



Légende

- Limites de l'étude
- Limite de cartographie
- Bassin versant du Dourduff
- Réseau hydrographique
- Failles

- Points avec altitude de la base des altérites

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

- 0 - 1
- 1 - 2
- 2 - 3
- 3 - 4
- 4 - 5
- 5 - 6
- 6 - 7
- 7 - 8
- 8 - 9
- 9 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25

Planche 18 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Dourduff)

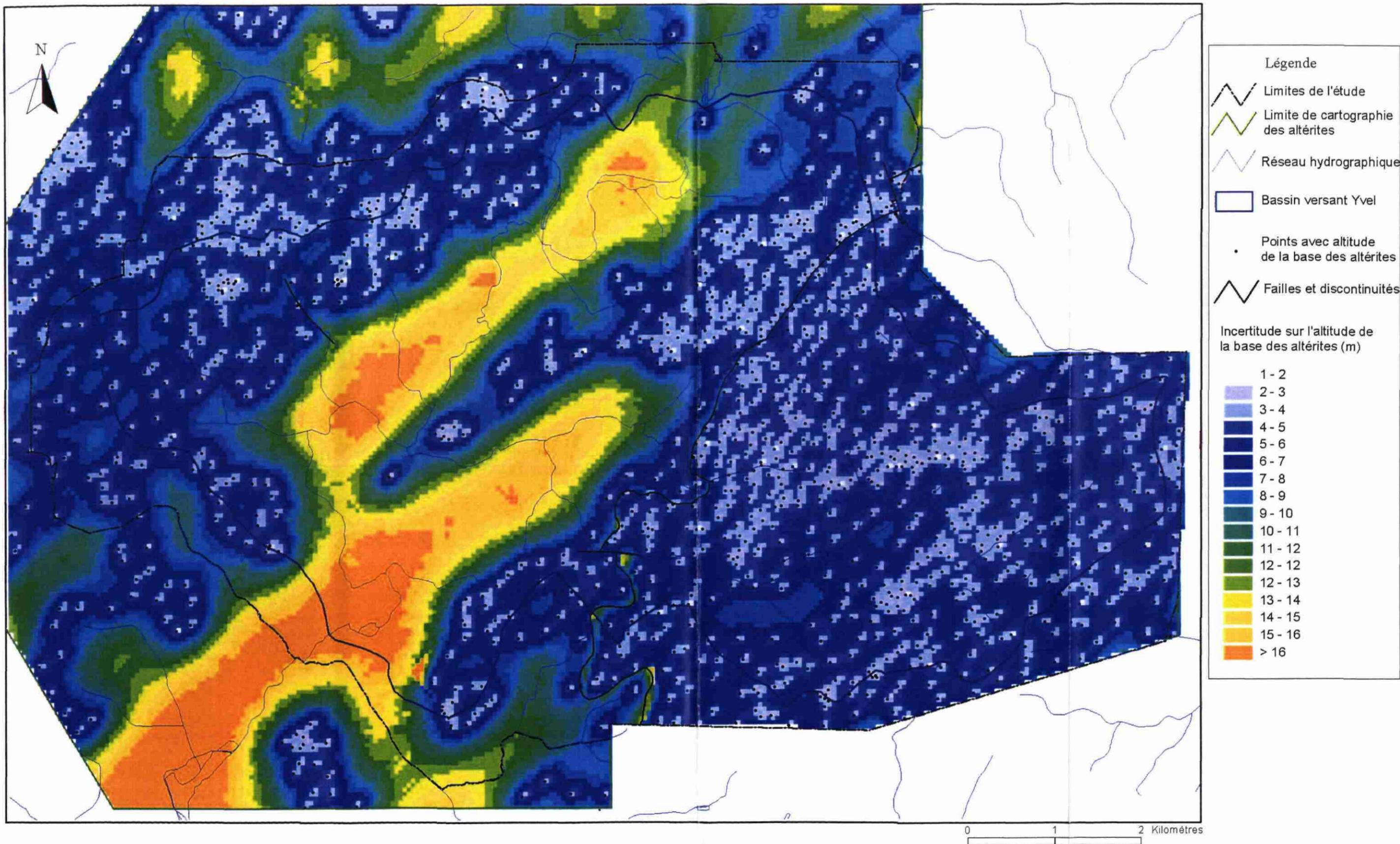


Planche 19- Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Yvel)

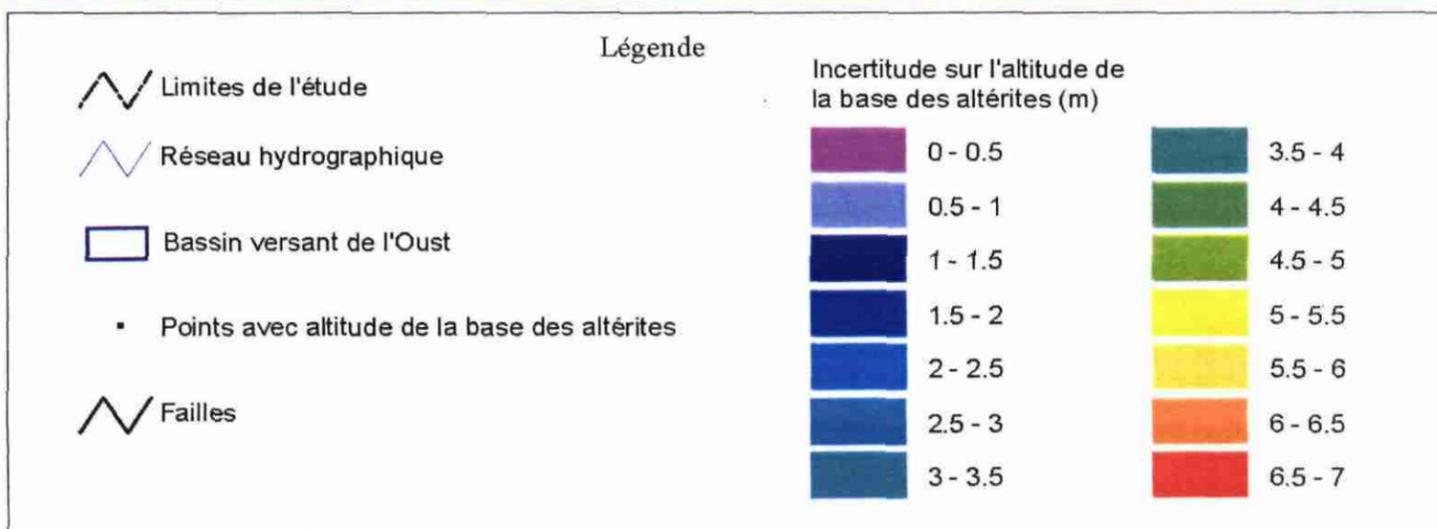
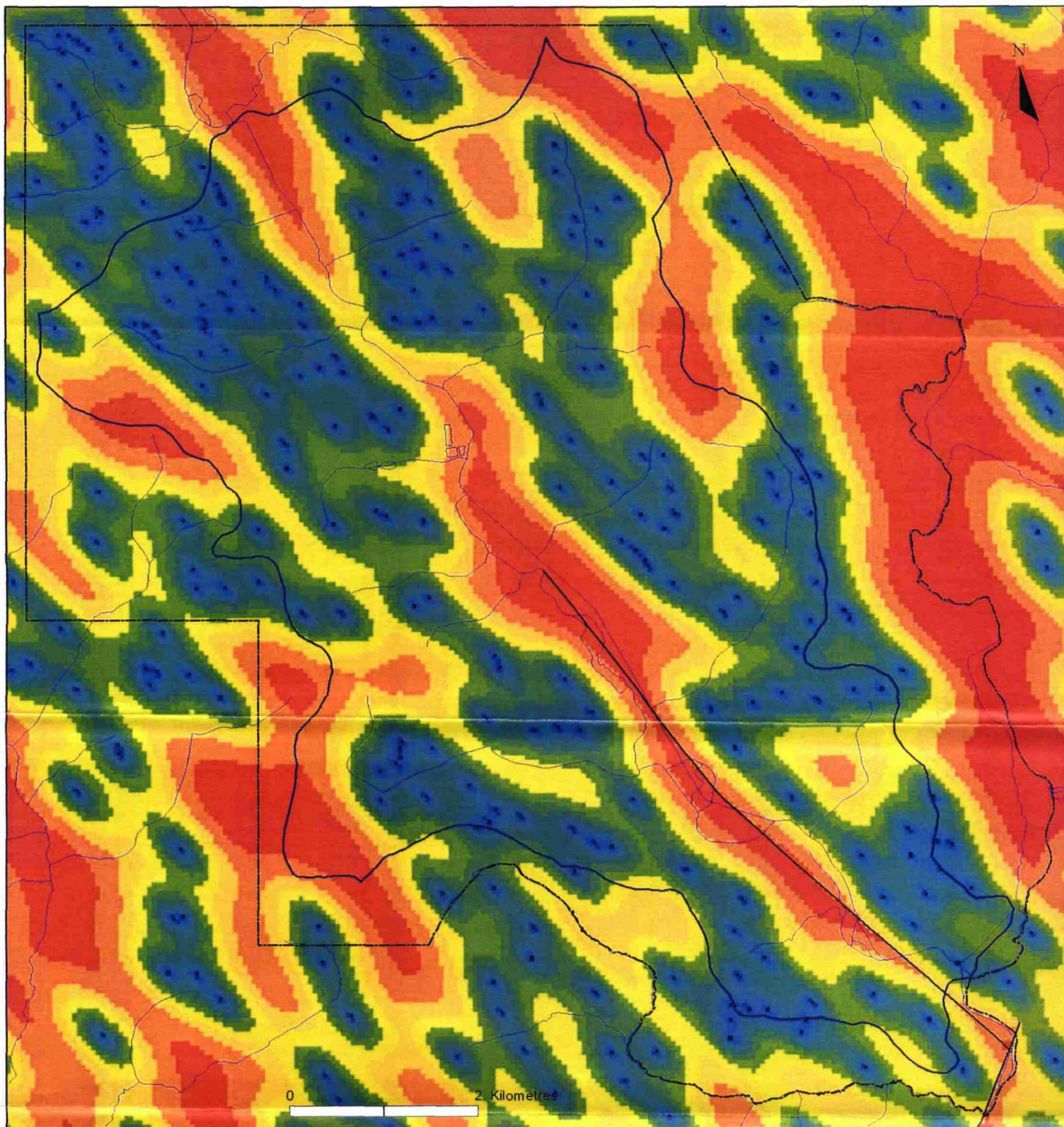
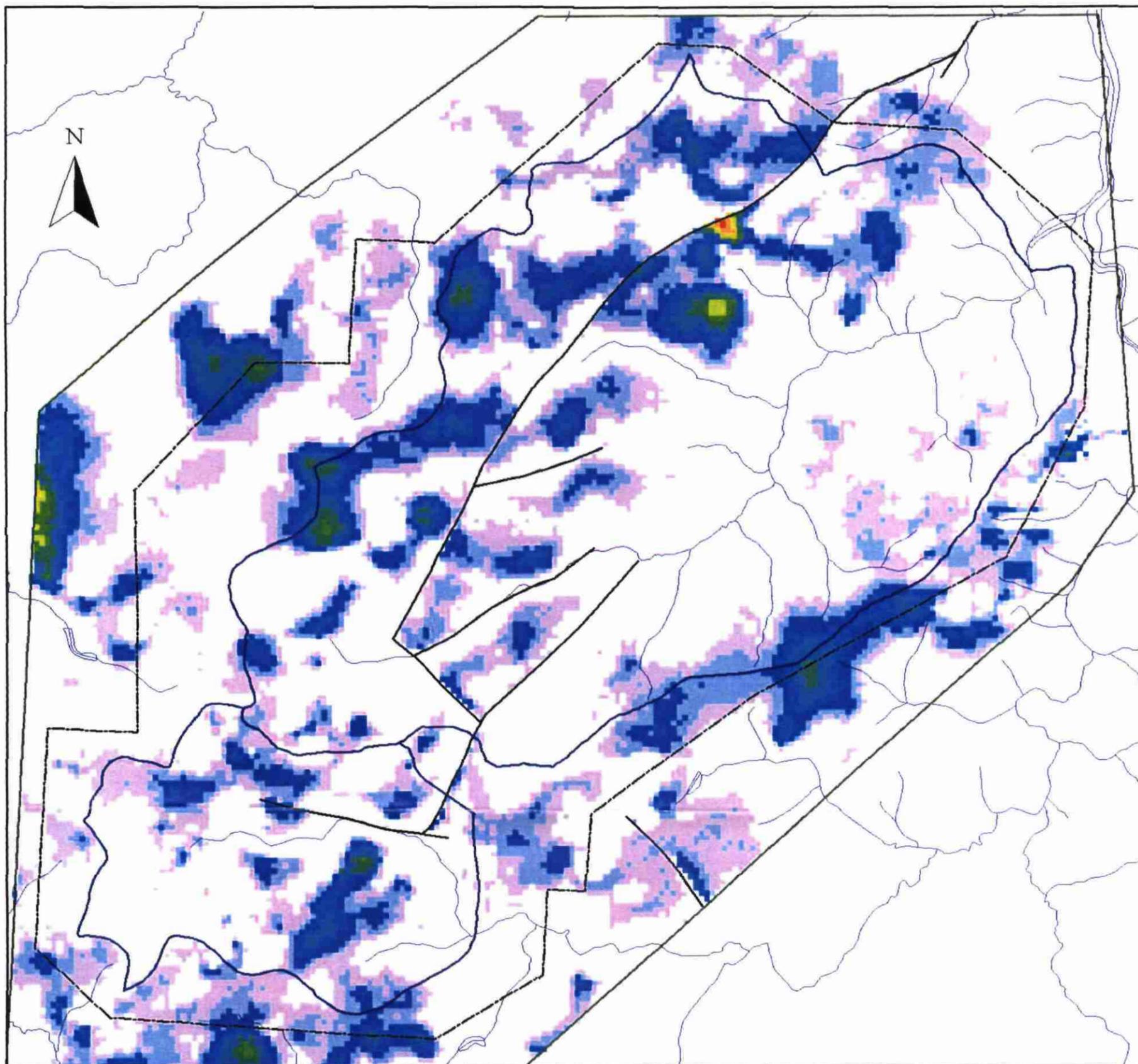


Planche 20 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

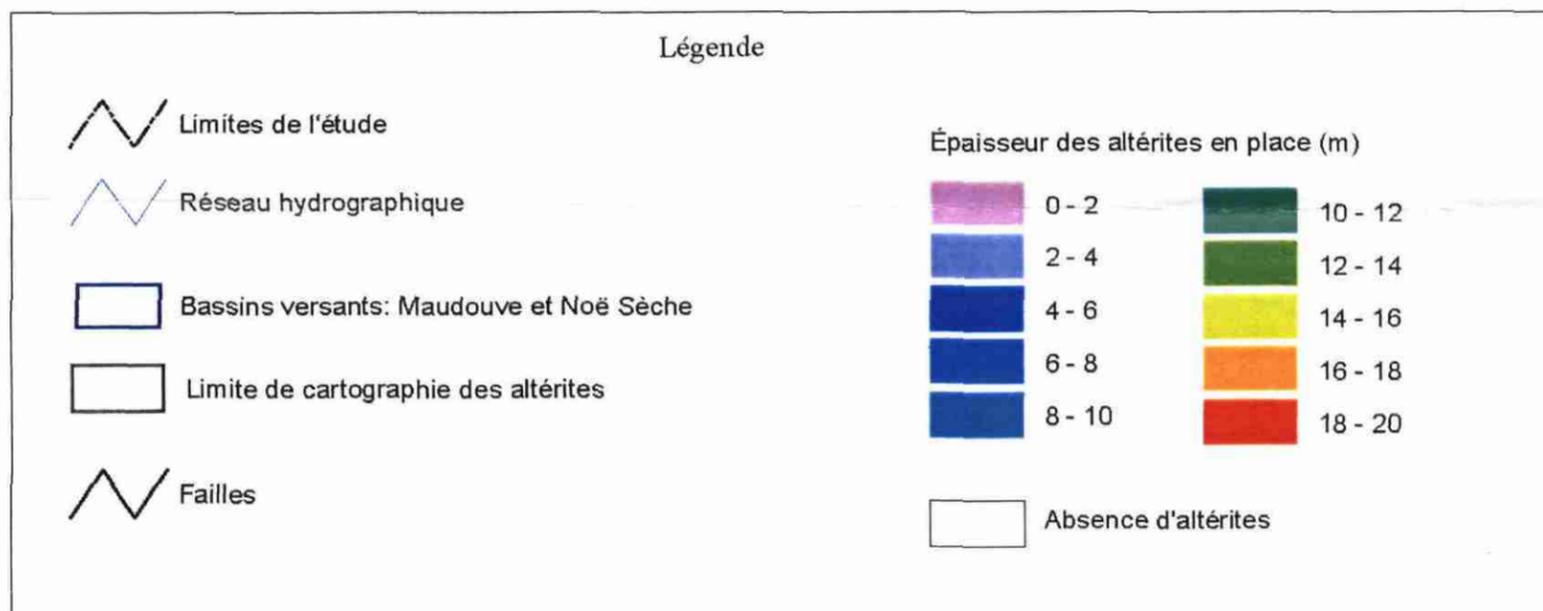
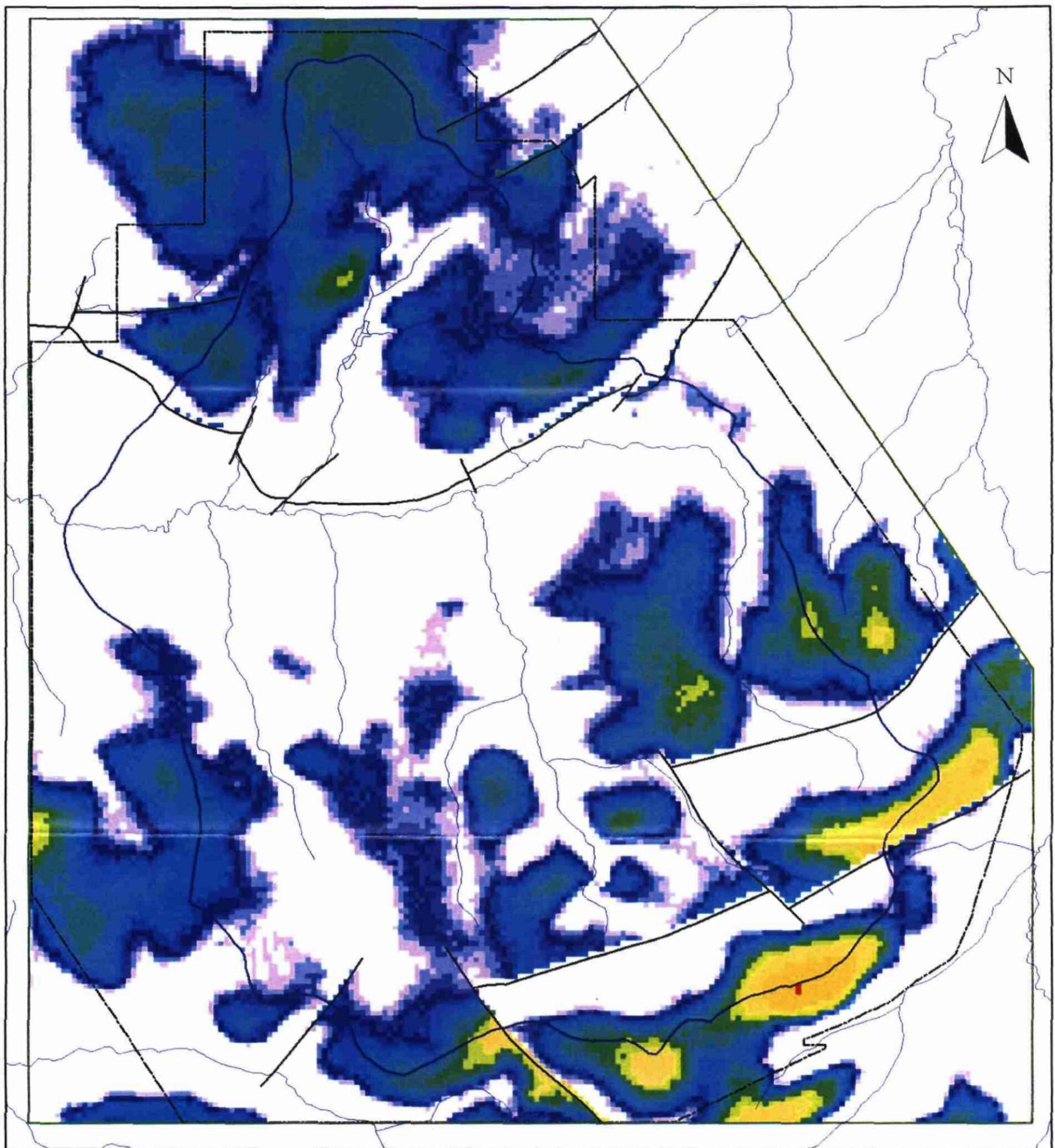


Planche 21 - Épaisseur des altérites en place (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

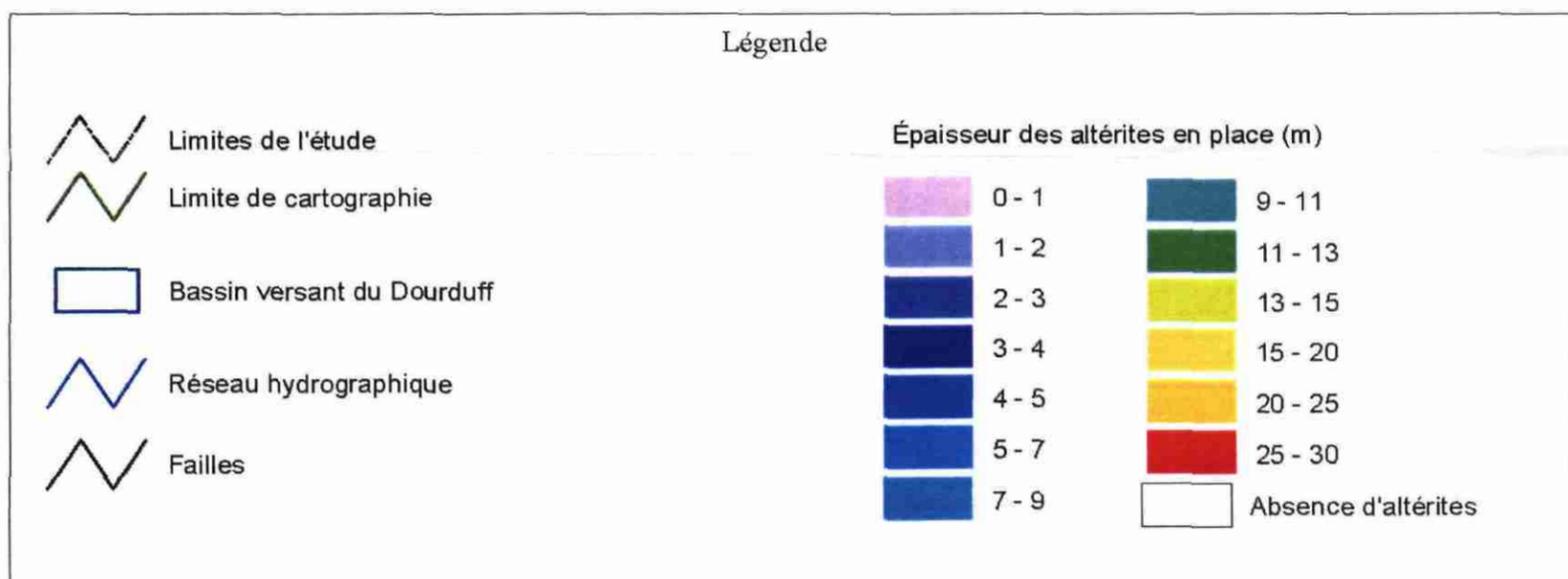


Planche 22- Épaisseur des altérites en place (bassin du Dourduff)

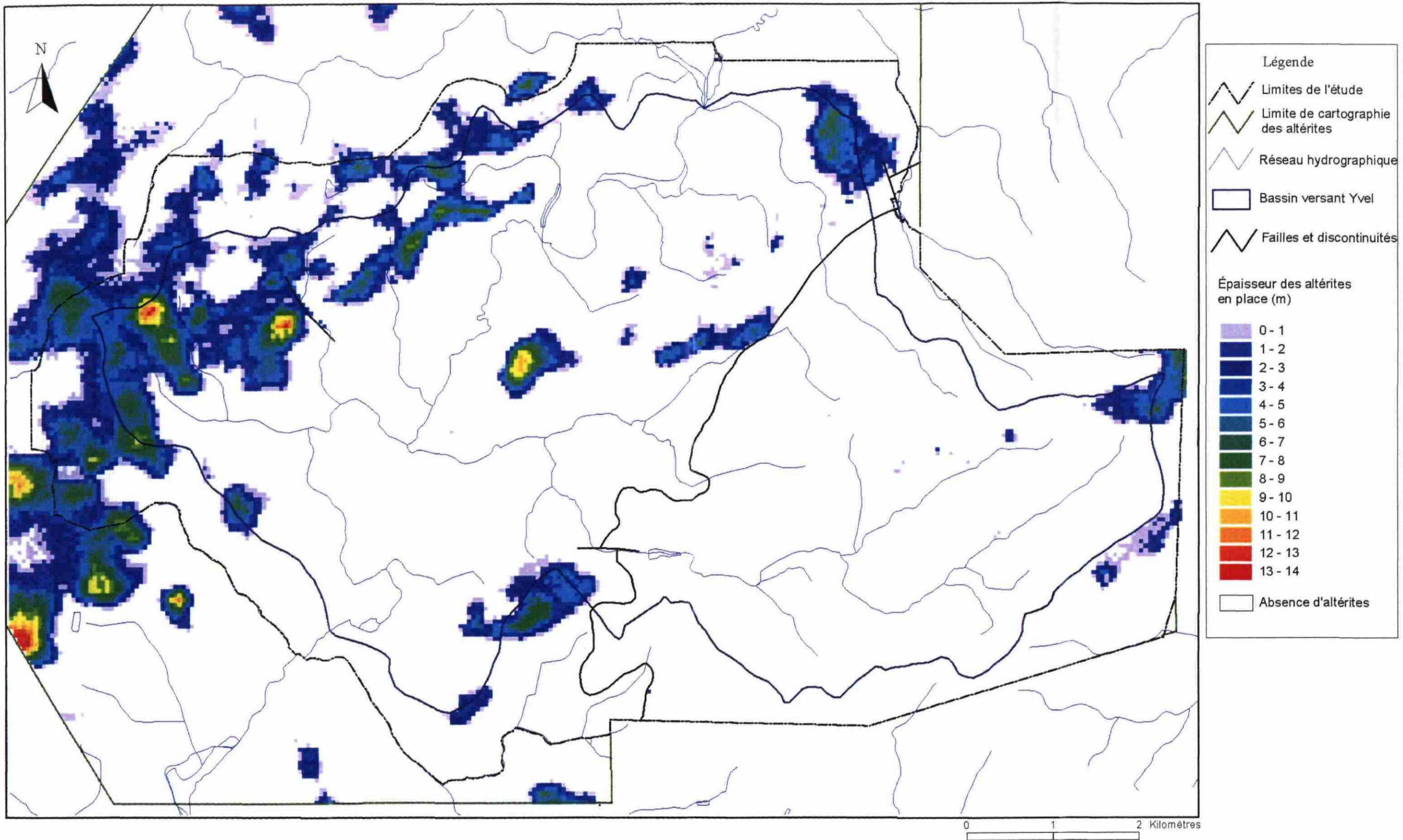


Planche 23 - Épaisseur des altérites en place (bassin de l'Yvel)

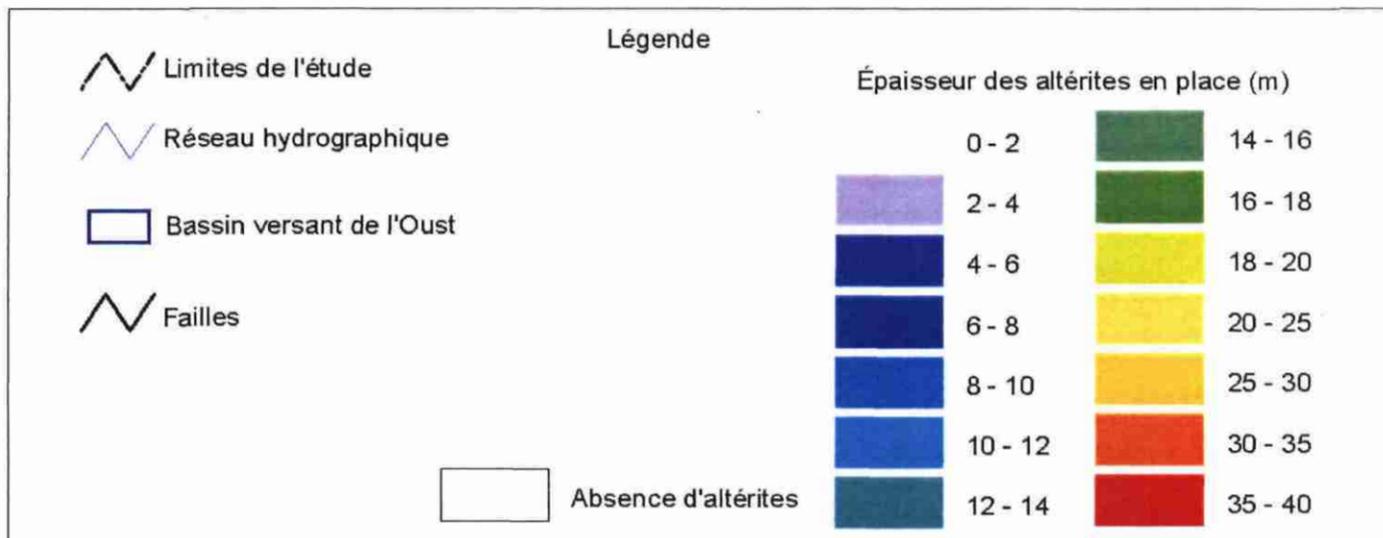
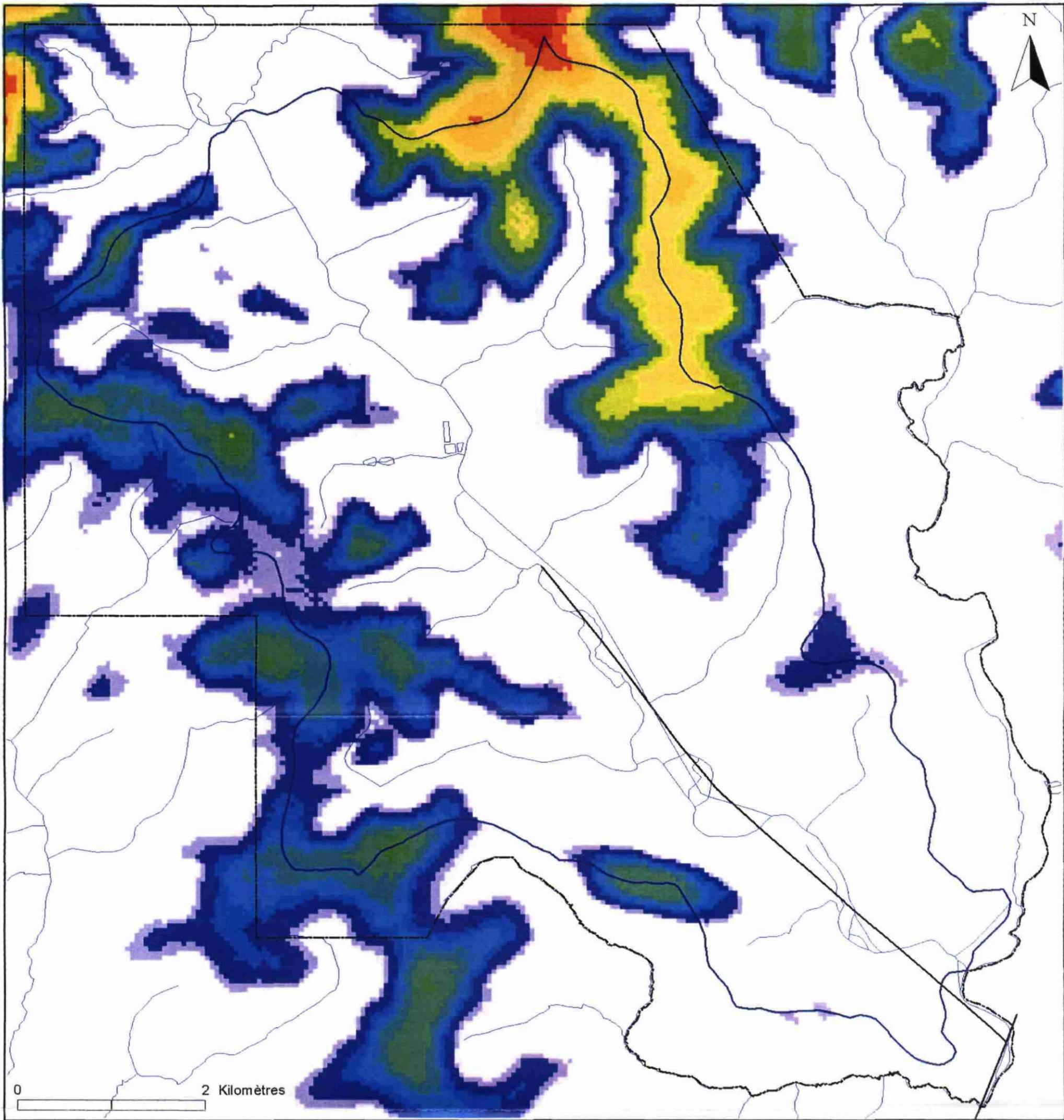
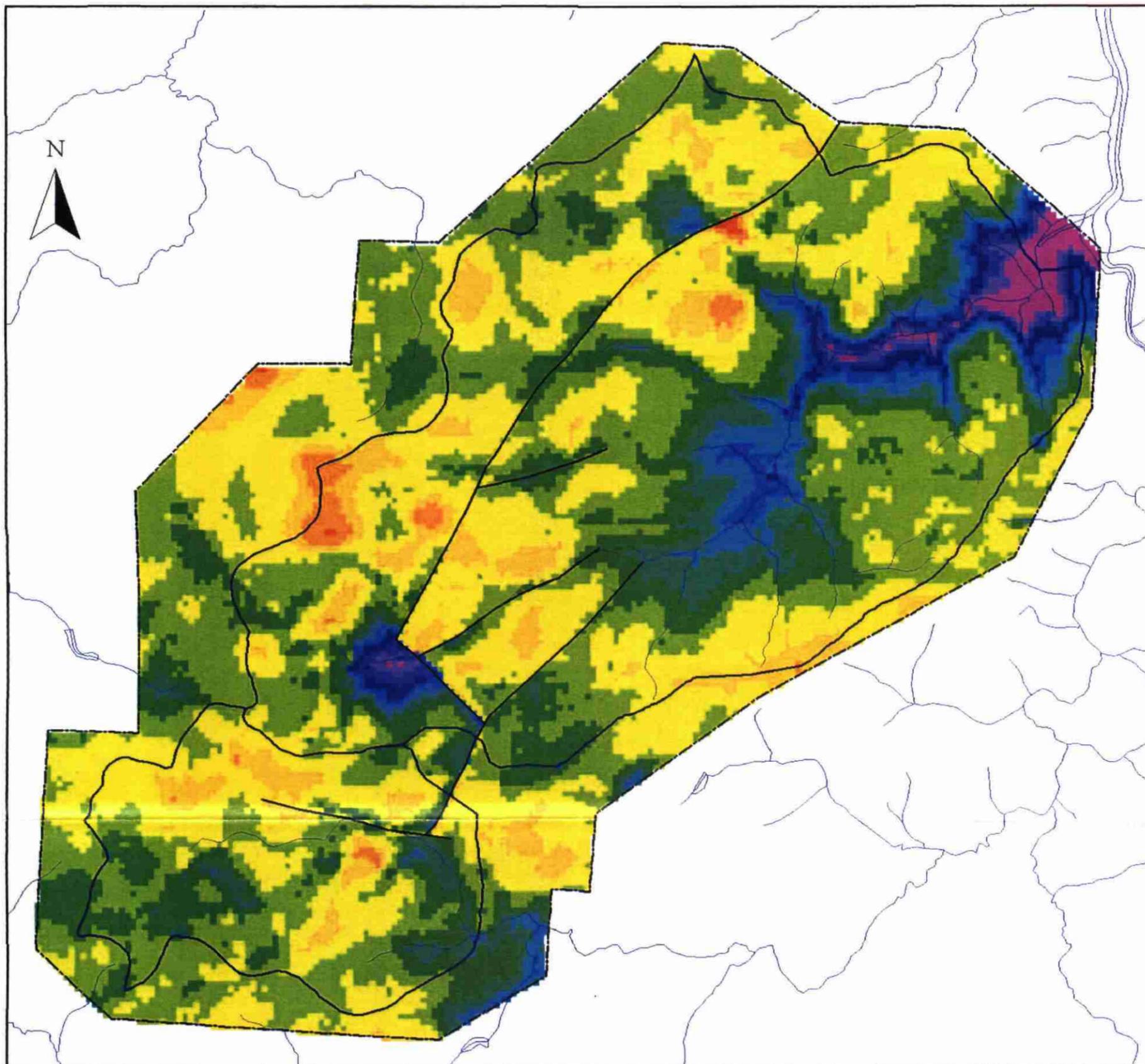


Planche 24 - Épaisseur des altérites en place (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

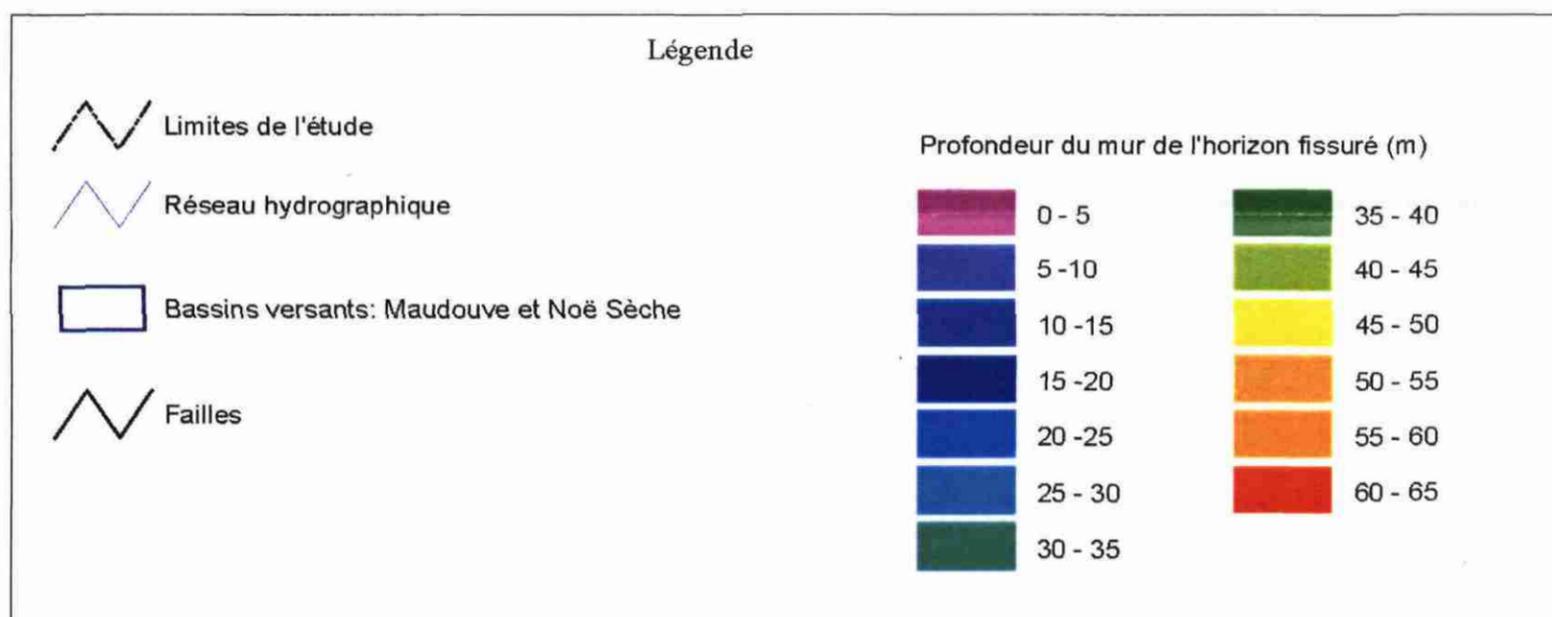
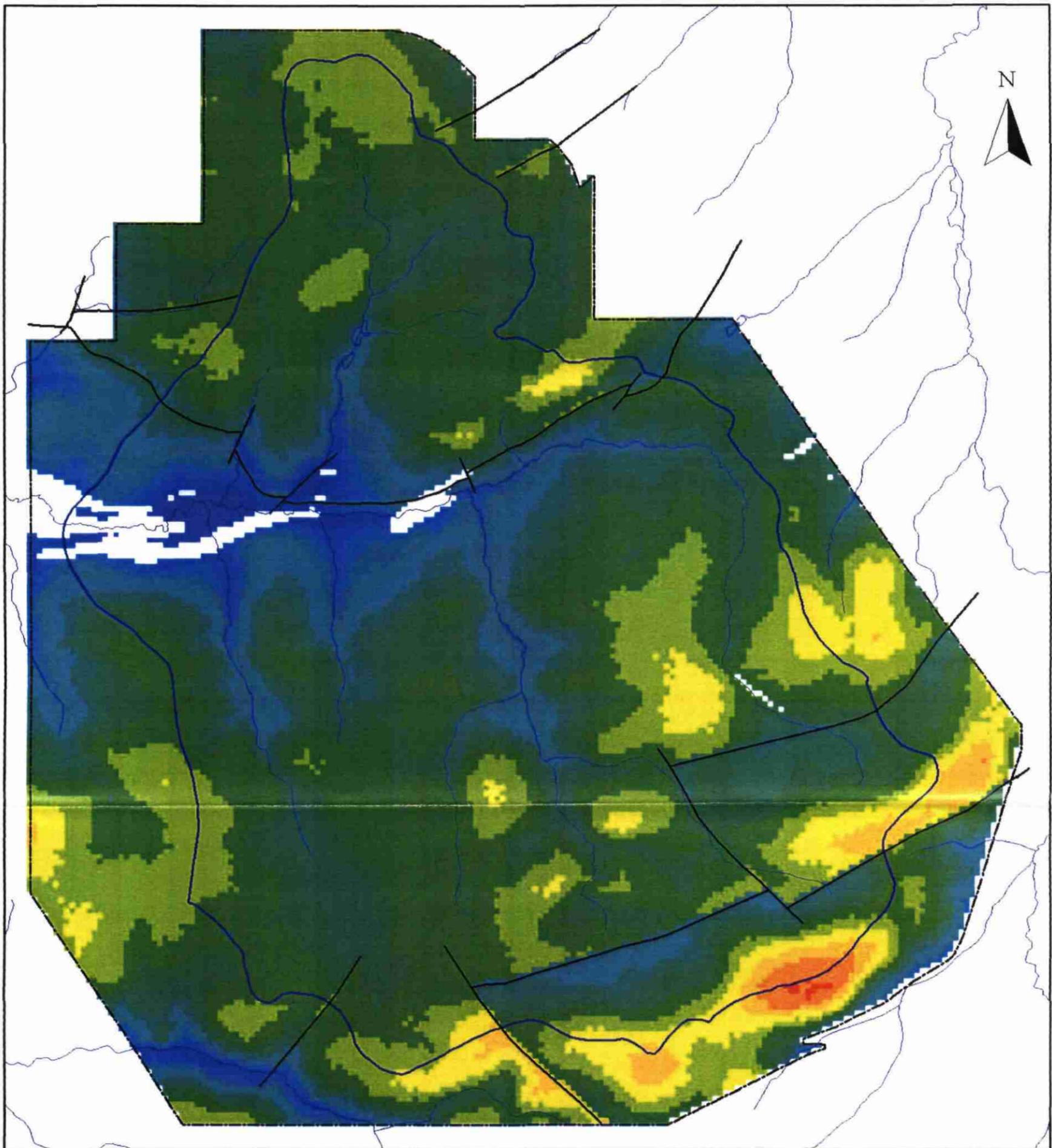


Planche 25 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

Légende

- Limites de l'étude
- Réseau hydrographique
- Bassin versant du Dourduff
- Failles

Profondeur du mur de l'horizon fissuré (m)

	0 - 3		35 - 40
	3 - 5		40 - 45
	5 - 10		45 - 50
	10 - 15		50 - 55
	15 - 20		55 - 60
	20 - 25		60 - 65
	25 - 30		65 - 70
	30 - 35		70 - 80
			Pas de données

Planche 26 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Dourduff)

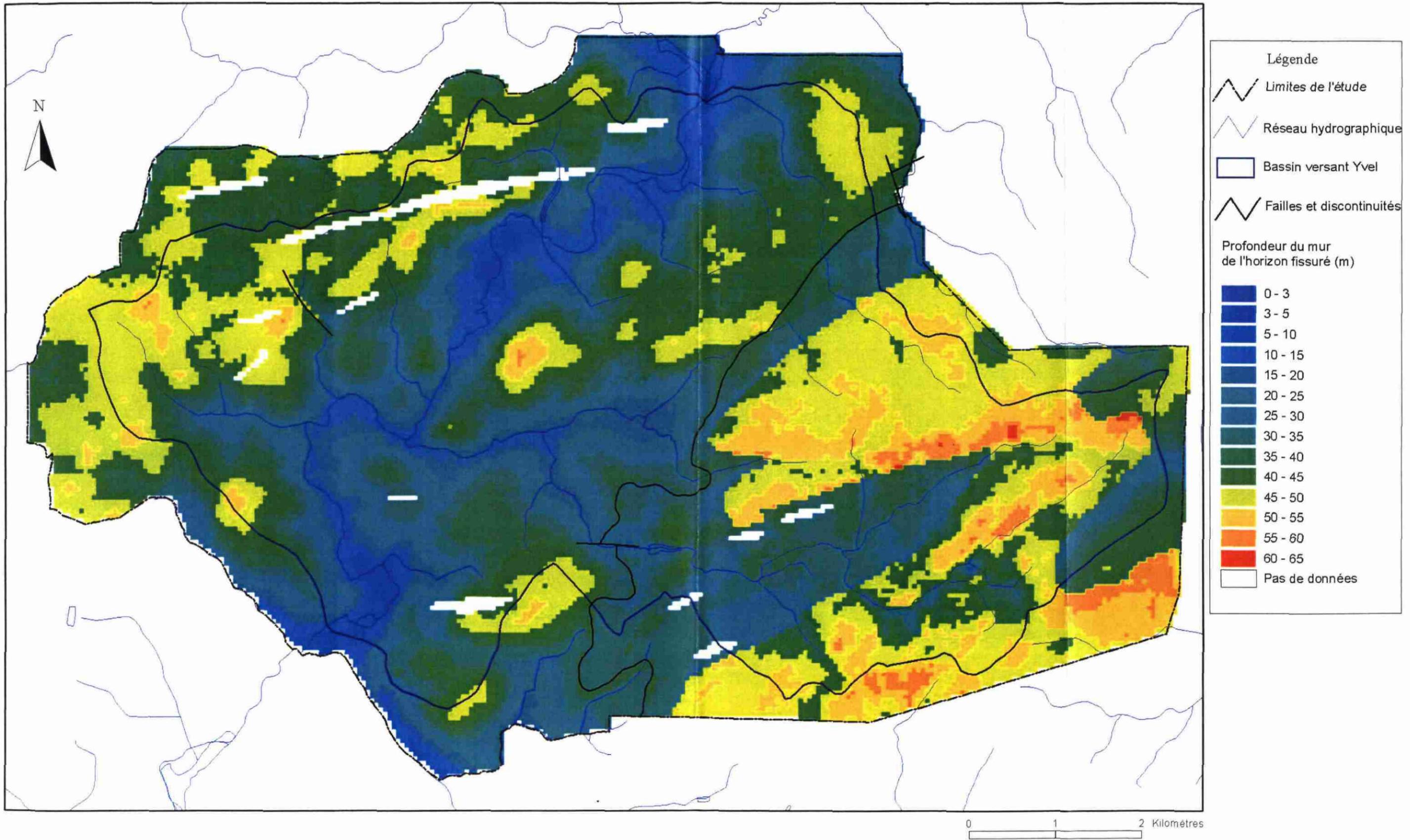


Planche 27 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Yvel)

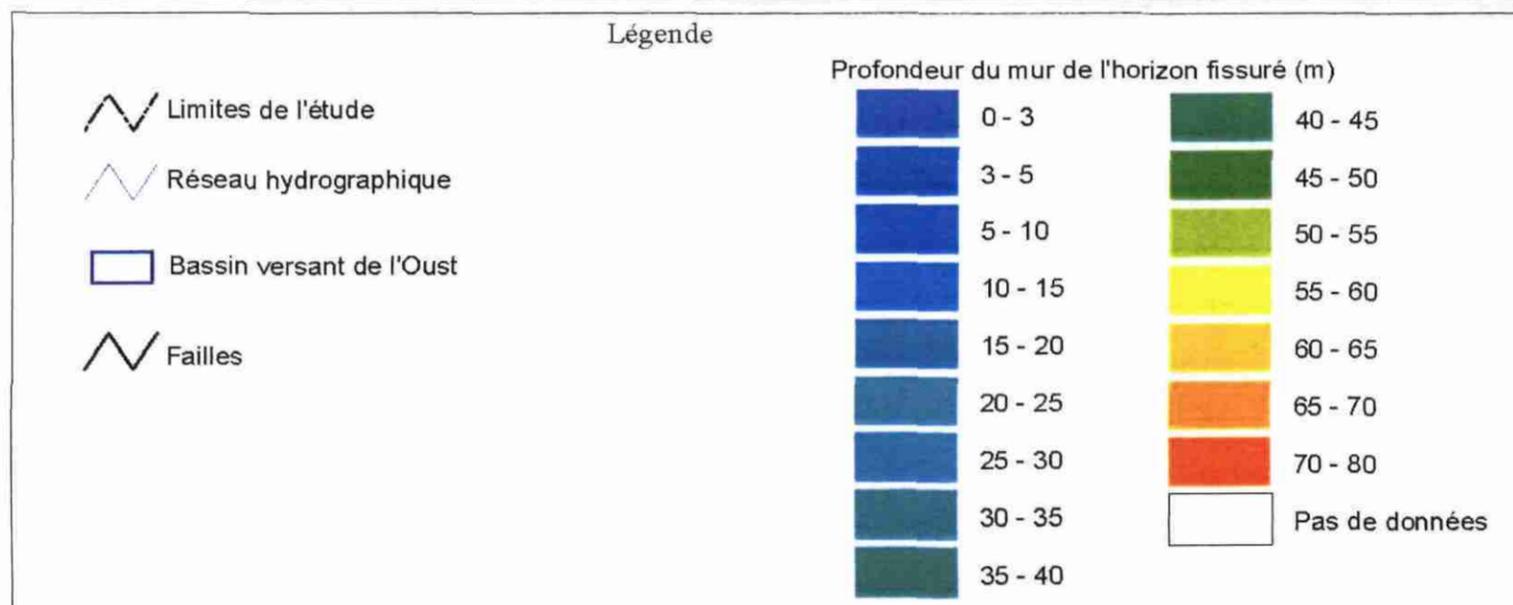
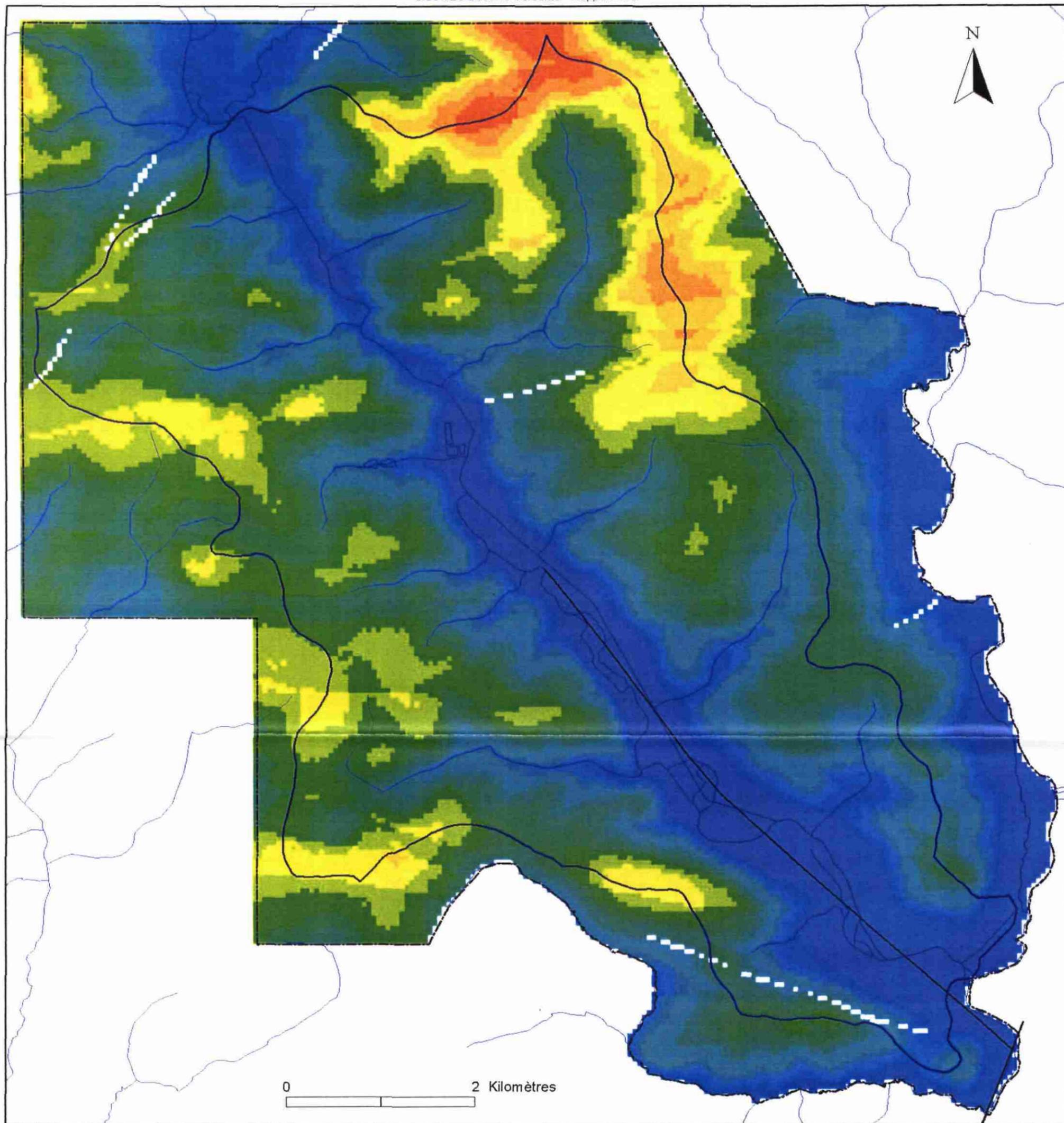
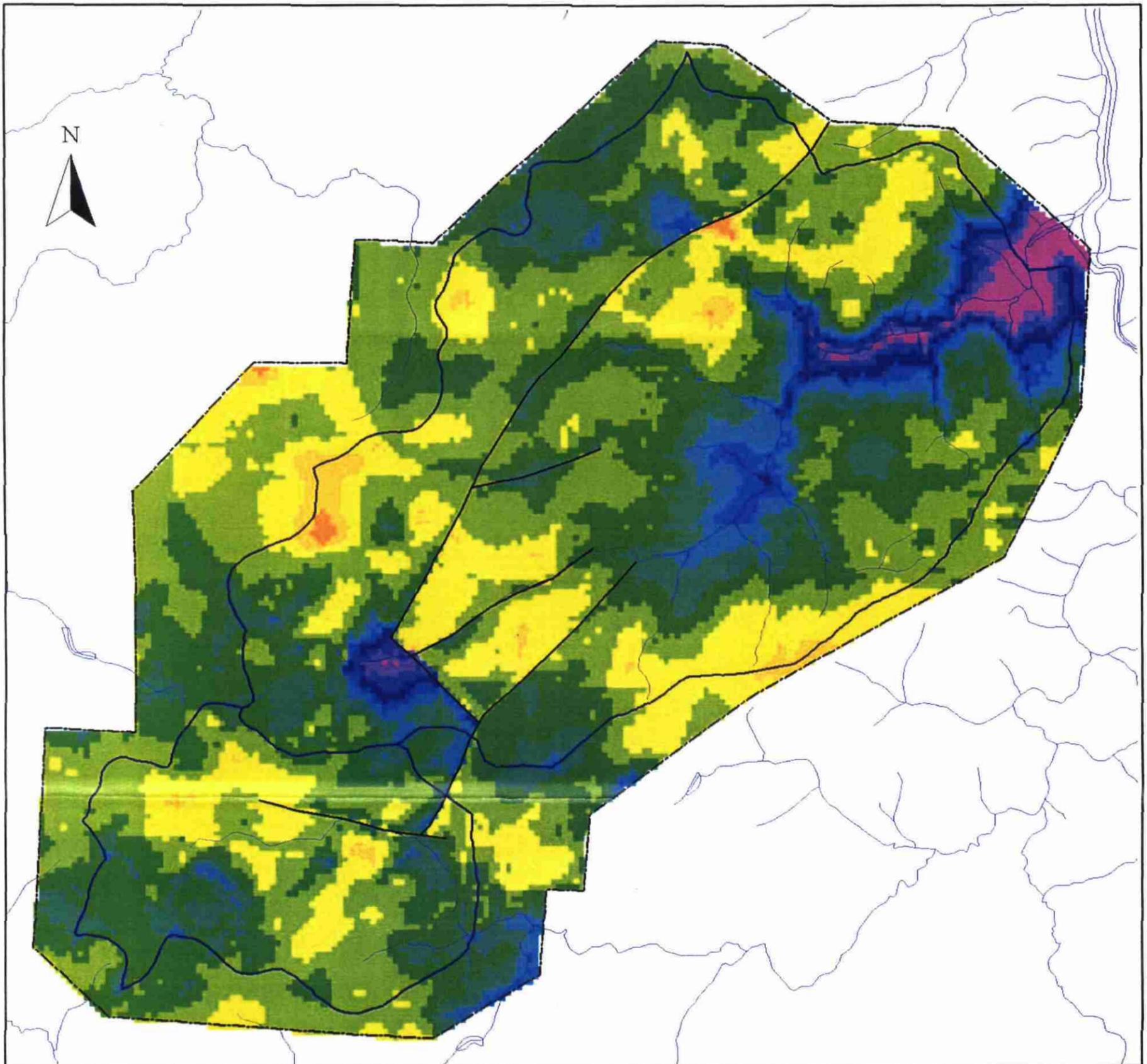


Planche 28 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

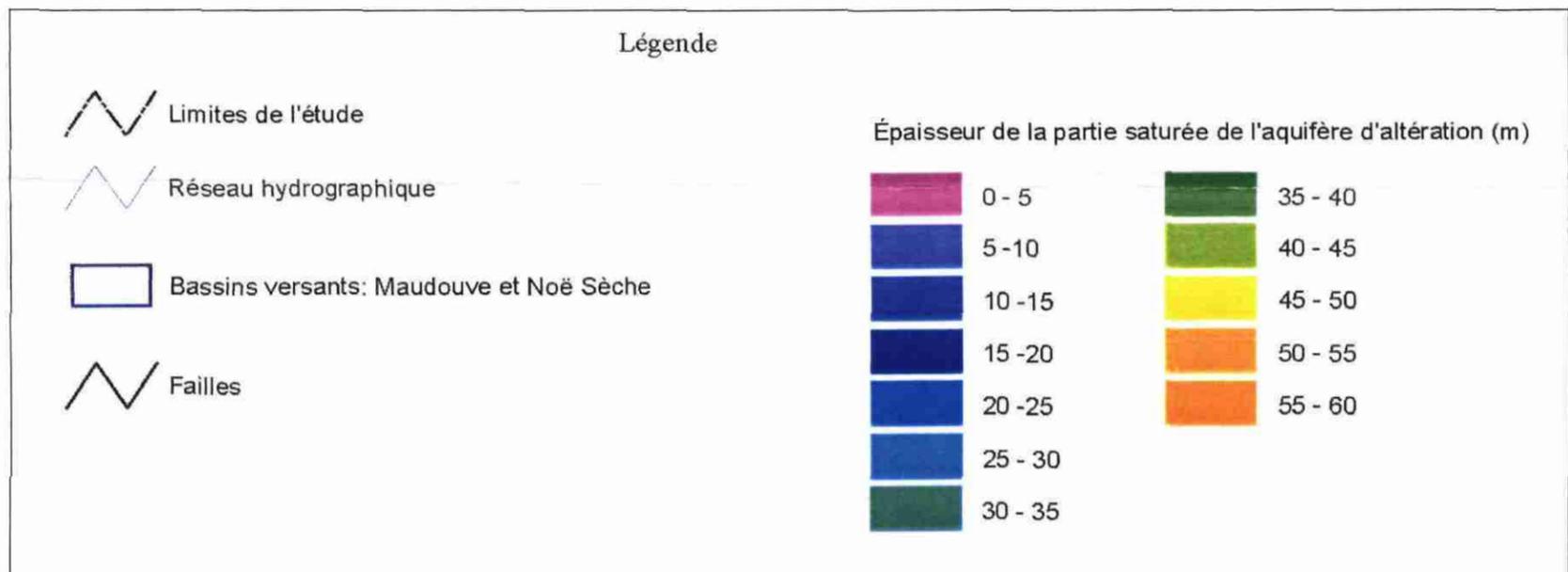
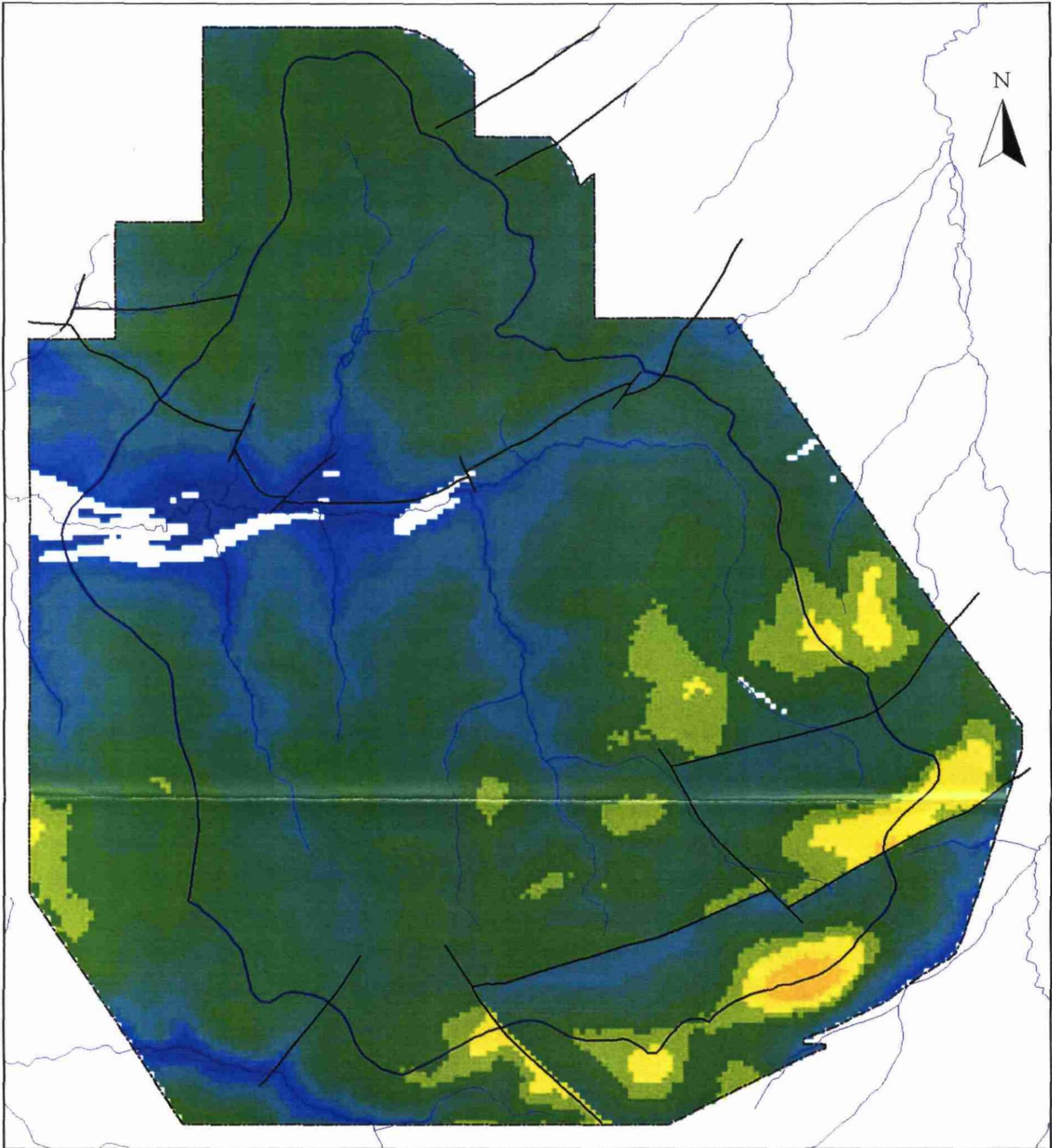
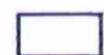


Planche 29 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

Légende

-  Limites de l'étude
-  Réseau hydrographique
-  Bassin versant du Dourduff
-  Failles

Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (m)

 0 - 3	 35 - 40
 3 - 5	 40 - 45
 5 - 10	 45 - 50
 10 - 15	 50 - 55
 15 - 20	 55 - 60
 20 - 25	 60 - 65
 25 - 30	 Pas de données
 30 - 35	

Planche 30 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Dourduff)

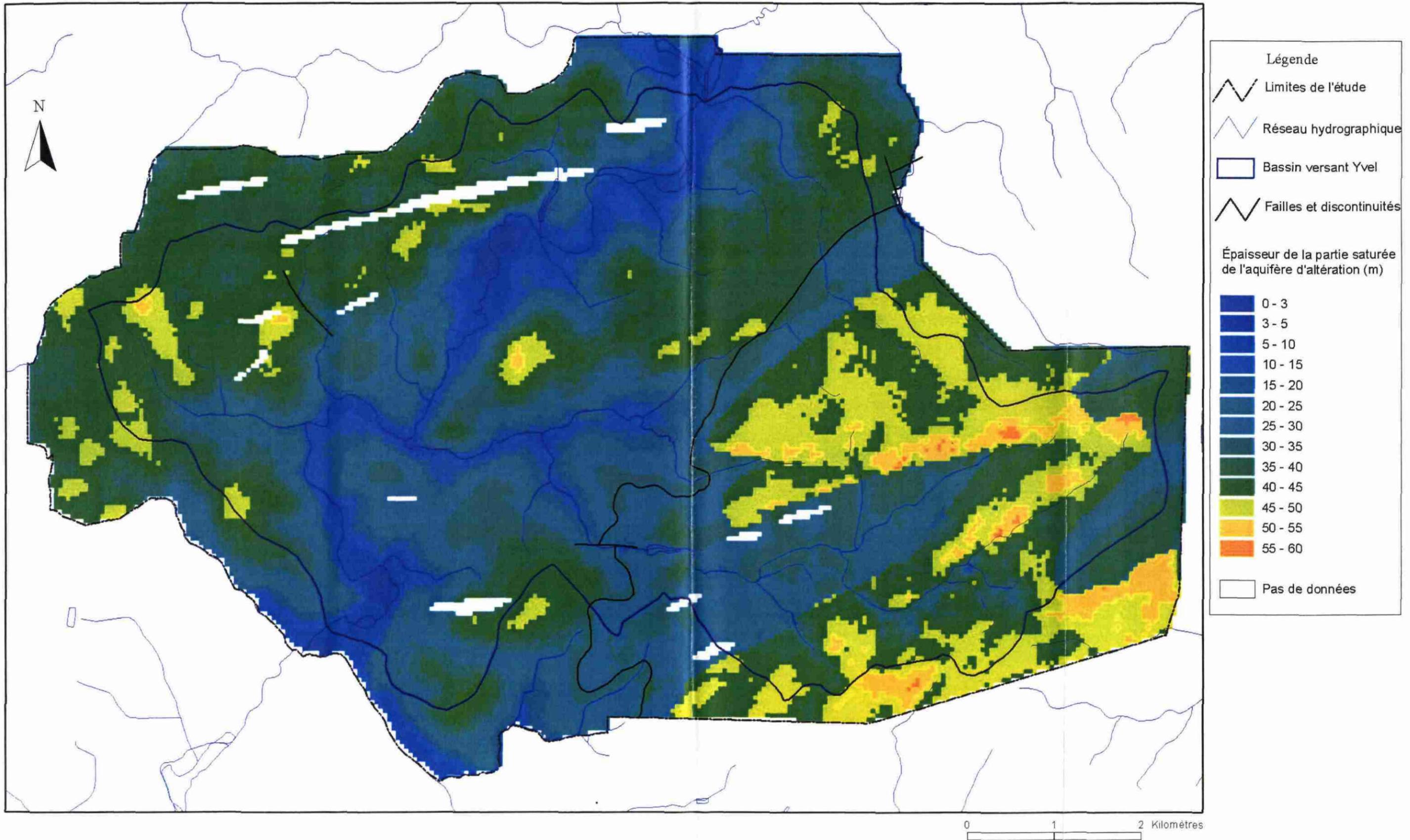


Planche 31 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Yvel)

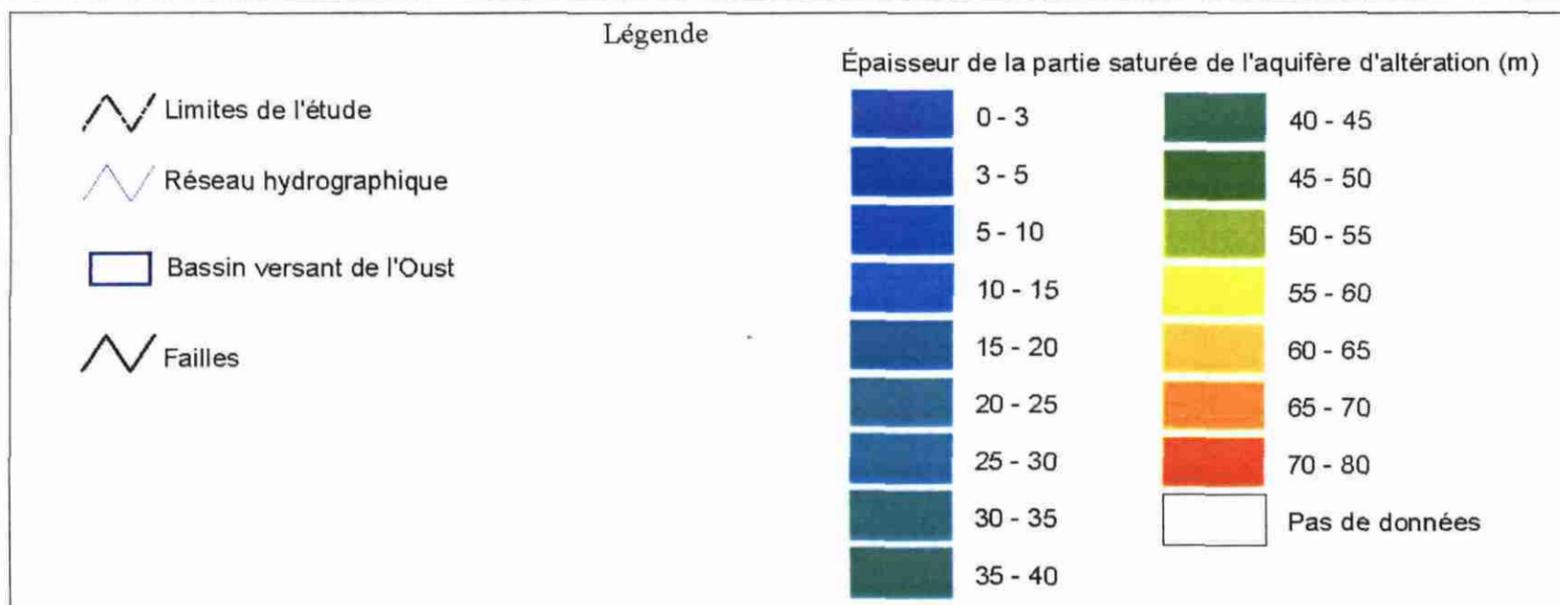
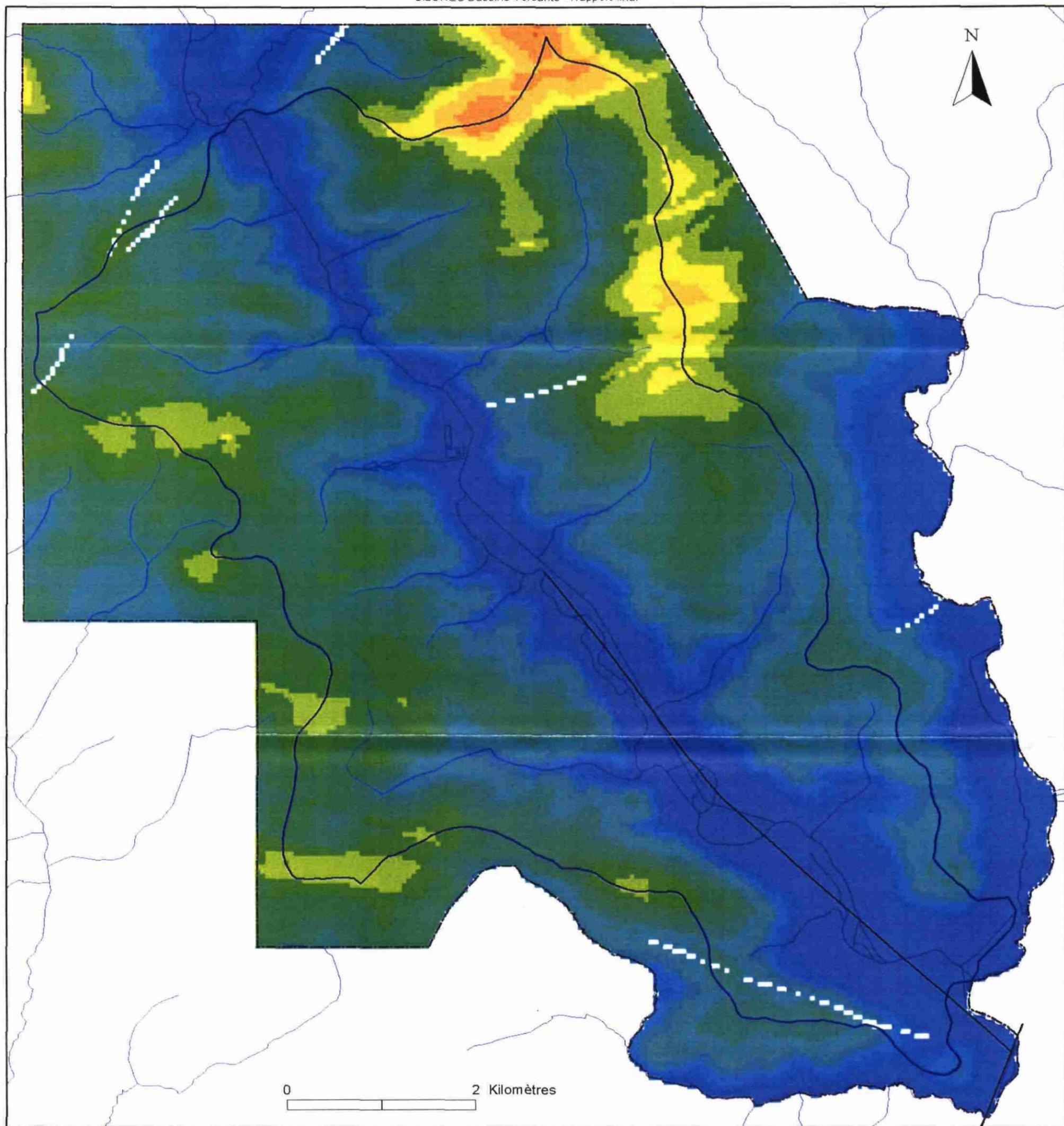
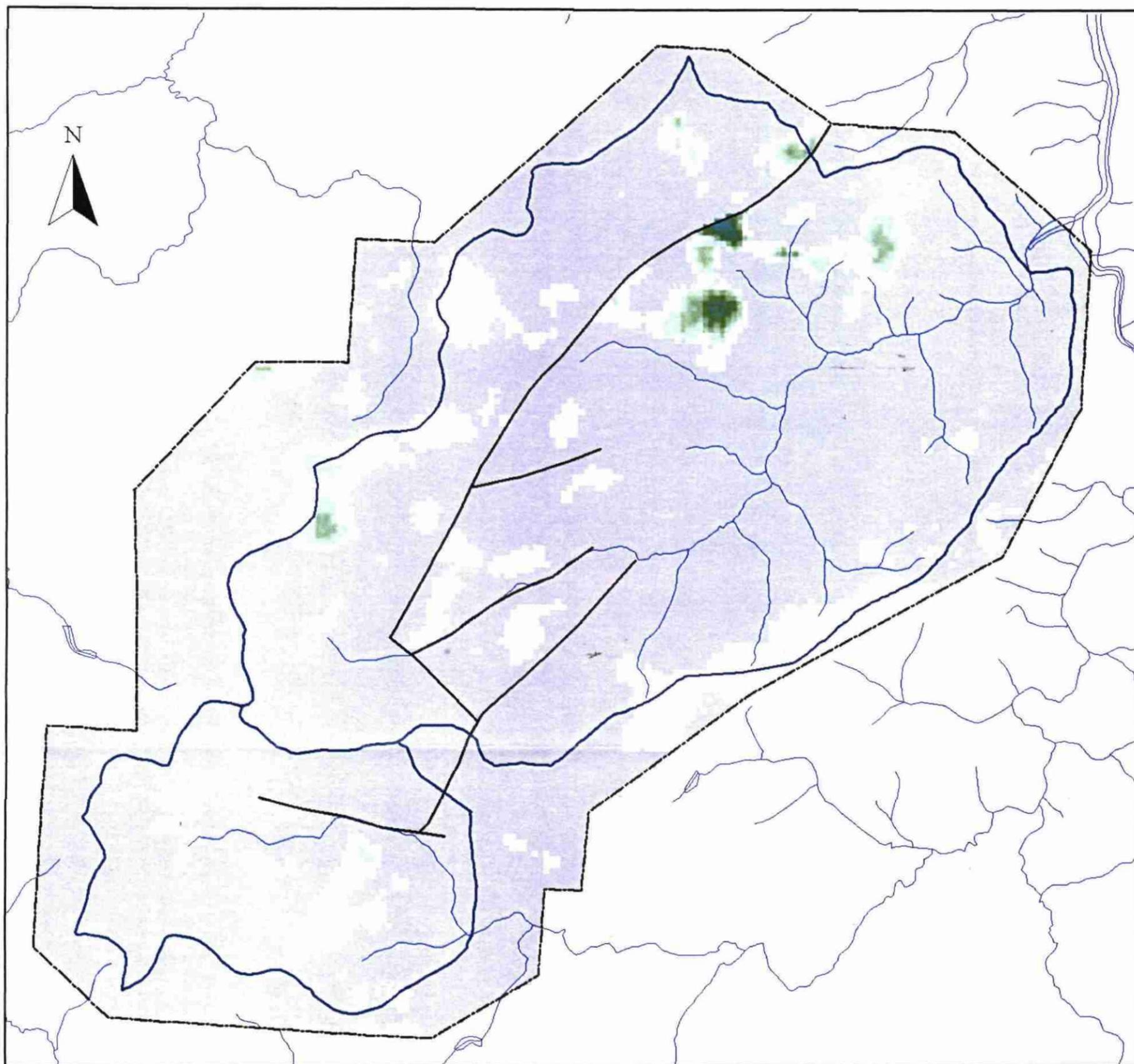


Planche 32 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

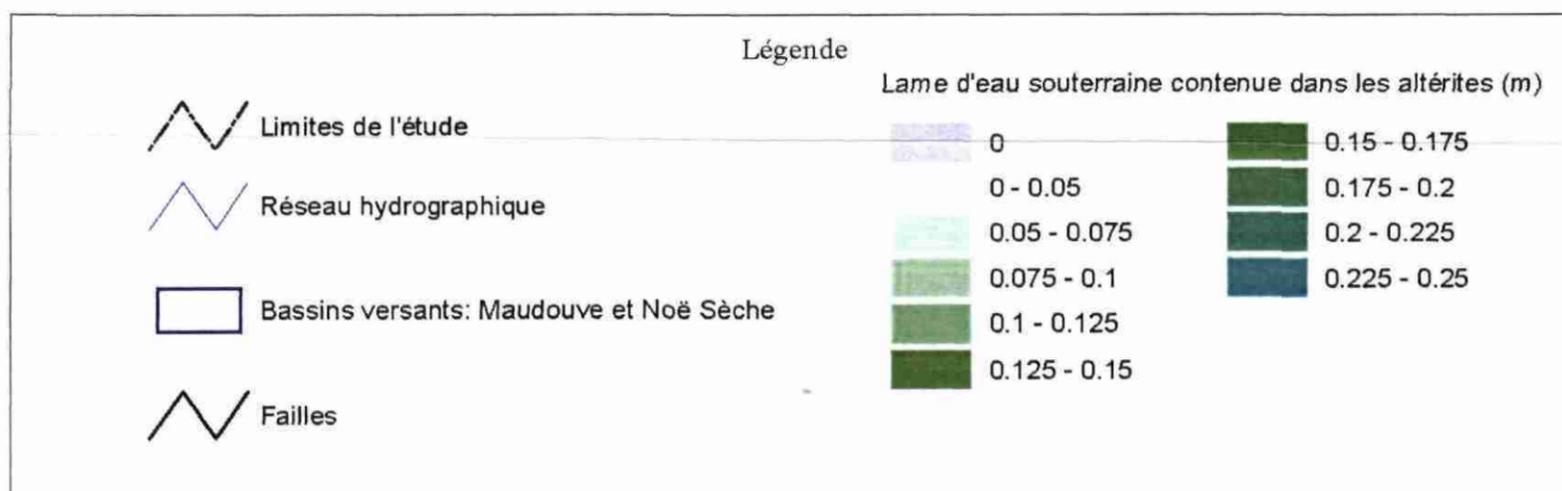
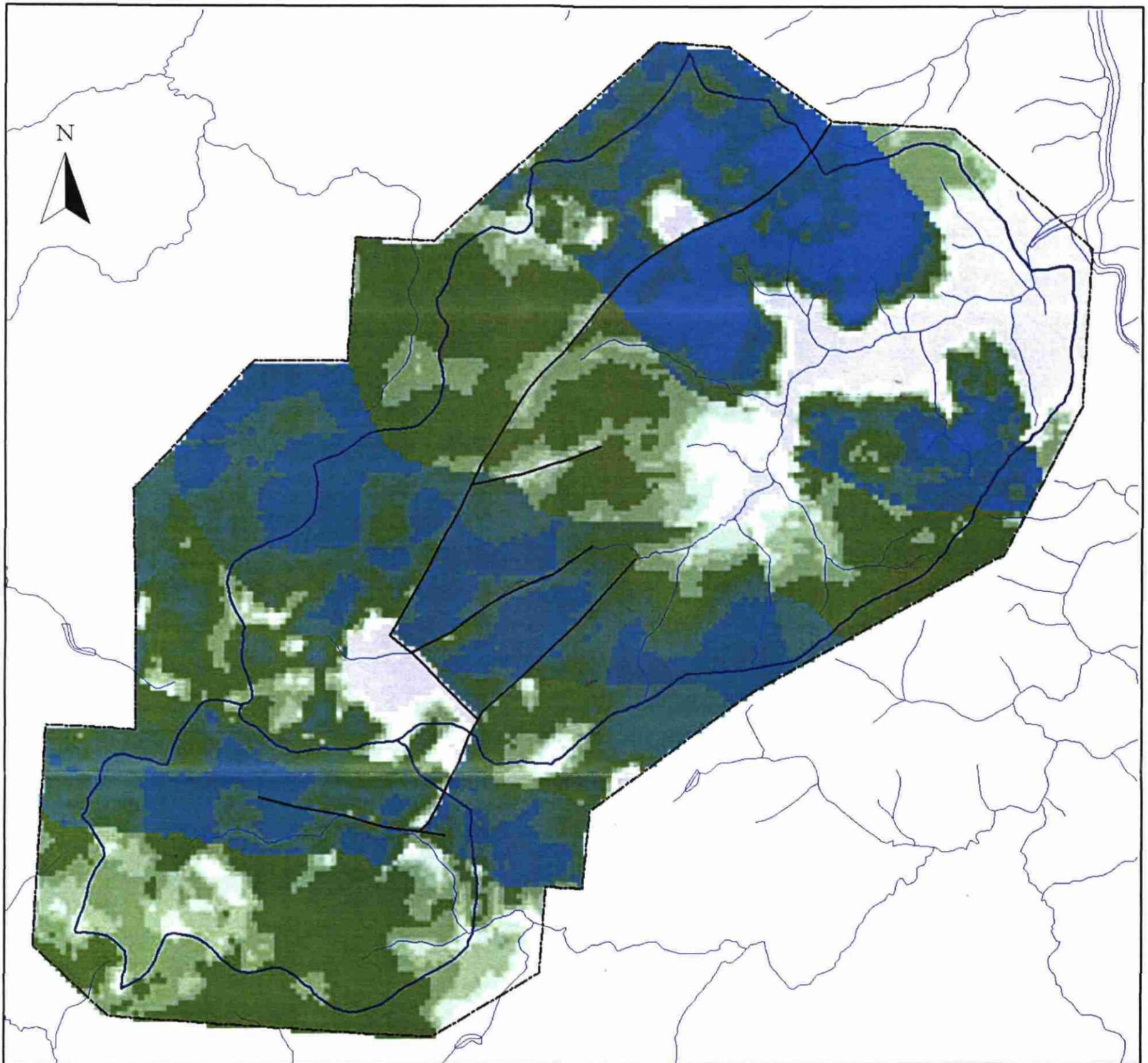


Planche 33 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 1 2 Kilomètres

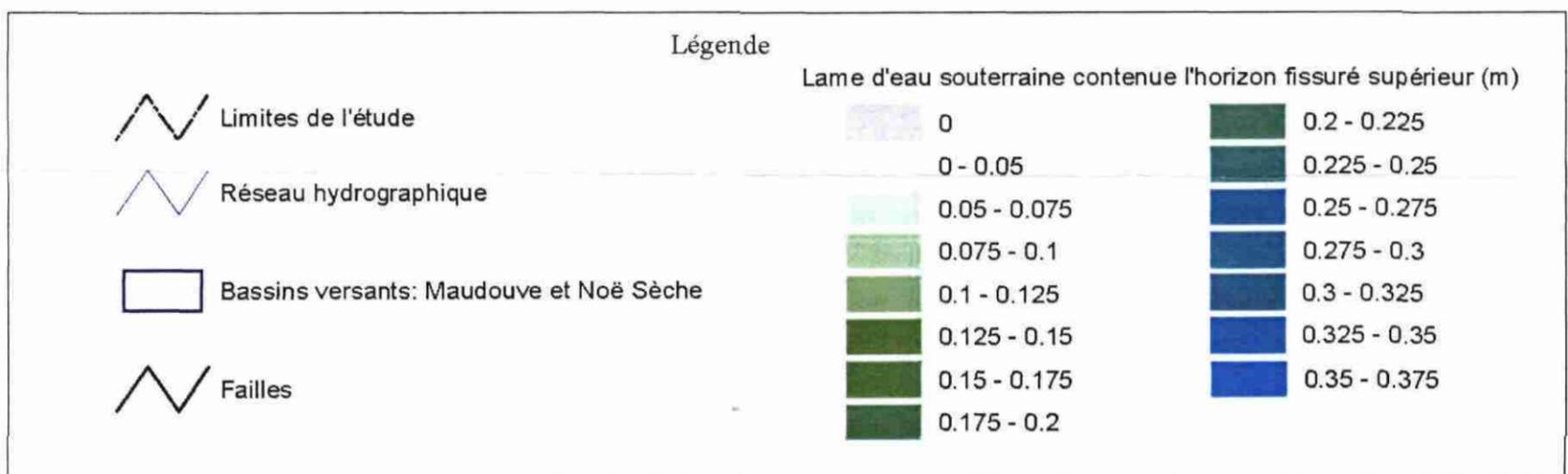
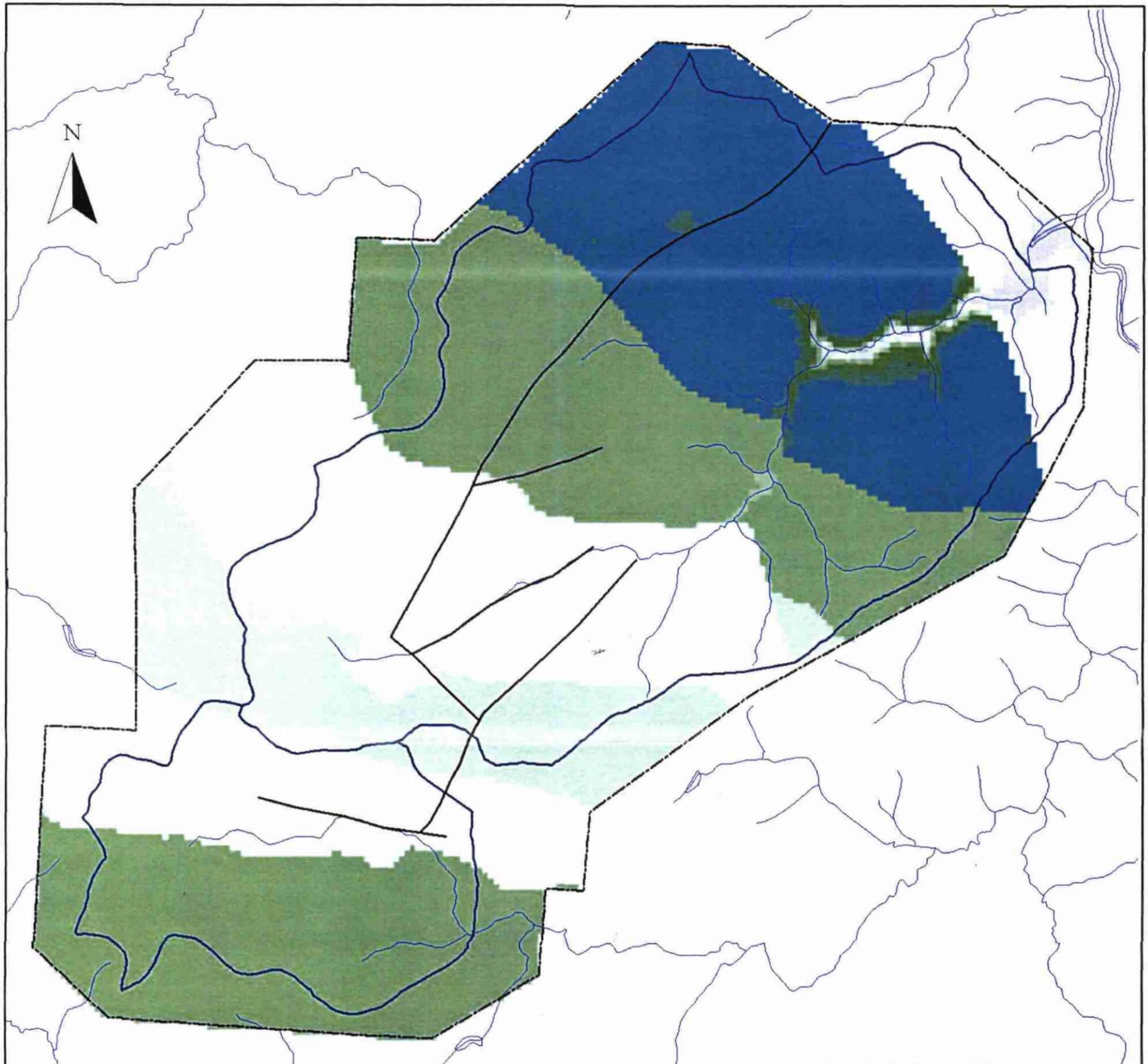


Planche 34 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 1 2 Kilomètres

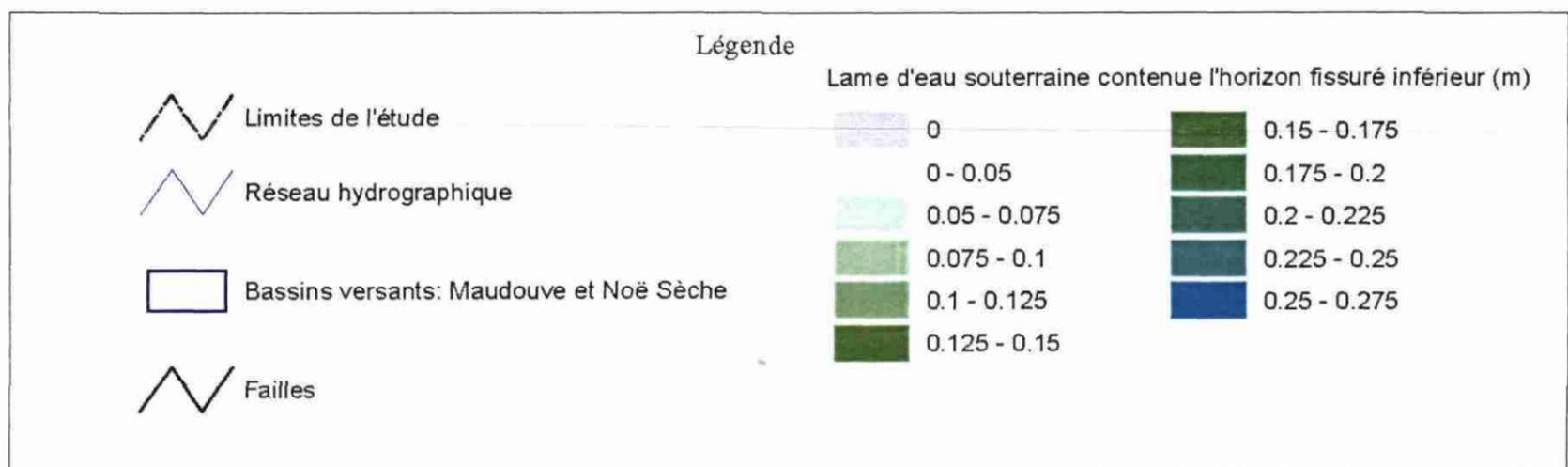
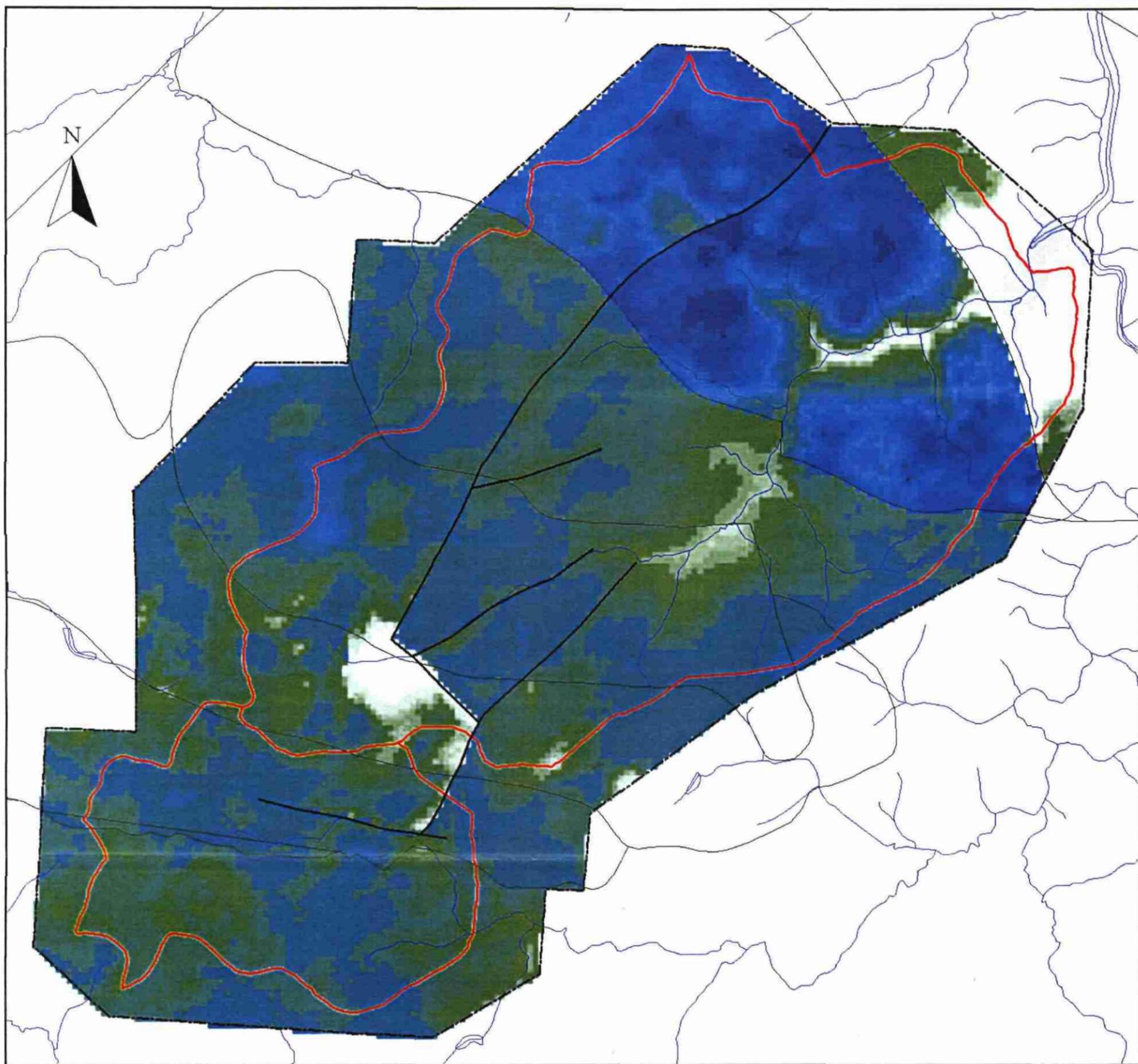


Planche 35 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 1 2 Kilomètres

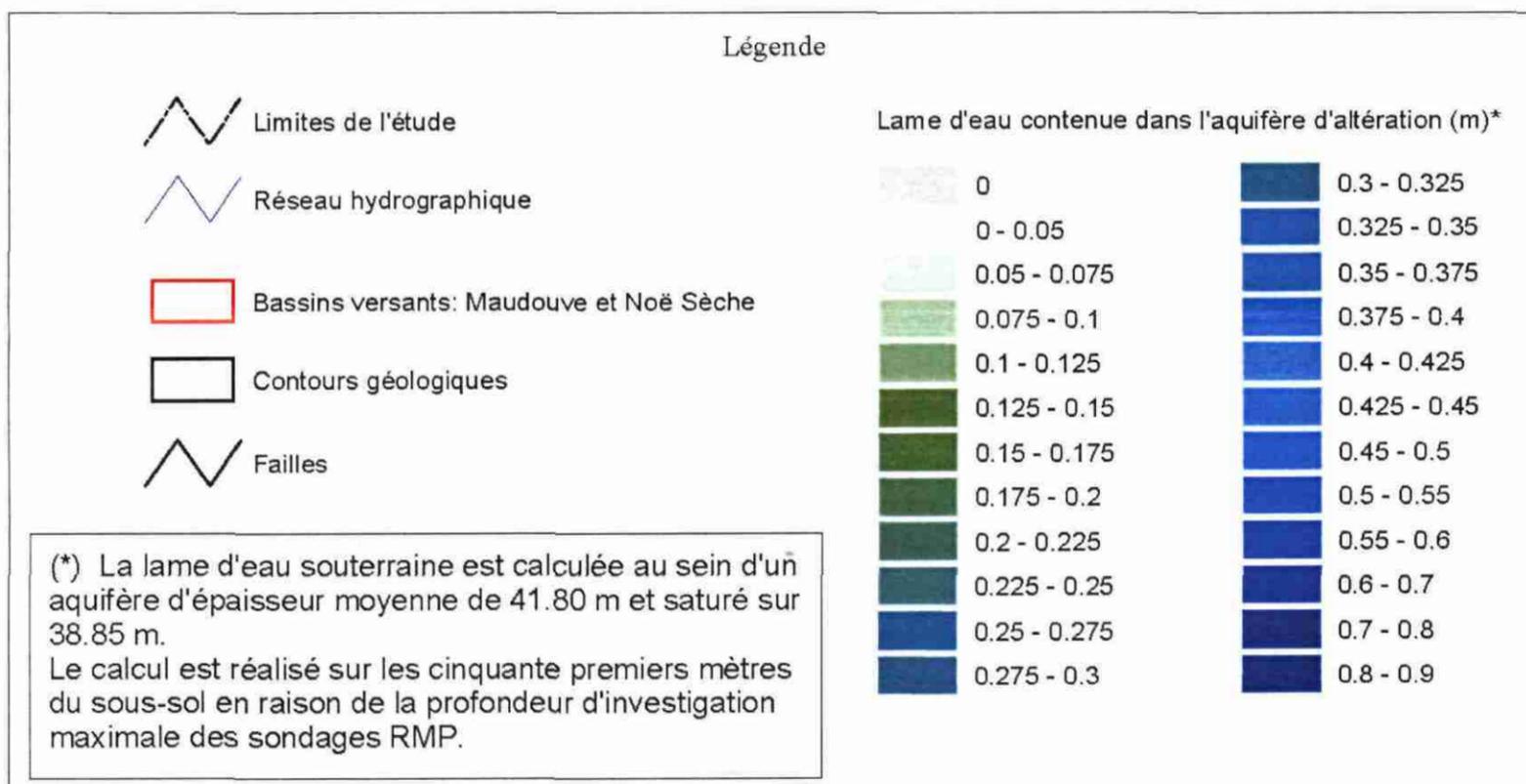
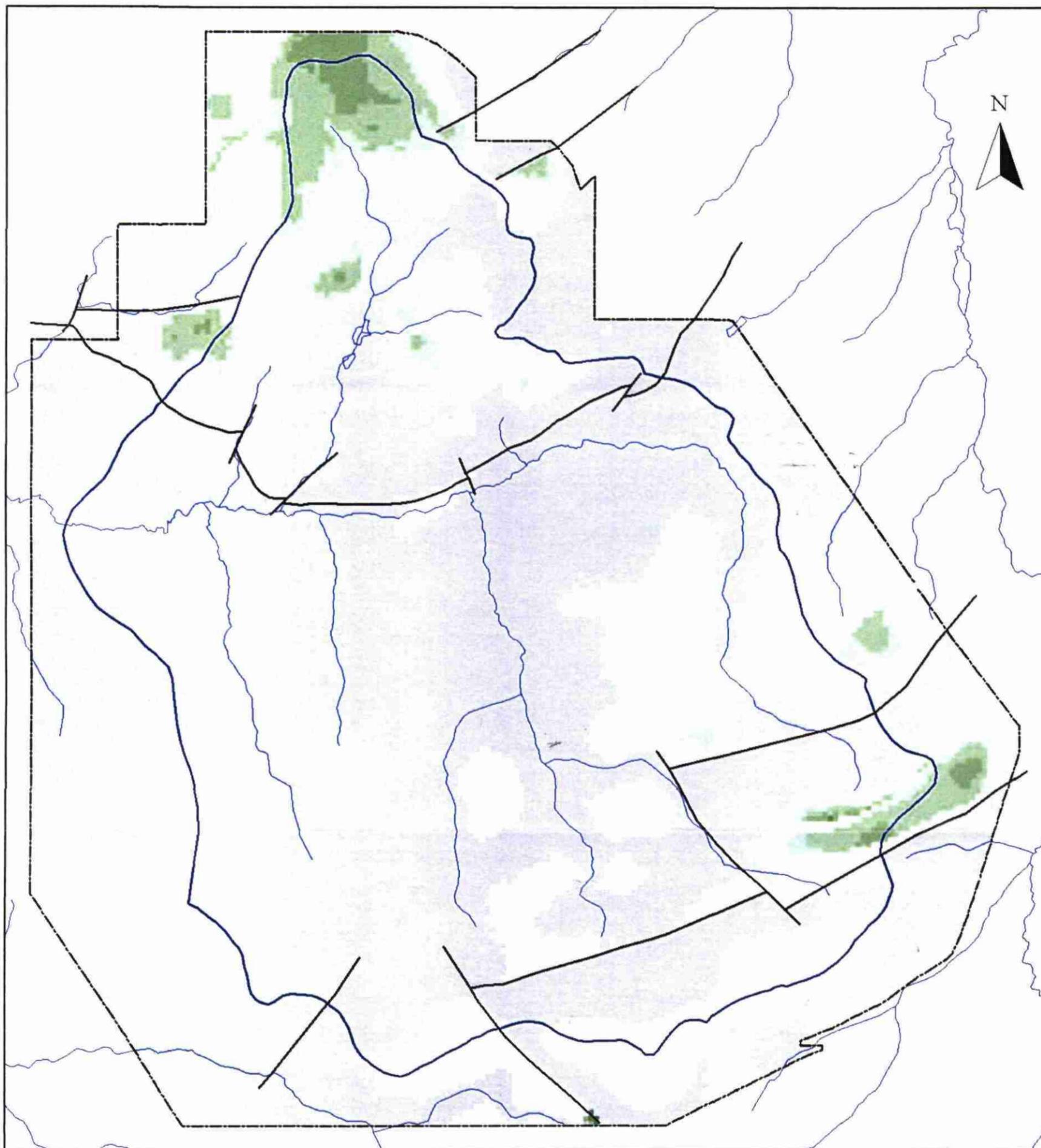


Planche 36 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

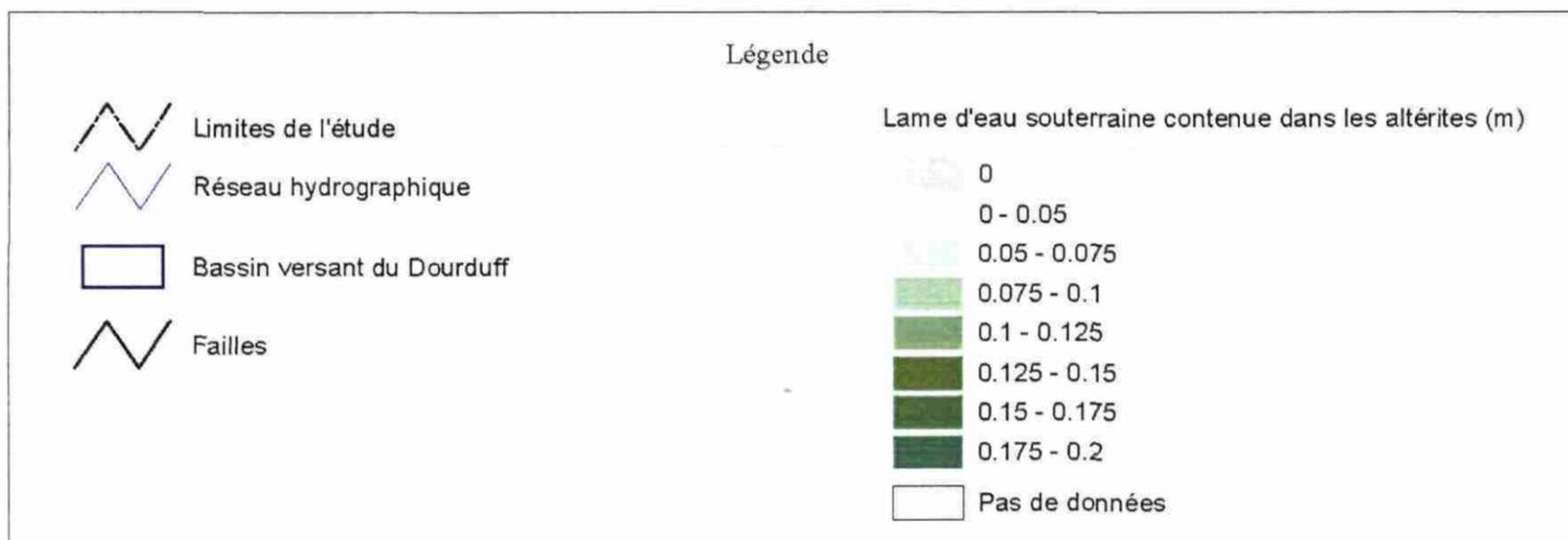
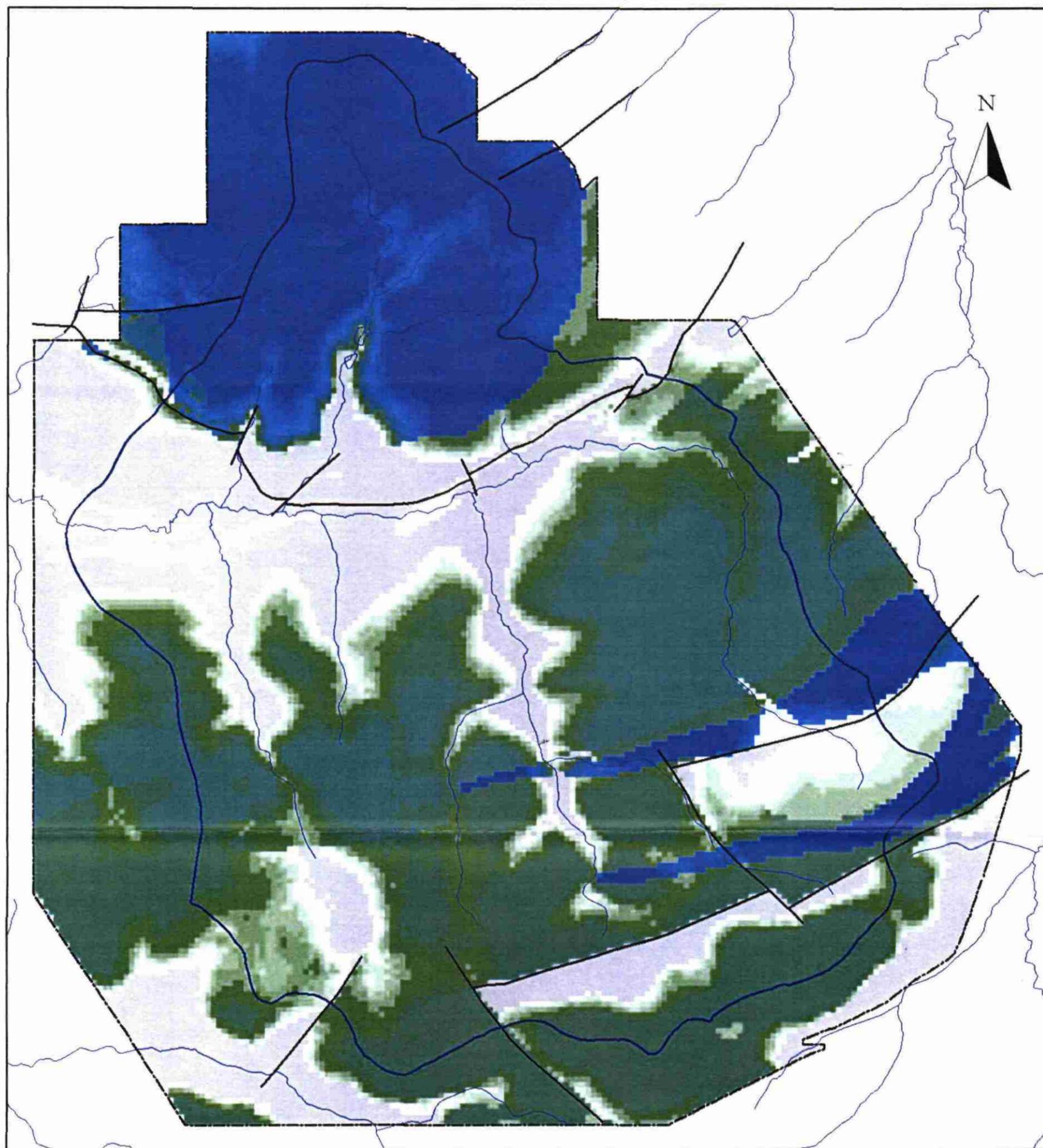


Planche 37 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Dourduff)



0 2 Kilomètres

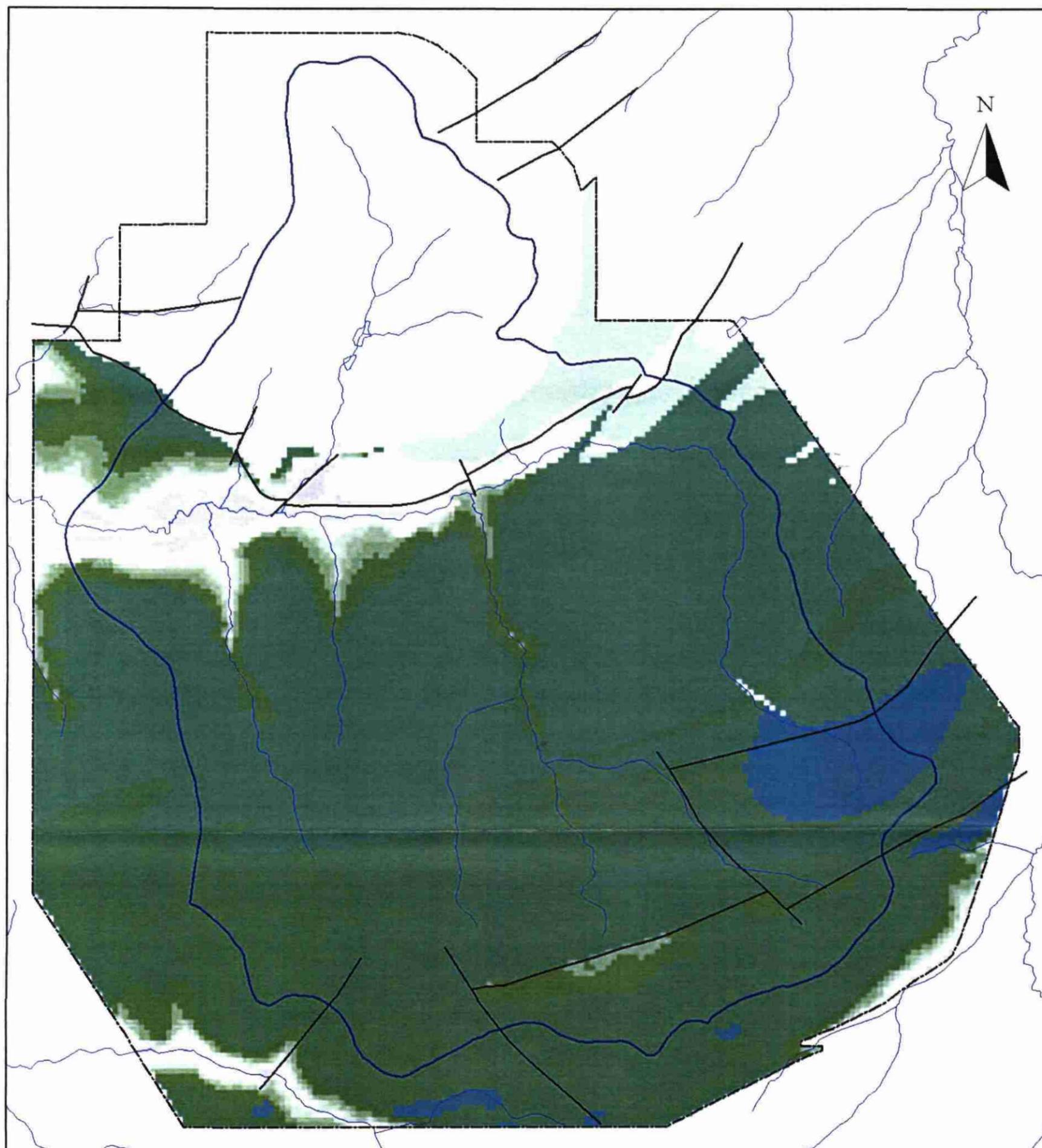
Légende

- Limites de l'étude
- Réseau hydrographique
- Bassin versant du Dourduff
- Failles

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

	0		0.325 - 0.35
	0 - 0.05		0.35 - 0.375
	0.05 - 0.075		0.375 - 0.4
	0.075 - 0.1		0.4 - 0.425
	0.1 - 0.125		0.425 - 0.45
	0.125 - 0.15		0.45 - 0.5
	0.15 - 0.175		0.5 - 0.55
	0.175 - 0.2		0.55 - 0.6
	0.2 - 0.225		0.6 - 0.7
	0.225 - 0.25		Pas de données
	0.25 - 0.275		
	0.275 - 0.3		
	0.3 - 0.325		

Planche 38 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Dourduff)



0 2 Kilomètres

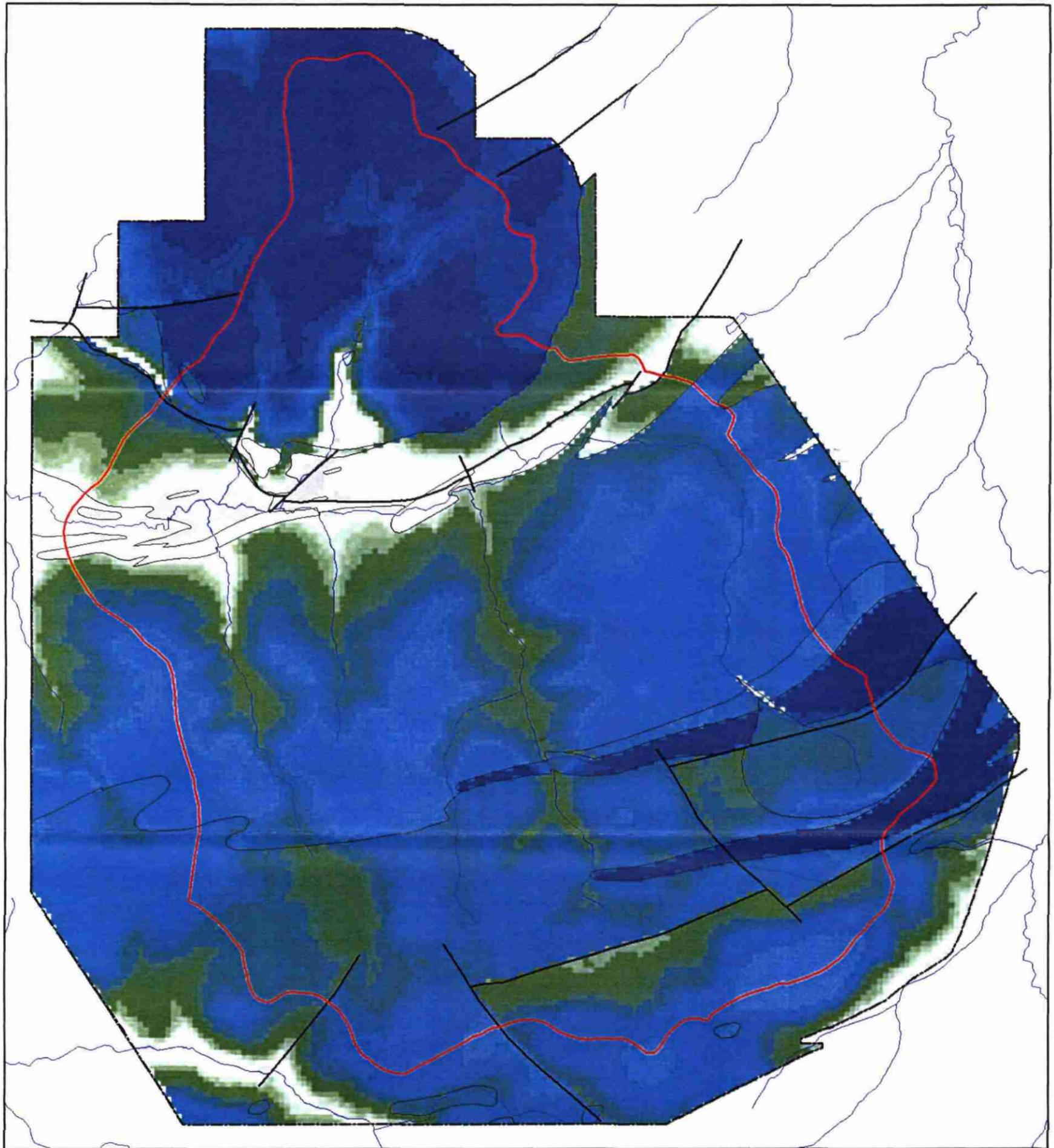
Légende

-  Limites de l'étude
-  Réseau hydrographique
-  Bassin versant du Dourduff
-  Failles

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

- |  |  |
|--|--|
|  0            |  0.175 - 0.2    |
|  0 - 0.05     |  0.2 - 0.225    |
|  0.05 - 0.075 |  0.225 - 0.25   |
|  0.075 - 0.1  |  0.25 - 0.275   |
|  0.1 - 0.125  |  0.275 - 0.3    |
|  0.125 - 0.15 |  Pas de données |
|  0.15 - 0.175 |  |

Planche 39 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Dourduff)



0 2 Kilomètres

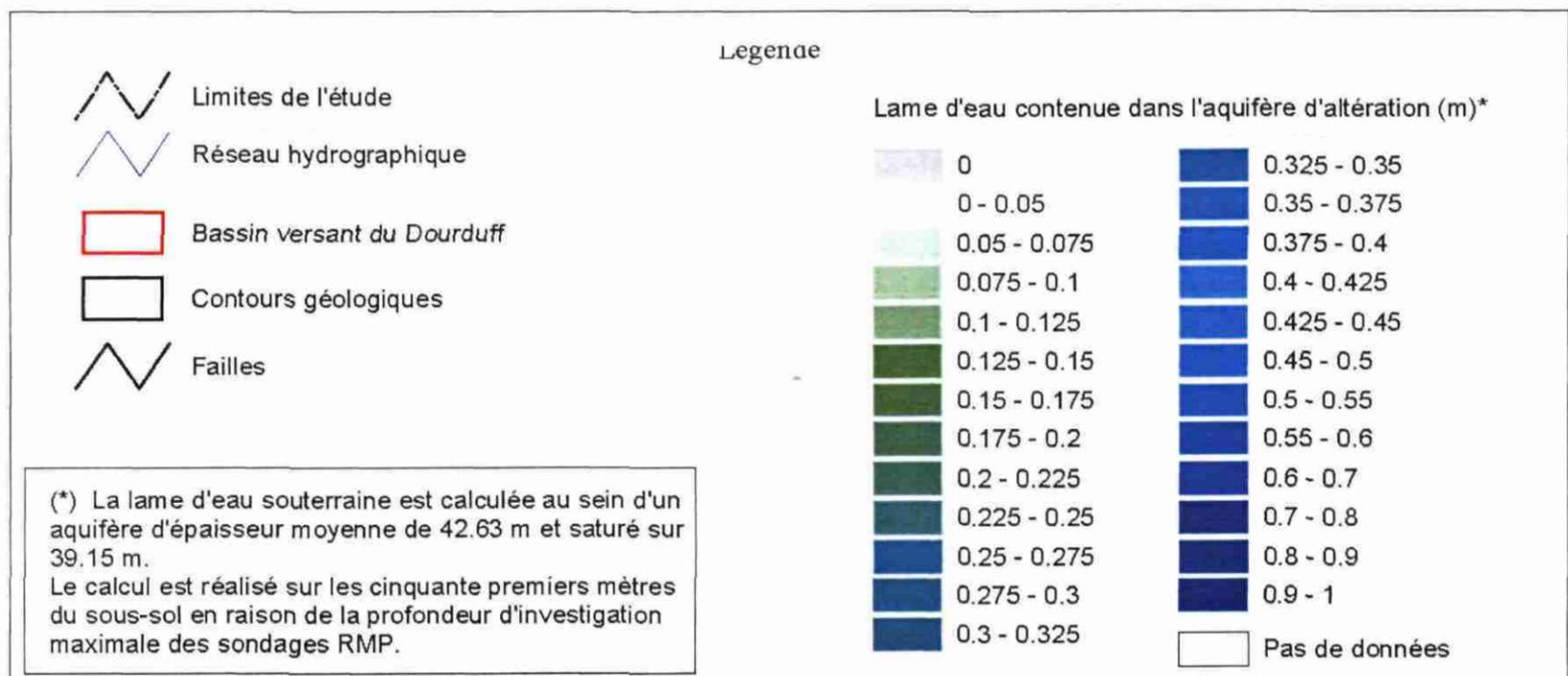


Planche 40 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Dourduff)

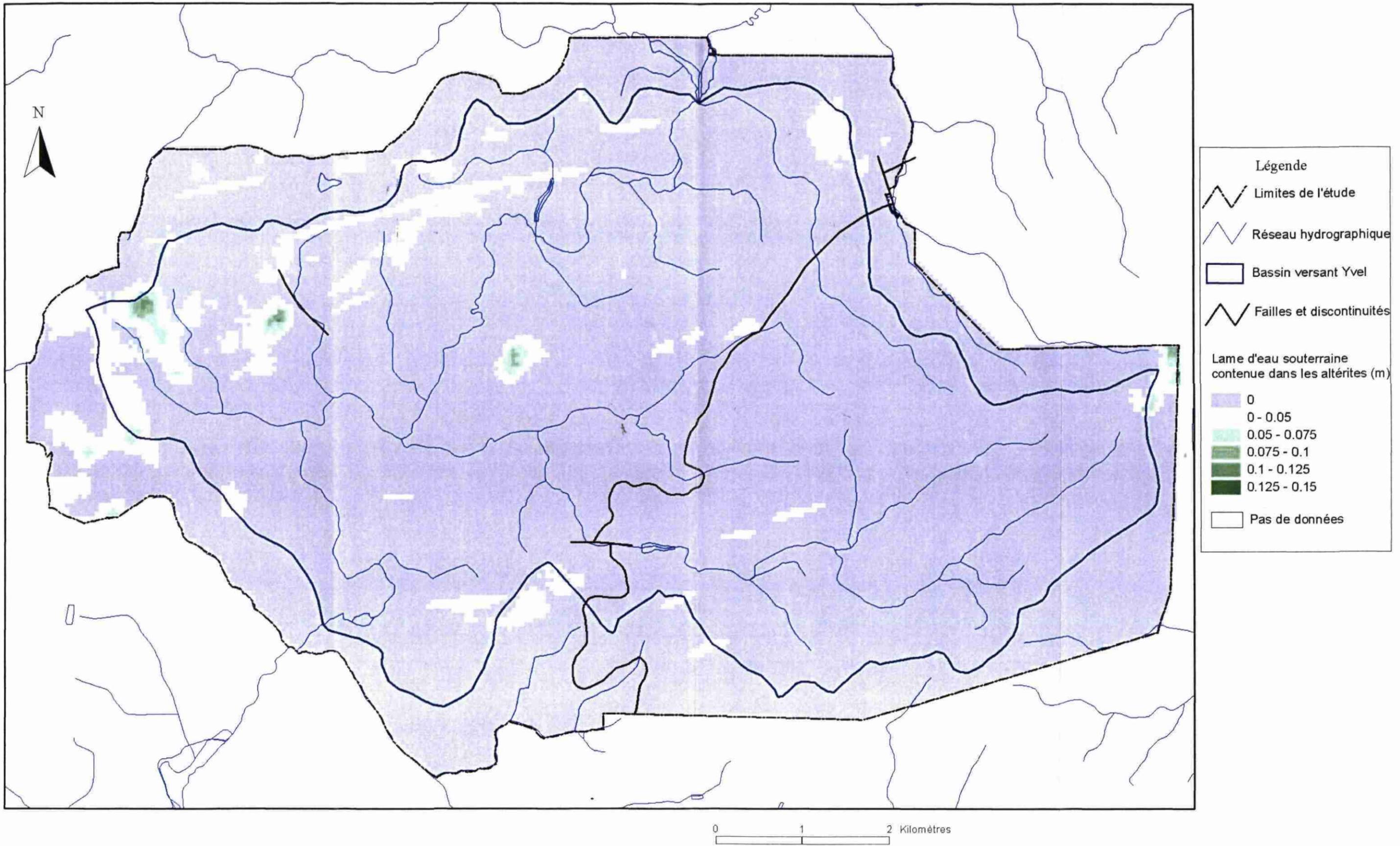


Planche 41 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Yvel)

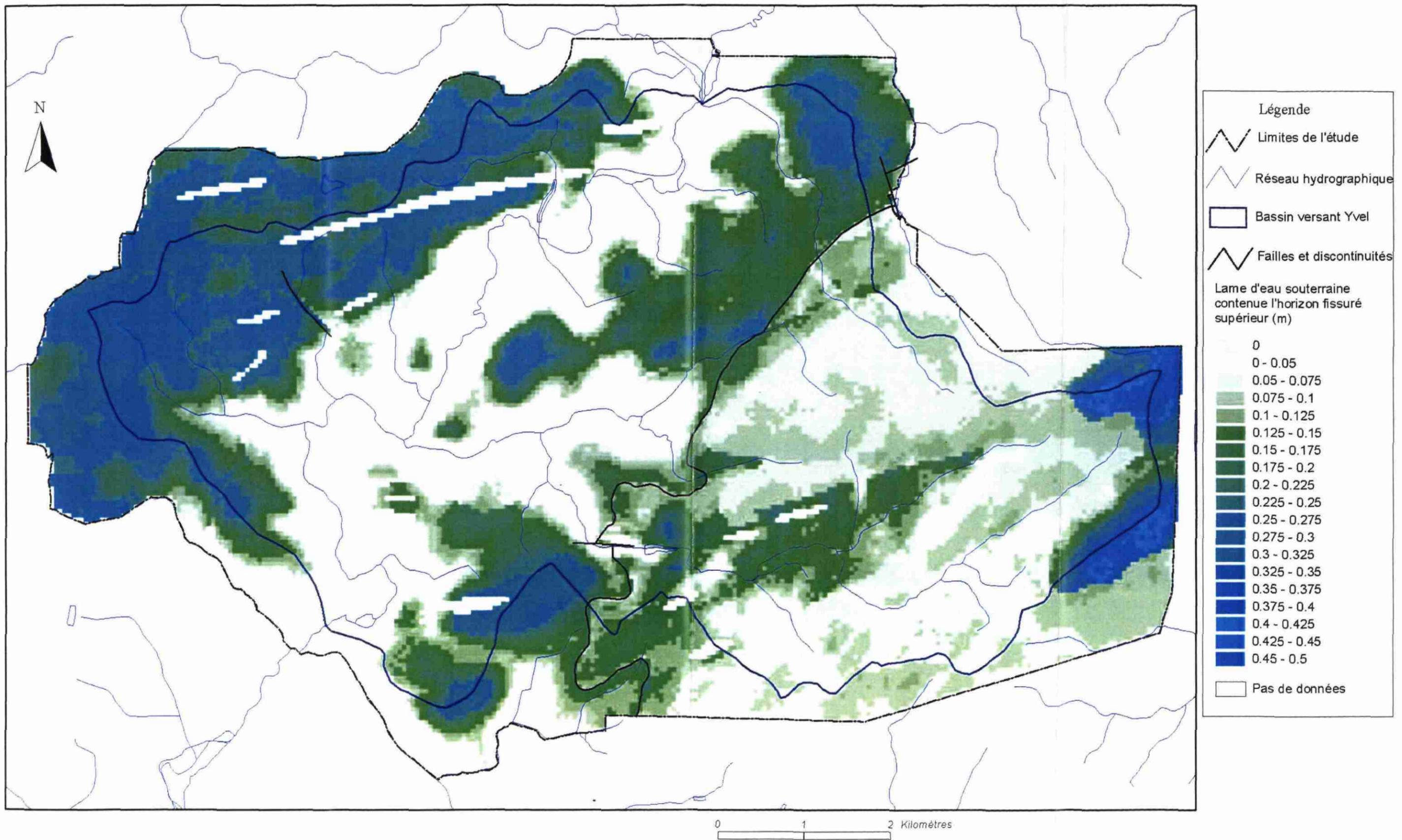


Planche 42 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Yvel)

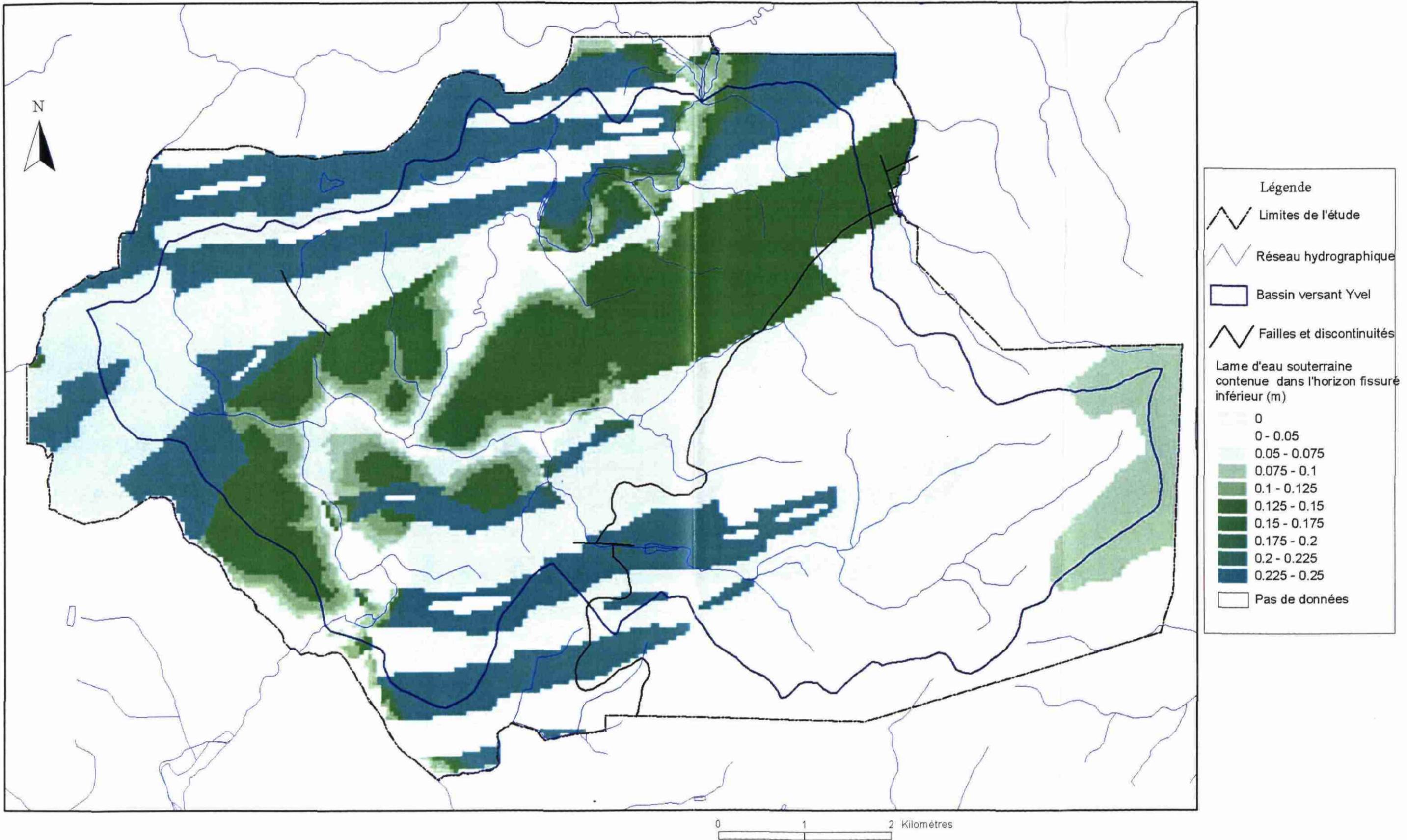
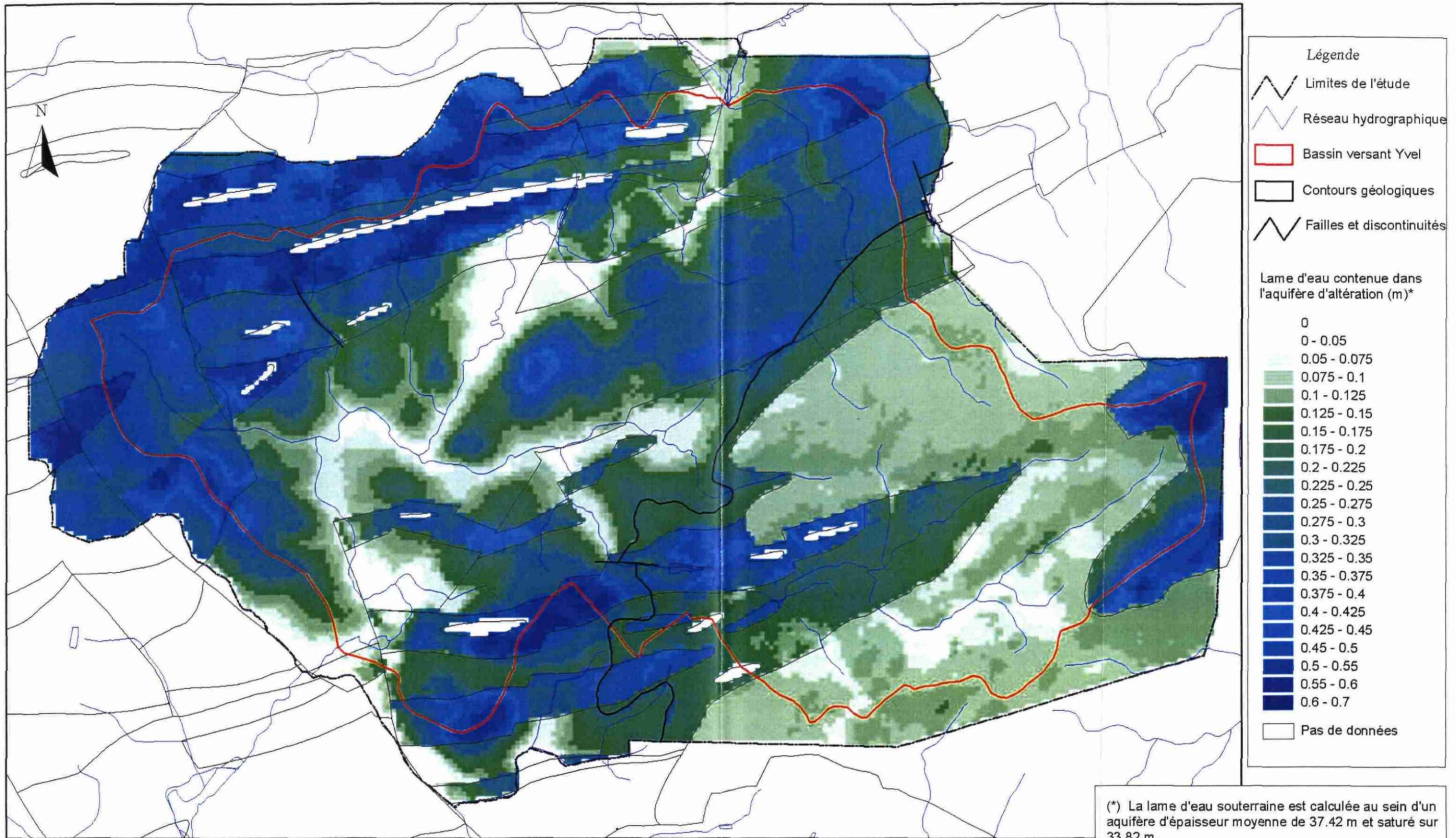
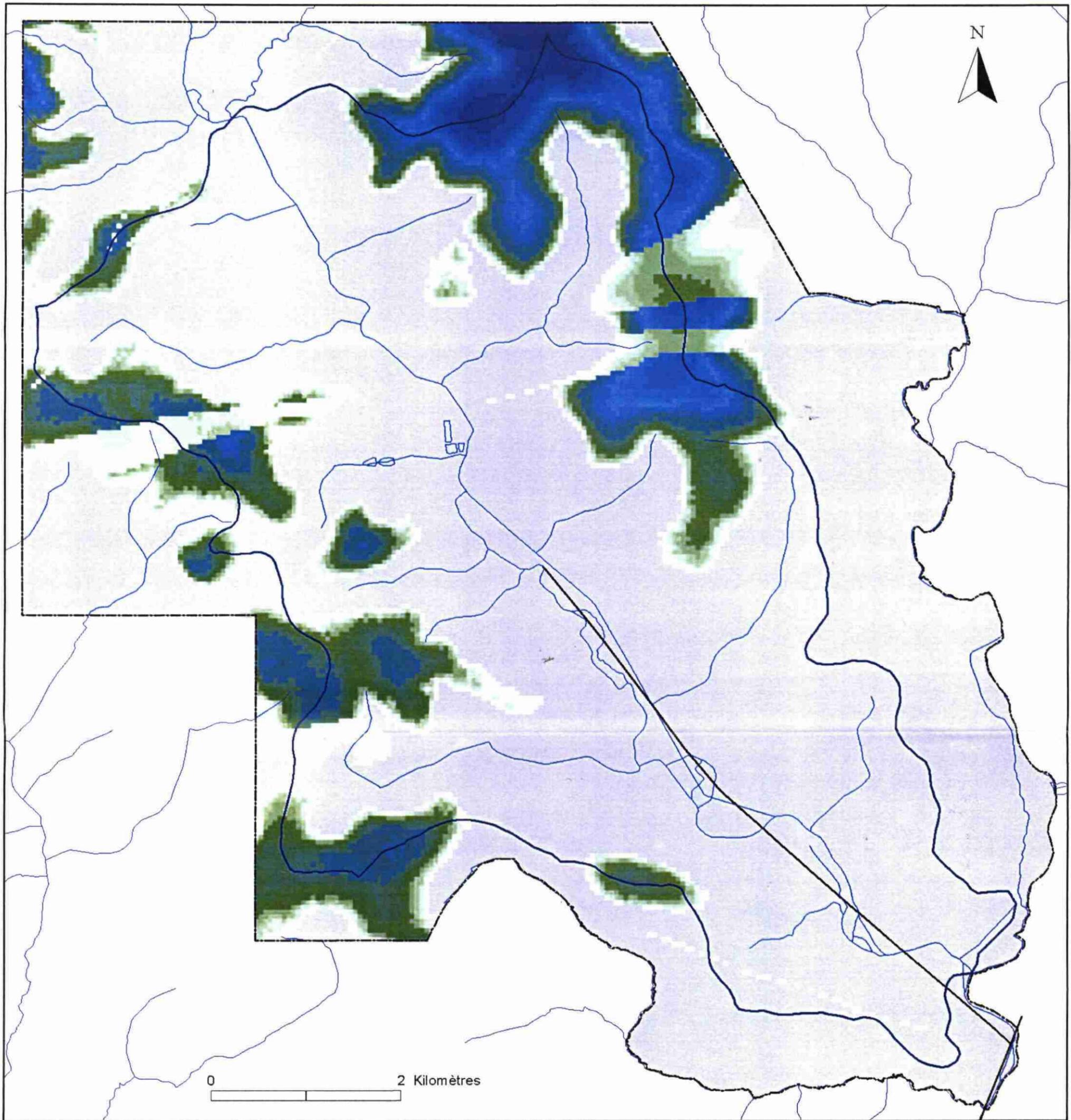


Planche 43 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Yvel)



(\*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 37.42 m et saturé sur 33.82 m. Le calcul est réalisé sur les cinquante premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

Planche 44 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Yvel)

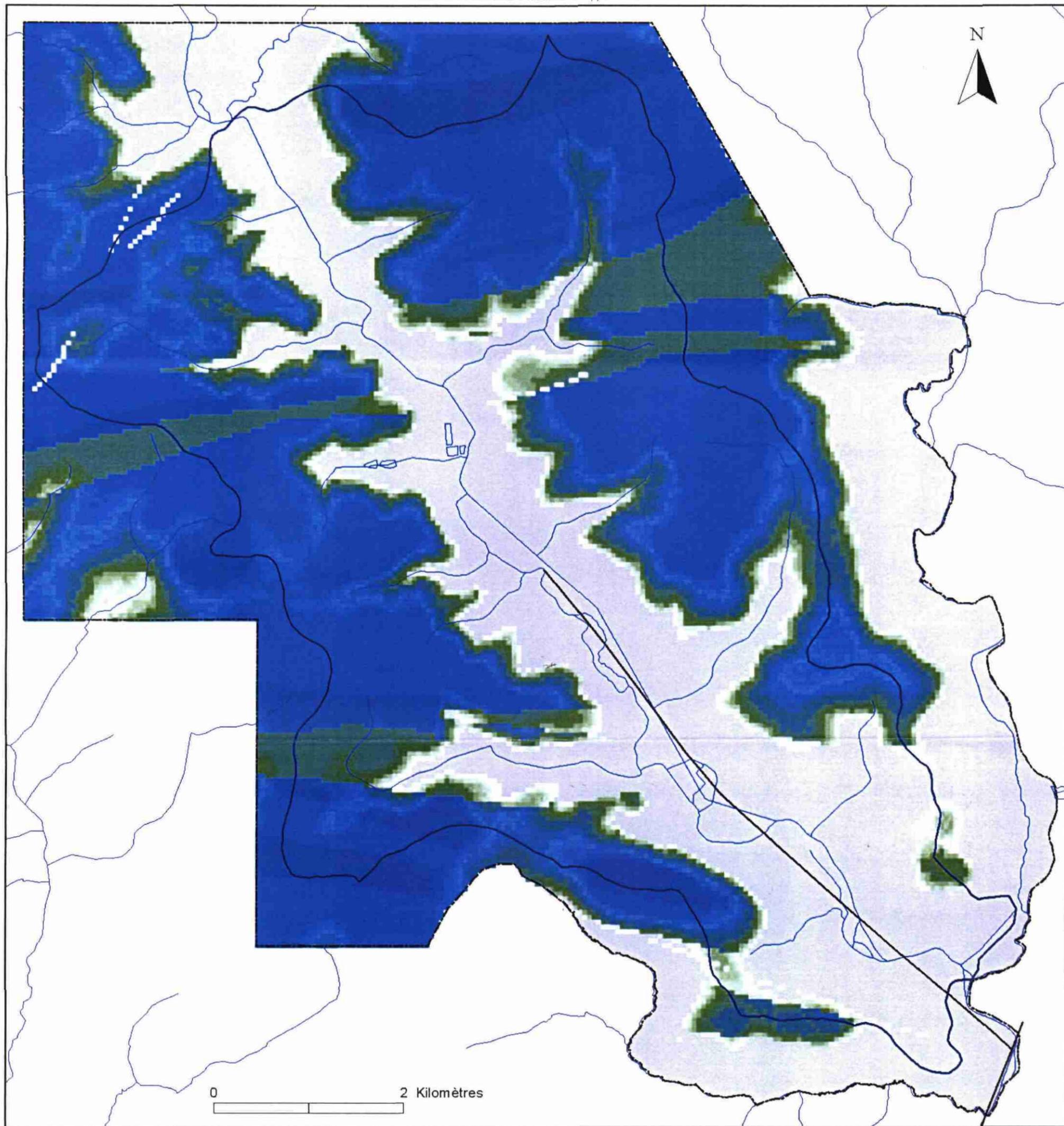


Légende

- Limites de l'étude
- Réseau hydrographique
- Bassin versant de l'Oust
- Failles

Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (m)

	0		0.25 - 0.275		0.55 - 0.6
	0 - 0.05		0.275 - 0.3		0.6 - 0.7
	0.05 - 0.075		0.3 - 0.325		0.7 - 0.8
	0.075 - 0.1		0.325 - 0.35		0.8 - 0.9
	0.1 - 0.125		0.35 - 0.375		0.9 - 1
	0.125 - 0.15		0.375 - 0.4		1 - 1.25
	0.15 - 0.175		0.4 - 0.425		Pas de données
	0.175 - 0.2		0.425 - 0.45		
	0.2 - 0.225		0.45 - 0.5		
	0.225 - 0.25		0.5 - 0.55		

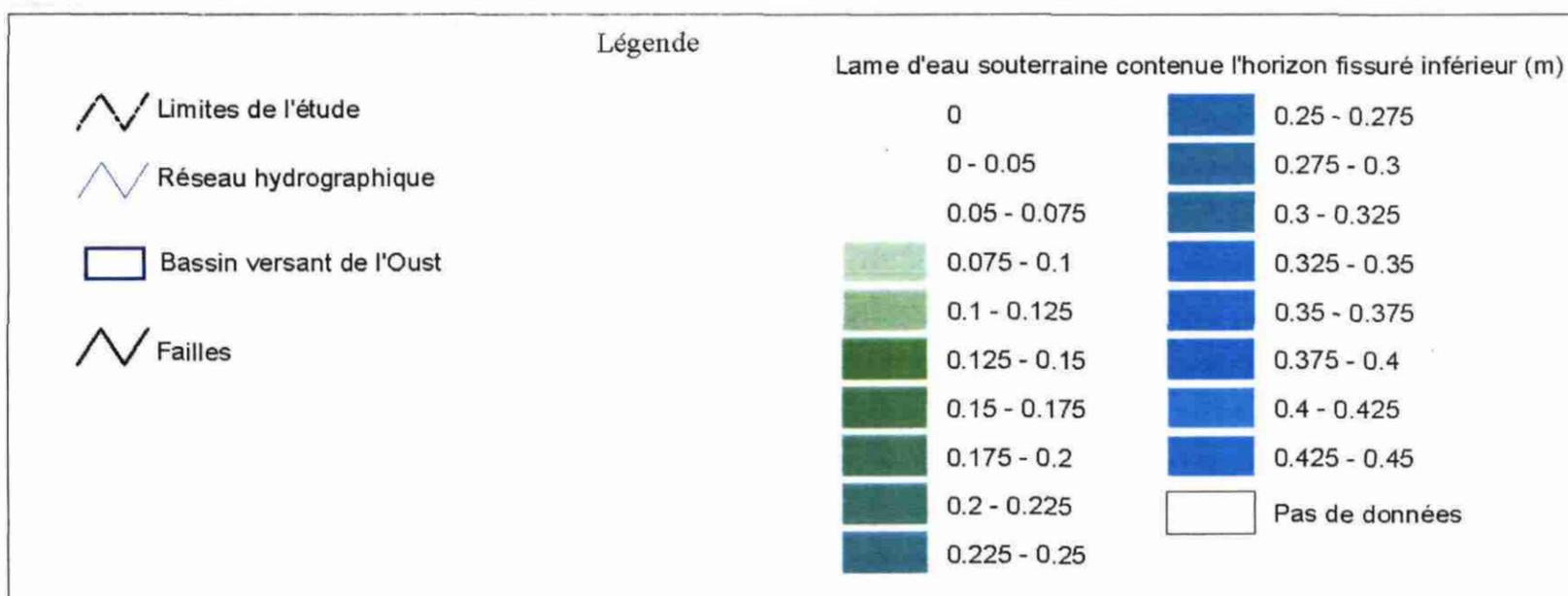
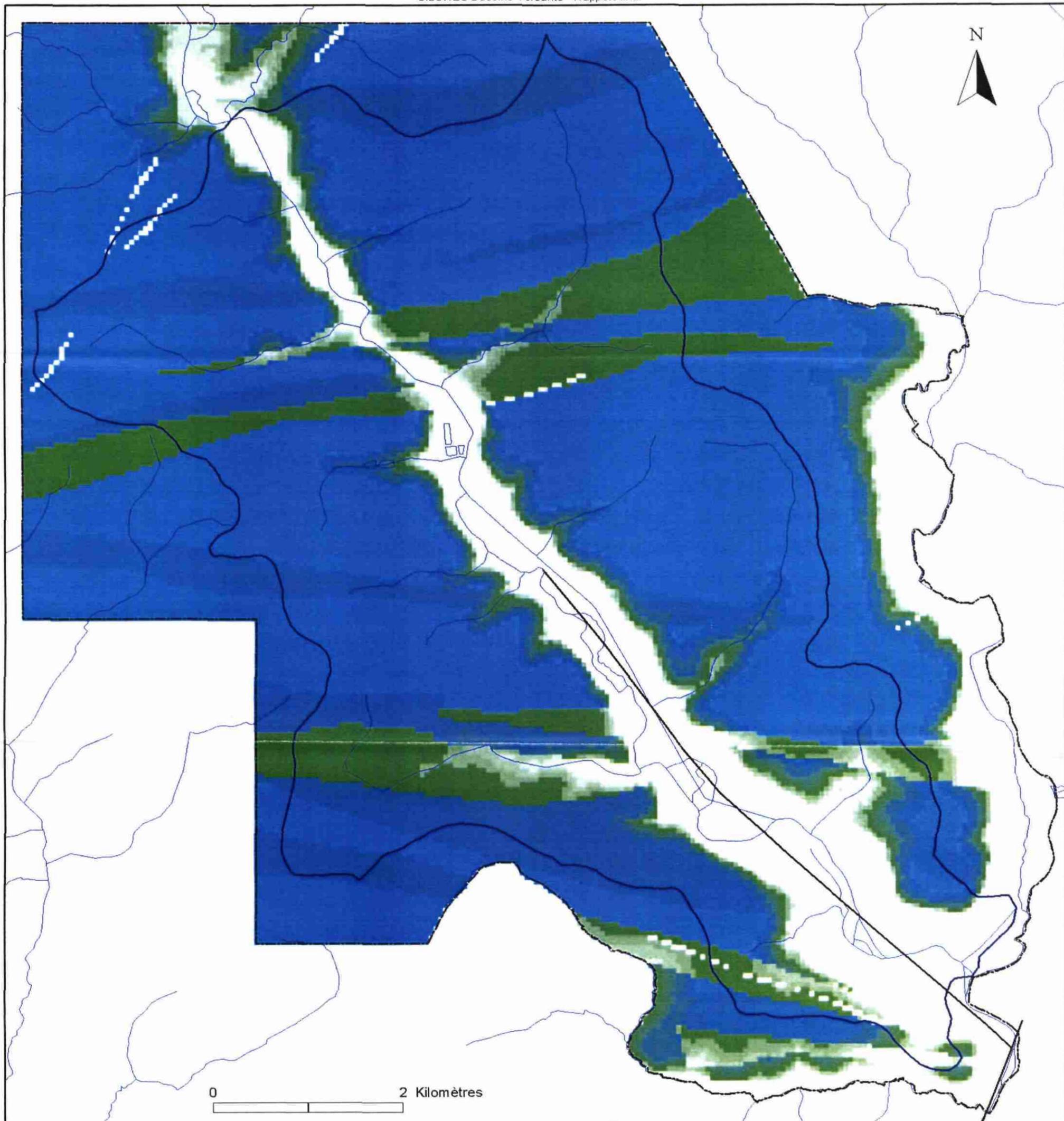


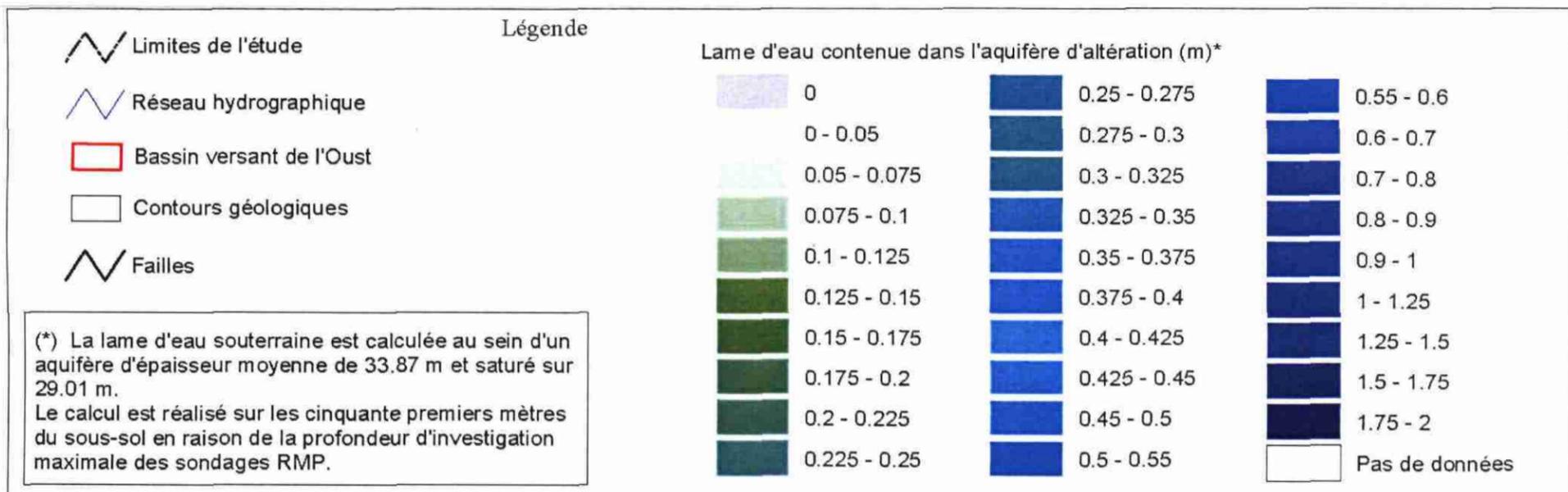
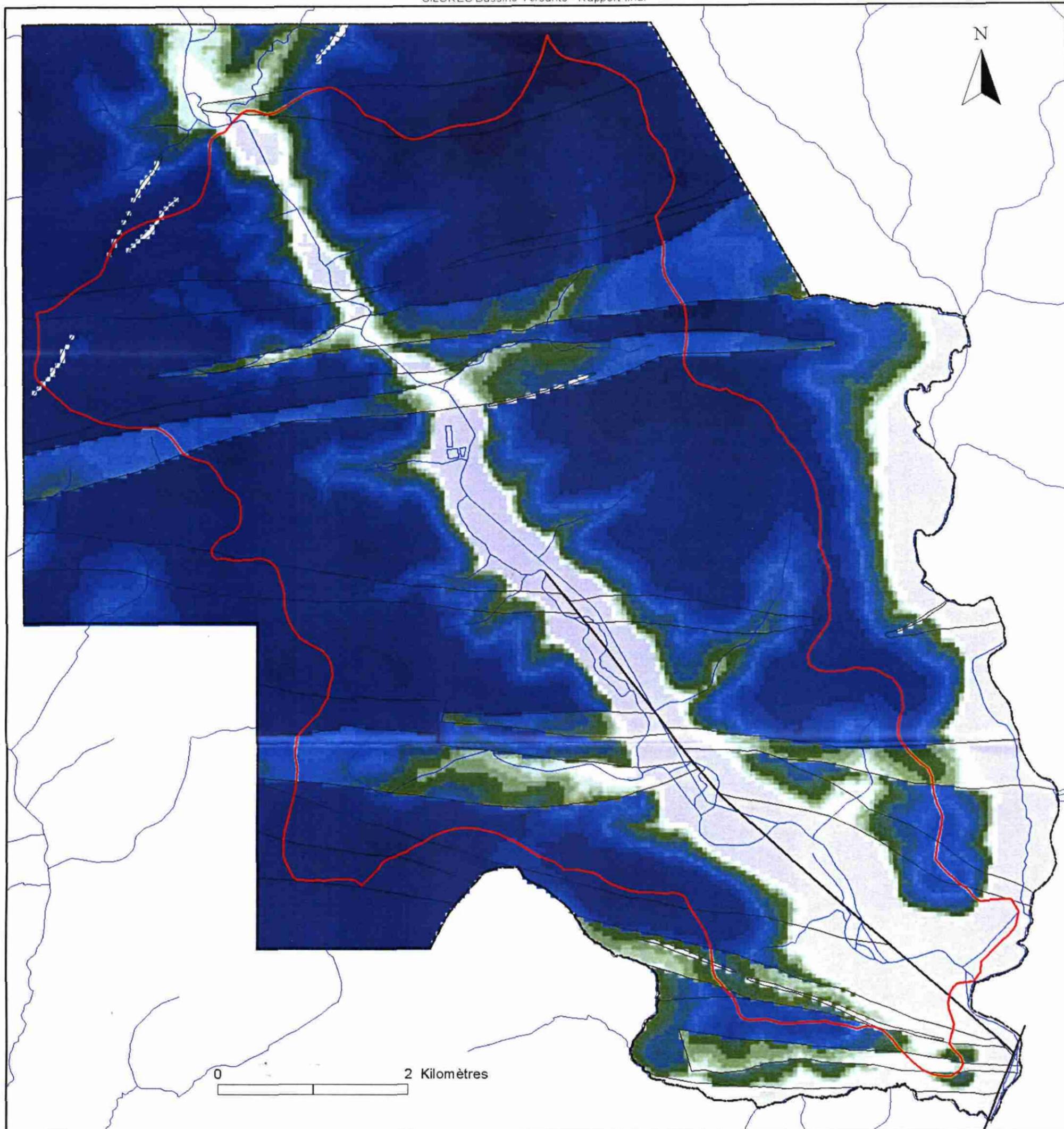
Légende

- Limites de l'étude
- Réseau hydrographique
- Bassin versant de l'Oust
- Failles

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

	0		0.25 - 0.275		0.55 - 0.6
	0 - 0.05		0.275 - 0.3		Pas de données
	0.05 - 0.075		0.3 - 0.325		
	0.075 - 0.1		0.325 - 0.35		
	0.1 - 0.125		0.35 - 0.375		
	0.125 - 0.15		0.375 - 0.4		
	0.15 - 0.175		0.4 - 0.425		
	0.175 - 0.2		0.425 - 0.45		
	0.2 - 0.225		0.45 - 0.5		
	0.225 - 0.25		0.5 - 0.55		





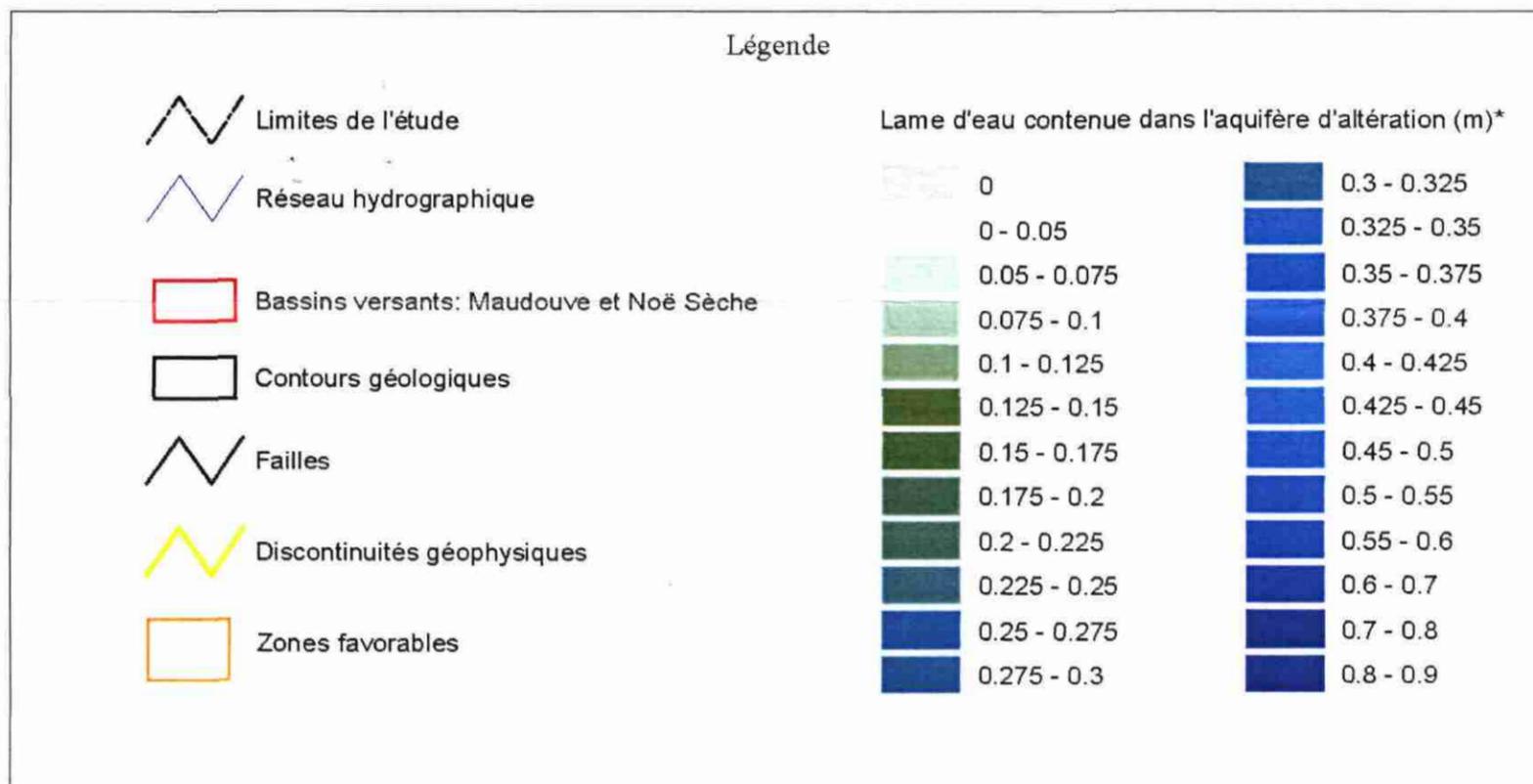
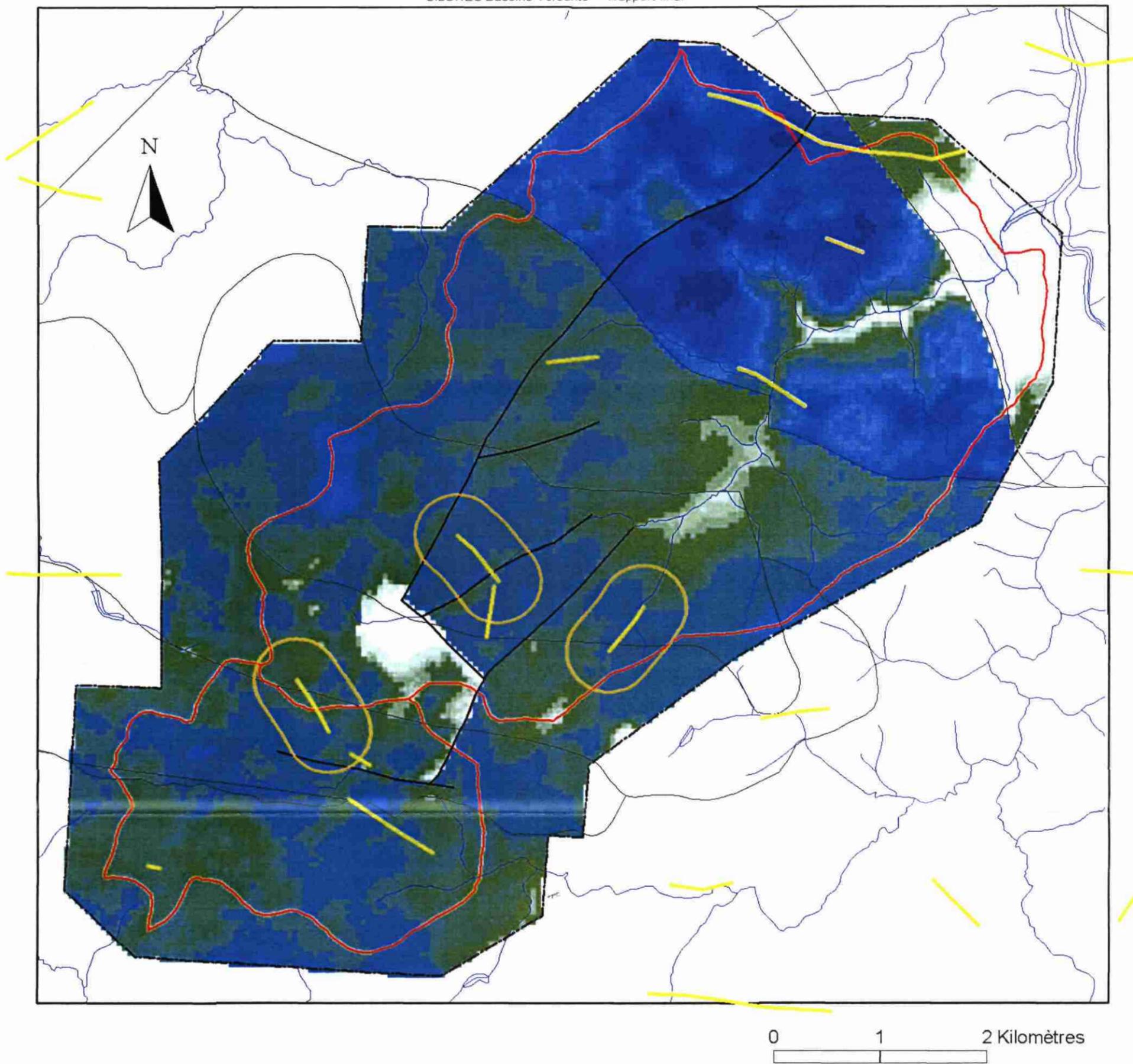
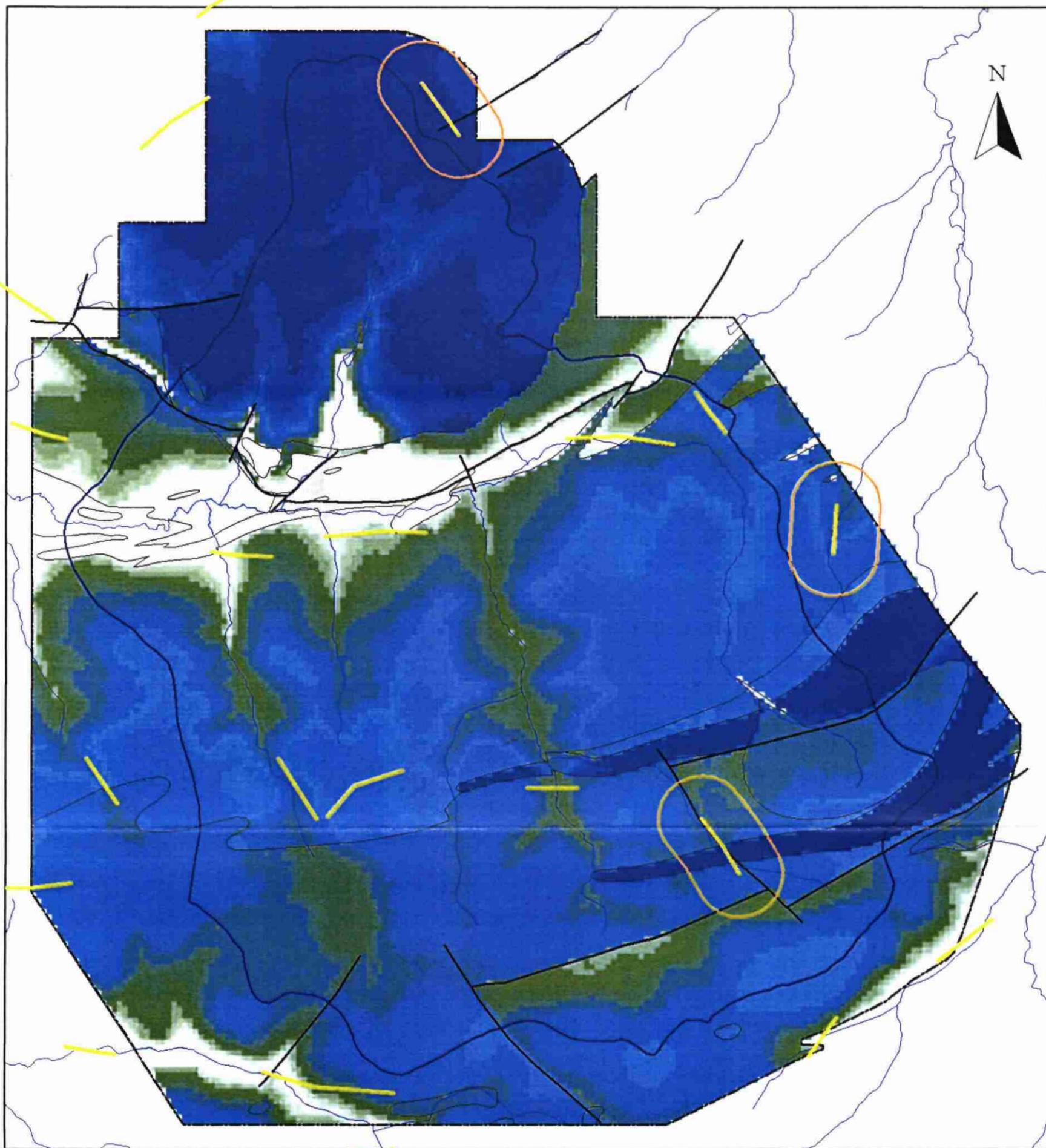


Planche 49 - Lame d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



0 2 Kilomètres

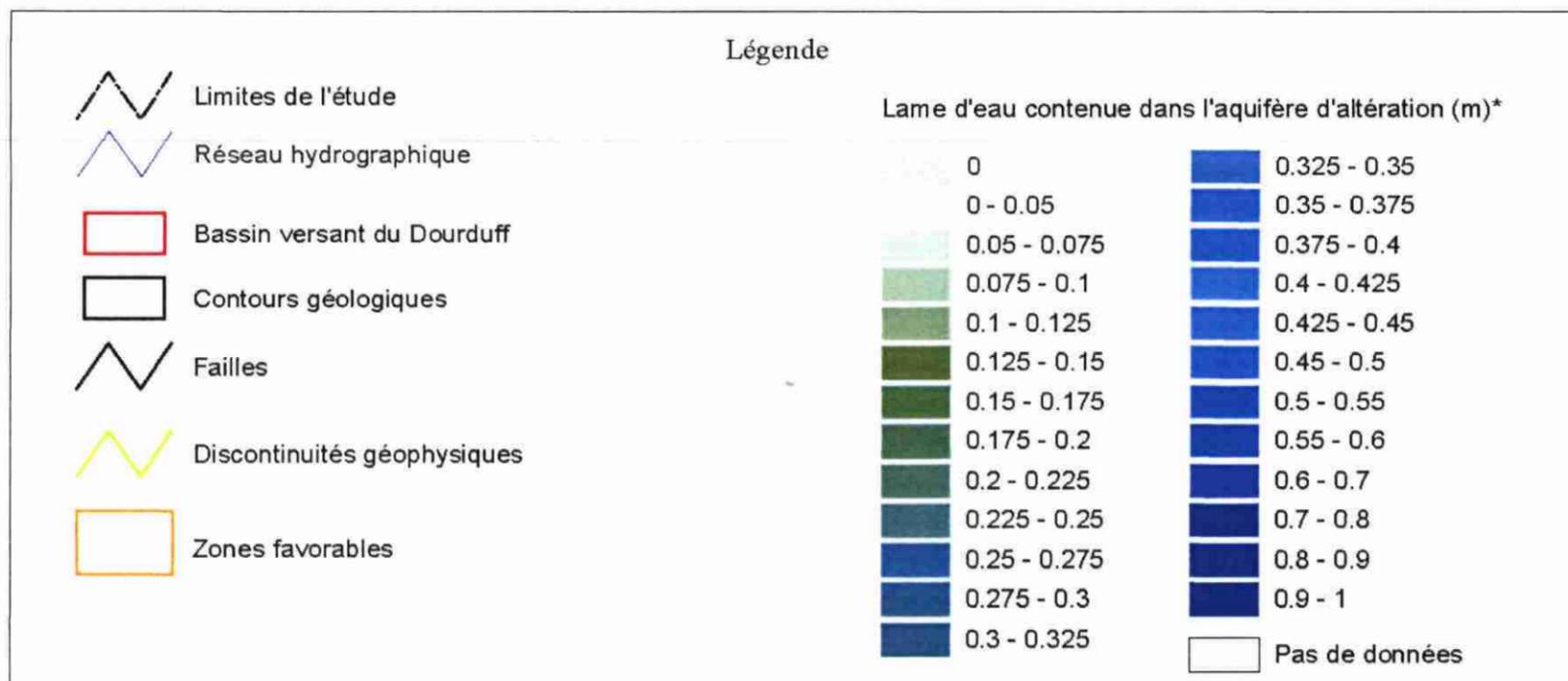


Planche 50 - Lame d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin du Dourduff)

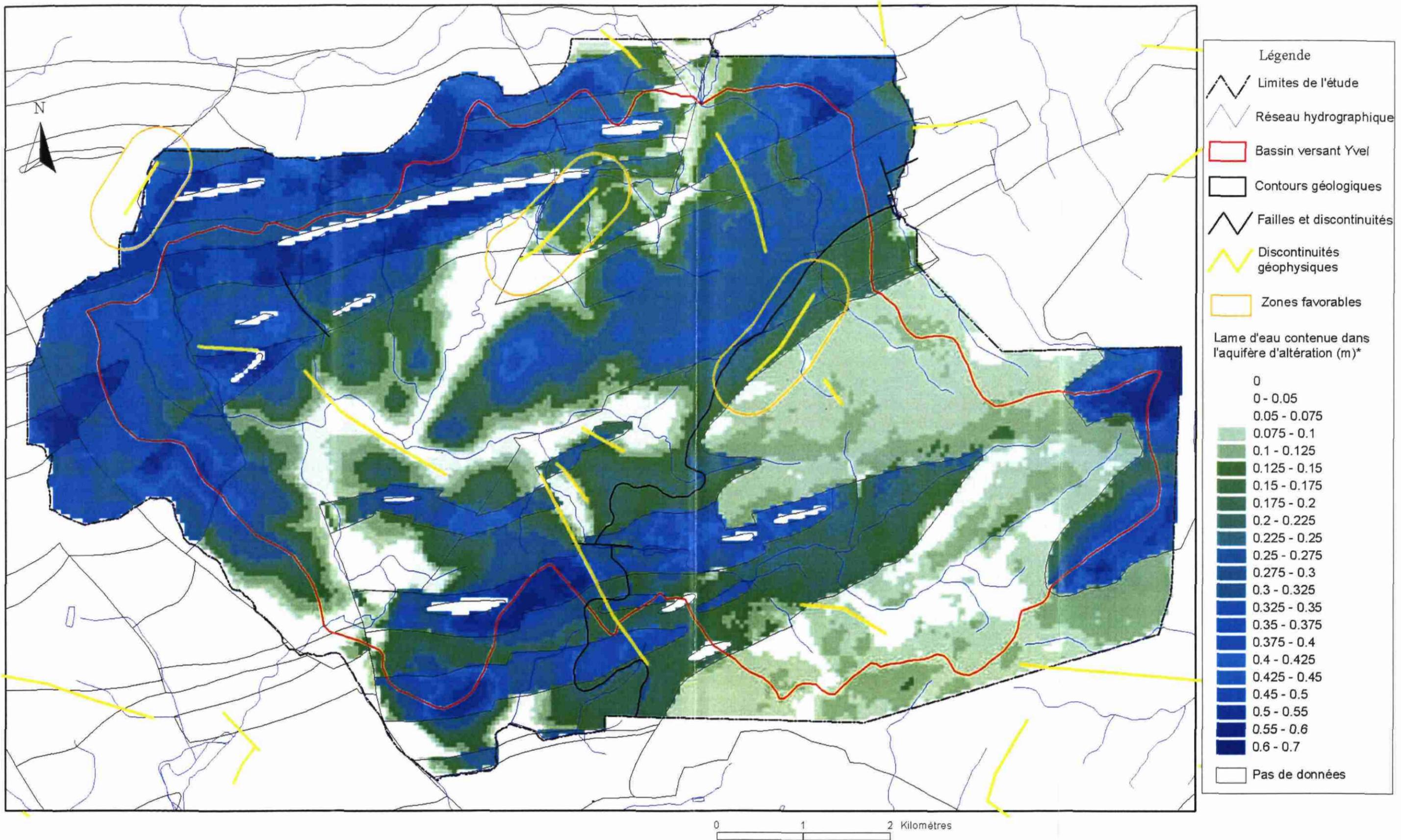


Planche 51 - Lame d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin de l'Yvel)

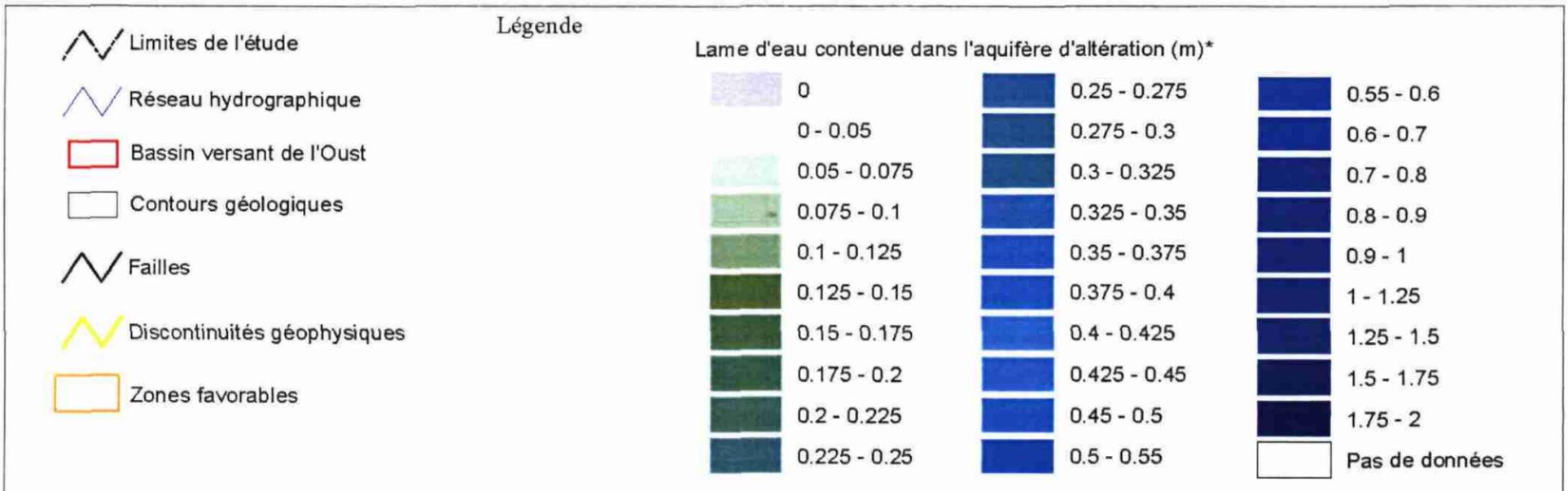
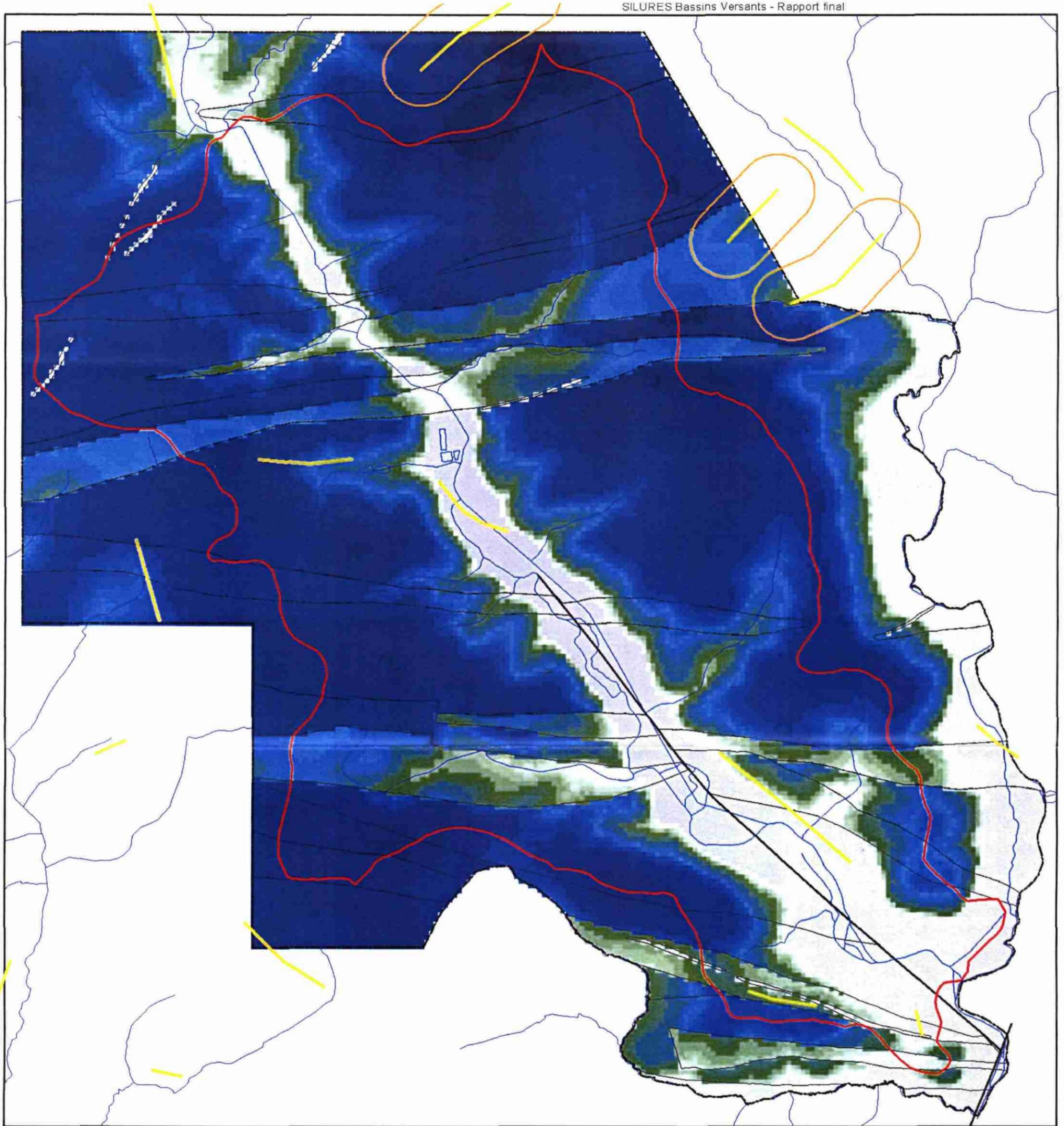
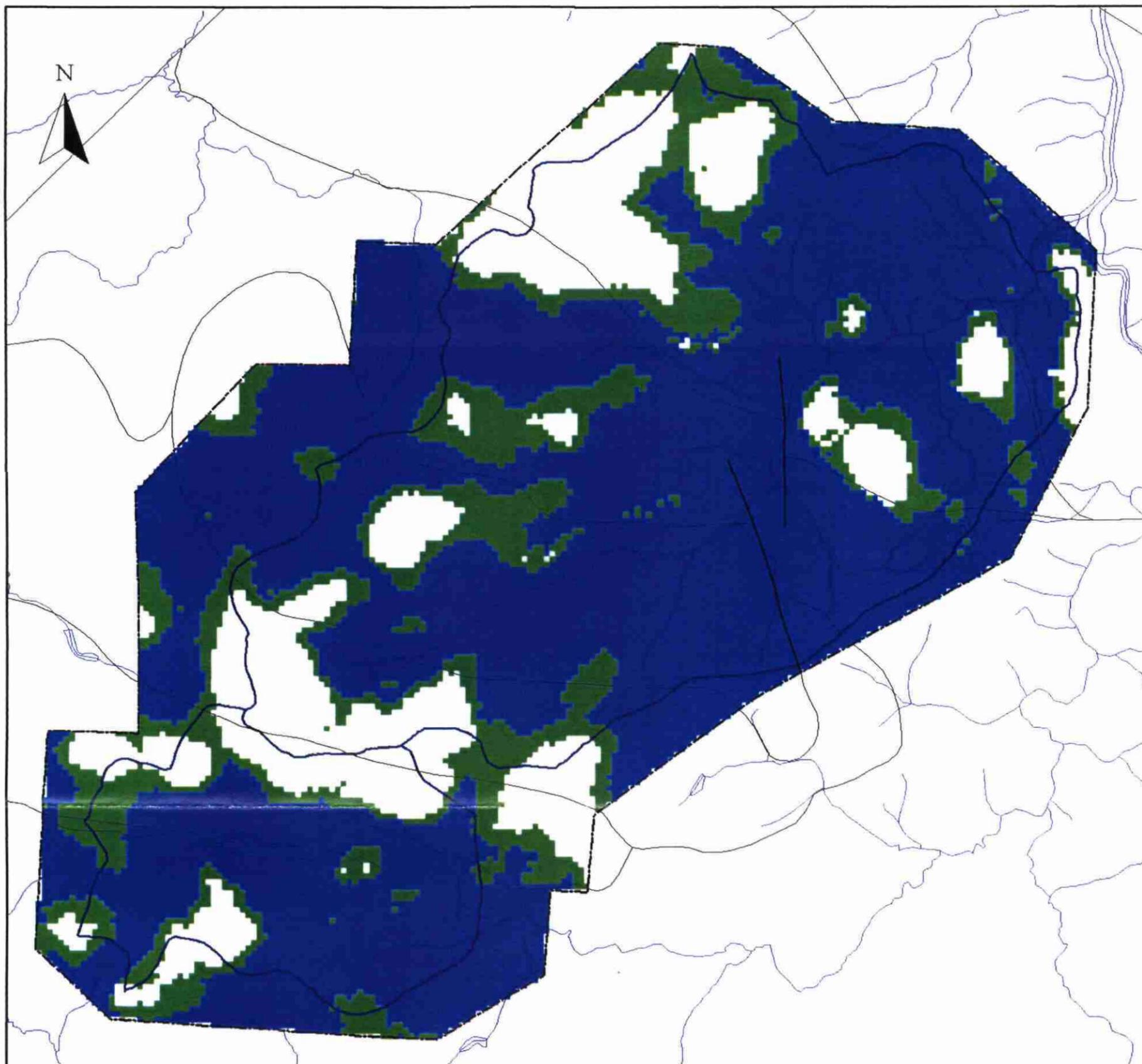


Planche 52 - Lame d'eau totale et discontinuités géophysiques (bassin de l'Oust)



0 1 2 Kilomètres

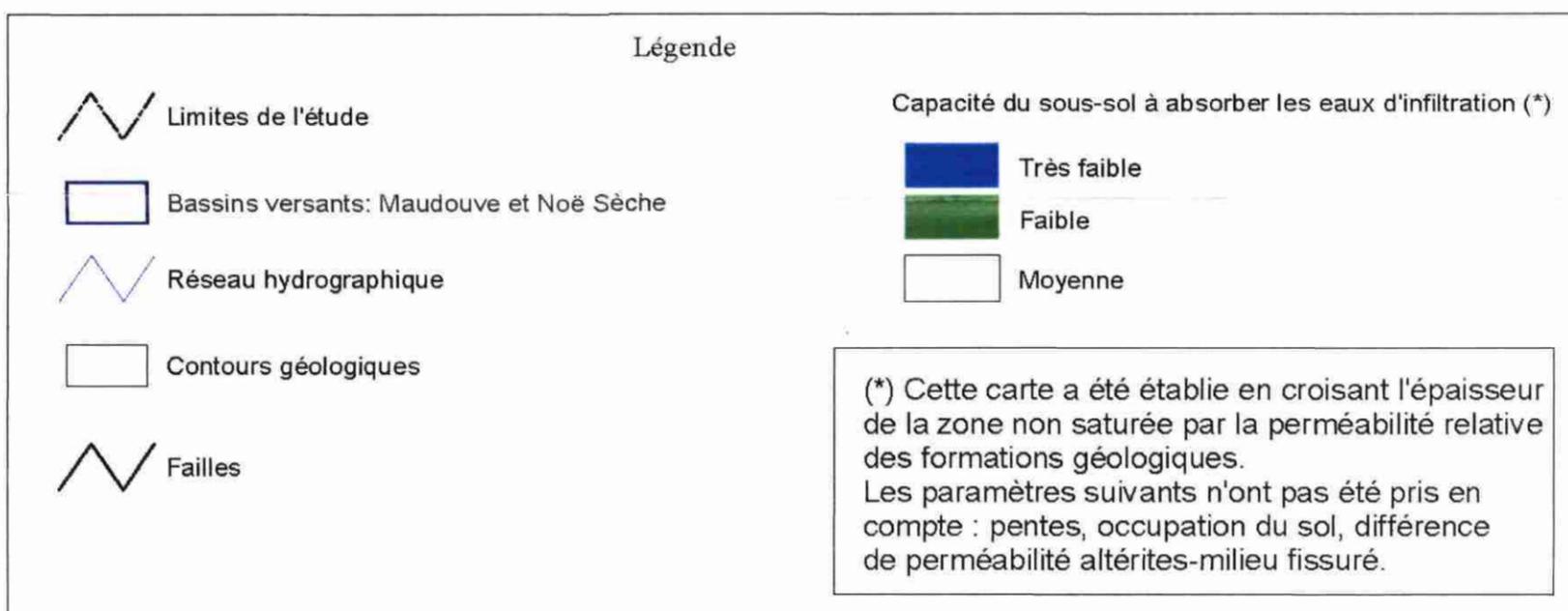
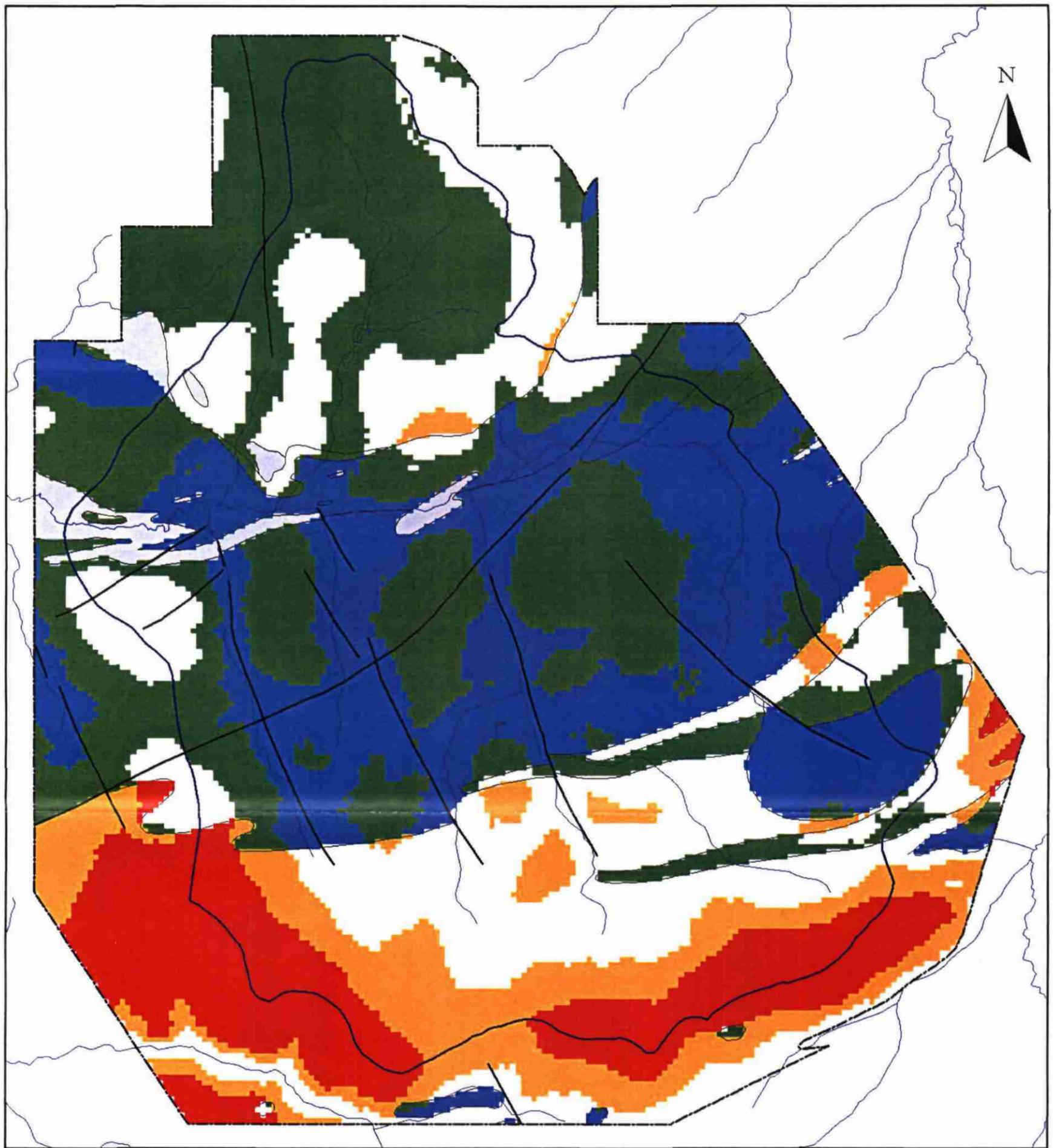


Planche 53 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassins de la Maudouve et de la Noë Sèche)



Légende

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

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

- Très faible
- Faible
- Moyenne
- Forte
- Très forte
- Pas de données

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

Planche 54 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Dourduff)

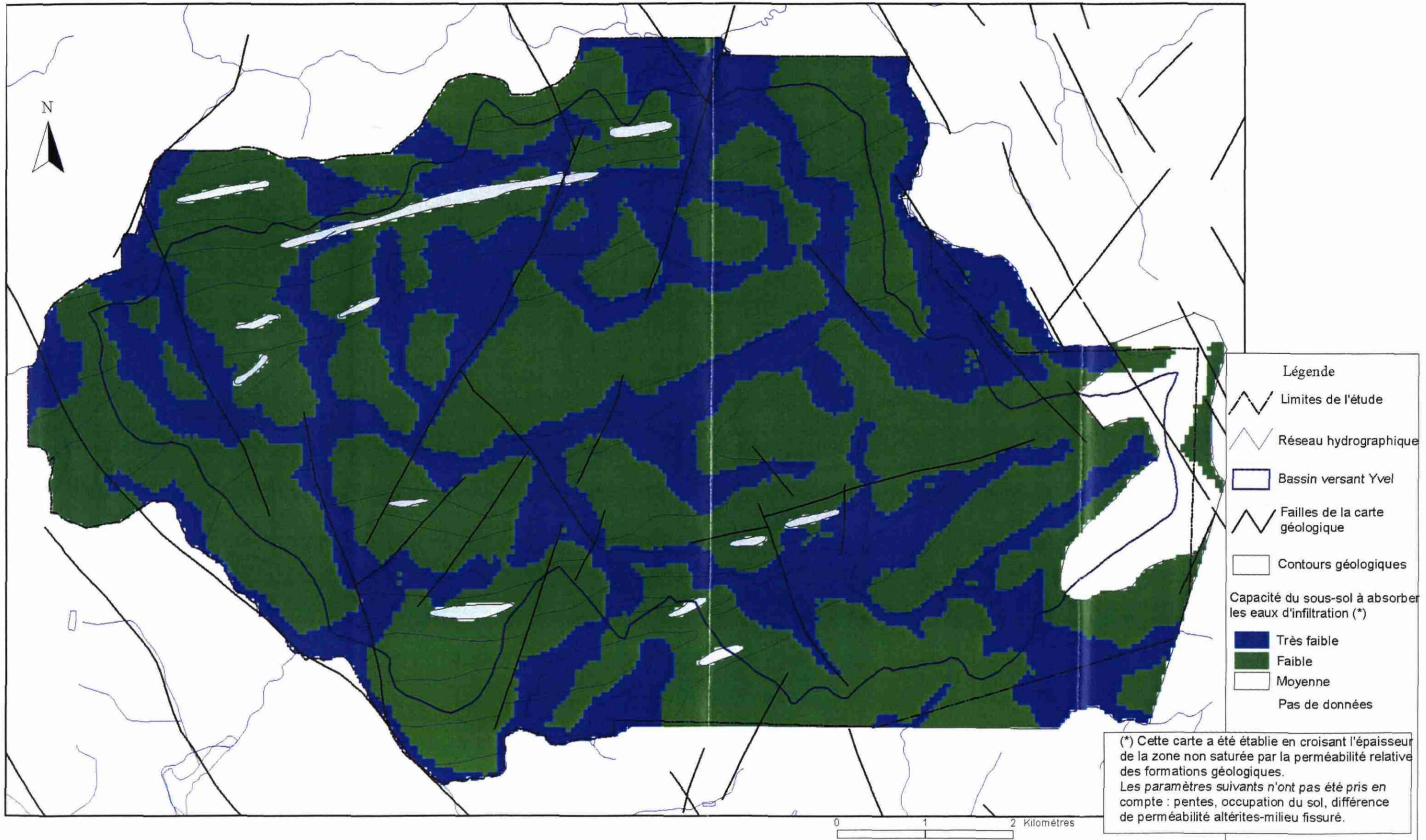
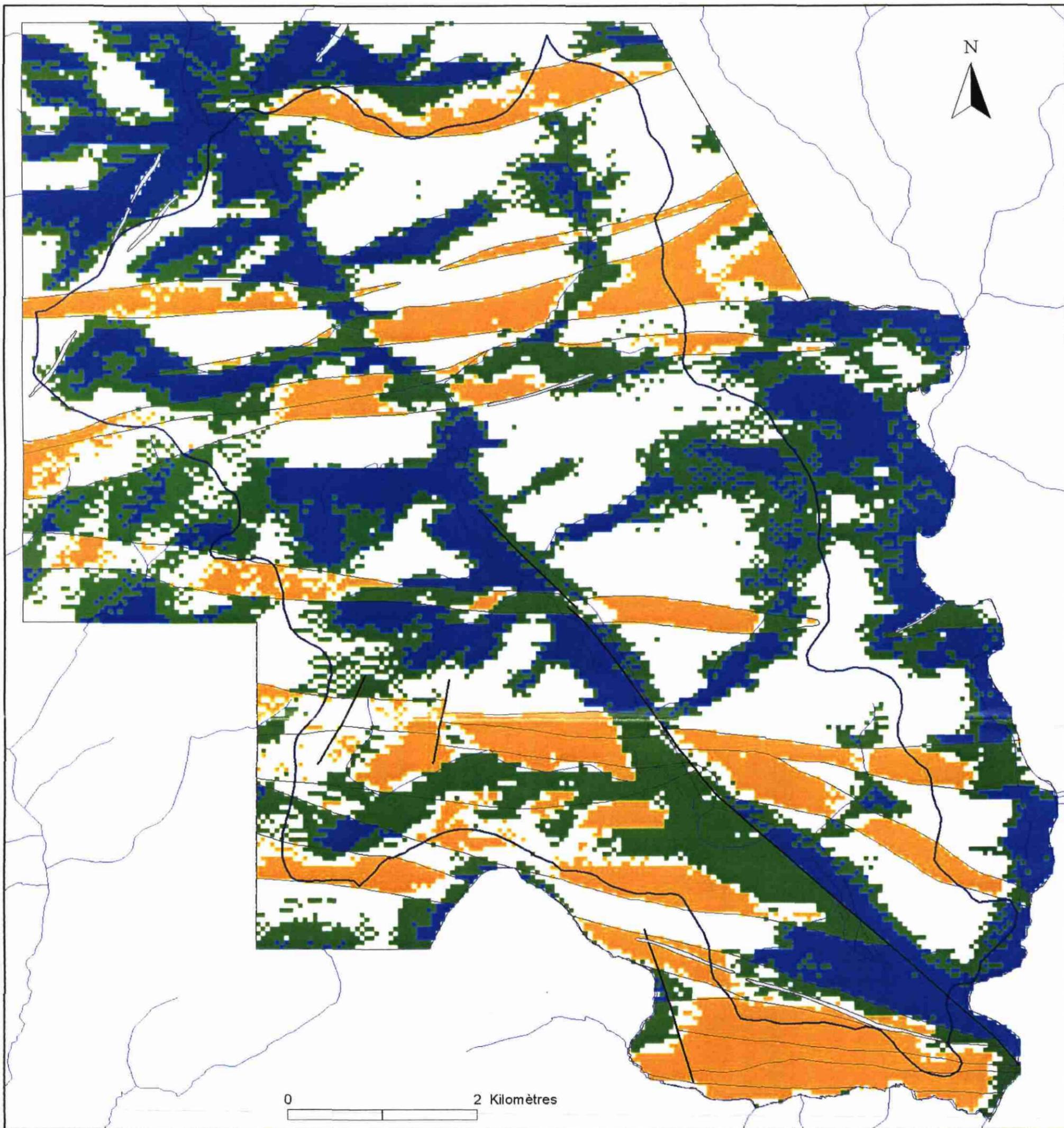


Planche 55 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Yvel)



Légende

<ul style="list-style-type: none"> <li> Limites de l'étude</li> <li> Bassin versant de l'Oust</li> <li> Réseau hydrographique</li> <li> Failles</li> <li> Contours géologiques</li> </ul>	<p>Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (*)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Très faible</li> <li> Faible</li> <li> Moyenne</li> <li> Forte</li> <li style="padding-left: 100px;">pas de données</li> </ul>
---	---

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

## **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 elle 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.

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

### Principe de calcul du variogramme

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

- **Continuité à l'origine.** En principe Z(x) et Z(x+h) sont égaux quand h tend vers 0. En pratique toutefois, ceci n'est pas toujours vérifié. En effet il peut exister une discontinuité apparente à l'origine, qui peut être liée soit à une erreur de mesure, soit à des variations à « petites distances », en tout cas à des distances inférieures à la maille d'échantillonnage. Cette discontinuité à l'origine est appelée « effet de 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.

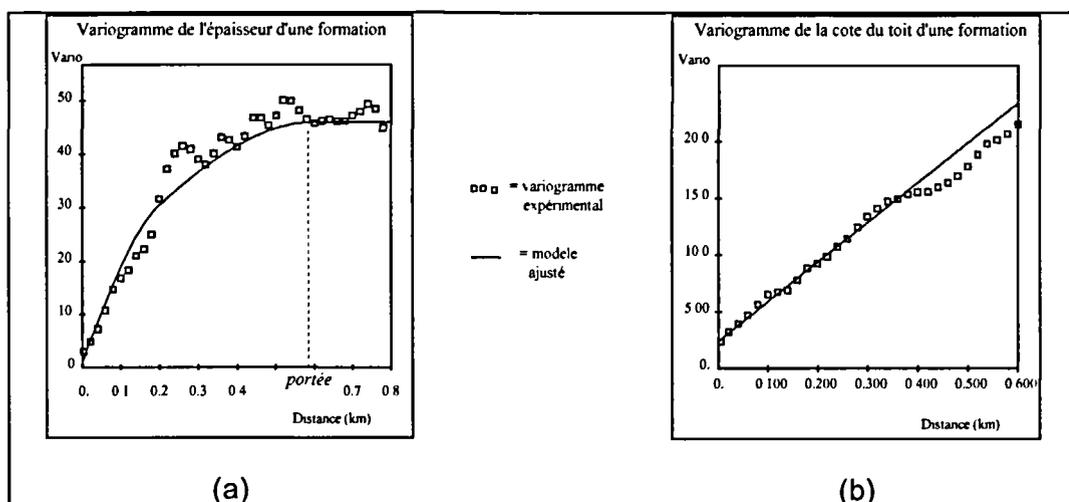


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

## 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  $\lambda_i$  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),
$\lambda_i$ (ou $\lambda_j$ )	=	pondérateur (ou poids) affecté à la valeur mesurée en $x_i$ ,
$\mu$	=	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 $\gamma$ 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  $x_j$  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  $\gamma$ .



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique  
Service environnement industriel et procédés  
innovants**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33  
(0)2 38 64 34 34

**Service géologique de Bretagne**

**Atalante Beaulieu**  
2 rue de Jouanet  
35700 RENNES

Tél. 02.99.84.26.70.

