

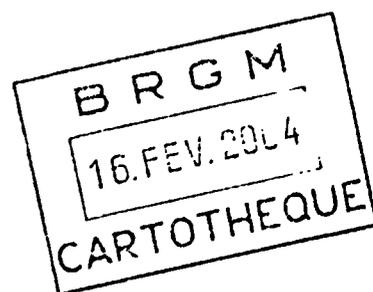
**Qualité des eaux en Bretagne
Ruissellement - Infiltration
Temps de réponse
Bassins versants du Yar (22),
de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)**
Rapport final

BRGM/RP-52731-FR
janvier 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations de
Service public du BRGM 03EAUD25

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





Mots clés : Qualité des eaux en Bretagne, ruissellement, infiltration, temps de réponse, Yar (22), Horn (29), Coët Dan (56), roches altérées, milieu fissuré, cartographie, modélisation géostatistique.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : B. MOUGIN, E. THOMAS, R. WYNS, R. BLANCHIN et F. MATHIEU (2004) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Bassins versants du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56) - Rapport final - BRGM/RP-52731-FR - 82 p., 16 tab., 21 fig., 3 annexes, 39 planches.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

Synthèse	9
1. Déroulement du projet	11
1.1. Contexte et objectif du projet.....	11
1.2. Rappel des résultats acquis.....	11
1.3. Conditions de réalisation	14
2. Contexte géologique et géomorphologique	15
2.1. Géologie du substratum	15
2.2. Géologie de la surface et géomorphologie	22
2.3. Modèle conceptuel des aquifères de socle	24
3. Campagnes de sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP)	29
3.1. Contexte géologique	29
3.2. Méthodes et moyens	31
3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP).....	31
3.2.2. Moyens mis en œuvre.....	40
3.3. Travaux réalisés.....	41
3.3.1. Acquisition des mesures	41
3.3.2. Volume des travaux	42
3.4. Traitement et analyse des données.....	44
3.4.1. Qualité des mesures	44
3.4.2. Matrice pour l'inversion	45
3.4.3. Inversions automatiques	46
4. Modélisation géométrique des interfaces	47

4.1. Méthodologie mise en œuvre	47
4.1.1. Principe.....	47
4.1.2. Choix de la méthode d'interpolation	48
4.2. Modélisation de la surface piézométrique.....	48
4.2.1. Récupération des données piézométriques	48
4.2.2. Campagne piézométrique	49
4.2.3. Modélisation.....	50
4.3. Modélisation de la base des altérites et de l'épaisseur des altérites en place.....	54
4.4. Modélisation de la base de l'horizon fissuré supérieur et inférieur	55
4.5. Calcul de l'épaisseur des horizons situés en zone saturée	59
5. Calcul de la réserve en eau souterraine	60
5.1. Synthèse des mesures RMP	60
5.2. Calcul de la carte de la réserve en eau souterraine	65
5.3. Discussion et commentaires.....	66
5.3.1. Epaisseur des aquifères des bassins versants.....	66
5.3.2. Répartition de la réserve en eau souterraine sur les bassins versants	66
5.3.3. Comparaison de la réserve en eau souterraine avec la pluie efficace	67
6. Utilisations des cartes	70
6.1. Utilisation des cartes pour la recherche des eaux souterraines en vue de leur exploitation.....	70
6.1.1. Mise en évidence de zones favorables	70
6.1.2. Recommandations	71
6.2. Utilisation des cartes pour la protection des eaux souterraines et des eaux de surface	71
6.2.1. Estimation des temps de transfert.....	71
6.2.2. Sensibilité du sous-sol au ruissellement et à l'infiltration	75
Conclusion	80
Bibliographie	81

Liste des tableaux

Tabl. 1 - Localisation et contextes géologiques des sondages RMP

Tabl. 2 - Paramètres du modèle

Tabl. 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP

Tabl. 4 - Répartition des mesures piézométriques

Tabl. 5 - Répartition des points d'observation du contact altérites/milieu fissuré

Tabl. 6 - 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 Yar)

Tabl. 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 l'Horn)

Tabl. 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 Coët Dan)

Tabl. 9 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Yar)

Tabl. 10 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Horn)

Tabl. 11 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Coët Dan)

Tabl. 12 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Yar

Tabl. 13 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Horn

Tabl. 14 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Coët Dan

Tabl. 15 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P

Tabl. 16 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Liste des figures

- Fig. 1 - Localisation des bassins versants étudiés
- Fig. 2 - Carte géologique du bassin du Yar
- Fig. 3 - Carte géologique du bassin de l'Horn
- Fig. 4 - Carte géologique du bassin du Coët Dan
- Fig. 5 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)
- Fig. 6 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité
- Fig. 7 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.
- Fig. 8 - Principe de mesure RMP
- Fig. 9 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental
- Fig. 10 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site
- Fig. 11 - Schéma, en fonction du temps, d'une séquence émission/réception
- Fig. 12 - Résultats d'inversion des données théoriques
- Fig. 13 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie
- Fig. 14 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP
- Fig. 15 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine
- Fig. 16 - Principe de modélisation de la surface piézométrique
- Fig. 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 du Yar)
- Fig. 18 - 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'Horn)
- Fig. 19 - 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 Coët Dan)
- Fig. 20 - Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976)
- Fig. 21 - Localisation des bassins versants modélisés

Liste des annexes

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

Ann. 2 - Planches A3 et A4

Ann. 3 - Interpolation par la géostatistique

Liste des planches A3

Pl. 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Yar)

Pl. 2 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin de l'Horn)

Pl. 3 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Coët Dan)

Pl. 4 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Yar)

Pl. 5 - Altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)

Pl. 6 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Coët Dan)

Pl. 7 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Yar)

Pl. 8 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin de l'Horn)

Pl. 9 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Coët Dan)

Pl. 10 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Yar)

Pl. 11 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Horn)

Pl. 12 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Coët Dan)

Pl. 13 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Yar)

Pl. 14 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin de l'Horn)

Pl. 15 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Coët Dan)

Pl. 16 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Yar)

Pl. 17 - Epaisseur des altérites en place (bassin de l'Horn)

Pl. 18 - Epaisseur des altérites en place (bassin du Coët Dan)

Pl. 19 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Yar)

Pl. 20 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin de l'Horn)

Pl. 21 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Coët Dan)

Pl. 22 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Yar)

- Pl. 23 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin de l'Horn)
- Pl. 24 - Epaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Coët Dan)
- Pl. 25 - Lamé d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Yar)
- Pl. 26 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Yar)
- Pl. 27 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Yar)
- Pl. 28 - Lamé d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Yar)
- Pl. 29 - Lamé d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin de l'Horn)
- Pl. 30 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin de l'Horn)
- Pl. 31 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin de l'Horn)
- Pl. 32 - Lamé d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin de l'Horn)
- Pl. 33 - Lamé d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Coët Dan)
- Pl. 34 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Coët Dan)
- Pl. 35 - Lamé d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Coët Dan)
- Pl. 36 - Lamé d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Coët Dan)
- Pl. 37 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Yar)
- Pl. 38 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Horn)
- Pl. 39 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Coët Dan)

Synthèse

Une cartographie quantitative de la réserve en eau souterraine a été réalisée sur les bassins versants du Yar (Côtes d'Armor), de l'Horn (Finistère), et du Coët Dan (Morbihan).

L'étude a été réalisée à la demande du Ministère du Travail et des Affaires Sociales, à l'initiative de la DDASS des Côtes d'Armor, dans le cadre du programme Bretagne Eau Pure, avec la participation financière des Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan, de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et du BRGM, dans le cadre de ses opérations de Service Public.

Cette étude est basée sur un nouveau concept d'aquifères de socle développé depuis 1997 au BRGM : dans les domaines de socle altéré, une grande partie des eaux souterraines est contenue dans un aquifère stratiforme multicouches, épais de 50 à 100 m en moyenne, induit par les modifications des propriétés physiques des roches au cours de l'altération supergène. La quantité d'eaux souterraines contenue à proximité des couloirs de fracturation n'est prise en compte dans ce concept.

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires et il porte sur les bassins versants :

- du Yar de sa source à la mer (superficie 61,2 km²) ;
- de l'Horn de sa source à la mer (80,6 km²) ;
- et du Coët Dan de sa source à sa confluence avec l'Evel (12,5 km²).

Au niveau de chaque bassin versant étudié, la géométrie des différents horizons de cet aquifère multicouches a été modélisée à partir des données de forages et des observations de surface (affleurements), en utilisant les méthodes de géostatistique (krigeage). La modélisation de la piézométrie a permis de calculer l'épaisseur de chaque couche située en zone saturée.

Une campagne de 22 sondages de Résonance Magnétique Protonique (dont 21 interprétables) a permis de calculer les teneurs en eau moyennes de chaque couche de l'aquifère pour chacune des principales formations géologiques, et de calculer ensuite la hauteur d'eau contenue dans l'aquifère d'altération.

Cette hauteur est en moyenne égale à 0.384 m pour le bassin versant du Yar (dans un aquifère d'une puissance de 37 m), 0.511 m pour celui de l'Horn (aquifère de 37 m d'épaisseur) et 0.857 m pour celui du Coët Dan (aquifère de 34 m d'épaisseur).

L'aquifère caractérisé se subdivise en 3 couches superposées, dont les teneurs en eau décroissent généralement du haut vers le bas : les altérites meubles, l'horizon fissuré supérieur, et l'horizon fissuré inférieur. A lui seul, l'ensemble de l'horizon fissuré totalise environ 79 % (Horn) et 97 % (Yar et Coët Dan) de la réserve en eau souterraine des bassins versants (le pourcentage restant étant situé dans les altérites).

La réserve totale d'eau souterraine représenterait environ : 22.5 millions de m³ sur le bassin versant du Yar, 38.3 millions de m³ sur celui de l'Horn, et 10.3 millions de m³ sur celui du Coët Dan ; soit, un peu moins de deux années d'infiltration moyenne (exactement 1 an et 8 mois) pour le Yar, un peu moins de deux années et demi d'infiltration moyenne (exactement 2 ans et 4 mois) pour l'Horn, et cinq années et demi d'infiltration moyenne (exactement 5 ans et 6 mois) pour le Coët Dan.

Les cartes réalisées permettent de visualiser la répartition spatiale des volumes d'eau souterraine contenue dans les réservoirs de subsurface (0 à 50 m de profondeur). Elles constituent un type nouveau de données utilisables :

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

La répartition des réserves en eau souterraine (teneur en eau et épaisseur d'aquifère) et la perméabilité relative des formations géologiques font apparaître des zones favorables à la recherche d'eau souterraine :

- les formations situées à l'aval du bassin du Yar : Orthogneiss de Plougouven, Paragneiss alumineux et Amphibolites de Plestin-les-Grèves ;
- les formations situées dans la moitié Sud du bassin de l'Horn : Micaschistes de la Penzé au Sud et Sud-Est, Paragneiss à biotite-sillimanite et Orthogneiss de Plouénan au Centre, et Gneiss de Brest au Sud ;
- sur le bassin du Coët Dan, les Pélites altérées au Nord, à l'Ouest et à l'Est.

Une cartographie de la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration sur les bassins étudiés a été réalisée (croisement de l'épaisseur de la zone non saturée et de la perméabilité relative des formations géologiques).

Ces cartes montrent que :

- le bassin versant du Yar est découpé en une partie aval qui a une forte capacité d'absorption des eaux d'infiltration (notamment au Nord) et une partie amont plus « imperméable » à ces eaux ;
- le bassin de l'Horn a une forte capacité d'absorption sur la quasi-totalité de sa superficie (infiltration majoritaire) ;
- tout le bassin du Coët Dan n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (ruissellement majoritaire).

La cartographie de la réserve en eau souterraine effectuée sur chacun des 3 bassins versants a été extraite sur les bassins versants :

- du Yar au droit de la station de Tréduder (J2314910, superficie de 59 km²),
- de l'Horn au droit de la station de Mespaul [Pont Milin] (J3014310, 50 km²),
- et du Coët Dan au droit de la station de Guénin [Stimoës] (J5606810, 11.9 km²).

Sur ces bassins versants modélisés, la quantité d'eau souterraine renouvelée annuellement en moyenne était connue. Ce volume renouvelé, comparé à la quantité d'eau souterraine calculée sur ces bassins, a permis d'estimer des temps de vidange des réserves totales présentes sur ces bassins.

Afin de calculer le temps de renouvellement de l'eau souterraine (temps qu'une goutte d'eau met à s'écouler du sol à la nappe, puis de la nappe à la rivière), le temps de transit de l'eau dans la zone non saturée a été ajouté au temps de vidange.

Les temps de renouvellement qui en découlent sont de :

- de l'ordre de 4 ans (3 ans et 8 mois) pour le Yar,
- de l'ordre de 5 ans (4 ans et 8 mois) pour l'Horn,
- de l'ordre de 7 ans et demi (7 ans et 5 mois) pour le Coët Dan.

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 (les eaux souterraines participant de manière non négligeable à l'écoulement des rivières).

1. Déroulement du projet

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIF DU PROJET

Le projet a été élaboré par le BRGM-Bretagne, à la demande du Ministère du Travail et des Affaires Sociales, à l'initiative de la DDASS des Côtes d'Armor.

Son objectif consiste à cartographier les volumes d'eau stockés dans les altérites du sous-sol afin de pouvoir évaluer les temps de transfert de l'eau souterraine et des produits dissous qu'elles contiennent, par comparaison avec le régime des cours d'eau et les débits souterrains qui y contribuent.

Cette démarche doit permettre une meilleure hiérarchisation des mesures de protection et de réhabilitation de la qualité de l'eau par la prise en compte de l'hétérogénéité hydrogéologique d'un bassin versant et des délais prévisibles nécessaires à l'obtention d'une réponse significative aux aménagements éventuels.

Dans le cadre du programme Bretagne Eau Pure, les financements du projet ont été assurés par les Conseils Généraux des Côtes d'Armor, du Finistère et du Morbihan, par l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne et par le BRGM, dans le cadre de ses opérations de Service Public.

Le secteur d'étude a été défini en accord avec les partenaires et il porte sur les bassins versants (cf. figure 1) :

- du Yar de sa source à la mer (superficie 61,2 km²), au Sud-Ouest de Lannion dans les Côtes d'Armor ;
- de l'Horn de sa source à la mer (80,6 km²), situé à l'Ouest de Morlaix dans le Finistère ;
- et du Coët Dan de sa source à sa confluence avec l'Evel (12,5 km²), au Sud-Est de Pontivy dans le Morbihan.

1.2. RAPPEL DES RESULTATS ACQUIS

Dans le cadre de ce projet, plusieurs rapports d'avancement ont déjà été remis :

- Rapport R40412 (décembre 1998)
Ce rapport présente différentes cartes du bassin versant du Yar : carte géologique, carte des formations superficielles (altération), cartographie de la perméabilité du sous-sol (statistiques sur les forages présents sur le secteur) ;
- Rapport R40764 (octobre 1999)
Ce rapport présente différentes cartes du bassin versant de l'Horn : carte géologique, carte des formations superficielles (altération), cartographie de la perméabilité du sous-sol (statistiques sur les forages présents sur le secteur).
La contribution des eaux souterraines aux débits des 3 rivières est chiffrée (modélisation Gardénia).
Une synthèse bibliographique des données présentes sur le Coët Dan est réalisée (géologie, hydrogéologie, cartes piézométriques, perméabilité sous-sol, modélisation Gardénia).

- Rapport RP-50262-FR (juin 2000)
Ce rapport fait un compte-rendu du travail de terrain mené sur les trois bassins étudiés : réalisation de 66 sondages mécaniques à la tarière sur le Yar, 64 sur l'Horn, 38 sur le Coët Dan.
Ces campagnes ont permis d'obtenir des épaisseurs d'altération, et de mesurer la profondeur des niveaux de la nappe sur les bassins versants.
- Rapport BRGM/SGR BRETAGNE N°03/01 (décembre 2002)
Ce rapport fait l'état d'avancement technique du projet à fin décembre 2002.

Une comparaison des résultats obtenus sur les trois bassins versants met en évidence les points suivants :

- le bassin du Yar, géologiquement contrasté, montre un découpage entre :
 - une partie amont granitique peu conductrice, peu perméable, où les déstockages par le milieu fissuré profond doivent être lents,
 - une partie aval gneissique plus conductrice où la vidange des stocks d'eau et le renouvellement des réserves doivent être beaucoup plus rapides ;
- le bassin versant de l'Horn, géologiquement plus homogène que le Yar, a des étiages très soutenus liés à une forte participation des eaux souterraines au débit du cours d'eau. Les formations gneissiques présentes sur le bassin sont assez perméables (perméabilité comparable aux gneiss du Yar) ;
- le bassin du Coët Dan est constitué par des schistes briovériens constituant un sous-sol peu conducteur où les écoulements rapides sont prépondérants.

Par ailleurs, le rapport SILURES Bretagne (Année 1 BRGM/RP-51481-FR, Année 2 à venir) a permis de mettre à jour les calculs de la contribution des eaux souterraines aux débits des rivières par décomposition des hydrogrammes des rivières (modélisation Gardénia).

Les résultats indiquent la part d'eau souterraine participant à l'écoulement global des cours d'eau :

- 55.5 % pour le bassin versant du Yar au droit de la station de Tréduder (J2314910, superficie de 59 km²),
- 61 % pour celui de l'Horn au droit de la station de Mespaul [Pont Milin] (J3014310, superficie de 50 km²),
- et 59 % pour celui du Coët Dan au droit de la station de Guénin [Stimoës] (J5606810, superficie de 11.9 km²).

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de la ressource en eau souterraine, la phase finale du projet a été engagée avec pour objectif de cartographier la réserve en eau souterraine présente dans les 3 bassins versants. Cette cartographie s'appuie sur un nouveau modèle conceptuel des aquifères de socle cristallin obtenu dans le cadre de projets de Recherche du BRGM depuis 1997.

1.3. CONDITIONS DE REALISATION

Afin de réaliser un modèle géométrique des aquifères de socle et de la surface piézométrique sur chacun des 3 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 82 points (10 sur le Yar, 58 sur l'Horn et 14 sur le Coët Dan), et l'altitude de la surface piézométrique sur 48 points (15 sur le Yar, 20 sur l'Horn et 13 sur le Coët Dan).

Les données provenant des sondages mécaniques à la tarière ont fourni l'altitude du contact altérites/milieu fissuré sur 167 points (66 sur le Yar, 63 sur l'Horn et 38 sur le Coët Dan), et l'altitude de la surface piézométrique sur 99 points (33 sur le Yar, 43 sur l'Horn et 23 sur le Coët Dan).

Elles ont été complétées par deux études de terrain (septembre 1998 et septembre 2002) destinées à déterminer l'altitude de la base des altérites sur chacun des 3 bassins versants ; les observations d'affleurements sur le terrain ont permis d'ajouter 1546 points de calage supplémentaires (801 sur le Yar, 630 sur l'Horn et 115 sur le Coët Dan) du contact altérites/milieu fissuré aux données de forages et sondages (cf. chapitre 4.3.).

22 sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés (15 RMP en janvier 2002, puis 7 RMP en février 2003) sur les 3 bassins versants avec la répartition suivante : 11 sur le Yar (7+4), 7 sur l'Horn (4+3) et 4 sur le Coët Dan (4+0). 21 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 3.1 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 à l'échelle du 1/50 000.

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

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

Ces points sont développés ci-dessous.

2. Contexte géologique et géomorphologique

2.1. GEOLOGIE DU SUBSTRATUM

Bassin du Yar (cf. figure 2)

Le bassin versant du Yar est caractérisé essentiellement par des formations métamorphiques (d'origine sédimentaire ou magmatique) et des formations magmatiques.

Quelques formations situées au nord du bassin versant gardent cependant, en raison de leur faible degré de métamorphisme, des caractères métasédimentaires d'âge paléozoïque : ce sont les Grès de St-Michel-en-Grève, les Schistes siluro-dévonien noirs carbonés, et les Micaschistes et Quartzites de Ploumilliau (équivalents latéraux des Schistes et Quartzites de Plouigneau sur la feuille de Morlaix, et des Schistes et Quartzites de Plougastel sur les feuilles de Brest et du Faou...).

Les roches métamorphiques d'origine sédimentaire comprennent des paragneiss alumineux (équivalents latéraux des paragneiss du bassin versant de l'Horn). Les roches métamorphiques d'origine magmatique sont représentées par les Orthogneiss de Plougonven et par les Amphibolites de Plestin-les-Grèves.

Les roches magmatiques sont très bien représentées au sud du bassin versant. Elles correspondent à des intrusions successives au sein d'un vaste massif principal : le Massif de Plouaret-Bégard. En fonction de leurs caractères minéralogiques, ces intrusions peuvent être subdivisées en deux groupes principaux.

Le premier groupe est formé par les granites de Guerlesquin s.s , de St-Carré et de Bruillac. Les granites de Croaz-Illiès et de Loguivy, de part leurs caractéristiques minéralogiques, doivent être séparés de ce groupe et être considérés chacun à part.

Le deuxième groupe est caractérisé par le granite porphyrique du Ponthou et le monzogranite de Tonquédec. Il existe de plus tout un cortège de petits corps ou filons isolés qui, de part leur dimension restreinte, ne seront pas considérés dans cette étude. Il s'agit principalement de diorites (Diorite de Lanvellec), de granodiorites (Keransaudy) et de granites variés (Syénite, Adamélite).

Les Formations métasédimentaires sont :

- les Grès de St-Michel-en-Grèves qui se présentent en bancs massifs clairs d'épaisseur métrique à plurimétrique à interbancs psammitiques. Ils peuvent être localement altérés en un sable à grain fin de couleur clair ;
- les Micaschistes et Quartzites de Ploumilliau qui sont ici essentiellement constitués de quartzites alternant avec de rares bancs schisteux.

Les Formations métamorphiques d'origine sédimentaire sont : les Paragneiss alumineux qui constituent une roche sombre, homogène. Ils pourraient dériver d'un ensemble schisto-gréseux d'âge briovérien. Ils sont constitués de quartz et de feldspath. La proportion de biotite, de muscovite et localement de sillimanite peut parfois être importante.

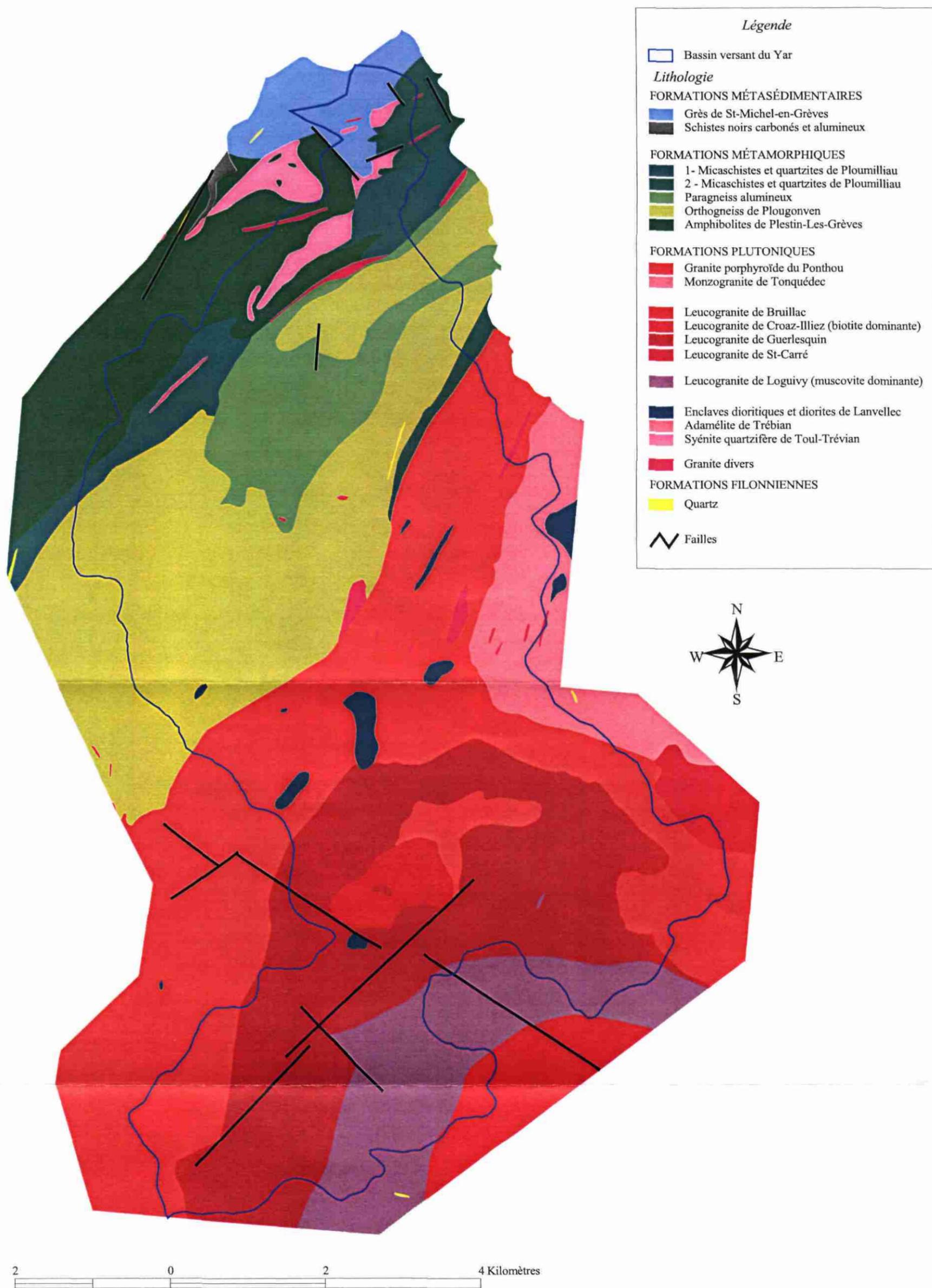


Fig. 2 - Carte géologique du bassin du Yar

Les Formations métamorphiques d'origine magmatique sont :

- les Orthogneiss de Plougonven. Il s'agit d'une roche à gros grains, homogène. Elle est constituée par un assemblage de quartz, plagioclase acide et feldspath potassique. La biotite est omniprésente et la muscovite parfois abondante ;
- les Amphibolites de Plestin-Les-Grèves, très homogènes, qui constituent des roches vertes, massives, souvent à gros grain. Elles sont constituées d'un assemblage à hornblende, chlorite ou biotite, plagioclase, ilménite. Le quartz est rare. Ces roches dérivent de metabasites qui se sont mises en place vers la limite Dévonien-Carbonifère.

Les Formations magmatiques sont composées de plusieurs ensembles :

- groupe des granites de Guerlesquin, de St-Carré et de Bruillac (Croaz-Illiès). Malgré quelques petites dissemblances, ces granites peuvent être regroupés au sein d'un même ensemble. Ces granites sont des roches à grain fins, parfois légèrement porphyroïde, à microcline, biotite et muscovite rare. Le granite de Croaz-Illiès, considéré comme la réapparition du granite de Guerlesquin au sein du granite de Loguivy (plus tardif) possède les mêmes caractéristiques minéralogiques mais l'aspect des résultats des RMP a conduit à traiter le granite de Croaz-Illiès séparément (cf. chapitre 5) ;
- groupe des granites du Ponthou et Tonquédec. Ce sont des roches constituées de gros cristaux de feldspaths potassiques allongés, de plagioclase oligoclase, de quartz et de biotite. La muscovite est généralement absente ;
- et le leucogranite de Loguivy est clairement indépendant des granites précédents, de part sa composition pétrographique et ses contacts à l'emporte-pièce sur les autres granitoïdes. La roche à grain fin est constituée de quartz, microcline, plagioclase acide, biotite et muscovite en belles lames.

L'ensemble de ces granites s'altèrent en une arène plus ou moins grossière, sableuse pour les faciès les plus fins.

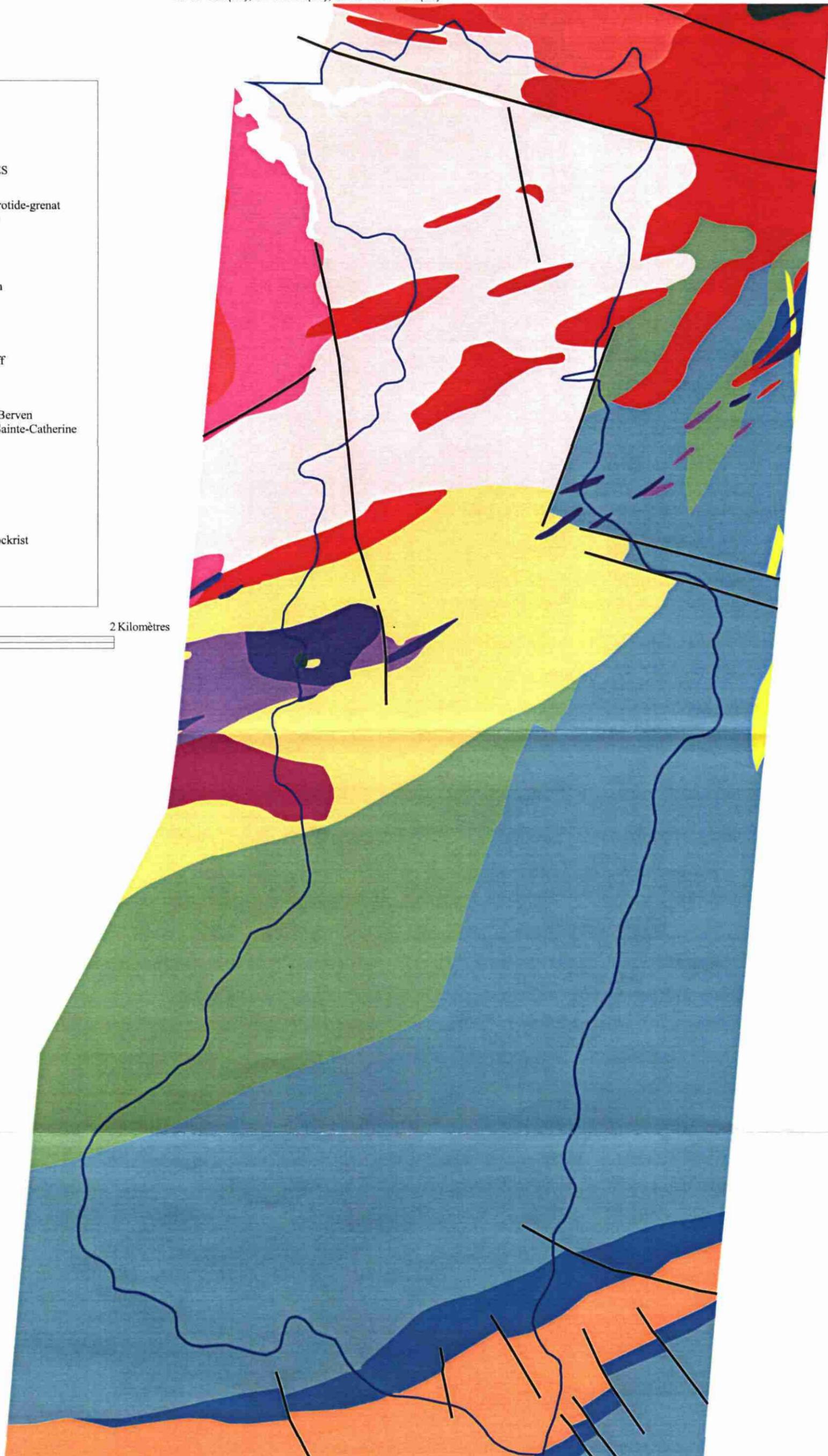
Bassin de l'Horn (cf. figure 3)

Le secteur d'étude est caractérisé par les formations métamorphiques et plutoniques très variées qui se prolongent pour certaines depuis le Léon occidental jusqu'à la région de Morlaix. Les formations métamorphiques s'organisent en grandes bandes parallèles, de direction N70. Des venues magmatiques plus tardives sont intrusives dans ces formations selon des axes qui restent, eux aussi, proches d'une direction N70-80. Les formations métamorphiques se classent en deux ensembles :

- celles dérivant d'unités sédimentaires (quartzites, micaschistes divers, Micaschistes de la Penzé, Paragneiss à biotite-sillimanite, Gneiss migmatitiques de l'Horn)
- et celles dérivant d'anciennes unités plutoniques (Orthogneiss de Plouénan, Gneiss de Brest).

Les formations plutoniques sont représentées par la granodiorite de Rochinigou, les monzogranites de Cléder et de Muguérec, les leucogranites de St-Catherine, de Berven et de Lescondan, le granite porphyroïde de Roscoff, le granite de St-Pol-de-Léon, des leucogranites divers).

Les formations géologiques différentes étant particulièrement nombreuses, seules seront décrites les formations intervenant d'une manière prépondérante dans la modélisation des volumes d'eau.



Les Micaschistes de la Penzé (auxquels peuvent être rattachés les micaschistes bordant les Gneiss de Brest au sud du bassin versant), les Paragneiss à biotite-sillimanite et les Gneiss migmatitiques de l'Horn dérivent vraisemblablement tous d'une même unité grésopélitique soumise à un métamorphisme prograde (« croissant ») du sud vers le nord. Ainsi le faciès le moins métamorphique correspond aux Micaschistes de la Penzé. Ils sont caractérisés par une roche assez homogène à biotite, muscovite, quartz et oligoclase. Ces micaschistes passent progressivement vers le nord à des paragneiss avec développement de sillimanite fibreuse et apparition de feldspath potassique. Les Gneiss migmatitiques de l'Horn se développent aux dépens des paragneiss précédents par augmentation du degré de métamorphisme avec début de fusion des roches. Ces gneiss sont constitués de feldspath potassique, de plagioclase, de quartz.

Les Orthogneiss de Plouénan se distinguent des faciès précédents, bien que leurs contacts avec les paragneiss soient assez diffus. Le faciès est homogène à grain fin à moyen caractérisé par une foliation nette dans laquelle se détachent des « yeux » d'albite-oligoclase qui attestent de son origine magmatique. La biotite, parfois chloritisée, est abondante, en lits sombres qui contiennent aussi un peu de muscovite.

Au Sud du bassin versant, les Gneiss de Brest occupent une étroite bande entourée par les micaschistes. Il s'agit d'une unité métamorphique complexe dérivant pour une partie d'un protolithe sédimentaire (Briovérien) et pour une autre d'un protolithe magmatique. La carte au 1/50 000 couvrant ce secteur n'est pas éditée mais les travaux entrepris dans le cadre du levé des cartes voisines (Plabennec, Morlaix) ont montré que sur la feuille de Landerneau, l'ensemble des Gneiss de Brest étaient à rattacher au groupe dérivant d'une unité magmatique. Ces orthogneiss ont une composition granodioritique où le plagioclase domine largement le feldspath potassique. La biotite peut être abondante, la muscovite généralement accessoire.

L'ensemble des gneiss orthodérivés s'altèrent en une arène grenue. Le sommet du profil (altitudes vers 130 m) peut s'enrichir très fortement en argiles. Ce sont des domaines où l'infiltration est moindre et où il n'est pas rare d'observer des zones marécageuses.

Les formations plutoniques (leucogranites de St-Catherine, de Berven et de Lescondan) ne seront pas prises en considération lors de l'établissement des cartes de volumes d'eau. Cependant, elles ont un rôle capital dans l'établissement de la carte de la base des altérites car elles forment un des traits morphologiques majeurs du domaine étudié. Le Leucogranite de St-Catherine, très siliceux et peralumineux, est composé de microcline, d'albite, de quartz, de muscovite. Il est très connu pour ces minéralisations en tourmaline noire, béryl vert et topaze. Le granite à deux micas de Berven semble être tout à fait comparable à celui de St-Catherine mais les contacts tranchés entre les deux granites font du granite de Berven une intrusion plus tardive. Ses caractères minéralogiques et chimiques sont sensiblement identiques à ceux du granite de St-Catherine.

Les caractères minéralogiques du leucogranite de Lescondan montrent qu'il correspond vraisemblablement à la terminaison orientale du granite de St-Renan - Kersaint. C'est une roche claire à grain fin-moyen dont la paragenèse est constituée de feldspath potassique, oligoclase, quartz, biotite et muscovite (la muscovite dominant généralement très largement la biotite).

Les formations superficielles sont caractérisées par deux ensembles : les formations d'altération et les formations d'origine éolienne.

Les altérites des roches granitiques et gneissiques se présentent sous forme d'arènes plus ou moins évoluées et plus ou moins grossières en fonction de la lithologie originelle. Ainsi, les arènes des roches dérivant des Gneiss migmatitiques de l'Horn sont généralement beaucoup plus fines et plus argileuses que celles issues de l'altération des Gneiss de Plouéan ou des Gneiss de Brest. Les granites et roches apparentées sont ici altérés en arènes assez fines, sombres mais peu argileuses. Enfin, les roches micaschisteuses s'altèrent en arènes fines, sombres, sablon-argileuses voire franchement argileuses.

Les formations d'origine éolienne (loess et limons loessiques) sont certainement bien plus développées que ne le laisse apparaître la carte géologique au 1/50 000. Elles recouvrent tous les interfluves sur une grande partie du bassin versant sur des épaisseurs qui peuvent atteindre plusieurs mètres. Ces formations semblent être beaucoup moins développées aux niveaux des hauts topographiques (Granite de St-Catherine, Lescondan et Berven au centre de la zone d'étude ; Gneiss de Brest au sud du bassin versant).

Bassin du Coët Dan (cf. figure 4)

Le bassin versant du Coët Dan occupe une superficie très restreinte au sein du vaste domaine géologique de la Bretagne centrale. Ce domaine est caractérisé par une formation géologique principale d'âge briovérien (Protérozoïque supérieur). Dans le domaine centre-armoricain, cette puissante formation est composée de schistes verdâtres, de grès plus ou moins grossiers et localement de conglomérats à galets de quartz roulés (conglomérats de type Gourin). Les levés cartographiques effectués lors de cette étude ont montré que l'intégralité du bassin versant du Coët Dan n'est caractérisé que par un seul assemblage lithologique constitué d'une alternance de couches pélitiques et de bancs de grès d'épaisseur centimétrique à pluricentimétriques. Les schistes fins (pélites, siltites) sont très nettement majoritaires par rapport aux grès et il n'a pas été possible, sur cette petite zone, de distinguer les secteurs plus gréseux des secteurs plus schisteux comme cela est localement possible en Bretagne centrale (Feuilles géologiques au 1/50 000 de Montfort-sur-Meu, Ploërmel, et St-Méen-le-Grand). Le faciès type est donc une pélite localement silteuse à éléments subanguleux de quartz fin et de feldspaths dispersés dans une matrice quartzo-phylliteuse abondante. Les quelques rares passées plus grossières sont caractérisées par des grès subfeldspathiques plus ou moins grossiers et non-classés, à éléments remaniés de quartzites, de quartz, de paillettes phylliteuses (muscovite et biotite) et de grains feldspathiques. La matrice de ces bancs grossiers est généralement quartzo-chloriteuse et peut représenter 30 à 40 % de la roche.

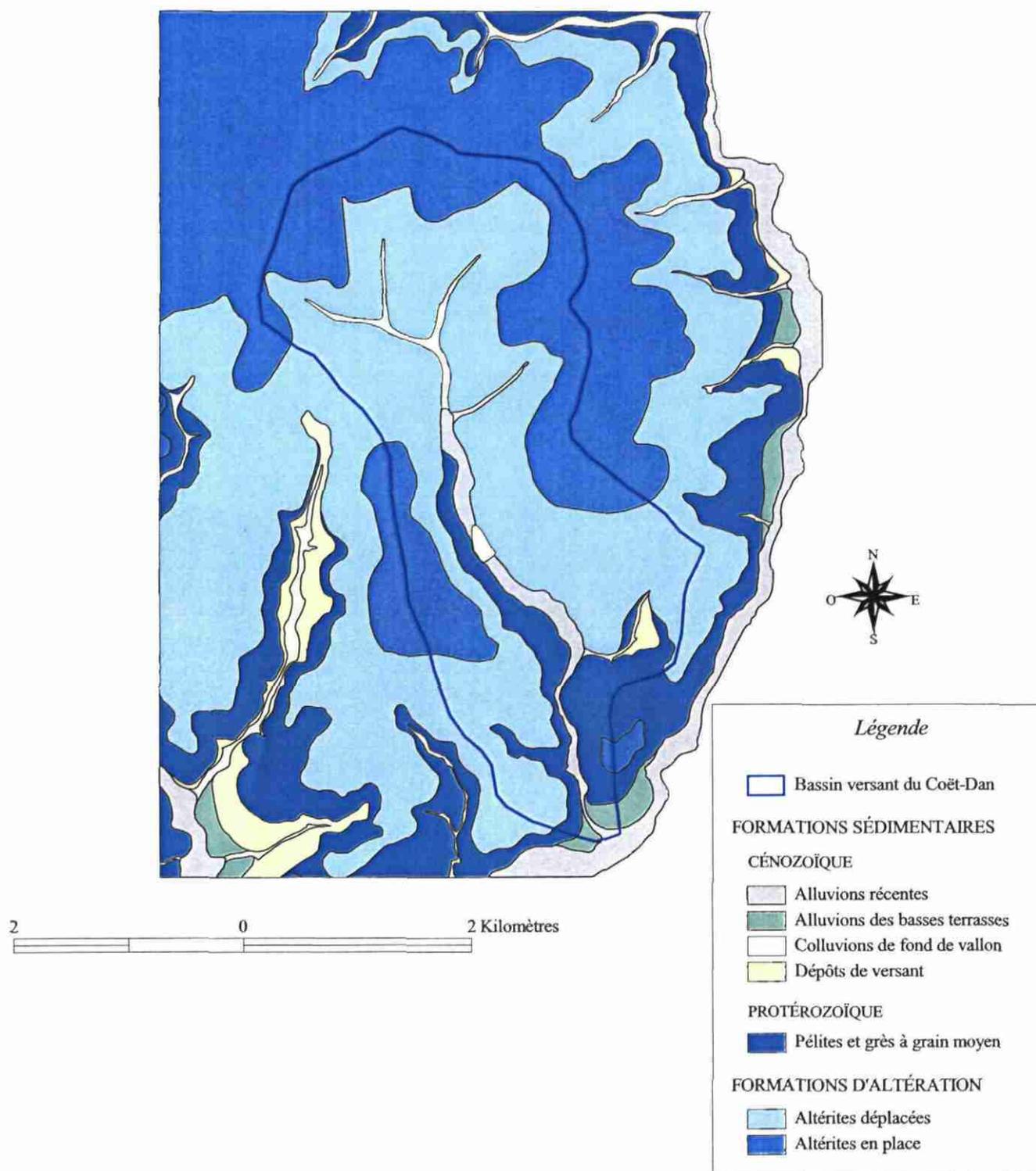


Fig. 4 - Carte géologique du bassin du Coët Dan

Sur le secteur d'étude, cette formation constitutive du socle est largement recouverte par des formations superficielles. On peut en distinguer trois types :

- les formations d'altération (altérites en place et déplacées) sont représentées par des argiles ocres à blanches provenant de la dégradation des schistes sous-jacents lors des périodes chaudes et humides du Tertiaire. L'épaisseur des profils, ici réduite, traduit des phases successives d'érosion et de démantèlement au cours de la fin du Tertiaire et au Quaternaire. Ces altérites sont constituées d'argiles micacées, de quartz et de petites quantités de kaolinite ;
- les formations de versant et les formations de pied de pente sont très développées sur le bassin versant du Coët Dan. Elles proviennent d'un lent remaniement gravitaire des formations d'altération, vraisemblablement au Quaternaire, sous l'action principale des agents météoriques lors des périodes de gel et dégel associées aux glaciations ;
- les formations fluviatiles sont composées de colluvions de fond de vallon et d'alluvions Cénozoïques. Les colluvions de fond de vallon correspondent au remplissage des petites vallées associées au réseau secondaire. Généralement peu à très peu épais, les sédiments sont constitués par les particules argileuses ou limoneuses arrachées aux formations de versant lors des périodes de fortes précipitations. Elles s'accumulent progressivement au fur et à mesure que le cours d'eau perd de son énergie. Les alluvions occupent les terrasses du réseau principal. Elles sont constituées de galets de quartz roulés emballés dans une matrice limoneuse ; elles ont pu se mettre en place à l'Holocène, lors d'un épisode interglaciaire.

2.2. GEOLOGIE DE LA SURFACE ET GEOMORPHOLOGIE

Bassin du Yar

Le bassin versant du Yar présente des écarts altimétriques très importants qui s'échelonnent jusqu'à environ 260 m au Sud-Ouest de Plounérin.

L'organisation géologique générale de la partie aval du bassin est identique à celle de l'Horn : le domaine Nord-Ouest du bassin correspond à la terminaison orientale du plateau du Léon. Les altitudes croissent régulièrement jusqu'à atteindre 130-140 m.

Sur ces roches métamorphiques, la base des altérites, constituées essentiellement d'arènes ou de sables argileux plus ou moins grossiers, est observée à des positions compatibles avec celles reconnues sur l'ensemble du Pays Léonard.

A la différence de ce qui est observé sur le bassin de l'Horn, il ne semble pas y avoir ici de systèmes de décalages (horst et effondrements) de la base des altérites par jeu de failles plus anciennes.

La partie amont du bassin versant est occupée par les multiples intrusions granitiques. Les différences morphologiques s'expriment alors distinctement : les altitudes croissent très rapidement (jusqu'à 257 m), notamment au sud de la voie de chemin de fer. La rugosité du paysage est importante faisant apparaître des buttes témoins à fort relief au sommet desquelles il n'a été observé que de rares zones où les arènes apparaissent plutôt comme une pellicule relictuelle très peu épaisse.

Les domaines de replats situés entre les dômes sont occupés par de vastes zones alluvionnaires ou colluviales dont les localisations sont à corréliser avec le passage de grandes fractures orientées sensiblement N120-130 et N20-30. Ce sont aussi ces secteurs qui présentent les profils d'altération les plus développés. Il est vraisemblable que ces failles aient été, pour les eaux météoriques, des drains privilégiés qui ont permis des approfondissements très locaux des profils d'altération.

La modélisation effectuée dans cette étude tend à tenir compte de ces approfondissements locaux, notamment grâce au nombre important de tarières de reconnaissance qui y ont été implantées. Cependant, avec ces domaines d'approfondissement sur faille, on atteint les limites de la méthode et les résultats obtenus dans ces zones doivent être considérés avec prudence.

Bassin de l'Horn

Le secteur de l'Horn correspond à la prolongation orientale du plateau du Léon. Il s'agit d'un plateau incliné doucement du sud vers le nord, localement profondément entaillé par les vallées des fleuves côtiers (Abers, Horn...). La vallée de l'Horn est relativement large dans le sud du bassin versant ; ses flancs montrent des pentes peu marquées et le relief est faible. En revanche, à partir de Mespaul-Plouéan et à l'Ouest de St-Pol-de-Léon la vallée est beaucoup plus encaissée. Elle contourne la terminaison du granite de St-Catherine (contrôle lithologique) puis reprend une direction N-S avant de soudainement bifurquer vers l'Ouest au niveau de St-Pol-de-Léon, traduisant vraisemblablement un contrôle par la grande faille Santec-Pempoul.

La cartographie des altérites montre que leur base s'étire de 55 m d'altitude environ à 100 m d'altitude au Sud du bassin versant mais avec une complexité relativement importante. Plusieurs niveaux à transitions brutales sont mis en évidence, ce qui permet de conclure soit à des décalages (horsts et effondrements) par des failles difficilement distinguables sur le terrain, soit à des discontinuités lithologiques majeures. 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 compatibles avec des directions structurales hercyniennes réactivées : N110-120 et N30-50 pour les accidents majeurs. D'autres directions s'observent parfois : les directions N150-170 sont bien connues dans tout le Massif armoricain et se sont individualisées à la fin de l'orogénèse hercynienne (290-280 Ma). Les granites de St-Catherine, Berven et Lescondan forment des pointements rocheux très importants dans le paysage. Quelques carrières où le granite est encore exploité montrent une absence d'altérites meubles mais une fissuration horizontale importante qui permet de fixer la base des altérites vers une dizaine de mètres au-dessus du niveau topographique actuel. Au niveau de la carte de la base des altérites, ceci se traduit donc par un brusque ressaut, très marqué au nord puisqu'à cet endroit, le niveau repère passe de 55 m à plus de 90 m (cf. planche du chapitre 4.3.).

Bassin du Coët Dan

Le canevas géomorphologique de la région du Coët Dan est particulièrement simple. La vallée du Coët Dan est une vallée relativement large ; l'incision par le réseau hydrographique est réduite. 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 120-125 m, excepté au sud de Naizin où on les trouve à des altitudes sensiblement plus basses (110-115 m). Aucune faille ne semble avoir ici décalé la base du profil d'altération.

2.3. MODELE CONCEPTUEL DES AQUIFERES DE SOCLE

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

La fracturation d'origine tectonique favorise la circulation des eaux lorsque ces fractures sont ouvertes. C'est le cas des couloirs de fracturation souvent subverticaux, dont le degré d'ouverture est lié d'une part à leur mécanisme de formation, et d'autre part à leur orientation par rapport au champ de contraintes 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 5.

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 5) ;
- allotérites (quelques mètres à une dizaine de mètres) : altérite caractérisée par une réduction de volume par rapport à la roche mère initiale ; la texture de la roche mère n'est pas préservée. En contexte schisteux il s'agit d'une argile imperméable ; en contexte granitique, il s'agit d'une arène argileuse à faible perméabilité et faible porosité efficace.

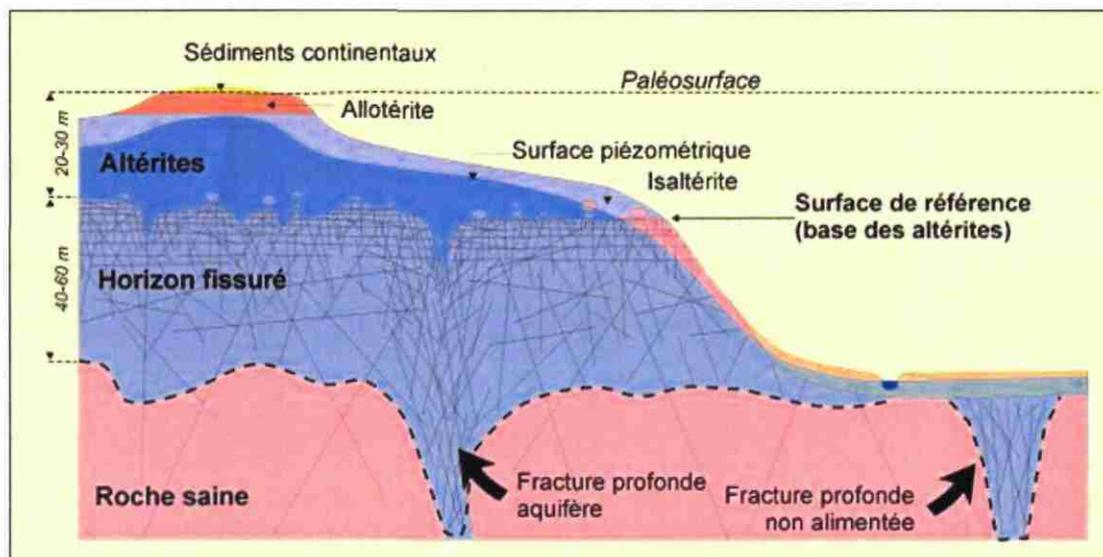


Fig. 5 - Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

- 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 6) dont l'intensité décroît vers le bas. Cette fissuration résulte de l'éclatement de la roche sous l'effet des contraintes générées par les changements de phase minéralogique, principalement l'hydratation de la biotite, qui se transforme avec augmentation de volume en chlorite, puis vermiculite, avant d'évoluer vers des minéraux argileux. Dans les 15 premiers mètres, la distance moyenne entre fissures est décimétrique et celles-ci sont ouvertes. L'espacement entre fissures (et donc leur probabilité d'interconnexion) diminue au fur et à mesure que l'on descend dans le profil.

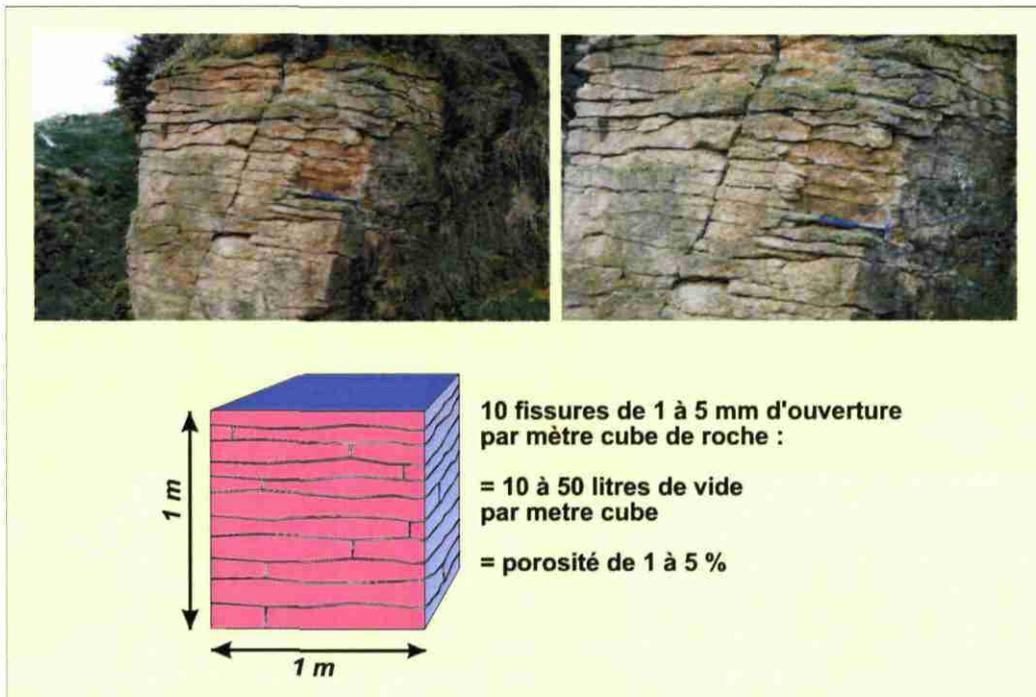


Fig. 6 - Partie supérieure de l'horizon fissuré dans le granite de Kernilis (Finistère) et estimation visuelle de la porosité

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 6). Cette orientation préférentielle résulte des caractéristiques du déviateur de contraintes généré par l'altération : la dilatation étant impossible dans le sens horizontal, les 2 composantes principales du tenseur (σ_1 et σ_2) sont horizontales, tandis que la composante minimale (σ_3) est verticale ; dans un tel système de contraintes on ouvre principalement des fentes

horizontales. Le même phénomène s'applique à la base des arènes, qui présentent un feuilletage horizontal caractéristique : ce feuilletage traduit un resserrement centimétrique à millimétrique entre joints ; cet espacement étant du même ordre de grandeur que celui du grain de la roche, tous les grains sont atteints par l'altération : il s'agit du début de l'arénisation.

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

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

Ainsi, dans le Finistère nord, une étude 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 7).

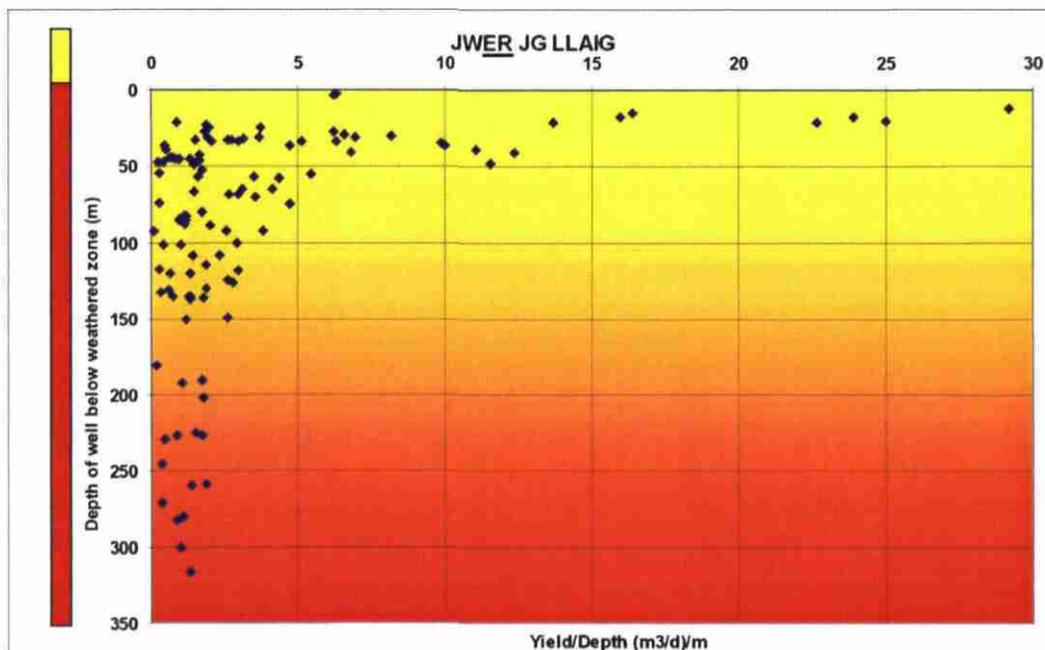


Fig. 7 - Corée du sud : débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en dessous de la base des arènes, en contexte de granite altéré.

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

- les altérites meubles, à porosité importante et faible perméabilité, ont un rôle d'emmagasinement de l'eau de pluie ;

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

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

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

A la demande du Service Géologique Régional Bretagne et dans le cadre du projet « Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse », une reconnaissance géophysique par sondages de Résonance Magnétique Protonique (RMP) a été effectuée par l'unité ARN/MRS du BRGM, sur les bassins versants du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56).

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

22 sondages RMP ont été effectués sur l'ensemble des bassins versants (cf. planches 1 pour le bassin du Yar, 2 Horn et 3 Coët Dan en annexe 2) lors de 2 campagnes de mesures sur le terrain (15 sondages en janvier 2002, puis 7 en février 2003). Les coordonnées de ces sondages sont données en Lambert II étendu dans le tableau 1.

3.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Sur le bassin versant du Yar, le nombre de formations géologiques constituant le substratum est relativement important. Certaines formations ont été rassemblées en deux groupes lithologiquement semblables : 1) Granite du Ponthou et Tonquédec, et 2) Leucogranites de Guerlesquin, St-Carré et Bruillac.

Cinq ensembles géologiques ont ainsi fait l'objet d'une reconnaissance par RMP : Orthogneiss de Plougonven, Granite du Ponthou, Leucogranite de Loguivy, Leucogranite de Guerlesquin et Leucogranite de Croaz-Ilhez.

Les formations géologiques situées au Nord du bassin versant (Amphibolites, Micaschistes et Paragneiss) ont été caractérisées par des sondages RMP réalisés sur le bassin voisin du Dourduff, dans le cadre du projet SILURES Bassins versants (BRGM/RP-51891-FR).

Sur le bassin versant de l'Horn, cinq formations géologiques ont fait l'objet d'une reconnaissance par RMP : Gneiss migmatitique de l'Horn, Orthogneiss de Plouéan, Leucogranites, Paragneiss à biotite-sillimanite et Micaschistes de la Penzé.

Les micaschistes situés au Sud du bassin ont été rattachés aux Micaschistes de la Penzé à staurotide-grenat. Les Gneiss de Brest ont été caractérisés par des sondages RMP réalisés sur le bassin versant de la rade de Brest, dans le cadre du contrat de Baie de la Rade de Brest (BRGM/RP-52656-FR).

Sur le bassin versant du Coët Dan l'unique formation géologique présente sur le bassin a été renseignée par quatre sondages RMP.

Néanmoins sur les bassins versant du Yar et de l'Horn, quelques formations géologiques n'ont pas pu être renseignées par des sondages RMP (cf. contours en blanc des planches 1 et 2). 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.

*Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)*

Bassin versant	Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Contexte géologique
YAR	YA01	162567	2419133	101	Orthogneiss de Plougonven
	YA02	161229	2418646	116	Orthogneiss de Plougonven
	YA03	165427	2419069	101	Granite porphyroïde du Ponthou
	YA04	163746	2416164	159	Granite porphyroïde du Ponthou
	YA05	166702	2413790	154	Leucogranite de Guerlesquin
	YA06	164313	2412226	181	Leucogranite de Guerlesquin
	YA07	164947	2411934	207	Leucogranite de Loguivy (muscovite dominante)
	YA08	169165	2413451	182	Granite porphyroïde du Ponthou
	YA09	164816	2411748	200	Leucogranite de Loguivy (muscovite dominante)
	YA10	164800	2409950	243	Leucogranite de Loguivy (muscovite dominante)
	YA11	166120	2411150	216	Leucogranite de Croaz-Illiez (biotite dominante)
HORN	HR01	131680	2426605	37	Gneiss migmatitiques de l'Horn
	HR02	130979	2423388	56	Leucogranites
	HR03	131402	2417134	65	Micaschites de la Penzé à staurotide-grenat
	HR04	132106	2414622	88	Micaschites de la Penzé à staurotide-grenat
	HR05	131179	2420269	70	Orthogneiss de Plouénan
	HR06	127297	2416928	103	Paragneiss à biotite-sillimanite
	HR07	131345	2423677	55	Gneiss migmatitiques de l'Horn
COET DAN	CD01	213782	2347367	107	Pélites et grès à grain moyen
	CD02	215127	2347932	110	Pélites et grès à grain moyen
	CD03	215709	2347561	131	Pélites et grès à grain moyen
	CD04	215777	2344103	94	Pélites et grès à grain moyen

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

3.2. METHODES ET MOYENS

3.2.1. La résonance magnétique protonique (RMP)

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

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

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

Principe de la méthode

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (cf. figure 8).

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

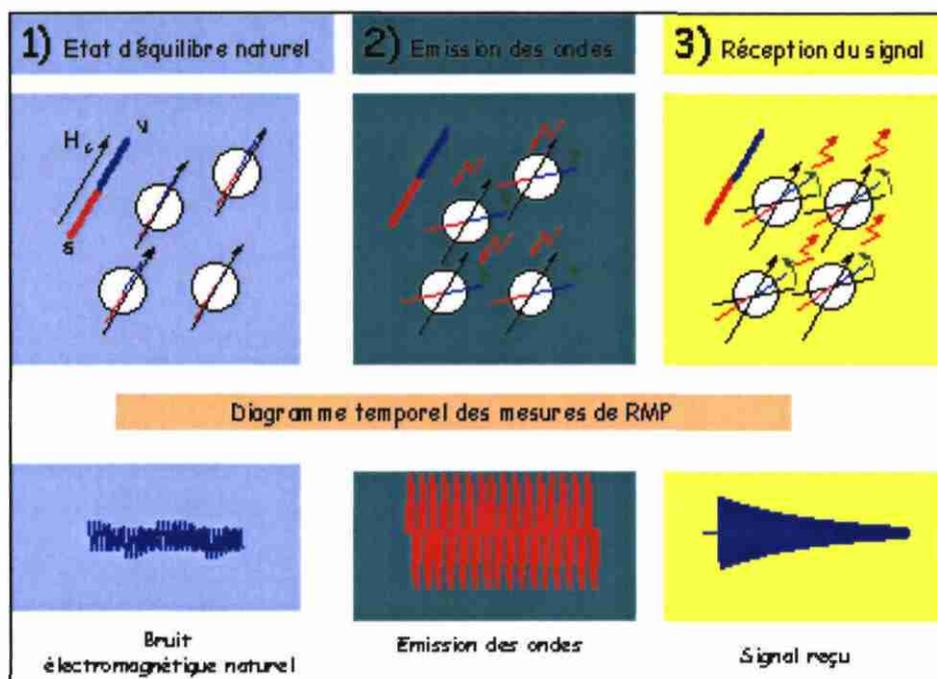


Fig. 8 - Principe de mesure RMP

L'équipement « NUMIS »

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (cf. figure 9).

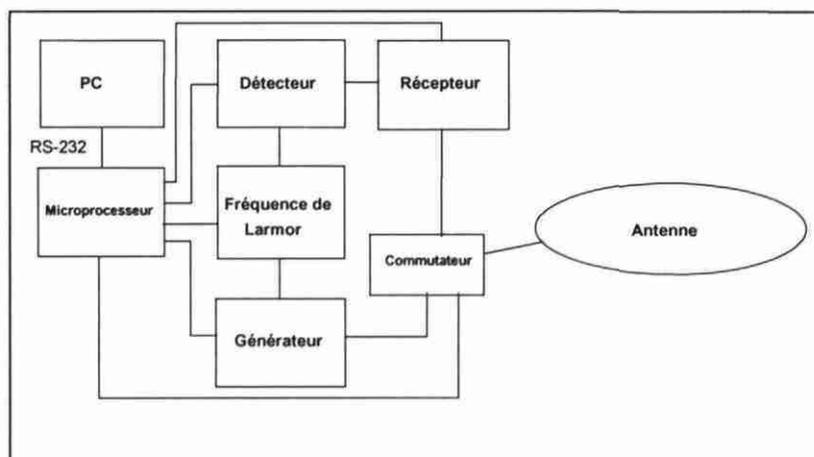


Fig. 9 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental

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 10).

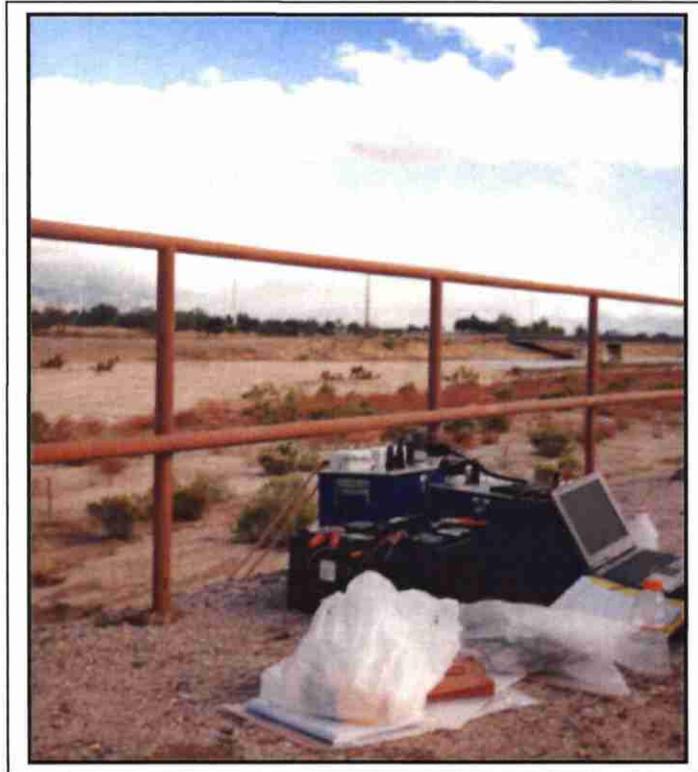


Fig. 10 - Equipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS » sur site

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

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

Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur la figure 11.

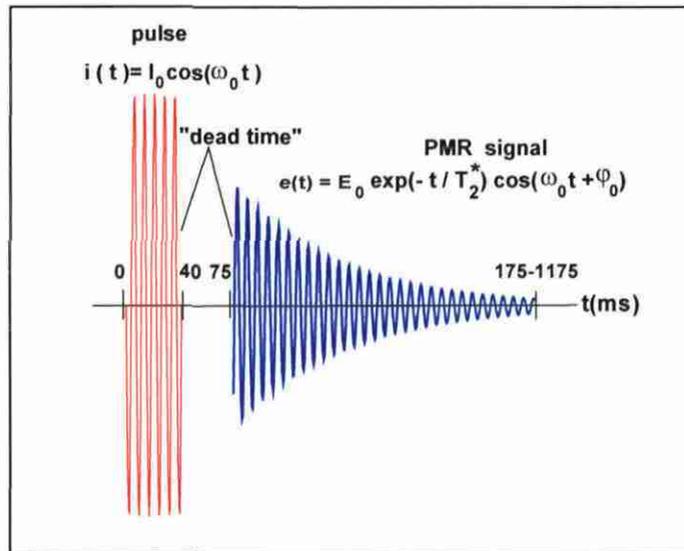


Fig. 11 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception

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

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

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

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

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

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 4 nV. Différents facteurs peuvent influencer l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko et al., 1998).

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

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

Interprétation des données

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

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

Le problème de l'inversion des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion des données théoriques est présenté sur la figure 12.

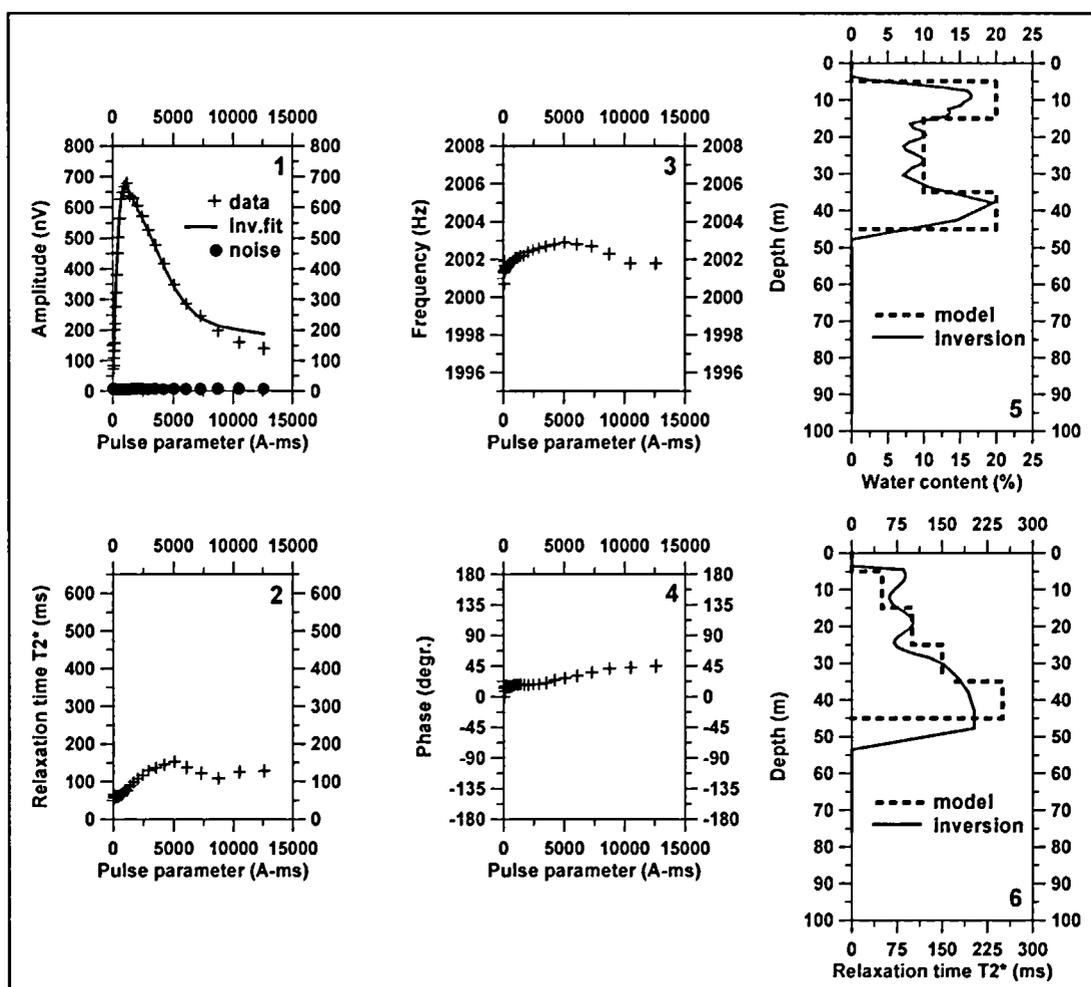


Fig. 12 - Résultats d'inversion des données théoriques

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

Tabl. 2 - Paramètres du modèle

La mesure des caractéristiques de relaxation du signal RMP ($T_2^*(q)$ et $T_1(q)$), rend possible l'estimation 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, φ est la teneur en eau, T_1 est la constante du temps de décroissance, C_k et a, b sont des constantes définies empiriquement.

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

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

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

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

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

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

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté sur la figure 13.

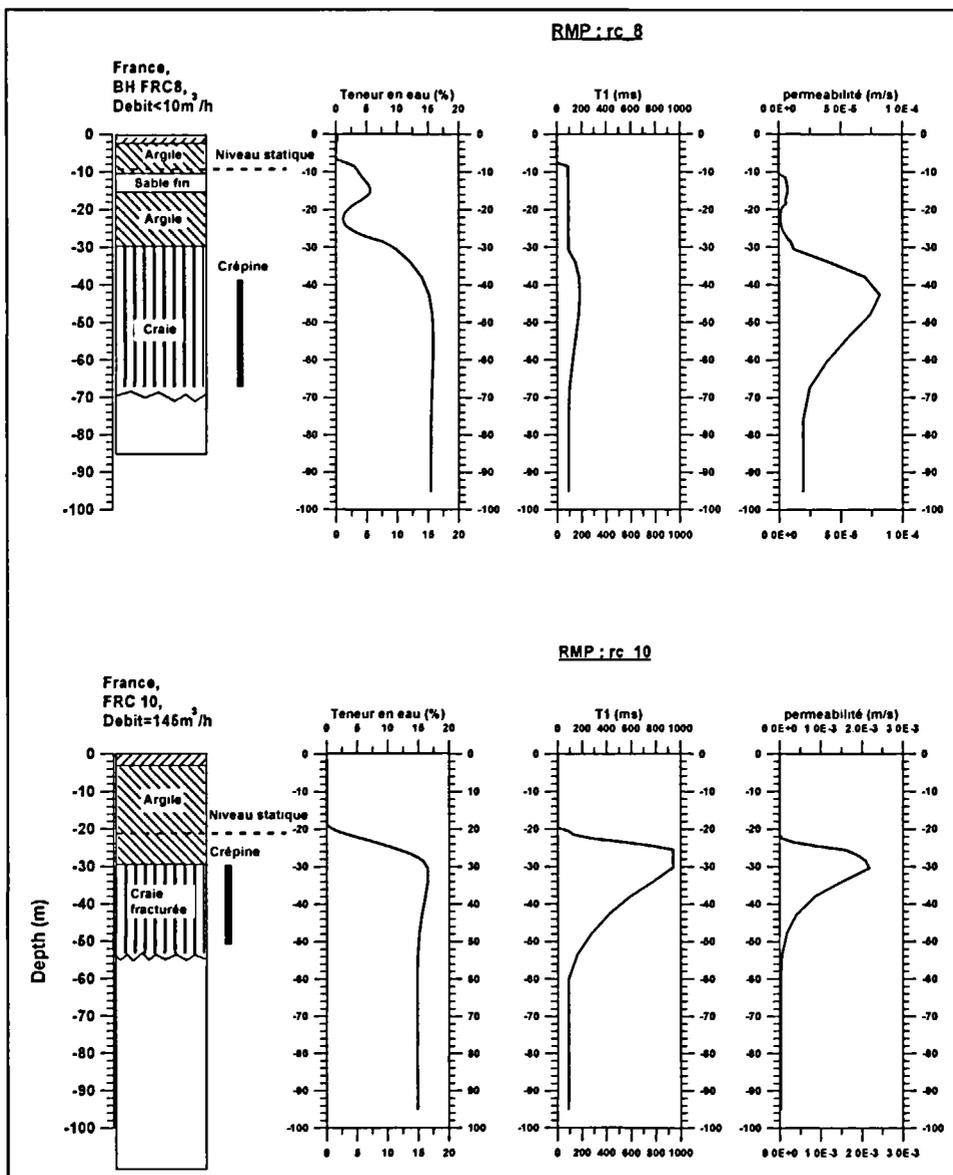


Fig. 13 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie

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 14.

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

*Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)*

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN HR05
 Loop: 4 - 37.5 Date: 14.02.2003 Time: 13:03

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr05.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 = 178.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 4.14; EN/IN = 0.97
 fitting error: FID1 = 21.89%; FID2 = 23.56 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

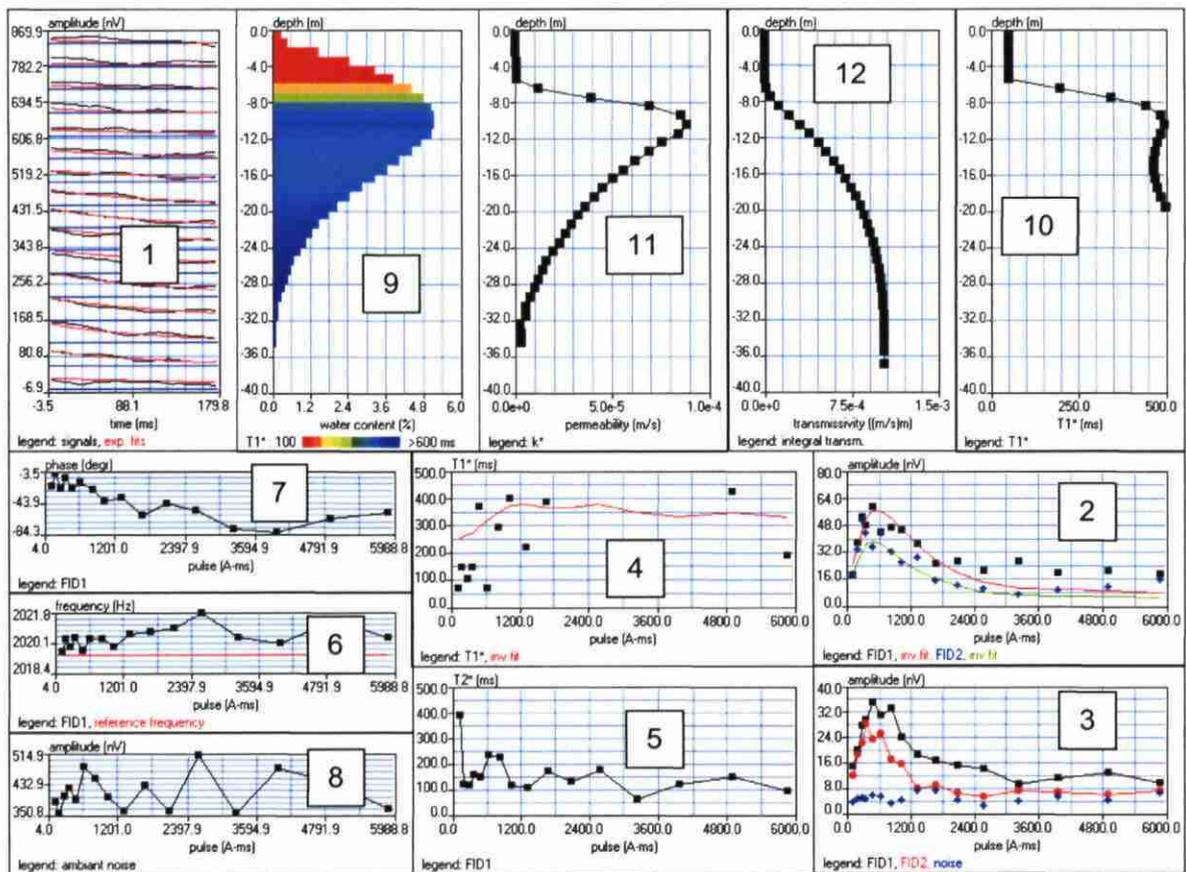


Fig. 14 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP

Les résultats graphiques sont :

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

3.2.2. Moyens mis en œuvre

Personnel et calendrier

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

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

Le permittage des sites sélectionnés a été réalisé par le SGR Bretagne une quinzaine de jours avant le début de l'opération.

La 1^{ère} campagne de mesures (15 sondages RMP réalisés) s'est déroulée du 14 au 23 janvier 2002, amené et repli compris, soit un total de 8 jours d'acquisition.

La 2^{nde} campagne de mesures (7 sondages RMP réalisés) s'est déroulée du 12 au 15 février 2003, amené et repli compris, soit un total de 4 jours d'acquisition.

Équipement

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

3.3. TRAVAUX REALISES

3.3.1. Acquisition des mesures

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

Cette procédure est la suivante :

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

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

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

Toutes les acquisitions ont été effectuées avec les paramètres suivants :

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

- FID 1 : 240 ms
- D1 : 15 ms
- P2 : 42 ms
- FID 2 : 240 ms
- D2 : 0
- optimisation du stack : oui
- filtre 50 Hz : non, sauf si l'origine du bruit est attribuable au 50 Hz
- nombre de stacks : 150 à 350.

3.3.2. Volume des travaux

Pendant les 12 jours (8+4) d'intervention sur le terrain, 22 sondages RMP (15+7) ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude, ce qui représente un rendement d'environ 2 sondages RMP par jour.

Le tableau 3 présente un récapitulatif des principales caractéristiques de ces 22 sondages RMP.

*Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)*

Sondage RMP	X (m)	Y (m)	Z (m)	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Rapport signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit exter./bruit Instr. (EN/IN)	Qualité des mesures	Interprétation
YA01	162567	2419133	101	300/600	200	1.42	2.24	bonne	quantitative
YA02	161229	2418646	116	250/300	200	3.33	1.65	bonne	quantitative
YA03	165427	2419069	101	300/400	200	1.53	3.31	bonne	quantitative
YA04	163746	2416164	159	500/700	200	1.13	3.02	médiocre	optimiste
YA05	166702	2413790	154	500/1200	250	2.21	2.25	bonne	quantitative
YA06	164313	2412226	181	600/800	200	1.68	3.6	moyenne	estimative
YA07	164947	2411934	207	400/700	200	1.21	8.88	inexploitable	
YA08	169165	2413451	182	400/800	350	1.64	1.29	moyenne	estimative
YA09	164816	2411748	200	5000/6000	250	1.35	5.36	médiocre	optimiste
YA10	164800	2409950	243	900/1300	300	1.46	1.86	moyenne	estimative
YA11	166120	2411150	216	400/700	200	1.36	1.65	bonne	estimative
HR01	131680	2426605	37	3000/3500	200	1.36	3.6	moyenne	optimiste
HR02	130979	2423388	56	700/800	250	1.44	3.27	moyenne	estimative
HR03	131402	2417134	65	2000/3500	250	1.04	3.25	médiocre	optimiste
HR04	132106	2414622	88	350/400	200	2.34	2.31	bonne	quantitative
HR05	131179	2420269	70	350/400	250	4.14	0.97	bonne	quantitative
HR06	127297	2416928	103	400/900	150	2.73	3	bonne	quantitative
HR07	131345	2423677	55	550/700	300	1.85	2.14	bonne	quantitative
CD01	213782	2347367	107	2600/2700	200	0.84	8.92	médiocre	optimiste
CD02	215127	2347932	110	350/450	150	1.34	3.57	moyenne	estimative
CD03	215709	2347561	131	1000/1500	150	1.1	5.87	médiocre	optimiste
CD04	215777	2344103	94	700/1400	150	1.17	13.11	moyenne	estimative

Tabl. 3 - Principales caractéristiques des sondages RMP

3.4. TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES

3.4.1. Qualité des mesures

Les conditions de bruit électromagnétique, sur l'ensemble des bassins versants 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 interprétation estimative 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.

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

Pour les 22 sondages RMP, le rapport EN/IN varie entre 0,97 et 13,11 ; et le rapport S/N oscille entre 0,84 et 4,14.

L'analyse de la qualité des mesures pour les 22 sondages RMP donne la répartition suivante :

- bonne : 9 41 %
- moyenne : 7 32 %
- médiocre : 5 23 %
- inexploitable : 1 4 %.

En ce qui concerne l'interprétation des 21 sondages exploitables la répartition est la suivante :

- interprétation quantitative : 8 38 %
- estimative : 7 33 %
- optimiste : 6 29 %

3.4.2. Matrice pour l'inversion

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

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

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

3.4.3. Inversions automatiques

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

Les 21 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. METHODOLOGIE MISE EN ŒUVRE

4.1.1. Principe

La cartographie quantitative de la réserve en eau souterraine en contexte de socle altéré repose sur le calcul, maille par maille, de l'épaisseur de chaque horizon d'altération situé en zone saturée, couplé à la détermination de la teneur moyenne en eau libre de chacun de ces horizons pour chaque faciès lithologique présent dans la zone d'étude (figure 15).

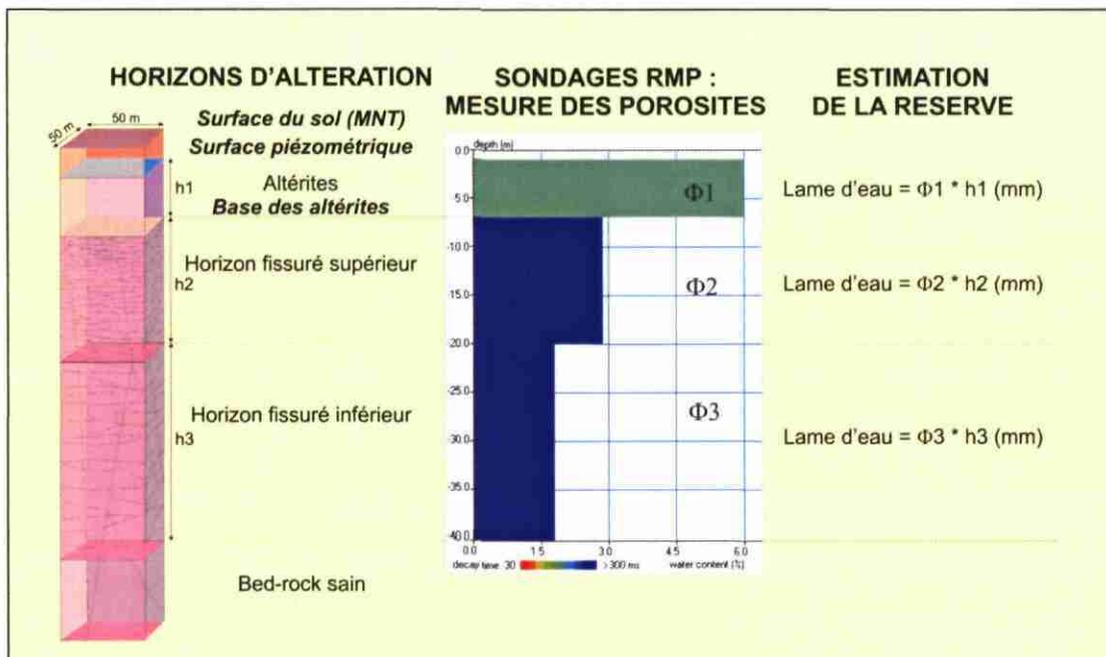


Fig. 15 - Organigramme de réalisation de la carte de la réserve en eau souterraine

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 variables étudiées ; c'est l'objectif de l'analyse variographique ;
- d'interpoler par krigeage les variables de travail aux nœuds d'un maillage régulier.

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

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

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

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

4.2. MODELISATION DE LA SURFACE PIEZOMETRIQUE

4.2.1. Récupération des données piézométriques

Suite à une recherche au niveau de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) sur les 199 forages recensés sur les 3 bassins versants (34 sur le Yar, 84 sur l'Horn et 81 sur le Coët Dan), 36 mesures de la profondeur du niveau de nappe ont été relevées dans des forages d'eau (cf. répartition par bassin versant dans le tableau 4).

Ces niveaux varient entre 0 et 8 m de profondeur sur le Yar, entre 0 et 18 m sur l'Horn et entre 0 et 13 m sur le Coët Dan.

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 piézométriques (total)	Bassin du Yar	Bassin de l'Horn	Bassin du Coët Dan
En forage (36)	3	20	13
En tarière (99)	33	43	23
Total (135)	36	63	36

Tabl. 4 - Répartition des mesures piézométriques

Les profondeurs du niveau de nappe mesurées sur les 168 sondages mécaniques à la tarière réalisés sur les 3 bassins versants (BRGM/RP-50262-FR : 66 sur le Yar, 64 sur l'Horn et 38 sur le Coët Dan) ont permis de rassembler 99 mesures (cf. répartition dans le tableau 4).

Ces niveaux varient entre 1 et 16 m de profondeur sur le Yar, entre 1 et 13 m sur l'Horn et entre 1 et 21 m sur le Coët Dan.

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 135 points d'observation (cf. tableau 4) représente une densité d'environ 1 point pour 2.5 km² sur le Yar, 1 point pour 2.1 km² sur l'Horn, et 1 point pour 1 km² sur le Coët Dan.

4.2.2. Campagne piézométrique

Une campagne de mesures piézométriques a été réalisée en juillet 2002 afin d'obtenir une meilleure densité d'observation et une répartition plus homogène sur le bassin versant du Yar.

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

Néanmoins, lors de cette campagne 12 mesures ont pu être effectuées. Les niveaux relevés varient entre 3 et 9,4 m de profondeur.

L'ensemble de ces 48 points d'observation (15 en forage et 33 en tarière) représente une densité d'environ 1 point pour 1.9 km² sur le bassin versant du Yar.

Le nombre total de points d'observation de niveau de nappe sur les 3 bassins versants devient donc égal à 147 points d'observation (48 en forage et 99 en tarière).

4.2.3. 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 mise en œuvre a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al., 2004) ; son principe est rappelé ci-dessous (figure 16).

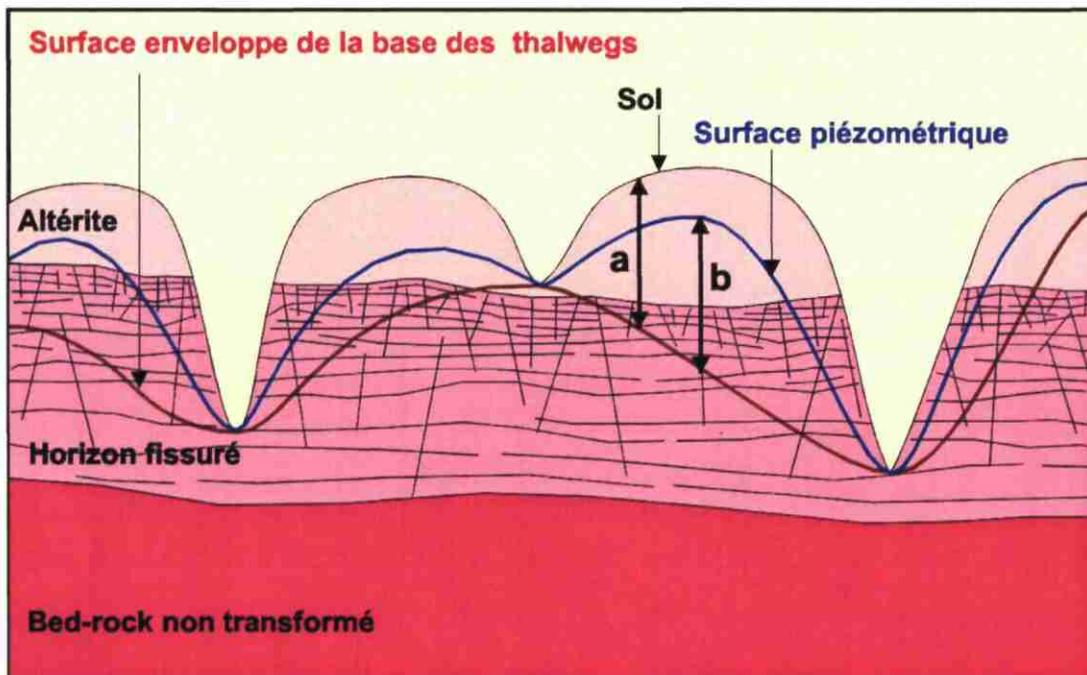


Fig. 16 - Principe de modélisation de la surface piézométrique

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 16), 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 16). 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 du Yar entre 1 et 26.2 m, avec une moyenne de 7.38 m ;
- pour le bassin de l'Horn entre 0.5 et 11 m, avec une moyenne de 2.92 m ;
- pour le bassin du Coët Dan entre 0.2 et 9.1 m, avec une moyenne de 4.21 m.

Au vue de ces résultats, on constate que la variabilité spatiale est sensiblement plus forte sur le bassin du Yar ce qui se traduit par des incertitudes plus fortes par comparaison aux deux autres bassins.

La surface du sol est fournie par le MNT.

Sur les grilles englobant les zones d'étude, 147 mesures piézométriques ont été utilisées (48 sur le Yar, 63 sur l'Horn et 36 sur le Coët Dan).

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 147 couples de variables a et b sur un diagramme binaire a montré que 50 points (16 sur le Yar, 18 sur l'Horn et 16 sur le Coët Dan) 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 importante : points situés dans les vallées pour lesquels la correspondance entre le niveau piézométrique et le niveau de la base des thalwegs n'est pas bonne ;
- points à ordonnée trop faible : points influencés par des pompages ; les niveaux piézométriques sont alors inférieurs à ce qu'ils devraient être (cf. explications au chapitre 4.2.1.).

Après élimination des valeurs aberrantes (50 mesures), 97 mesures piézométriques ont pu être utilisées (32 sur le Yar, 45 sur l'Horn et 20 sur le Coët Dan).

Le report des couples de variables a et b sur un diagramme binaire (cf. figures 17, 18 et 19) a permis de calculer les équations suivantes :

Bassin du Yar $b = 0.9324 * a - 3,0313$

Bassin de l'Horn $b = 0.9165 * a - 3,7923$

Bassin du Coët Dan $b = 1.0512 * a - 4,4969$

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 ordonnées à l'origine négatives (-3, -3.8 et -4.5 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 comporte plus d'erreur qu'une maille située dans une vallée à fond plat. La maille du MNT est donc parfois trop large par rapport à la morphologie existante.

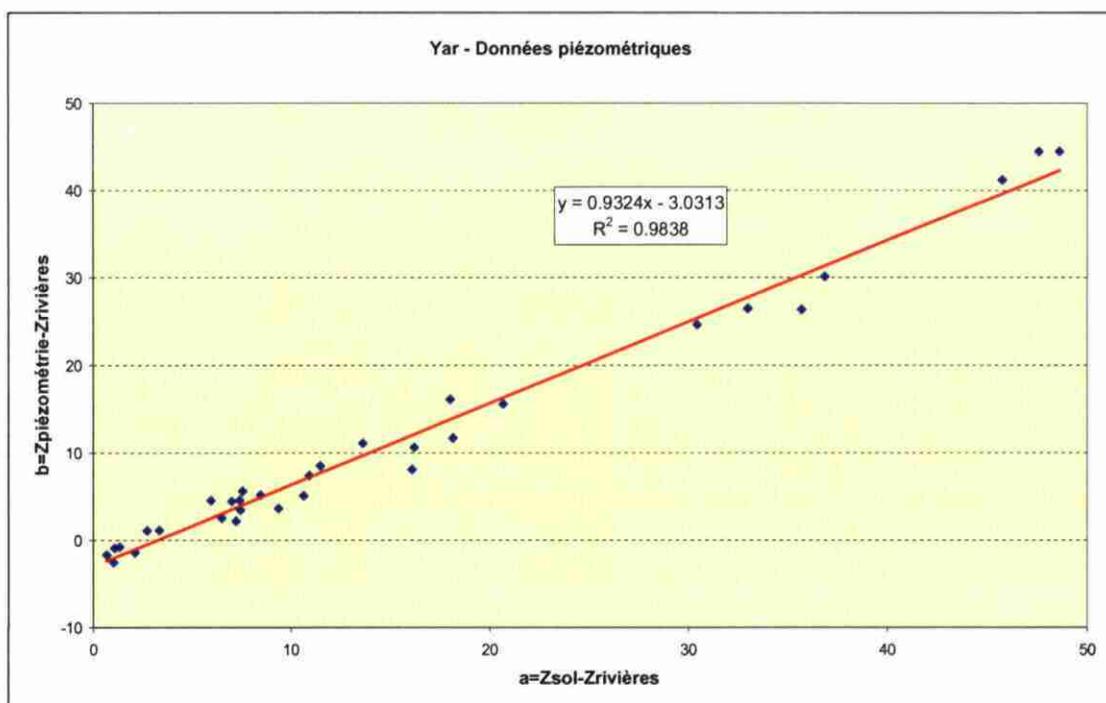


Fig. 17 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Yar)

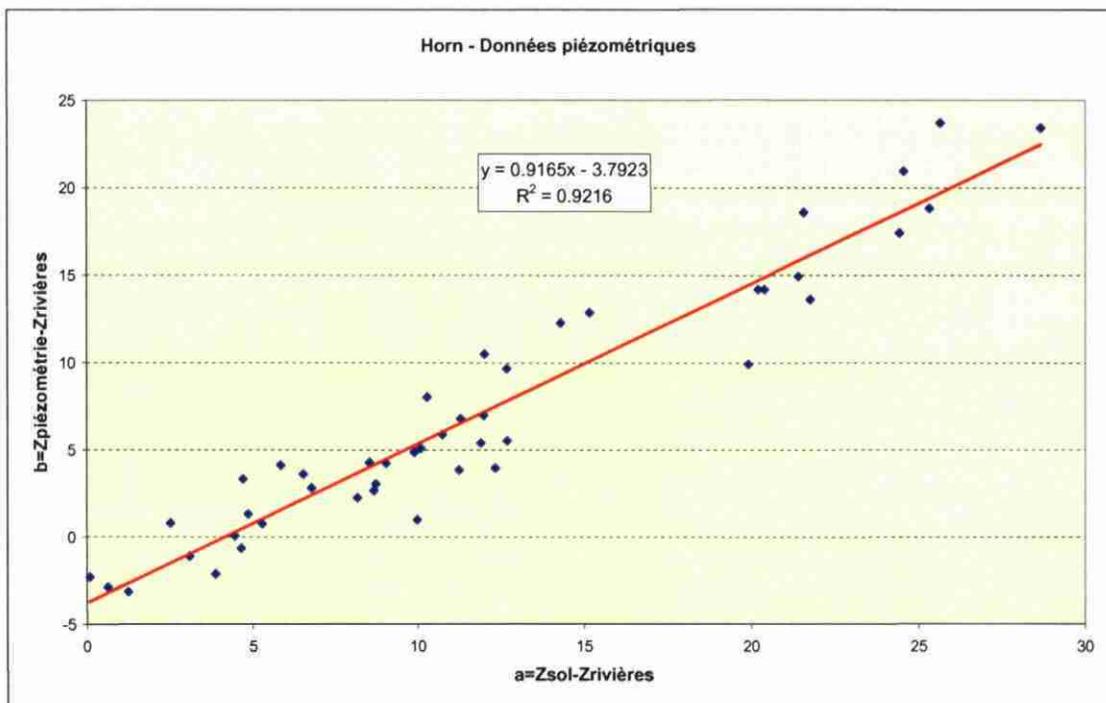


Fig. 18 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin de l'Horn)

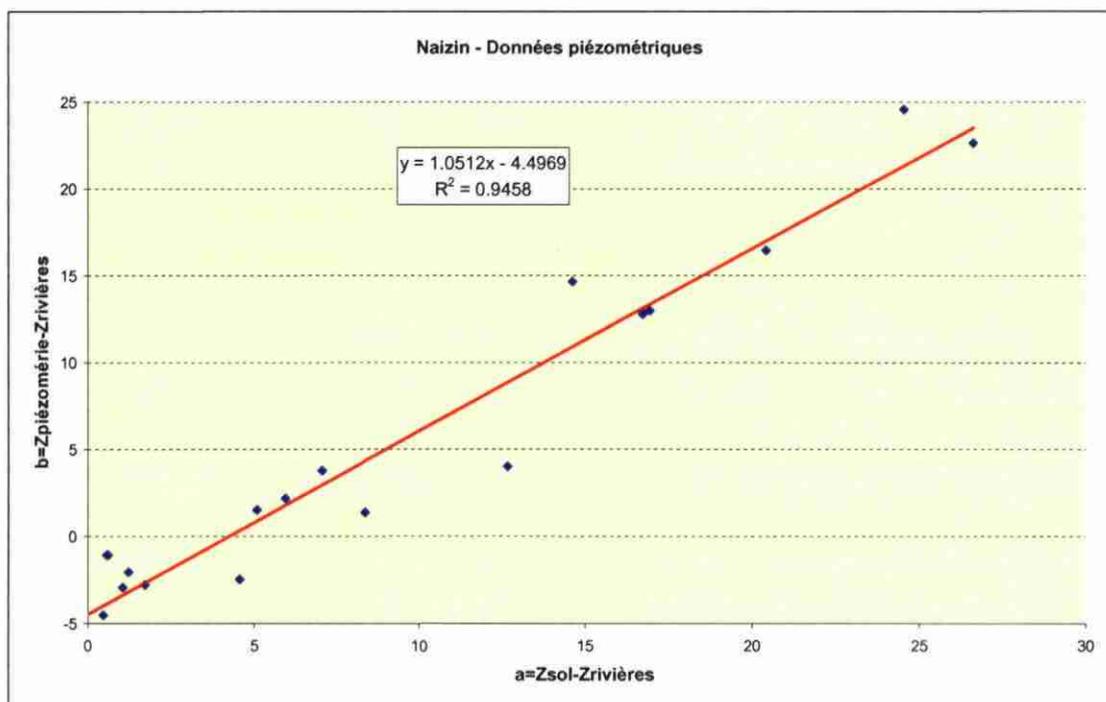


Fig. 19 - Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes (bassin du Coët Dan)

Les cartes de l'altitude de la surface piézométrique sur les 3 bassins versants (Yar, Horn et Coët Dan) sont respectivement représentées sur les planches 4, 5 et 6.

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 3 bassins versants (Yar, Horn et Coët Dan) sur les planches 7, 8 et 9.

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

La surface de base des altérites a été construite par krigeage, après étude géostatistique, d'une population de points d'observation de l'interface altérites/milieu fissuré : 877 points sur le Yar, 751 sur l'Horn et 167 sur le Coët Dan.

Ces points proviennent (cf. répartition par bassin versant dans le tableau 5) :

- de données des 82 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 (167 points),
- d'observations des affleurements présents sur les zones d'étude (517 points),
- du repérage sur le terrain du contact altérites/milieu fissuré (digitalisation des contours et création de 1029 points).

Nombre de points d'observation	(total)	Bassin du Yar	Bassin de l'Horn	Bassin du Coët Dan
De forage	(82)	10	58	14
De tarière	(167)	66	63	38
D'affleurements	(517)	267	210	40
D'après la digit du contact	(1029)	534	420	75
Total	(1795)	877	751	167

Tabl. 5 - Répartition des points d'observation du contact altérites/milieu fissuré

L'acquisition des 1546 derniers points (517 et 1029) s'est déroulée lors de deux campagnes de terrain, en septembre 1998 puis en septembre 2002.

L'ensemble des 1795 points (cf. tableau 5) représente une densité d'observations d'environ 1 point pour 0.10 km² sur le Yar, 1 point pour 0.17 km² sur l'Horn, et 1 point pour 0.22 km² sur le Coët Dan.

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

- entre 2.3 et 17.4 m, avec une moyenne de 7.78 m, pour le bassin du Yar ;
- entre 1 et 8.2 m, avec une moyenne de 4.13 m, pour le bassin de l'Horn ;
- entre 0.1 et 3.1 m, avec une moyenne de 1.42 m, pour le bassin du Coët Dan.

L'altitude de la surface de base des altérites obtenue sur les 3 bassins versants (Yar, Horn et Coët Dan) est respectivement représentée sur les planches 10, 11 et 12.

Au niveau du bassin versant de l'Horn, des failles et des discontinuités géologiques (leucogranites de Sainte-Catherine, Berven et Lescondan, cf. figure 3) 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 (Yar, Horn et Coët Dan) est respectivement représentée sur les planches 13, 14 et 15.

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.

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 16, 17 et 18 (Yar, Horn et Coët Dan).

L'épaisseur des altérites varie :

- sur le bassin du Yar entre 0 et 24.8 m, avec une moyenne de 1.14 m ;
- sur le bassin de l'Horn entre 0 et 31.2 m, avec une moyenne de 3.83 m ;
- sur le bassin du Coët Dan entre 0 et 14.1 m, avec une moyenne de 1.36 m.

Ces planches montrent que le bassin de l'Horn est mieux pourvu d'altérites que les deux autres bassins versants et que les altérites y sont plus épaisses.

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

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

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

Les épaisseurs moyennes pour chaque lithologie ont été calculées sur chacun des 3 bassins versants (cf. tableaux 6, 7 et 8 : Yar, Horn et Coët Dan) à partir des résultats d'inversion des 10 sondages RMP réalisés sur le Yar, 7 sur l'Horn et 4 sur le Coët Dan.

Les sondages RMP déjà réalisés dans le cadre d'autres études sur les mêmes formations géologiques ont également été utilisés pour calculer ces épaisseurs :

- 7 sondages provenant du secteur de Plabennec (PLB), 4 caractérisant les Paragneiss alumineux du Yar (identiques aux Paragneiss à biotite-sillimanite de l'Horn), 1 pour les Orthogneiss de Plouéan et 2 pour les Gneiss de Brest de l'Horn,

- 3 sondages effectués sur le bassin versant du Dourduff (DOUR), au Nord-Est du Finistère, pour caractériser les Amphibolites de Plestin-les-Grèves (1 sondage) et les Micaschistes et Quartzites de Ploumillau (2) du Yar,
- 5 sondages réalisés sur le secteur d'étude de la Rade de Brest (RD), au centre du Finistère, pour caractériser les Orthogneiss de Plougonven du Yar (2 sondages), les Micaschistes de la Penzé (2) et les Gneiss de Brest (1) de l'Horn.

EPAISSEURS

Géologie	Sondage	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Amphibolites Plestin-les-Grèves	DOUR09	20.00	25.00
Moyenne		20.00	25.00
Micaschistes Quartzites Ploumillau	DOUR06	9.00	35.00
	DOUR07A	8.00	39.00
Moyenne		8.50	37.00
Paragneiss alumineux	HR06	9.00	36.00
	PLB15	13.00	30.00
	PLB19	11.00	30.00
	PLB24	9.00	36.00
	PLB28	8.00	37.00
Moyenne		10.00	33.80
Orthogneiss de Plougouven	YA01	16 (ns)	30.00
	YA02	18.00	26.00
	RD26	15.00	30.00
	RD14	18.00	29.00
Moyenne		17.00	28.75
Granite porphyroïde du Ponthou	YA03	18 (ns)	32.00
	YA04	18.00	29.00
	YA08	16.00	30.00
Moyenne		17.00	30.33
Leucogranite de Loguivy	YA09	13.00	34.00
	YA10	14.00	34.00
Moyenne		13.50	34.00
Leucogranite de Guerlesquin	YA05	10.00	32.00
	YA06	12.00	30.00
Moyenne		11.00	31.00
Leucogranite de Croaz-Illiez	YA11	10.00	35.00
Moyenne		10.00	35.00

Tabl. 6 - 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 Yar)

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

EPAISSEURS

Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Gneiss migmatitique de l'Horn	HR01	11.00	34.00
	HR07	8.00	39.00
Moyenne		9.50	36.50
Orthogneiss de Plouéan	HR05	14.00	30.00
	PLB23	14.00	32.00
Moyenne		14.00	31.00
Leucogranites	HR02	8.00	37.00
		8.00	37.00
Paragneiss à biotite-sillimanite	HR06	9.00	36.00
	PLB15	13.00	30.00
	PLB19	11.00	30.00
	PLB24	9.00	36.00
	PLB28	8.00	37.00
	Moyenne		10.00
Micaschistes de la Penzé	HR03	10.00	30.00
	HR04	11.00	35.00
	RD02	10.00	35.00
	RD22	6.00	34.00
Moyenne		9.25	33.50
Gneiss de Brest	PLB35	14.00	32.00
	PLB36	13.00	28.00
	RD03	16.00	29.00
Moyenne		14.33	29.67

Tabl. 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 l'Horn)

EPAISSEURS

Géologie	RMP	Fissuré supérieur	Fissuré inférieur
Pélites et grès à grain moyen	CD01	6 (ns)	31.00
	CD02	4 (ns)	27.00
	CD03	21.00	18.00
	CD04	4 (ns)	42.00
Moyenne		21.00	29.50

Tabl. 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 Coët Dan)

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

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

- comprise entre 8,5 et 20 m, sur le bassin du Yar ;
- comprise entre 8 et 14,33 m, sur le bassin de l'Horn ;
- de 21 m, sur le bassin du Coët Dan.

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 25 et 37 m, sur le bassin du Yar ;
- varient entre 29.67 et 37 m, sur le bassin de l'Horn ;
- sont de 29.5 m, sur le bassin du Coët Dan.

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 19, 20 et 21 (pour les bassins versants du Yar, de l'Horn et du Coët Dan) : cette profondeur représente la profondeur approximative du mur de l'aquifère d'altération.

Les valeurs varient :

- entre 0 et 72.1 m, avec une moyenne de 40.65 m, sur le bassin du Yar ;
- entre 0 et 73.9 m, avec une moyenne de 40.56 m, sur le bassin de l'Horn ;
- entre 0 et 64.6 m, avec une moyenne de 37.60 m, sur le bassin du Coët Dan.

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 22, 23 et 24 (Yar, Horn et Coët Dan).

Cette épaisseur varie :

- entre 0 et 67.2 m, avec une moyenne de 36.62 m, sur le bassin du Yar ;
- entre 0 et 68.1 m, avec une moyenne de 36.55 m, sur le bassin de l'Horn ;
- entre 0 et 62.1 m, avec une moyenne de 33.70 m, sur le bassin du Coët Dan.

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 du Yar, de l'Horn et du Coët Dan).

21 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 3 bassins versants dans les tableaux 9, 10 et 11 (Yar, Horn et Coët Dan).

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 9, 10 et 11.

Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Géologie	RMP	signal/bruit	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES		
			Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Amphibolites Plestin-les-Grèves	DOUR09	2.3	0.74	3.20	0.89			
Moyenne			0.74	3.20	0.89	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
MicaS Quartzites de Ploumillau	DOUR06	1.35	0.20	2.56	0.77	0.27	3.46	1.04
	DOUR07A	0.98	0.15	2.13	0.15	0.15	2.09	0.14
Moyenne			0.17	2.35	0.46	0.18	2.38	0.51
Paragneiss alumineux	HR06	2.73	1.70	7.54	0.17	4.64	20.58	0.46
	PLB15	0.98	0.21	4.26	0.15	0.21	4.18	0.15
	PLB19	1.74	-	1.28	3.04	-	2.22	5.28
	PLB24	1.22	0.66	1.89	0.37	0.81	2.30	0.45
	PLB28	0.91	2.03	4.68	3.78	1.85	4.26	3.44
Moyenne			0.79	3.93	1.50	1.29	4.42	1.29
Orthogneiss de Plougonven	YA01	1.42	-	3.99	0.68	-	5.67	0.96
	YA02	3.33	3.15	4.24	0.91	10.49	14.11	3.02
	RD26	2.29	3.20	2.17	0.41	7.34	4.97	0.95
	RD14	1.06	0.83	0.79	?	0.88	0.84	?
Moyenne			2.40	2.80	0.67	2.80	3.16	0.70
Granite porphyroïde du Ponthou	YA03	1.53	-	2.56	0.49	-	3.92	0.75
	YA04	1.13	0.43	1.26	0.37	0.49	1.43	0.42
	YA08	1.64	0.70	0.99	0.38	1.15	1.63	0.62
Moyenne			0.57	1.61	0.41	0.59	1.62	0.41
Leucogranite de Loguivy	YA09	1.35	4.04	2.75	1.29	5.46	3.72	1.74
	YA10	1.46	-	3.78	0.67	-	5.52	0.98
Moyenne			4.04	3.27	0.98	4.04	3.29	0.97
Leucogranite de Guerlesquin	YA05	2.21	6.44	8.06	0.02	14.23	17.82	0.05
	YA06	1.68	5.08	5.93	0.12	8.53	9.97	0.20
Moyenne			5.76	7.00	0.07	5.85	7.14	0.06
Leucogranite de Croaz-Illiez	YA11	1.36	0.49	1.24	0.01			
Moyenne			0.49	1.24	0.01	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

Tabl. 9 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Yar)

? : 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

Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Géologie	RMP	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES			
		signal/bruit	Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Gneiss migmatitique de l'Horn	HR01	1.36	-	1.62	0.10	-	2.20	0.14
	HR07	1.85	-	4.65	0.18	-	8.60	0.33
Moyenne			-	3.13	0.14	-	3.37	0.15
Orthogneiss de Plouéan	HR05	4.14	2.80	4.12	0.33	11.59	17.05	1.37
	PLB23	2.05	4.68	3.27	0.66	9.60	6.71	1.36
Moyenne			3.74	3.70	0.50	3.42	3.84	0.44
Leucogranites	HR02	1.44	2.15	3.80	0.39			
	Moyenne		2.15	3.80	0.39	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>
Paragneiss à biotite-sillimanite	HR06	2.73	1.70	7.54	0.17	4.64	20.58	0.46
	PLB15	0.98	0.21	4.26	0.15	0.21	4.18	0.15
	PLB19	1.74	-	1.28	3.04	-	2.22	5.28
	PLB24	1.22	0.66	1.89	0.37	0.81	2.30	0.45
	PLB28	0.91	2.03	4.68	3.78	1.85	4.26	3.44
Moyenne			0.79	3.93	1.50	1.29	4.42	1.29
Micaschistes de la Penzé	HR03	1.04	-	1.92	0.24	-	2.00	0.25
	HR04	2.34	4.31	6.85	0.11	10.09	16.03	0.26
	RD02	3.82	4.81	4.66	0.75	18.37	17.80	2.86
	RD22	5.72	9.85	7.43	0.41	56.35	42.52	2.32
Moyenne			6.32	5.22	0.38	7.14	6.06	0.44
Gneiss de Brest	PLB35	1.42	-	5.11	0.32	-	7.26	0.45
	PLB36	1.08	0.72	3.40	0.73	0.78	3.67	0.78
	RD03	1.58	0.38	0.85	0.46	0.60	1.34	0.73
Moyenne			0.55	3.12	0.50	0.52	3.01	0.48

Tabl. 10 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin de l'Horn)

Géologie	RMP	TENEURS EN EAU BRUTES			TENEURS EN EAU PONDEREES			
		signal/bruit	Altérite %	Fissup %	Fissinf %	Altérite %	Fissup %	Fissinf %
Pélites et grès à grain moyen	CD01	0.84	-	2.62	1.01	-	2.20	0.84
	CD02	1.34	-	7.52	1.83	-	10.08	2.46
	CD03	1.1	4.50	5.60	?	4.95	6.16	?
	CD04	1.17	-	3.09	?	-	3.62	?
Moyenne			4.50	4.71	1.42	4.50	4.96	1.51

Tabl. 11 - Détermination des teneurs en eau moyenne brutes et pondérées pour chaque horizon d'altération de chaque formation géologique (bassin du Coët Dan)

? : 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

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

- **Bassin du Yar :**

- Le Leucogranite de Guerlesquin, avec des teneurs en eau de 5,9 % pour les arènes, 7,1 % pour l'horizon fissuré supérieur et 0,1 % pour l'horizon fissuré inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'arène, riche en quartz, est grossière et donc très poreuse, et l'horizon fissuré, issu de l'altération de la biotite dominante dans une roche à gros grains, a également une porosité très importante ;
- Le Leucogranite de Loguivy : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 4,0 %, 3,3 % et 1,0 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; l'arène grossière est un peu plus argileuse (altération des minéraux de muscovite et de feldspath plagioclase) et a des teneurs en eau un peu plus faibles que le Leucogranite de Guerlesquin, et l'horizon fissuré est moins riche en eau en raison d'une roche à grains plus fins ;
- Les Paragneiss alumineux viennent ensuite avec respectivement 1,3 %, 4,4 % et 1,3 % ; l'horizon fissuré étant plus riche en eau que les altérites ; cette plus forte porosité s'explique par une présence importante de biotite et une foliation fréquemment verticale de la roche ;
- Les Orthogneiss de Plougonven présentent des teneurs en eau de 2,8 %, 3,2 % et 0,7 % ; les altérites sont plus ou moins grossières et l'horizon fissuré est assez poreux puisque la roche présente une forte granulométrie et de la biotite ; la foliation de ces gneiss est moins verticale que celle des Paragneiss ;
- Les Amphibolites de Plestin-les-Grèves présentent des teneurs en eau plus faibles (0,7 %, 3,2 % et 0,9 %) ; les altérites sont argileuses (quartz rare) et la porosité sous-jacente est assurée par les gros grains de la roche ;
- Les Micaschistes et Quartzites de Ploumillau présentent de faibles teneurs en eau (0,2 %, 2,4 % et 0,5 %) dues à des altérites très argileuses (micaschistes) et une porosité faible au sein de l'horizon fissuré (quartzites à grains fins) ;
- Le Granite porphyroïde du Ponthou présente des teneurs en eau relativement faibles pour un granite (0,6 %, 1,6 % et 0,4 %) liées à une arène très argileuse (altération de la biotite et des plagioclases dominants par rapport au quartz) et un horizon fissuré peu poreux ;
- Le Leucogranite de Croaz-Illeiz présente des teneurs en eau faibles (0,5 %, 1,2 % et 0,0 %), probablement dues à la faible taille du grain de la roche (par rapport aux Leucogranites de Guerlesquin et de Loguivy) ;

- **Bassin de l'Horn :**

- Les Micaschistes de la Penzé, avec des teneurs en eau de 7,1 % pour les arènes, 6,1 % pour l'horizon fissuré supérieur et 0,4 % pour l'horizon fissuré inférieur, est la formation géologique du bassin versant qui présente les teneurs en eau les plus élevées ; l'arène est grossière et donc très poreuse, et l'horizon fissuré a également une porosité importante s'expliquant par une présence importante de biotite et une foliation quasi-verticale de la roche ;
- Les Orthogneiss de Plouéan : ce faciès vient en deuxième position avec des teneurs en eau de 3,4 %, 3,8 % et 0,4 % respectivement pour chaque horizon d'altération ; l'altération est plus ou moins grossière et l'horizon fissuré a une porosité assez forte puisque la roche présente une granulométrie fine à moyenne et beaucoup de biotite ; la foliation de ces gneiss est moins verticale que celle des Micaschistes ;

- Les Paragneiss à biotite-sillimanite viennent ensuite avec 1,3 %, 4,4 % et 1,3% ; l'horizon fissuré étant plus riche en eau que les altérites ; l'altération des Paragneiss est argileuse, et la présence importante de biotite ainsi que la foliation moyenne de la roche assurent une porosité forte à l'horizon fissuré ;
 - Les Leucogranites présentent des teneurs en eau de 2,2 %, 3,8 % et 0,4 % ; les arènes granitiques fines et peu argileuses, et l'horizon fissuré ont des teneurs en eau non négligeables liées à leur porosité moyenne ;
 - Les Gneiss de Brest présentent des teneurs en eau relativement faibles (0,5 %, 3,0 % et 0,5 %) ; l'arène est très argileuse (altération des minéraux de biotite et de feldspath plagioclase), et l'horizon fissuré est un peu plus riche en eau en raison de la faible taille des grains de la roche et de la présence parfois importante de biotite qui lui assure une certaine porosité ;
 - Les Gneiss migmatitiques de l'Horn ne présentent pas d'altérites et les formations fissurées ont des teneurs en eau moyennes (3,4 % et 0,2 %) ; ceci s'explique par une porosité moyenne provenant de la présence de biotite et du grain fin de la roche ;
- **Bassin du Coët Dan :**
 - Les Pélites et grès à grain moyen présentent des teneurs en eau relativement fortes pour des schistes (4,5 %, 5,0 % et 1,5 %), probablement dues à une forte densité de fracturation du milieu fissuré.

Les descriptions géologiques des tarières réalisées sur le bassin du Yar (cf. rapport BRGM/RP-50262-FR) confirment les conclusions, présentées ci-dessus, pour expliquer les différences de teneurs en eau des altérites des formations géologiques :

- la tarière Y4-6 décrit l'« arène moyennement grossière, très argileuse » du Granite porphyroïde du Ponthou (teneur en eau des altérites 0,6 %),
- la tarière Y2-13 décrit une « arène très grossière, très argileuse » des Amphibolites de Plestin-les-Grèves (teneur 0,7 %),
- la tarière Y3-2 décrit une « arène grossière argileuse » des Paragneiss alumineux (teneur 1,3 %),
- la tarière Y3-4 décrit l'« arène plus ou moins grossière » des Orthogneiss de Plougouven (teneur 2,8 %).

Il en est de même pour le bassin de l'Horn :

- les tarières H4-7 et H5-12 décrivent l'« arène sableuse ou sablo-argileuse » des Micaschistes de la Penzé (teneur en eau des altérites 7,1 %),
- les tarières H3-9 et H3-12 décrivent l'« arène sablonneuse » des Orthogneiss de Plouéan (teneur 3,4 %),
- la tarière H4-4 décrit une « arène argileuse » des Paragneiss à biotite-sillimanite (teneur 1,3 %),
- la tarière H6-5 décrit l'« arène marron et très argileuse » des Gneiss de Brest (teneur 0,5 %).

Sur le bassin du Coët Dan, la formation géologique, composée de Pélites (schistes fins) majoritaires par rapport aux grès à grain moyen (cf. chapitre 2.1.), a une altération sablo-argileuse contenant une quantité non négligeable d'eau (teneur 4,5 %). Le substratum schisteux fracturé sous-jacent est également très poreux (teneur 5 %).

5.2. CALCUL DE LA CARTE DE LA RESERVE 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).

Bassin versant du Yar

Sur les 58.9 km² renseignés du bassin versant du Yar (superficie 61.2 km²), les altérites (planche 25) contiennent globalement un stock d'eau souterraine assez faible totalisant environ 0.8 millions de m³, dû au faible degré d'enneigement des altérites dans la nappe, malgré des lames d'eau atteignant localement 1,11 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 26) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 13.6 millions de m³, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,79 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 27) contient un stock d'eau un peu moins important : 8.1 millions de m³, pour une lame d'eau maximale de 0,44 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 28) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 22.5 millions de m³, avec une lame d'eau maximale de 1,92 m.

Bassin versant de l'Horn

Sur les 74.9 km² renseignés du bassin versant de l'Horn (superficie 80.6 km²), les altérites (planche 29) contiennent globalement un stock d'eau souterraine totalisant environ 8.1 millions de m³, avec des lames d'eau atteignant localement 1,79 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 30) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 18.7 millions de m³, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 0,87 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 31) contient un stock d'eau un peu moins important : 11.5 millions de m³, pour une lame d'eau maximale de 0,47 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 32) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 38.3 millions de m³, avec une lame d'eau maximale de 2,50 m.

Bassin versant du Coët Dan

Sur les 12.5 km² renseignés du bassin versant du Coët Dan (superficie 12.5 km²), les altérites (planche 33) contiennent globalement un stock d'eau souterraine assez faible totalisant environ 0.3 millions de m³, dû au faible degré d'enneigement des altérites dans la nappe, malgré des lames d'eau atteignant localement 0,50 m.

L'horizon fissuré supérieur (planche 34) contient un stock d'eau nettement plus important, de l'ordre de 5.4 millions de m³, avec une lame d'eau comprise entre 0 et 1,04 m.

L'horizon fissuré inférieur (planche 35) contient un stock d'eau un peu moins important : 4.6 millions de m³, pour une lame d'eau maximale de 0,45 m.

La carte de la lame d'eau totale (planche 36) représente sur la zone d'étude un volume approximatif d'environ 10.3 millions de m³, avec une lame d'eau maximale de 1,99 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 40.65 m, et saturé sur 36.62 m en moyenne, sur le bassin du Yar ;
- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 40.56 m, et saturé sur 36.55 m en moyenne, sur le bassin de l'Horn ;
- au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 37.60 m, et saturé sur 33.70 m en moyenne, sur le bassin du Coët Dan.

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 du Yar (ordre décroissant) : les Leucogranites de Guerlesquin et de Loguivy au Sud, les Orthogneiss de Plougouven, les Amphibolites de Plestin-les-Grèves et les Paragneiss alumineux au Nord ;
- sur le bassin de l'Horn (ordre décroissant) : les Micaschistes de la Penzé au Sud et Sud-Est, les Paragneiss à biotite-sillimanite, les Orthogneiss de Plouévan au Centre et les Gneiss de Brest au Sud ;
- sur le bassin du Coët Dan, les Pélites altérées au Nord, à l'Ouest et à l'Est.

Les formations comprenant un peu moins de réserve sont :

- sur le bassin du Yar : les Micaschistes et Quartzites de Ploumillau à l'extrême Nord-Ouest du bassin, le Granite porphyroïde du Ponthou au Centre et le Leucogranite de Croaz-Illicz au Sud-Est ;
- sur le bassin de l'Horn : les Gneiss migmatitiques de l'Horn et les Leucogranites au Nord.

Répartition dans les aquifères du sous-sol

Sur les bassins versants du Yar et du Coët Dan, la répartition de l'eau souterraine au sein de l'aquifère multicouches montre qu'environ 97 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans l'horizon fissuré (61 % dans l'horizon fissuré supérieur, 36 % dans l'horizon fissuré inférieur, et 3 % dans les altérites pour le Yar, et respectivement 52 %, 45 % et 3 % pour le Coët Dan).

Ceci est principalement lié à la meilleure préservation de l'horizon fissuré, les altérites ayant été plus largement érodées sur les bassins versants du Yar et du Coët Dan (épaisseurs moyennes faibles de 1.1 m sur le Yar et 1.4 m sur le Coët Dan, 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 90 % du bassin du Yar et 84 % du bassin du Coët Dan, la surface piézométrique se situe au sein de l'horizon fissuré (contre 10 % et 16 % pour les altérites du Yar et du Coët Dan).

A l'inverse, sur le bassin versant de l'Horn cette érosion des altérites est nettement moins importante (épaisseur moyenne 3.8 m) ; la surface piézométrique étant à 30 % comprise dans les altérites. Par ailleurs, 21 % de la réserve en eau souterraine est contenue dans les altérites (49 % dans l'horizon fissuré supérieur, 30 % dans l'horizon fissuré inférieur).

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.

5.3.3. Comparaison de la réserve en eau souterraine avec la pluie efficace

Les valeurs des pluies efficaces sont assez différentes sur les 3 bassins versants (Louvrier et Margat, 1983 : moyenne annuelle 1946-1976). La figure 20 représente la répartition des pluies efficaces.

La valeur moyenne des pluies efficaces :

- sur le bassin du Yar (superficie 61.2 km²) est d'environ 370 mm ;
- sur le bassin de l'Horn (superficie 80.6 km²) est d'environ 360 mm ;
- sur le bassin du Coët Dan (superficie 12.5 km²) est d'environ 180 mm.

La pluie efficace se répartit en ruissellement et en infiltration ; seul ce dernier phénomène alimente la réserve en eau souterraine.

En considérant un ruissellement compris entre 25 % et 50 % de la pluie efficace, l'infiltration annuelle :

- est comprise entre 185 et 277.5 mm sur le bassin du Yar ;
- est comprise entre 180 et 270 mm sur le bassin de l'Horn ;
- est comprise entre 90 et 135 mm sur le bassin du Coët Dan.

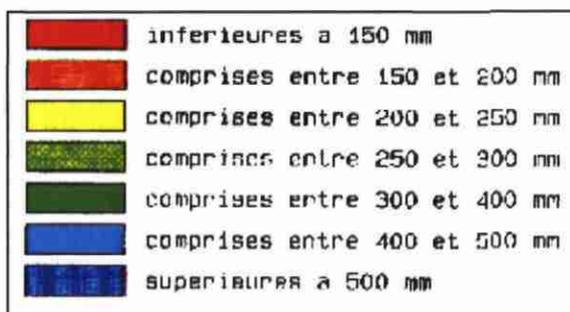
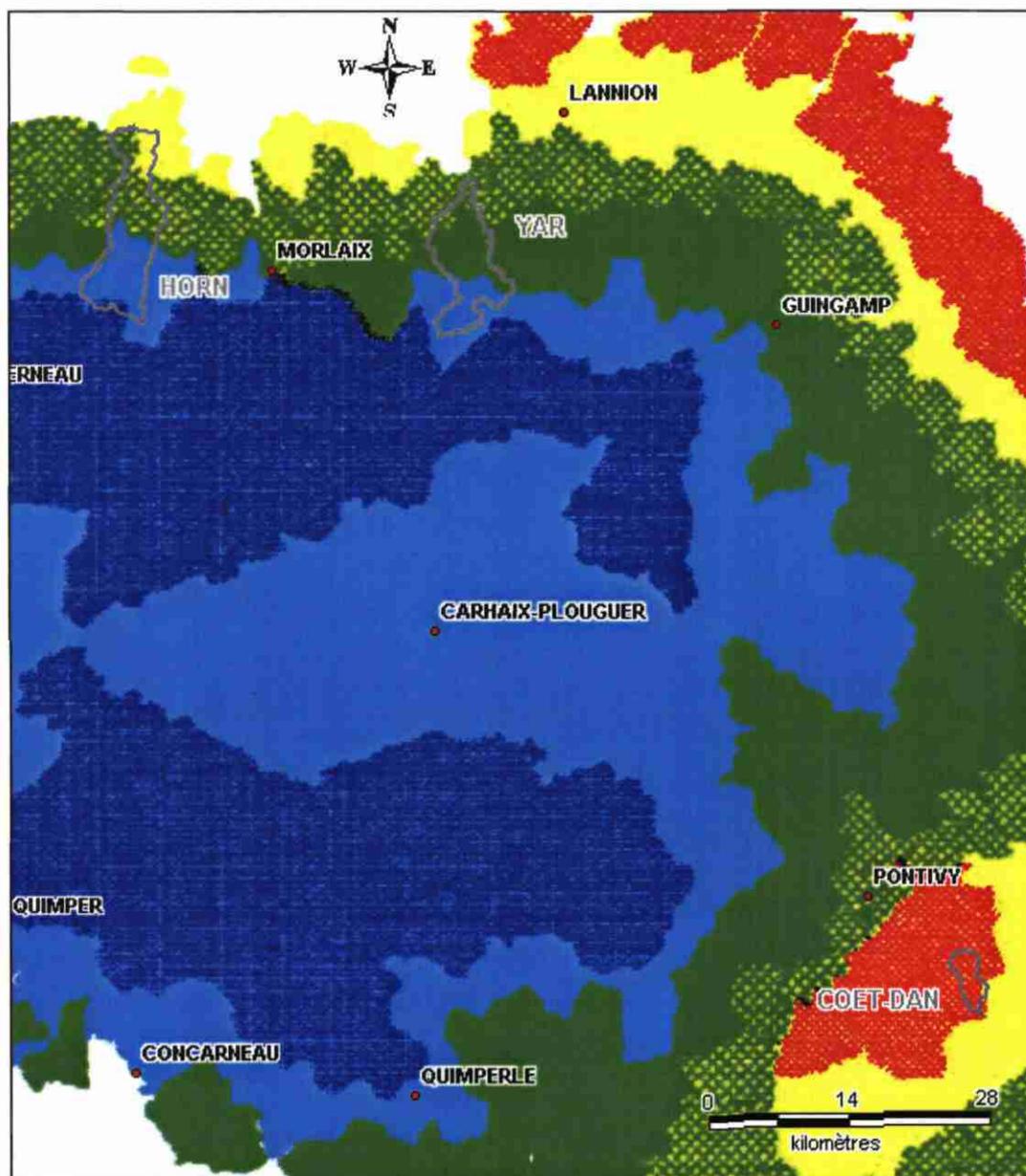


Fig. 20 - Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976)

Une modélisation globale effectuée, au moyen du logiciel Gardénia sur les 3 bassins versants (SILURES Bretagne Année 1 BRGM/RP-51481-FR, Année 2 à venir) a permis de déterminer la part ruisselée et la part infiltrée de la pluie efficace ; la part infiltrée représente :

- 244.5 mm sur le bassin du Yar au droit de la station de station de Tréduder (J2314910, superficie de 59 km²),
- 288 mm sur le du bassin de l'Horn au droit de la station de Mespaul [Pont Milin] (J3014310, superficie de 50 km²),
- et 187.5 mm sur le bassin du Coët Dan au droit de la station de Guénin [Stimoës] (J5606810, superficie de 11.9 km²).

Ce calcul de part infiltrée issue de la modélisation confirme l'ordre de grandeur précédent sur le bassin du Yar.

Pour le bassin de l'Horn, la modélisation étant réalisée sur les 50 km² amont au Sud du bassin, il est nécessaire de calculer la pluie efficace annuelle moyenne sur ces 50 km² : celle-ci est égale à 415 mm et l'infiltration annuelle est estimée entre 207 et 311 mm. Cet ordre de grandeur est confirmé par la part infiltrée issue de la modélisation : 288 mm.

Pour le bassin du Coët Dan, les pluies efficaces de la figure 20 sont sans doute sous-estimées.

L'intégration des volumes d'eau par unité de surface sur l'ensemble des mailles valorisées de chaque bassin versant (58.9 km² pour le Yar, 74.9 km² pour l'Horn, et 12.5 km² pour le Coët Dan) permet de calculer la lame d'eau moyenne stockée dans l'aquifère (pour l'ensemble de l'horizon fissuré et des altérites). Celle-ci est de l'ordre de :

- 384,3 mm sur le bassin du Yar ;
- 510,6 mm sur le bassin de l'Horn ;
- 857,1 mm sur le bassin du Coët Dan.

En considérant la pluie efficace moyenne égale à environ :

- 240 mm sur le bassin du Yar ;
- 240 mm sur le bassin de l'Horn ;
- 155 mm sur le bassin du Coët Dan ;

et une lame d'eau rapportée :

- sur les 61.2 km² du bassin du Yar et estimée à environ 400 mm ;
- sur les 80.6 km² du bassin de l'Horn et estimée à environ 550 mm ;
- sur les 12.5 km² du bassin du Coët Dan et estimée à environ 857 mm.

la hauteur d'eau représenterait :

- un peu moins de deux années d'infiltration moyenne (exactement 1 an et 8 mois) sur le bassin du Yar ;
- un peu moins de deux années et demi d'infiltration moyenne (exactement 2 ans et 4 mois) sur le bassin de l'Horn ;
- environ cinq années et demi d'infiltration moyenne (exactement 5 ans et 6 mois) sur le bassin du Coët Dan.

Ces temps peuvent être plus élevés si l'on prend en compte une participation de l'eau souterraine plus profonde que l'horizon fissuré inférieur caractérisé par la méthode.

6. Utilisations des cartes

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

6.1.1. Mise en évidence de zones favorables

Un des buts de ce projet est de rechercher, sur les 3 bassins versants, les régions les plus favorables à la recherche d'eau souterraine, après avoir identifié la structure des aquifères.

Les rapports d'étapes des années 1 et 2 de ce projet (R 40412, R 40764 et BRGM/RP-50262-FR) ont 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 1.2.).

Ces rapports mettent en évidence l'intérêt des aquifères situés :

- dans les formations situées à l'aval du bassin du Yar, avec par intérêt décroissant : les Amphibolites de Plestin-les-Grèves, les formations gneissiques (Paragneiss alumineux et Orthogneiss de Plougonven), et les Micaschistes et quartzites de Ploumillau,
- dans toutes les formations géologiques présentes sur le bassin de l'Horn, avec par intérêt décroissant : Gneiss de Brest au Sud, Gneiss migmatitique de l'Horn et Orthogneiss de Plouénan au Nord, Paragneiss à biotite-sillimanite et Micaschistes de la Penzé au Sud.

Les résultats statistiques des autres formations géologiques présentaient un intérêt moins important : Granite porphyroïde et Leucogranites du Yar, Leucogranites de l'Horn, et Pélites du Coët Dan.

La répartition des réserves en eau souterraine (teneur en eau et épaisseur d'aquifère, cf. chapitre 5) et la perméabilité relative des formations géologiques, caractérisée par l'intérêt hydrogéologique des formations (cf. ci-dessus), font apparaître des zones d'intérêt pour la recherche d'eau souterraine (cf. planches 28, 32 et 36) :

- les formations situées à l'aval du bassin du Yar : Orthogneiss de Plougonven, Paragneiss alumineux et Amphibolites de Plestin-les-Grèves ;
- les formations situées dans la moitié Sud du bassin de l'Horn : Micaschistes de la Penzé au Sud et Sud-Est, Paragneiss à biotite-sillimanite et Orthogneiss de Plouénan au Centre, et Gneiss de Brest au Sud ;
- sur le bassin du Coët Dan, les Pélites altérées au Nord, à l'Ouest et à l'Est.

Parmi les formations géologiques présentes sur les 3 bassins versants, ces formations présentent des réserves en eau souterraine qui semblent intéressantes et des perméabilités favorables à l'exploitation des eaux souterraines ; les perméabilités sont faibles au sein des altérites et plus élevées dans l'horizon fissuré.

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

A l'inverse, au Sud du bassin du Yar, les Leucogranites de Guerlesquin et de Loguivy sont les formations les plus riches en eau souterraines (cf. chapitre 5.3.2.) mais elles ont des perméabilités faibles (l'étude statistique, réalisée à partir des données de forages d'eau disponibles, fournit des résultats médiocres) ne permettant pas une mobilisation facile des réserves en eau souterraine présentes dans le milieu altéré et dans l'horizon fissuré.

6.1.2. Recommandations

Dans ce contexte de socle métamorphique et plutonique altéré, la hauteur d'eau maximale est observée dans les secteurs où le degré de préservation du profil d'altération et la position relative de la surface piézométrique permettent d'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 de recherche d'eau souterraine.

La recherche en eau souterraine passe donc par l'identification de ces fractures drainantes généralement subverticales qui relève des techniques classiques de prospection hydrogéologique en domaine de socle : photo-interprétation, prospection géophysique (électrique et/ou électromagnétique), prospection émanométrique par le radon par exemple.

Les meilleurs débits devraient être obtenus dans des fractures ouvertes traversant les zones de ressource en eau maximale.

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

6.2.1. Estimation des temps de transfert

Estimation des temps de vidange de l'aquifère

La cartographie de la réserve en eau souterraine effectuée sur chacun des 3 bassins versants (cf. chapitre 5.2.) a été extraite sur les zones suivantes (cf. figure 21) :

- bassin versant du Yar au droit de la station de Tréduder (J2314910, superficie de 59 km²),
- bassin versant de l'Horn au droit de la station de Mespaul [Pont Milin] (J3014310, superficie de 50 km²),
- et bassin versant du Coët Dan au droit de la station de Guénin [Stimoës] (J5606810, superficie de 11.9 km²).

Sur le bassin du Yar modélisé, la réserve totale de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) représente, sur 98 % du bassin (57.8 km²), un volume approximatif d'environ 21.6 millions de m³, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,384 m.

Sur le bassin de l'Horn modélisé, la réserve totale de l'aquifère représente, sur 99 % du bassin (49.5 km²), un volume approximatif d'environ 34.6 millions de m³, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,688 m.

Sur le bassin du Coët Dan modélisé, la réserve totale de l'aquifère représente, sur 100 % du bassin (12.5 km²), un volume approximatif d'environ 10.3 millions de m³, ramené à une lame d'eau moyenne de 0,857 m.

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

- 22 016 521 m³ sur les 59 km² du bassin versant modélisé du Yar,
- 34 702 570 m³ sur les 50 km² du bassin versant modélisé de l'Horn,
- 10 297 600 m³ sur les 12.5 km² du bassin versant modélisé du Coët Dan.

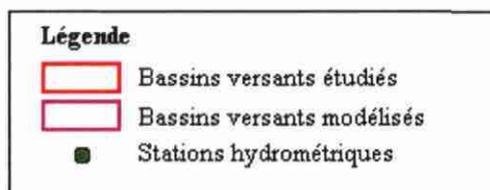
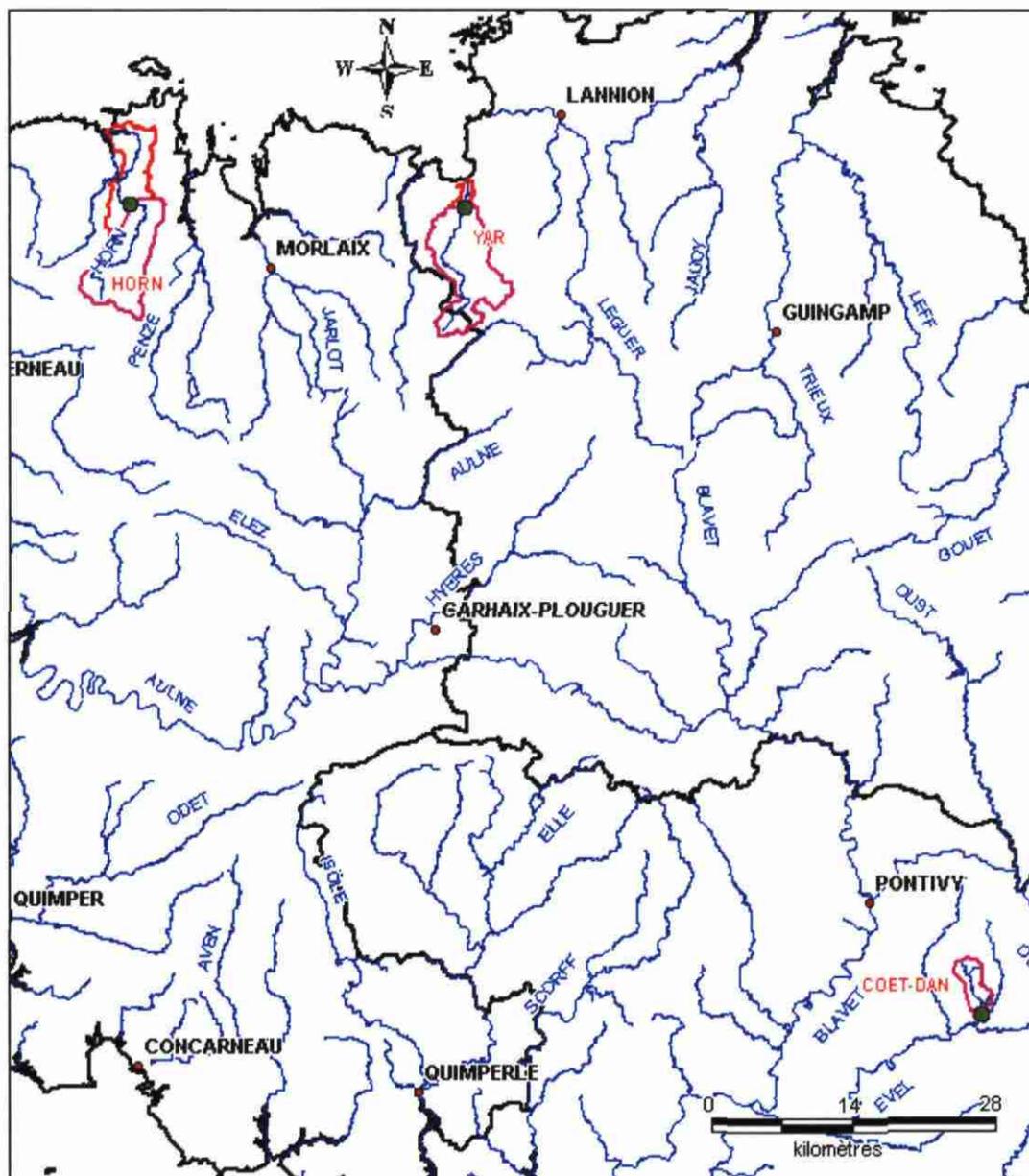


Fig. 21 - Localisation des bassins versants modélisés

Les rapports SILURES Bretagne Année 1 (BRGM/RP-51481-FR) et Année 2 (à venir) présentent les résultats de la décomposition des hydrogrammes des rivières du Yar, de l'Horn et du Coët Dan en écoulement rapide et lent (écoulement souterrain) suite à une modélisation réalisée avec le logiciel Gardénia.

Ces modélisations 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 (cf. tableaux 12, 13 et 14).

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	67.1	144.7	211.8	12496200	8537300
1997	63.2	132.2	195.4	11528600	7799800
1998	133.6	182	315.6	18620400	10738000
1999	212.1	295.8	507.9	29966100	17452200
2000	256.3	313.4	569.7	33612300	18490600
			Moyenne	21244720	12603580

Tabl. 12 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Yar

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1991	127.7	215.5	343.2	17160000	10775000
1992	42.8	156.5	199.3	9965000	7825000
1993	147.8	246.1	393.9	19695000	12305000
1994	182.8	322.2	505	25250000	16110000
1995	298.7	368.2	666.9	33345000	18410000
1996	101.8	244.1	345.9	17295000	12205000
1997	52.4	157.2	209.6	10480000	7860000
1998	195.4	289	484.4	24220000	14450000
1999	283.6	405.1	688.7	34435000	20255000
2000	224.8	358.5	583.3	29165000	17925000
			Moyenne	22101000	13812000

Tabl. 13 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant de l'Horn

Année hydraulique	Débit rapide mm/an	Débit souterrain mm/an	Débit calculé mm/an	Volume total m3	Volume souterrain m3
1996	67.5	139.6	207.1	2464490	1661240
1997	46.1	88.2	134.3	1598170	1049580
1998	115.3	187.9	303.2	3608080	2236010
1999	111.7	203.1	314.8	3746120	2416890
			Moyenne	2854215	1840930

Tabl. 14 - Evaluation des volumes d'eaux souterraines renouvelables annuellement sur le bassin versant du Coët Dan

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

- 12 603 580 m³ pour le Yar (période 1996-2000),
- 13 812 000 m³ pour l'Horn (période 1991-2000),
- 1 840 930 m³ pour le Coët Dan (période 1996-1999).

Ces volumes moyens renouvelés annuellement peuvent être comparés aux volumes des réserves en eau souterraine existantes sur chaque bassin modélisé (22 016 521 m³ sur le Yar, 34 702 570 m³ sur l'Horn et 10 297 600 m³ sur le Coët Dan) 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 du Yar est donc vidangée en 1 an et 9 mois,
- celle de l'Horn se vidange plus lentement en 2 ans et 6 mois,
- tandis que celle du Coët Dan se vidange nettement plus lentement en 5 ans et 7 mois.

Ces chiffres calculés sur les bassins modélisés sont cohérents avec ceux estimés sur les bassins versants entiers dans le chapitre 5.3.3.

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 4, 5 et 6 avec l'altitude de la surface du sol (fournie par les MNT) permet de calculer la profondeur moyenne de la nappe qui est de 4.03 m sur le Yar, 4.58 m sur l'Horn et 3.96 m sur le Coët Dan.

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 11 mois pour le Yar,
- 2 ans et 2 mois pour l'Horn,
- 1 an et 10 mois pour le Coët Dan.

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 4 ans (3 ans et 8 mois) pour le Yar,
- un peu moins de 5 ans (4 ans et 8 mois) pour l'Horn,
- un peu moins de 7 ans et demi (7 ans et 5 mois) pour le Coët Dan.

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 28, 32 et 36 permet de déduire que, parmi les aquifères présents dans les formations géologiques étudiées :

- c'est l'aquifère contenu dans les Leucogranites de Guerlesquin qui contribue le plus aux débits d'étiage du Yar,
- pour l'Horn, c'est celui des Micaschistes de la Penzé,
- et ce sont les aquifères des Pérites altérées qui contribuent le plus aux débits d'étiage du Coët Dan.

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).

Les rapports d'étapes des années 1 et 2 de ce projet (R 40412, R 40764 et BRGM/RP-50262-FR) ont 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 1.2.).

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 par deux en raison d'un nombre insuffisant de forages) 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 15 détaille ce classement.

BV	Géologie	Nbre forages	Q/P (m ³ /h/m)
Yar	Granite porphyroïde Ponthou et Leucogranites	31	0.129
Yar	Paragneiss alumineux et Orthogneiss Plougonven	62	0.175
Yar	Amphibolites Plestin et MicaS Quartzites Ploumillau	9	0.303
Horn	Leucogranites	75	0.229
Horn	Paragneiss à biotite et Micaschistes Penzé	70	0.231
Horn	Gneiss migmatitique de l'Horn et Orthogneiss Plouéan	90	0.303
Horn	Gneiss Brest	25	0.439
Coët-Dan	Pélites et grès à grain moyen	192	0.130

Tabl. 15 - Classement des formations géologiques en fonction de Q/P

La formation rassemblant les Amphibolites de Plestin-les-Grèves et les Micaschistes et Quartzites de Ploumillau n'est pas suffisamment renseignée (nombre de forages < 20), les résultats sur cette formation seront donc à prendre sous réserve (capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration).

Les planches 4, 5 et 6 représentant l'altitude de la surface piézométrique ont permis de calculer, pour chacun des 3 bassins versants, 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 surface piézométrique.

Sur les bassins versants du Yar et de l'Horn, 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 6-7 m). Ces observations sont cohérentes avec le schéma de la figure 16.

Sur le bassin versant du Coët-Dan, la situation précédente s'inverse en raison de la faible perméabilité des terrains : la surface piézométrique est plus proche du sol au niveau des plateaux (à 2.5 m) en raison d'une infiltration difficile des eaux de pluie.

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 37, 38 et 39, utilisent les critères du tableau 16.

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

Tabl. 16 - Détail des pôles caractérisant la capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration

Sur le bassin du Yar, la planche 37 montre un découpage amont/aval du bassin versant : la partie aval a une forte capacité d'absorption des eaux d'infiltration (notamment au Nord) et la partie amont est plus « imperméable » à ces eaux.

Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont (par ordre décroissant) : les Micaschistes et quartzites de Ploumilliau et les Amphibolites de Plestin-Les-Grèves au Nord-Ouest, les Orthogneiss de Plougonven au Centre-Ouest du bassin versant. Ces formations 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) : tous les Leucogranites (Guerlesquin, Loguivy et Croaz-Illicz) au Sud-Est, le Granite porphyroïde du Ponthou et le Monzogranite de Tonquédec au Centre, et le Paragneiss alumineux au Nord du bassin. Ces formations ont un niveau de nappe proche du sol (notamment au droit des vallées) et une perméabilité moyenne à faible par rapport aux autres formations ; la capacité de remplissage du sous-sol est atteinte et le ruissellement peut intervenir.

La planche 38 montre que quasiment tout le bassin de l'Horn a une forte capacité d'absorption des eaux d'infiltration.

Les seules petites zones moins favorables aux eaux d'infiltration sont situées dans les vallées des formations géologiques suivantes : Micaschistes de la Penzé, Paragneiss à biotite et Leucogranites (faible épaisseur de la zone non saturée et perméabilité moyenne à faible par rapport aux autres formations).

Les formations géologiques acceptant le plus les eaux d'infiltration sont (par ordre décroissant) : les Orthogneiss de Plouénan au Centre, les Gneiss migmatitiques de l'Horn au Nord, les Gneiss de Brest au Sud, puis les Micaschistes de la Penzé et les Paragneiss à biotite au Sud du bassin versant.

La planche 39 montre que tout le bassin du Coët Dan n'a qu'une faible capacité d'absorption des eaux d'infiltration (le ruissellement peut être majoritaire).

Perspectives

Les planches 37, 38 et 39 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 trois cours d'eau, 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).

Conclusion

Ce rapport final présente la synthèse des travaux menés dans le cadre du projet « Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse ».

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,
- rédaction de ce rapport final.

La cartographie de la répartition spatiale des réserves en eau souterraine, acquise 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 trois bassins versants, 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.

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. (2002) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Bassins versants : le Yar (22), l'Horn (29), le Coët Dan (56) - Rapport BRGM/SGR BRETAGNE N°03/01, 6 pages, 1 annexe

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

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

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.

TALBO H., J.-M. OUTIN (1998) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Secteur Côtes d'Armor (bassin du Yar) - Rapport BRGM R 40412, 22 p., 2 tabl, 3 annexes

TALBO H., J.-M. OUTIN, F. TRAUTMANN (1999) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Bassins versants : le Yar (Côtes d'Armor), l'Horn (Finistère), le Coët Dan (Morbihan) - Rapport BRGM R 40764, 62 p., 4 tabl., 28 figures, 4 cartes

TALBO H. (2000) - Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse - Bassins versants : le Yar (Côtes d'Armor), l'Horn (Finistère), le Coët Dan (Morbihan) - Rapport BRGM RP-50262-FR, 47 p., 8 tabl., 8 figures, 6 cartes

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)

Annexe 1

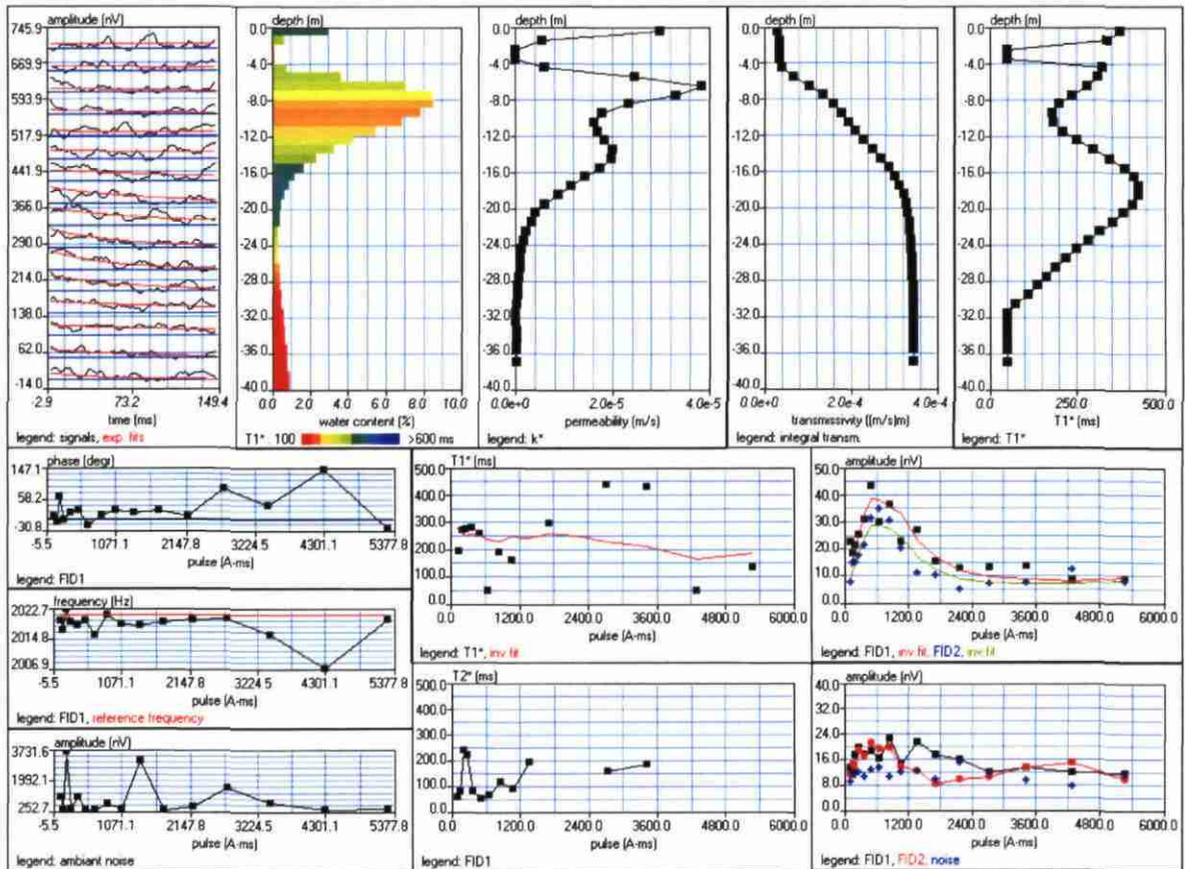
**Données et résultats d'interprétation des sondages RMP
Inversion automatique en quarante couches**

Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR
 Date: 23.01.2002; Time: 09:30

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya01.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 148.4 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.42; EN/IN = 2.24
 fitting error: FID1 = 19.50%; FID2 = 18.27 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

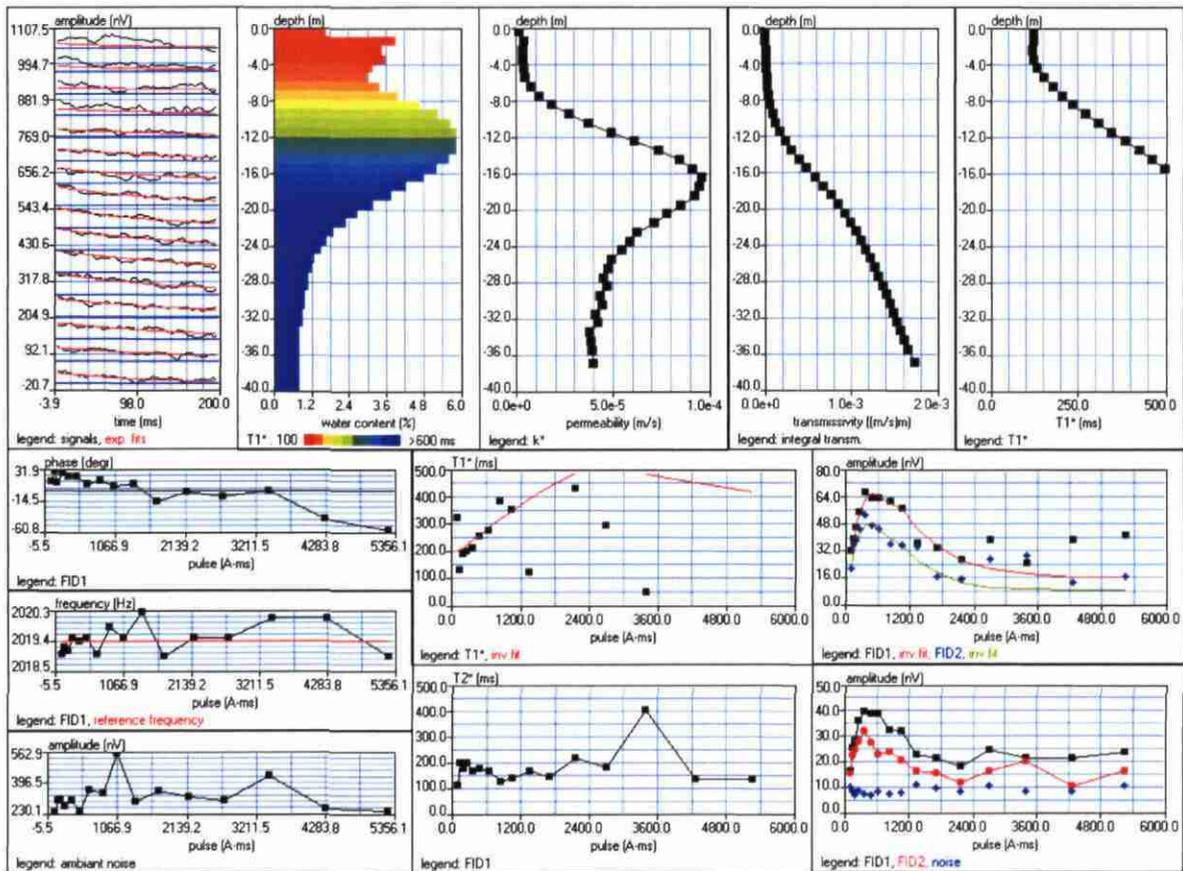


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR
 Date: 23.01.2002; Time: 15:50

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya02.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 = 3.33; EN/IN = 1.65
 fitting error: FID1 = 21.02%; FID2 = 22.01 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

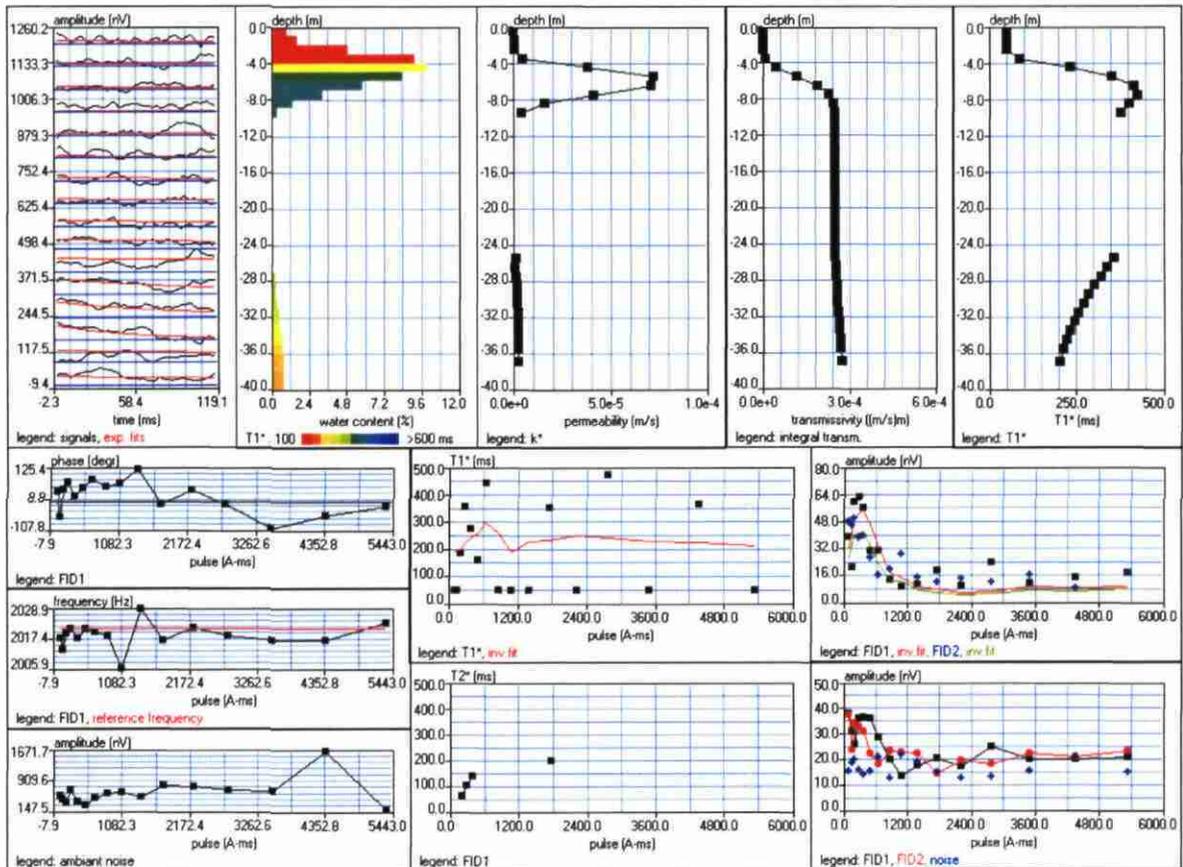


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR
 Date: 22.01.2002; Time: 15:30

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya03.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 118.8 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.53; EN/IN = 3.31
 fitting error: FID1 = 30.57%; FID2 = 33.46 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

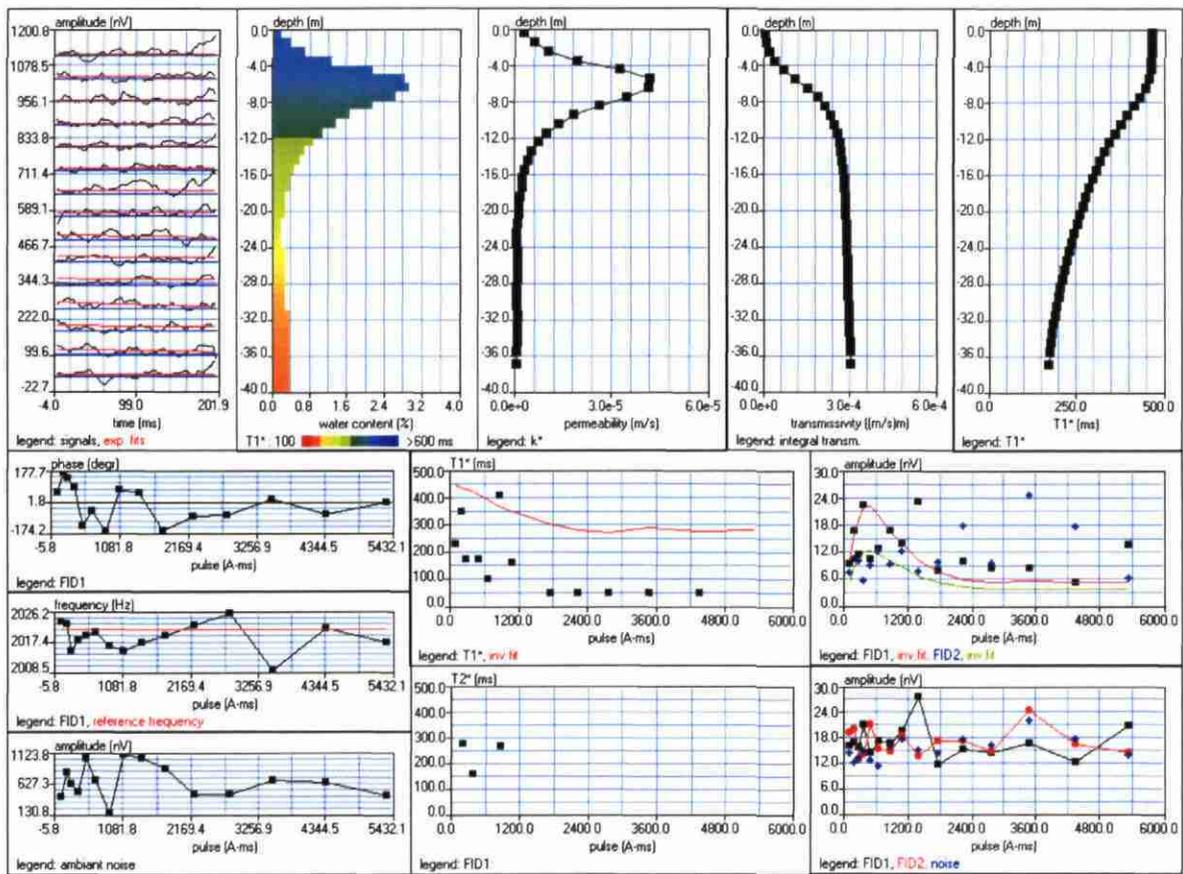


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR
 Date: 22.01.2002; Time: 10:10

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya04.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 199.9 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.13; EN/IN = 3.02
 fitting error: FID1 = 42.89%; FID2 = 64.58 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09



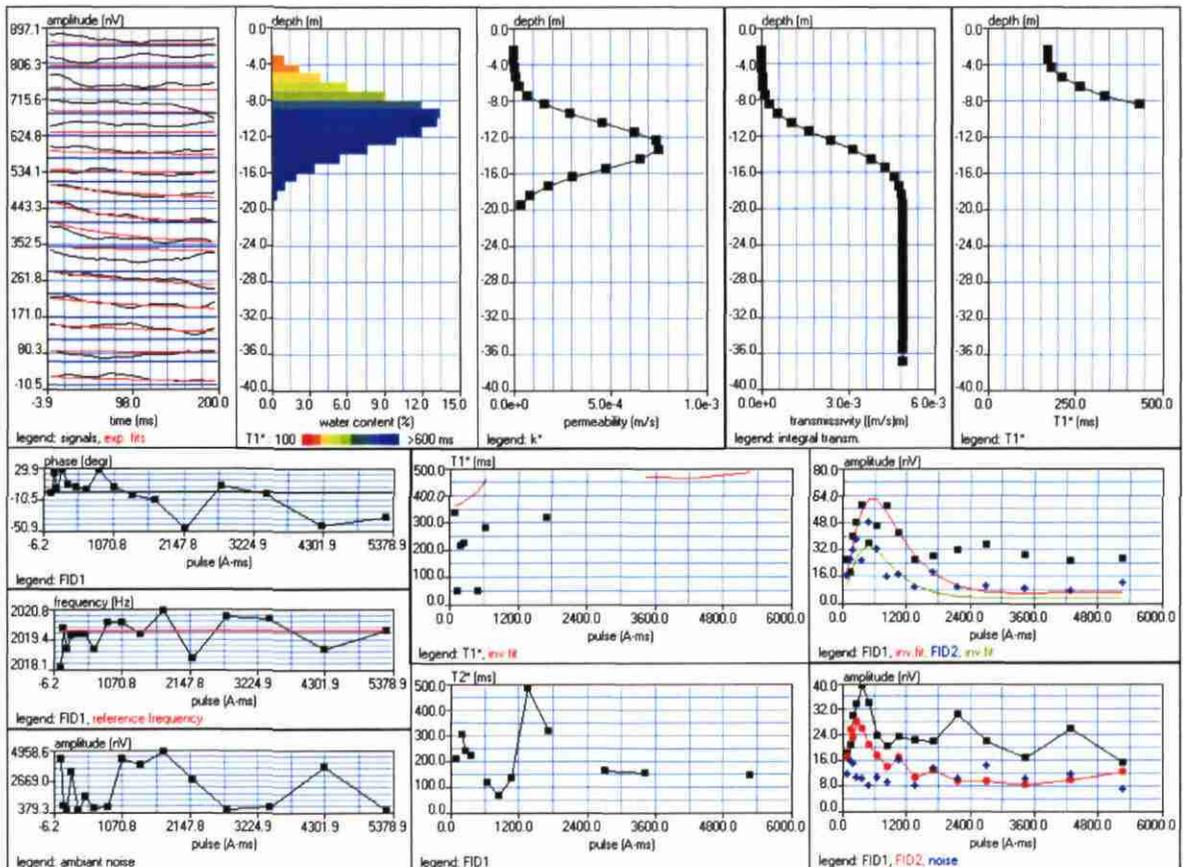
Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR

Date: 19.01.2002; Time: 17:56

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya05.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47413.15 nT

filtering window = 198.0 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 2.21; EN/IN = 2.25
 fitting error: FID1 = 40.87%; FID2 = 33.61 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR

Date: 21.01.2002; Time: 10:21

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya06.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 = 178.3 ms

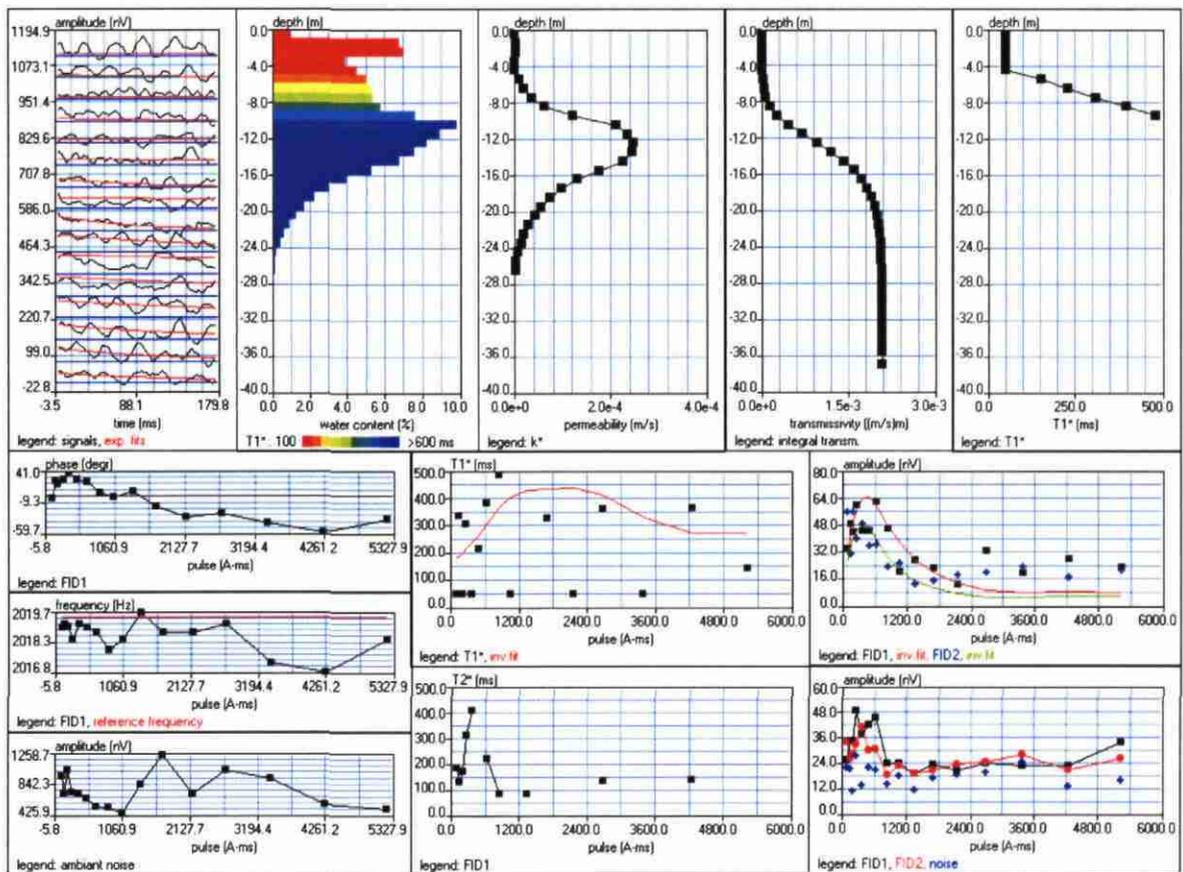
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.68; EN/IN = 3.60

fitting error: FID1 = 32.30%; FID2 = 36.17 %

param. of regular.: modeling

permeability constant $C_p = 7.00e-09$



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR YA08

Loop: 4 - 37.5 Date: 12.02.2003 Time: 15:23

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya08.inp

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

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 199.9 ms

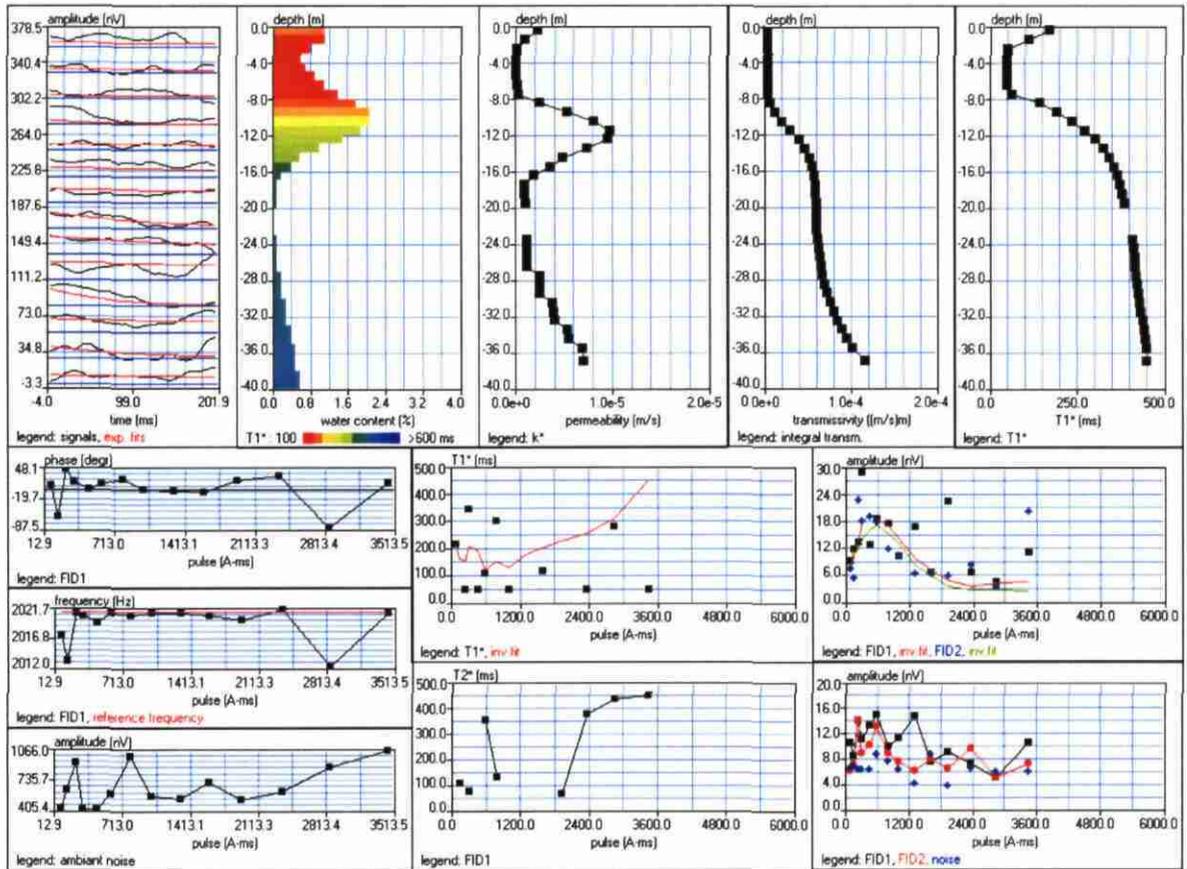
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.64; EN/IN = 1.29

fitting error: FID1 = 43.50%; FID2 = 46.62 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR YA09

Loop: 4 - 37.5 Date: 13.02.2003 Time: 09:28

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya09.inp

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

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47450.70 nT

filtering window = 158.3 ms

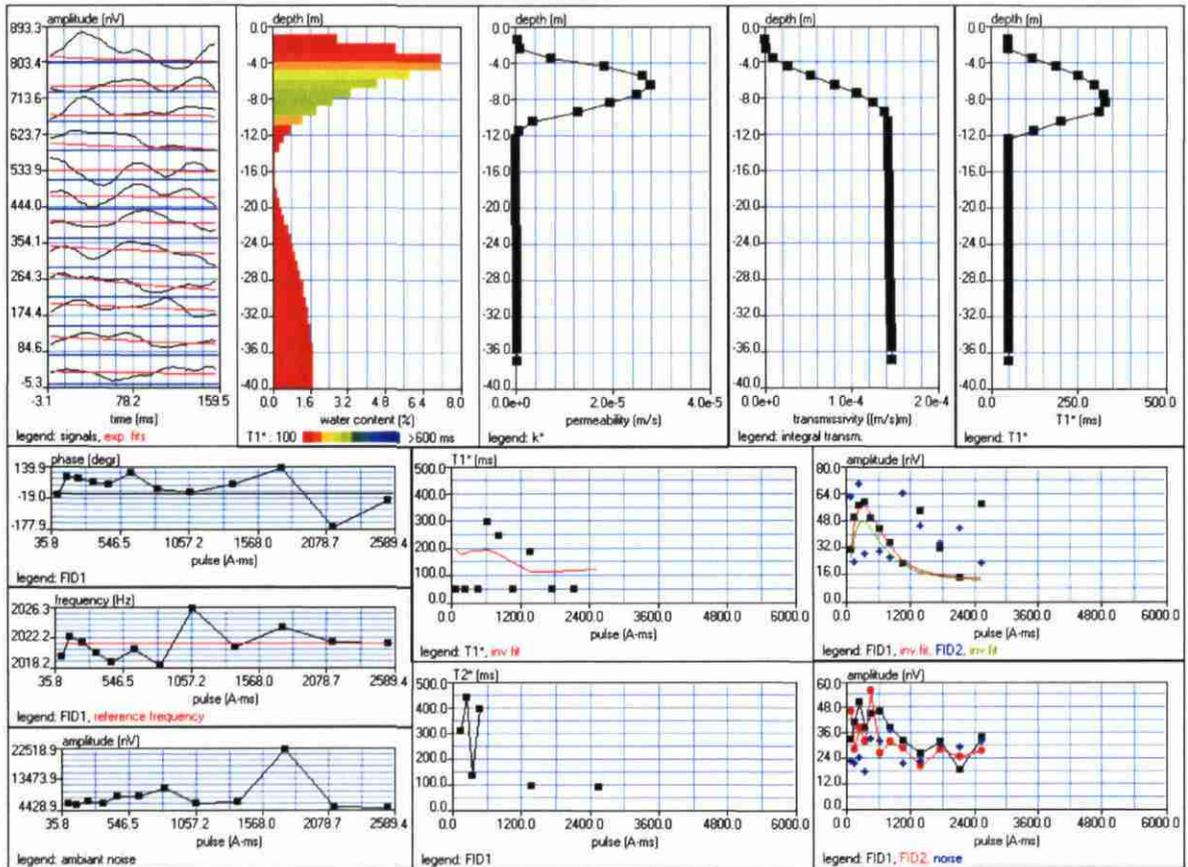
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.35; EN/IN = 5.36

fitting error: FID1 = 38.29%; FID2 = 52.27 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



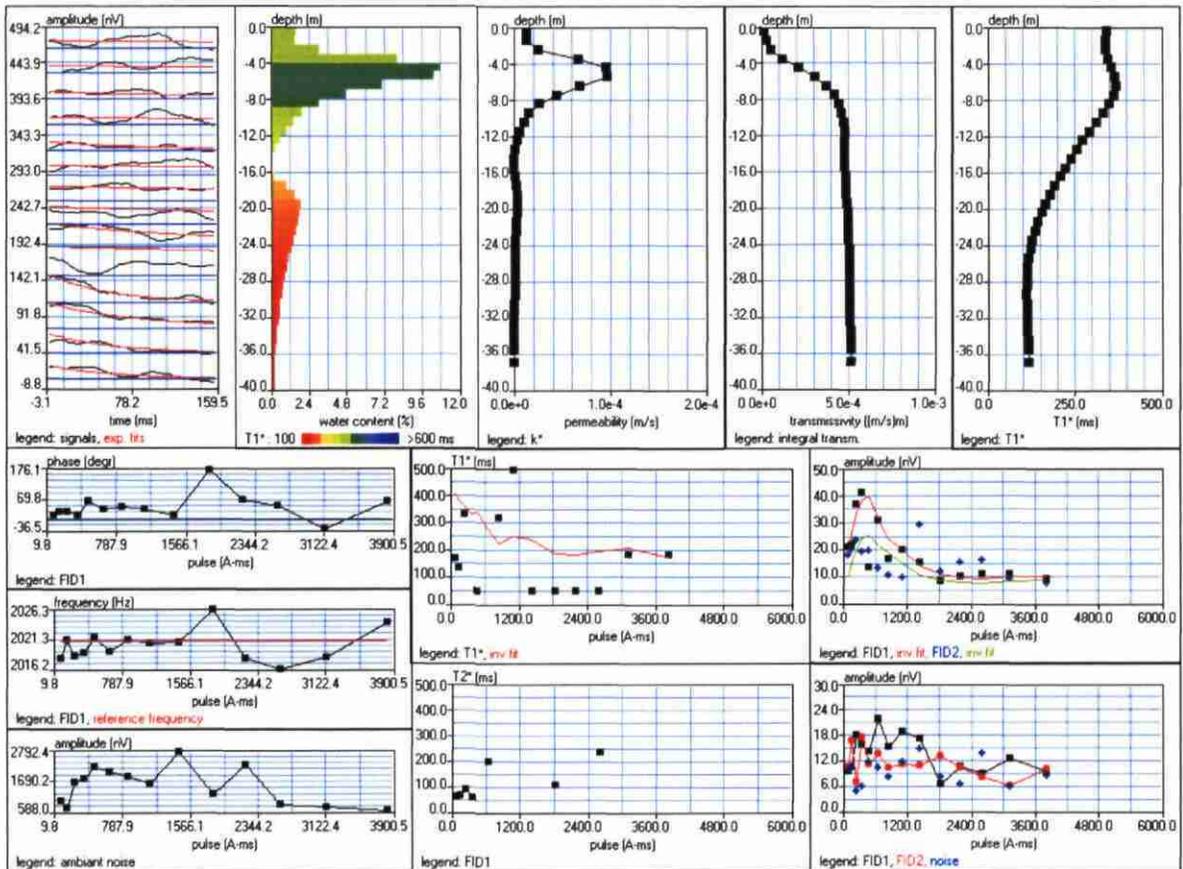
Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR YA10

Loop: 4 - 37.5 Date: 13.02.2003 Time: 16:40

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya10.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 158.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.46; EN/IN = 1.86
 fitting error: FID1 = 35.34%; FID2 = 44.15 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DU YAR YA11

Loop: 4 - 37.5 Date: 14.02.2003 Time: 08:22

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Ya11.inp

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

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47450.70 nT

filtering window = 158.3 ms

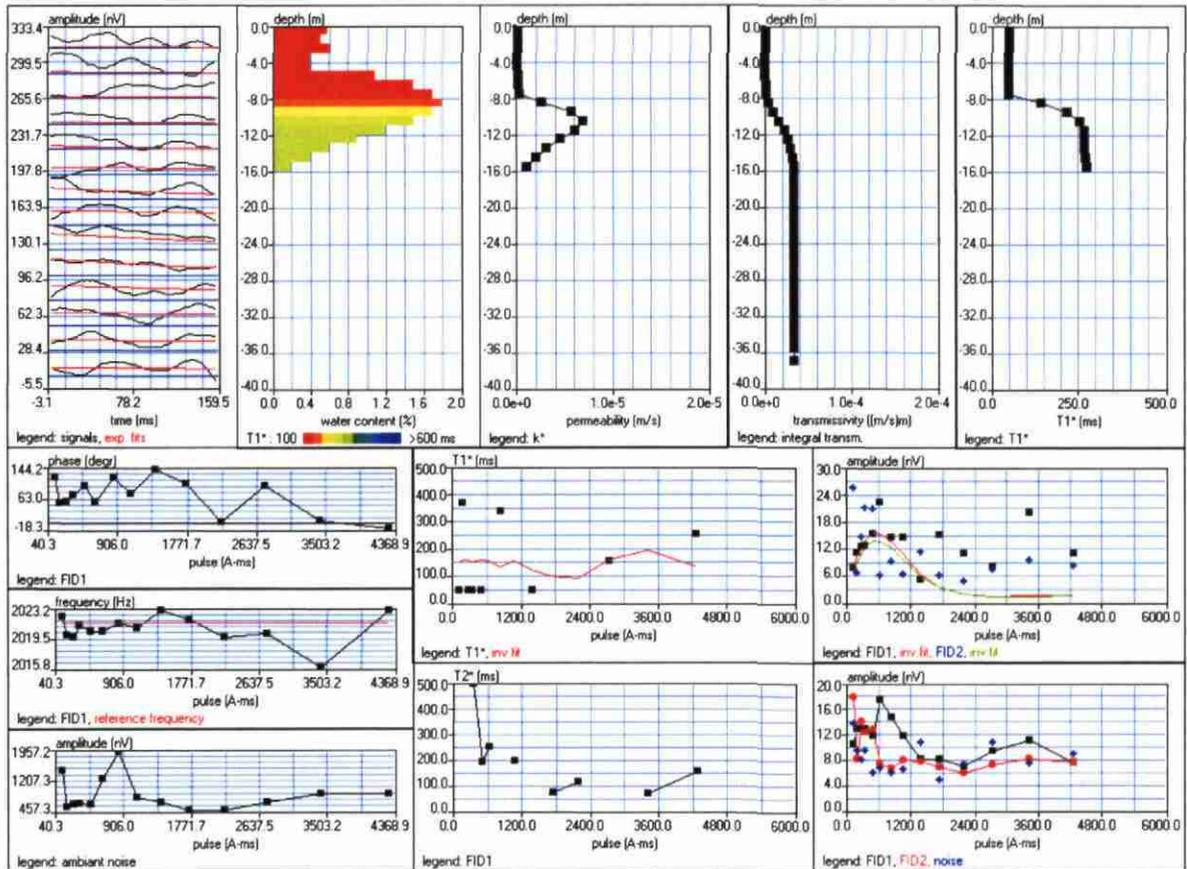
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.36; EN/IN = 1.65

fitting error: FID1 = 52.99%; FID2 = 56.34 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN

Date: 24.01.2002; Time: 11:22

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr01.inp

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

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47413.15 nT

filtering window = 198.0 ms

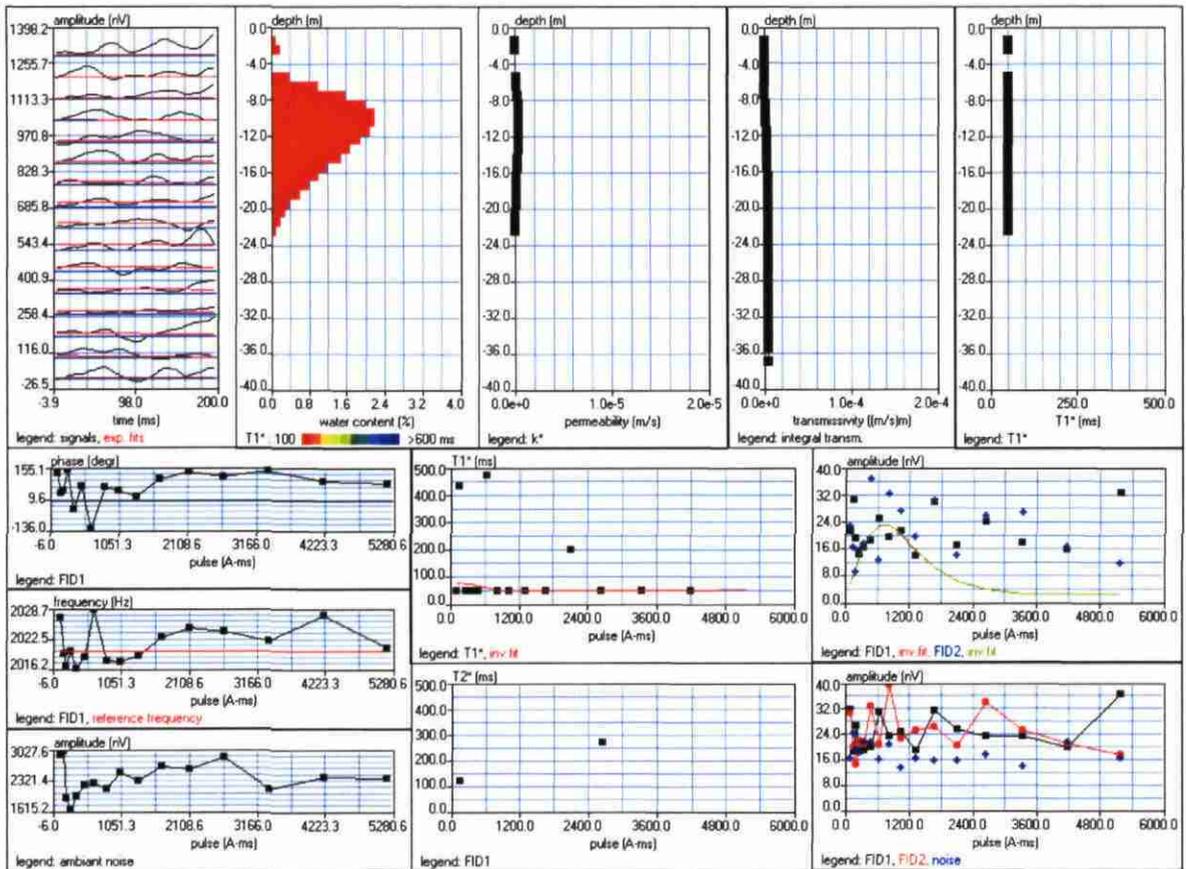
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.36; EN/IN = 3.60

fitting error: FID1 = 63.33%; FID2 = 57.66 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN

Date: 24.01.2002; Time: 16:31

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr02.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

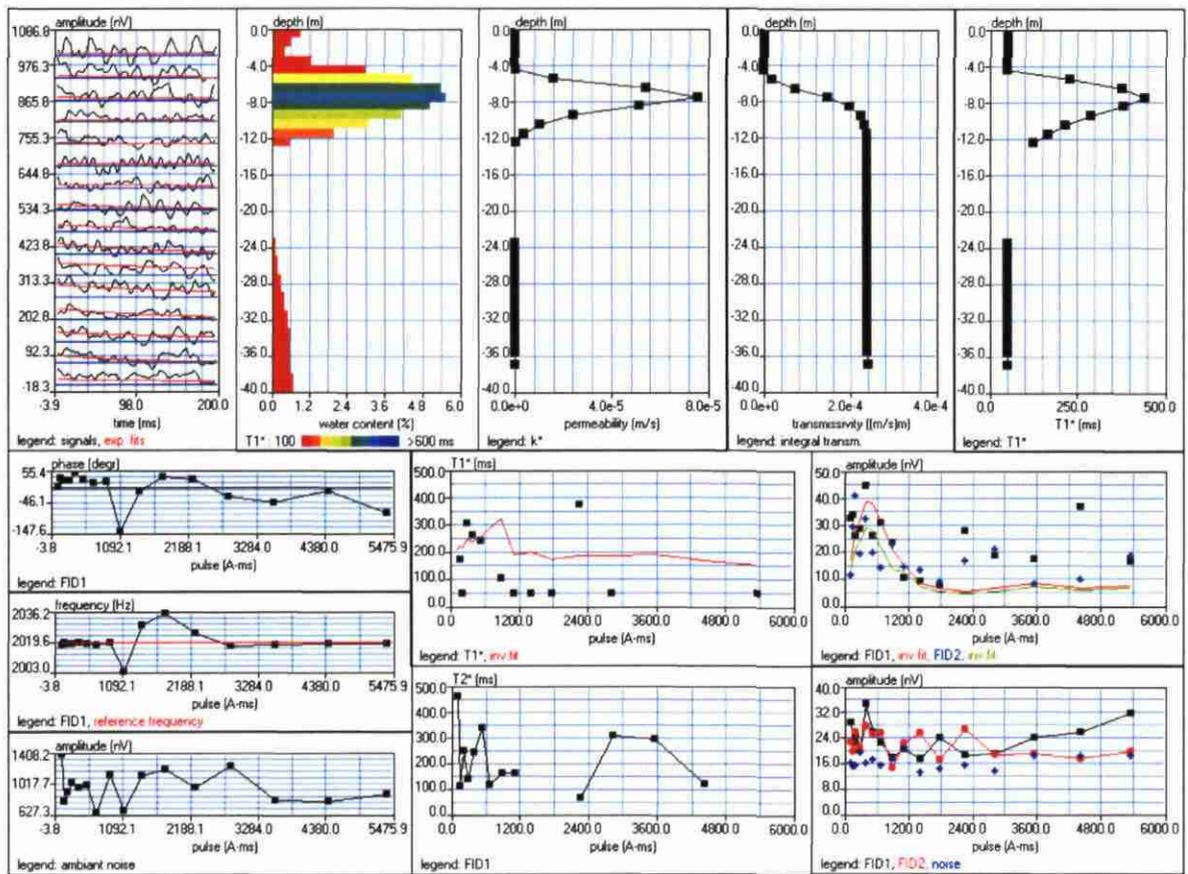
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.44; EN/IN = 3.27

fitting error: FID1 = 45.45%; FID2 = 44.23 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN

Date: 28.01.2002; Time: 16:00

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr03.inp

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

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 64 degr, magnitude= 47441.31 nT

filtering window = 118.8 ms

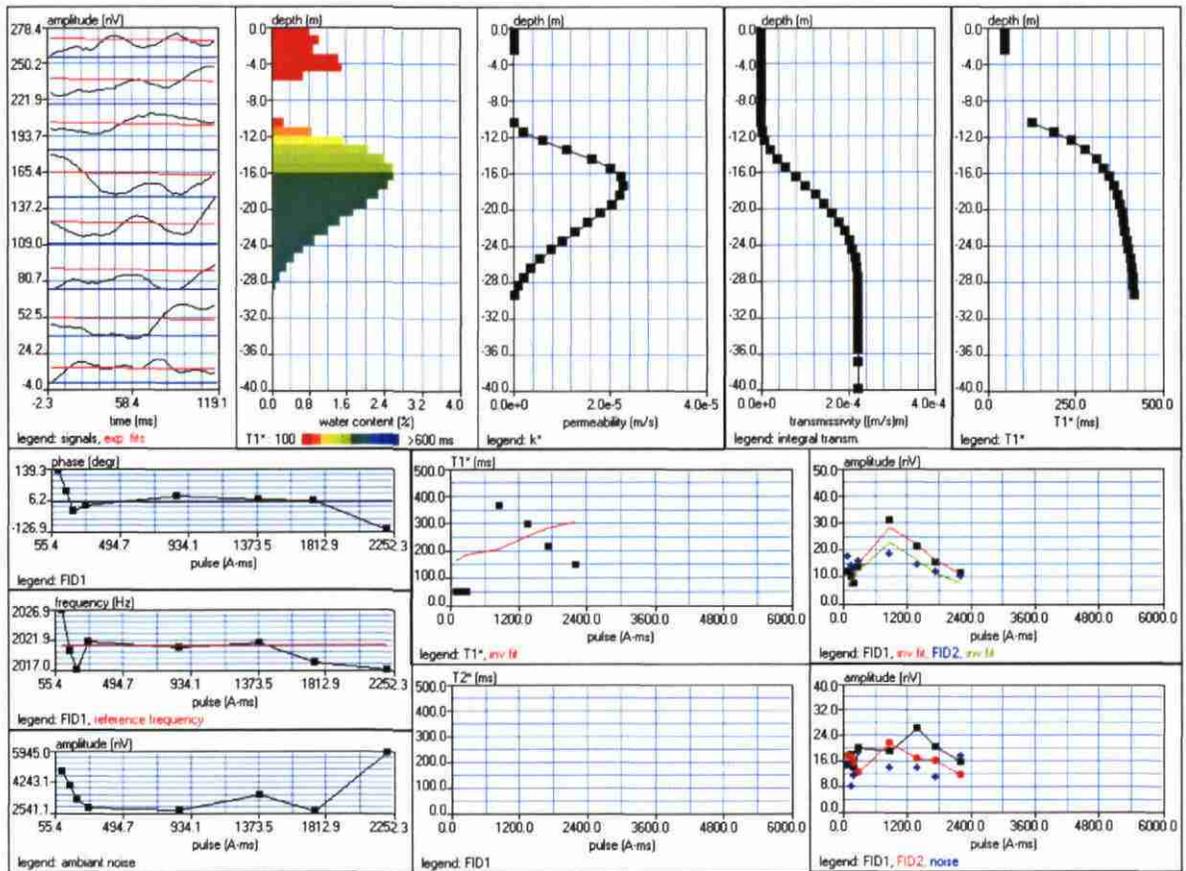
time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.36; EN/IN = 2.70

fitting error: FID1 = 13.74%; FID2 = 34.83 %

param. of regular.: E, T2* = 76.3; T1* = 1.192

permeability constant Cp = 7.00e-09



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN

Date: 29.01.2002; Time: 09:37

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr04.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

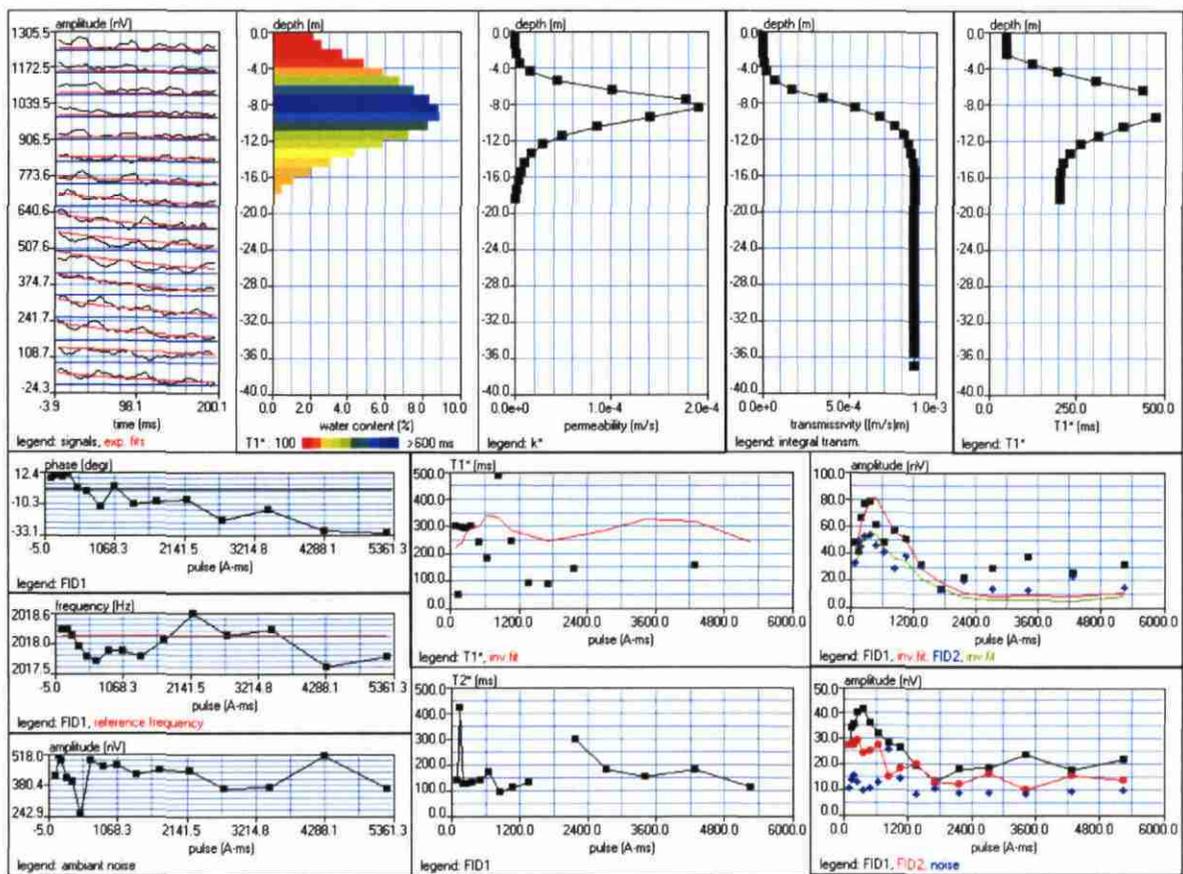
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.34; EN/IN = 2.31

fitting error: FID1 = 29.48%; FID2 = 21.98 %

param. of regular.: modeling

permeability constant $C_p = 7.00e-09$



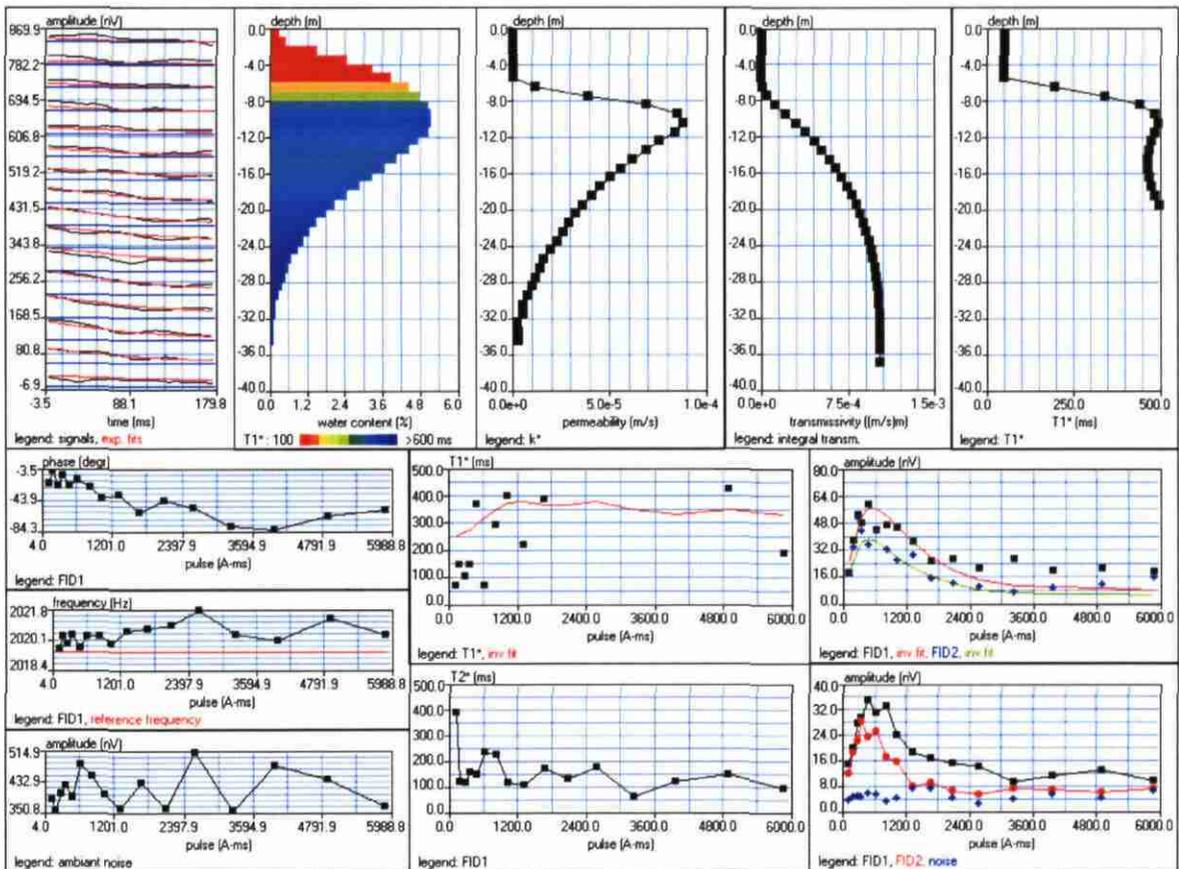
Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN HR05

Loop: 4 - 37.5 Date: 14.02.2003 Time: 13:03

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr05.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 = 178.3 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 4.14; EN/IN = 0.97
 fitting error: FID1 = 21.89%; FID2 = 23.56 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$



Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN HR06

Loop: 4 - 37.5 Date: 15.02.2003 Time: 05:19

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr06.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

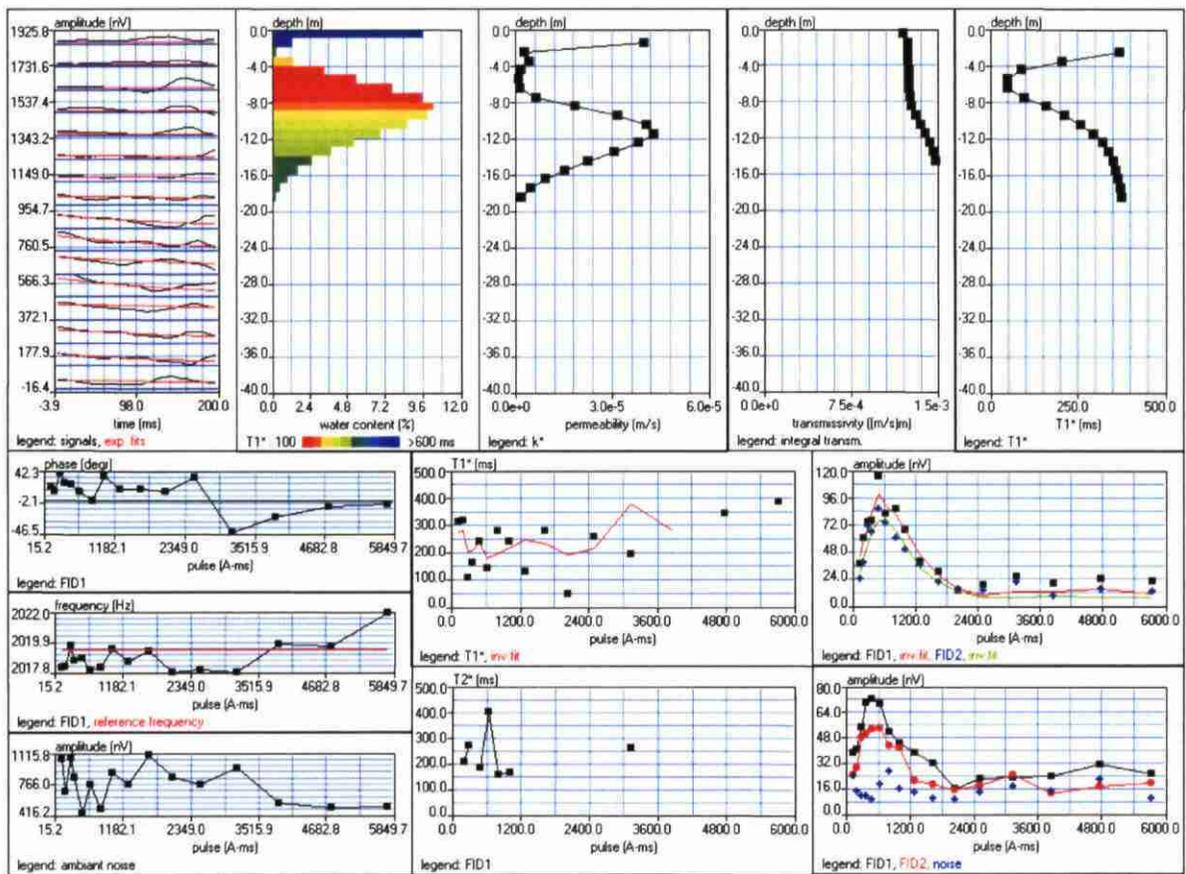
time constant = 15.00 ms

average S/N = 2.73; EN/IN = 3.00

fitting error: FID1 = 13.82%; FID2 = 15.06 %

param. of regular.: modeling

permeability constant Cp = 7.00e-09



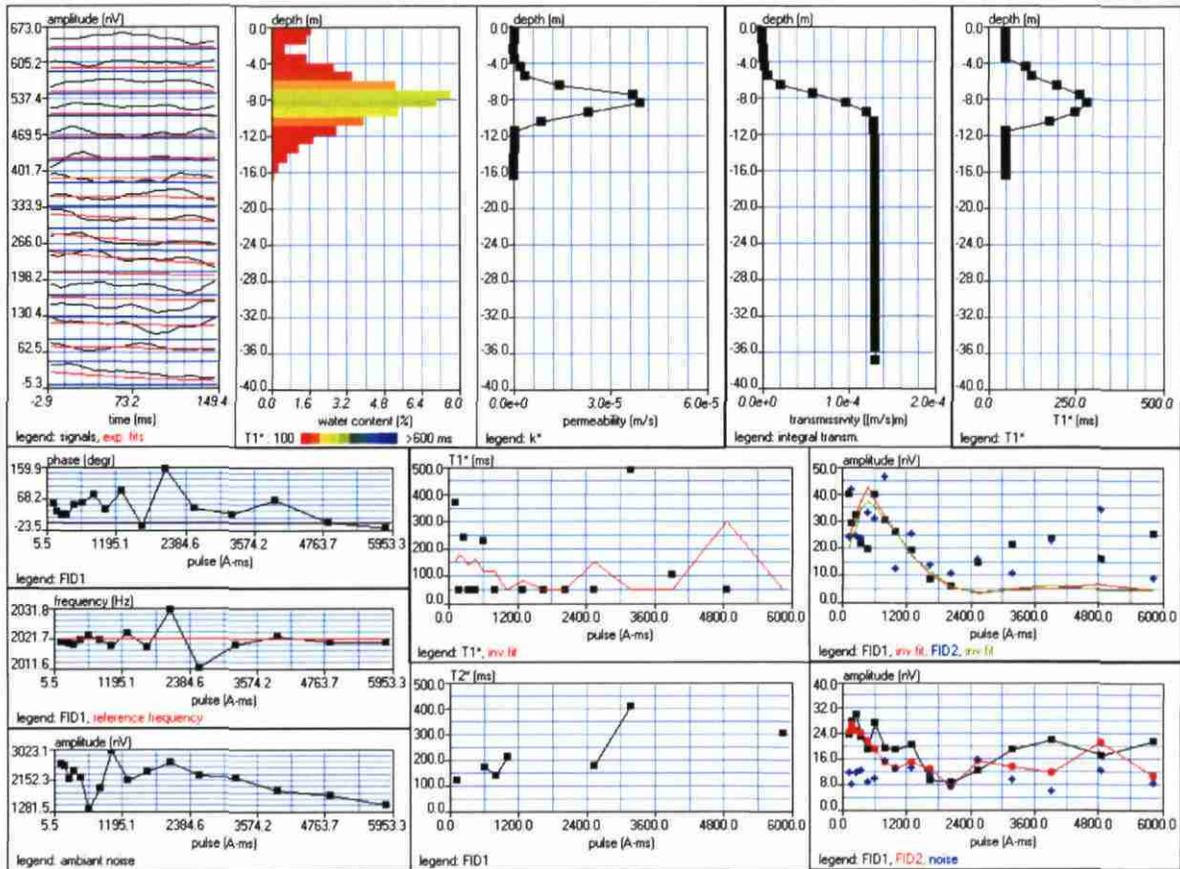
Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT DE L'HORN HR07

Loop: 4 - 37.5 Date: 15.02.2003 Time: 10:43

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Hr07.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 = 148.4 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.85; EN/IN = 2.14
 fitting error: FID1 = 48.43%; FID2 = 47.07 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

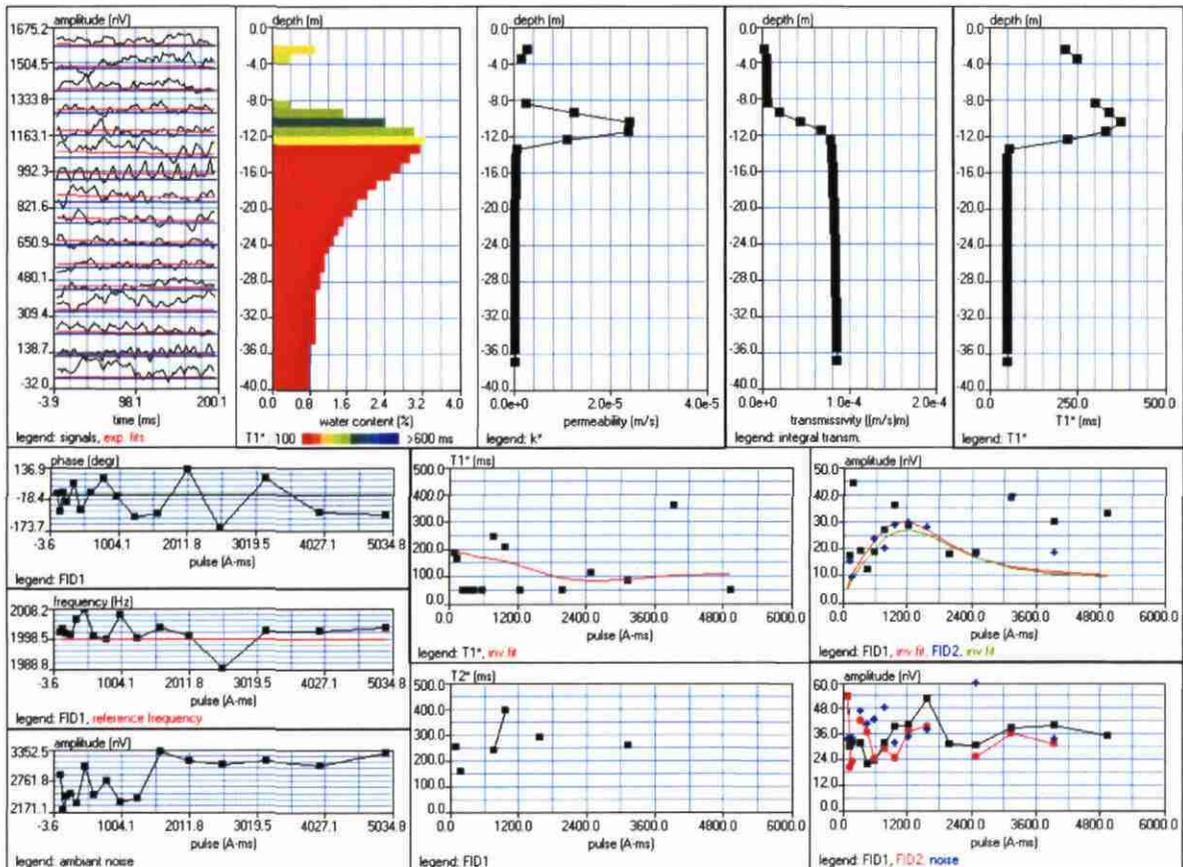


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT COET DAN
 Date: 15.01.2002; Time: 15:13

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Cd01.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 = 198.2 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 0.81; EN/IN = 9.17
 fitting error: FID1 = 66.01%; FID2 = 81.79 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

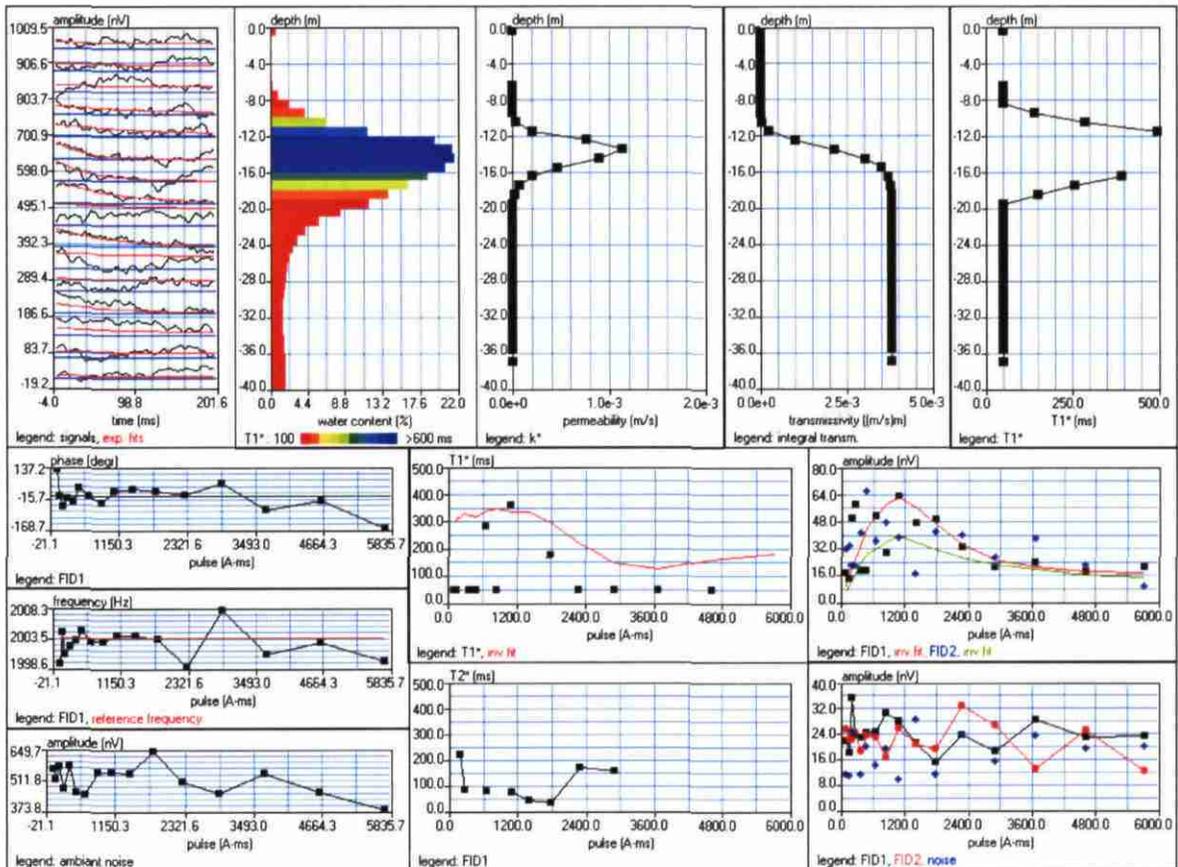


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT COET DAN
 Date: 15.01.2002; Time: 10:32

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Cd02.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47032.86 nT

filtering window = 199.6 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.34; EN/IN = 3.57
 fitting error: FID1 = 42.29%; FID2 = 45.07 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

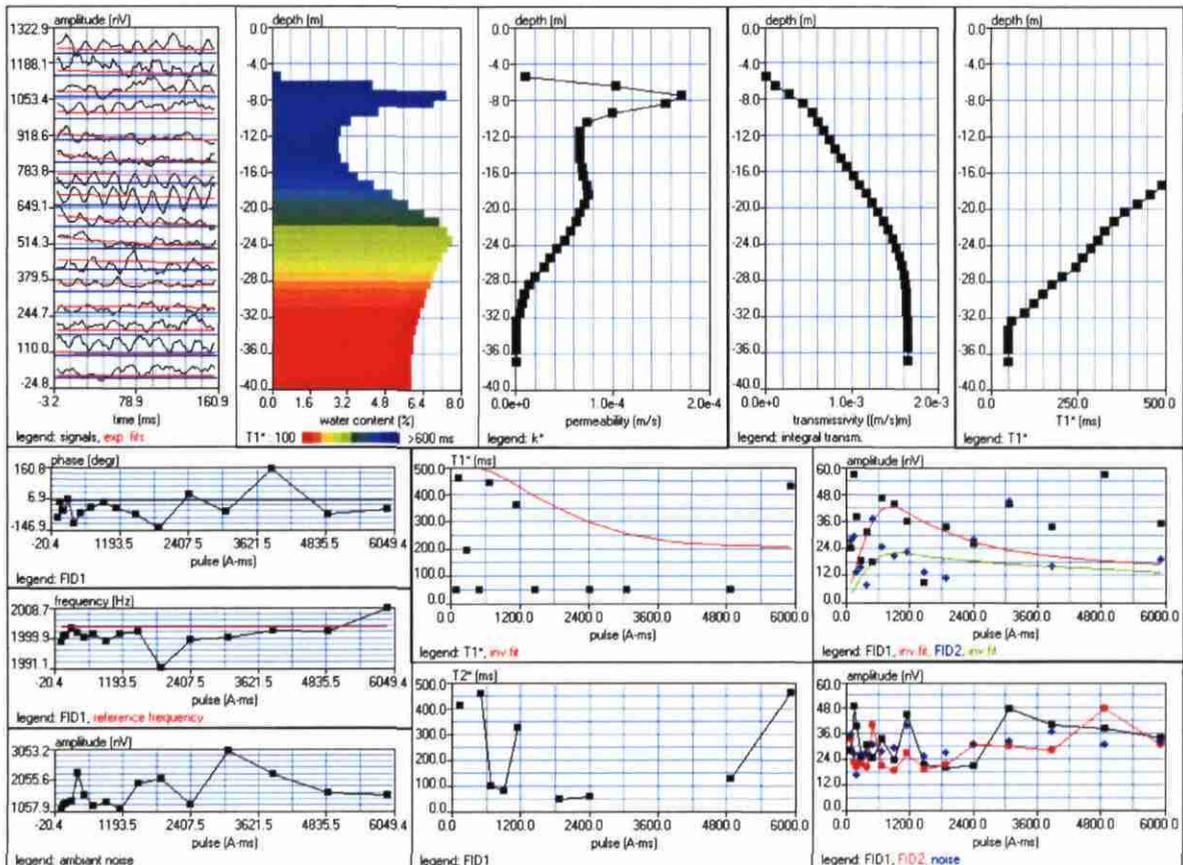


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT COET DAN
 Date: 14.01.2002; Time: 16:57

NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Cd03.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47023.47 nT

filtering window = 159.7 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.10; EN/IN = 5.87
 fitting error: FID1 = 53.72%; FID2 = 63.07 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant Cp = 7.00e-09

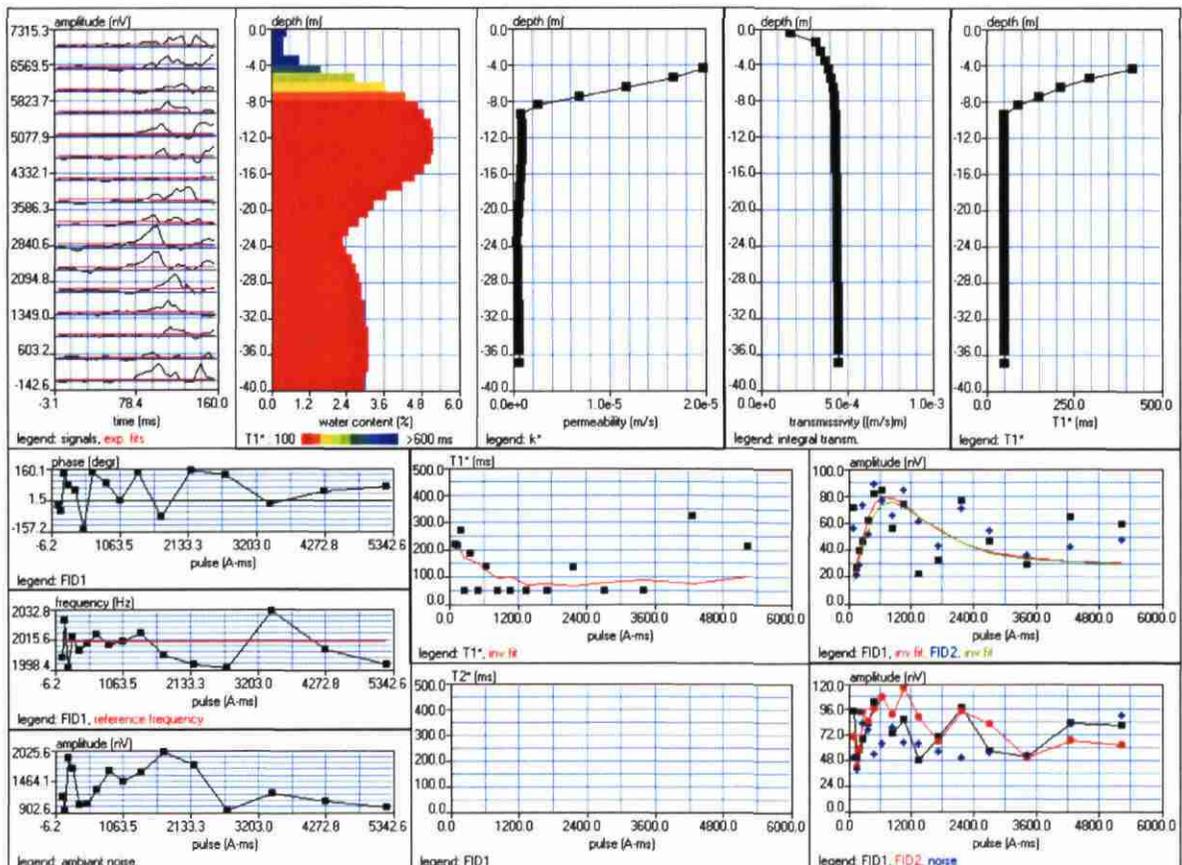


Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
 BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)

Site: BASSIN VERSANT COET DAN
 Date: 16.01.2002; Time: 09:46

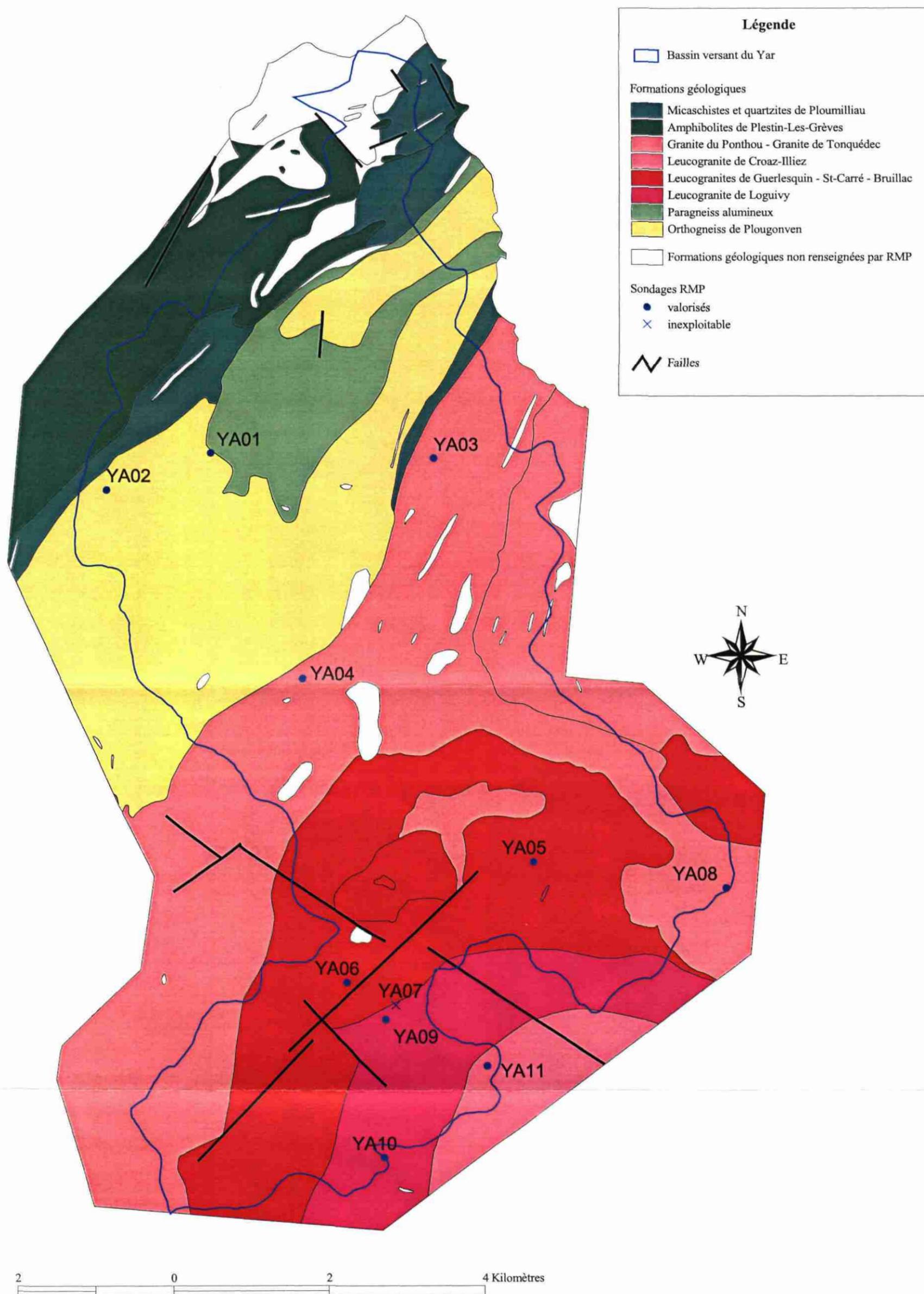
NUMIS data set: C:\BRETAGNE\MOD40C\Cd04.inp
 matrix: C:\bretagne2003\matrice\Silures.mrm
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 64 degr, magnitude= 47298.12 nT

filtering window = 158.8 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 1.17; EN/IN = 13.11
 fitting error: FID1 = 39.32%; FID2 = 28.71 %
 param. of regular.: modeling
 permeability constant $C_p = 7.00e-09$

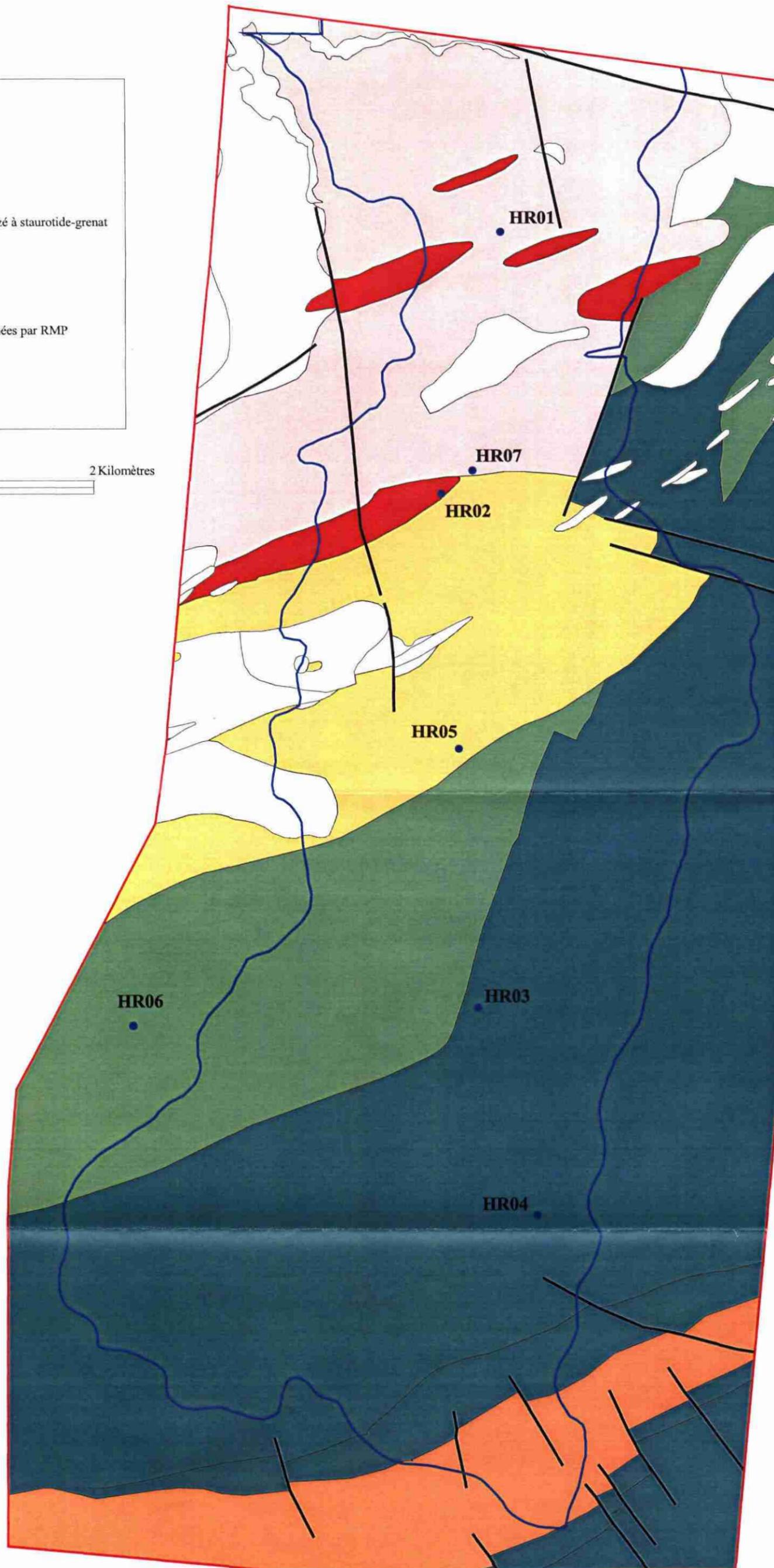
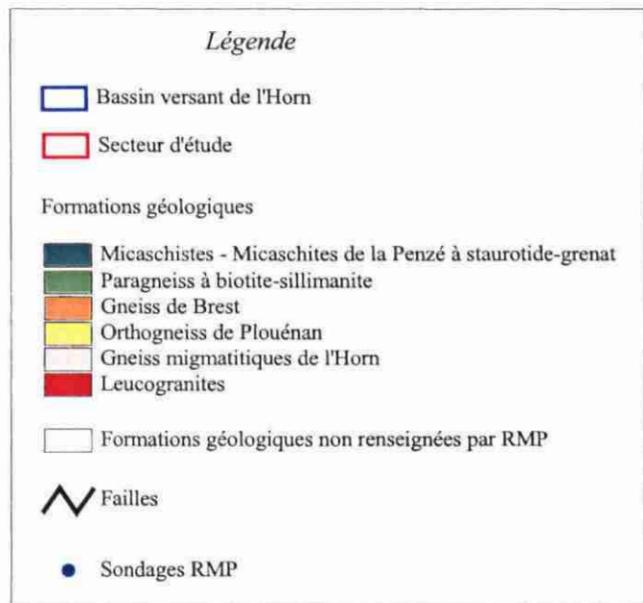


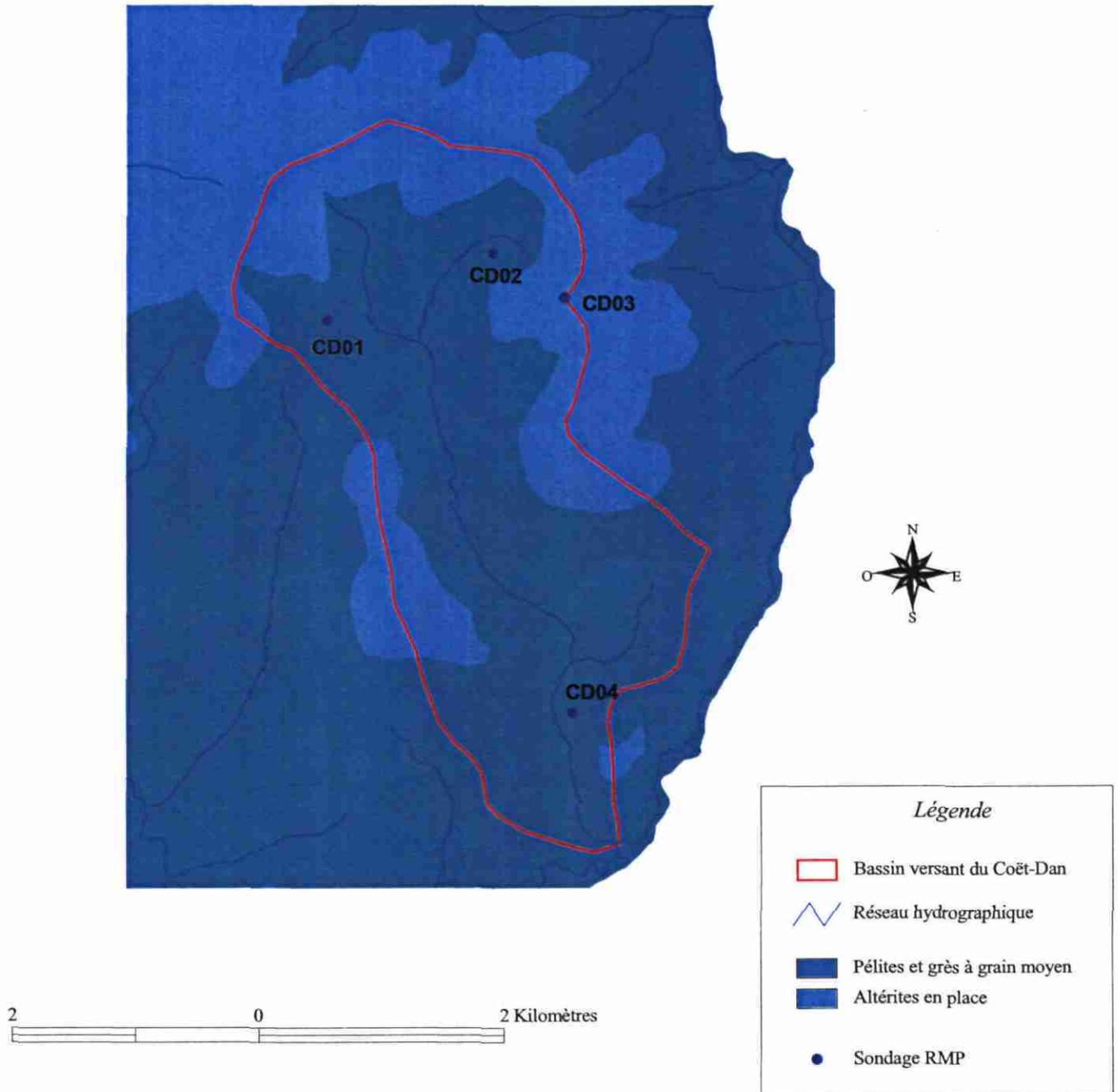
Annexe 2

Planches A3 et A4

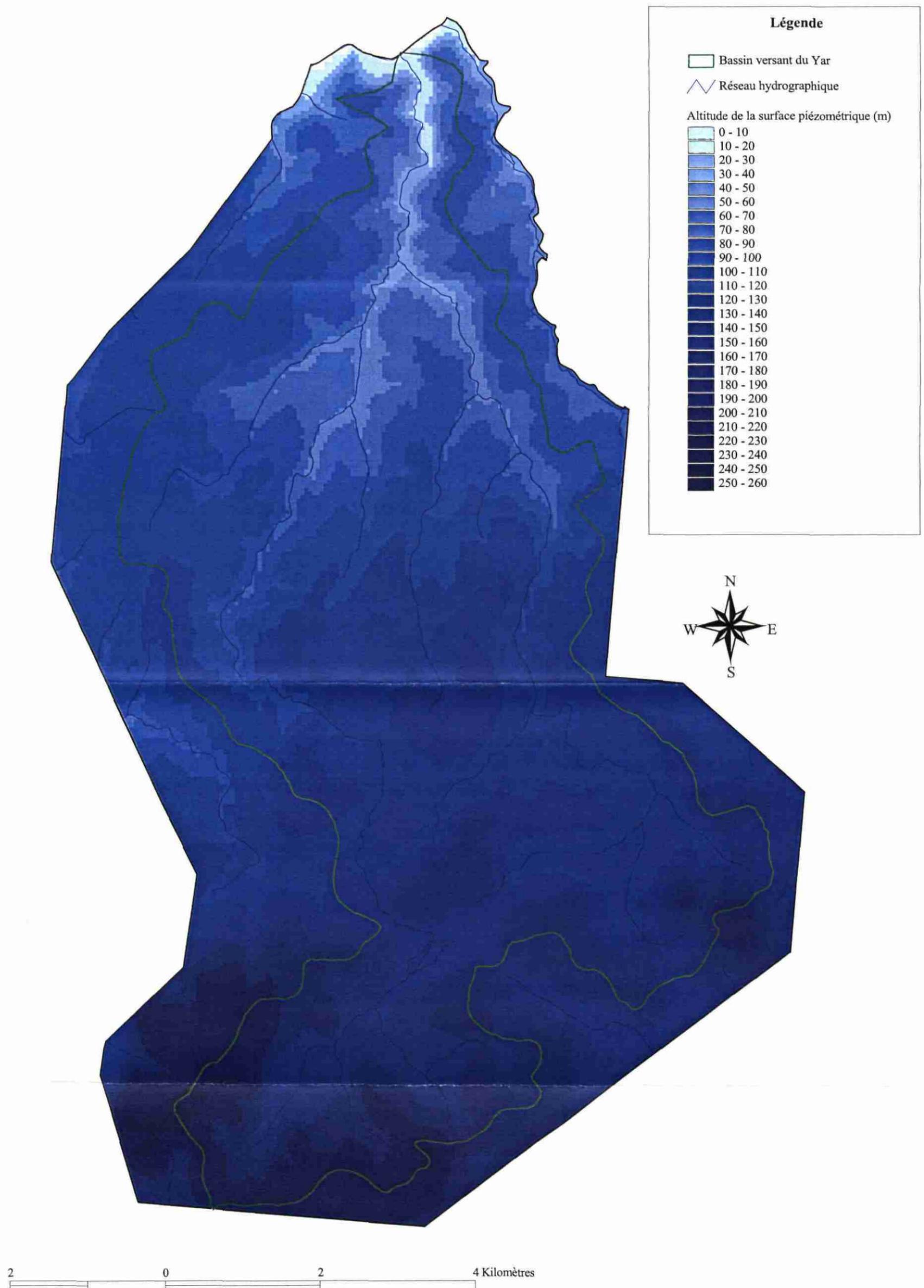


Pl. 1 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Yar)

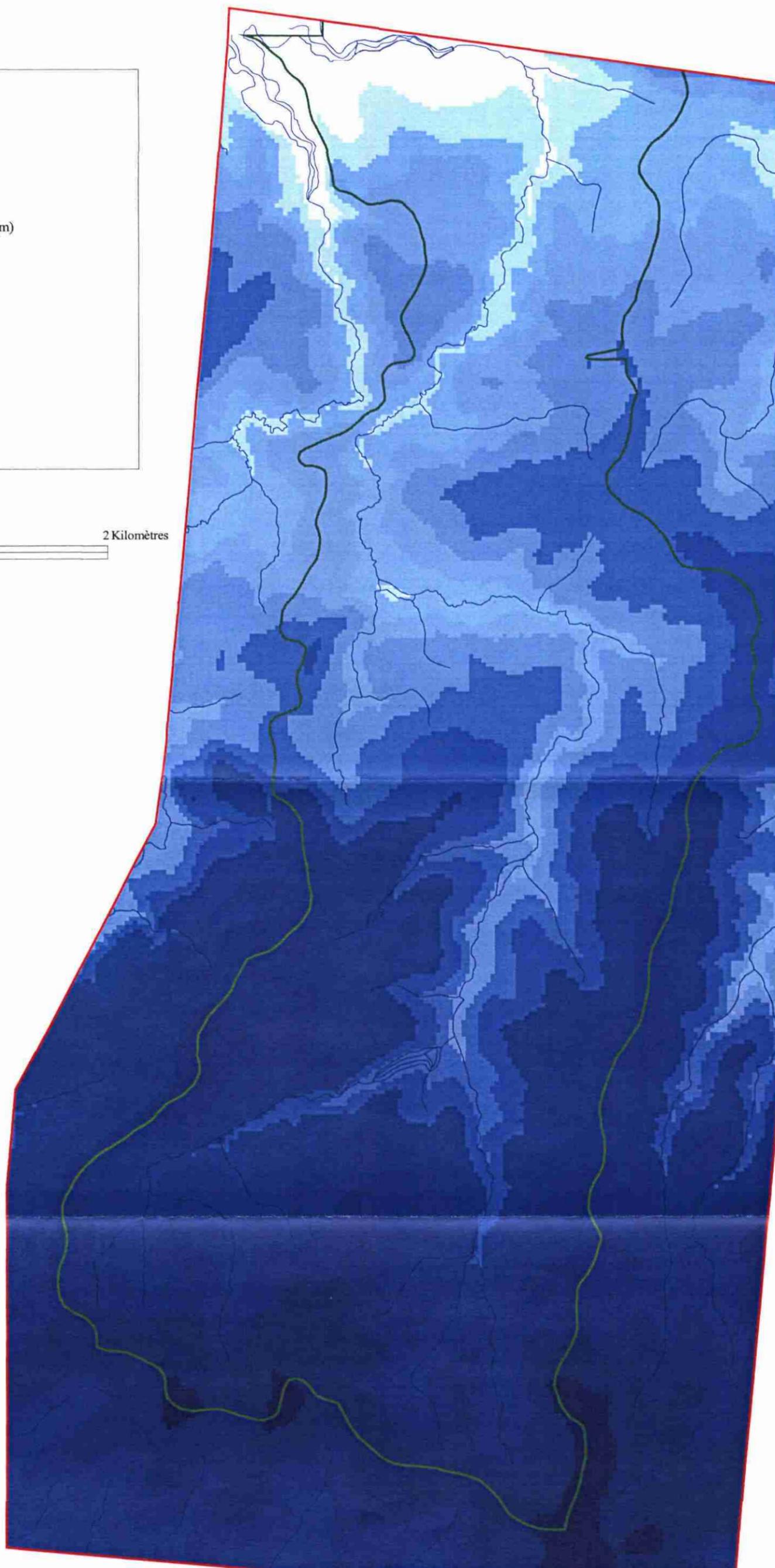
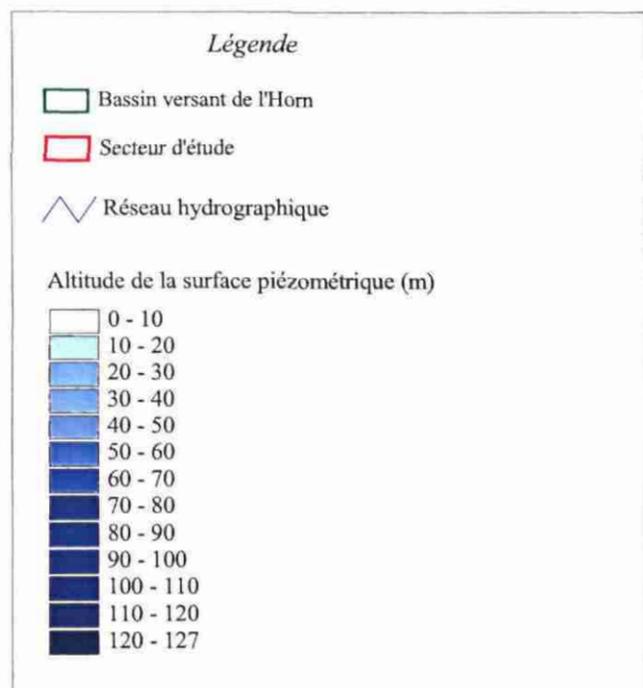


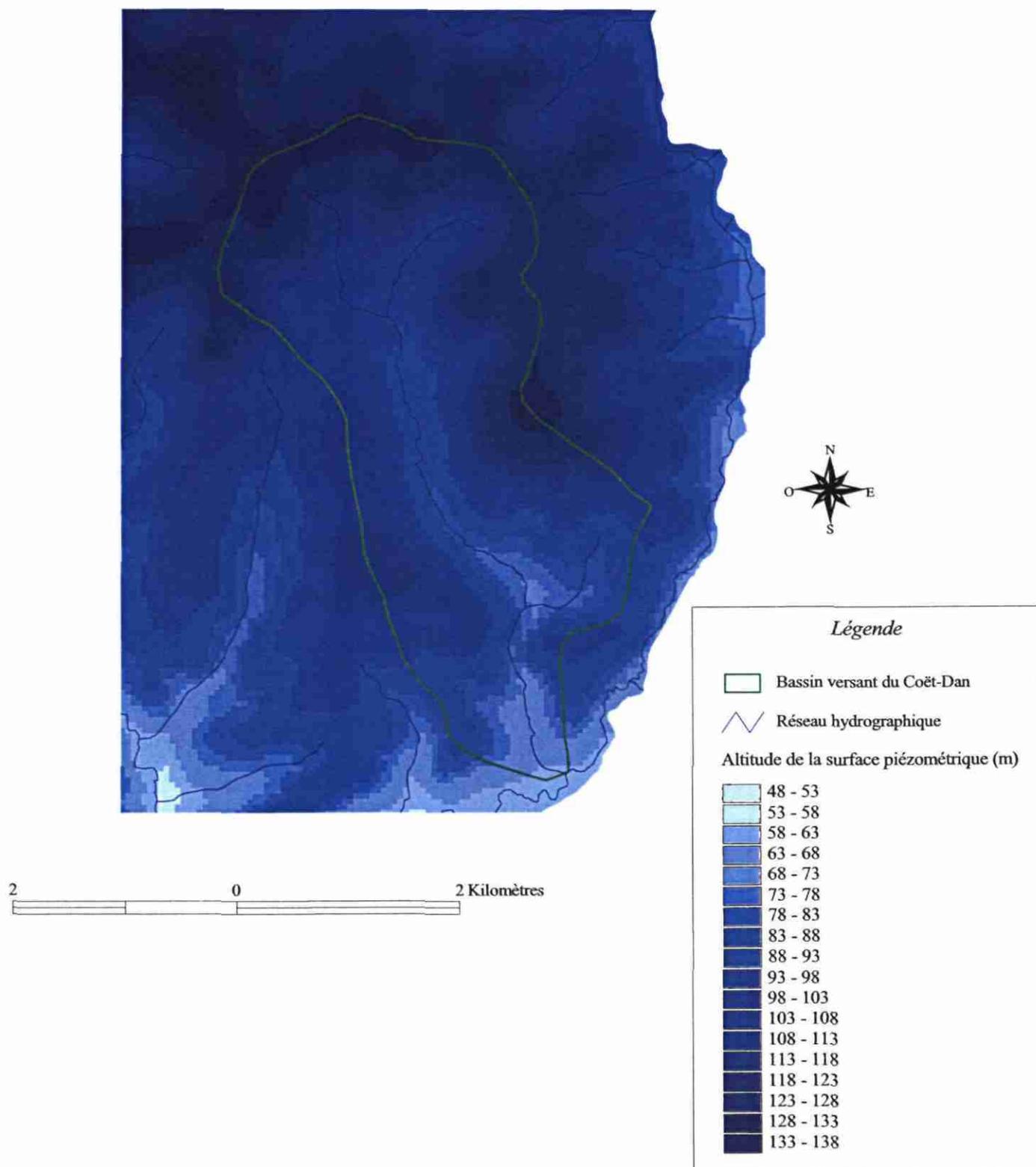


Pl. 3 - Géologie et implantation des sondages RMP (bassin du Coët Dan)

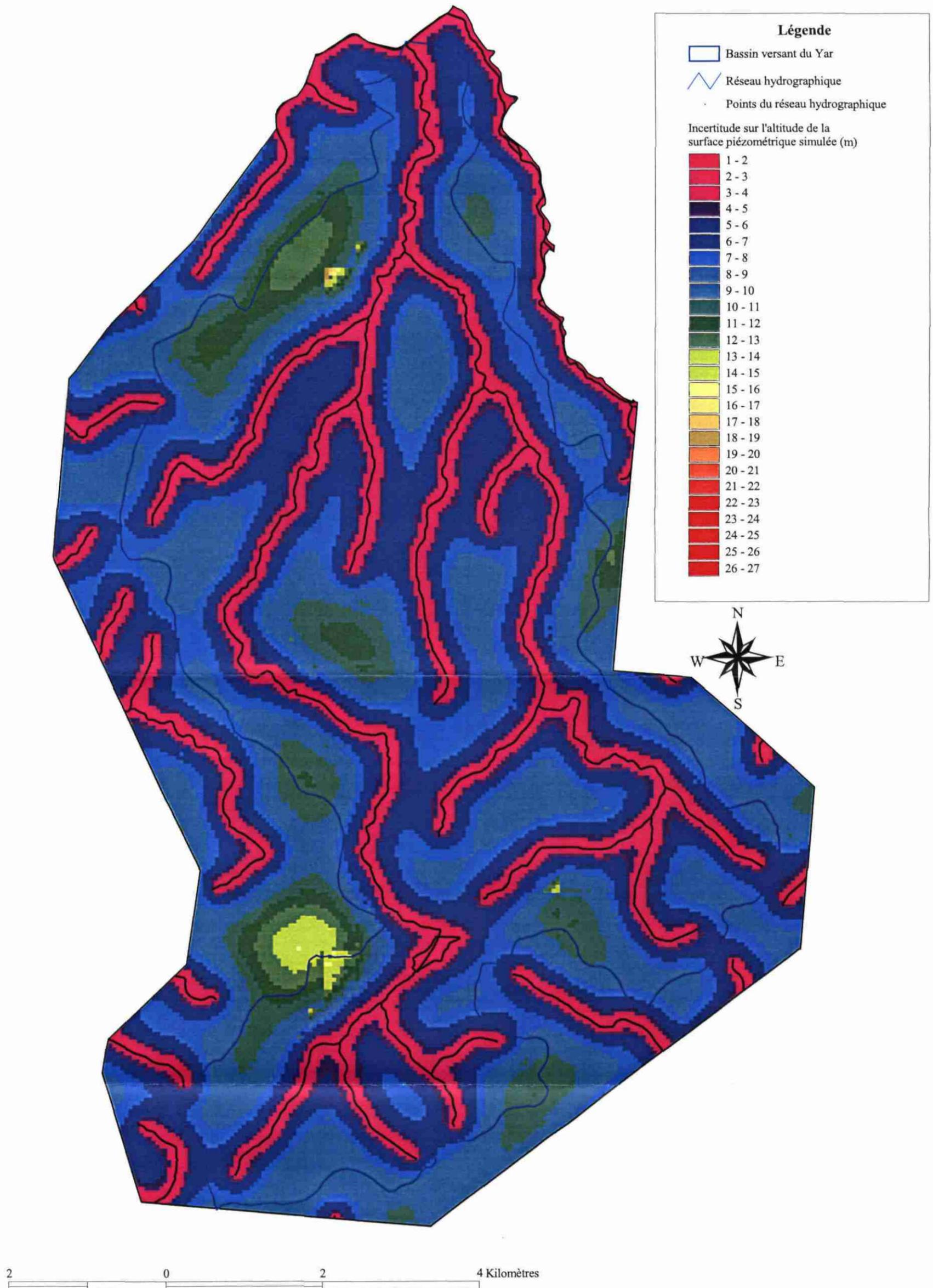


Pl. 4 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Yar)

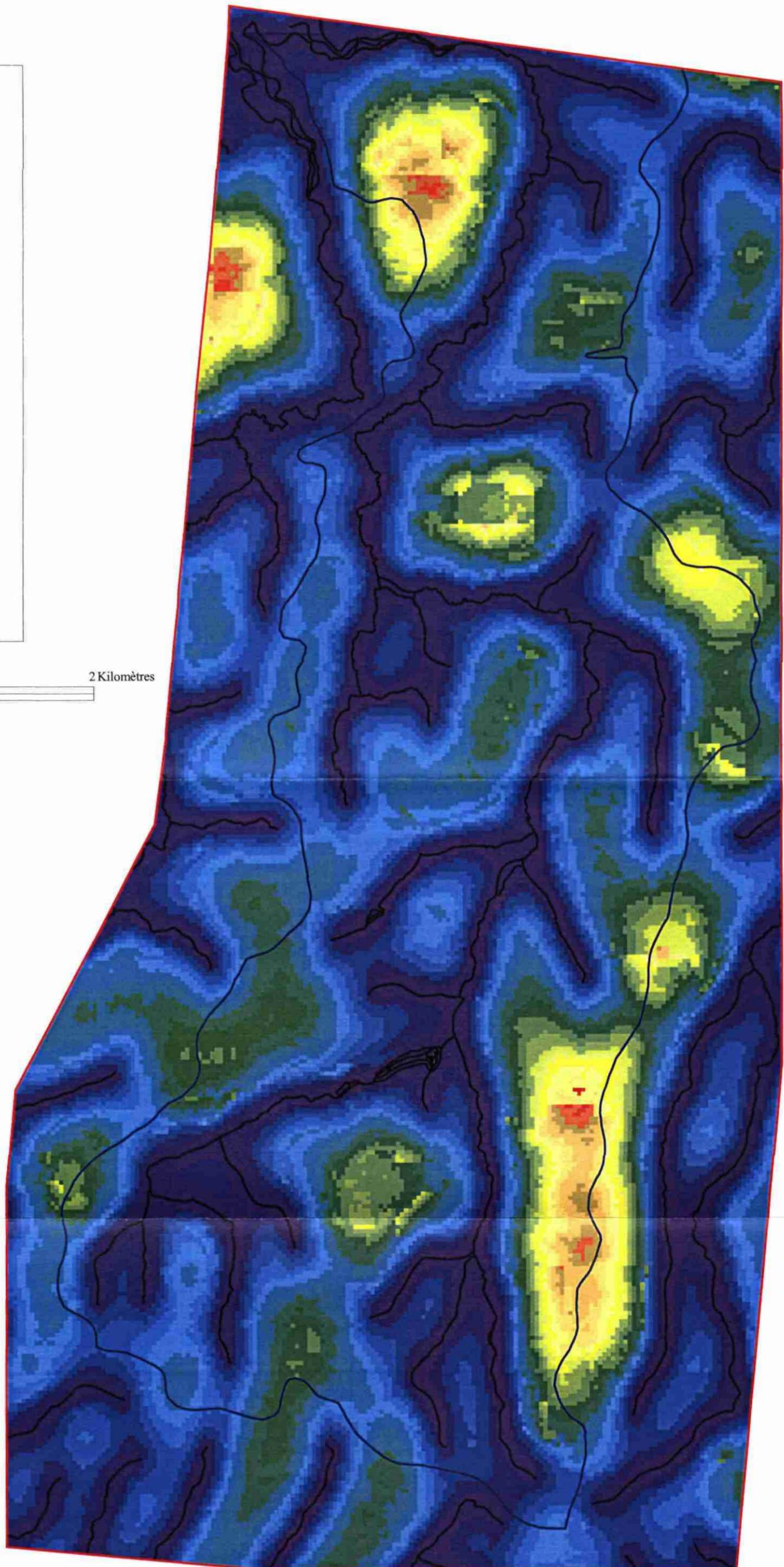
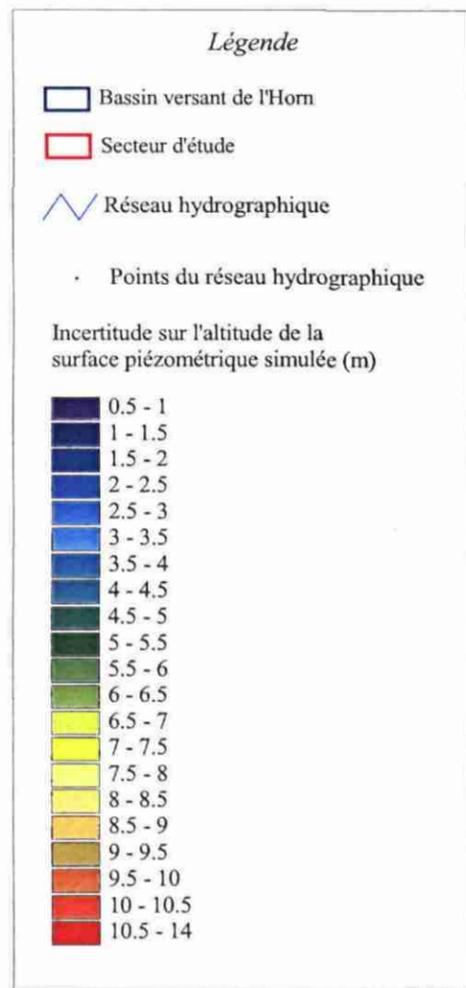


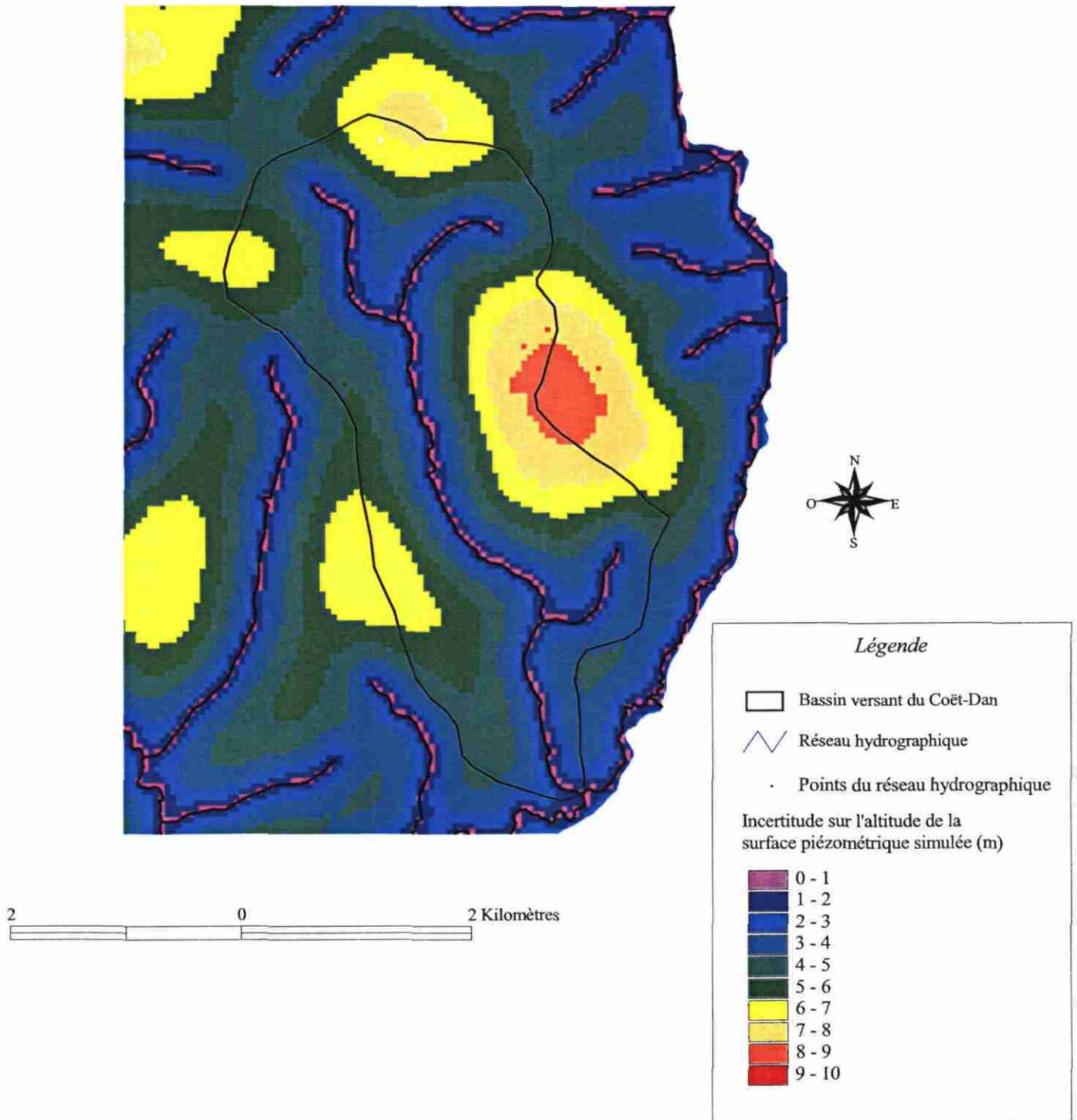


Pl. 6 - Altitude de la surface piézométrique (bassin du Coët Dan)

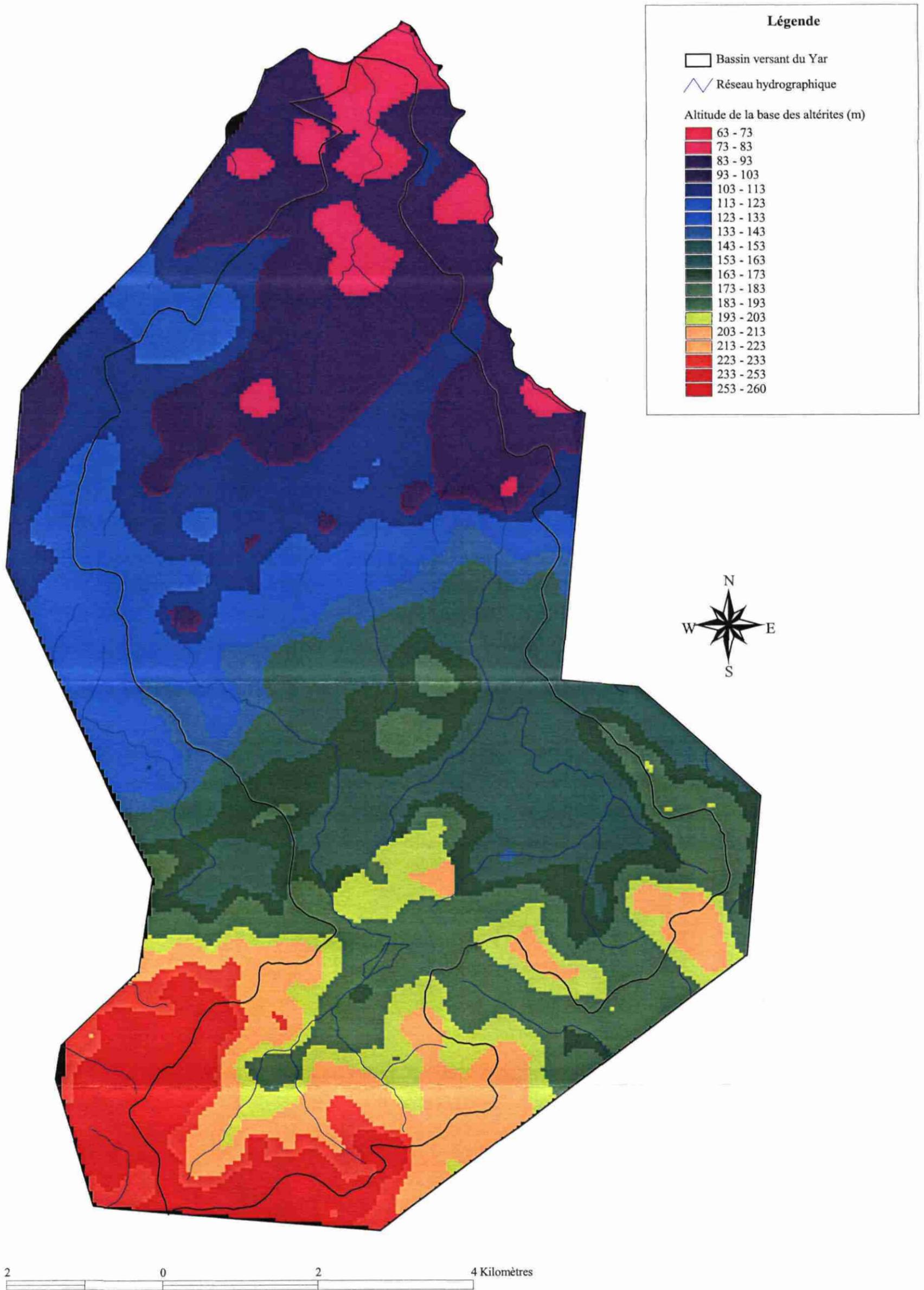


Pl. 7 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Yar)

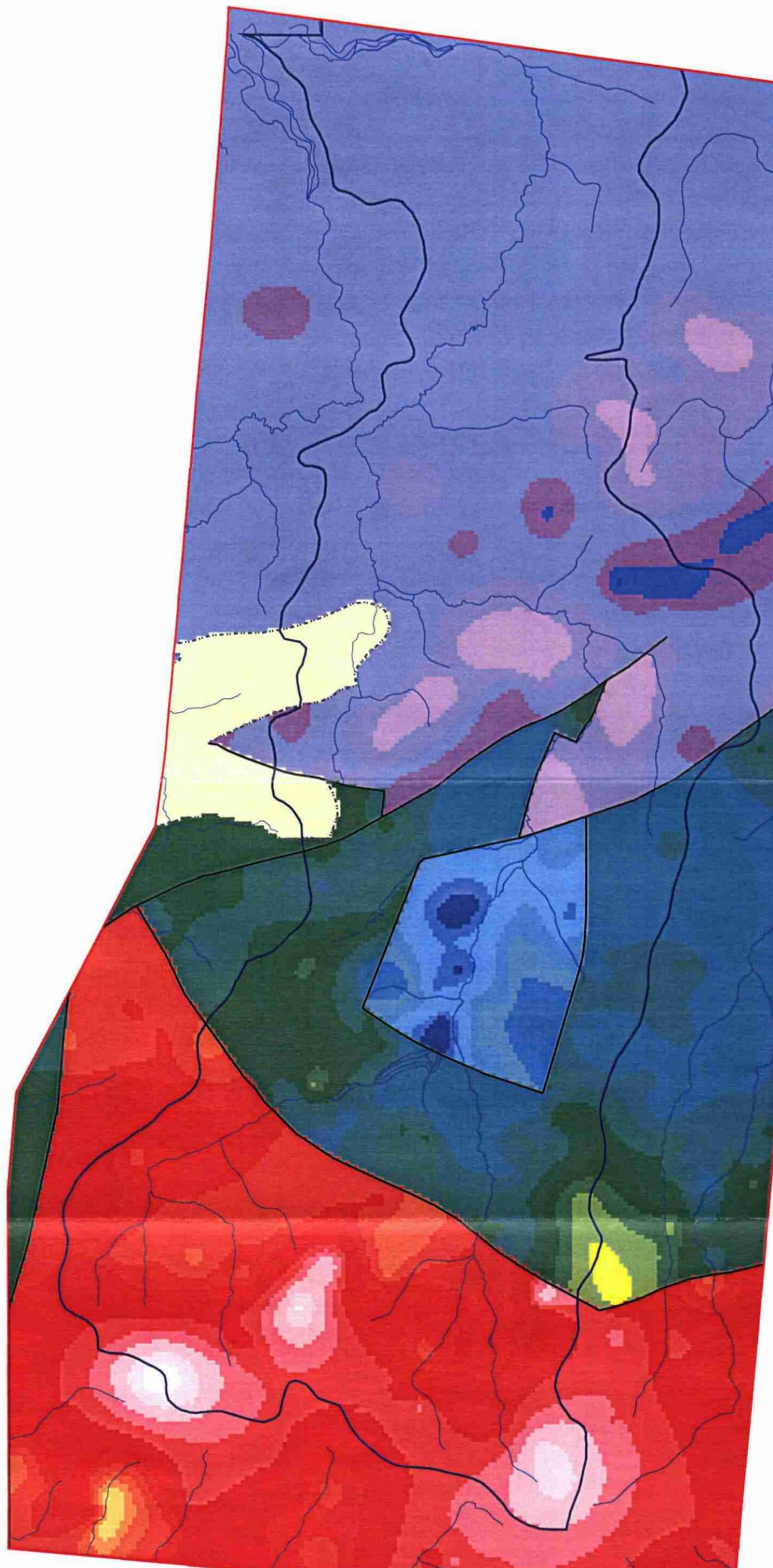
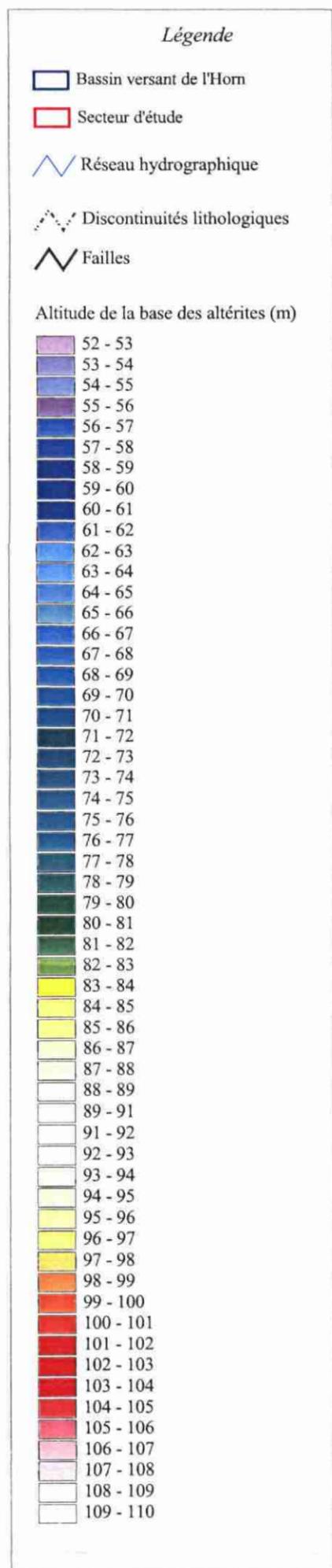


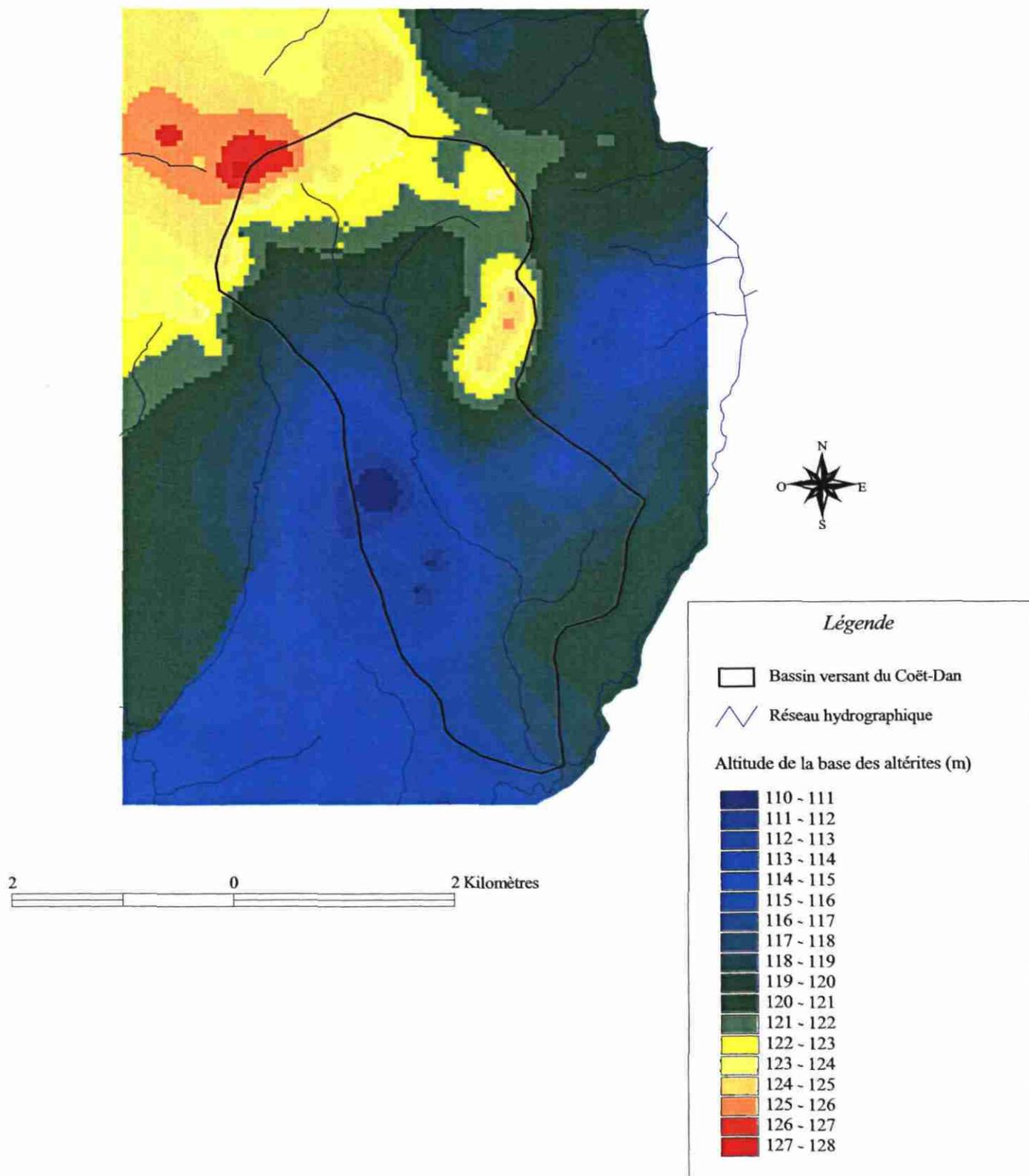


Pl. 9 - Incertitude sur l'altitude de la surface piézométrique (bassin du Coët Dan)

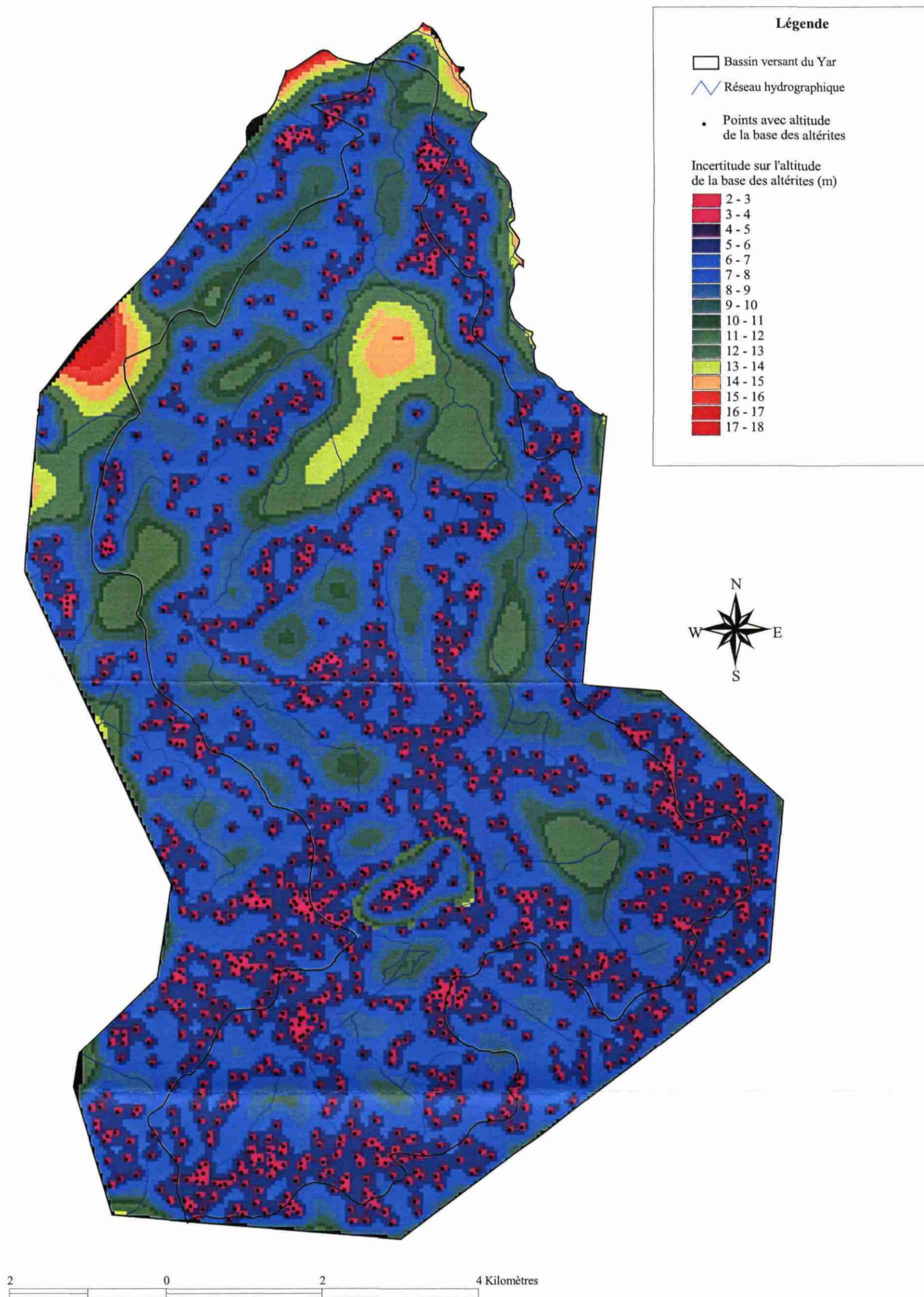


Pl. 10 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Yar)

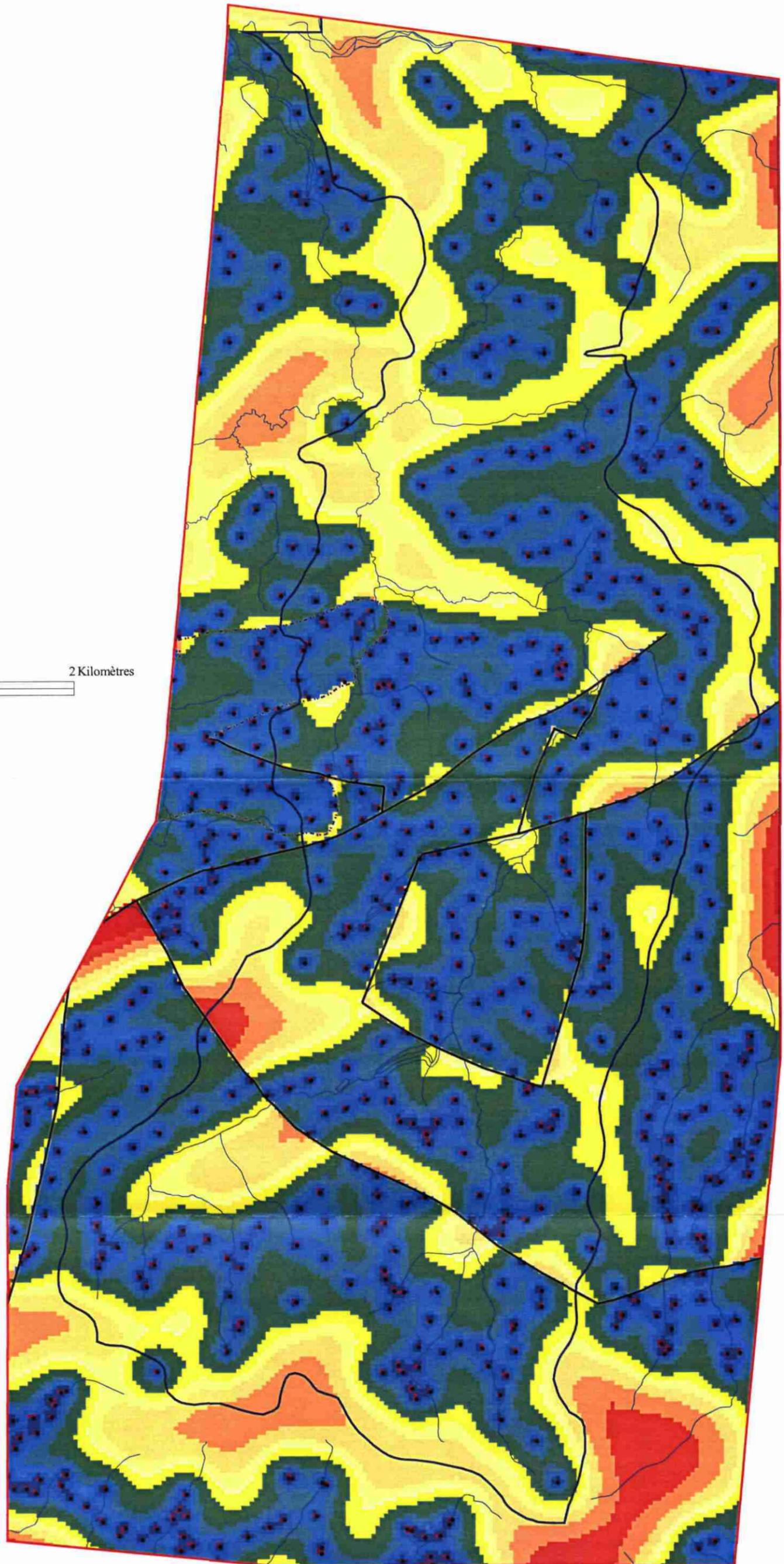
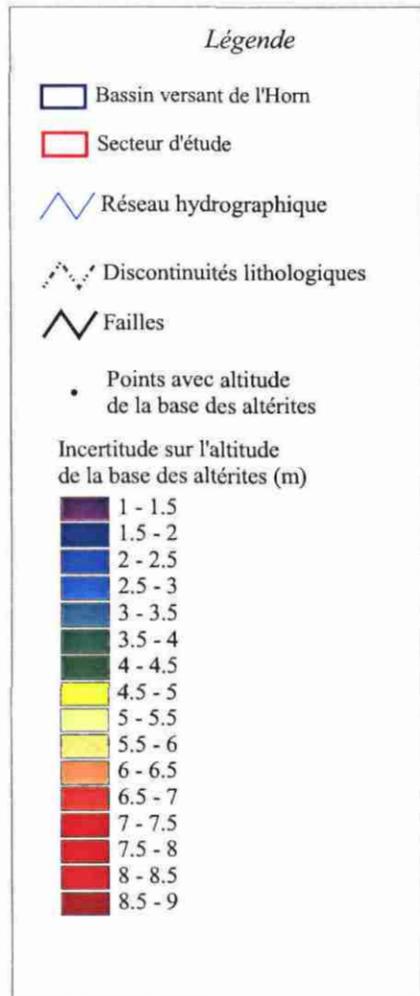


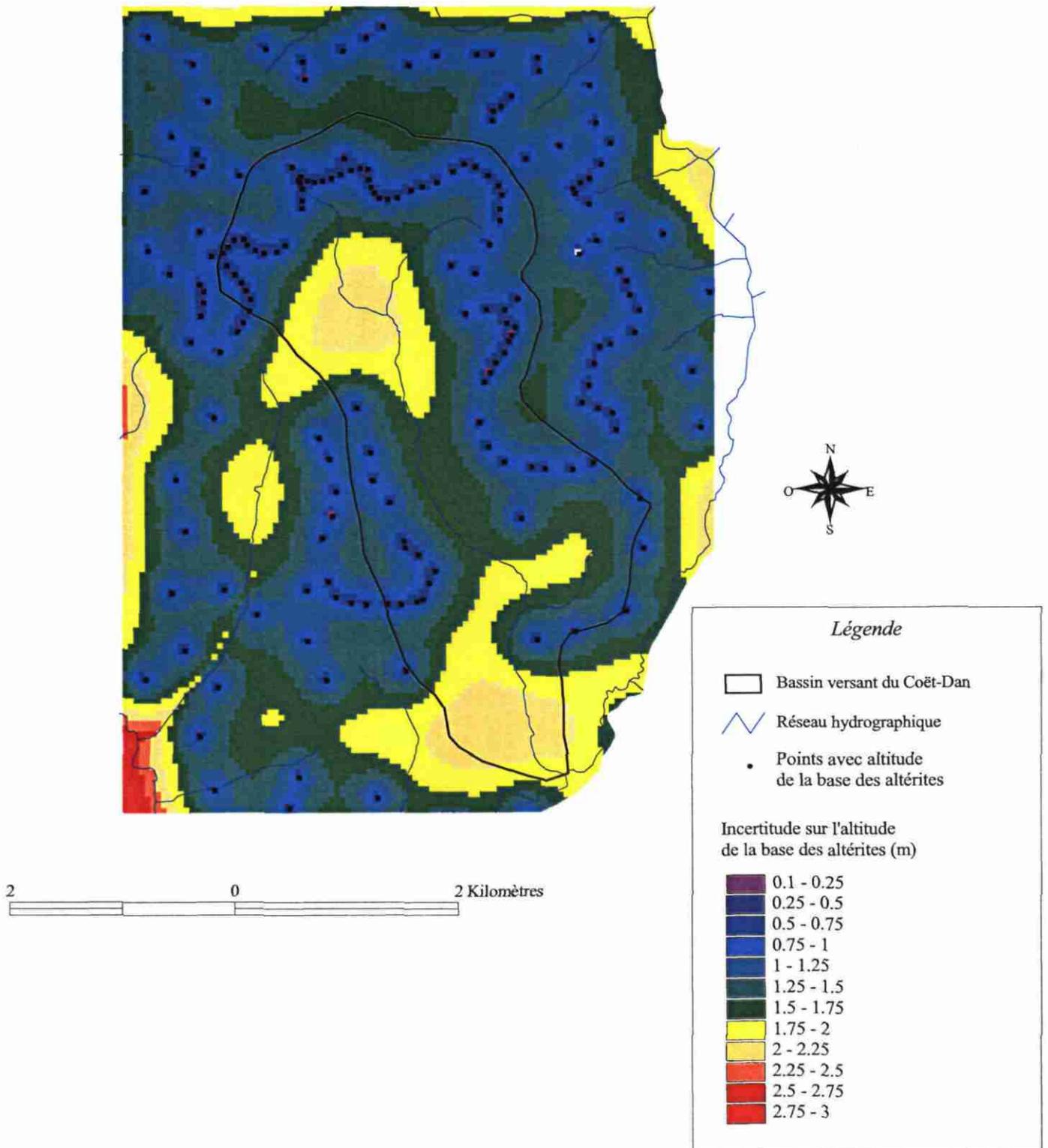


PL 12 - Altitude de la surface de base des altérites (bassin du Coët Dan)

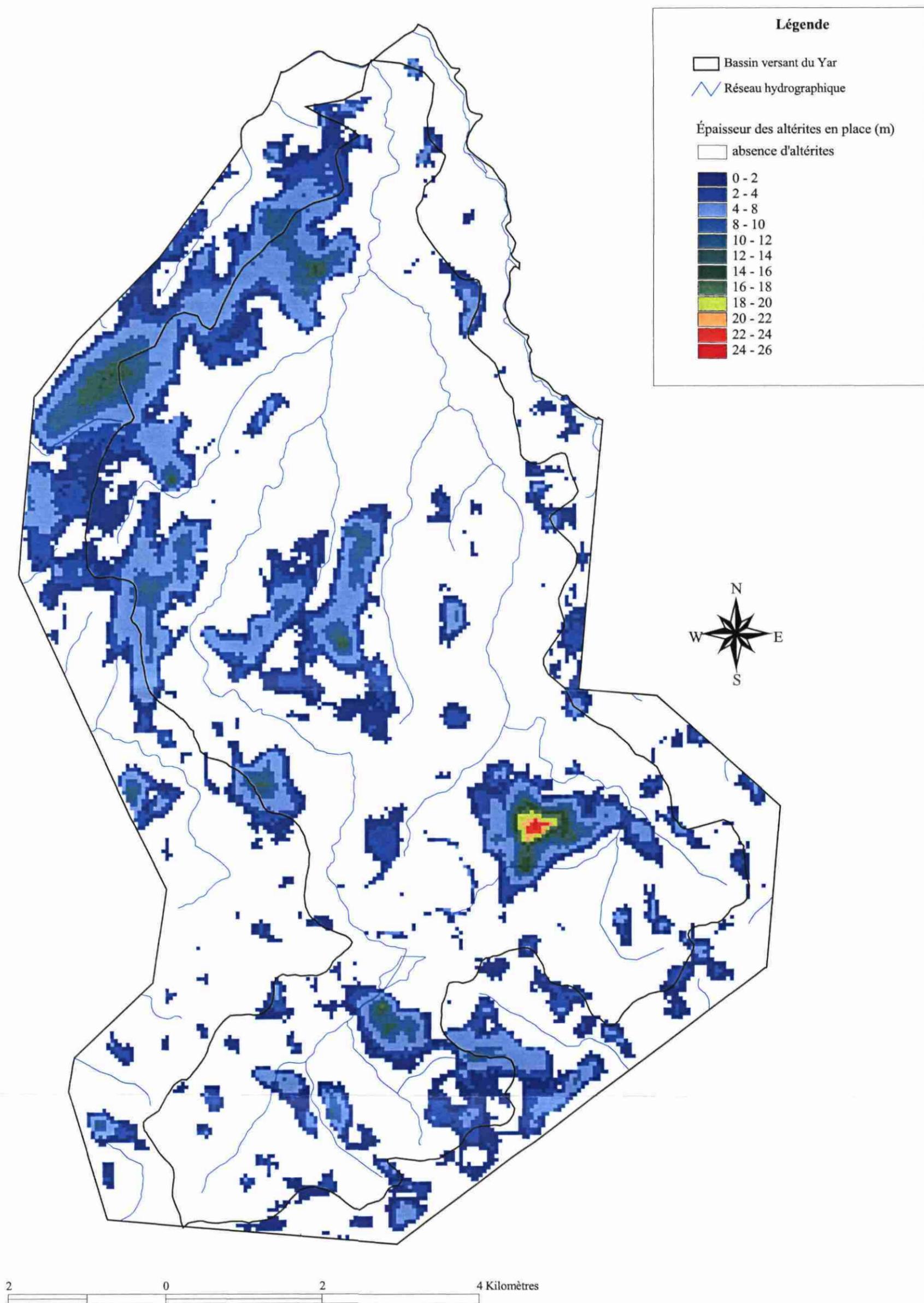


Pl. 13 - Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Yar)

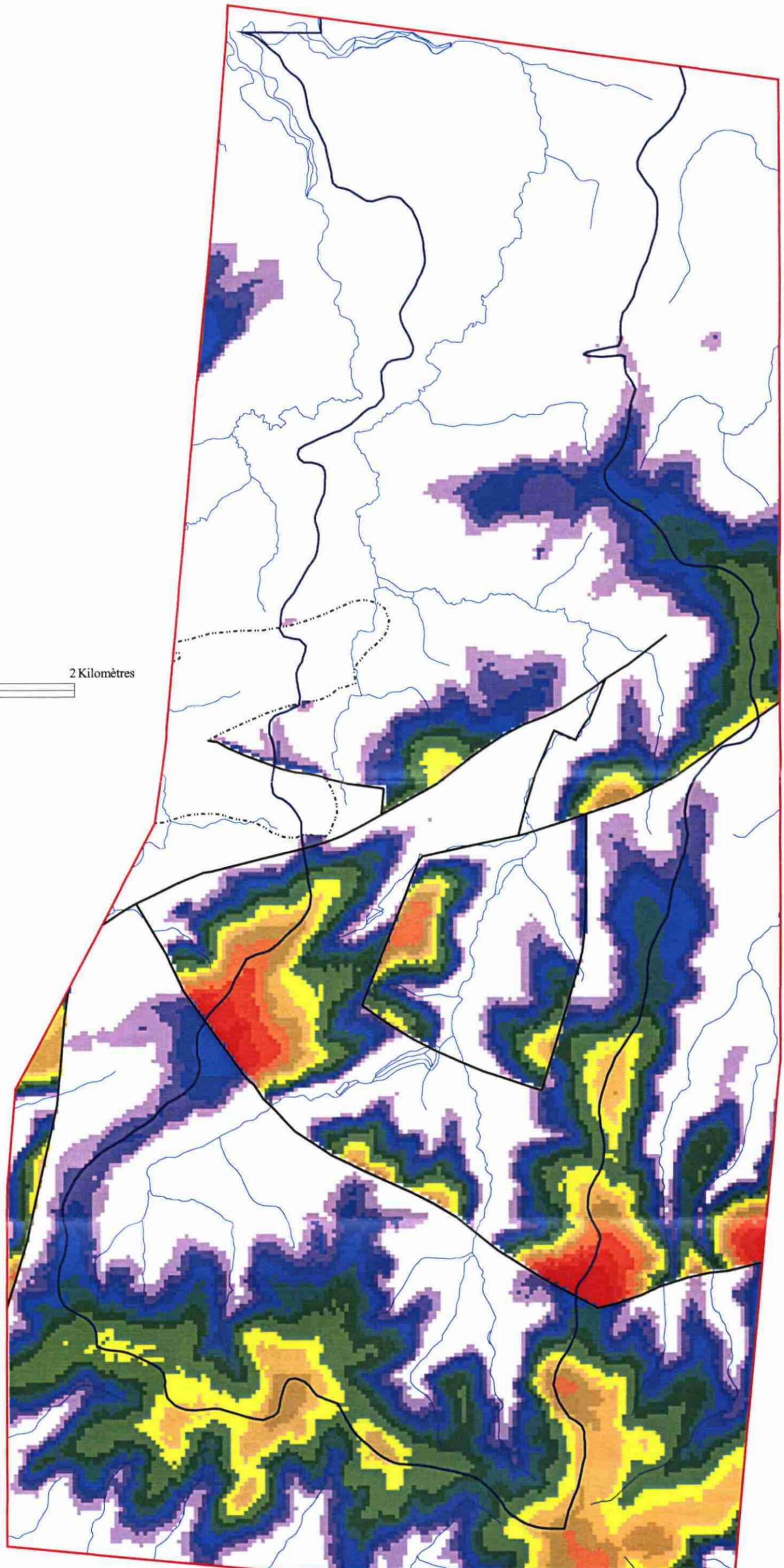
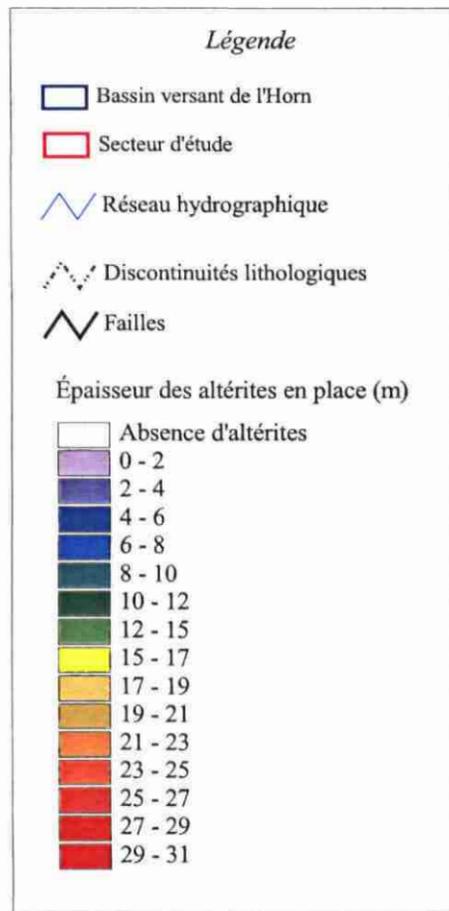


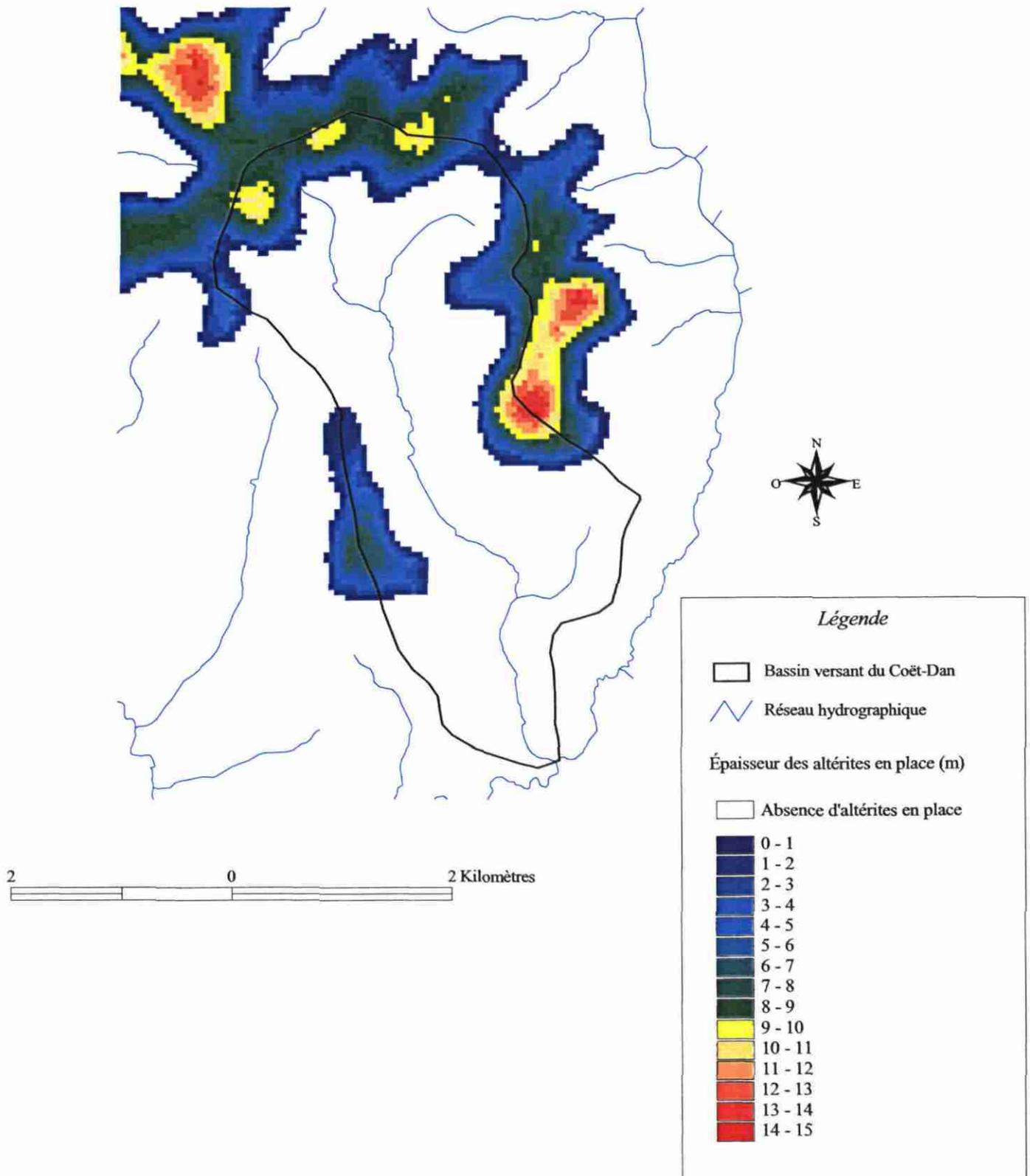


Pl. 15- Incertitude sur l'altitude de la surface de base des altérites (bassin du Coët Dan)

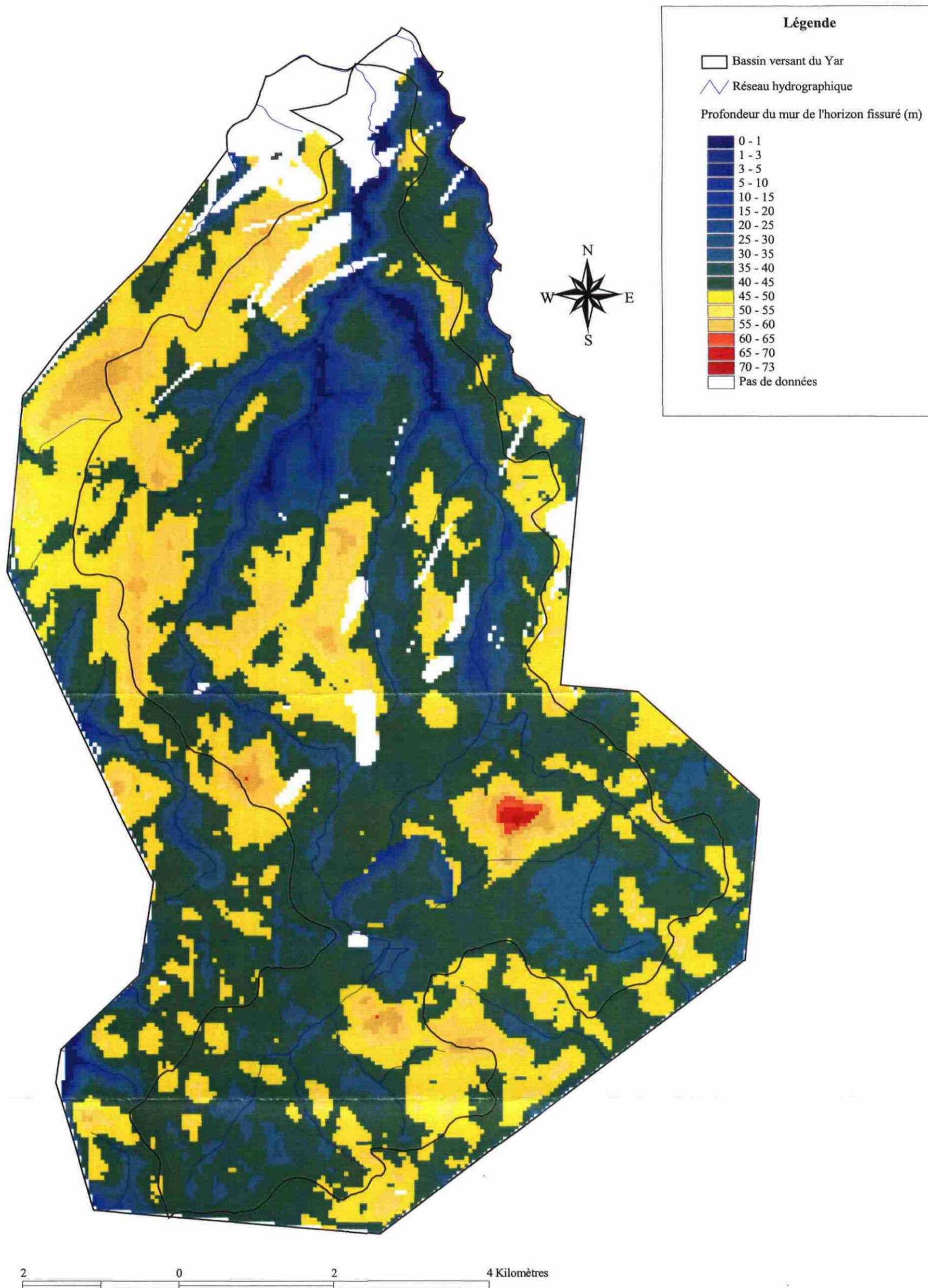


Pl. 16 - Épaisseur des altérites en place (bassin du Yar)

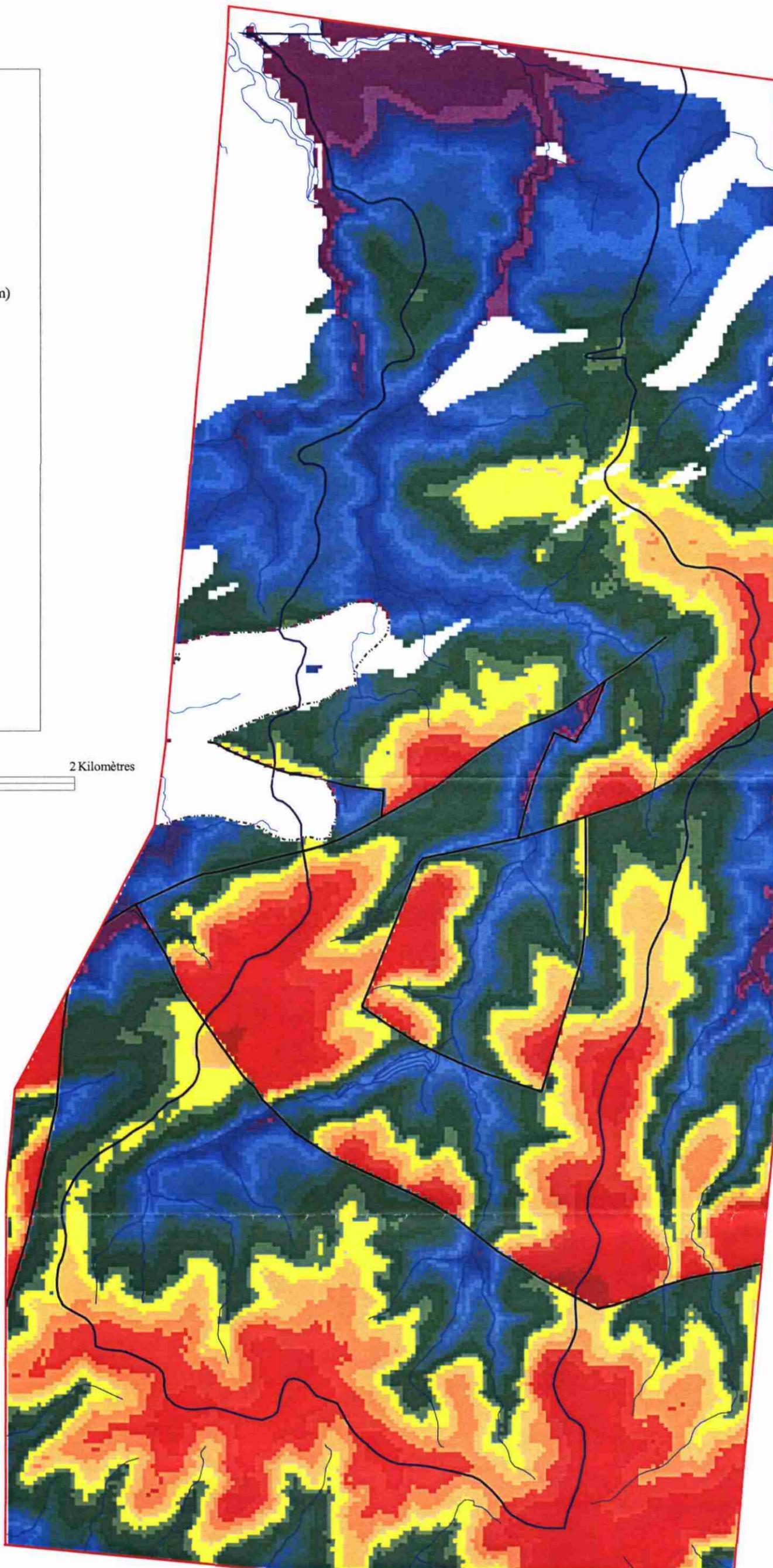


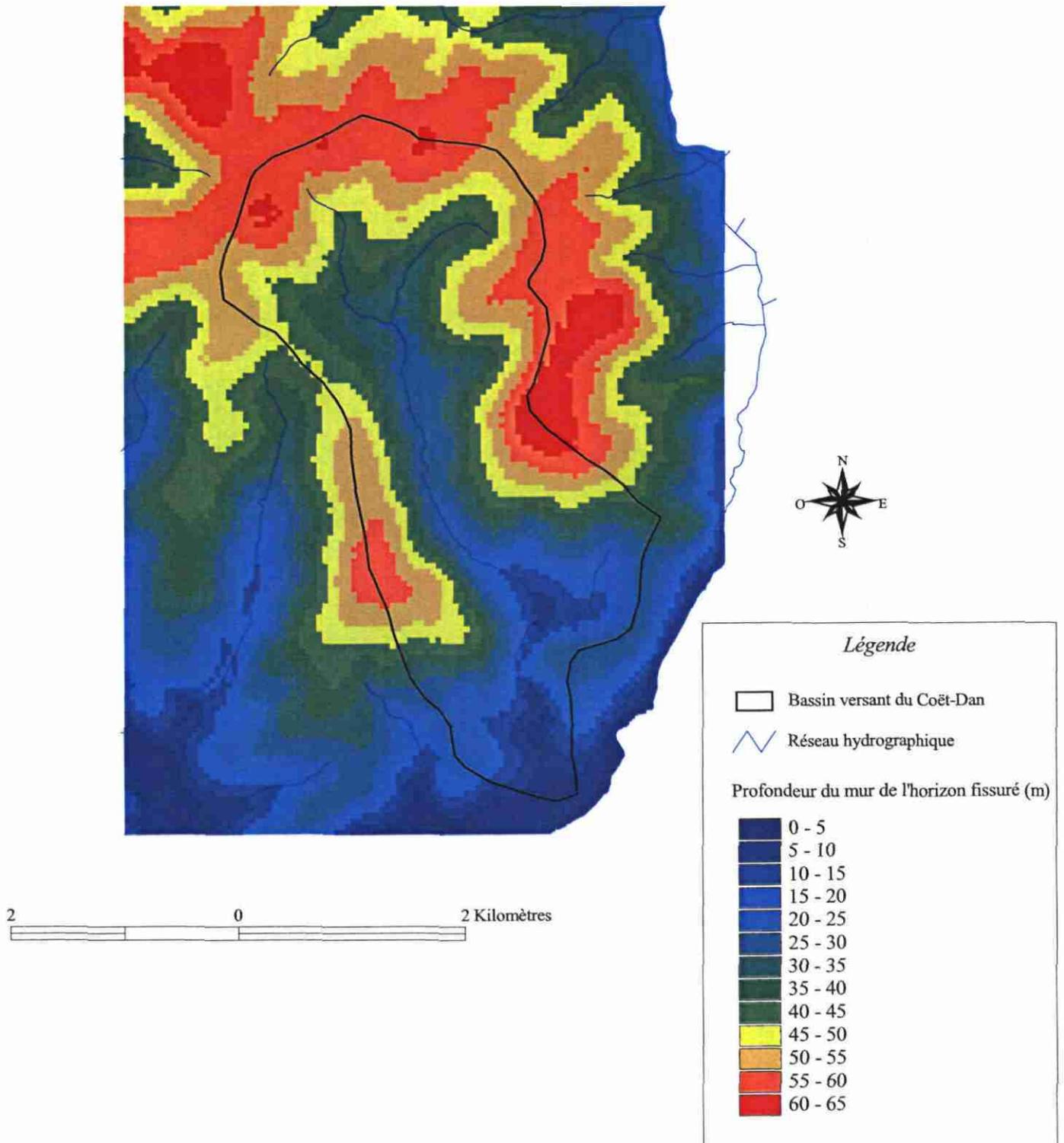


Pl. 18 - Épaisseur des altérites en place (bassin du Coët Dan)

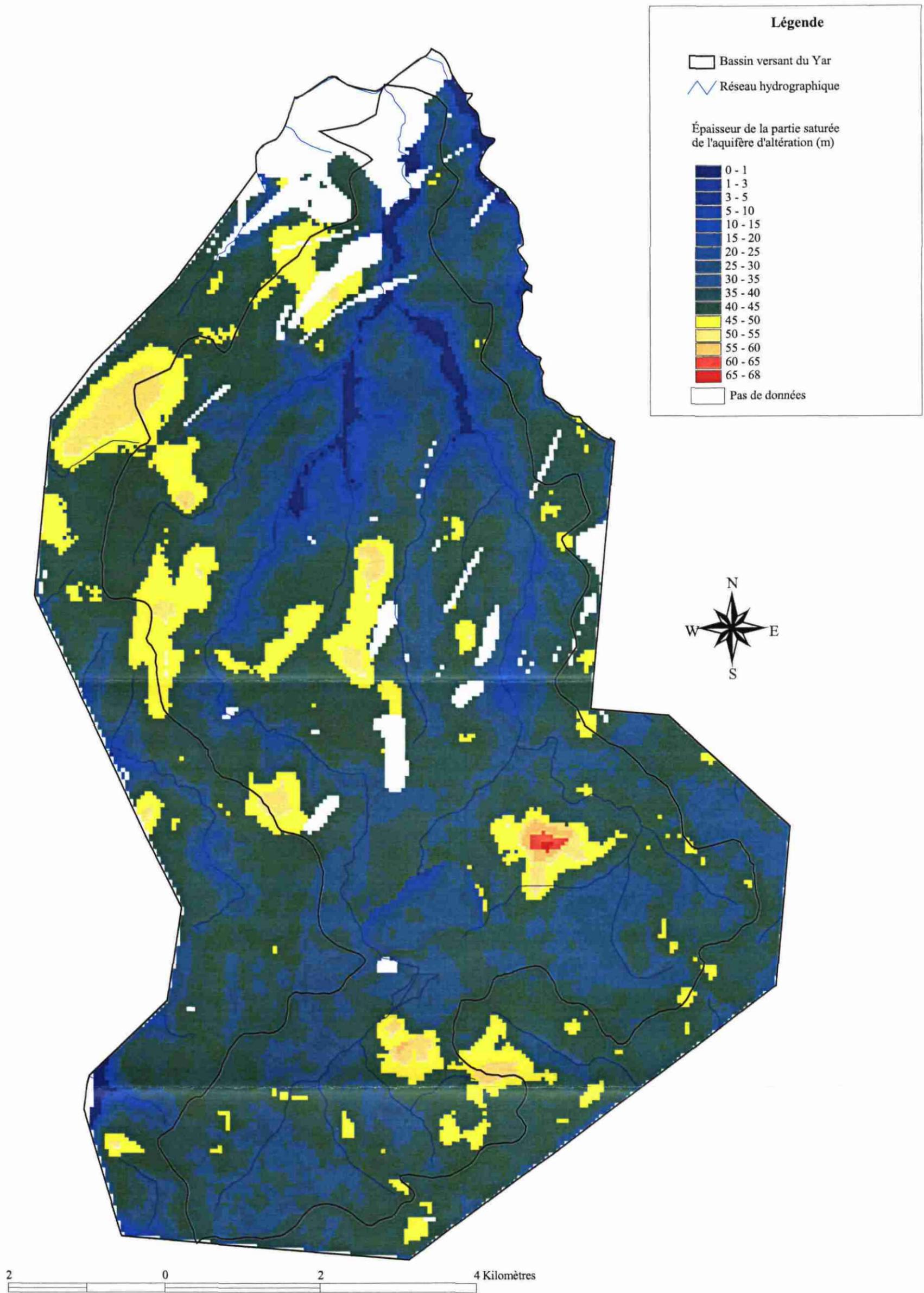


Pl. 19 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Yar)

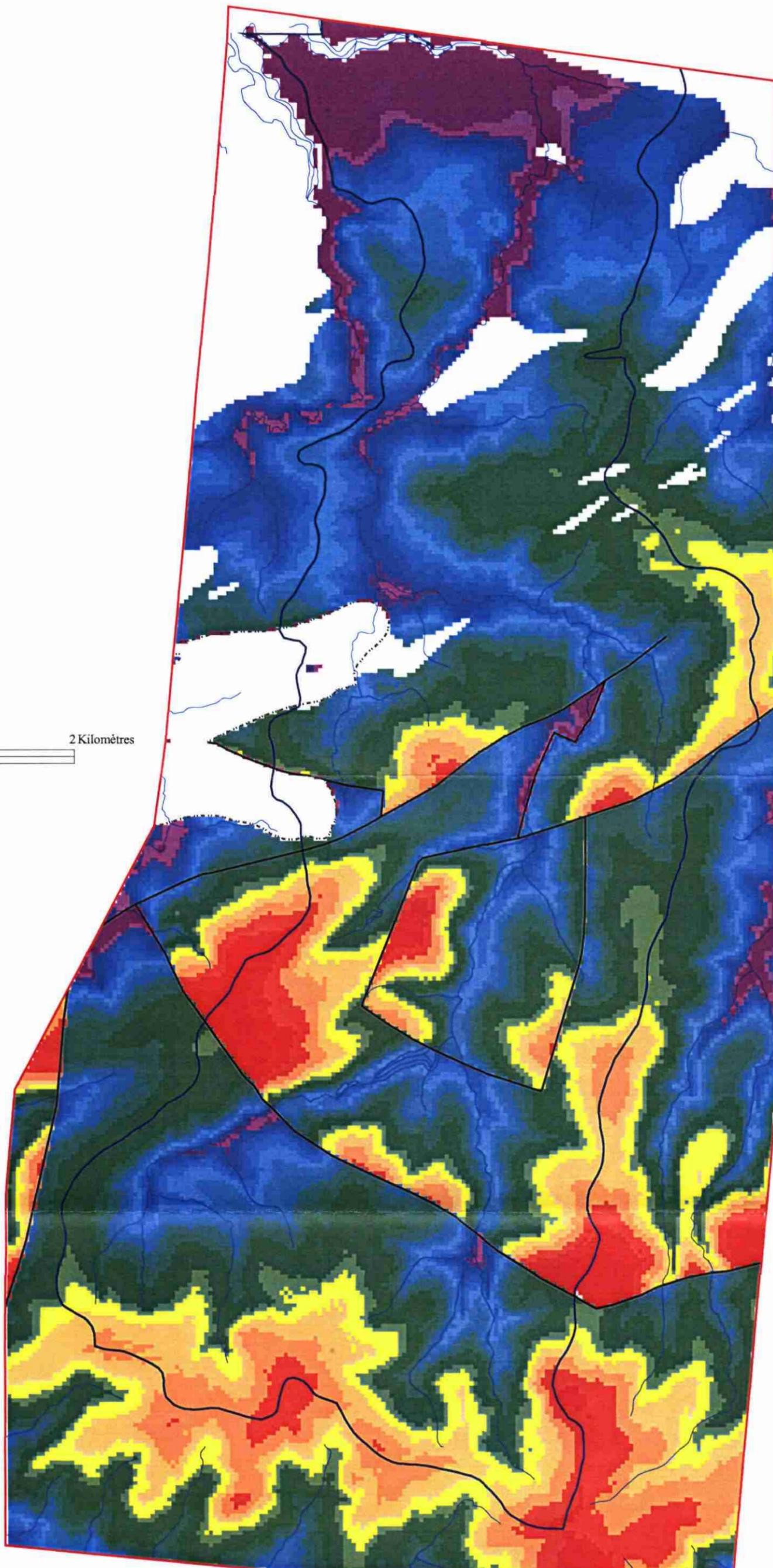
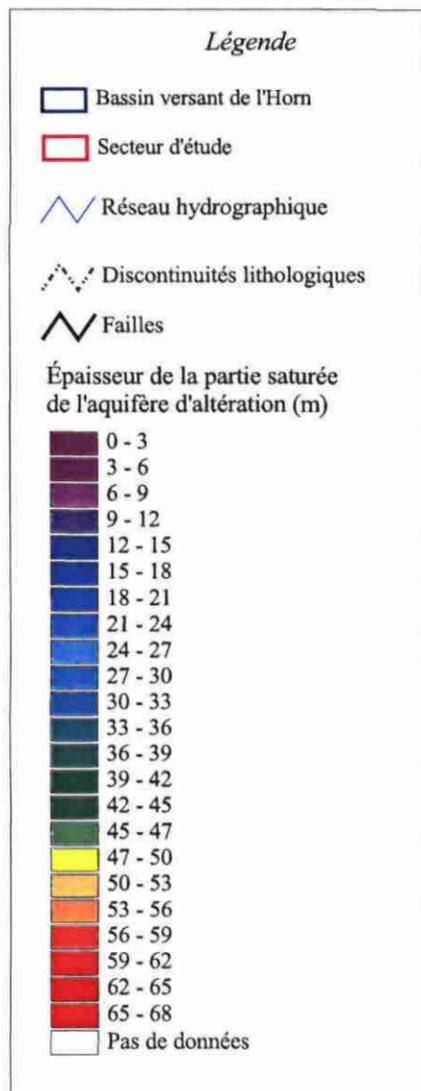


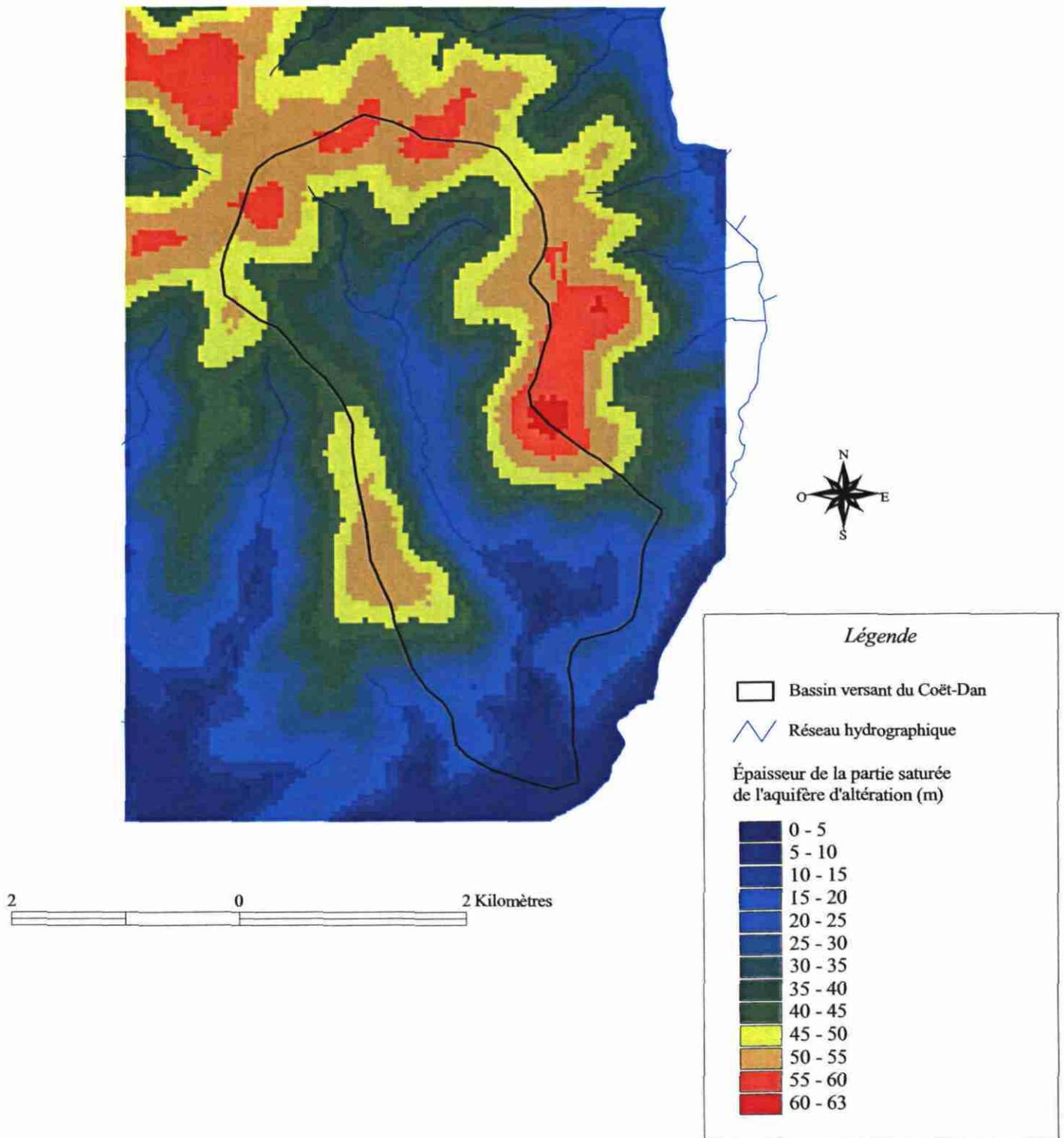


Pl. 21 - Profondeur du mur de l'horizon fissuré sous la surface du sol (bassin du Coët Dan)

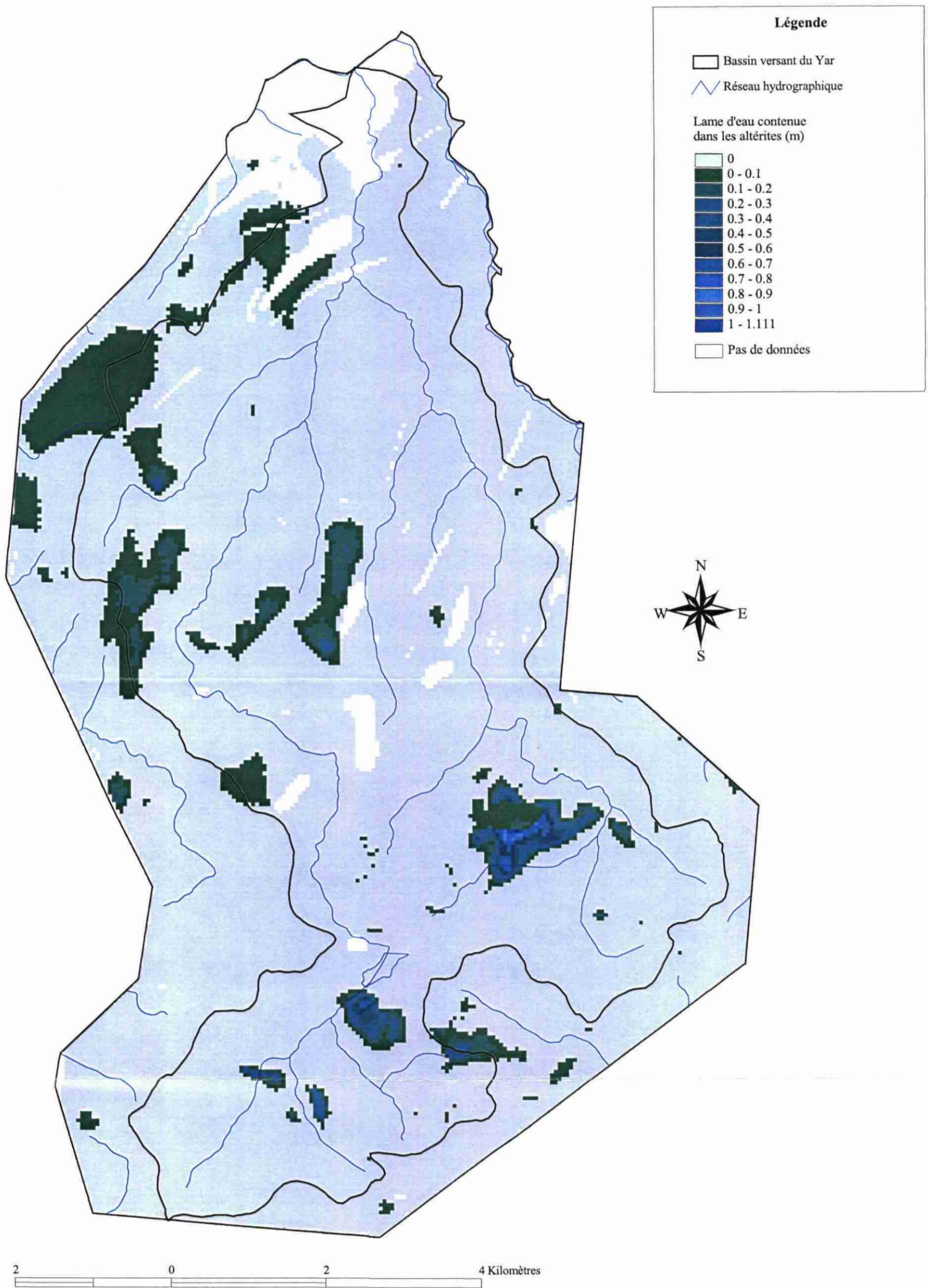


Pl. 22 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Yar)

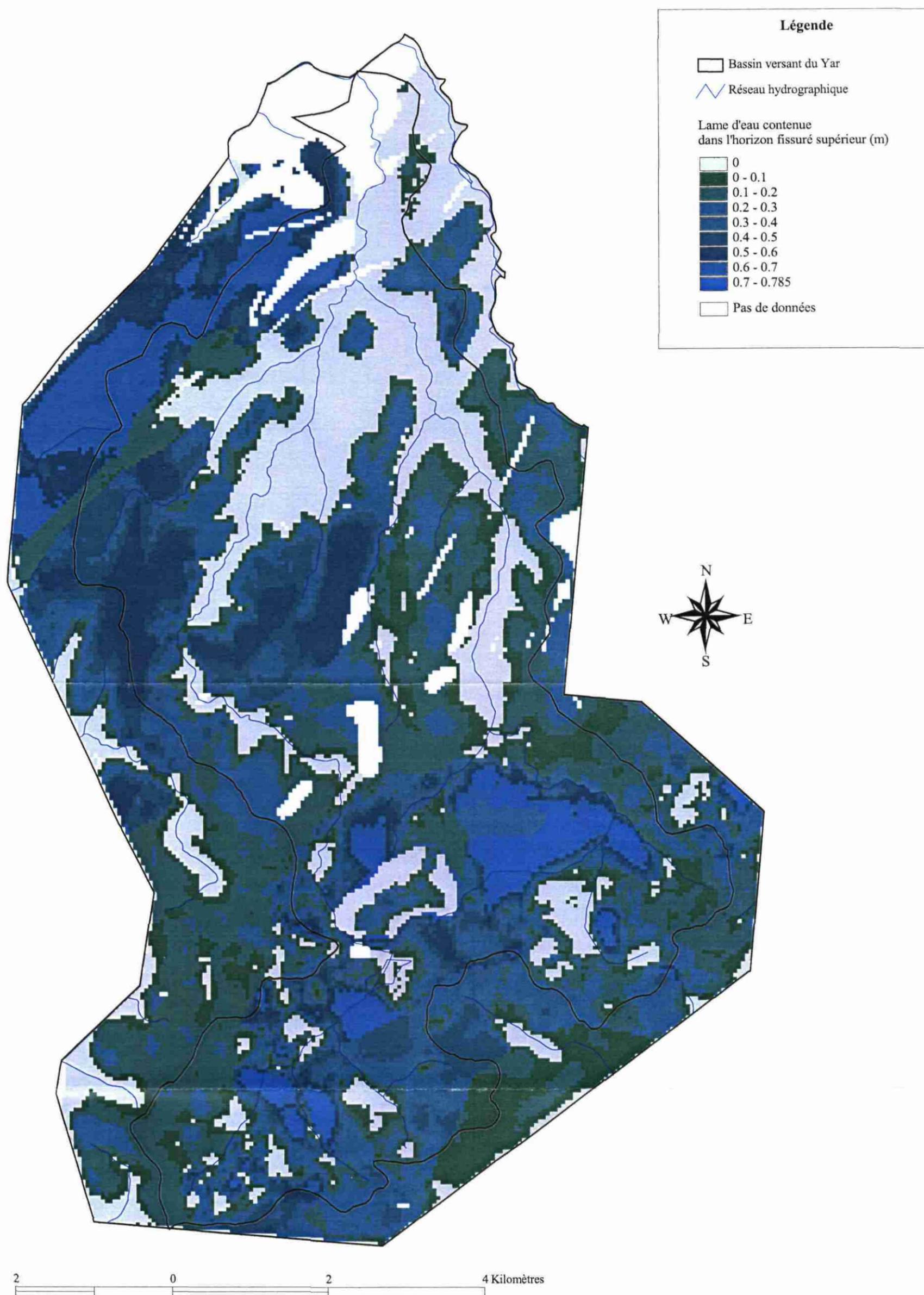




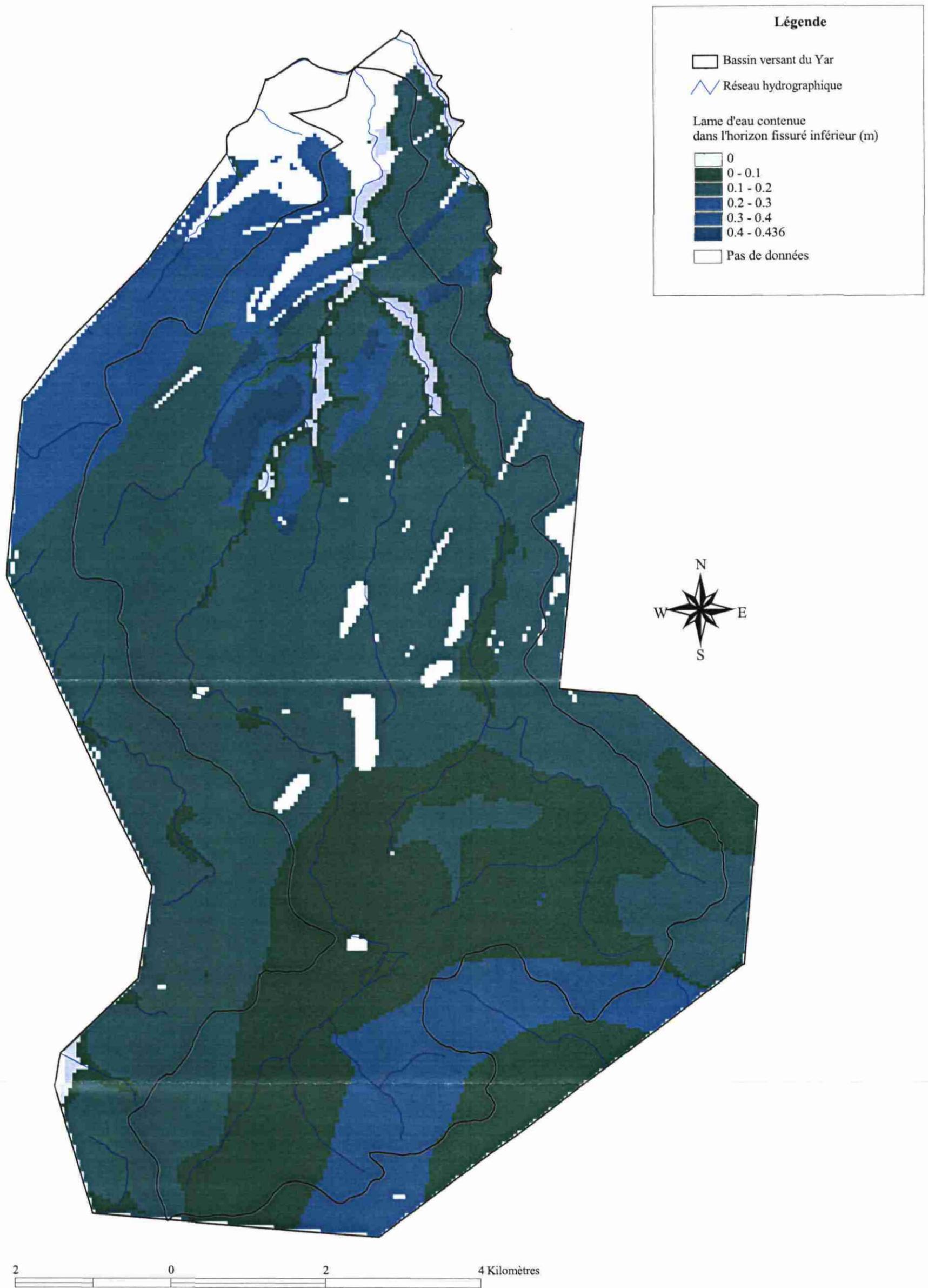
PL 24 - Épaisseur de la partie saturée de l'aquifère d'altération (bassin du Coët Dan)



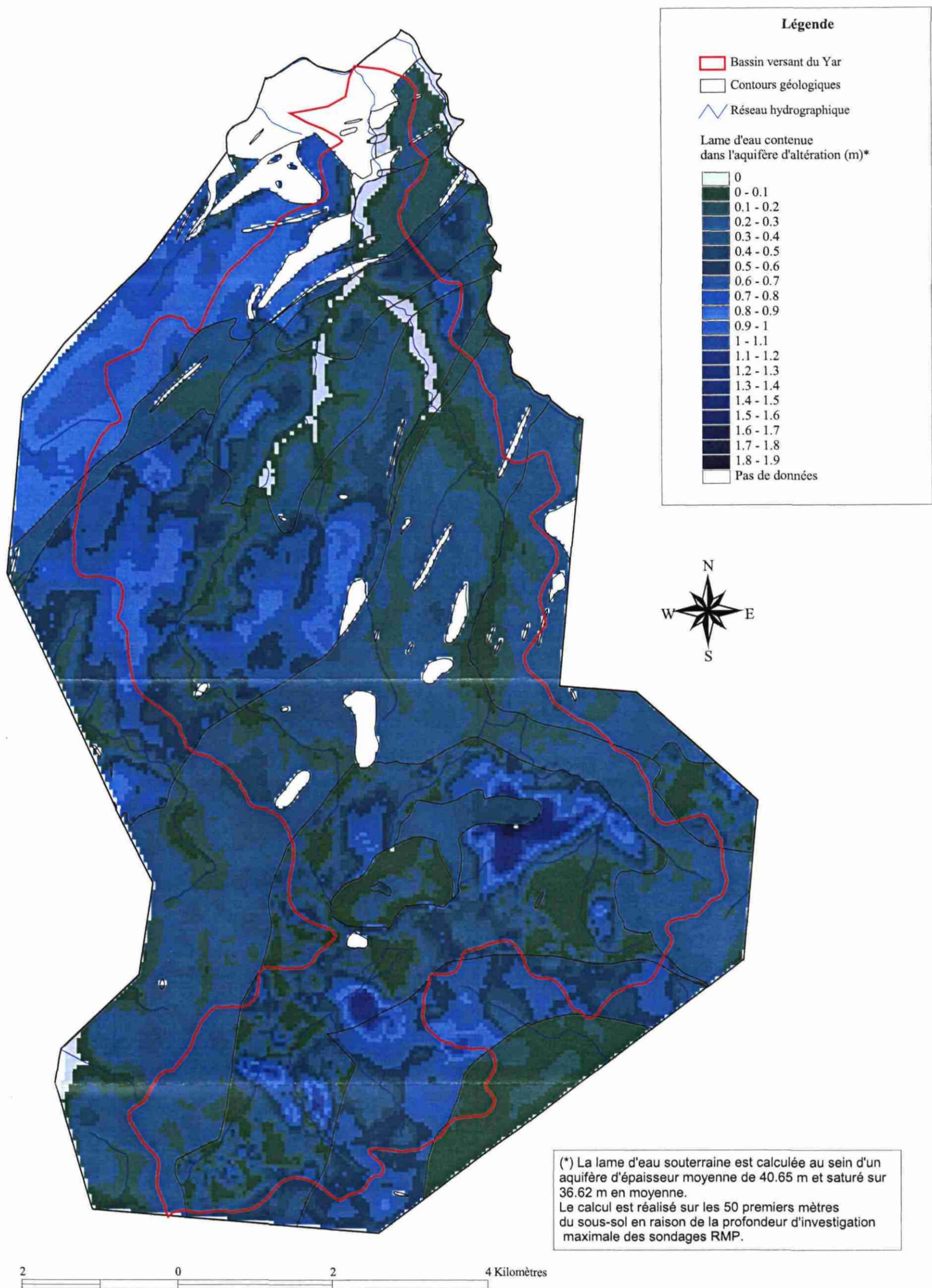
Pl. 25 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Yar)



Pl. 26 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Yar)

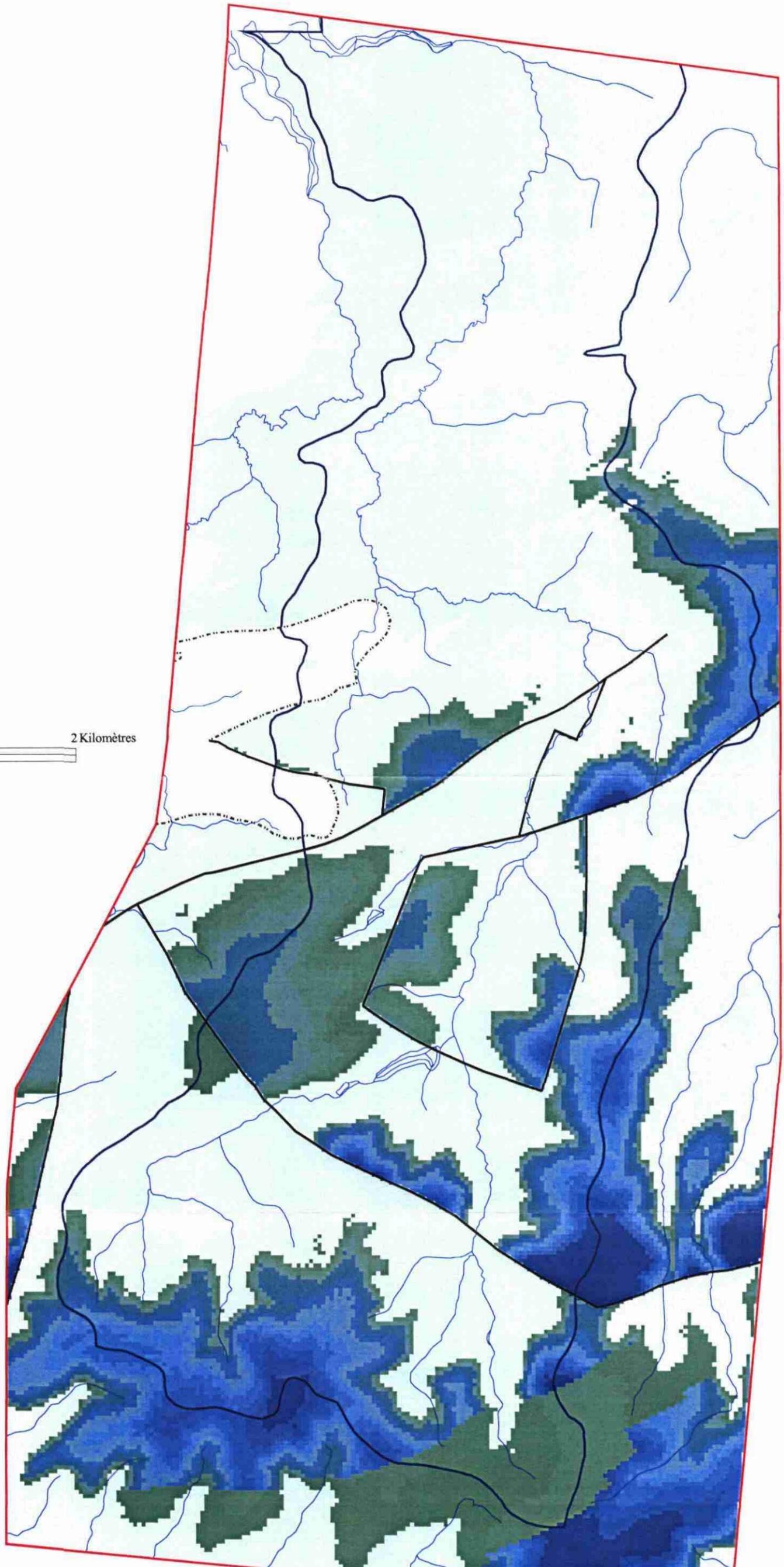
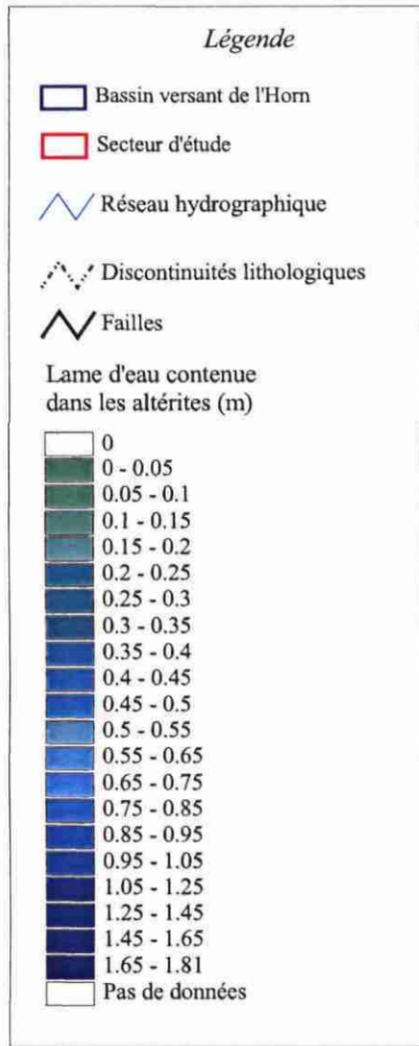


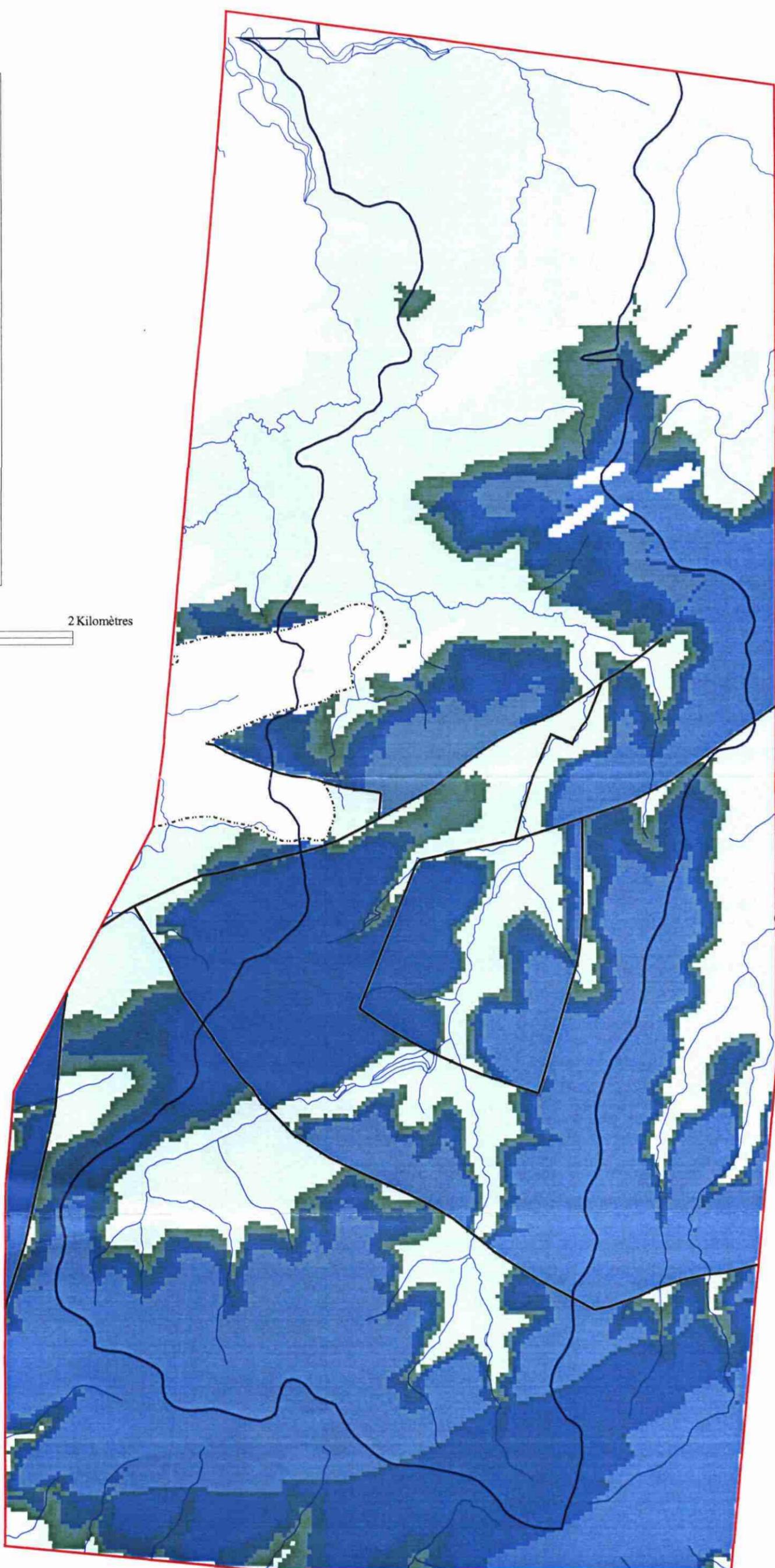
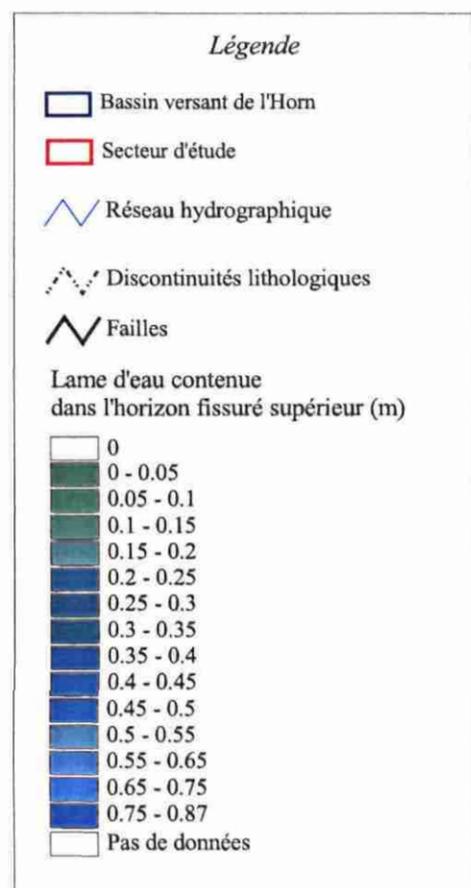
Pl. 27- Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Yar)

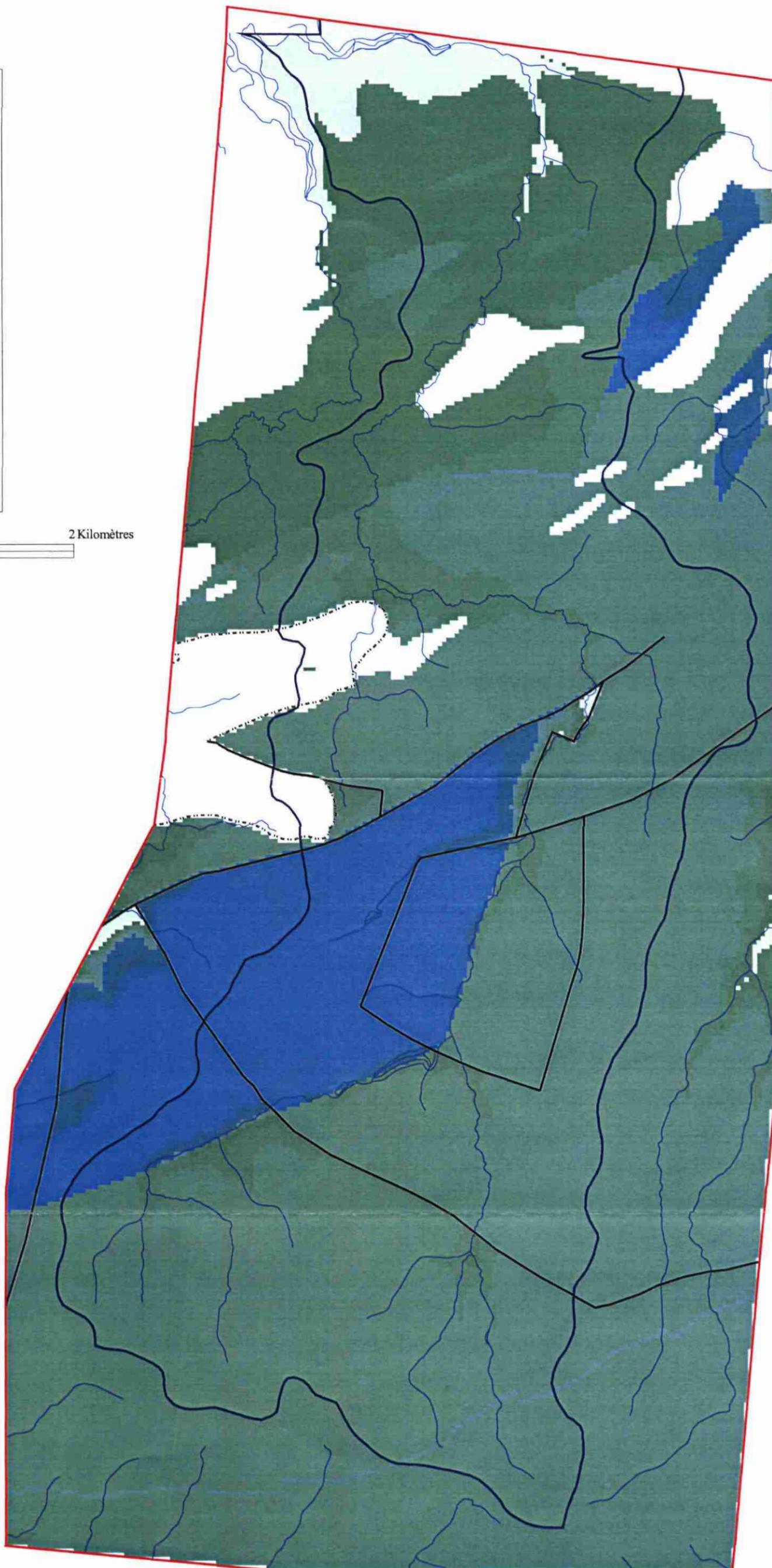
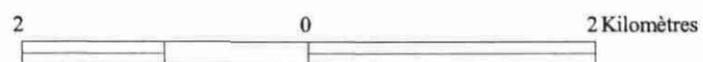
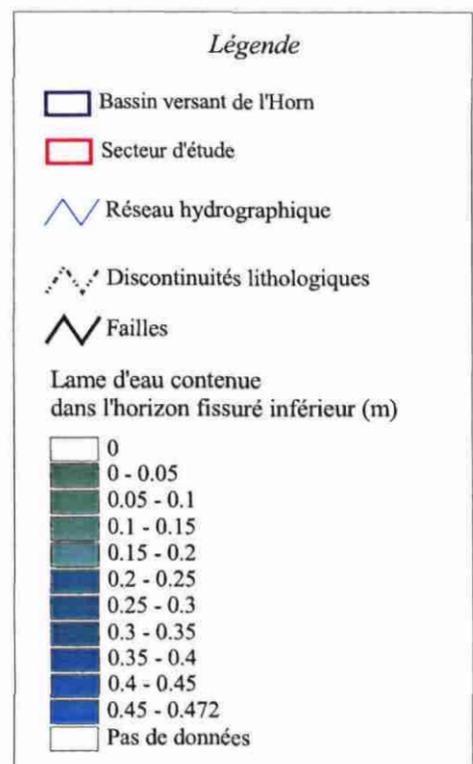


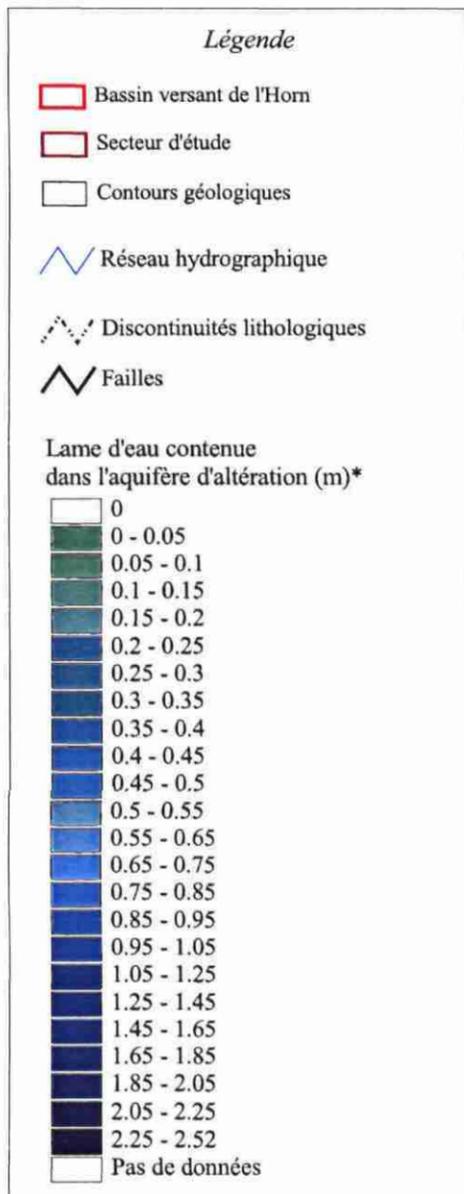
(*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 40.65 m et saturé sur 36.62 m en moyenne. Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

Pl. 28 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Yar)

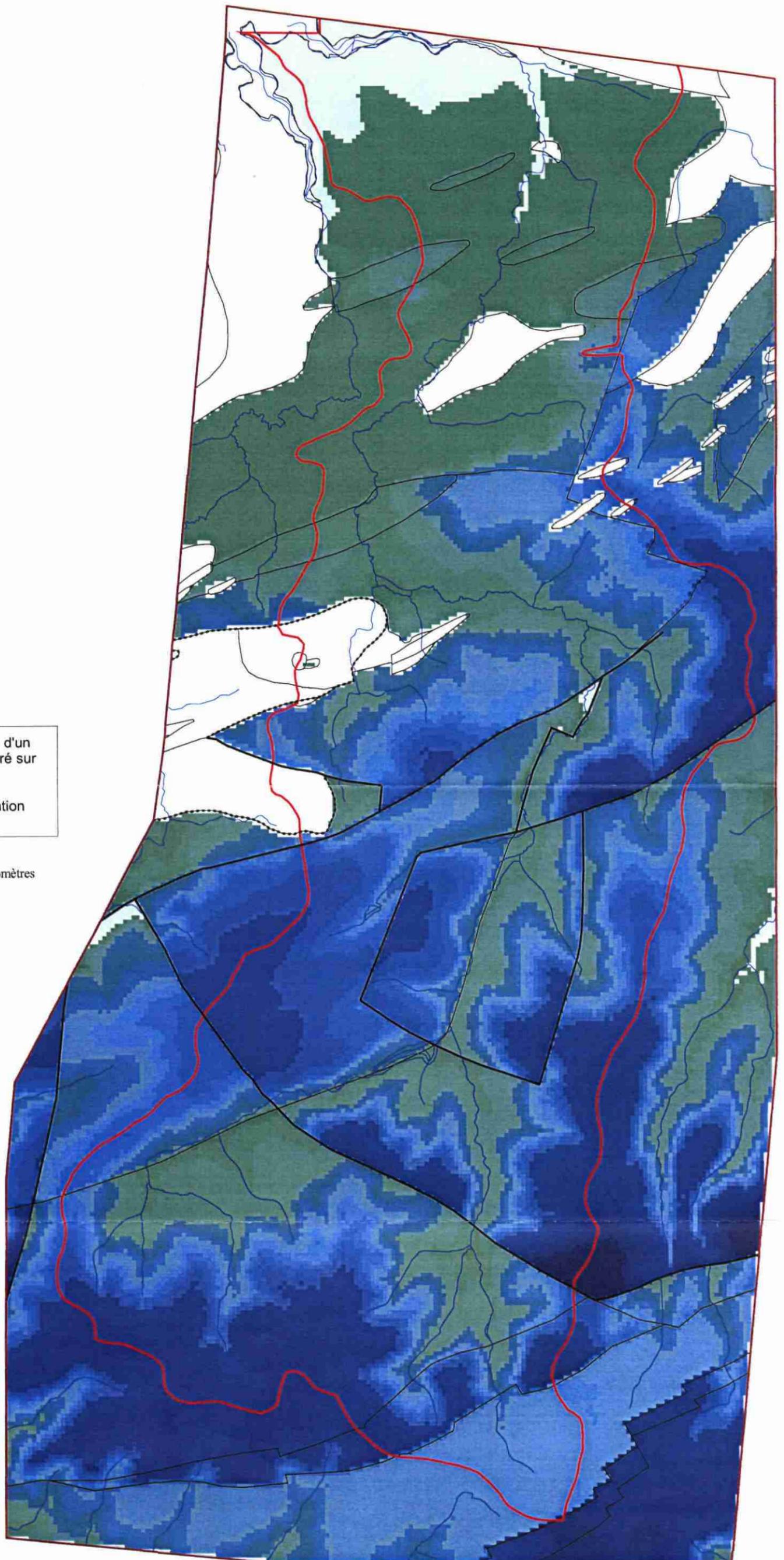
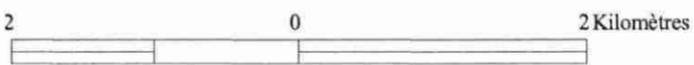


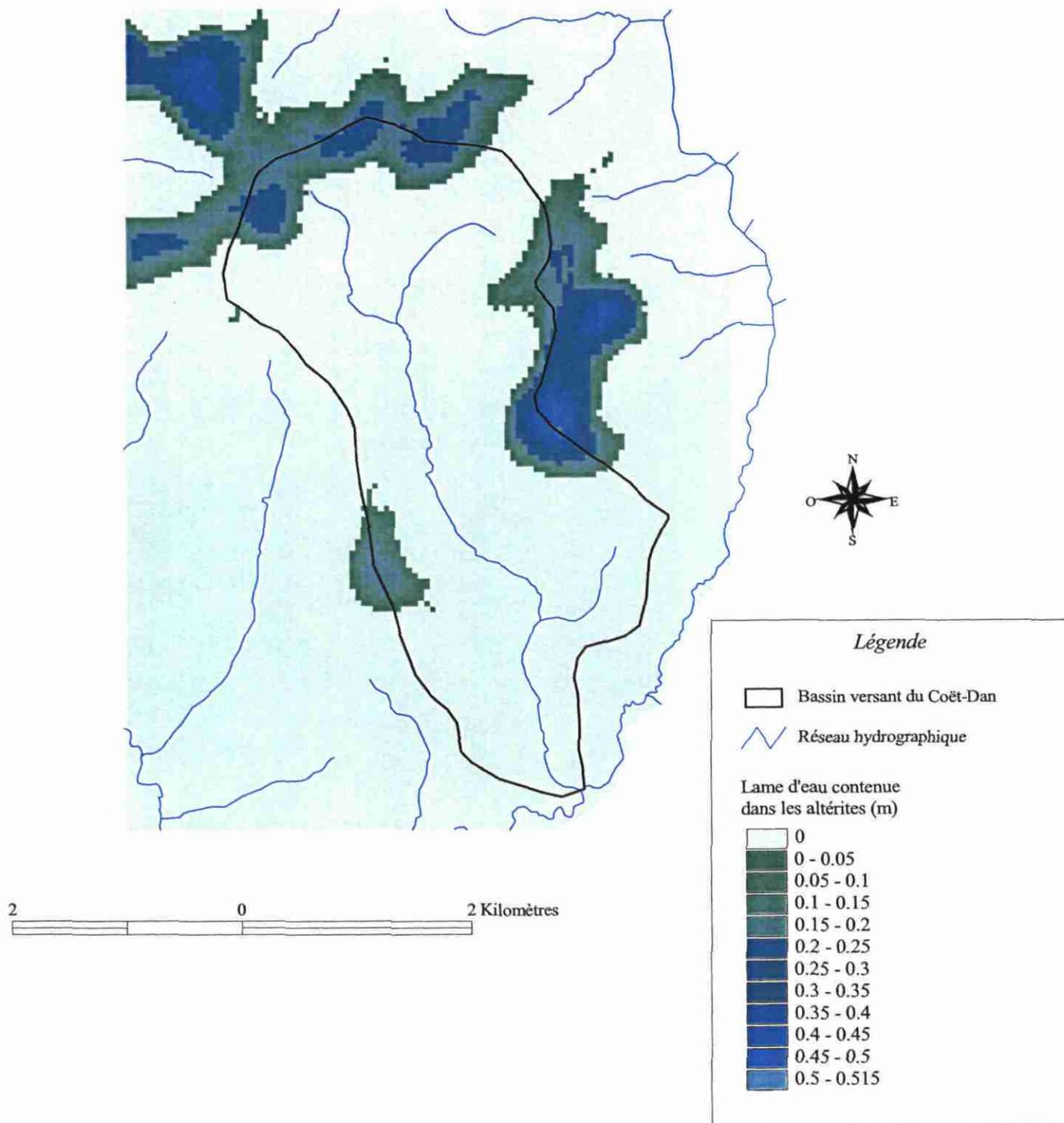




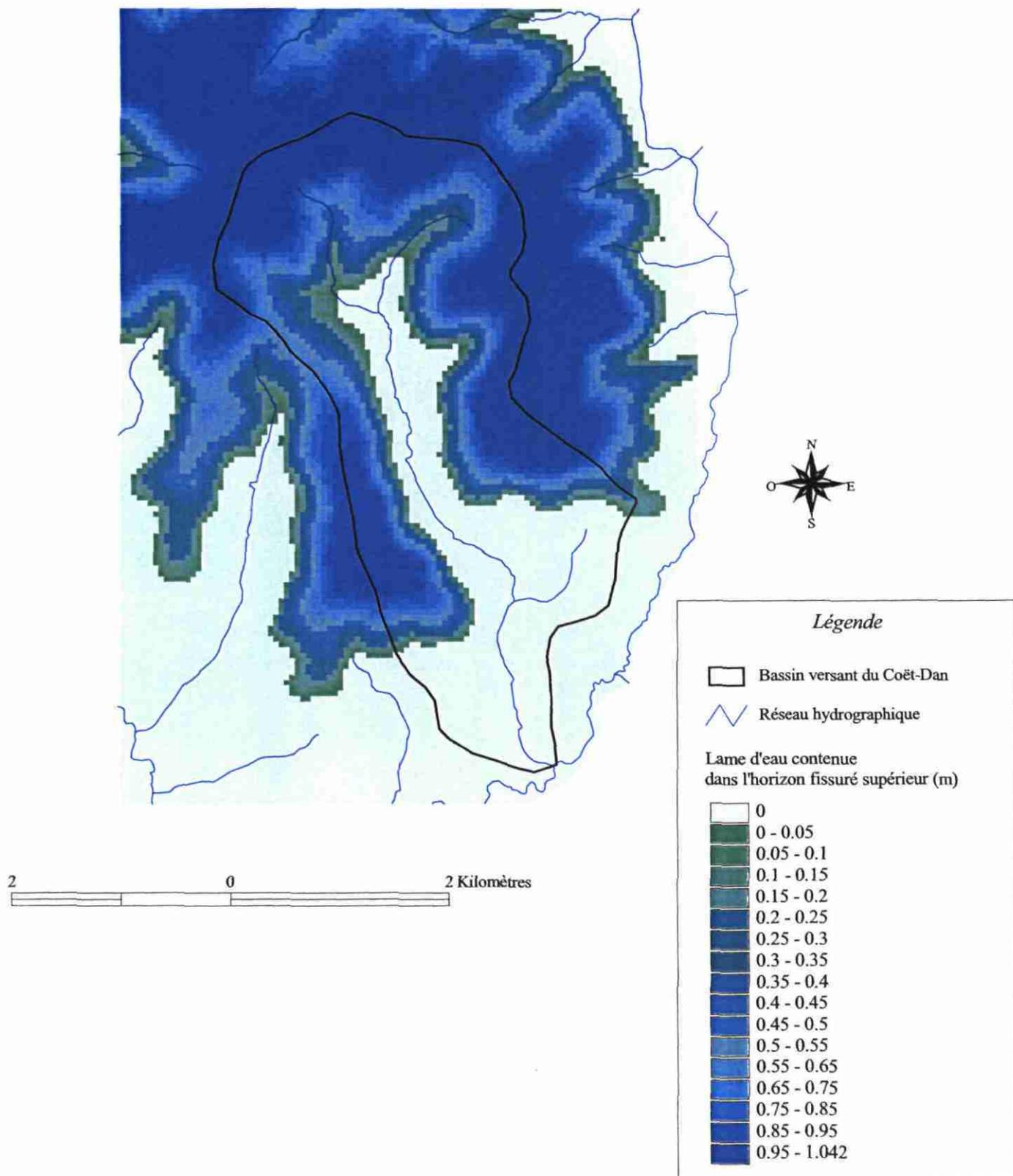


(*) La lame d'eau souterraine est calculée au sein d'un aquifère d'épaisseur moyenne de 40.56 m et saturé sur 36.55 m en moyenne. Le calcul est réalisé sur les 50 premiers mètres du sous-sol en raison de la profondeur d'investigation maximale des sondages RMP.

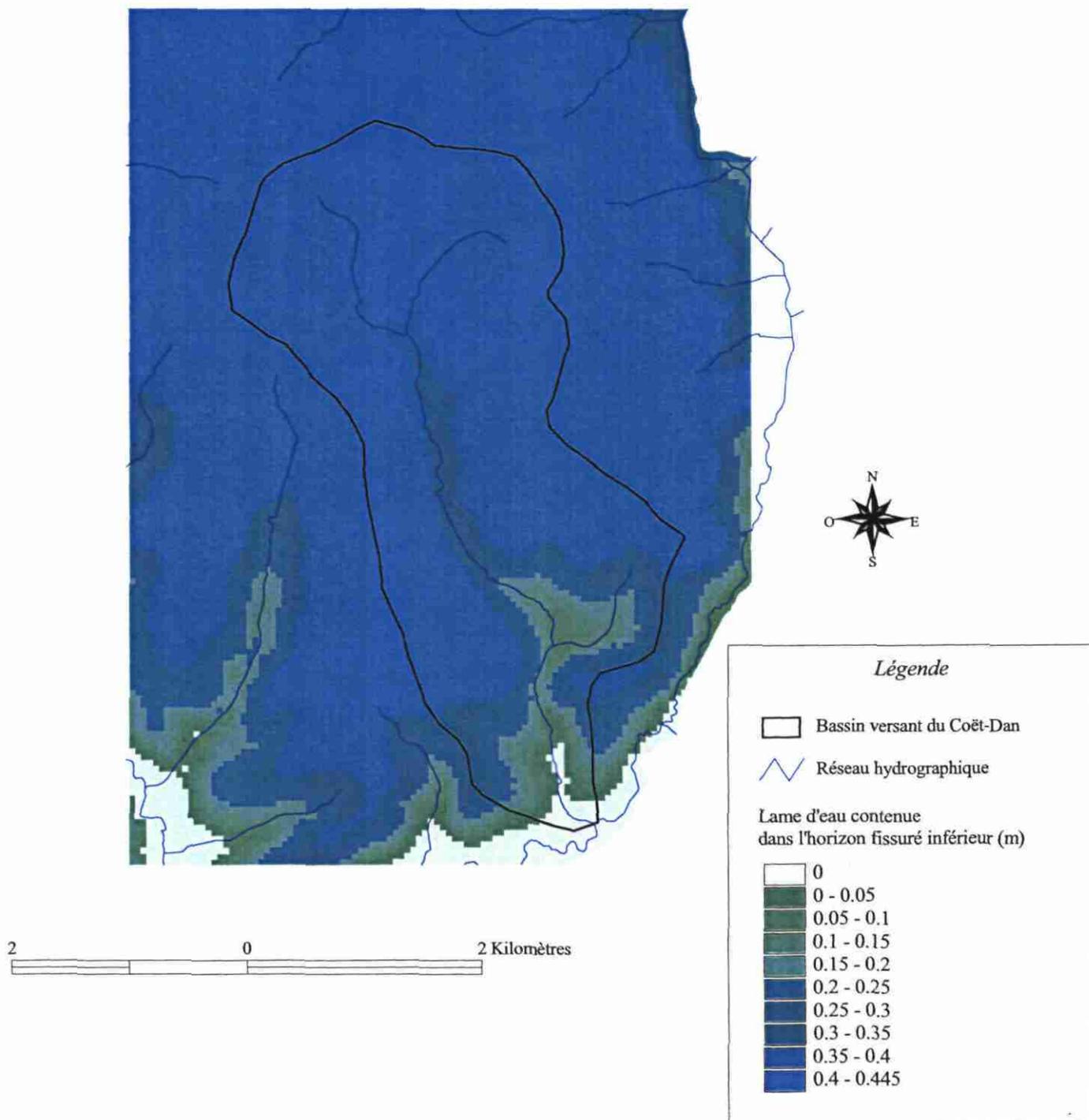




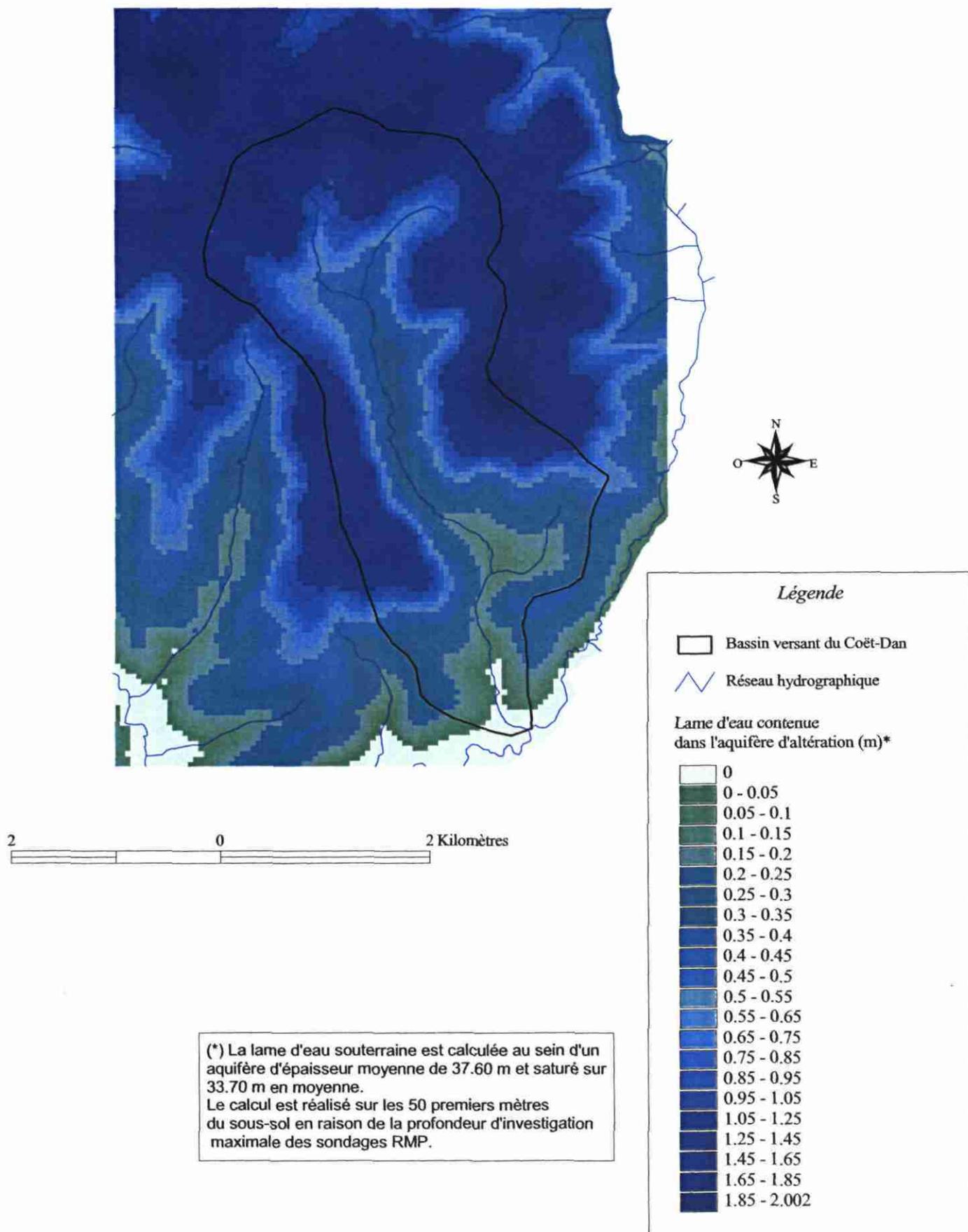
Pl. 33 - Lame d'eau souterraine contenue dans les altérites (bassin du Coët Dan)



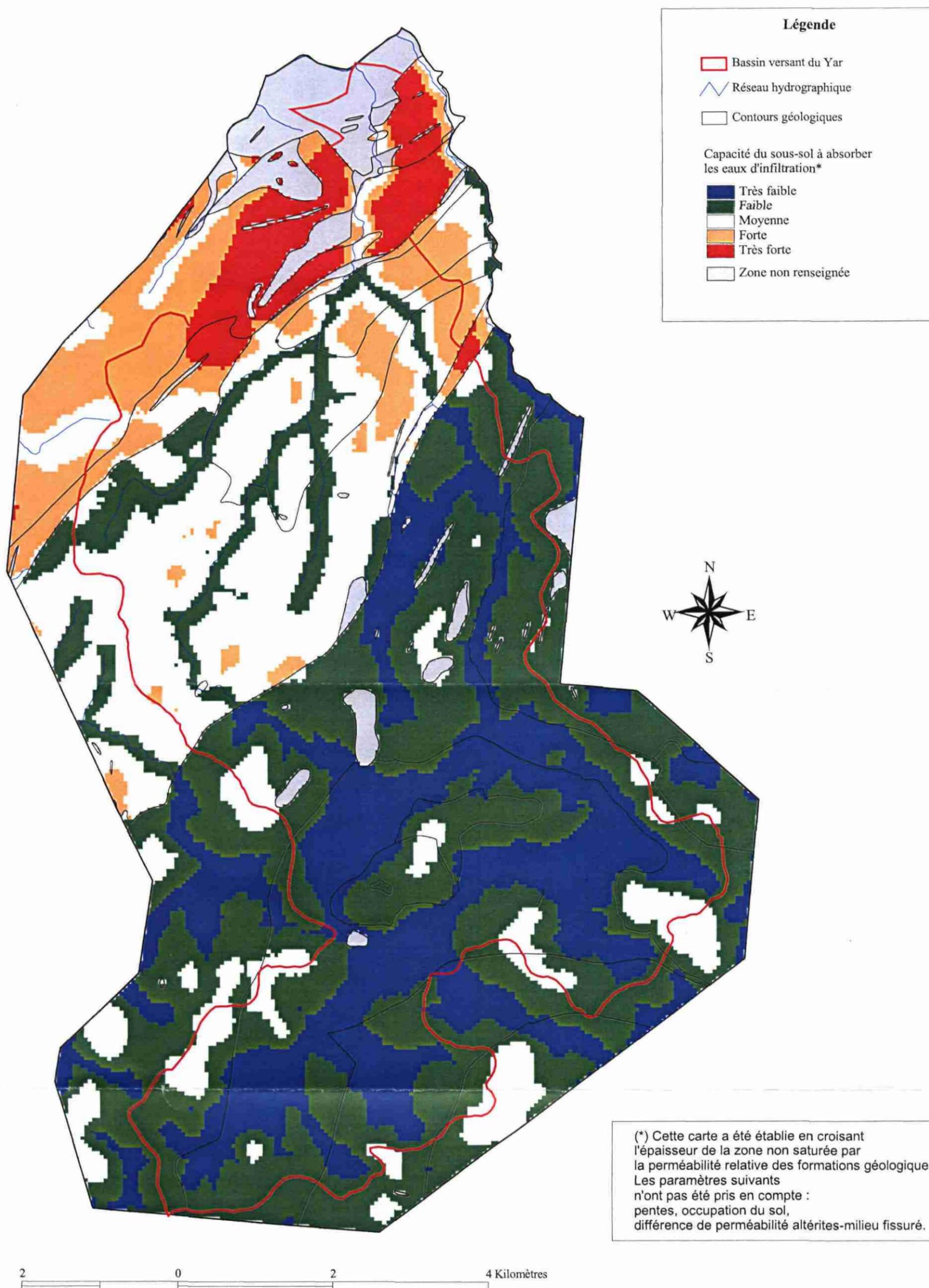
PL 34 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré supérieur (bassin du Coët Dan)



Pl. 35 - Lame d'eau souterraine contenue dans l'horizon fissuré inférieur (bassin du Coët Dan)



Pl. 36 - Lame d'eau totale de l'aquifère d'altération (bassin du Coët Dan)



Pl. 37 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Yar)

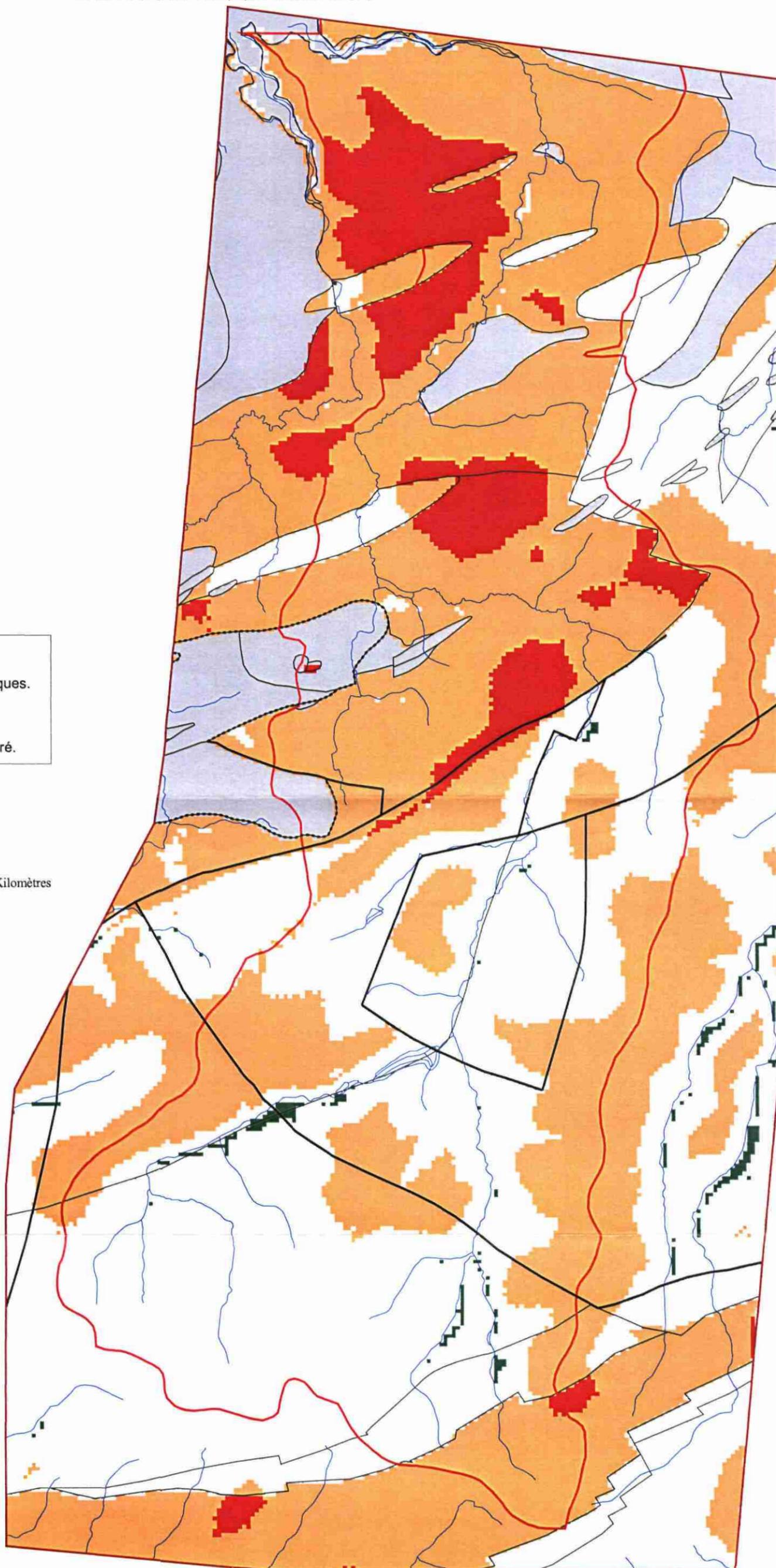
Légende

-  Bassin versant de l'Horn
-  Secteur d'étude
-  Contours géologiques
-  Réseau hydrographique
-  Discontinuités lithologiques
-  Failles

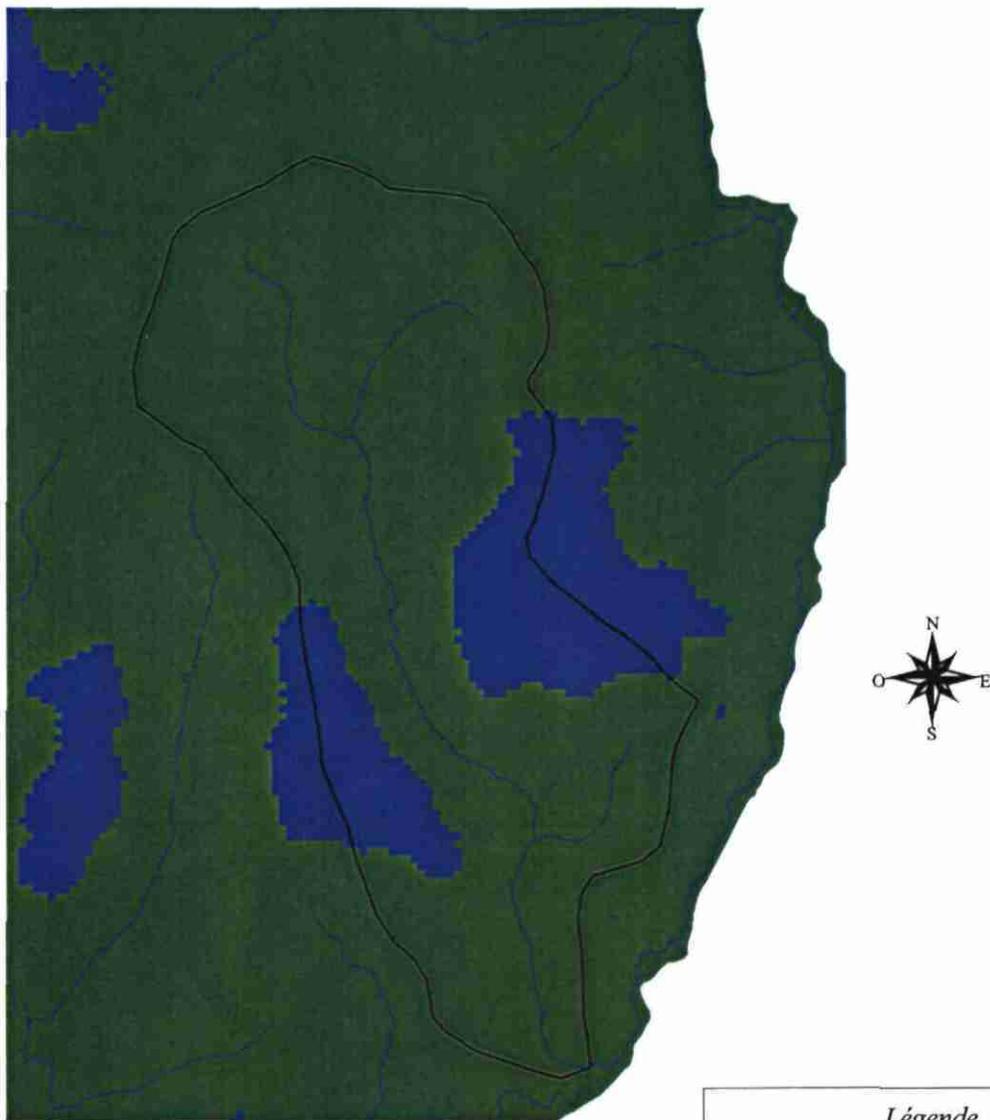
- Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration*
-  Très faible
-  Faible
-  Moyenne
-  Forte
-  Très forte
-  Zone non renseignée

(*) 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.

2 0 2 Kilomètres



Pl. 38 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin de l'Horn)



2 0 2 Kilomètres

Légende

 Bassin versant du Coët-Dan

 Réseau hydrographique

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

 Très faible

 Faible

 Moyenne

 Forte

 Très forte

 Zone non renseignée

(*) 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.

Pl. 39 - Capacité du sous-sol à absorber les eaux d'infiltration (bassin du Coët Dan)

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.

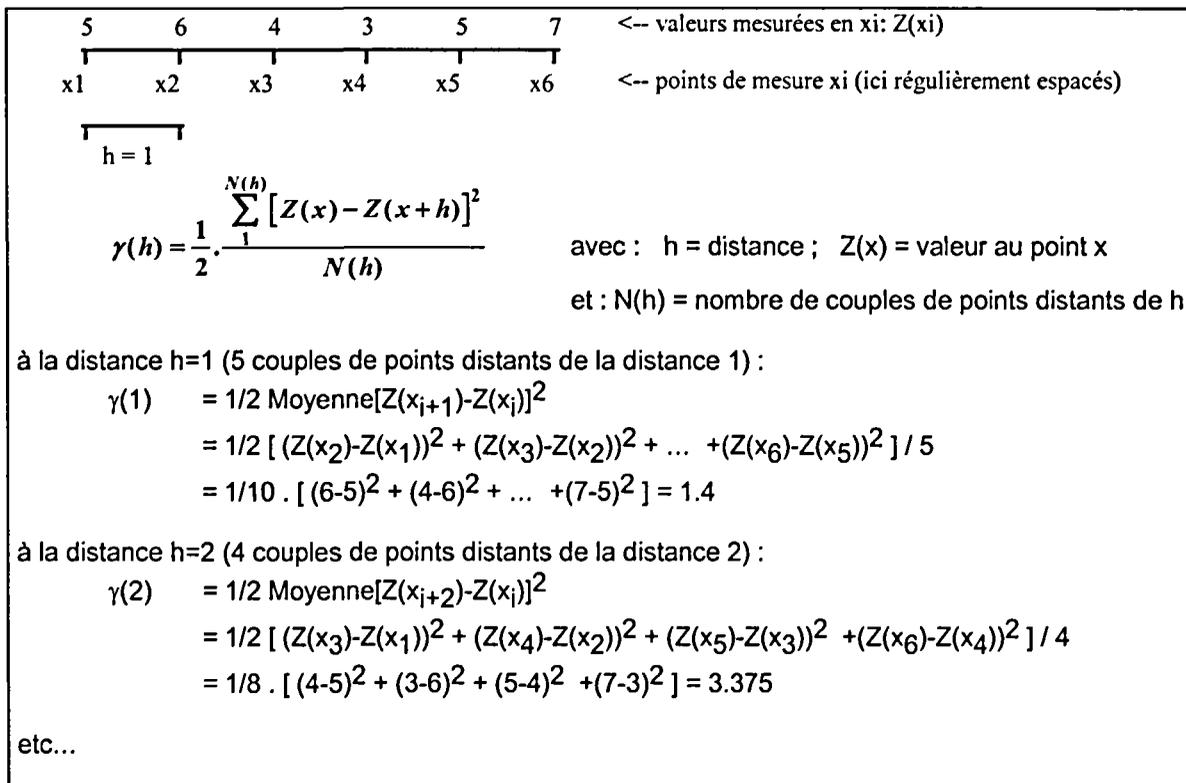
Deux raisons majeures justifient la mise en œuvre d'une approche géostatistique :

- 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.



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 pépîte". 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 pépîte.
- **Continuité spatiale au delà de l'origine**, traduite par les observations suivantes :
 - **portée** (distance de corrélation), phénomène stationnaire - figure A (a) ci-dessous; classiquement la valeur du variogramme est plus faible à l'origine: $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont voisins quand h est faible, donc la valeur du variogramme est faible) et augmente quand la distance augmente. Au bout d'une certaine distance entre points de mesure, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ n'augmente plus statistiquement, car les points ne sont plus corrélés. Cette distance limite est appelée portée (distance maximale jusqu'à laquelle des points peuvent être corrélés). A partir de cette distance, la valeur du variogramme se stabilise autour d'un palier,

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

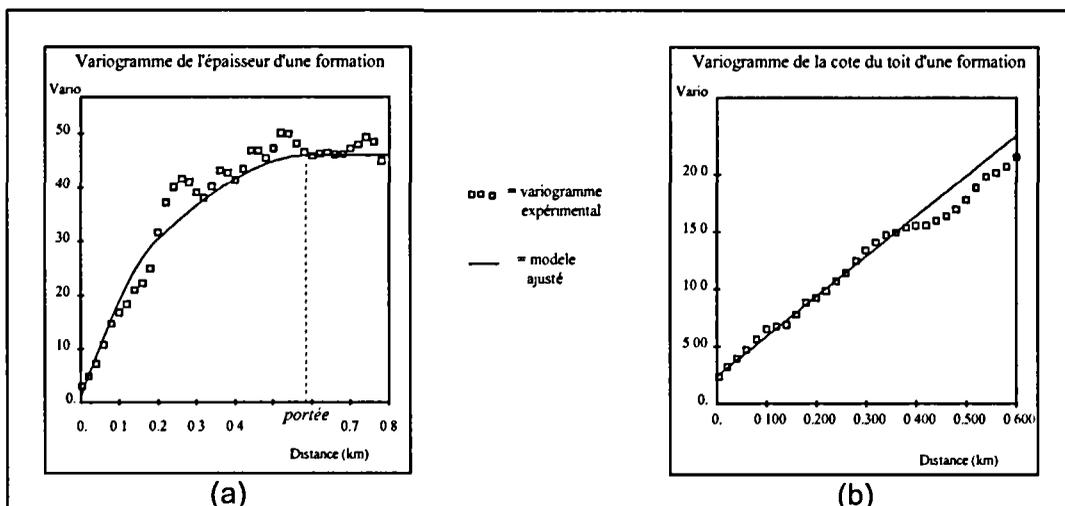


Fig. A : Exemples types de variogrammes : (a) : variable stationnaire avec portée visible, (b) : variable non stationnaire, sans portée.

Le krigeage

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

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

Formalisme du krigeage "ordinaire"

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Qualité des eaux en Bretagne - Ruissellement - Infiltration - Temps de réponse
BV du Yar (22), de l'Horn (29), et du Coët Dan (56)*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34

Service géologique de Bretagne

Atalante Beaulieu
2 rue de Jouanet
35700 RENNES

Tél. 02 99 84 26 70

