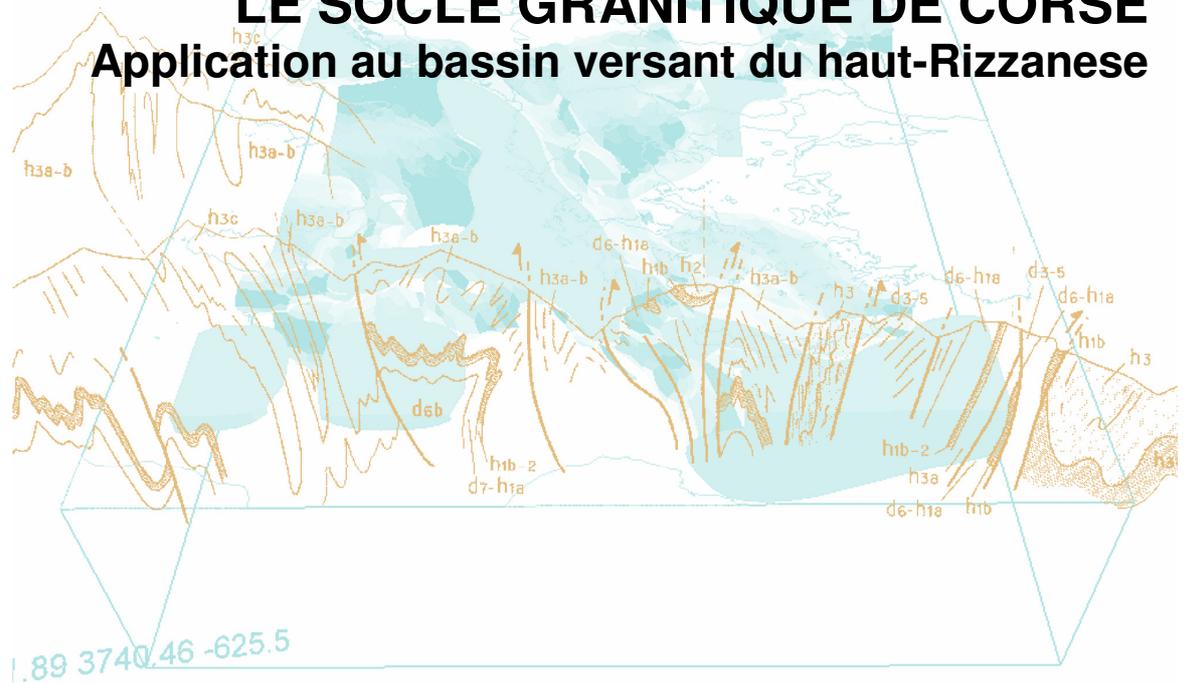




ESTIMATION DE LA RESERVE EN EAU SOUTERRAINE PARTICIPANT AU SOUTIEN D'ETIAGE DES RIVIERES, DANS LE SOCLE GRANITIQUE DE CORSE Application au bassin versant du haut-Rizzanese



Rapport final

BRGM/RP-55121-FR

Mars 2007

ESTIMATION DE LA RESERVE EN EAU SOUTERRAINE PARTICIPANT AU SOUTIEN D'ETIAGE DES RIVIERES, DANS LE SOCLE GRANITIQUE DE CORSE

Application au bassin versant du haut-Rizzanese

Rapport final

BRGM/RP-55121-FR
Mars 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007 PSP05CSC07

Y. Caballero

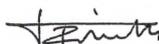
Avec la collaboration de
R. Wyns, J.M. Miehé, G. Bodéré, B. Bourguine et J.M. Baltassat

Vérificateur :

Nom : T. Pointet

Date : 30/11/2007

Signature :



Approbateur :

Nom : E. Palvadeau

Date : 30/11/2007

Signature :



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

Mots clés : soutien étiage, récession, ressource en eau, RMP, granite, Corse.

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

Caballero Y., Wyns R, Miehé J.-M., et al.. (2007) - Estimation de la réserve en eau souterraine participant au soutien d'étiage des rivières, dans le socle granitique de corse. Application au bassin versant du haut-Rizzanese. Rapport final. BRGM/RP-55121-FR, 105 p.,65 ill,1 ann.

Synthèse

En Corse, dans un contexte d'augmentation de la demande en eau pour l'alimentation des populations et face aux sécheresses qui devraient être de plus en plus fréquentes d'après les évolutions climatiques actuellement prévues, l'utilisation d'eau souterraine constitue une alternative très intéressante.

A la demande de l'Office de l'Environnement de la Corse et en collaboration avec Claude Griolet du SEMA-DIREN, le BRGM développe un ensemble de travaux pour essayer de mieux connaître les conditions de mise en place de la ressource en eau souterraine en zone de socle granitique en Corse et de quantifier la ressource disponible.

Ce rapport présente le travail réalisé dans le cadre de la Convention d'Application OEC/BRGM 2005, sur un secteur défini comme potentiellement intéressant sur le plan de la ressource en eau souterraine, le bassin versant Rizzanese dans sa partie amont de la commune de Zoza, en Corse du Sud.

Cette étude a consisté en la réalisation d'une synthèse géologique sur l'ensemble des bassins du Baracci, Rizzanese et Ortolo, qui a mis en évidence un grand nombre de zones potentiellement aquifères (définies sur la base du modèle géologique proposé par Wyns *et al.* (2004)). Une campagne de mesures piézométriques a ensuite été conduite qui a mis en évidence le manque de données permettant d'étudier la piézométrie à grande échelle. Des sondages RMP ont donc été réalisés pour tenter de disposer d'un peu plus de données, ainsi qu'un travail de caractérisation de la géométrie des formations concernées par le modèle géologique adopté.

Cette caractérisation a permis de proposer une quantification de la ressource en eau souterraine susceptible d'alimenter l'écoulement des rivières en étiage, dont les résultats ont été confrontés aux volumes dynamiques estimés à partir de l'analyse de la récession des rivières. Ainsi, une estimation des ressources en eau souterraines existant dans la zone d'étude a pu être réalisée, en les localisant spatialement de manière à orienter les recherches sur les secteurs les plus favorables.

Les deux méthodes ont permis d'aboutir à des ordres similaires de réserve en eau souterraine susceptible d'alimenter les rivières en étiage. Ces ordres de grandeur sont compris entre 10 et 20 Mm³ sur la zone d'étude.

De plus, la mise en œuvre conjointe des deux méthodes a permis de proposer, en complément de la quantification de la ressource en eau, une cartographie de l'extension spatiale des zones les plus favorables à la présence d'eau souterraine sur la zone d'étude.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Synthèse des travaux précédents.....	13
2.1. LA SYNTHÈSE GEOLOGIQUE.....	13
2.2. LA CAMPAGNE DE MESURES PIEZOMETRIQUES.....	17
3. Caractérisation spatiale de la réserve en eau souterraine du bassin versant du Rizzanese en amont du Pont de Zoza.....	21
3.1. METHODE DE TRAVAIL.....	21
3.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE.....	22
3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE.....	24
3.4. DONNEES DISPONIBLES ET ACQUISITIONS SUPPLEMENTAIRES.....	25
3.4.1. Principe de la méthode RMP	27
3.4.2. Le sondage RMP	31
3.4.3. Interprétation des sondages	33
3.4.4. Présentation des résultats d'un sondage fournis par le système NUMIS	37
3.4.5. Résultats des mesures RMP	39
3.4.6. Synthèse	45
3.5. CONSTITUTION DE LA SURFACE DE BASE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE PERENNE.....	46
3.5.1. Données prises en compte.....	46
3.5.2. Méthodologie.....	46
3.5.3. Mise en œuvre	47
3.5.4. Vérification et résultat final	50
3.6. CONSTRUCTION DE LA PIEZOMETRIE SUR LE BASSIN VERSANT	53
3.6.1. Données disponibles	53
3.6.2. Construction de la surface piézométrique à partir de la surface de base du réseau hydrographique pérenne.....	53
3.7. INTEGRATION DE LA LITHOLOGIE ET DE LA FRACTURATION	56
3.8. QUANTIFICATION ET REPARTITION SPATIALE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE AU SEIN DE L'HORIZON D'ALTERATION.....	61

3.9. SYNTHÈSE	62
4. Processus hydrologiques sur le bassin versant du haut-Rizzanese.....	63
4.1. DONNÉES DISPONIBLES	63
4.1.1. Précipitations et ETP	63
4.1.2. Débits journaliers.....	63
4.2. ANALYSE DES DONNÉES	65
4.2.1. Comparaison des données des stations EDF et DIREN	65
4.2.2. Analyse des débits classés.....	67
4.2.3. Modélisation inverse (pluie-débit) des écoulements.....	71
4.2.4. Analyse des tarissements.....	74
4.3. SYNTHÈSE	86
5. Comparaison des volumes estimés par les méthodes géologiques et hydrologiques.....	89
6. Conclusion.....	91
7. Bibliographie	93

Liste des illustrations

Illustration 1 - Localisation géographique de la zone d'étude: Bassins versants du Baracci-Rizzanese-Ortolo.	13
Illustration 2 - Modèle conceptuel de la structure des aquifères dans des roches cristallines altérées (tiré de Wyns et al., 2004).....	14
Illustration 3 - Cartographie des replats topographiques (pente < 7°) sur la zone d'étude (échelle 1/300 000ème).	15
Illustration 4 - Visualisation des contours délimitant grossièrement les zones potentiellement aquifères dans lesquelles on a pu observer des profils d'altération suffisamment importants pour contenir des aquifères au potentiel intéressant.	16
Illustration 5 - Carte de localisation des sources et forages étudiés.	18
Illustration 6 - Localisation et ordre de grandeur du débit des sources pour lesquelles cette grandeur a pu être mesurée ou bien est connue par les exploitants (les débits égaux à 0 correspondent à des suintements identifiés mais non mesurables).....	19
Illustration 7 - Principe de construction de la surface piézométrique, à partir de la connaissance de la surface de base. A - dénivellation entre la surface du sol et la surface de base; B - dénivellation entre la surface piézométrique et la surface de base.....	22
Illustration 8 - Zone d'étude amont du pont de Zoza sur le bassin versant du Rizzanese.	23

Illustration 9 - vue du bassin versant depuis le village de Zona.....	23
Illustration 10 - Contexte géologique de la zone d'étude.	24
Illustration 11 - Localisation des forages pour lesquels la piézométrie est connue et des sources dont l'existence a été vérifiée lors d'une visite de terrain. Les sources recensées sur la carte topographique au 1/25 000ème de l'IGN ainsi que les contours des zones considérées comme potentiellement aquifères (cf. Illustration 4) sont aussi indiquées.	26
Illustration 12 - Débits des sources, conductivités de l'eau mesurée en divers points du bassin versant. Les zones de replats (pente des cellules du MNT < 7%) sont représentées en fonction de leur altitude et englobées dans les zones considérées comme potentiellement aquifères.	27
Illustration 13 - Principe de la mesure RMP.	29
Illustration 14 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.....	29
Illustration 15 - Equipement de RMP NUMIS installé sur la plage arrière d'un 4x4 pour une manipulation aisée.....	30
Illustration 16 - Cable disposé au sol, formant l'antenne d'émission et de réception du signal. Ici, il s'agit d'un carré de 3 m de côté centré sur le caillou, uniquement à des fins d'illustration.....	30
Illustration 17 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.	31
Illustration 18 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1	33
Illustration 19 - Résultats d'inversion des données théoriques.	35
Illustration 20 - Paramètres du modèle.	35
Illustration 21 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.....	37
Illustration 22 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP.....	38
Illustration 23 - Localisation des 17 sites potentiels et sondages RMP effectivement réalisés.	40
Illustration 24 - Statistiques relatives aux sondages RMP.	41
Illustration 25 - Synthèse des sondages RMP. La colonne « résultats » exprime les porosités efficaces qui ont été calculées.....	45
Illustration 26 - Zone d'étude et points échantillonnés sur les rivières pérennes utilisés.....	47
Illustration 27 - Variogramme brut de la cote de base du réseau hydrographique.....	48
Illustration 28 - Variogramme de la cote de base du réseau hydro après soustraction d'une dérive linéaire et avec son ajustement.....	49
Illustration 29 - Paramètres de la grille modélisée.....	49
Illustration 30 - Visualisation du MNT de la surface de base et de la position d'une coupe de contrôle.....	50
Illustration 31 - Coupe de contrôle. En noir, coupe de la topographie et en bleu coupe de la surface de base du réseau hydrographique.....	51
Illustration 32 - Surface de base finale du réseau hydrographique obtenue.....	51

Illustration 33 - Epaisseur de la différence en altitude entre la topographie du MNT et celle de la surface de base des rivières pérennes.	52
Illustration 34 - synthèse des données piézométriques disponibles et calcul des différences d'altitude entre niveau piézométrique, surface de base et topographique.....	53
Illustration 35 - Relations entre les niveaux piézométriques, la surface de base du réseau hydrographique pérenne et la surface topographique.	54
Illustration 36 - Profondeur par rapport au sol du niveau piézométrique modélisé.	55
Illustration 37 - Relation entre la piézométrie modélisée et la piézométrie mesurée au niveau des forages et avec les sondages RMP.	56
Illustration 38 - Carte des arènes et de la fracturation locale d'après les visites de terrain et une analyse de la topographie sur carte au 1/25 000 ^{ème}	57
Illustration 39 - Epaisseur des altérites calculée par différence entre l'altitude du mur des altérites calculée par interpolation et la topographie.....	58
Illustration 40 - épaisseur et porosité efficace théoriques affectées aux arènes et aux deux niveaux de l'horizon fissuré.....	59
Illustration 41 - Carte des épaisseurs calculées pour les niveaux supérieur et inférieur de l'horizon fissuré sur la zone d'étude.....	60
Illustration 42 - Présentation schématique de la méthode de détermination de la part d'eau souterraine contenue dans les formations d'altération des granites (arènes et horizon fissuré), susceptible de participer au soutien des écoulements des rivières en étiage.	61
Illustration 43 - Volumes d'eau susceptibles de participer au soutien des écoulements des rivières en étiage, par horizon d'altération pour les bassins versants du Codi et du Criviscia. Pour chaque formations des débits spécifiques équivalents ont été calculés en considérant que ces volumes seraient vidangés en un an.	62
Illustration 44 - Pluviomètre et stations hydrométriques dans la zone du haut Rizzanese.....	64
Illustration 45 - Caractéristiques principales des stations hydrométriques existantes.....	64
Illustration 46 - Comparaison des débits mesurés à Codi, Criviscia/Saint-Antoine et à Zoza (Qcodi + Q Criviscia/St- Antoine – Q Zoza).....	65
Illustration 47 - Comparaison des débits mesurés à Codi, Criviscia/Saint-Antoine et à Zoza DIREN (Qcodi + Q Criviscia/St-Antoine – Q Zoza DIREN).	66
Illustration 48 - Débits spécifiques d'étiage des bassins versants du Codi et du Criviscia/Saint-Antoine.....	67
Illustration 49 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Zoza DIREN.	68
Illustration 50 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Zoza EDF.	69
Illustration 51 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Criviscia/St-Antoine.....	70
Illustration 52 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Codi.....	70

Illustration 53 - Corrélogramme croisé des précipitations journalières et des débits journaliers à l'exutoire pour la période comprise entre 2003 et 2006.	72
Illustration 54 - Débits simulés et débits observés à l'exutoire du bassin versant sur la période comprise entre 2003 et l'été 2006.	73
Illustration 55 - Caractéristiques principales résultantes des simulations Tempo pour chaque station hydrométrique (les 3 premières sont gérées par EDF, la dernière par le SEMA-DIREN).	73
Illustration 56 - Précipitation mesurée et Evapotranspiration calculée quotidiennement à Levie et débits journaliers mesurées à la station de la DIREN du pont de Zoza sur le Rizzanese pendant la période 2002 – 2006. Les zones en grisé correspondent aux périodes pendant lesquelles le tarissement des écoulements peut être étudié.	74
Illustration 57 - Utilisation de la notion de récession pour séparer les différentes composantes d'un hydrogramme (modifié à partir de Dewandel et al., 2003).	75
Illustration 58 - Tarissement des débits mesurés à la station du pont de Zoza l'année 2005, présenté sur un diagramme semi-log, en regard des précipitations mesurées à la station de Levie.	78
Illustration 59 - Ajustement du tarissement de 2003 à l'aide de la formulation de Mangin et de Maillet. Une erreur de mesure de 10% est attribuée à la chronique des débits mesurés pour juger de la qualité de l'ajustement. La période correspondant au débit de base est marquée par le fond grisé.	79
Illustration 60 - Comparaison entre les ajustements des formules de Maillet et Quadratique sur la période du débit de base de 2003.	80
Illustration 61 - Valeurs des paramètres et des volumes dynamiques obtenus à l'issue de l'ajustement du tarissement de 2003 avec les deux formulations utilisées.	80
Illustration 62 - Ajustement des tarissements de 2004, 2005 et 2006 à l'aide des formulations de Mangin et de Maillet.	82
Illustration 63 - Caractéristiques des ajustements pour les années 2004, 2005 et 2006.	83
Illustration 64 - recharge en eau souterraine estimée pour les années 2003 à 2006.	84
Illustration 65 - Valeurs obtenues à l'issue de l'ajustement des tarissements du Codi et de Criviscia/Saint-Antoine pour les années 2003 à 2005 (les valeurs de PE sont données sur l'illustration 64).	86

Liste des annexes

Annexe 1 Résultats des sondages RMP sur le bassin versant du Rizzanese	95
--	----

1. Introduction

En Corse, dans un contexte d'augmentation de la demande en eau pour l'alimentation des populations et face aux sécheresses qui devraient être de plus en plus fréquentes d'après les évolutions climatiques actuellement prévues, l'utilisation d'eau souterraine constitue une alternative très intéressante. Si les communes littorales situées sur des milieux alluvionnaires ou carbonatés font déjà largement appel à la ressource en eau souterraine par forage, les communes situées en contexte de socle granitique ou métamorphique n'utilisent généralement que leur partie visible en surface par l'intermédiaire du captage des sources.

Les roches de socle granitique et métamorphique qui recouvrent la majeure partie du territoire corse sont de milieux qui permettent rarement d'obtenir des débits d'exploitation d'eau souterraine par forage de plus de 15 m³/h. Cependant, la ressource en eau souterraine qui s'y trouve peut représenter un apport d'appoint non négligeable pour l'alimentation en eau des communes de montagne et du littoral, surtout en contexte de diminution des niveaux des sources, conséquence d'une sécheresse prolongée.

La difficulté majeure que l'on rencontre lorsque l'on s'intéresse à la ressource en eau souterraine dans ce type de contexte géologique, c'est que ces conditions de stockage sont mal connues, qu'elle est donc difficile à localiser et encore plus à quantifier. Conséquence logique, lorsqu'elle est captée, cette ressource est rarement bien exploitée (pompages contrôlés par des niveaux d'eau dans les réservoirs des communes et non pas par les capacités réelles des aquifères).

Pour cette raison, un ensemble de travaux ont été entrepris par le BRGM pour essayer de décrire les conditions de mise en place de la ressource en eau souterraine en zone de socle granitique en Corse. Il a fallu commencer par acquérir des données qui, dans ce type de contexte, sont très peu nombreuses et de qualité très relative. Sur la base des informations récoltées, un modèle géologique de mise en place des réserves de l'eau souterraine en zone de socle granitique a été envisagé et la réalité de son existence a été testée sur le terrain. Enfin, une estimation de la part de l'eau souterraine qui participe aux écoulements des rivières en étiage a été réalisée, de manière à vérifier si les critères de localisation et de quantification de la ressource en eau souterraine adoptés dans le cadre du modèle choisi sont robustes et pourraient être utilisés pour la localisation de la ressource dans ce contexte géologique.

Ce rapport présente ainsi un travail pluriannuel réalisé sur un secteur défini comme potentiellement intéressant sur le plan de la ressource en eau souterraine, le bassin versant Rizzanese dans sa partie amont de la commune de Zoza en Corse du Sud.

Ce travail a consisté en la réalisation d'une synthèse géologique sur l'ensemble des bassins du Baracci, Rizzanese et Ortole, qui a mis en évidence un grand nombre de zones potentiellement aquifères (définies sur la base du modèle géologique adopté).

Une campagne de mesures piézométriques a ensuite été conduite qui a mis en évidence le manque de données permettant d'étudier la piézométrie à grande échelle. Des sondages RMP ont donc été réalisés pour tenter de disposer d'un peu plus de données et un travail de modélisation de la géométrie des formations concernées par le modèle géologique adopté a été réalisé.

Cette modélisation a permis de proposer une quantification de la ressource en eau souterraine susceptible d'alimenter l'écoulement des rivières en étiage, dont les résultats ont été confrontés aux volumes dynamiques estimés à partir de l'analyse de la récession des rivières. Ainsi, une estimation des ressources en eau souterraines existant dans la zone d'étude a pu être réalisée, en les localisant spatialement de manière à orienter les recherches sur les secteurs les plus favorables.

2. Synthèse des travaux précédents

2.1. LA SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE

Avec pour objectif de cartographier la présence éventuelle de formations d'altération dans les bassins versants du Baracci-Rizzanese-Ortolo (Illustration 1), une campagne de reconnaissance géologique a été effectuée en novembre 2004. Ce travail est présenté dans Caballero et Wyns (2004).

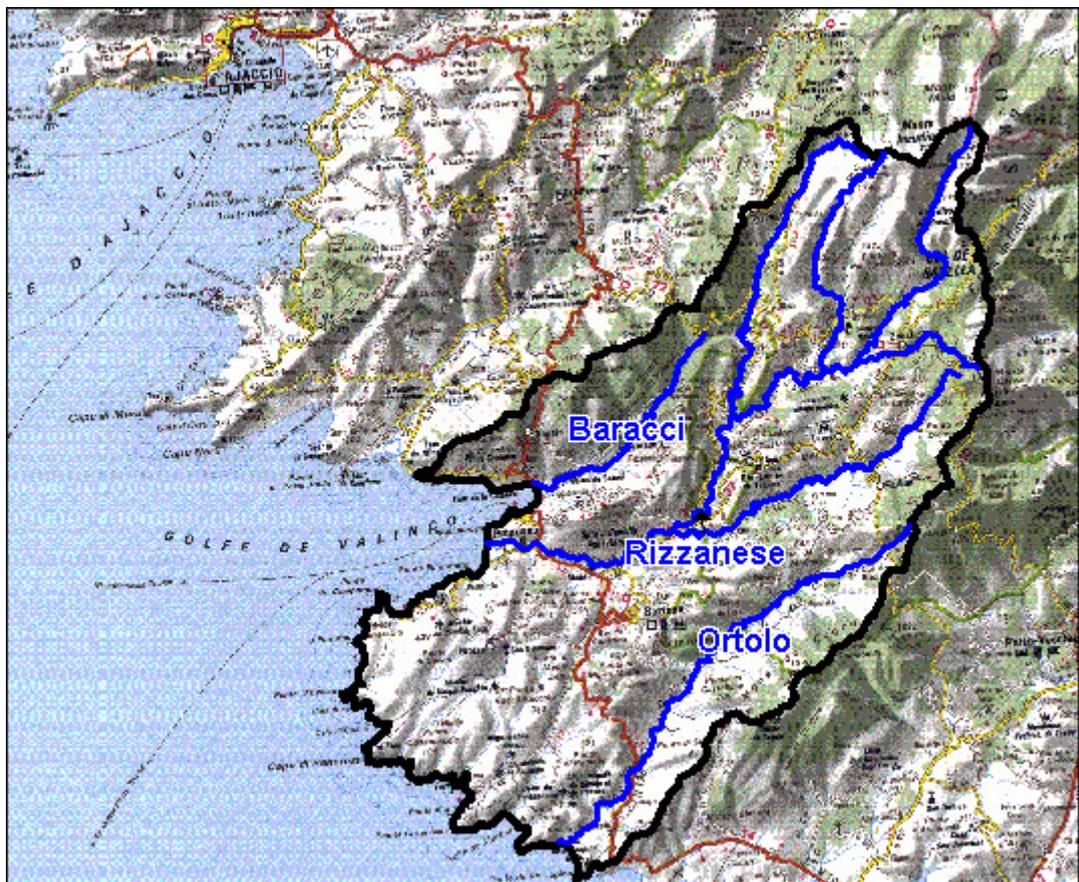


Illustration 1 - Localisation géographique de la zone d'étude: Bassins versants du Baracci-Rizzanese-Ortolo.

Le but de cette campagne était de chercher des profils d'altération constitués d'un niveau d'arènes surmontant un horizon fissuré. En effet, des études dont celle de Wyns *et al* (2004) ont montré que l'essentiel des ressources en eau dans les formations de socle granitique sont contenues dans les zones « d'altération et de fissuration » des granites (Illustration 2). Ces types de profils constituent donc les

réservoirs les plus intéressants en termes de ressource en eau, s'ils sont suffisamment étendus, profonds, drainés par des fractures et correctement alimentés.

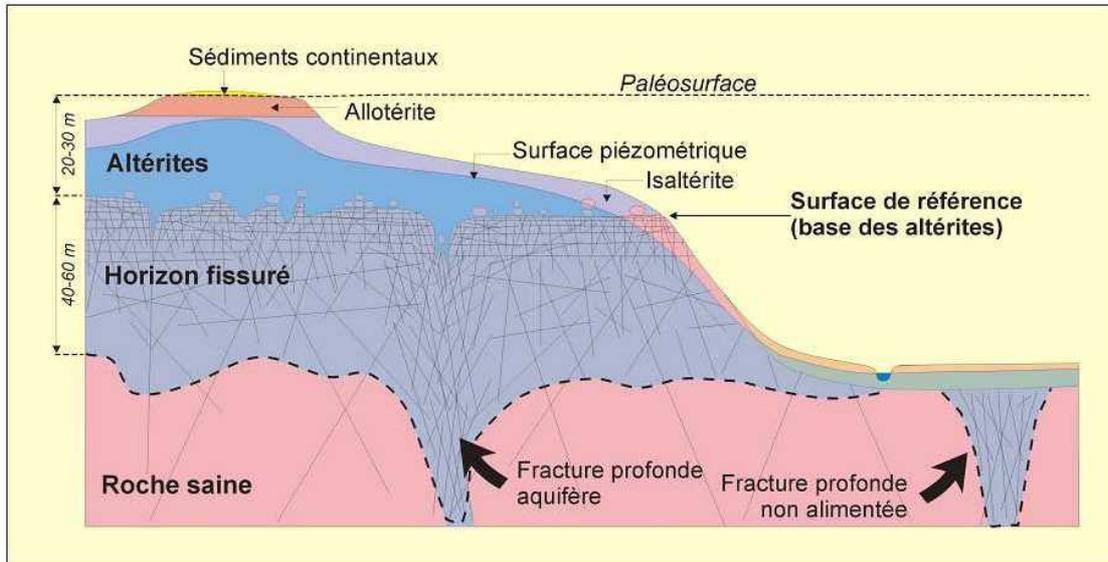


Illustration 2 - Modèle conceptuel de la structure des aquifères dans des roches cristallines altérées (tiré de Wyns et al., 2004)

Cette campagne de terrain a été précédée d'un traitement d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) à la maille de 50 m, afin de faire ressortir les zones plates susceptibles de correspondre à des zones à profil d'altération préservé. Le traitement a consisté à sélectionner les zones dont la pente est faible ($\alpha < 7^\circ$), de manière à faire apparaître d'éventuelles paléo-surfaces d'érosion (repérables grâce à leur aspect tabulaire), sous lesquelles pourraient se trouver des profils d'altération.

Ce traitement a permis de mettre en évidence un ensemble de zones tabulaires situées à des altitudes comprises entre le niveau de la mer et 1950 m (Illustration 3). La grande variabilité de la position de ces zones dans le relief (on en trouve à tous les étages des bassins versants) est intéressante car elle indique que les éventuelles paléo-surfaces pourraient être décalées par des failles. L'essentiel de leur mise en place est probablement antérieur à la formation du relief actuel. Toutes ces zones ne sont cependant pas des paléo-surfaces potentielles, puisque la majorité de celles situées à des altitudes faibles semble être des plaines alluviales dans lesquelles coulent les fleuves.

Replats dans la zone d'étude (pente < 7°)

Valeur

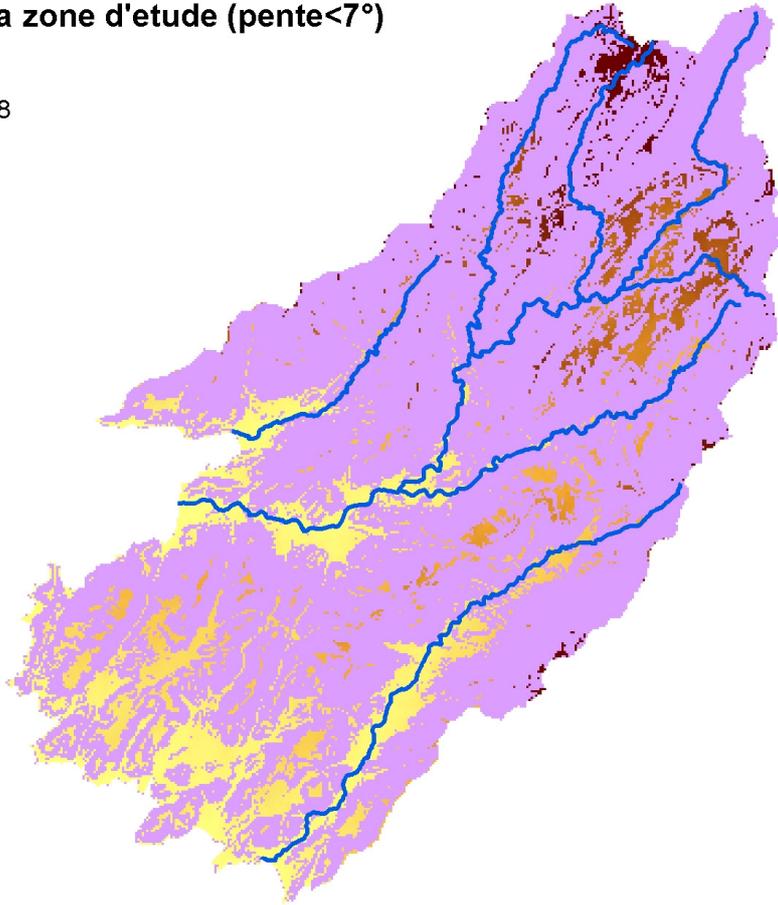


Illustration 3 - Cartographie des replats topographiques (pente < 7°) sur la zone d'étude (échelle 1/300 000ème).

A l'issue de ce travail, 9 zones potentiellement aquifères, qui présentent des caractéristiques favorables à la présence d'un profil d'altération important, ont été repérées (Illustration 4). Pour chacune d'entre elles, une description sommaire des principales caractéristiques géographiques, lithologiques, tectoniques, morphologiques et hydrogéologiques est donnée dans Caballero et Wynn (2004).

Replats dans la zone d'étude (pente < 7°)

Valeur

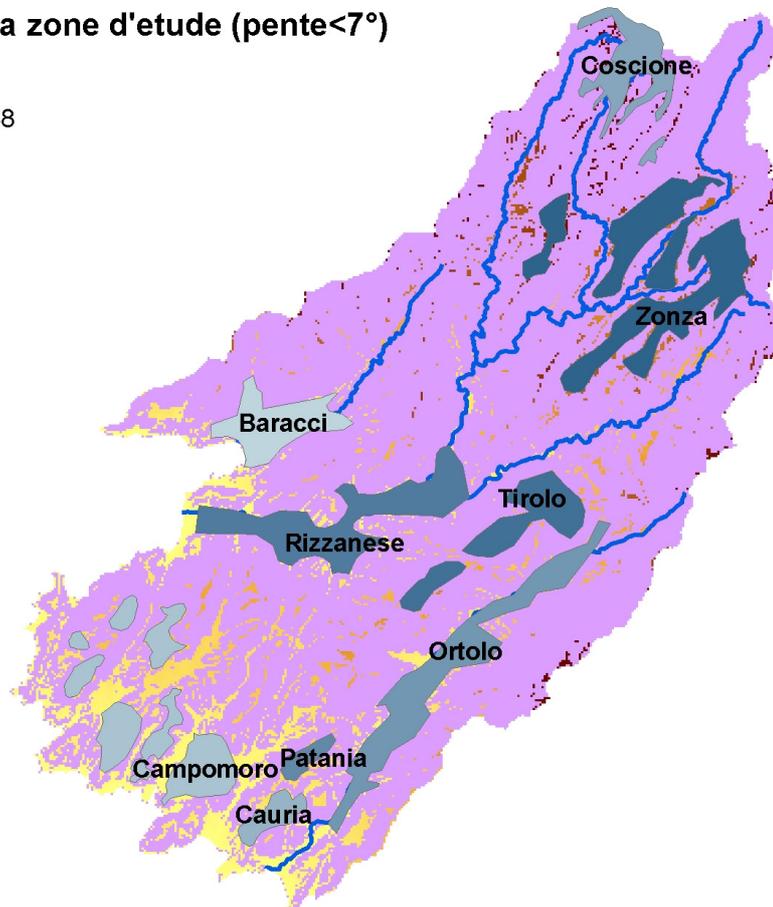


Illustration 4 - Visualisation des contours délimitant grossièrement les zones potentiellement aquifères dans lesquelles on a pu observer des profils d'altération suffisamment importants pour contenir des aquifères au potentiel intéressant.

Les zones délimitées sont essentiellement composées de plateaux dont la superficie peut varier de 1 à 19 km² et de fonds de vallées érodées par les rivières ou résultant de processus tectoniques (grabens) dont les superficies sont plus étendues (jusqu'à 23 km²).

Elles sont essentiellement constituées de paléo-profil d'altération plus ou moins préservés de l'érosion. Ces profils se présentent sous la forme d'horizons fissurés d'épaisseur pluri-décamétrique, parfois surmontés de niveaux d'arènes généralement mieux préservées dans les fonds de vallée.

Du point de vue géologique, on observe que ces profils d'altération se trouvent généralement sur un substratum de monzogranites et de granodiorites, contenant une proportion importante de biotite, principal minéral sensible à l'altération hydrique. De

même on observe que les granites leucocrates sont généralement préservés de l'altération et de ce fait dominant généralement les niveaux altérés. Les intrusions de petite taille de granite leucocrate, ainsi que les filons d'aprites ou de pegmatites qui recoupent les granodiorites et les monzogranites, sont très souvent affectés par de la fissuration horizontale. Cette fissuration résulte de l'apparition de contraintes horizontales dans l'encaissant, liée au gonflement des biotites sous l'effet de l'altération. Ainsi, les filons peuvent avoir un important rôle drainant au sein de l'aquifère de l'horizon fissuré, à condition que leur taille soit faible. Enfin, les nombreux filons basiques que l'on observe sur l'ensemble du bassin versant sont fortement altérés lorsqu'ils se trouvent à proximité des profils d'altération ou de l'altération liée au passage des failles.

2.2. LA CAMPAGNE DE MESURES PIEZOMETRIQUES

L'objectif de cette campagne était de rassembler le plus grand nombre de données permettant de décrire la répartition de la ressource en eau souterraine dans les aquifères de la région. Elle fut réalisée entre septembre et novembre 2005, de manière à travailler uniquement sur les écoulements issus des eaux souterraines qui participent au soutien de l'écoulement dans les rivières. Les résultats de cette campagne sont détaillés dans Caballero *et al.* (2005).

La campagne de mesures a consisté d'une part, à repérer toutes les sources connues et actives à cette période et, d'autre part, à relever le niveau piézométrique dans tous les forages existants sur la zone d'étude.

Un total de 142 sources et de 73 forages ont été étudiés dans le cadre de ce travail. L'analyse de la qualité des données obtenues montre que 94 points fournissent des mesures fiables, 74 fournissent des mesures dont la cohérence doit être vérifiée lors de toute utilisation pour faire de la piézométrie. Les 47 points de mesure restants étant uniquement composés de forages qui n'ont pu être visités ou localisés (Illustration 5).

La répartition spatiale des points de mesure montre que la présence d'eau souterraine n'est pas homogène sur le bassin étudié. De manière générale, les forages recensés ne sont pas systématiquement situés à proximité des zones potentiellement aquifères délimitées. Ceci semble normal dans la mesure où les logiques d'implantation des forages doivent répondre à la fois à des critères hydrogéologiques (qui dépendent de la sensibilité de l'hydrogéologue ou du foreur ayant implanté le forage) et fonciers (l'implantation optimale sur le plan hydrogéologique n'est pas toujours possible sur le plan foncier). La même observation peut être faite pour les sources, que l'on trouve aussi bien sur les zones délimitées qu'en dehors. Ceci montre que l'hétérogénéité du milieu granitique, dans lequel l'existence d'une ressource en eau souterraine n'est pas attribuable à la seule présence des horizons d'altération. Ce critère garde cependant tout son intérêt puisque l'on observe que les débits des sources que l'on rencontre à proximité des zones délimitées présentent des valeurs généralement intéressantes (Illustration 6).

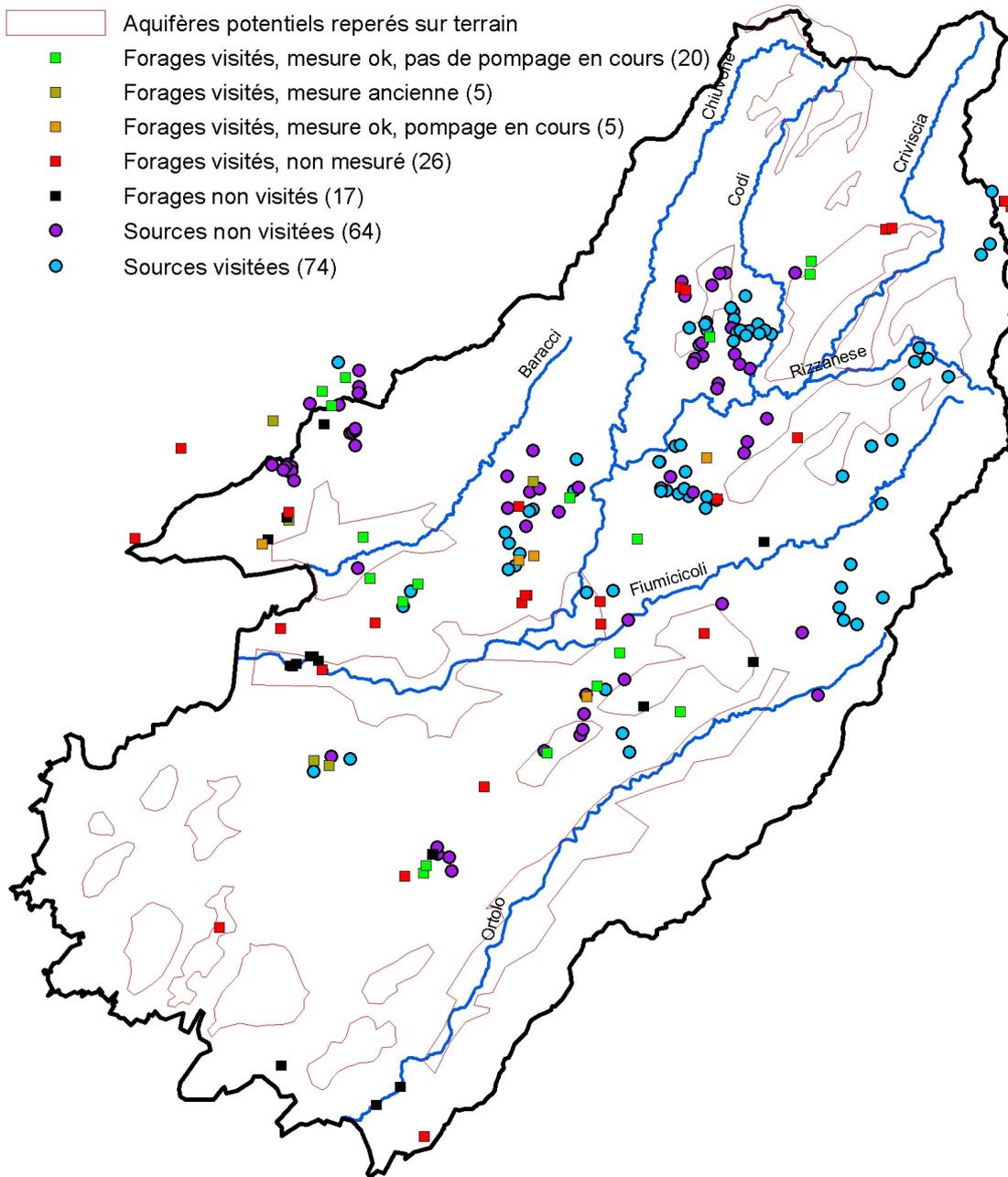


Illustration 5 - Carte de localisation des sources et forages étudiés.

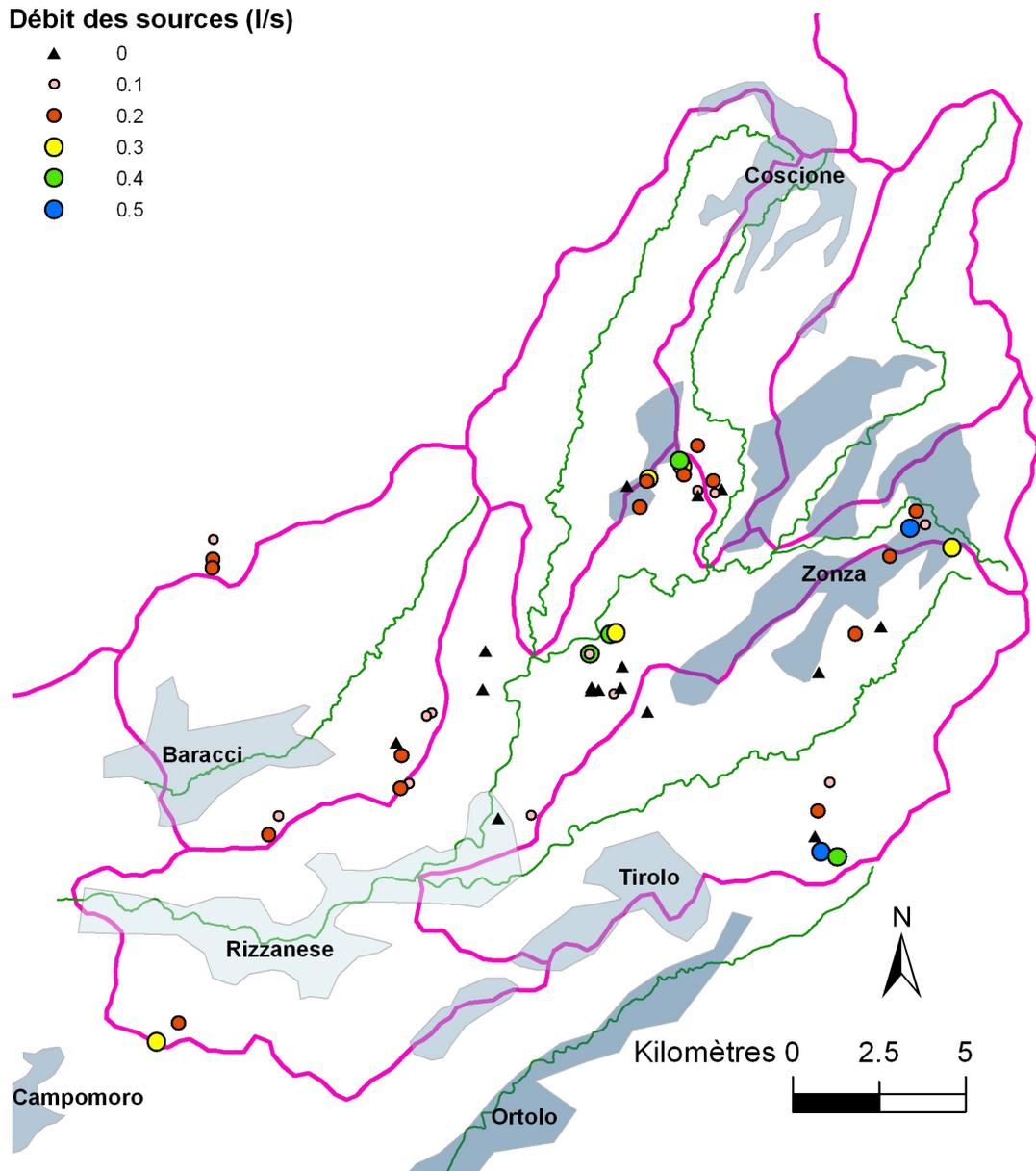


Illustration 6 - Localisation et ordre de grandeur du débit des sources pour lesquelles cette grandeur a pu être mesurée ou bien est connue par les exploitants (les débits égaux à 0 correspondent à des suintements identifiés mais non mesurables).

3. Caractérisation spatiale de la réserve en eau souterraine du bassin versant du Rizzanese en amont du Pont de Zoza

3.1. METHODE DE TRAVAIL

Dans un premier temps, une caractérisation géologique détaillée sur le bassin versant amont du pont de Zoza, a permis d'améliorer la description des formations et notamment de localiser plus précisément les horizons d'altération et de fissuration du granite. En effet, ce sont ces formations qui sont les plus intéressantes au regard de la ressource en eau souterraine et une localisation plus détaillée que celle réalisée dans le cadre de la synthèse géologique (cf. § 2.1) était nécessaire.

En parallèle et avec l'objectif de mieux décrire les conditions de stockage de la ressource en eau souterraine, des sondages visant à la détermination du contenu en eau du sol par la méthode de la Résonance Magnétique Protonique (RMP) ont été réalisés et leurs résultats interprétés en termes de géométrie des horizons fissurés et altérés. La base de l'horizon altéré et celui de l'horizon fissuré ont ainsi été cartographiés sur la zone d'étude en intégrant la fracturation (source de nombreux décalages des profils) dans la mesure du possible. Des ordres de grandeur de la porosité efficace des deux types d'horizon ont enfin été estimés à partir de la littérature et du résultat des sondages RMP.

Dans le but de déterminer la piézométrie à l'échelle de la zone d'étude, la surface décrivant le réseau hydrographique pérenne (surface de base) a été construite. Les thalwegs pérennes peuvent en effet être considérés comme le niveau de base de la réserve d'eau souterraine qui participe au soutien des écoulements en étiage. L'altitude des points décrivant ces cours d'eau a ainsi été extraite d'un modèle numérique de terrain de 50 m de résolution spatiale. La surface de base a ensuite été construite par interpolation spatiale de l'altitude des points entre les différents cours d'eau sur un maillage carré régulier à l'aide de la méthode des variables régionalisées (variogramme - krigeage).

La surface de base ainsi construite, ainsi que les mesures des niveaux piézométriques disponibles (terrain et sondages RMP), ont été utilisées pour établir la relation linéaire qui, d'après Wyns *et al.* (2004), relie la hauteur de la zone saturée située au dessus de la surface de base (B), à la profondeur par rapport au sol de celle-ci (A) (Illustration 7).

La relation linéaire établie a permis le calcul du niveau piézométrique sur chaque maille de même résolution spatiale que le MNT sur la zone d'étude, à partir de la surface de base. La position de la surface piézométrique a ensuite été croisée avec la description spatiale des horizons altérés et fissurés.

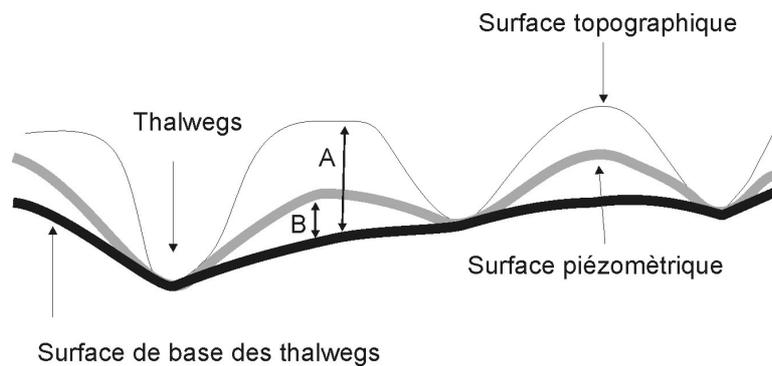


Illustration 7 - Principe de construction de la surface piézométrique, à partir de la connaissance de la surface de base. A - dénivellation entre la surface du sol et la surface de base; B - dénivellation entre la surface piézométrique et la surface de base.

La ressource en eau souterraine a ensuite été quantifiée sur la base de l'épaisseur de la zone saturée définie grâce à la position de la surface piézométrique et de la base des horizons altérés et fissurés et des ordres de grandeur attribués à la porosité efficace des deux horizons.

Ensuite, une série d'analyses et de modélisations utilisant les données hydrologiques disponibles sur la zone d'étude (précipitations, ETP et débits) ont été conduites pour décrire le comportement hydrologique de la zone d'étude. Une analyse détaillée de la forme de l'hydrogramme du cours d'eau a permis d'interpréter les récessions à l'étiage et d'en déduire les volumes d'eau souterraine qui participent au soutien des écoulements pendant cette période (volumes dynamiques). Ces volumes ont été comparés aux principaux flux hydrologiques dans le bassin (écoulements, pluies efficaces, recharge hivernale), de manière à mieux appréhender leur représentativité.

Enfin, les volumes dynamiques ont été comparés aux volumes estimés à partir de la caractérisation spatiale de la piézométrie et de la géologie.

3.2. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude concerne le secteur du bassin versant du Rizzanese situé en amont du Pont de Zoza sur la commune du même nom (Illustration 8). D'une superficie totale de 130 km², c'est un secteur très montagneux avec des rivières présentant un fort encaissement et un relief accidenté (Illustration 9). Orienté nord-ouest / sud-est d'amont en aval, il est adossé sur sa bordure nord-ouest à des sommets qui culminent à 2130 m (Monte Incudime) et son exutoire se trouve à 284 m. Trois cours d'eau principaux drainent le bassin : le Codi, le Criviscia et le Saint-antoine, qui en se rejoignant en amont de l'exutoire défini pour la zone d'étude, forment le cours principal du Rizzanese.

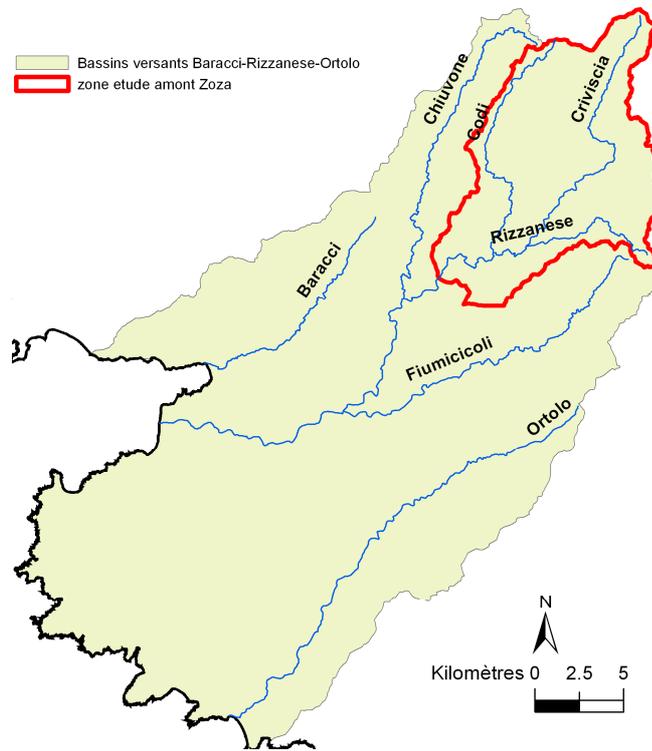


Illustration 8 - Zone d'étude amont du pont de Zoza sur le bassin versant du Rizzanese.



Illustration 9 - vue du bassin versant depuis le village de Zona.

3.3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La zone d'étude se situe dans un contexte géologique relativement homogène (illustration 10). En effet le substratum est essentiellement composé de formations du batholite corse d'âge carbonifère, composé dans le secteur de granodiorites et de monzogranites à grains moyen à gros (porphyroïde) et dans lesquels on trouve des biotites et des amphiboles. Ces formations s'ordonnent en bandes plus ou moins continues orientées NE-SW, parallèlement aux directions majeures de la tectonique régionale.

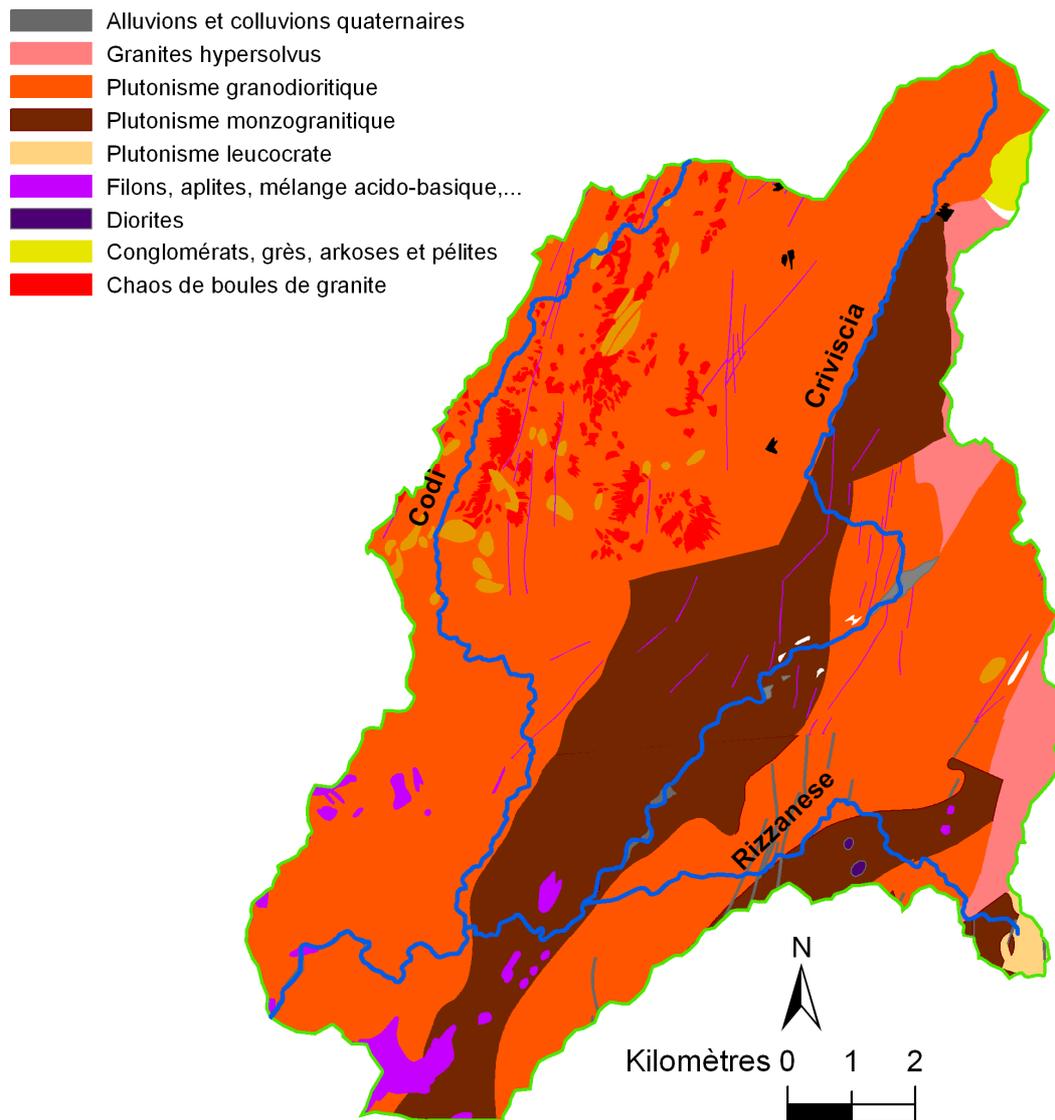


Illustration 10 - Contexte géologique de la zone d'étude.

Ces granodiorites, et à un degré moindre les monzogranites, sont assez fortement altérées, ce qui a pour conséquence que l'on y rencontre des horizons d'arènes parfois très épaisses. Des intrusions de granites leucocrates apparaissent sous la forme de plutons isolés et discordants dans l'encaissant granodioritique ou monzogranitique. Ces granites clairs sont dépourvus de biotite, ce qui les rend beaucoup plus résistants à l'altération, raison pour laquelle ils donnent des reliefs proéminents et accidentés. Des roches basiques (diorites, gabbros) se sont mises en place en association avec les granodiorites et les monzogranites, sous la forme de plutons, de filons et d'injections composites acido-basiques. Ces roches apparaissent souvent au sein des granites, fortement altérées et fracturées. Un cortège filonien post-orogénique a donné lieu à un grand nombre de filons acides et basiques de direction générale méridienne. Les filons basiques ont des puissances variables entre quelques décimètres et quelques mètres et sont généralement très altérés. Les filons acides (quartz, aplites, microgranites, rhyolites) sont généralement bien visibles dans la topographie car ils sont peu altérés. Sur la bordure est du secteur d'étude, apparaissent des formations du plutonisme alcalin d'âge permien qui sont des granites hypersolvus présentant du quartz et du feldspath perthitique en abondance. Ces formations forment un rempart abrupt au dessous de la dépression de monzogranites et de granodiorites portant la forêt de Zonza. Des restes de formations sédimentaires tertiaires (conglomérats de Bavella) et quaternaires (éboulis sur les pentes et alluvions dans le fond des vallées) sont conservés par endroits.

Vis-à-vis de notre objectif, seules les formations du plutonisme carbonifère (granodiorites et monzogranites) seront étudiées, dans la mesure où ce sont les formations présentant le degré d'altération le plus important et dont la répartition spatiale sur la zone d'étude est prépondérante. Le rôle de drain ou de barrière hydraulique que peuvent par exemple jouer les filons ne sera ainsi pas intégré à l'analyse.

3.4. DONNEES DISPONIBLES ET ACQUISITIONS SUPPLEMENTAIRES

L'illustration 11 présente les données disponibles en termes d'eau souterraine sur la zone d'étude à l'issue des campagnes de mesures piézométriques. Comme nous pouvons le voir, la densité d'information obtenue est très faible.

Seuls 5 forages ont permis d'avoir accès à une mesure de la piézométrie et 25 sources dont l'existence a pu être vérifiée lors d'une visite sont recensées. Le travail de terrain n'ayant pas pu être totalement exhaustif sur l'ensemble de la zone d'étude du fait notamment de l'éloignement de certaines sources, mais aussi parce qu'un grand nombre d'entre elles sont captées, toutes les sources recensées sur la carte topographique de l'IGN, n'ont pas pu être visitées. Il convient cependant de rester prudent sur la réalité de l'existence et surtout sur de l'importance des sources repérées sur la carte de l'IGN, qui sont souvent taries, captées ou de très faible débit (un grand nombre de sources ont par ailleurs été recensées sur le terrain alors qu'elles n'apparaissent pas sur la carte).

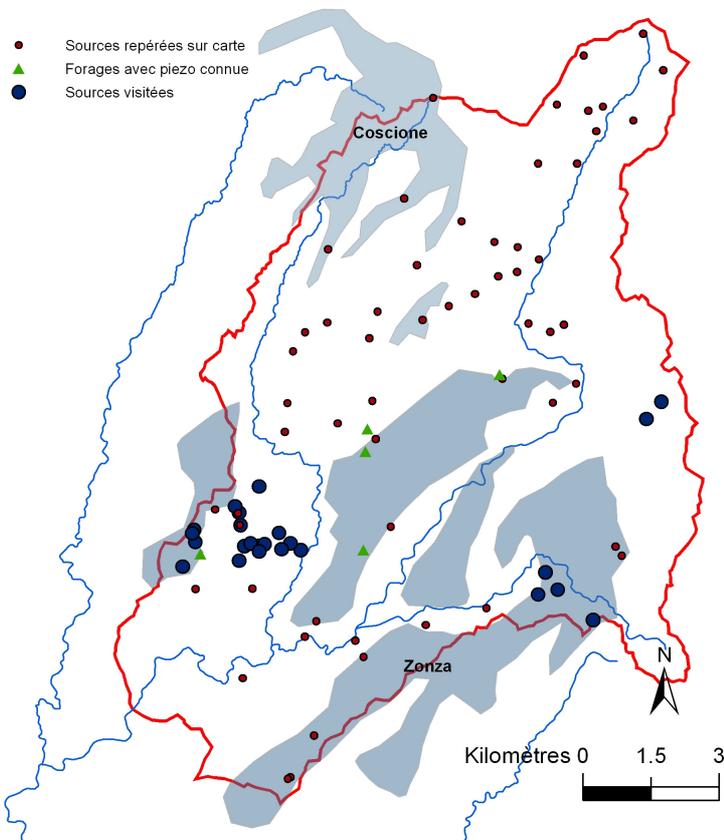


Illustration 11 - Localisation des forages pour lesquels la piézométrie est connue et des sources dont l'existence a été vérifiée lors d'une visite de terrain. Les sources recensées sur la carte topographique au 1/25 000ème de l'IGN ainsi que les contours des zones considérées comme potentiellement aquifères (cf. Illustration 4) sont aussi indiquées.

La grande hétérogénéité des contextes hydrogéologiques pouvant donner lieu à l'apparition de sources rend périlleuse leur utilisation pour définir la piézométrie. L'illustration 12 permet de voir que des différences significatives peuvent exister en termes de débits entre les sources, et qu'il est délicat de relier l'importance d'un débit avec la présence d'un plateau d'arènes situé en amont. Les quelques mesures de conductivité disponibles semblent mieux mettre en évidence le rôle des horizons d'arènes vis-à-vis des eaux souterraines. En effet, il apparaît que les eaux des sources ou des petits cours d'eau se trouvant en contrebas des zones où des horizons d'arènes conséquents ont été identifiés, présentent une minéralisation plus importante. L'intérêt d'utiliser les sources pour la piézométrie régionale reste donc très relatif.

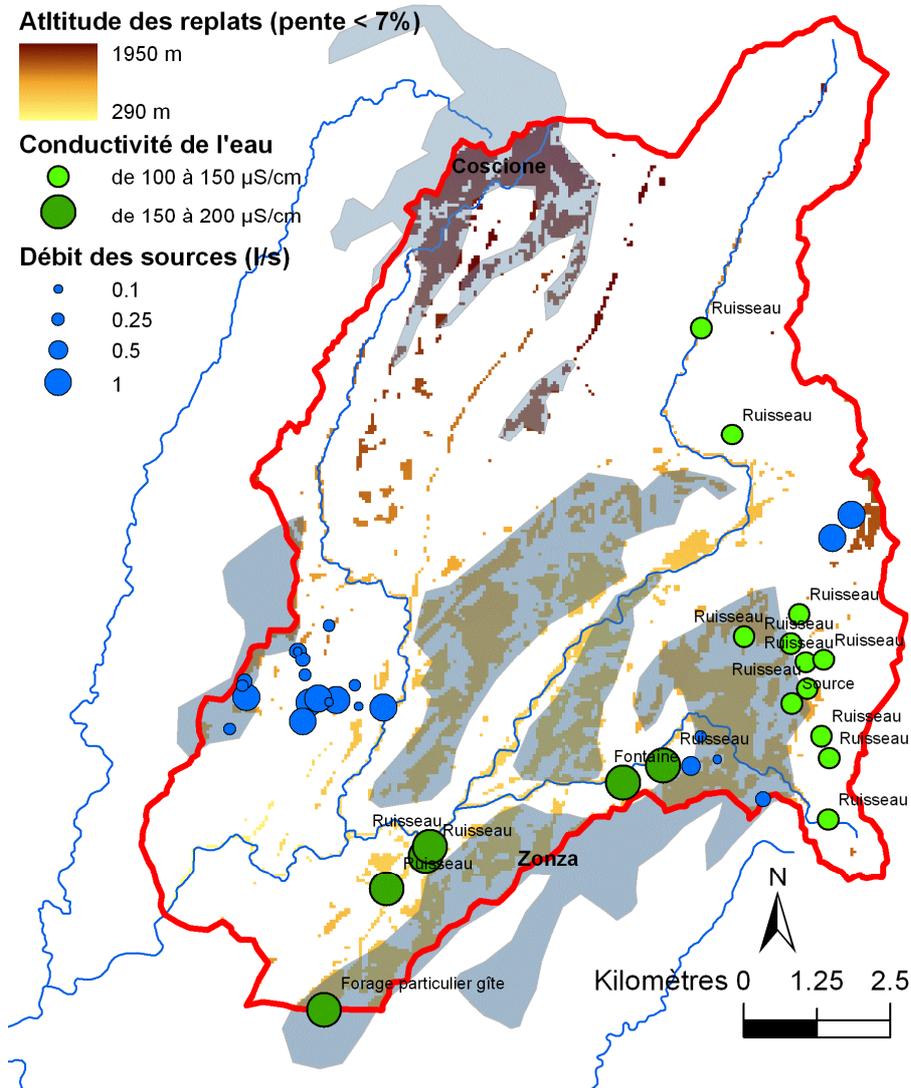


Illustration 12 - Débits des sources, conductivités de l'eau mesurée en divers points du bassin versant. Les zones de replats (pente des cellules du MNT < 7%) sont représentées en fonction de leur altitude et englobées dans les zones considérées comme potentiellement aquifères.

Ne pouvant pas utiliser les sources comme des indicateurs fiables pour la piézométrie, la faible densité de l'information disponible a rendu nécessaire la réalisation d'une campagne de sondages par Résonance Magnétique Protonique (RMP), qui permet la mesure du contenu en eau du sol par une méthode électromagnétique non intrusive.

3.4.1. Principe de la méthode RMP

Contrairement aux méthodes géophysiques classiques, l'information déduite d'un sondage de 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.

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 (Illustration 13). 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 proviennent des molécules d'eau. Ceci implique donc que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié, ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

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

La constante de temps de relaxation transversale, T_2 , caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ H_0 alors que T_1 correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ H_0 .

Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante T_2^* .

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

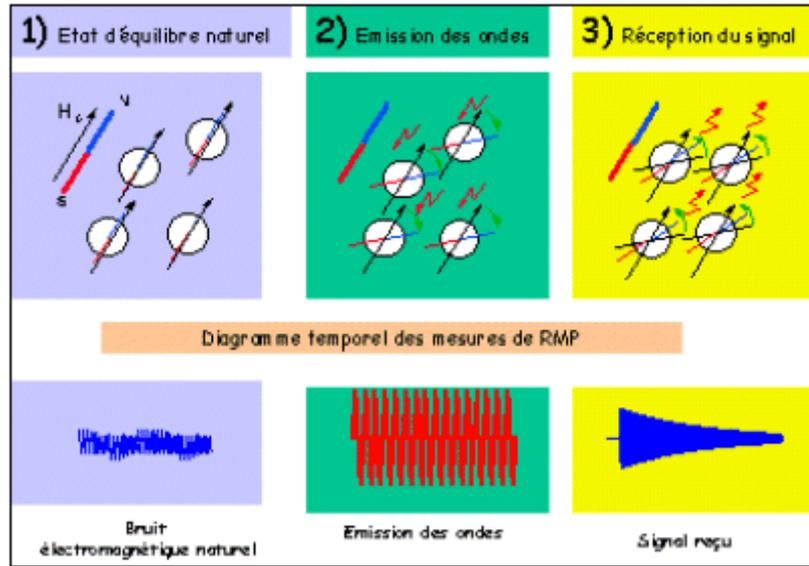


Illustration 13 - Principe de la mesure RMP.

L'équipement NUMIS se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (Illustration 14).

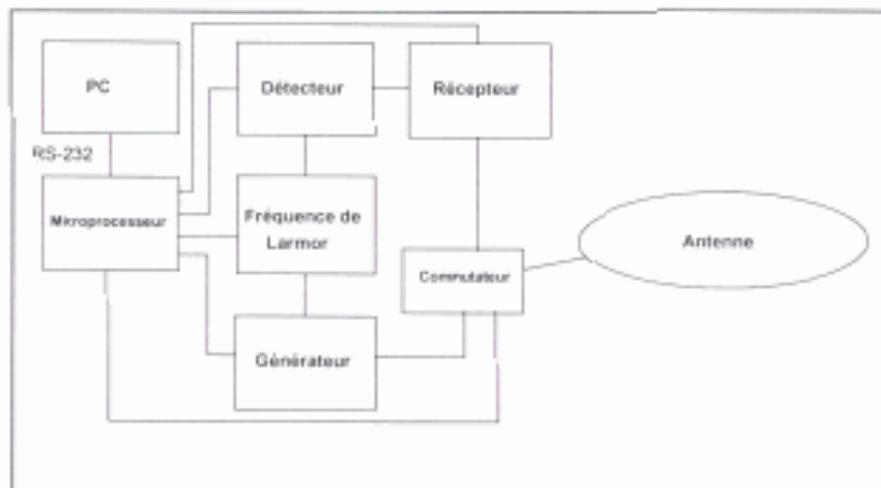


Illustration 14 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

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 (Illustration 15).



Illustration 15 - Equipement de RMP NUMIS installé sur la plage arrière d'un 4x4 pour une manipulation aisée.



Illustration 16 - Cable disposé au sol, formant l'antenne d'émission et de réception du signal. Ici, il s'agit d'un carré de 3 m de côté centré sur le caillou, uniquement à des fins d'illustration.

3.4.2. Le sondage RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol (Illustration 16), généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 150 m selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer (par commodité d'installation, une antenne carrée est souvent utilisée à la place du cercle). Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » (composé de deux boucles de polarité opposée) afin d'améliorer le rapport signal/bruit.

Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle (Équation 1) :

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

I_0 et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_0 correspond à la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_0 = \gamma H_0 / 2\pi$ avec H_0 l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé sur l'illustration 17.

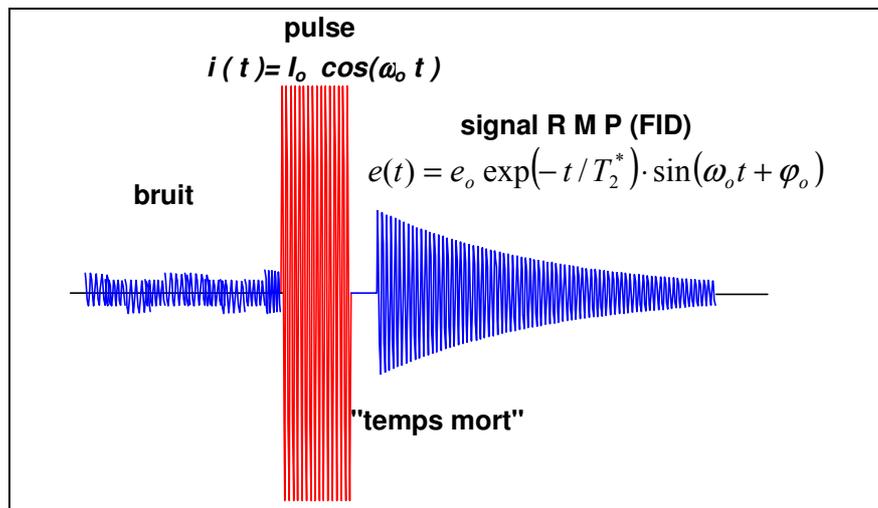


Illustration 17 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t,q)$ (appelé aussi free induction decay, FID) décrit une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation $q = I_0 \tau$ (Équation 2):

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

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

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

Pour la mesure de T_1 (constante de temps de relaxation longitudinale), une adaptation de la technique d'« inversion recovery » (Farrar *et al.*, 1971) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives séparées par un délai ($\Delta t < T_1$) et en mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de déduire la constante de relaxation T_1 à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (Illustration 18) tel que (Équation 3) :

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

Avec e_{0-fid1} et e_{0-fid2} , les amplitudes à l'origine des signaux FID1 et FID2 respectivement et Δt le délai séparant les deux pulses.

Les paramètres $e(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres significatifs qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 5 nV. Différents facteurs influencent l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre.

La profondeur d'investigation maximale est de l'ordre de 150 m dans les conditions les plus favorables. Elle est sensiblement diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m.

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

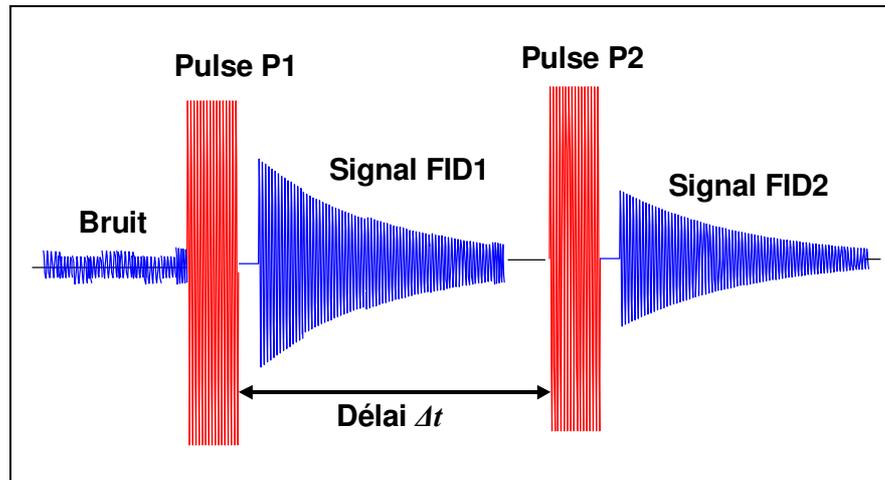


Illustration 18 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1 .

3.4.3. Interprétation des sondages

a) Inversion des sondages RMP

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

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

La teneur en eau RMP, W est définie (Équation 4) comme le rapport entre l'amplitude initiale, e_{0-m} du signal mesuré (pour une couche horizontale d'extension infinie) et l'amplitude théorique calculée, e_{0-c} pour une même couche contenant 100 % d'eau :

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

C'est une teneur en eau volumique.

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

L'expérience d'application des sondages RMP a montré que dans bien des cas le temps de décroissance, T_2^* de l'eau liée est inférieur à 20-30 ms et que celui de l'eau libre est compris entre 30 et 1 000 ms. Comme les caractéristiques des équipements de mesures actuels ne permettent pas de mesurer des temps inférieurs à 30 ms, il est généralement admis que la teneur en eau RMP correspond à la teneur volumique en eau libre. Selon ces considérations, l'eau non connectée et

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

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

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

- les constantes de **temps de relaxation** sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) et peuvent être décrites en fonction des caractéristiques des pores (en milieu saturé) tel que (Équation 5) :

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

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

Mais T_2^* dépend aussi des hétérogénéités du champ géomagnétique ΔH_0 tel que (Équation 6) :

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

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

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

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

- la **phase** $\omega_b(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm-m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et

Shushakov (1998). Un exemple d'inversion de données théoriques est présenté dans l'illustration 19.

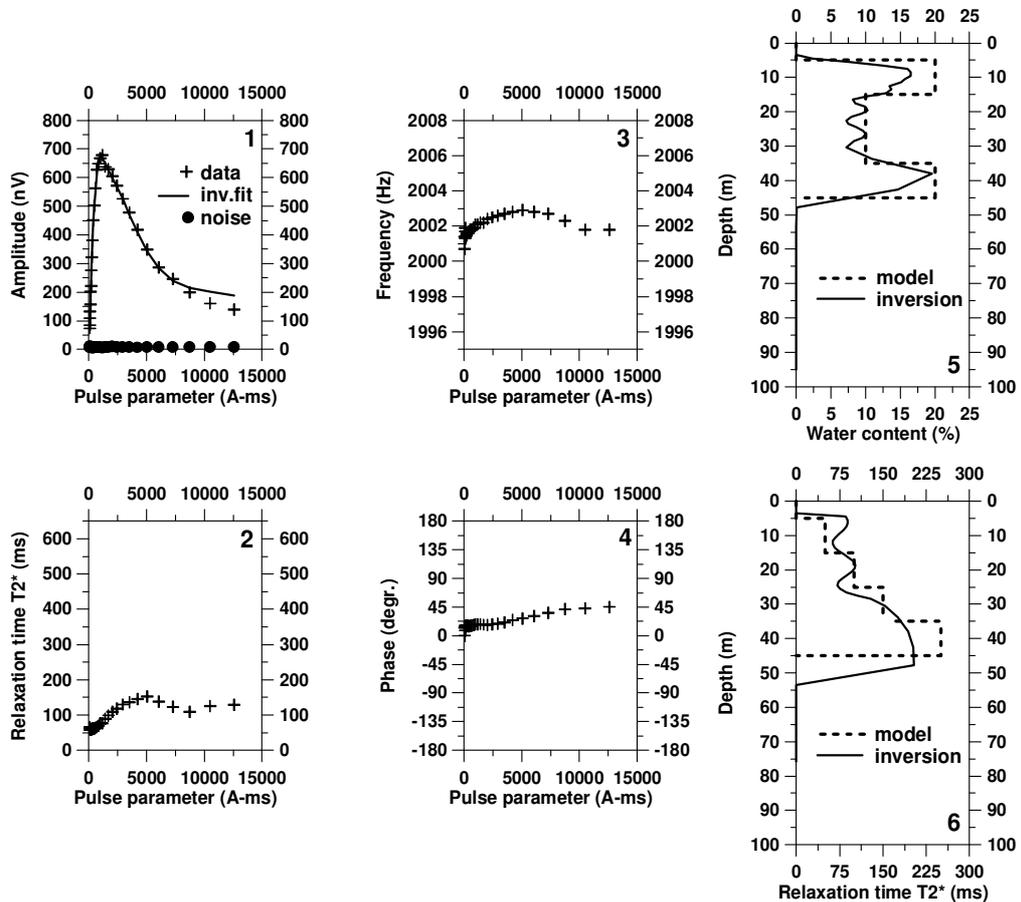


Illustration 19 - Résultats d'inversion des données théoriques.

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

Illustration 20 - Paramètres du modèle.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle du tableau (Illustration 20) :

b) Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP

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

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

où K est la perméabilité, W est la teneur en eau RMP, T_l est la constante de temps de décroissance, C_k et a , b sont des constantes définies empiriquement. En diagraphies RMN, différentes valeurs a , b sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues, les valeurs $a = 1$, $b = 2$ ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies.

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

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

- 1) distribution verticale de la teneur en eau ;
- 2) distribution verticale du temps de décroissance T_2^* ;
- 3) distribution verticale du temps de décroissance T_l ;
- 4) distribution verticale de la perméabilité K .

Un exemple de la comparaison des résultats RMP avec des données de forage et d'essais de pompage est présenté dans l'illustration 21.

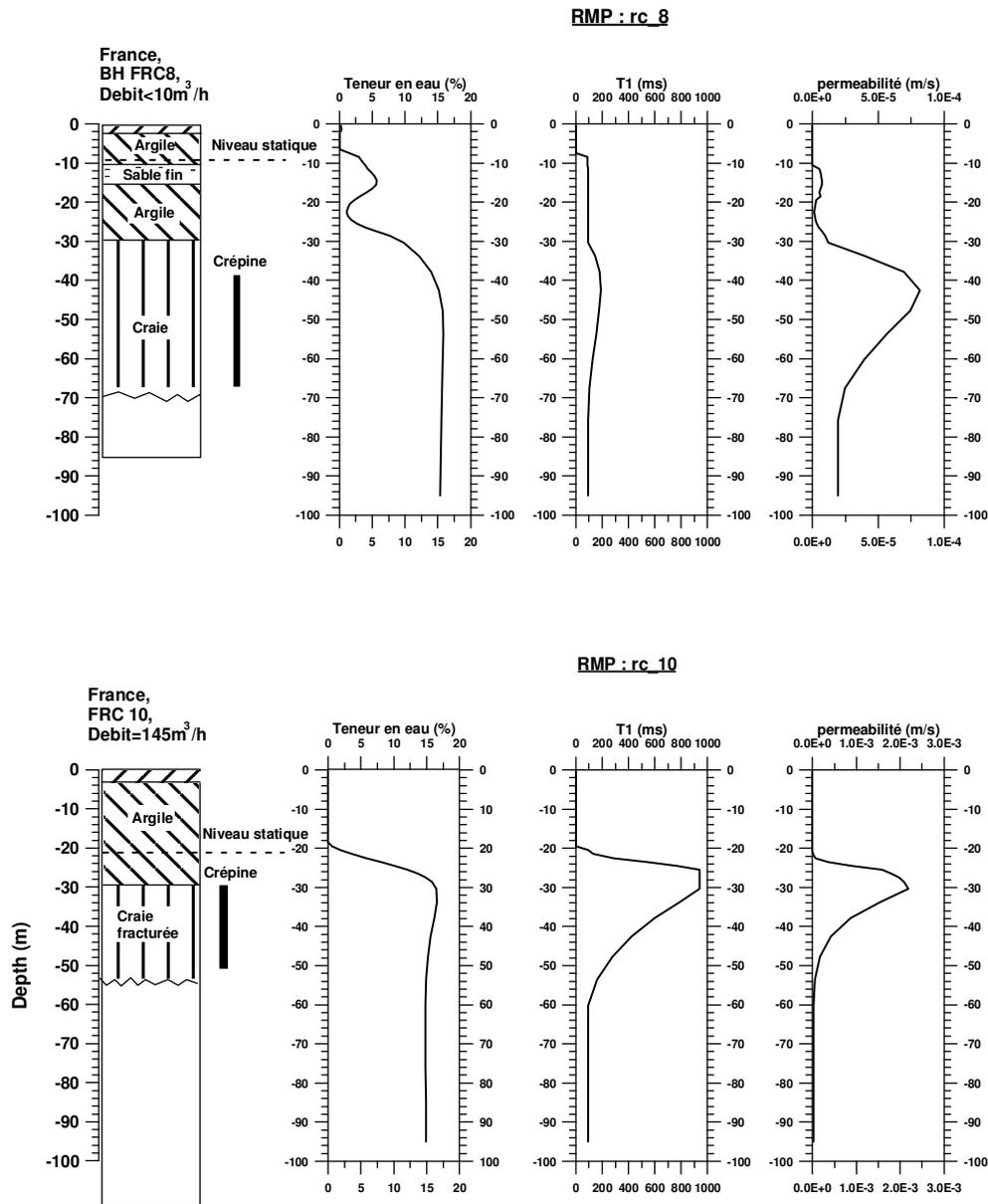


Illustration 21 - Exemple de résultats RMP sur deux forages dans la craie.

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

Les graphiques fournis à l'issue d'un sondage RMP sont tels que décrits sur l'exemple de l'illustration 22. En tête de la feuille, on trouve des informations générales sur le sondage et les paramètres d'interprétation.

Site: PROJET CRUE WARLOY-BAILLON
 Loop: 4 - 37.5 Date: 02.10.2002 Time: 12:42

NUMIS data set:
 D:\crue\Monitoring\warloybaillon\WB1ant8-37.5\teta(prof)\mesures\02-10-02\Wb102102.inp
 matrix: D:\RMP\LOGICIEL\Inter2001-1\HAL8_386.MRM
 loop: eight square, side = 37.5 m
 geomagnetic field:
 inclination= 65 degr, magnitude= 47995.31 nT

filtering window = 105.6 ms
 time constant = 15.00 ms
 average S/N = 9.99; EN/IN = 1.07
 fitting error: FID1 = 7.51%; FID2 = 13.02 %
 param. of regular.: E,T2* = 10000.0; T1* = 1.192
 permeability constant Cp = 7.00e-09

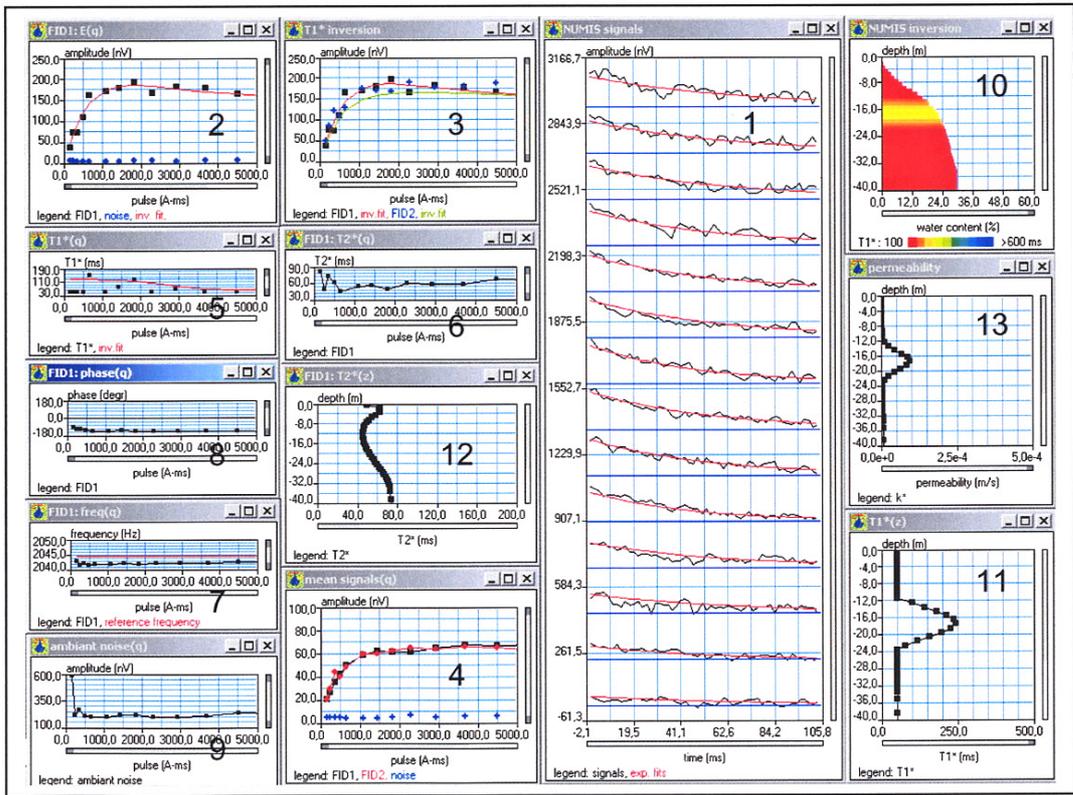


Illustration 22 - Exemple de feuille de données et de résultats RMP.

Les graphiques situés dessous concernent respectivement (voir numérotation sur l'illustration 22) :

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

3.4.5. Résultats des mesures RMP

La campagne de mesure s'est déroulée du 23 novembre au 2 décembre 2006. Les sondages ont été réalisés par J.M. Miehé géophysicien du BRGM aidé de G. Bodéré, technicienne au SGR Corse. Les sites de mesure ont été implantés par Y. Caballero et R. Wyns. Les données et les résultats des sondages RMP sont présentés en Annexe 1.

17 sites potentiels ont été identifiés initialement (Illustration 23). Les secteurs suivants n'étaient pas propices à la réalisation de sondages RMP en raison d'un environnement électromagnétique trop bruité (proximité de lignes de courants) :

- centre de ski plateau de Coscione,
- aval de la décharge de Zonza (ruisseau Prunéti),
- Campo Longu (est Quenza),
- secteur A Vaja (nord-ouest de Quenza),
- vallée de l'Ortolo (3 implantations prévisionnelles)

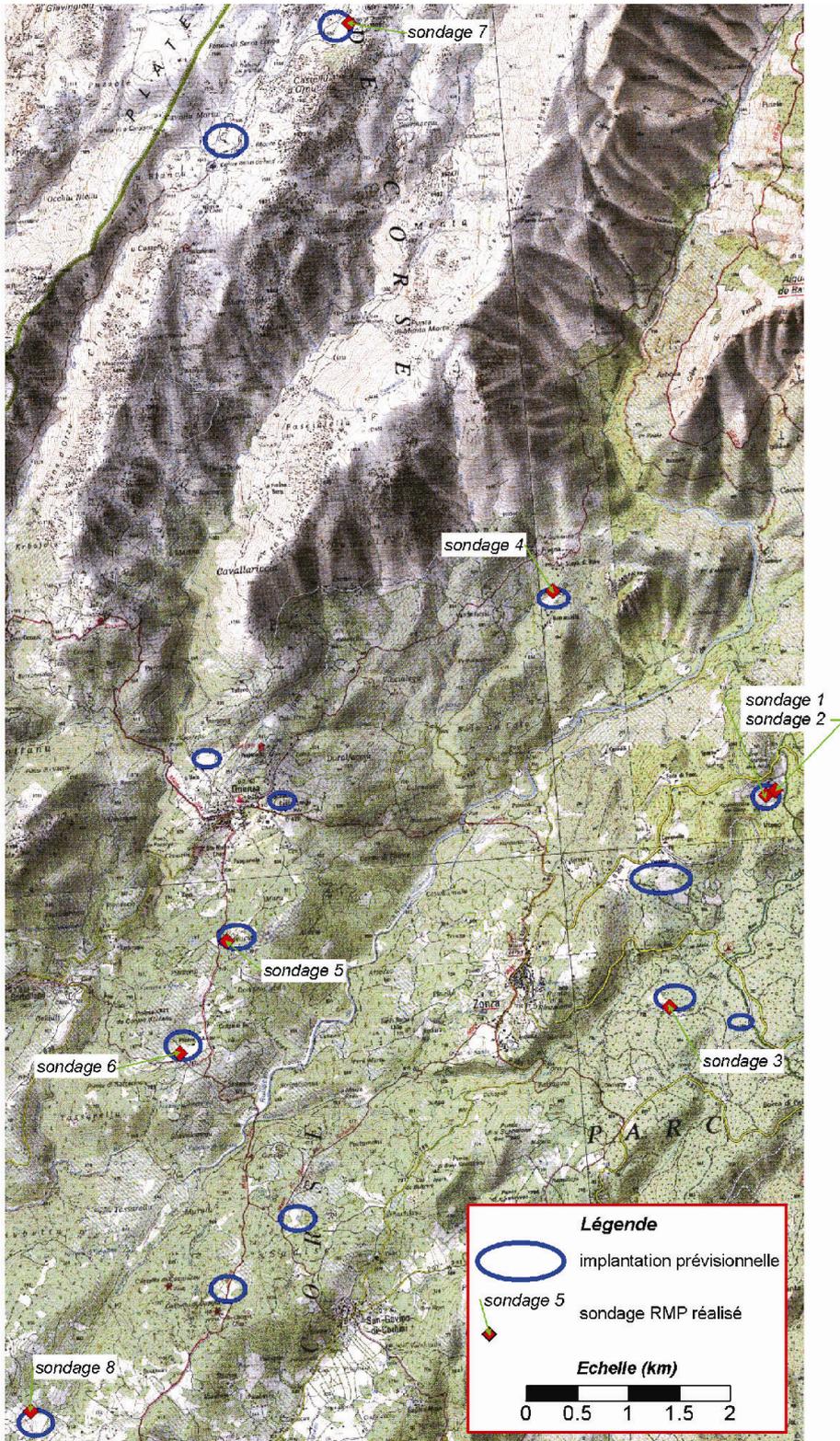


Illustration 23 - Localisation des 17 sites potentiels et sondages RMP effectivement réalisés.

Pour le secteur de Varginga (nord-est de Zonza), le propriétaire a refusé l'accès au lieu. Les secteurs Sadice (nord-ouest de San Gavino) et Est Castellu Cucuruzzu le long du Mare - Mare n'ont pas été investigués du fait des difficultés d'accès.

8 sondages RMP ont finalement pu être enregistrés sur 7 secteurs différents (Illustration 23). Les statistiques relatives à ces sondages sont présentées sur l'illustration 24.

Secteur	Sondage RMP	X (WGS84, m)	Y (WGS84, m)	X (Lbt IV Paris, m)	Y (Lbt IV Paris, m)	Z (m)	Boucle	Bruit ambiant avant stack (nV)	Nombre de stacks	Signal/bruit après stacks (S/N)	Bruit ext./bruit instr. (EN/IN)	Exploitabilité
Hippodrome, nord-est Zonza	COR1	516736	4623566	570454	4164230	900	◆◆	500	150	1.01	3.55	W _{max}
Hippodrome, nord-est Zonza	COR2A	516831	4623613	570545	4164284	900	■□	2500	250	1.02	16.27	-
Aval décharge Zonza	COR3A	515632	4621560	569509	4162143	738	◆◆	350	150	1.05	2.3	W _{max}
Burracciola sud Prugna	COR4A	514811	4625728	568365	4166236	830	□■	2000	400	0.95	7.61	W _{max}
Crisencia, sud et aval Quenza	COR5B	511369	4622549	565181	4162797	765	◆◆	300	400	1.28	1.05	W, T1, T2*
Plaine d'Anau, sud-est Sorbollano	COR6	510827	4621477	564724	4161686	750	◆◆	250	380	0.99	1.02	W, T1, T2*
Piana d'Ornicciu, plateau de Coscione	COR7A	513261	4631469	566372	4171841	1565	■□	350	300	1.17	1.61	W, T1, T2*
Aravina, nord-ouest Levi	COR8A	509098	4618083	563264	4158166	750	◆◆	700	400	1.17	3.86	W _{max}

géométrie des boucles: ◆◆ 8 carré 37.5 m, ■□ carré 75 m avec boucle de compensation, □■ carré 35 m avec boucle de compensation

Illustration 24 - Statistiques relatives aux sondages RMP.

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

- non exploitable : aucun résultat ne peut être extrait de l'interprétation des données,
- W_{max} : seule une teneur maximale en eau peut être estimée (cette valeur n'indique pas la teneur en eau réelle du milieu qui peut très bien être moindre),
- W, T2*, T1 : l'ensemble des caractéristiques RMP peut être estimé (distribution verticale de teneur en eau, des temps de décroissance T1 et T2, de la perméabilité et de la transmissivité)

Pour chaque sondage, la géométrie de la boucle a été adaptée en fonction des conditions de bruit et de l'espace disponible.

La profondeur d'investigation maximale est atteinte avec une boucle carrée de 75 m. Une boucle de compensation est associée pour réduire le niveau de bruit électromagnétique. Lorsque le bruit était trop élevé ou lorsque l'espace accessible n'était pas suffisant, une boucle en 8 carrée de 37.5 m a été utilisée.

Sur le site de Burracciola au sud de Prugna seule une boucle carrée de 35 m (avec compensation) a pu être mise en place, l'orientation du dispositif de mesure n'a pas pu être optimisée par manque de place. Pour tenter de réduire l'effet d'une ligne électrique (220V) alimentant une habitation située à 200 m du lieu du sondage RMP, les conducteurs de la boucle ont été doublés.

Pour l'ensemble des huit sondages mesurés, le rapport signal sur bruit ne dépasse pas 1.28, valeur faible mais pas surprenante. En effet dans les aquifères de socle, les quantités d'eau en présence sont généralement faibles, les teneurs en eau n'excèdent pas quelques % et le signal RMP ne dépasse pas quelques dizaines de nV.

La difficulté de la mesure consiste à « extraire » un signal RMP dont l'amplitude est proche de celle du bruit ambiant. La géométrie et la compensation de la boucle, le filtrage et l'optimisation des stacks ainsi que l'augmentation du nombre de stacks (nombre d'échantillons accumulés pour faire une mesure) sont les outils qui permettent d'améliorer le rapport signal/bruit.

Le nombre de stacks a été porté à 400 pour les sondages les plus bruités (au détriment de l'avancement des travaux) pour augmenter au maximum le rapport signal sur bruit et pour tenter de ramener le bruit environnemental, EN au niveau du bruit instrumental, IN (rapport EN/IN=1).

a) Sondage 1, hippodrome de Zonza (Annexe 1 - illustration 1a)

Le sondage est caractérisé par un rapport signal sur bruit proche de 1. Le signal RMP ne ressort pas du niveau de bruit. Les premiers pulses calés autour de la fréquence 1950 Hz qui correspond bien au champ géomagnétique mesuré, laissent entrevoir la possibilité d'un niveau aquifère entre 0 et 5 m de profondeur avec une teneur en eau moyenne qui n'excéderait pas 1%. Ceci pourrait correspondre à un front de percolation en relation avec les pluies subies pendant les jours précédant le sondage.

Au-delà, les décalages en fréquence sont trop importants pour affirmer que les augmentations de teneur en eau entre 11 et 30 m puis au-delà de 35 m correspondent à une réalité. Pour ces profondeurs, on est réduit à estimer une teneur en eau maximale possible qui serait inférieure ou égale à 1.5 %. Cependant, si l'on se réfère au modèle géologique considéré pour les aquifères en zone de socle granitique (cf. Illustration 2), les variations de la teneur en eau observées peuvent être interprétées en considérant que le niveau piézométrique pourrait se situer vers 12-13m et que l'eau serait stockée dans les arènes entre 12 et 24 m. Dans cette hypothèse, un horizon fissuré présentant une teneur en eau plus faible devrait se trouver sous ces arènes au-delà de 30 m, ce qui n'est pas contredit par le sondage qui indique simplement que, s'il y a de l'eau à ce niveau, la teneur en eau maximale du milieu ne peut dépasser 1.5%. Cette interprétation doit cependant être utilisée avec précaution au vu de la qualité très moyenne du sondage.

b) Sondage 2, hippodrome de Zonza (Annexe 1 - illustration 1b)

Ce sondage a été mesuré à l'est du sondage 1 avec une boucle carrée de 75 m compensée pour tenter d'augmenter la profondeur d'investigation. Le rapport signal sur bruit reste proche de 1. Le niveau des signaux (96 nV en début de sondage) laisse planer le doute sur l'origine du signal (50 Hz domestique?) et ne permet pas d'identifier clairement un signal RMP. Le rapport bruit environnemental sur bruit instrumental particulièrement élevé (16.3) rend ce sondage inexploitable.

c) Sondage 3, est de Zonza, en aval de la décharge (Annexe 1 – illustration 2)

Avec un rapport signal sur bruit proche de 1 et une dispersion de la fréquence du signal, aucune courbe de signal RMP cohérente ne se dessine. Dans l'hypothèse où le signal mesuré correspond effectivement à un signal RMP (amplitude < 20 nV), les teneurs en eau maximales n'excèderaient pas 0.2 - 0.4% pour les aquifères superficiels et 1.0 - 1.5 % en profondeur. Une interprétation du même type que celle faite pour le sondage 1 pourrait être faite ici, dans laquelle on situerait le niveau piézométrique autour de 10-11 m, la zone saturée dans les arènes entre 10 et 23 m et l'horizon fissuré au-delà. Cette interprétation doit cependant être utilisée avec précaution au vu de la qualité très moyenne du sondage et des faibles teneurs en eau obtenues.

d) Sondage 4, Burracciola, au sud de Prugna, au nord-est de Quenza (Annexe 1 - illustration 4)

Le niveau de bruit avant stack est relativement élevé (environ 2000 nV). Les rapports signal/bruit et EN/IN sont défavorables. Malgré un nombre de stacks élevé (400) aucune courbe RMP caractéristique n'émerge et les fréquences sont très dispersées. La seule information que l'on puisse extraire de ces données est la teneur en eau maximale, en admettant que le signal mesuré correspond bien à de l'eau. Dans cette hypothèse, la teneur en eau des aquifères superficiels est inférieure à 4%, de l'ordre de 6% pour les aquifères plus profonds. Les 9 premiers mètres peuvent alors être interprétés comme une zone d'imbibition partielle des arènes (onde d'infiltration), le niveau piézométrique pourrait se situer autour de 20 m avec une limite entre les arènes et le milieu fissuré située autour de 30 m. A titre de comparaison, les sources observées sur les versants voisins sont situées entre 20 et 40 m en dessous de l'altitude du sol au point de sondage, et se situent principalement dans l'horizon fissuré.

e) Sondage 5, Crisencia, au sud et en aval de Quenza (Annexe 1 – illustration 5a et 5b)

Les conditions de mesures de ce sondage sont très bonnes puisque le bruit après stack est ramené à environ 5 nV, valeur proche du bruit instrumental (rapport EN/IN très proche de 1). Le signal mesuré est bien structuré. Les premiers pulses matérialisent un pic d'une amplitude maximale de 25nV qui se traduit à l'interprétation par la mise en évidence d'une structure aquifère entre 5 et 14 m de profondeur, avec une teneur en eau maximale d'environ 5% et une teneur moyenne de 2 à 3%. Cette structure est caractérisée par des temps de relaxation T1 élevés compris entre 600 et 750 ms.

Au-delà de 30 m de profondeur apparaîtrait une seconde structure marquée par une teneur en eau maximale de 15 % et une teneur moyenne de 10 %, avec des temps de relaxation plus court de 150 à 300 ms. L'illustration 5b montre que l'augmentation de l'amplitude du signal est linéairement corrélée avec la magnitude du pulse sur la fin de la courbe du signal et l'amplitude atteint 52 nV sur le dernier pulse, en limite de la

profondeur d'investigation. L'avant dernier pulse est marqué par un décalage en fréquence important (1956 Hz au lieu de 1944 Hz). Ces éléments confèrent à cette structure une réalité très hypothétique. Le doute pourrait être levé par des investigations plus profondes. A cet endroit précis, la taille de la parcelle n'a pas permis d'installer une boucle carrée de 75 m.

Malgré la bonne qualité de ce sondage, il est probable que la structure profonde mise en évidence soit un artefact méthodologique qui mériterait de refaire un sondage avec une taille de boucle plus importante. Dans cette hypothèse, et au vu des valeurs de teneur en eau observées, le signal observé en surface pourrait correspondre à une zone saturée au sein de l'horizon fissuré de teneur en eau moyenne de l'ordre de 3%, ce qui situerait le niveau piézométrique à une profondeur de 5 m.

f) Sondage 6, Plaine d'Anau au sud-est de Sorbollano (Annexe 1 - illustration 6)

Les conditions de mesure de ce sondage sont semblables à celles du sondage 5, avec un bruit après stack ramené à environ 5 nV. Le signal RMP reste cependant inférieur au bruit, sauf en début de sondage où l'amplitude atteint 9.3 nV. L'interprétation met en évidence une structure dont la teneur en eau est inférieure à 1% entre 5 et 20 m de profondeur, avec un temps de relaxation moyen de 330 ms. En fin de sondage, le signal est trop faible pour donner une interprétation fiable au-delà de 20 m de profondeur. Là encore une investigation plus profonde serait nécessaire.

L'interprétation géologique qui peut être faite de ce sondage indiquerait que la surface piézométrique se situerait vers 7,50 m. Les faibles teneurs en eau observées pour la structure proche de la surface (de l'ordre de 0.6% en moyenne), ainsi que les réserves quand à la fiabilité du sondage pour des profondeurs supérieures à 20 m ne nous permettent pas de conclure sur le type d'horizon concerné.

g) Sondage 7, Piana d'Ornicciu, plateau de Coscione (Annexe 1 – illustration 7)

Ce sondage reste relativement bruité avec un bruit après stack compris entre 5 et 10 nV. L'interprétation met en évidence un niveau aquifère entre 8 et 19 m de profondeur, avec une teneur en eau moyenne de l'ordre de 5%. L'amplitude du signal en fin de sondage est très faible, moins de 5 nV, le résultat de l'inversion se traduit alors par l'absence de ressource en eau en au-delà de 20 m de profondeur. Ce sondage peut être interprété par l'existence d'une zone saturée peu profonde, qui se situerait dans l'horizon fissuré et dont le niveau piézométrique se trouverait être autour de 8 m.

h) Sondage 8, Aravina, nord-ouest de Levi (Annexe 1 - illustration 8)

La boucle en 8 carré utilisée pour ce sondage a été implantée parallèlement à une ligne électrique 220V distante de moins de 200 m. Cette implantation était la seule possible sur ce secteur. Les mesures restent très bruitées et ne permettent pas

d'identifier un signal RMP cohérent. La seule information que l'on puisse extraire de ces données est une estimation de la teneur en eau maximale rencontrée, évaluée à 5%. Ce sondage de qualité médiocre peut être interprété en considérant la présence d'une zone saturée superficielle qui se situerait entre 1 et 5 m dans un horizon fissuré recouvert par des arènes sur moins d'un mètre et en considérant que l'augmentation observée en profondeur est un artéfact de la mesure.

3.4.6. Synthèse

L'illustration 25 présente la synthèse des résultats obtenus sur les différents sondages. Une appréciation sur la qualité de l'interprétation des sondages ayant conduit à la détermination d'un niveau piézométrique permet de qualifier la donnée.

Secteur	Sondage RMP	Exploitabilité	Résultats	Piézométrie interprétée (m/sol)	Qualité de l'interprétation
Hippodrome, nord-est Zonza	COR1	W_{max}	$\leq 1.5\%$	12.5	Moyenne
Hippodrome, nord-est Zonza	COR2A	-	-	-	
Aval décharge Zonza	COR3A	W_{max}	< 0.2 - 0.4 % entre 0 et 20 m de profondeur, < 1.0 - 1.5 % au-delà de 20 m	10.5	Médiocre
Burracciola, sud Prugna	COR4A	W_{max}	4 % jusqu'à 30 m de profondeur, 6 % au-delà	20	Médiocre
Crisencia, sud et aval Quenza	COR5B	W, T_1, T_2^*	2 à 3 %, max. à 5%, entre 5 et 14 m, $T_1=600$ à 750 ms, 10 % au-delà de 30 m avec $T_1=150$ à 300 ms	5	Moyenne
Plaine d'Anau, sud-est Sorbollano	COR6	W, T_1, T_2^*	< 1 % entre 5 et 20 m avec $T_1=330$ ms	7.5	Moyenne
Piana d'Ornicciu, plateau de Coscione	COR7A	W, T_1, T_2^*	3 à 4 % en moyenne, max. 7 %, entre 8 et 19 m, $T_1=500$ à 1000 ms	8	Bonne
Aravina, nord-ouest Levie	COR8A	W_{max}	< 5 %	1	Moyenne

Illustration 25 - Synthèse des sondages RMP. La colonne « résultats » exprime les porosités efficaces qui ont été calculées.

Ce tableau montre que la qualité des sondages RMP est assez moyenne. En dehors du bruit électromagnétique anthropique et des problèmes d'accès aux sites, un certain nombre de problèmes peuvent être liées aux perturbations du champ magnétique du fait de l'aimantation rémanente des roches (notamment des filons) et à la présence en leur sein d'éléments paramagnétiques. Une partie de ces difficultés pourraient être contournées en augmentant le délai de réalisation des sondages, mais ils deviendraient alors non raisonnables économiquement.

Ces sondages montrent néanmoins la diversité des situations que l'on peut rencontrer pour les aquifères dans ce type de contexte. On peut en particulier observer que dans l'hypothèse où les aquifères présentent un horizon fissuré surmonté d'un horizon altéré (arènes), les conditions climatiques et topographiques locales peuvent induire la présence d'une zone saturée au sein des deux horizons (cas des sondages 1,3 et 4) ou bien seulement dans l'horizon fissuré (cas des sondages 5,7 et 8). Ces derniers

seraient alors pourvus d'une épaisseur trop faible d'arènes ou bien plus facilement drainés du fait d'une extension réduite ou de la proximité de vallées encaissées.

Malgré la qualité relative des sondages, les niveaux piézométriques obtenus peuvent tout de même être utilisés pour compléter les quelques observations sur la piézométrie dont nous disposons dans la zone d'étude.

3.5. CONSTITUTION DE LA SURFACE DE BASE DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE PERENNE

3.5.1. Données prises en compte

Les données utilisées pour construire une carte de la surface de base sont les suivantes :

- MNT (modèle numérique de terrain), à la maille 50 m (source : IGN)
- Tracé des rivières pérennes (extraction suivant la classification de BD Carthage®)
- Limite de la zone d'étude

3.5.2. Méthodologie

La méthode consiste à construire la surface passant par la base du réseau hydrographique permanent, c'est-à-dire les rivières pérennes : au droit des rivières, cette surface passe à la cote $Z = \text{MNT}$.

La première étape consiste à affecter à chaque point de la rivière sa cote topographique, par projection de la valeur du MNT sur chaque point de rivière.

Dans un second temps, les rivières sont « échantillonnées » de façon à n'en retenir qu'un point tous les 200 m (en distance curviligne) le long de chaque rivière. Cette étape est préférable pour avoir un échantillonnage de même densité partout, et pour éviter les artefacts pouvant apparaître lors de l'interpolation.

Ensuite, la structure spatiale des points retenus est caractérisée en calculant le variogramme de la cote topographique des rivières pérennes. Ceci permet de mettre en évidence d'éventuelles anisotropies, ou des dérives spatiales.

Puis, la grille régulière des altitudes de la surface de base est construite par interpolation, en prenant en entrée les points des rivières et le variogramme caractérisant leur comportement.

Enfin on contrôle le résultat en vérifiant que la surface de base du réseau hydrographique calculée reste toujours inférieure à la cote topographique. Au besoin on introduit manuellement (et visuellement) quelques points de contrainte de façon à bien « caler » la forme de la surface là où l'interpolation automatique ne donne pas de résultats satisfaisants.

3.5.3. Mise en œuvre

Les points échantillonnés tous les 200 m le long des rivières sont présentés sur l'illustration 26 (croix noires). On obtient ainsi 1118 points.

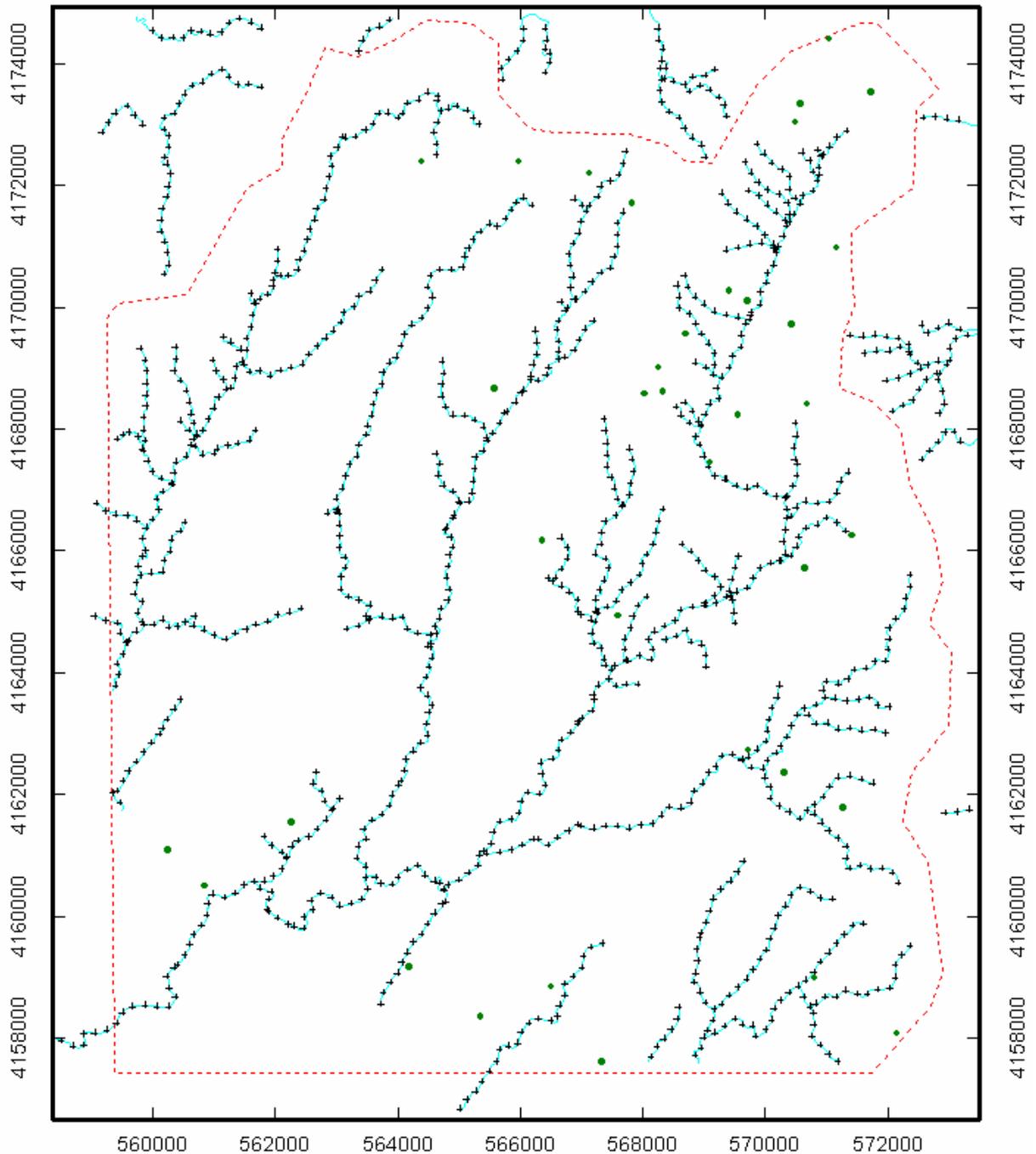


Illustration 26 - Zone d'étude et points échantillonnés sur les rivières pérennes utilisés.

La limite en pointillés rouge correspond à la limite approximative du domaine de travail. Les points verts correspondent aux points de contrainte entrés manuellement dans un second temps pour améliorer le résultat final.

Le variogramme de la cote de base du réseau hydrographique calculé montre une nette dérive (Illustration 27). Un second calcul est effectué en enlevant une dérive de degré 1 (c'est-à-dire un plan moyen). Le résultat montre un comportement plus stationnaire (présence d'un palier) – fig. 2 en bas, mais présente toujours une anisotropie. Ce variogramme est ajusté par un modèle sphérique anisotrope (illustration 28). On note que la direction N45 (plus ou moins parallèle à l'allongement du réseau hydro) a un comportement plus continu que dans les autres directions (valeur du variogramme plus faible dans la direction N45). La portée (distance maximale de corrélation) est de 14 km dans la direction N45, et 3.2 km dans la direction N135.

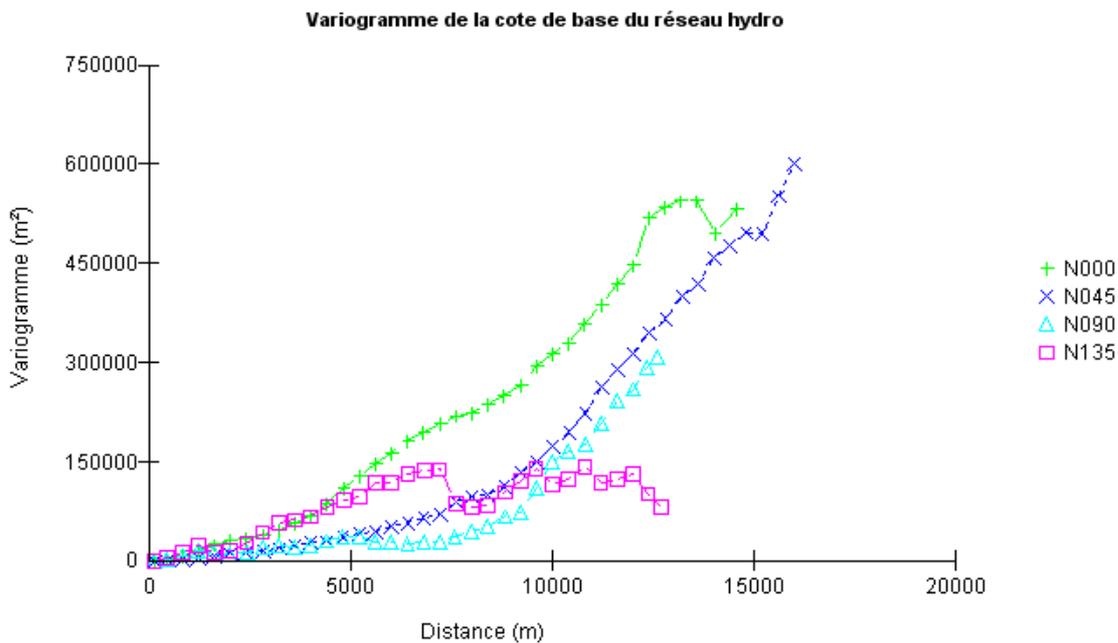


Illustration 27 - Variogramme brut de la cote de base du réseau hydrographique

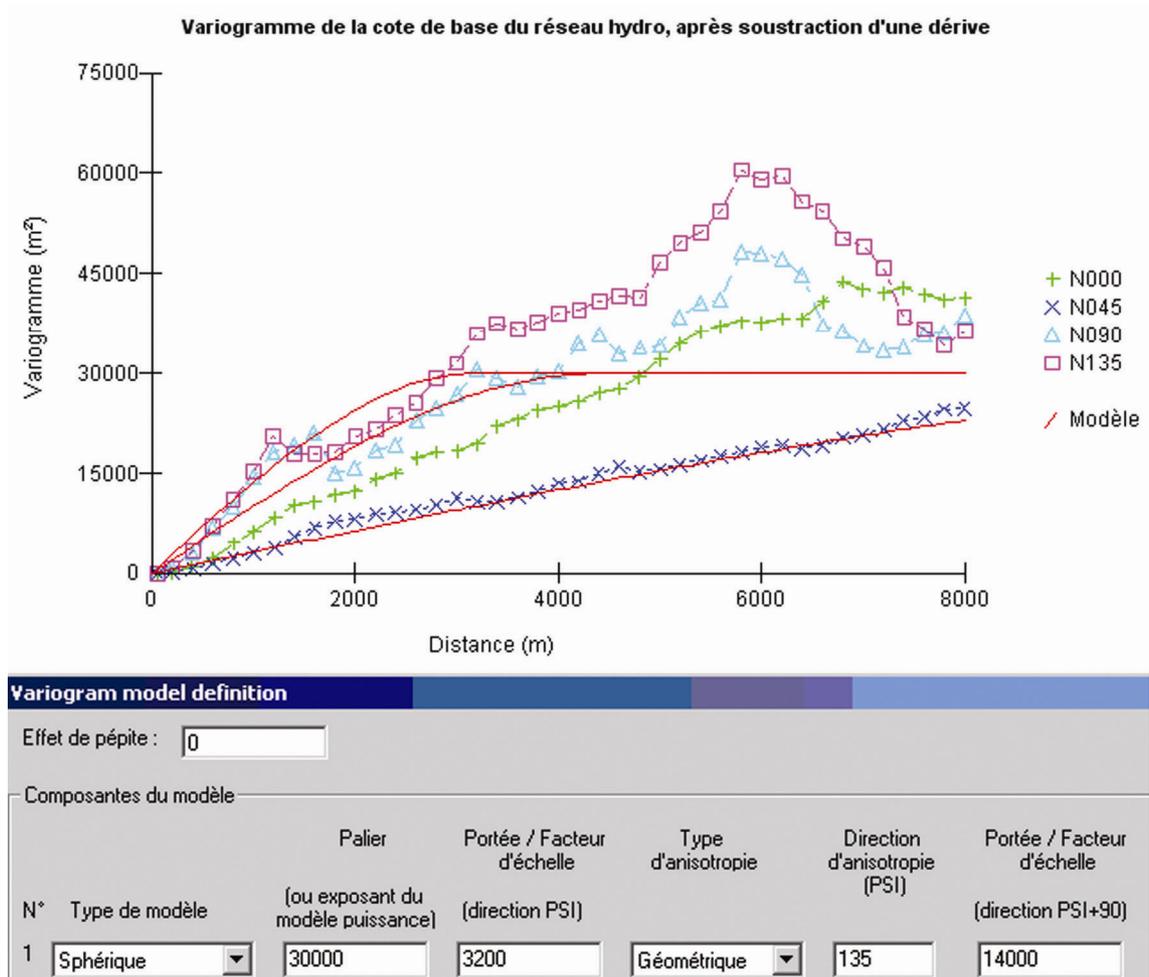


Illustration 28 - Variogramme de la cote de base du réseau hydro après soustraction d'une dérive linéaire et avec son ajustement.

Après ajustement du variogramme, la surface de base du réseau hydrographique a été interpolée par krigeage. Pour interpoler en un nœud de grille, toutes les données à l'intérieur de 4,5 km autour du nœud ont été prises en compte. Le poids affecté à chaque donnée est lié au modèle de variogramme utilisé, de façon à minimiser l'erreur d'interpolation (technique du krigeage). Les paramètres de la grille modélisée (origine, maille, nb de nœuds) sont indiqués sur l'illustration 29.

Paramètres de la grille du modèle

	Origine (coin inf. gauche)	Maille	Nb pixels	Coin sup. droit	Nb de pts de discretisation
X	559325	50	280	573325	1
Y	4157575	50	341	4174625	1

Illustration 29 - Paramètres de la grille modélisée.

3.5.4. Vérification et résultat final

En tout point, la cote topographique de la surface ainsi calculée doit être inférieure à celle du MNT. Lorsque ce n'est pas le cas, des points de contrainte sont entrés manuellement. 36 points de contrainte ont été ainsi ajoutés aux 1118 points initiaux. Ces points sont reportés en vert sur l'illustration 26.

Des coupes verticales en différents endroits du domaine permettent également de contrôler le résultat (Illustration 30 et Illustration 31). La surface de base finale obtenue est présentée sur l'illustration 32. Par différence entre les valeurs d'altitude de la topographie du MNT et celle de la surface de base du réseau hydrographique pérenne, on obtient une épaisseur que l'on peut grossièrement assimiler à la zone non saturée (Illustration 33).

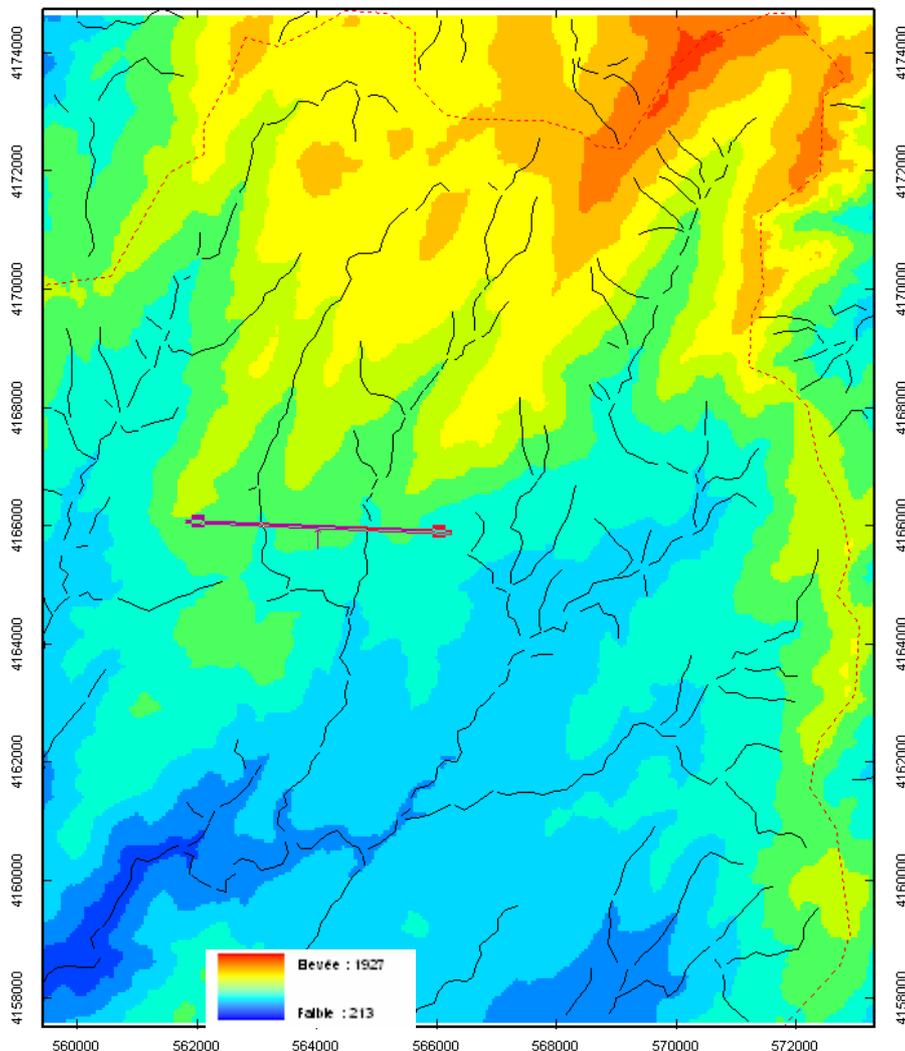


Illustration 30 - Visualisation du MNT de la surface de base et de la position d'une coupe de contrôle.

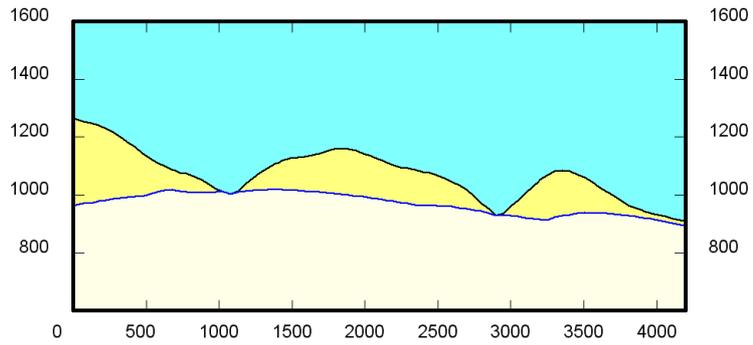


Illustration 31 - Coupe de contrôle. En noir, coupe de la topographie et en bleu coupe de la surface de base du réseau hydrographique.

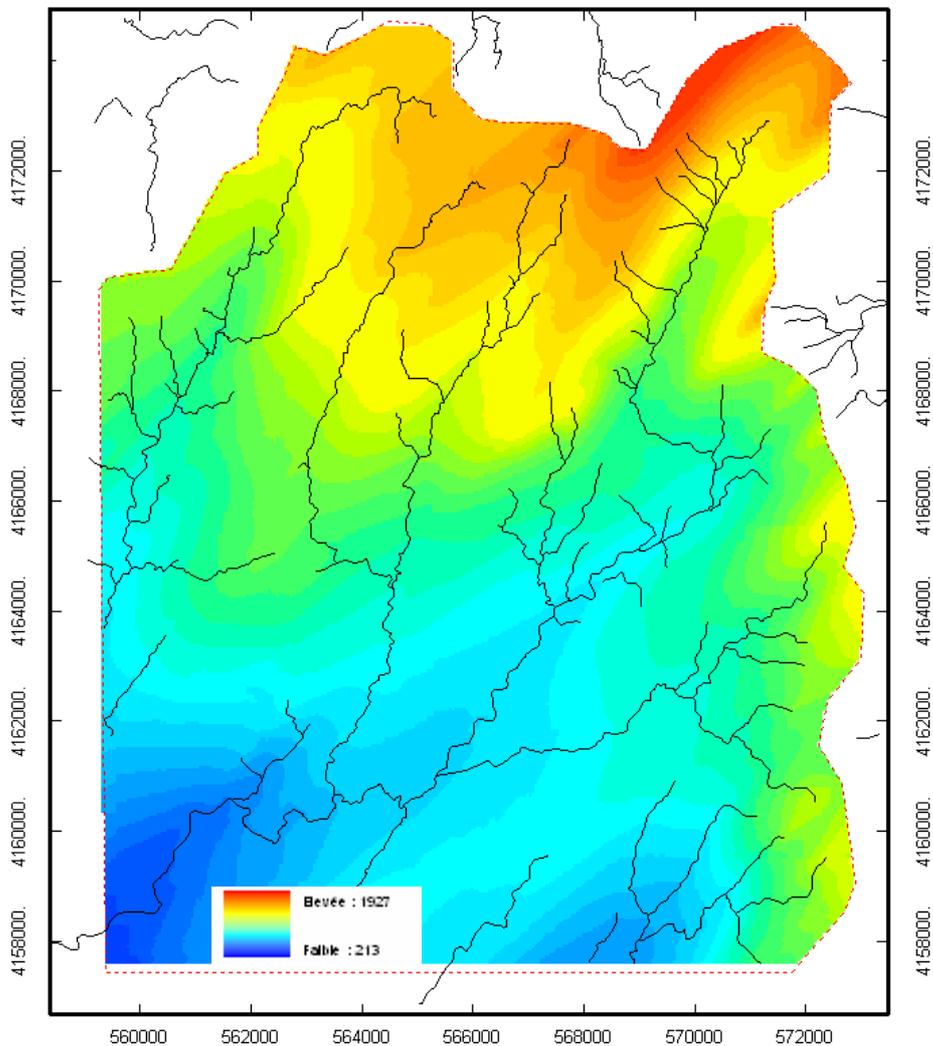


Illustration 32 - Surface de base finale du réseau hydrographique obtenue.

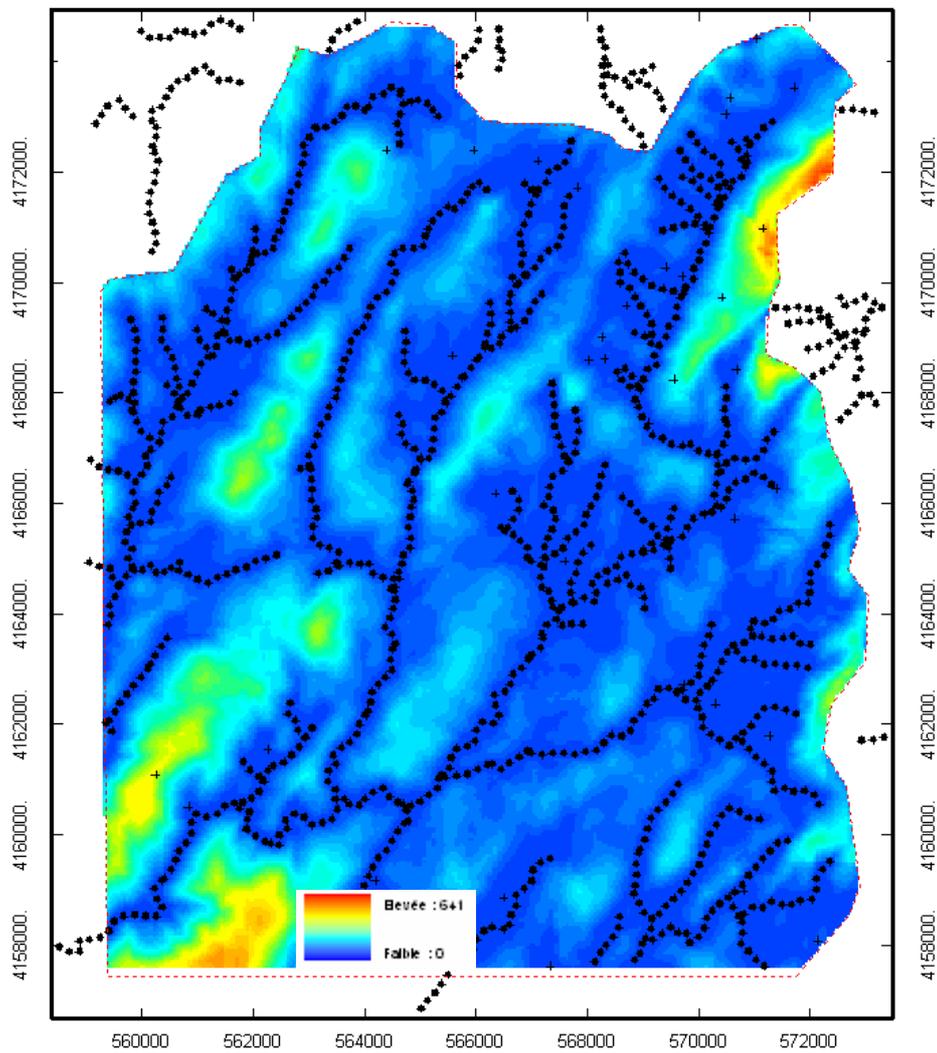


Illustration 33 - Epaisseur de la différence en altitude entre la topographie du MNT et celle de la surface de base des rivières pérennes.

3.6. CONSTRUCTION DE LA PIEZOMETRIE SUR LE BASSIN VERSANT

3.6.1. Données disponibles

Les données de piézométrie disponibles sont celles que nous avons pu mesurer dans les forages existants dans la zone d'étude (Illustration 11), ainsi que celles issues des sondages RMP. Ces données sont synthétisées sur l'illustration 34. Cette illustration présente aussi le résultat des calculs des différences d'altitude entre la surface topographique (basée sur l'altitude donnée par le MNT), le niveau piézométrique et la surface de base du réseau hydrographique pérenne.

Désignation	Code BSS / Code sondage RMP	X (L IV Carto)	Y (L IV Carto)	Z (m)	Niveau piézo mesuré (m/sol)	Altitude surface de base (m)	Altitude surface topo MNT (m)	Altitude niveau piézométrique (m)	A (Zmnt-Zsurfbase)	B (Zpiezo-Zsurfbase)
Forage de Tallone à Quenza	11216X0111	565600	4165450	945	14	857	946	920	82	68
Forage de Culastru à Quenza	11216X0112	565550	4164950	865	7	821	873	866	52	45
Forage de Scapa à Quenza	11217X0002	568520	4166660	905	8	875	913	905	38	30
Forage du Camping à Serra di Scopamène		561910	4162664	950	8	671	934	926	263	255
Forage de Crisencia à Quenza		565506	4162755	793	17	630	787	770	157	140
Hippodrome, nord-est Zonza	COR1	570454	4164230	900	12,5	881	902	889,5	21	8,5
Aval décharge Zonza	COR3A	569509	4162143	738	10,5	759	781	770,5	22	11,5
Burracciola, sud Prugna	COR4A	568365	4166236	830	20	850	868	848	18	-2
Crisencia, sud et aval Quenza	COR5B	565181	4162797	765	5	650	776	771	126	121
Plaine d'Anau, sud-est Sorbollano	COR6	564724	4161686	750	7,5	596	752	744,5	156	148,5
Piana d'Ornicciu, plateau de Coscione	COR7A	566372	4171841	1565	8	1579	1580	1572	1	-7
Aravina, nord-ouest Levie	COR8A	563264	4158166	750	1	692	761	760	69	68

Illustration 34 - synthèse des données piézométriques disponibles et calcul des différences d'altitude entre niveau piézométrique, surface de base et topographique.

3.6.2. Construction de la surface piézométrique à partir de la surface de base du réseau hydrographique pérenne

L'illustration 35 montre que malgré le peu de données disponibles et leur qualité relative, la relation décrite par Wyns *et al.* (2004) est bien vérifiée, puisque l'ensemble des points s'alignent selon une droite de régression. Des barres d'erreur de valeur arbitraire ont été attribuées aux points issus des sondages RMP, de manière à intégrer la qualité de l'interprétation des sondages à l'analyse. Ainsi, même si les points présentant les plus grandes barres d'erreur étaient retirés, les deux points RMP de qualité acceptable s'alignent bien suivant la même droite que les points obtenus sur les forages existants. Ce résultat renforce la confiance que l'on peut avoir sur les interprétations des sondages RMP réalisées.

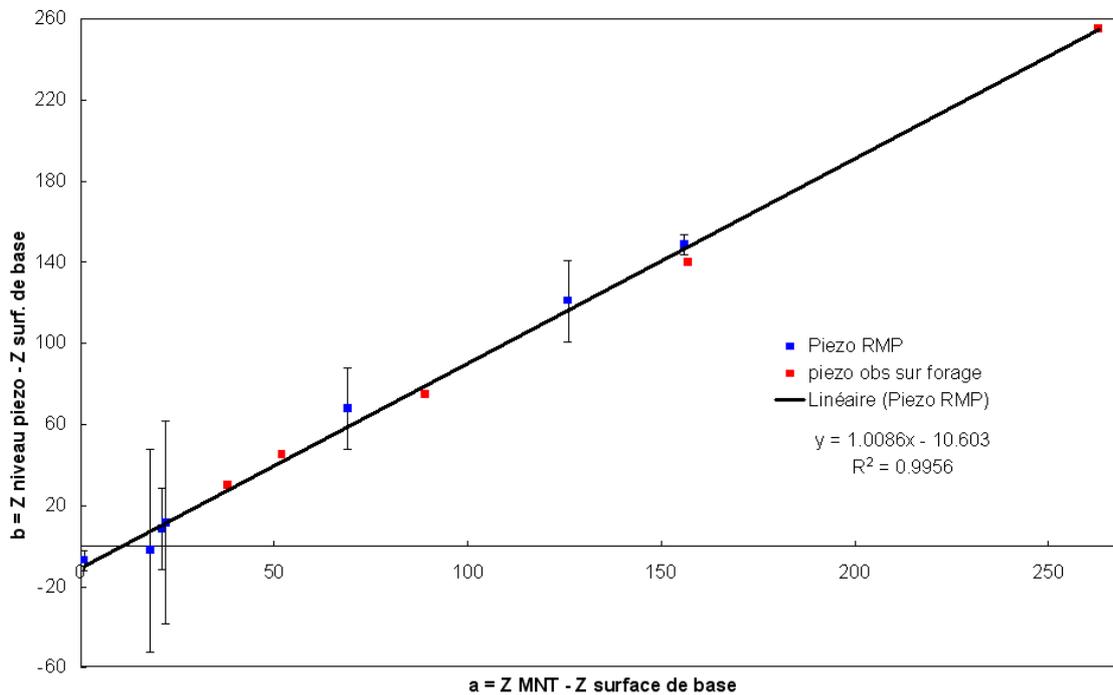


Illustration 35 - Relations entre les niveaux piézométriques, la surface de base du réseau hydrographique pérenne et la surface topographique.

Le coefficient de détermination obtenu présentant une valeur très satisfaisante, nous pouvons utiliser la relation linéaire obtenue pour modéliser l'altitude de la surface piézométrique en tout point du bassin versant à partir des altitudes de la surface topographique et de la surface de base du réseau hydrographique pérenne. La valeur négative de l'ordonnée à l'origine qui indique que le niveau piézométrique se situe statistiquement à une dizaine de mètres sous le fond des thalwegs résulte de deux facteurs : i) le réseau hydrographique pérenne étant issu de la BD Carthage® nationale, il est susceptible de classer des cours d'eau comme pérennes alors qu'ils sont secs dans la réalité, ii) l'encaissement des rivières dans les fonds de vallée, qui peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par endroits, n'est pas pris en compte dans le MNT.

L'illustration 36 présente le résultat de cette construction, au travers de la profondeur à laquelle se situe la surface piézométrique modélisée par rapport à la surface du sol (telle que représentée par le MNT). L'équation utilisée conduit à simuler une surface piézométrique proche du sol sur les reliefs (~ 5 m de profondeur), qui s'éloigne du sol au niveau des thalwegs. Le fait que la surface piézométrique se situe à une dizaine de mètres sous les mailles MNT décrivant les fonds de vallée traduit le fort encaissement général des rivières dans le bassin versant. La comparaison des piézométries mesurées et calculées permet d'obtenir une droite de régression avec une pente égale à 1 et un coefficient de corrélation de 0,99 (Illustration 37).

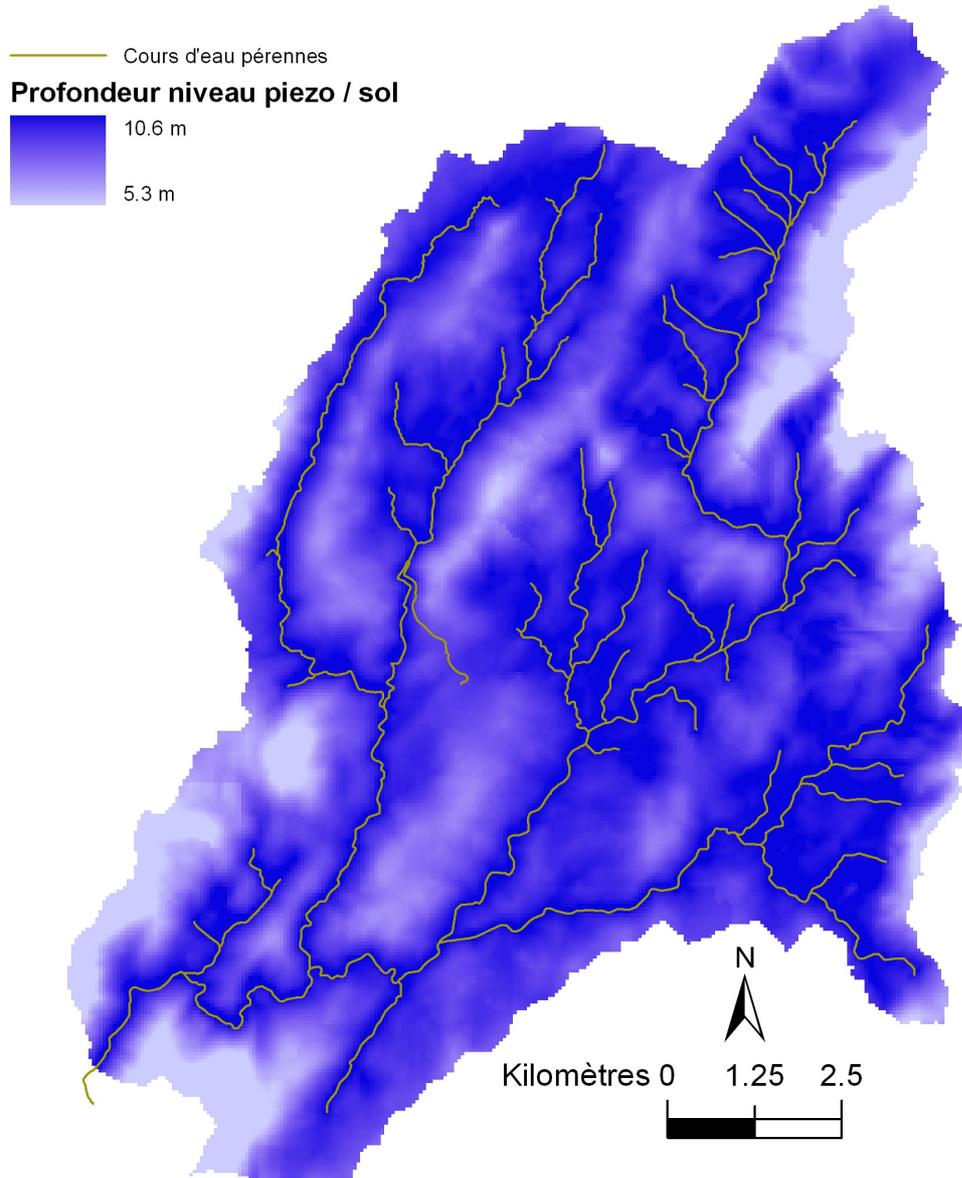


Illustration 36 - Profondeur par rapport au sol du niveau piézométrique modélisé.

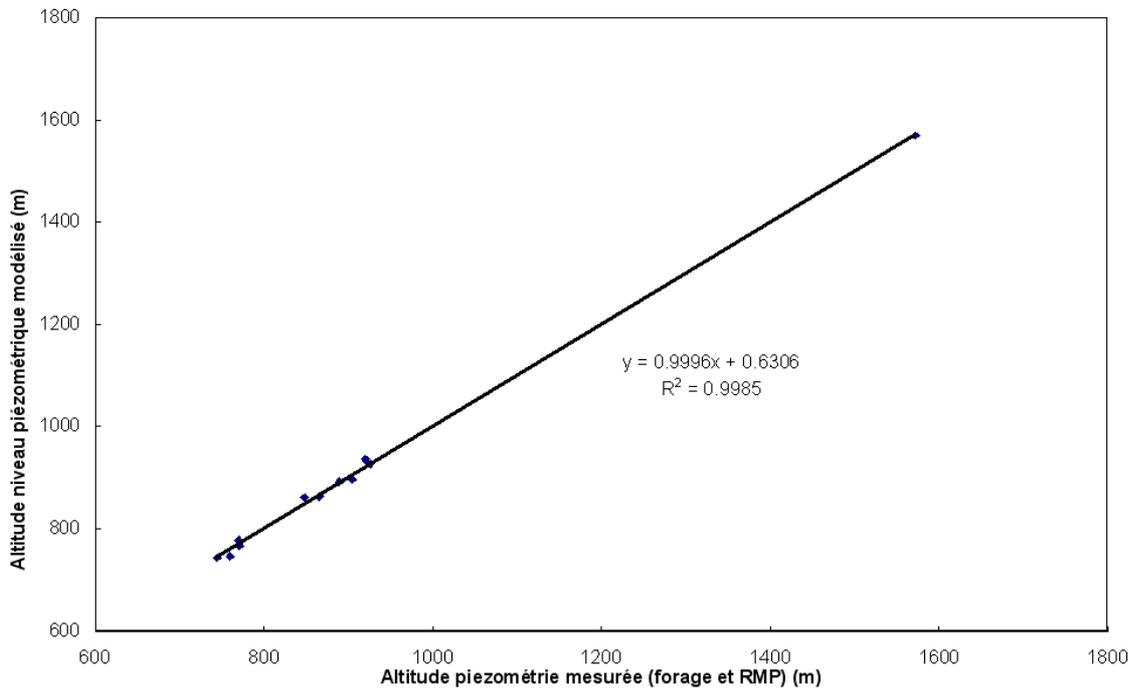


Illustration 37 - Relation entre la piézométrie modélisée et la piézométrie mesurée au niveau des forages et avec les sondages RMP.

3.7. INTEGRATION DE LA LITHOLOGIE ET DE LA FRACTURATION

Cartographie de la surface de base des arènes

A partir de la connaissance géologique acquise lors des campagnes de cartographie de terrain, les limites des secteurs présentant des arènes ont été cartographiées sur l'ensemble de la zone d'étude (Illustration 38). On observe que les arènes se présentent sous la forme d'un grand nombre de petites unités décalées les unes par rapport aux autres par des failles. La fracturation observée, probablement en rapport avec la dynamique de surrection générale de l'ensemble du batholite granitique corse, présente une structure cohérente et marque l'effondrement des compartiments au sein desquels les horizons d'arènes ont été préservés.

Globalement, deux grands secteurs peuvent être différenciés, le secteur nord-ouest correspondant grossièrement au bassin du Codi et le secteur sud-ouest correspondant aux bassins du Criviscia et de St Antoine. Ces deux secteurs sont séparés par une zone de transition, suivant un axe NE-SO, qui correspond à la direction des accidents structuraux majeurs à l'échelle du batholite. Le secteur sud-est présente une plus grande proportion d'arènes que le secteur nord-ouest, sur lequel elles ont subi une érosion plus importante en rapport avec l'altitude plus élevée.

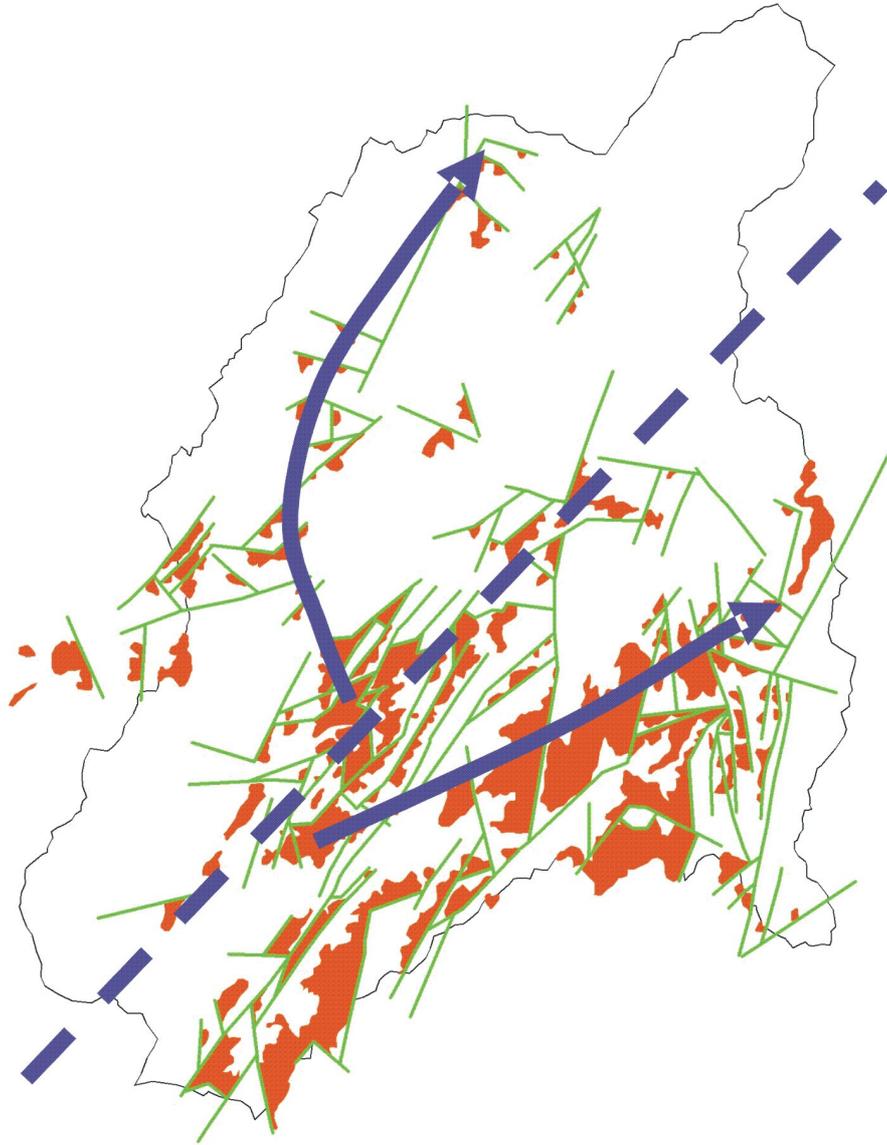


Illustration 38 - Carte des arènes et de la fracturation locale d'après les visites de terrain et une analyse de la topographie sur carte au 1/25 000^{ème}.

A partir de l'altitude des limites des arènes cartographiées, une carte d'altitude de la surface de base des arènes a été construite, à l'aide d'une interpolation par krigeage intégrant la présence des failles. Pour sursoir à l'effet de « masque » que jouent les failles dans le calcul d'interpolation, un certain nombre de points de contrainte d'altitude théorique de la surface de base des arènes ont été ajoutés.

L'épaisseur des horizons d'arènes calculée par croisement de la topographie et de la carte du mur des altérites interpolée, atteint des valeurs maximales de l'ordre de 67 m (illustration 39). Ces épaisseurs, bien que ne pouvant pas être vérifiées faute de coupes géologiques fiables dans le secteur, sont cependant cohérentes avec les observations faites sur le terrain, en particulier dans le secteur de Zonza (sud de la zone étudiée).

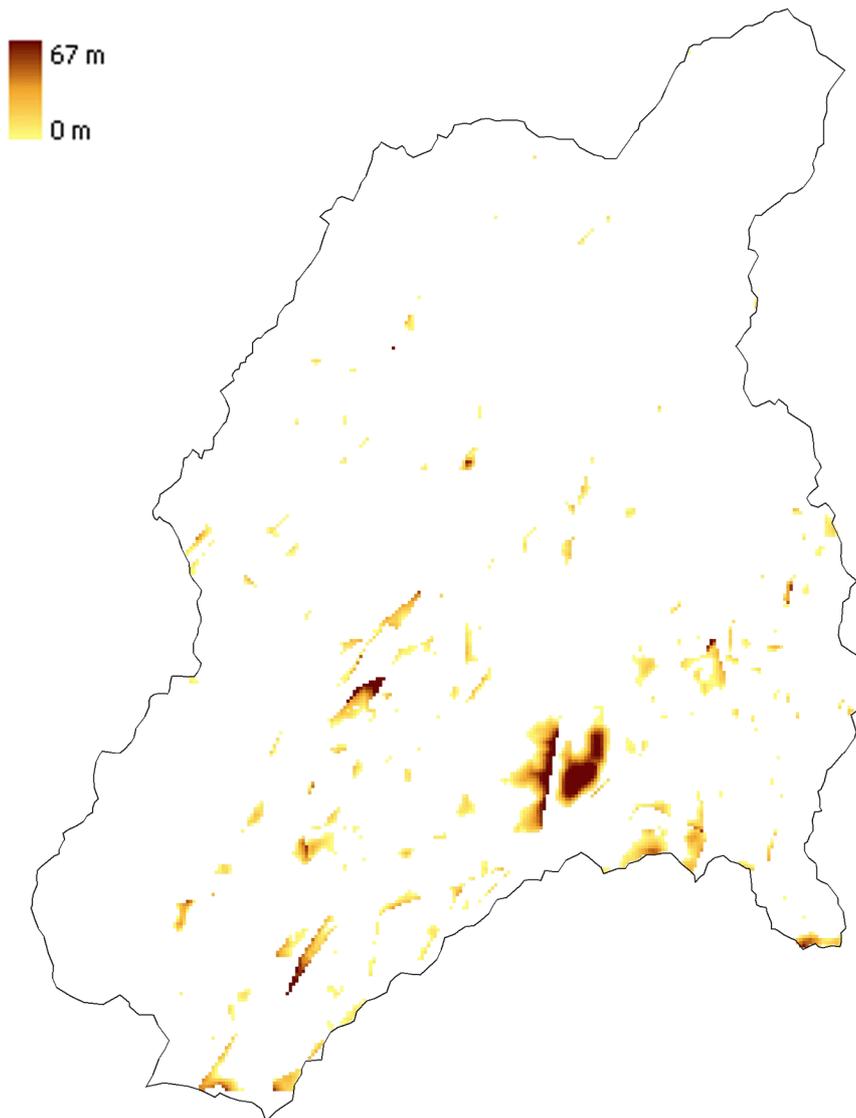


Illustration 39 - Epaisseur des altérites calculée par différence entre l'altitude du mur des altérites calculée par interpolation et la topographie.

Épaisseur de l'horizon fissuré

En l'absence de coupes géologiques permettant de différencier et de caractériser l'horizon fissuré sur la zone d'étude, des épaisseurs théoriques ont été définies pour les deux niveaux que l'on peut différencier au sein de l'horizon fissuré en fonction de leur porosité efficace moyenne (Wyns *et al.*, 2004). N'ayant pu déterminer la valeur de ces porosités à partir des sondages RMP du fait de leur mauvaise qualité, des ordres de grandeur ont là aussi été utilisés (Illustration 40).

Nature des formations	Épaisseur	Porosité efficace
Arènes	0 – 67 m	1% - 2%
Horizon fissuré supérieur	20 m	2% - 5%
Horizon fissuré inférieur	40 m	0,5% - 2,5%

Illustration 40 - épaisseur et porosité efficace théoriques affectées aux arènes et aux deux niveaux de l'horizon fissuré.

A l'aide de ces valeurs, la position de la base des deux niveaux de l'horizon fissuré a été cartographiée sur la zone d'étude à partir de celle des arènes. Le croisement des cartes résultantes avec la topographie a permis de décrire leur répartition spatiale et leur épaisseur sur la zone d'étude (Illustration 41). Un artefact d'interpolation dû à la présence de failles positionnées sur le plateau du Coscione en limite de bassin (secteur nord-ouest), explique la limite rectiligne non réaliste obtenue pour l'extension de l'horizon fissuré dans ce secteur.

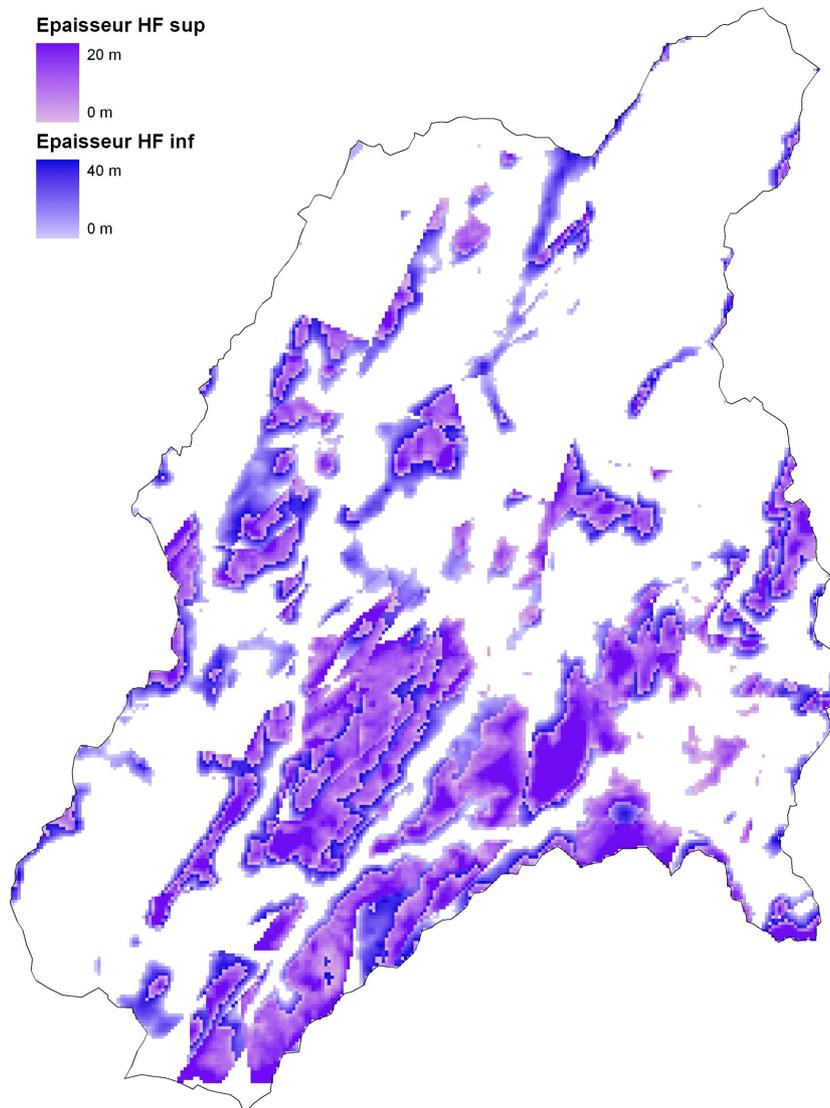


Illustration 41 - Carte des épaisseurs calculées pour les niveaux supérieur et inférieur de l'horizon fissuré sur la zone d'étude.

3.8. QUANTIFICATION ET REPARTITION SPATIALE DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE AU SEIN DE L'HORIZON D'ALTERATION

Pour connaître la part des niveaux d'arènes et d'horizon fissuré susceptibles de contenir de l'eau souterraine pouvant alimenter les cours d'eau pendant l'étiage, les cartes des épaisseurs respectives de chaque horizon (altérites, HF supérieur et inférieur) ont été croisées avec celle décrivant la surface passant par le fond des rivières pérennes, ainsi qu'avec celle décrivant la piézométrie (Illustration 42).

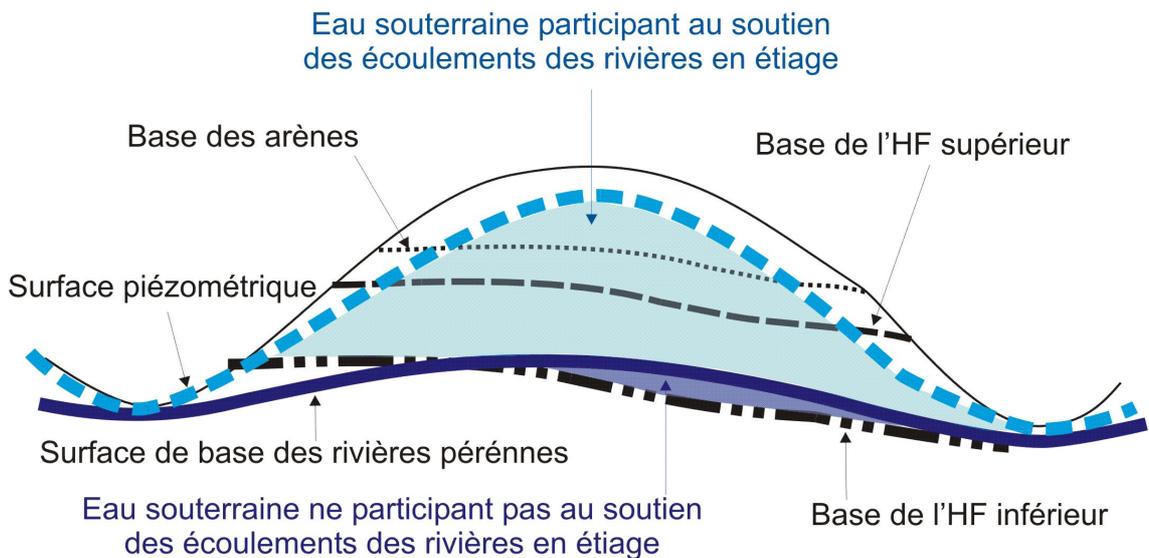


Illustration 42 - Présentation schématique de la méthode de détermination de la part d'eau souterraine contenue dans les formations d'altération des granites (arènes et horizon fissuré), susceptible de participer au soutien des écoulements des rivières en étiage.

Les superficies et les tranches de chaque horizon pouvant contenir de l'eau ont ainsi été déterminées sur les deux bassins versants du Codi et du Criviscia-St Antoine. Les ordres de grandeur des volumes d'eau souterraine qu'ils peuvent contenir ont été calculés en multipliant les volumes correspondants par les porosités efficaces estimées pour chaque niveau (Illustration 43).

Le tableau de l'illustration 43 montre que le volume total contenu dans les horizons d'altération auquel l'on arrive au terme de ce calcul est compris entre 3 et 11 Mm³ pour le bassin versant du Codi et entre 7 et 25 Mm³ pour celui du Criviscia. Si l'on ramène ce volume à la surface totale de chacun des deux bassins versants (respectivement 35,6 et 71,2 km²) et que l'on considère que la totalité de ce volume s'écoule en une année, les débits spécifiques moyens obtenus sont d'un ordre de grandeur très plausible pour ce type de formation (6 l/s/km²).

Enfin, il apparaît que, même si les horizons d'altérites sont présents de manière prépondérante sur le bassin du Criviscia-St Antoine (le volume d'altérites de Criviscia

représente 5 fois le volume obtenu pour le Codi), cela ne se traduit pas par un débit spécifique notablement plus important.

Nature de la formation par bassin	Volume total par couche (10 ⁶ m ³)	porosité min (%)	porosité max (%)	Volume d'eau min (10 ⁶ m ³)	Volume d'eau max (10 ⁶ m ³)	Débit spécifique moyen équivalent (l/s/km ²)
Altérites	8	1	2	0.08	0.16	0.1
HF supérieur	60	2	5	1.21	3.02	1.9
HF inférieur	308	0.5	2.5	1.54	7.70	4.1
Total Codi	376			2.8	10.9	6.1
Altérites	42	1	2	0.4	0.8	0.3
HF supérieur	174	2	5	3.5	8.7	2.7
HF inférieur	625	0.5	2.5	3.1	15.6	4.2
Total Criviscia	841			7.0	25.2	7.2

Illustration 43 - Volumes d'eau susceptibles de participer au soutien des écoulements des rivières en étiage, par horizon d'altération pour les bassins versants du Codi et du Criviscia. Pour chaque formations des débits spécifiques équivalents ont été calculés en considérant que ces volumes seraient vidangés en un an.

Ceci est probablement lié au fait qu'une plus grande part de l'horizon fissuré est sollicité pour alimenter les rivières sur le bassin versant du Codi (les volumes de l'horizon fissuré supérieur et inférieur calculés pour le bassin de Criviscia représentent seulement 2 fois les volumes calculés pour celui du Codi). La topographie très encaissée de ce bassin versant au regard des reliefs plus « mous » que l'on observe sur celui de Criviscia renforce cette hypothèse.

Ceci montre que la présence et l'extension des arènes ne sont pas les seuls critères à considérer lorsque l'on s'intéresse à la ressource en eau, mais que la prise en compte de l'horizon fissuré est essentielle (d'autant que sa porosité efficace est théoriquement plus importante).

3.9. SYNTHÈSE

La méthode de caractérisation spatiale de la réserve en eau basée sur la description des formations d'altération du granite a donc permis d'obtenir des ordres de grandeur pour les volumes d'eau souterraine susceptible d'alimenter les rivières en étiage de 3 et 11 Mm³ pour le bassin versant du Codi et entre 7 et 25 Mm³ pour celui du Criviscia. Ces volumes, ramenés à la surface de chacun des bassins versants représentent un écoulement moyen sur l'année de l'ordre de 6 l/s/km². Les valeurs obtenues semblent réalistes par rapport à ce qui est connu par ailleurs pour ce type de formations, bien qu'il ait été nécessaire de s'appuyer sur des hypothèses fortes pour réaliser le calcul notamment concernant l'épaisseur de l'horizon fissuré et les porosités efficaces de chaque niveau. Le calcul permet tout de même de mettre en avant le rôle prépondérant du milieu fissuré en termes de réservoir pour l'eau souterraine par rapport à celui des altérites.

4. Processus hydrologiques sur le bassin versant du haut-Rizzanese

4.1. DONNEES DISPONIBLES

4.1.1. Précipitations et ETP

Pour des questions de cohérence, de qualité des données (lacunes) et de stationnarité du contexte environnemental général, les analyses développées dans ce qui suit concernent la période 2002 – 2006.

Une seule station est en mesure de fournir des observations sur les précipitations dans la zone d'étude. Il s'agit de la station située dans l'enceinte de la Gendarmerie de Levie (Code station : 20142001 - Illustration 44). Les valeurs de l'ETP calculées par Météo France sur la zone d'étude (point de grille centré sur Levie), ont aussi été récupérées.

Les précipitations annuelles moyennes à la station de Levie, calculées sur 30 ans (1971 – 2000) sont de l'ordre de 1015 mm. Au regard de cette valeur :

- les années 2002 et 2006 sont des années relativement normales en termes de précipitations annuelles (respectivement 1021 mm et 778 mm – à comparer avec le cumul sur 10 mois seulement pour 2006) ;
- Les années 2003 et 2005 sont fortement déficitaires en termes de précipitations annuelles (respectivement 871 mm et 862 mm) ;
- L'année 2004 est fortement excédentaire en termes de précipitations annuelles.

4.1.2. Débits journaliers

Une station hydrométrique (code station : Y8814010) gérée par la DIREN et placée au niveau du pont de Zoza sur la commune du même nom, contrôle les débits écoulés à l'exutoire du bassin versant du haut-Rizzanese depuis 1966. Des stations hydrométriques ont aussi été ponctuellement installées en amont de cette dernière, pour l'implantation du barrage qu'EDF construit dans ce secteur (Illustration 44).

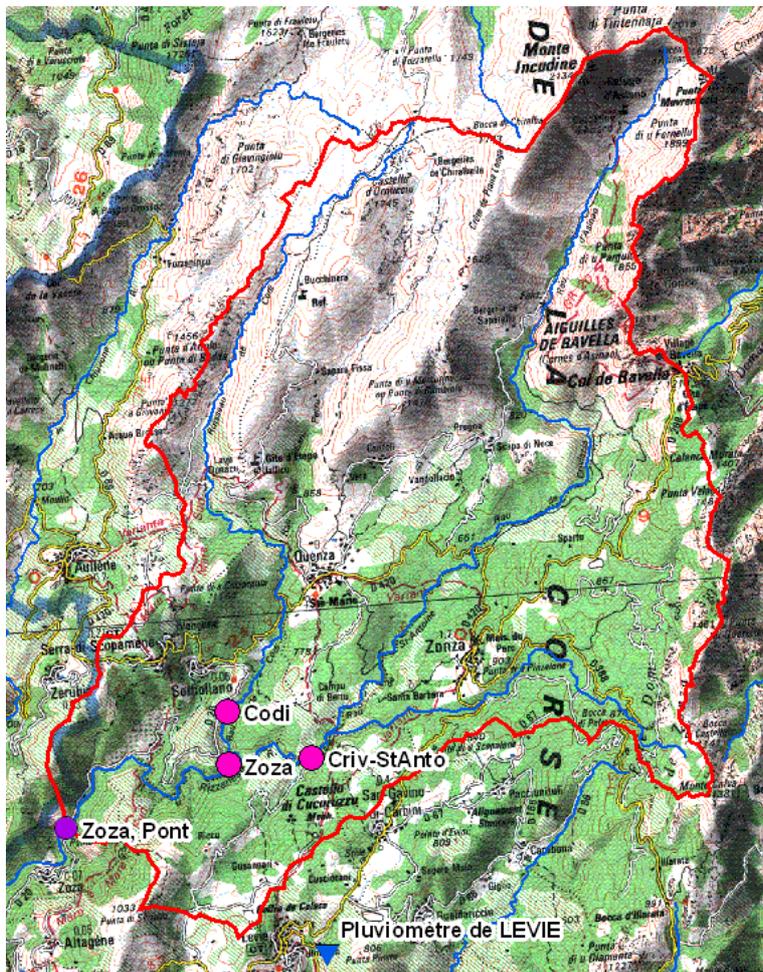


Illustration 44 - Pluviomètre et stations hydrométriques dans la zone du haut Rizzanese.

Les principales caractéristiques des stations hydrométriques sont présentées sur l'illustration 45.

Nom station	Gestionnaire	Code station	X (Lambert IV en m)	Y (Lambert IV en m)	Z (m)	BV (km ²)	Données dispo depuis
Pont de Zoza	DIREN/SEMA	Y8814010	560 400	4 159 200	300	130.0	01/08/1997
Zoza	EDF/DTG	520	563 500	4 162 422	526	114.7	01/01/1984
Codi	EDF/DTG	519	563 470	4 161 440	582	35.9	16/09/1997
Saint-Antoine / Criviscia	EDF/DTG	521	565 065	4 160 560	582	70.8	17/09/1997

Illustration 45 - Caractéristiques principales des stations hydrométriques existantes.

Les débits journaliers mesurés à la station de la DIREN ont été récupérés sur le site de la « banque hydro » (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>), portail du Ministère de l'Environnement pour les mesures hydrométriques. EDF nous a cédé à titre gracieux les données mesurées au niveau de leurs stations.

4.2. ANALYSE DES DONNEES

4.2.1. Comparaison des données des stations EDF et DIREN

Les données n'ayant pas été produites par les mêmes opérateurs, il convient d'être très prudent dans les exercices de comparaison, notamment entre les données des deux stations proches dans le secteur de Zoza. En effet, lorsque l'on compare les débits journaliers mesurés à la station de Zoza d'EDF avec la somme des débits de la station de Codi et de Criviscia/Saint-Antoine, on obtient un résultat cohérent (Illustration 46), puisque les débits de Zoza sont toujours supérieurs à la somme des débits amont.

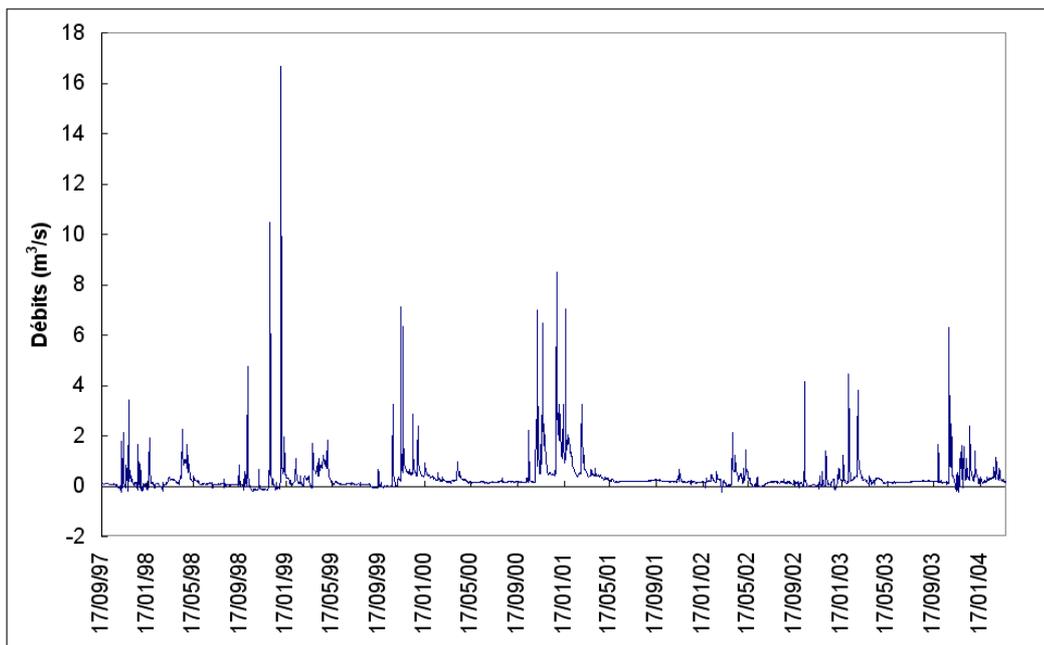


Illustration 46 - Comparaison des débits mesurés à Codi, Criviscia/Saint-Antoine et à Zoza ($Q_{\text{codi}} + Q_{\text{Criviscia/St-Antoine}} - Q_{\text{Zoza}}$).

Le même type de comparaison avec les débits mesurés à la station de Zoza de la DIREN montre un résultat moins cohérent (Illustration 47). En effet, les débits à la station DIREN sont parfois inférieurs à la somme des débits amont. Dans la mesure où aucune prise d'eau importante n'est connue entre les deux stations, cette situation peut-être due :

- à l'existence d'une zone de pertes pour la rivière qui se situerait entre les deux stations de Zoza,
- à des différences entre les courbes de tarage mises au point par les deux opérateurs (EDF et DIREN).

En l'absence d'éléments permettant de trancher la question, il convient de ne pas comparer les stations des deux opérateurs de manière trop détaillée.

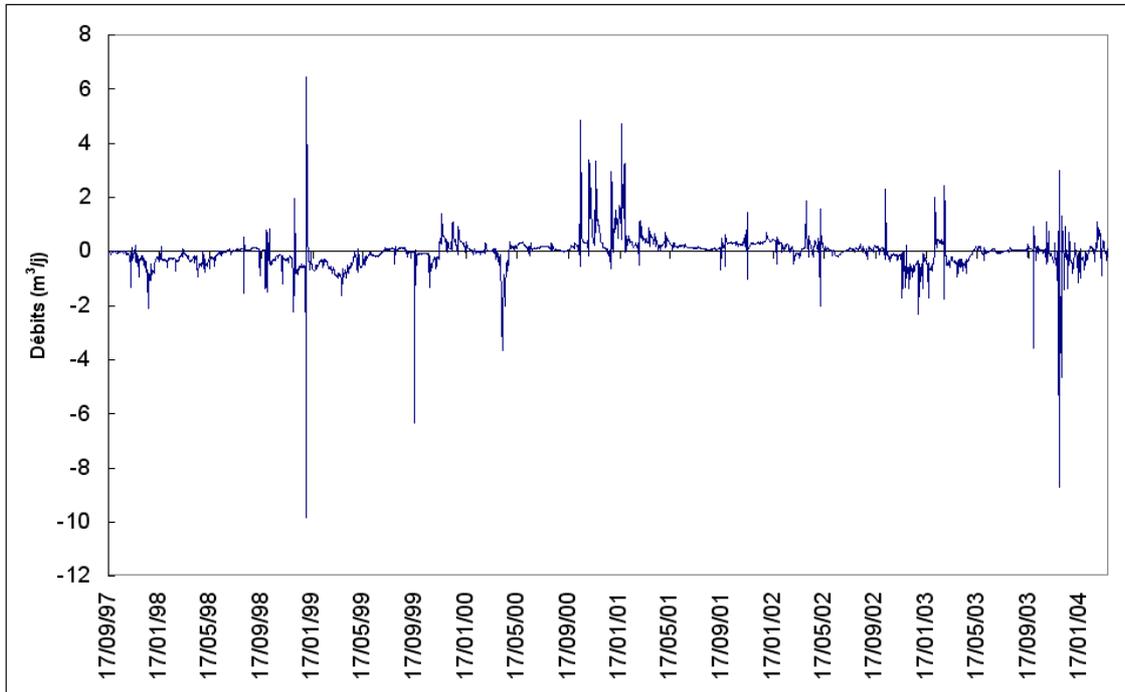


Illustration 47 - Comparaison des débits mesurés à Codi, Criviscia/Saint-Antoine et à Zoza DIREN ($Q_{\text{codi}} + Q_{\text{Criviscia/St-Antoine}} - Q_{\text{Zoza DIREN}}$).

La comparaison des données des stations d'EDF est par contre plus robuste, puisque l'on peut imaginer que les protocoles de tarage et d'acquisition des données sont similaires. Ainsi, les lames d'eau annuelles écoulées à la station de Zoza d'EDF représentent 20% (19% sur le Codi et 16% sur le Criviscia/St-Antoine) des précipitations annuelles en 2002 et 35% en 2003 (32% sur le Codi et 35% sur le Criviscia/St-Antoine - année déficitaire en pluviométrie).

En période d'étiage, le bassin versant contrôlé par la station de Codi semble produire un écoulement spécifique un peu plus important que le bassin versant de la station de Criviscia/St-Antoine (Illustration 48).

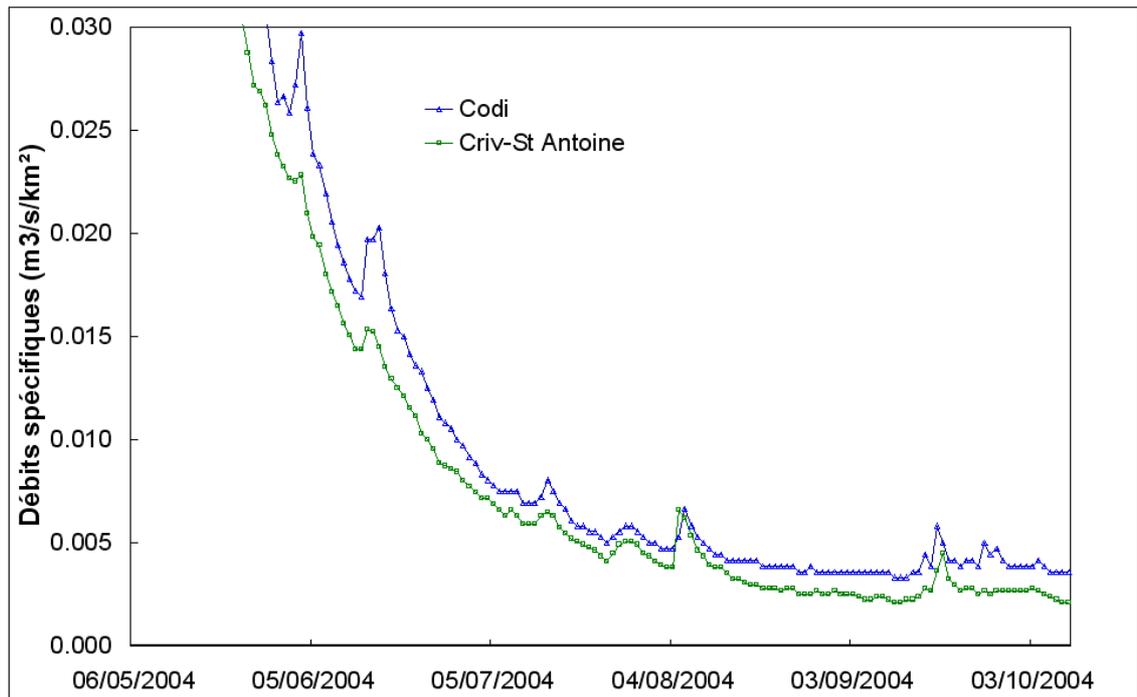


Illustration 48 - Débits spécifiques d'étiage des bassins versants du Codi et du Criviscia/Saint-Antoine.

4.2.2. Analyse des débits classés

La technique d'analyse des débits classés, couramment utilisée en hydrologie à des fins de prévision des régimes des cours d'eau, repose sur un classement et une représentation des débits journaliers sous la forme d'une courbe de distribution des fréquences. Cette courbe fournit les débits atteints ou dépassés pour un nombre de jours d'observation donné.

Nous l'utilisons ici à des fins descriptives du comportement des bassins versants au travers de l'ajustement des débits classés suivant une relation de type logarithmique. Les éventuelles ruptures de pente de la droite que l'on obtient traduisent des variations dans les vitesses de croissance ou de décroissance des débits, qu'il s'agit alors d'interpréter (Crochet et Marsaud, 1997).

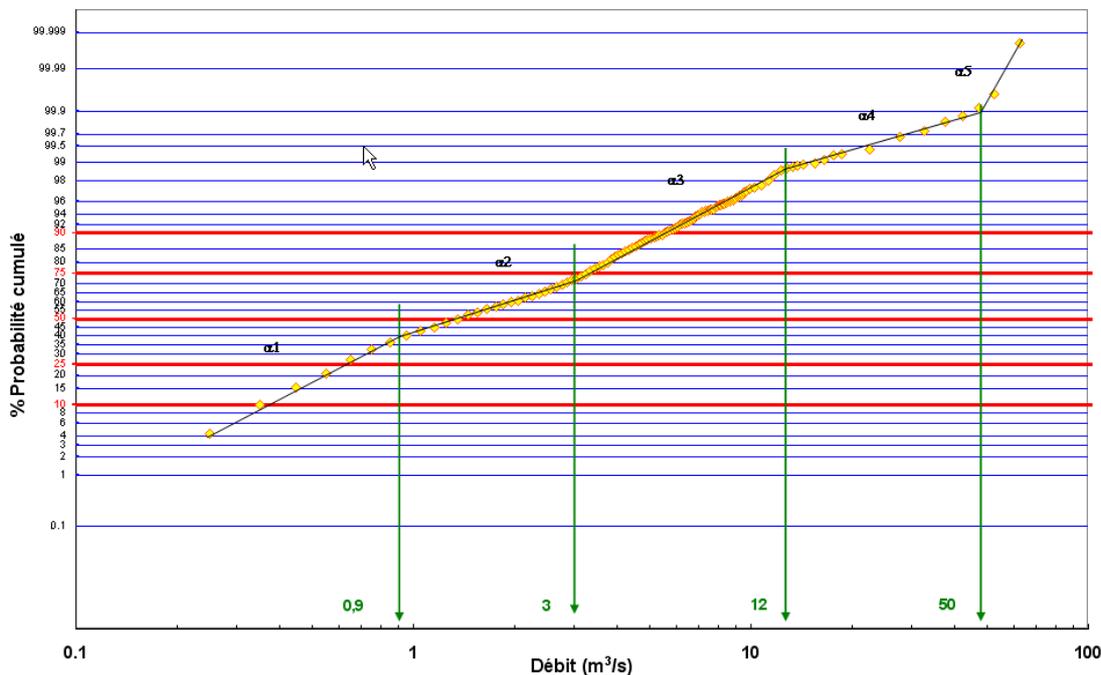


Illustration 49 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Zoza DIREN.

L'illustration 49 montre le résultat de cette analyse pour la station de Zoza de la DIREN, où quatre ruptures de pente principales sont observées. Le tronçon de pente α5 peut être considéré comme lié au problème de la courbe de tarage qui sous-estimerait les débits (les fortes crues étant rarement bien jaugées).

Le tronçon α1 correspond aux ordres de grandeur des débits d'étiage, c'est-à-dire que l'on peut considérer qu'il reflète l'évolution de l'écoulement des eaux souterraines. La diminution de la pente observée au passage au tronçon α2 correspond à une augmentation des apports, probablement liée aux précipitations qui génèrent un ruissellement venant s'ajouter aux apports des eaux souterraines. La légère augmentation de pente observée au passage au tronçon α3 pourrait traduire le fait que dans les conditions de ce tronçon, une part préférentielle (par rapport au tronçon α2) des écoulements s'infiltre pour recharger les réserves d'eau souterraine. La recharge, qui a aussi lieu pour des débits plus faibles, serait donc optimale dans les conditions d'écoulement du tronçon α3. Finalement, le tronçon α4 pourrait décrire un retour à un fonctionnement proche de celui de α2 pour des conditions de sol totalement saturé.

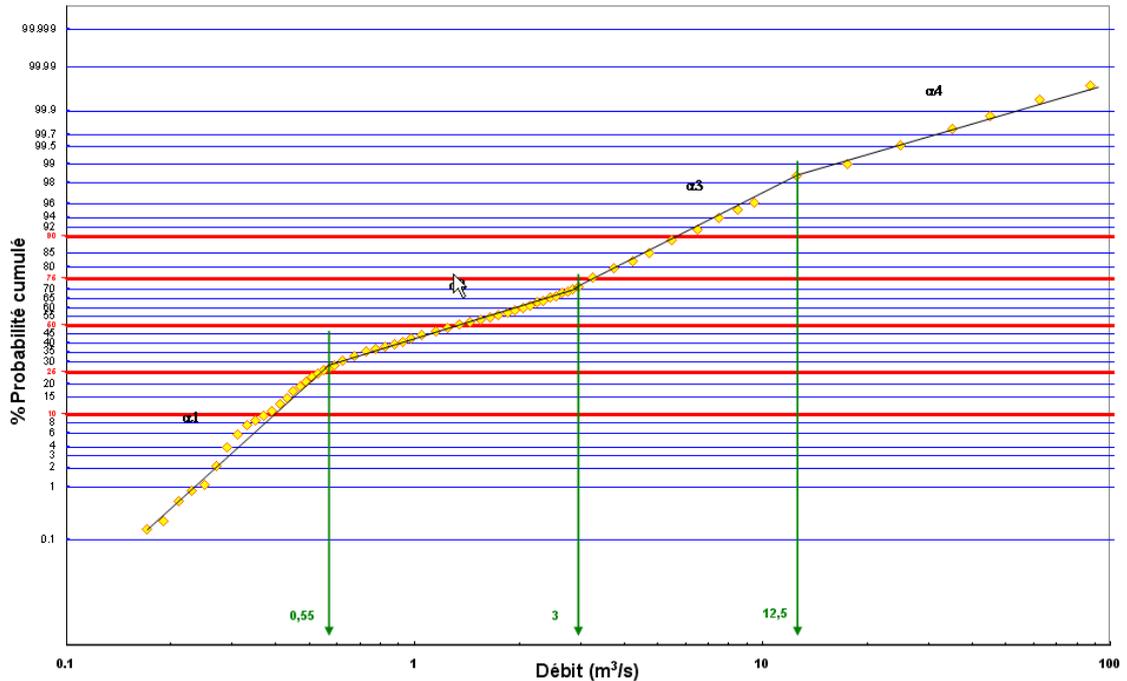


Illustration 50 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Zoza EDF.

Le même type de phénomène est observé pour les stations d'EDF et l'on peut remarquer que les ruptures de pente entre les divers tronçons interviennent grossièrement pour des probabilités d'occurrence similaires (Illustration 50, Illustration 51 et Illustration 52).

Si l'on rapporte les valeurs des débits au niveau des ruptures de pente entre les tronçons α_1 et α_2 à la superficie respective des bassins versants de Criviscia/Saint-Antoine et Codi, il apparaît que les cours d'eau sont essentiellement soutenus par les eaux souterraines pour des débits spécifiques inférieurs à 3 l/s/km² pour Criviscia/St-Antoine et de 6 l/s/km² pour Codi. De même, l'impact du passage à des conditions de recharge optimale soit plus important pour le Codi (pente du tronçon plus forte) que pour le Criviscia/Saint-Antoine. Ceci tend à montrer que les eaux souterraines ont un poids plus important sur les régimes d'écoulement des cours d'eau dans le bassin versant du Codi, que dans celui du Criviscia/Saint-Antoine.

Le comportement général du bassin versant étudié est donc globalement homogène et présente un bilan en termes de recharge et de vidange des eaux souterraines relativement équilibré (probabilités d'occurrence des débits d'étiage et des débits de recharge similaires).

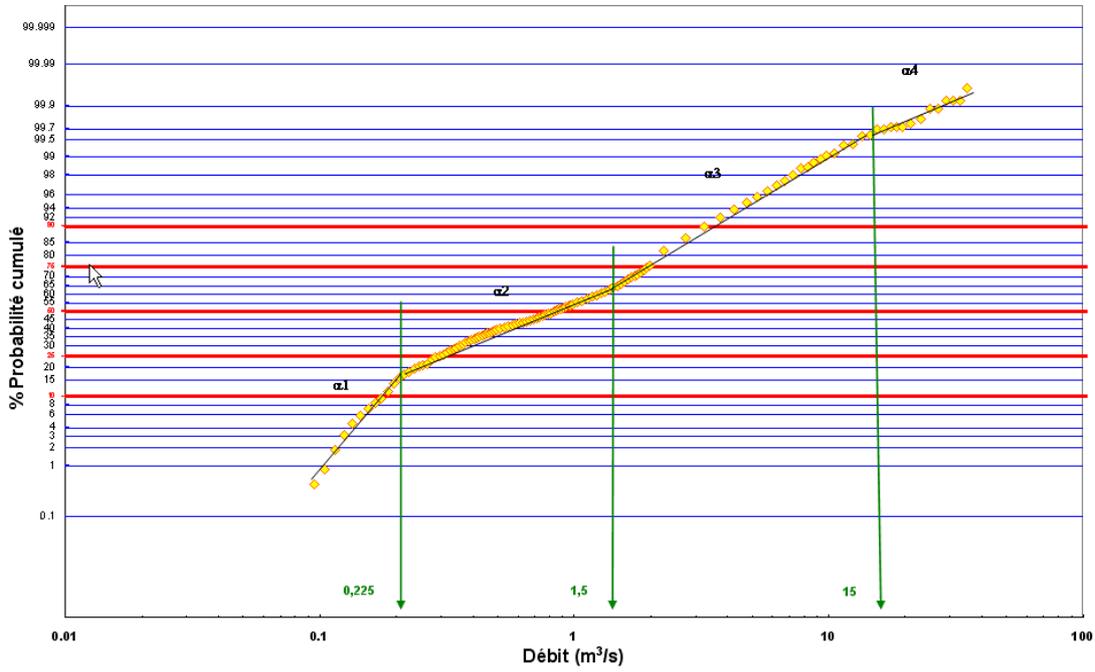


Illustration 51 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Criviscia/St-Antoine.

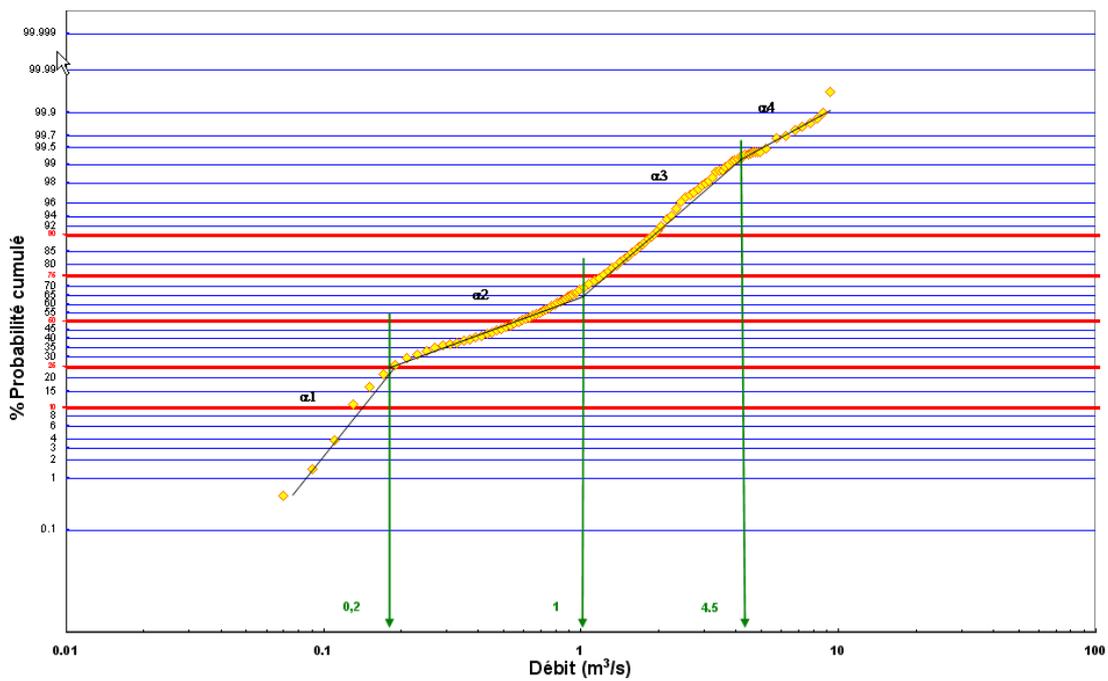


Illustration 52 - Ruptures de pente de la droite des débits classés pour la station de Codi.

4.2.3. Modélisation inverse (pluie-débit) des écoulements

Analyse des relations entre précipitations et écoulements

Les relations entre les précipitations, l'ETP et les débits à l'exutoire du bassin versant contrôlé par la station de la DIREN ont été étudiées au pas de temps journalier, en utilisant les techniques de traitement du signal et de modélisation inverse des séries temporelles.

En assimilant ce bassin versant à une « boîte noire » pour laquelle la pluie et l'ETP représentent les entrées et les débits à l'exutoire la sortie, des techniques d'inversion du signal permettent de reproduire ces derniers. La relation entre les entrées et la sortie est alors matérialisée par une ou plusieurs fonctions de transfert (constituées d'une ou plusieurs réponses impulsionnelles ou hydrogrammes unitaires) décrivant les différents processus impliqués : ruissellement, infiltration, écoulement souterrain. Une réponse impulsionnelle relie linéairement les différentes entrées à la sortie, c'est à dire que la sortie est proportionnelle aux sollicitations des différentes entrées, la réponse du système étant plus ou moins décalée dans le temps.

L'étude des caractéristiques de la ou des fonctions de transfert obtenues permet de décrire la dynamique de transformation des précipitations en infiltration et ruissellement au sein du bassin étudié. L'ensemble de ces traitements ont été réalisés à l'aide de l'outil TEMPO ({{494 Pinault,J.-L. 2001}}) développé au BRGM.

Simulation des débits sur la période 2003 - 2005

Une fonction de transfert permettant de reproduire les débits observés à partir des précipitations et de l'ETP a été calée sur la période comprise entre 2003 et l'été 2006. Cette fonction combine des réponses impulsionnelles rapides et lentes pour être en mesure de reproduire la non-linéarité du système à un événement de précipitation en termes de débit à l'exutoire.

Une approximation de la combinaison de ces fonctions est donnée par le corrélogramme croisé des précipitations journalières et des débits journaliers à l'exutoire présenté sur l'illustration 53.

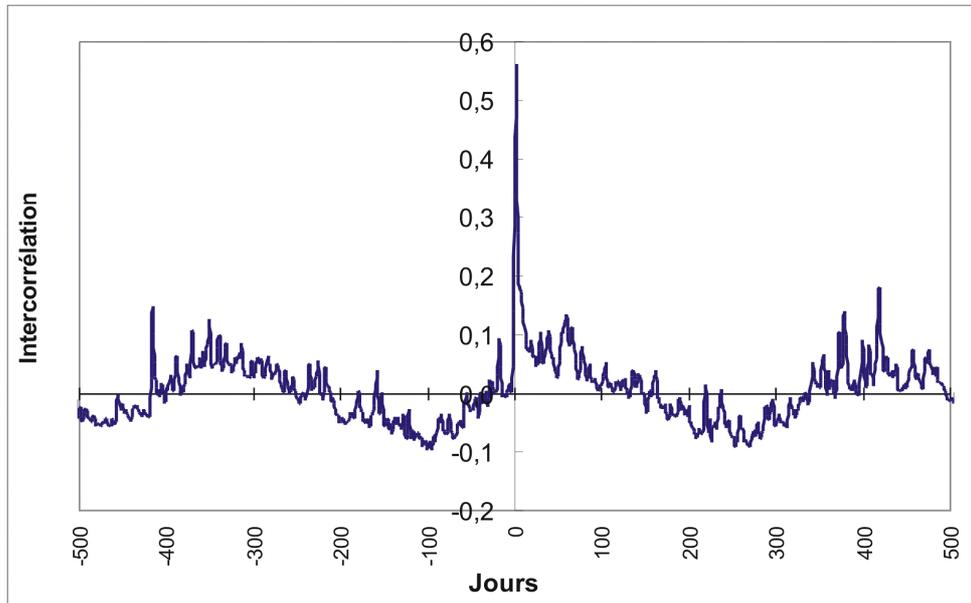


Illustration 53 - Corrélogramme croisé des précipitations journalières et des débits journaliers à l'exutoire pour la période comprise entre 2003 et 2006.

Le corrélogramme croisé a pour objet l'analyse des corrélations entre deux variables dans l'espace temporel. Il permet de mettre en exergue les relations de causalité entre les deux variables et de donner une approximation de la réponse impulsionnelle du système (ou hydrogramme unitaire). On observe sur l'illustration 53 une réponse très rapide et intense du système dès les premiers jours, suivie par une dynamique beaucoup plus lente qui perdure pendant plus de 200 jours après la sollicitation.

Les débits ont donc été simulés en calibrant les caractéristiques des réponses impulsionnelles rapides et lentes au sein de TEMPO. La simulation dont l'illustration 54 présente les résultats, a été obtenue pour un temps de réponse rapide de 2,5 jours et lente de 220 jours. Les valeurs des critères statistiques présentés indiquent que la qualité de la simulation est acceptable.

Cette simulation permet d'estimer le temps moyen pendant lequel l'effet de la recharge (infiltration de l'eau) se fait sentir sur les écoulements pour chaque composante. Cette durée, appelée temps de transit moyen, est de l'ordre de 1 jour pour la composante rapide et de l'ordre de 70 à 80 jours pour la composante lente. Ainsi, au-delà de cette durée, le modèle considère que les écoulements simulés ne sont plus en rapport avec les processus d'infiltration. Seule la vidange des aquifères participerait alors au soutien des écoulements.

Le modèle permet aussi d'estimer une capacité de stockage d'eau dans le sol, paramètre contrôlant la génération de ruissellement. Pour obtenir le résultat présenté, le modèle considère qu'en été une pluie doit dépasser 50 mm pour générer du ruissellement. Ceci permet d'estimer que la capacité de stockage en eau du sol se situe autour de cette valeur en moyenne sur le bassin.

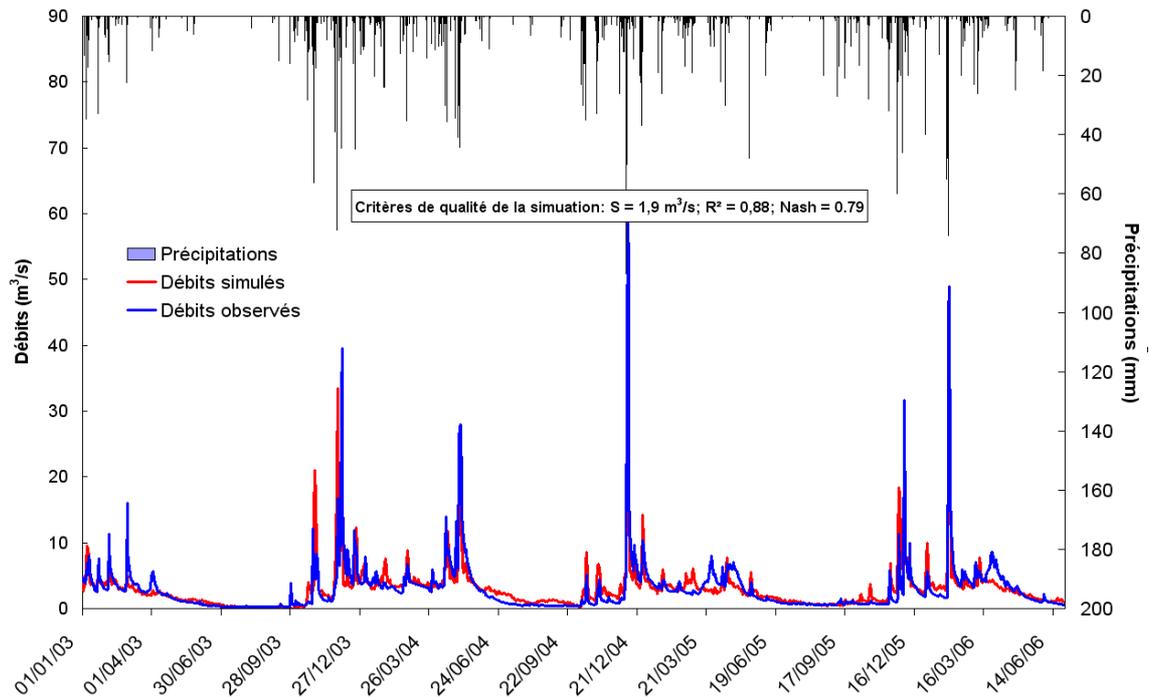


Illustration 54 - Débits simulés et débits observés à l'exutoire du bassin versant sur la période comprise entre 2003 et l'été 2006.

Le même type de travail a été réalisé sur les chroniques de débit disponibles au niveau des stations d'EDF (Illustration 55). Les valeurs des critères de qualité des simulations obtenues sont aussi relativement satisfaisantes. D'après les résultats de cette modélisation, le bassin versant contrôlé par la station de Criviscia/Saint-Antoine semble présenter une inertie moins grande à l'infiltration, puisque son temps de transit lent est inférieur de moitié à celui du Codi. Une capacité de stockage d'eau dans le sol plus réduite est aussi modélisée pour ce bassin en comparaison de celui du Codi, ce qui est cohérent avec le fait que l'effet de l'infiltration sur les écoulements disparaît plus vite et avec la production plus grande de ce dernier bassin en termes de débit spécifique (Illustration 48). La modélisation à la station de Zoza EDF semble faire la synthèse des deux stations amont, avec un temps de transit lent compris entre les deux valeurs amont.

Station hydro	R ²	Nash	tps transit rapide (j)	tps transit lent (j)	capacité de stockage (mm)
Codi	0.88	0.8	1	60	50
St Antoine	0.84	0.73	1.4	33	35
Zoza	0.9	0.84	0.9	50	50

Illustration 55 - Caractéristiques principales résultantes des simulations Tempo pour chaque station hydrométrique (les 3 premières sont gérées par EDF, la dernière par le SEMA-DIREN).

4.2.4. Analyse des tarissements

L'étude des mécanismes de tarissement (diminution des débits d'un cours d'eau ou d'une source au cours du temps, hors événement pluvieux perturbateur – Illustration 57) permet d'obtenir des informations sur les caractéristiques des aquifères qui participent au soutien des écoulements. L'illustration 56 montre que 5 périodes de tarissement peuvent être étudiées sur la période de disponibilité des données, au niveau de la station hydrométrique de la DIREN à Zoza.

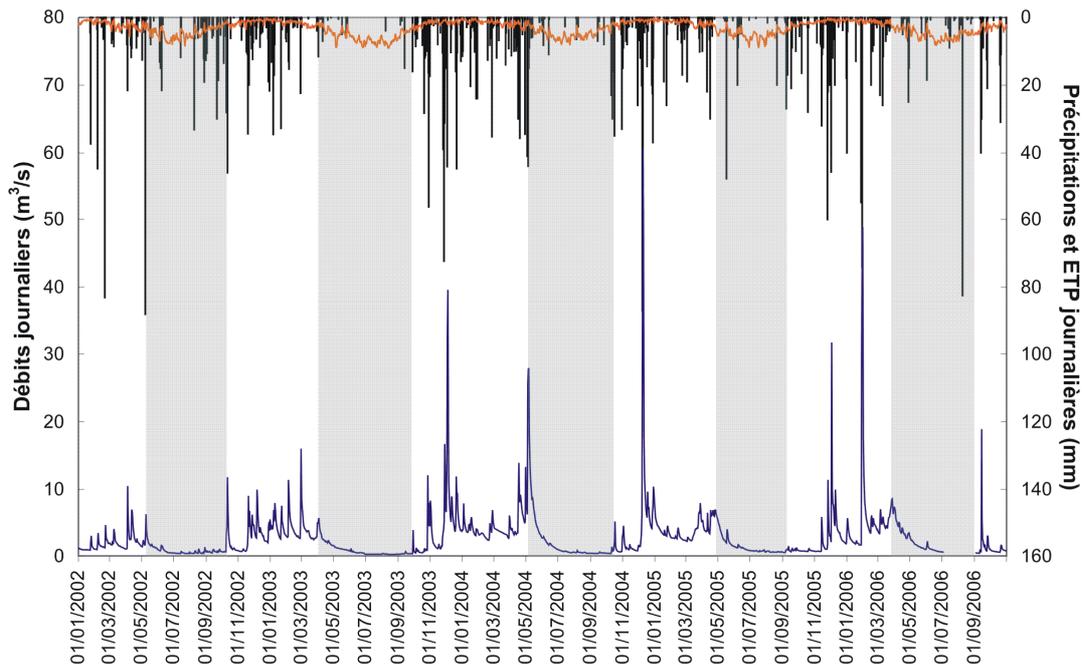


Illustration 56 - Précipitation mesurée et Evapotranspiration calculée quotidiennement à Levie et débits journaliers mesurées à la station de la DIREN du pont de Zoza sur le Rizzanese pendant la période 2002 – 2006. Les zones en grisé correspondent aux périodes pendant lesquelles le tarissement des écoulements peut être étudié.

Présentation théorique

• Les modèles conceptuels

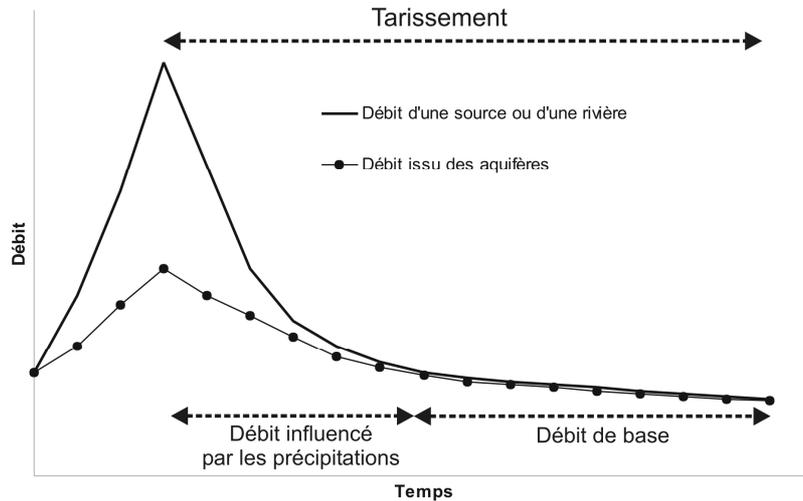


Illustration 57 - Utilisation de la notion de récession pour séparer les différentes composantes d'un hydrogramme (modifié à partir de Dewandel et al., 2003).

Un grand nombre de travaux ont été réalisés sur l'analyse des tarissements depuis plus d'un siècle, notamment sur les aquifères poreux ou considérés comme équivalents. Ces travaux ont donné lieu à différentes formulations conceptuelles de ce phénomène, qui diffèrent suivant les bases (physiques ou empiriques) sur lesquelles elles s'appuient (pour une revue des méthodes existantes, {{487 Dewandel,B. 2003 ; 489 Smakhtin,V.U. 2001/1/10 et 488 Tallaksen,L.M. 1995}}).

La formulation la plus connue est celle de Maillet (1905) qui considère que le tarissement d'une source ou d'une rivière peut être assimilé à la vidange d'un réservoir au travers d'un bouchon poreux situé à sa base. L'équation de la vidange est alors de forme exponentielle (Équation 7), où Q_t , le débit varie en fonction du temps t , du débit à l'instant $t=0$ (Q_0) et d'un coefficient de tarissement exponentiel noté α qui est fonction des paramètres physiques du modèle de bouchon poreux.

$$(Équation 7) \quad Q_t = Q_0 \times e^{-\alpha t}$$

Cette formulation sous une forme exponentielle implique que lorsque l'on se place dans un repère de coordonnées semi-logarithmique, la diminution du débit au cours du temps, hors influence des précipitations, peut être assimilée à une droite d'ordonnée à l'origine Q_0 et de pente α .

Une formulation alternative à celle de Maillet est la formulation que nous appellerons « Quadratique » et qui est en fait une solution analytique pour l'équation de diffusion,

permettant de décrire le passage d'un flux au travers d'un milieu poreux (Boussinesq 1903 et 1904). Boussinesq propose de simuler le tarissement d'un aquifère à l'aide de l'Équation 8. Cette équation s'appuie sur les hypothèses simplificatrices que l'aquifère est poreux, libre, homogène et isotrope, qu'il ne subit pas d'effet de capillarité et qu'il est limité à sa base par une couche imperméable située au niveau de l'émergence de l'écoulement.

(Équation 8)
$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$$

La formule de Maillet (Équation 7), est une solution approchée de l'équation de diffusion, qui établit une relation linéaire entre la charge hydraulique dans l'aquifère et le débit à son exutoire. La formule Quadratique présente, malgré les hypothèses simplificatrices sur lesquelles elle s'appuie, l'avantage d'être une solution exacte et de proposer une relation non-linéaire entre la charge hydraulique et le débit.

L'étude du tarissement d'un écoulement consiste donc à essayer d'approcher la forme de l'hydrogramme au cours de la période dite de « débit de base », à l'aide des courbes représentatives des formulations décrites ci-dessus. Le problème consiste pour cette opération à bien délimiter le moment où les débits ne sont plus influencés par les précipitations, ce qui n'est pas toujours aisé. Diverses méthodes permettant de le faire sont proposées en fonction des objectifs affichés (487 Dewandel, B. 2003 ; 489 Smakhtin, V.U. 2001/1/10 et 488 Tallaksen, L.M. 1995)). Une façon de résoudre cette difficulté consiste à utiliser des formulations permettant de simuler aussi la période où les débits sont influencés par les précipitations. Ainsi, la totalité du tarissement peut être étudiée en partant d'un pic de crue, ce qui permet d'approcher de manière moins incertaine la part de l'écoulement de la rivière pouvant être considérée comme du débit de base.

Parmi les différents auteurs ayant proposé des formulations permettant d'étudier cette question, nous avons choisi d'utiliser celle de Mangin (1975), initialement développée pour l'étude des karsts. Mangin considère que le débit est fonction de deux composantes, l'une représentant le tarissement de la zone saturée (relation linéaire si l'on utilise la formule de Maillet, non-linéaire si l'on utilise la formule quadratique) et l'autre représentant les écoulements au sein de la zone non-saturée à l'aide d'une relation non-linéaire. Les écoulements au sein de la zone non-saturée sont simulés à l'aide d'une formule empirique appelée « homographique » (487 Dewandel, B. 2003)), dont les principaux paramètres sont :

- le débit maximal d'infiltration, calculé comme la différence entre le débit de début de tarissement non influencé par les précipitations – le Q_0 de Maillet ou de Boussinesq et le débit du pic de l'hydrogramme précédant le tarissement,
- le temps d'infiltration,
- la concavité de la courbe de tarissement résultante des hétérogénéités des formations en termes de capacité d'infiltration.

La prise en compte de ces deux composantes peut-être considérée comme pertinente, dans la mesure où le modèle géologique de Wyns *et al.* (2004) pour les aquifères en contexte granitique, les représente comme la superposition d'une zone altérée (arènes granitiques) et d'une zone fissurée, dont les propriétés hydrodynamiques sont différentes (Caballero et Wyns, (2004)). Ainsi, bien que Mangin ait utilisé cette formulation pour décrire le tarissement de sources karstiques, les fonctions homographiques peuvent être utilement adaptées au contexte granitique pour décrire la part du tarissement liée aux processus d'infiltration dans la zone non saturée, comme nous le verrons plus loin.

• Le volume dynamique

L'intégration des formules décrivant le tarissement en régime de débit de base (Maillet et Boussinesq Quadratique) entre $t = 0$ (début du tarissement) et $t = \infty$ (fin du tarissement), permet de déterminer le volume d'eau pouvant être drainé de l'aquifère par écoulement gravitaire. Ce « volume dynamique - V_d », exprimé en m^3 , peut être calculé grâce à l'Équation 9 :

$$(Équation 9) \quad V_d = \frac{Q_0}{\alpha} \times 86400$$

Appliquée à l'étude de l'évolution des débits sur un cours d'eau, cette opération permet donc de déterminer la ressource disponible pour le soutien des écoulements dans la zone saturée des aquifères présents sur le bassin versant. Elle n'est cependant qu'une vision *ad minima* de la ressource disponible au sein des aquifères concernés, puisque ceux-ci peuvent très bien contenir de l'eau située sous le niveau de leur exutoire de vidange et par conséquent ne pouvant être captée que par pompage.

Ajustements sur la période 2003-2006 à la station de Zoza DIREN

4 des 5 périodes de tarissement disponibles ont été retenues pour être étudiées (les importantes précipitations observées durant l'été 2002, perturbent de manière excessive le tarissement - Illustration 56).

Les courbes de tarissement des 4 périodes étudiées ont été projetées dans un diagramme semi-log, avec le temps en abscisses et les débits en ordonnée et en coordonnées logarithmiques. L'illustration 58 présente par exemple le tarissement de l'année 2005 où l'on voit qu'en dehors des périodes de précipitations, la pente de décroissance du débit varie entre le début et la fin de la période d'observation. Ce graphique permet d'observer par ailleurs que toutes les variations de débit dans le cours d'eau ne sont pas systématiquement reliées à des précipitations, ce qui implique que la station de Lévie n'est pas totalement représentative des précipitations qui surviennent sur le bassin étudié. Au vu de la position latérale de la station par rapport à l'orientation du bassin versant et de son altitude (652 m) plutôt basse par rapport à l'altitude moyenne sur le bassin versant étudié (1069 m), il est probable que certains événements ne soient pas observés et que l'ensemble des précipitations soient sous-estimées.

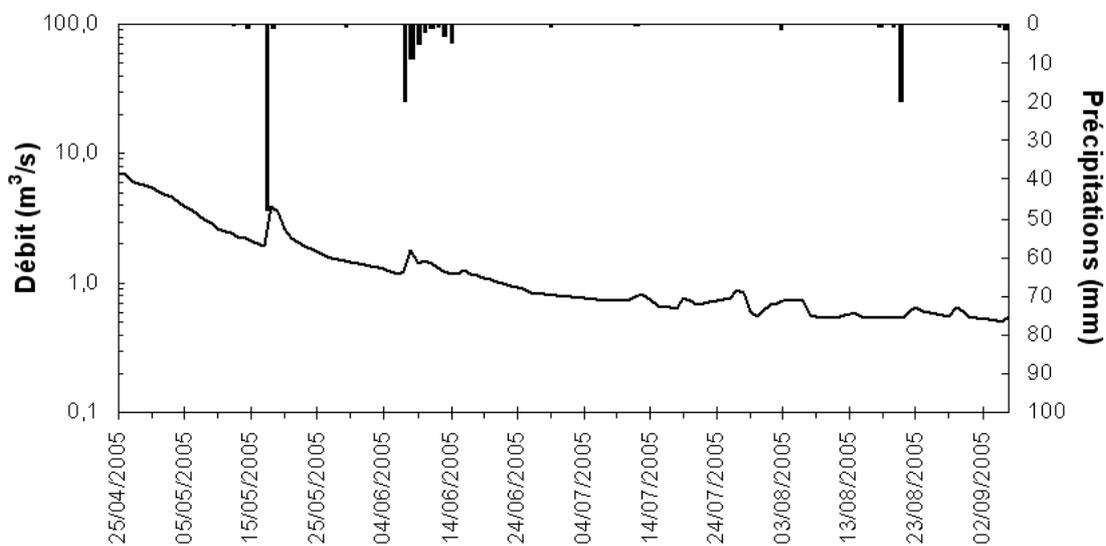


Illustration 58 - Tassement des débits mesurés à la station du pont de Zoza l'année 2005, présenté sur un diagramme semi-log, en regard des précipitations mesurées à la station de Levie.

L'analyse du tassement a été faite pour chaque période, par ajustement graphique aux courbes de débits observés, des courbes de débits simulés à l'aide des formulations de Mangin pour la période sous influence des précipitations et de Maillet et Boussinesq quadratique pour la période de débit de base. Cet ajustement s'est fait en faisant varier manuellement les paramètres des équations présentées plus haut, pour que les courbes de débits simulés à l'aide des formulations conceptuelles (Mangin + Maillet) d'une part et (Mangin + Boussinesq) d'autre part soient les plus proches possibles des courbes observées.

• Tassement de 2003

L'année 2003 est une année favorable pour l'analyse des tassements dans la mesure où le fort déficit pluviométrique subi s'est traduit par un hydrogramme relativement peu perturbé par les précipitations durant l'étiage. L'illustration 59 présente le résultat de l'ajustement des débits simulés aux débits observés pour cette année, à l'aide des formulations de Mangin et Maillet. La qualité de l'ajustement calculé à l'aide du critère de Nash (noté E, calculé comme la somme de l'écart quadratique – carré de l'écart entre débit simulé et débit observé - ramené à la somme de l'écart quadratique à la valeur moyenne du débit observé et dont la valeur peut varier entre 0 et 1, cette dernière signifiant un ajustement optimal, {{289 Nash,J.E. 1970}}), est satisfaisante (E = 0,98).

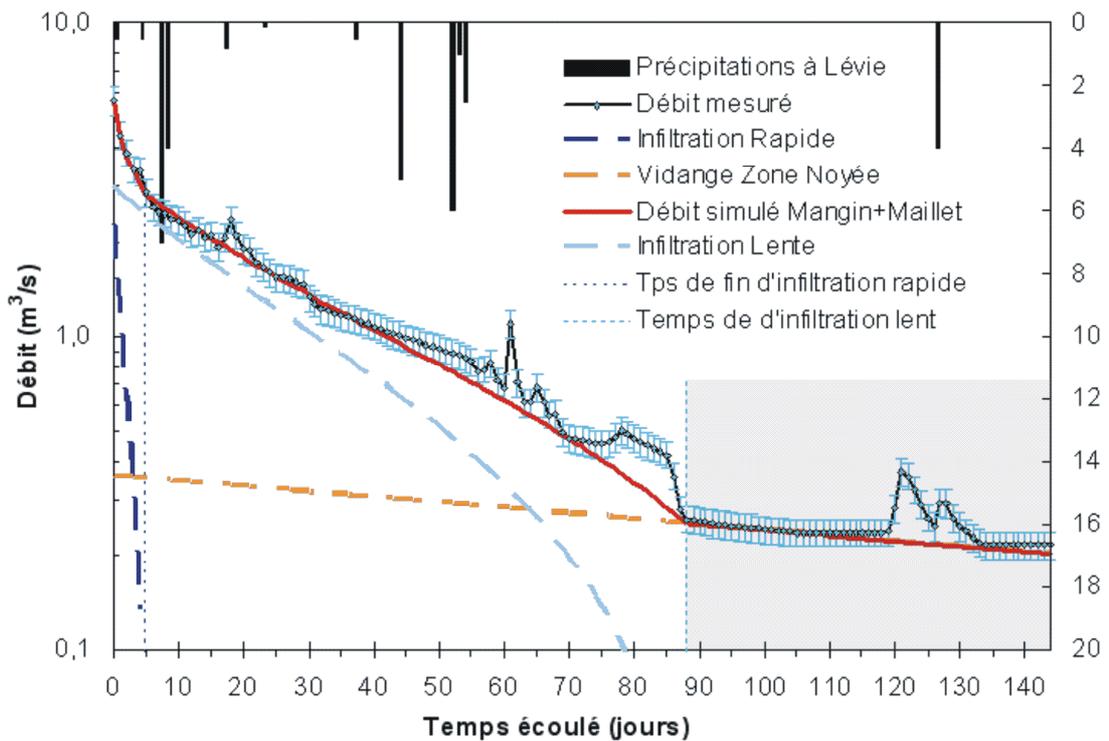


Illustration 59 - Ajustement du tarissement de 2003 à l'aide de la formulation de Mangin et de Maillet. Une erreur de mesure de 10% est attribuée à la chronique des débits mesurés pour juger de la qualité de l'ajustement. La période correspondant au débit de base est marquée par le fond grisé.

Deux dynamiques d'infiltration différentes sont considérées pour simuler le tarissement précédant le débit de base. Une dynamique rapide qui dure 5 jours et une lente qui dure 88 jours. Le passage à un régime où le débit de la rivière serait uniquement lié aux apports en provenance des aquifères (débit de base) se traduit sur le graphique par une rupture de pente assez nette. C'est sur cette période de débit de base que la formulation choisie pour le simuler est ajustée (sur le graphique de l'illustration 59, il s'agit de la formule de Maillet).

De manière générale, la qualité de l'ajustement des formules de Maillet et de Boussinesq quadratique sont très proches pour chacune des années étudiées ici. L'illustration 60 permet de le visualiser pour le tarissement de l'année 2003. La différence majeure entre les deux ajustements réside dans le fait que, dans le repère semi-logarithmique, la formule quadratique se traduit par une courbe alors que celle de Maillet se traduit par une droite. Cette illustration montre cependant qu'à l'échelle des 50 jours de tarissement considérés, la différence entre les deux ajustements est très faible.

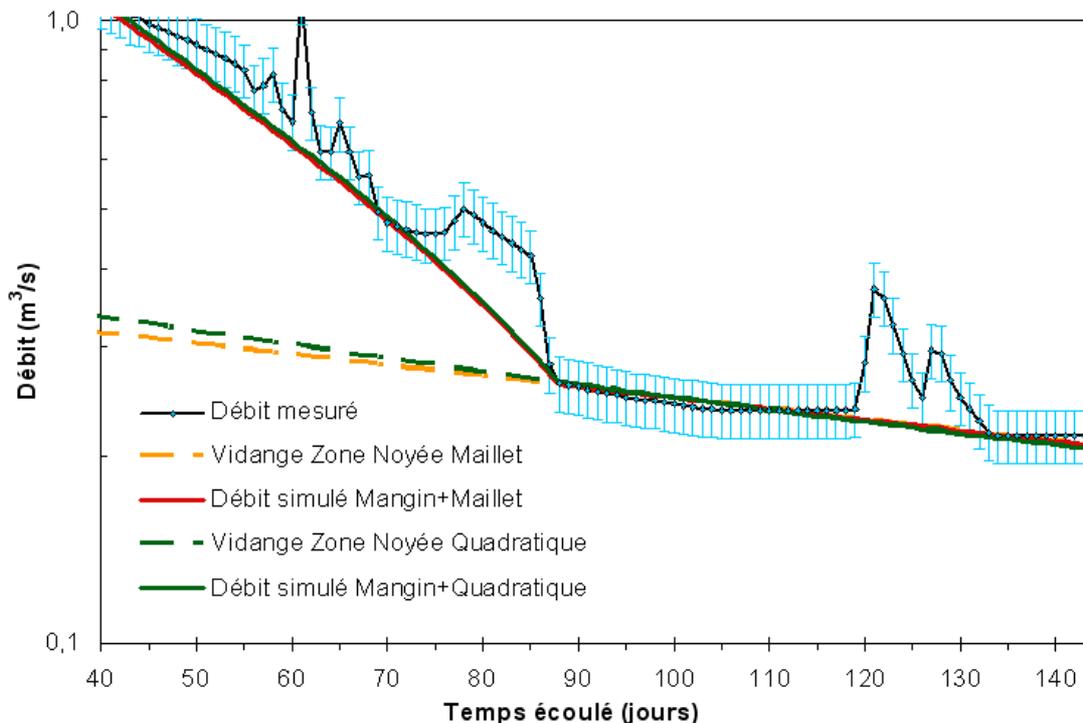


Illustration 60 - Comparaison entre les ajustements des formules de Maillet et Quadratique sur la période du débit de base de 2003.

Ceci n'est par contre pas le cas en ce qui concerne les valeurs des variables qui ont permis d'obtenir ces ajustements. L'illustration 61 présente les valeurs obtenues pour les variables intervenant dans chacune des deux formulations et les volumes dynamiques calculés respectifs.

Dynamique d'infiltration	Rapide	Lente
Durée (jours)	5	88
Formulations de	Maillet	Boussinesq Quadratique
Coefficient de tarissement	0,004	0,003
Q_0 (m ³ /s)	0,37	0,42
V_d (10 ⁶ m ³)	8	12,1
V_d (mm)	61	93
V_d (% des PE)	33	49
V_d (% lame d'eau annuelle moy.)	7	10

Illustration 61 - Valeurs des paramètres et des volumes dynamiques obtenus à l'issue de l'ajustement du tarissement de 2003 avec les deux formulations utilisées.

Les volumes dynamiques obtenus par la formulation de Boussinesq sont supérieurs à ceux obtenus suivant la formulation de Maillet, ce qui est logique au vu de la forme de leurs courbes de vidange respectives (Illustration 60). Ces volumes sont variables d'une année sur l'autre du fait de la variabilité de la recharge par les précipitations.

Le calcul de ces volumes en mm d'eau sur la totalité de la surface du bassin (130 km²) permet de les comparer aux apports de la part des précipitations qui sont disponibles pour l'infiltration et le ruissellement (précipitations efficaces - PE), au cours de la période de recharge de l'aquifère (Illustration 61). Nous considérons ici que cette période est comprise entre les mois de décembre et d'avril. Les PE peuvent être calculées au pas de temps journalier en retirant aux précipitations, l'évapotranspiration réelle (ETR). Cette dernière est la valeur limite de l'évapotranspiration de l'eau du sol (liée au pouvoir évaporant de l'atmosphère et à la transpiration des plantes). Elle dépend de l'évapotranspiration potentielle (ETP – uniquement fonction du pouvoir évaporant de l'atmosphère) et du volume d'eau stocké dans le sol, la Réserve Facilement Utilisable – RFU (Castany, G. 1982).

A partir de l'ETP estimée par Météo France sur la zone d'étude et si l'on prend comme hypothèse que le sol à une RFU de 50 mm (valeur moyenne de la capacité de stockage du sol obtenue avec TEMPO (cf. § 4.2.3), on obtient 188 mm de PE entre décembre 2002 à avril 2003 inclus. Le volume dynamique estimé pour l'année 2003 représente donc entre 33% et 49% des PE estimées durant la période de recharge (Illustration 61). Ce volume peut aussi être comparé au volume annuel moyen d'eau s'écoulant sur le bassin (Illustration 61). Il représente ainsi entre 7% et 10% de la lame d'eau moyenne annuelle passant à la station du pont de Zoza (906 mm, moyenne calculée sur 41 ans).

• Tarissements de 2004, 2005 et 2006

L'illustration 62 présente le résultat de l'ajustement des débits simulés aux débits observés pour les années 2004, 2005 et 2006, à l'aide des formulations de Mangin et Maillet. Étant donnée la faible différence d'ajustement graphique entre les formulations de Maillet et Boussinesq quadratique, seul l'ajustement à l'aide de Maillet est présenté. Comme pour 2003, deux dynamiques d'infiltration sont nécessaires pour simuler le tarissement sous influence des précipitations. Les durées pendant lesquelles ces dynamiques interviennent sont présentées sur l'illustration 63. Si ces durées peuvent varier de ± 10 jours d'une année sur l'autre, elles conservent des ordres de grandeur similaires. Elles sont de plus très proches des valeurs de temps de transit moyen obtenues lors de la simulation réalisée avec Tempo (70 à 80 jours, cf. § 4.2.3). Par contre, quelque soient les années et le type de formulation utilisé, les coefficients de tarissements obtenus sont très similaires, ce qui confirme que la dynamique de fin des hydrogrammes correspond bien à celle d'un débit de base.

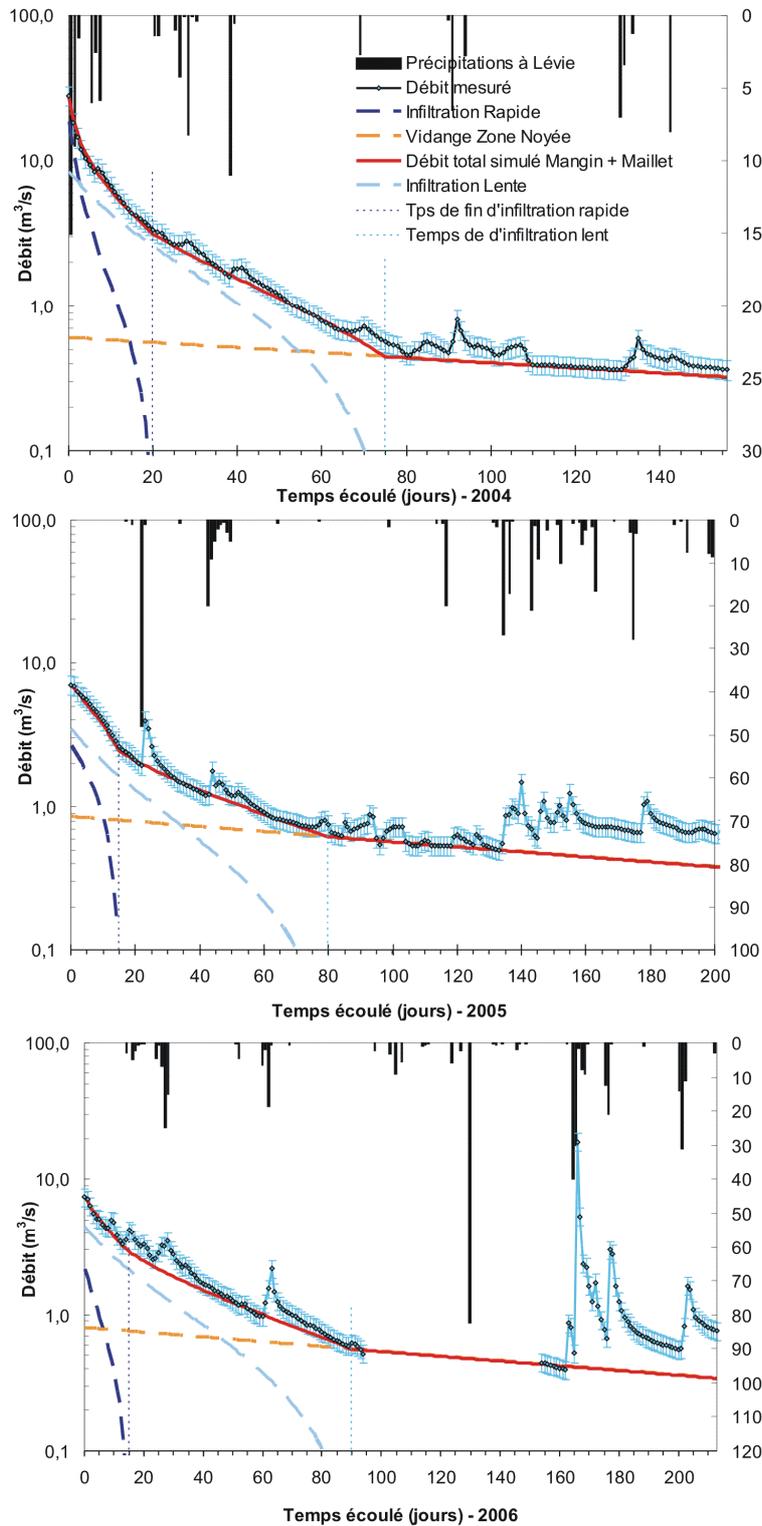


Illustration 62 - Ajustement des tarissements de 2004, 2005 et 2006 à l'aide des formulations de Mangin et de Maillet.

Le volume dynamique calculé, variable d'une année sur l'autre du fait de la variabilité de la recharge, représente une part des PE (calculées entre décembre et avril) relativement constante d'une année sur l'autre. Cette part est en moyenne de l'ordre de 32% ($\pm 5\%$), lorsque le tarissement est simulé d'après Maillet et de 50% ($\pm 5\%$), lorsqu'il est simulé d'après Boussinesq Quadratique. Quelque soit la formulation utilisée, il convient de garder à l'esprit que cette part est très probablement surestimée, du fait de la position peu représentative de la station de mesure des précipitations concernée (Illustration 44).

2004		
Dynamique d'infiltration	Rapide	Lente
Durée (jours)	20	75
Formulations de	Maillet	Boussinesq Quadratique
Coefficient de tarissement	0,004	0,003
Q₀ (m³/s)	0,6	0,7
V_d (10⁶ m³)	13	20,1
V_d (mm)	100	155
V_d (% des PE)	27	42
V_d (% lame d'eau annuelle moy.)	11	17
2005		
Dynamique d'infiltration	Rapide	Lente
Durée (jours)	15	80
Formulations de	Maillet	Boussinesq Quadratique
Coefficient de tarissement	0,004	0,003
Q₀ (m³/s)	0,850	0,950
V_d (10⁶ m³)	18,4	27,4
V_d (mm)	141	210
V_d (% des PE)	36	54
V_d (% lame d'eau annuelle moy.)	16	23
2006		
Dynamique d'infiltration	Rapide	Lente
Durée (jours)	15	90
Formulations de	Maillet	Boussinesq Quadratique
Coefficient de tarissement	0,004	0,003
Q₀ (m³/s)	0,8	0,95
V_d (10⁶ m³)	17,3	27,4
V_d (mm)	133	210
V_d (% des PE)	35	55
V_d (% lame d'eau annuelle moy.)	14	23

Illustration 63 - Caractéristiques des ajustements pour les années 2004, 2005 et 2006.

De même, le volume dynamique estimé pour ces quatre années, représente entre 12% ($\pm 5\%$) et 18% ($\pm 5\%$) de la lame d'eau écoulée annuelle moyenne sur le bassin versant (926 mm – source banque hydro calculée entre 1966 et 2003).

• Calcul de la recharge en 2003, 2004, 2005 et 2006 à l'aide de la formulation de Maillet

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la variation interannuelle du volume dynamique d'eau souterraine est fortement liée à la variation de la recharge hivernale. L'estimation de la recharge permet de connaître la part des précipitations efficaces d'une année donnée qui alimente les aquifères contenus dans le bassin versant.

Les Illustration 59 et Illustration 62 montrent que les tarissements analysés démarrent en avril/mai et se poursuivent jusqu'en septembre/octobre suivant les années. Si l'on prend pour hypothèse que le tarissement dure 6 mois (180 jours) chaque année, la formulation de Maillet permet d'estimer la recharge qui intervient entre la fin du tarissement de l'année n et le début du tarissement de l'année n+1.

En effet,

- si $V_d(n)$ est le volume dynamique restant au bout de 6 mois de tarissement l'année n (calculé à l'aide de l'Équation 9, en remplaçant Q_0 par le débit Q au bout de 6 mois, ce dernier étant obtenu à l'aide de l'Équation 7 pour $t = 180$ jours) ;
- $V_d(n+1)$ est le volume dynamique estimé au début du tarissement de l'année n+1 ;
- Alors, le volume d'eau souterraine directement imputable à la recharge pendant l'hiver séparant les deux années est égal à $V_d(n+1) - V_d(n)$ (Domenico and Schwartz, 1998).

Les recharges hivernales ont ainsi été estimées pour chaque année de la période sur laquelle les tarissements ont été étudiés, sauf 2002 puisque la situation de l'année précédente n'est pas connue (Illustration 64). Pour les comparer aux pluies efficaces, il est considéré que celles-ci interviennent entre décembre de l'année du tarissement considéré et avril de l'année suivante (5 mois).

	2003	2004	2005	2006
PE en mm (déc-avril ; RFU = 50 mm)	188	371	391	380
recharge en 10^6 m^3	3,8	8,8	14,2	13,1
recharge en mm	29	67	109	101
recharge en % de la PE	15	18	28	26
recharge en % du V_d de l'année	47	68	77	76

Illustration 64 - recharge en eau souterraine estimée pour les années 2003 à 2006.

L'année 2003 présente des valeurs de l'ordre de la moitié de celles des années suivantes, qui sont en relation avec le caractère déficitaire de la pluviométrie évoquée au paragraphe 4.1. Ce caractère déficitaire ne se traduit en revanche pas par des précipitations efficaces faibles en 2005, du fait notamment des précipitations très fortement excédentaires enregistrées en décembre 2004 (317 mm alors que la valeur moyenne se situe autour de 132 mm). Ces résultats montrent que, dans le cadre des hypothèses de calcul exposées, 15% à 25% des précipitations efficaces hivernales alimenteraient les eaux souterraines sur ce bassin chaque année, le reste partant en écoulement de surface. De même, la recharge représenterait une part significative (supérieure à 50%) du volume dynamique d'eau souterraine disponible pour les écoulements de l'année (ce qui est logique au vu de la part des PE que représente le V_d (Illustration 63)).

Nous pouvons pour finir comparer le volume écoulé pendant les 6 mois de tarissement aux volumes dynamiques calculés pour chaque année. Ce calcul se fait en intégrant les (Équation 7 et (Équation 8 entre le temps $t=0$ de début du tarissement et le temps $t = 180$ jours. De ce fait, la part que ce volume représente par rapport au volume dynamique total ne dépend que du temps d'intégration considéré (ici 180 jours) pour chaque formulation. Ainsi, le volume qui s'écoule théoriquement pendant six mois d'étiage représente 51% du volume dynamique total estimé à l'aide de Maillet. Ces volumes sont donc comparables aux volumes d'eau infiltrée participant à la recharge du volume dynamique des aquifères en année déficitaire.

Ceci permet d'estimer très grossièrement que, pour ce bassin versant, la quantité d'eau souterraine dynamique que l'on peut potentiellement exploiter par pompage (sous réserve de localiser les aquifères), sans altérer l'écoulement des rivières en étiage, pourrait représenter des volumes d'eau de l'ordre de 2 à 3 millions de m^3 par an (30% du V_d en année déficitaire. Ces volumes sont de plus estimés *ad minima* dans la mesure où, l'étude des tarissements ne s'intéresse qu'à la part de la ressource en eau souterraine qui participe aux écoulements dans les rivières du bassin.

Ajustements sur la période 2003-2005 aux stations EDF

Les récessions des hydrogrammes des bassins versants du Codi et de Criviscia/Saint-Antoine ont été traitées avec les mêmes méthodes que celles présentées dans ce qui précède. Nous détaillons les résultats dans ce qui suit, pour la formulation de Maillet (Illustration 65).

Le caractère moins « productif » (en termes d'eau souterraine) du bassin versant de Criviscia/Saint-Antoine est à nouveau visible sur les résultats présentés puisque :

- son coefficient de tarissement (pente de la droite de tarissement) est plus grand que celui de Codi (donc la décroissance des débits d'étiage est plus rapide),
- son V_d est plus faible que celui de Codi,
- sa recharge représente une part plus faible des précipitations efficaces (PE) et
- sa recharge représente une part plus importante du V_d .

Bassin versant du Codi	2003	2004	2005
Coefficient de tarissement	0,005	0,005	0,005
Q₀ (m³/s)	0,13	0,24	0,21
V_d (10⁶ m³)	2,25	4,15	3,63
V_d (mm)	62	115	101
V_d (% des PE)	33	31	26
recharge en 10⁶ m³	1,05	3,23	1,94
recharge en mm	29	90	54
recharge en % de la PE	16	24	14
recharge en % du V_d de l'année	47	78	54
Bassin versant du Criviscia/St-Antoine	2003	2004	2005
Coefficient de tarissement	0,007	0,007	
Q₀ (m³/s)	0,22	0,38	
V_d (10⁶ m³)	2,72	4,69	
V_d (mm)	38	66	
V_d (% des PE)	20	18	
recharge en 10⁶ m³	1,88	3,92	
recharge en mm	26	55	
recharge en % de la PE	14	15	
recharge en % du V_d de l'année	69	84	

Illustration 65 - Valeurs obtenues à l'issue de l'ajustement des tarissements du Codi et de Criviscia/Saint-Antoine pour les années 2003 à 2005 (les valeurs de PE sont données sur l'illustration 64).

4.3. SYNTHÈSE

Les eaux souterraines jouent un rôle prépondérant de soutien des écoulements des rivières pendant l'étiage. Ce soutien se manifeste de manière variable au sein du bassin étudié puisque l'on observe un soutien plus important au sein du bassin du Codi qu'à sein de celui du Criviscia/Saint-Antoine. Bien que ce résultat soit à vérifier dans le détail, il semble que des conditions de recharge optimale des eaux souterraines se mettent en place sur l'ensemble du bassin versant, en périodes de gros débits (c'est-à-dire pour des conditions proches de la saturation des sols).

L'effet des précipitations sur les écoulements des rivières perdure pendant des durées de l'ordre de 60 à 80 jours. Une capacité de stockage d'eau dans le sol de l'ordre de 50 millimètres est estimée pour l'ensemble du bassin étudié, cette grandeur étant plus faible sur le bassin de Criviscia/Saint-Antoine que sur celui du Codi. Ce dernier présente des écoulements spécifiques plus importants que le Criviscia/Saint-Antoine, ce qui indique que son potentiel est plus important en termes d'eau souterraine. Ce résultat est confirmé par les valeurs des coefficients de tarissement obtenus d'après la formulation de Maillet en analysant les récessions des hydrogrammes, plus faibles

pour le Codi (0.004) que pour le Criviscia/Saint-Antoine (0.007) (ce qui implique que la décroissance des débits des rivières en étiage est plus rapide pour le Criviscia/Saint-Antoine que pour le Codi).

Le volume dynamique (V_d) de l'eau souterraine varie d'une année sur l'autre en fonction de l'intensité avec laquelle il est vidangé puis rechargé. Il représenterait entre 35% et 50% des précipitations efficaces sur le bassin versant étudié. Pour les années 2003 à 2006, la valeur estimée varie entre 8 et 18 Mm³. Ce volume représente de l'ordre de 20% des écoulements annuels sur le bassin versant étudié.

Le bassin versant de Criviscia/Saint-Antoine présente un V_d plus faible que celui du bassin versant du Codi au regard de sa superficie. Les V_d obtenus pour 2003 et 2004 sont compris entre 2 et 4 Mm³ pour le Codi et entre 3 et 5 Mm³ pour le Criviscia/Saint-Antoine.

La recharge calculée pour le bassin versant contrôlé par la station de Zoza représente plus de 50% du V_d estimé pour le bassin versant. La recharge estimée sur le bassin de Criviscia/Saint-Antoine est plus faible que celle estimée sur le Codi et la part du V_d que représente la recharge y est plus forte.

Pour finir, on peut raisonnablement estimer que le potentiel d'eau souterraine qu'il est possible d'exploiter sur ce bassin versant (sous réserve de localiser les aquifères) sans altérer de manière trop intense l'écoulement des rivières représente 2 à 3 Mm³/an.

5. Comparaison des volumes estimés par les méthodes géologiques et hydrologiques

Deux méthodes ont été utilisées dans ce travail pour tenter de déterminer les volumes d'eau souterraine susceptibles de participer au soutien des écoulements des rivières pérennes en étiage.

La méthode de caractérisation géologique (section 3) a permis d'obtenir des volumes d'eau compris entre 3 et 11 Mm³ pour le bassin versant du Codi et entre 7 et 25 Mm³ pour celui du Criviscia. Ces volumes représentent un écoulement moyen sur l'année de l'ordre de 6 l/s/km² sur les deux bassins.

La méthode de caractérisation hydraulique (section 4) a permis d'obtenir des volumes d'eau dynamique compris entre 2 et 4 Mm³ pour le Codi et entre 3 et 5 Mm³ pour le Criviscia/Saint-Antoine pour les années 2003 et 2004.

Les deux méthodes conduisent donc à des ordres de grandeur similaires et mettent en avant les mêmes différences entre les deux bassins versants en termes de capacité à contenir de l'eau souterraine. Ce constat permet de valider, au moins sur le plan qualitatif, l'approche de cartographie et les hypothèses de calcul adoptées pour la détermination des épaisseurs des différents horizons d'altération et de leurs porosités efficaces respectives.

Cependant, la notion de volume dynamique repose sur le principe que le mouvement des masses d'eau situées au-dessus de l'exutoire d'un aquifère entraîne par inertie une partie des eaux situées sous l'exutoire (Crochet et Marsaud 1997). Cette notion est quelque peu différente de celle du volume calculé par la méthode géologique, puisque ce dernier ne considère que la part d'eau souterraine qui se situe au dessus de la courbe enveloppe passant par les rivières pérennes, c'est-à-dire à une altitude supérieure à celle des exutoires.

Il est donc probable que les volumes obtenus par la méthode géologique soient un peu surestimés, et par conséquent, que les valeurs d'épaisseur et de porosité adoptés pour les horizons d'altération et plus particulièrement pour les deux niveaux de l'horizon fissuré, le soient aussi. Un travail supplémentaire de caractérisation de ces paramètres, faisant appel à des méthodes géophysiques plus adaptées aux contraintes de la zone d'étude et/ou à la réalisation de sondages visant à décrire les horizons d'altération permettrait de pallier à ce problème et d'affiner le calcul.

6. Conclusion

Un travail de caractérisation de la réserve en eau souterraine susceptible de participer au soutien des écoulements des rivières en période d'étiage a été réalisé sur le haut-bassin versant du Rizzanese, en amont de la commune de Zoza en Corse du Sud.

Ce travail a été conduit en parallèle par une méthode basée sur la caractérisation géologique des formations d'altération des granites et une méthode hydraulique basée sur l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau drainant deux sous-bassins parallèles contenus dans la zone d'étude : celui du Codi à l'ouest et celui de Criviscia/St Antoine à l'est.

La méthode géologique a consisté à cartographier l'extension des arènes granitiques sur la zone d'étude, puis à en déduire l'extension de l'horizon d'altération sous-jacent (appelé horizon fissuré) de manière à déterminer les volumes susceptibles de contenir de l'eau souterraine au sein des granites dans la zone d'étude.

Des sondages par la méthode de Résonance Protonique Magnétique ont ensuite été réalisés dont les résultats, de qualité moyenne, ont tout de même permis de caractériser le sous-sol et notamment de construire une carte piézométrique générale sur la zone d'étude.

Les volumes d'eau participant au soutien des écoulements ont ainsi pu être calculés sur les bassins versants du Codi et du Criviscia en croisant :

- 1) les volumes obtenus par différence entre la carte piézométrique et la courbe enveloppe passant par les rivières pérennes et
- 2) les épaisseurs et la porosité efficace des horizons d'altération du granite cartographiés sur la zone d'étude.

Cette méthode a ainsi permis d'obtenir des volumes d'eau compris entre 3 et 11 Mm³ pour le bassin versant du Codi et entre 7 et 25 Mm³ pour celui du Criviscia. Ces volumes représentent un écoulement moyen sur l'année de l'ordre de 6 l/s/km² sur les deux bassins.

La méthode hydraulique a consisté à un travail de description des processus hydrologiques au sein de la zone d'étude, faisant appel à un travail d'analyse des débits classés, de modélisation des écoulements et à une analyse du tarissement des hydrogrammes des cours d'eau drainant la zone d'étude.

Ainsi, il a été démontré que l'effet des précipitations sur les écoulements des rivières perdure pendant des durées de l'ordre de 60 à 80 jours sur la zone d'étude. Une capacité de stockage d'eau dans le sol de l'ordre de 50 millimètres a été estimée pour l'ensemble du bassin étudié, cette grandeur étant plus faible sur le bassin de Criviscia/Saint-Antoine que sur celui du Codi.

L'écoulement spécifique observé sur le bassin versant du Codi est plus important que celui observé sur celui du Criviscia/Saint-Antoine, ce qui indique que son potentiel est plus important en termes d'eau souterraine. Les ordres de grandeur observés sont similaires à ceux obtenus par la méthode géologique.

Le volume dynamique (V_d) calculé au sein de chaque sous-bassin varie d'une année sur l'autre en fonction de l'intensité avec laquelle il est vidangé puis rechargé. Il représenterait cependant entre 35% et 50% des précipitations efficaces sur le bassin versant en amont de Zoza. Pour les années 2003 à 2006, la valeur estimée varie entre 8 et 18 Mm³ et représente de l'ordre de 20% des écoulements annuels sur ce bassin.

Le sous-bassin versant de Criviscia/Saint-Antoine présente un V_d plus faible que celui du bassin versant du Codi au regard de sa superficie. Les V_d obtenus pour 2003 et 2004 sont compris entre 2 et 4 Mm³ pour le Codi et entre 3 et 5 Mm³ pour le Criviscia/Saint-Antoine. Ces valeurs, légèrement plus faibles que les valeurs obtenues par la méthode géologique, permettent de valider les calculs réalisés dans le cadre de cette dernière et en particulier les cartes d'extension des horizons d'altération.

La recharge calculée pour le bassin versant contrôlé par la station de Zoza représente plus de 50% du V_d estimé pour le bassin versant. La recharge estimée sur le bassin de Criviscia/Saint-Antoine est plus faible que celle estimée sur le Codi et la part du V_d que représente la recharge y est plus forte.

Pour finir, on peut raisonnablement estimer que le potentiel d'eau souterraine qu'il est possible d'exploiter sur ce bassin versant (sous réserve de localiser les aquifères) sans altérer de manière trop intense l'écoulement des rivières représente 2 à 3 Mm³/an.

Si la localisation des aquifères les plus productifs représente toujours la principale difficulté pour pouvoir exploiter cette ressource en eau souterraine en contexte granitique, les résultats présentés dans ce travail montrent qu'il est possible de quantifier cette ressource à l'échelle d'un bassin versant tout en déterminant les secteurs les plus favorables à sa présence.

7. Bibliographie

Boussinesq, J., (1903), Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond. C. R. Acad. Sci. 137, pp. 5-11.

Boussinesq, J., (1904), Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. J. Math. Pure Appl. 10 (1904), pp. 5–78.

Caballero Y., Wyns R. (2004) - Synthèse de la campagne de reconnaissance géologique dans le Sartenais – Alta Rocca. BRGM/RP-53570-FR. 20 p., 4 fig.

Caballero Y., Griolet C., Bodéré G. (2005) – Campagne de mesures piézométriques sur les bassins versants du Baracci-Rizzanese-Ortolo. Rapport BRGM/RP-54295-FR, 34 p., 1 ill.

Chang D., Vinegar H., Morriss C., et al. (1997) - Effective porosity, producible fluid and permeability from NMR logging. The Log Analyst. March-April, p. 60-72.

Crochet, P., Marsaud, B., (1997) - Approches conceptuelles de l'aquifère karstique ; problèmes méthodologiques et d'exploitation. Hydrogéologie, n°3, pp. 3–18.

Domenico, P. A. and Schwartz, F.W. (1998) – Physical and Chemical hydrogeology. Wiley and sons. (2nd ed.), 506 p.

Farrar T.C., Becker E.D. (1971) - Pulse and Fourier transform NMR: Academic Press, New York.

Kenyon W.E. (1997) - Petrophysical principles of applications of NMR logging. The Log Analyst, March-April : p.21-43.

Legchenko A., Beauce A., Guillen A., et al. (1997) - Natural variations in the magnetic resonance signal used in PMR groundwater prospecting from the surface. European Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2 : p. 173-190.

Legchenko, A.V., Baltassat, J.M., Beauce, A., et al. (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.

Maillet, E., (1905), Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Sci., A. Hermann, Paris (1905), p. 218.

Mangin, A., (1975), Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Institut des sciences de la Terre de l'Université de Dijon, Moulis, Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles.

Wyns R., Baltassat J-M., Lachassagne P., et al. (2004). "Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France)", Bull. Soc. Géol. Fr. 175 (1), pp. 21-34.

Pointet T., (1975) .- Essai de caractérisation du coefficient de tarissement des nappes.- Thèse ing.-doct. Nancy

Annexe 1

Résultats des sondages RMP sur le bassin versant du Rizzanese

Site: Hippodrome RMP Corse

Loop: 4 - 37.5 Date: 23.11.2006 Time: 17:35

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR1.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 0.94; EN/IN = 3.61

fitting error: FID1 = 18.20%; FID2 = 51.97 %

param. of regular.: E, T2* = 152.6; T1* = 0.238

permeability constant Cp = 7.00e-09

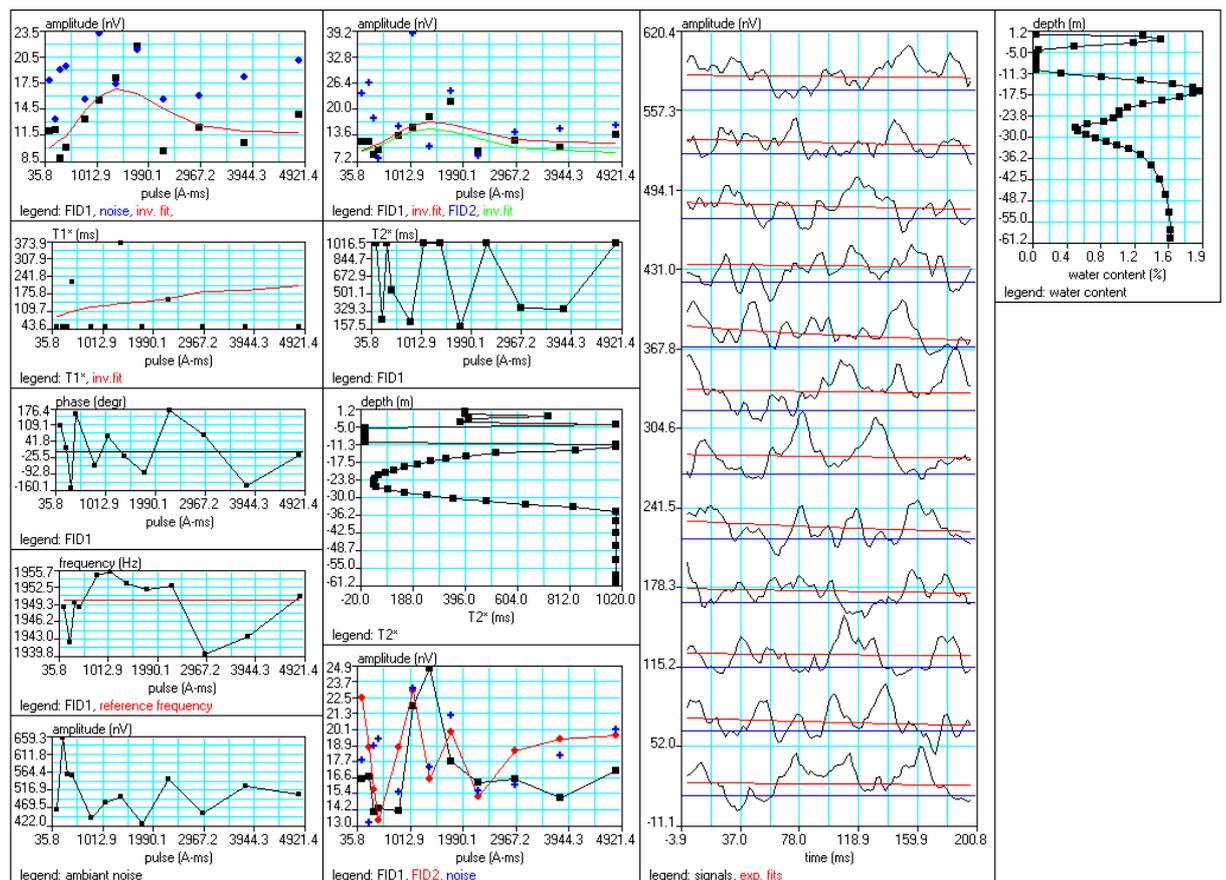


Illustration 1a - Sondage 1, hippodrome de Zonza

Site: Hyppodrome Viseo 75m

Loop: 2 - 75.0 Date: 24.11.2006 Time: 13:47

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR2A.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\MS75_57_1_0_0.mrm

loop: square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.02; EN/IN = 16.27

fitting error: FID1 = 40.12%; FID2 = 65.16 %

param. of regular.: E,T2* = 274.2; T1* = 0.238

permeability constant Cp = 7.00e-09

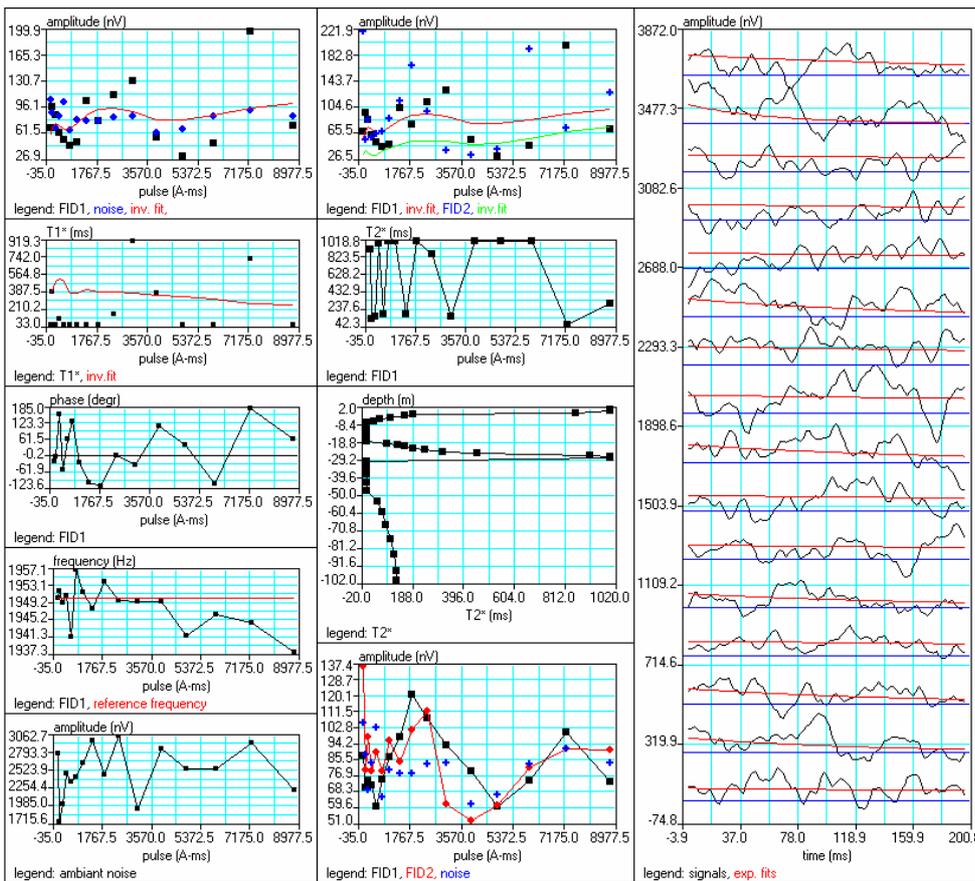


Illustration 1b - Sondage 2, hippodrome de Zonza

Site: RMP CORSE Prunetu

Loop: 4 - 37.5 Date: 25.11.2006 Time: 12:31

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR3A.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.04; EN/IN = 2.13

fitting error: FID1 = 26.75%; FID2 = 32.74 %

param. of regular.: E, T2* = 244.1; T1* = 10.490

permeability constant Cp = 7.00e-09

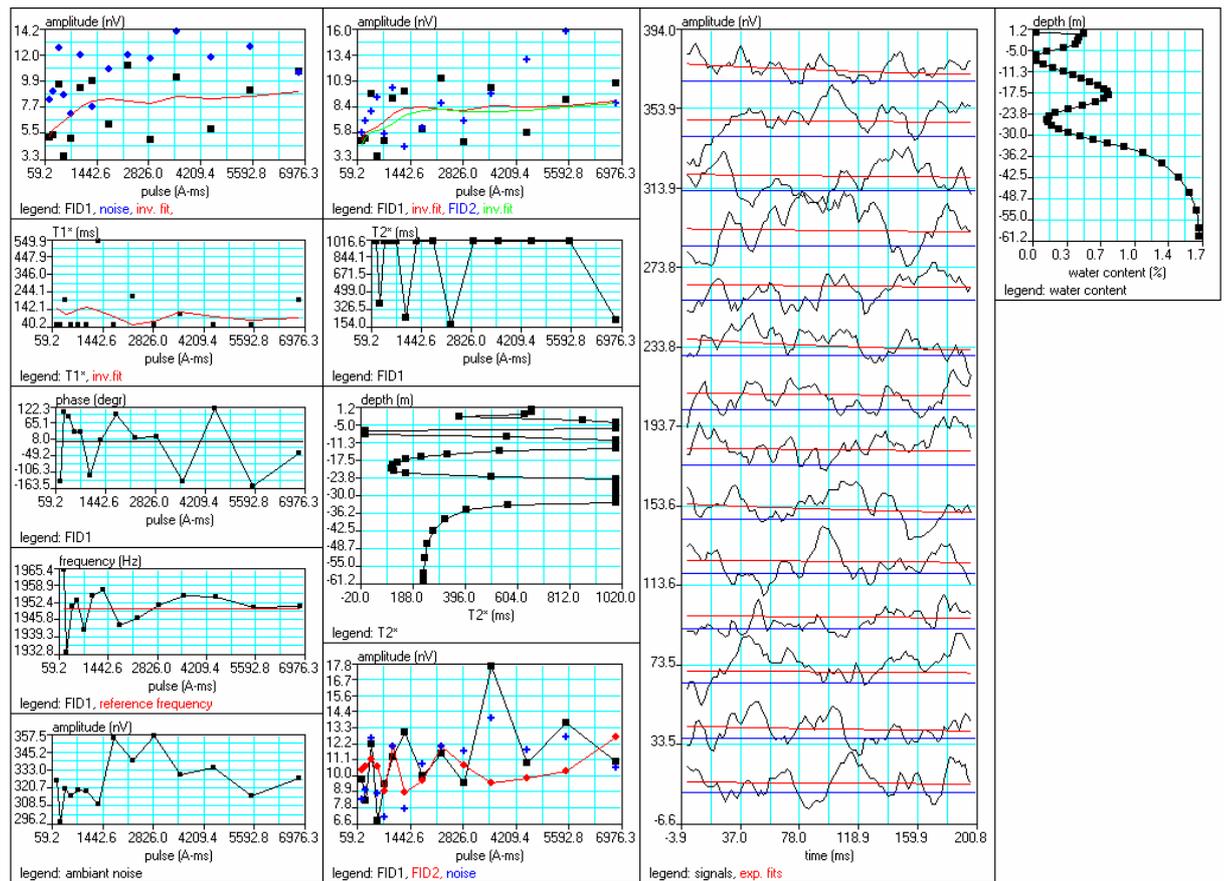


Illustration 2 - Sondage 3, Est de Zonza, en aval de la décharge

Site: RMP Corse Prugna

Loop: 2 - 35.0 Date: 27.11.2006 Time: 12:35

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR4A.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\MS35_57_1_0_0.mrm

loop: square, side = 35.0 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.00; EN/IN = 6.93

fitting error: FID1 = 16.43%; FID2 = 53.24 %

param. of regular.: E, T2* = 53.4; T1* = 0.238

permeability constant Cp = 7.00e-09

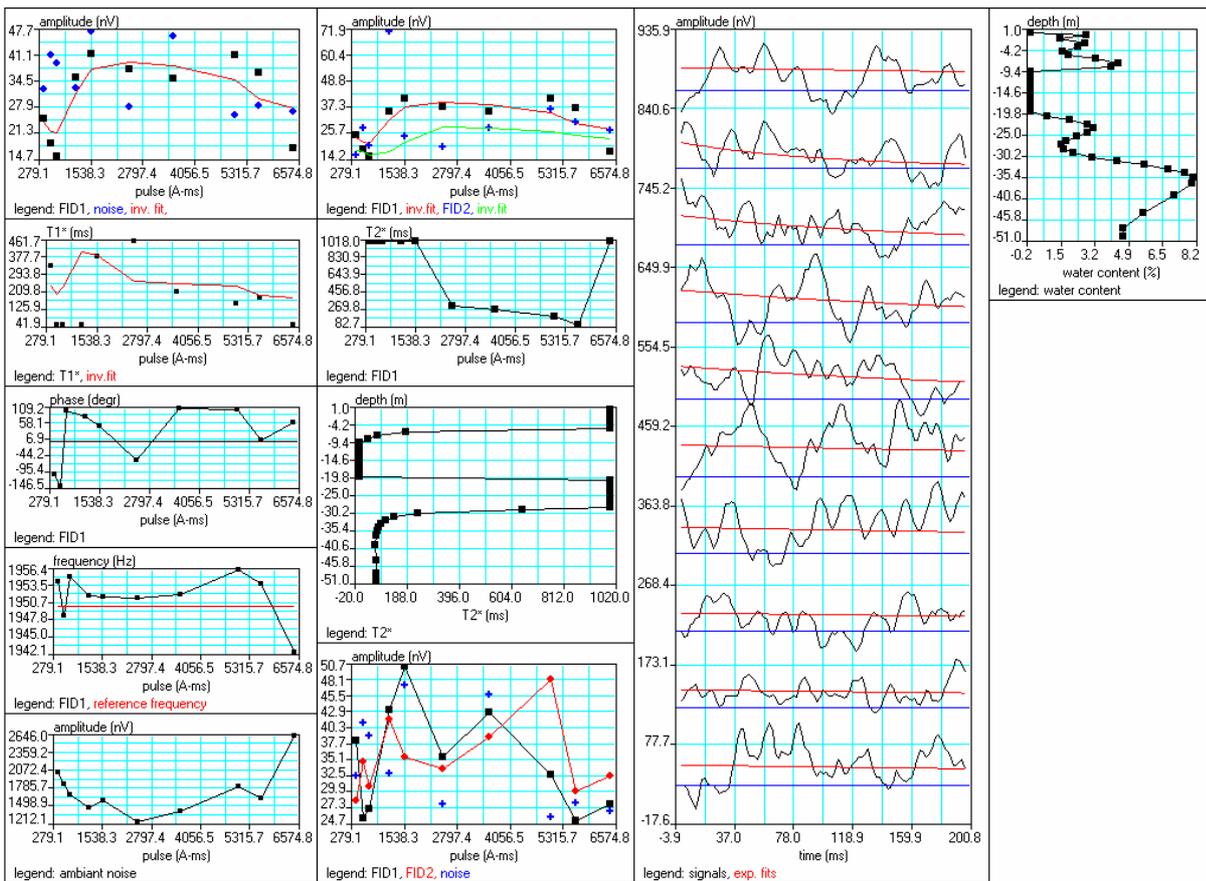


Illustration 3 - Sondage 4, Burracciola, Sud de Prugna, Nord-Est de Quenza

Site: RMP Corse Crisencia

Loop: 4 - 37.5 Date: 29.11.2006 Time: 08:15

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR5B.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_A_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45633.80 nT

filtering window = 199.6 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.25; EN/IN = 1.06

fitting error: FID1 = 47.51%; FID2 = 47.61 %

param. of regular.: E, T2* = 427.2; T1* = 6.914

permeability constant Cp = 7.00e-09

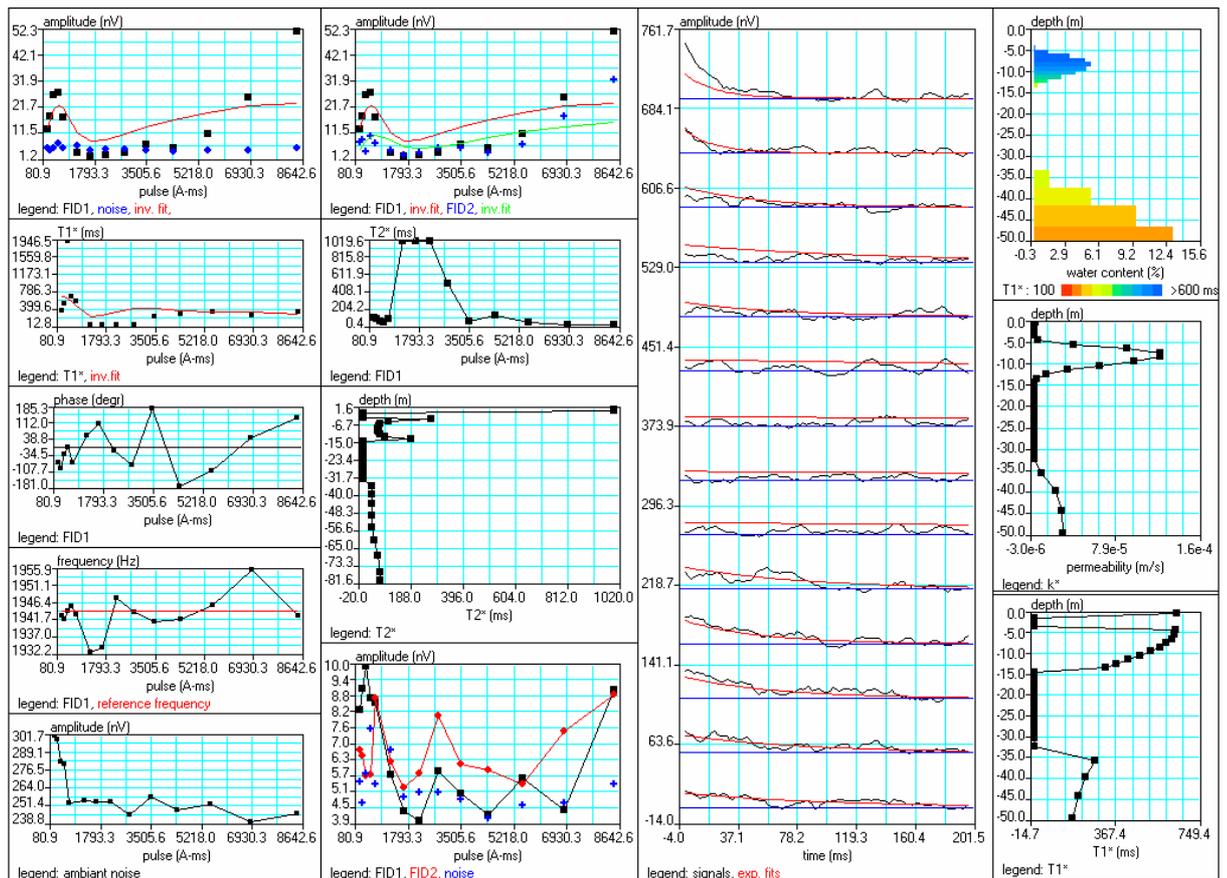


Illustration 4a - Sondage 5, Crisencia, Sud et aval de Quenza

Site: RMP Corse Crisencia

Loop: 4 - 37.5 Date: 29.11.2006 Time: 08:15

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR5B.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_A_0_0.mmm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45633.80 nT

filtering window = 199.6 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.25; EN/IN = 1.06

fitting error: FID1 = 47.51%; FID2 = 47.61 %

param. of regular.: E,T2* = 427.2; T1* = 6.914

permeability constant Cp = 7.00e-09

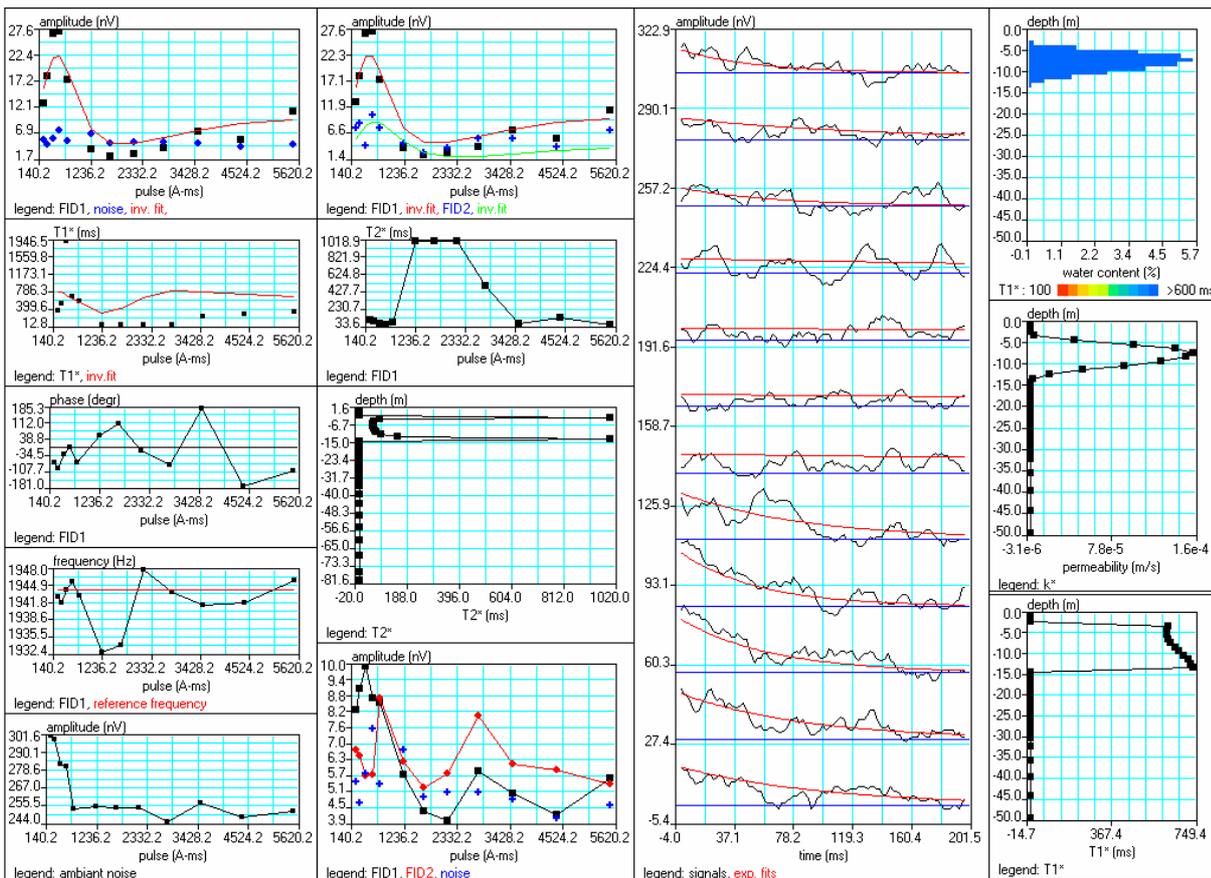


Illustration 4b - Sondage 5, Crisencia, Sud et aval de Quenza

Site: RMP Corse Anau

Loop: 4 - 37.5 Date: 29.11.2006 Time: 20:31

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR6.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_A_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45633.80 nT

filtering window = 199.6 ms

time constant = 15.00 ms

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

fitting error: FID1 = 34.12%; FID2 = 51.83 %

param. of regular.: E, T2* = 976.6; T1* = 5.722

permeability constant Cp = 7.00e-09

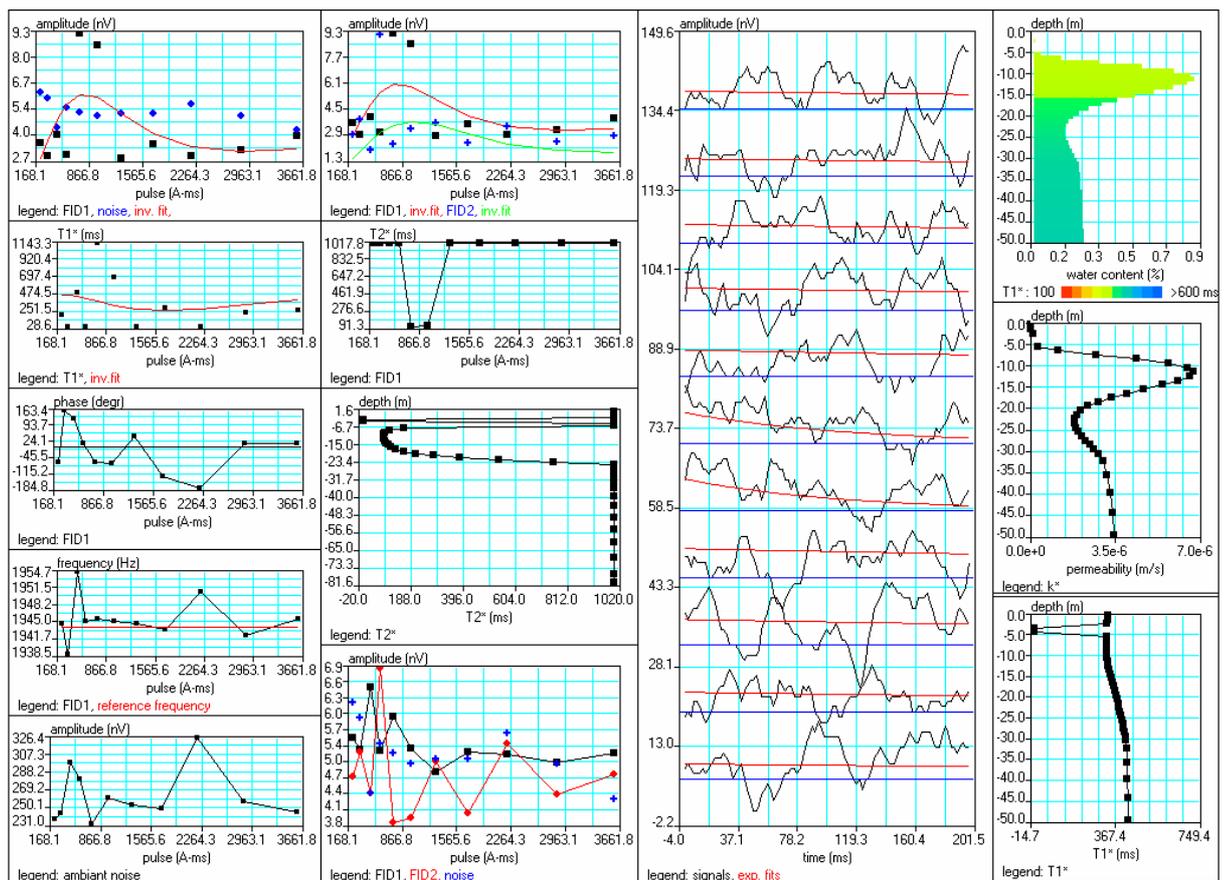


Illustration 5 - Sondage 6, Plaine d'Aneau, Sud-Est de Sorbollano

Site: RMP Corse Coscione

Loop: 2 - 75.0 Date: 30.11.2006 Time: 16:52

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR7A.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\MS75_57_1_0_0.mrm

loop: square, side = 75.0 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.21; EN/IN = 1.55

fitting error: FID1 = 24.04%; FID2 = 52.51 %

param. of regular.: E, T2* = 305.2; T1* = 0.954

permeability constant Cp = 7.00e-09

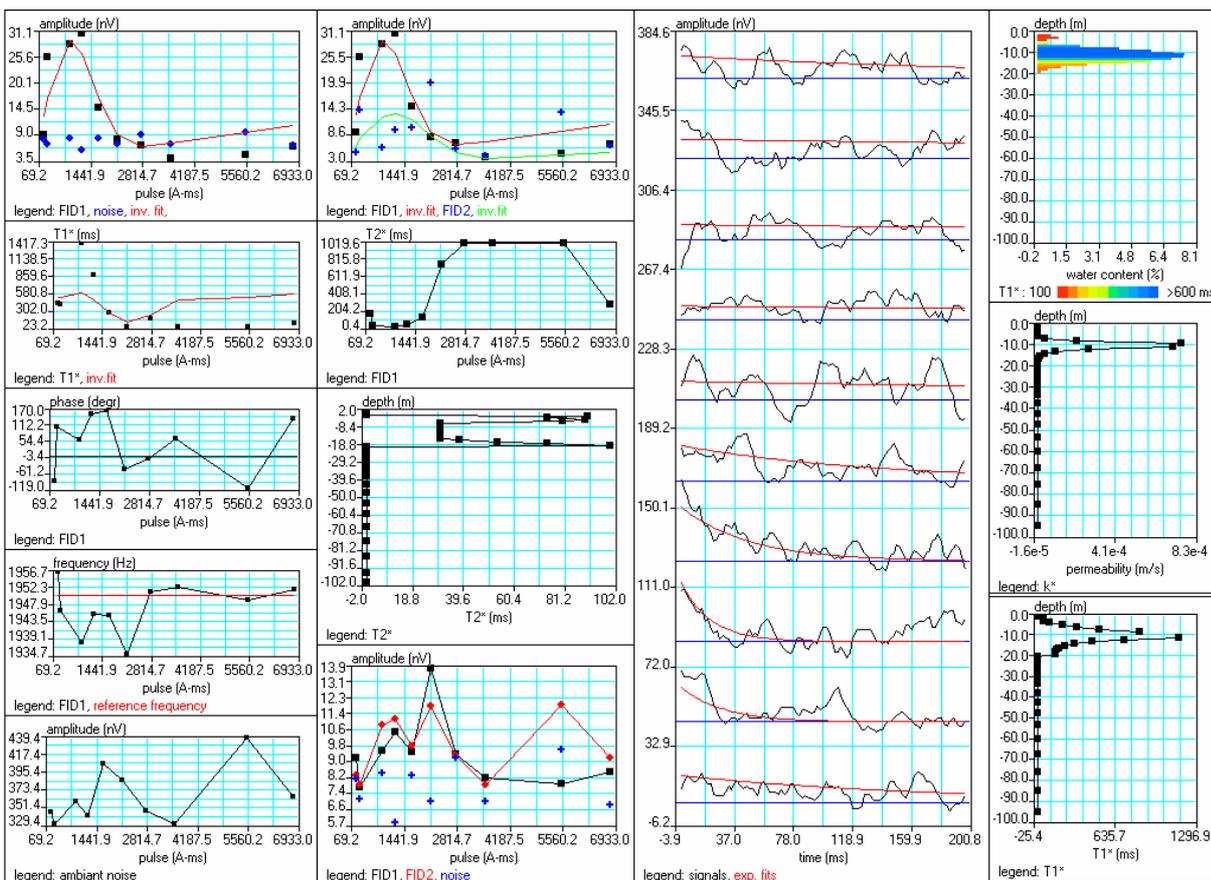


Illustration 6 - Sondage 7, Piana d'Ornicciu, plateau de Coscione

Site: RMP Corse Aravina

Loop: 4 - 37.5 Date: 01.12.2006 Time: 15:50

NUMIS data set: D:\Travail\2006\RMP_CORSE\RMP_INT\COR8A.inp

matrix: D:\SOFTWARE\RMP\2007\Matrices_RMP_Corse\M837_57_1_0_0.mrm

loop: eight square, side = 37.5 m

geomagnetic field:

inclination= 57 degr, magnitude= 45777.00 nT

filtering window = 199.0 ms

time constant = 15.00 ms

average S/N = 1.17; EN/IN = 3.86

fitting error: FID1 = 42.09%; FID2 = 46.69 %

param. of regular.: E, T2* = 179.3; T1* = 0.715

permeability constant Cp = 7.00e-09

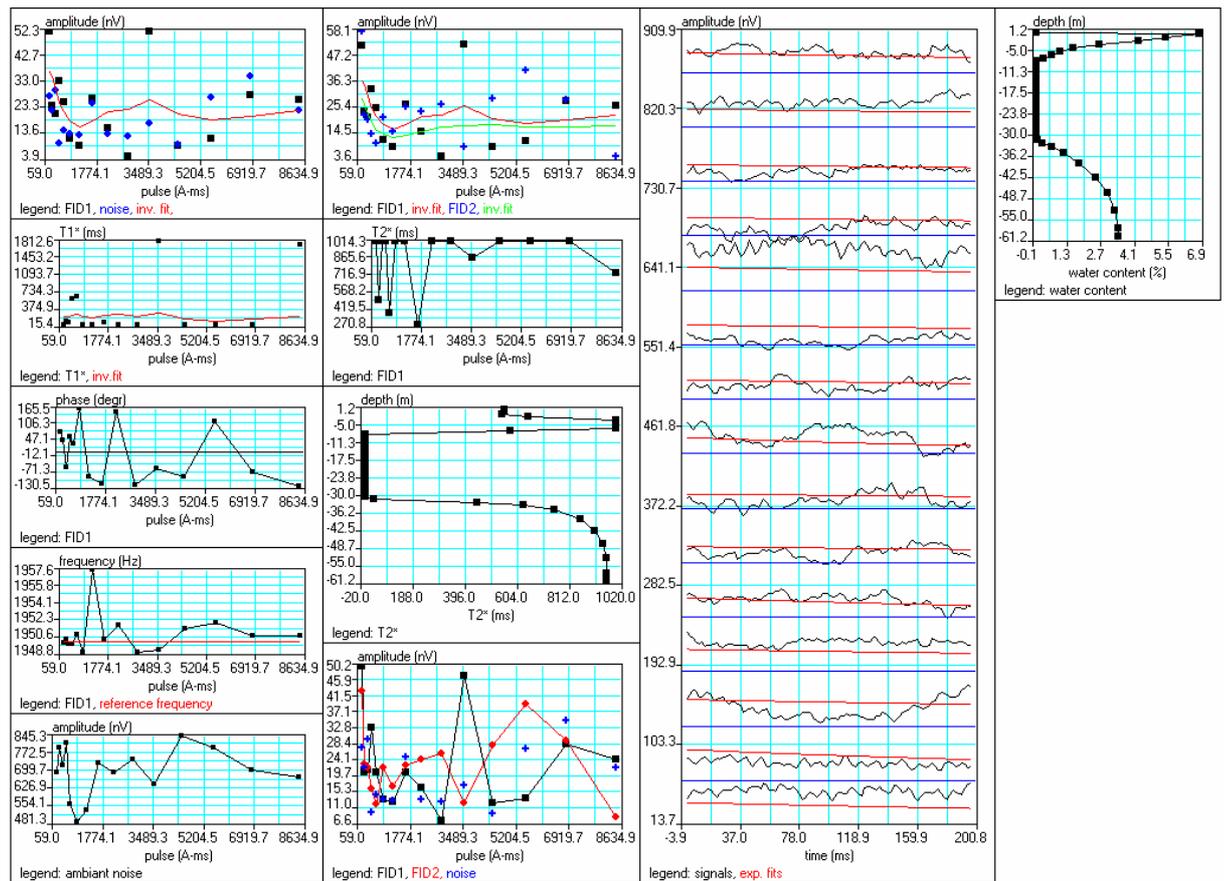


Illustration 7 - Sondage 8, Aravina, Nord-Ouest Levi



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Corse

Immeuble Agostini
ZI de Furiani

20600 – Bastia - France
Tél. : 04 95 58 04 33