

Document public



Contribution à l'évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse

Rapport final

BRGM/RP-54541-FR

Avril 2006

Contribution à l'évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse

Rapport final

BRGM/RP-54541-FR
Avril 2006

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 05EAUC07

Y. Caballero, P. Lachassagne et B. Ladouche
Avec la collaboration de
G. Bodéré et E. Palvadeau

Vérificateur :

Nom : J.-C. Maréchal

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : E. Palvadeau

Date :

Signature :

Mots clés : aquifère, Corse, forages, piézométrie, ressource en eau, socle granitique, synthèse hydrogéologique.

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

Caballero Y., Lachassagne P., Ladouche B., (2006) – Contribution à l'évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse. Rapport final. BRGM/RP-54541-FR. 87 p., 66 fig, 4 Ann.

Synthèse

Lorsque l'on s'intéresse aux ressources en eau de la Corse, on pense d'abord à leur composante superficielle, largement suffisante pour alimenter les zones proches des aménagements hydrauliques qui permettent de la capter. Pour les parties du territoire qui ne bénéficient pas de cette source d'alimentation, notamment en montagne, la composante souterraine (captage de sources et forages d'eau) devient prépondérante en termes de ressource en eau.

Cette étude, cofinancée par l'Office de l'Environnement de la Corse et l'Agence de l'Eau RM&C, vise à apporter une meilleure compréhension du fonctionnement des aquifères en contexte granitique, couvrant les 2/3 du territoire corse. À partir du suivi de 5 forages exploités dans des contextes hydrogéologiques variés, deux types d'aquifères différents sont identifiés, suivant si l'effet de l'altération, de l'érosion et de la tectonique auront affecté le socle granitique. Nous pouvons ainsi différencier :

- des **aquifères de type « fissuré avec couverture d'altérites »**, correspondant à des environnements où le profil d'altération de la roche aura été préservé de l'érosion,
- des **aquifères de type « fissuré sans couverture d'altérites »**, où l'érosion aura fait disparaître la majeure partie des altérites et une partie de l'horizon fissuré ou bien lorsque la fissuration est principalement liée à de la fracturation d'origine tectonique.

Les différences de fonctionnement entre ces deux types d'aquifères sont étudiées au travers de l'analyse des chroniques des niveaux piézométriques obtenues pour chacun des forages, de manière à déterminer lequel est le plus productif.

Les fluctuations des niveaux piézométriques et l'impact des pompages d'exploitation sont étudiés ; les débits de pompage et les débits moyens journaliers d'exploitation sont calculés et la stratégie de pompage (durée et fréquence des pompages) est analysée. La sensibilité des aquifères aux précipitations, moindre dans le cas des aquifères d'altération que dans le cas des aquifères de fracture, ainsi que le fonctionnement naturel des aquifères sont présentés.

Les productivités des forages des aquifères fissurés avec couverture d'altérites apparaissent supérieures à celles des aquifères sans couverture d'altérites. Il est par ailleurs observé que la stratégie de pompage actuellement appliquée sur tous les forages affecte peu les aquifères suivis, ce qui implique que leur exploitation pourrait être optimisée, voire intensifiée.

Des stratégies de prospection sont proposées pour cartographier les zones les plus favorables à l'implantation des forages, au travers de la localisation des couvertures d'altération préservées dans les roches granitiques du socle en Corse.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Suivi des forages et traitement des données.....	13
2.1. LES FORAGES SUIVIS	13
2.2. LES DONNÉES ACQUISES.....	13
2.3. LES OUTILS ET MODÈLES.....	16
2.3.1. Stockage et mise en forme des données	16
2.3.2. Calcul des débits de pompage et des pertes de charge quadratiques..	17
2.3.3. Analyse des relations entre précipitations, débit de pompage et piézométrie	18
3. Comportement des aquifères exploités.....	19
3.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES	19
3.2. DISTINCTION TYPOLOGIQUE.....	25
3.3. FORAGES EN CONTEXTE AQUIFÈRE DE TYPE « FISSURÉ SANS COUVERTURE D'ALTÉRITES »	26
3.3.1. Pioggiola	26
3.3.2. Tallone	37
3.3.3. Urba 3 et Urba 4	49
3.4. FORAGES EN CONTEXTE AQUIFÈRE DE TYPE « FISSURÉ AVEC COUVERTURE D'ALTÉRITES »	58
3.4.1. Azilone	58
3.4.2. Ampaza.....	64

4. Typologie de la ressource en eau dans le granite en Corse.....	73
4.1. DISTINCTIONS TYPOLOGIQUES ENTRE LES DEUX TYPES D'AQUIFÈRES.....	73
4.2. COMPARAISONS AVEC LES BILANS HYDRIQUES.....	77
4.3. VOLUMES EXPLOITÉS PAR RAPPORT À LA POPULATION.....	81
Conclusions	85
Perspectives.....	87
Références	89

Liste des illustrations

Figure 1 : Précipitations cumulées mensuelles aux stations les plus proches de chacun des forages.	15
Figure 2 : Données d'ETP quotidiennes acquises auprès de Météo France au niveau des points de grille de calcul les plus proches des différents forages étudiés.....	16
Figure 3: Durée des épisodes de pompage aux forages suivis (plusieurs pompages ont lieu chaque jour).	20
Figure 4 : Fréquences de pompage (nombre de pompages par jour).	21
Figure 5 : Fréquences de pompage (nombre de pompages par jour) – zoom sur les fréquences de pompage comprises entre 0 et 30.	21
Figure 6 : Débits moyens journaliers de pompage (produit du débit de pompage par le temps de pompage cumulé sur la journée, ramené à un pompage continu de 24h) des forages suivis. Les très faibles valeurs correspondent à des artéfacts de calcul. Pour chaque forage, le débit d'exploitation retenu pour le calcul du débit moyen journalier, est indiqué dans la légende.....	22
Figure 7 : Rabattements provoqués par les pompages en fonction de leur durée (ces rabattements sont calculés sans correction des pertes de charge quadratique).	24
Figure 8 : Modèle conceptuel de la structure des aquifères de socle.	25
Figure 9 : Coupes géologique et technique du forage de Pioggiola.	28
Figure 10: Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 26 juin 2001 sur le forage de Pioggiola, avec prise en compte des pertes de charge quadratique et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 150 minutes de pompage.	29

Figure 11 : Niveau piézométrique moyen observé et corrigé des pertes de charge quadratique (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Pioggiola (altitude : 810 m NGF).	30
Figure 12 : Niveau piézométrique moyen observé et corrigé des pertes de charge quadratique (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Pioggiola (altitude : 810 m NGF) – zoom sur la période du 01/11/04 au 30/06/05.	31
Figure 13 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage de Pioggiola entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.	32
Figure 14 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique observée au forage de Pioggiola entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.....	32
Figure 15 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Pioggiola (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage)	33
Figure 16 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique à Pioggiola (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).	34
Figure 17 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour Pioggiola à partir des précipitations et des débits, sur la période allant du 10/06/04 au 22/07/04 et du 14/11/04 au 28/06/05. La pluie efficace est calculée à partir des données de précipitation et d'ETP de Météo-France. Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations sont S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R ² (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1).	35
Figure 18 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour Pioggiola à partir des précipitations et des débits, zoom sur la période allant du 14/11/04 au 28/06/05.	35
Figure 19: Composantes des réponses impulsionnelles (R.I.) résultant du calage de la fonction de transfert servant à simuler les variations piézométriques au forage de Pioggiola en fonction de la pluviométrie.	36
Figure 20 : Simulation de la piézométrie sur l'ensemble de la période de mesure à Pioggiola (01/04/04 au 31/12/05). Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R ² (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont affichés.	37
Figure 21 : Coupes géologique et technique du forage de Tallone.	39
Figure 22 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé les 14 et 15 août 1998 sur le forage de Tallone, avec prise en compte des pertes de charge quadratique et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 300 minutes de pompage.....	40
Figure 23 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF).	41

Figure 24: Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF) – zoom sur la période sans pompages.	42
Figure 25 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF) – zoom sur la période de pompage.	42
Figure 26 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage de Tallone entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.	43
Figure 27 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique observée au forage de Tallone entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.	44
Figure 28: Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Tallone (entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).	45
Figure 29 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique à Tallone (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).	45
Figure 30 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour le forage de Tallone à partir des précipitations et des débits, sur la période allant du 14/06/04 au 07/08/05 et du 25/10/05 au 28/12/05. La pluie efficace est calculée à partir des données de précipitation et d'ETP de Météo-France. Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations sont S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R ² (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont indiqués.	46
Figure 31 : Composantes des réponses impulsionnelles (R.I.) résultant du calage de la fonction de transfert servant à simuler les variations piézométriques au forage de Tallone.	47
Figure 32: Simulation de la piézométrie sur l'ensemble de la période de mesure à Tallone (01/04/04 au 31/12/05). Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R ² (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont indiqués.	48
Figure 33 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 18 avril 1997 sur le forage d'Urba 4, sans prise en compte des pertes de charge quadratique.	50
Figure 34 : Niveaux piézométriques moyens observés non corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage d'Urba 4 (altitude : 382 m NGF).	51
Figure 35 : Niveaux piézométriques moyens observés non corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage d'Urba 4 (altitude : 382 m NGF) – zoom entre le 01/04/04 et le 01/07/05.	52
Figure 36: Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage d'Urba 4 entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.	53

Figure 37 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Urba 4 entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.....	54
Figure 38 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Urba 4 (entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).....	55
Figure 39 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques à Urba 4 (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).	55
Figure 40 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage d'Urba 3 entre le 01/08/05 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.	56
Figure 41 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Urba 3 (entre le 01/08/05 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).....	57
Figure 42 : Coupes géologique et technique du forage d'Azilone.	59
Figure 43 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 1 ^{er} août 1988 sur le forage d'Azilone, avec prise en compte des pertes de charge quadratiques et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 100 minutes de pompage.....	60
Figure 44 : Niveaux piézométriques moyens observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Azilone (altitude : 500 m NGF).	61
Figure 45 : Niveaux piézométriques moyens observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage de Azilone (altitude : 500 m NGF) – zoom entre le 1 ^{er} sept. 2004 et le 30 mars 2005.	62
Figure 46 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Azilone entre le 01/04/04 et le 31/12/05.	63
Figure 47 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratiques à Azilone (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05).	64
Figure 48 : Coupes géologique et technique du forage d'Ampaza.....	66
Figure 49 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 22 septembre 1986 sur le forage d'Ampaza, avec prise en compte des pertes de charge quadratiques.....	67
Figure 50 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m ³ /h) mesurés au forage d'Ampaza (altitude : 515 m NGF).	69
Figure 51 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Ampaza entre le 01/04/04 et le 31/12/05.	71
Figure 52 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques à Ampaza (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05).....	71
Figure 53 : Comparaison des volumes moyens journaliers pompés prévus/observés en fonction du débit d'exploitation et de la durée de pompage journalière prévue (suite à	

l'essai de pompage) /calculée (valeur moyenne sur l'ensemble de la chronique disponible).	75
Figure 54: « aire d'alimentation » (en rouge) et localisation des forages d'Urbalacone, Ampaza, Azilone et Tallone au sein des bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques des Ponts d'Abra et de Zoza.	78
Figure 55 : « aire d'alimentation » (en rouge) et localisation du forage de Pioggiola au sein du bassin versant contrôlé par la station hydrométrique de Ponte-Leccia.	79
Figure 56: Carte schématique de la micro-région de la Balagne.	82
Figure 57: Carte schématique de la micro-région du Taravo.	83
Figure 58: Niveaux piézométriques mesurés au forage de Pioggiola entre le 01/06/05 et le 28/08/05 – période de pompage 2005.	91
Figure 59 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Pioggiola (zoom entre le 30/06/05 et le 06/07/05).	91
Figure 60 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone entre le 01/07/05 et le 30/09/05 – période de pompage 2005.	92
Figure 61 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone (zoom entre le 10/08/05 et le 12/08/05).	92
Figure 62 :Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Urba 3 entre le 01/09/05 et le 31/12/05.	93
Figure 63 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone entre le 01/07/05 et le 28/08/05 – période de pompage 2005.	93
Figure 64 :Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Urba 4 (zoom entre le 20/08/05 et le 22/08/05).	94
Figure 65: Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Azilone entre le 01/07/05 et le 10/07/05.	94
Figure 66: Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Ampaza entre le 01/07/05 et le 10/07/05.	95

1. Introduction

La Corse est majoritairement composée de roches de socle qui contiennent des aquifères aux propriétés hydrodynamiques (perméabilité, porosité) en général plus modestes que celles d'autres types d'aquifères (sédimentaires ou karstiques par exemple). Ils sont cependant de plus en plus sollicités, au moyen de forages, par de nombreuses communes rurales pour lesquelles ils représentent une importante ressource d'appoint aux prélèvements d'eau de surface en rivière et aux sources.

La double nécessité d'estimer la ressource en eau souterraine et d'en proposer une stratégie d'exploitation et de gestion durable et respectueuse de l'environnement, a conduit l'Office de l'Environnement à confier au BRGM la réalisation d'une étude visant à caractériser ce type d'aquifères. Cette étude concerne les roches de type plutonique (granites s.l.), qui occupent environ les deux tiers de la surface de l'île, principalement à l'Ouest et au Sud. Elle se fixe comme objectif de proposer, d'une part une description la plus précise possible de la géométrie et du fonctionnement des aquifères granitiques sur le territoire Corse et, d'autre part, d'estimer la ressource en eau qu'ils représentent ou pourraient représenter dans le cadre d'une exploitation optimisée.

Le présent rapport vient clôturer une période d'acquisition des niveaux piézométriques de 20 mois (Avril 2004 – Décembre 2005) menée sur 6 des 7 forages initialement suivis ([Caballero *et al*, 2005]). Il présente dans un premier temps les principales caractéristiques de l'exploitation des forages, détaille les résultats des travaux de modélisation de la fonction de transfert existant entre les précipitations et le niveau piézométrique et propose une typologie pour la caractérisation des aquifères en domaine de socle granitique en Corse.

2. Suivi des forages et traitement des données

2.1. LES FORAGES SUIVIS

Six des 7 forages initialement retenus ([Caballero et Lachassagne, 2003]) ont été équipés en vue d'un suivi du niveau piézométrique au pas de temps de 3 ou 6 minutes. L'équipement du septième forage (Culastru à Quenza) n'est pas encore effectif du fait de problèmes de fonctionnement du matériel d'acquisition.

Les principales caractéristiques de ces forages sont présentées dans le Tableau 1. Les 5 premiers se situent en Corse-du-Sud (est d'Ajaccio et sud de Bavella) et le dernier en Haute-Corse (vallée de la Tartagine). Tous se trouvent dans un environnement de basse à moyenne montagne (altitude des forages comprise entre 380 m et 945 m NGF). Les caractéristiques détaillées de chacun de ces forages (y compris pour Culastru) sont présentées dans les rapports de ([Caballero et Lachassagne, 2003] et [Caballero *et al*, 2005]). Ces forages sont exploités toute l'année ou en saison estivale et possèdent des compteurs en état de marche à l'heure actuelle, ce qui n'était pas toujours le cas au début de l'étude.

Pratiquement aucun des forages suivis n'est utilisé comme unique source d'alimentation en eau pour les communes. Ils viennent la plupart du temps en complément de sources captées aux alentours. Cette situation est représentative de celle de l'ensemble des forages exploités dans le granite en Corse. Ceci s'explique par le fait qu'historiquement les communes ont d'abord capté les sources proches des villages et ont dirigé les eaux vers des réservoirs situés en amont des habitations. La réalisation de forages n'est intervenue qu'ultérieurement, lorsque les sources n'ont plus suffi à alimenter le village.

2.2. LES DONNÉES ACQUISES

Le suivi des fluctuations du niveau piézométrique est réalisé au moyen de capteurs de pression reliés à des stations d'acquisition, programmées pour l'enregistrement au pas de temps de 3 ou 6 minutes. Cet équipement a permis la mesure du niveau piézométrique sur ces forages à partir du mois d'avril 2004. La présente étude portera sur les données acquises entre cette date et la fin du mois de décembre 2005, soient 20 mois. Cette acquisition est toujours opérationnelle et devrait être maintenue au moins jusqu'en mars 2007.

Le fonctionnement des capteurs et centrales est contrôlé régulièrement lors de visites des sites organisées tous les mois et demi pour récupérer les données. Cela n'a malheureusement pas empêché des dysfonctionnements des appareils qui ont donné lieu à des lacunes dans les séries de données acquises, de parfois plusieurs dizaines de jours.

Code BSS	Désignation (commune / lieu-dit ou indice)	Département	Suivi local	Fréquence et intensité d'exploitation du forage (AEP assurée par forages, sources, prises d'eau)		Population desservie		Contexte hydrogéologique	
				Annuelle et forage + sources	Saisonniers et forage + sources	Hiver	Eté (août)	Type d'aquifère	Morphologie
11211X0001	Ampaza	Corse du Sud	oui (employé communal)	X		20-40	60-80	fissuré + altérites	plateau
11211X0002	Azilone	Corse du Sud	oui (employé communal)	X		60-80	100- 120	fissuré + altérites	flanc de relief faible
11208X0002	Urbalacone / 3	Corse du Sud	oui (maire)	X (avec Urba4)		45	150	fissuré	flanc de relief fort
11208X0028	Urbalacone / 4	Corse du Sud	oui (maire)	X (avec Urba3)				fissuré	flanc de relief fort
11216X0111	Quenza / Tallone	Corse du Sud	oui (employé communal)		X (avec Culastru)	200	500	fissuré	flanc de relief modéré
11065X0036	Pioggiola	Haute-Corse	oui (maire)		X	65	300	fissuré	flanc de relief modéré

Tableau 1 : Principales caractéristiques des 7 forages retenus dans le cadre de l'étude.

Les données de précipitation mesurées au niveau des stations de Météo-France les plus proches de chacun des forages ont aussi été acquises pour analyser leur relation avec le comportement des nappes suivies. Une analyse détaillée de ces données a été réalisée ([Caballero *et al*, 2005]) dont il ressort l'alternance d'une saison « sèche », d'une durée moyenne de 3 mois (juin à août) et d'une saison des pluies assez longue (octobre à avril), avec une période d'intensité maximale intervenant normalement en novembre et une deuxième période de reprise des précipitations en avril (cf. Figure 1). La pluviométrie pendant la période d'étude est globalement proche de la tendance normale calculée sur 30 ans (1971-2000). La faible densité de couverture du territoire en termes de stations de mesure des précipitations et l'environnement de montagne dans lequel se trouvent les forages, rendent parfois la représentativité des mesures des précipitations très relative au droit de certains forages (en particulier celui de Pioggiola).

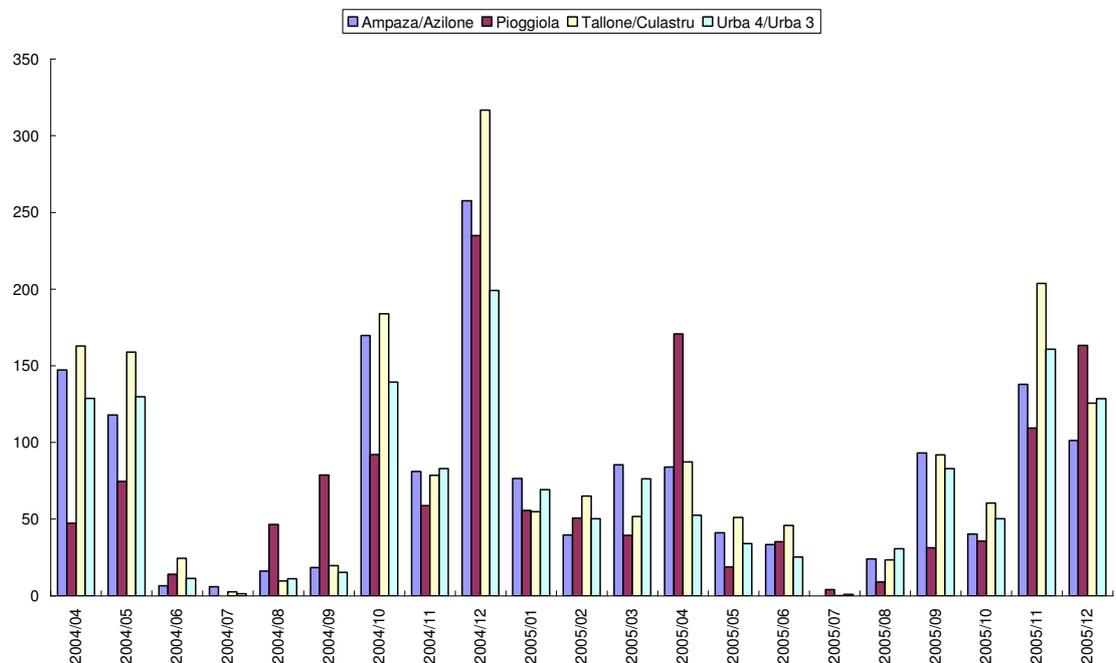


Figure 1 : Précipitations cumulées mensuelles aux stations les plus proches de chacun des forages.

Les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) quotidiennes, nécessaires pour le calcul de la pluie efficace (part des précipitations participant effectivement aux écoulements et à l'infiltration, après avoir retiré la part qui repart dans l'atmosphère par évapotranspiration) ont aussi été acquises auprès de Météo France. Ces données sont calculées à partir de la formule de Penman-Monteith en point de grille régulière sur la Corse avec une maille de 0.125° (soit environ 12 kilomètres). Les données des points de grille les plus proches des forages ont donc été acquises (Figure 2). Les valeurs observés sont globalement similaires pour tous les secteurs géographiques et oscillent de manière régulière entre 1 mm/j l'hiver et 7 mm/j l'été en moyenne.

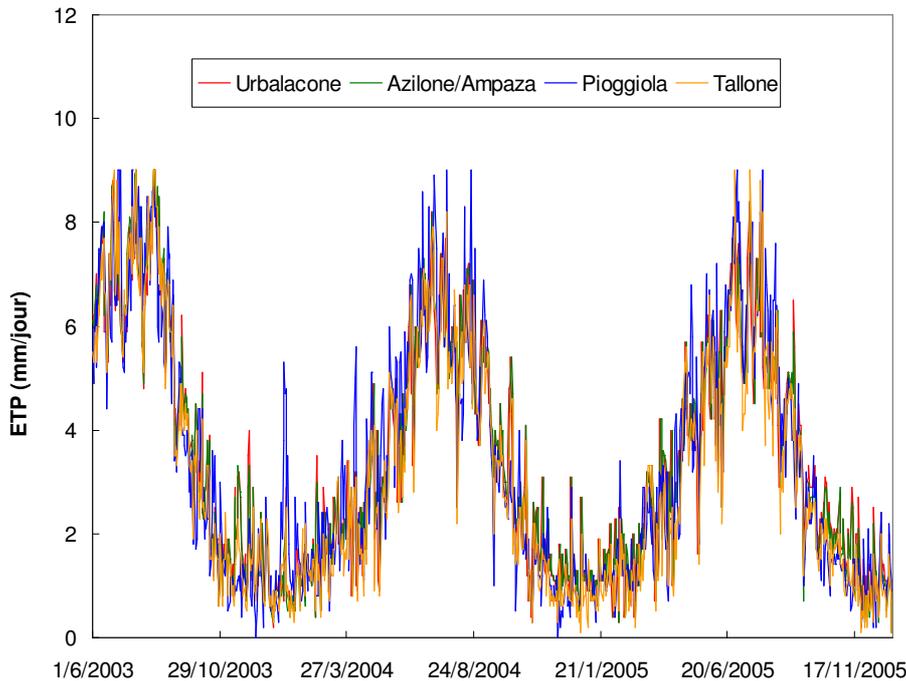


Figure 2 : Données d'ETP quotidiennes acquises auprès de Météo France au niveau des points de grille de calcul les plus proches des différents forages étudiés.

2.3. LES OUTILS ET MODÈLES

2.3.1. Stockage et mise en forme des données

L'ensemble des données acquises ont été stockées dans une base de données construite sous Access. Les données de piézométrie y sont stockées au pas de temps de 3 ou 6 minutes, celles de précipitation et ETP au pas de temps journalier. Cette base a été construite de manière à favoriser une interrogation aisée, permettant notamment l'extraction au pas de temps journalier, pour la période choisie, des données de précipitation, d'ETP et de la piézométrie maximale et moyenne, pour chaque forage.

Parallèlement à l'extraction de ces données, un module de calcul permet de dénombrer et de repérer les événements de pompage. En effet, grâce au pas de temps fin utilisé pour l'acquisition (3 ou 6 minutes), il est possible de repérer précisément le début d'un pompage dans la mesure où celui-ci provoque un rabattement brusque dans le forage. La fin d'un pompage peut être repérée de la même manière, puisqu'elle se traduit par une remontée brusque du niveau d'eau dans le forage. Les temps de pompage et le rabattement provoqués par chacun des pompages ainsi repérés sont calculés à partir des dates et niveaux piézométriques repérés en début et fin de pompage. De plus, le temps nécessaire à l'aquifère pour retrouver son niveau piézométrique d'avant pompage peut lui aussi être calculé. Un

indice permet enfin de différencier les cas où l'aquifère retrouve son niveau d'avant pompage, de ceux pour lesquels un nouveau pompage intervient avant ce retour aux conditions initiales.

2.3.2. Calcul des débits de pompage et des pertes de charge quadratiques

Le relevé des volumes mesurés par les compteurs volumiques existant sur les forages a permis de connaître les volumes d'eau pompés pour les périodes comprises entre deux visites sur les sites. Ces valeurs ont permis d'estimer les débits de pompage à partir des temps de pompage extraits de la base et cumulés sur ces périodes. La valeur moyenne de ces débits calculés par périodes est considérée comme représentative du débit d'exploitation du forage. Ce débit a été multiplié par les temps de pompage journaliers extraits de la base, pour calculer un débit de pompage moyen journalier en m³/h équivalent à un pompage continu pendant 24 heures.

Lorsqu'elles existent, les données relatives aux pompages d'essai réalisés préalablement à la mise en exploitation des forages ont été traitées à l'aide du logiciel Winsape développé au BRGM. Cet outil permet d'estimer les paramètres hydrodynamiques des aquifères testés lors de la réalisation de l'essai de pompage. Il permet aussi d'évaluer les pertes de charge quadratiques qui apparaissent au cours des pompages. Ces pertes de charge sont provoquées par les écoulements turbulents qui se produisent dans le voisinage proche de l'ouvrage au cours du pompage, principalement au niveau de la crépine et, dans certains cas, au sein de la partie de l'aquifère située à proximité immédiate du puits.

Le rabattement provoqué par un pompage peut être calculé suivant l'équation (1), s étant le rabattement en mètres provoqué par le pompage avec un débit Q en m³/h, b et c les coefficients de perte de charge linéaire et quadratique.

$$(1) \quad s = b \times Q + c \times Q^2$$

L'équation (1) montre que les pertes de charge quadratiques introduisent une composante non linéaire (qui varie en fonction du carré du débit) dans le rabattement provoqué par le pompage. Il convient donc de la retirer pour isoler la composante linéaire liée à l'aquifère et pouvoir analyser l'impact réel d'un pompage sur le niveau piézométrique de l'aquifère.

Lorsque les données nécessaires au calcul des pertes de charge quadratiques existent, les niveaux piézométriques moyens journaliers observés ont été corrigés en leur retirant la part de rabattement que ces pertes de charge provoquent pendant les périodes de pompage (équation (2)) :

$$(2) \quad NP_{corr} = \frac{(NP_{obs} - cQ^2) \times Dp}{24} + \frac{NP_{obs} \times (24 - Dp)}{24}$$

NP_{obs} et NP_{corr} étant les niveaux piézométriques (considérés ici comme des altitudes du niveau d'eau par rapport au niveau de la mer, ce qui permet de pouvoir éventuellement comparer ce niveau avec les altitudes des cours d'eau et des sources environnantes) observés et corrigés en mètres NGF, c le coefficient de pertes de charges quadratiques en $m/(m^3/h)^2$, Q le débit d'exploitation en m^3/h et Dp la durée du pompage journalier en heures.

2.3.3. Analyse des relations entre précipitations, débit de pompage et piézométrie

Les relations entre la piézométrie corrigée des pertes de charge quadratiques, les précipitations, l'ETP et les débits moyens de pompage ont été étudiés au pas de temps journalier en utilisant les techniques de traitement du signal et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie.

Des analyses corrélatoires et spectrales ont ainsi été mises en oeuvre sur la chronique de données piézométriques pour caractériser « l'effet mémoire » de l'aquifère (dépendance dans le temps de la piézométrie aux événements qui l'affectent – pluie efficace (précipitations – ETP), pompages) et de mettre en évidence des phénomènes périodiques.

En assimilant l'aquifère à une « boîte noire » pour laquelle la pluie, l'ETP et les débits pompés représentent les entrées et le niveau piézométrique la sortie, des techniques d'inversion permettent de reproduire les fluctuations du niveau piézométrique. La relation entre les entrées et la sortie est alors matérialisée par une ou plusieurs fonctions de transfert (ou réponses impulsionnelles). Dans notre cas d'étude, l'objectif consiste à étudier les caractéristiques des fonctions de transfert obtenues pour avancer dans la compréhension du fonctionnement des aquifères et de leur réponse aux pompages.

L'ensemble de ces traitements ont été réalisés à l'aide de l'outil TEMPO développé au BRGM.

3. Comportement des aquifères exploités

3.1. CARACTÉRISTIQUES DE L'EXPLOITATION DES AQUIFÈRES

De façon générale pour tous les forages étudiés, la **stratégie d'exploitation** est contrôlée par le niveau d'eau dans le réservoir communal (« château d'eau » dont la capacité de stockage est généralement comprise entre 50 et 100 m³). Le niveau d'eau dans le réservoir est contrôlé par des capteurs qui déclenchent le pompage lorsque le niveau atteint une valeur minimale et l'arrêtent quand le réservoir est suffisamment rempli. Le pompage peut aussi être arrêté lorsque le niveau de l'eau dans le forage risque de dénoyer la pompe. Enfin, le fait que le réservoir soit alimenté en parallèle et en continu par des sources, fait que les temps de pompage nécessaires au remplissage du réservoir ne sont jamais très longs (se reporter à l'Annexe 1 pour visualiser les niveaux piézométriques mesurés sur les différents forages en pompage).

La Figure 3 montre les **durées de pompage** calculées pour 5 des 6 forages étudiés (celui d'Urbalacone 3 n'est à l'heure actuelle pas exploité). Les pompages les plus longs atteignent à peine 7 heures. Ils sont en général beaucoup plus courts et il y a plusieurs épisodes de pompage par jour.

Les durées de pompage aux forages d'Ampaza et Azilone, qui sont exploités toute l'année, sont relativement constantes (30-45 minutes pour Ampaza et 1h - 1h30 pour Azilone) en dehors de la période estivale. Elles augmentent de manière significative, notamment pour Azilone, du mois de mai au mois de septembre.

C'est aussi au cours de cette période que les forages de Pioggiola et Tallone, prévus pour une exploitation saisonnière, sont mis en service.

Le pompage à Urbalacone 4, exploité toute l'année en temps normal, ne débute qu'à la date de réparation de la pompe (juillet 2005), tombée en panne en début d'année précédente (l'alimentation en eau du village se faisait grâce au pompage sur Urbalacone 3 pendant ce temps). Nous ne disposons pas de données sur Urbalacone 3 car il n'a pu être équipé que récemment, à cause de problèmes d'encombrement dans le tubage.

L'augmentation de la durée de pompage, ainsi que la mise en route des forages de Pioggiola et de Tallone, sont liés à la diminution du débit des sources en été, qui se conjugue avec l'augmentation de la demande en eau dans le village (fréquentation estivale et activité touristique).

Les **fréquences de pompage** sont comprises entre 2 et 10 pompages par jour sur l'ensemble des forages (Figure 4 et Figure 5). Des dysfonctionnements du système de contrôle de la pompe du forage de Pioggiola sont responsables des pics atteignant les 30 pompages par jour. Les valeurs observées pour les forages d'Urba 4 et de Tallone

sont liées aux conditions particulières de leur stratégie de pompage. Pour Urba 4, où la pompe a été mise en route début août 2005, la stratégie de pompage consiste à alterner des phases de pompage et de repos, dont les durées sont respectivement contrôlées d'une part par le capteur de niveau bas dans le forage pour stopper le pompage et d'autre part par une minuterie pour le relancer au bout de 40 minutes (cf. Annexe 1).

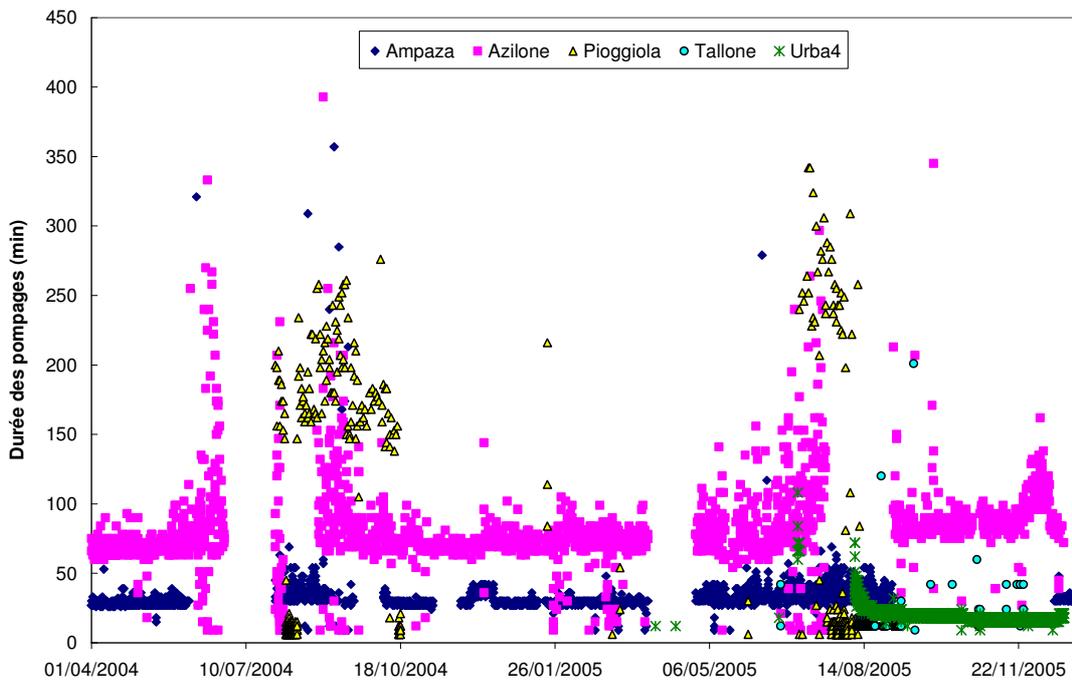


Figure 3: Durée des épisodes de pompage aux forages suivis (plusieurs pompages ont lieu chaque jour).

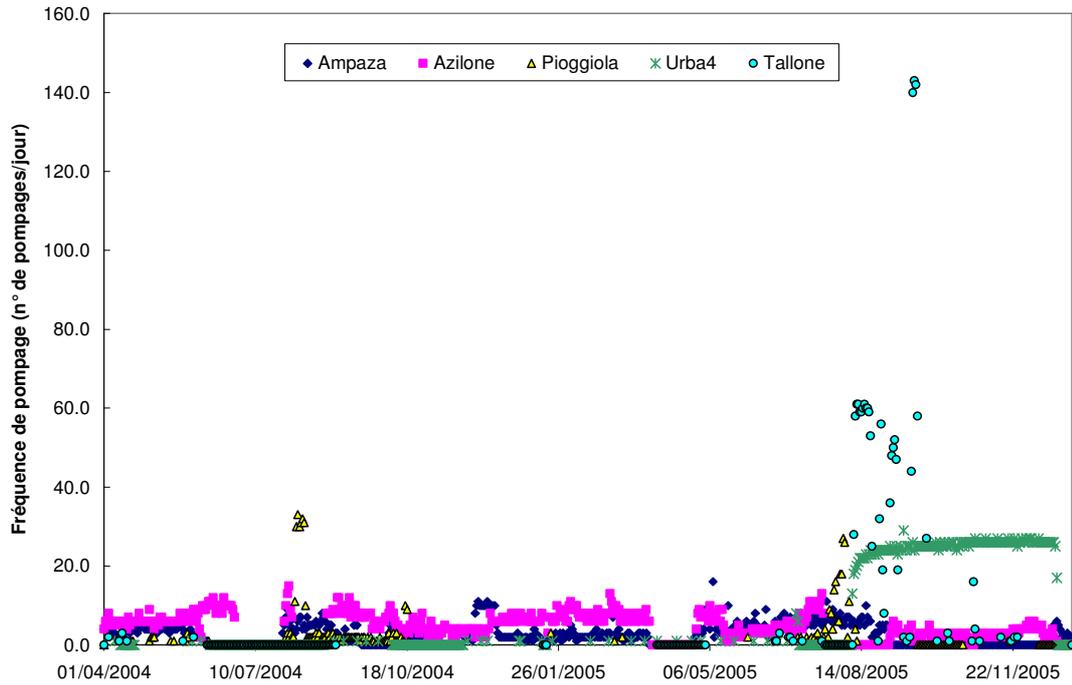


Figure 4 : Fréquences de pompage (nombre de pompages par jour).

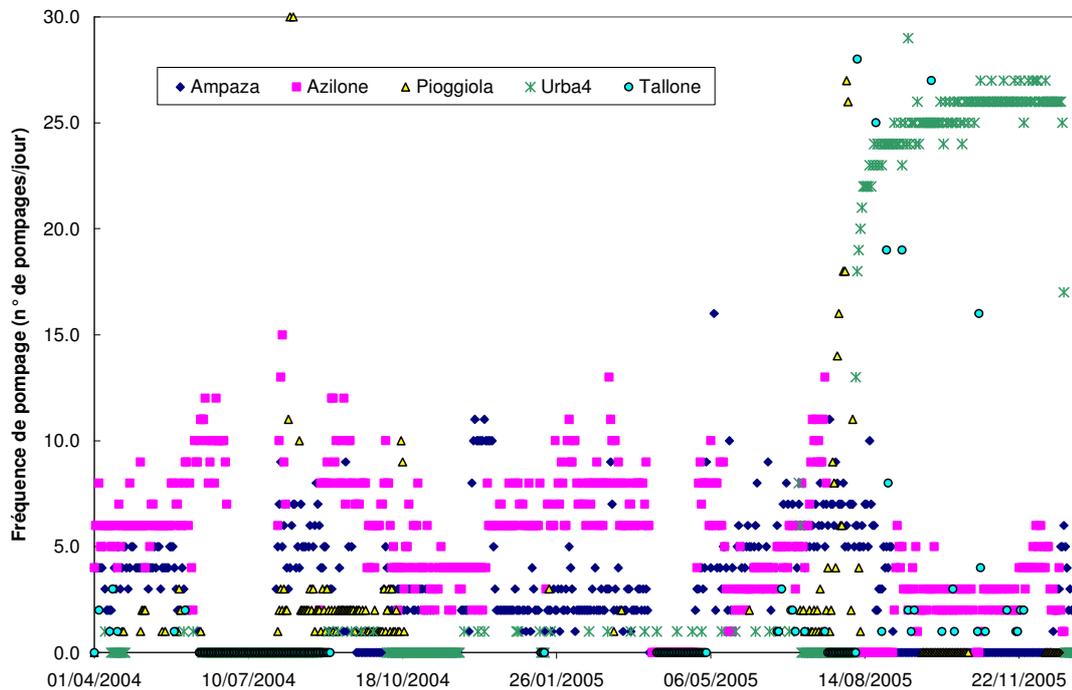


Figure 5 : Fréquences de pompage (nombre de pompages par jour) – zoom sur les fréquences de pompage comprises entre 0 et 30.

Pour Tallone, les grandes fréquences de pompage observées sont liées au même type de stratégie de pompage que pour Urba 4. Cependant, les pompages sont relancés ici par un capteur de niveau haut qui semble placé à une dizaine de mètres seulement au dessus du capteur de niveau bas. Ceci donne lieu à des pompages plus fréquents que dans le cas d'Urba 4, pour des durées de pompage proches.

La Figure 6 présente les **débits moyens journaliers** calculés, pour chacun des forages, à partir des temps de pompage cumulés sur la journée et du débit d'exploitation estimé (cf. principe de calcul présenté au sein du § 2.3.2. et Annexe 2). Ce dernier n'est pas obtenu de la même manière suivant les forages.

Dans le cas d'Azilone, il a été estimé au moyen d'une mesure réalisée sur site au cours d'un événement de pompage (le volume pompé au cours du temps est contrôlé sur le compteur volumétrique placé sur le tuyau d'exhaure). Pour les autres forages, il a été estimé à l'aide des relevés des compteurs effectués lors des visites de récupération des données et des temps de pompage cumulés sur la période entre deux visites (cf. Annexe 2). Les débits moyens journaliers sont compris, pour tous les forages, entre 0.5 et 3 m³/h (Figure 6).

Sur cette même figure sont indiqués les débits d'exploitation retenus pour chaque forage pour calculer les débits moyens journaliers. Il est intéressant de noter que ces débits sont presque systématiquement supérieurs (au maximum de l'ordre de 1 m³/h) aux débits d'équipement préconisés suite aux essais de pompage préalables à leur mise en exploitation.

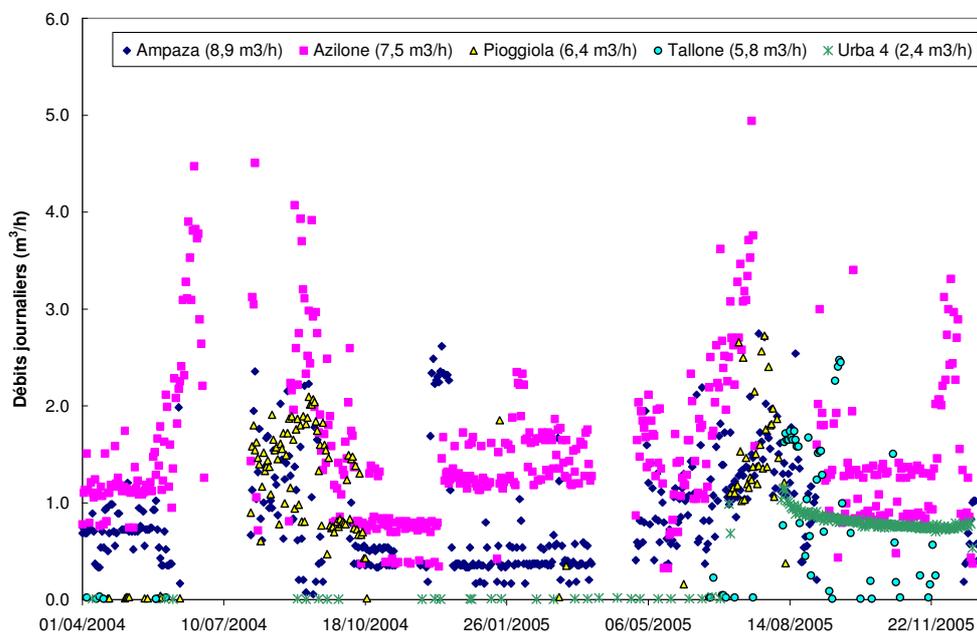


Figure 6 : Débits moyens journaliers de pompage (produit du débit de pompage par le temps de pompage cumulé sur la journée, ramené à un pompage continu de 24h) des forages suivis. Les très faibles valeurs correspondent à des artéfacts de calcul. Pour chaque forage, le débit d'exploitation retenu pour le calcul du débit moyen journalier, est indiqué dans la légende.

L'augmentation de la durée et de la fréquence de pompage pendant la saison estivale se traduit logiquement par une augmentation des débits moyens journaliers.

L'importance des rabattements provoqués par le pompage varie en fonction de la durée pendant laquelle celui-ci s'exerce (Figure 7). D'une manière générale, le rabattement tend à se stabiliser lorsque les durées de pompage sont suffisamment longues (cf. forages d'Ampaza, Azilone et Pioggiola sur la Figure 7). Les valeurs qui se situent totalement en dehors de la tendance logarithmique de l'évolution des rabattements sont dues à des artéfacts de calcul. En effet, le rabattement est ici calculé comme la différence de niveau mesurée entre le début (déclenchement) et la fin (arrêt) du pompage, sans préjuger du contexte de ce pompage ; par exemple, un rabattement très faible sera calculé pour un pompage de longue durée faisant presque immédiatement suite à un pompage préalable ayant déjà rabattu de manière importante le niveau de l'eau dans le forage.

La relation observée entre les rabattements et les temps de pompage est un peu différente dans le cas des forages de Tallone et d'Urba 4, du fait de leur stratégie de pompage particulière. En particulier pour Tallone, on observe des rabattements soit très forts, soit très faibles pour des durées de pompage similaires. Ceci s'explique par le fait que le premier pompage de la journée sur ce forage (après une nuit de repos due à la stratégie de pompage appliquée) provoque un rabattement complet et rapide qui atteint le capteur de niveau bas. Les pompages suivants reprennent dès que le capteur de niveau haut (vraisemblablement situé à une dizaine de mètres plus haut que le capteur de niveau bas) est atteint. Ces pompages ne provoquent alors que des rabattements faibles (voir ci-dessus le mode de calcul du « rabattement »), de l'ordre de la dizaine de mètres.

Une stratégie de pompage similaire explique les valeurs observées pour Urba 4 sauf que le pompage intensif n'est pas arrêté pendant la nuit. Ceci explique que les rabattements observés soient tous du même ordre de grandeur et que les pompages durent rarement plus d'une heure.

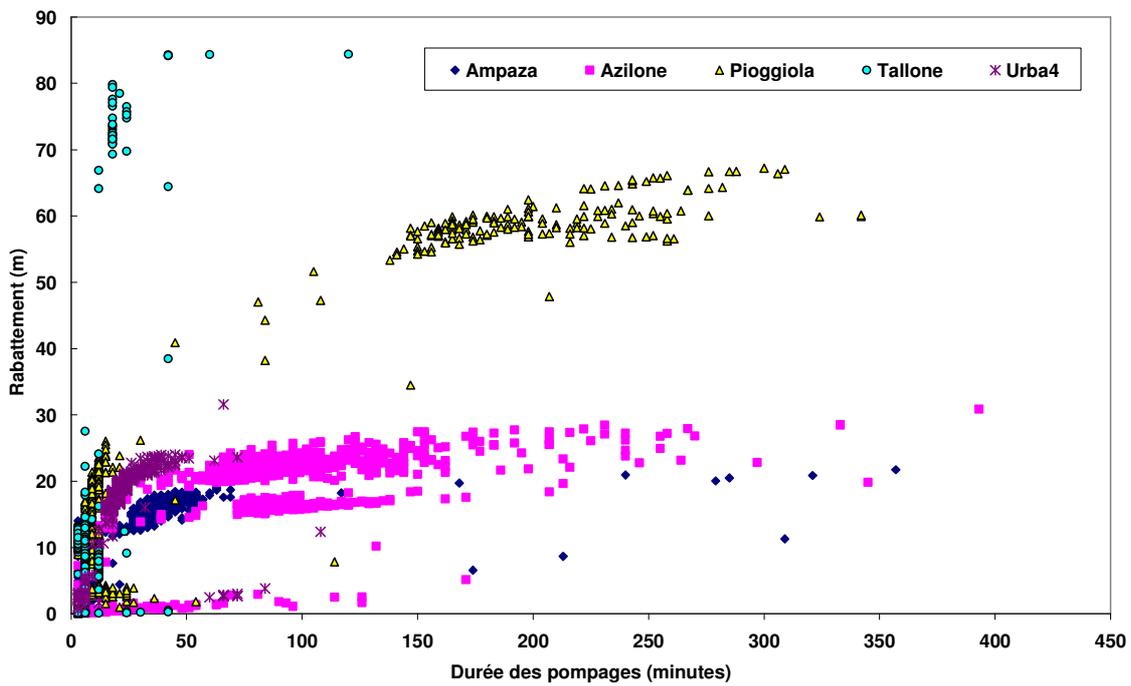


Figure 7 : Rabattements provoqués par les pompages en fonction de leur durée (ces rabattements sont calculés sans correction des pertes de charge quadratique).

3.2. DISTINCTION TYPOLOGIQUE

Les roches de socle granitique ne sont généralement aquifères qu'au sein de leur frange superficielle, sur les 100 premiers mètres environ sous la surface du sol, qui a été soumise à des processus d'altération supergènes ([Maréchal *et al*, 2003]). Le profil d'altération type comprend, de haut en bas, les horizons suivants (Figure 8), qui possèdent des propriétés hydrodynamiques spécifiques ([Caballero *et al*, 2005]).

- Les altérites (ou saprolites) couvrent la roche « saine » sur une épaisseur variable (de 0, quand cet horizon a été érodé, à plusieurs dizaines de mètres). Du fait de sa dominante argilo-sableuse, ce compartiment se caractérise par une porosité pouvant être importante et par une perméabilité relativement faible. Lorsqu'il est saturé en eau, ce compartiment assure donc une fonction capacitive de stockage des eaux souterraines au sein de l'aquifère.
- L'horizon fissuré est constitué de roche dure affectée, sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, par la présence de fissures de fréquence décroissante avec la profondeur, qui résultent, elles aussi, du processus d'altération ([Wyns *et al*, 1999, Wyns *et al*, 2004]). Leur genèse est due principalement à l'altération des minéraux phylliteux (biotite en particulier), dont le gonflement provoque cette fissuration qui s'exprime préférentiellement, pour les granites à texture équante, le long de plans sub-horizontaux. Cet horizon assure la fonction transmissive de l'aquifère et est capté par la plupart des forages réalisés en région de socle.

Le substratum sain n'est perméable que très localement, là où il est affecté par des fractures d'origine tectonique, le plus souvent sub-verticales.

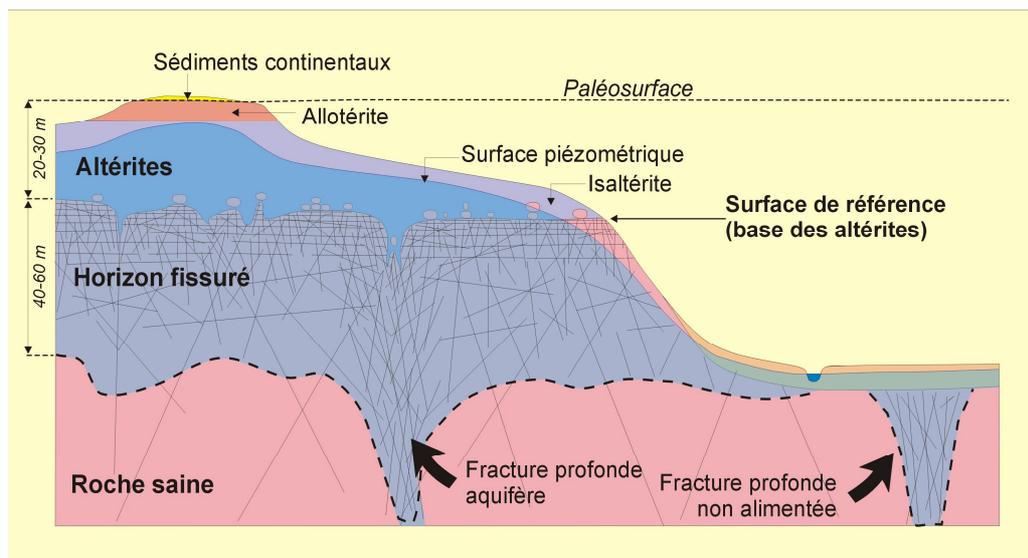


Figure 8 : Modèle conceptuel de la structure des aquifères de socle.

Les spécificités des propriétés hydrodynamiques de ces trois horizons (altérites ; horizon fissuré ; roche saine fracturée) permettent de distinguer grossièrement deux types de **contextes aquifères** différents, suivant que l'effet de l'altération, de l'érosion et de la tectonique auront affecté le socle granitique. Nous pouvons ainsi différencier :

- des **aquifères de type « fissuré avec couverture d'altérites »**, correspondant à des environnements où le profil d'altération aura été préservé de l'érosion,
- des **aquifères de type « fissuré sans couverture d'altérites »**, où l'érosion aura fait disparaître la majeure partie des altérites et une partie de l'horizon fissuré ou bien lorsque la fissuration est principalement liée à de la fracturation d'origine tectonique.

La **fracturation tectonique** peut bien sûr intervenir dans les deux types de contexte, tout comme elle peut constituer un contexte aquifère distinct. (Ce type d'aquifère est d'ailleurs classiquement recherché lors de la plupart des études hydrogéologiques, notamment lorsque des méthodes d'identification de la fracturation sur photographies aériennes sont mises en œuvre). Cependant, les coupes géologiques sommaires relevées lors de la réalisation des forages d'eau ne permettent généralement pas de distinguer les fractures d'origine tectonique, des fissures dues à l'altération.

Parmi les 6 forages suivis, 4 d'entre eux peuvent a priori être classés dans le contexte aquifère de type « fissuré sans couverture d'altérites », sur la base de leur coupe géologique. Il s'agit des forages de Pioggiola, Tallone et les deux forages d'Urbalacone (Urba 3 et Urba 4). Les 2 forages restants (Ampaza et Azilone) peuvent être classés dans le contexte où la couverture d'altérites a été préservée. Cette classification est cohérente avec leur contexte morphologique (Tableau 1).

3.3. FORAGES EN CONTEXTE AQUIFÈRE DE TYPE « FISSURÉ SANS COUVERTURE D'ALTÉRITES »

3.3.1. Pioggiola

Synthèse des observations

Le forage de Pioggiola a été implanté sur la base de l'observation d'une fracturation SW-NE, repérée sur photo aérienne, fracturation qui pourrait être à l'origine d'une source située à proximité (DIREN SEMA, 2001).

Réalisé en 2001 et d'une profondeur de 75 m, il est implanté dans des monzogranites à grain moyen dans lesquels la principale venue d'eau a été mise en évidence entre 66 et 72 m (Figure 9). La couverture altérée observée a une épaisseur de 3 m (il s'agit très vraisemblablement d'altérites récentes, sans rapport avec un éventuel profil d'altération puissant) et aucune venue d'eau n'a été repérée à sa base. Des fissures ont été repérées à 30, 40 et 60 m de profondeur ; elles sont marquées par la présence d'argile grise.

Les essais de pompage ont conduit à estimer une transmissivité comprise entre 1,4 et $2,6 \cdot 10^{-5}$ m²/s, un débit spécifique de 0,37 m³/h/m et un débit d'équipement de 5 m³/h pour 12 heures de pompage quotidien durant les 3 mois d'étiage, en considérant un rabattement maximal admissible de 56 m (niveau piézométrique à l'étiage supposé à 10 m/sol (DIREN-SEMA, 2001)).

Un débit réel d'exploitation égal à 6,4 m³/h a été estimé pour ce forage (Annexe 2). Malgré qu'il soit supérieur de 1,4 m³/h aux 5 m³/h préconisés suite à l'essai de pompage, le débit de pompage estimé ne pose pas de problème dans le cadre de la stratégie de pompage actuelle (notamment du fait que le niveau piézométrique à l'étiage se situerait plutôt autour des 3 m sous la surface du sol selon nos observations - Figure 11). Cette stratégie est cependant proche d'un état critique puisque les 65 m de rabattement provoqués par le pompage vont malgré tout, légèrement en deçà (68 m environ) des principales venues d'eau observées à partir de 66 m.

Les données du pompage d'essai étant disponibles, nous avons procédé à une nouvelle interprétation, de manière à intégrer notamment les pertes de charge quadratiques et des hypothèses supplémentaires sur les limites hydrodynamiques de l'aquifère (Figure 10). Une synthèse de cette interprétation ainsi que la représentation des données dans un diagramme semi-logarithmique sont présentées à l'Annexe 4.

La valeur du coefficient de pertes de charges quadratiques a été estimée à $0,57 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ à partir des rabattements mesurés pour les deux paliers de pompage réalisés lors de l'essai de pompage (Annexe 3). Les deux couples de valeurs (débit de pompage/rabattement mesuré) obtenus à cette occasion ont été complétés par un troisième, calculé avec les données de la période 01/04/04 – 31/12/05. Celui-ci a été estimé en mesurant le rabattement correspondant à un pompage au débit d'exploitation actuel, de même durée que celle au terme de laquelle les rabattements ont été mesurés lors de l'essai de pompage (259 minutes). Ceci implique que, pour un pompage réalisé au débit d'exploitation actuel (6,4 m³/h), les pertes de charge quadratiques sont à l'origine d'un rabattement de 23,35 m (sur les 65 m de rabattement total provoqués par ce pompage au bout de 4h30).

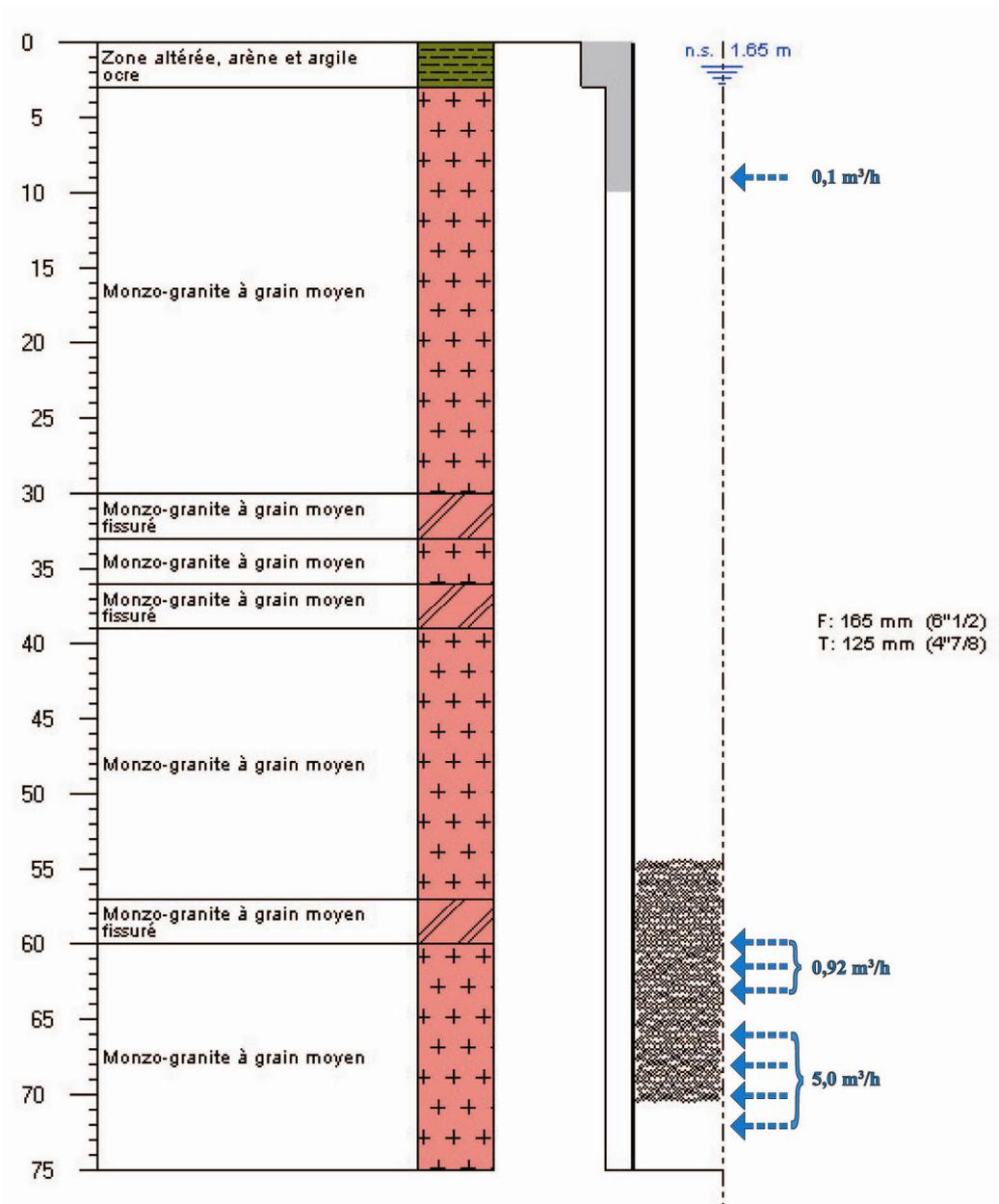


Figure 9 : Coupes géologique et technique du forage de Pioggiola.

L'ajustement des rabattements s'est fait de manière à simuler le mieux possible les rabattements obtenus pour le palier de pompage à $2 \text{ m}^3/\text{h}$, car il est plus proche du débit d'exploitation préconisé. La solution choisie (Theis et Jacob) est celle pour laquelle l'on obtient le meilleur ajustement (la solution théorique de Gringarten (1974), conçue pour simuler l'effet d'une seule fracture recoupée par un forage, n'a, par exemple, pas donné de meilleur résultat).

Une transmissivité de $1,56 \cdot 10^{-5}$ m²/s a été obtenue en intégrant les pertes de charge quadratiques et une limite alimentée se manifestant au bout de 2h30 de pompage. La proximité d'une petite source et du ruisseau d'Avorozia, qu'alimentent plusieurs sources situées au nord-ouest du forage ([Caballero *et al*, 2005]), pourraient expliquer la nécessité de considérer l'existence de cette limite alimentée pour interpréter cet essai.

Le coefficient d'emmagasinement estimé pour cet essai de pompage (1,49 – Annexe 4), est présenté à titre indicatif, car théoriquement, il ne peut être calculé que lorsque le suivi des rabattements provoqués par le pompage se fait au niveau d'un piézomètre (essai de nappe) et non au niveau du puits de pompage lui-même (essai de puits). Le fait d'interpréter l'essai en intégrant les pertes de charge quadratiques, rend l'estimation de l'emmagasinement possible, mais ne compense pas l'incertitude importante qui affecte la valeur estimée. De plus, l'estimation des pertes de charge peut être erronée et conduire à une mauvaise estimation de la valeur de l'emmagasinement. Cela semble être par exemple le cas pour le forage de Pioggiola, où le diagramme semi-logarithmique d'interprétation de l'essai présenté à l'Annexe 4, montre que les rabattements simulés sur le premier palier de pompage se placent sur une droite parallèle aux rabattements observés. Des pertes de charge quadratiques moins importantes permettraient probablement de simuler des rabattements plus proches des rabattements observés sur ce palier.

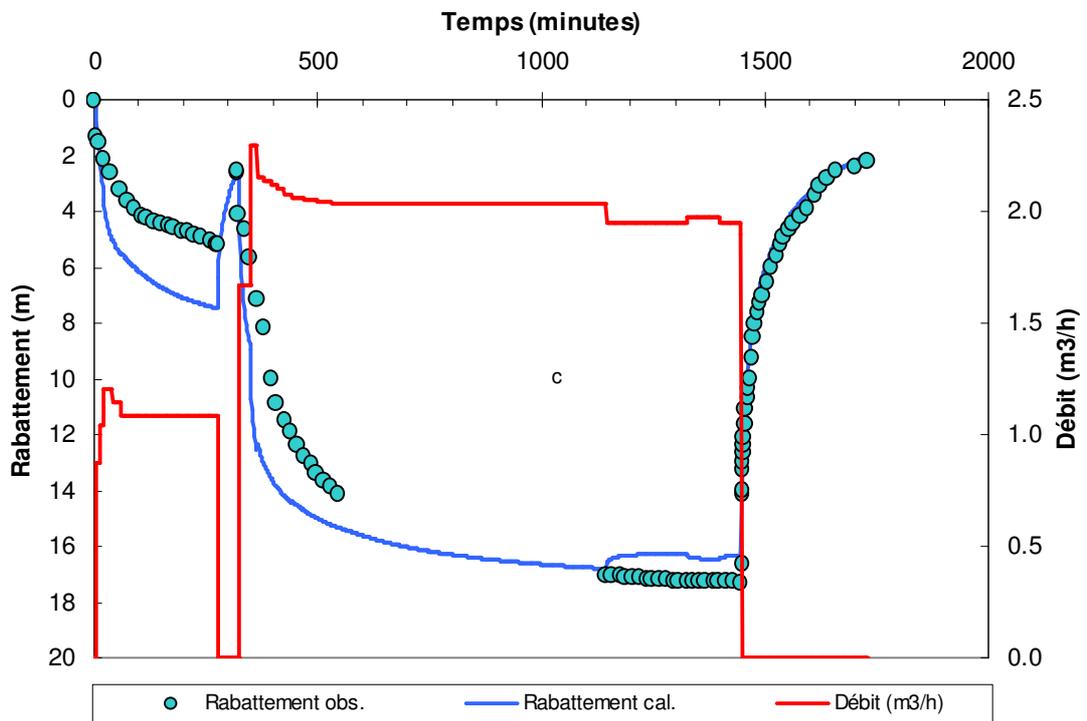


Figure 10: Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 26 juin 2001 sur le forage de Pioggiola, avec prise en compte des pertes de charge quadratique et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 150 minutes de pompage.

Un nouvel essai de puits avec des paliers de débit plus proches du débit d'équipement préconisé serait souhaitable pour permettre une interprétation plus précise et plus robuste.

Le coefficient de perte de charge quadratique calculé a été utilisé pour corriger les niveaux piézométriques observés (suivant l'équation (2)) de manière à pouvoir étudier les relations existant entre précipitations efficaces, débit de pompage et niveau piézométrique. La Figure 11 présente l'effet de la correction ainsi que les différentes variables citées, sur l'ensemble de la période d'étude. La Figure 12 présente un zoom sur une période sans pompages, de manière à mieux apprécier les fluctuations naturelles du niveau piézométrique.

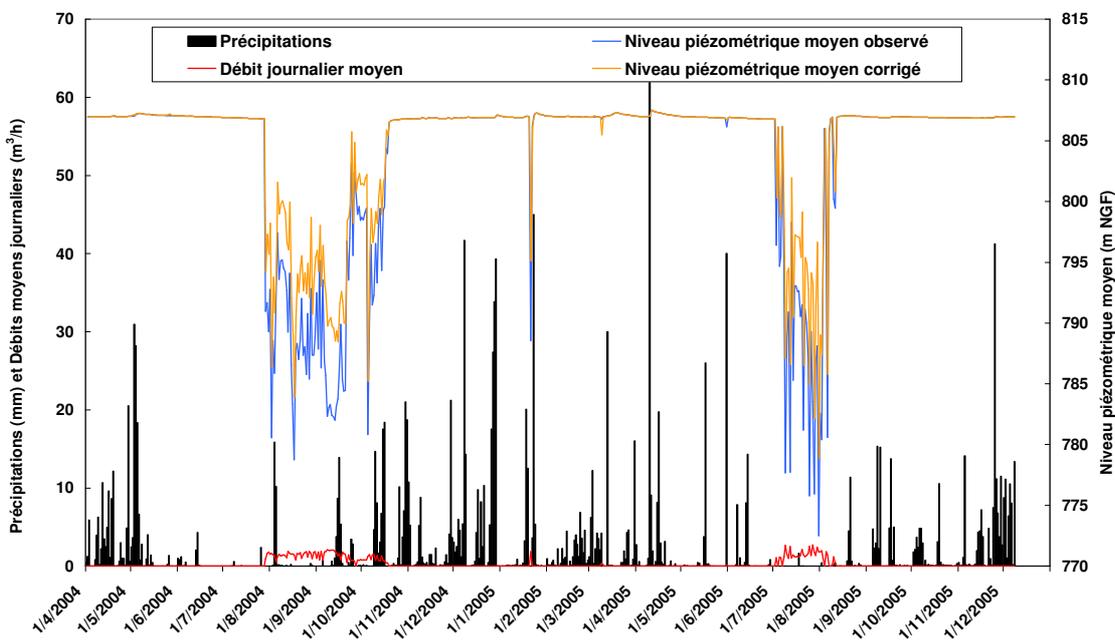


Figure 11 : Niveau piézométrique moyen observé et corrigé des pertes de charge quadratique (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m³/h) mesurés au forage de Pioggiola (altitude : 810 m NGF).

En dehors des périodes de pompage, le niveau piézométrique dans le forage semble assez stable (Figure 12). On observe des phénomènes de recharge sur quelques jours lors des épisodes de fortes précipitations (variations piézométriques de l'ordre de 50 cm) et des tarissements qui semblent durer plusieurs semaines. L'impact des pompages est clairement prépondérant pendant la période estivale, où il provoque des rabattements du niveau piézométrique moyen pouvant atteindre 40 m.

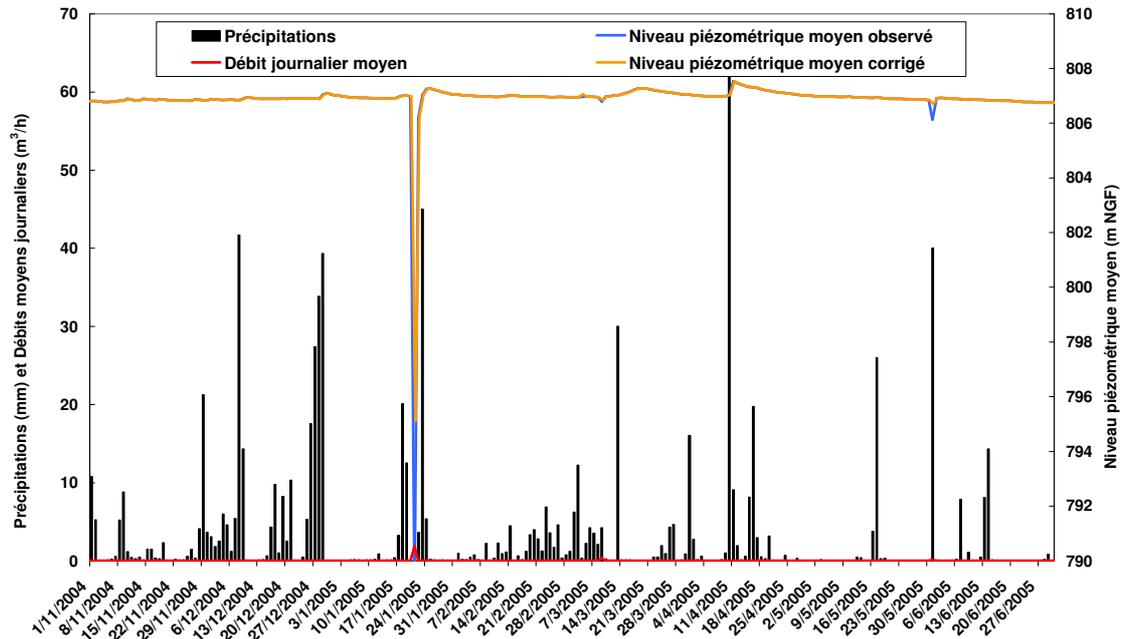


Figure 12 : Niveau piézométrique moyen observé et corrigé des pertes de charge quadratique (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m^3/h) mesurés au forage de Pioggiola (altitude : 810 m NGF) – zoom sur la période du 01/11/04 au 30/06/05.

La saison de pompage 2004 a démarré fin juillet et s'est prolongée assez tard puisqu'on observe des pompages jusqu'au milieu du mois d'Octobre 2004. La saison de pompage 2005 est beaucoup plus courte mais elle commence plus tôt (début juillet). Les volumes prélevés pendant ces deux saisons sont estimés à $2874 m^3$ pour 2004 et $1610 m^3$ en 2005.

Relations Précipitations/Débit de pompage/Niveau Piézométrique

Le calcul dans TEMPO du diagramme d'auto-corrélation des niveaux piézométriques hors périodes de pompage renseigne sur le degré d'interdépendance des événements affectant la série de données pour des intervalles de temps de plus en plus longs (Figure 13). Si l'on considère que l'auto-corrélation n'est plus significative pour des valeurs inférieures à 0.3, on peut estimer que l'aquifère de Pioggiola présente une inertie de l'ordre d'une trentaine de jours. Cette inertie traduit à la fois la durée de la recharge de l'aquifère par les précipitations mais aussi son tarissement naturel. La forme aiguë du pic d'auto-corrélation suggère que l'effet de la recharge s'estompe au bout de quinze à vingt jours, puisque l'on atteint une valeur de corrélation de 0.4, suivie de la phase de tarissement, dont la durée dépasse certainement la dizaine de jours mais ne peut être estimée plus précisément avec ce type de méthode.

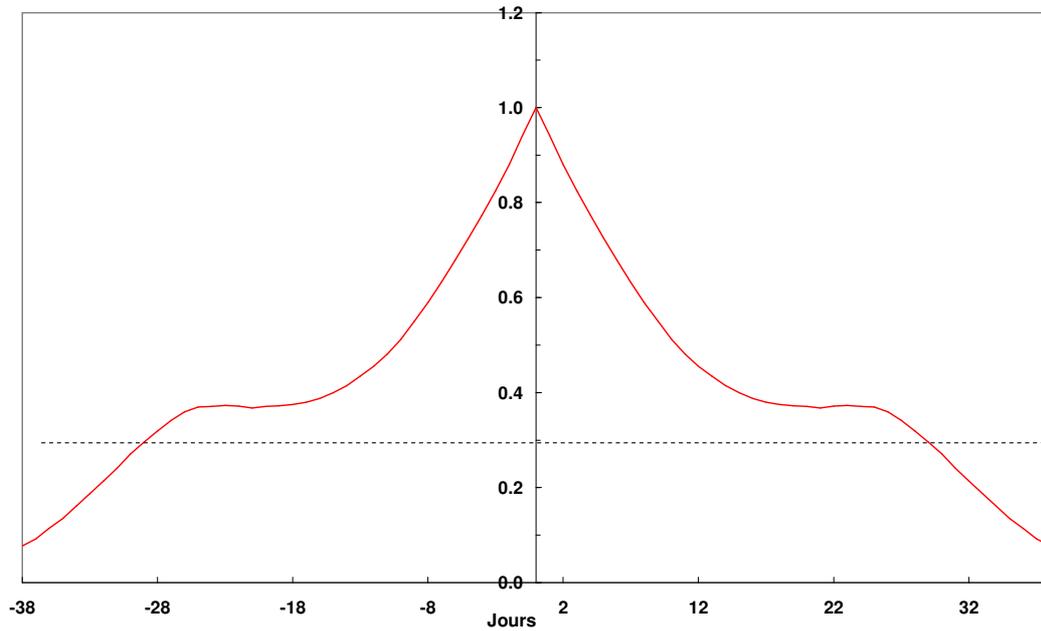


Figure 13 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage de Pioggiola entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.

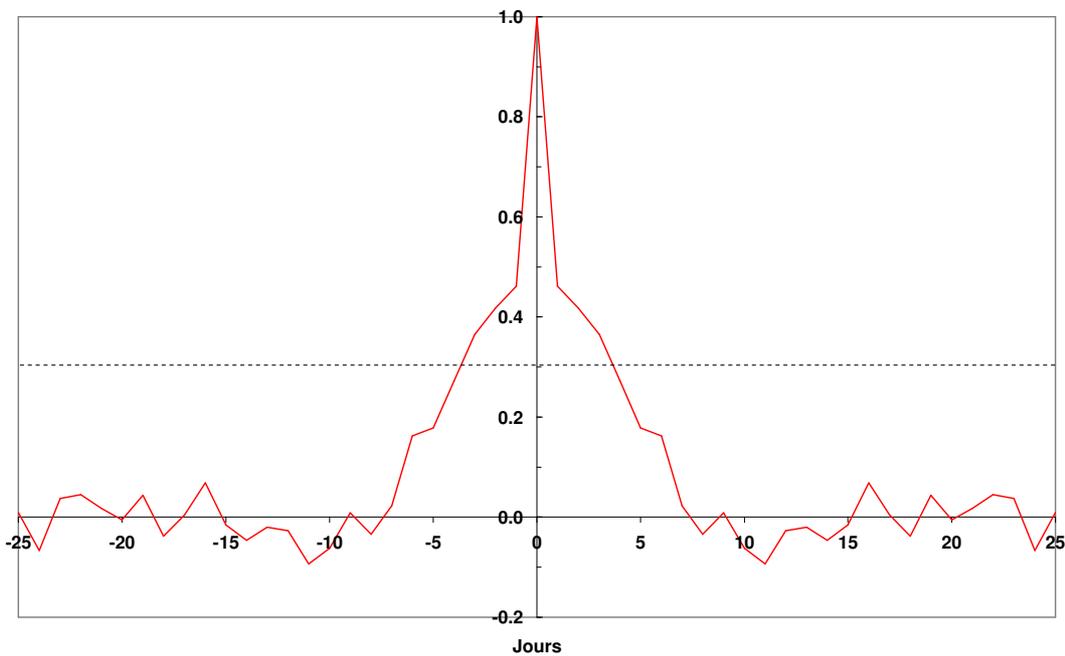


Figure 14 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique observée au forage de Pioggiola entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.

Le même type de diagramme calculé uniquement en période de pompage révèle une réponse du système aux pompages beaucoup plus rapide, puisque leur effet est fortement atténué au-delà d'une journée, pour disparaître au bout de 6 jours environ (Figure 14). Ce diagramme met en évidence la vitesse à laquelle l'aquifère réagit aux changements du débit de pompage moyen et le temps qu'il met à retrouver sa piézométrie de départ, lorsque les variations de débit cessent.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière (en dehors des périodes de pompage) montre que l'effet d'un événement de précipitation provoque une augmentation de la piézométrie dans les deux jours (maximum atteint à $t + 2$ jours), puis une décroissance se produit pendant plus d'une vingtaine de jours (Figure 15). Le comportement global de la réponse évoque la recharge puis la vidange d'un aquifère rechargé par la pluie efficace. La valeur de la corrélation (à $t + 2$ j) étant cependant faible (elle ne dépasse pas 0,2), les précipitations n'ont qu'un impact modéré en terme d'amplitude de variation du niveau, ce qui se vérifie sur la Figure 11.

Le corrélogramme croisé entre les débits moyens journaliers et la piézométrie moyenne journalière pendant la période de pompage uniquement présente à l'inverse une forte corrélation négative, ce qui indique que, logiquement, le niveau piézométrique diminue fortement avec l'augmentation des débits (Figure 16). La rapide décroissance de l'anti-corrélation montre à nouveau que les effets des pompages sur la piézométrie disparaissent au bout de quelques jours (cf. interprétation de l'auto-corrélogramme de la piézométrie).

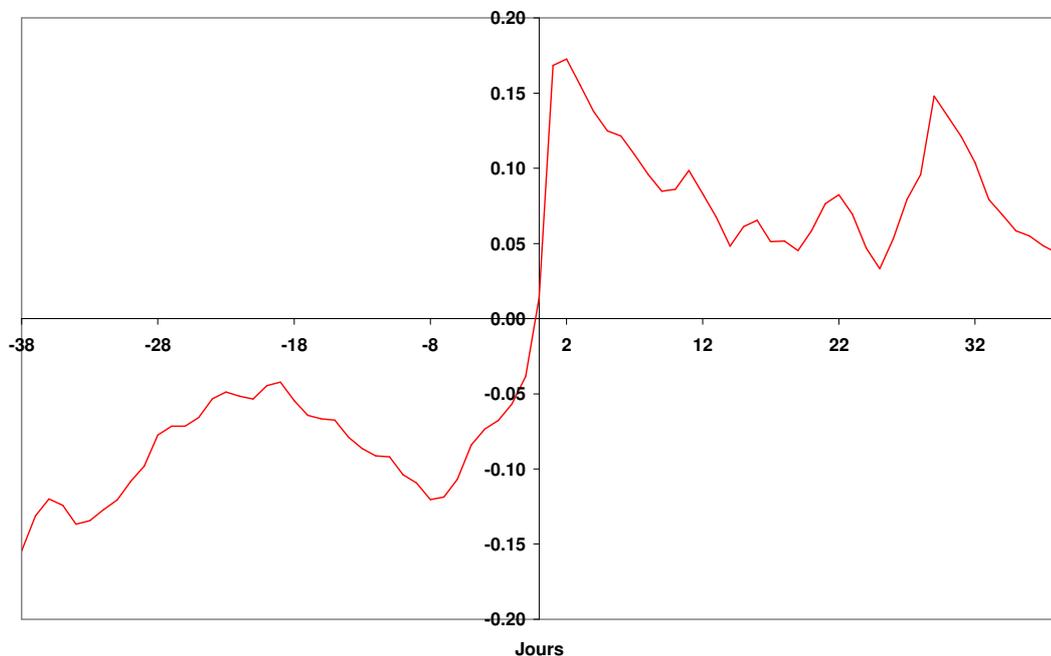


Figure 15 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Pioggiola (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage)

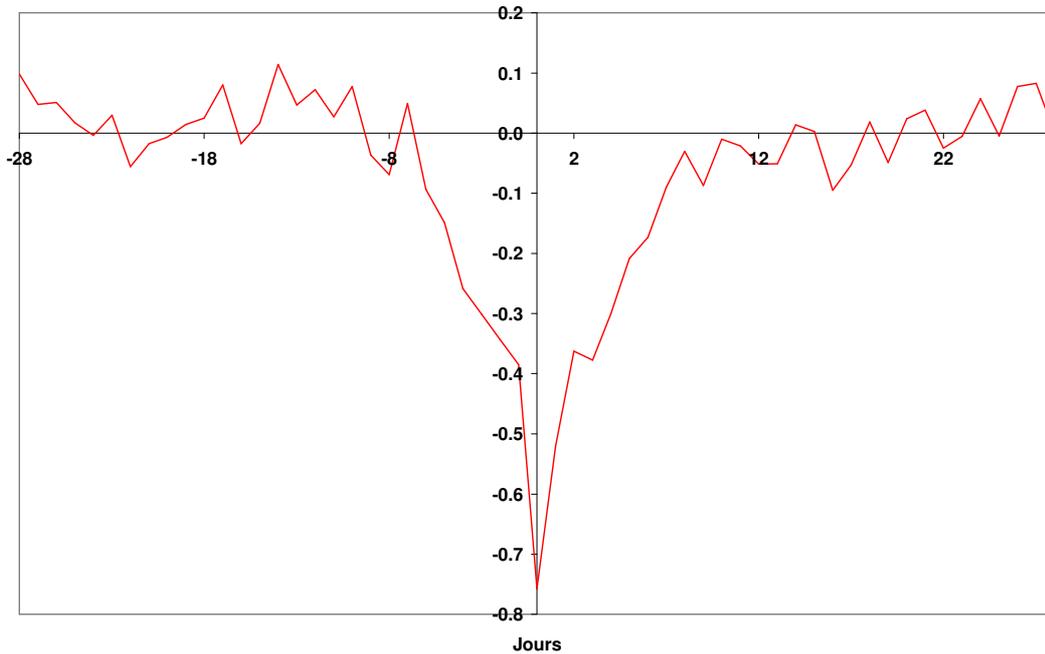


Figure 16 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique à Pioggiola (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).

Un modèle de transfert, permettant de reproduire les variations piézométriques à partir des précipitations efficaces (calculées à partir des précipitations et de l'ETP) et des débits de pompage, a été construit pour étudier ce forage. Les pompages ayant un impact bien plus important que les précipitations sur la piézométrie, le calage du modèle a été réalisé en dehors des périodes de pompage intensif (Figure 17 et Figure 18). La relativement bonne qualité du calage au vu des valeurs des critères d'ajustement du modèle aux observations, est fortement liée au fait que le niveau piézométrique observé reste relativement stable. En effet, le modèle utilise un niveau piézométrique de base (fixé par l'utilisateur et correspondant au plus bas niveau observé sur la période de calage), à partir duquel sont simulés les effets des précipitations et des pompages. Les périodes sans pompages ni précipitations efficaces, sont donc assez facilement simulés. La qualité très relative des données de précipitation utilisés pour ce forage ([Caballero *et al*, 2005]), explique en partie les différences entre le modèle et les observations pour les précipitations efficaces importantes. L'effet des pompages isolés du mois de janvier et mars est par contre assez bien restitué.

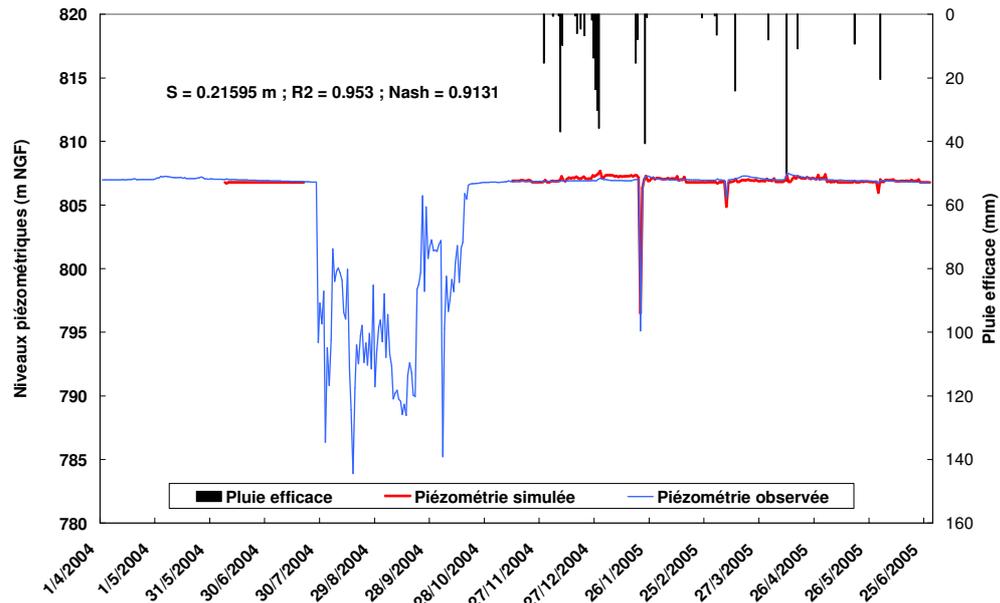


Figure 17 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour Pioggiola à partir des précipitations et des débits, sur la période allant du 10/06/04 au 22/07/04 et du 14/11/04 au 28/06/05. La pluie efficace est calculée à partir des données de précipitation et d'ETP de Météo-France. Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations sont S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R^2 (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1).

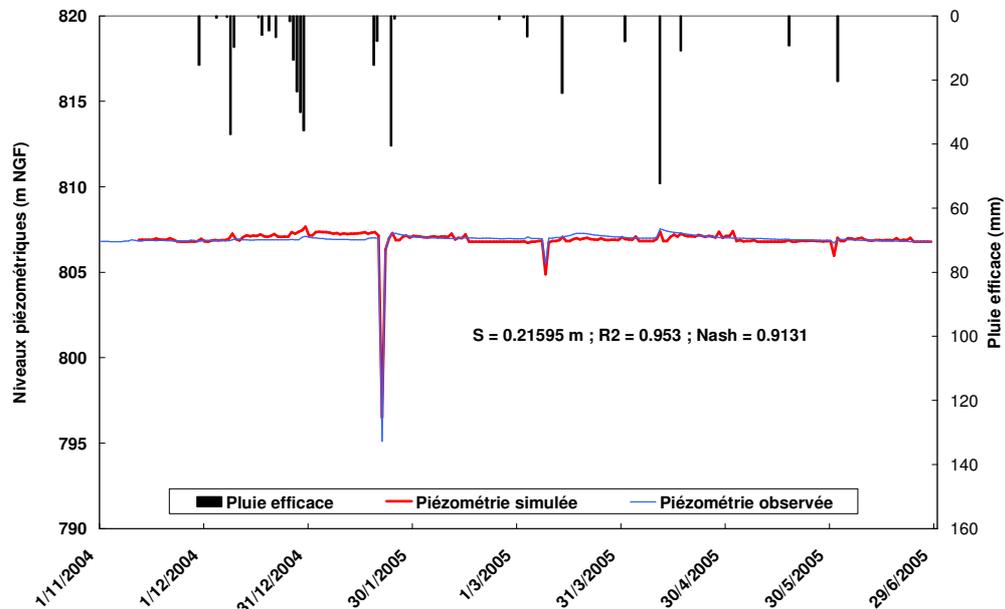


Figure 18 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour Pioggiola à partir des précipitations et des débits, zoom sur la période allant du 14/11/04 au 28/06/05.

Les caractéristiques de la fonction de transfert permettant de simuler l'évolution du niveau piézométrique sont conformes aux observations faites sur les chroniques de piézométrie à l'aide des corrélogrammes (Figure 19). La réponse impulsionnelle du système aux précipitations se décompose en deux composantes : une rapide, traduisant le temps de réaction du système à l'impulsion de précipitation au travers du processus d'infiltration et/ou transfert de pression et une lente, qui contrôle le temps que met l'effet de l'impulsion à disparaître (tarissement).

Le calage du modèle de transfert présenté sur la Figure 17 est obtenu en associant les réponses impulsionnelles du système aux précipitations et aux pompages. Pour les précipitations, la composante rapide de la réponse impulsionnelle ne s'exprime pas et la composante lente s'exprime pendant 23 jours (Figure 19). Ceci indique que le système réagit aux précipitations dès le lendemain et que cette réaction est contrôlée par un mécanisme de transfert relativement lent au travers de la zone non saturée et au sein de l'aquifère (lente montée des niveaux piézométriques). La réponse impulsionnelle pour les débits ne présente qu'une composante lente. Elle indique que l'effet des pompages s'exprime le jour même et qu'il disparaît au bout de 2 jours. La prépondérance de l'effet des pompages sur la piézométrie par rapport aux précipitations, est due à l'amplitude supérieure de sa réponse impulsionnelle. Les valeurs d'amplitude pour les deux réponses impulsionnelles sont cependant faibles, ce qui est lié aux faibles variations piézométriques observées pendant la période de calage choisie (Figure 17).

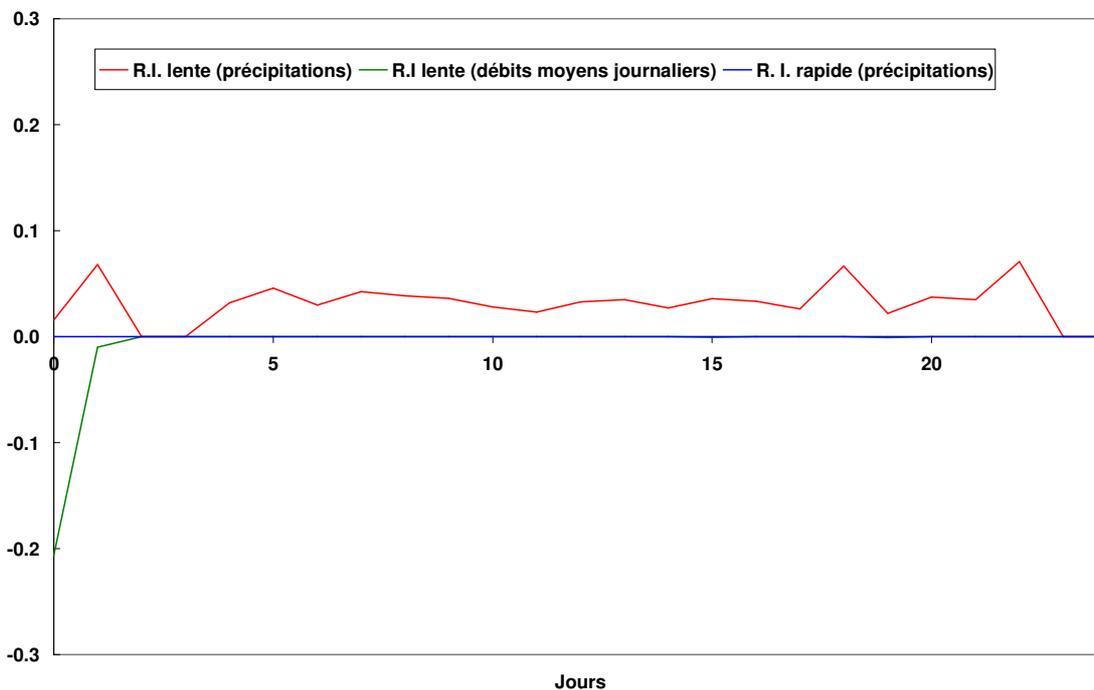


Figure 19: Composantes des réponses impulsionnelles (R.I.) résultant du calage de la fonction de transfert servant à simuler les variations piézométriques au forage de Pioggiola en fonction de la pluviométrie.

La simulation sur toute la période d'observation disponible permet de vérifier que les réponses impulsionnelles obtenues reproduisent relativement bien le fonctionnement du système puisque l'effet des pompages est relativement bien reproduit, bien que les plus forts rabattements ne soient pas simulés (Figure 20). Ce dernier point pourrait cependant résulter d'une mauvaise correction des pertes de charge quadratique.

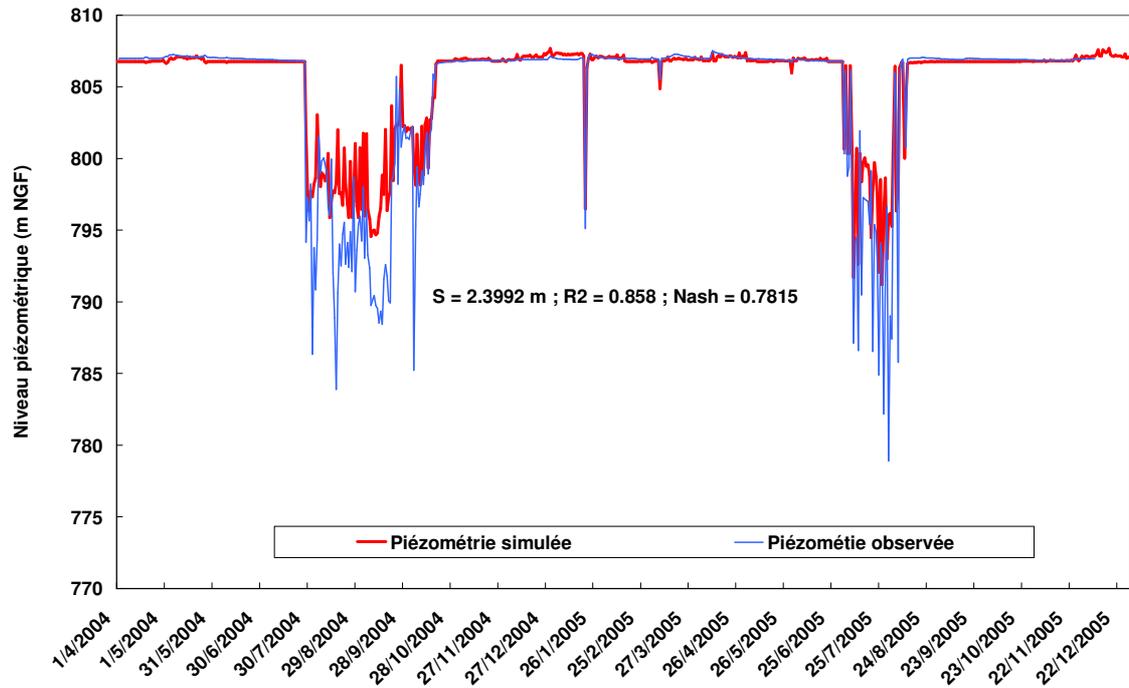


Figure 20 : Simulation de la piézométrie sur l'ensemble de la période de mesure à Pioggiola (01/04/04 au 31/12/05). Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R^2 (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont affichés.

3.3.2. Tallone

Synthèse des observations

Ce forage a été implanté sur la base de l'observation d'une fracture d'orientation ENE-OSO, repérée par photo-interprétation. Réalisé en 1998 et d'une profondeur de 126 m, est implanté dans des granodiorites de teinte grise à grain moyen, à biotite et à amphibole, avec des passages riches en orthose donnant localement à la roche une teinte rose (DIREN-SEMA, 1997 - Figure 21). Au forage, une couverture d'arènes argileuses de 12 m d'épaisseur recouvre les granodiorites, couverture à la base de laquelle de très faibles venues d'eau ont été observées. Les principales venues se situent au fond du forage entre 117 m et 122 m. Un grand nombre de sources apparaissent sur les flancs du plateau du Coscione, situé au nord-ouest du forage, à des altitudes généralement égales ou supérieures à celles du forage (959 à 1100 m).

Un pompage d'essai réalisé en août 1998 a permis d'estimer une transmissivité de l'ordre de 0,9 à $2,2 \cdot 10^{-5}$ m²/s et de proposer, pour un rabattement maximal admissible de 100 m (en considérant un niveau piézométrique à l'étiage de 14 m/sol et que la zone productive du forage se trouve au-delà de 117 m) un débit d'équipement de 5,1 m³/h, pour un pompage de 14 h quotidiennes pendant les 4 mois d'étiage (DIREN-SEMA, 1998).

Un débit réel d'exploitation égal à 5,8 m³/h a pu être estimé pour ce forage (Annexe 2). Malgré qu'il ne soit supérieur que de 0,7 m³/h par rapport aux 5.1 m³/h préconisés comme débit d'équipement, cela pourrait suffire pour expliquer les problèmes de productivité que ce forage rencontre (le maire de la commune regrette en outre que les volumes pompés soient bien inférieurs à ses attentes). En effet, l'observation des chroniques de données brutes présentées en Annexe 1 montre que l'intensité du pompage trop importante oblige la pompe à fonctionner par intermittence (arrêt de la pompe par le capteur de niveau bas, déclenchement lorsque le niveau de l'eau dans le forage remonte et atteint le capteur de niveau haut).

Les données du pompage d'essai étant disponibles, nous avons procédé à une nouvelle interprétation, de manière à y intégrer les pertes de charge quadratiques et des hypothèses supplémentaires sur les limites hydrodynamiques de l'aquifère (Figure 22). Une synthèse de cette interprétation ainsi que la représentation des données dans un diagramme semi-logarithmique sont présentées à l'Annexe 4.

Un coefficient de pertes de charges quadratiques égal à $1,22 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ a été estimé à partir des rabattements mesurés lors de l'essai de pompage, au bout d'une heure de pompage aux débits de 1,8 et 3 m³/h (Annexe 3). La valeur de ce coefficient, déterminé avec une très faible précision compte tenu du fait que seulement deux points de mesure sont disponibles, semble un peu élevée. Il serait sans doute intéressant de réaliser un nouvel essai de puits, comprenant 4 paliers de pompage, pour vérifier ce calcul. En effet, ce coefficient suggère que, pour un pompage réalisé au débit d'exploitation actuel (5,8 m³/h), les pertes de charge quadratiques seraient à l'origine d'un rabattement de 41 m, sur les 50 m de rabattement total provoqués par le pompage au bout d'une heure. L'effet des pertes de charge quadratique semble donc un peu exagéré et de plus, le rabattement total que cette estimation propose est bien inférieur aux rabattements qui sont observés sur la chronique des données brutes présentées en Annexe 1.

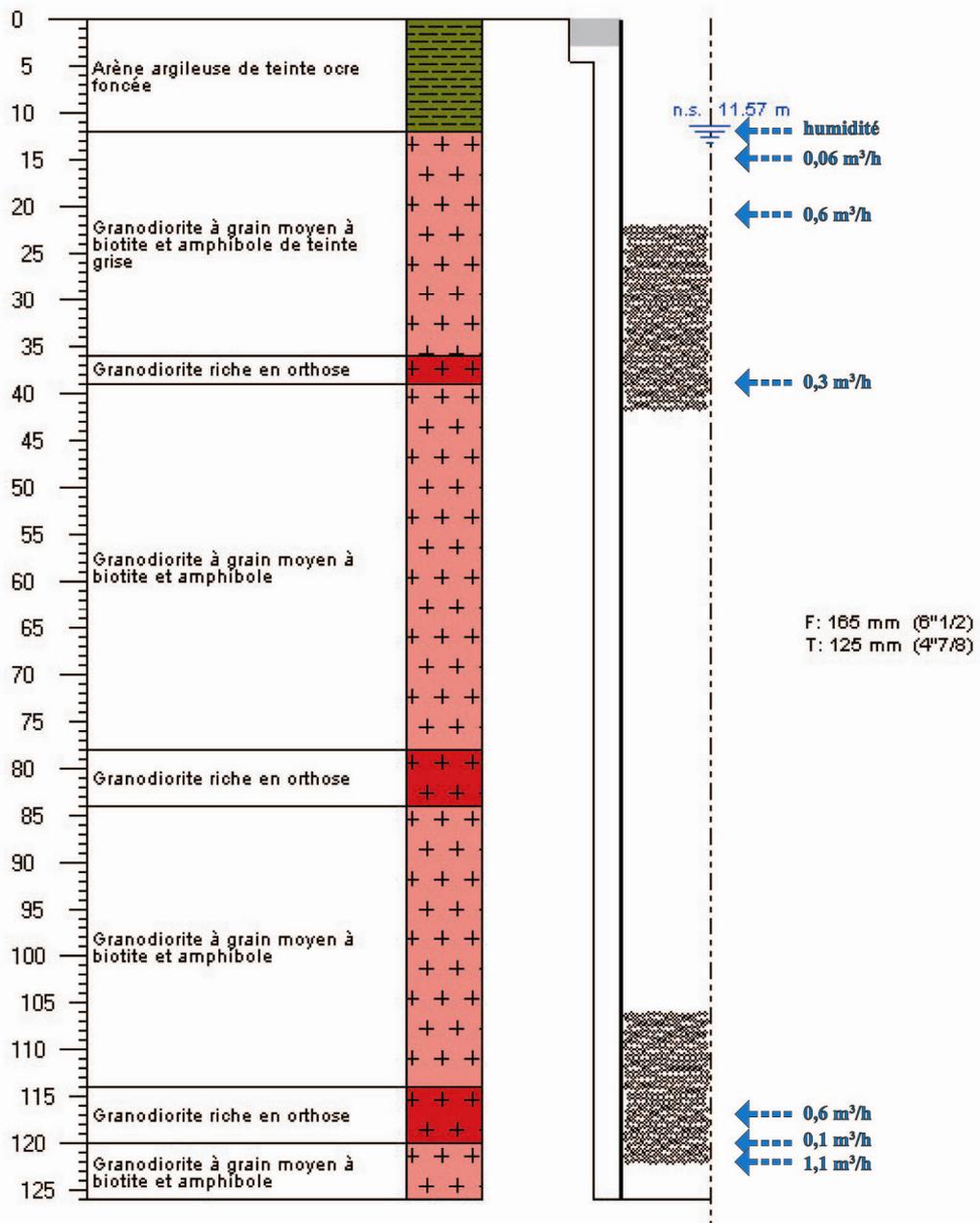


Figure 21 : Coupes géologique et technique du forage de Tallone.

L'ajustement des rabattements a été réalisé de manière à simuler le mieux possible les rabattements obtenus pour le palier de pompage à 3 m³/h, car il est le plus proche du débit d'exploitation préconisé. La solution choisie (Theis et Jacob) est celle pour laquelle l'on obtient le meilleur ajustement (la solution théorique de Gringarten (1974), conçue pour simuler l'effet d'une seule fracture recoupée par un forage, n'a, par exemple, pas donné de meilleur résultat).

Une transmissivité de $2,38 \cdot 10^{-5}$ m²/s a été obtenue en intégrant les pertes de charge quadratiques telles que déterminées ci-dessus et une limite alimentée se manifestant au bout de 5 heures de pompage. Cette limite semble réaliste dans la mesure où ce forage se trouve en aval du plateau du Coscione, au pied duquel un grand nombre de sources marquent l'existence d'un ou de plusieurs aquifères pouvant jouer le rôle de limite alimentée. De même, cette limite pourrait être liée à la présence du ruisseau de San Petru distant de 500 m, que recoupe la fracture repérée sur photo aérienne et sur laquelle le forage est censé être implanté. Cette dernière hypothèse reste cependant peu probable étant donné la faible durée de pompage au terme de laquelle se manifesterait cette limite (5h).

Le coefficient d'emmagasinement estimé pour cet essai de pompage ($6,44 \cdot 10^{-2}$ – Annexe 4), est présenté à titre indicatif (cf. § 3.3.1). Malgré le fait que son ordre de grandeur soit plausible (porosité de nappe libre comprise entre 6 et 7%), une grande incertitude affecte son estimation. Le diagramme semi-logarithmique d'interprétation de l'essai présenté à l'Annexe 4, montre que les rabattements simulés sur le premier palier de pompage se placent sur une droite parallèle aux rabattements observés, de la même manière que pour le forage de Pioggiola. Il est donc probable que les pertes de charge quadratiques soient surestimées, ce qui implique une estimation erronée de l'emmagasinement.

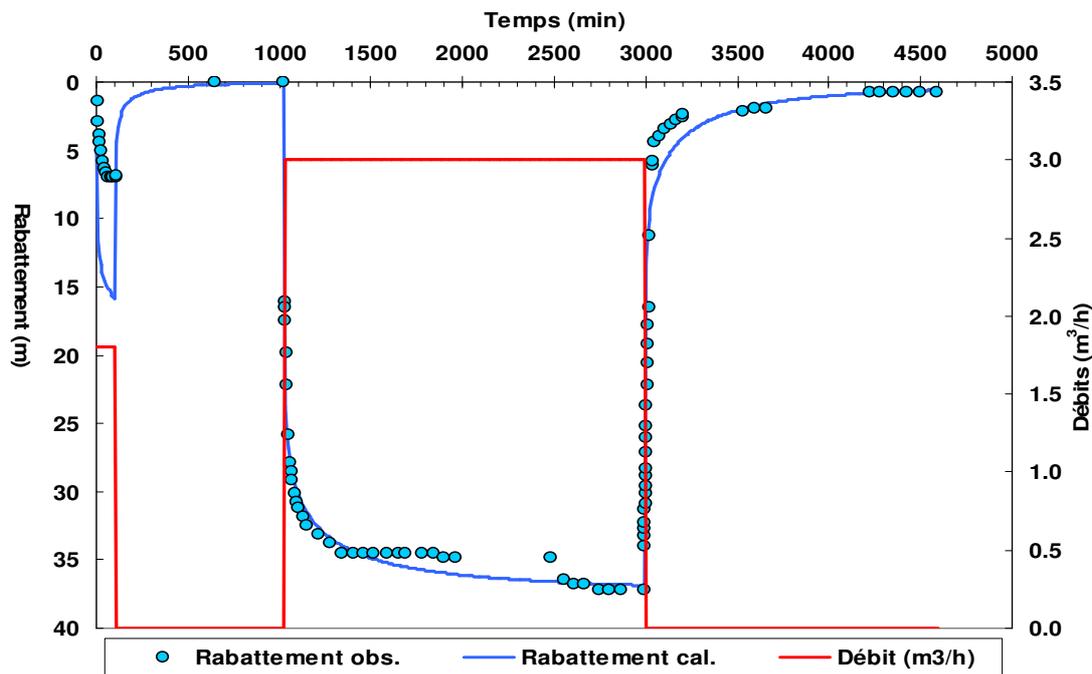


Figure 22 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé les 14 et 15 août 1998 sur le forage de Tallone, avec prise en compte des pertes de charge quadratique et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 300 minutes de pompage.

Un nouvel essai de pompage avec des paliers de débit plus proches du débit d'équipement préconisé serait souhaitable pour permettre un ajustement plus précis et plus robuste.

Malgré sa valeur probablement excessive, le coefficient de perte de charge quadratique a tout de même été utilisé pour corriger les niveaux piézométriques moyens observés (suivant l'équation (2)). Cette correction a cependant été modifiée ponctuellement pour éviter que des valeurs aberrantes en résultent. Les précipitations, débits de pompage moyens journaliers et niveaux piézométriques observés et corrigés concernant la période d'étude sont présentés sur la Figure 23. Des interpolations linéaires ont été faites sur les données lorsqu'il a été considéré que c'était possible (en l'absence de précipitations significatives - été 2004 par exemple). La correction et l'interpolation réalisées en début de période de pompage 2005, ont été faites en considérant que le pompage a démarré le dernier jour de la lacune (d'après le maire il aurait en fait démarré quelques jours plus tôt, sans pouvoir préciser quand). La lacune d'Avril 2004 n'a pas été comblée car des précipitations relativement importantes ont eu lieu à ce moment là.

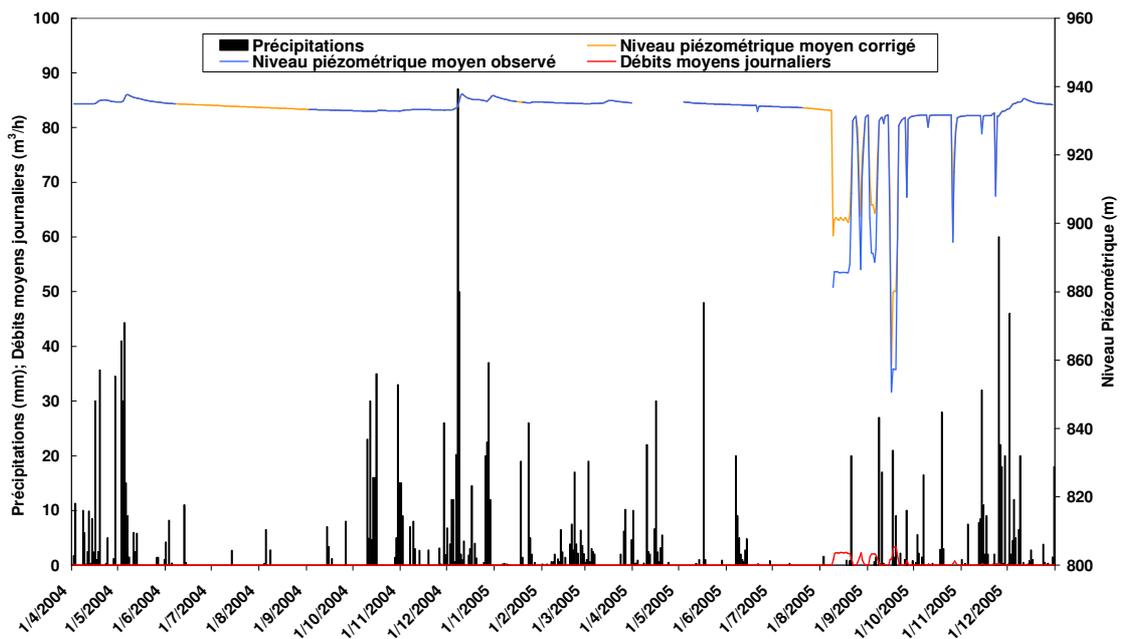


Figure 23 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m^3/h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF).

La Figure 24 présente un zoom sur une période sans pompages, de manière à mieux apprécier les fluctuations naturelles du niveau piézométrique. En dehors des périodes de pompage, le niveau piézométrique dans le forage réagit de manière significative aux précipitations, avec des montées pouvant atteindre plusieurs mètres en quelques jours ([Caballero *et al*, 2005]). De même, un tarissement significatif se traduit par une diminution du niveau piézométrique de l'ordre de 2,3 cm/jour en 2004 (l'estimation ne

pouvant être faite en 2005 du fait des pompages). L'impact des pompages est cependant clairement prépondérant pendant la période estivale et provoque des rabattements du niveau piézométrique moyen pouvant atteindre 70 m (Figure 25).

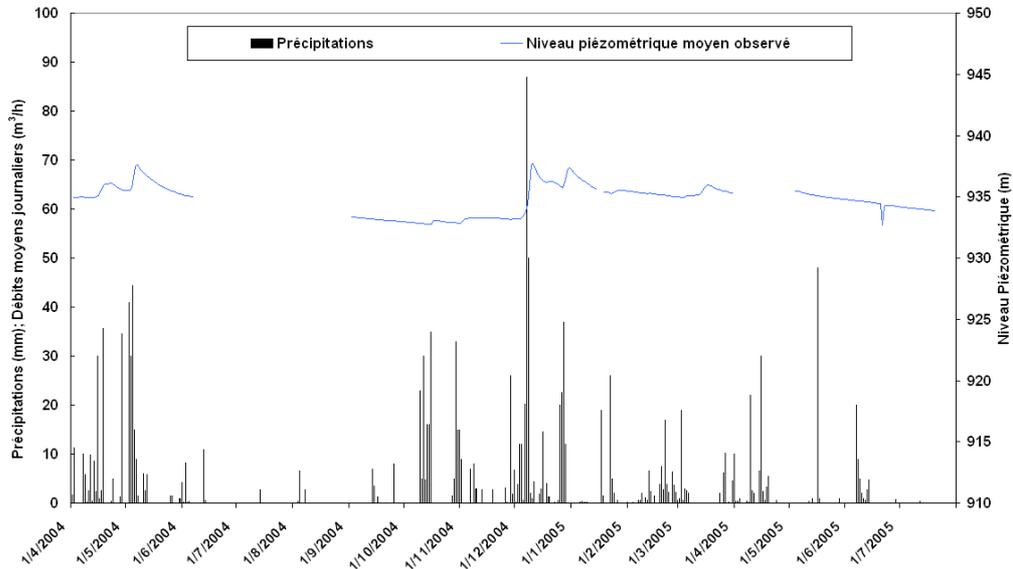


Figure 24: Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m³/h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF) – zoom sur la période sans pompages.

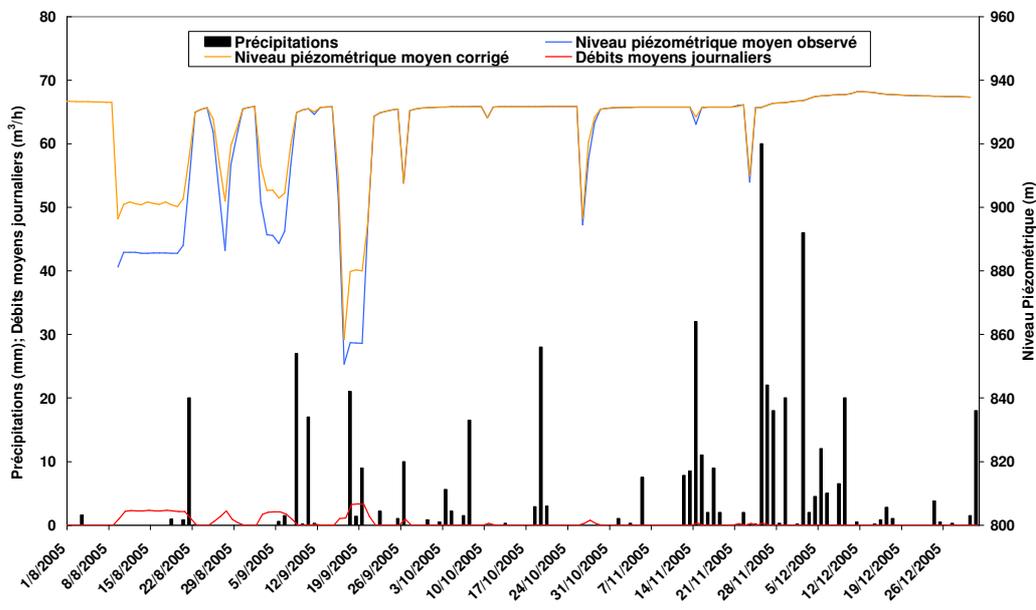


Figure 25 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m³/h) mesurés au forage de Tallone (altitude : 945 m NGF) – zoom sur la période de pompage.

La pompe a démarré début août 2005 et a connu beaucoup de difficultés liées à la non adéquation du débit de pompage avec la productivité de l'ouvrage. En dehors des pompages sporadiques réalisés en octobre et novembre, le volume prélevé pendant la saison estivale est de l'ordre de 1330 m³.

Relations Précipitations/Débit de pompage/Niveau Piézométrique

La Figure 26 présente le diagramme d'auto-corrélation du niveau piézométrique observé sur le forage de Tallone, en dehors des périodes de pompage. Si l'on considère que l'auto-corrélation n'est plus significative pour des valeurs inférieures à 0.3, on peut estimer que l'aquifère de Tallone présente une inertie de l'ordre de trente cinq jours. Cette inertie traduit à la fois la durée de la recharge de l'aquifère par les précipitations mais aussi son tarissement naturel. La décroissance quasi linéaire de la corrélation indique que les effets de la recharge et du tarissement décroissent lentement mais ne sont pas dissociables.

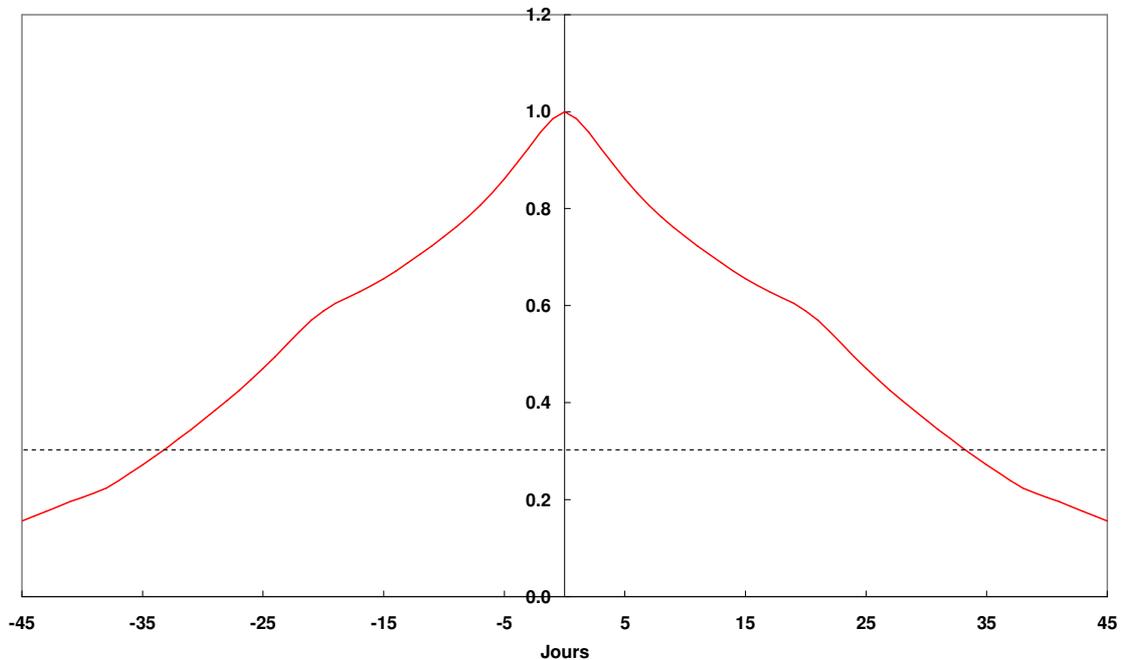


Figure 26 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage de Tallone entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.

Le même diagramme calculé uniquement en période de pompage révèle une réponse beaucoup plus rapide du système aux pompages, puisque leur effet est fortement atténué au-delà de 2 jours et disparaît au bout de 4 jours environ (Figure 27). Ce diagramme met en évidence la vitesse à laquelle l'aquifère réagit aux changements du débit de pompage moyen et le temps qu'il met à retrouver sa piézométrie de départ, lorsque les variations de débit cessent.

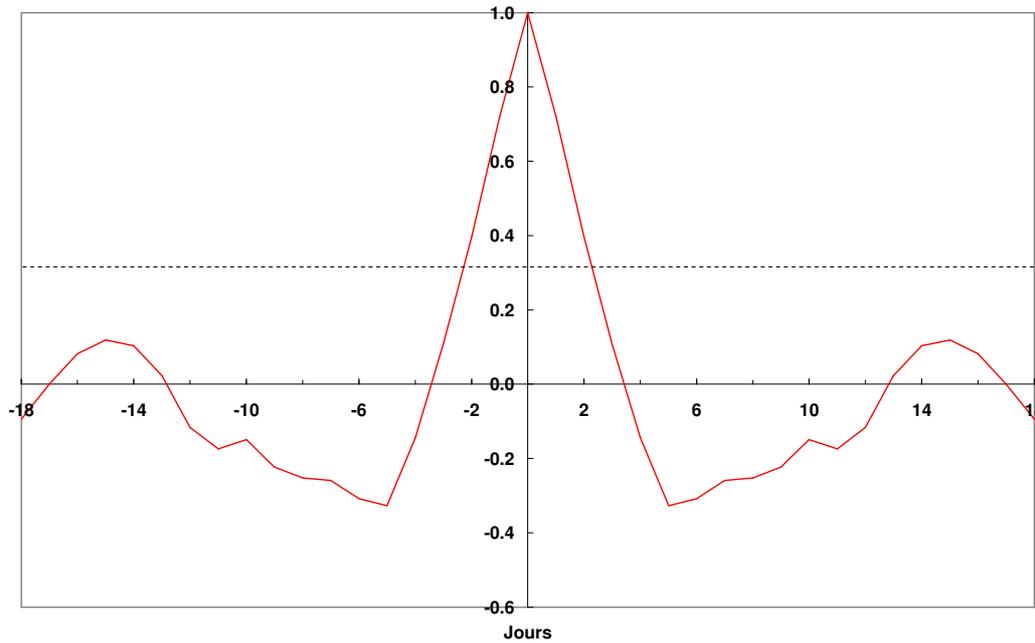


Figure 27 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique observée au forage de Tallone entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière montre que l'effet d'un événement de précipitation provoque une augmentation de la piézométrie dans les trois jours qui suivent et que cet effet se prolonge pendant plus d'une vingtaine de jours (Figure 28). La valeur de la corrélation étant cependant faible (elle dépasse à peine 0,2), les précipitations ont ici aussi un impact modéré en termes d'amplitude de variation du niveau, qui semble cependant un peu plus fort que ce que l'on observe sur le forage de Pioggiola.

Le corrélogramme croisé entre les débits moyens journaliers et la piézométrie moyenne journalière pendant la période de pompage uniquement (Figure 29), présente à l'inverse une forte corrélation négative, ce qui indique que, logiquement, le niveau piézométrique diminue fortement avec l'augmentation des débits. La rapide décroissance de l'anti-corrélation confirme la disparition rapide des effets des pompages sur la piézométrie (moins de 3 jours).

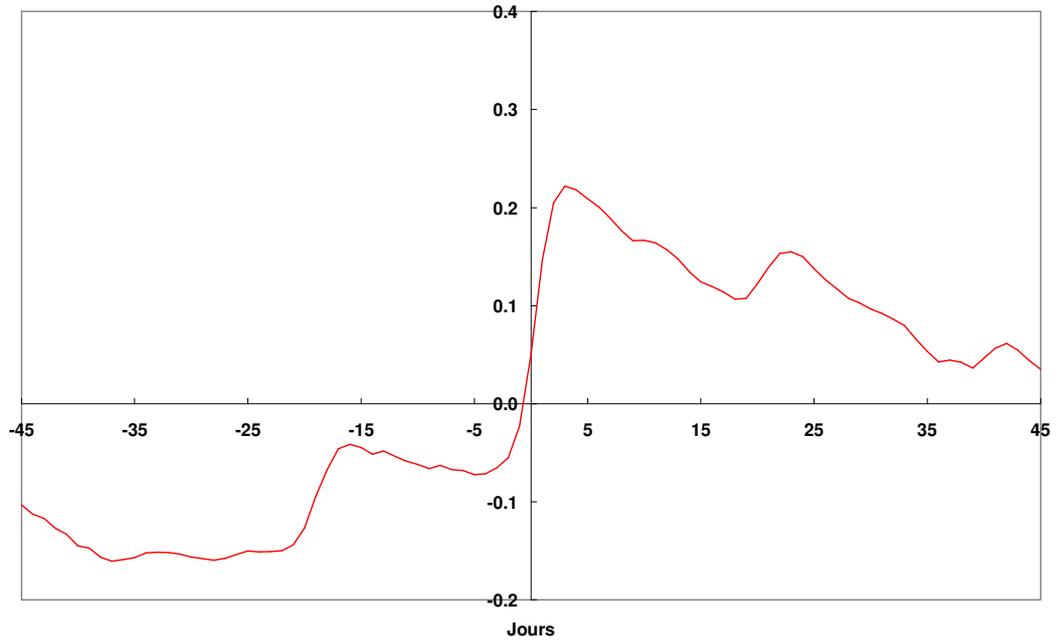


Figure 28: Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Tallone (entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).

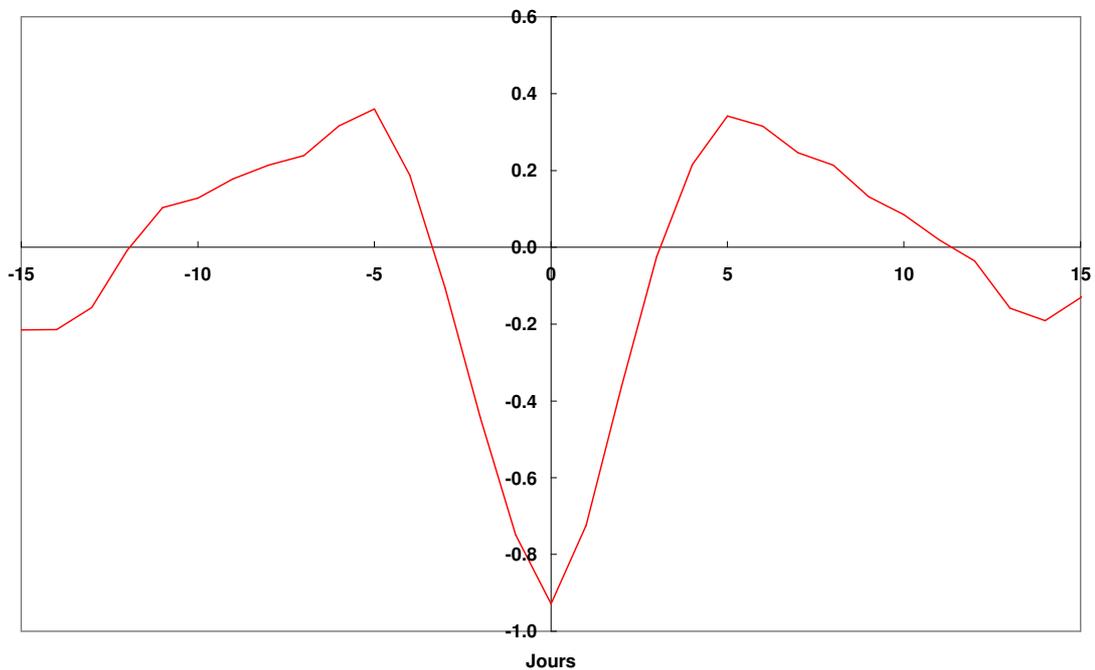


Figure 29 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratique à Tallone (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).

Un modèle de transfert, permettant de reproduire les variations piézométriques à partir des précipitations efficaces (calculées à partir des précipitations et de l'ETP) et des débits de pompage, a été mis en oeuvre pour ce forage. Les pompages ayant un impact bien plus important que les précipitations sur la piézométrie, le calage du modèle n'a pu être réalisé qu'en dehors des périodes de pompage intensif (Figure 30).

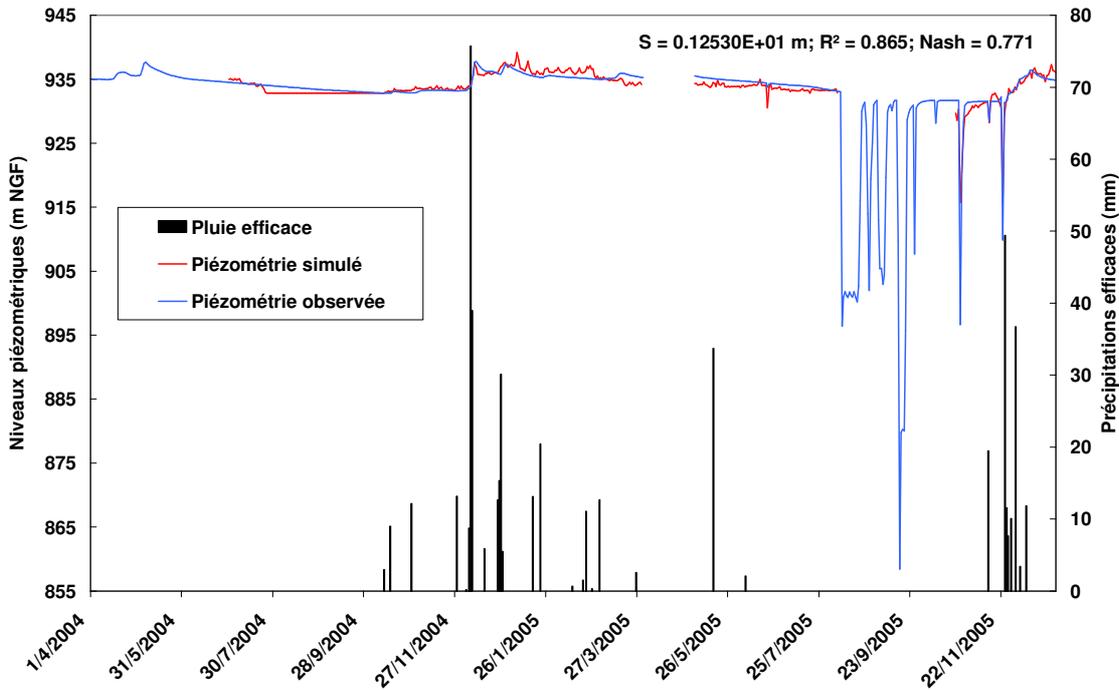


Figure 30 : Calage du modèle de transfert de simulation de la piézométrie pour le forage de Tallone à partir des précipitations et des débits, sur la période allant du 14/06/04 au 07/08/05 et du 25/10/05 au 28/12/05. La pluie efficace est calculée à partir des données de précipitation et d'ETP de Météo-France. Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations sont S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R^2 (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont indiqués.

Dans le cas de ce forage, le niveau piézométrique est sensiblement affecté par l'apport des précipitations, dont l'effet est relativement bien reproduit. La qualité très relative des données de précipitation utilisés pour ce forage ([Caballero *et al*, 2005]), peut expliquer en partie les différences entre le modèle et les observations pour les précipitations efficaces importantes (par exemple pour les événements de début janvier 2005, qui provoquent une montée exagérée des niveaux piézométriques simulés). La fonction de transfert calée ne permet cependant pas une très bonne simulation du tarissement. L'effet des pompages isolés des mois d'octobre et novembre est par contre assez bien restitué. Les rabattements simulés sont tout de même inférieurs à ceux observés et la simulation de la remontée rapide du niveau piézométrique dès la fin du pompage semble trop lente.

La réponse impulsionnelle du système aux précipitations comprend deux composantes : une rapide, traduisant le temps de réaction du système à l'impulsion de précipitation au travers du processus d'infiltration et une lente, traduisant le temps de transfert au sein de l'aquifère (récession), qui contrôle le temps que met l'effet de l'impulsion à disparaître.

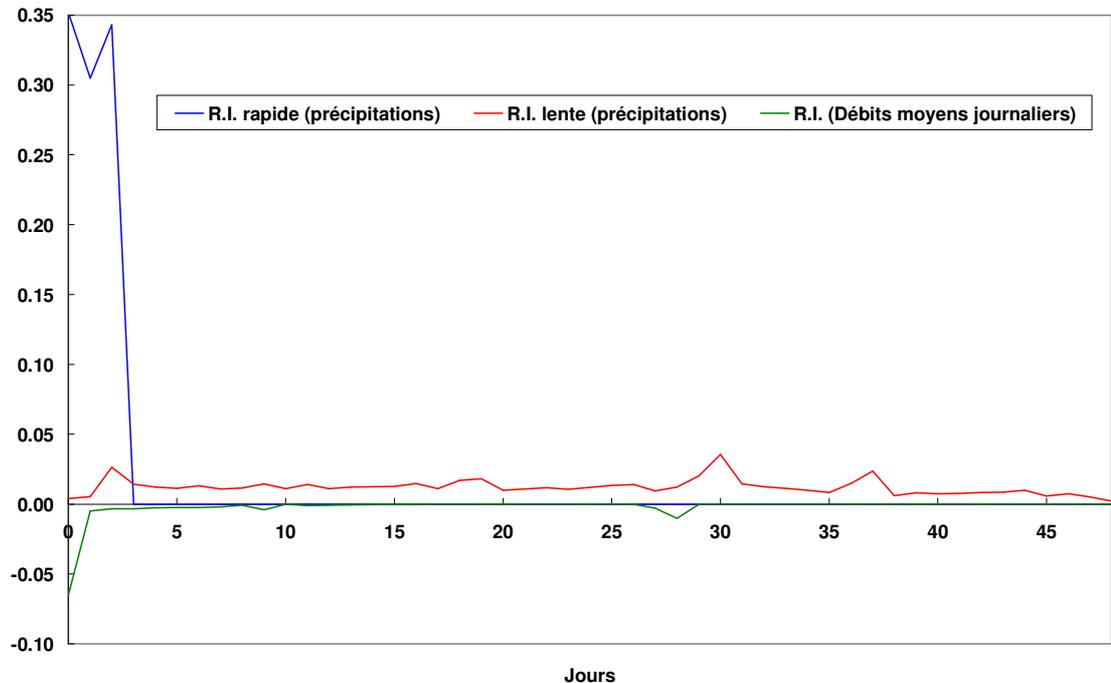


Figure 31 : Composantes des réponses impulsionnelles (R.I.) résultant du calage de la fonction de transfert servant à simuler les variations piézométriques au forage de Tallone.

Le calage du modèle de transfert présenté sur la Figure 30 est obtenu en associant les réponses impulsionnelles du système aux précipitations et aux pompages. Pour les précipitations, la composante rapide de la réponse impulsionnelle s'exprime de manière importante (son amplitude atteint 0.35) sur 2 jours puis disparaît. La composante lente s'exprime de manière discrète (son amplitude ne dépasse pas 0.04) pendant presque 50 jours (Figure 31). Ceci indique que le système réagit aux précipitations de manière franche dans les deux jours qui suivent leur occurrence et que l'atténuation de cette réaction est contrôlée par un mécanisme de transfert très lent au sein de l'aquifère (récession), puisqu'elle n'est toujours pas atténuée au bout de 45 jours.

La réponse impulsionnelle pour les débits ne présente qu'une composante lente. Elle indique clairement que l'effet des pompages s'exprime le jour même et qu'il devient négligeable au bout de quelques jours. La prépondérance de l'effet des pompages sur la piézométrie par rapport aux précipitations, s'exprime très faiblement ici puisque l'amplitude de sa réponse impulsionnelle aux pompages n'est pas beaucoup plus grande que celle de la composante lente des précipitations. Les amplitudes des deux

réponses impulsionnelles sont cependant très faibles au regard de celle de la composante rapide.

La simulation sur toute la période d'observation disponible, montre que l'effet des pompages est bien reproduit, bien que les rabattements simulés soient un peu faibles. De même, les descentes consécutives de la mise en œuvre des pompages et les remontées suite à leur arrêt ne sont pas toujours suffisamment rapides (Figure 32). Il faut néanmoins rappeler ici, que le fonctionnement intermittent de la pompe avec un débit d'exploitation trop élevé provoquent des variations piézométriques qu'il est difficile de reproduire en utilisant simplement une fonction de transfert associant les précipitations et les débits de pompage journaliers.

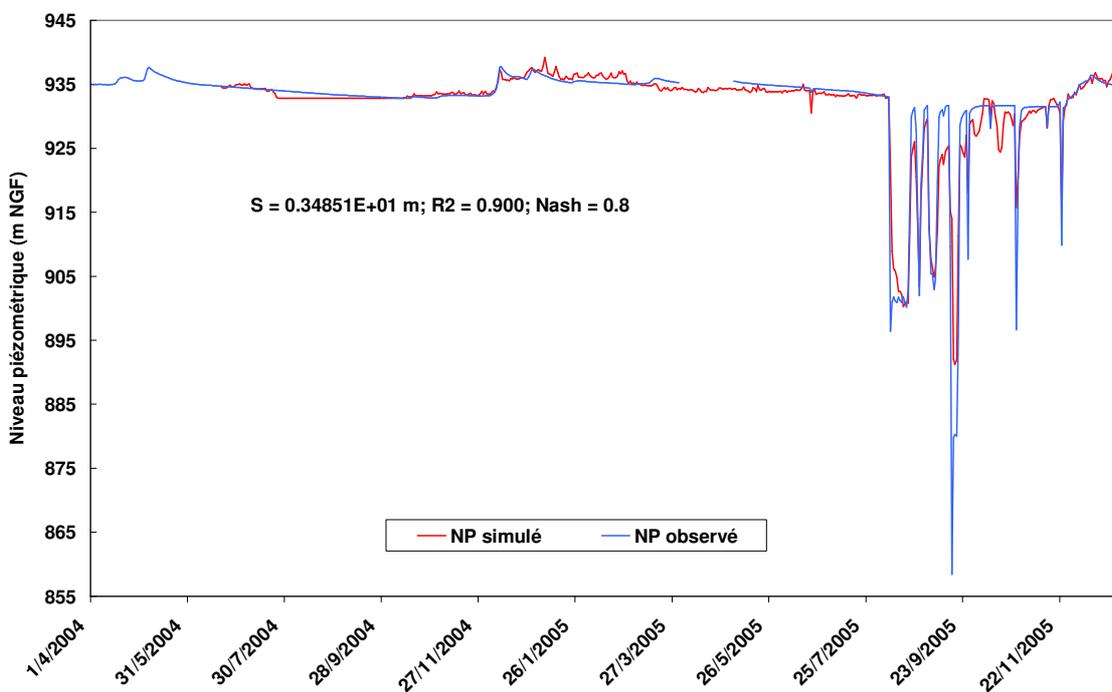


Figure 32: Simulation de la piézométrie sur l'ensemble de la période de mesure à Tallone (01/04/04 au 31/12/05). Les critères d'ajustement du modèle par rapport aux observations S (écart moyen entre la piézométrie simulée et observée en m), R^2 (coefficient de corrélation dont la valeur optimale est 1) et Nash (critère de Nash ([Nash and Sutcliffe, 1970]), dont la valeur optimale est 1) sont indiqués.

3.3.3. Urba 3 et Urba 4

Synthèse des observations

Sur les quatre forages que possède la commune d'Urbalacone, deux ont été équipés. Les informations disponibles sur ces deux forages, que nous avons nommés Urba 3 et Urba 4, sont relativement peu précises.

Le forage d'**Urba 3**, profond de 84 m et situé à côté de la place centrale du village d'Urbalacone à une altitude de 380 m, aurait été réalisé en 1981 ({{433 Caballero, 2005}}). Présenté par l'ancien maire comme la principale source d'alimentation en eau du village, son exploitation a été stoppée par le maire actuel pour cause de pollution bactériologique de l'eau. Son équipement en capteurs de mesure et station d'acquisition n'a pu être réalisé qu'en août 2005. Par conséquent seuls 6 mois d'observations de l'évolution du niveau piézométrique sont disponibles (forage non pompé - Annexe 1).

Le forage **Urba 4**, réalisé en 1995, se situe à la sortie du village d'Urbalacone, sur la route de Guarguale, à une altitude de 382 m et à une distance de 200 m au sud-ouest du forage Urba 3. D'une profondeur de 84 m et initialement exploité en appoint d'Urba 3, il était en panne lors de la mise en place du matériel d'acquisition. Réparé en juillet 2005, son utilisation est à présent intensive pour remplacer Urba 3, actuellement non exploité. Du fait de cette exploitation intensive, le fonctionnement du forage est actuellement contrôlé par un capteur de niveau bas placé à l'entrée de la zone d'aspiration de la pompe, qui stoppe le pompage dès que la piézométrie atteint cette cote, et par une minuterie, ce qui conduit à une alternance de périodes de pompage (jusqu'au niveau bas) et de repos durant 40 minutes (durée programmée par la minuterie - Annexe 1).

Nous ne disposons d'informations sommaires sur les coupes géologique et technique que pour le forage d'Urba 4. Trois venues d'eau ont été observées lors de la réalisation de ce forage : les plus importantes sont signalées à 19 et 34 mètres (0,6 m³/h chacune) et la troisième, à 64 m, présente un débit plus faible (0,2 m³/h). Sur le plan géologique, les deux forages se situent dans une zone à granodiorites porphyroïdes à amphiboles et à enclaves. Les observations du foreur sur la géologie indiquent une altération modérée sur les 10 premiers mètres, suivie par un granite plus compact. Compte tenu du contexte morphologique des forages et de la quasi absence d'altérites, nous avons considéré que les aquifères captés se plaçaient plutôt dans le type d'aquifères sans couverture d'arènes. Quelques sources ont été repérées dans le secteur et notamment au nord-est du forage, à des altitudes comprises entre 330 et 380 m ([Caballero *et al*, 2005]).

Un pompage d'essai réalisé en avril 1997 a permis d'estimer une transmissivité comprise entre $5,5 \cdot 10^{-6}$ et $1,5 \cdot 10^{-5}$ m²/s et de proposer, pour un rabattement maximal admissible fixé à 30 m (en faisant l'hypothèse que le niveau piézométrique à l'étiage se situe à 34 m par rapport au sol (DIREN SEMA, 1997), ce qui signifierait que les deux principales venues d'eau sont dénoyées), un débit d'équipement de 1,25 m³/h pour un pompage de 14 h quotidiennes pendant les 4 mois d'étiage.

Le débit d'exploitation a été estimé à 2,4 m³/h pour ce forage (Annexe 1). Il dépasse de plus de 1 m³/h le débit d'équipement préconisé. Ceci ne pose pas de problème à l'heure actuelle au regard du type de stratégie de pompage adopté et dans la mesure où cette stratégie n'est mise en oeuvre que depuis 6 mois. De plus, le rabattement maximal admissible a été estimé avec une hypothèse très prudente sur le niveau piézométrique à l'étiage. Un rabattement admissible plus important aurait probablement conduit à une valeur de débit similaire à celle du débit d'exploitation. Cette situation ne garantit cependant en rien la pérennité de l'exploitation notamment au cours de la saison sèche à venir.

Les données du pompage d'essai étant disponibles, nous avons procédé à une nouvelle interprétation (Figure 33). Une synthèse de cette interprétation ainsi que la représentation des données dans un diagramme semi-logarithmique sont présentées à l'Annexe 3. Il n'a pas été possible d'estimer les pertes de charge pour ce forage dans la mesure où un seul couple de valeurs débit pompé / rabattement mesuré est disponible suite à l'essai de pompage. Les données enregistrées dans le cadre de ce travail ne sont pas utilisables pour déterminer ce type d'information du fait de la stratégie de pompage adoptée (pompage intermittent contrôlé par des capteurs de niveau haut et bas).

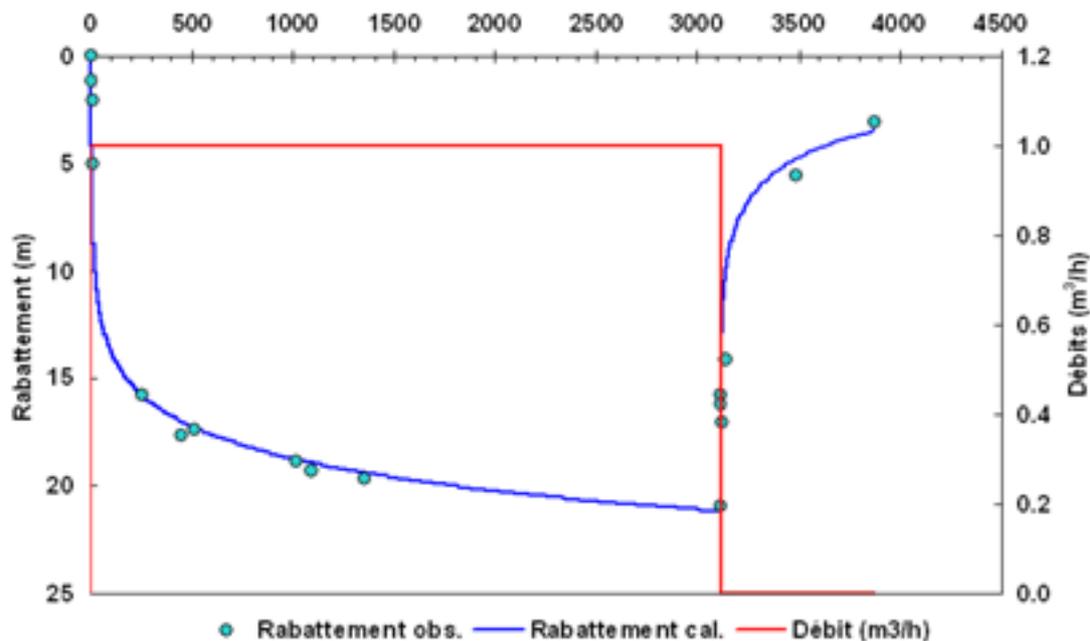


Figure 33 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 18 avril 1997 sur le forage d'Urba 4, sans prise en compte des pertes de charge quadratique.

L'ajustement obtenu est cependant très satisfaisant, bien que la première venue d'eau (19 m de profondeur) soit probablement dénoyée en cours d'essai. La solution choisie (Theis) fournit une transmissivité de $1,03 \cdot 10^{-5}$ m²/s. Le coefficient d'emmagasinement estimé pour cet essai de pompage ($5,7 \cdot 10^{-2}$ – Annexe 4), est présenté à titre indicatif (cf. § 3.3.1). Malgré le fait que son ordre de grandeur soit plausible (une porosité de

nappe libre comprise entre 5 et 6%), une grande incertitude affecte son estimation puisque l'interprétation réalisée n'intègre en outre pas les pertes de charge quadratiques (la prise en compte de pertes de charge quadratiques conduirait en effet à un coefficient d'emmagasinement plus fort, ce qui ne semble guère plausible).

Les précipitations, débits de pompage moyens journaliers et niveaux piézométriques observés non corrigés des pertes de charge quadratiques, mesurés sur la période d'étude sont présentés sur la Figure 34. Malgré l'apparente continuité entre les niveaux piézométriques avant et après les lacunes, aucune interpolation n'a été faite. Les niveaux mesurés fin novembre 2004 semblent étonnamment bas par rapport aux niveaux mesurés avant la lacune, et ce malgré les précipitations enregistrées dans l'intervalle. Il n'a pas été possible de vérifier si des pompages (qui pourraient éventuellement expliquer cette baisse) avaient eu lieu pendant cette période, car le compteur volumétrique était alors en panne.

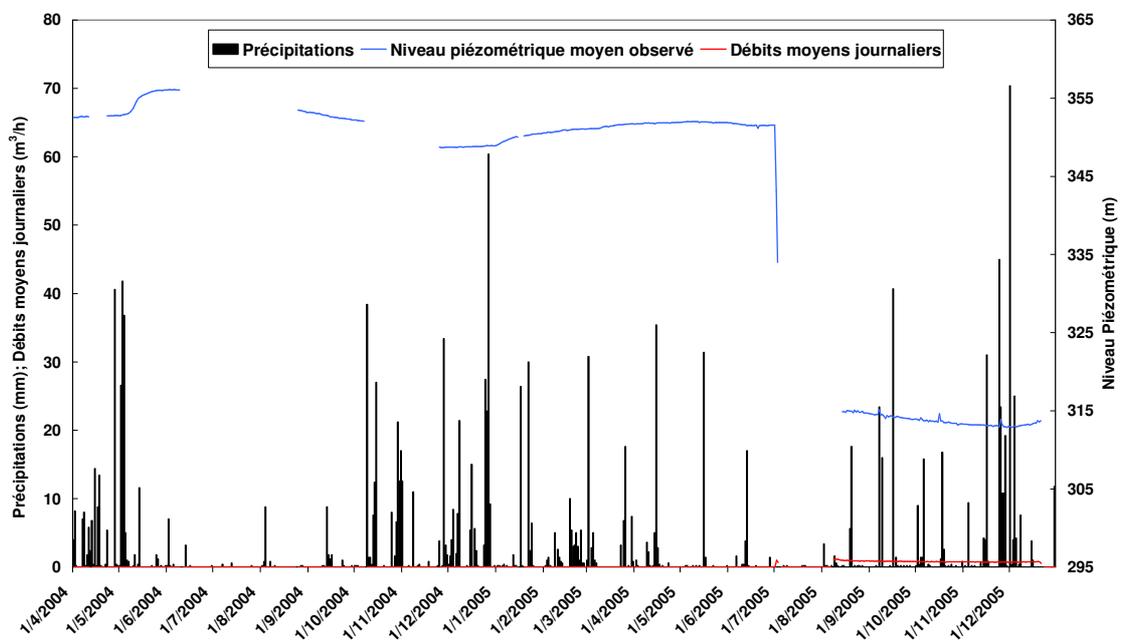


Figure 34 : Niveaux piézométriques moyens observés non corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m^3/h) mesurés au forage d'Urba 4 (altitude : 382 m NGF).

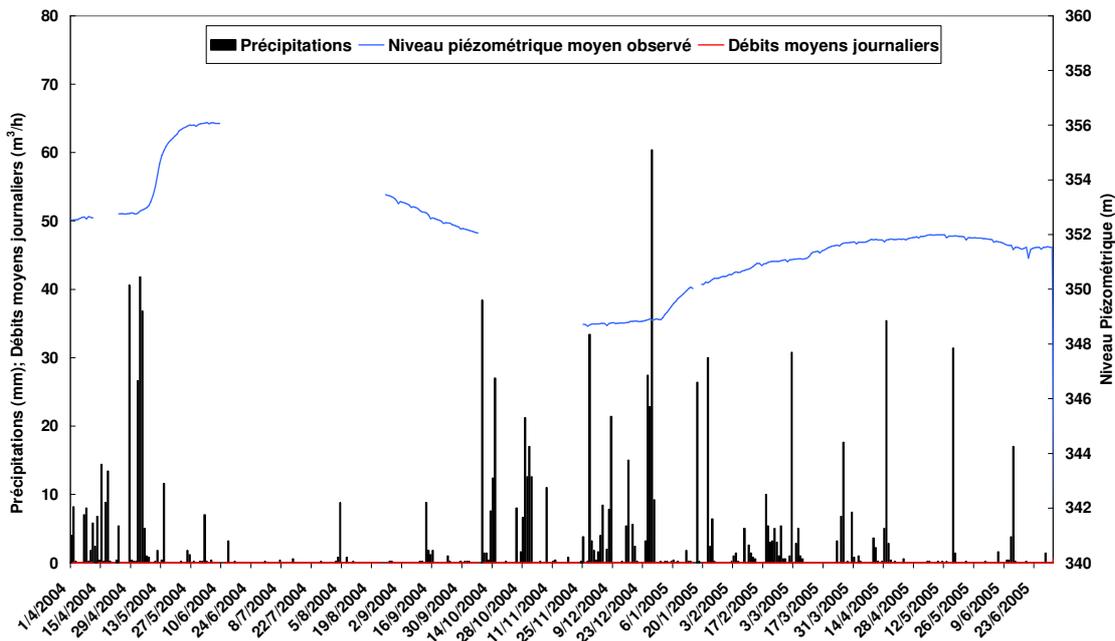


Figure 35 : Niveaux piézométriques moyens observés non corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m³/h) mesurés au forage d'Urba 4 (altitude : 382 m NGF) – zoom entre le 01/04/04 et le 01/07/05.

On n'observe pas, pour ce forage, une réaction rapide du système aux précipitations, comme c'est le cas pour les précédents. Les fluctuations naturelles du niveau piézométrique ne semblent en effet pas associées aux évènements ponctuels de précipitation, mais plutôt répondre de manière lissée à leur occurrence sauf, dans une moindre mesure, la remontée du niveau piézométrique observée début mai 2004 (Figure 35). Ces fluctuations présentent néanmoins une amplitude importante (pouvant atteindre 8 m), supérieure à celle observée aux autres forages, qui peut s'expliquer par le contexte morphologique de situation du forage (à flanc de relief).

Au cours de l'été 2004, le phénomène de tarissement se prolonge longtemps malgré l'arrivée des précipitations, l'effet de la recharge intervenant de manière différée.

La baisse observée à partir de juillet 2005 correspond au début des pompages consécutifs à la réparation de la pompe. Le maintien du niveau à des valeurs basses (sans remonter ponctuellement comme dans les forages précédents) est dû au pompage intermittent maintenu en continu.

Relations Précipitations/Débit de pompage/Niveau Piézométrique

• Urba 4

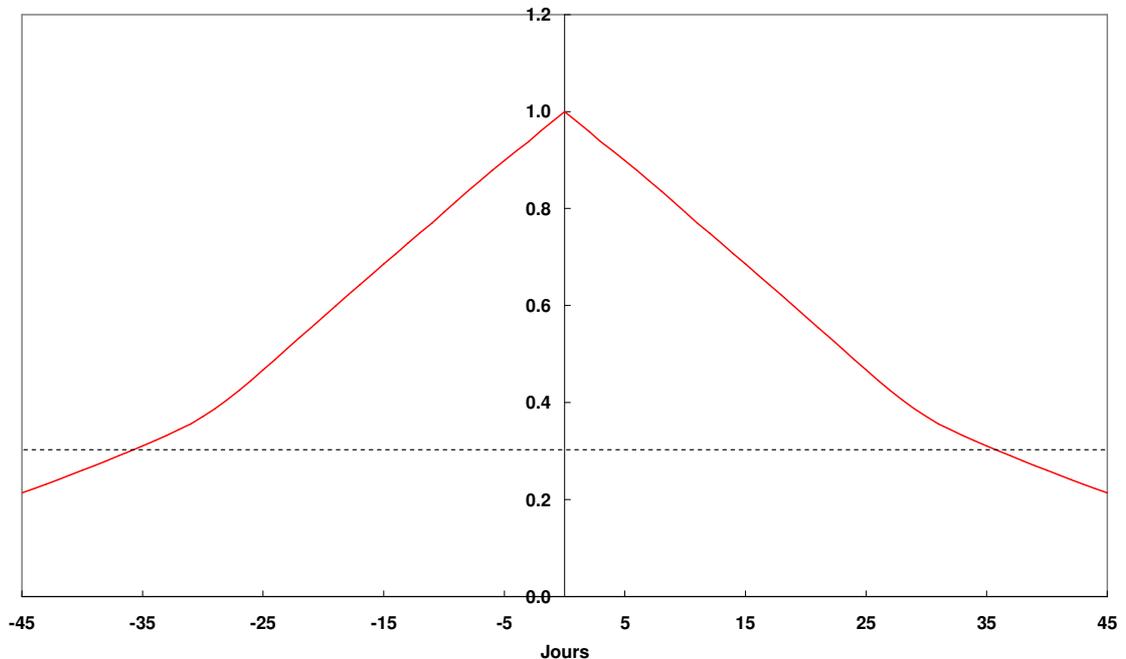


Figure 36: Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage d'Urba 4 entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage

La Figure 36 présente le diagramme d'auto-corrélation du niveau piézométrique observé sur le forage d'Urba 4, en dehors des périodes de pompage. Si l'on considère que l'auto-corrélation n'est plus significative pour des valeurs inférieures à 0.3, on peut estimer que l'aquifère d'Urba 4 présente une inertie de l'ordre de trente cinq jours. Cette inertie traduit à la fois la durée de la recharge de l'aquifère par les précipitations mais aussi son tarissement naturel. La décroissance quasi linéaire de la corrélation indique que les effets de la recharge et du tarissement décroissent lentement mais ne sont pas dissociables.

Le même diagramme calculé uniquement en période de pompage traduit l'impact du pompage continu par une décroissance linéaire de la corrélation entre les données, qui devient négligeable au bout d'une trentaine de jours (Figure 37). Le système met donc ici beaucoup plus de temps à réagir que dans les forages précédents, ce qui montre que ce type d'analyse matérialise surtout la réaction du système à une stratégie de pompage. Il est en effet probable que, si par exemple le forage de Tallone était soumis à un pompage intermittent jour et nuit (et non pas avec des arrêts pendant la nuit comme c'est le cas actuellement), il présenterait un auto-corrélogramme du même type que celui de la Figure 37.

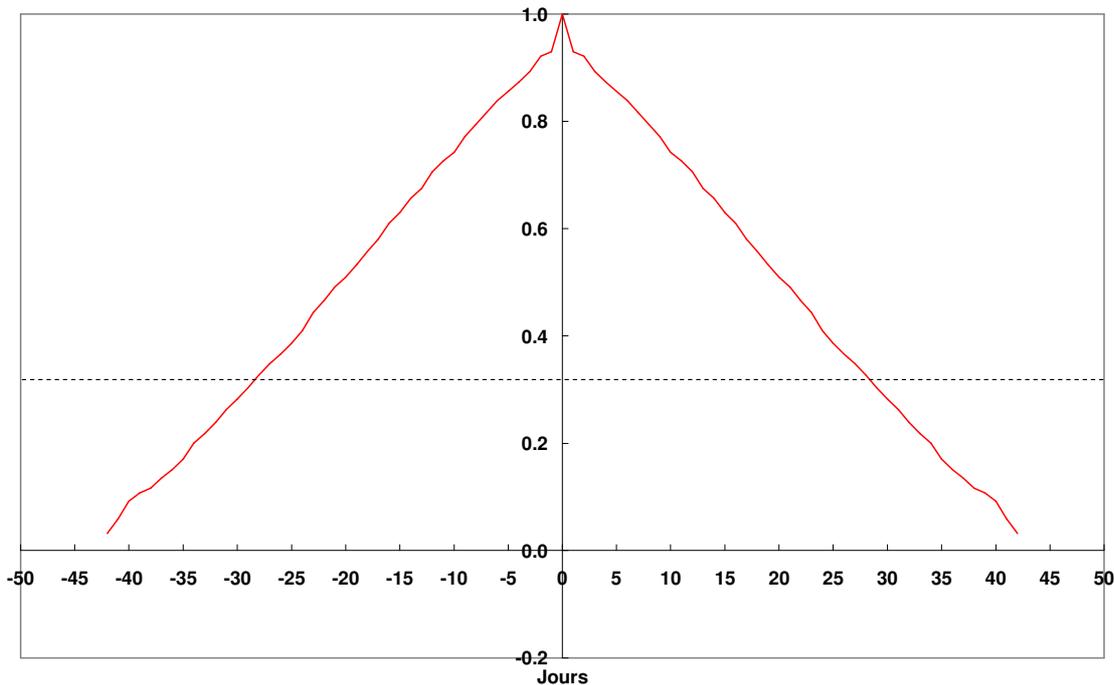


Figure 37 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Urba 4 entre le 01/04/04 et le 31/12/05, au cours des périodes de pompage uniquement.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière indique que les précipitations sont anti-corrélées à la piézométrie pendant 15 jours, puis qu'elles sont corrélées pendant une trentaine de jours. On peut considérer que le pic de corrélation entre les deux séries de données intervient entre 20 et 30 jours après l'occurrence des précipitations. Le système présenterait donc un temps de réaction aux précipitations très lent, ce qui tend à conforter l'analyse faite sur la Figure 34.

Le corrélogramme croisé entre les débits moyens journaliers et la piézométrie moyenne journalière pendant la période de pompage uniquement (Figure 39), présente une corrélation négative, ce qui indique que, logiquement, le niveau piézométrique diminue avec l'augmentation des débits. L'anti-corrélation atteint un pic au bout de 4 jours, puis décroît pour s'annuler au bout d'une vingtaine de jours. L'anti-corrélation est maximale au bout de 4 jours, puis décroît pour s'annuler au bout d'une vingtaine de jours. La réponse de ce forage aux sollicitations par pompage apparaît bien plus longue que pour les autres ouvrages étudiés. L'effet d'un pompage journalier au temps $t = 0$ sur la piézométrie est maximal pendant 4 jours et le système met une vingtaine de jours à retrouver son état initial après l'arrêt d'un pompage. Ce comportement est à rattacher au caractère inertiel de ce système.

Il n'a pas été possible de caler une fonction de transfert sur les données de ce forage, du fait du grand nombre de lacunes et du peu de données disponibles.

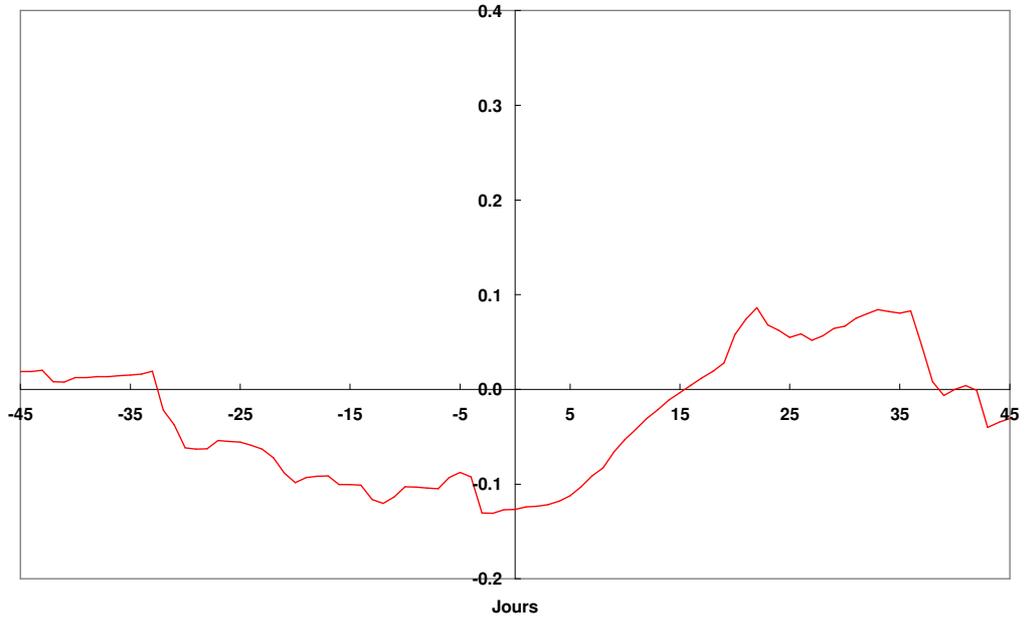


Figure 38 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Urba 4 (entre le 01/04/04 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).

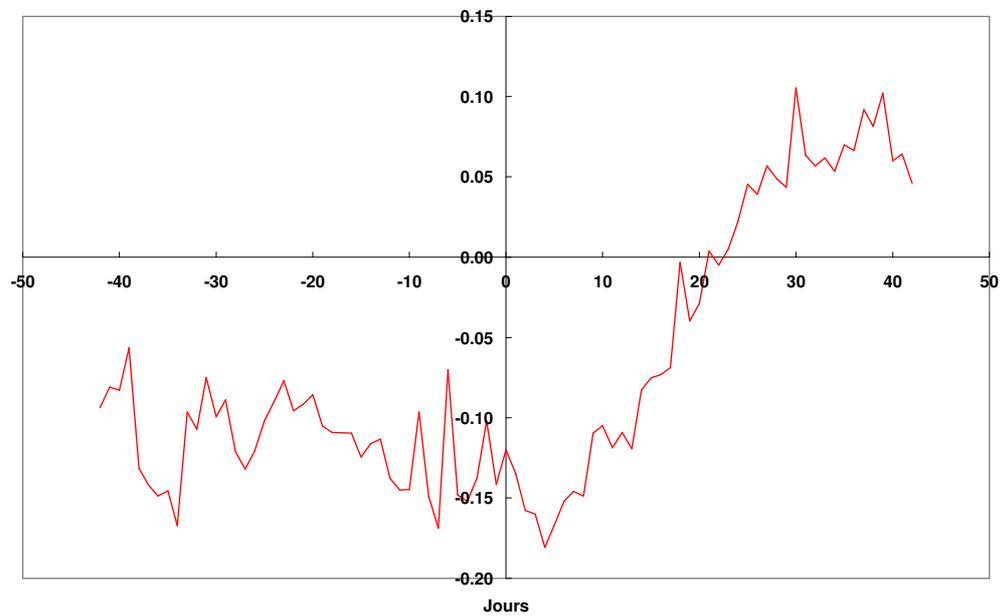


Figure 39 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques à Urba 4 (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05, pendant les périodes de pompage uniquement).

• **Urba 3**

La Figure 40 présente le diagramme d'auto-corrélation du niveau piézométrique observé sur le forage d'Urba 3, sur les 5 mois d'observations dont nous disposons. L'allure de la décroissance de la corrélation est très similaire à celle d'Urba 4 (Figure 36), avec une inertie que l'on peut estimer à vingt cinq jours.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière (Figure 41) présente lui aussi un comportement similaire à Urba 4, ce qui tend à confirmer la validité des données sur Urba 4. On confirme avec cette figure que le temps de réaction des aquifères aux précipitations dans ce type de contexte est bien de l'ordre de 20 jours après leur occurrence et que leur effet se maintient au-delà des 40 jours.

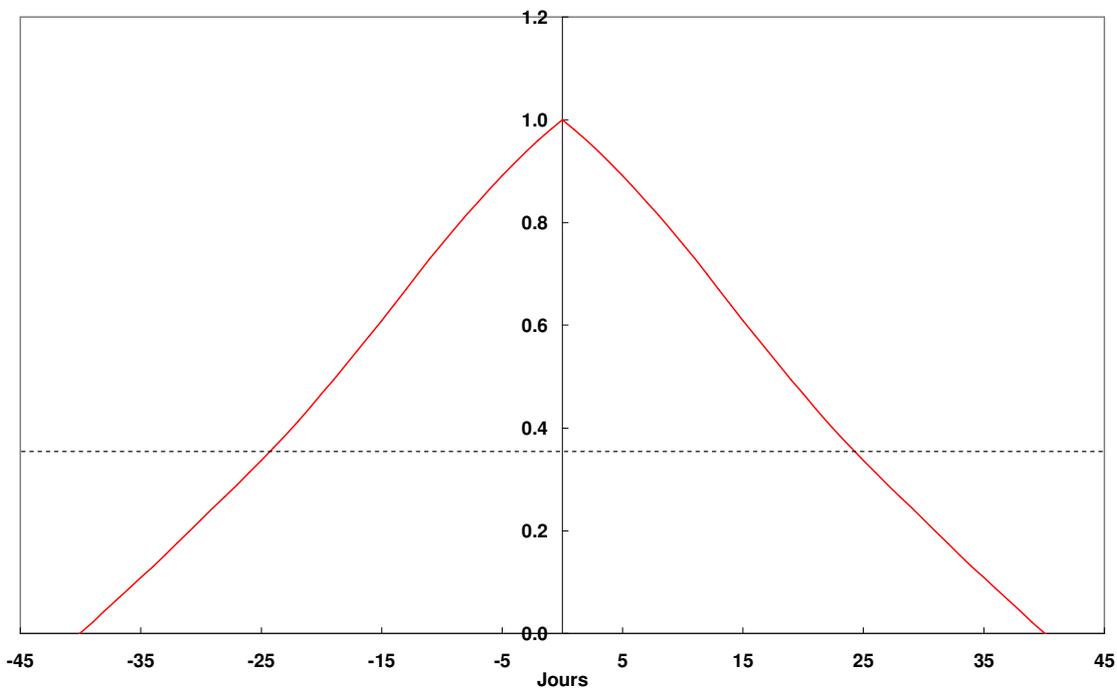


Figure 40 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière observée au forage d'Urba 3 entre le 01/08/05 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage.

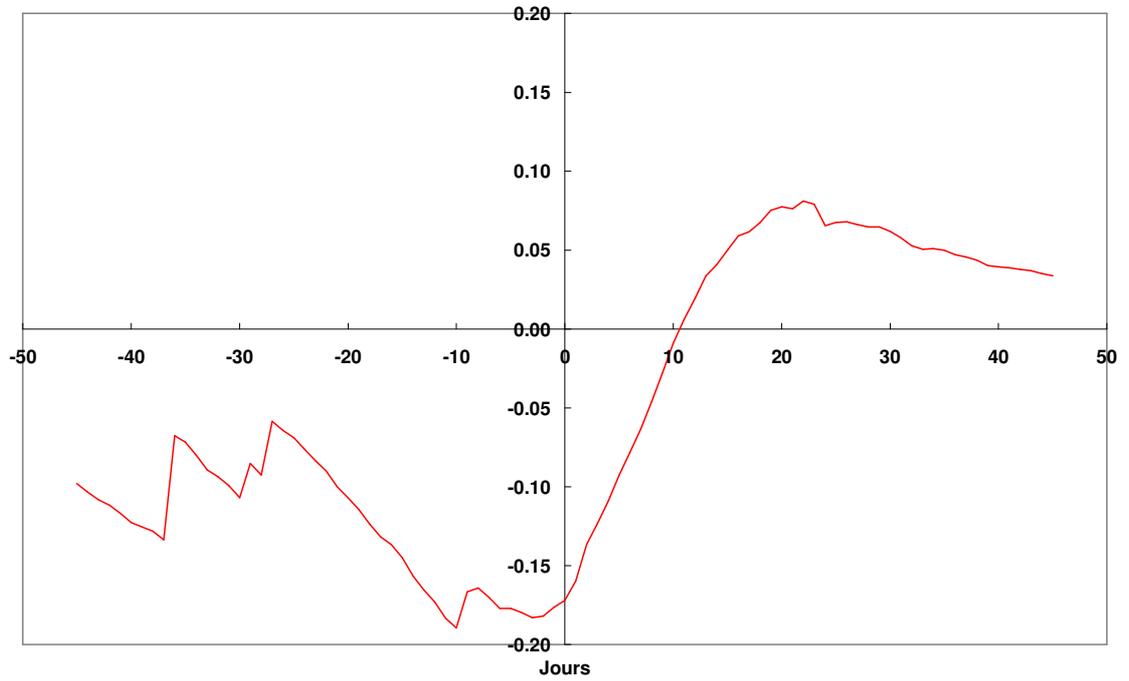


Figure 41 : Corrélogramme croisé précipitations – piézométrie moyenne journalière à Urba 3 (entre le 01/08/05 et le 31/12/05, en dehors des périodes de pompage).

3.4. FORAGES EN CONTEXTE AQUIFÈRE DE TYPE « FISSURÉ AVEC COUVERTURE D'ALTÉRITES »

3.4.1. Azilone

Synthèse des observations

Le forage d'Azilone a été implanté sur proposition de la municipalité qui s'est basée sur des critères morphologiques (SRAE, 1988), dans un petit talweg situé dans un contexte géologique de granodiorites à grain moyen et à amphibole, recoupées par des filons de dolérite fracturée et altérée (Figure 42).

Réalisé en 1988 et d'une profondeur de 63 m, le forage se situe à une altitude de 500 m. Il recoupe une couverture d'altérites d'une dizaine de mètres d'épaisseur, que l'on retrouve sur divers affleurements autour du forage et particulièrement sur le versant qui le domine, ce qui montre qu'il s'agit très vraisemblablement d'un profil d'altération relativement étendu (Figure 42).

Lors de la réalisation du forage, celui-ci s'est avéré artésien. Plusieurs venues d'eau ont été recoupées entre 5 et 42 m de profondeur, dont les plus importantes se situent entre 24 et 30 m (Figure 42). Une venue d'eau relativement importante (1,2 m³/h) a été repérée à la base de la couverture d'altérites. Des filons de dolérite, présentant une altération et une fissuration importante, sont aussi recoupés par le forage. Correspondant aux niveaux où l'on repère les venues d'eau les plus importantes, ils pourraient constituer des zones privilégiées de perméabilité significative (les discontinuités lithologiques constituent fréquemment des zones privilégiées de propagation de l'altération et de la fissuration, donc de la perméabilité associée).

Ce forage est exploité toute l'année pour remplir un réservoir de 50 m³, en complément de deux sources. L'exploitation est contrôlée par des flotteurs installés dans le réservoir qui déclenchent le pompage lorsque le niveau d'eau dans le réservoir est bas et qui l'arrêtent quand il est rempli.

Un pompage d'essai réalisé avant la mise en exploitation du forage a conduit à préconiser un débit d'équipement de 6,5 m³/h pendant 20 h/jour afin d'obtenir un volume journalier de 130 m³ (SRAE, 1988).

Le débit réel d'exploitation a été estimé à 7,1 m³/h pour ce forage (Annexe 2), au moyen du suivi d'un événement de pompage (le compteur volumétrique placé sur le tuyau d'exhaure du forage étant en panne, nous n'avons pas pu le déterminer suivant la méthode adoptée pour les forages précédents - § 2.3.2). Ce débit, malgré qu'il soit légèrement supérieur aux 6,5 m³/h préconisés suite à l'essai de pompage, ne pose pas de problèmes d'exploitation dans le cadre de la stratégie de pompage actuelle.

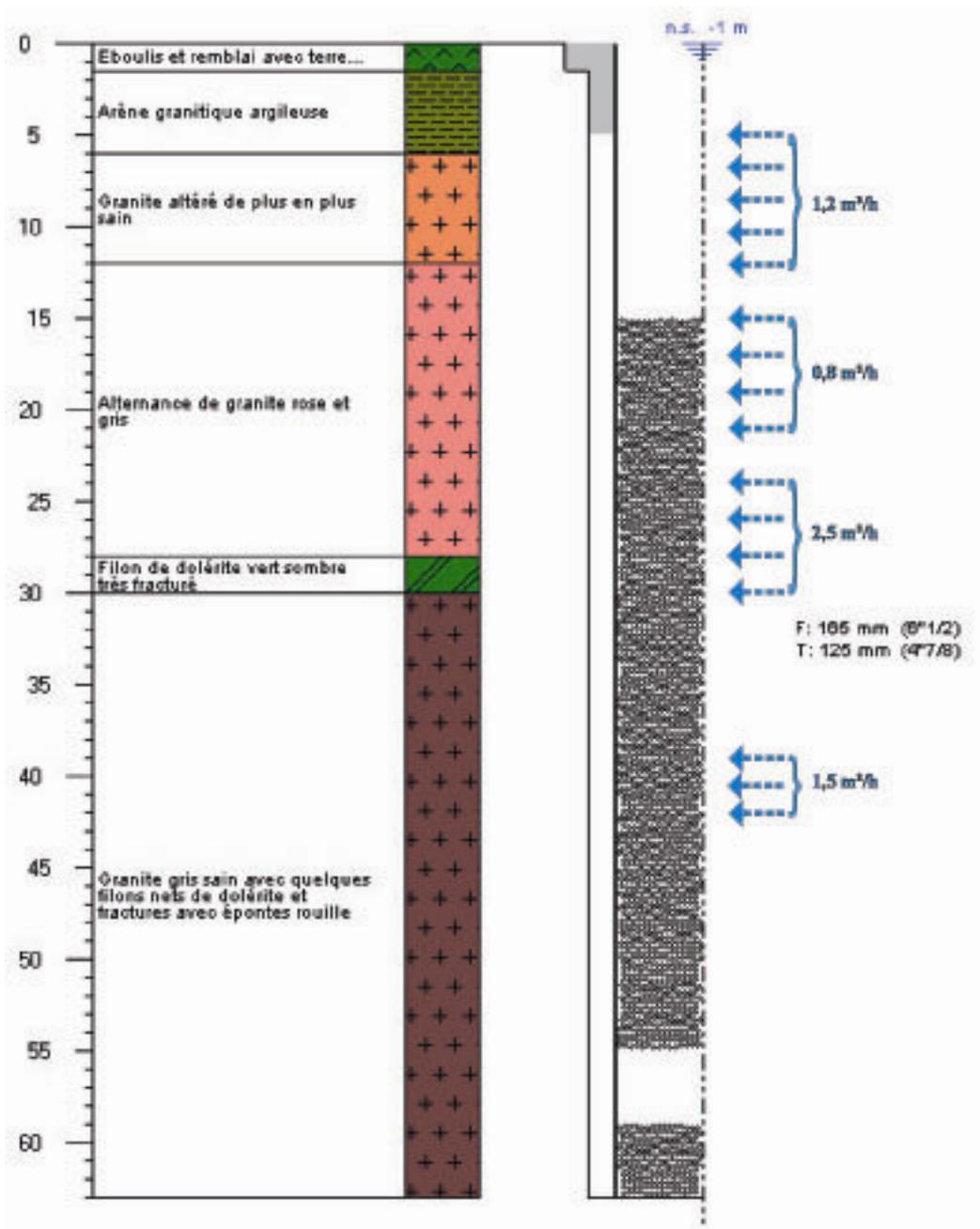


Figure 42 : Coupes géologique et technique du forage d'Azilone.

Les données du pompage d'essai étant disponibles, nous avons procédé à une nouvelle interprétation, de manière à intégrer notamment les pertes de charge quadratiques et des hypothèses supplémentaires sur les limites hydrodynamiques de l'aquifère (Figure 43). Une synthèse de cette interprétation ainsi que la représentation des données dans un diagramme semi-logarithmique sont présentées à l'Annexe 4.

La valeur du coefficient de pertes de charges quadratiques a été estimée à $0,364 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ à partir des rabattements mesurés au bout d'une heure pour les trois paliers de pompage réalisés lors de l'essai de pompage (Annexe 3). Ceci implique que, pour un pompage réalisé au débit d'exploitation actuel ($7,1 \text{ m}^3/\text{h}$), les pertes de charge quadratiques sont à l'origine d'un rabattement de $18,35 \text{ m}$ (sur les $28,36 \text{ m}$ de rabattement total provoqués par ce pompage au bout d'une heure).

L'ajustement des rabattements est considéré comme satisfaisant avec la solution choisie (Theis) (Figure 43). Une transmissivité de $6,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ a été obtenue en intégrant les pertes de charge quadratiques et une limite alimentée se manifestant au bout de 100 minutes de pompage. L'existence du profil d'altération dans l'environnement immédiat du forage et notamment sur tout le versant qui le domine, constitue un élément très favorable du point de vue de la ressource exploitable sur ce site, son artésianisme étant quant à lui à relier d'une part à cette couverture d'altération saturée en eau et d'autre part à la situation morphologique du forage en pied de relief. La présence de cette couverture d'altérites saturées peut expliquer la nécessité de considérer l'intervention d'une limite alimentée dès la première heure de pompage pour interpréter convenablement cet essai (phénomène de drainance des altérites en cours de pompage).

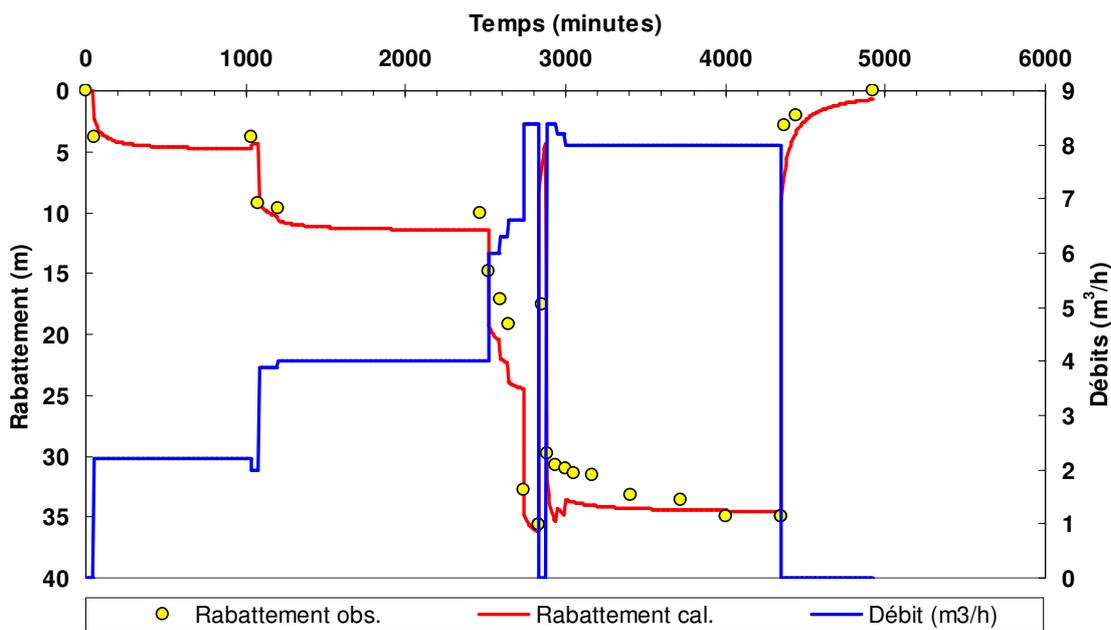


Figure 43 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 1^{er} août 1988 sur le forage d'Azilone, avec prise en compte des pertes de charge quadratiques et l'hypothèse de l'existence d'une limite alimentée se manifestant au bout de 100 minutes de pompage.

Le coefficient d'emmagasinement estimé pour cet essai de pompage (de l'ordre de 10% – Annexe 4), est présenté à titre indicatif (cf. § 3.3.1). La qualité de l'ajustement de l'essai de pompage montre cependant que l'estimation des pertes de charge quadratiques est relativement robuste.

Le coefficient de pertes de charge quadratiques calculé a été utilisé pour corriger les niveaux piézométriques observés (suivant l'équation (2)) de manière à pouvoir étudier les relations existant entre précipitations efficaces, débit de pompage et niveau piézométrique au sein de l'aquifère. La Figure 44 présente l'effet de la correction ainsi que les différentes variables citées, sur l'ensemble de la période d'étude.

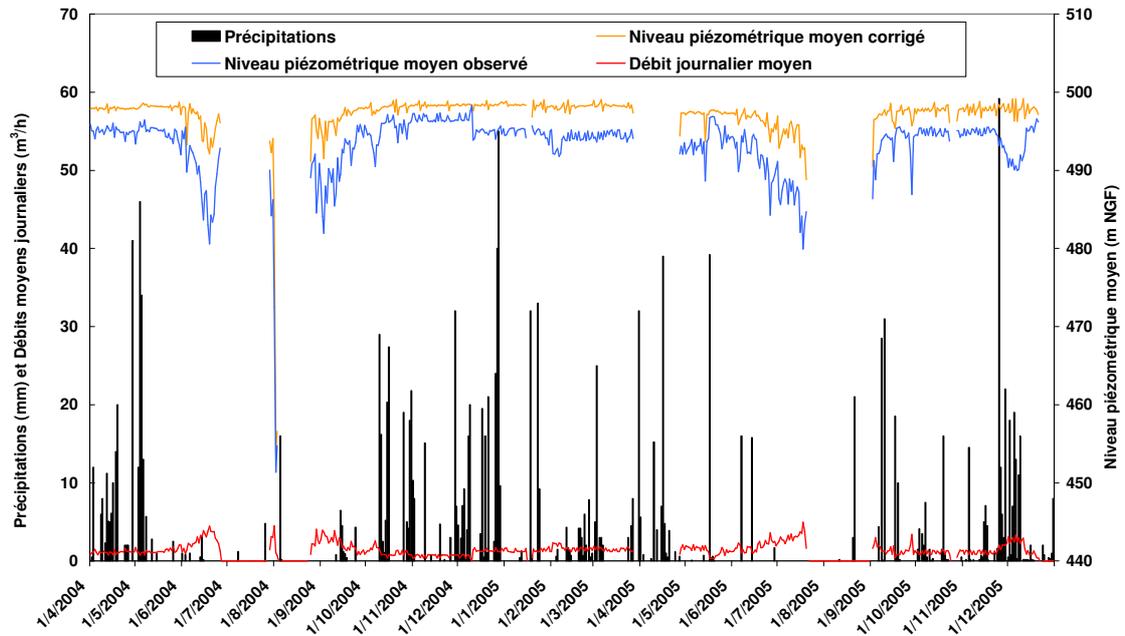


Figure 44 : Niveaux piézométriques moyens observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m^3/h) mesurés au forage de Azilone (altitude : 500 m NGF).

Le pompage sur ce forage étant réalisée toute l'année, le niveau piézométrique moyen est constamment influencé, de sorte qu'il n'est pas possible d'analyser finement les relations entre piézométrie et précipitations, hors effet des pompages.

En dehors des périodes de pompage estivales, le niveau piézométrique moyen dans le forage reste relativement constant et proche de la surface topographique (il fluctue autour de 498 m environ - Figure 45). Le caractère artésien de ce forage se maintient donc malgré le pompage intensif au cours de l'année. Les pompages plus importants en période estivale rabattent la nappe d'une hauteur pouvant atteindre la dizaine de mètres (été 2005). Le niveau piézométrique de celle-ci reste cependant remarquablement haut au cours de l'année malgré un débit d'exploitation important (Annexe 1).

Un compteur volumétrique ayant été installé sur le réservoir récemment a permis d'estimer que le volume pompé entre juin et décembre 2006 est de l'ordre de $11\,940\,m^3$.

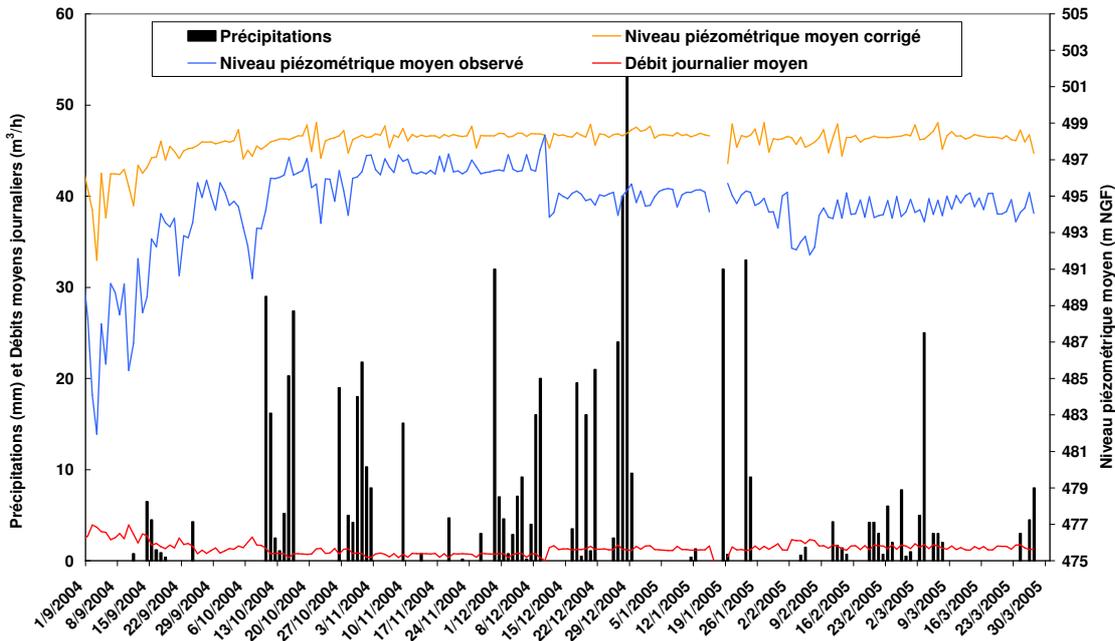


Figure 45 : Niveaux piézométriques moyens observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m³/h) mesurés au forage de Azilone (altitude : 500 m NGF) – zoom entre le 1^{er} sept. 2004 et le 30 mars 2005.

Les pompages continus sur l'année rendent impossible l'analyse de la recharge et du tarissement de l'aquifère.

Relations Précipitations/Débit de pompage/Niveau Piézométrique

La Figure 46 présente le diagramme d'auto-corrélation du niveau piézométrique observé sur le forage d'Azilone, sur toute la période de suivi. Ce diagramme met en évidence la vitesse à laquelle l'aquifère réagit aux changements du débit de pompage moyen et le temps qu'il met à retrouver sa piézométrie de départ, lorsque les variations de débit cessent. Si l'on considère que l'auto-corrélation n'est plus significative pour des valeurs inférieures à 0.3, on peut estimer l'aquifère d'Azilone réagit de manière très rapide aux changements de débit, puisque la corrélation devient non significative au-delà de 2 jours.

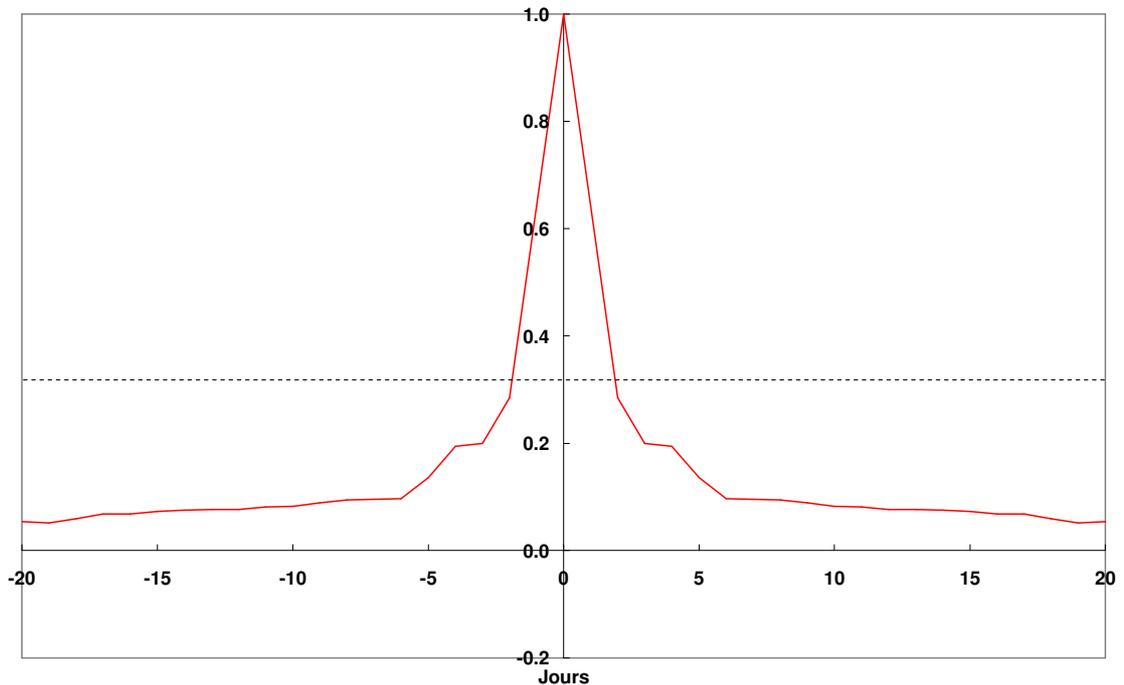


Figure 46 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Azilone entre le 01/04/04 et le 31/12/05.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière n'est pas calculé car l'effet des pompages est prépondérant pendant toute la période de suivi. Par contre, le corrélogramme croisé entre les débits moyens journaliers et la piézométrie moyenne journalière est présenté sur la Figure 47. Il présente une forte corrélation négative, ce qui indique que, logiquement, le niveau piézométrique diminue fortement avec l'augmentation des débits. La décroissance de l'anti-corrélation est cependant assez lente puisqu'elle met une dizaine de jours à devenir non significative et plus de 35 jours à s'annuler. La stratégie de pompage adoptée sur ce forage a donc un effet relativement persistant sur la piézométrie.

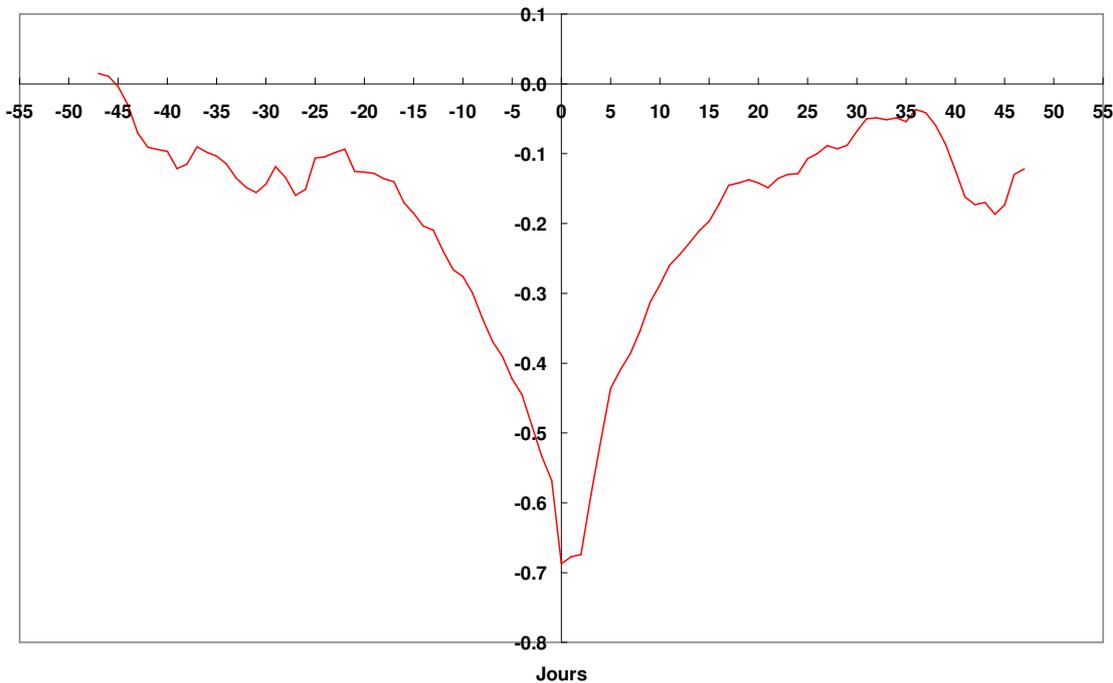


Figure 47 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière corrigée des pertes de charge quadratiques à Azilone (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05).

Le pompage continu pendant toute la période de suivi empêche d'analyser la relation entre les variations piézométriques et les apports des précipitations. Il n'a donc pas été possible de caler une fonction de transfert et donc de simuler le niveau piézométrique pour ce forage.

3.4.2. Ampaza

Synthèse des observations

Le forage d'Ampaza a été implanté sur la base de l'observation d'une fracturation WNW-ESE, repérée sur photo aérienne, à l'aval d'un filon de microgranite marqué par une petite source (SRAE, 1988). Sur le plan géologique, le forage se situe, comme celui d'Azilone, dans des granodiorites à grain moyen et à amphibole, recoupées par des filons de dolérite fracturée et altérée (SRAE, 1986).

Réalisé en 1986 et d'une profondeur de 50 m, ce forage se situe à une altitude de 515 m en rive droite du ruisseau Fiumicellu et à proximité d'une petite source proche de l'axe du talweg. Il recoupe une couverture d'altérites d'une vingtaine de mètres d'épaisseur (Figure 48). Le secteur montre une forte arénisation (on observe en particulier le long de la route qui passe près du forage, des affleurements d'arènes granitiques sur des épaisseurs d'au moins 5 m, lardées de filons de dolérite aux

épontes oxydées). Il comporte cependant une quantité moindre de sources que dans les environs d'Azilone.

Des venues d'eau très significatives (de l'ordre de 4 m³/h) ont été rencontrées entre 12 et 32 m de profondeur (Figure 48), correspondant à la base de la couverture d'altérites. Une venue d'eau moins importante (0,8 m³/h) est observée entre 38 et 47 m. Ce forage semble donc exploiter principalement l'horizon fissuré situé sous la couverture d'arènes meubles.

Au cours de l'essai de pompage réalisé le 22 septembre 1986 par le SRAE, le débit de la source située à proximité en amont du forage a diminué, puis augmenté après l'arrêt du pompage. Il est donc probable que cette source soit liée au même aquifère que le forage, le pompage sur celui-ci provoquant un rabattement aussi bien au sein de l'horizon fissuré que des arènes sus-jacentes, le rabattement au sein de ces dernières formations étant moindre. Il est de plus intéressant de noter que cette source, ainsi que les deux autres repérées plus au sud, sont situées à des altitudes similaires (de l'ordre de 520 m) et en contrebas d'un plateau (sud-est de la Punta di Canapile), où l'on a probablement des épaisseurs importantes d'arènes granitiques. L'aquifère capté par le forage d'Ampaza pourrait de ce fait avoir une extension non négligeable, ou, du moins, faire partie d'un ensemble d'aquifères étendu.

Le forage est exploité toute l'année pour remplir un réservoir de 50 m³. L'exploitation est contrôlée par des flotteurs installés dans le réservoir qui déclenchent le pompage lorsque le niveau d'eau dans celui-ci est bas et qui l'arrêtent quand le réservoir est rempli.

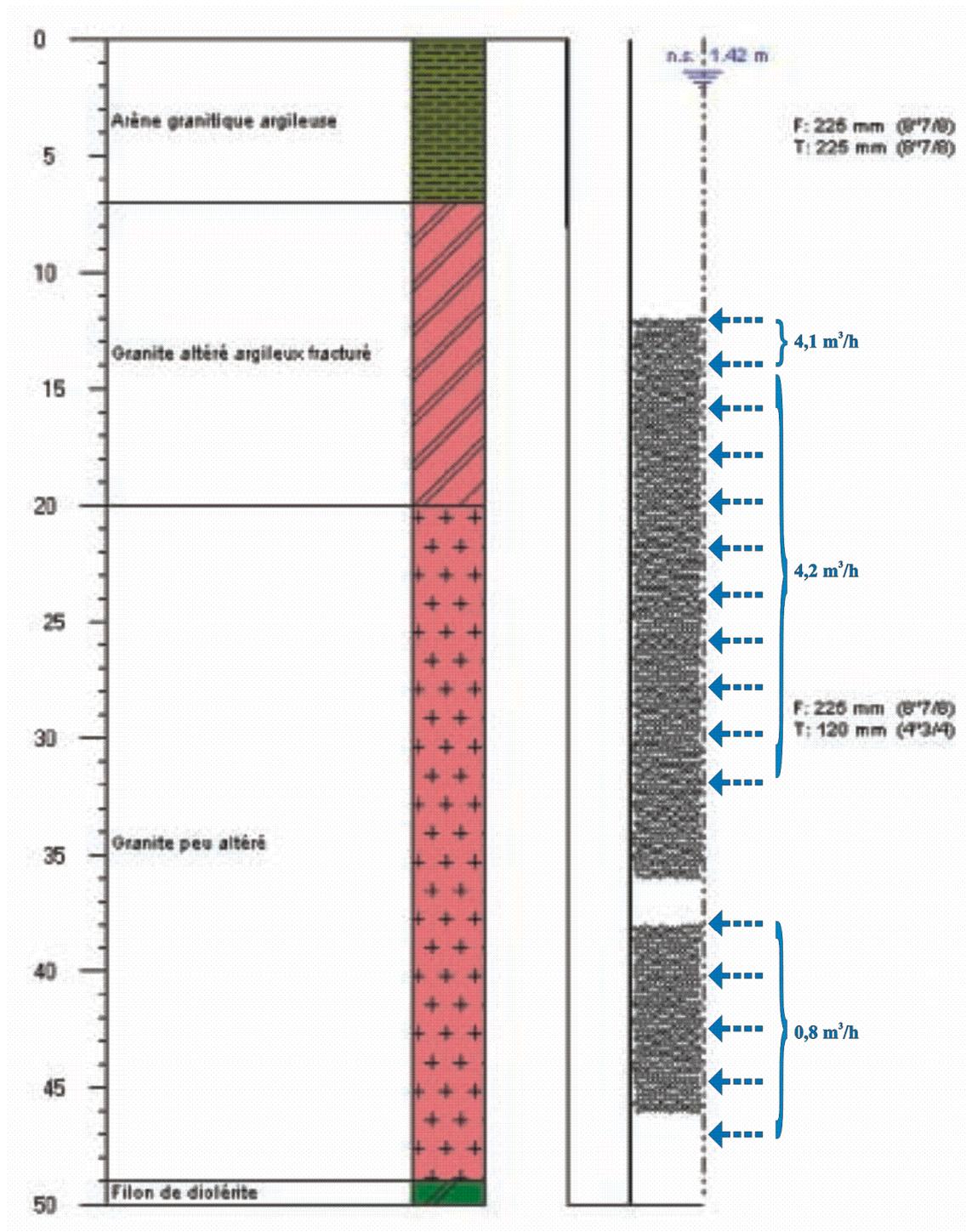


Figure 48 : Coupes géologique et technique du forage d'Ampaza.

Un pompage d'essai réalisé avant la mise en exploitation du forage a conduit à préconiser un débit d'exploitation de 5 à 6 m³/h pendant 8 à 10 h/jour pour obtenir les 50 à 55 m³ journaliers souhaités (SRAE, 1986).

Le débit d'exploitation a été estimé à 9,4 m³/h pour ce forage (Annexe 2). Ce débit est presque deux fois supérieur au débit d'équipement préconisé suite à l'essai de pompage. Il se situe au dessus du débit du troisième palier (8,7 m³/h) pour lequel les rabattements étaient tels que l'essai fut arrêté (SRAE, 1986). Il est donc possible que le pompage appliqué depuis la mise en route du forage ait provoqué son développement, permettant ainsi des débits d'exploitation plus importants.

Un nouvel essai de pompage par paliers de débit avec des paliers plus proches du débit d'exploitation estimé serait souhaitable pour valider cette hypothèse.

Les données du pompage d'essai étant disponibles, nous avons procédé à une nouvelle interprétation, de manière à intégrer notamment les pertes de charge quadratiques et des hypothèses supplémentaires sur les limites hydrodynamiques de l'aquifère (Figure 49). Une synthèse de cette interprétation ainsi que la représentation des données dans un diagramme semi-logarithmique sont présentées à l'Annexe 4.

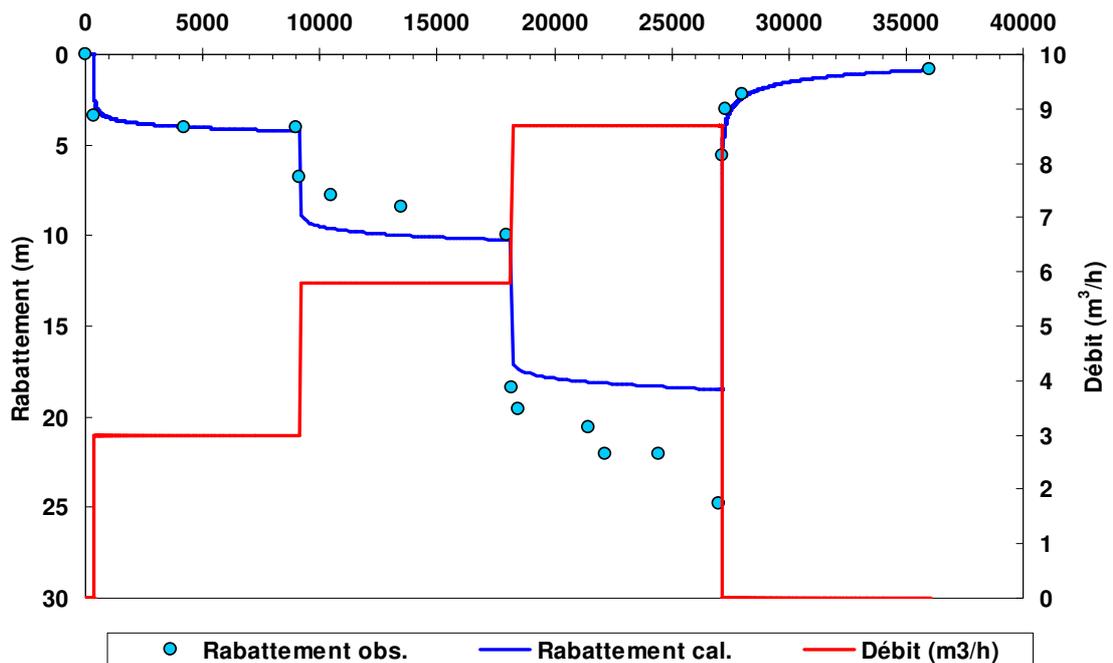


Figure 49 : Ré-interprétation de l'essai de pompage réalisé le 22 septembre 1986 sur le forage d'Ampaza, avec prise en compte des pertes de charge quadratiques.

La valeur du coefficient de pertes de charges quadratiques a été estimée à 0,28 m/(m³/h)² à partir des rabattements mesurés au bout de 15 heures pour les trois paliers de pompage réalisés lors de l'essai de pompage (Annexe 3). Ceci implique que, pour un pompage réalisé au débit d'exploitation actuel (9,4 m³/h), les pertes de charge

quadratiques sont à l'origine d'un rabattement de 24,71 m (sur les 28.53 m de rabattement total provoqués par ce pompage au bout de 15 h). Compte tenu du développement probable du forage depuis sa mise en exploitation, cette proportion des pertes de charges quadratiques est très vraisemblablement définie par excès. On peut en effet observer sur le graphique de l'Annexe 3, que la prise en compte du rabattement mesuré à la fin du troisième palier augmente de manière considérable les pertes de charge. Il semble donc que l'évolution des rabattements au cours du troisième palier soit liée à l'apparition de pertes de charge qui ne sont plus quadratiques. Au vu de ce constat et n'ayant pas d'informations sur la qualité, ni les conditions dans lesquelles se sont faites les observations au cours de cet essai, le couple débit/rabattement du dernier palier n'a pas été retenu. Les pertes de charge quadratiques calculées sur les deux premiers de pompage ont de ce fait été réduites de moitié ($c = 0.116$ et $1\,500\,296 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$).

Pour obtenir un ajustement satisfaisant avec la solution analytique choisie (Theis) (Figure 49), celui-ci a donc été conduit de manière à simuler au mieux l'évolution des rabattements au cours des deux premiers paliers de l'essai. Une transmissivité de $2,42 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ a ainsi été obtenue en intégrant les pertes de charge quadratiques.

Le coefficient d'emmagasinement estimé pour cet essai de pompage (de l'ordre de 64% – Annexe 4), est présenté à titre indicatif (cf. § 3.3.1). Les incertitudes sur la valeur réelle des pertes de charge quadratiques ainsi que la qualité de l'ajustement de l'essai de pompage font que cette valeur d'emmagasinement n'est pas réaliste.

Le coefficient de perte de charge quadratique retenu pour l'ajustement ($0.116 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$) a été utilisé pour corriger les niveaux piézométriques observés (suivant l'équation (2)) de manière à pouvoir étudier les relations existant entre précipitations efficaces, débit de pompage et niveau piézométrique. La Figure 44 présente l'effet de la correction ainsi que les différentes variables citées, sur l'ensemble de la période d'étude

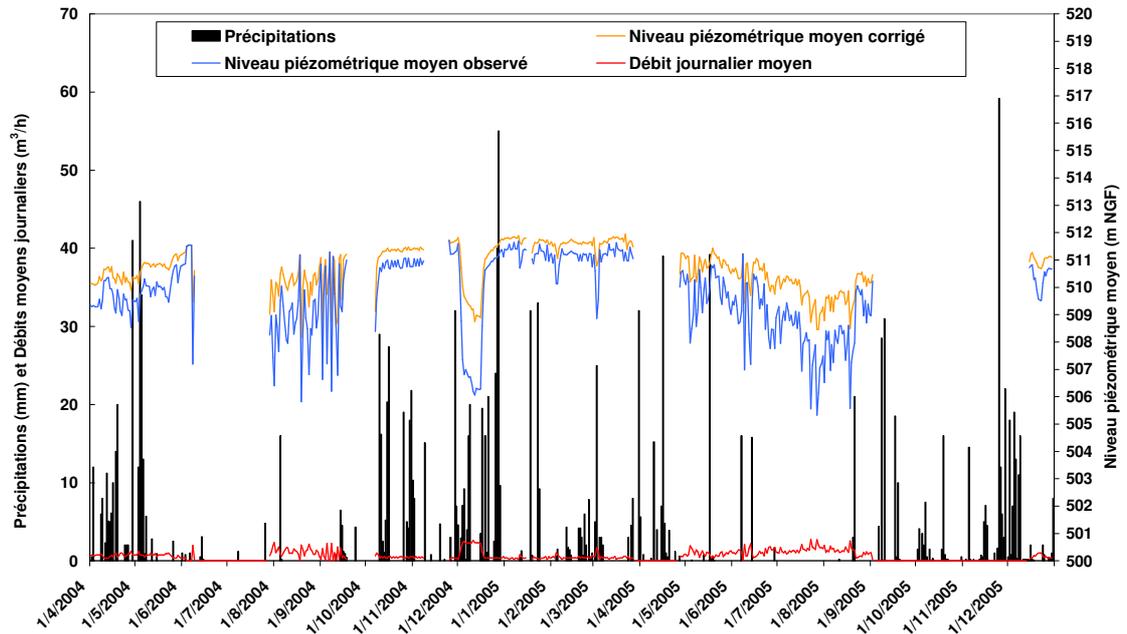


Figure 50 : Niveaux piézométriques observés et corrigés des pertes de charge quadratiques (m NGF), précipitations (mm) et débits moyens journaliers (m^3/h) mesurés au forage d'Ampaza (altitude : 515 m NGF).

Le pompage sur ce forage étant continu, le niveau piézométrique est constamment influencé, de sorte qu'il n'est pas possible d'analyser les relations entre piézométrie et précipitations, hors effet des pompages. On peut cependant observer que le niveau piézométrique moyen reste relativement haut dans le forage (il fluctue entre 509 et 512 m, hors saison estivale et pompages intenses - Annexe 1).

Le volume pompé sur l'ensemble de la période de suivi est de l'ordre de $13\,307\ m^3$.

Les pompages continus sur l'année rendent impossible la mise en évidence de la recharge de l'aquifère et d'un éventuel tarissement.

Relations Précipitations/Débit de pompage/Niveau Piézométrique

La Figure 51 présente le diagramme d'auto-corrélation du niveau piézométrique observé sur le forage d'Ampaza, sur toute la période de suivi. Ce diagramme met en évidence la vitesse à laquelle l'aquifère réagit aux changements du débit de pompage moyen et le temps qu'il met à retrouver sa piézométrie de départ, lorsque les variations de débit cessent. Si l'on considère que l'auto-corrélation n'est plus significative pour des valeurs inférieures à 0.3, on peut estimer l'aquifère d'Ampaza réagit de manière modérée aux changements de débit, puisque la corrélation devient non significative au-delà d'une quinzaine de jours.

Le corrélogramme croisé entre les précipitations et la piézométrie moyenne journalière n'est pas calculé car l'effet des pompages est prépondérant pendant toute la période de suivi. Par contre, le corrélogramme croisé entre les débits moyens journaliers et la piézométrie moyenne journalière est présenté sur la Figure 52.

Il présente une forte corrélation négative, ce qui indique que, logiquement, le niveau piézométrique diminue fortement avec l'augmentation des débits. La décroissance de l'anti-corrélation est cependant assez lente, comme dans le cas d'Ampaza, puisqu'elle met une dizaine de jours à devenir non significative et plus de 35 jours à s'annuler. La stratégie de pompage adoptée sur ce forage a donc un effet relativement persistant sur la piézométrie.

Le pompage continu pendant toute la période de suivi empêche d'analyser la relation entre les variations piézométriques et les apports des précipitations. Il n'a donc pas été possible de caler une fonction de transfert et donc de simuler le niveau piézométrique pour ce forage.

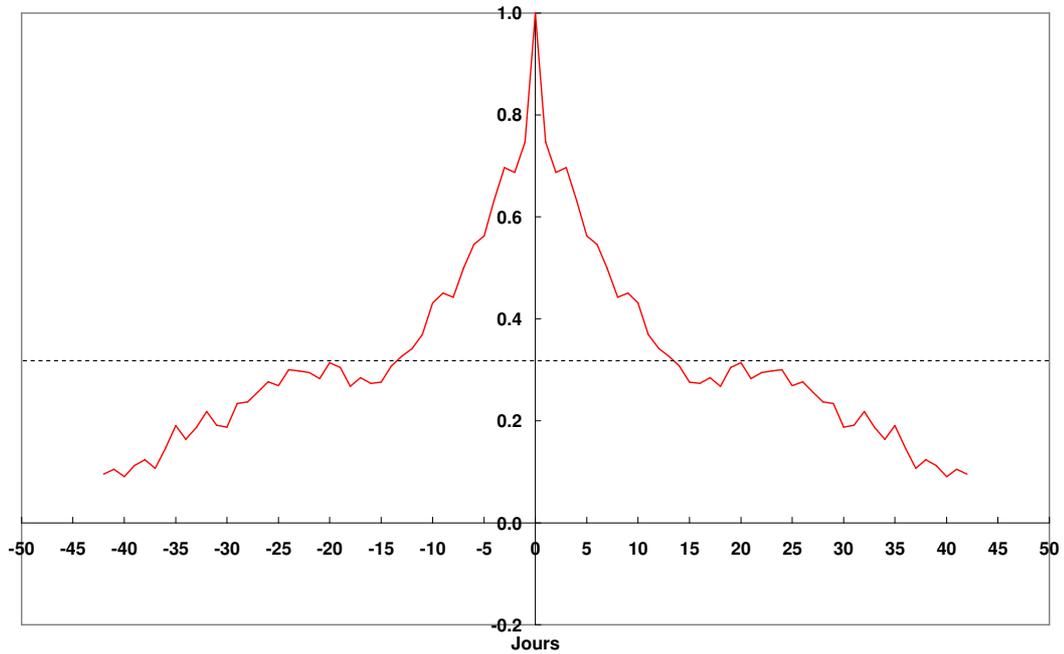


Figure 51 : Auto-corrélogramme de la piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques observée au forage d'Ampaza entre le 01/04/04 et le 31/12/05.

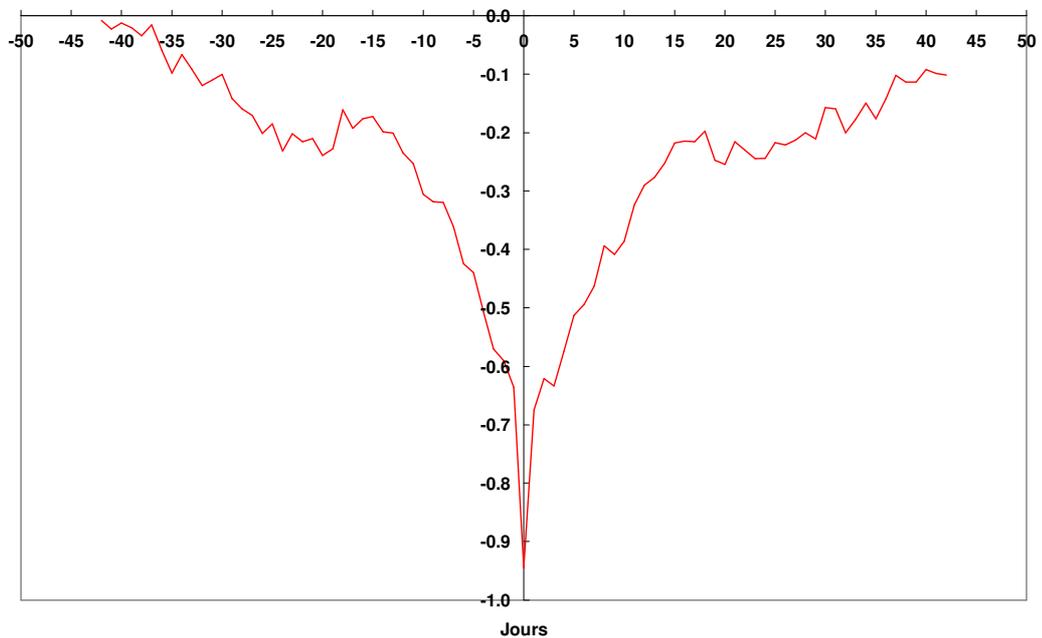


Figure 52 : Corrélogramme croisé débits moyens journaliers de pompage – piézométrie moyenne journalière non corrigée des pertes de charge quadratiques à Ampaza (calculé entre le 01/04/04 et le 31/12/05).

4. Typologie de la ressource en eau dans le granite en Corse

4.1. DISTINCTIONS TYPOLOGIQUES ENTRE LES DEUX TYPES D'AQUIFÈRES

Les principaux résultats quantitatifs obtenus pour chacun des forages sont présentés dans le Tableau 2, pour comparer les deux types de contextes aquifères.

Forages	Pioggiola	Tallone	Urba 4	Urba 3	Azilone	Ampaza
Type	sans couv. altérites	sans couv. altérites	sans couv. altérites	sans couv. altérites	avec couv. altérites	avec couv. altérites
Stratégie de pompage	saison	saison	annuelle	annuelle	annuelle	annuelle
Débit d'équipement (m ³ /h)	5	5.1	1.25	NC	6.5	6
Temps de pompage prévu (heures/jour)	12	14	14	NC	20	10
Débit d'exploitation estimé (m ³ /h)	6.4	5.8	2.4	NC	7.1	9.4
Temps de pompage moyen estimé (entre Juillet et Septembre - h/jour)	5.4	6	8.8	NC	6.9	3.4
Fréquence de pompage estimée (entre Juillet et Septembre - n° pompages/jour)	1.8	53	24.7	NC	6.5	5.3
Volume pompé prévu (m³/jour) (temps pomp. prévu * Q expl.)	60	71.4	17.5	NC	130	60
Volume pompé estimé (m³/jour) (temps pomp. estimé * Q expl.)	35	35	21	NC	49	32
Transmissivité suite à l'essai de	1.4 - 2.6	0.9 - 2.2	0.55 - 1.5	NC	NC	NC

Forages	Pioggiola	Tallone	Urba 4	Urba 3	Azilone	Ampaza
pompage (*10 ⁻⁵ m ² /s)						
Transmissivité estimée (*10 ⁻⁵ m ² /s)	1.56	2.38	1.03	NC	6.94	24.2
Coef. de perte de charges quadratiques (m/(m ³ /h) ²)	0.57	1.22	NC	NC	0.364	0.116
Influence limite alimentée (heures)	2.5	5	NON	NC	1.5	NON
Effet mémoire aquifère hors pompage (jours)	30	35	35	25	NC	NC
Effet mémoire aquifère en pompage (jours)	4	3	30	NC	2	15
Pic de réaction de l'aquifère aux précipitations (jours)	2	3	20	20	NC	NC
Durée d'influence des précipitations (jours)	20	20	35	40	NC	NC
Durée d'influence des pompages (jours)	4	3	20	NC	35	35
RI rapide aux précipitations (jours)	0	2	NC	NC	NC	NC
RI lente aux précipitations (jours)	23	50	NC	NC	NC	NC
RI lente au pompage (jours)	1	1	NC	NC	NC	NC

Tableau 2 : Synthèse des principaux résultats quantitatifs obtenus pour chacun des forages (NON signifie que le paramètre n'a pas été utilisé ; NC signifie que la valeur du paramètre n'a pu être calculée ou bien n'était pas disponible dans les documents consultés ; RI : réponse impulsionnelle).

Les principales observations que l'on peut faire à l'analyse de ce tableau sont les suivantes (dans ce qui suit, les aquifères de type fissuré sans couverture d'altérites seront désignés comme aquifères fissurés et ceux avec couverture d'altérites comme altérés/fissurés):

- **Les débits d'équipement et d'exploitation des forages implantés dans les aquifères de type altérés/fissurés sont supérieurs à ceux que l'on observe sur les forages dans les aquifères fissurés.** La Figure 53 montre que les volumes moyens journaliers pompés estimés sur chacun des forages sont cependant similaires, car ils dépendent des durées de pompage. Cette figure permet aussi de montrer que 4 forages sur 5 sont sous-exploités, puisque l'exploitation journalière dont ils font l'objet représente 40 à 50% de celle proposée suite à l'essai de pompage. Seul le forage d'Urba4 est exploité avec une intensité légèrement supérieure à ce qui était préconisé à l'origine.

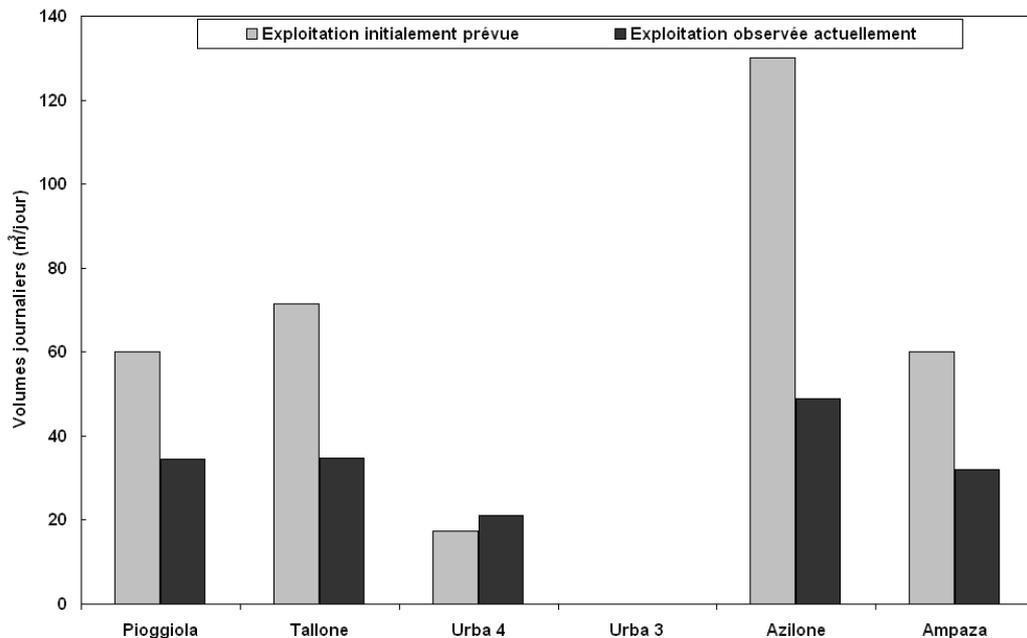


Figure 53 : Comparaison des volumes moyens journaliers pompés prévus/observés en fonction du débit d'exploitation et de la durée de pompage journalière prévue (suite à l'essai de pompage) /calculée (valeur moyenne sur l'ensemble de la chronique disponible).

- **Les transmissivités estimées pour les aquifères altérés/fissurés sont significativement plus importantes que celles estimées pour les aquifères fissurés.** Ceci est relié à l'intensité de la fissuration qui, dans les contextes altérés/fissurés, est plus importante et se développe sur une grande partie du profil recoupé par le forage que dans les contextes fissurés. Cela se vérifie sur les coupes géologiques des forages d'Azilone et d'Ampaza (Figure 42 et Figure 48) sur lesquelles on observe des venues d'eau sur la majeure partie du profil sous les altérites, alors que pour Pioggiola et Tallone (Figure 9 et Figure 21),

elles sont plus localisées. C'est donc la contribution du grand nombre de fissures de l'horizon fissuré-altéré de l'aquifère avec couverture qui génère une transmissivité équivalente plus élevée que dans l'aquifère fissuré ou seules quelques fissures relativement localisées contribuent à la transmissivité de l'aquifère.

- Les pertes de charges quadratiques et les temps d'influence des limites alimentées auxquelles il est fait appel pour interpréter ces essais sont systématiquement supérieurs dans les aquifères fissurés (si l'on considère que les pertes de charge quadratiques dues aux ouvrages eux-mêmes sont similaires et négligeables, ce qui est une hypothèse forte). Concernant les pertes de charge, ceci est probablement lié au fait que lorsque les écoulements se concentrent dans une ou deux fissures, cela génère des vitesses d'écoulement plus élevées que s'ils sont distribués dans un grand nombre de fissures (section d'écoulement équivalente plus grande). Or, plus la vitesse d'écoulement est grande, plus la part des écoulements turbulents (pertes de charge quadratiques) est importante par rapport aux écoulements laminaires (pertes de charge linéaires). Il convient par contre d'être prudent concernant la signification des limites alimentées. Dans le cas d'Azilone, la limite alimentée peut traduire le drainage de l'eau stockée dans les altérites (dont la capacité de stockage est plus grande que celle de l'horizon fissuré), qui permet de compenser l'effet du pompage sur le niveau piézométrique, limitant ainsi le rabattement. Dans le cas de Pioggiola et de Tallone, elle pourrait plutôt être reliée aux cours d'eau proches ou bien à la connexion avec des zones plus fracturées, sans que nous ne disposions d'éléments suffisants pour trancher la question.
- Il n'est pas possible de comparer la réaction des deux types d'aquifères aux recharges par les précipitations, du fait de l'exploitation annuelle des deux forages d'Azilone et d'Ampaza. En ce qui concerne les aquifères fissurés, il apparaît que ceux-ci réagissent parfois très rapidement aux précipitations (en moins de 3 jours pour Pioggiola et Tallone), et parfois plus lentement (20 jours pour les forages d'Urbalacone). Ce type d'aquifère présente donc une certaine vulnérabilité aux pollutions, que l'on peut estimer supérieure à celle des aquifères fissurés-altérés, pour lesquels la couverture d'altérites joue un rôle protecteur (filtration). La différence entre les différents aquifères fissurés est par contre moins claire lorsque l'on analyse la résorption de l'effet des précipitations. Celle-ci peut durer de 20 jours pour Pioggiola et Tallone, à 40 jours pour Urbalacone, sans qu'il soit possible de séparer l'effet de la précipitation et le tarissement naturel de l'aquifère. Ces ordres de grandeur permettent cependant de simuler de manière satisfaisante les variations piézométriques dans l'aquifère pour les forages de Pioggiola et de Tallone, en intégrant les pompages (cf. Figure 20 et Figure 32).
- En ce qui concerne la durée de l'influence du pompage sur les aquifères, les valeurs obtenues semblent indiquer que les aquifères fissurés résorbent beaucoup plus rapidement l'effet d'un pompage que les aquifères altérés/fissurés. Cependant, ces valeurs sont contraintes par les stratégies de

pompage (les fortes fréquences de pompage influencent par exemple plus longtemps le niveau piézométrique dans le forage). Les forages présentant de trop fortes disparités de ce point de vue, nous ne disposons pas d'assez d'éléments pour valider cette comparaison.

L'ensemble de ces informations tend cependant à indiquer que **la productivité des aquifères fissurés avec couverture d'altérites est supérieure à celle des aquifères sans couverture d'altérites.**

4.2. COMPARAISONS AVEC LES BILANS HYDRIQUES

Les forages étudiés sont situés dans des bassins versants de grande taille, à l'exutoire desquels des stations hydrométriques gérés par la DIREN permettent de mesurer les écoulements.

Si l'on considère les surfaces situées en amont des forages comme leurs aires **minimales** d'alimentation (cf. Figure 54 et Figure 55), il est possible de comparer les volumes pompés aux forages aux volumes écoulés à l'exutoire. Cette comparaison s'appuie sur l'hypothèse que la lithologie sur les bassins versants concernés est homogène et de même type que celle dans laquelle est implanté le forage. Ainsi, en appliquant aux volumes pompés, le rapport entre l'aire d'alimentation des forages et l'aire des bassins versants, on peut estimer la part des écoulements que l'exploitation des eaux souterraines représenterait, si des forages de mêmes caractéristiques étaient exploités sur l'ensemble du bassin versant. Les ordres de grandeur des rapports de volumes fournissent ainsi une information sur la part que représenteraient les prélèvements dans l'aquifère, par rapport aux écoulements superficiels que l'on peut estimer sur l'aire supposée d'alimentation du forage. Cette comparaison a été faite en étiage (considéré ici entre juillet et septembre) et sur l'année (Tableau 3). Les lames d'eau écoulées sont des valeurs moyennées sur, au minimum, les 30 dernières années mesurées aux stations hydrométriques contrôlant les bassins versants dans lesquels se trouvent les forages (cf. Figure 55 et Figure 54).

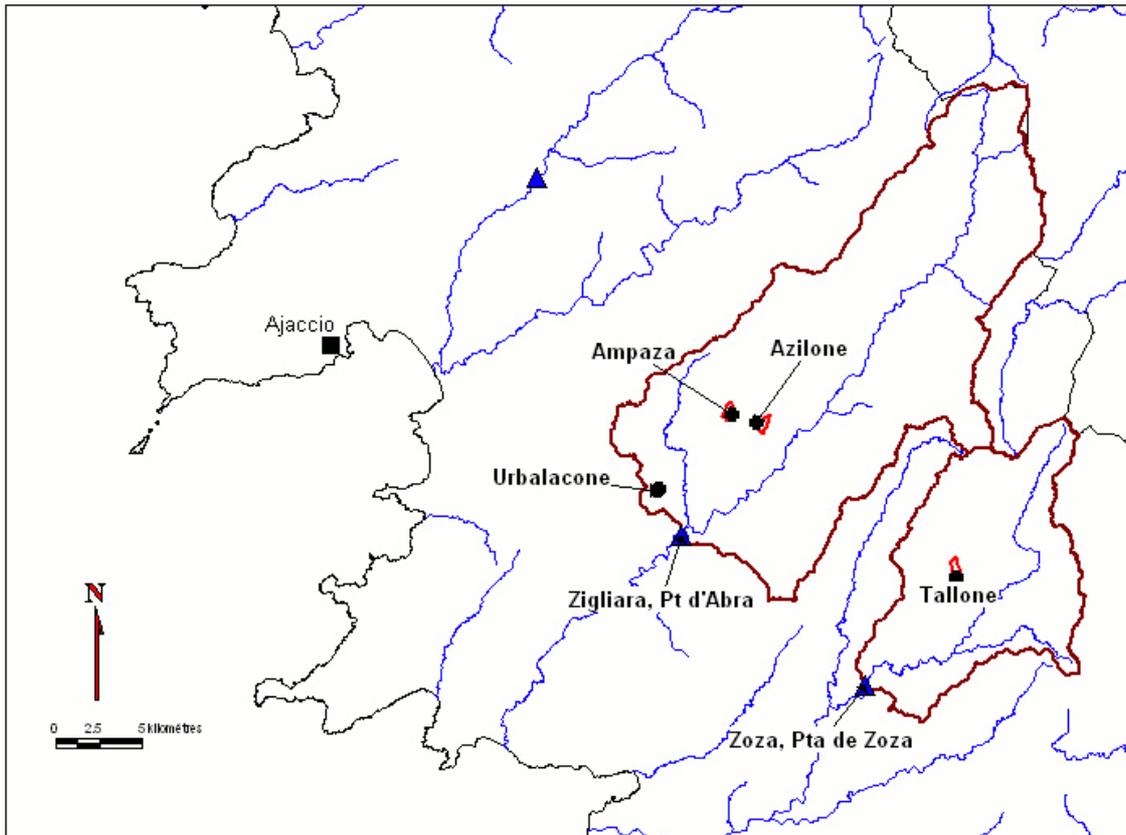


Figure 54: « aire d'alimentation » (en rouge) et localisation des forages d'Urbalacone, Ampaza, Azilone et Tallone au sein des bassins versants contrôlés par les stations hydrométriques des Ponts d'Abra et de Zoza.

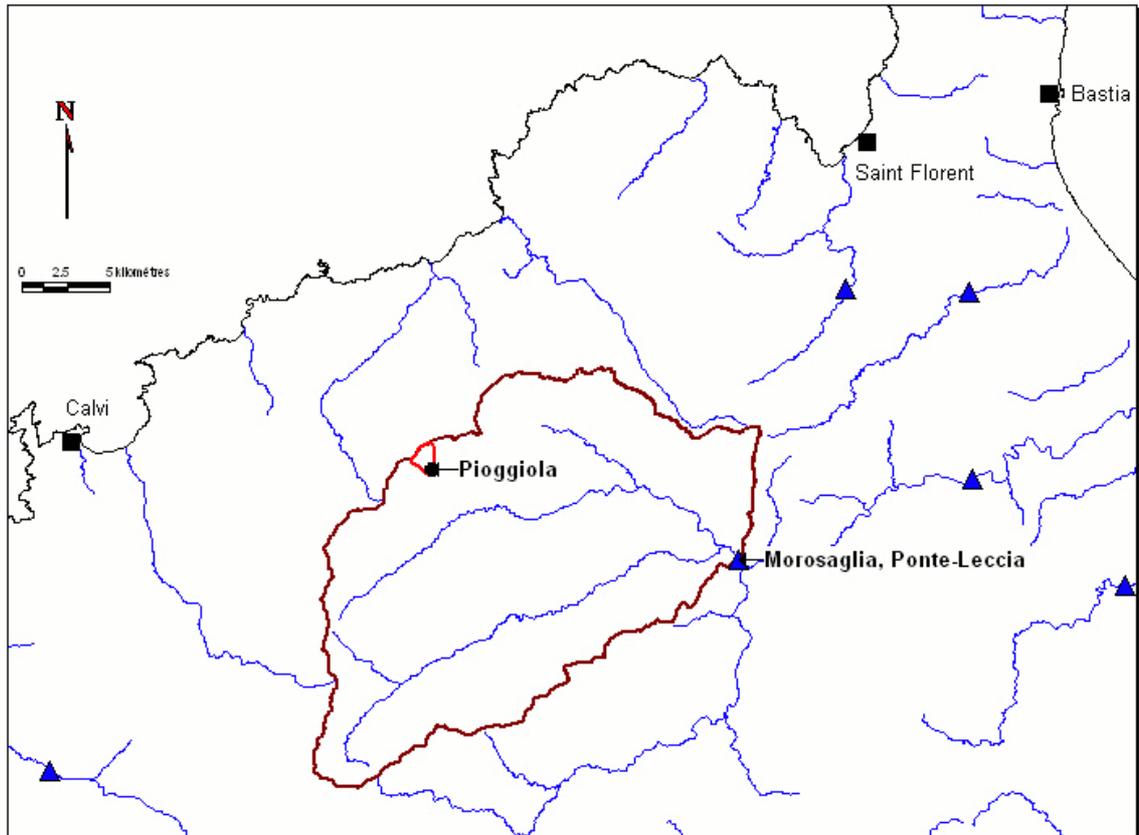


Figure 55 : « aire d'alimentation » (en rouge) et localisation du forage de Pioggiola au sein du bassin versant contrôlé par la station hydrométrique de Ponte-Leccia.

	Pioggiola	Tallone	Azilone	Ampaza
Aire d'alimentation (km ²)	1.6	0.3	0.4	0.4
Aire bassin versant (km ²)	364	130	330	330
Rapport de surface (bv/alim)	228	433	825	825
Volumes pompés juillet à septembre 2005 (m3)	1261	1330	3418	2744
Volumes pompés 2005 (m3)	1611	1412	12344	6874
Volumes pompés équivalents sur tout le bv (vol pomp * rap surf) juillet à septembre (m3)	286878	576333	2819850	2263800
Volumes pompés équivalents sur tout le bv 2005 (m3)	366503	611867	10183800	5671050
Lame d'eau exutoire juillet à septembre (mm)	26	39	45	45
Lame d'eau exutoire Janvier à décembre (mm)	450	926	720	720
Volume écoulé exutoire (lame*aire bv) juillet à septembre (m3)	9464000	5070000	14850000	14850000
Volume écoulé exutoire Janvier à décembre (m3)	163800000	120380000	237600000	237600000
Rapport volume pompé/écoulé juillet à septembre (%)	3	11	19	15
Rapport volume pompé/écoulé Janvier à décembre (%)	~0	1	4	2

Tableau 3 : Comparaison des volumes pompés au niveau des forages de Pioggiola, Tallone, Azilone et Ampaza, aux volumes écoulés à l'exutoire au cours de l'étiage (juillet à septembre) et sur l'année 2005.

Le Tableau 3 présente l'ensemble des éléments de la comparaison à l'échelle du bassin versant. On constate que, sous réserve des hypothèses détaillées plus haut, les volumes pompés représenteraient entre 3% et 19% des volumes écoulés à l'exutoire pendant l'étiage (juillet à septembre). Les volumes pompés aux forages implantés dans les aquifères de type altéré/fissuré représentent une part plus importante des écoulements à l'exutoire que ceux implantés dans les aquifères de type fissuré. La même comparaison faite sur l'année ne présente un intérêt que pour les forages d'Azilone et Ampaza (ceux de Tallone et Pioggiola ne sont pas exploités toute l'année) et l'on voit que la part des volumes pompés devient négligeable au regard des écoulements observés à l'exutoire.

Les hypothèses utilisées pour faire cette comparaison font que ces ordres de grandeur sont cependant très incertains et probablement fortement surestimés. En effet, les aires d'alimentations des aquifères sont rarement limitées aux aires des bassins d'alimentation topographiques (notion de bassin versant souterrain). De plus, l'hypothèse d'homogénéité géologique introduit une surestimation de la superficie

potentiellement aquifère sur le bassin versant en considérant que la totalité de sa superficie est aquifère.

Cette comparaison permet cependant de conclure que :

1. les volumes prélevés au niveau des forages sous les conditions d'exploitation actuelles peuvent représenter une part non négligeable des écoulements superficiels en période d'étiage. Pour les forages exploités de manière intensive (Azilone et Ampaza) et sur des superficies où les formations géologiques donneraient lieu à des contextes aquifères de type altéré/fissuré, on peut raisonnablement penser que cette part pourrait atteindre jusqu'à 10% des écoulements superficiels en étiage.
2. au regard des volumes écoulés sur l'ensemble de l'année, les prélèvements en forage ne représentent qu'une part négligeable des écoulements. L'augmentation des prélèvements hors période estivale en exploitant un même aquifère avec plusieurs forages est donc tout à fait envisageable.

4.3. VOLUMES EXPLOITÉS PAR RAPPORT À LA POPULATION

Les communes de Pioggiola et d'Azilone-Ampaza ont des populations comprises entre 80 et 100 habitants (données INSEE, recensement 1999 et 2004). Si l'on ramène la part du volume exploité sur les forages sur la période de juillet à septembre (cf. Tableau 3) au nombre d'habitants par commune on obtient les rapports suivants :

- Pour Pioggiola : $1261/100 = 12.6 \text{ m}^3/\text{habitant} = \mathbf{140}$ litres/jour/habitant
- Pour Azilone-Ampaza : $(12344 + 6874) / 100 = 192,18 \text{ m}^3/\text{habitant} = \mathbf{2\ 000}$ litres/jour/habitant

La très forte différence entre ces deux communes vient certainement du fait que ces chiffres ne tiennent pas compte des autres sources d'alimentation en eau de la commune (sources captées, prises en rivières/ruisseaux, forages privés), de l'augmentation estivale de la population et surtout de l'usage réel de l'eau. En effet, un grand nombre de jardins de taille non négligeable sont arrosés avec l'eau du réservoir à Azilone, ce qui représente une part importante de la consommation, d'après l'employé communal en charge de la maintenance des installations sur la commune.

Ce calcul n'est pas réaliste sur les communes d'Urbalacone et de Quenza (Tallone) du fait des difficultés de fonctionnement que ces forages ont rencontré.

La micro-région de la Balagne, dans laquelle se trouve comprise la commune de Pioggiola (Figure 56), contient près de 9 000 habitants (données INSEE recensement 1999). Si l'on fait l'hypothèse qu'ils ont une consommation du même ordre que celle que l'on observe sur Pioggiola, on peut estimer qu'ils consommeraient un total de $9\ 000 \times 0.14 = 1\ 260 \text{ m}^3/\text{jour}$, ce qui représenterait un total de $1\ 260 \times 92 = 115\ 920 \text{ m}^3$ pour la période de juillet à septembre. Cela veut donc dire qu'il faudrait de l'ordre de

$115\,920/1261 = 90$ forages du type de celui qui est implanté à Pioggiola pour alimenter la population de la Balagne entre juillet et septembre. Si l'on considère que l'aire d'alimentation de ce forage est égale à 1.6 km^2 (Tableau 3), l'implantation de 90 forages représenterait une superficie de $90 \times 1.6 = 144\text{ km}^2$, c'est-à-dire moins de 40 % des 382 km^2 que couvre le territoire de cette micro-région.

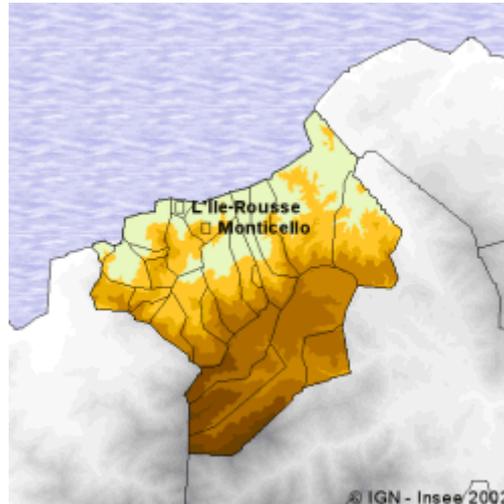


Figure 56: Carte schématique de la micro-région de la Balagne.

La micro-région du Taravo, dans laquelle se trouve comprise la commune d'Azilone-Amapaza (Figure 57), contient près de 4 720 habitants (données INSEE recensement 1999). Si l'on fait l'hypothèse qu'ils ont une consommation du même ordre que celle que l'on observe sur la commune d'Azilone-Ampaza, on peut estimer qu'ils consommeraient un total de $4\,720 \times 2 = 9\,440\text{ m}^3/\text{jour}$, ce qui représenterait un total de $9\,440 \times 92 = 868\,480\text{ m}^3$ pour la période de juillet à septembre. Cela veut donc dire qu'il faudrait de l'ordre de $868\,480 / (12\,344 + 6\,874) = 45$ forages du type de ceux qui sont implantés à Azilone et Ampaza pour alimenter la population du Taravo entre juillet et septembre. Si l'on considère que l'aire d'alimentation de ce forage est égale à $0.4 + 0.4 = 0.8\text{ km}^2$ (Tableau 3), l'implantation de 90 forages du même type représenterait une superficie de $45 \times 0.8 = 36\text{ km}^2$, qui représente moins de 7 % des 568 km^2 que couvre cette micro-région.

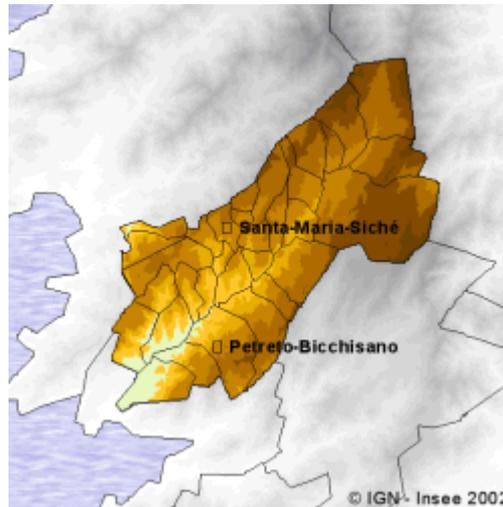


Figure 57: Carte schématique de la micro-région du Taravo.

Les valeurs issues de ces comparaisons sont bien évidemment associées à des incertitudes importantes. La plus importante d'entre elles concerne la taille réelle des aires d'alimentation des forages. Les hypothèses sur lesquelles s'appuient les estimations de consommation et de population sont aussi très discutables.

Cette analyse présente cependant l'intérêt de replacer les volumes d'eau exploités dans le contexte général des usages de l'eau dans les régions où se trouvent les forages. On peut donc en conclure, qu'au vu de la sous-exploitation des aquifères observée au niveau de la plupart des forages suivis (cf. Figure 53 par exemple), on peut raisonnablement penser **qu'une partie non négligeable des besoins en alimentation en eau potable des populations pourraient être couverts grâce à une exploitation optimisée de l'eau souterraine**. Pour que cette affirmation soit réaliste, il est néanmoins nécessaire de s'assurer que l'on se trouve dans des régions favorables du point de vue de la population (densité de population modérée et une consommation d'eau régulière et maîtrisée, avec en particulier des contrastes saisonniers acceptables) et de la géologie (présence d'horizons d'altérites ou densité de fracturation importante). Dans de telles conditions, la réalisation de plusieurs forages répartis sur un aquifère ou sur plusieurs aquifères différents pourrait garantir une ressource en eau intéressante.

Conclusions

Ce rapport présente l'ensemble des analyses et travaux de modélisation effectués à partir des données acquises grâce au suivi de 6 forages exploités pour l'alimentation en eau communale et implantés dans le socle granitique en Corse.

L'ensemble des données acquises (niveaux piézométrique au pas de temps de 3 à 6 minutes, précipitations et températures journalières mesurées aux stations et ETP calculées aux points de grille, les plus proches des forages) a été stocké dans une base de données, développée sous ACCESS, de manière à faciliter l'extraction de données synthétiques.

2 forages (Pioggiola, Tallone) font l'objet d'une exploitation saisonnière, 2 autres (Urba 3 et 4) ont subi des arrêts d'exploitation pour cause de pannes mécaniques ou bien de pollution et les deux derniers (Azilone et Ampaza) sont exploités toute l'année. L'exploitation est contrôlée par le niveau de remplissage des réservoirs communaux pour 3 forages (Pioggiola, Azilone et Ampaza), alors que pour 2 autres, elle est contrôlée par minuterie et par des capteurs de niveau présents dans le forage.

Ces stratégies de pompage font que si les forages permettent de satisfaire la demande dans la plupart des cas (exception faite de Tallone, pour des raisons techniques), le niveau de remplissage des aquifères dans lesquels ils sont implantés semble être très peu impacté par le pompage sur le long terme. Ces forages pourraient donc faire, dans la plupart des cas, l'objet d'une exploitation de l'ordre de 2 fois plus intense, sans mettre en danger la ressource disponible.

Une distinction typologique est proposée pour différencier les deux types de contextes aquifères différents dans lesquels sont implantés les forages suivis:

- les aquifères de type fissuré avec couverture d'altérites, correspondant à des environnements où le profil d'altération aura été préservé de l'érosion (cas du forage d'Azilone et d'Ampaza),
- les aquifères de type fissuré sans couverture d'altérites, lorsque l'érosion a fait disparaître la majeure partie des altérites ou bien lorsque la fissuration est principalement liée à de la fracturation tectonique (cas des forages de Pioggiola, d'Urba 3 et 4 et de Tallone).

Les principales différences observées entre ces deux contextes hydrogéologiques, à travers les analyses des données obtenues grâce au suivi des forages, sont :

- **les aquifères de type fissuré avec couverture d'altérites présentent une productivité plus importante que ceux sans couverture d'altérites.** Cette productivité supérieure se traduit essentiellement par des débits d'exploitation et des transmissivités plus importants au sein de ce type d'aquifères,

- des pertes de charge plus importantes semblent systématiquement intervenir lors des pompages dans les aquifères fissurés sans couverture d'altérites. Du fait de la courte durée des pompages (entre 1 et 5 heures), ces pertes de charge jouent un rôle prépondérant dans la réponse de l'aquifère (rabattement et remontée très rapides du niveau de l'eau dans le forage au démarrage et à l'arrêt du pompage). Ceci implique que pour les aquifères sans couverture, le rendement du pompage pourrait être amélioré par un **pompage à un débit plus faible sur une période plus longue**.

La comparaison des volumes exploités sur les forages et des volumes d'écoulements superficiels montre que, les volumes exploités sur des aquifères de type fissuré avec couverture d'altérites peuvent représenter jusqu'à 10% des écoulements mesurés dans les cours d'eau pendant l'étiage (considéré ici de juillet à septembre). La ressource en eau souterraine permet donc d'exploiter une part non négligeable de la ressource disponible durant cette période. La part du volume exploité devient cependant négligeable au regard des volumes écoulés annuels, ce qui montre que l'on peut certainement exploiter la ressource en eau souterraine de manière beaucoup plus intense à cette échelle de temps.

Enfin, l'analyse des usages l'eau souterraine montre qu'**une partie non négligeable des besoins en alimentation en eau potable des populations pourraient être couverts, au travers d'une exploitation optimisée de l'eau souterraine**, sous réserve de se trouver dans des conditions géographiques et géologiques favorables.

Compte tenu de la faible intensité d'exploitation de ces aquifères (mais aussi et surtout de la prépondérance des effets de puits et des pertes de charge dans la partie proximale de l'aquifère, sur les rabattements), il n'a pas été possible d'étudier l'intérêt d'appliquer des méthodes de gestion active sur les forages suivis.

Perspectives

Les perspectives dégagées par le travail réalisé peuvent être déclinées selon deux axes d'approfondissement des connaissances:

1. Localisation et caractérisation sur l'ensemble du territoire de socle granitique en Corse, des zones sur lesquelles on trouve des aquifères fissurés avec couverture d'altérites (zone les plus favorables à l'implantation de forages d'eau comme démontré au sein de cette étude) :

- Un travail de cartographie qui viserait à repérer les horizons d'altérites et les fractures pouvant potentiellement les drainer préférentiellement peut être entrepris sur la base :
 - de caractérisations *géomorphologiques* sur MNT (pentes et réseau de drainage hydrographique), *lithologiques* (type de granites préférentiellement altérés et densité de fracturation),
 - de méthodes géophysiques (*aéromagnétisme*, qui permet de repérer les accidents tectoniques invisibles sur le terrain et *sondages RMP*, qui permettent de caractériser l'état de saturation du sous-sol jusqu'à 50 m de profondeur),
 - de visites de terrain de validation des zonages proposés.

2. Étude des possibilités d'optimisation de l'exploitation de l'eau souterraine et estimation de la réserve en eau exploitable :

- Le réseau de suivi des niveaux piézométriques pourrait être maintenu sur les forages les plus représentatifs des deux types de contextes aquifères (Pioggiola ou Tallone (sous réserve d'une amélioration de son fonctionnement, Urba 3 ou Urba 4 (pour étudier plus finement leur comportement plus inertiel), Azilone ou Ampaza), pour modéliser plus finement les processus et, notamment, *tester différentes stratégies de pompage, évaluer les résultats en termes de rendements en eau, en énergie et de réactions de l'aquifère de différentes stratégies (pompages à plus faible débit pendant plus longtemps)*. Les forages conservés devront être équipés de débitmètres et de nouveaux essais de pompage devront être réalisés sur certains d'entre eux (Ampaza et Azilone),
- Un travail de recherche plus approfondi (notamment auprès des particuliers et des communes ayant réalisé des forages récemment) pourrait être entrepris pour localiser et équiper un forage qui soit implanté dans des altérites, mais dont l'exploitation soit saisonnière, de manière à pouvoir

analyser les réactions de la nappe aux précipitations dans ce type de contexte aquifère.

- Un bassin versant de taille réduite et à fort potentiel comme celui d'Azilone-Ampaza pourrait être équipé de manière plus conséquente avec :
 - des piézomètres plus ou moins proches des forages, pour mieux décrire l'impact des pompages sur la piézométrie autour de l'aquifère,
 - des appareils de suivi des débits des cours d'eau et des principales sources du bassin versant, pour étudier les éventuels impacts des pompages sur leur débit.

Un tel bassin équipé permettrait :

- d'étudier de manière fine les réponses de l'aquifère et en particulier *l'extension du cône de rabattement* lors d'essais de pompage spécifiques (cela permettrait par exemple de déterminer les distances minimales devant séparer deux forages qui pomperaient le même aquifère en parallèle à un débit donné),
 - de déterminer l'intérêt de réaliser un *essai de pompage spécifique* préalable à la mise en exploitation des forages implantés en contexte de socle granitique,
 - d'étudier la *réaction des aquifères à des pompages de longue durée*, ce qui permettrait de comparer les résultats à la méthode de prévision des débits et des ressources exploitables mise au point et utilisée à l'heure actuelle par les services de la DIREN-SEMA (méthode des pompages intermittents faisant le lien entre un pompage de courte durée et exploitabilité à long terme du forage - C. Griolet), pour déterminer les débits d'équipement et les stratégies de pompage des nouveaux forages communaux.
- 3. Enfin, la faisabilité de l'exploitation d'un forage avec une logique de gestion active de l'aquifère (pompage d'une partie de la ressource excédentaire en saison des pluies) pourrait être testée sur un forage sur une période représentative.**

Références

- Caballero Y. et P. Lachassagne (2003), Évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse. Rapport de fin des phases 1 et 2 du projet : synthèse documentaire, choix des forages expérimentaux. BRGM/RP-52669-FR, 1-44 pp.
- Caballero Y., Albertini J.-M., Lachassagne P., (2005) - Évaluation de la ressource en eau des aquifères de socle des roches granitiques de Corse. Rapport de fin de la convention d'application 2003 : synthèse des données obtenues sur les forages expérimentaux. BRGM/RP-54000-FR. 53 p., 29 fig.
- DIREN-SEMA (1997), Commune d'Urbalacone, Détermination des capacités de production du forage répertorié Ajaccio 35-Q
- DIREN-SEMA (1998), Commune de Quenza (Corse-du-Sud) Exécution de forages d'eau au socle cristallin. Forage Zicavo 39.Q et 40.Q, Compte-rendu des travaux.
- DIREN-SEMA (2001), Commune de Pioggiola (Haute-Corse) Exécution de forages d'eau au socle cristallin. Forage Calvi 94.O ; Forage Santo Pietro di Tenda W 51.Q, Compte-rendu des travaux.
- Gringarten, A.C. ; Ramey, H.J. (1974), Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single horizontal fracture partially penetrating or restricted entry. Trans. Am. Inst. Min. Eng. 257, 413-426.
- Maréchal, J.-C., R. Wyns, P. Lachassagne, K. Subrahmanyam and F. Touchard (2003), Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle: concordance avec la structure géologique des profils d'altération. C. R. Géoscience, **335**, 451-460.
- Nash J. E. et J. V. Sutcliffe. (1970), River flow forecasting through conceptual models, Journal of Hydrology, **10**(3), 282-290
- SRAE (1986), Commune d'Azilone-Ampaza (Corse du Sud), Recherche d'eau par forage au hameau d'Ampaza.
- SRAE (1988), Commune d'Azilone-Ampaza (Corse du Sud), Recherche d'eau par forage.
- Wyns, R., J.-C. Gourry, J.-M. Baltassat and F. Lebert (1999), Caractérisation multiparamètres des horizons de subsurface (0-100 m) en contexte de socle altéré. 2ème Colloque GEOFCAN, BRGM, IRD, UPMC (**105**), 110.
- Wyns, R., J. -. Baltassat, P. Lachassagne, A. Legchenko, J. Vairon and F. Mathieu (2004), Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bull. Soc. Géol. Fr., **175**(1), 21-34.

Annexe 1 : Visualisation des données brutes

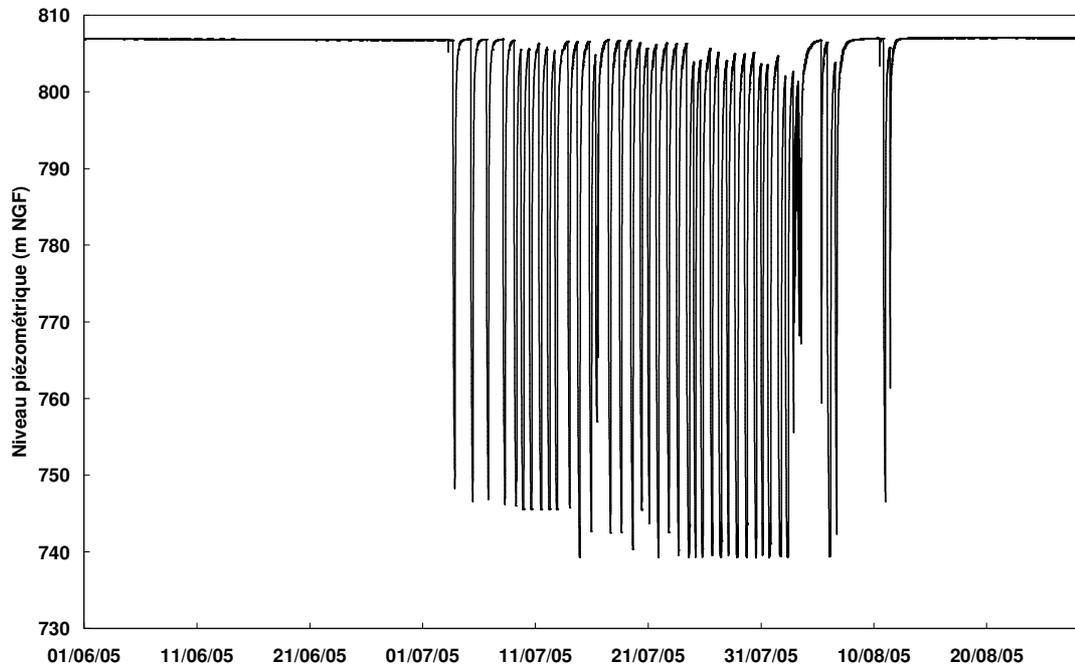


Figure 58: Niveaux piézométriques mesurés au forage de Pioggiola entre le 01/06/05 et le 28/08/05 – période de pompage 2005.

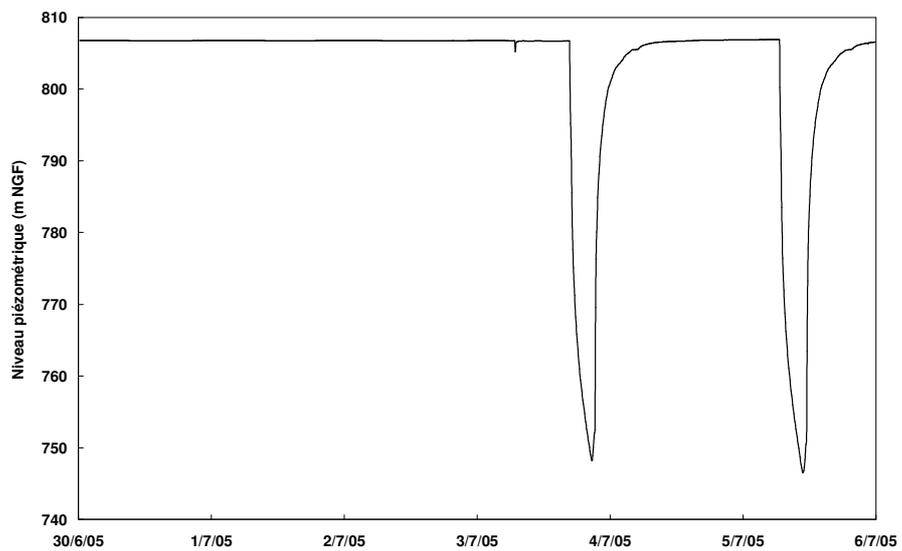


Figure 59 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Pioggiola (zoom entre le 30/06/05 et le 06/07/05).

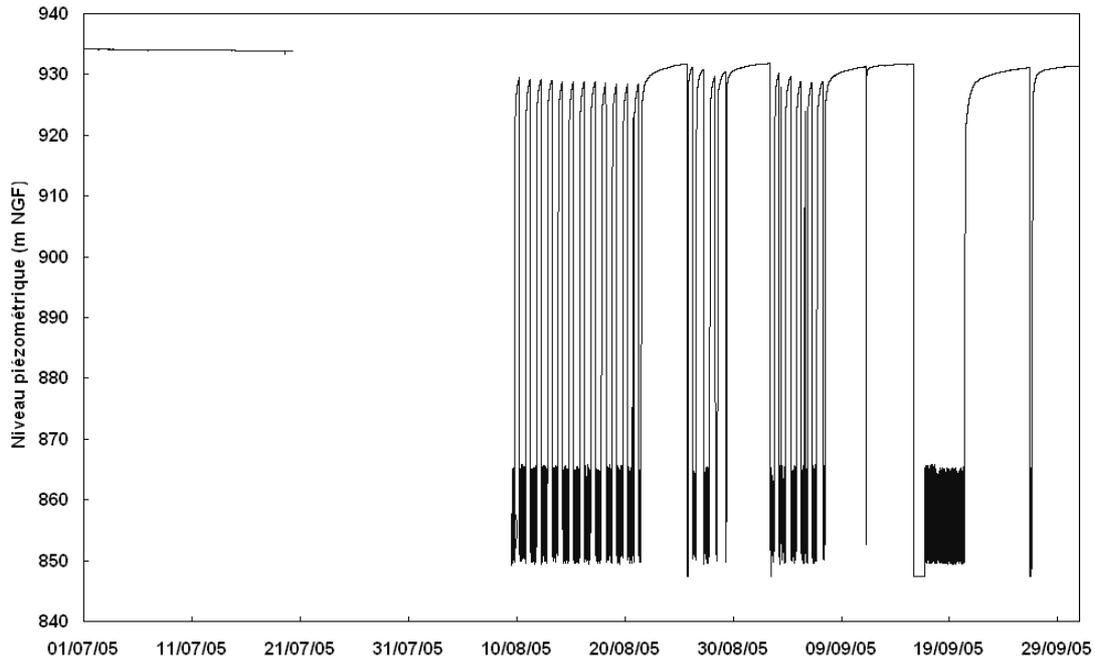


Figure 60 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone entre le 01/07/05 et le 30/09/05 – période de pompage 2005.

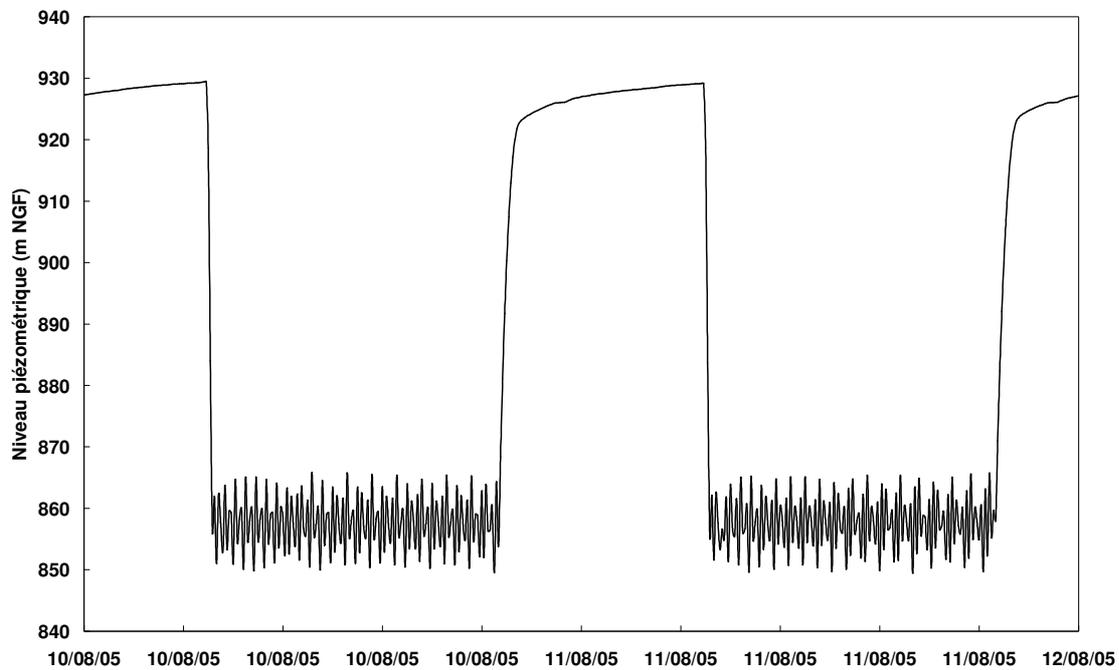


Figure 61 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone (zoom entre le 10/08/05 et le 12/08/05).

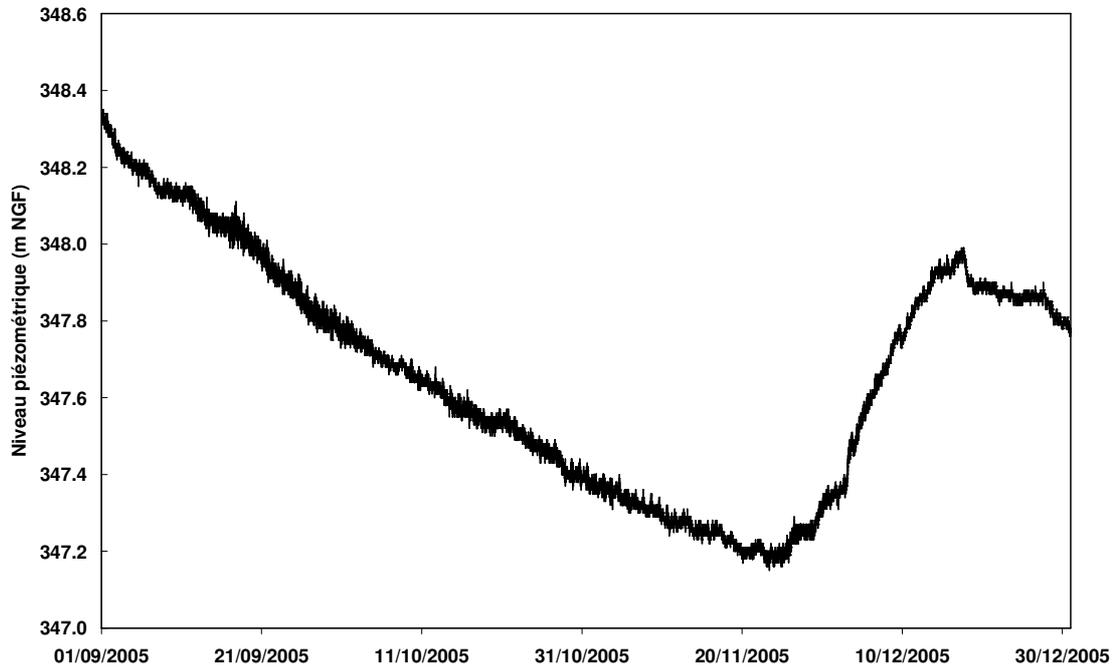


Figure 62 : Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Urba 3 entre le 01/09/05 et le 31/12/05.

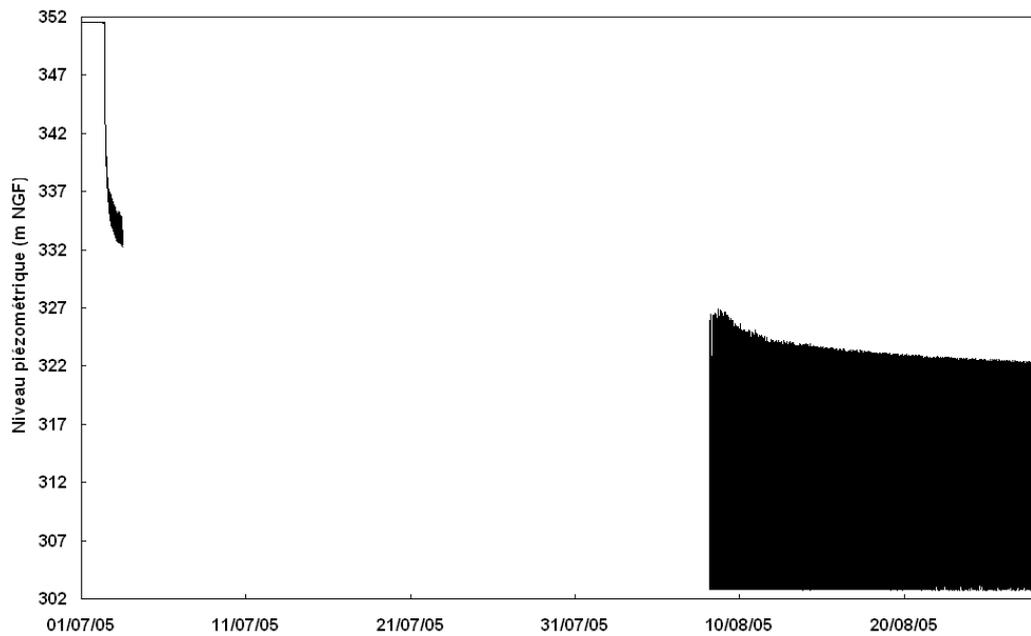


Figure 63 : Niveaux piézométriques mesurés au forage de Tallone entre le 01/07/05 et le 28/08/05 – période de pompage 2005.

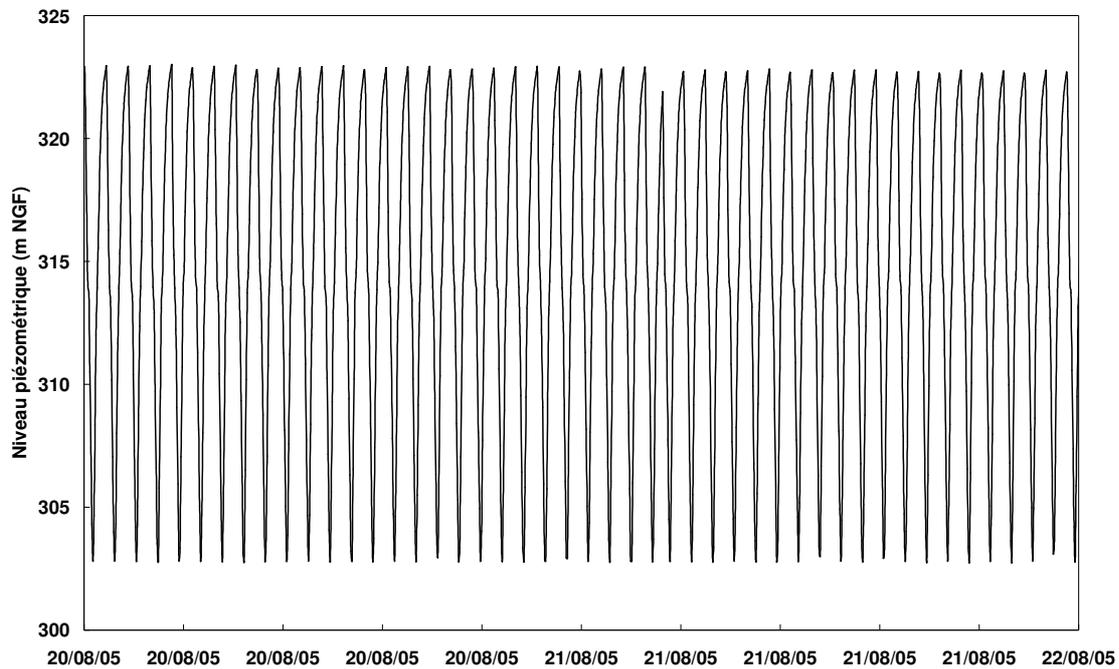


Figure 64 : Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Urba 4 (zoom entre le 20/08/05 et le 22/08/05)

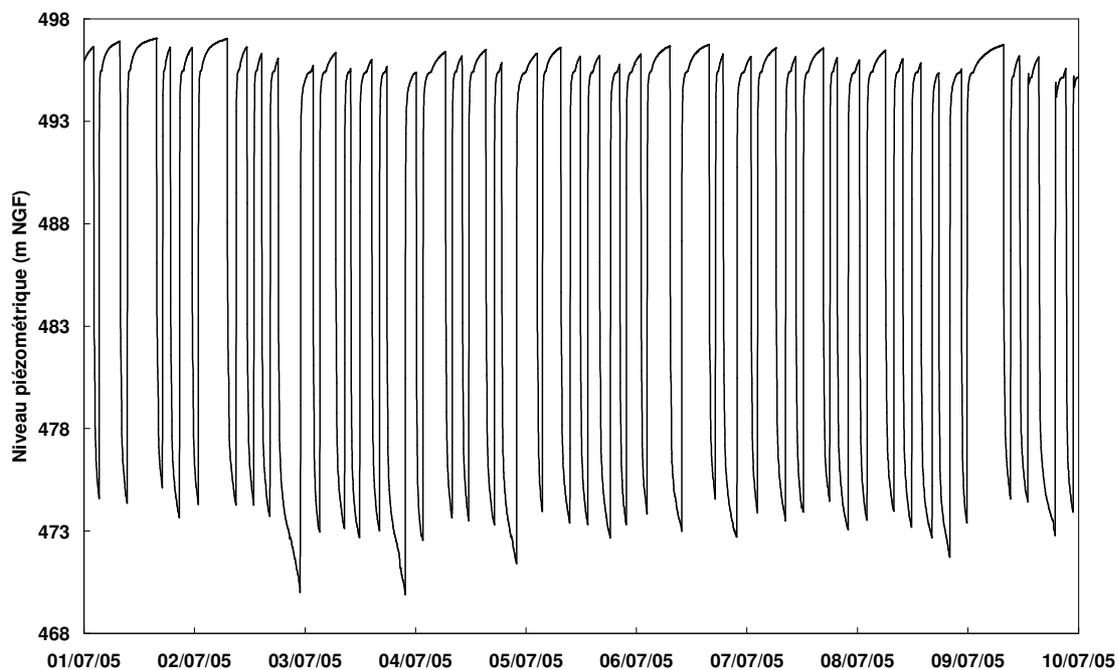


Figure 65 : Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Azilone entre le 01/07/05 et le 10/07/05.

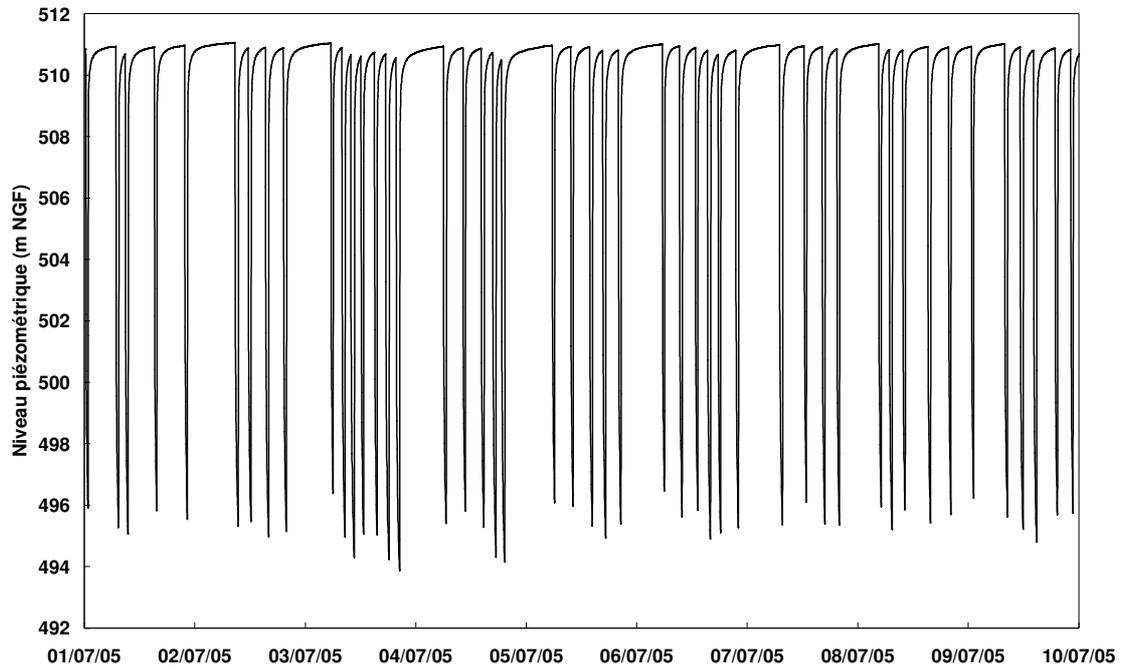


Figure 66: Niveaux piézométriques mesurés au forage d'Ampaza entre le 01/07/05 et le 10/07/05.

Annexe 2 : Calcul des débits instantanés moyens

Date de relevé des compteurs	Temps de pompage total (minutes)	Volume pompé (m ³)	Débit instantané par périodes (m ³ /h)
07/10/2004	12447	1393	6.715
25/11/2004	2232	253	6.801
09/12/2004	0	0	
10/03/2005	498	48	5.783
27/04/2005	0	0	
16/06/2005	36	4	5.833
13/07/2005	2967	329	6.653
02/09/2005	8769	1007	6.892
Débit instantané moyen (m³/h)			6.4
Ecart-type (m³/h)			0.5

Tableau 4 : Forage de Pioggiola (date de 1^{ère} relève du compteur : 25/08/04).

Date de relevé des compteurs	Temps de pompage total (minutes)	Volume pompé (m ³)	Débit instantané par périodes (m ³ /h)
02/09/2005	6467	541.9	5.028
09/09/2005	1746	157.5	5.413
14/10/2005	2904	329.6	6.811
Débit instantané moyen (m³/h)			5.8
Ecart-type (m³/h)			0.9

Tableau 5 : Forage de Tallone (date de 1^{ère} relève du compteur : 09/08/05).

Date de relevé des compteurs	Temps de pompage total (minutes)	Volume pompé (m ³)	Débit instantané par périodes (m ³ /h)
09/09/2005	3546	144.2	2.440
28/10/2005	23307	928.1	2.389
Débit instantané moyen (m³/h)			2.41
Ecart-type (m³/h)			0.04

Tableau 6 : Forage d'Urbalacone – Urba 4 (date de 1^{ère} relève du compteur : 02/09/05).

Heure	Volume (m ³)	Durée (s)	Débits associés (m ³ /h)
12:09:11	25861.315	0	0
12:15:21	25862	370	6.7
12:21:36	25863	375	9.6
12:28:05	25864	389	9.3
12:36:34	25865	509	7.1
12:44:06	25866	452	8.0
13:44:30	25874	4081	7.1
13:52:05	25875	455	7.9
13:59:38	25876	453	8.0
Débit instantané moyen (m³/h)			7.1
Ecart-type (m³/h)			2.8

Tableau 7 : Forage d'Azilone (mesure effectuée le 20/07/2005).

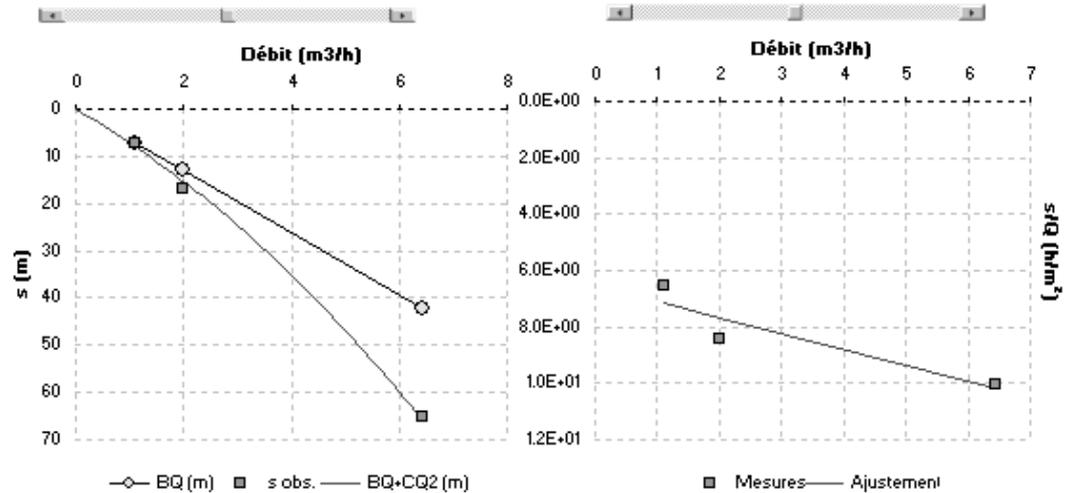
Date de relevé des compteurs	Temps de pompage total (minutes)	Volume pompé (m ³)	Débit instantané par périodes (m ³ /h)
23/04/2004	2503.177	347	8.317
29/07/2004	NC	692	
25/08/2004	5643	887	9.431
07/10/2004	NC	475	
25/11/2004	NC	460	
19/01/2005	NC	1127	
10/03/2005	3743.117	579	9.281
27/04/2005	NC	445	
16/06/2005	7608	1443	11.380
20/07/2005	6849	1017	8.909
02/09/2005	9549	1451	9.117
Débit instantané moyen (m³/h)			9.4
Ecart-type (m³/h)			1.0

Tableau 8 : Forage d'Ampaza (date de 1^{ère} relève du compteur : 02/04/04).

Annexe 3 : Evaluation des pertes de charge aux puits par pompage

Opération : Pioggiola Retour Menu Nom de l'ouvrage : Santo Pietro di Tenda W 51.Q
 Localisation : Haute-Corse Type d'ouvrage : PUIITS
 Société : SGR CSC Aquifère testé : GRANITE
 Date pompage : 26-juin-01

Pompage par paliers	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Débit (m ³ /h)	1.1	2	6.45		
Temps de pompage (min)	259	259	259	60	60
Temps de remontée (min)	45	0	0	0	0
Rabatement observé (m)	7.2	16.8	65		



Coef. pertes de charge linéaires (B) : **6.53 m³(m³/h)** → **23503 m³(m³/s)**
 Coef. pertes de charge quadratiques (C) : **5.69E-01 m³(m³/h)²** → **7378421 m³(m³/s)²**

CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIITS DE POMPAGE INFORMATIONS GÉNÉRALES

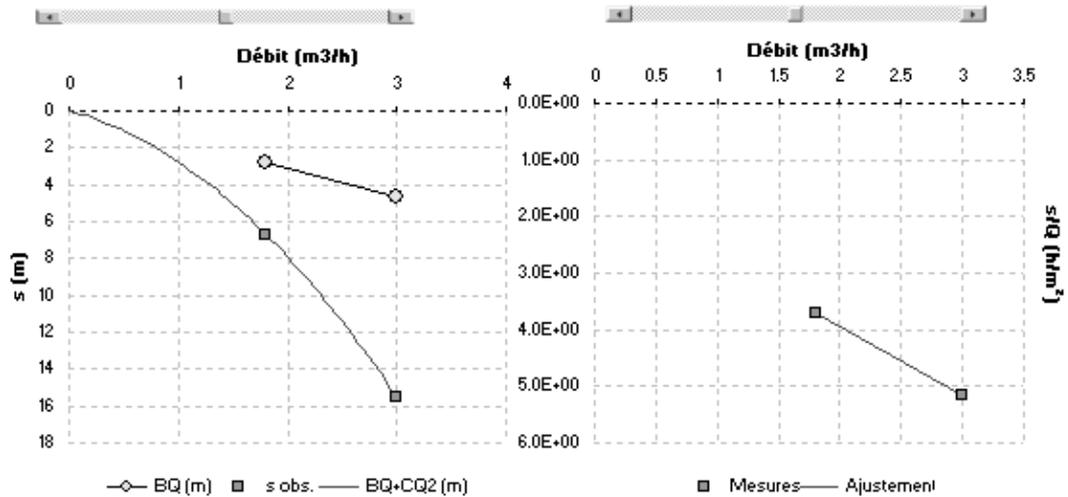
Essai de puits		Limites hydrauliques d'exploitation	
Niveau statique initial (m/sol)	30	Niveau statique en basses eaux (m)	10
Profondeur pompe (m/sol)	66	Amplitudes saisonnières (m)	<= 5.5
Type pompe	Franklin 4"	Débit d'exploitation recommandé (m³/h)	6.4
Diamètre chambre de pompage (mm)	311	Pertes de charge linéaires (m)	41.78
Position crépine (m/sol)	46 à 74 m	Pertes de charge quadratiques (m)	23.32
Type crépine	INOX	Niveau dynamique en basses eaux (m)	75.10

Opération : Tallone Retour Menu Nom de l'ouvrage : Zicavo 39.Q
 Localisation : Corse du Sud Type d'ouvrage : PUITES
 Société : DIREN SEMA Aquifère testé : GRANITE
 Date pompage : 13-août-98

Ajustement automatique
 Impression de la feuille "Pertes de charge"

Pompage par paliers	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Débit (m ³ /h)	18	3			
Temps de pompage (min)	60	60		60	60
Temps de remontée (min)	0	0	0	0	0
Rabatement observé (m)	6.69	15.51			

Zoom & Scroll



Coef. pertes de charge linéaires (B) : **1.54 m³/h** → **5532 m³/s**
 Coef. pertes de charge quadratiques (C) : **1.21E+00 m³/h²** → **15696000 m³/s²**

CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUITES DE POMPAGE INFORMATIONS GÉNÉRALES

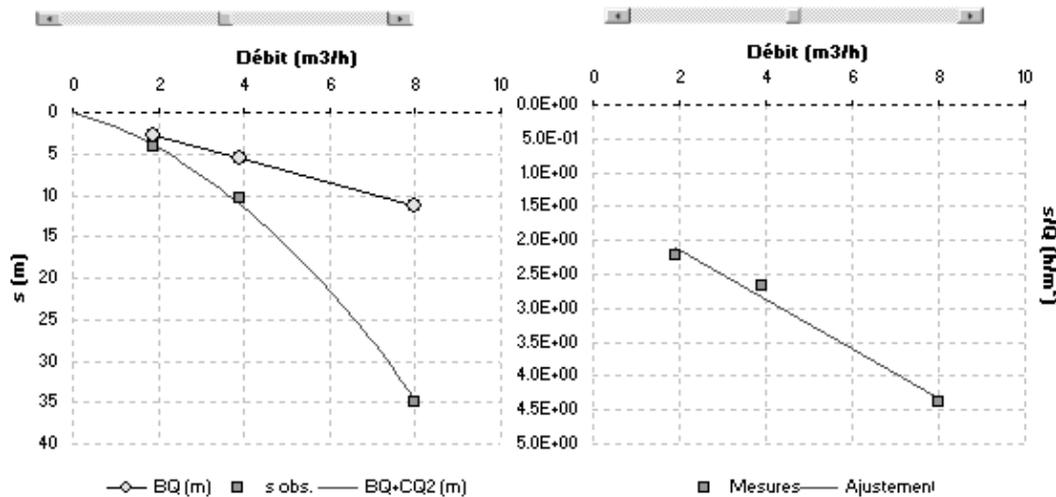
Essai de puits	
Niveau statique initial (m/sol)	11.57
Profondeur pompe (m/sol)	
Type pompe	
Diamètre chambre de pompage (mm)	
Position crépine (m/sol)	
Type crépine	

Limites hydrauliques d'exploitation	
Niveau statique en basses eaux (m)	11.57
Amplitudes saisonnières (m)	
Débit d'exploitation recommandé (m ³ /h)	7.3
Pertes de charge linéaires (m)	11.22
Pertes de charge quadratiques (m)	64.54
Niveau dynamique en basses eaux (m)	87.33

Opération : AZILONE Retour Menu
 Localisation : Corse du Sud Nom de l'ouvrage : Zicavo 29-0
 Société : SRAE Type d'ouvrage : PUIS
 Date pompage : 01-août-88 Aquifère testé : GRANITE

Ajustement automatique
 Impression de la feuille "Pertes de charge"

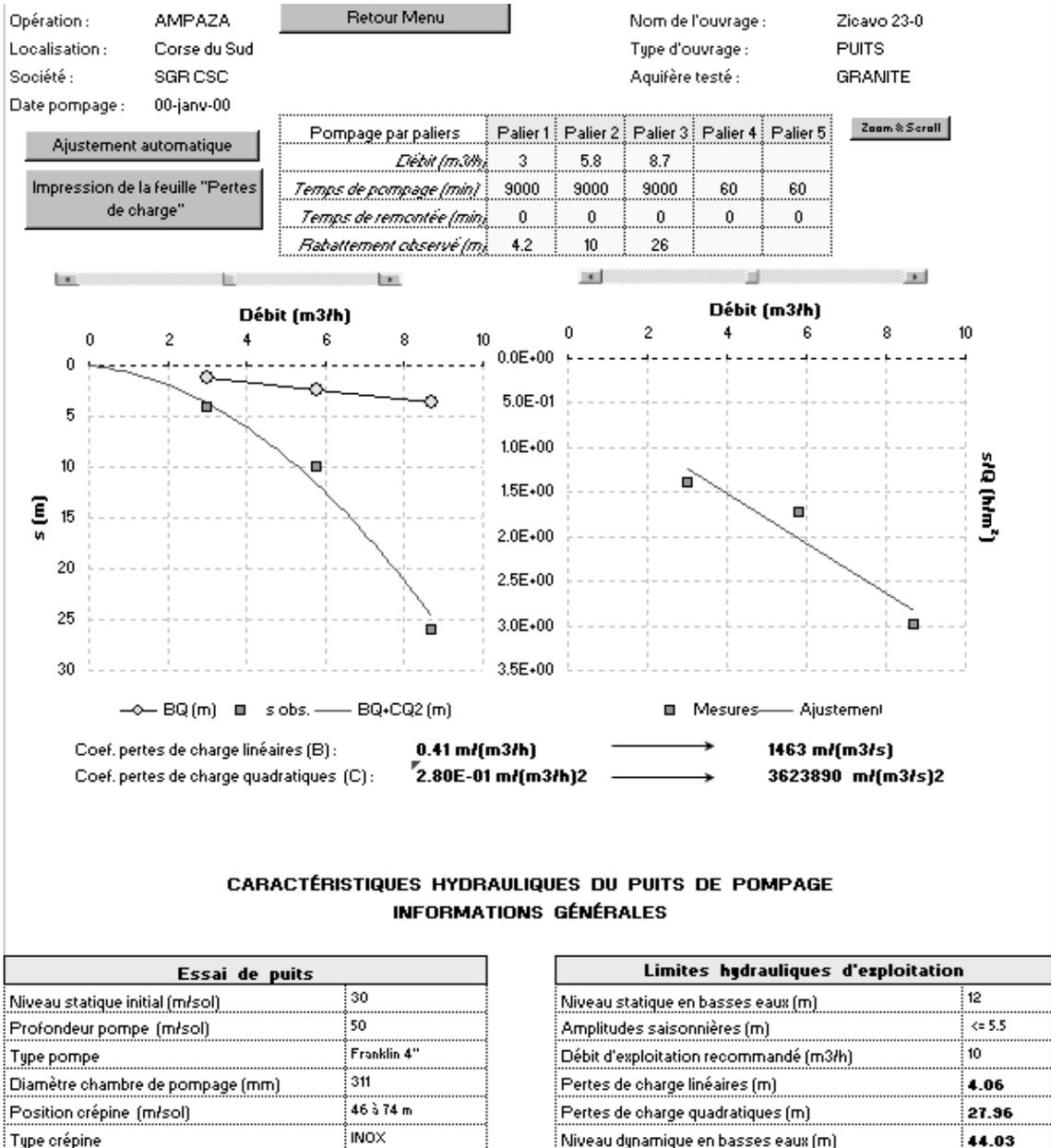
Pompage par paliers	Palier 1	Palier 2	Palier 3	Palier 4	Palier 5
Débit (m ³ /h)	1.9	3.9	8		
Temps de pompage (min)	60	60	60	60	60
Temps de remontée (min)	0	0	0	0	0
Rabattement observé (m)	4.2	10.4	35		



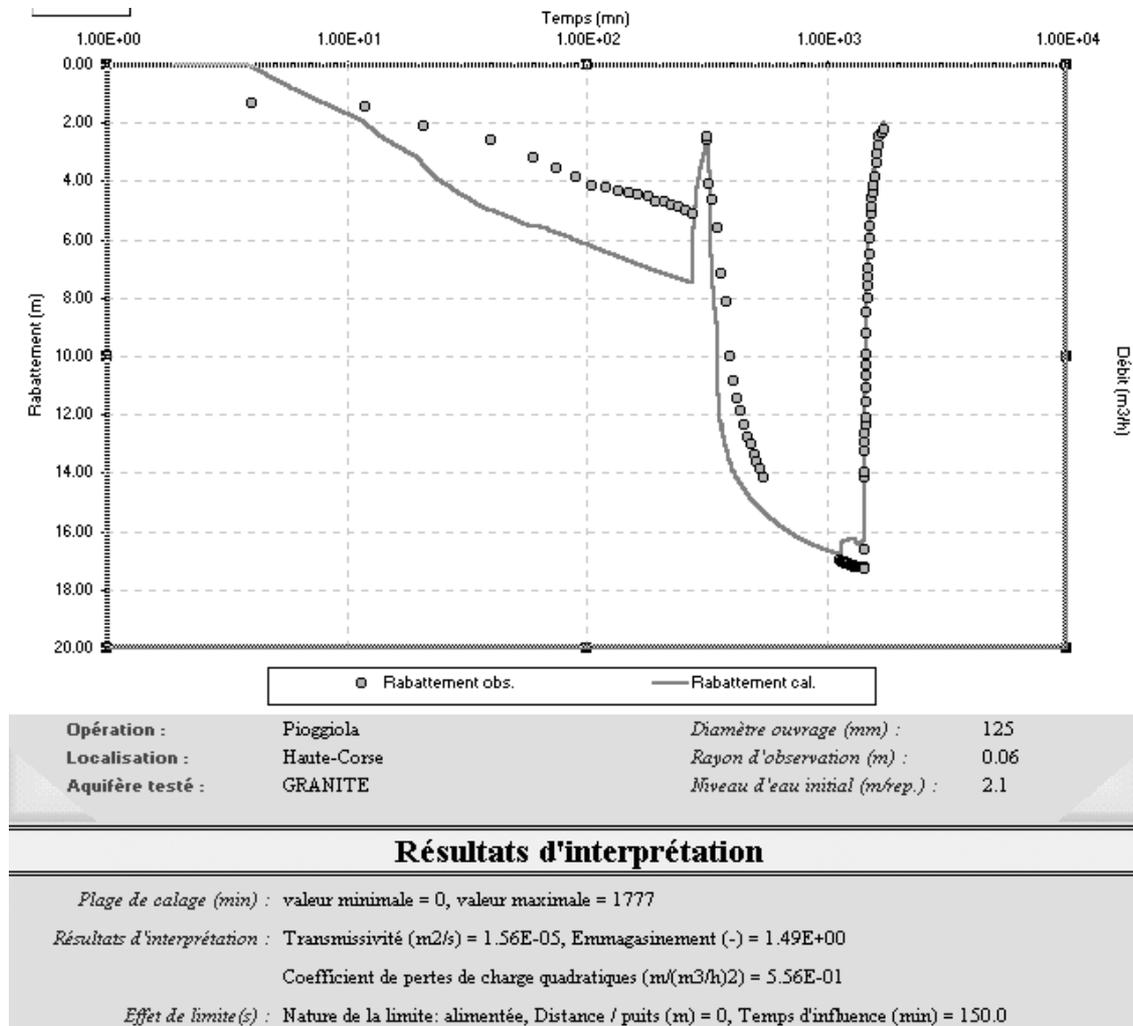
Coef. pertes de charge linéaires (B) : **1.41 ml(m³/h)** → **5075 ml(m³/s)**
 Coef. pertes de charge quadratiques (C) : **3.64E-01 ml(m³/h)²** → **4717542 ml(m³/s)²**

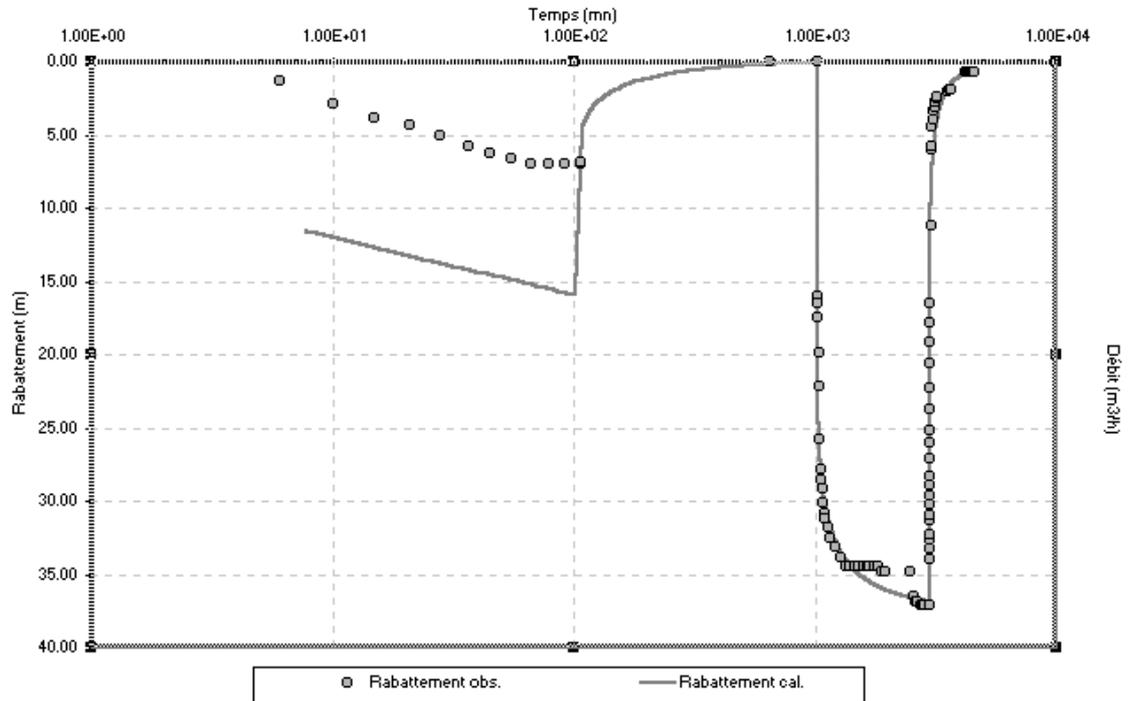
CARACTÉRISTIQUES HYDRAULIQUES DU PUIS DE POMPAGE
INFORMATIONS GÉNÉRALES

Essai de puits		Limites hydrauliques d'exploitation	
Niveau statique initial (m/sol)	Artésien	Niveau statique en basses eaux (m)	0
Profondeur pompe (m/sol)		Amplitudes saisonnières (m)	
Type pompe		Débit d'exploitation recommandé (m ³ /h)	7.5
Diamètre chambre de pompage (mm)		Pertes de charge linéaires (m)	10.57
Position crépine (m/sol)		Pertes de charge quadratiques (m)	20.48
Type crépine		Niveau dynamique en basses eaux (m)	31.05



Annexe 4 : Rapport d'interprétation des essais de pompage





Opération :	Tallone	<i>Diamètre ouvrage (mm) :</i>	125
Localisation :	Corse du Sud	<i>Rayon d'observation (m) :</i>	0.06
Aquifère testé :	GRANITE	<i>Niveau d'eau initial (m/rep.) :</i>	11.6

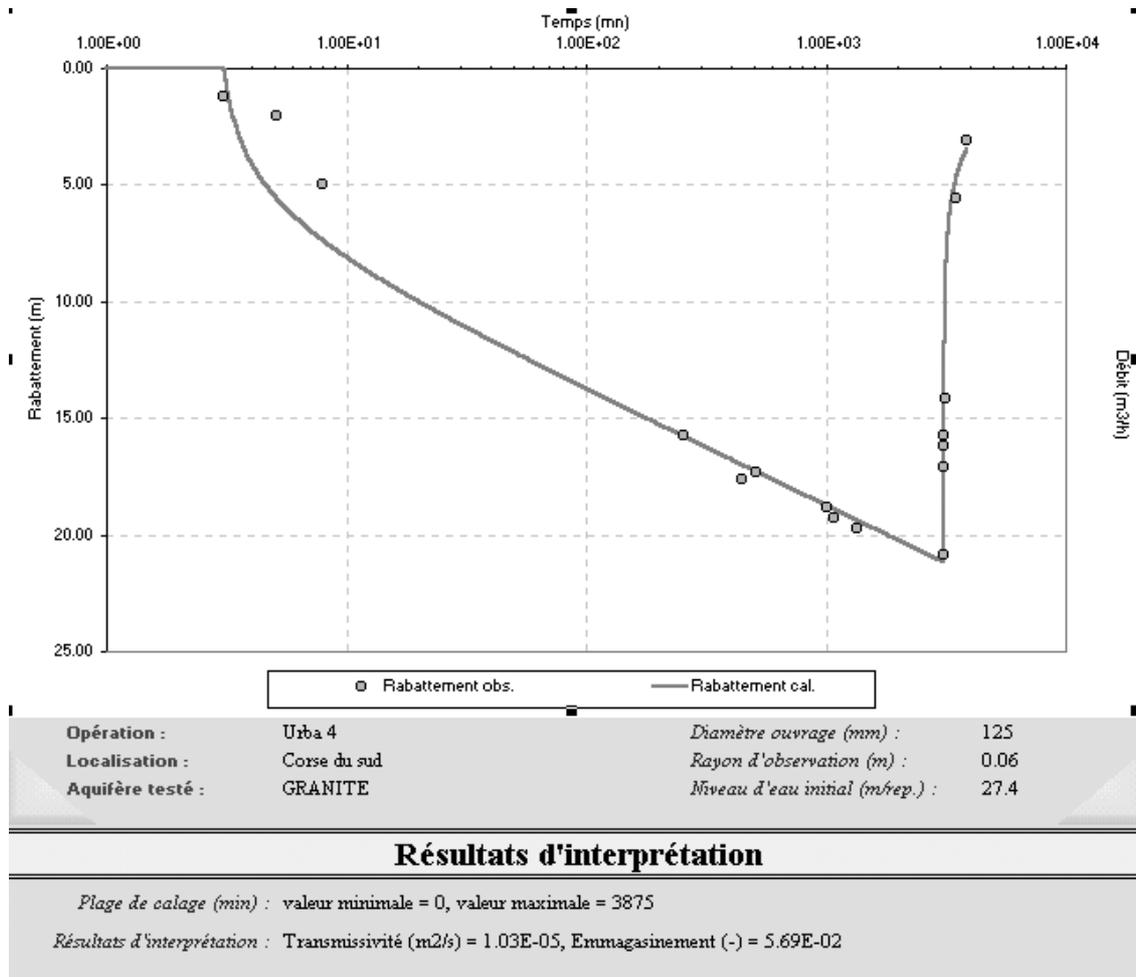
Résultats d'interprétation

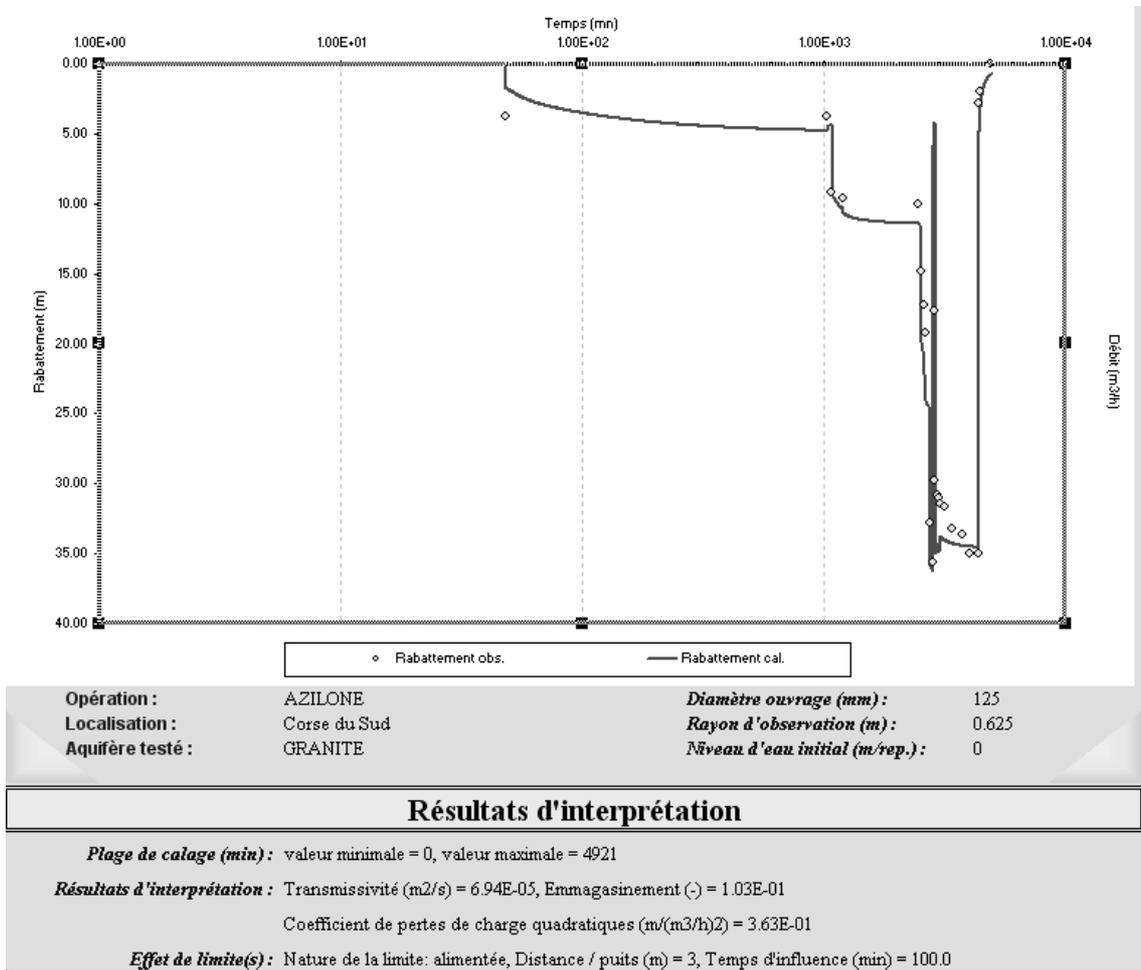
Plage de calage (min) : valeur minimale = 0, valeur maximale = 7109

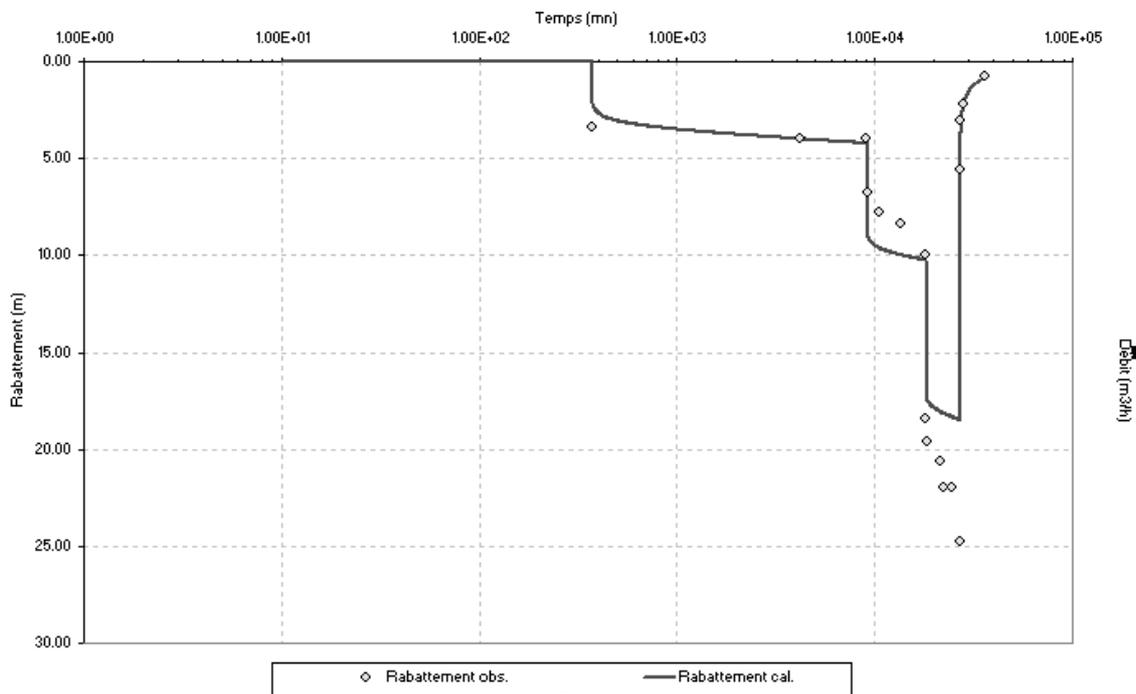
Résultats d'interprétation : Transmissivité (m²/s) = 2.38E-05, Emmagasinement (-) = 6.44E-02

Coefficient de pertes de charge quadratiques (m/(m³/h)²) = 1.21E+00

Effet de limite (s) : Nature de la limite: alimentée, Distance / puits (m) = 4, Temps d'influence (min) = 300.0







Opération :	AMPAZA	<i>Diamètre ouvrage (mm) :</i>	125
Localisation :	Corse du Sud	<i>Rayon d'observation (m) :</i>	0.063
Aquifère testé :	GRANITE	<i>Niveau d'eau initial (m^{rep.}) :</i>	2.34

Résultats d'interprétation

Plage de calage (min) : valeur minimale = 0, valeur maximale = 36015

Résultats d'interprétation : Transmissivité (m²/s) = 2.42E-04, Emmagasinement (-) = 6.37E-01

Coefficient de pertes de charge quadratiques (m/(m³/h)²) = 1.16E-01



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional “Corse”
Immeuble Agostini
ZI Furiani
20600 – Bastia – France
Tél. : 04 95 58 04 33