

Protection optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Année 4.

Valorisation des données d'exploitation des forages de Kwalé 1
(1230-7X-0022) et de Mtsangamouji 2 (1230-6X-0016)

Rapport final

BRGM/RP-56438-FR

Juin 2008

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2007 SP07EAUUK53

**Guilbert M., Dewandel B., Lachassagne P.
en collaboration avec Malard A.**

Vérificateur :

Nom : P. Stollsteiner

Date :

Signature

Approbateur :

Nom : P. Puvilland

Date :

Signature

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

COLLECTIVITE DEPARTEMENTALE DE MAYOTTE



Mots clés : aquifères volcaniques, Archipel des Comores, eau souterraine, exploitation, hydrogéologie, Mayotte, piézométrie, recharge.

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

Guilbert M., Dewandel B., Lachassagne P., en collaboration avec Malard A. (2008) – Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Année 4 – BRGM/RP-56438-FR, 105 p., 38 ill., 10 tab., 6 ann.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre de ses missions de service public, le Service Géologique Régional océan Indien, antenne de Mayotte, s'est vu confier la réalisation d'une étude relative à la protection et à l'optimisation de la ressource en eau à Mayotte. Cette étude (fiche 07EAUK53 de la programmation de service public du BRGM) a été cofinancée, par la dotation de service public du BRGM et la Collectivité Départementale de Mayotte (convention d'application 2007, signée le 14 Mai 2007).

Depuis 1999, la Collectivité Départementale de Mayotte s'est engagée, en partenariat avec le BRGM, dans un programme d'exploration et d'exploitation des ressources en eau souterraine de l'île qui a permis la réalisation de plusieurs dizaines de forages.

Les travaux présents peuvent être regroupés en 2 parties.

La première partie a pour objectifs de présenter et d'interpréter les chroniques piézométriques des 8 forages d'eau qui seront prochainement mis en exploitation. Ces analyses permettront de préciser les modalités des cycles hydrogéologiques des forages Béja 1 (12306X0014), Orovéni 1 (12306X0048), Bouyouni-Bouyouni (1306X0024), Bouyouni-Méresse (12306X0046), Combani-Kahani (12306X0047), Combani-Mréréni (12306X0038), Gouloué1 (12307X0045) et Gouloué2 (12307X0053).

La seconde partie s'intéressera plus particulièrement à l'étude des forages exploités de Kwalé 1 (12307X0022) et de Mtsangamouji 2 (12306X0016) dans l'objectif à la fois de déterminer les paramètres de l'aquifère et d'optimiser l'exploitation de la ressource tout en limitant l'impact sur les eaux de surface. La valorisation des données de forage à long terme (7 ans pour Kwalé) et l'approche de la recharge des aquifères par l'utilisation d'un modèle mathématique ont permis de mettre en évidence une alimentation de ces aquifères par pertes des cours d'eau voisins et une intensification de ce phénomène depuis 2005. La quantification de cette recharge « directe » a permis de réévaluer les capacités d'exploitation de ces deux forages.

Ainsi, La production du forage de Kwalé peut être réhaussée d'environ 23 m³/h alors que celle de Mtsangamouji ne semble pas offrir de potentiel supplémentaire.

Dans cette perspective, la Collectivité Départementale de Mayotte souhaite poursuivre ces programmes d'actions sur les nouveaux forages mis en exploitation et les futurs forages qui devraient prochainement être mis en fonctionnement.

L'amélioration de la compréhension de fonctionnement hydrogéologique des aquifères volcaniques de Mayotte, ainsi que des études complémentaires telles que des suivis géochimiques des eaux d'exhaure des pompages et des cours d'eau et de la géophysique pour identifier la géométrie des aquifères, devraient permettre, à terme, de proposer des scénarios d'exploitation durables de la ressource en eau souterraine à l'échelle de l'île.

Sommaire

1.	Introduction	11
2.	Suivi piézométrique de 8 forages prochainement exploités	13
2.1.	Généralités	13
2.2.	Période et fréquence des mesures	14
2.3.	Forage de Béja 1 (12306X0014).....	15
2.4.	Forage de Orovéni 1 (12306X0048)	17
2.5.	Forage de Bouyouni - bouyouni (12306x0024)	19
2.6.	Forage de Bouyouni-Méresse (12306X0046)	21
2.7.	Forage de Combani-Kahani (12306X0047)	23
2.8.	Forage de Combani-M'réréni (12306X0038).....	25
2.9.	Forage de Gouloué 1 (12307X0045)	27
2.10.	Forage de Gouloué 2 (12307X0053)	29
2.11.	Synthèse	31
3.	Valorisation des données d'exploitation du forage de Kwalé 1 (1230-7X-0022) recueillies en 2002-2007.....	33
3.1.	Analyse des données recueillies.....	38
3.1.1.	Evolution de la piézométrie au forage de Kwalé 1	39
3.1.2.	Interprétation des rabattements en période d'étiage	42
3.1.3.	Evolution des débits du cours d'eau	44
3.1.4.	Synthèse de l'analyse des données.....	47
3.2.	modélisation des series piézométriques et du débit du cours d'eau en fonction de l'exploitation.....	47

3.2.1.	Description du modèle	50
3.2.2.	Application du modèle hydraulique au site de Kwalé	53
3.2.3.	Synthèse de la modélisation de la piézométrie au puits de pompage et du débit du cours d'eau au site de Kwalé.....	61
4.	Valorisation des données d'exploitation du forage de Mtsangamouji 2 (1230-6X-0016) recueillies en 2002-2007.....	65
4.1.	Présentation des données recueillies.....	67
4.2.	Application du modèle au site de Mtsangamouji 2	68
4.2.1.	Modélisation de la piézométrie au puits de pompage et du débit du cours d'eau sans prise en compte de l'infiltration du cours d'eau	68
4.2.2.	Modélisation avec prise en compte d'une infiltration issue du cours d'eau	72
4.2.3.	Cas « naturel »	75
4.2.4.	Synthèse de la modélisation au site de Mtsangamouji 2.....	77
5.	Conclusion	79
	Références bibliographiques	81

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de localisation des 8 forages suivis par la DAF.....	14
Illustration 2 : Fluctuations piézométriques du forage de Béja 1 entre mars 2003 et juillet 2007.....	16
Illustration 3 : Fluctuations piézométriques du forage d'Ourovéni 1 entre septembre 2003 et février 2006.....	18
Illustration 4 : Fluctuations piézométriques du forage de Bouyouni-Bouyouni de mars 2003 à juin 2006.....	20
Illustration 5 : Fluctuations piézométriques du forage de Bouyouni-Méresse de juin 2003 à mai 2006.....	22
Illustration 6 : Fluctuations piézométriques du forage de Combani-Kahani de juillet 2003 à juillet 2007.....	24
Illustration 7 : Fluctuations piézométriques du forage de Combani-Mréréni entre février 2003 et décembre 2005.....	26
Illustration 8 : Fluctuations piézométriques du forage de Gouloué1 entre juin 2003 et juin 2007.....	28
Illustration 9 : Fluctuations piézométriques du forage de Gouloué2 entre juin 2003 et juin 2007.....	30
Illustration 10 : Localisation du forage exploité de Kwalé 1 et du dispositif de métrologie du bassin versant topographique.....	34
Illustration 11 : présentation des données de piézométrie (forages Kwalé 1 et 3), de pluviométrie, de conductivité électrique de l'eau d'exhaure et de débit.....	36
Illustration 12 : présentation des données de débit du cours d'eau (station Kwalé ; superficie du bassin versant : 12.5 km ²) et de pluviométrie.....	37
Illustration 13 : durée journalière de l'insolation (station de PAMANDZI) et température journalière moyenne (station de VAHIBE-PRIMA).	38
Illustration 14 : Mise en évidence de régimes pseudo-permanents (forage de Kwalé 1).....	41
Illustration 15 : Estimation du « volume » de l'aquifère exploité (m ³ /m) ; les barres d'erreur ont été calculées à partir des coefficients de régression de l' Erreur ! Source du renvoi introuvable. ($x \pm (1-r)\%$).....	42
Illustration 16 : Valeurs de transmissivité de l'aquifère exploité. Estimations réalisées sur 7 cycles d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 (de 2001 à 2007) et 3 cycles au puits d'observation Kwalé 3 (2005 à 2007).....	43
Illustration 17 : Valeurs de l'emmagasinement de l'aquifère exploité. Estimations réalisées sur 3 cycles d'étiage au puits d'observation Kwalé 3 (2005 à 2007).....	44
Illustration 18 : présentation des données de débit du cours d'eau (station Kwalé ; superficie du bassin versant : 12.5 km ²) et de pluviométrie.....	45
Illustration 19 : Localisation des stations de jaugeage et valeurs des débits de la Mro Oua Kwalé en amont du forage de Kwalé 1.	46

Illustration 20 : Interprétation des jaugeages au micro-moulinet du cours d'eau de Kwalé. La localisation des points figure en Illustration 19. Les barres d'erreur correspondent à une incertitude sur la mesure estimée à 10%.	46
Illustration 21 : Schéma simplifié du modèle développé pour le site de Kwalé.....	49
Illustration 22 : Modélisation de la piézométrie au puits de pompage de Kwalé 1. Simulation sans changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau	55
Illustration 23 : Modélisation des débits du cours d'eau à Kwalé bas. Simulation sans changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau, avec (rouge) ou sans (tirés noirs) prise en compte de la prise d'eau amont.....	55
Illustration 24 : Modélisation de la piézométrie au puits de pompage Kwalé 1. Simulation avec changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05	58
Illustration 25 : Modélisation des débits du cours d'eau à Kwalé. Simulation avec changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05. Prélèvement de la prise en amont (Kwalé haut) : 500 000 m ³ /an.....	58
Illustration 26 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité ; cas où les paramètres de l'infiltration sont différents à partir du 15-02-05. Moyenne des pertes par débordement après 2005 : 0.007 m ³ /s.....	59
Illustration 27 : Modélisation de la piézométrie à Kwalé 1 sans les pompes. Tirés rouges : avec infiltration du cours d'eau, les paramètres sont constants et identiques à la période anté 15-02-05 ; trait continu rouge : pas d'infiltration.....	61
Illustration 28 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité. Tirés verts : avec infiltration du cours d'eau, les paramètres sont constants et identiques à la période anté 15-02-05 ; trait continu vert : pas d'infiltration. Moyenne de la vidange de l'aquifère par débordement 0.015 m ³ /s avec infiltration et 0.011 m ³ /s sans l'infiltration.	61
Illustration 29 : Modélisation de la piézométrie à Kwalé 1 de 2001 à 2012 avec un pompage hypothétique continu de 60 m ³ /h à partir de juin 2006 ; piézo min : env. 23.5 m. Les données de pluies post 2007 correspondent à celles de la période 2002-2007. La cote min : cote piézométrique minimale, la pompe est située à 20 m NGM aux quels ont été rajoutés 2 m de sécurité (voir RP-53193-FR).....	63
Illustration 30 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité. Pompage hypothétique de 60 m ³ /h à partir de juin 2006. Nette diminution du débordement comparé à l'illustration 26 et quasiment plus de débordement à partir du scénario d'exploitation (2006).....	63
Illustration 31 : Fonctionnement hydrogéologique schématique de l'aquifère volcanique de Kwalé. Les termes du bilan sont basés sur la période 2005-2007.....	64
Illustration 32 : Localisation du forage exploité de Mtsangamouji 2.....	66
Illustration 33 : Piézométrie en valeur relative et débit de pompage au forage de Mtsangamouji 2 (données SOGEA) et pluviométrie (données DAF).....	68
Illustration 34: Modélisation de la piézométrie (valeur relative) au forage de Mtsangamouji 2 (données SOGEA). Simulation sans infiltration issue du cours d'eau	70

Illustration 35 : Modélisation du débit du cours d'eau. Rouge : simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau (paramètre: tableau 5), noir : avec infiltration (paramètre: tableau 7).	70
Illustration 36 : Modélisation des pertes par débordement (simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau)	71
Illustration 37 : Modélisation de la piézométrie au forage Mtsangamouji 2 (données SOGEA). Simulation intégrant une infiltration en provenance du cours d'eau	73
Illustration 38 : Modélisation du débit d'infiltration en provenance du cours d'eau et du débordement de l'aquifère.	73
Illustration 39 : Modélisation de la piézométrie à Mtsangamouji 2 sans les pompages avec (tirés rouge) et sans (trait rouge) infiltration en provenance du cours d'eau. Les paramètres de modélisation sont ceux du tableau 6	76
Illustration 40 : simulation de l'infiltration en provenance du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité, dans les deux cas de figure : avec (tirés verts) et sans (trait vert) infiltration en provenance du cours d'eau	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des interprétations des rabattements en période d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 et au puits d'observation Kwalé 3. Modèle utilisé : Theis+ deux limites étanches ; Lim.Et (2) : distance aux limites ; pour Kwalé 1 : $r=0.136$ m, effet de capacité au puits : 273 mm ; pour Kwalé 3 : $r = 54$ m. * : l'emmagasinement S n'a pas de signification physique puisque déterminé au puits ; il en est de même de pour le calcul de la distance à la limite ; au puits, ces paramètres ne constituent que des valeurs de calage. Moy. géom** : moyenne géométrique ; *** : moyenne arithmétique.	42
Tableau 2 : paramètres du modèle hydraulique ; pas de variations des paramètres d'infiltration du cours d'eau. h_0 : niveau piézométrique initial.	56
Tableau 3 : Bilan hydrique moyen annuel en pourcentage des pluies annuelles (2002-2007 ; précipitation moyenne annuelle : 1692 mm), comparaison aux estimations réalisées à la station de Coconi en 1994 ; précipitation annuelle : 1985 mm (Lapègue, 1999).	56
Tableau 4 : paramètres du modèle hydraulique ; variations des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05. h_0 : niveau piézométrique initial.	59
Tableau 5 : paramètres du modèle ; simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau. h_0 : niveau piézométrique initial.	71
Tableau 6 : Bilan de la simulation ; cas où il n'y a pas d'infiltration en provenance du cours d'eau.	72
Tableau 7: paramètres du modèle hydraulique ; simulation intégrant une infiltration en provenance du cours d'eau. h_0 : niveau piézométrique initial.	74

Tableau 8 : Bilan de la simulation ; cas avec infiltration en provenance du cours d'eau	74
Tableau 9 : Bilan de la simulation ; cas « naturel » avec infiltration.....	76
Tableau 10 : Bilan de la simulation ; cas « naturel » sans infiltration.....	77

Liste des annexes

Annexe 1 : Fréquence mensuelle des mesures réalisées aux forages non exploités	83
Annexe 2 : Interprétation des rabattements en période d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 et au puits d'observation Kwalé 3.....	87
Annexe 3 : Calcul de l'évapotranspiration journalière (ETP).....	93
Annexe 4 : Fonction de production : comparaison Theis – Jacob calculé sur les 5, 10, 15 et 20 derniers jours.....	95
Annexe 5 : Simulations –Graphiques complémentaires du modèle hydraulique de Kwalé	99
Annexe 6 : Données complémentaires au site de Mtsangamouji	105

1. Introduction

Dans le cadre de ses missions de Service Public, le Service Géologique Régional océan Indien, antenne de Mayotte, s'est vu confier la réalisation d'une étude relative à la protection et à l'optimisation de la ressource en eau à Mayotte. Cette étude (fiche 07EAU53 de la programmation de service public du BRGM) a été cofinancée par la dotation de service public du BRGM et la Collectivité Départementale de Mayotte (convention d'application 2007, signée le 14 Mai 2007).

La présente étude a pour objet de présenter les données piézométriques acquises aux forages qui seront prochainement mis en exploitation et valoriser les informations recueillies lors du suivi de deux forages exploités (débit, piézométrie, conductivité électrique des eaux) en les interprétant et en les confrontant notamment à d'autres données disponibles (pluviométrie, évapotranspiration, débit et niveau de cours d'eau proches, piézométrie au sein de forages non pompés, etc.), dans le but d'obtenir une meilleure compréhension de la structure et du fonctionnement des aquifères et ainsi de pouvoir définir des règles de gestion optimale de la ressource en eau pour chaque site étudié.

Le traitement des données a pour principaux objectifs :

- **pour les forages prochainement mis en exploitation**, de mettre en forme, critiquer et interpréter les chroniques piézométriques : commentaires, interprétation, identification des principaux processus en jeu, définition notamment des périodes et des modalités de tarissement et de recharge de l'aquifère ;
- **pour les forages exploités (Kwalé 1 et Mtsangamouji 2)**, d'interpréter les données de manière qualitative et quantitative au moyen d'outils appropriés. La mise en évidence des effets liés au pompage ou à l'infiltration des pluies, permettra éventuellement une réévaluation des potentiels d'exploitation des forages (ajustement des débits d'exploitation, positionnement de la pompe, temps de pompage, rabattement maximal admissible, ressource exploitable, gestion globale de l'aquifère, etc.).

Le présent rapport rend compte des travaux et des interprétations qui ont été réalisés.

2. Suivi piézométrique de 8 forages prochainement exploités

2.1. GENERALITES

A Mayotte, 11 forages issus des campagnes de recherche d'eau menées depuis 2001 sur l'île devraient être prochainement mis en exploitation pour l'alimentation en eau potable. Les mesures piézométriques sur ces ouvrages sont réalisées manuellement à la sonde électrique par la DAF de Mayotte.

Sur ces 11 forages, seules 8 chroniques piézométriques sont présentées. En effet certains sites ne sont plus suivis en raison de problème d'accès à l'ouvrage, de défaillance du matériel de mesure ou de perte des cahiers de station. Les chroniques piézométriques qui sont présentées concernent les 8 forages suivants (Cf. Illustration 1) :

- Béja 1 (12306X0014) ;
- Ourovéni 1 (12306X0048) ;
- Bouyouni-Bouyouni (1306X0024) ;
- Bouyouni-Méresse (12306X0046) ;
- Combani-Kahani (12306X0047) ;
- Combani-Mréréni (12306X0038) ;
- Gouloué1 (12307X0045) ;
- Gouloué2 (12307X0053).

Par ailleurs, certaines chroniques ne possèdent que deux années de suivi (Ouroveni 1, Bouyouni Meresse). Pour ces ouvrages, il est donc difficile de définir des tendances à moyen et/ou à long terme de la nappe qu'ils captent.

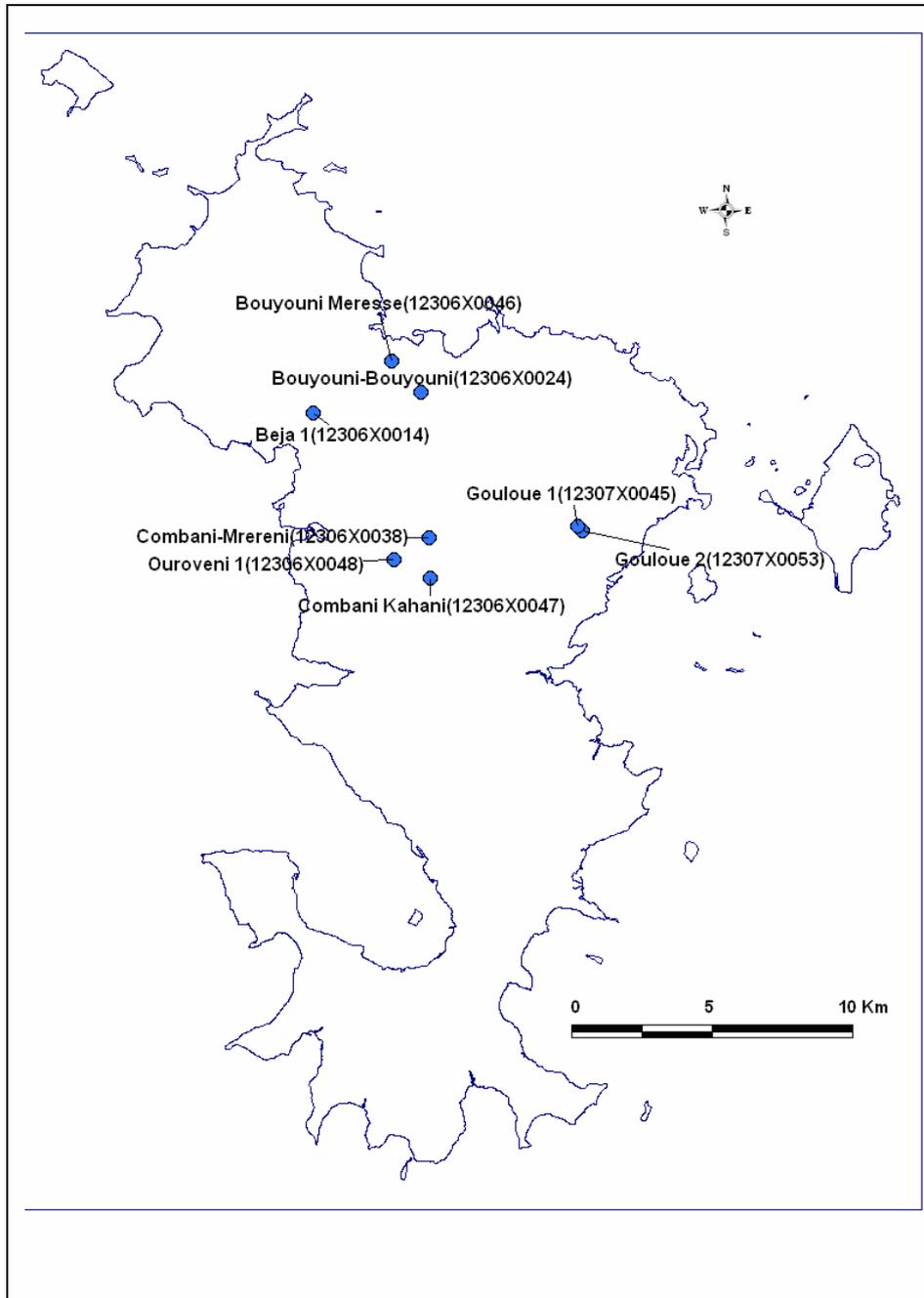


Illustration 1 : Carte de localisation des 8 forages suivis par la DAF

2.2. PERIODE ET FREQUENCE DES MESURES

Les données piézométriques présentent des fréquences d'acquisition assez régulières entre l'année 2003 et l'année 2006 (Cf. Annexe1), en moyenne 3 à 4 mesures par

mois. Avant cette date, les données ne sont généralement pas présentées en raison de mauvaise manipulation des sondes de mesure électriques ou de l'absence de données. A partir de 2006-2007, certains piézomètres ne sont plus suivis, soit parce que l'accès au site est devenu impossible, soit parce que les forages ont été vandalisés. Ainsi la plupart des chroniques piézométriques qui ont pu être reconstituées s'arrêtent en cours d'année.

2.3. FORAGE DE BEJA 1 (12306X0014)

Les informations relatives au forage de Béja 1 (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein des rapports BRGM/RP-50428-FR et BRGM/RP-51603-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

Les données acquises entre 2001 et 2002 sur ce forage étant très fluctuantes et peu nombreuses, elles n'ont pas été intégrées à la chronique piézométrique.

Sur ce forage on observe (Illustration 2) :

- un **tarissement** de type exponentiel, qui débute généralement au mois d'avril, mai et qui se termine au mois de novembre, décembre.
Le tarissement s'effectue en saison sèche. Le tarissement est rapide au début (pente forte) entre les mois d'avril, mai et d'août, puis plus lent d'août à novembre, décembre (pente plus faible).
De 2003 à 2006, on observe une légère tendance à la baisse du niveau des basses eaux ;

L'amplitude de fluctuation entre les périodes de très hautes eaux et de très basses eaux est faible. Elle est comprise entre 1 et 1,3 m ;
- la **recharge** de l'aquifère s'effectue pendant la saison humide. Elle débute en général vers le mois de novembre par des périodes de faible remontée piézométrique (les deux premiers mois), puis se termine par des remontées plus franches à partir du mois de janvier. En période de recharge il est intéressant de remarquer que les courbes sont entrecoupés de brefs épisodes de stagnation voire de tarissement. Ces évolutions montrent la réactivité de la nappe à l'irrégularité des pluies en saison humide.

Par conséquent, les phénomènes de drainance et/ou d'alimentation sont, a priori, relativement rapides dans ce secteur.

Une baisse légère du niveau des hautes eaux est observée sur ce forage depuis 2004 en raison d'une diminution de l'intensité des pluies sur les saisons 2005 et 2006.

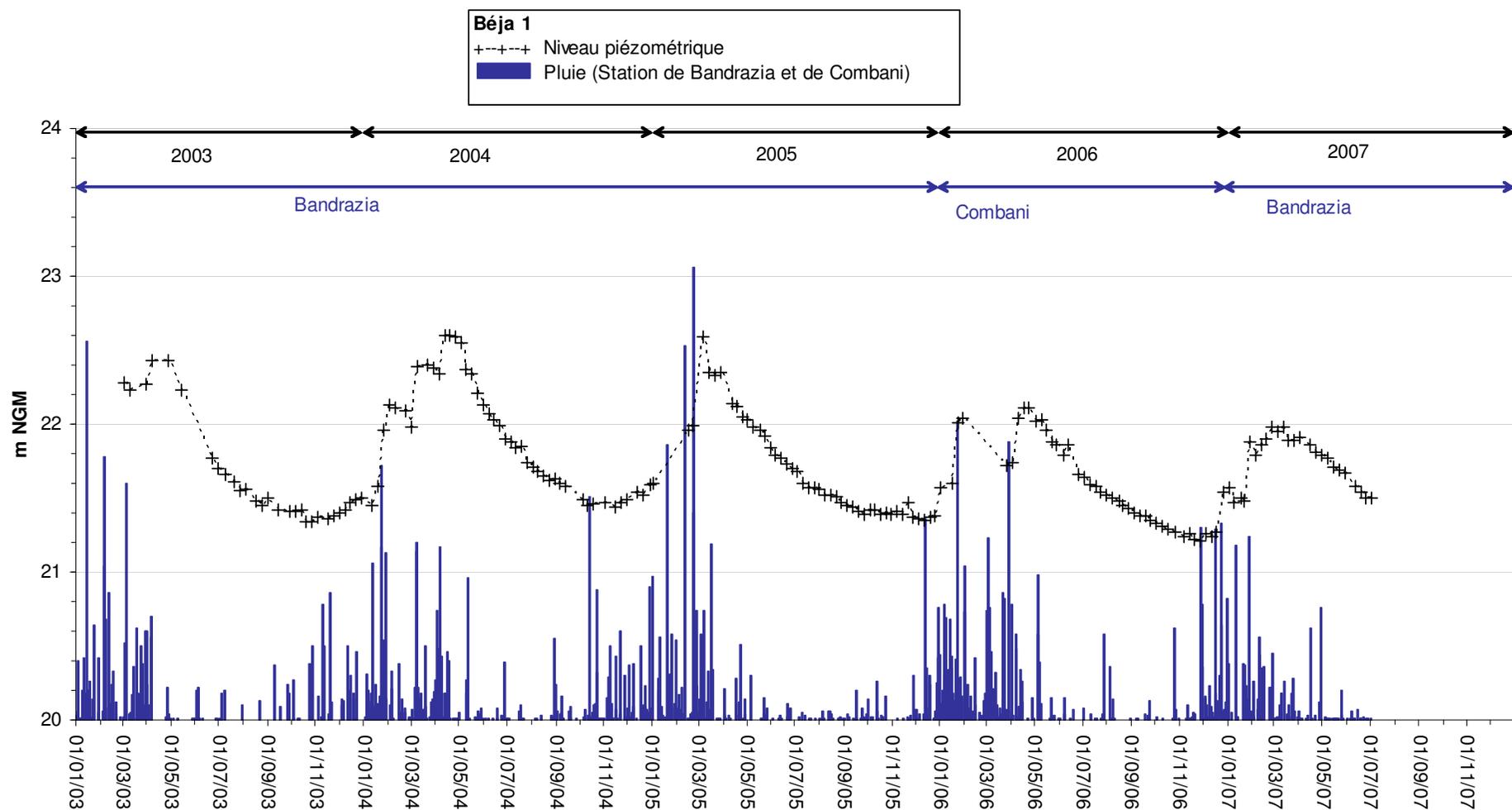


Illustration 2 : Fluctuations piézométriques du forage de Béja 1 entre mars 2003 et juillet 2007

2.4. FORAGE DE OUROVENI 1 (12306X0048)

Les informations relatives au forage de Ourovéni 1 (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport DAF 2004.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

La chronique piézométrique de l'ouvrage d'Ouroveni 1 s'étend de septembre 2003 à février 2006 et ne compte que deux cycles hydrogéologiques complets. Sur la base de ces informations, la tendance d'évolution des niveaux à moyen terme tout comme à long terme ne peut être envisagée.

Les amplitudes interannuelles sont moyennes à ce piézomètre, autour de 2 m. On observe (Illustration 3) :

- des périodes de **tarissement** quasiment linéaire, de l'ordre de 1,2 cm/j. En général, le tarissement débute au mois de mars, avril, à la fin de la saison des pluies et se termine au mois d'octobre, novembre. Le niveau de basse eau a diminué en 2005 par rapport à 2004 mais semble comparable à celui de 2003;
- la **recharge** de l'aquifère a lieu en saison des pluies. Elle débute généralement en octobre par des périodes de faible remontée piézométrique. La remontée franche des niveaux piézométriques se produit début janvier et se confond assez bien avec les variations des pluies. Elle est incisée par de fréquents épisodes de tarissements, notamment en début de période de recharge. Ces observations portent à croire que la réactivité de la nappe aux irrégularités des précipitations est forte. Les phénomènes de recharge de la nappe dans ce secteur sont relativement rapides.

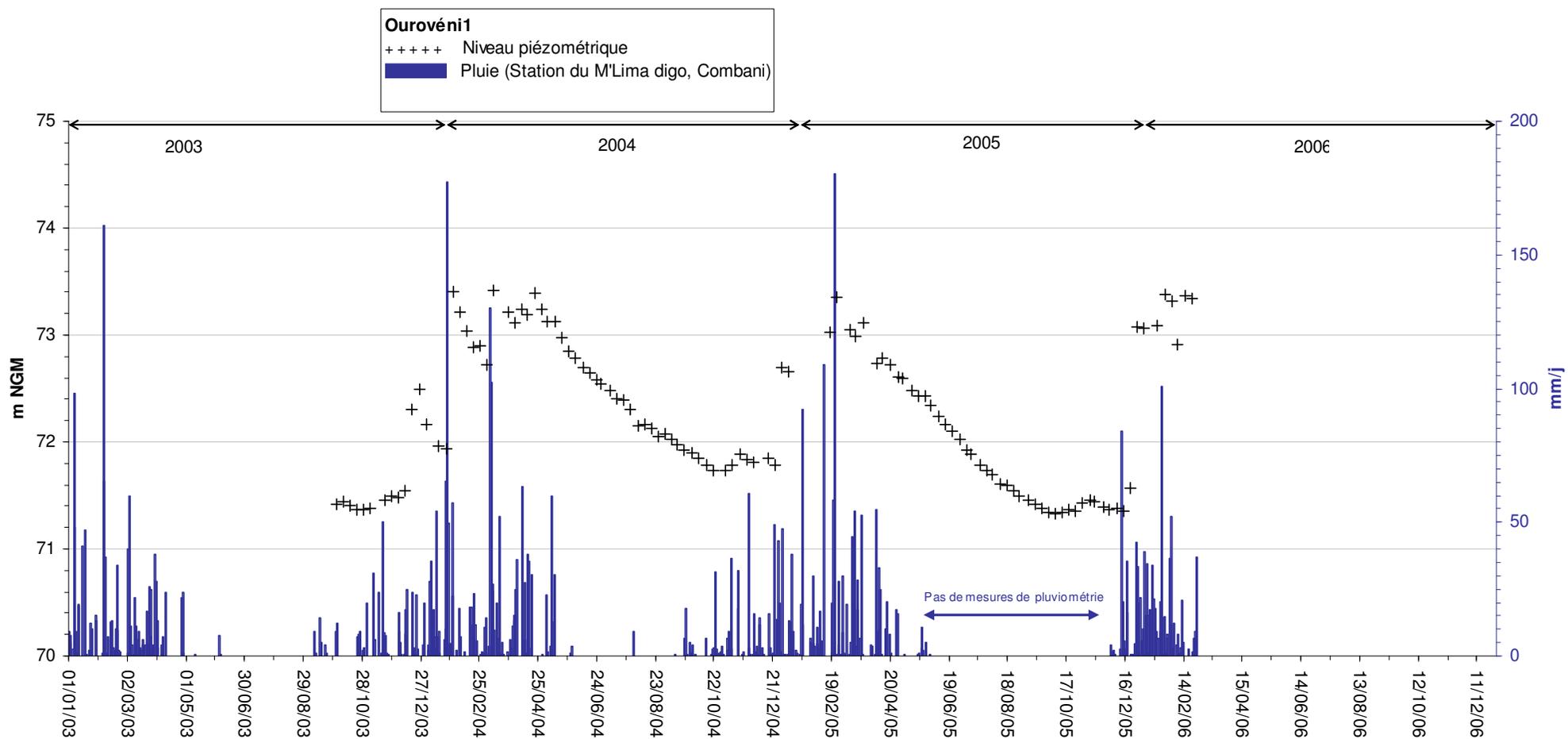


Illustration 3 : Fluctuations piézométriques du forage d'Orovéni 1 entre septembre 2003 et février 2006

2.5. FORAGE DE BOUYOUNI - BOUYOUNI (12306X0024)

Les informations relatives au forage de Bouyouni-Bouyouni (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein des rapports BRGM/RP-51969-FR, BRGM/RP-53193-FR et BRGM/RP-54090-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

Les cycles hydrologiques de mars 2003 à juin 2006 sont bien marqués sur ce piézomètre (Illustration 4) avec :

- un **tarissement** quasiment linéaire : de l'ordre de 1,4 cm/j pour les deux premiers tarissements et de 1,7 cm/j pour le tarissement 2005. Il débute généralement au mois d'avril, mai et se termine en décembre. Le tarissement de l'étiage 2004 est interrompu par une baisse significative (octobre). La baisse du niveau piézométrique est de l'ordre de 2,5 m à 3 m ;
- la **recharge** s'effectue en saison des pluies mais est légèrement retardée. Elle montre deux phases successives :
 - elle débute en général vers le mois d'octobre-novembre par des périodes de faible et temporaire remontée piézométrique ;
 - la remontée franche des niveaux piézométriques se produit de manière différée à partir du mois de février et se prolonge généralement jusqu'en juin ;

Les pentes de recharge et de tarissement sont très proches et la courbe présente une allure assez lissée. La courbe n'est pas aussi sensible aux irrégularités des pluies que les ouvrages décrits précédemment. Ce qui laisse supposer que les mécanismes d'alimentation et de tarissement ne sont pas aussi rapides. Les informations relatives au forage suggèrent que la nappe est semi-captive à captive dans ce secteur et que les alimentations sont assurées par la drainance des unités hydrogéologiques amont et non par infiltration directe.

Les niveaux piézométriques maximaux mesurés sont croissants de 2003 à 2005. En 2005, le niveau maximum mesuré est supérieur de 1 m au niveau maximum mesuré en 2003. Ceci peut s'expliquer par une pluviométrie plus efficace au cours de la saison des pluies 2005. En revanche, début 2006 la recharge s'avère moindre que les années précédentes.

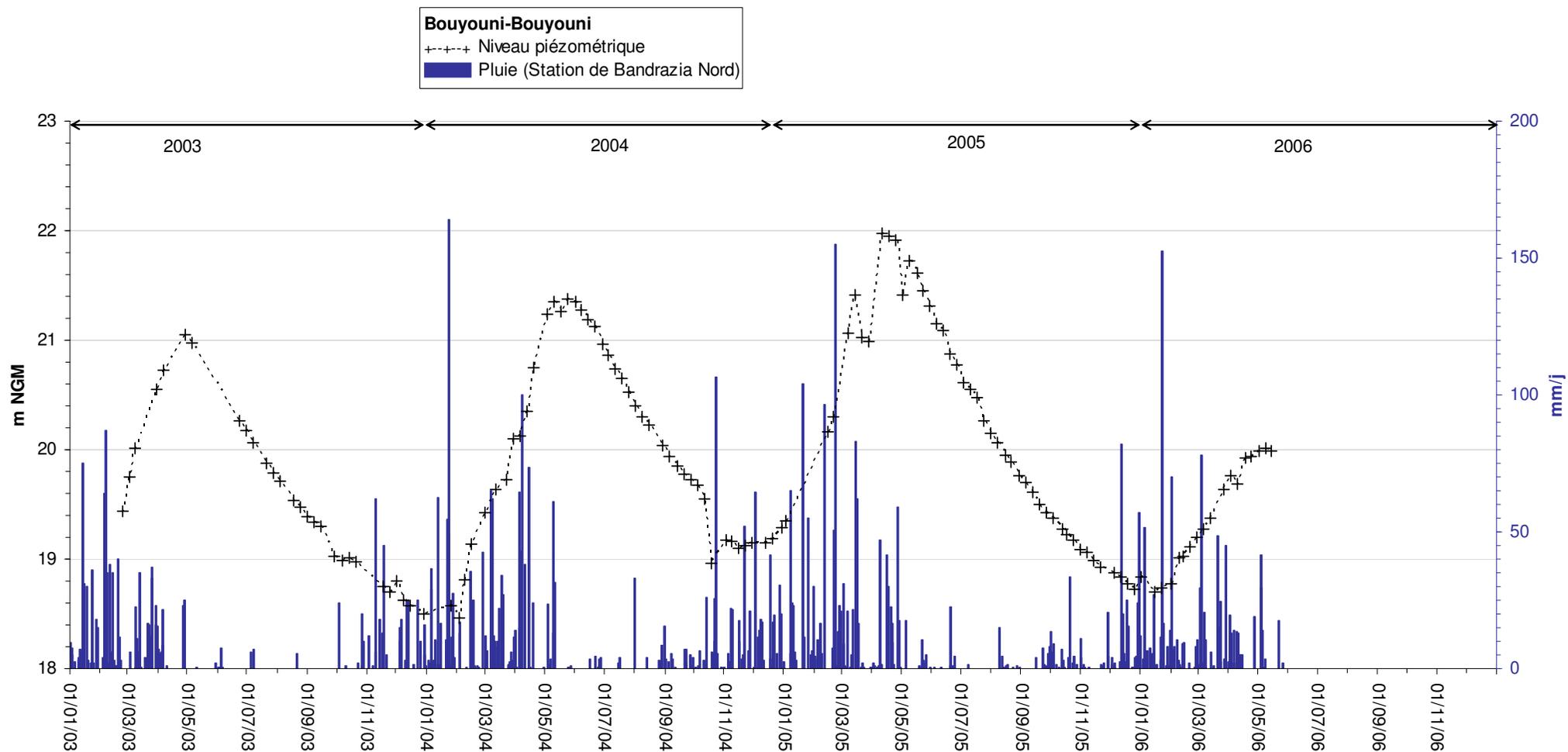


Illustration 4 : Fluctuations piézométriques du forage de Bouyouni-Bouyouni de mars 2003 à juin 2006

2.6. FORAGE DE BOUYOUNI-MERESSE (12306X0046)

Les informations relatives au forage de Bouyouni-Méresse (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport BRGM/RP-52481-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

La chronique piézométrique de l'ouvrage de Bouyouni-Méresse s'étend de juin 2003 à mai 2006 et ne compte que deux cycles hydrogéologiques complets. Sur la base de ces informations, la tendance d'évolution des niveaux à moyen terme tout comme à long terme ne peut être envisagée.

Sur ce forage on observe (Illustration 5) :

- des périodes de **tarissement** peu caractéristiques (tendance exponentielle très peu marquée) qui débutent généralement en avril, mars et se terminent en décembre. La vitesse de tarissement est faible de l'ordre de 0.5 cm/j. Les niveaux piézométriques minimums mesurés entre 2003 et 2006 semblent avoir légèrement augmenté, ce qui laisse croire que le tarissement est interrompu ces deux années par une reprise plus brutale (ou plus importante ?) de la recharge. L'inflexion caractérisant le passage entre tarissement et recharge étant brutalement rompue.

Les fluctuations piézométriques sont faibles sur ce forage, inférieures à 1 m ;

- la **recharge** de l'aquifère s'effectue pendant la saison des pluies en deux périodes : une recharge lente entre les mois de décembre et janvier puis une recharge plus rapide de février à Avril. La recharge de cette nappe est interrompue par de petits épisodes de tarissements (février 2004 et 2005) ce qui montre une certaine réactivité aux irrégularités des pluies. Les niveaux piézométriques maximums mesurés entre 2003 et 2006 semblent avoir légèrement augmenté et ce pour les mêmes raisons que le tarissement.

Bien que la nappe soit semi-captive ou captive dans ce secteur, son comportement semble être différent de l'aquifère recoupé par le forage de Bouyouni-Bouyouni, situé au sein d'une vallée voisine, plus en amont.

Sur ces deux années, le fonctionnement hydrogéologique de la nappe de Bouyouni-Méresse montre des alimentations relativement rapides et des phénomènes de vidange plus lents.

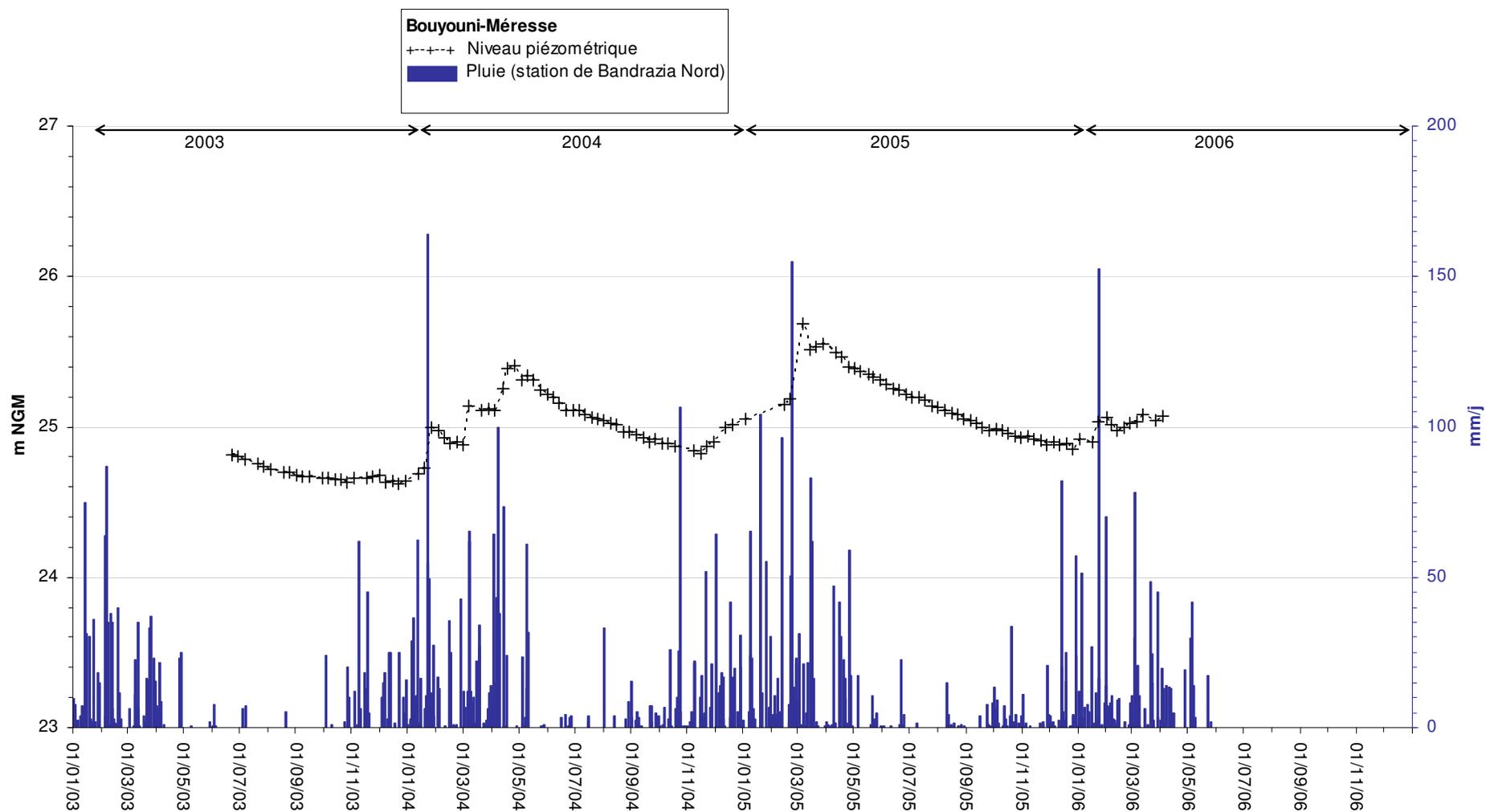


Illustration 5 : Fluctuations piézométriques du forage de Bouyouni-Méresse de juin 2003 à mai 2006

2.7. FORAGE DE COMBANI-KAHANI (12306X0047)

Les informations relatives au forage de Combani-Kahani (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport BRGM/RP-52721-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

Les cycles hydrologiques de juillet 2003 à juillet 2007 sont bien marqués sur ce forage (Illustration 6) avec :

- un **tarissement** quasiment linéaire de l'ordre de 1,4 cm/j. Il débute généralement au mois de juin et se termine au mois de janvier. L'amplitude de fluctuation est assez élevée sur ce forage, en moyenne de 2,5 m. Les niveaux piézométriques minimums mesurés sur ce forage montrent une légère diminution (environ 1 m) entre 2004 et 2007 ;
- la **recharge** de l'aquifère commence assez tardivement sur ce piézomètre, entre décembre et janvier. En 2006 et en 2007, les périodes de recharge sont interrompues par de petits épisodes de tarissement. Depuis 2004, une baisse significative du niveau des hautes eaux a été enregistrée, en raison des fluctuations des précipitations. En 2007, le niveau de hautes eaux semble remonter mais le manque de données à partir du mois de juillet ne nous permet pas de le confirmer.

De manière générale, les pentes d'évolution du niveau piézométrique entre la phase de recharge et celle de tarissement sont très similaires et rappellent la chronique de Bouyouni-Bouyouni. Il semblerait que les nappes soient proches en terme de comportement. On observe par ailleurs que la courbe est très lissée et présente très peu de perturbations dues aux irrégularités des pluies. La nappe est captive ou semi-captive à cet endroit et les processus d'alimentation et de vidange sont plus tamponnés que ce que l'on peut remarquer sur des ouvrages décrits précédemment.

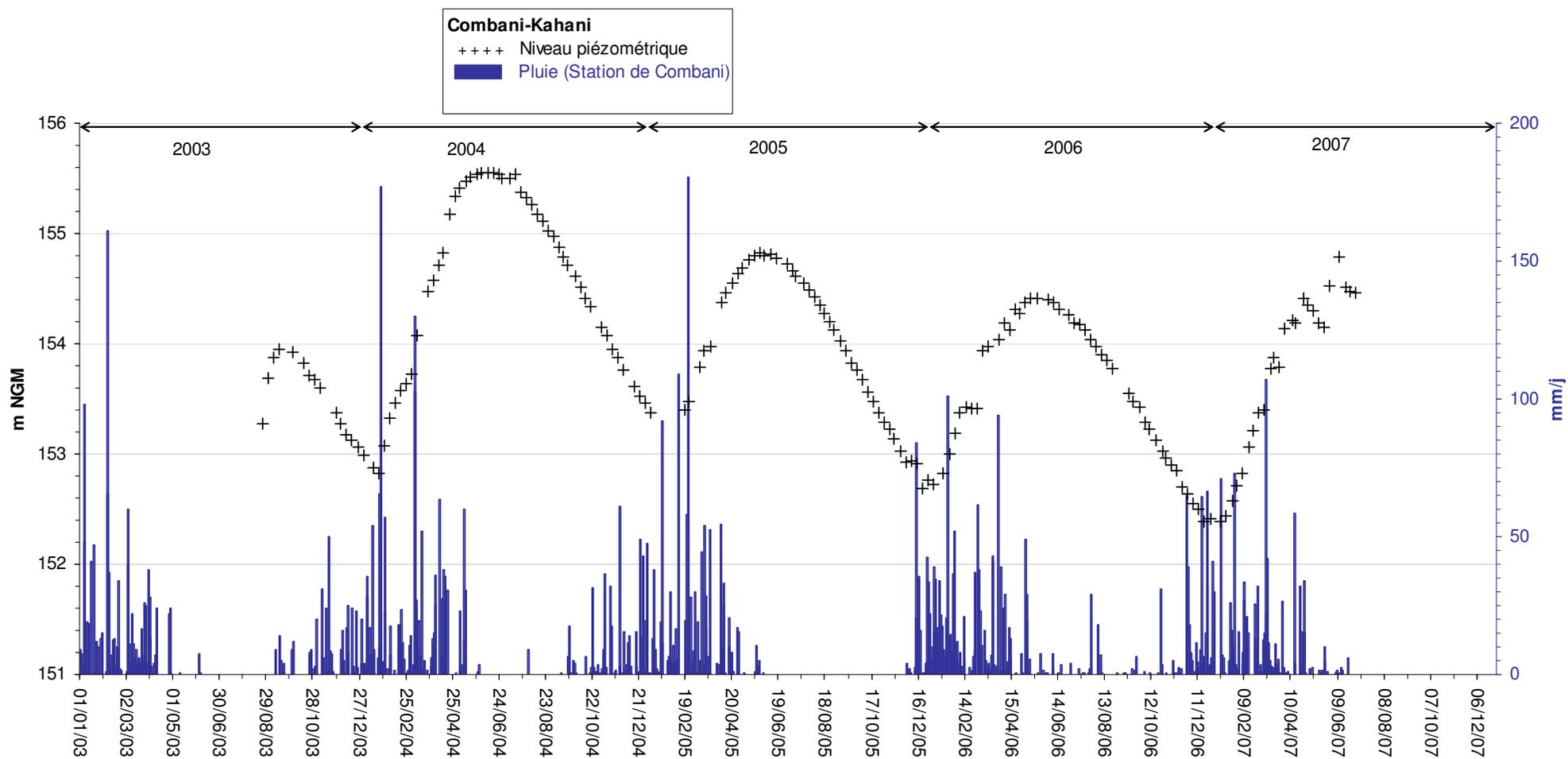


Illustration 6 : Fluctuations piézométriques du forage de Combani-Kahani de juillet 2003 à juillet 2007

2.8. FORAGE DE COMBANI-M'RERENI (12306X0038)

Les informations relatives au forage de Combani M'réréni (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport BRGM/RP-52054-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

Les niveaux piézométriques entre février 2003 et décembre 2005 montrent une évolution différente de celle observée sur l'ouvrage de Combani-Kahani. La réactivité de cet ouvrage aux irrégularités des pluies est plus visible (Illustration 7) avec :

- un **tarissement** exponentiel bien marqué, montrant néanmoins de brèves tendances linéaires en fin de période de tarissement (2004 et 2005) et une relativement faible amplitude de fluctuation (1,2 m environ) entre les périodes de très hautes et de très basses eaux ;
- la **recharge** de l'aquifère s'effectue en saison des pluies et montre deux phases successives :
 - elle débute en général vers le mois d'octobre par des périodes de remontées piézométriques de faibles amplitudes. Les oscillations fréquentes des niveaux, souvent confondus avec les pics de précipitation, montrent que la réaction aux pluies est rapide;
 - la remontée des niveaux piézométriques s'accélère entre janvier et février en raison de l'intensification des pluies. En 2004, le découpage des précipitations entraînent de fortes incisions dans la courbe piézométrique (notamment en 2004).

Les altitudes moyennes des niveaux piézométriques sont très proches de celles du cours d'eau voisin, le Mro Oua Ourouvéni (107 à 108 m NGM). Il est très probable que des infiltrations directes du cours d'eau conditionnent le niveau piézométrique de l'ouvrage. Dans ce cas et dans le cadre d'une mise en exploitation de l'ouvrage, une attention particulière doit être portée aux modalités de fonctionnement des relations nappe-rivière et à la qualité des eaux du cours d'eau.

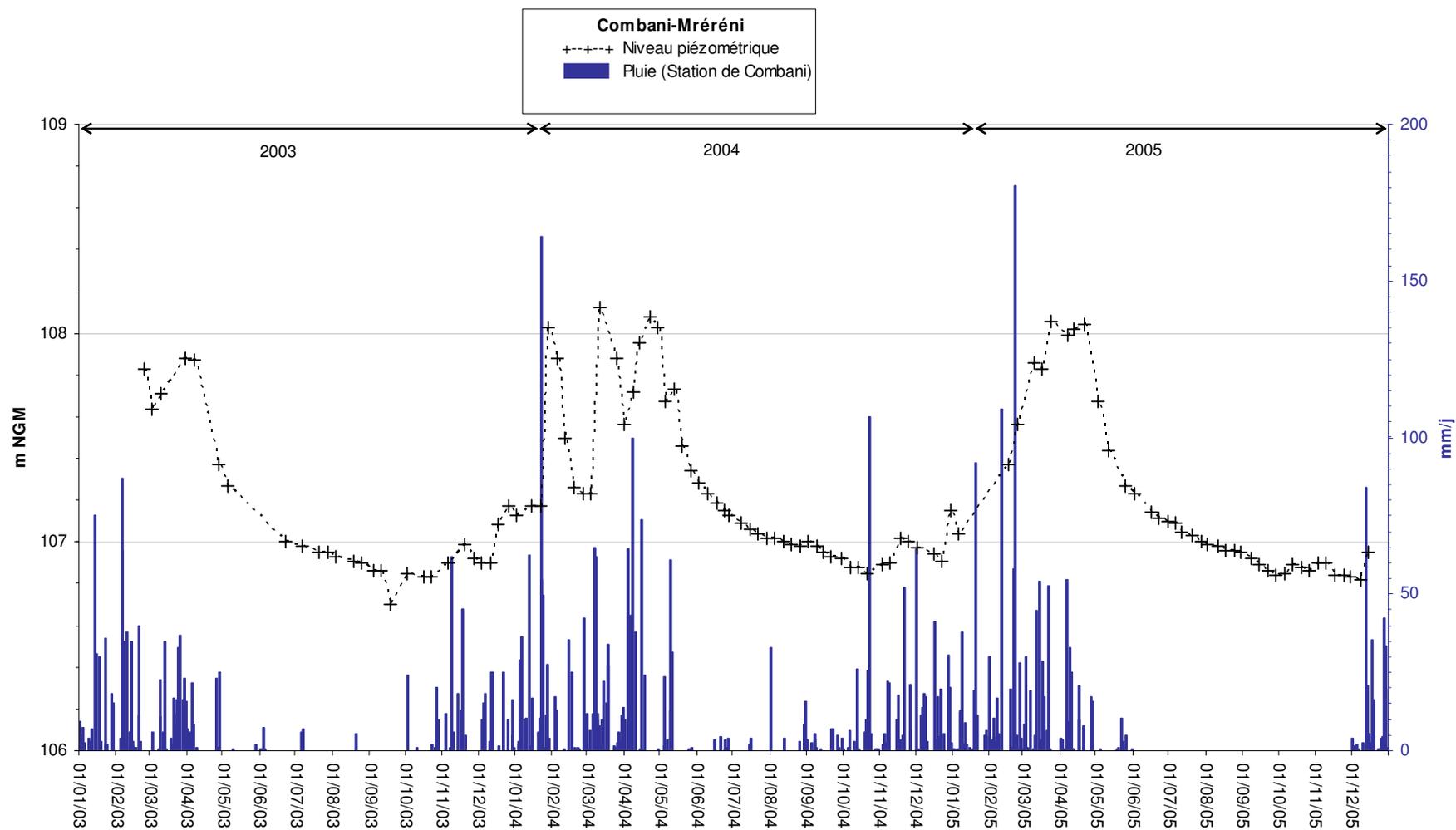


Illustration 7 : Fluctuations piézométriques du forage de Combani-Mréréni entre février 2003 et décembre 2005

2.9. FORAGE DE GOULOUE 1 (12307X0045)

Les informations relatives au forage de Gouloué1 (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein des rapports BRGM/RP-52035-FR, BRGM/RP-53193-FR et BRGM/RP-54090-FR.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

Les amplitudes interannuelles observées entre juin 2003 et juin 2007 sont faibles sur ce forage, inférieures à 1 m (Illustration 8). De manière générale, la chronique présente des évolutions très proches de celle de Bouyouni-Méresse, que ce soit en termes d'amplitude ou de géométrie de la courbe. On observe :

- des périodes de **tarissement** à tendance exponentielle peu marquée. En général, le tarissement s'effectue entre les mois d'avril et de décembre. Dans l'ensemble la pente de tarissement est faible. La vitesse de vidange de l'aquifère est donc lente. Le tarissement est tout de même plus rapide au début de l'étiage (pente plus forte) d'avril à juillet puis plus lent jusqu'au mois de décembre (pente plus faible). On observe en revanche de faibles alimentations en période de vidange se caractérisant par de petites bosses (observables souvent aux mois de juin juillet 2004, 2005 et 2006). De 2003 à 2006, le niveau des plus basses eaux mesuré sur ce forage a légèrement augmenté. De même que sur l'ouvrage de Bouyouni-Méresse, la fin de la période de tarissement montre une inflexion brutale indiquant la reprise de la recharge.
- la **recharge** de l'aquifère s'effectue en deux phases successives. Elle débute assez tardivement, au mois de décembre, janvier par des périodes de faible remontée piézométrique. La remontée franche des niveaux se produit de manière différée à partir du mois de février. Les périodes de recharge sont fréquemment interrompues par des épisodes rapides de tarissement indiquant une alimentation par les précipitations.
De 2003 à 2006, il est intéressant de remarquer que la tendance des niveaux moyens est sensiblement en hausse entre 2003 et 2006 comme il l'a été remarqué sur la chronique de Bouyouni-Méresse

Sur ces 3 cycles hydrologiques, le fonctionnement de la nappe de Gouloué montre des alimentations relativement rapides et des phénomènes de vidange plus lents comparé à la moyenne observée sur les autres ouvrages. Ce fonctionnement a contribué sur ces 3 années au maintien voire à la hausse des niveaux piézométriques moyens.

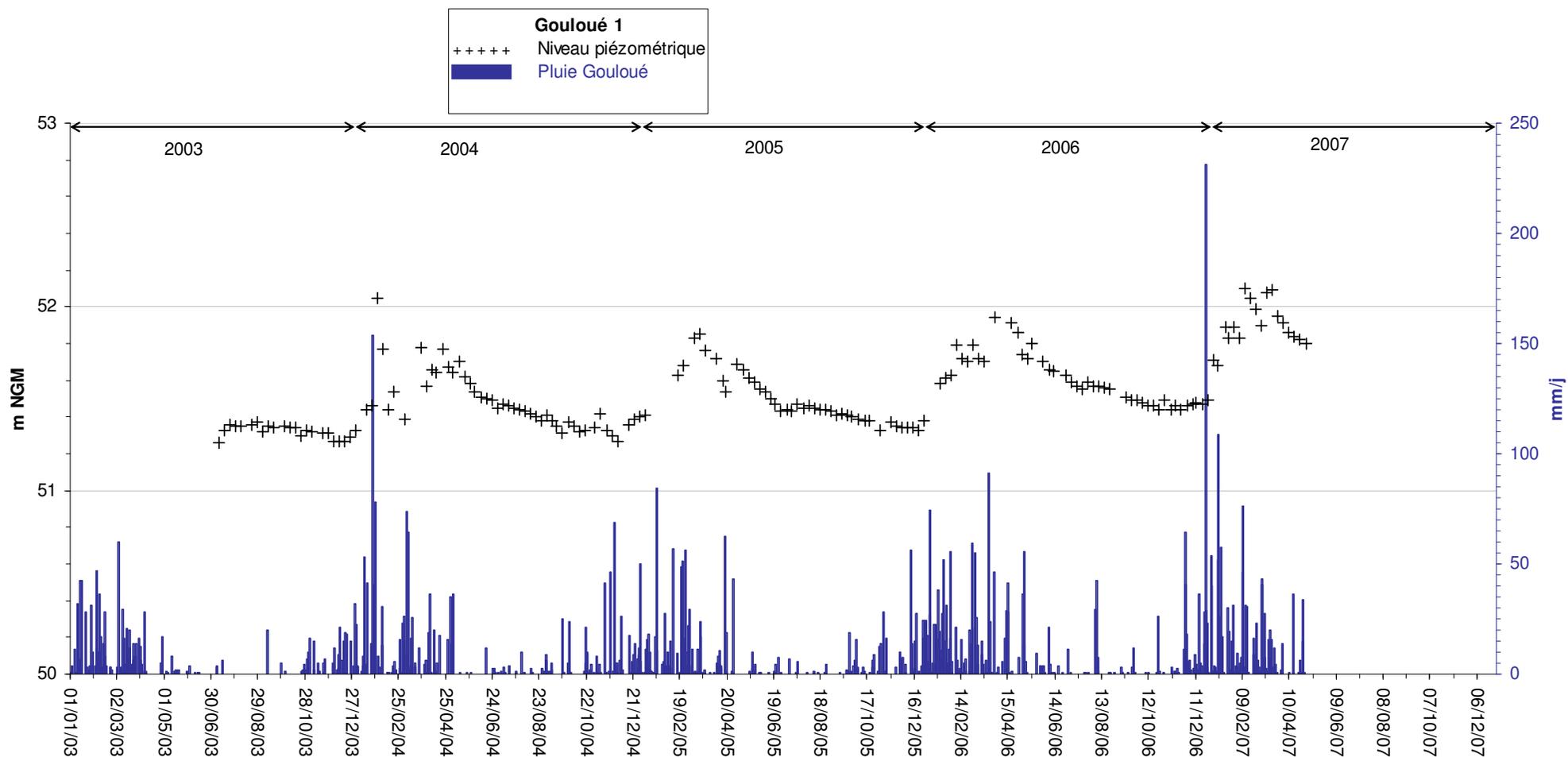


Illustration 8 : Fluctuations piézométriques du forage de Gouloué1 entre juin 2003 et juin 2007

2.10. FORAGE DE GOULOUE 2 (12307X0053)

Les informations relatives au forage de Gouloué2 (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport BRGM/RP-52551-FR. Le forage de Gouloué 2 est situé environ 200 m en aval du forage de Gouloué 1.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM (aucun nivellement n'a été effectué, les cotes sont estimées à partir des données cartographiques de l'IGN).

La chronique de Gouloué 2 est très similaire (pour ne pas dire copie conforme mais décalée topographiquement d'une dizaine de mètres vers le bas) à celle du forage de Gouloué 1 sur la période concernée. Sur cette chronique on observe entre juin 2003 et juin 2007 (Illustration 9) :

- des périodes de **tarissement** de type exponentiel peu marquées. Ces périodes débutent généralement au mois d'avril et se terminent en décembre. Dans l'ensemble la pente de tarissement est faible, la vitesse de vidange de l'aquifère est donc assez lente. Comme observé à Gouloué 1, la période de vidange de l'aquifère se distingue par des alimentations chroniques se traduisant par de petites « bosses » particulièrement en juin-juillet. Il s'agit probablement de réalimentation par des infiltrations du fond du lit de la Mro Oua Gouloué située à proximité du forage et très proche altimétriquement.

L'amplitude de tarissement est faible sur ce forage, en moyenne 0,6 m entre les périodes de hautes eaux et de basses eaux ;

- la **recharge** de l'aquifère s'effectue en deux phases successives :
 - elle débute au mois de décembre par des périodes de faible remontée piézométrique ;
 - la remontée franche des niveaux se produit de manière différée à partir du de la fin du mois de février lors de l'intensification des précipitations.

La recharge est fréquemment interrompue par des épisodes très rapides de tarissement dus aux irrégularités des pluies.

Entre juin 2003 et juin 2006, le fonctionnement de la nappe de Gouloué montre des alimentations relativement rapides et des phénomènes de vidange de vitesse sensiblement équivalente. Ce fonctionnement a contribué sur ces 3 années au maintien des niveaux moyens.

Etant donné l'éventuelle relation nappe-rivière que montrent les données, une attention particulière devra être portée aux modalités de fonctionnement de ces relations et à la qualité des eaux du cours d'eau dans le cadre d'une mise en exploitation de l'ouvrage.

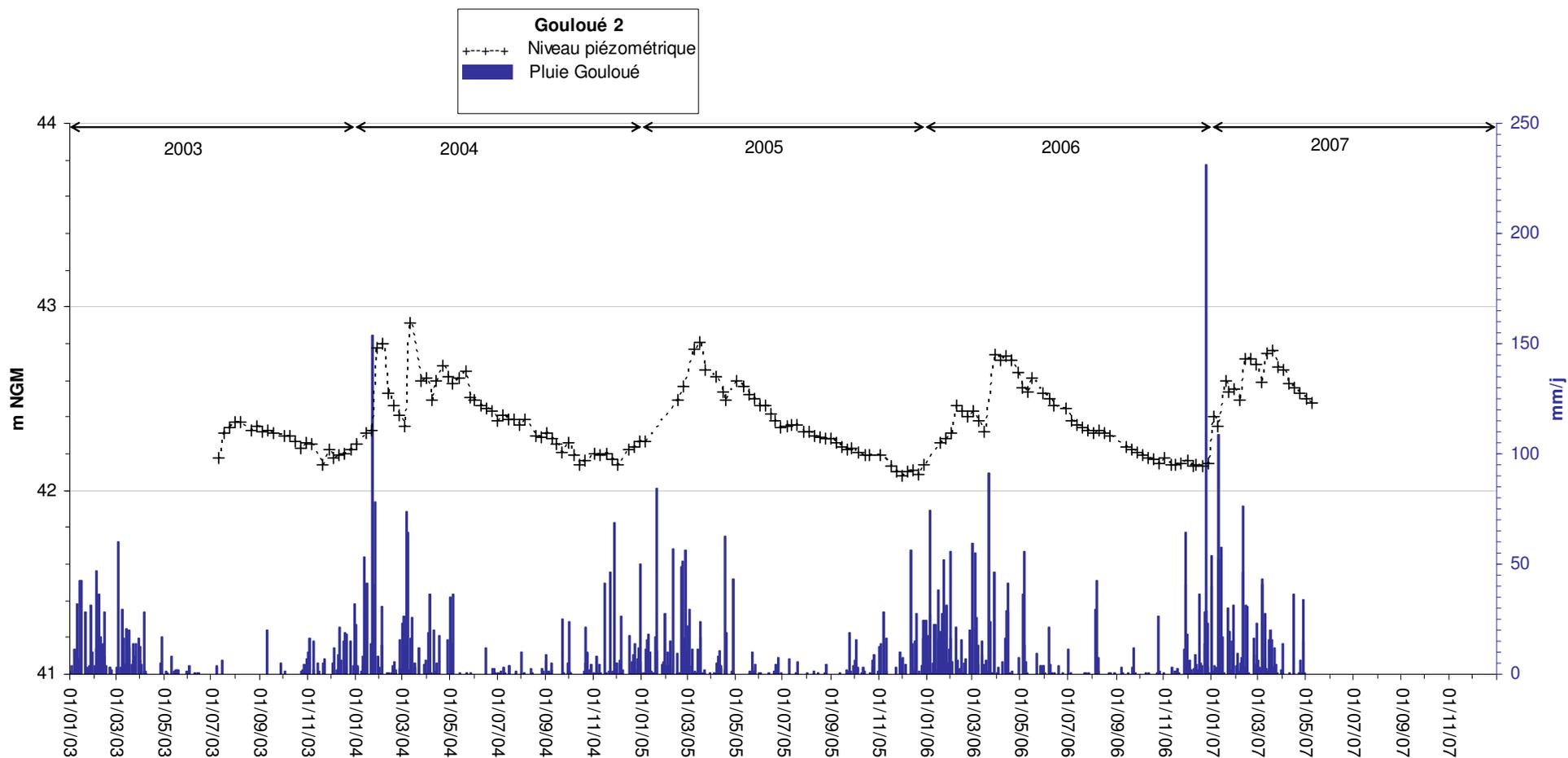


Illustration 9 : Fluctuations piézométriques du forage de Gouloué2 entre juin 2003 et juin 2007

2.11. SYNTHÈSE

Les fluctuations piézométriques mesurées sur ces 8 ouvrages ont des ordres de grandeur caractéristiques des aquifères de Mayotte (de 0,5 à 3 m environ). Les forages de Gouloué 1, Gouloué 2 et Bouyouni-Méresse montrent des amplitudes nettement plus faible que celles des autres ouvrages (inférieure à 1m) mais une réactivité accrue au signal des pluies. Ces aquifères ont tendance à se recharger rapidement d'une part sous l'effet des précipitations efficaces et d'autre part probablement par l'infiltration des eaux des cours d'eau de surface. Par contre, ils ont tendance à se vidanger de façon plus lente. Etant donné l'éventuelle relation nappe-rivière de ces aquifères, une attention particulière devra être portée aux modalités de fonctionnement de ces relations et à la qualité des eaux du cours d'eau dans le cadre d'une mise en exploitation des ouvrages.

Certains piézomètres présentent de légères tendances à moyen terme, à la hausse ou à la baisse de leur niveau de basses eaux ou de hautes eaux. Ces fluctuations attribuables aux variations interannuelles de la recharge, restent cependant faibles en valeur absolue et variables d'un site à l'autre de Mayotte, ce qui montre à la fois l'hétérogénéité des formations hydrogéologiques, la variabilité des mécanismes de recharge, etc. Comme indiqué en tête du chapitre, il est difficile de pronostiquer des tendances à moyen termes sur des ouvrages dont les chroniques n'excèdent pas 2 ou 3 ans.

Ces données pourront être utilement valorisées dans le futur, notamment lorsque ces forages auront été mis en exploitation, pour simuler leur fonctionnement et quantifier la ressource exploitable au sein des aquifères captés (voir les chapitres suivants à titre d'exemple). Ils permettront en effet de disposer d'éléments de calibration en dehors des périodes de pompage, élément qui permettront de mieux contraindre le calage des modèles qui seront mis en œuvre.

3. Valorisation des données d'exploitation du forage de Kwalé 1 (1230-7X-0022) recueillies en 2002-2007

Les informations relatives au forage de Kwalé 1 – puits exploité - et Kwalé 3 – forage non exploité actuellement, suivi en tant que piézomètre d'observation - (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein des rapports BRGM/RP-50428-FR et BRGM/RP-53471. Les deux forages captent le même aquifère volcanique. Kwalé 1 est capté de 32 à 62 m de profondeur (horizon fissuré) et Kwalé 3 de 68 à 74 m de profondeur (base de coulée scoriacées).

Les nappes sont semi-captives à captives au niveau des forages. Les pompages d'essai ont démontré que l'aquifère présentait un effet de capacité, que les limites étanches étaient atteintes rapidement (compartiments) mais que néanmoins celui-ci renfermait un volume d'eau exploitable important (BRGM/RP-53593-FR). A l'issue de ce rapport, l'alimentation de la nappe par la rivière Mro Oua Kwalé avait été envisagée par des pertes partielles au travers de la zone non saturée. Ces pertes seraient plus prononcées en période de hautes eaux.

Des premiers travaux visant à valoriser ces données sur la période de 2000-2001, puis sur la période 2002-2003 ont déjà été réalisés (rapports BRGM/RP-51603 et BRGM/RP-53193-FR). Ceux-ci mettaient en évidence un fonctionnement complexe de cet aquifère volcanique. Ils ont néanmoins permis de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères de Mayotte ainsi qu'une réévaluation de la ressource exploitable au forage de Kwalé 1.

Les données acquises par la DAF (débit du cours d'eau et piézométrie en Kwalé 3 notamment,) et par la SOGEA au forage de Kwalé 1 (niveaux piézométriques, débits du forage et conductivité électrique des eaux pompées) ont été utilisées pour améliorer la compréhension de la structure et du fonctionnement de cet aquifère et pour proposer une modélisation de la piézométrie en fonction des conditions d'exploitation du site et des conditions hydro-climatiques (recharge, débit du cours d'eau voisin).

L'illustration 10 présente la zone d'étude et le dispositif de métrologie disponible.

La piézométrie est exprimée en cotes piézométriques rattachées au NGM. Les forages de Kwalé 1 et Kwalé 3 ont été nivelés en novembre 2004. Les cotes sont estimées à partir des données topographiques mesurées lors des travaux de nivellement.

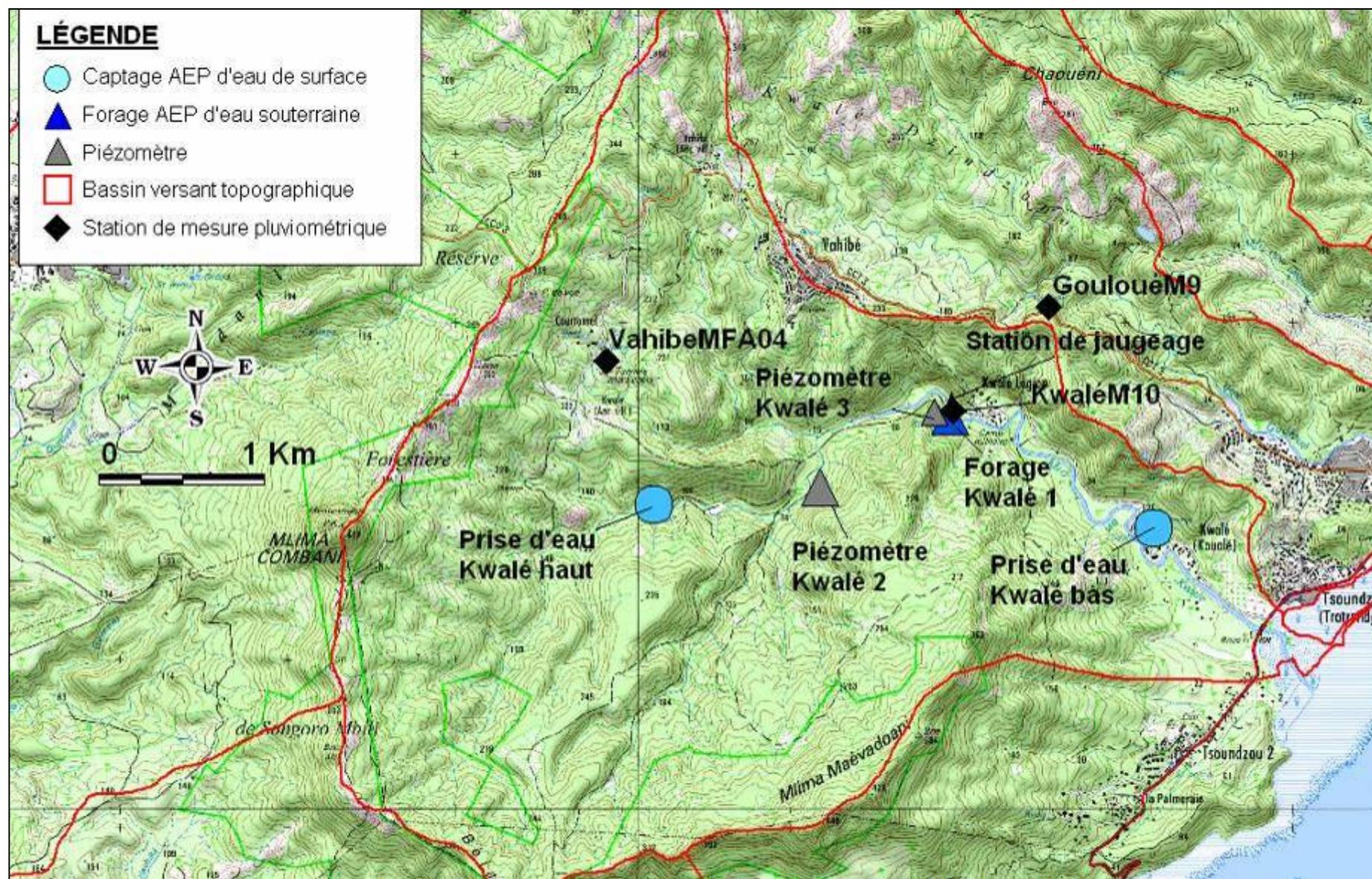


Illustration 10 : Localisation du forage exploité de Kwalé 1 et du dispositif de métrologie du bassin versant topographique

Les informations reçues par le BRGM à la fin octobre 2007 et en février 2008 correspondent à l'ensemble des données recueillies par l'exploitant (cahier de station SOGEA) et la DAF depuis la mise en exploitation de l'ouvrage (1^{er} semestre 2001) jusqu'à décembre 2007.

Elles ont été transmises sous forme numérique pour les données DAF et papier pour les données de l'exploitant. Elles comprennent :

- les cotes piézométriques au forage d'exploitation de Kwalé 1 (1230-7X-0022) de fin juin 2001 à fin décembre 2007, et au forage d'observation Kwalé 3 (1230-7X-0100) d'octobre 2004 à février 2008 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le pas de temps de mesure est journalier pour le forage Kwalé 1 (moyenne piézométrique journalière déduite d'un enregistrement automatique ; cf. BRGM/RP-53193-FR) et hebdomadaire pour Kwalé 3 (mesures manuelles DAF). Pour le forage Kwalé 1, les données proviennent de la DAF pour les données antérieures au 31-12-06 et des cahiers de station de la SOGEA pour les données postérieures. Les données piézométriques journalières au forage Kwalé 1 présentent quelques interruptions (03 au 06-09-03 ; 09 au 14-12-03 ; 26 au 31-05-04 ; 26-11-04 au 02-01-05 ; 17-01-06 au 26-03-06 ; 28-07-06 au 06-08-06),
- le débit moyen journalier du forage de Kwalé 1, en m³/h (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les données présentées et traitées proviennent de la DAF pour les données antérieures au 31-12-06 et des cahiers de station de la SOGEA pour les données postérieures. Cette donnée présente quelques interruptions (03 au 06-09-03 ; 09 au 14-12-03 ; 26 au 31-05-04 ; 07 au 08-09-04 ; 26-11-04 au 02-01-05 ; 17-01-06 au 26-03-06 ; 28-07-06 au 06-08-06). Pour le besoin des modélisations les interruptions ont été « comblées » par interpolation linéaire,
- la conductivité électrique des eaux, exprimée en microSiemens par centimètre (µs/cm) (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les données présentées et traitées proviennent de la DAF pour les données antérieures au 31-12-06 et des cahiers de station de la SOGEA pour les données postérieures. Cette donnée présente les mêmes interruptions que pour les débits ; celles-ci n'ont pas été comblées,
- la pluviométrie, exprimée en mm (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), à la station de Kwalé (code : M10 ; le pluviomètre est situé sur le bâtiment abritant le forage de Kwalé 1). La chronique présente une interruption des mesures du 01-06-05 au 30-11-05. Pour le besoin des modélisations, cette interruption a été « comblée » par les données de la station pluviométrique la plus proche (station de Gouloué code : M09, situé à 860 m du forage de Kwalé 1 - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**),

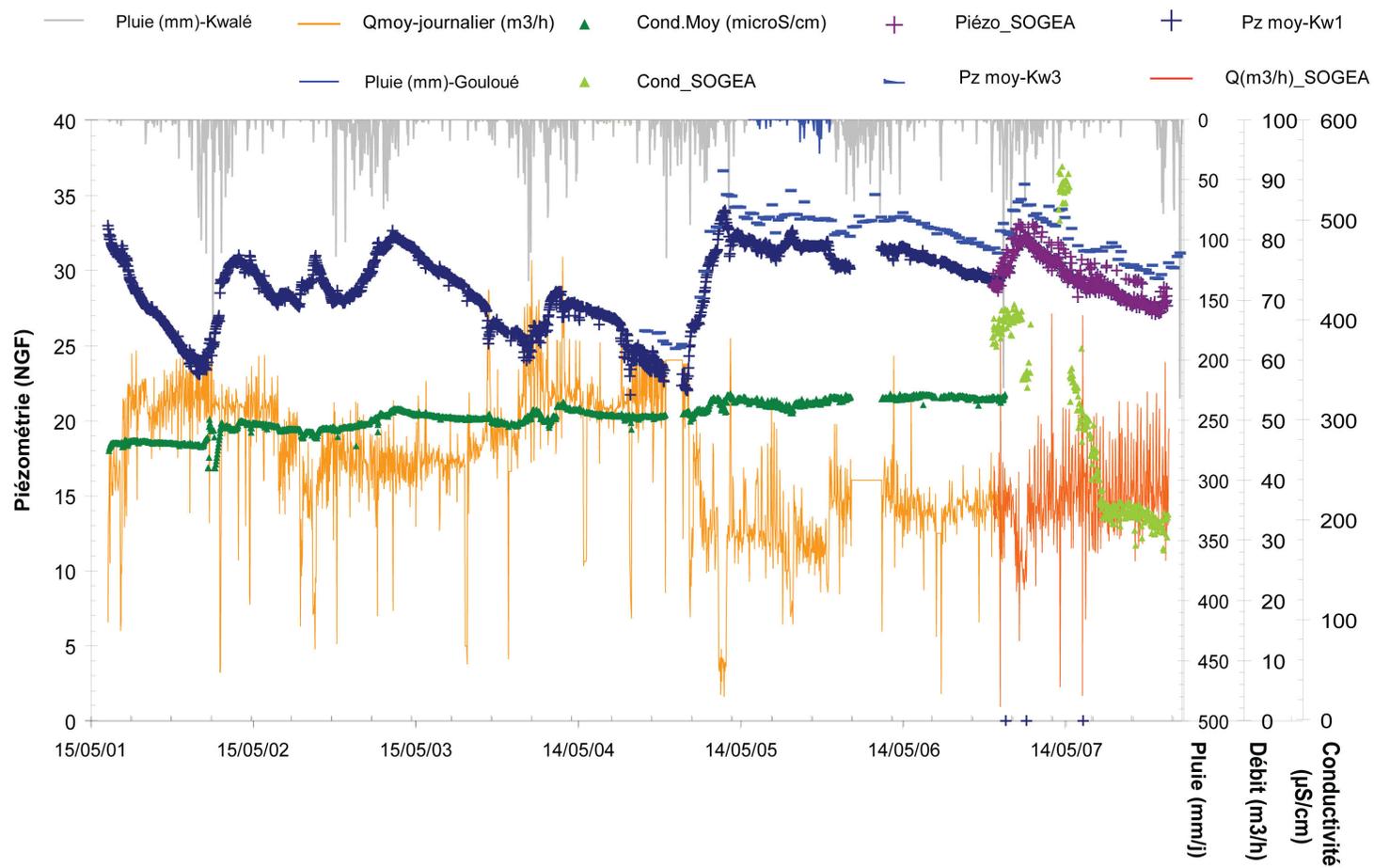


Illustration 11 : présentation des données de piézométrie (forages Kwalé 1 et 3), de pluviométrie, de conductivité électrique de l'eau d'exhaure et de débit

- les débits du cours d'eau (Mro oua Kwalé), exprimés en m^3/s , mesurés à proximité du forage de Kwalé 1 (station de mesure « Kwalé bas » ; surface du bassin versant topographique : 12.5 km^2 - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) ; ce cours d'eau traverse et draine l'ensemble des formations volcaniques situés en amont. Les mesures sont manuelles (jaugeages au micromoulinet) et réalisées à un pas de temps hebdomadaire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La fréquence hebdomadaire conduit à ce que certains pics de crue n'ont pas été mesurés. Par ailleurs, une partie du débit du cours d'eau est capté en amont (station de Kwalé haut ; surface du bassin versant : 3.7 km^2 - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), avec un prélèvement annuel de l'ordre de $500\,000 \text{ m}^3$ (SOGEA, Com. Pers.). Ce prélèvement entraîne une probable sous-estimation du débit à la station de Kwalé bas.
- d'autres données météorologiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) : durée journalière de l'insolation (station Météo France de PAMANDZI) et température journalière moyenne (station de VAHIBE-PRIMA). Données disponibles du 07-11-03 au 31-12-07.

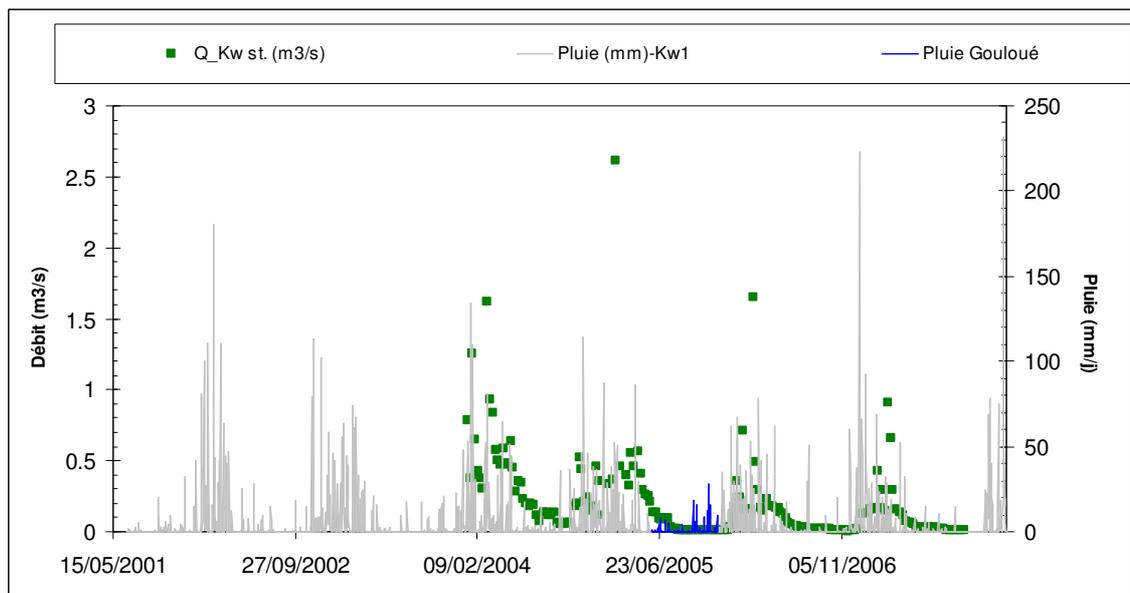


Illustration 12 : présentation des données de débit du cours d'eau (station Kwalé ; superficie du bassin versant : 12.5 km^2) et de pluviométrie

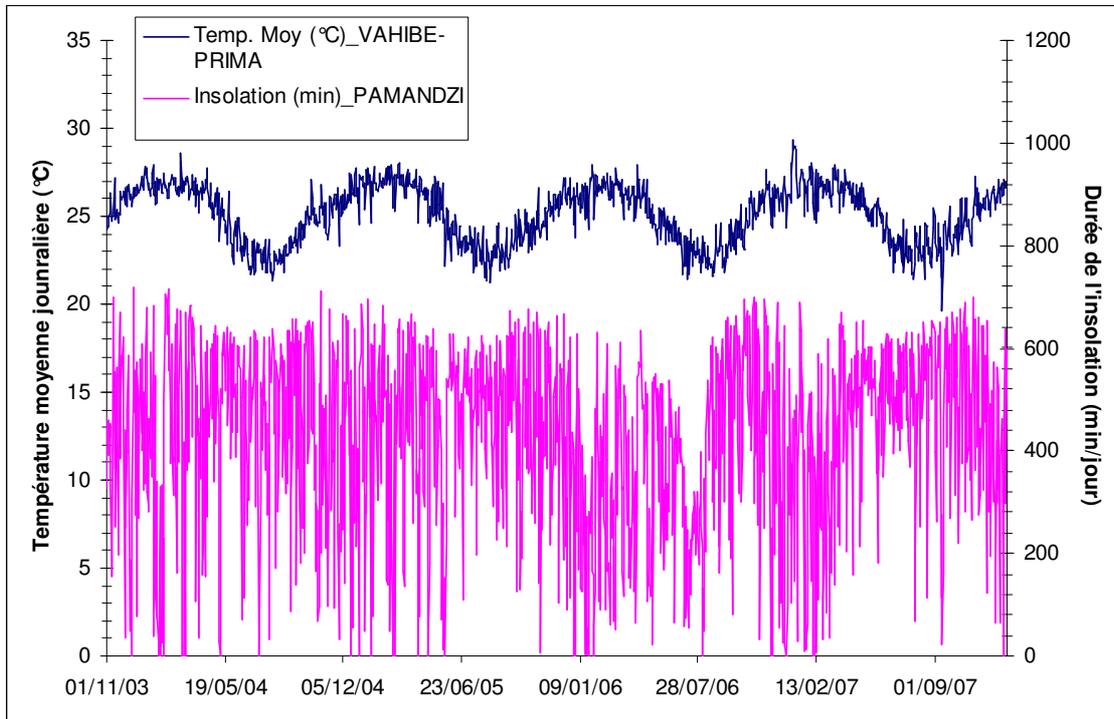


Illustration 13 : durée journalière de l'insolation (station de PAMANDZI) et température journalière moyenne (station de VAHIBE-PRIMA).

3.1. ANALYSE DES DONNEES RECUEILLIES

Dans les paragraphes suivants, seules les données de piézométrie aux forages de Kwalé 1 et 3, les débits du forage pompé et le débit du cours d'eau ont fait l'objet de traitements.

Les données de conductivité électrique de l'eau pompée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) en raison de leur tendance à une augmentation linéaire pour la période anté 2006, probablement due à une dérive de l'appareil de mesure, et à leur caractère erratique post 2006 dû vraisemblablement à un problème de calibration de la sonde n'ont pas fait l'objet d'un traitement dans le cadre du présent projet. Tout au plus peut on noter que la conductivité électrique mesurée est dans la gamme des eaux douces connues sur ce site, aux environs de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Il est possible que la sonde de mesure soit placée dans le forage et non au niveau des eaux d'exhaure. Si tel est le cas, la mesure pourrait concerner des « eaux mortes » situées au dessus de la pompe ; il serait alors recommandé de déplacer la sonde afin de disposer de mesures significatives. Dans tous les cas, il conviendrait de procéder à des mesures périodiques d'étalonnage.

3.1.1. Evolution de la piézométrie au forage de Kwalé 1

La piézométrie (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) fluctue en fonction des conditions d'alimentation de la nappe par les précipitations efficaces - recharge - (janvier-avril) et du débit de pompage. Comme déjà remarqué lors de la précédente étude (BRGM/RP-53193-FR), l'évolution de la piézométrie suit une forte tendance linéaire en coordonnées arithmétiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), en particulier lors des périodes d'étiage (avril-mai à novembre-décembre) au cours desquelles la recharge influence peu ou pas celle-ci. Ce comportement est caractéristique d'un aquifère limité dans l'espace, relativement homogène et isotrope.

Une fois les limites de l'aire de drainage (surface de l'aquifère) atteintes par le pompage (atteinte d'un régime pseudo-permanent), la charge hydraulique au puits, et donc le rabattement croît linéairement en fonction du temps. Pour un débit constant et un aquifère captif homogène et isotrope, le rabattement au puits a pour expression analytique (Bourdarot, 1996) :

$$s = \frac{Q}{SA}t + \frac{Q}{4\pi T} \left[\ln\left(\frac{A}{r_w^2}\right) + \ln\left(\frac{2.2458}{C_A}\right) \right] \quad \text{Eq.1}$$

Où, s est le rabattement (m), S l'emmagasinement de l'aquifère (sans dimension), A la surface de l'aquifère (m^2), T la transmissivité de l'aquifère (m^2/s), r_w le rayon du puits (m), C_A une constante qui dépend de la géométrie de l'aquifère et de la position du puits au sein de l'aquifère et t le temps (s). C_A varie de 31.63 pour un aquifère circulaire à 5.38 pour un aquifère ayant la forme d'un quart de cercle. L'analyse de sensibilité de cette expression analytique montre que quand le rapport A/r_w^2 est grand, ce qui est le cas la plupart du temps, l'intercepte de la droite (deuxième terme) est peu sensible à C_A ; par conséquent, dans la pratique, l'interprétation des rabattements ne permet pas d'obtenir d'information précise sur la géométrie de l'aquifère et la position du puits par rapport aux limites.

L'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre les parties de la chronique où le régime pseudo-permanent est atteint (le rabattement est linéaire en fonction du temps) ; dans ces parties, le débit de pompage est quasi constant. Le rabattement, et donc la piézométrie, suivent une relation équivalente à la relation précédemment décrite (Eq. 1).

Des régressions linéaires ($Y = a.X + b$) ont été établies pour chaque droite identifiée sur l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Si le second terme de ces régressions (b) n'a pas signification puisqu'il dépend de la piézométrie initiale (celle avant pompage), le premier (a), qui exprime la pente de la droite, est égal à Q/SA , et donne des renseignements sur la productivité de l'aquifère exploité. En normant les données par le débit pompé Q et en faisant l'hypothèse que l'aquifère n'est soumis à aucune

recharge¹, on peut en déduire la « quantité d'eau » présente au sein de l'aquifère, par unité de hauteur d'aquifère (exprimée en m³/m - **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Ce paramètre est de l'ordre de 3.0×10^4 m³/m de 2001 à 2003. Il semble ensuite augmenter quasi linéairement, jusqu' 9.0×10^4 m³/m à fin 2007, sans pour autant montrer de relation significative avec la cote des niveaux piézométriques au sein de l'aquifère (qui aurait par exemple pu traduire des variations de sa porosité efficace en fonction de la profondeur). Cette augmentation apparente du volume d'eau présent dans l'aquifère traduit un changement de comportement de l'aquifère, très probablement lié à une augmentation des infiltrations via un aquifère superficiel ou via des pertes du cours d'eau voisin. L'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** suggère que ces infiltrations/pertes étaient plus faibles en 2001-2003 qu'au cours de la seconde période. En considérant une épaisseur aquifère de l'ordre de 30 m (RP-50428-FR), le volume d'eau présent dans l'aquifère est estimé à environ 0.9 Mm³ ; estimation basée sur les pentes de 2001-2003, valeurs les plus réalistes pour l'estimation du volume. Par ailleurs, considérant une surface de l'aquifère, A , de l'ordre du km² ceci porte la valeur de l'emmagasinement, S , à quelques pourcent (0.03) ce qui apparaît comme réaliste pour un aquifère volcanique.

¹ En présence d'une recharge (infiltration d'un cours d'eau ou recharge par les précipitations par exemple) constante dans le temps, le débit Q ci-dessus correspond au débit de pompage moins la recharge. Le terme SA est alors surestimé.

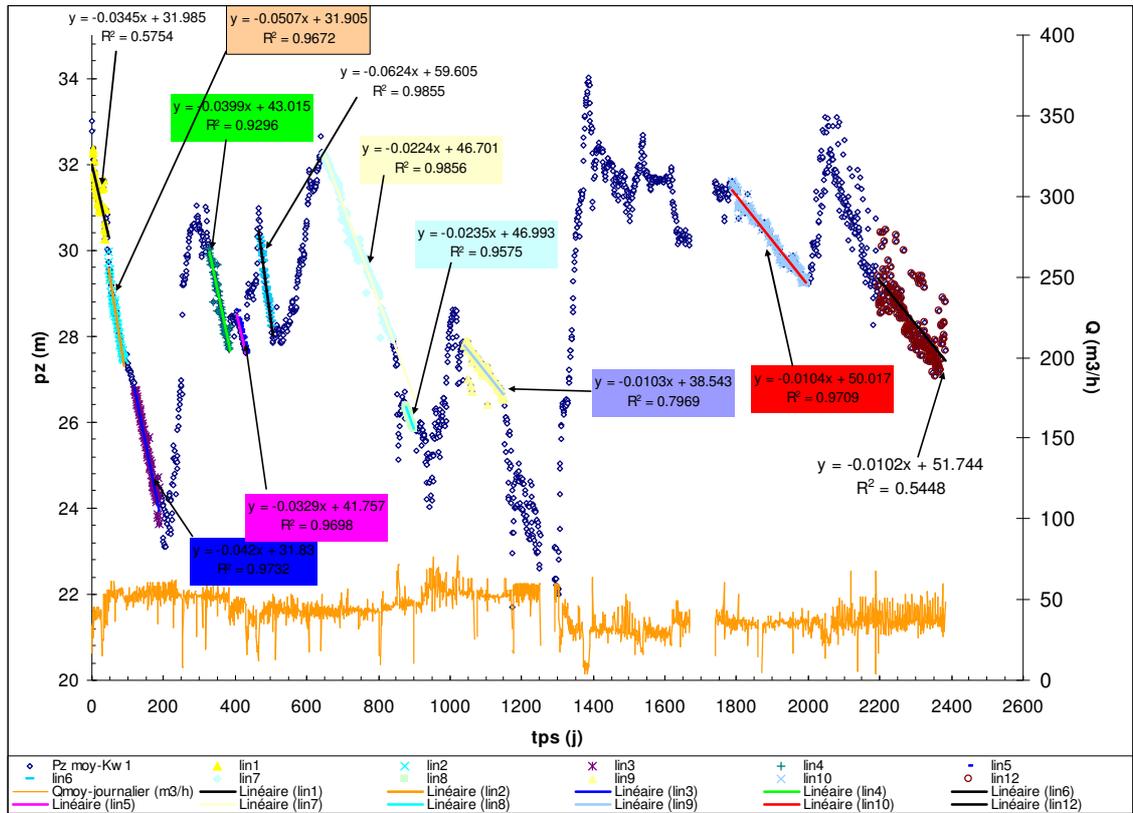


Illustration 14 : Mise en évidence de régimes pseudo-permanents (forage de Kwalé 1)

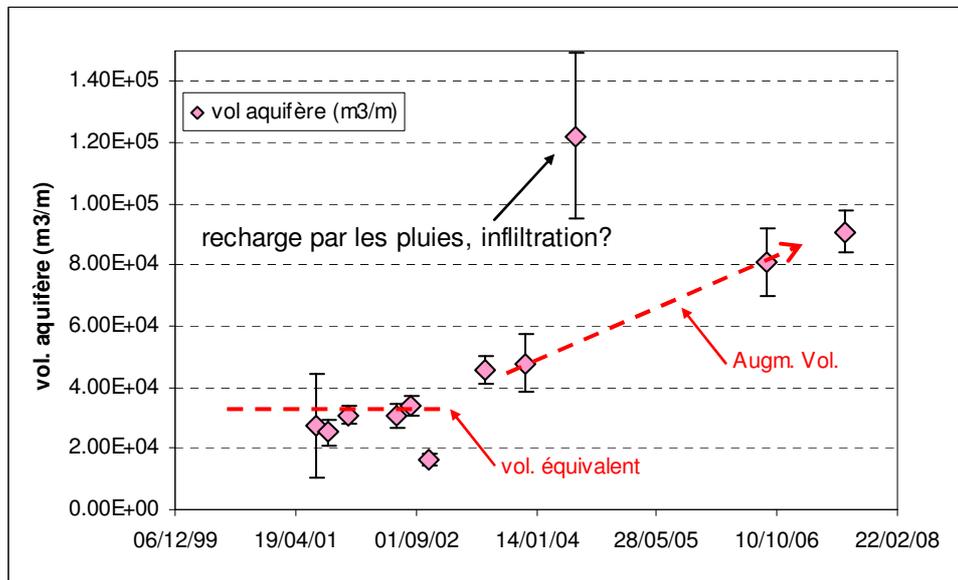


Illustration 15 : Estimation du « volume » de l'aquifère exploité (m³/m) ; les barres d'erreur ont été calculées à partir des coefficients de régression de l'Erreur ! Source du renvoi introuvable. ($x \pm (1-r)\%$)

3.1.2. Interprétation des rabattements en période d'étiage

Les rabattements mesurés au puits de pompage Kwalé 1 et au puits d'observation Kwalé 3 ont été interprétés comme des pompages d'essai de longue durée. Seules les périodes d'étiage (en général d'avril-mai à décembre –janvier) ont été interprétées afin de minimiser l'influence due à la recharge par les précipitations. Les modélisations ont été réalisées avec le logiciel WinISAPE-BRGM. Cette modélisation ne prend pas en compte les éventuels flux de recharge ou flux d'infiltration d'un cours d'eau qui ont pu se produire sur les périodes analysées (voir par exemple le cas d'avril 2002). Par ailleurs, le logiciel utilisé n'accepte qu'un maximum de deux limites étanches, alors que l'analyse précédente montre que l'aquifère est fermé donc limité par au moins 4 limites étanches. La méthode utilisée, Theis + 2 limites étanches (aquifère homogène, isotrope, captif, entièrement capté, etc. limitées par 2 limites étanches), conduira donc à sensiblement sous-estimer la transmissivité de l'aquifère, néanmoins son ordre de grandeur ne sera pas altéré.

Les ajustements ont été réalisés sur plusieurs mois et sur 7 cycles d'étiage pour le puits de pompage Kwalé 1 (de 2001 à 2007) et 3 cycles pour le puits d'observation Kwalé 3 (2005 à 2007). Les ajustements sont en général satisfaisants. L'annexe 2 présente l'ensemble des interprétations ; le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et les illustrations 16 et 17 résument les caractéristiques hydrodynamiques obtenues pour chacune des modélisations.

	Kwalé 1					Kwalé 3			
	T (m ² /s)	S (-) *	pdcc (s ² /m ⁵)	Lim.Et (2) (min)	Lim.Et (2) (m) *	T (m ² /s)	S (-)	Lim.Et (2) (min)	Lim.Et (2) (m)
Juin 01	1.06E-03	1.09E+05	5000	15000	0.07				
Avril 02	8.86E-04	5.18E+05	3000	13000	0.03				
Mars 03	8.10E-04	1.36E+06	8000	12000	0.02				
Avril 04	1.37E-03	2.14E+06	4000	15000	0.02				
Avril 05	3.64E-03	9.72E+02	5000	35000	2.10	3.05E-03	6.45E-04	20000	1787
Mai 06	1.95E-03	1.34E+06	5000	13000	0.03	2.51E-03	2.90E-02	17000	223
Mars 07	2.02E-03	2.20E+04	4000	15000	0.22	3.00E-03	5.12E-02	15000	172
Moy. géom**	1.47E-03			15742		2.84E-03	2.69E-02 ***	17213	409

Tableau 1 : Synthèse des interprétations des rabattements en période d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 et au puits d'observation Kwalé 3. Modèle utilisé : Theis+ deux limites étanches ; Lim.Et (2) : distance aux limites ; pour Kwalé 1 : r=0.136 m, effet de capacité au

*puits : 273 mm ; pour Kwalé 3 : r = 54 m. * : l'emmagasinement S n'a pas de signification physique puisque déterminé au puits ; il en est de même de pour le calcul de la distance à la limite ; au puits, ces paramètres ne constituent que des valeurs de calage. Moy. géom** : moyenne géométrique ; *** : moyenne arithmétique.*

La transmissivité de l'aquifère ainsi évaluée (Illustration 16) est de l'ordre de 1 à 2×10^{-3} m²/s en moyenne et est relativement peu variable suivant si les estimations sont faites au puits de pompage ou au forage d'observation. De plus, les valeurs trouvées sont du même ordre de grandeur que celle estimée lors de l'essai de pompage de 24 h effectué en avril 2000 (4×10^{-3} m²/s ; rapport RP-50428-FR). Cependant, on constate une augmentation de ce paramètre à partir d'avril 2005. Cette augmentation apparente de la transmissivité traduit un changement du fonctionnement de l'aquifère et l'arrivée d'eau supplémentaire dans le système. Comme souligné précédemment (§ 3.2.1.) celle-ci est probablement la conséquence de variations du régime de recharge de l'aquifère, comme par exemple une augmentation (ou l'apparition) de pertes du cours d'eau vers l'aquifère.

L'emmagasinement de l'aquifère est de l'ordre de 2 à 3%, ce qui est cohérent avec l'estimation proposée plus haut. Les estimations sont assez variables et augmentent elles aussi dans le temps. Cette dernière observation est à rapprocher de celles effectuées précédemment et traduit elle aussi une arrivée d'eau supplémentaire dans le système. En utilisant la valeur du volume d'eau présent dans l'aquifère, 0.9 Mm³ (§ 3.2.1.), on en déduit que la surface de l'aquifère est comprise entre 1.0 et 1.5 km².

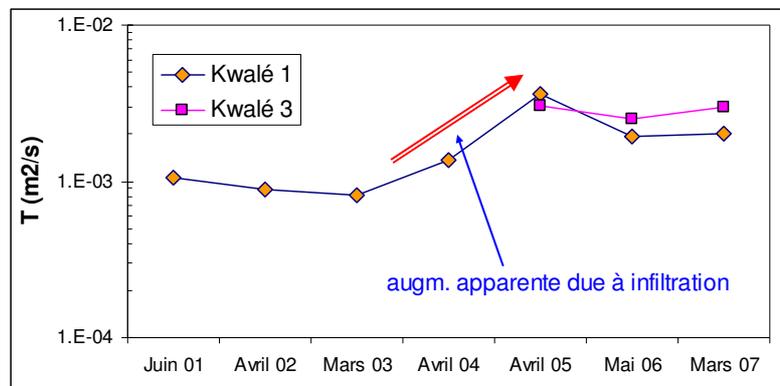


Illustration 16 : Valeurs de transmissivité de l'aquifère exploité. Estimations réalisées sur 7 cycles d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 (de 2001 à 2007) et 3 cycles au puits d'observation Kwalé 3 (2005 à 2007)

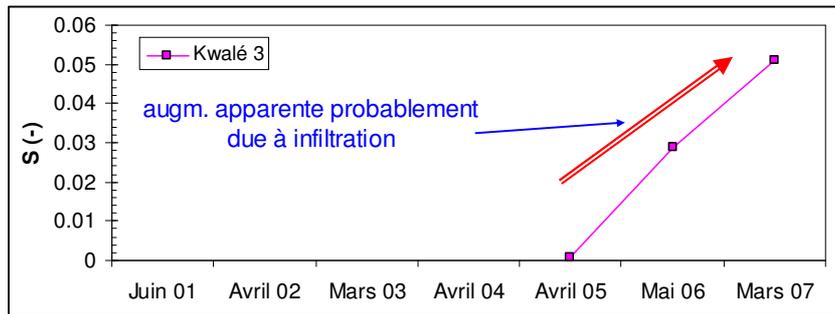


Illustration 17 : Valeurs de l'emmagasinement de l'aquifère exploité. Estimations réalisées sur 3 cycles d'étiage au puits d'observation Kwalé 3 (2005 à 2007)

3.1.3. Evolution des débits du cours d'eau

L'évolution des débits du cours d'eau à proximité du forage Kwalé 1 (station de mesure « Kwalé bas ») semble montrer une tendance à la diminution à partir d'août-septembre 2004 (Illustration 18). Cette diminution est particulièrement importante pour les débits minimaux d'étiage qui sont de l'ordre de 0.06 m³/s en 2004 contre 0.01 m³/s en 2005, 2006 et 2007, soit un débit environ 6 fois moins important. Cette diminution peut être attribuée à une diminution du régime des précipitations, celles-ci ayant significativement varié au cours de ces années (P₂₀₀₄ : 2050 mm, P₂₀₀₅ : 1180 mm, P₂₀₀₆ : 1950 mm, P₂₀₀₇ : 1340 mm) et/ou à une augmentation de l'infiltration.

Par ailleurs, cette diminution apparaît à peu près à la même période au cours de laquelle l'estimation du « volume d'eau » présent au sein de l'aquifère et les estimations de transmissivité augmentent. Il est donc envisageable que cette diminution du débit soit en partie la conséquence d'une augmentation ou l'apparition, à partir de 2005, de pertes qui se produiraient en amont de la station de jaugeage de Kwalé bas et conduiraient à l'infiltration d'une partie des eaux du cours d'eau vers l'aquifère.

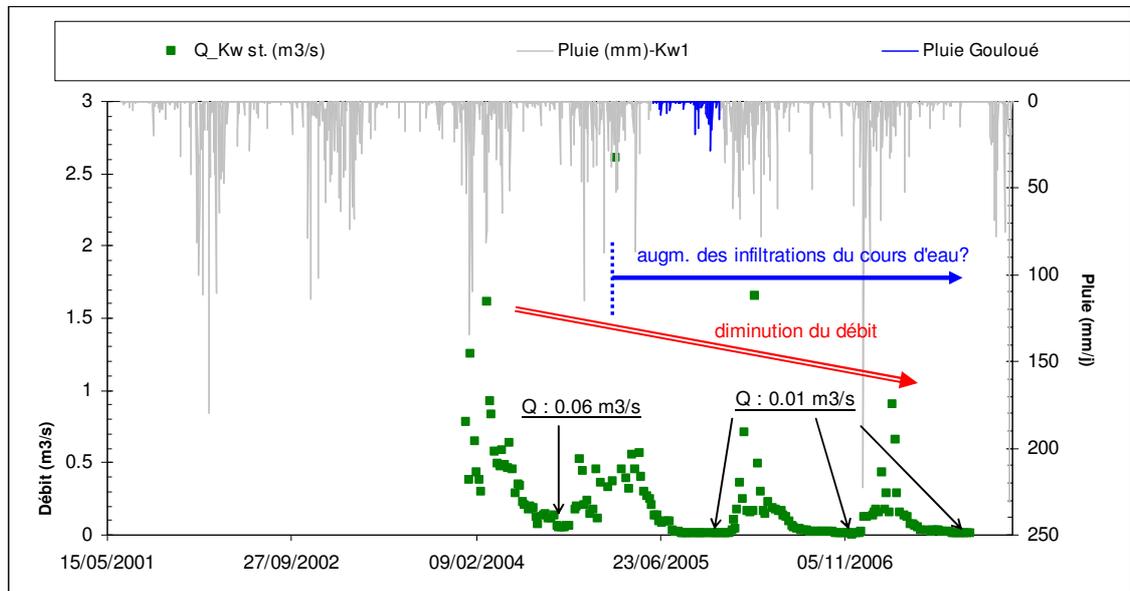


Illustration 18 : présentation des données de débit du cours d'eau (station Kwalé ; superficie du bassin versant : 12.5 km²) et de pluviométrie

Une précédente étude (rapport BRGM/RP-53153-FR) réalisée en 2006 avait mis en évidence une diminution significative du débit de la Mro Oua Kwalé de plus de 0.02 m³/s à travers deux séries de jaugeages réalisées au micromoulinet les 6 mai et 1^{er} juin 2004 entre les sections situées respectivement 500 m en amont et 800 m en aval du forage. Ces observations, aux incertitudes de mesure près, étaient néanmoins représentatives de l'existence d'une zone d'infiltration dans ce secteur.

Afin de vérifier ou d'infirmer l'hypothèse de l'existence de pertes en amont de la station de jaugeage de Kwalé bas, une série de jaugeages au micromoulinet a été réalisée par la DAF et le BRGM le 13/05/2008 (Illustrations 19 et 20).

Ces mesures montrent effectivement la présence d'une zone d'infiltration située dans les 500 m environ situés en amont de la station de jaugeage (entre les points de mesures 1 et 3 sur l'illustration 19). Les pertes sont estimées entre 0.02 et 0.1 m³/s en considérant une erreur sur les estimations de débit de 10%, soit pour cette période de début d'étiage, à environ 25% en moyenne du débit du cours d'eau – Illustration 20). Ces résultats confirment donc l'hypothèse d'infiltration des eaux du cours d'eau dans l'aquifère émise dans les paragraphes précédents (variations du volume, de la transmissivité et de l'emmagasinement).



Illustration 19 : Localisation des stations de jaugeage et valeurs des débits de la Mro Oua Kwalé en amont du forage de Kwalé 1.

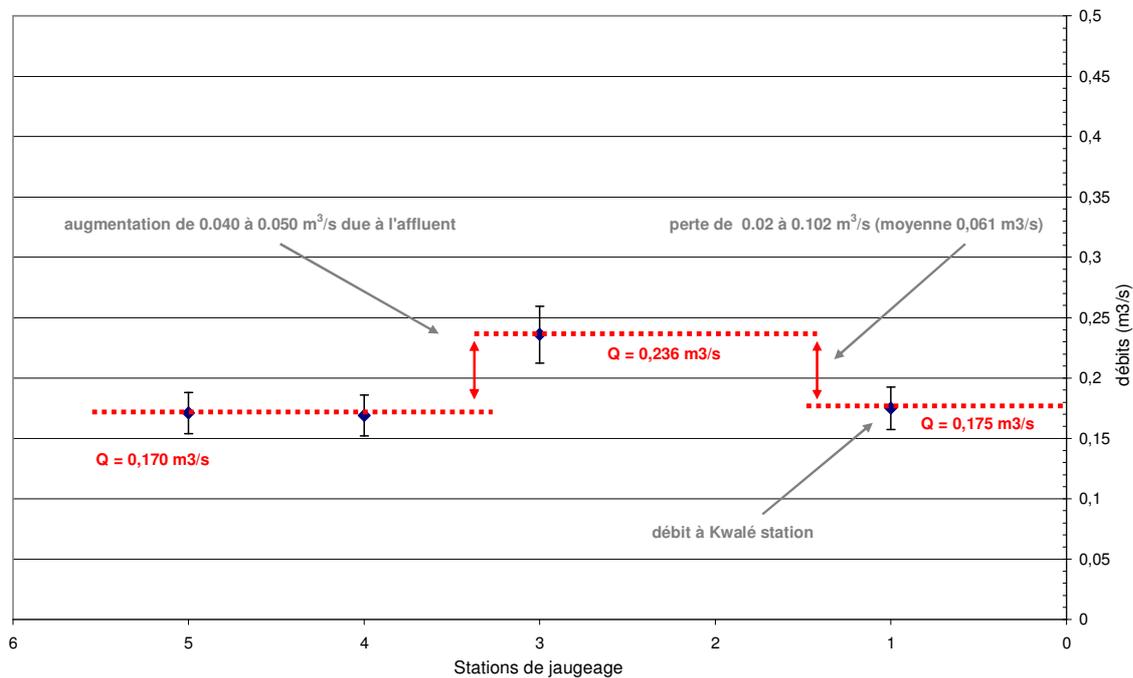


Illustration 20 : Interprétation des jaugeages au micro-moulinet du cours d'eau de Kwalé. La localisation des points figure en Illustration 19. Les barres d'erreur correspondent à une incertitude sur la mesure estimée à 10%.

3.1.4. Synthèse de l'analyse des données

L'analyse des niveaux piézométriques en fonction des débits de prélèvement par pompage au puits de pompage de Kwalé 1 et au puits d'observation Kwalé 3, et l'analyse des débits du cours d'eau précisent le fonctionnement de l'aquifère exploité :

- 1- l'aquifère est soumis à un régime de recharge par les pluies efficaces, cette recharge contribue à reconstituer les réserves de l'aquifère à chaque saison des pluies, bien que celui-ci soit pompé en permanence,
- 2- à partir de 2005, on observe une augmentation (ou l'apparition) d'infiltration d'eau dans l'aquifère qui sont attribuées, *a priori*, à des pertes du cours d'eau vers l'aquifère qui ont été démontrées lors des séries de jaugeages de 2004 et 2008. Cette augmentation de l'infiltration pourrait être due à des modifications intervenues au sein du lit du cours d'eau (réduction locale de l'épaisseur d'alluvions lors d'épisodes de crue par exemple). Tout comme la recharge, cette infiltration contribue à reconstituer les réserves de l'aquifère, mais ce probablement tout au long de l'année, avec d'éventuelles variations saisonnières qui devraient vraisemblablement dépendre de la ligne d'eau dans la rivière et donc du débit de celle-ci,
- 3- l'aquifère est fermé (4 limites étanches au moins), sa surface est de l'ordre du km^2 (1 à 1.5 km^2), sa transmissivité est de l'ordre de 1 à $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et son emmagasinement de 2 à 3%.

3.2. MODELISATION DES SERIES PIEZOMETRIQUES ET DU DEBIT DU COURS D'EAU EN FONCTION DE L'EXPLOITATION

L'analyse précédente a permis de procéder à une première évaluation, plutôt qualitative, de l'aquifère exploité par le forage de Kwalé 1, tant du point de vue de sa structure et de ses paramètres hydrodynamiques : géométrie du réservoir, perméabilité, emmagasinement, etc., que de son fonctionnement : influence des pluies (recharge) et relations avec le cours d'eau voisin.

Les paragraphes suivants décrivent la mise au point d'un modèle mathématique visant à simuler les niveaux piézométriques en fonction des conditions climatiques et du régime de pompage, tout en prenant en compte une éventuelle infiltration du cours d'eau vers l'aquifère, elle-même contrôlée par les conditions climatiques. Ce modèle permettra d'une part de vérifier le comportement hydraulique et le fonctionnement de l'aquifère et d'autre part de pouvoir quantifier les différentes composantes des flux (recharge par les pluies, infiltration, etc.).

L'illustration 21 décrit le principe du modèle. Il est basé sur une combinaison de réservoirs à vidange exponentielle (réservoirs types Gardenia-BRGM ; Thiéry 2003) qui servent à quantifier la recharge par les pluies efficaces, le débit du cours d'eau (somme des écoulements rapide et lent), l'infiltration du cours d'eau dans l'aquifère capté ainsi que l'éventuelle vidange de celui-ci. Le modèle intègre de l'hydraulique de puits (c'est à dire une « fonction de production au puits ») qui tient compte des propriétés de l'aquifère et du puits (A [surface], T [transmissivité], S [emmagasinement], etc.) pour décrire les variations des niveaux piézométrique dues au pompage. De plus, le modèle prend en compte les éventuels prélèvements dans le cours d'eau (captage d'eau de surface).

De plus, le modèle prend en compte les éventuels prélèvements dans le cours d'eau (captage d'eau de surface).

Le modèle développé pour le site Kwalé :

1- génère des pluies efficaces à partir des pluies et d'une évapotranspiration potentielle (réservoir RU),

2- génère une recharge (percolation, réservoir H). La recharge est identique à l'échelle de la surface du bassin versant et à celle de l'aquifère exploité,

3- génère des écoulements de surface rapides (« ruissellement ») et des écoulements lents (soutien de la nappe au cours d'eau)- réservoirs H et G,

4- si besoin, prend en compte l'infiltration (pertes) se produisant le long d'un cours d'eau (réservoir R),

5- simule la piézométrie d'un aquifère capté au moyen d'une fonction de production au puits, elle-même dépendante du type d'aquifère capté (état pseudo-permanent) et des pertes de charges quadratiques au puits (réservoir K). Dans le cas de Kwalé, il est considéré un aquifère fermé (cf. 3.1.4.),

6- si besoin, prend en compte que l'aquifère capté peut se vidanger « naturellement » au cours d'une certaine période de l'année (réservoir K),

7- si besoin, prend en compte des captages d'eau de surface (captages situés en amont des pertes).

Le modèle développé permet un double calage des séries piézométriques à l'ouvrage en exploitation d'une part et du débit du cours d'eau d'autre part en fonction des pluies et de l'infiltration. C'est-à-dire que les caractéristiques des réservoirs RU, H, G et R sont communes à l'aquifère et au bassin versant de surface. Le calage des différents paramètres du modèle doit ainsi satisfaire au mieux les séries de suivis piézométriques et de débits. Les calculs sont réalisés au pas de temps journalier.

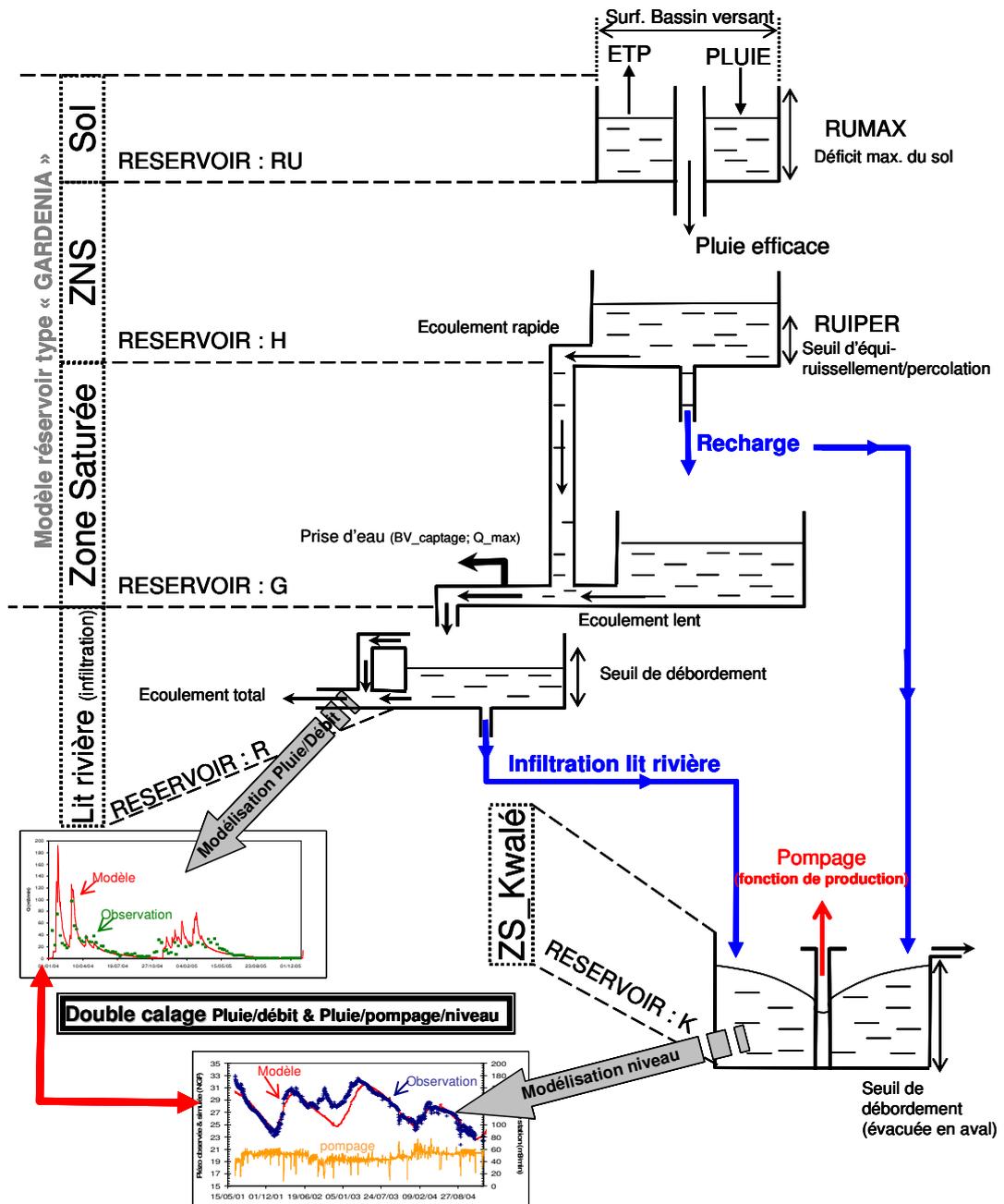


Illustration 21 : Schéma simplifié du modèle développé pour le site de Kwalé

3.2.1. Description du modèle

3.2.1.1. Réservoirs RU, H et G (d'après Thiéry 2003)

Le réservoir superficiel (RU)

Ce réservoir représente les premiers décimètres du sol, soumis à l'évapotranspiration par la végétation et à l'évaporation. L'apport à ce réservoir est constitué par la pluie. Sa vidange est contrôlée par l'évapotranspiration réelle ETR (ETR=ETP, lorsque le stock d'eau disponible le permet) et par vidange de l'excédent lorsque la hauteur dans le réservoir est supérieure au seuil de rétention RUMAX.

$$\text{Pluie efficace} = \text{RU} - \text{RUMAX} \quad \text{Eq.2}$$

RU= réserve utile du sol correspondant à la hauteur d'eau dans le réservoir RU

L'ETP est calculée à partir de la formule de Turc et des données météorologiques des stations de PAMANDZI pour la durée d'insolation journalière et de VAHIBE-PRIMA pour la température journalière moyenne (Annexe 3). Les travaux précédents réalisés sur les calculs d'ETP (Lapègue, 1999) mentionnent que les formules de Turc et de Pennmann donnent des estimations similaires bien que la formule de Turc ait en général tendance à sous estimer l'ETP en milieu tropical. L'utilisation de RUMAX permet cependant de contrebalancer cette éventuelle sous estimation.

Le réservoir intermédiaire (H)

Il représente la zone non saturée à l'échelle du bassin versant de la zone étudiée, il est alimenté par le réservoir RU et est vidangé par deux exutoires : l'un par percolation (recharge) vers le réservoir souterrain G (réservoir linéaire, vidange exponentielle) et l'autre par écoulement « rapide » vers l'extérieur sous forme de débit retardé contrôlé (loi non-linéaire). Le paramètre RUIPER est la hauteur pour laquelle la percolation égale l'écoulement rapide.

$$\text{Recharge} = H \cdot dt / \text{THG} \quad \text{Eq.3}$$

$$\text{Ecoulement rapide} = H \cdot dt / (\text{THG} \cdot \text{RUIPER} / H) \quad \text{Eq.4}$$

Avec dt = pas de temps ; THG = constante de temps pour la vidange du réservoir H ; H = hauteur d'eau dans le réservoir H.

Le réservoir souterrain (G)

Ce réservoir représente l'aquifère à l'échelle du bassin versant de la zone étudiée, il est alimenté par le réservoir H et se vidange sous forme de débit « souterrain » vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un exutoire (écoulement lent). La vidange de ce réservoir se fait de façon exponentielle.

$$\text{Ecoulement lent} = G \cdot dt / TG1 \quad \text{Eq.5}$$

Avec TG1=constante de temps pour la vidange du réservoir G ; G= hauteur d'eau dans le réservoir G.

La somme des écoulements rapide et lent constitue le débit du cours d'eau. A ce débit peut être retranchée l'influence d'un captage d'eau de surface. Si seul le prélèvement annuel au captage est connu, comme dans le cas présent, une reconstitution du débit prélevé est calculée en fonction de la surface de bassin versant du captage, BV_captage, et des paramètres hydrauliques des réservoirs, RU, H et G. En fonction du prélèvement annuel, une fonction d'écrêtage est appliquée, définie par un débit maximum, Q_max, qui reproduira le débit de prélèvement. Ce dernier sera déduit des débits simulés en aval. Les paramètres des réservoirs, RU, H et G, ainsi que les séries de précipitations et ETP, sont supposés identiques sur l'ensemble du bassin versant.

3.2.1.2. Le réservoir d'infiltration du cours d'eau et l'aquifère exploité

Le réservoir infiltration (R)

Ce réservoir représente le cours d'eau, il est alimenté par les réservoirs H (écoulement rapide) et G (écoulement lent) ; les éventuels prélèvements situés en amont sont déduits. Ce réservoir se vidange sous forme d'infiltration vers le réservoir K (vidange à loi exponentielle) et sous forme de débit vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un exutoire à vidange exponentielle et par un seuil de débordement (« by pass »). La somme de ces dernières composantes constitue le débit du cours d'eau (écoulement total).

Le seuil de débordement officie comme un « by pass » (cf. Eq. 8), c'est-à-dire qu'au-delà de ce seuil, tout l'écoulement « part » dans la rivière sans être infiltré. Il prend en compte le fait que l'infiltration dans le cours d'eau peut avoir une valeur seuil ce qui traduit le fait que la surface responsable de l'infiltration est finie dans l'espace.

$$\text{Infiltration Rivière} = R \cdot dt / TGM1 \quad \text{Eq.6}$$

$$\text{Ecoulement (Rivière)-1} = (R) \cdot dt / TGM2 \quad \text{Eq.7}$$

Si R>Seuil :

$$\text{Ecoulement (Rivière)-2= (R-Seuil).dt} \quad \text{Eq.8}$$

TGM1 et TGM2 = constantes de temps pour la vidange du réservoir R ; R= hauteur d'eau dans le réservoir R.

L'aquifère exploité (K)

Ce réservoir représente l'aquifère capté, il est alimenté par le réservoir H (recharge) et par le réservoir R (infiltration du cours d'eau). Il se vidange par pompage et sous forme de débit d'exhaure « souterrain » vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un exutoire à seuil (SeuilK ; vidange à loi exponentielle). Ce débit souterrain prend en compte le fait que l'aquifère peut, dans certaines conditions, se vidanger de façon naturelle quand le niveau d'eau dans le réservoir est suffisamment haut. Cependant, la valeur de ce seuil ne correspond pas à la côte altimétrique du seuil d'émergence, mais à la valeur piézométrique au puits à partir de laquelle ces écoulements vont se manifester.

$$\text{Fluctuation du niveau piézométrique} = (\text{Infiltration Rivière.Surf-BV} / A + \text{Recharge}) / S \quad \text{Eq.9}$$

Si $K > \text{SeuilK}$:

$$\text{Exhaure « souterrain »} = (K - \text{SeuilK}).dt / \text{TGK} \quad \text{Eq.10}$$

Avec Surf-BV= surface du bassin versant ; A= surface de l'aquifère exploité ; S= porosité efficace de l'aquifère ; TGK =constante de temps pour la vidange du réservoir K ; K= niveau piézométrique dans le réservoir K.

Le pompage est pris en compte par une fonction de production au puits et, dans le cas de Kwalé, par la fonction décrivant le rabattement dans un aquifère homogène isotrope fermé (cf. Eq.1, régime pseudo-permanent). Pour un historique quelconque des débits et considérant le rabattement additionnel dû aux pertes de charges au puits, en utilisant le principe de superposition cette équation devient :

$$s(t) = \frac{1}{SA} \sum_{i=1}^n [(Q_i - Q_{i-1})(t - t_{i-1})] + \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{i-1})}{4\pi T} \left[\ln\left(\frac{A}{r_w^2}\right) + \ln\left(\frac{2.2458}{C_A}\right) \right] + CQ_i^2 \quad \text{Eq.11}$$

où, t est la durée du pompage (s), $s(t)$ le rabattement au temps t (m), S l'emmagasinement ou porosité efficace de l'aquifère (-), A la surface de l'aquifère exploité (m^2), T la transmissivité de l'aquifère (m^2/s), r_w le rayon du puits (m), C_A une constante qui dépend de la géométrie de l'aquifère et de la position du puits dans

l'aquifère, Q_i le débit au temps t_i (m^3/s), t_{i-1} : temps d'arrêt du pompage Q_{i-1} (s) et C le coefficient de pertes de charges quadratiques ($m^{-5}.s^2$).

Afin de simplifier la suite précédente, et à partir de 10 jours de pompage, seuls sont considérées les variations de débit des 10 derniers jours précédents le calcul. C'est-à-dire que la variation du rabattement induite par des variations de débit antérieures à 10 jours est supposée négligeable. Pour $t \leq 10$ jours, l'équation Eq.11 est utilisée.

Cette approximation de calcul a été vérifiée en comparant un modèle Theis (calculé au moyen du logiciel WinSAPE, BRGM), avec l'équation de Jacob où seules les variations de débit des 5, 10, 15 et 20 jours précédant le calcul sont considérées (Annexe 4) ; les variations de niveaux dues aux pertes de charge quadratiques ont aussi été considérées. Les simulations donnent des résultats quasi identiques à la solution de Theis quelque soit le nombre de jour considéré dans le calcul. Elles montrent que l'approximation n'introduit pas d'erreur significative.

De plus, la fonction de production au puits (Eq.11) est réinitialisée une fois par an au moment où le niveau piézométrique est au plus haut afin de prendre en compte le fait que, lorsque l'aquifère s'est rechargé la déformation de la surface piézométrique due au pompage devient négligeable devant celle due à la recharge.

Afin d'initialiser le modèle, les calculs de pluies efficaces commencent plusieurs années (5 ans) avant les simulations hydrodynamiques. Ces calculs d'initialisation sont basés sur les moyennes journalières des chroniques de précipitations et d'ETP disponibles.

3.2.2. Application du modèle hydraulique au site de Kwalé

Cas où les paramètres de l'infiltration du cours d'eau sont constants sur toute la période

Les illustrations 22 et 23 présentent respectivement les résultats de la modélisation du niveau piézométrique et du débit du cours d'eau. Le tableau 2 présente les paramètres hydrauliques du modèle. Les graphiques de l'annexe 5 présente :

- i) la simulation du niveau piézométrique pour un modèle ne comportant pas d'infiltration en provenance du cours d'eau,
- ii) la contribution de l'infiltration et le débit de débordement de l'aquifère exploité (cas où les paramètres de l'infiltration sont constants sur toute la période),
- iii) la simulation des écoulements et des prélèvements au niveau de la prise d'eau amont Kwalé-haut et les bilans annuels du modèle.

Cette modélisation prend en compte les prélèvements de la prise d'eau amont, évalué à 500 000 m^3/an , et une légère infiltration en provenance du cours d'eau, avec un

régime similaire sur l'ensemble de la période, 1.5 à 2% en moyenne (env. 0.005 m³/s). Cette modélisation est satisfaisante pour la période 2001 à début 2005 mais, de 2005 à 2007, elle sous-estime sensiblement le niveau piézométrique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Les différences observation-simulation sont, probablement, dues à une variation de l'infiltration du cours d'eau vers l'aquifère à partir de 2005, comme proposé lors de l'analyse des données (§ 2.1.). Cette hypothèse sera testée dans le prochain paragraphe.

Les débits du cours d'eau sont en moyenne correctement reproduits avec une légère surestimation au début des étiages 2006 et 2007 ; la surface de bassin versant correspondant à l'aire du bassin amont de la station de Kwalé (cf. Tableau 2). Pour les débits, on remarque cependant que le modèle produit des débits de « crue » plus importants que l'observation. Comme les débits sont mesurés manuellement, il est probable que certains pics n'aient pas été enregistrés. Néanmoins, le modèle manque un peu de « nervosité » lors des tarissements (tarissements sensiblement plus lents que dans la réalité). Ce peut être dû à une légère différence de modalité de recharge entre le bassin versant et l'aquifère capté. Par ailleurs, on note la faible influence de la prise d'eau amont sur le débit à la station aval (légère diminution du débit). Ainsi, le débit simulé de prise d'eau varie de 0.002 m³/s en étiage à environ 0.032 m³/s (Annexe 5), ce qui apparaît comme conforme compte tenu de l'équipement de captage et d'adduction (diamètre de la conduite : environ 250 mm). Cependant, la considération ou pas de la prise d'eau lors du calage n'a que peu d'impact sur le calage de la piézométrie du fait de la faible différence des débits modélisés et donc de l'infiltration du cours d'eau dans l'aquifère (Illustration 23).

Ponctuellement, l'aquifère de Kwalé déborde (quand le niveau piézométrique est haut), mais les débits de débordement sont faibles, de l'ordre de 0.003 m³/s en moyenne (Annexe 5). Cette situation était probablement plus fréquente lorsque celui-ci n'était pas exploité.

Les paramètres de l'aquifère obtenus par calage au cours de la modélisation : surface de l'aquifère exploité (A), 1.34 km², porosité (S), 0.027, et transmissivité (T), 10⁻³ m²/s, sont très voisins de ceux qui ont été estimées lors de l'analyse des données (§ 2.1.). L'analyse de sensibilité, en particulier sur A et S montre qu'une variation de quelques pourcents seulement entraîne des simulations très différentes qui ne reproduisent en particulier pas la piézométrie de manière satisfaisante. Par contre, l'analyse de sensibilité sur T et le facteur C_A pour des variations dans les gammes des valeurs connues (cf. § 2.1.1. et 2.1.2.) n'engendre pas de différences significatives de l'ajustement.

Par ailleurs, le bilan hydrique (tableau 3) montre que les pluies efficaces correspondent à environ 55% des pluies mesurées à la station de Kwalé. Cette valeur est semblable à celle estimée à la Station de Coconi, 54% par Lapègue en 1994 (Thèse « Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique, l'assainissement pluvial et l'érosion. 1999. p74, 93 et 219). La répartition des pluies efficaces entre recharge (environ 15%) et écoulements de surface (environ 40% partagés entre écoulements

lents et rapides) est elle aussi semblable à celle proposée par Lapègue (14% et 40% respectivement).

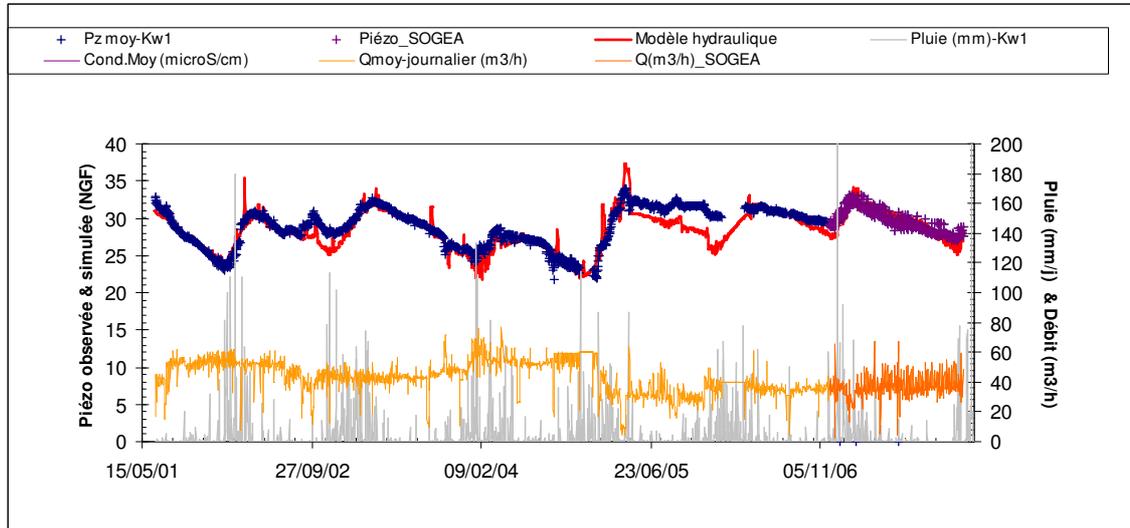


Illustration 22 : Modélisation de la piézométrie au puits de pompage de Kwalé 1. Simulation sans changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau

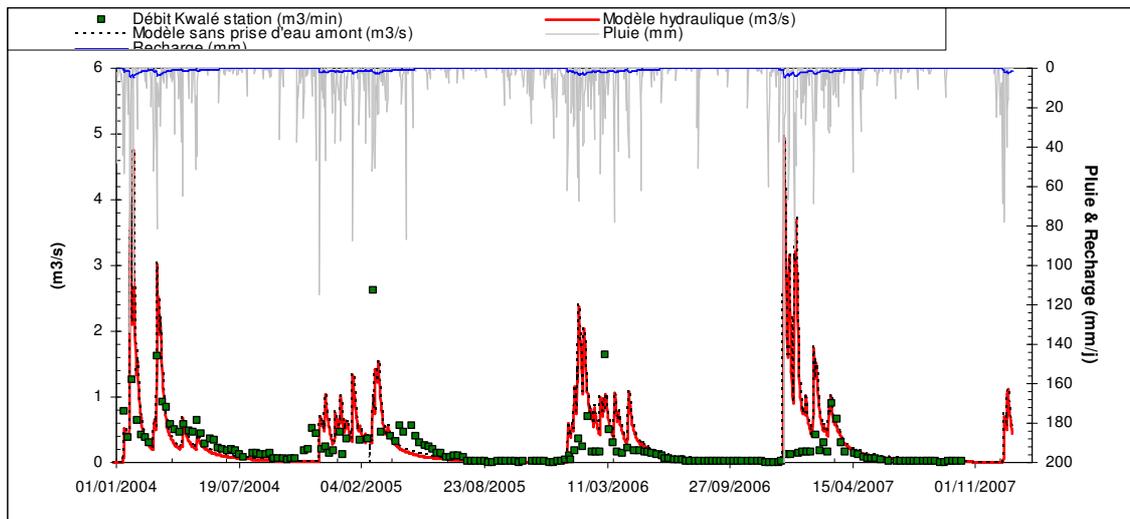


Illustration 23 : Modélisation des débits du cours d'eau à Kwalé bas. Simulation sans changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau, avec (rouge) ou sans (tirés noirs) prise en compte de la prise d'eau amont

PARAMETRES			
Surface BV	12.5	km ²	
RESERVOIR RU			
RUMAX	100.0	mm	Déficit max sol
REVERVOIR H			
RUIPER	40.0	mm	seuil équi-ruiss-percolation
THG	55.0		tps demi-montée
REVERVOIR G			
TG1	66.0	J	tps demi-tarissement
REVERVOIR R			
Seuil déb.R	2.4	mm	seuil de débordement
TGM1-pertes	47.0	J	tps demi-tarissement
TGM2	3.0	J	tps demi-tarissement
CAPTAGE AMONT			
BV_Captage	3.7	km ²	bassin versant captage
Q_max	0.032	m ³ /s	débit max. pour écrêtage
REVERVOIR K			
h0	31.0	m	
pdc	1500.0	s ² /m ⁵	pertes de charges quadratiques
A	1340000.0	m ²	Surface Res. R
S	0.027	-	emmagasinement
T	0.001	m ² /s	transmissivité
C _A	20.0	-	
rw	0.2	m	
Seuil-res K	29.5	m	seuil de débordement
TGK	72.0	J	tps demi-tarissement (quand h > seuil)

Tableau 2 : paramètres du modèle hydraulique ; pas de variations des paramètres d'infiltration du cours d'eau. h0 : niveau piézométrique initial.

	Modèle hydraulique	Coconi (Lapègue, 1999)
Pe _{eff} =Rech+(Ec.Rap.+Lent)	54.9% (929 mm)	54% (1072 mm)
ETR	45.1% (763 mm)	46% (913 mm)
Rech	15.2% (257 mm)	14% (278 mm)
Ec.Rap+Lent	39.7% (672 mm)	40% (794mm)

Tableau 3 : Bilan hydrique moyen annuel en pourcentage des pluies annuelles (2002-2007 ; précipitation moyenne annuelle : 1692 mm), comparaison aux estimations réalisées à la station de Coconi en 1994 ; précipitation annuelle : 1985 mm (Lapègue, 1999).

Cas où les paramètres de l'infiltration du cours d'eau changent au début de l'année 2005

Les illustrations 24 et 25 présentent respectivement les résultats de la modélisation du niveau piézométrique et du débit du cours d'eau. Le tableau 4 présente les paramètres hydrauliques du modèle. L'annexe 5 présente la contribution de l'infiltration et le débit de débordement de l'aquifère exploité et les bilans annuels du modèle.

Cette modélisation prend en compte une augmentation de l'infiltration du cours d'eau à partir de début 2005 (15-02-05) comme le suggère l'analyse des données (§ 3.2.) et la modélisation précédente. Les paramètres de l'infiltration du cours d'eau ante 2005 sont identiques à ceux de la modélisation précédente ainsi que les autres paramètres du modèle, sur l'ensemble de la période simulée (**Erreur! Source du renvoi introuvable.**). Cette fois-ci la modélisation est satisfaisante sur l'ensemble de la période (2001 à 2007) pour les niveaux piézométriques (Illustration 24). Pour les débits du cours d'eau, la modélisation est semblable à la précédente avec une estimation des débits d'étiages sensiblement meilleure après 2005 que dans le cas précédent.

L'infiltration sur la période 2005-2007 (Illustration 26) est deux fois plus importante qu'avant 2005, elle est de l'ordre de 2 à 3 % du débit du cours d'eau en moyenne (1.2% en moyenne avant 2005). Au maximum (plateaux sur l'illustration 26), l'infiltration modélisée est de l'ordre de 0.01 m³/s. Cette valeur est d'un ordre de grandeur proche de celle qui a pu être ponctuellement estimée sur le site, 0.02 à 0.1 m³/s (§ 2.1.3.), tout en restant inférieure, ce qui suggère qu'une partie des pertes pourrait alimenter un autre système que l'aquifère de Kwalé 1, qu'il s'agisse d'un aquifère volcanique ou des formations alluviales d'accompagnement de la ravine. Cependant l'infiltration est faible et reste difficilement mesurable.

Si lors de la précédente modélisation l'aquifère de Kwalé ne débordait que ponctuellement, voire pas du tout en 2004, il semble qu'à partir de 2005 il déborde de façon plus fréquente, avec un débit moyen de l'ordre de 0.007 m³/s (Illustration 26). L'intensification du débordement est la conséquence d'une hausse du niveau piézométrique elle-même provoquée d'une part par la diminution du débit de pompage et d'autre part par une augmentation de l'infiltration par les pertes.

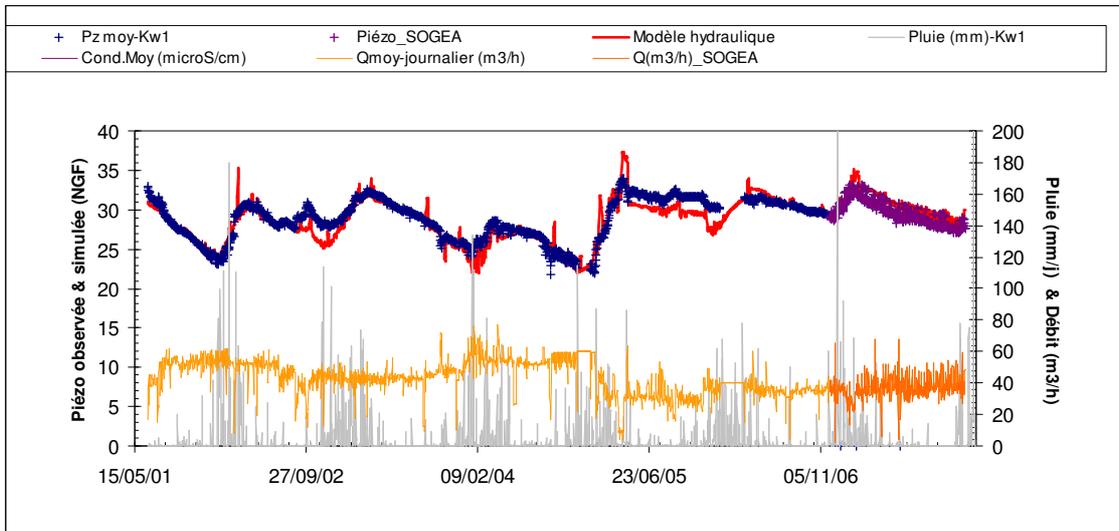


Illustration 24 : Modélisation de la piézométrie au puits de pompage Kwalé 1. Simulation avec changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05

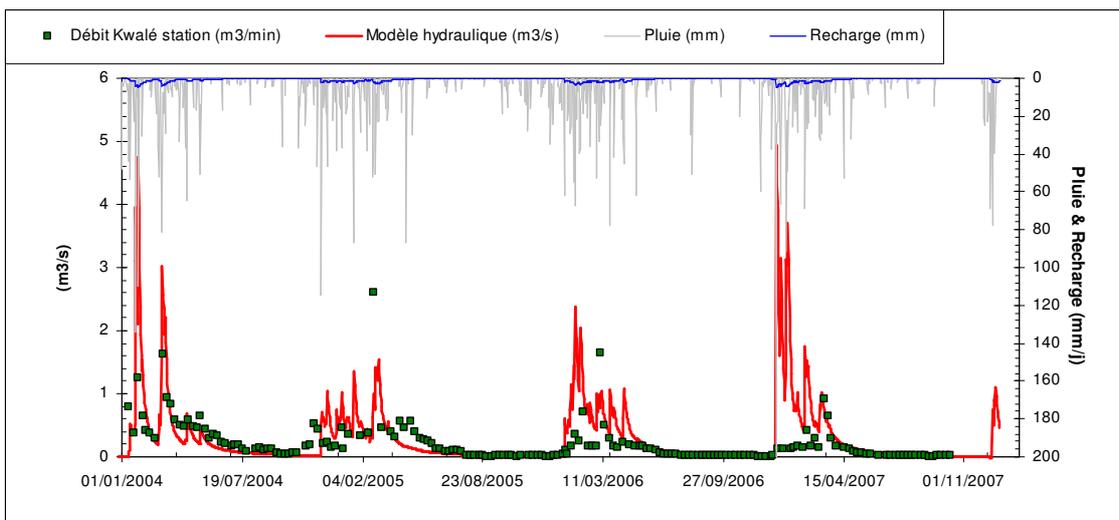


Illustration 25 : Modélisation des débits du cours d'eau à Kwalé. Simulation avec changement des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05. Prélèvement de la prise en amont (Kwalé haut) : 500 000 m³/an

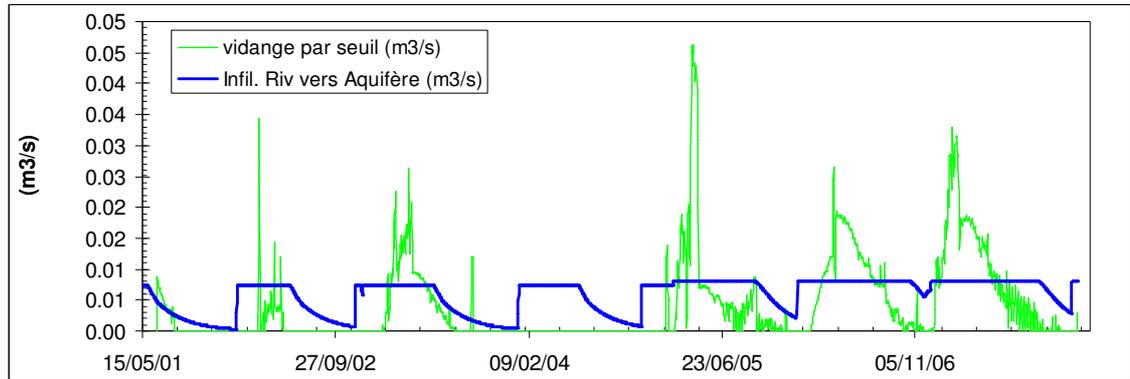


Illustration 26 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité ; cas où les paramètres de l'infiltration sont différents à partir du 15-02-05. Moyenne des pertes par débordement après 2005 : $0.007 \text{ m}^3/\text{s}$.

PARAMETRES				APRES 15/02/2005
Surface BV	12.5	km ²		12.5
RESERVOIR RU				
RUMAX	100.0	mm	Déficit max sol	100.0
REVERVOIR H				
RUIPER	40.0	mm	seuil équi-ruiss-percolation	40.0
THG	55.0		tps demi-montée	55.0
REVERVOIR G				
TG1	66.0	J	tps demi-tarissement	66.0
REVERVOIR R				
Seuil déb.R	<u>2.4</u>	mm	seuil de débordement	<u>2.5</u>
TGM1-pertes	<u>47.0</u>	J	tps demi-tarissement	<u>45.0</u>
TGM2	<u>3.0</u>	J	tps demi-tarissement	<u>20.0</u>
CAPTAGE AMONT				
BV Captage	3.7	km ²	bassin versant captage	3.7
Q_max	0.032	m ³ /s	débit max. pour écrêtage	0.032
REVERVOIR K				
h0	31.0	m		31.0
pdc	1500.0	s ² /m ⁵	pertes de charges quadratiques	1500.0
Area	1340000.0	m ²	Surface Res. R	1340000.0
S	0.027	-	emmagasinement	0.027
Seuil-res K	29.5	m	seuil de débordement	0.001
T	0.001	m ² /s	transmissivité	20.0
C _A	20	-		0.2
rw	0.20	m		29.5
TGK	72.0	J	tps demi-tarissement (quand h > seuil)	72.0

Tableau 4 : paramètres du modèle hydraulique ; variations des paramètres d'infiltration du cours d'eau à partir du 15-02-05. h₀ : niveau piézométrique initial.

Cas « naturel »

La simulation suivante présente le cas de la fluctuation « naturelle » de la piézométrie hors pompage. Les paramètres de la fonction de production des pluies efficaces, des écoulements lents et rapides et de l'aquifère sont gardés identiques aux modélisations précédentes (Annexe 5).

La modélisation est réalisée de 2001 à 2007 sans les pompages dans l'aquifère la prise d'eau amont est conservée ; elle n'influence cependant pas significativement la piézométrie. L'infiltration est identique sur toute la période, ses paramètres correspondent à la période ante 2005 des modélisations précédentes.

Le niveau piézométrique simulé « naturel » (Illustration 27 ; tirés rouges) présente des fluctuations de l'ordre de 3.0 à 5.0 mètres, ce qui est réaliste compte tenu des observations réalisés sur les ouvrages non-exploités (cf. §1. Illustration 4 [Bouyouni : 2.5 à 3.5 m], Illustration 6 [Combani : 2.0 à 2.5 m]). On se situe dans la fourchette haute des fluctuations types observées à Mayotte (le forage de Kwalé n'avait pas fait l'objet de suivi piézométrique avant la mise en exploitation de l'aquifère).

Par contre, l'aquifère déborde en quasi permanence avec un débit beaucoup plus important que pendant l'exploitation (Illustration 28 ; tirés verts), 0.015 m³/s en moyenne, et notamment sur la période 2001-2005 où l'exploitation de l'aquifère avait contribué à diminuer fortement le débordement (débordement moyen : 0.003 m³/s). L'exploitation de l'aquifère contribue donc à fortement réduire ce débit de vidange naturel. Ainsi, aujourd'hui l'eau apportée par les pluies sous forme de recharge et par l'infiltration du cours d'eau ne se contente plus de transiter pas le système comme elle le faisait naturellement avant, mais y reste stockée, ce qui lui permet d'être pompé ensuite. L'aquifère fait donc typiquement l'objet d'une « gestion active ».

Une autre simulation a été réalisée sans pompage et en considérant qu'il n'y avait pas de pertes du cours d'eau vers l'aquifère. L'amplitude des fluctuations piézométriques « naturelles » est réduite d'un quart environ (Illustration 27 ; trait rouge). Ceci suggère que les pompages pourraient être à l'origine de tout ou partie du phénomène de pertes.

Il est notable, néanmoins, de signaler que le débit des pertes par infiltration simulé en étiage (en conditions de pompage) ne constitue qu'environ 10 à 15% du débit d'étiage du cours d'eau.

Accessoirement, ce type de simulation montre l'intérêt de disposer de chroniques concernant l'aquifère avant sa mise en exploitation. Celles-ci auraient en effet constitué un élément de contrainte supplémentaire pour la modélisation.

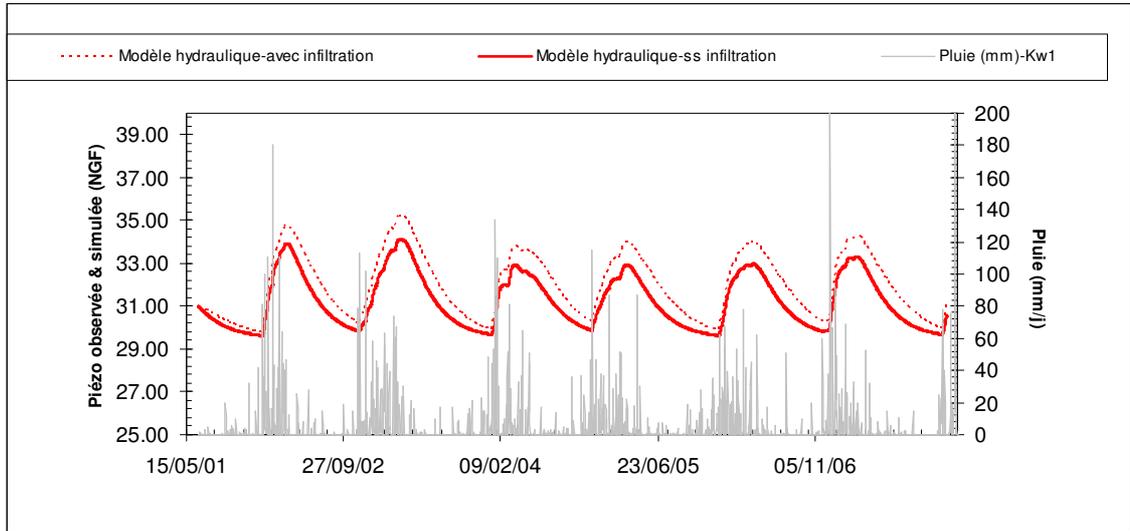


Illustration 27 : Modélisation de la piézométrie à Kwalé 1 sans les pompages. Tirés rouges : avec infiltration du cours d'eau, les paramètres sont constants et identiques à la période anté 15-02-05 ; trait continu rouge : pas d'infiltration.

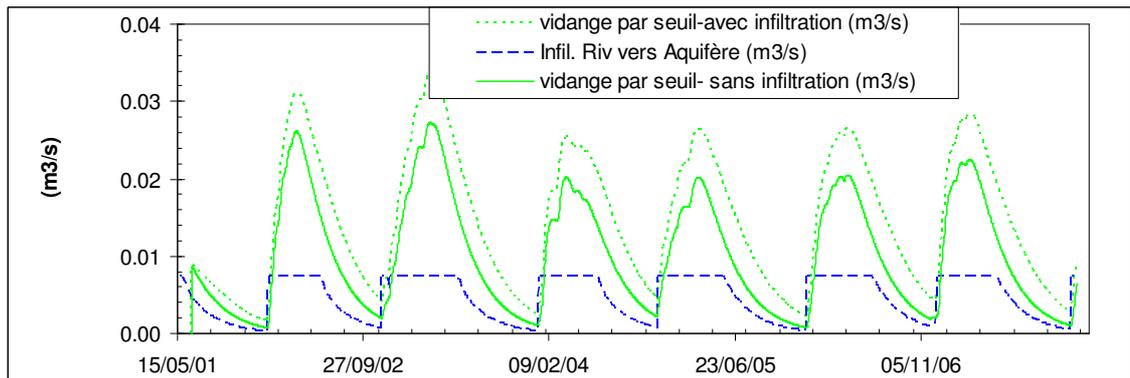


Illustration 28 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité. Tirés verts : avec infiltration du cours d'eau, les paramètres sont constants et identiques à la période anté 15-02-05 ; trait continu vert : pas d'infiltration. Moyenne de la vidange de l'aquifère par débordement $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ avec infiltration et $0.011 \text{ m}^3/\text{s}$ sans l'infiltration.

3.2.3. Synthèse de la modélisation de la piézométrie au puits de pompage et du débit du cours d'eau au site de Kwalé

L'approche par la modélisation a permis d'une part de mieux comprendre le fonctionnement de l'aquifère et d'autre part de quantifier les différentes contributions à l'aquifère de Kwalé (recharge, infiltration du cours d'eau, etc.). Ce type de modèle, calé principalement sur une sollicitation significative de l'aquifère par pompage, conduit à des simulations relativement robustes.

On note que, depuis que le débit de pompage a été diminué et que les infiltrations en provenance de la rivière ont augmenté (depuis 2005), le niveau piézométrique est remonté suffisamment haut pour que l'aquifère puisse à nouveau déborder significativement et se vidanger en aval de la station de jaugeage, soit directement dans le cours d'eau soit dans un autre aquifère. C'est ce qui devait se passer naturellement avant l'exploitation du site. La modélisation suggère ainsi que, depuis 2005, l'aquifère se vidange à un débit moyen de l'ordre de $0.0068 \text{ m}^3/\text{s}$; cette vidange est voisine de la valeur d'infiltration en provenance du cours d'eau, en moyenne $0.0074 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Néanmoins, ces deux composantes ne se compensent pas, car elles sont décalées temporellement ; leur prise en compte conjointe est donc nécessaire.

Cette modélisation montre que l'aquifère peut être exploité de façon active. En fait, lorsque l'aquifère est pompé, le niveau d'eau dans l'aquifère baisse suffisamment pour limiter son débordement vers l'extérieur, voire l'annuler. En conséquence, une plus grande quantité d'eau provenant, principalement en hautes eaux, de la recharge et de l'infiltration par les pertes peut y être stockée. Si le niveau d'eau dans l'aquifère reste haut, une part plus importante de recharge et d'infiltration sera évacuée vers l'aval de l'aquifère de Kwalé et donc « perdue » pour l'exploitation.

Sur la base de ce modèle, on peut estimer que l'aquifère de Kwalé pourrait être pompé aux environs de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ en continu (prélèvement annuel : 0.526 Mm^3) alors qu'en 2007 il a été exploité à un débit moyen $37 \text{ m}^3/\text{h}$ (prélèvement annuel : 0.325 Mm^3). La simulation est réalisée de juin 2006 à décembre 2012, pour les chroniques météorologiques post-2007 (pluie, ETP) les données des années 2002 à 2007 ont été reportées de 2008 à 2012. Les illustrations 29 et 30 illustrent la simulation d'une telle exploitation, « pomper plus pour augmenter les rabattements, donc limiter les pertes par débordement et donc stocker plus en saison des pluies pour prélever plus à longueur d'année ». Cette modélisation suggère que le débordement est quasiment annulé. Etant donné le relativement faible débit de débordement actuel simulé par le modèle ($0.007 \text{ m}^3/\text{s}$), ce scénario de pompage ne devrait pas affecter significativement le débit en aval de la station de Kwalé bas.

Cependant, si un tel scénario d'exploitation devait se réaliser, il serait nécessaire d'assurer un suivi des conditions météorologiques, de la piézométrie, du débit de pompage et du débit du cours d'eau. Ce suivi permettrait d'une part de vérifier les résultats du modèle, notamment les paramètres utilisés et d'autre part de vérifier que certains éléments externes ne changent pas, comme par exemple une diminution de l'infiltration du cours d'eau vers l'aquifère ou une succession d'années sèches.

De plus, l'importante inertie du système suggère que l'aquifère pourrait être exploité pendant 2 à 3 années à un débit plus important de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ en continu ($0.613 \text{ Mm}^3/\text{an}$) à condition de descendre la pompe plus profondément (cote + 7 m NGM par exemple) ou de mettre en place une pompe au puits Kwalé 3 pour assurer la différence de

² Les décimales ne sont pas le reflet de l'exactitude de la mesure. Les valeurs d'infiltration et vidange sont nécessairement différentes (il ne s'agit pas d'un simple transit), mais comme ici les valeurs sont très voisines, il est nécessaire de distinguer le 4^{ième} chiffre après la virgule

prélèvement. Cependant, ce « sur-pompage » temporaire devra être suivi d'une phase de moindre pompage (par exemple retour aux 60 m³/h en continu) sur une période équivalente afin de reconstituer le stock de l'aquifère.

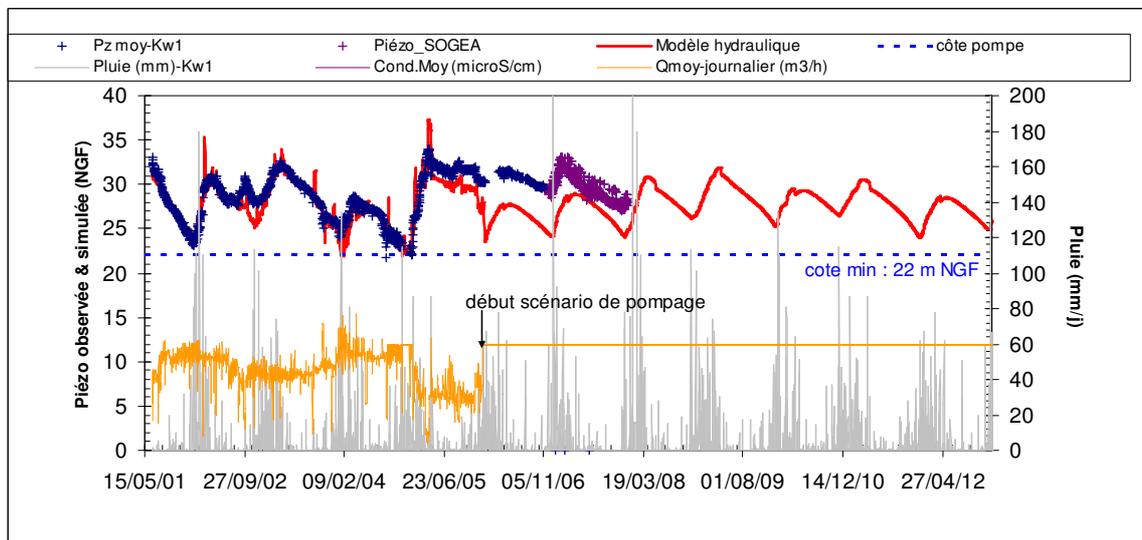


Illustration 29 : Modélisation de la piézométrie à Kwalé 1 de 2001 à 2012 avec un pompage hypothétique continu de 60 m³/h à partir de juin 2006 ; piézo min : env. 23.5 m. Les données de pluies post 2007 correspondent à celles de la période 2002-2007. La cote min : cote piézométrique minimale, la pompe est située à 20 m NGM aux quels ont été rajoutés 2 m de sécurité (voir RP-53193-FR).

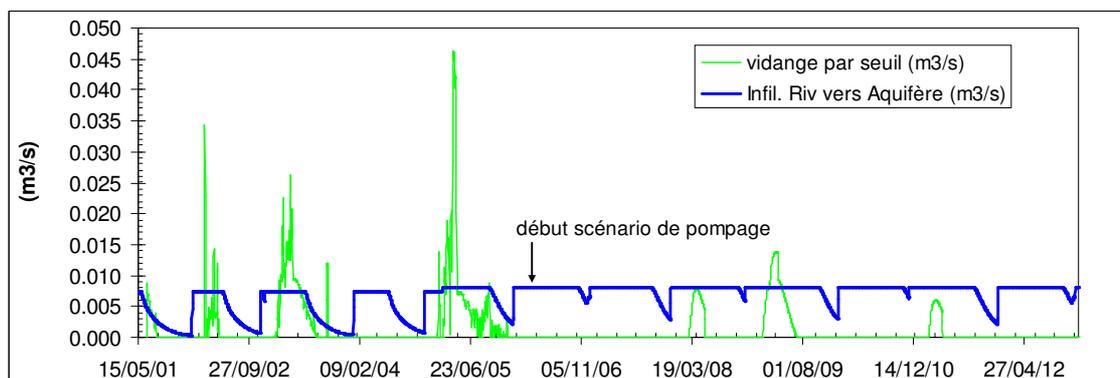


Illustration 30 : Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité. Pompage hypothétique de 60 m³/h à partir de juin 2006. Nette diminution du débordement comparé à l'illustration 26 et quasiment plus de débordement à partir du scénario d'exploitation (2006).

L'illustration 31 reprend les données du modèle numérique développé sur le site de Kwalé et donne un aperçu du fonctionnement hydrogéologique schématique de l'aquifère sur la période 2005-2007.

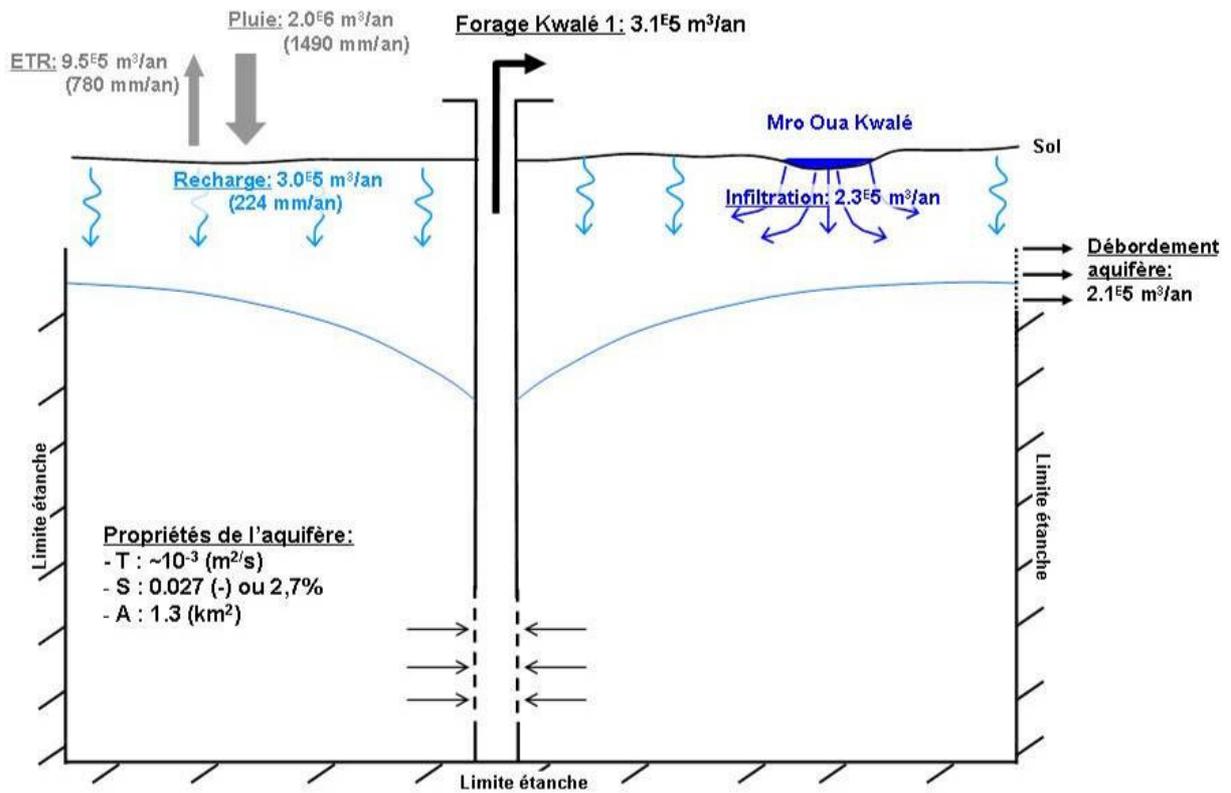


Illustration 31 : Fonctionnement hydrogéologique schématique de l'aquifère volcanique de Kwalé. Les termes du bilan sont basés sur la période 2005-2007

4. Valorisation des données d'exploitation du forage de Mtsangamouji 2 (1230-6X-0016) recueillies en 2002-2007

Les informations relatives au forage de Mtsangamouji 2 – puits exploité - (coupe géologique et technique, observations réalisées lors de la foration et des pompages d'essai, interprétation de ces données, etc.) sont disponibles au sein du rapport BRGM/RP-50428-FR. L'aquifère exploité est un aquifère volcanique ; l'ouvrage est capté de 66 à 76 m de profondeur au sein d'un niveau scoriacé.

Les données acquises par la station de pompage de Mtsangamouji 2 (cahier de station SOGEA), niveaux piézométriques et débit du forage, ont été modélisés avec le même modèle mathématique que celui développé pour l'aquifère de Kwalé (aquifère fermé soumis à recharge et/ou infiltration d'un cours d'eau). L'illustration 32 présente la zone d'étude.

Cependant, comme les informations données par SOGEA sont des différences par rapport à un niveau piézométrique de référence choisi arbitrairement à 100 m dans le forage exploité, la piézométrie est ici exprimée en valeurs relatives. La valeur absolue de la piézométrie est donc inexacte, mais ses variations traduisent bien la réalité.

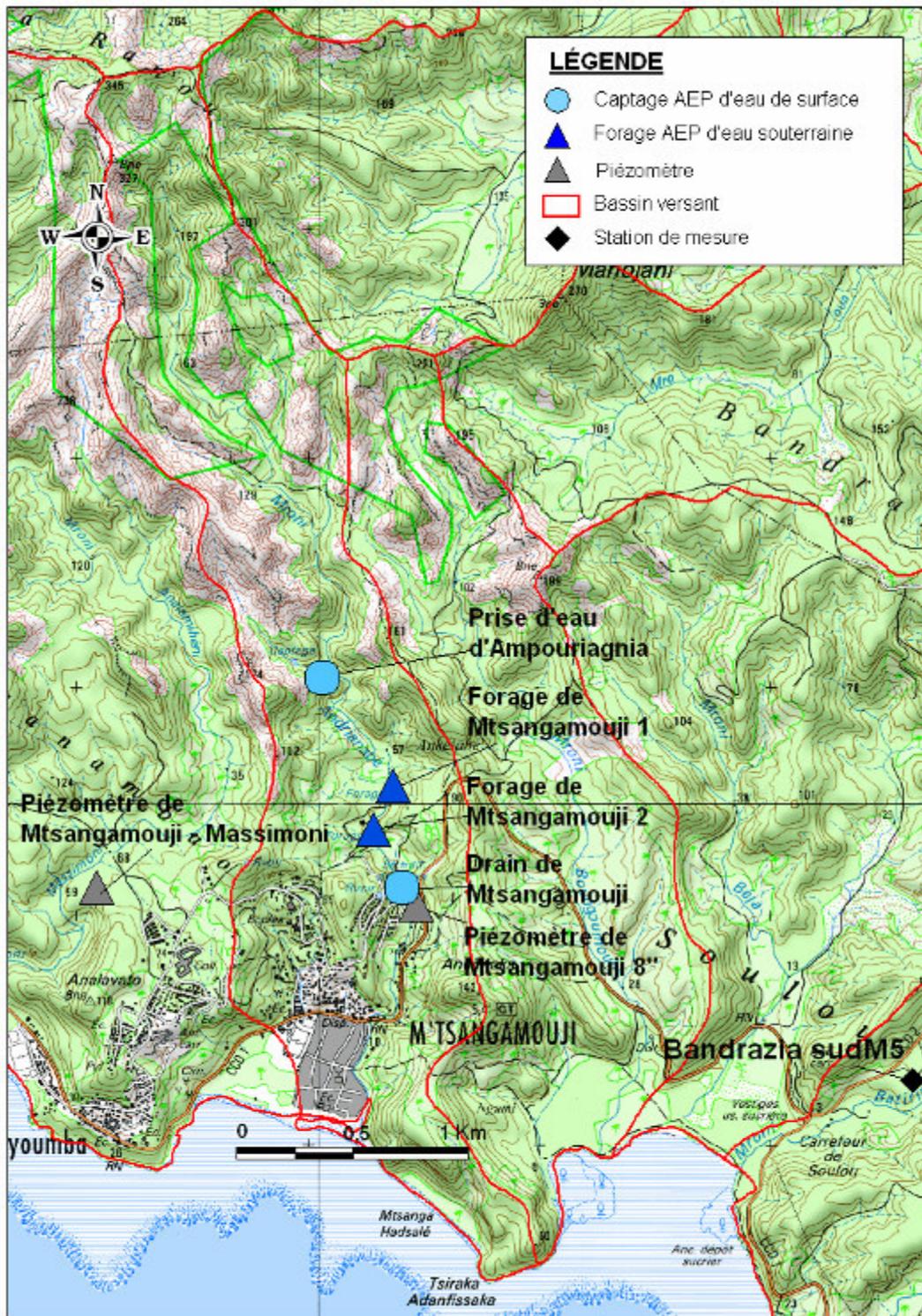


Illustration 32 : Localisation du forage exploité de Mtsangamouji 2

4.1. PRESENTATION DES DONNEES RECUEILLIES

Les informations reçues en avril 2008 correspondent à l'ensemble des données recueillies par l'exploitant (cahier de station SOGEA).

Elles ont été transmises sous forme numérique au BRGM. Elles comprennent :

- des niveaux piézométriques exprimés en profondeurs (distance sonde – surface ; profondeur de la sonde inconnue) au forage d'exploitation Mtsangamouji 2 (1230-6X-0016) de décembre 2005 à fin novembre 2007. Le pas de temps de mesure est journalier, avec une relative forte imprécision sur les valeurs puisque celles-ci sont exprimées en mètres, sans indication des décimales,
- le débit moyen journalier du forage, en m³/h. Les données présentées et traitées proviennent des cahiers de station de la SOGEA. Cette donnée présente une interruption du 03 au 07-02-07 ; la donnée n'a pas été comblée pour les besoins de la modélisation (débit considéré *a priori* comme nul),
- la pluviométrie en mm mesurée à la station de Bandrazia (code : 1230-6X-0037 ; situé à 2,5 km du forage de Mtsangamouji 2). Celle-ci présente une interruption de mesure à partir de juillet 2007. Pour les besoins des modélisations, cette interruption a été « comblée » avec les données de la station pluviométrique de Kwalé (située à 9,2 km). L'éloignement de cette station par rapport au site d'étude peut poser des problèmes lors du calage du modèle, en raison notamment des différences de régime de pluie entre le site et la station de Kwalé. Cependant, comme la période manquante se situe en période sèche, le « comblement » des données de pluie par cette station ne devrait pas trop altérer les résultats des simulations.
- il n'y a pas de suivi du débit du cours d'eau. La surface du bassin versant topographique situé en amont du forage est de 2.3 km²,
- autres données météorologiques : durée journalière de l'insolation (station de PAMANDZI) et température journalière moyenne (station de VAHIBE-PRIMA). Données disponibles du 07-11-03 au 31-12-07 (cf. Illustration 13).

L'illustration 33 présente l'ensemble de ces données disponibles.

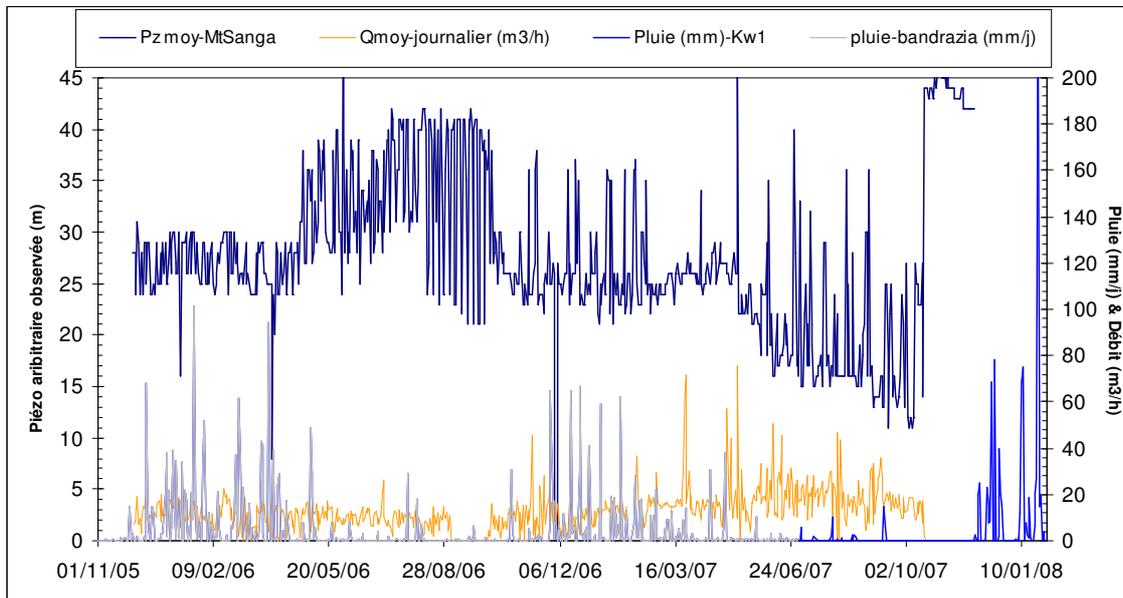


Illustration 33 : Piézométrie en valeur relative et débit de pompage au forage de Mtsangamouji 2 (données SOGEA) et pluviométrie (données DAF)

4.2. APPLICATION DU MODELE AU SITE DE MTSANGAMOUJI 2

Afin de mettre en évidence de premières informations sur l'aquifère capté (géométrie, interactions éventuelles avec les eaux des cours d'eau, etc.) une série de modélisations, avec et sans infiltrations en provenance du cours d'eau a été réalisée. En l'absence d'information sur la prise d'eau d'Ampouriagnia, celle-ci n'a pas été considérée dans le modèle. Cette modélisation, approximative, puisque ne disposant pas du prélèvement à ce captage et de données de débit du cours d'eau, devrait néanmoins apporter de premiers éléments quant au fonctionnement de cet aquifère.

4.2.1. Modélisation de la piézométrie au puits de pompage et du débit du cours d'eau sans prise en compte de l'infiltration du cours d'eau

L'illustration 34 présente le meilleur calage observation – simulation de la piézométrie au puits exploité Mtsangamouji 2. L'aquifère est supposé fermé, comme celui de Kwélé ; lors de l'essai de nappe de 2000 (essai de courte durée) une limite étanche au moins avait été décelée (BRGM/RP-50428-FR) ; ces deux résultats sont donc cohérents. Par ailleurs, la prise d'eau amont n'est pas considérée dans le modèle et il

n'y a pas non plus d'infiltration en provenance du cours d'eau. Les tableaux 5 et 6 présentent respectivement les paramètres de calage du modèle et les bilans annuels.

La fonction de production des pluies efficaces est similaire à celle utilisée à Kwalé et aux informations recueillies dans la Thèse de Lapègue (1999). Les pluies efficaces sont de l'ordre de 55% des pluies mesurées à la station de Bandrazia. La recharge correspond environ à 15% des pluies et le débit du cours d'eau (écoulement rapide et lent) à environ 40% des pluies.

Les valeurs du débit simulé sont réalistes compte tenu de la surface de bassin versant à Mtsangamouji 2, 2.3 km² (Illustration 35). Le débit moyen est de 0.055 m³/s environ et varie de 0.5 m³/s environ pour les pics à 0.001 m³/s environ pour l'étiage le plus sévère.

Comme indiqué précédemment, il n'a pas été simulé d'infiltration du cours d'eau vers l'aquifère, par contre on note un quasi non-débordement de l'aquifère exploité ; débit inférieur à 10⁻⁴ m³/s (Illustration 35).

Les paramètres de l'aquifère utilisés pour la modélisation sont (i) de 1.4x10⁻³ m²/s pour la transmissivité (T) - cette valeur correspond à celle obtenue lors de l'interprétation de l'essai de nappe de 2000 (BRGM/RP-50428-FR) - et (ii) de 0.04 pour la porosité efficace (S), ce qui est envisageable pour ce type d'aquifère. Par contre, la surface de l'aquifère, 2.8 km², est supérieure à celle du bassin versant en amont du forage (2.3 km²). Ce point est assez difficile à discuter compte tenu des connaissances géologiques actuelles sur le secteur ; l'ordre de grandeur reste néanmoins raisonnable.

Le modèle choisi reproduit grossièrement les tendances générales des évolutions piézométriques, mais rend mal compte de leur amplitude à court terme et de la remontée lors de la phase d'arrêt de pompage en 2007 (sous-estimation de la piézométrie calculée ; Illustration 34). Il a donc été choisi de tester un modèle avec infiltration du cours d'eau afin d'augmenter l'amplitude des fluctuations piézométriques (action sur S). Ce type de simulation devrait en outre concourir à réduire la surface du bassin versant hydrogéologique.

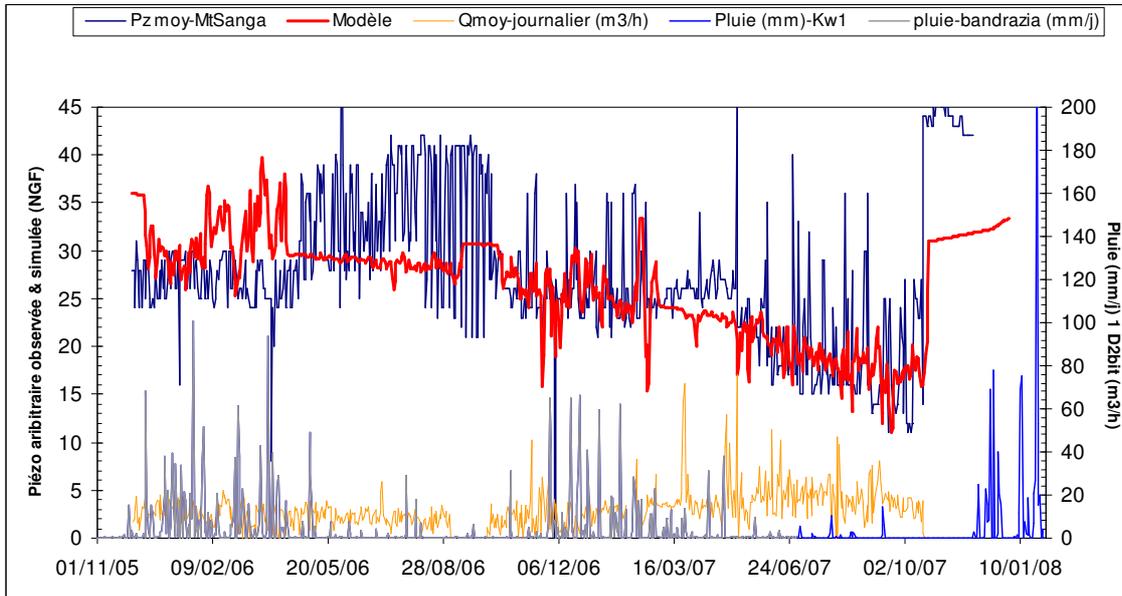


Illustration 34: Modélisation de la piézométrie (valeur relative) au forage de Mtsangamouji 2 (données SOGEA). Simulation sans infiltration issue du cours d'eau

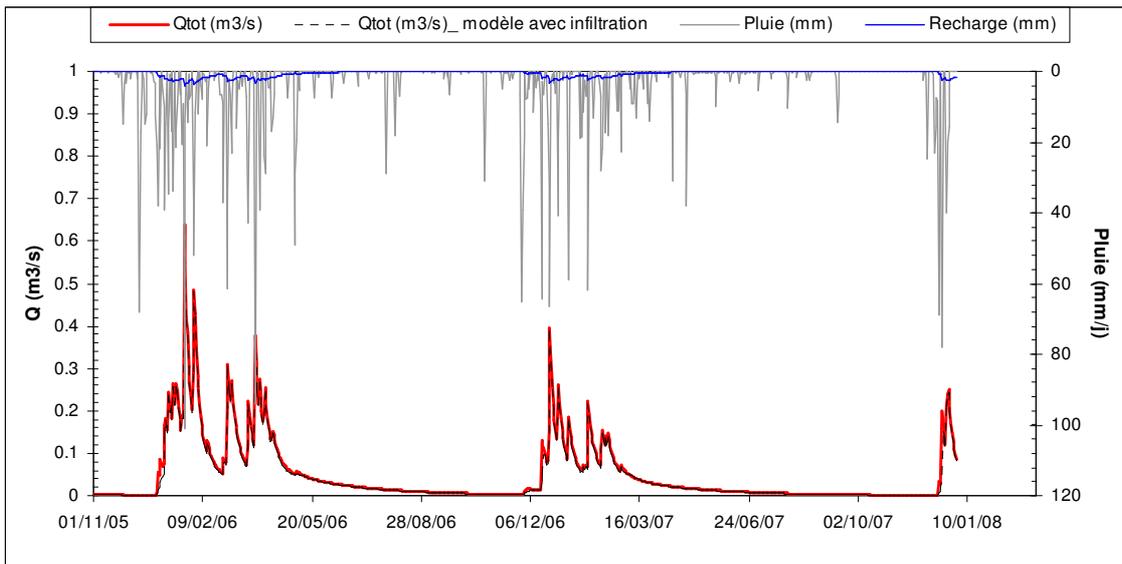


Illustration 35 : Modélisation du débit du cours d'eau. Rouge : simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau (paramètre: tableau 5), noir : avec infiltration (paramètre: tableau 7).

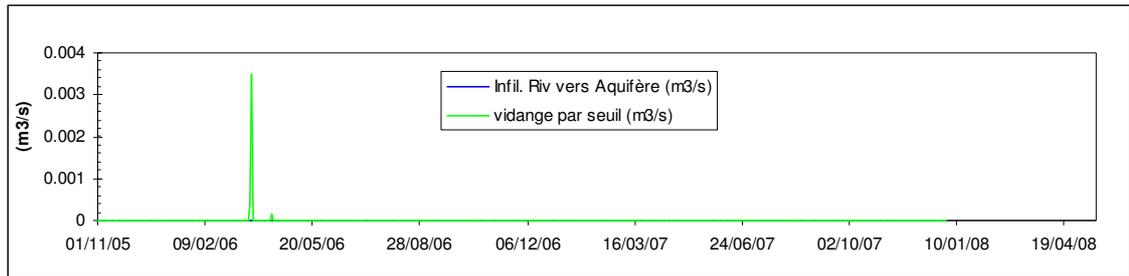


Illustration 36 : Modélisation des pertes par débordement (simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau)

PARAMETRES			
Surface BV	2.33	km ²	
RESERVOIR RU			
RUMAX	100.0	mm	Déficit max sol
REVERVOIR H			
RUIPER	35.0	mm	seuil équi-ruiss-percolation
THG	45.0		tps demi-montée
REVERVOIR G			
TG1	66.0	J	tps demi-tarissement
REVERVOIR R			
Seuil déb.R	0	mm	seuil de débordement
TGM1-pertes	0.0	J	tps demi-tarissement
TGM2	0.0	J	tps demi-tarissement
CAPTAGE AMONT			
BV Captage	0.0	km ²	bassin versant captage
Q_max	0.0	m ³ /s	débit max. pour écrêtage
REVERVOIR K			
h0	36.0	m	
pdc	2000.0	s ² /m ⁵	pertes de charges quadratiques
A	2800000.0	m ²	Surface Res. R
S	0.04	-	Emmagasinement
T	0.0014	m ² /s	Transmissivité
C _A	20.0	-	
r _w	0.2	m	
Seuil-res K	36.0	m	seuil de débordement
TGK	66.0	J	tps demi-tarissement (quand h > seuil)

Tableau 5 : paramètres du modèle ; simulation sans infiltration en provenance du cours d'eau.
h0 : niveau piézométrique initial.

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Rech. (mm)	Rech. (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infilt. rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2005	1322.0	741.2	206.9	4.82E+05	1.83E+06	0.00E+00	0.0%	0.00E+00	8.50E+03
2006	1831.5	1051.6	297.2	6.93E+05	2.37E+06	0.00E+00	0.0%	3.49E+02	8.06E+04
2007	938.0	436.8	150.1	3.50E+05	1.04E+06	0.00E+00	0.0%	0.00E+00	1.23E+05

Tableau 6 : Bilan de la simulation ; cas où il n'y a pas d'infiltration en provenance du cours d'eau

4.2.2. Modélisation avec prise en compte d'une infiltration issue du cours d'eau

La modélisation suivante (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) intègre une infiltration en provenance du cours d'eau.

Les résultats comparés des Illustrations 34 et 35 sont de meilleure qualité que précédemment et reproduisent mieux l'amplitude des fluctuations piézométriques, en particulier à partir de fin 2006 et lors de la remontée des niveaux fin 2007, due à l'arrêt du pompage. Les paramètres du modèle sont identiques à la modélisation précédente en ce qui concerne la modélisation des pluies efficaces, de la recharge et des écoulements lent et rapide. Par contre, la surface de l'aquifère a été réduite à 1.7 km², ce qui apparaît comme plus réaliste ; la porosité, 0.03, sensiblement plus faible que précédemment, reste dans la gamme des valeurs attendues pour ce type d'aquifère.

Le débit simulé au sein du cours d'eau (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est très peu différent de celui issu de la modélisation précédente. Ceci est dû au faible débit des pertes du cours d'eau (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), en moyenne 4 à 5% du débit du cours d'eau soit en moyenne 0.002 m³/s environ. Les pertes par débordement de l'aquifère sont toujours faibles, inférieures à 0.001 m³/s.

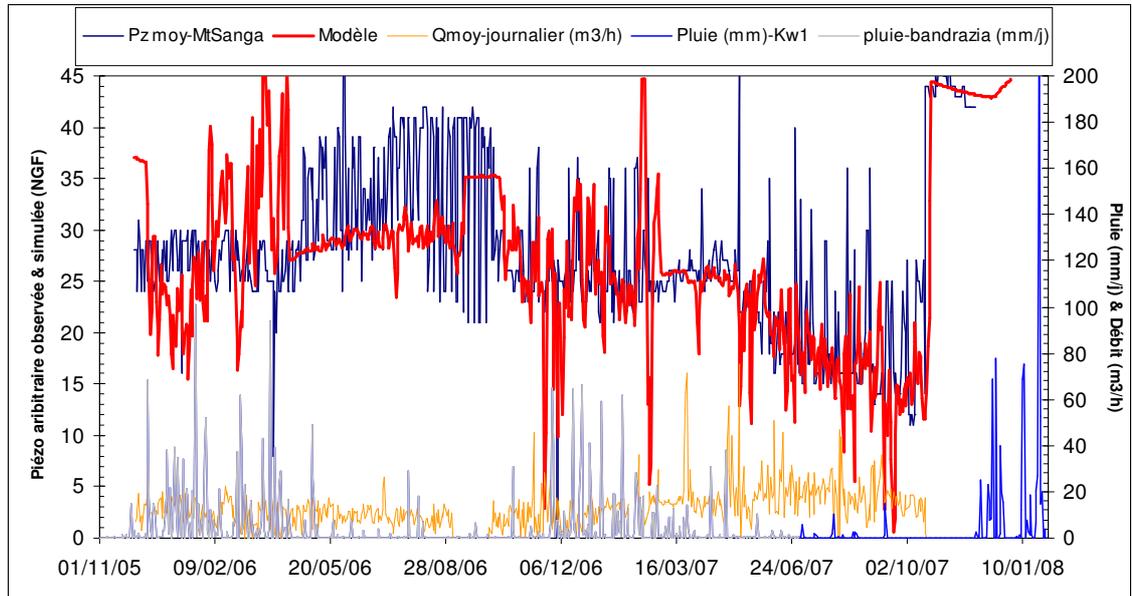


Illustration 37 : Modélisation de la piézométrie au forage Mtsangamouji 2 (données SOGEA). Simulation intégrant une infiltration en provenance du cours d'eau

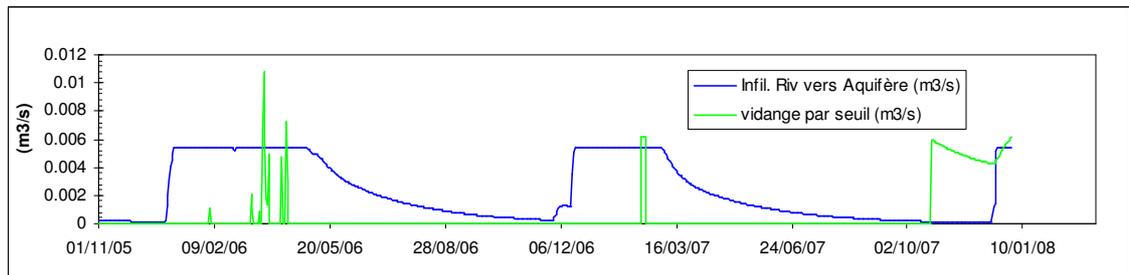


Illustration 38 : Modélisation du débit d'infiltration en provenance du cours d'eau et du débordement de l'aquifère.

PARAMETRES			
Surface BV	2.33	km ²	
RESERVOIR RU			
RUMAX	100.0	Mm	Déficit max sol
REVERVOIR H			
RUIPER	35.0	Mm	seuil équi-ruiss-percolation
THG	45.0		tps demi-montée
REVERVOIR G			
TG1	66.0	J	tps demi-tarissement
REVERVOIR R			
Seuil déb.R	10.0	mm	seuil de débordement
TGM1-pertes	50.0	J	tps demi-tarissement
TGM2	5.0	J	tps demi-tarissement
CAPTAGE AMONT			
BV_Captage	0.0	km ²	bassin versant captage
Q_max	0.0	m ³ /s	débit max. pour écrêtage
REVERVOIR K			
h0	36.0	m	
pdc	2000.0	s ² /m ⁵	pertes de charges quadratiques
A	1700000.0	m ²	Surface Res. R
S	0.03	-	emmagasinement
T	0.0014	m ² /s	transmissivité
C _A	20.0	-	
rw	0.2	m	
Seuil-res K	39.0	m	seuil de débordement
TGK	55.0	J	tps demi-tarissement (quand h> seuil)

Tableau 7: paramètres du modèle hydraulique ; simulation intégrant une infiltration en provenance du cours d'eau. h0 : niveau piézométrique initial

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Rech. (mm)	Rech. (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infilt. rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2005	1322.0	741.2	206.9	4.82E+05	1.77E+06	7.48E+04	4.1%	0.00E+00	8.50E+03
2006	1831.5	1051.6	297.2	6.93E+05	2.27E+06	9.32E+04	3.9%	4.51E+03	8.06E+04
2007	938.0	436.8	150.1	3.50E+05	9.81E+05	6.04E+04	5.8%	3.26E+04	1.23E+05

Tableau 8: Bilan de la simulation ; cas avec infiltration en provenance du cours d'eau

4.2.3. Cas « naturel »

La simulation suivante présente le cas de la fluctuation « naturelle » de la piézométrie (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**; tirés rouges), en supprimant le pompage et avec des paramètres d'infiltration identiques à ceux de la modélisation précédente (recharge directe par les précipitations et infiltrations en provenance du cours d'eau). Les paramètres de la fonction de production des pluies efficaces, des écoulements lent et rapide et de l'aquifère sont gardés identiques à la modélisation précédente (Annexe 5). La prise d'eau amont n'est pas considérée.

Le niveau piézométrique simulé « naturel » (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présente des fluctuations de l'ordre de 4.0 à 8.0 mètres ce qui apparaît comme important compte tenu des observations réalisées sur les ouvrages non-exploités montrant les fluctuations les plus importantes (cf. § 2 : Illustration 4 [Bouyouni : 2.5 à 3.5 m], Illustration 6 [Combani : 2.0 à 2.5 m]).

La suppression de l'alimentation de l'aquifère par des infiltrations en provenance du cours d'eau (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**; trait rouge), réduit très sensiblement l'amplitude des fluctuations piézométriques « naturelles » (2 à 4 m) et les confine dans une gamme plus acceptable. Comme dans le cas du site de Kwalé, ce type de simulation suggère que l'exploitation de l'aquifère entraîne une augmentation de l'infiltration en provenance du cours d'eau et, potentiellement, une augmentation de la recharge de l'aquifère par infiltration directe (probablement par moindre débordement et conversion d'écoulements rapides en écoulements lents).

Lorsque les pompages sont supprimés, le modèle montre que l'aquifère déborde en quasi permanence avec un débit faible en valeur absolue, mais beaucoup plus important que pendant l'exploitation, 0.003 m³/s en moyenne si la recharge en provenance du cours d'eau est maintenue et 0.001 m³/s en moyenne lorsque celle-ci est supprimée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ce débit de débordement est très variable et dépend des conditions climatiques. Tout comme à Kwalé, l'exploitation de l'aquifère contribue à diminuer très sensiblement le débit de vidange naturel de l'aquifère.

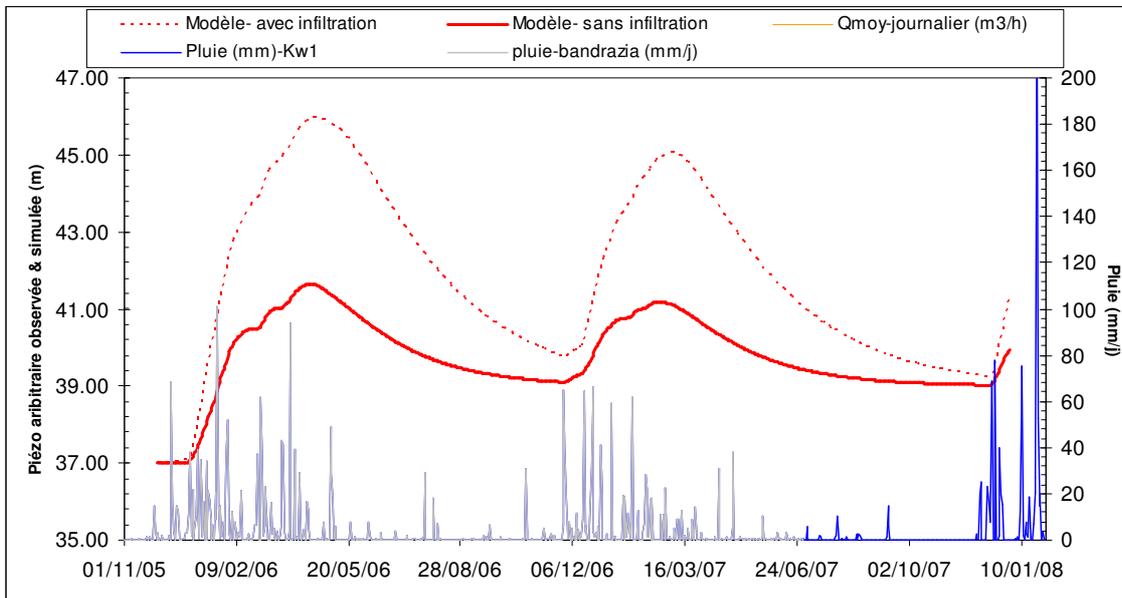


Illustration 39 : Modélisation de la piézométrie à Mtsangamouji 2 sans les pompages avec (tirés rouge) et sans (trait rouge) infiltration en provenance du cours d'eau. Les paramètres de modélisation sont ceux du tableau 6

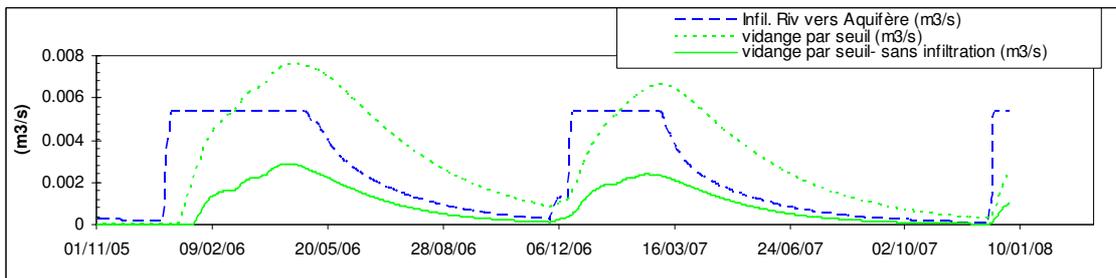


Illustration 40 : simulation de l'infiltration en provenance du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité, dans les deux cas de figure : avec (tirés verts) et sans (trait vert) infiltration en provenance du cours d'eau

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Rech. (mm)	Rech. (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infilt. rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2005	1322.0	741.2	206.9	4.82E+05	1.77E+06	7.48E+04	4.1%	0.00E+00	0.00E+00
2006	1831.5	1051.6	297.2	6.93E+05	2.27E+06	9.32E+04	3.9%	1.20E+05	0.00E+00
2007	938.0	436.8	150.1	3.50E+05	9.81E+05	6.04E+04	5.8%	8.98E+04	0.00E+00

Tableau 9 : Bilan de la simulation ; cas « naturel » avec infiltration.

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Rech. (mm)	Rech. (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infilt. rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2005	1322.0	741.2	206.9	4.82E+05	1.83E+06	0.00E+00	0.0%	0.00E+00	0.00E+00
2006	1831.5	1051.6	297.2	6.93E+05	2.37E+06	0.00E+00	0.0%	3.48E+04	0.00E+00
2007	938.0	436.8	150.1	3.50E+05	1.04E+06	0.00E+00	0.0%	2.69E+04	0.00E+00

Tableau 10 : Bilan de la simulation ; cas « naturel » sans infiltration.

4.2.4. Synthèse de la modélisation au site de Mtsangamouji 2

Les modélisations proposées permettent de disposer d'une première évaluation des caractéristiques de l'aquifère exploité à Mtsangamouji 2. La première modélisation (§ 4.2.1.), pessimiste, ne tient pas compte de l'existence d'une infiltration d'eau en provenance du cours d'eau et ne reproduit que grossièrement la piézométrie au puits exploité, la deuxième (§ 4.2.2.), qui intègre une recharge en provenance du cours d'eau, donne des résultats plus satisfaisants tant du point de vue de la qualité de l'ajustement obtenu qu'en ce qui concerne les paramètres de calage (surface de l'aquifère exploité notamment). La troisième, correspondant au cas « naturel » (§ 4.2.3.), montre que l'exploitation de l'aquifère conduit très vraisemblablement à une augmentation artificielle de sa recharge (effets de « gestion active ») en augmentant voire en générant une alimentation à partir du cours d'eau et en convertissant vraisemblablement des écoulements d'eau de surface en recharge de l'aquifère.

L'aquifère exploité au forage de Mtsangamouji 2 apparaît, dans son fonctionnement et sa structure, assez similaire à celui de Kwalé :

- aquifère fermé, d'une superficie utile de l'ordre de 1.7 km² ; l'aspect « réservoir clos » avait déjà été suggéré lors de l'essai de nappe de 2000 (une limite étanche au moins ; BRGM/RP-50428-FR),
- aquifère soumis à un régime de recharge par les précipitations efficaces,
- soumis, *a priori*, à une infiltration en provenance du cours d'eau situé à proximité du puits de pompage, du moins lorsqu'il est pompé,
- et présentant une surverse par débordement, au moins en conditions de fonctionnement naturel.

Cependant, contrairement au cas de Kwalé, la modélisation suggère que l'aquifère déborde peu, voire pas du tout lorsqu'il est exploité. Ainsi, et compte tenu de la gamme

de rabattement observée, **il est probable que l'aquifère soit exploité selon un régime assez proche de son potentiel maximal** (actuellement, le débit moyen annuel est d'environ 13 m³/h soit environ 0.11 Mm³/an). Le recueil d'informations plus précises concernant notamment les cotes piézométriques et la profondeur à laquelle la pompe est installée permettrait de valider ce premier diagnostic et, le cas échéant, de préciser le régime d'exploitation du forage.

Les modélisations présentées n'utilisent pas, pour le calage, la contrainte que pourrait constituer la connaissance du débit du cours d'eau qui contribue à l'alimentation de l'aquifère. L'acquisition de ce type de données (campagne de jaugeages différentiels et/ou suivi régulier) permettrait aussi de renforcer la crédibilité de la modélisation.

Il est donc vivement recommandé de poursuivre l'acquisition de données de suivi d'exploitation sur ce forage, en rationalisant celle-ci (pour ce qui concerne la piézométrie notamment : identification du paramètre mesuré et réalisation de mesures plus précises, au centimètre si possible). Par ailleurs, le site de Mtsangamouji comporte un autre forage d'exploitation (Mtsangamouji 1, 1230-6X-0017), actuellement exploité et situé à environ 250 m du forage d'exploitation Mtsangamouji 2 (données en Annexe 6). Cependant, les données, du fait de leur relative imprécision (absence des décimales pour les valeurs de niveaux d'eau, absence de niveau de référence, gammes de fluctuation des niveaux d'eau et du débit surprenantes, etc.), n'ont pas mis en évidence une éventuelle interférence de ce dernier au puits de pompage Mtsangamouji 2. Par ailleurs et en raison de la leur forte imprécision, les données de Mtsangamouji 1 n'ont pas été modélisées.

Ainsi dans la simulation proposée à Mtsangamouji 2, les deux aquifères sont supposés déconnectés. Afin d'évaluer les interférences entre les aquifères exploités il serait souhaitable de pouvoir disposer de suivi piézométrie-débit fins menés conjointement aux deux ouvrages pendant plusieurs semaines ou mois d'exploitation. Ainsi, il est recommandé de procéder à un tel suivi ce qui permettrait de préciser le potentiel à Mtsangamouji 1 ou de l'ensemble du champ captant dans le cas où les aquifères seraient connectés.

5. Conclusion

Le présent travail montre, si besoin en était, la valeur ajoutée qui peut être tirée des suivis hydrologiques et hydrogéologiques réalisées sur les aquifères et sur les cours d'eau qui leur sont associés. Leur valorisation (en conjonction avec les données météorologiques disponibles, qui sont elles aussi déterminantes) apporte des informations cruciales tant en termes de connaissance de la structure et des modalités de fonctionnement des aquifères de Mayotte, que du point de vue opérationnel, en vue d'optimiser et de pérenniser l'exploitation de la ressource en eau souterraine.

Les données hydrologiques et les suivis piézométriques réalisés sur des forages non exploités (piézomètres), ou sur des forages exploitables mais non encore mis en exploitation, sont nécessaires afin de contraindre la modélisation des aquifères et donc d'assurer la robustesse des modèles mis en œuvre. Ces données ne sont cependant pas suffisantes pour évaluer la ressource en eau exploitable au sein des aquifères captés ainsi que les incidences éventuelles de cette exploitation, notamment sur le régime des eaux de surface.

Ce sont les données tirées des suivis réalisés sur les forages exploités (piézométrie, débit) qui sont décisives pour caractériser la structure et les modalités de fonctionnement à long terme des aquifères et en déduire les modalités optimales de leur exploitation. La sollicitation exercée par le pompage, à long terme, permet en effet d'investiguer l'aquifère dans son ensemble (et non seulement à proximité immédiate du puits pompé comme lors d'un pompage d'essai), de confirmer les paramètres hydrodynamiques tirés des pompages d'essai (perméabilité, emmagasinement, pertes de charge quadratiques au puits), d'en déduire la géométrie de l'aquifère (surface utile, distance aux limites, etc.), ses relations éventuelles avec les eaux de surface et, le cas échéant, de déterminer si l'exploitation se traduit ou non par une augmentation de la recharge (notamment la conversion d'écoulements rapides, qui se seraient perdus en mer, en écoulements lents, exploitables par pompage).

L'application du modèle mathématique développé aux sites de Kwalé et de Mtsangamouji a montré que les aquifères exploités présentent une bonne perméabilité (transmissivité de l'ordre de 10^{-3} m²/s), une porosité efficace de l'ordre de quelques pourcents (entre 2 et 3), cependant ils sont de taille modeste (surface utile de l'ordre du kilomètre carré). Ils sont rechargés par l'infiltration d'une partie des précipitations efficaces et montrent des relations avec les eaux de surface, du moins lorsqu'ils sont exploités.

Ces relations d'alimentation nappe/rivière ont été mises en évidence sur le terrain lors de jaugeages différentiels sur le cours d'eau du Mro Oua Kwalé. Une poursuite d'étude, notamment de jaugeages différentiels serait à envisager pour confirmer et mieux caractériser ses mécanismes d'infiltration. Ces relations ne sont cependant pas de type « limite alimentée », mais de type drainance. Les résultats de la modélisation montrent que l'alimentation de la nappe par pertes du cours d'eau plafonne à environ 20 L/s suggérant un très faible impact des pompages sur le débit du cours d'eau.

Les résultats de l'étude montrent que l'aquifère de Kwalé aujourd'hui exploité aux environs de 37 m³/h (24/24h) pourrait être exploité à un régime plus soutenu aux environs de 60 m³/h (24/24h) sans modification du dispositif actuel (profondeur de pompe notamment). La ressource exploitable annuelle de cet aquifère est estimée à environ 0.526 Mm³. L'aquifère de Mtsangamouji, exploité aux environs de 13 m³/h (24/24h) ne présente *a priori* qu'une faible marge de progression possible, la ressource exploitable annuelle est de l'ordre de 0.11 Mm³.

A terme, d'autres types de données, notamment celles résultant du suivi physico-chimique de l'exploitation (conductivité électrique des eaux d'exhaure notamment) ou de suivis géochimiques des eaux de surface et pompées, pourraient être utilisées pour tenter de mieux contraindre la compréhension des systèmes et la modélisation, en visant à tracer, par exemple, la recharge de l'aquifère et si possible, en visant à différencier la recharge en provenance directe des précipitations efficaces de celle résultant de pertes de cours d'eau.

Ainsi l'application du modèle mathématique développé pourrait s'étendre à d'autres ouvrages (non encore exploités ou en cours de l'être) en vue d'optimiser leur production et de permettre une optimisation de la gestion de la ressource en eau souterraine tout en veillant à ne pas porter un préjudice notable aux eaux de surface.

Références bibliographiques

Bourdarot G. (1996). Essais de puits : méthode et interprétation. Ed. Technip, Paris et Institut Français du Pétrole.

Bonnier J., Jossot O., Lachassagne P., Mouron R. (2003) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2001-2003). Forage de Gouloué 2 (12307X0053). Rapport BRGM/RP-52551-FR. 63 p., 20 fig., 4 ann.

Cruchet M., Daesslé M., Gérard A., Lachassagne P. (2000) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et énamométriques radon. Propositions d'implantation des sondages de reconnaissance. Rapport BRGM/RP-50386-FR. 54 p., 17 fig., 3 ann.

DAF/SER, (Juin 2004) – Recherche et exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Forage de Orovéni 01. Rapport DAF – SIEAM. 14p., 9 ill.

Frissant N., Lachassagne P., Miehe J.M., Eucher G, Petit V., Mouron R., coll. Barthélemy L. (2006) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (Campagne 2006-2007). Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon. Proposition d'implantation des sondages de reconnaissance. Rapport BRGM/RP-55322-FR. 138 p., 41 ill., 6 ann.

Jourdain T., Lachassagne P., Lebon D., Miehe J.M., Mouron R. (2002) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne 2001-2002 – Synthèse des résultats des reconnaissances géologiques, hydrogéologiques, géophysiques et radon – Proposition d'implantation des sondages de reconnaissance - Rapport BRGM/RP-51498-FR, 115 p., 33 fig., 6 tab., 4 ann.

Jourdain T., Maurillon N., Mouron R. (2002) – Approche géologique et hydrogéologique des ensembles volcaniques de Grande-Terre (Ile de Mayotte). Rapport BRGM/RP-52193-FR, 80 p., 17 fig., 8 tab., 5 ann.

Lachassagne P., Cruchet M., Daesslé M., Lebon D., (2000) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte. Campagne prioritaire d'études et de forages de reconnaissance / d'exploitation (juin 1999 – octobre 2000). Compte-rendu des travaux et principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-50428-FR, 20 p., 2 fig., 4 tabl., 14 ann.

Lachassagne P., Ladouche B., Petit V. avec la collaboration de Jourdain Th. et Mouron R. (2002) – Protection et optimisation de la ressource en eau souterraine à Mayotte. Réévaluation des débits d'exploitation des forages de 1999-2000, sur la base d'observations complémentaires réalisées en 2000-2001. BRGM/RP-51603-FR, 89p., 31 fig.

Lachassagne P., Maurillon N., Mouron R. (2002) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte (campagne 2001-2002) – Forage de Gouloué (12307X0045). Compte rendu des travaux – Principaux résultats géologiques et hydrogéologiques. Rapport BRGM/RP-52035-FR. 30 p., 8 fig., 6 ann.

Lachassagne P., Maurillon N., Mouron R. (2002) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Réévaluation des débits d'exploitation des forages de 1999-2000, sur la base d'observations complémentaires réalisées en 2001-2002. Rapport BRGM/RP-51603-FR. 89,p.

Lachassagne P., Noël Y., Jossot O., Willeumier A. (2004).- Valorisation des données d'exploitation du forage de Kwalé 1 (1230-7X-0022) recueillies en 2002-2003. Réévaluation des volumes exploitables. Présentation des données piézométriques recueillies sur 4 forages suivis par la DAF.- Collectivité Territoriale de Mayotte, Direction de l'Agriculture et de la Forêt.- Rapport BRGM/RP-53193-FR.- 74 p., 36 ill., 6 tabl., 2 ann., 1CD ROM.

Lachassagne P. *et al* (2000) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne prioritaire d'étude et de forages de reconnaissance / exploitation (juin 1999 – octobre 2000). Annexe 6 : Forage de Kwalé 1 (indice national 1230-7X-0022). BRGM/RP-50428-FR. Orléans : BRGM, 30 p.

Lapègue J. (1999) - Thèse - Université de la Réunion - Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte : la ressource hydrique, l'assainissement pluvial et l'érosion. 376 p

Petit V., Frissant N., Euchet G., Lachassagne P. (2004) – Programme de recherche et d'exploitation des eaux souterraines à Mayotte – Campagne 2004 – Forage 12307X01000 (Kwalé 3). Rapport BRGM/RP-53471-FR, 89 p., 13 ill., 4 ann.

Petit V., Euchet G. (2005) – Etude préalable à l'élaboration des périmètres de protection des forages de Kwalé (12307X0022 et 12307X0100) – Rapport BRGM/RP-53593-FR. 38 p., 9 ill., 3 ann.

Petit V., G. Euchet (2005) – Valorisation des données piézométriques acquises à Mayotte en 2003-2004. Réévaluation des volumes exploitables au forage de Kwalé 1 (1230-7X-0022). Présentation de données piézométriques recueillies sur 4 forages suivis par la DAF – Rapport BRGM/RP-54090-FR, 48 p., 2 ill., 2 ann.

Thiéry D. (2003) – Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation. BRGM/RP-52832-FR, 102p., 42 fig., 3 ann.

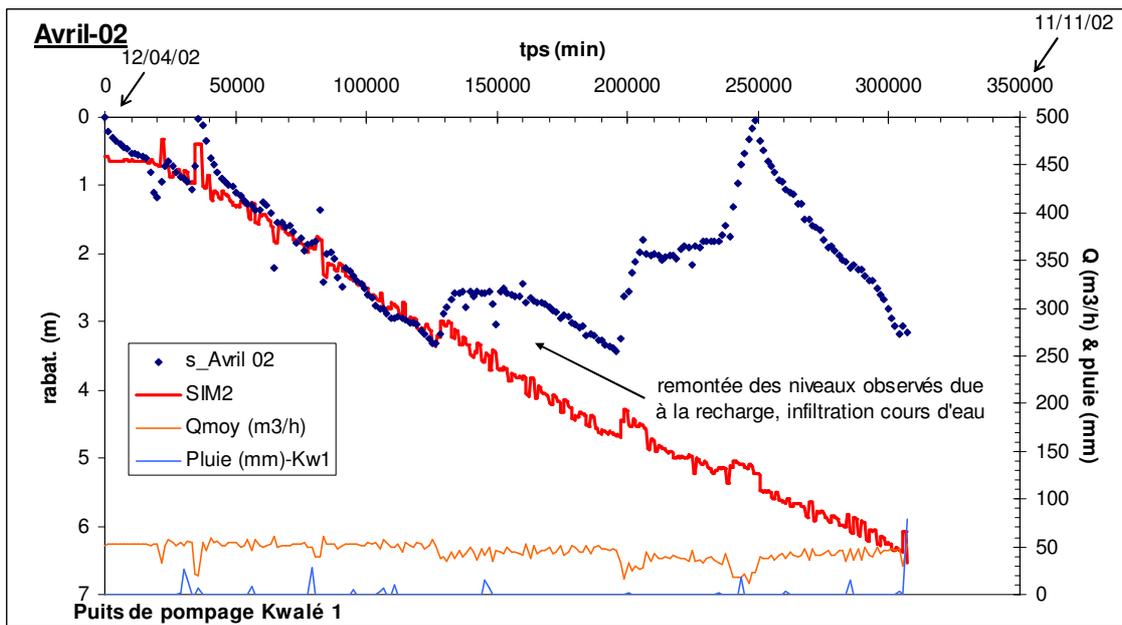
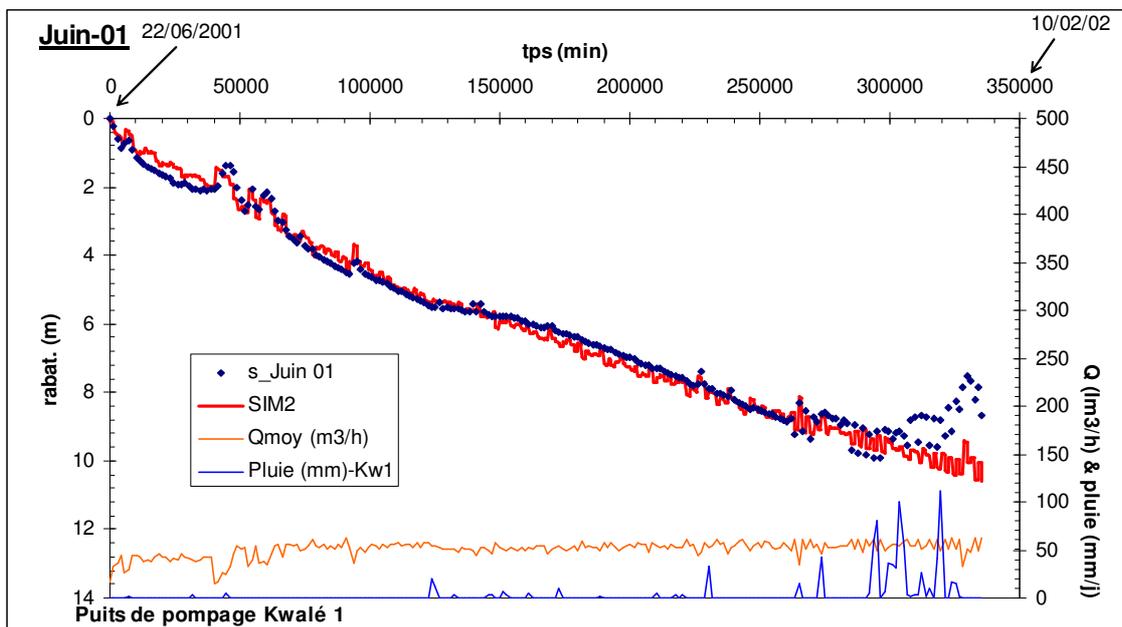
Willeumier A., Jossot O., Euchet G. ((2004) – Etude hydrogéologique préalable à l'élaboration des périmètres de protection du forage de Kwalé 1 (12307X0022). Rapport BRGM/RP-53153-FR. 56 p., 7 ill., 3 tab., 3 ann.

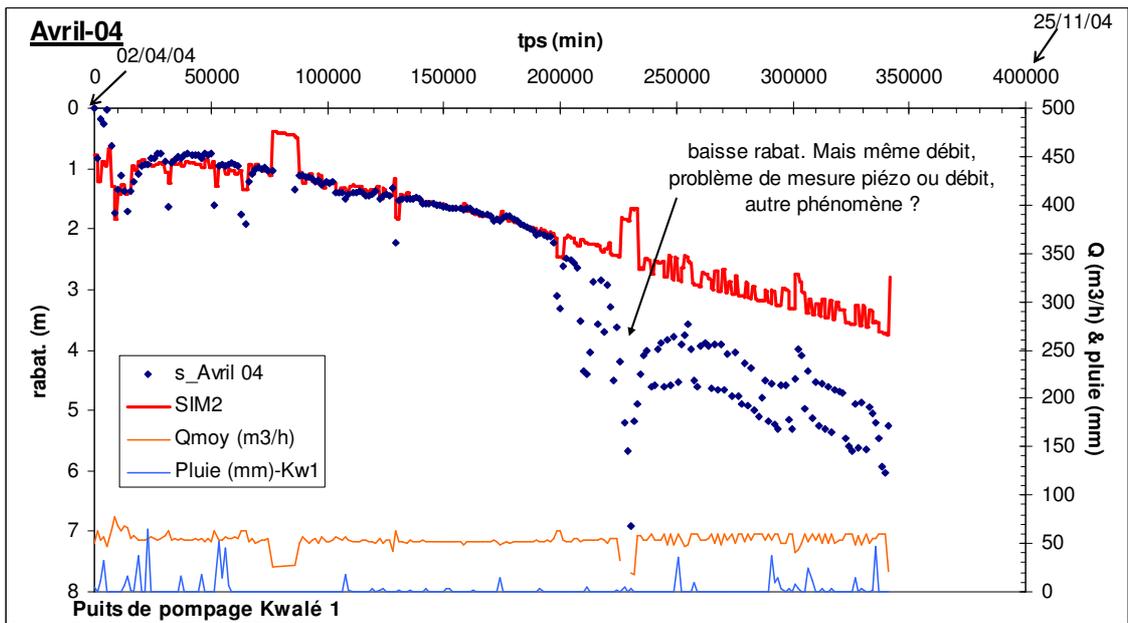
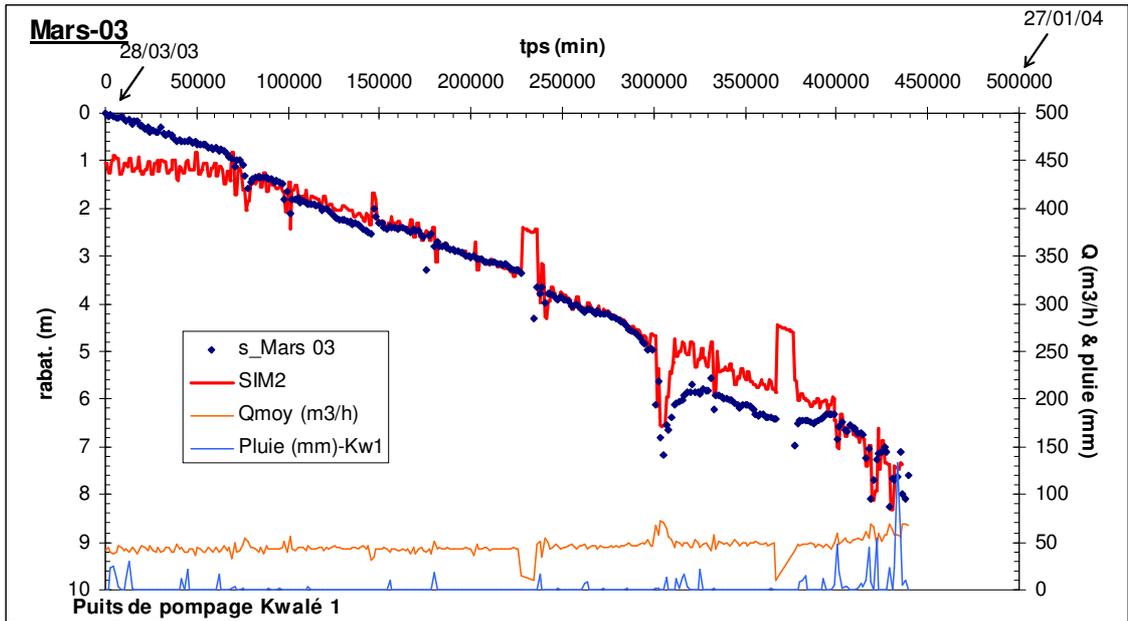
Annexe 1 : Fréquence mensuelle des mesures réalisées aux forages non exploités

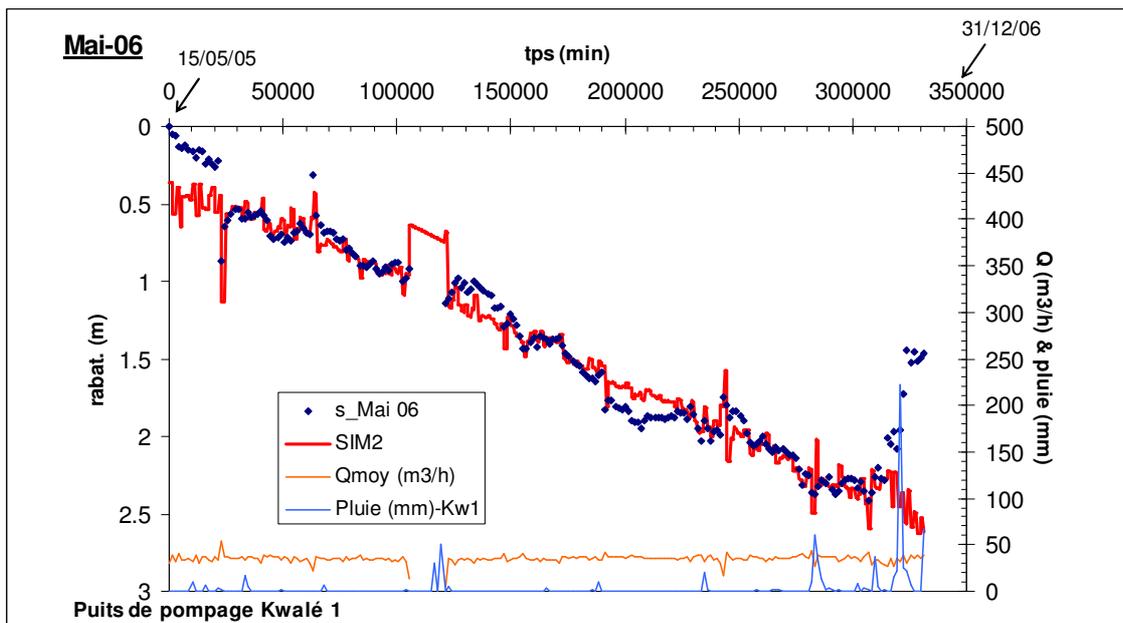
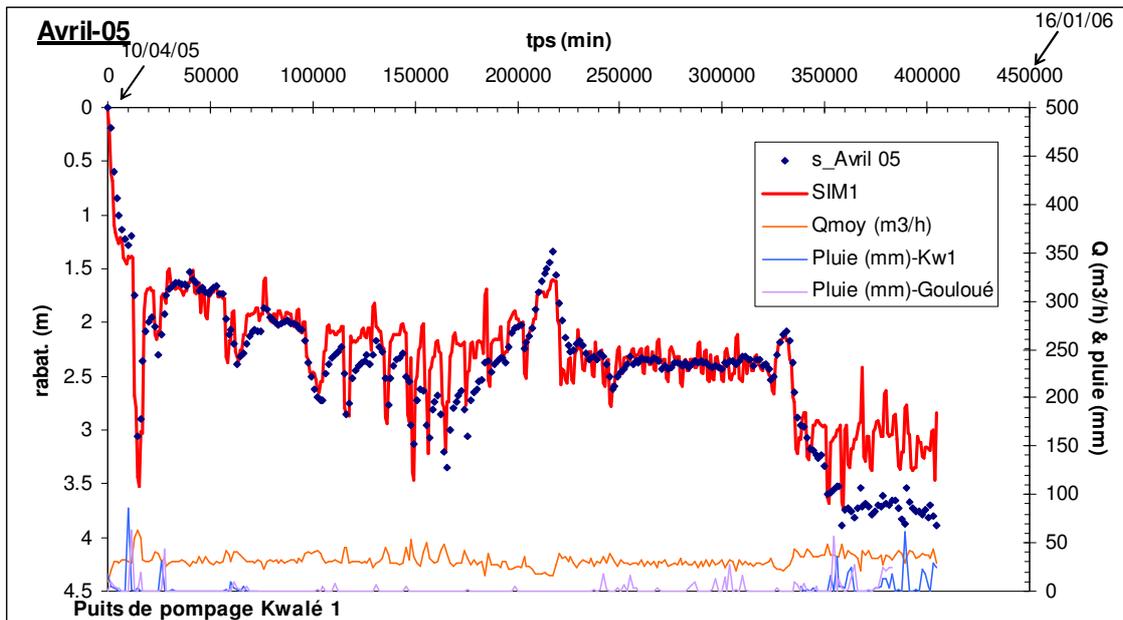
		Béja 1	Bouyouni- Bouyouni	Bouyouni- Méresse	Combani Kahani	Combani Mréréni	Gouloué1	Gouloué2	Ourovéni1
2000	janvier	0							
	février	0							
	mars	0							
	avril	0							
	mai	0							
	juin	0							
	juillet	0							
	août	0							
	septembre	1							
	octobre	1							
	novembre	1							
	décembre	1							
Total	4								
2001	janvier	1							
	février	1							
	mars	1							
	avril	1							
	mai	1							
	juin	1							
	juillet	1							
	août	1							
	septembre	1							
	octobre	1							
	novembre	1							
	décembre	1							
Total	12								
2002	janvier	2							
	février	3							
	mars	1							
	avril	0							
	mai	0							
	juin	0							
	juillet	0							
	août	0							
	septembre	0							
	octobre	0							
	novembre	0							
	décembre	0							
Total	6								
2003	janvier	0	0	0	0	0	0	0	0
	février	0	1	0	0	1	1	0	0
	mars	3	3	0	0	3	2	0	0
	avril	2	2	0	0	2	2	0	0
	mai	1	1	0	0	1	2	0	0
	juin	2	2	2	0	1	1	0	0
	juillet	3	3	3	0	3	4	4	0
	août	3	3	3	1	3	3	3	0
	septembre	3	4	4	3	3	3	3	0
	octobre	4	3	4	4	3	5	5	5
	novembre	3	2	3	4	3	3	3	3
	décembre	5	4	5	4	4	4	4	4
Total	29	28	24	16	27	30	22	12	

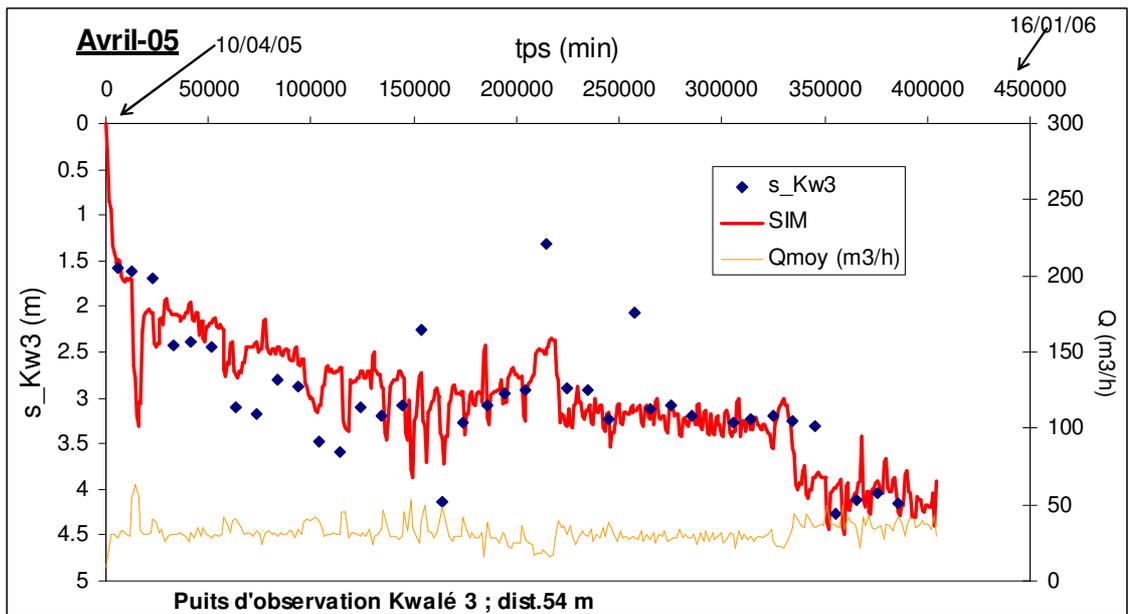
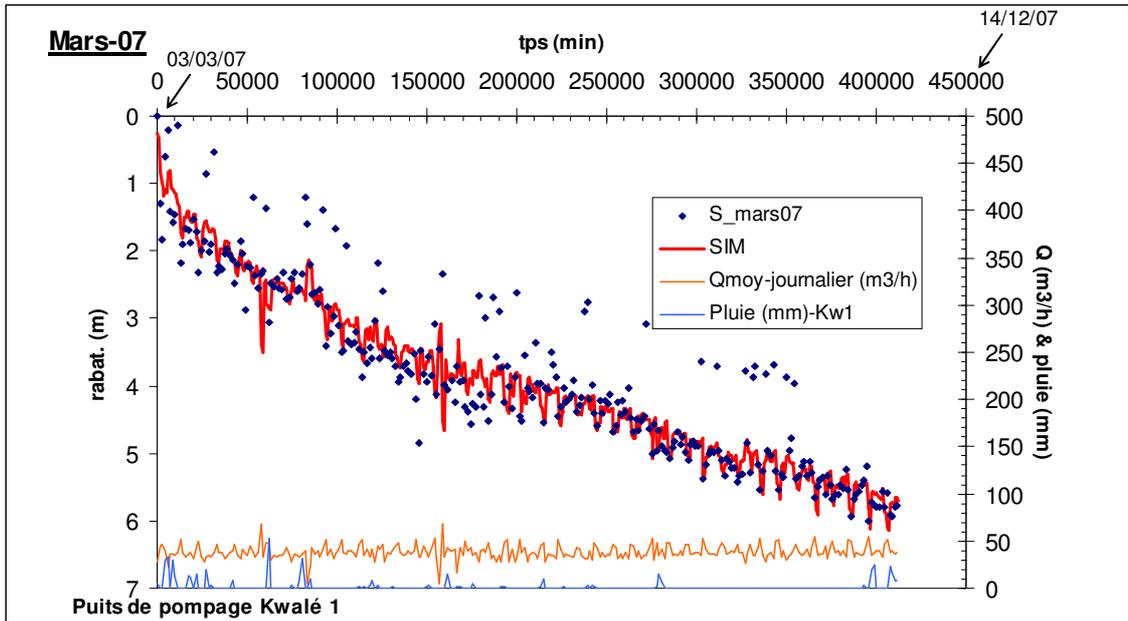
		Béja 1	Bouyouni- Bouyouni	Bouyouni- Méresse	Combani Kahani	Combani Mréréni	Gouloué1	Gouloué2	Oourovéni1
2004	janvier	3	4	7	4	8	7	8	4
	février	3	3	4	4	4	3	4	4
	mars	4	4	4	3	3	3	3	3
	avril	4	3	4	5	5	5	5	5
	mai	4	3	4	4	5	5	5	4
	juin	5	5	5	5	5	4	4	5
	juillet	4	4	4	4	4	5	5	4
	août	5	4	5	4	4	4	3	4
	septembre	2	4	4	5	5	5	5	5
	octobre	3	3	3	3	3	3	3	3
	novembre	4	5	4	4	4	4	4	4
	décembre	3	3	2	4	4	4	4	4
Total	44	45	50	49	54	52	53	49	
2005	janvier	1	1	1	1	1	1	1	1
	février	2	2	2	2	2	2	2	2
	mars	4	4	4	3	3	3	3	3
	avril	3	3	3	4	3	3	3	4
	mai	5	5	5	4	3	4	4	4
	juin	4	4	4	4	4	5	5	5
	juillet	4	4	4	4	4	4	4	4
	août	5	5	5	5	5	4	4	5
	septembre	4	4	4	4	4	5	5	4
	octobre	5	5	5	4	4	3	3	4
	novembre	4	3	4	4	5	4	3	5
	décembre	4	4	4	5	2	4	5	4
Total	45	44	45	44	40	42	42	45	
2006	janvier	4	3	3	3		2	2	3
	février	0	5	5	4		4	4	4
	mars	1	3	3	4		4	4	0
	avril	4	4	1	4		4	4	0
	mai	5	3	0	3		4	4	0
	juin	3	0	0	4		3	3	0
	juillet	5	0	0	4		4	4	0
	août	4	0	0	4		4	4	0
	septembre	4	0	0	3		3	3	0
	octobre	4	0	0	5		4	4	0
	novembre	4	0	0	4		4	4	0
	décembre	4	0	0	4		5	5	0
Total	42	18	12	46		45	45	7	
2007	janvier	5			4		5	5	
	février	4			4		4	4	
	mars	4			4		4	4	
	avril	4			4		4	4	
	mai	4			5		1	2	
	juin	3			3		0	0	
	juillet	1			1		0	0	
	août	0			0		0	0	
	septembre	0			0		0	0	
	octobre	0			0		0	0	
	novembre	0			0		0	0	
	décembre	0			0		0	0	
Total	25			25		18	19		

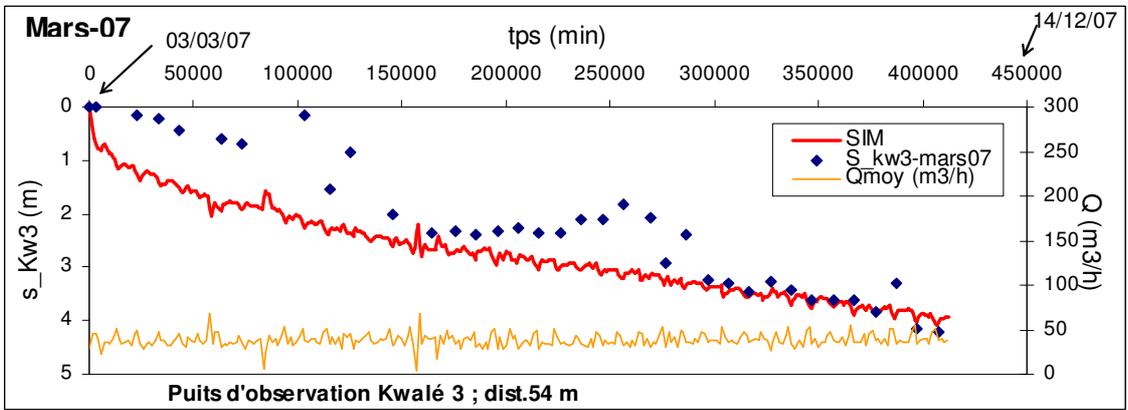
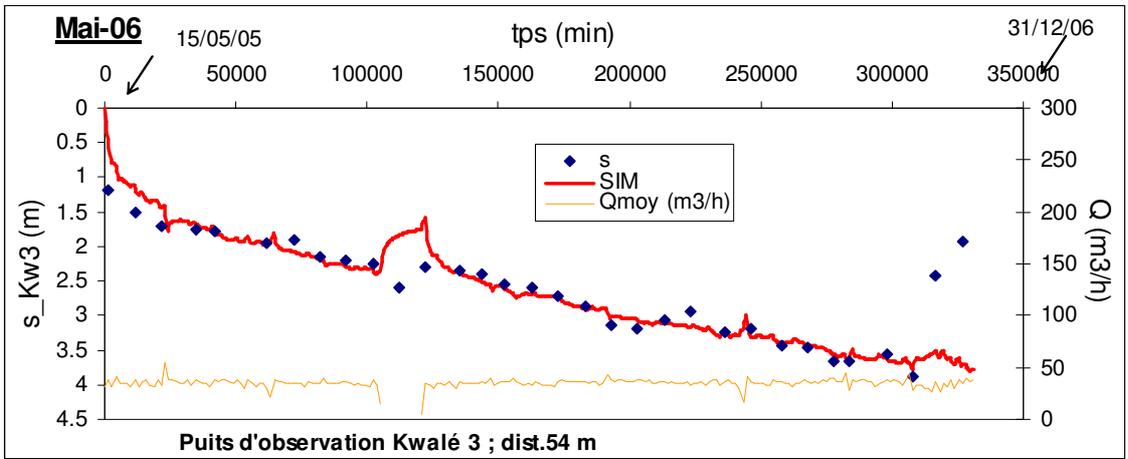
**Annexe 2 : Interprétation des rabattements en
période d'étiage au puits de pompage Kwalé 1 et
au puits d'observation Kwalé 3**











Annexe 3 : Calcul de l'évapotranspiration journalière (ETP)

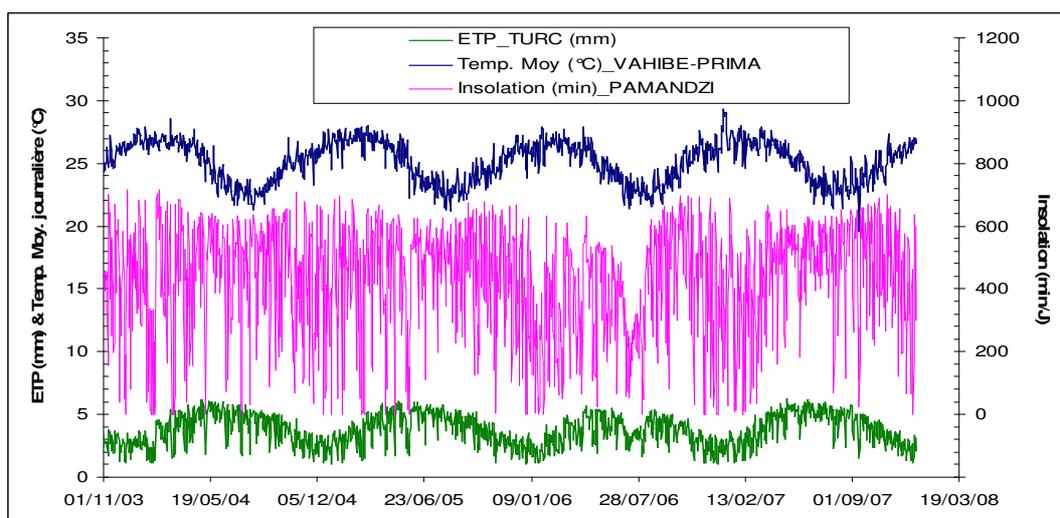
Le calcul de l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP) est réalisé à partir de la formule de Turc :

$$ETP = 0.013 \frac{\theta}{\theta + 15} (R_g + 50) \quad \text{avec} \quad R_g = I_{g_a} \left(0.18 + 0.62 \frac{h}{H} \right)$$

θ est la température journalière moyenne à la station de VAHIBE-PRIMA, R_g la radiation solaire globale, I_{g_a} la radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (valeur tabulée ; cf. tableau ci-dessus), h la durée réelle d'insolation fournie par la station de PAMANDZI, et H durée maximale d'insolation possible (comme proche de l'équateur elle supposé égale à 12h).

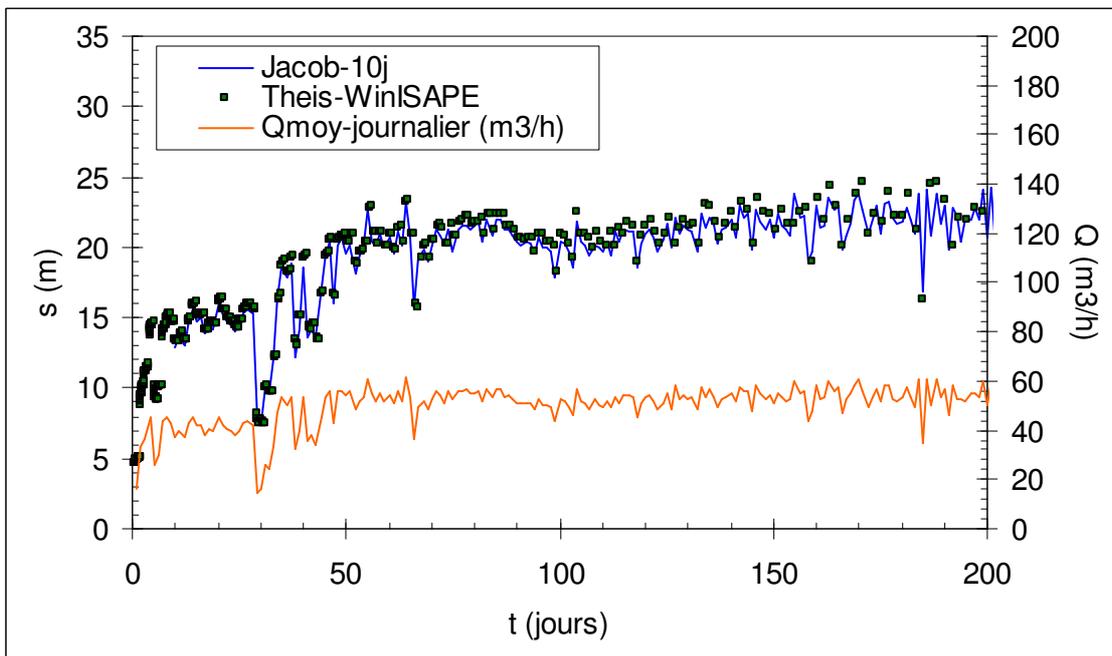
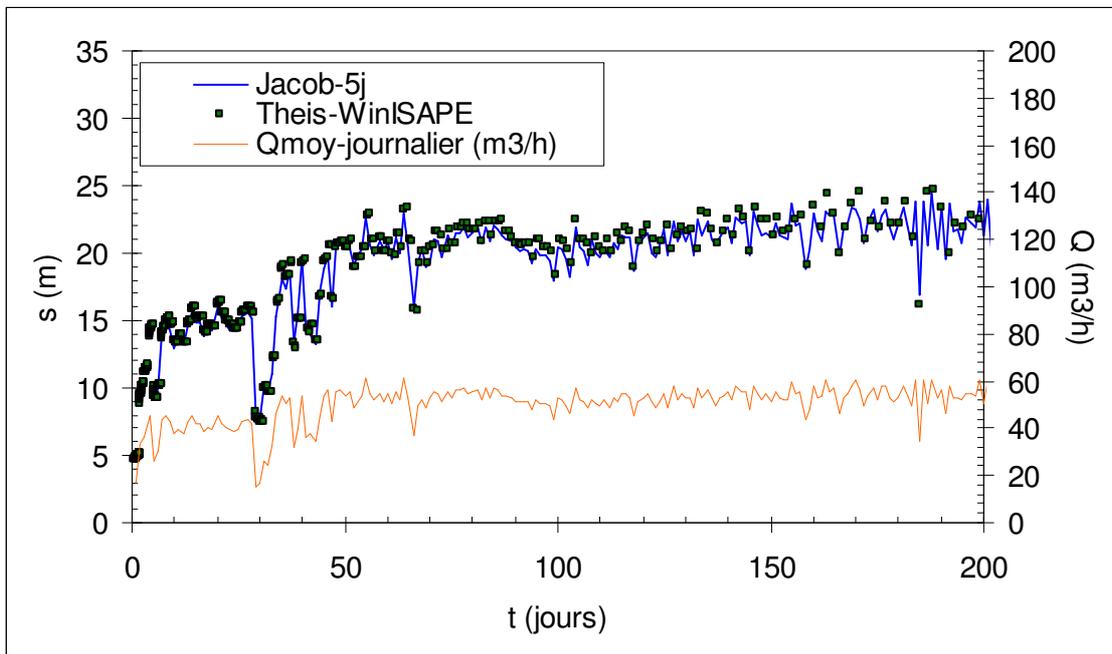
MOIS	I_{g_a} (Lat 30°N) Cal/cm ² /Jour
Jan	508
Fév	624
Mars	764
Avr	880
Mai	950
Juin	972
Juil	955
Aout	891
Sept	788
Oct	658
Nov	528
Déc	469

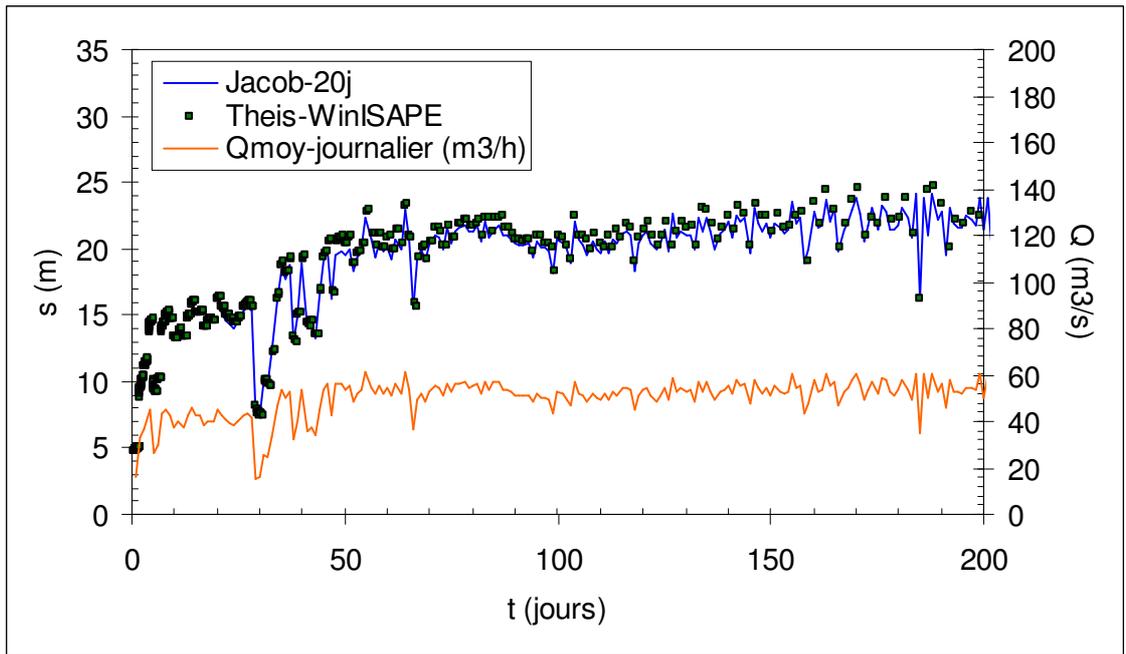
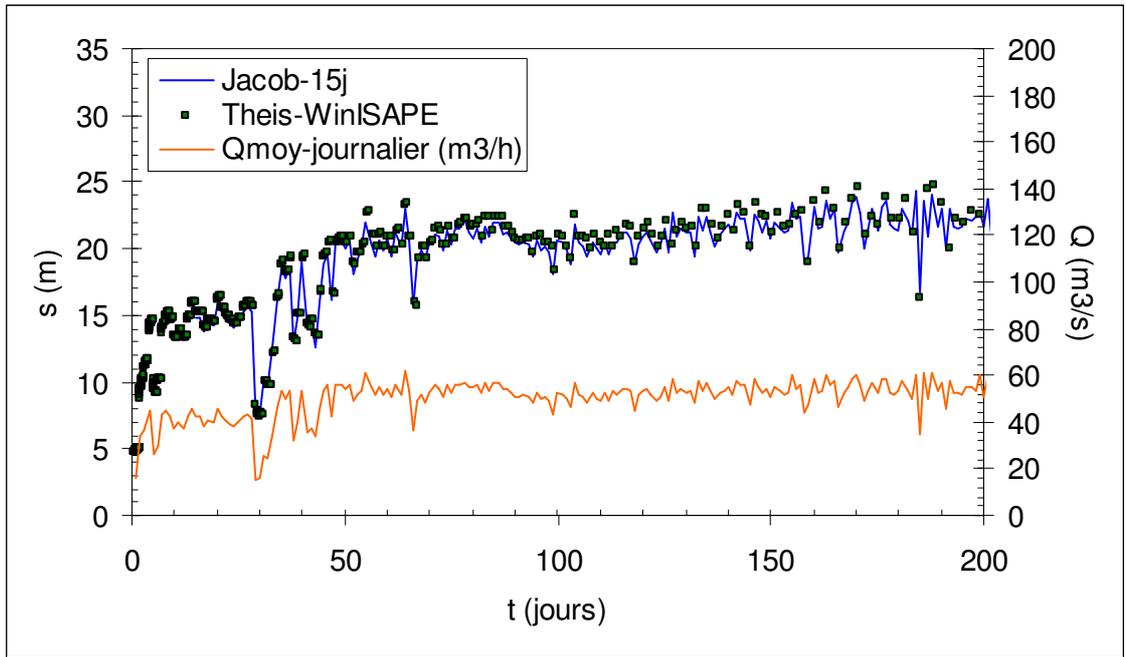
La figure ci-dessous représente l'évolution de l'ETP.



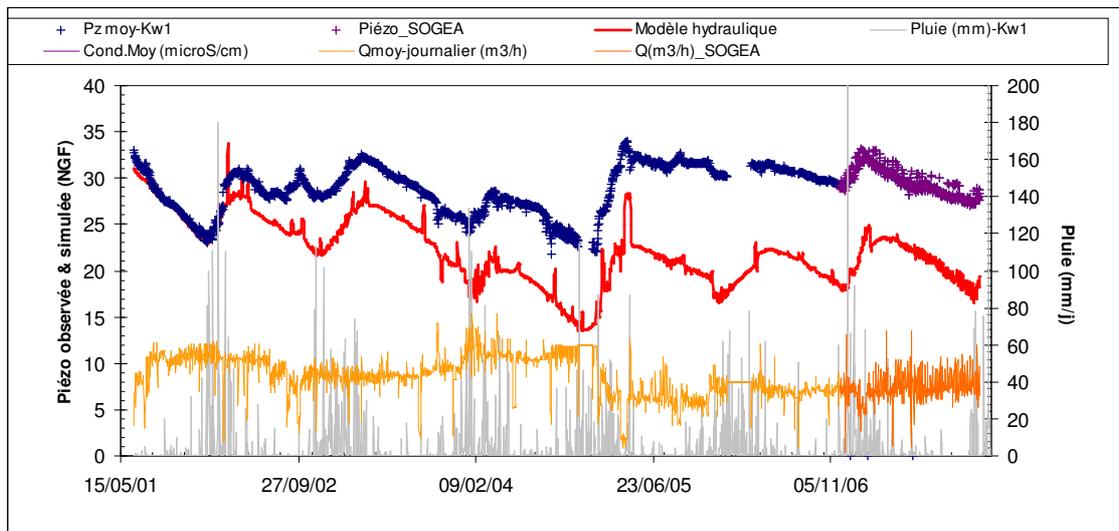
Annexe 4 : Fonction de production : comparaison Theis – Jacob calculé sur les 5, 10, 15 et 20 derniers jours

Caractéristiques aquifère/puits: $T : 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $S : 3.0 \cdot 10^{-2} (-)$; $r=0.108 \text{ (m)}$;
 $\rho_{dc}=3000 \text{ (m}^{-5}\text{s}^2)$.

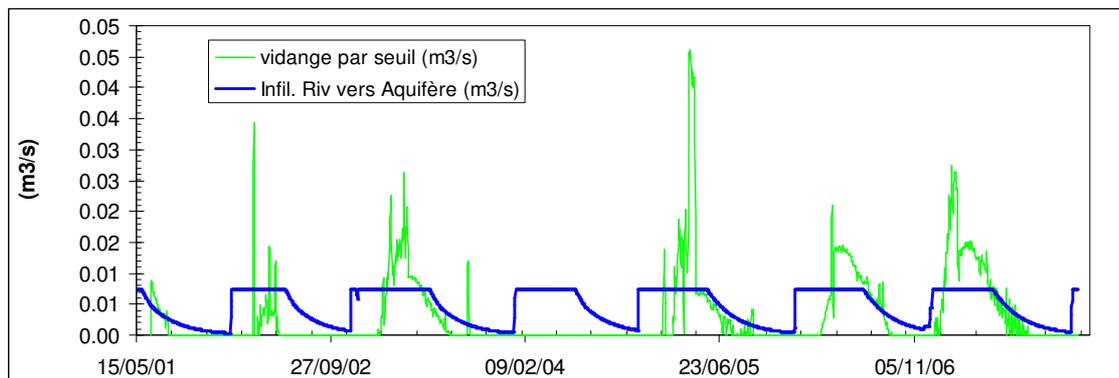




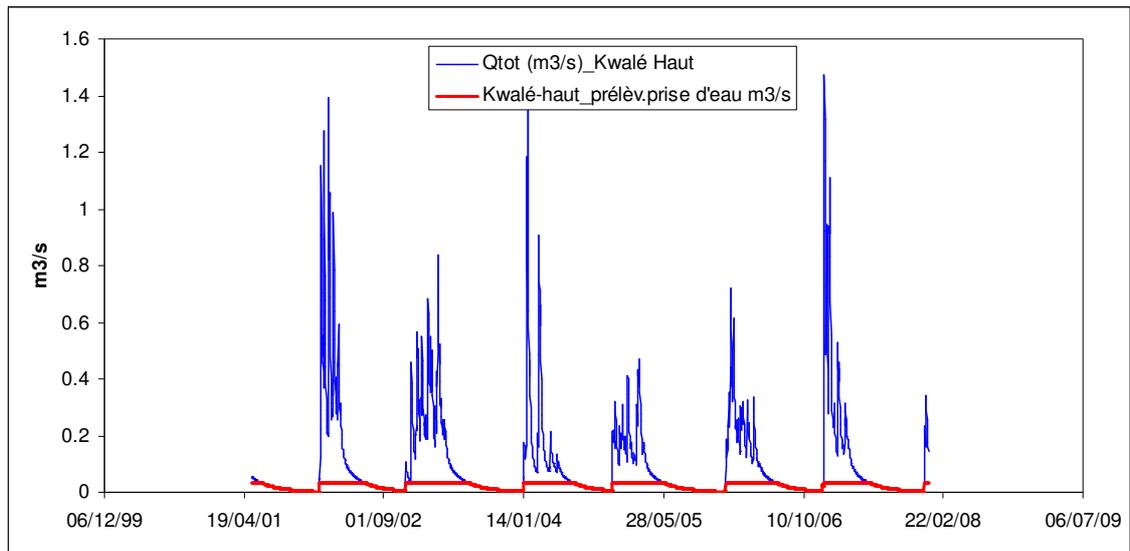
**Annexe 5 : Simulations –Graphiques
complémentaires du modèle hydraulique de
Kwalé**



Evolution de la piézométrie sans l'infiltration du cours d'eau. Paramètres identiques au tableau 2 sauf Seuil = 0 mm.



Evolution de l'infiltration du cours d'eau et de la vidange de l'aquifère exploité ; cas où les paramètres de l'infiltration sont constants sur toute la période. Moyenne des pertes par débordement $0.003\text{m}^3/\text{s}$.



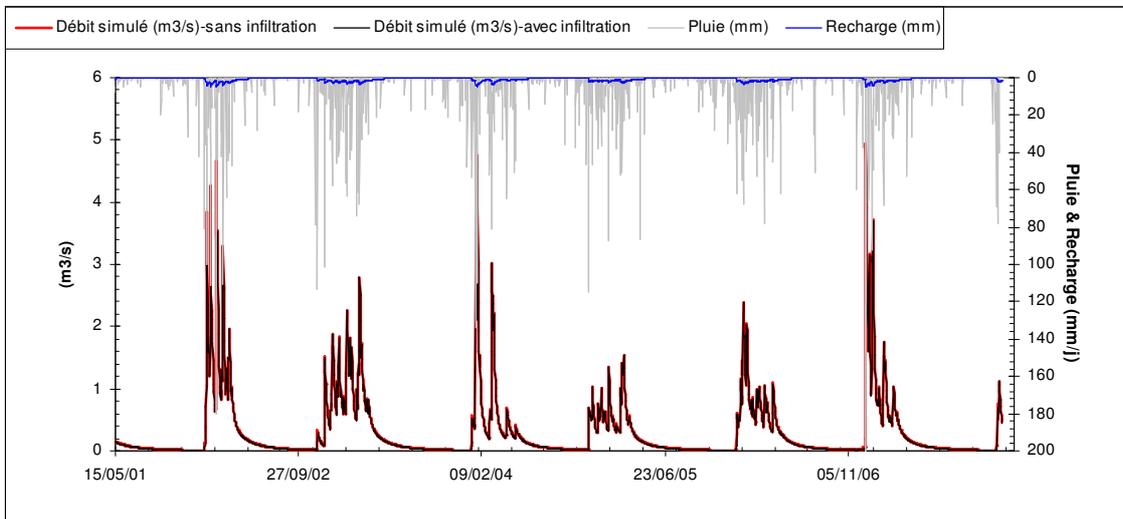
Modélisation des prélèvements dans le sein du cours d'eau à Kwalé-haut (rouge)
 Prélèvement de la prise d'eau : 500 000 m³/an.

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Recharge (mm)	Recharge (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infiltration rivière (m3)	Infiltr. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2001	185.5	7.7	7.0	8.81E+04	4.38E+05	2.80E+04	6.0%	1.73E+04	2.30E+05
2002	2214.5	1311.0	314.1	3.93E+06	1.48E+07	1.55E+05	1.0%	2.83E+04	4.08E+05
2003	1417.0	901.0	247.3	3.09E+06	1.11E+07	1.41E+05	1.3%	1.29E+05	3.82E+05
2004	2050.0	1029.3	287.5	3.59E+06	1.14E+07	1.60E+05	1.4%	0.00E+00	4.80E+05
2005	1178.5	485.3	164.8	2.06E+06	5.91E+06	1.35E+05	2.2%	1.49E+05	2.81E+05
2006	1952.5	1014.2	278.3	3.48E+06	1.13E+07	1.63E+05	1.4%	1.27E+05	3.17E+05
2007	1336.2	842.0	229.9	2.87E+06	9.85E+06	1.48E+05	1.5%	1.81E+05	3.27E+05

Bilan de la simulation ; cas où les paramètres de l'infiltration sont constants sur toute la période de simulation. Prélèvement de la prise en amont (Kwalé haut) : 500 000 m³/an.

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Recharge (mm)	Recharge (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infiltration rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2001	185.5	7.7	7.0	8.81E+04	4.38E+05	2.80E+04	6.0%	1.73E+04	2.30E+05
2002	2214.5	1311.0	314.1	3.93E+06	1.48E+07	1.55E+05	1.0%	2.83E+04	4.08E+05
2003	1417.0	901.0	247.3	3.09E+06	1.11E+07	1.41E+05	1.3%	1.29E+05	3.82E+05
2004	2050.0	1029.3	287.5	3.59E+06	1.14E+07	1.60E+05	1.4%	0.00E+00	4.80E+05
2005	1178.5	485.3	164.8	2.06E+06	5.82E+06	2.20E+05	3.6%	1.77E+05	2.81E+05
2006	1952.5	1014.2	278.3	3.48E+06	1.12E+07	2.45E+05	2.1%	2.10E+05	3.17E+05
2007	1336.2	842.0	229.9	2.87E+06	9.76E+06	2.33E+05	2.3%	2.56E+05	3.27E+05

Bilan de la simulation ; cas où les paramètres de l'infiltration sont différents à partir du 15-02-05. Prélèvement de la prise en amont (Kwalé haut) : 500 000 m³/an.



Modélisation des débits du cours d'eau à Kwalé. Cas « naturel » sans pompage. Deux simulations sont présentées : avec (noir) et sans infiltration (rouge) du cours d'eau.

PARAMETRES			
Surface BV	12.5	km2	
RESERVOIR RU			
RUMAX	100.0	mm	Déficit max sol
REVERVOIR H			
RUIPER	40.0	mm	seuil équi-ruiss-percolation
THG	55.0		tps demi-montée
REVERVOIR G			
TG1	66.0	jours	tps demi-tarissement
REVERVOIR R			
Seuil déb.R	2.4*	mm	seuil de débordement
TGM1-pertes	47.0*	jours	tps demi-tarissement
TGM2-rest cours d'eau	3.0*	jours	tps demi-tarissement
CAPTAGE AMONT			
BV captage	3.7	km2	bassin versant captage
Q_max	0.032	m3/s	débit max. pour écrêtage
REVERVOIR K			
h0	31.0	m	
pdc	1500.0	s2/m5	pertes de charges quadratiques
A	1340000.0	m2	Surface Res. K
S	0.027	-	emmagasinement
T	0.001	m2/s	transmissivité
CA	20.0	-	paramètre de forme
rw	0.2	m	rayon du puits
Seuil-res Kwalé	29.5	m	seuil de débordement
TG_Kwalé	72.0	jours	tps demi-tarissement (quand h> seuil)

Paramètres du modèle hydraulique ; cas « naturel » sans pompage. * dans le cas de la simulation sans pertes du cours d'eau, les trois paramètres du réservoir R sont nuls.

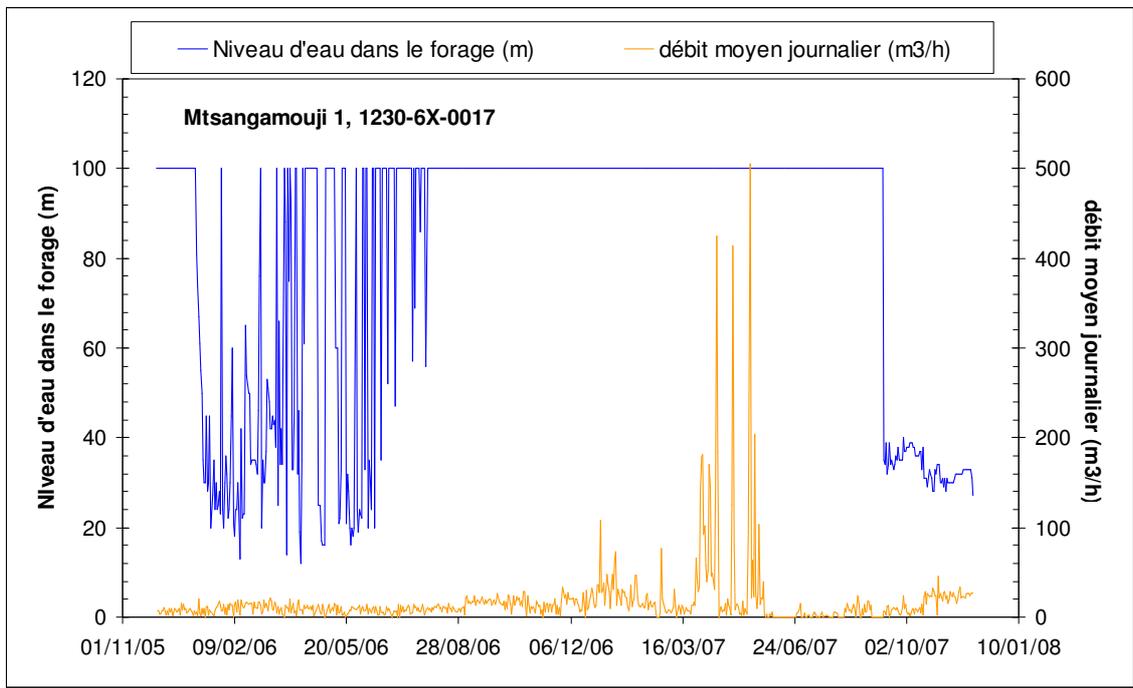
Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Recharge (mm)	Recharge (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infiltration rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2001	185.5	7.7	7.0	8.81E+04	4.38E+05	2.80E+04	6.0%	8.06E+04	0.00E+00
2002	2214.5	1311.0	314.1	3.93E+06	1.48E+07	1.55E+05	1.0%	4.83E+05	0.00E+00
2003	1417.0	901.0	247.3	3.09E+06	1.11E+07	1.41E+05	1.3%	5.60E+05	0.00E+00
2004	2050.0	1029.3	287.5	3.59E+06	1.14E+07	1.60E+05	1.4%	4.69E+05	0.00E+00
2005	1178.5	485.3	164.8	2.06E+06	5.91E+06	1.35E+05	2.2%	4.36E+05	0.00E+00
2006	1952.5	1014.2	278.3	3.48E+06	1.13E+07	1.63E+05	1.4%	4.75E+05	0.00E+00
2007	1336.2	842.0	229.9	2.87E+06	9.85E+06	1.48E+05	1.5%	4.73E+05	0.00E+00

Bilan de la simulation ; cas « naturel » sans pompage **avec infiltration** du cours d'eau.
Prise d'eau amont 500 000 m³/an.

Bilan Global	PLUIE (mm)	PluieEFF (mm)	Recharge (mm)	Recharge (m3)	Débit cours d'eau (m3)	Infiltration rivière (m3)	Infilt. rivière (%)	Vidange Aquifère (m3)	Pompage (m3)
2001	185.5	7.7	7.0	8.81E+04	4.55E+05	0.00E+00	0.0%	5.84E+04	0.00E+00
2002	2214.5	1311.0	314.1	3.93E+06	1.50E+07	0.00E+00	0.0%	3.50E+05	0.00E+00
2003	1417.0	901.0	247.3	3.09E+06	1.12E+07	0.00E+00	0.0%	4.00E+05	0.00E+00
2004	2050.0	1029.3	287.5	3.59E+06	1.15E+07	0.00E+00	0.0%	3.26E+05	0.00E+00
2005	1178.5	485.3	164.8	2.06E+06	6.03E+06	0.00E+00	0.0%	2.83E+05	0.00E+00
2006	1952.5	1014.2	278.3	3.48E+06	1.15E+07	0.00E+00	0.0%	3.23E+05	0.00E+00
2007	1336.2	842.0	229.9	2.87E+06	1.00E+07	0.00E+00	0.0%	3.23E+05	0.00E+00

Bilan de la simulation ; cas « naturel » sans pompage **sans infiltration** du cours d'eau.
Prise d'eau amont 500 000 m³/an.

**Annexe 6 : Données complémentaires au site de
Mtsangamouji**



Fluctuation du niveau d'eau et débit d'exploitation au forage Mtsangamouji 1 (1230-6X-0017) ; données SOGEA.