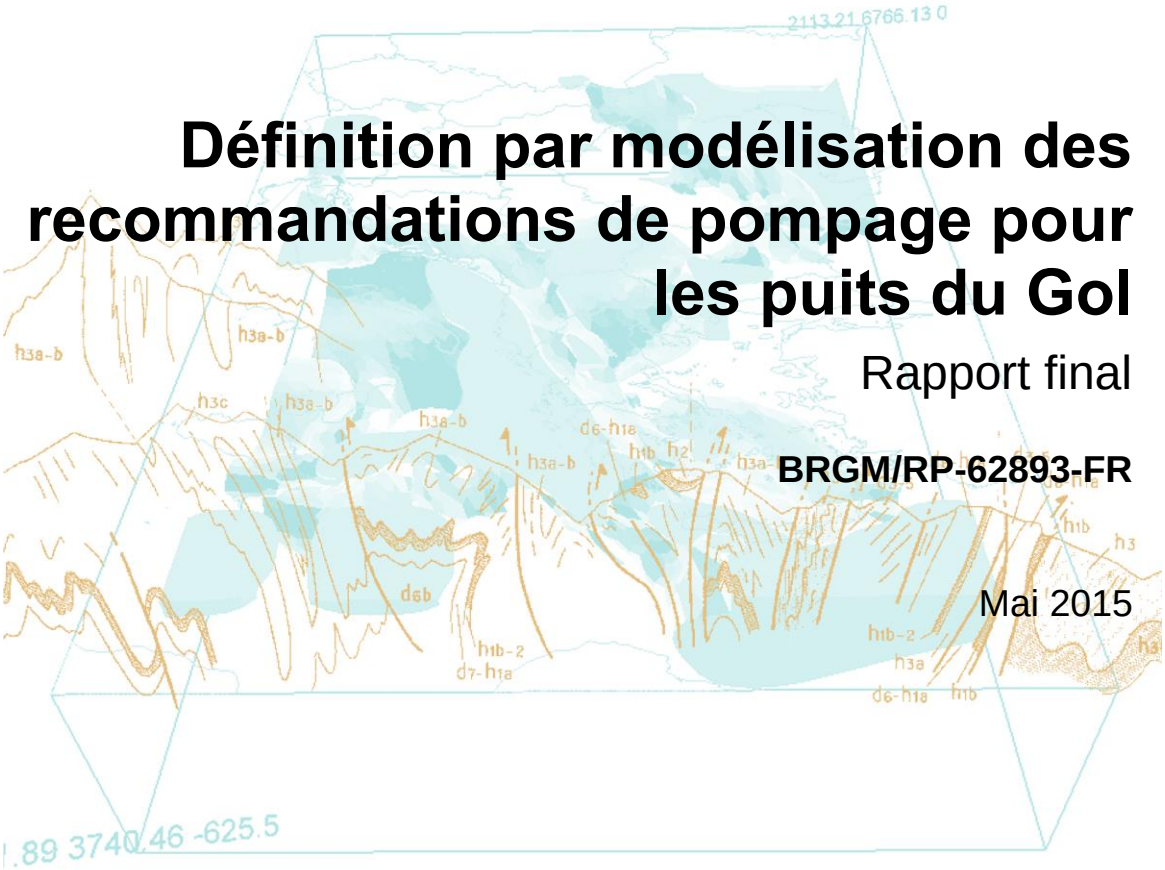
Document public



Définition par modélisation des recommandations de pompage pour les puits du Gol

Rapport final

BRGM/RP-62893-FR

Mai 2015

OFFICE DE L'EAU RÉUNION

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
RÉUNION

DÉPARTEMENT DE LA Réunion
www.cg974.fr

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Définition par modélisation des recommandations de pompage pour les puits du Gol

Rapport final

BRGM/RP-62893-FR

Mai 2015

S. Lanini, V. Petit

avec la collaboration de C. Leforgeais

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Y. Caballero	Nom : Bes de Berc S.
Date : 17/12/2013	Date : 22/01/2014
Signé	Signé

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 9001:2008.

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Gol, La Réunion, nappe littorale, modélisation, réservoirs, MATLAB-Simulink

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Lanini S., Petit V., Leforgeais C. (2013) - Définition par modélisation des recommandations de pompage pour les puits du Gol. Rapport final. BRGM/RP-62893-FR. 80 p. 30 ill.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'aquifère du Gol a été modélisé pour établir des règles de gestion de prélèvement d'eau souterraine pour les cinq puits du compartiment Est.

Les connaissances acquises lors de l'étude "Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol" ont été utilisées pour bâtir un schéma conceptuel des aquifères. Le modèle formalise ce schéma par un réseau de réservoirs. Il s'agit d'un modèle global, non spatialisé qui détermine les niveaux piézométriques dans les réservoirs "nappe supérieure" et "complexe de base". Le modèle a été calé et validé sur la période 01/01/2012 – 31/05/2013.

Les niveaux d'eau dans les puits sont reproduits fidèlement par le modèle. Les conductivités sont reproduites correctement dans les trois puits A, B et C et moins bien pour les puits du Gol et de Bois de Nèfles qui ont un comportement différent pour les évolutions de conductivité.

A l'aide de ce modèle calé, des prélèvements ont été simulés pour trois types d'années : année sèche, année normale et année humide. Pour qu'un scénario de pompage soit acceptable, il faut que la conductivité moyenne annuelle de l'aquifère supérieur soit inférieure à 500 µS/cm. C'est la valeur seuil de conductivité définie pour La Réunion ; au-delà, un risque d'intrusion saline est à suspecter. Les débits maximums de prélèvement proposés sont les suivants : 3.5 millions de m^3/an en année sèche, 4.5 millions de m^3/an en année normale et 5 millions de m^3/an en année humide. Le contexte du site (forte alimentation de l'aquifère, transmissivité très élevée, implantation correctement répartie des puits) ne rend pas possible des contraintes supplémentaires concernant la répartition du débit entre les ouvrages. Pour cela, une concertation entre les exploitants de l'aquifère du Gol est nécessaire. En complément, pour éviter les situations de crise, de seuils d'alerte sont proposés sur la conductivité et les niveaux piézométriques. Enfin, les contraintes classiques de prélèvement en aquifère côtier restent totalement pertinentes (exploitation régulière dans le temps et répartie dans l'espace).

Sommaire

1. Introduction 9

2. Schéma conceptuel 11

2.1. CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE 11
2.1.1. Contexte hydrogéologique régional (ANTEA, 2002) 11
2.1.2. Apports des approches hydrodynamiques et hydrochimiques 11

2.2. SCHEMA CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE 14

3. Modélisation 16

3.1. DESCRIPTION DU MODELE 16
3.1.1. Modèle de réservoirs 17
3.1.2. Calcul des charges aux ouvrages 19
3.1.3. Estimation de la conductivité électrique dans la nappe supérieure 20

3.2. CHRONIQUES D'ENTREES 21

3.3. MODELE NUMERIQUE 24

3.4. CALAGE ET VALIDATION 24
3.4.1. Paramètres et conditions limites 24
3.4.2. Comparaison observations / simulations 26

3.5. BILANS 31

4. Règles de gestion 35

4.1. CRITERES DE DEFINITION DES REGLES DE GESTION 35
4.1.1. Critère de gestion durable de l'aquifère du Gol 35
4.1.2. Critère de périodicité des contraintes 35
4.1.3. Critère de distribution spatiale des contraintes 36

4.2. ELABORATION DES REGLES DE GESTION 37
4.2.1. Situations climatiques 37
4.2.2. Scénarios de pompage 39
4.2.3. Exploration des scénarios 41

4.3. REGLES DE GESTION 46
4.3.1. Arrêtés préfectoraux en cours 46

4.3.2. Principes de base de gestion des aquifères côtiers 47
4.3.3. Suivi de l'exploitation 48
4.3.4. Les contraintes spécifiques de prélèvements 48
4.3.5. Simulations des règles de gestion sur les années 2008-2013 51
4.3.6. Les contraintes de seuil 54

5. Conclusion 57

6. Références 61

Liste des illustrations

Illustration 1 : Compartiments de la zone d'étude. 13
Illustration 2 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du site d'étude.Modélisation 15
Illustration 3 : Principe du calcul de l'infiltration 17
Illustration 4 :Relation entre la concentration en chlorures et la conductivité de l'eau dans l'aquifère du Gol (source : BRGM/RP-61486-FR) 20
Illustration 5 : Carte des isohyètes 2012 22
Illustration 6 : Chroniques pluviométriques fournies en entrée du modèle (pour calage) 22
Illustration 7 : Chroniques d'ETP fournies en entrée du modèle (pour calage) 23
Illustration 8 : Chroniques des débits exploités fournies en entrée du modèle (pour calage) 23
Illustration 9 : Comparaison des niveaux observés et simulés aux 5 puits d'exploitation (période 2012-2013) 28
Illustration 10 : Comparaison de la charge moyenne simulée dans la nappe supérieure et dans la nappe de base (période 2012-2013) à celles observées aux piézomètres disponibles. 29
Illustration 11 : Conductivités électriques observées et simulée dans la nappe supérieure (2012-2013) 30
Illustration 12 : Ratio "eau saumâtre/apport amont" en fonction de la situation climatique et du débit moyen annuel prélevé. 33
Illustration 13 : Schéma conceptuel amélioré 34
Illustration 14 : Précipitations à Pierrefonds (2005 – 2013) 38
Illustration 15 : Chroniques de référence des pompages 41
Illustration 16 : Variation journalière de la conductivité de la nappe supérieure pour les trois scénarios retenus. 42
Illustration 17 : Variation journalière du niveau d'eau aux puits pour les trois scénarios retenus 43

Illustration 18 : Conductivités moyennes simulées avec des consignes de prélèvements journalières, trimestrielles ou annuelles 45
Illustration 19 : Exemple de l'état des ressources d'août 2013 extrait des chroniques de l'eau Réunion (Office de l'eau Réunion). 50
Illustration 20 : Chroniques des prélèvements (en partie reconstituées) 52
Illustration 21 : Prélèvements réels comparés aux contraintes de gestion par trimestre. 52
Illustration 22 : Ecarts positifs et négatifs entre prélèvements et contraintes de gestion. 53
Illustration 23 : Logs de conductivité (PIB5D) 55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres calés pour la modélisation de la charge dans les réservoir A et B. 25
Tableau 2 : Paramètres de calcul de la charge en un point donné (Eq. 5). 25
Tableau 3 : Termes du bilan issu de la modélisation sur l'année 2012. 31
Tableau 4 : Propriétés hydrauliques des ouvrages de la plaine du Gol. 36
Tableau 5 : Prélèvements annuels 2010 – 2012. 39
Tableau 6 : Conductivités moyennes simulées avec des contraintes de débits maximum imposées au pas de temps journalier, trimestriel ou annuel 44
Tableau 7 : Contraintes de prélèvements trimestrielles et annuelles selon le type d'année climatique 49
Tableau 8 : Contraintes sur les volumes prélevables selon le type d'année climatique 50
Tableau 9 : Compilations des débits prélevés au Gol par trimestre et comparaison avec le prélèvements maximum proposés dans les règles de gestion. 51

1. Introduction

L'aquifère du Gol constitue une ressource en eau souterraine caractérisée par des propriétés hydrodynamiques remarquables. Le besoin de préserver cette ressource en eau exceptionnelle a conduit le Conseil général de La Réunion, l'Office de l'eau Réunion, la DEAL et le BRGM à financer ensemble une étude sur l'aquifère côtier du Gol. L'Office de l'eau Réunion ainsi que les acteurs locaux du Gol (Saphir, Usine sucrière, Centrale thermique du Gol, Veolia) ont également contribué par la mise à disposition de leurs données.

La première phase de l'étude (rapport BRGM/RP-61834-FR, Petit et al., 2013), réalisée en 2011-2012, a combiné plusieurs approches : acquisition de données (niveau d'eau, conductivité, chimie, isotopes…), ré-interprétation de pompages d'essai, réalisation de pompages d'essai en interférences multiples, interprétation hydrochimique et traitement du signal. La complémentarité des approches mises en œuvre a permis d'améliorer le modèle hydrogéologique conceptuel du site et d'en préciser les caractéristiques hydrodynamiques. Un des principaux apports de cette étude a été de démontrer que l'aquifère est constitué de deux compartiments hydrogéologiques distincts. Le premier entre les ravines Maniron et du Gol est homogène et transmissif, alors que le second à l'ouest est plus complexe et de transmissivité moindre. Il est exploité par les forages des Écumes et de Maniron. L'évolution de la salinité de l'aquifère semble modérée dans le temps et très variable selon les années sèches ou humides. Les variations de conductivité dans l'aquifère sont contrôlées par les pompages, ainsi que par l'océan à proximité des interfaces eau douce – eau salée.

Sur la base des résultats précédents, une modélisation du compartiment Est de l'aquifère du Gol a été entreprise dans le but de proposer des règles de bonne gestion des prélèvements. Elle est présentée dans ce rapport, qui dans le détail contient les développements suivants :

- Modélisation globale de l'aquifère, reposant sur la conceptualisation du fonctionnement du système aquifère, le développement d'un modèle mathématique d'interactions inter-puits puis le développement d'un simulateur numérique ;
- Simulation de l'exploitation de l'aquifère selon différents scénarios de pompage et scénarios climatiques en vue d'établir des règles pour la gestion concertée des prélèvements d'eau.

La description des chroniques acquises de juillet 2012 à juillet 2013 se trouve en Annexe 1.

2. Schéma conceptuel

Le modèle conceptuel initial a été établi à partir de synthèses et de bilans hydrologiques antérieurs. Il a été ensuite modifié pour parvenir à un schéma cohérent, sur lequel la modélisation numérique peut s'appuyer pour reproduire le fonctionnement hydrogéologique observé.

2.1. CARACTERISATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1.1. Contexte hydrogéologique régional (ANTEA, 2002)

La nappe du Gol est une nappe littorale, bordée à l'ouest par la nappe des Sables (commune d'Étang-Salé) et à l'Est par la Ravine du Gol. A l'amont (Nord-Est), le comportement des systèmes souterrains n'est pas connu au-delà de la côte 120 à 150 m NGR (forages Maniron, Aloès).

La partie supérieure de la nappe est libre, jusqu'à une trentaine de mètres de profondeur. La partie inférieure appelée complexe aquifère de base, est alimentée selon un axe Est-Ouest qui suit probablement la paléo-vallée sous les tufs, par la pluie qui s'infiltre au niveau du paléo-cirque des Makes. D'après une étude BCEOM (1989), ce flux serait de l'ordre de 1244 mm/an. Il s'y ajouterait un flux lié à l'infiltration en pied de planèze de l'eau de ruissellement, susceptible d'alimenter la nappe supérieure et le complexe de base. De plus, les nombreuses nappes perchées pourraient se comporter comme un vaste réservoir qui amortit les apports pluviaux d'altitude et les redistribue de façon très régulière à l'aquifère de base (ANTEA, 2002).

La pluviométrie moyenne interannuelle sur la plaine du Gol est comprise entre 750 et 760 mm/an. On considère que la recharge moyenne varie de 300 mm/an en année sèche à 500 mm/an en année humide. Les pluies supérieures à 60 mm/jour sur l'amont de la Planèze sont réputées ne pas participer à la recharge et ruisseler directement jusqu'à l'océan (ANTEA, 2002).

2.1.2. Apports des approches hydrodynamiques et hydrochimiques

La première partie du programme d'étude, dont les résultats sont détaillés dans Petit et al., (2013), a comporté une synthèse géologique bibliographique, une instrumentation des forages existant pour compléter le suivi piézométrique et de conductivité, l'interprétation de pompages d'essais (anciens et nouveaux), une analyse hydrogéochimique et l'exploitation des chroniques de données par traitement du signal (analyse corrélatoire, spectrale et en ondelettes). Ces différentes approches complémentaires ont mis en évidence l'existence de deux compartiments hydrogéologiquement indépendants dans la zone d'étude (voir schéma sur l'Illustration 1). Leurs principales caractéristiques sont rappelées ci-dessous.

Compartiment EST

- Ce compartiment est constitué de formations basaltiques récentes (phase IV) à fissuration relativement homogène.

- La minéralisation des eaux est faible à moyenne (230 à 270 mg/l). Les eaux présentent un faciès chimique de type bicarbonaté sodique ou chloruré sodique.

- L'interprétation des tests hydrauliques a montré que le secteur est relativement homogène, avec une transmissivité élevée (0.8 m^2/s), un emmagasinement de l'ordre de 5% et une anisotropie verticale importante ($T_{horizontale}=7*T_{verticale}$). Le réservoir est bordé par des limites étanches ou peu perméables à l'Est et à l'Ouest. Ces limites, de direction N050-060 et distantes de 2 km, ne sont pas précisément localisées mais correspondent certainement aux limites de la paléo-vallée.

- L'altitude de la recharge varie avec la profondeur, pouvant correspondre à une stratification des écoulements au sein de la paléo-vallée, les lignes de courant allant des plus hautes altitudes vers les plus grandes profondeurs en bas de versant.

Les pompages dans l'aquifère supérieur entrainent localement des infiltrations d'eau superficielle (peu salée mais contaminée en nitrates), plus élevées à proximité des ouvrages Bois de Nèfles et Usine du Gol (BdN et Usine Gol sur l'Illustration 1).

Compartiment OUEST

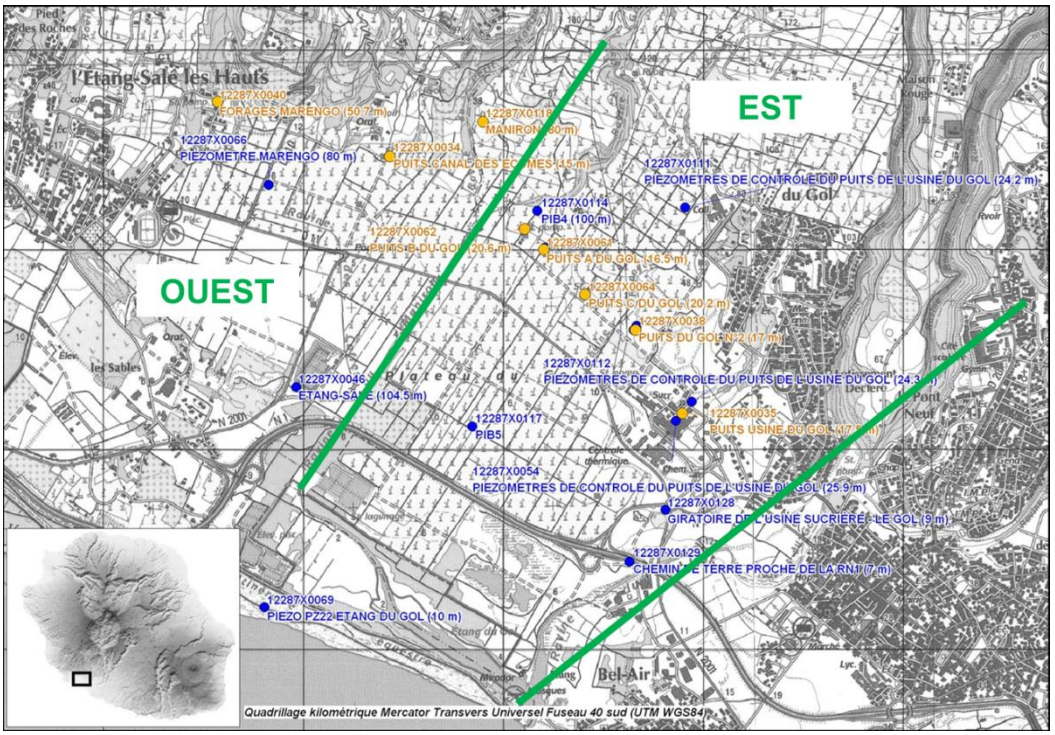
- Ce compartiment est constitué de formations volcaniques de phase III, à fissuration hétérogène.

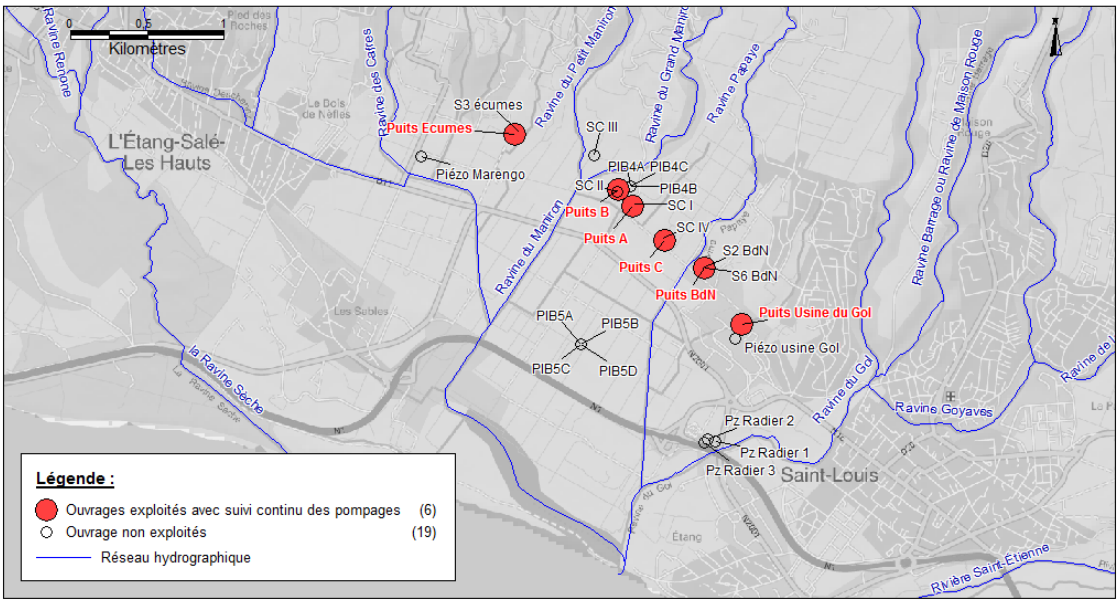
- La structure de l'aquifère est plus complexe et hétérogène que dans le compartiment Est. L'aquifère est compartimenté, avec une transmissivité variant de 0.07 à 0.2 m^2/s, et un emmagasinement de l'ordre de 0.013%.

- L'aquifère est faiblement impacté par l'intrusion saline.

- L'altitude de recharge est estimée à 1050 mètres.

La contribution de l'eau de mer à la composition de l'eau souterraine est de l'ordre de 0.6 % pour le compartiment Est. Elle est naturellement plus importante lorsqu'on se rapproche du littoral (PIB5), et également plus importante en profondeur qu'en surface.





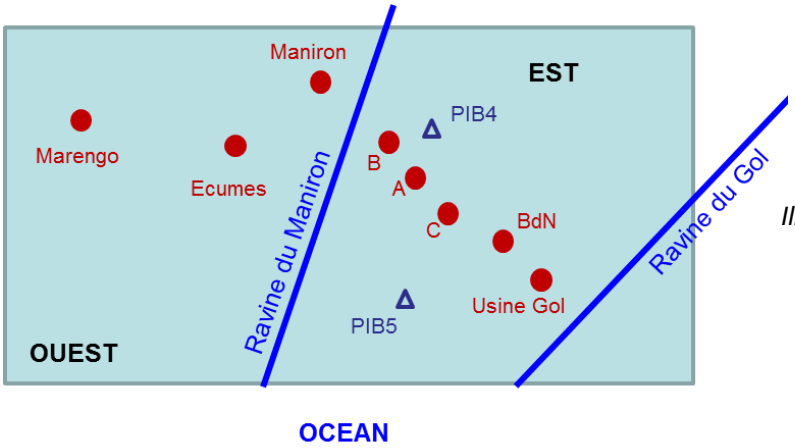


Illustration 1 : Compartiments de la zone d'étude.

Les ouvrages PIB4 et PIB5 sont des piézomètres en « flûte de pan » qui permettent de mesurer le niveau piézométrique à différentes profondeurs comprises entre 17 et 75 mètres. Les mesures fournies par les piézomètres PIB4A, PIB5A, PIB5B et PIB5C sont relatives à la nappe supérieure, alors que celles des piézomètres PIB4C et PIB5D concernent la nappe de base. Tous les puits d'exploitation (A, B, C, Gol et Bois de Nèfle) captent la nappe supérieure.

2.2. SCHEMA CONCEPTUEL HYDROGEOLOGIQUE

Le schéma conceptuel hydrogéologique et la modélisation concernent le compartiment Est, situé entre les limites étanches, la base des reliefs et la mer. Ce compartiment constitue une entité hydrogéologique complexe mais dont les limites identifiées forment le cadre hydrogéologique naturel du modèle.

En accord avec les éléments de caractérisation décrits précédemment, le modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique du compartiment Est du système du Gol identifie deux réservoirs superposés (Illustration 2): la « nappe de base » (B) et la « nappe supérieure » (A). Des échanges d'eau et de masse (salinité) sont possibles entre ces deux réservoirs, ainsi qu'entre chacun des réservoirs et l'océan qui constitue une limite à charge et salinité imposée. Le réservoir A est alimenté directement par la pluie efficace qui s'infiltre sur la plaine du Gol, ainsi que par une partie de l'eau qui s'infiltre dans le cirque des Makes et la planèze du Gol. Il reçoit de plus l'excédent d'irrigation non consommé par les plantations et est exploité par les forages A, B, C, Usine du Gol et Bois de Nèfles. Le réservoir B est également alimenté par l'eau qui s'infiltre en altitude, ainsi que par des flux provenant de réservoirs latéraux. Ces réservoirs, non précisément identifiés, pourraient correspondre aux nappes perchées situées à l'amont de la plaine du Gol, aux compartiments adjacents à la paléo-vallée, voire à la partie aval de la nappe de base. Ils ne sont pas modélisés, mais constituent une limite extérieure à charge constante et fournissent un flux d'eau orienté vers la nappe de base..

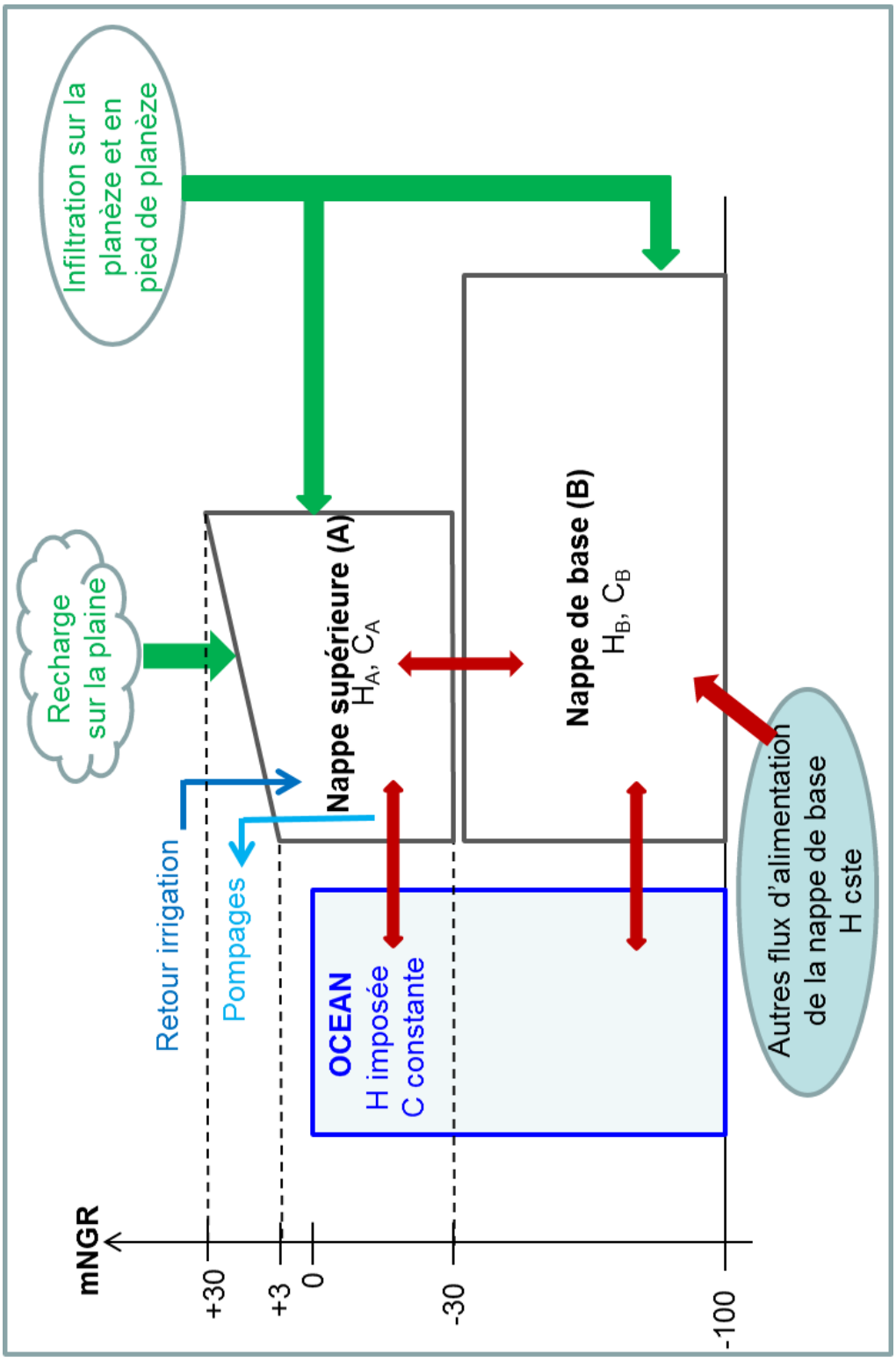


Illustration 2 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du site d'étude.Modélisation

3. Modélisation

L'objectif de la modélisation est d'aider à définir des règles de bonne gestion des prélèvements. Le modèle conceptuel établi précédemment propose une synthèse cohérente des connaissances, acquises au cours de cette étude et des études antérieures, sur le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère du Gol. Sur la base de ce modèle conceptuel et de quelques hypothèses fortes, la modélisation qui est présentée dans ce chapitre a consisté à décrire mathématiquement les écoulements au sein du système, pour ensuite développer un simulateur numérique capable de prédire la charge au niveau de chaque puits en fonction de contraintes extérieures telles que la pluviométrie ou le débit pompé.

3.1. DESCRIPTION DU MODELE

L'approche de modélisation retenue est celle des réseaux de réservoirs car elle parait la plus adaptée au niveau de connaissances acquises sur le système aquifère (manque de données spatialisées et de connaissance fine de la géométrie des formations aquifères). Il s'agit d'un modèle global, non spatialisé, qui réalise un bilan entrées/sorties de l'eau pour déterminer les variations du niveau piézométrique moyen dans les réservoirs A et B, en fonction des forçages extérieurs qui varient dans le temps (pluviométrie et pompages). Les transferts d'eau entre les réservoirs, ainsi qu'entre chaque réservoir et l'océan, sont contrôlés par les différences de charge.

L'hypothèse principale de cette approche est que les réservoirs sont homogènes, ce qui implique que les variables qui y sont calculées sont uniformes. Pour répondre à l'objectif de fixer des règles de gestion au niveau de chacun des puits et piézomètres d'observation, le modèle a donc été complété par une solution analytique qui permet de calculer la charge aux différents ouvrages (puits et piézomètres) du réservoir. Celle-ci est estimée à partir de la charge moyenne du réservoir, corrigée éventuellement des pertes de charges quadratiques liées aux pompages dans l'ouvrage et des pertes linéaires liées aux interactions avec les autres ouvrages.

Les modèles non spatialisés étant par définition incompétents pour décrire le phénomène de biseau salé en terme de salinité en tous points de l'aquifère, un module complémentaire a été introduit afin d'estimer indirectement la salinité moyenne du réservoir supérieur à partir des flux d'eau calculés par le modèle. La conductivité moyenne de la nappe supérieure est estimée à partir d'un modèle empirique sans équation de conservation.

3.1.1. Modèle de réservoirs

Le bilan des réservoirs indique qu'à chaque instant, la variation du volume d'eau dans le réservoir est égale aux débits entrants moins les débits sortants, soit :

$$s.S.\frac{\partial H}{\partial t} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out}$$

avec S la surface du réservoir (constante), s le coefficient d'emmagasinement, H le niveau d'eau (m NGR), Q_{in} et Q_{out} les flux entrants et sortants.

Les flux entrants dans le réservoir A sont constitués par la recharge directe sur la plaine, l'infiltration sur la planèze et le retour d'irrigation. Le flux sortant correspond à la somme des débits pompés aux 5 puits. Les échanges avec le réservoir B et avec l'océan peuvent être des entrées ou des sorties, selon le signe de la différence de charge entre les 2 réservoirs. Pour le réservoir B, les flux entrants sont l'infiltration sur la planèze et l'alimentation par des réservoirs annexes. Les échanges avec le réservoir A et avec l'océan peuvent être des entrées ou des sorties. Les modes de calcul ou d'évaluation de chacun de ces flux sont détaillés ci-dessous.

La recharge directe en plaine et l'infiltration sur la planèze sont calculées à partir des données météorologiques journalières (pluviométrie et ETP) selon le modèle de Thornthwaite (1948). Au pas de temps journalier, la recharge résulte de la vidange (selon une loi exponentielle) d'un réservoir intermédiaire entre le sol et la nappe saturée, qui est alimenté par la pluie efficace. Sur la plaine, le ruissellement est calculé comme une part constante de la pluie efficace. Sur la planèze, les pluies journalières inférieures à 60 mm s'infiltrent directement ou ruissellent puis s'infiltrent en pied de planèze. Au final, seule une faible part de ces pluies ne participe pas à la recharge (part supposée constante dans le modèle). En revanche, selon le modèle adopté par ANTEA (2002), on suppose que les pluies journalières supérieures à 60 mm ruissellent intégralement jusqu'à l'océan.

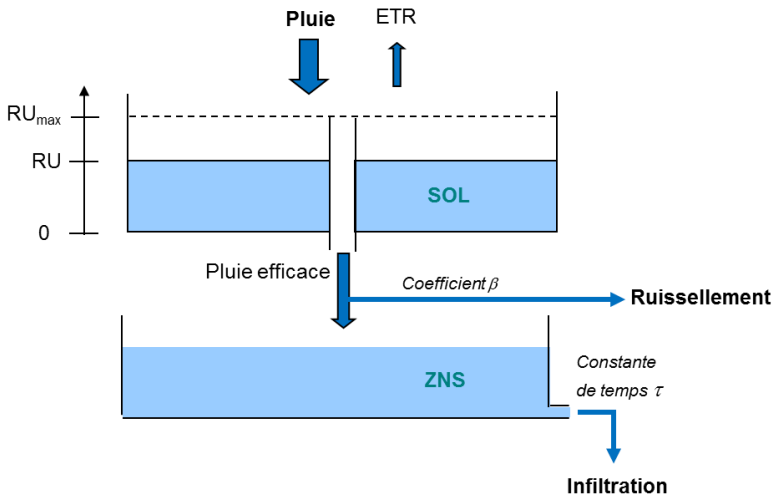


Illustration 3 : Principe du calcul de l'infiltration

Les paramètres de ce modèle de calcul de recharge sont la Réserve Utile maximale du sol, le Coefficient de ruissellement et la constante de temps de la loi de vidange. Une étude antérieure, basée sur la méthode de quantification spatiale sur des mailles de 1 km² (rapport BRGM/RP-55035-FR), fournit une valeur pour certains de ces paramètres :

- Réserve Utile maximale du sol : 90 mm pour la zone des Makes, et 150 mm pour la plaine du Gol.
- Coefficient de ruissellement : 64% de la pluie efficace ruisselle sur la zone des Makes (moyenne entre le cirque des Makes et la planèze du Gol), et 44% sur la Plaine du Gol.

Ces valeurs servent de valeur par défaut dans le modèle, mais peuvent être ajustées lors de la phase de calage du simulateur numérique.

Le moteur des échanges entre les réservoirs A et B est la différence de charge. Ainsi, les flux s'expriment selon une loi de type Darcy :

$$Q_{AB} = T_{AB}.(H_B - H_A) \quad \textit{[Eq. 1]}$$

$$Q_{A-Ocean} = T_A.(H_{oceanA} - H_A) \quad \textit{[Eq. 2]}$$

$$Q_{B-Ocean} = T_B.(H_{oceanB} - H_B) \quad \textit{[Eq. 3]}$$

$$Q_{annex-B} = T_{annex}.(H_{annex} - H_B)\ si\ H_{annex} \geq H_B, 0\ sinon \quad \textit{[Eq. 4]}$$

$$H_{annex} = cste$$

Les paramètres *T* ont la dimension d'une transmissivité. L'interprétation des essais de pompage (Petit et al., 2013) a fourni une estimation de la transmissivité du compartiment Est de l'ordre de 0.8 m^2/s (soit 69 120 m^2/j) qui sert de valeur par défaut pour le calage du modèle. La charge constante du réservoir annexe qui alimente la nappe de base est fixée par calage.

Compte-tenu de la salinité de l'océan (densité = 1.029), ce dernier constitue une limite non pas à charge nulle, mais à charge correspondant à la différence de charge entre une colonne d'eau salée et une colonne d'eau douce, colonne de 30 mètres pour les échanges avec la nappe supérieure (soit la profondeur de la base du réservoir, voir Illustration 2) et de 100 mètres pour les échanges avec la nappe de base. Ainsi, H_{oceanA}=0.87 m NGR et H_{oceanB}=2.9 m NGR.

Au cours de cette étude, le flux d'excédent d'irrigation a été supposé constant au cours du temps. Sa valeur est fixée à 1500 m^3/j, ce qui correspond à un taux de retour à la nappe de 42% (calage et dire d'expert) pour une surface irriguée de 2.9 km^2 et un apport d'irrigation moyen de 4500 m^3/ha/an (dire d'expert).

3.1.2. Calcul des charges aux ouvrages

Les pompages d'essai réalisés dans l'aquifère du Gol entre 1971 et 2006 ont été réinterprétés au cours de la première partie de cette étude (Petit et al., 2013). Il est apparu que le modèle classique de Theis, bien que reposant sur des hypothèses très simplificatrices (aquifère homogène isotrope et infini) permettait de reproduire correctement les courbes de rabattement observées aux puits d'exploitation (A, B, C, Gol et Bois de Nèfles). En revanche, pour interpréter les mesures aux piézomètres d'observations (PIB4 et PIB5) ainsi que les essais en interférence réalisés en 2011, des modèles plus complexes ont dû être développés, qui prennent en compte notamment l'existence de limites étanches à l'aquifère ou son anisotropie. Ces précédents résultats ont guidé la construction du modèle analytique qui a été intégré au modèle global afin qu'il puisse prédire, en plus de la charge moyenne du réservoir, la charge en chacun des cinq puits d'exploitation.

Le modèle analytique présenté ci-dessous est établi à partir de la formule de Jacob[1] et repose sur les hypothèses suivantes :

- Les limites étanches n'influencent que faiblement les variations de charge à l'échelle du pas de temps journalier : l'importante alimentation de l'aquifère et sa transmissivité élevée compensent la présence de ces limites.
- Le principe de superposition est appliqué pour adapter la formule de Jacob au cas d'un débit variable. Cette adaptation se fait cependant en supposant que l'influence du pompage demeure constante au cours d'un pas de temps (journalier), ce qui, in fine, permet d'écrire que le débit pompé le jour *j* influence uniquement le rabattement calculé ce même jour.
- Les influences croisées des pompages simultanés aux cinq puits sont prises en compte en appliquant le principe de superposition (on additionne alors les contributions de chaque pompage pour simuler l'évolution du rabattement).
- Les pertes de charges aux puits liées aux pompages sont quadratiques.

$$H_k(t) = H_A(t) - [\frac{2.3}{4\pi.T}.\sum_{i=1}^{n} Q_i(t).log\left(\frac{2.25.T.\Delta t}{(x_{ik})^2.S}\right)] + c_k.Q_k^2 \qquad \textit{[Eq. 5]}$$

Avec :

- H_k : la charge corrigée (des influences des autres ouvrages et des pertes de charge quadratiques) en chacun des 7 ouvrages du réservoir A (5 puits et 2 piézomètres d'observation)
- H_A : la charge moyenne calculée pour le réservoir A (m NGR)
- T : la transmissivité du réservoir (m^2/s)
- n=5 : le nombre de puits exploités simultanément dans le réservoir
- Q_i : le débit exploité au puits i (m^3/s)
- Δt : le pas de temps du modèle (1 jour)
- x_{ik} : la distance entre les ouvrages i et k

[1] La formule de Jacob est une approximation logarithmique de la solution analytique décrivant l'écoulement transitoire de l'eau dans un aquifère vers un puits pompé à débit constant.

- s : le coefficient d'emmagasinement du réservoir A
- c_k : le coefficient de pertes de charge au puits

Les valeurs des paramètres s, T et c_k, déterminées lors de l'interprétation des essais de pompage, servent de valeurs par défaut et peuvent être modifiées lors du calage.

3.1.3. Estimation de la conductivité électrique dans la nappe supérieure

L'Illustration 4 issue de Petit et al., (2013), permet de prendre pour hypothèse une relation linéaire entre la concentration en chlorures et la conductivité électrique dans la nappe supérieure. Les fortes valeurs de chlorures sont légèrement surestimées par rapport à la conductivité sans remettre en cause la relation linéaire.

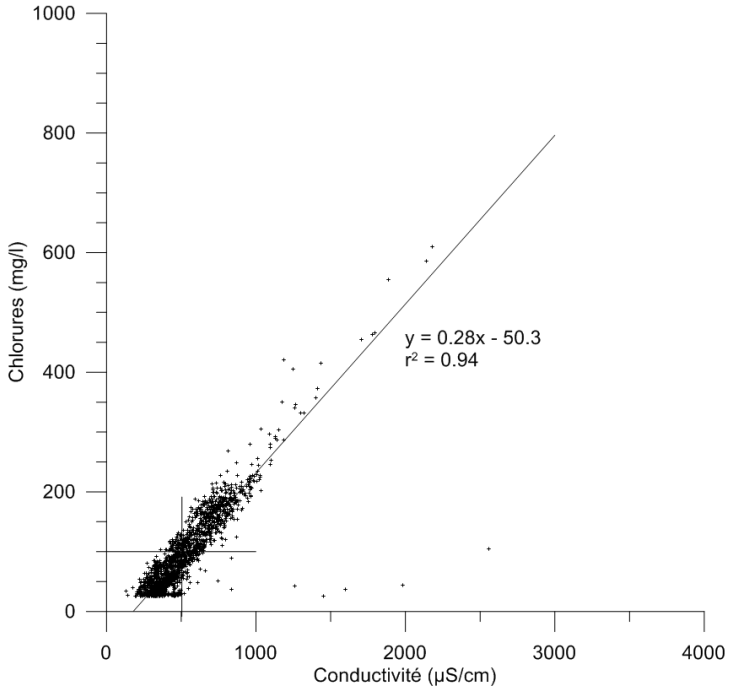


Illustration 4 :Relation entre la concentration en chlorures et la conductivité de l'eau dans l'aquifère du Gol (source : BRGM/RP-61486-FR)

Pour estimer la concentration en chlorures dans la nappe supérieure, à défaut de pouvoir appliquer un modèle global de bilan, on a cherché une formule empirique qui traduise le fait que les chlorures sont apportés par des flux d'alimentation autres que la recharge, qui sont d'autant plus importants que le débit pompé est élevé. Il est apparu possible d'estimer la conductivité dans la nappe supérieure, en utilisant le flux d'eau de la nappe de base vers la nappe supérieure. La formule suivante a donc été adoptée dans le modèle :

$C(t)=Crech+alfa.Q_{AB}$ *si* $Q_{AB}>0$ *(flux de B vers A)* *[Eq. 6]*

avec C(t), la concentration en chlorure dans la nappe supérieure ; Crech, la concentration en chlorure de la recharge et alfa, un paramètre de calage.

3.2. CHRONIQUES D'ENTREES

Pour prédire le niveau piézométrique en chaque puits au pas de temps journalier, le modèle utilise des chroniques de pluviométrie, d'évapo-transpiration potentielle et de débits pompés.

Pour la pluie, parmi les stations météorologiques existantes dans le sud de l'île, nous avons choisi les deux stations les plus proches des zones sur lesquelles la recharge doit être calculée (plaine des Makes et plaine du Gol) en apportant éventuellement une correction aux données pour tenir compte de l'altitude. Ainsi, la station la plus proche de la plaine des Makes est celle de "Le Gol Les Hauts", située à 365 m NGR entre la Plaine du Gol et la zone de recharge. D'après la carte des précipitations de l'année 2012 (Illustration 5) la pluviométrie annuelle sur la plaine des Makes a été de 1000 mm, contre 764 mm mesurés à la station « Le Gol Les Hauts". Un facteur correctif de 1.3 (1000/764) est donc appliqué aux données fournies par la station « Le Gol Les Hauts » qui sont utilisées pour le calcul de la recharge sur la plaine des Makes. Pour la zone de la Plaine du Gol, les chroniques pluviométriques de la station Pierrefonds- Aéroport peuvent être utilisées sans correction.

Les seules chroniques d'ETP disponibles à proximité et au pas de temps journalier sont celles de la station de Pierrefonds-Cirad. Elles ont donc été utilisées pour le calcul de la recharge sur les deux zones. Pour l'application à la zone des Makes, une correction tenant compte du gradient de variation de l'ETP avec l'altitude (formule du Cirad, JL Chopart) a été appliquée en considérant 1400 m d'écart entre l'altitude du poste et l'altitude moyenne de la recharge.

Les chroniques de débits journaliers pompés en chacun des cinq puits d'exploitation sont fournis par la SAPHIR (pour les puits A, B et C d'usage agricole) et par les exploitants pour les puits Gol et Bois de Nèfles (usage industriel).

L'ensemble des chroniques utilisées pour les simulations de calage du modèle sur la période 2011-2013 est représenté sur les Illustration 6 à Illustration 8.

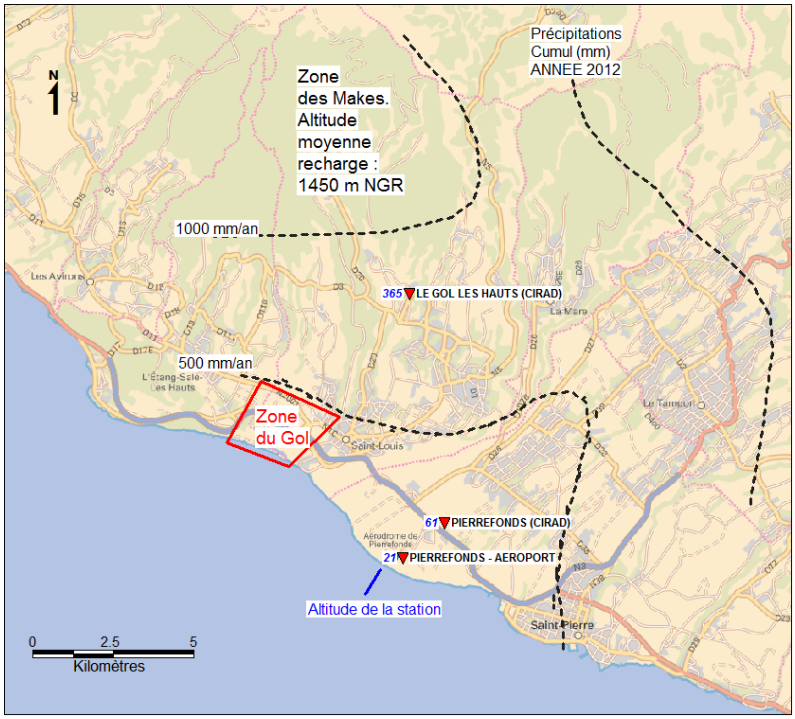


Illustration 5 : Carte des isohyètes 2012

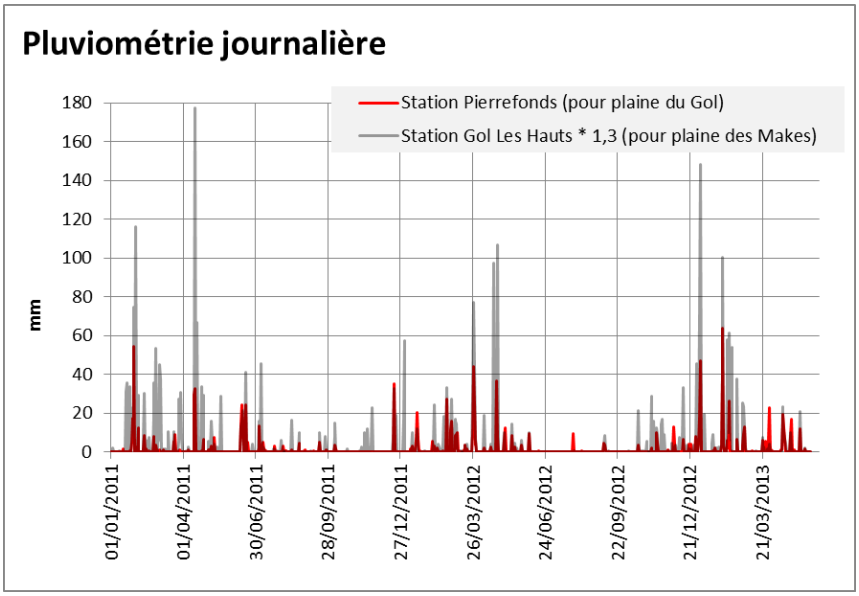


Illustration 6 : Chroniques pluviométriques fournies en entrée du modèle (pour calage)

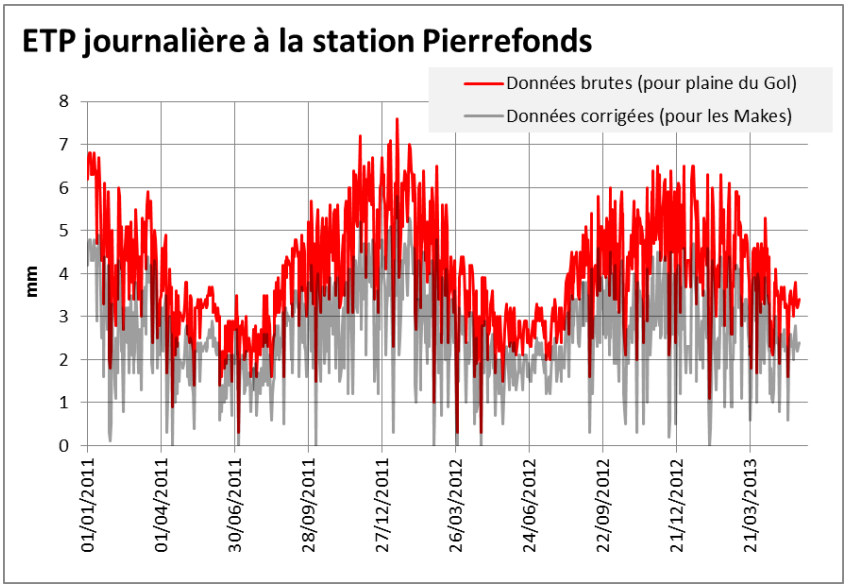


Illustration 7 : Chroniques d'ETP fournies en entrée du modèle (pour calage)

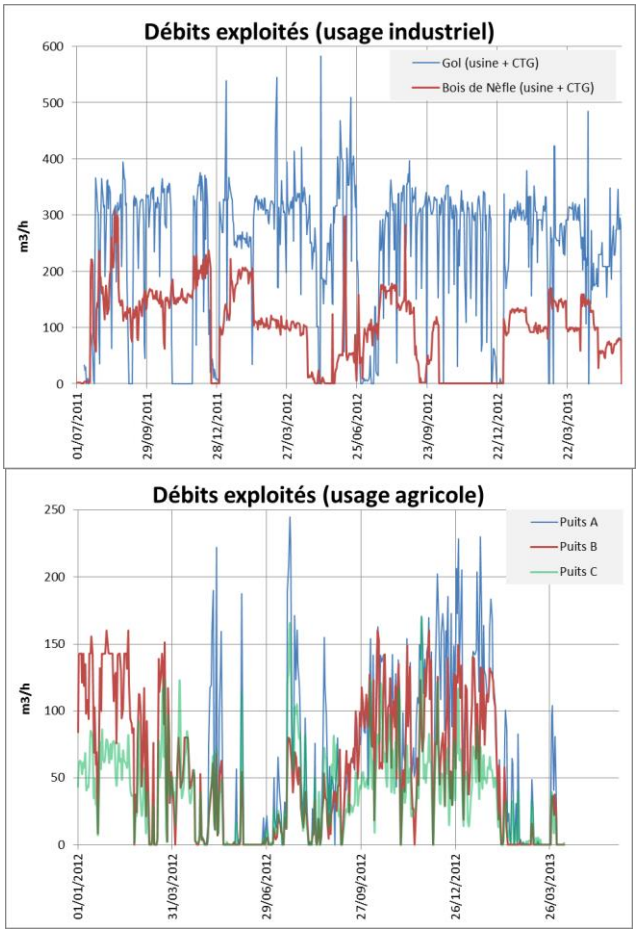


Illustration 8 : Chroniques des débits exploités fournies en entrée du modèle (pour calage)

3.3. MODELE NUMERIQUE

Sur la base du modèle conceptuel et des équations décrites précédemment, un modèle numérique a été développé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink© (version R2013a).

Pour la mise en œuvre du simulateur, que ce soit dans les phases de calage ou d'exploration de scénarios, les paramètres numériques sont les suivants : pas de temps fixe de 1 jour et solveur d'ordre 3 pour la résolution des équations différentielles.

3.4. CALAGE ET VALIDATION

Pour caler et valider le modèle, on dispose des chroniques piézométriques et de conductivité électrique aux différents ouvrages au pas de temps journalier sur la période 01/01/2012 – 31/05/2013.

Le modèle est initialisé sur l'année 2011, puis calé en comparant les simulations et les observations sur l'année 2012. Les cinq premiers mois de l'année 2013 servent de période de validation.

3.4.1. Paramètres et conditions limites

Les valeurs de différents paramètres du modèle global qui ont été retenues à l'issue de la phase de calage sont regroupées dans le Tableau 1. Lorsqu'elle existe, la valeur de référence est rappelée.

Paramètre	Unité	Valeurs de référence[2]	Valeur retenue
Surface Réservoir A	km^2	5	5
Surface Réservoir B	km^2	20	20
Surface Réservoir Planèze	km^2	50	50
Coefficient emmagasinement (A et B)		5%	5%
Coefficient d'échange entre A et B (T_{AB})	m^2/j	69120	70000
Coefficient d'échange des réservoirs annexes vers B (T_{annex})	m^2/j	69120	70000
Coefficient d'échange entre A et océan (T_A)	m^2/j		6666
Coefficient d'échange entre B et océan (T_B)	m^2/j		33333

[2] Valeurs mesurées ou estimées par ailleurs, voir §3.1

RU max plaine du Gol	mm	150	75
RU max plaine des Makes	mm	90	90
Coefficient de ruissellement plaine du Gol		44%	44%
Taux d'infiltration total sur la Planèze[3] (directe + infiltration en pied de planèze)			95%
Constante de temps de vidange du réservoir intermédiaire pour le calcul de la recharge sur la planèze	jour		730
Constante de temps de vidange du réservoir intermédiaire pour le calcul de la recharge sur la plaine du Gol	jour		90
Part de l'infiltration de la planèze qui alimente le réservoir B			50%
Part de l'infiltration de la planèze qui alimente le réservoir A			50%
Paramètre de la loi empirique de calcul de la conductivité	mol.j/m^6		0.0003

Tableau 1 : Paramètres calés pour la modélisation de la charge dans les réservoir A et B.

Les paramètres supplémentaires nécessaires pour le calcul de la charge, transmissivité T et coefficient de pertes de charge C, en chaque ouvrage, sont présentés dans le Tableau 2.

	A	**B**	**C**	**Gol**	**BdN**	**PIB4**	**PIB5**
T (m^2/s)	**0.1**	0.8	0.8	**0.6**	0.8	0.8	0.8
C (m^{-5}·s^2)	40	1680	**250**	**80**	24		

Tableau 2 : Paramètres de calcul de la charge en un point donné (Eq. 5).

Les valeurs en gras sont celles qui ont été modifiées par rapport aux valeurs de référence lors de la phase de calage. La valeur par défaut de la transmissivité est de 0.8 m^2/s pour tout le réservoir. Le coefficient de pertes de charge par défaut est de 195 m^{-5}·s^2 pour le puits C, et de 52 m^{-5}·s^2 pour le puits du Gol.

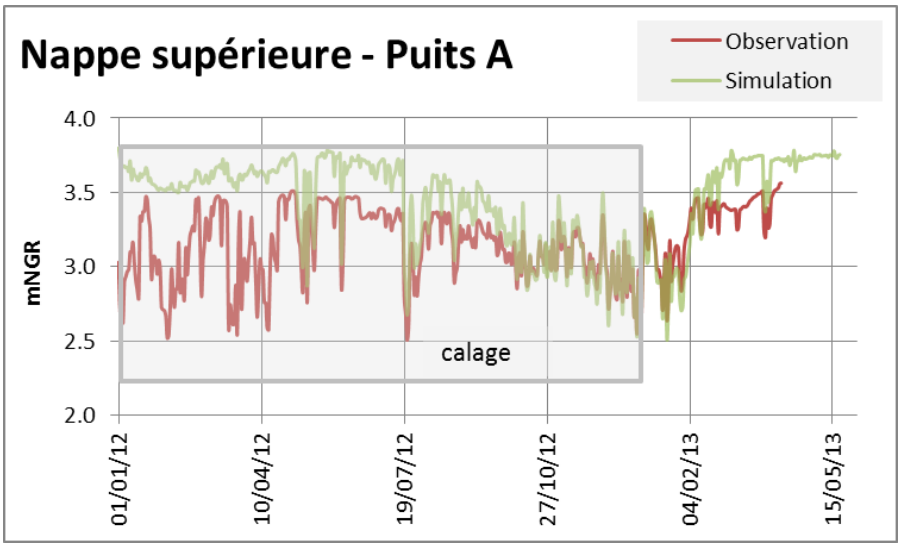
Les conditions limites imposées sont les suivantes :

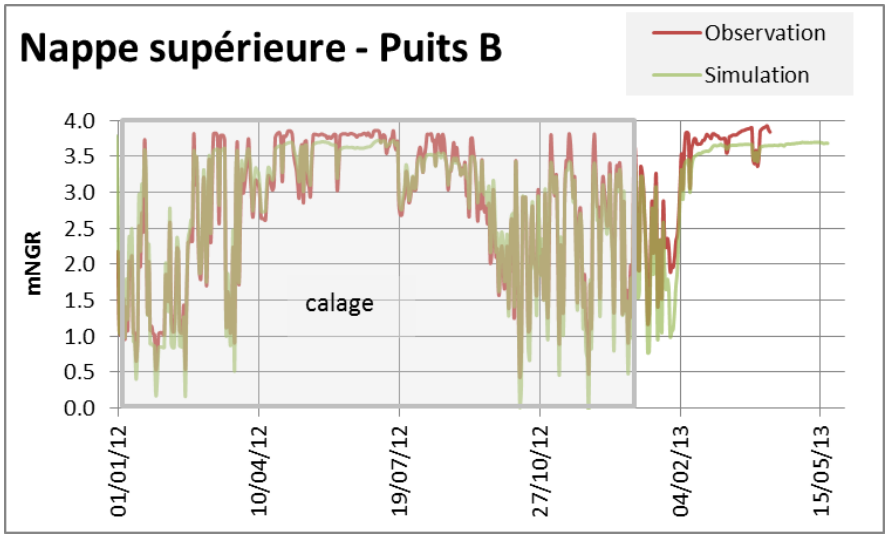
[3] Pour les pluies journalières inférieures à 60 mm

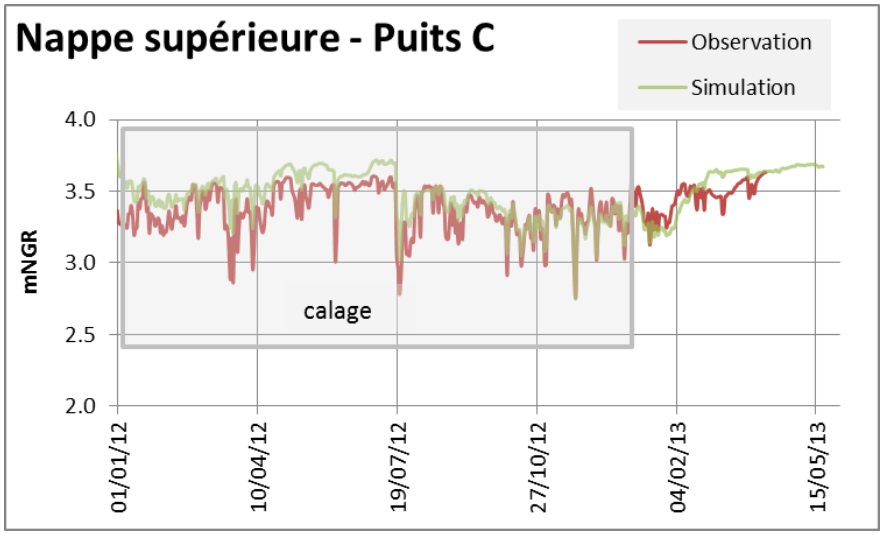
- les réservoirs annexes qui alimentent la nappe de base ont une charge fixée à 4 m NGR.
- La concentration en chlorures de la recharge (plaine ou planèze) est de 5 mg/l.

3.4.2. Comparaison observations / simulations

Les niveaux piézométriques calculés en chacun des cinq ouvrages d'exploitation sont comparés aux valeurs observées sur l'Illustration 9. Le travail de calage a consisté à régler les différents paramètres du modèle de façon à ce que les deux séries de courbes soient les plus proches possibles sur la période 01/01/2012 – 31/12/2013. La comparaison des observations et des simulations sur le début d'année 2013 sert de validation.




Nappe supérieure - Puits B
Observation
Simulation
mNGR
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
calage
01/01/12
10/04/12
19/07/12
27/10/12
04/02/13
15/05/13


Nappe supérieure - Puits C
Observation
Simulation
mNGR
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
calage
01/01/12
10/04/12
19/07/12
27/10/12
04/02/13
15/05/13

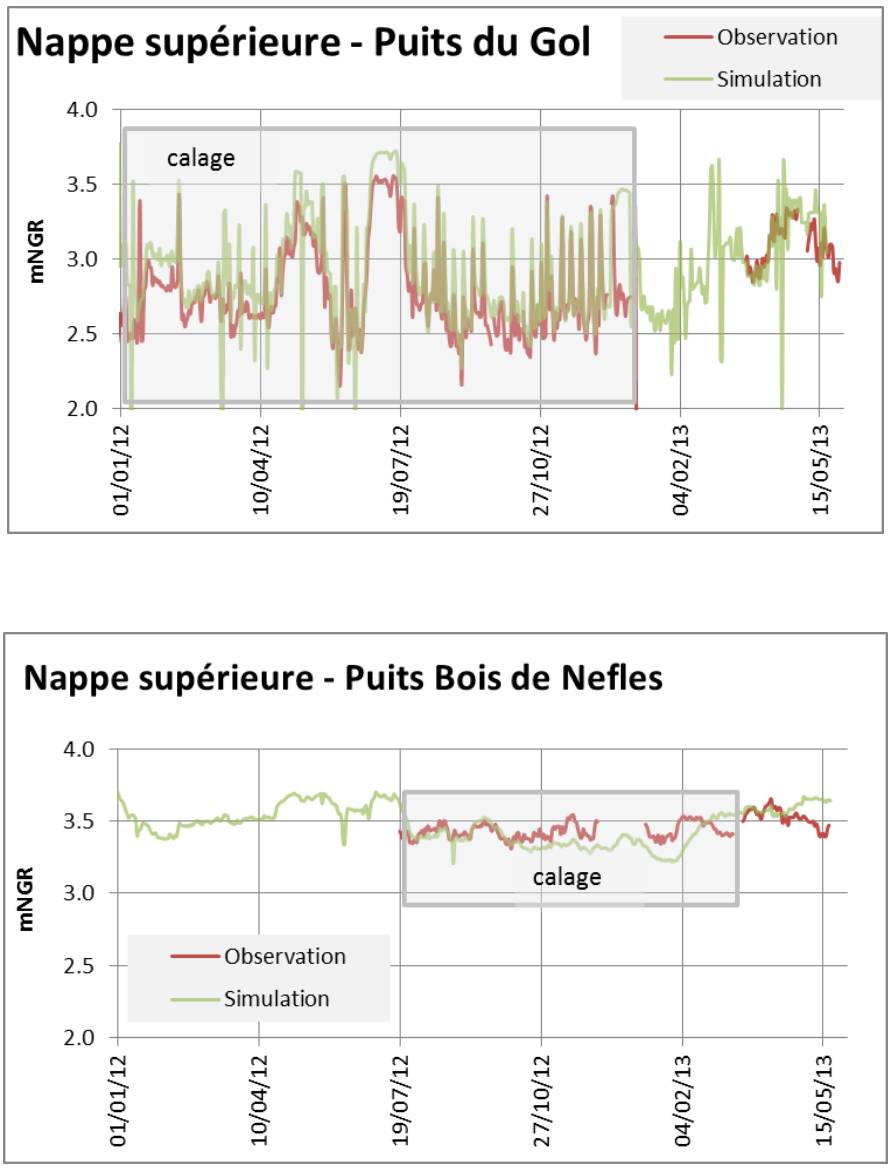


Illustration 9 : Comparaison des niveaux observés et simulés aux 5 puits d'exploitation (période 2012-2013)

On constate que le modèle est tout à fait satisfaisant pour reproduire les niveaux piézométriques observés aux puits d'exploitation : les écarts absolus entre niveaux observés et simulés sont faibles et les tendances sont correctement reproduites. Les coefficients de corrélation entre les séries observées et simulées sont compris entre 0.54 (Bois de Nèfle, pour lequel la période de calage est raccourcie en raison des lacunes de données) et 0.98 (puits B). On signale toutefois que le calage du modèle est effectué sur une seule année de données, qui plus est une année particulièrement sèche. On ne peut donc pas préjuger de sa capacité à reproduire correctement les niveaux piézométriques du système aquifère du Gol en année pluviométrique humide.

La comparaison entre la charge moyenne calculée pour chaque réservoir (supérieur et de base) et les données observées aux piézomètres PIB4 et PIB5 (Illustration 10) doit être faite en gardant à l'esprit que la charge calculée est une valeur unique, non spatialisée pour tout le réservoir. La comparaison fine avec les données fournies par les piézomètres en des points particuliers a donc peu de sens. L'intérêt de ces graphes est surtout de constater que les deux séries de courbes (observées et simulées) évoluent de manière similaire. On note cependant une remontée du niveau de la nappe supérieure plus précoce au niveau du piézomètre d'observation PIB5A que celle qui est calculée.

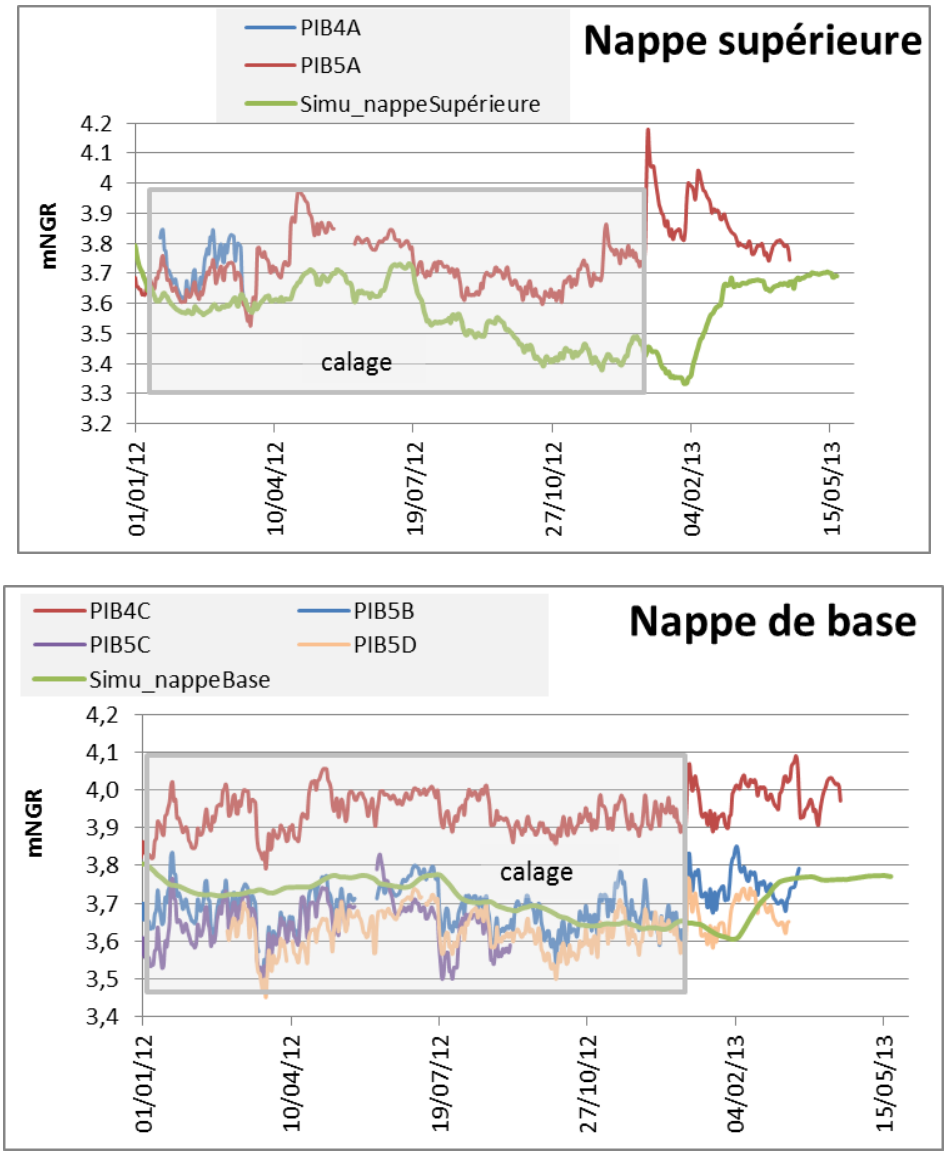


Illustration 10 : Comparaison de la charge moyenne simulée dans la nappe supérieure et dans la nappe de base (période 2012-2013) à celles observées aux piézomètres disponibles.

(La position des piézomètres est rappelée au §2.1.2)

La conductivité électrique moyenne estimée pour la nappe supérieure est comparée ci-dessous aux conductivités mesurées aux différents ouvrages. Il se trouve que les conductivités électriques mesurées aux différents ouvrages présentent deux types de comportement très différents : variations saisonnières marquées avec un minimum en juillet, auxquelles s'ajoutent des fluctuations importantes à plus haute fréquence (puits A, B et C), ou évolutions très lissées avec un minimum en janvier (puits Gol et BdN). L'étude hydrogéochimique (Petit et al., 2013) a expliqué ce comportement particulier au puits Gol par de possibles apports superficiels (présence de nitrates) associés à un faible impact de l'intrusion saline. Le modèle ne permet pas de reproduire ces comportements, alors que la conductivité estimée à partir du flux d'alimentation de la nappe supérieure par la nappe de base, reproduit assez bien les évolutions observées sur les trois puits agricoles (A, B et C).

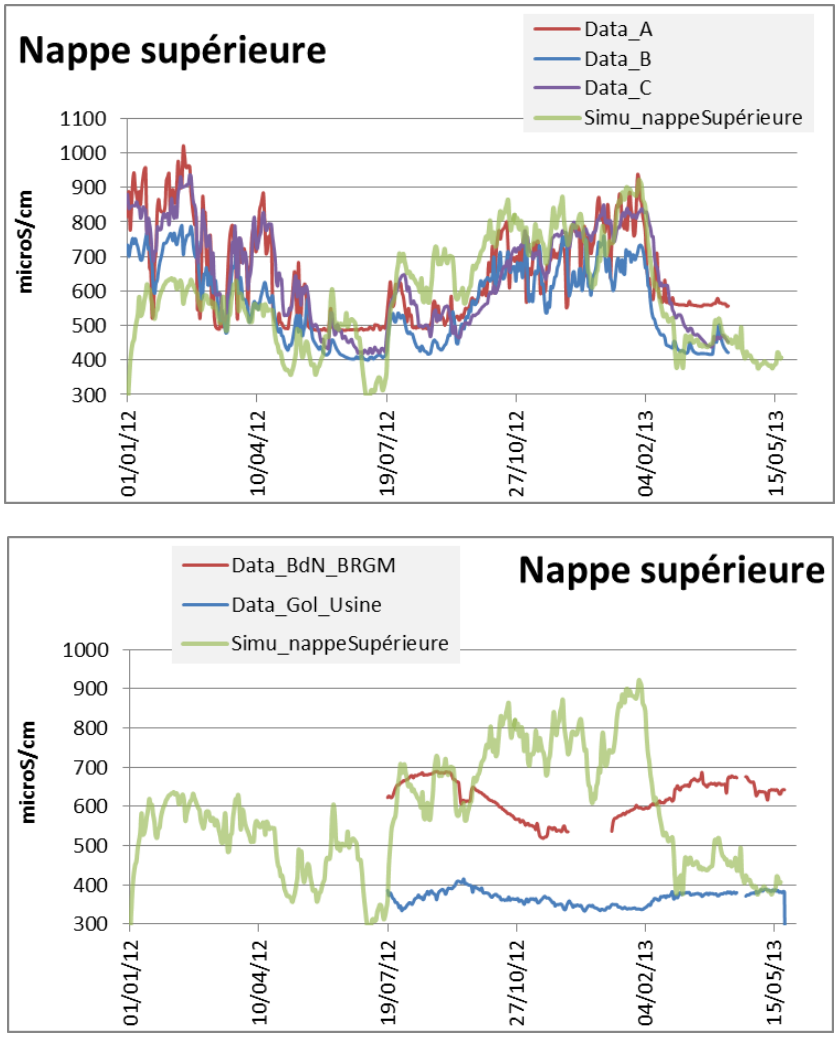


Illustration 11 : Conductivités électriques observées et simulée dans la nappe supérieure (2012-2013)

3.5. BILANS

Le bilan des flux moyens annuels est présenté dans le Tableau 3. On constate qu'en 2012, le système a été légèrement déficitaire. La conductivité électrique moyenne de la nappe supérieure calculée par le modèle pour l'année 2012 est de 627 µS/cm (d'après la loi empirique présentée par l'équation 6 qui suppose simplement que la conductivité dans la nappe supérieure est linéairement corrélée au flux d'eau journalier orienté de la nappe de base vers la nappe supérieure).

Flux moyens annuels	**m^3/j**
ENTREES	
Recharge directe de la nappe supérieure	24
Retour irrigation	1 500
Alimentation du système par infiltration en provenance de la planèze	35 137
Flux alimentation nappe de base par réservoirs annexes	20 652
Total ENTREES	57 313
SORTIES	
Débits moyens pompés dans la nappe supérieure	13 148
Flux nappe supérieure vers océan	17 785
Flux nappe de base vers océan	26 833
Total SORTIES	57 766
BILAN (ENTREES – SORTIES)	- 453
Pour INFORMATION (flux interne système)	
Flux de la nappe de base vers la nappe supérieure	11 708

Tableau 3 : Termes du bilan issu de la modélisation sur l'année 2012.

Ce bilan de flux annuels peut être utilisé pour déduire des informations sur la nature de l'eau apportée par les réservoirs annexes, à partir d'un simple calcul de mélange d'eau. En effet :

- La recharge directe sur la plaine du Gol, l'infiltration sur la planèze, et une partie des flux provenant des réservoirs « annexes » sont des flux d'eau douce (conductivité de l'ordre de 195 µS/cm).
- Les flux d'eau salée (conductivité de l'ordre de 69615 µS/cm) correspondraient aux intrusions d'eau océanique vers les réservoirs A ou B. Dans le contexte

climatique et d'exploitation de l'année 2012, les flux sont orientés des réservoirs vers l'océan, mais cela changerait pour des pompages plus importants.
- L'autre partie des flux en provenance des réservoirs « annexes » apporte de l'eau saumâtre au système (dont la conductivité est à calculer).

Pour estimer la part d'eau douce et d'eau saumâtre dans les apports qui viennent des réservoirs annexes vers un système tel que celui du Gol, on réalise une simulation du modèle sans aucun prélèvement pour des conditions climatiques données. On suppose que dans cet état naturel, les réservoirs annexes ne fournissent que de l'eau douce au système aquifère. On suppose ensuite que le flux d'eau douce en provenance des réservoirs annexes demeure constant (en volume annuel) lorsque l'aquifère est exploité. L'afflux d'eau supplémentaire en provenance des réservoirs annexes induit par les prélèvements est donc de l'eau saumâtre.

La conductivité moyenne annuelle du mélange peut donc être estimée par :

$$C = \frac{196 * Q_{eau_{douce}} + C_{saumâtre} * Q_{saumâtre} + 69615 * Q_{salé}}{\sum Q}$$

Avec, $Q_{eau\ douce}$, constitué de la somme de la recharge et du flux d'eau douce en provenance des réservoirs annexes estimé hors pompage ; $Q_{saumâtre}$ le flux d'eau en provenance des réservoirs annexes et $Q_{salé}$, le flux en provenance de l'océan.

Dans notre cas d'étude pour la période 2012-2103, la comparaison des flux calculés avec ou sans exploitation du système aquifère indique que l'alimentation par les réservoirs annexes est constituée de 62.5% d'eau douce. Avec ce ratio, si l'on attribue une conductivité moyenne de 3425 µS/cm pour l'eau saumâtre, on trouve une conductivité moyenne de 623 µS/cm pour l'eau de la nappe supérieure, ce qui est cohérent avec les observations.

L'évolution relative des apports d'eau douce et d'eau saumâtre à la nappe supérieure dépendent donc des conditions climatiques et d'exploitation. Différentes simulations effectuées en faisant varier les conditions climatiques (années sèches, humides ou normales) et les volumes prélevés dans la nappe supérieure ont donc été réalisées. Elles ont permis d'observer que, selon les conditions climatiques considérées, la conductivité calculée pour l'eau saumâtre en provenance des réservoirs annexes, varie entre 2500 et 4000 µS/cm.

Ces observations sont synthétisées par l'Illustration 12 qui représente le pourcentage d'eau saumâtre apporté par les réservoirs annexes en fonction du débit pompé et pour trois conditions climatiques contrastées.

Finalement, ces calculs nous permettent de conclure que la contribution des réservoirs annexes à la nappe supérieure est constituée pour partie d'écoulements d'eau douce (probablement en provenance des nappes perchées) et d'écoulements d'eau saumâtre (37.5% en 2012). L'origine de cette eau saumâtre pourrait être une zone intermédiaire entre l'océan et la zone des forages (représentation simplifiée dans un modèle non spatialisé du gradient de concentration), ou un réservoir latéral à la paléo-vallée.

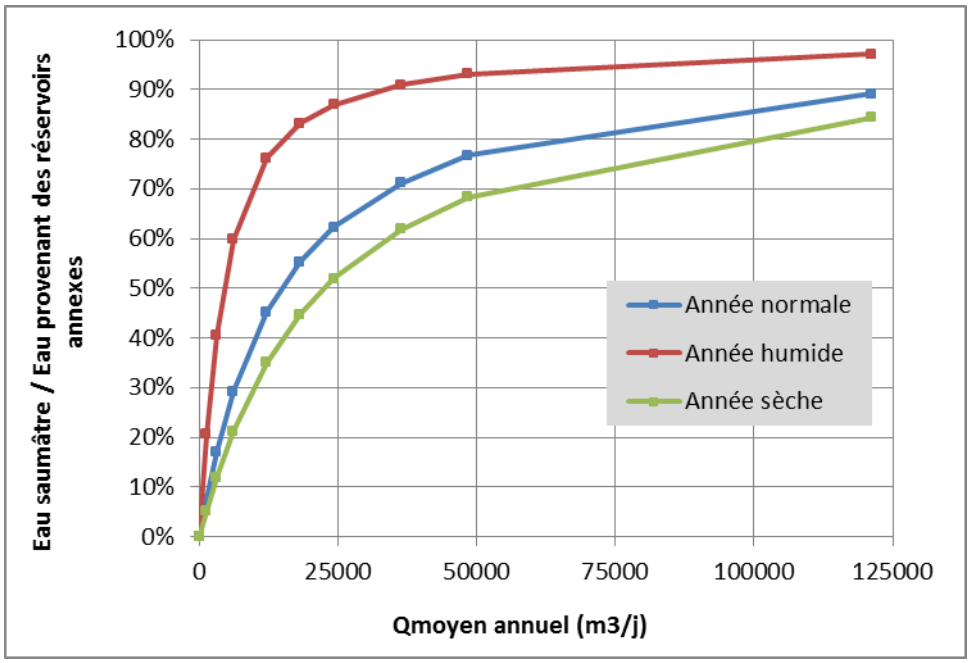


Illustration 12 : Ratio "eau saumâtre/apport amont" en fonction de la situation climatique et du débit moyen annuel prélevé.

Le modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique du compartiment Est de l'aquifère du Gol peut être affiné en tenant compte des dernières remarques (Illustration 13).

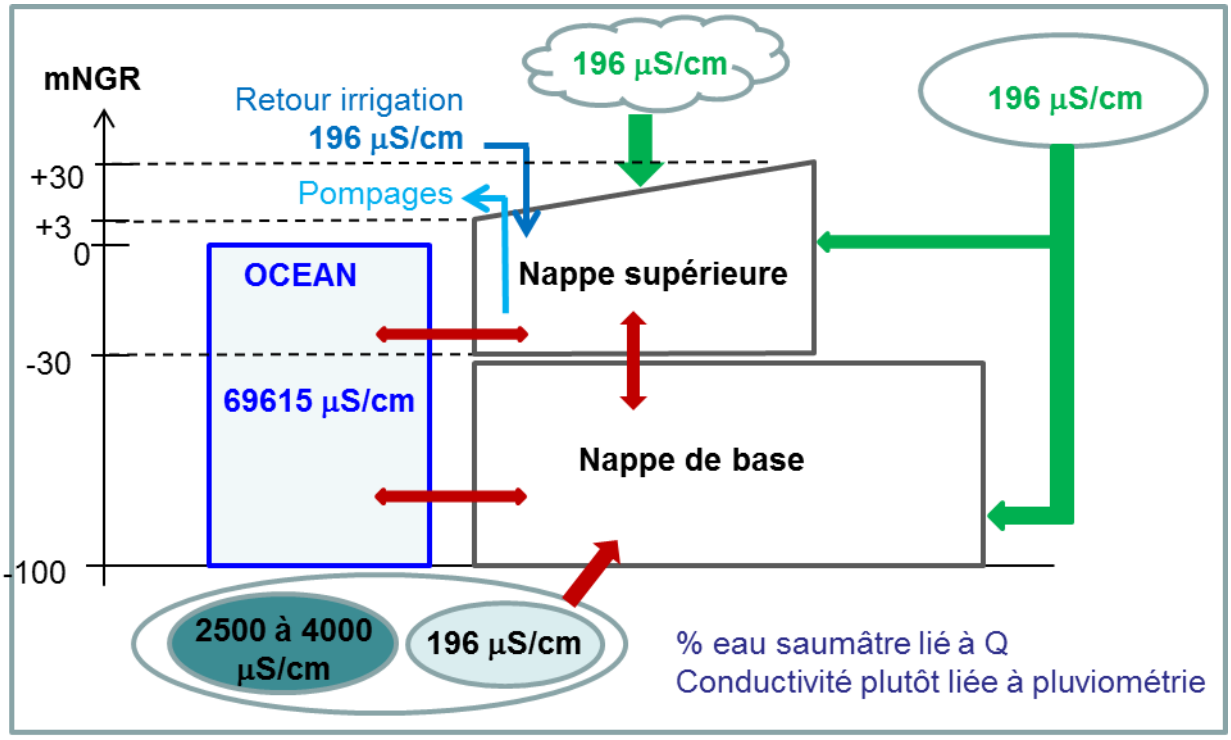


Illustration 13 : Schéma conceptuel amélioré

4. Règles de gestion

Grâce aux connaissances acquises sur le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère du Gol (synthétisées par le modèle conceptuel proposé au §2.2), on peut désormais envisager de proposer des règles de gestion, définies en termes de contraintes sur les prélèvements pour que ces derniers aient un impact acceptable sur l'aquifère. Le modèle numérique permet de simuler l'évolution du système pour différents niveaux de pluviométrie et de prélèvements. Il est donc appliqué pour tester les règles de gestion et optimiser les volumes prélevés dans la nappe supérieure.

4.1. CRITERES DE DEFINITION DES REGLES DE GESTION

4.1.1. Critère de gestion durable de l'aquifère du Gol

Le critère retenu est la valeur de la **conductivité moyenne annuelle de l'aquifère superficiel.** Celle-ci fluctue en fonction de la recharge de l'aquifère et de l'importance des prélèvements. Un scénario de pompage sera acceptable si cette conductivité moyenne annuelle reste en deçà de 500 µS/cm.

Cette valeur seuil de 500 µS/cm correspond à la valeur seuil de conductivité proposée pour La Réunion pour définir le bon état chimique des masses d'eau (Cary et al., 2012) : au-delà de cette valeur, une intrusion saline est considérée comme probable. Cette valeur peut sembler faible, néanmoins, c'est une valeur moyenne annuelle, qui permet par conséquent des dépassements ponctuels. Par ailleurs, la médiane de toutes les valeurs de conductivité des eaux souterraines disponibles à La Réunion est nettement plus faible : 139 µS/cm (Lopez, 2012).

4.1.2. Critère de périodicité des contraintes

La réponse du système aux forçages extérieurs (pluie sur la plaine et la planèze), et aux sollicitations anthropiques (prélèvements) n'est pas instantanée, mais étalée dans le temps. Les temps caractéristiques des processus qui contribuent à la recharge et à la salinisation de l'aquifère supérieur peuvent être estimés grâce aux paramètres du modèle qui a été calé. Ainsi, les transferts d'eau entre la nappe de base et la nappe supérieure présentent un temps caractéristique de l'ordre de 70 jours (transmissivité de 70000 m^2/j pour une surface de 5 km^2). Dès lors, lorsqu'on modifie le débit prélevé dans la nappe superficielle, le système réagit certes immédiatement mais près de trois mois sont nécessaires pour atteindre un nouvel état stationnaire, caractérisé par un nouveau flux d'équilibre entre la nappe de base et la nappe supérieure, et donc une nouvelle concentration moyenne dans cette dernière. Par ailleurs, l'infiltration de la pluie présente une constante de temps de 90 jours. L'état du système à un instant donné dépend donc de la pluviométrie et des prélèvements des trois derniers mois. Cependant pour maintenir un niveau moyen de conductivité dans la nappe supérieure toute l'année et à long terme, les préconisations sont à formuler en adéquation avec

les temps de réponse du système. En conséquence, les contraintes sont proposées par trimestre.

Un contrôle quotidien de la conductivité doit aussi être mis en place avec pour objectif d'éviter les pics de salinité. Des actions (baisse ou arrêt des pompages pendant quelques jours) seront mises en œuvre lors de dépassement de seuil. Elles auront une influence à court terme (baisser le pic), mais peu d'influence à long terme car la réponse du système s'étale sur 70 jours.

4.1.3. Critère de distribution spatiale des contraintes

Deux caractéristiques du site sont prises en compte pour la répartition du débit de prélèvement dans l'aquifère :

- La première concerne les propriétés hydrauliques de la nappe supérieure : comme le montre le tableau extrait du rapport BRGM/RP-61834-FR, elles sont relativement uniformes et significatives d'un aquifère très productif. On note seulement des pertes de charge quadratiques plus importantes dans le puits B. Rappelons que les pertes de charges quadratiques concernent l'ouvrage lui-même et non la ressource en eau. Donc, cette caractéristique reste secondaire.

Ouvrage	Type	l (m)	d (m)	T_{horiz} (m^2/s)	S (m)	e' (m)	K' (m/s)	$T_{horiz}/T_{v\ eq}$	PdC ($m^{-5}s^2$)
Puits A	puits	7.7	0.0	**8.0E-01**	**5.0E-02**	**1.0**	**5.0E-07**	**7.0**	**40.0**
Puits B	puits	11.0	0.0	**8.0E-01**	**5.0E-02**	**1.0**	**5.0E-07**	**7.0**	**1680.0**
Puits C	puits	8.0	0.0	**8.0E-01**	**5.0E-02**	**1.0**	**5.0E-07**	**7.0**	**195.0**
BdN	puits	1.6	0.0	**8.0E-01**	**5.0E-02**	**1.0**	**7.0E-07**	**7.0**	**-**
Gol	puits	2.5	0.0	**8.0E-01**	**5.0E-02**	**1.0**	**-**	**7.0**	**-**
Pib4c	piézo	98.0	80.0	8.0E-01	5.0E-02	1.0	5.0E-07	7.0	-
Pib5a	piézo	17.0	12.0	8.0E-01	1.5E-02	1.0	1.7E-07	7.0	-
Pib5b	piézo	36.0	32.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-
Pib5c	piézo	44.0	41.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-
Pib5d	piézo	73.0	54.0	8.0E-01	4.0E-03	1.0	1.6E-07	7.0	-

Tableau 4 : Propriétés hydrauliques des ouvrages de la plaine du Gol.

- La seconde concerne la position des puits pour privilégier les ouvrages les plus éloignés de la mer. Là aussi, ce critère n'est pas discriminant car ils sont situés à peu près à la même distance de la mer, entre 1.8 et 2.2 km ; leur position vis-à-vis des limites étanches est moins importante car les puits sont relativement proches les uns des autres et l'aquifère est très transmissif.

En conséquence, il est proposé d'attribuer le même quota de volume prélevable à chacun des cinq puits. Cette règle pourra cependant être assouplie si des problèmes de gestion apparaissent.

Les propriétés hydrogéologiques et éléments d'analyse rappelés précédemment, ont conduit à élaborer des règles de gestion exprimées en volume maximum

prélevable par trimestre dans l'aquifère supérieur, et permettant d'assurer un état acceptable de l'eau caractérisé par une conductivité électrique moyenne annuelle ne dépassant pas 500 μS/cm.

4.2. ELABORATION DES REGLES DE GESTION

La démarche pour définir les règles de gestion des prélèvements a consisté à explorer le comportement du système à l'aide du modèle numérique pour trois situations climatiques contrastées : année sèche, année normale et année humide. La recharge de l'aquifère est calculée pour chacune de ces trois situations pluviométriques et dans chaque cas, on simule le comportement du système selon différents scénarios de pompage. L'acceptabilité d'un scénario de pompage sera examinée au regard de la conductivité électrique de la nappe superficielle simulée par le modèle, qui devra rester en deçà de la limite des 500 μS/cm en moyenne annuelle.

4.2.1. Situations climatiques

Les trois situations climatiques ont été recherchées en priorité dans des années récentes, au-delà de 2007 (Illustration 14). En effet, dans ce cas, on dispose de la chronique de pompage réelle pour les prélèvements dans les puits de la Saphir (puits A, B et C).

Les précipitations sont examinées au poste de Pierrefonds. Sur la période 2007-2012, deux années ont été particulièrement sèches : 2011 et 2012. Les précipitations annuelles sont proches, légèrement supérieures à 400 mm. Le choix se porte sur l'année **2012** qui présente un caractère renforcé de sécheresse (deuxième année sèche consécutive) et qui est mieux connue par le suivi de l'étude Hydrogol. La moyenne interannuelle des précipitations est de 605 mm. L'année 2005 est très proche de cette moyenne ; l'année **2008** (555.4 mm) lui a été préférée pour des raisons de disponibilité de chroniques de pompage. L'année **2009** est une année très pluvieuse avec des précipitations dépassant de 134 % celles de 2012.

Les années de référence sont donc :

- 2012 : année sèche.
- 2008 : année moyenne.
- 2009 : année humide.

Les calculs de la recharge sont menés conformément à la description du paragraphe 3.1.1, à partir des postes pluviométriques de Gol les Hauts et de Pierrefonds.

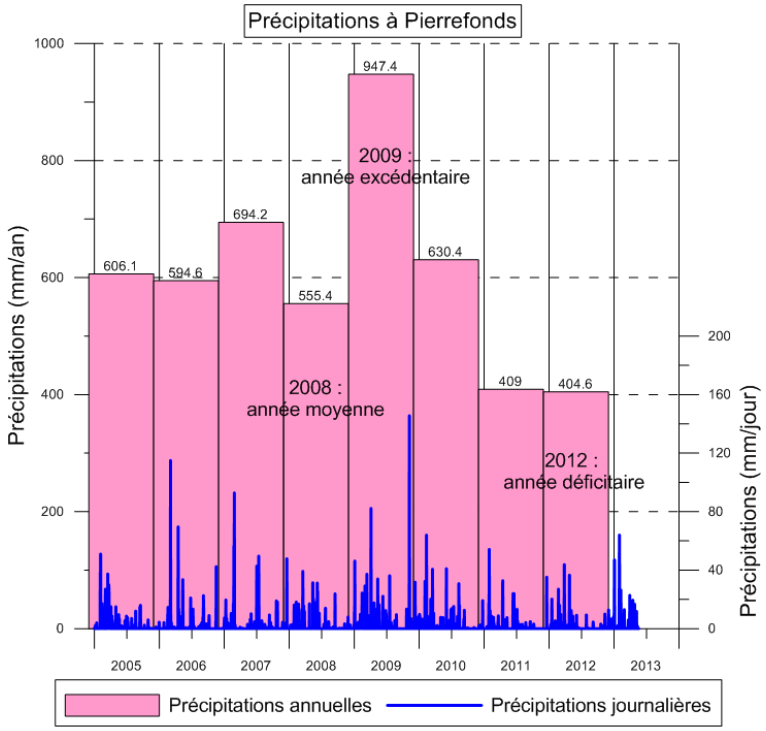


Illustration 14 : Précipitations à Pierrefonds (2005 – 2013)

4.2.2. Scénarios de pompage

Les prélèvements dans la nappe supérieure pour les années 2010 à 2012 sont récapitulés dans le Tableau 5. Les « Données redevance » sont fournies par l'Office de l'Eau, les « données producteurs[4] » par la Sucrière de la Réunion (SR) et la Centrale Thermique du Gol (CTG) pour les puits du Gol et Bois de Nèfles, et par la SAPHIR pour les puits A, B et C. On constate que les prélèvements annuels sont fortement variables d'une année sur l'autre. En 2011, les pompages industriels sont 41 % inférieurs aux pompages agricoles. En 2012, ils sont 87 % supérieurs. Sur la moyenne 2010 – 2012, les prélèvements agricoles et industriels, sont identiques à 1 % près. Les pompages aux puits A, B et C sont à usage agricole et par conséquent fortement dépendants de la pluviométrie mais aussi des ressources en eau superficielle du Bras de Cilaos. Cette dernière ressource est utilisée en priorité lorsqu'elle est suffisante.

HISTORIQUE 2010-2012. Débits en m3/an.					
Origine des données	Données redevance	Données redevance	Données producteur	Moyenne 2010-2012	Répartion des prélèvements sur la moyenne 2010-2012
Année	2010	2011	2012		
Puits Bois de Nèfles	594 116	1 277 278	886 512	919 302	16%
Puits du Gol	2 328 615	1 523 707	2 240 808	2 031 043	35%
Puits A	931 453	1 978 460	787 524	1 232 479	21%
Puits B	641 064	1 624 530	517 716	927 770	16%
Puits C	699 408	1 130 569	367 044	732 340	13%
Total	5 196 666	7 536 555	4 799 604	5 844 275	
Total industriels (BdN + Gol)	2 922 731	2 800 985	3 127 320	2 950 345	50.5%
Total Saphir (A+B+C)	2 271 925	4 733 559	1 672 284	2 892 589	49.5%

Tableau 5 : Prélèvements annuels 2010 – 2012.

On utilise le modèle pour évaluer à partir de quel niveau de pompage annuel, un risque d'engendrer une intrusion saline (caractérisée par une conductivité moyenne annuelle supérieure à 500 μS/cm) apparaît pour une année humide, normale ou sèche. On réalise des séries de simulations pour chacune des années type en imposant des débits de plus en plus importants jusqu'à identifier le scénario qui ne permet plus de respecter le critère sur la conductivité moyenne annuelle.

Les chroniques de pompages utilisées sont des chroniques réelles disponibles au pas de temps journalier et en chaque puits. Par rapport à des chroniques fictives trimestrielles, ces chroniques réelles ont l'avantage d'être réalistes et d'inclure implicitement l'adaptation des prélèvements agricoles à la pluviométrie et à leur

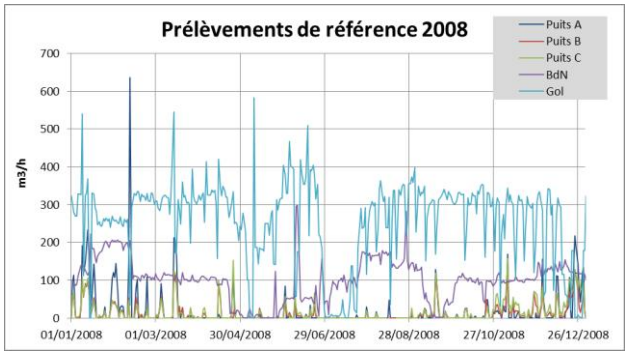
[4] Les données "producteur", sont à l'échelle journalière et ne sont disponibles que pour l'année 2012.

variabilité dans l'année en fonction des cycles agricoles. Leur répartition par puits permet de simuler le niveau piézométrique aux puits pour chaque scénario.

Les consignes de prélèvements portent sur des volumes trimestriels (voir § 4.1.2). Des scénarios de pompage à simuler sont donc à construire à ce pas de temps. De plus, le calcul de la concentration moyenne de la nappe supérieure dans le simulateur est lié au bilan de flux global, non spatialisé. Les résultats (pour la conductivité) sont donc identiques si on impose une distribution des prélèvements sur 5 puits, ou si on impose la somme des prélèvements en un seul ouvrage[5]. Une chronique de pompage de référence est donc identifiée pour chaque situation climatique, à partir d'une chronique réelle de pompage au pas de temps journalier en chaque puits (en complétant si besoin les données manquantes). Les scénarios de pompage pour les simulations sont ensuite créés en multipliant par une constante les débits de la chronique de référence. Les débits des différents scénarios restent donc proportionnels entre eux (et la répartition journalière des débits n'est pas modifiée par rapport à la répartition de la chronique de référence).

Les chroniques de référence sont les suivantes (Illustration 15) :

- Année sèche : Q2012 : Les pompages dans les puits de la Saphir sont ceux de 2012. Les pompages industriels (Gol et Bois de Nèfles) sont également ceux de 2012.
- Année normale : Q2008 : Les pompages dans les puits de la Saphir sont ceux de 2008. Les pompages industriels (Gol et Bois de Nèfles) sont ceux de 2012, disponibles à l'échelle journalière.
- Année humide : Q2009 : Les pompages dans les puits de la Saphir sont ceux de 2009. Les pompages industriels (Gol et Bois de Nèfles) sont ceux 2012 disponibles à l'échelle journalière.



[5] Ce n'est pas le cas pour les niveaux piézométriques aux puits, puisque pour ces variables, on a introduit un module de correction des pertes de charges quadratiques et linéaires liées au débit pompé.

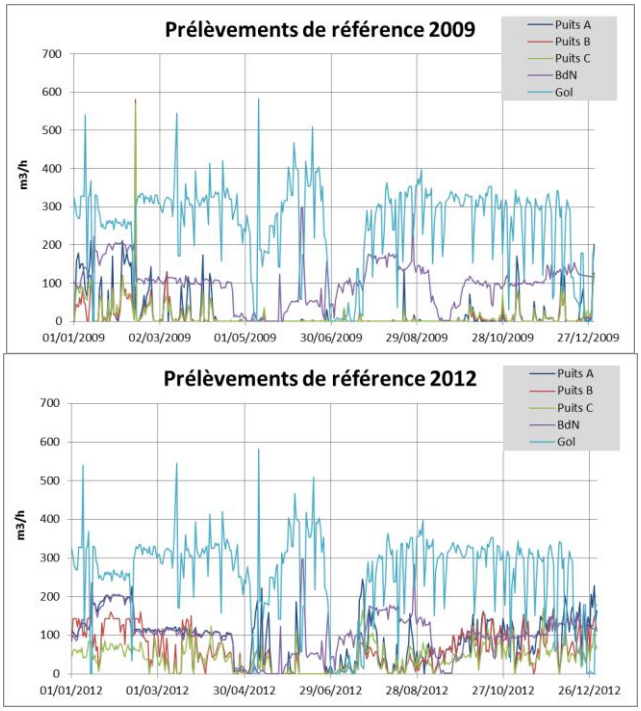


Illustration 15 : Chroniques de référence des pompages

4.2.3. Exploration des scénarios

Pour chaque situation climatique considérée (année sèche, moyenne et humide), le déroulement de l'exploration des scénarios de pompage a été le suivant :

- L'année de simulation dont les résultats seront exploités est toujours précédée par une année de calcul pour l'initialisation du modèle.
- Une première simulation avec les pompages de la chronique de référence est effectuée. La conductivité moyenne annuelle de l'aquifère superficiel est calculée. C'est la moyenne des 365 valeurs quotidiennes calculées par le simulateur.
- La démarche est ensuite itérative : elle consiste à simuler des pompages multipliés par une constante, calculer la valeur moyenne de conductivité, comparer cette valeur avec le seuil de 500 µS/cm et recommencer en ajustant les pompages. L'ajustement consiste à les augmenter d'un coefficient multiplicatif si la conductivité est inférieure à 500 µS/cm et inversement à les diminuer si ce seuil est dépassé. Une dizaine de scénarios de pompage a été testée pour chaque situation climatique. Le coefficient multiplicatif appliqué aux débits varie entre 0.65 et 1.45.
- Les calculs itératifs sont arrêtés lorsque le scénario avec les débits les plus élevés qui respectent la contrainte des 500 µS/cm a été trouvé.

Les résultats obtenus montrent que, pour chacune des trois situations climatiques, le scénario de pompage maximisant les débits et respectant la contrainte sur la conductivité moyenne annuelle est le suivant :

- **En année sèche, le débit maximal de prélèvement qui respecte la contrainte de la moyenne annuelle de conductivité de 500 µS/cm est de 0.7 x Q2012, soit un débit moyen annuel de 9 203 m^3/j.**
- **En année moyenne, le débit maximal de prélèvement qui respecte la contrainte de la moyenne annuelle de conductivité de 500 µS/cm est de 1.2 x Q2008, soit un débit moyen annuel de 11 647 m^3/j.**
- **En année humide, le débit maximal de prélèvement qui respecte la contrainte de la moyenne annuelle de conductivité de 500 µS/cm est de 1.35 x Q2009, soit un débit moyen annuel de 13 087 m^3/j.**

A titre d'illustration, on présente ci-dessous les variables calculées par le modèle au pas de temps journalier, pour le scénario de pompages retenu dans chacune des trois situations climatiques. Les trois scénarios retenus ont finalement des conséquences assez similaires, tant pour les charges hydrauliques que pour les conductivités. Ceci est lié au fait que, pour les pompages industriels, le volume total prélevé est certes différent pour chacune des trois années simulées, mais la répartition journalière des prélèvements est identique. Or, pour les années 2008, 2009 et 2012, les prélèvements industriels sont largement supérieurs aux prélèvements agricoles.

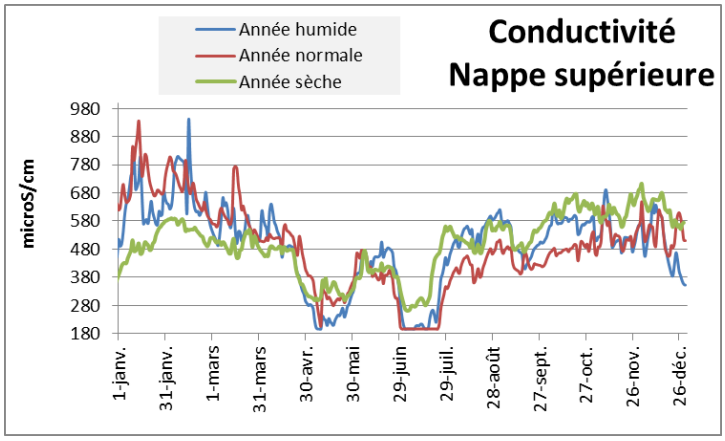


Illustration 16 : Variation journalière de la conductivité de la nappe supérieure pour les trois scénarios retenus.

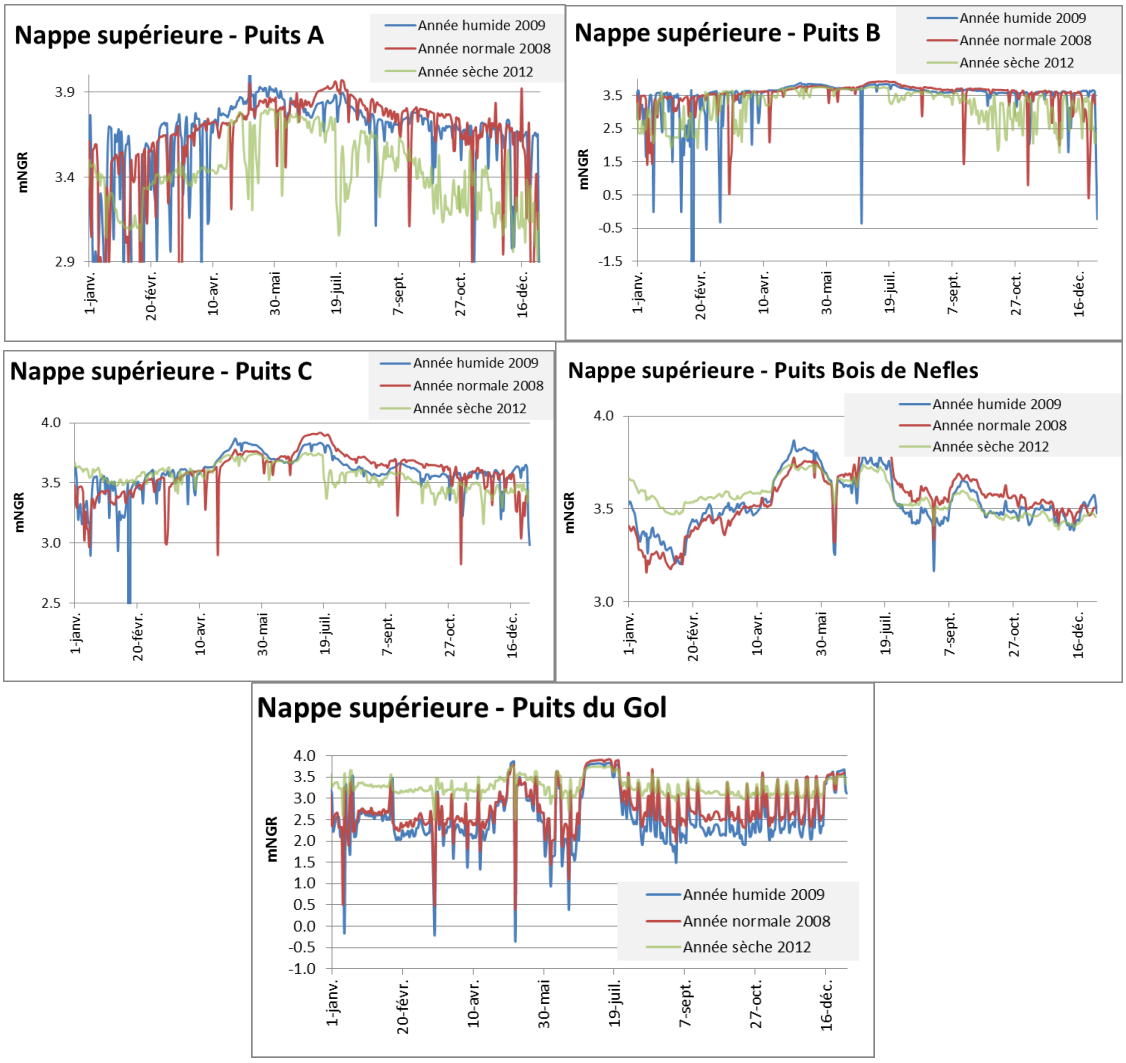


Illustration 17 : Variation journalière du niveau d'eau aux puits pour les trois scénarios retenus

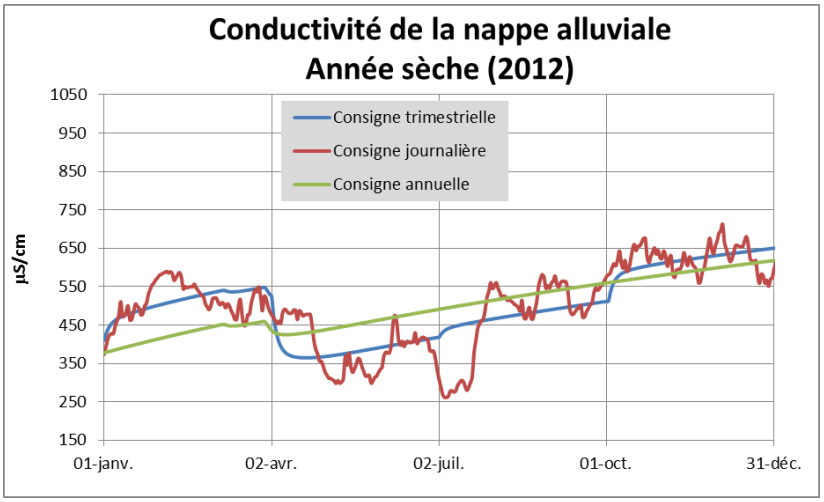
Les simulations précédentes ont permis de déterminer le volume prélevable maximum annuel (par type d'année climatique), selon une répartition journalière donnée (celle de la chronique de référence). Une analyse de sensibilité sur la périodicité des prélèvements (journalière, trimestrielle et annuelle) a été réalisée pour s'assurer que cette répartition n'influe pas sur la valeur de la conductivité moyenne annuelle (notre critère de sélection). Des simulations supplémentaires ont donc été réalisées en imposant des valeurs constantes de prélèvements par trimestre et aussi par année. Les résultats sont présentés dans les Tableau 6 et Illustration 18. Il apparait que les consignes trimestrielles, qui rendent bien compte de la répartition habituelle des prélèvements plus importants en début et en fin d'année, permettent bien de respecter la contrainte sur la conductivité moyenne annuelle.

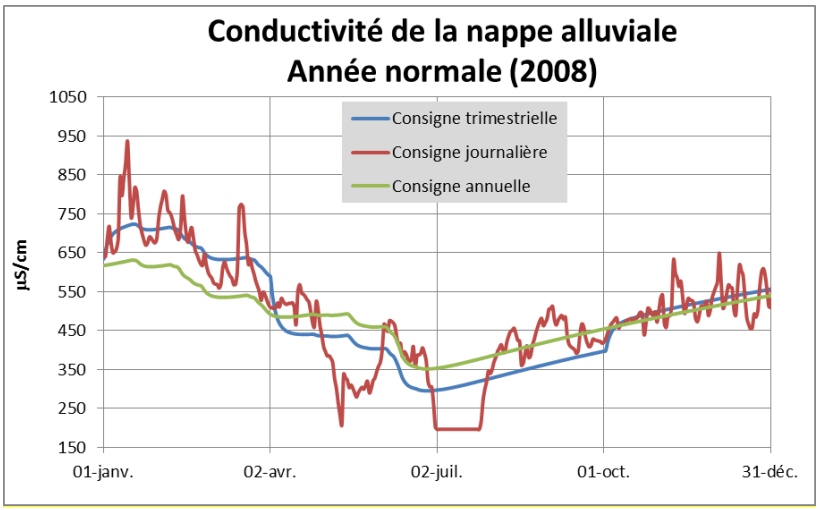
2012	Année sèche					
Consigne Q	Journalière		Trimestrielle		Annuelle	
	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)
Janvier	12763	486	11934	476	9203	396
Février	12536	552	11934	519	9203	431
Mars	10541	500	11934	540	9203	451
Avril	9101	449	6968	384	9203	430
Mai	5254	326	6968	380	9203	451
Juin	6605	403	6968	405	9203	478
Juillet	5767	363	7723	451	9203	503
Août	8969	519	7723	479	9203	527
Septembre	8455	527	7723	501	9203	549
Octobre	11204	629	10195	590	9203	571
Novembre	10151	617	10195	622	9203	591
Décembre	9227	623	10195	642	9203	610
Moyenne annuelle	9203	499	9204	499	9203	499

2008	Année normale					
Consigne Q	Journalière		Trimestrielle		Annuelle	
	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)
Janvier	15597	730	14634	705	11647	621
Février	14517	695	14634	683	11647	587
Mars	13781	603	14634	628	11647	531
Avril	11795	509	9917	457	11647	488
Mai	6686	318	9917	421	11647	476
Juin	11378	390	9917	332	11647	388
Juillet	5587	221	9891	311	11647	368
Août	12901	425	9891	347	11647	404
Septembre	11229	441	9891	382	11647	439
Octobre	12218	478	12158	475	11647	470
Novembre	12400	523	12158	516	11647	500
Décembre	11864	542	12158	544	11647	527
Moyenne annuelle	11647	489	11647	483	11647	483

2009	Année humide					
Consigne Q	Journalière		Trimestrielle		Annuelle	
	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)	Q (m3/j)	C (µS/cm)
Janvier	18563	624	17936	605	13087	474
Février	19969	690	17936	621	13087	465
Mars	15472	554	17936	623	13087	465
Avril	13431	493	10910	424	13087	457
Mai	7541	248	10910	352	13087	421
Juin	11872	431	10910	385	13087	456
Juillet	6350	257	10909	419	13087	489
Août	14863	538	10909	434	13087	504
Septembre	11534	504	10909	463	13087	534
Octobre	13702	574	12676	540	13087	563
Novembre	13156	537	12676	523	13087	537
Décembre	11184	495	12676	538	13087	551
Moyenne annuelle	13087	494	13087	494	13087	493

Tableau 6 : Conductivités moyennes simulées avec des contraintes de débits maximum imposées au pas de temps journalier, trimestriel ou annuel





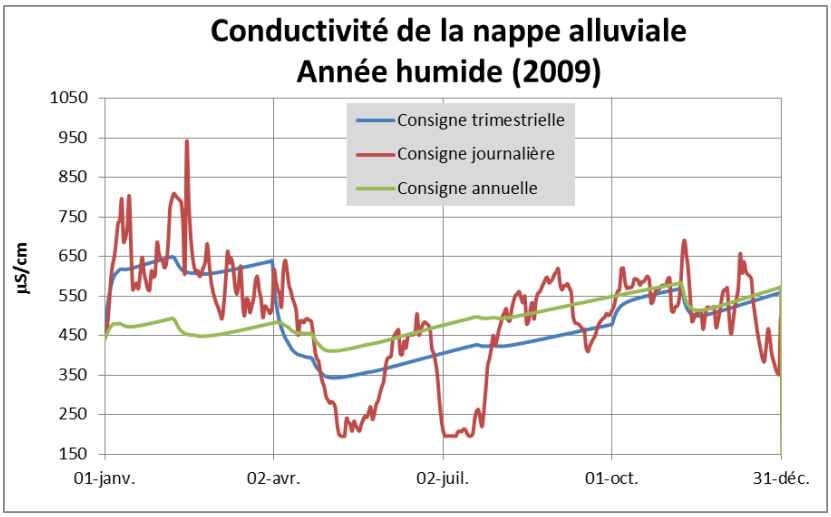


Illustration 18 : Conductivités moyennes simulées avec des consignes de prélèvements journalières, trimestrielles ou annuelles

4.3. REGLES DE GESTION

Les règles de gestion présentées ici rappellent les règles classiques de gestion des aquifères côtiers et proposent des consignes de suivi de l'aquifère. Ces règles de gestion concernent essentiellement des contraintes de prélèvements déterminées à l'aide du modèle numérique. Les contraintes de seuils complètent enfin ces règles de gestion. La situation actuelle des autorisations est préalablement décrite à partir des arrêtés préfectoraux sur le site.

4.3.1. Arrêtés préfectoraux en cours

Deux arrêtés préfectoraux[6] traitent des prélèvements en eau souterraine dans la plaine du Gol. Les aspects concernant les prélèvements en eau souterraine sont extraits ci-dessous.

- **2013 : Arrêté N° 747 /SG/DRCTCV complétant les prescriptions techniques de l'arrêté préfectoral 06-4153/SG/DRCTCV du 21/11/2006 autorisant la CTG à exploiter une centrale mixte bagasse-charbon au lieu-dit "La Plaine du Gol"**

III. Les prélèvements d'eau à usage industriel sont assurés en priorité à partir du réseau d'eau superficielle dit « réseau SAPHIR ».
Dans le cas où les ressources en eau de la SAPHIR pour l'irrigation des terres agricoles seraient insuffisantes, l'exploitant est autorisé à capter l'eau des puits de captage d'eau souterraine intitulés « puits du Gol » et « puits du bois de Nèfles » à un débit maximal total de 450 m3/h.

- **2012 : Arrêté N° 2012 - 1365 /SG/DRCTCV portant prescriptions complémentaire à la société Sucrière de La Réunion pour ses installations de production de sucre qu'elle exploite sur le territoire de la commune de St-Louis.**

"Les prélèvements d'eau dans le milieu…/… sont autorisés dans les quantités suivantes :"

[6] Communiqués par DEAL/SPREI.

Origine de la ressource	Nom de la commune du réseau ou de l'ouvrage de prélèvement	Coordonnées		Prélèvement maximal			Référence
		Latitude	Longitude	Annuel	Journalier	Horaire	
Eau souterraine	Puits « usine du Gol »	21°16'41"S	55°23'56"E	1 380 000 m^3/an	10 000 m^3/j 8 500 m^3/j en moyenne journalière	550 m^3/h	1228-7x-0035
	Puits « D » ou Bois de Nèfles	21°16'29"S	55°23'48"E				1228-7x-0038
Réseau public	Commune de Saint-Louis	21°16'51"S	55°24'00"E				-
	Réseau d'irrigation SAPHIR	21°16'29"S	55°23'48"E	-	-	550 m^3/h	-

Cet arrêté précise les puits de prélèvement, mais les prélèvements maximaux autorisés regroupent eau souterraine et eau du réseau public de St-Louis.

Les prélèvements fixés par ces deux arrêtés sont au maximum de 1000 m^3/h (soit 24 000 m^3/j) répartis entre les puits du Gol et de Bois de Nèfle, ce qui est largement supérieur au volume exploitable moyen annuel préconisé dans cette étude pour éviter l'intrusion saline (13087m^3/j au total pour les cinq puits en année humide par exemple).

4.3.2. Principes de base de gestion des aquifères côtiers

Sur la plaine du Gol, les principes de base généraux pour l'exploitation des aquifères côtiers sont évidemment à respecter :

- les prélèvements doivent être réguliers et répartis dans l'espace. Le but est de rabattre le moins possible la nappe. Il est donc préférable de pomper plus longtemps à un débit plus faible et d'éviter des périodes marche/arrêt trop courte. Au vu des chroniques de pompage, des améliorations sont possibles. L'implantation des puits est correcte sur le plan de leur répartition géographique.
- Des niveaux piézométriques minimaux sont à respecter, car plus le niveau est bas, plus les risques d'intrusion saline sont élevés. Ce seuil est fonction de l'aquifère.
- Les ouvrages : c'est un paramètre sur lequel on ne peut pas jouer a posteriori, mais *la réalisation des ouvrages au début des années 80 a été bien conçue* : prélèvement dans plusieurs ouvrages, répartition homogène dans l'espace, éloignement le plus possible de la mer et faible profondeur pour capter l'eau le plus en surface possible.

4.3.3. Suivi de l'exploitation

Le suivi de pompage dans un aquifère côtier doit, en plus de son rôle habituel, servir à prévenir des intrusions salines. Les paramètres à suivre sont : les pompages, les niveaux piézométriques et la conductivité. Ce suivi est à assurer dans les ouvrages de pompage et dans un ou plusieurs piézomètres ; un piézomètre au moins doit se situer entre les points de pompage et la mer. Le pas de temps des mesures doit être court (entre 2 et 10 mn).

Le suivi devra être le suivant :

- suivi du niveau, de la conductivité et du débit total dans tous les ouvrages équipés de pompes (Puits A, B et C, puits du Gol et puits Bois de Nèfles).
- Suivi des niveaux et de la conductivité dans les piézomètres suivants : PIB5D, PIB5B, PIB5C, PIB4C, piézomètre du Gol. Certains piézomètres jouent un rôle particulier : PIB5D (piézomètre le plus profond à proximité de la mer), PIB4C (position amont au même niveau que les forages et profond de 100 m, soit environ – 80 m NGR), piézomètre du Gol (proche des puits du Gol et de Bois de Nèfles).
- le pas de temps de mesure doit être court : il est proposé "2 mn" homogène avec le suivi actuel des puits de la SAPHIR. Cette durée permet de suivre correctement les pompages et permet ensuite des interprétations par corrélations relativement fines.
- Le suivi a pour but de contribuer à la connaissance du Gol en particulier en complétant les mesures sur les périodes moyennes eaux et hautes eaux non observées au cours de cette étude. L'autre but est de disposer des données nécessaires à la gestion de la nappe. Sur certains ouvrages, des seuils d'action (réduction ou arrêt des pompages) seront fixés.

4.3.4. Les contraintes spécifiques de prélèvements

L'exploration de scénarios a montré que les volumes prélevables maximum dans la nappe supérieure qui permettent de respecter la contrainte de **500 µS/cm** sur la conductivité moyenne annuelle de la nappe supérieure sont les suivants :

- En année sèche, un débit moyen annuel de 9 203 m^3/j (soit 0.7 fois le débit moyen annuel prélevé en 2012)
- En année moyenne un débit moyen annuel de 11 647 m^3/j (soit 1.2 fois le débit moyen annuel prélevé en 2008)
- En année humide, un débit moyen annuel de 13 087 m^3/j (soit 1.35 fois le débit moyen annuel prélevé en 2009)

Les simulations ont également montré que l'on pouvait décliner ces contraintes de prélèvements par trimestre, afin de permettre plus de souplesse dans la gestion et afin de tenir compte de la répartition habituelle des prélèvements plus importants en début et en fin d'année.

Règles de gestion : proposition de limites de prélèvements à l'échelle trimestrielle par type d'année (sec, normal, humide) sur l'ensemble de la nappe.				
	Unité	Année sèche	Année normale	Année humide
Janvier-Février-Mars	m3	1 092 000	1 337 700	1 642 550
Avril-Mai-Juin	m3	637 000	919 100	1 010 100
Juillet-Aout-Sept	m3	717 600	920 000	1 012 000
Oct-Nov-Déc	m3	932 750	1 114 750	1 155 700
Total annuel	m3	3 379 350	4 291 550	4 820 350

Tableau 7 : Contraintes de prélèvements trimestrielles et annuelles selon le type d'année climatique

Pour être appliqués, ces résultats supposent que l'on connaisse la situation hydrologique de l'année en cours. On suggère donc la démarche suivante en deux étapes pour mettre en œuvre ces consignes de gestion.

1e étape : prise en compte de la situation climatique :

Il est proposé de se conformer à l'état des ressources établi par l'Office de l'eau Réunion publié dans "Les chroniques de l'eau Réunion", disponible sur le site de l'Office de l'eau (Illustration 19). L'état des ressources y est évalué en moyenne une fois par mois et à une fréquence plus rapprochée en période de sécheresse. Le début de la période sèche (avril à mai) présente les enjeux les plus importants. Le contrôle de la situation hydrologique est à prévoir ensuite tous les deux mois pour un réajustement éventuel. Un piézomètre de référence est suivi sur le secteur du Gol : c'est le piézomètre n°3 PIB4-C (indice BSS : 12287X0114/PIB-4C).

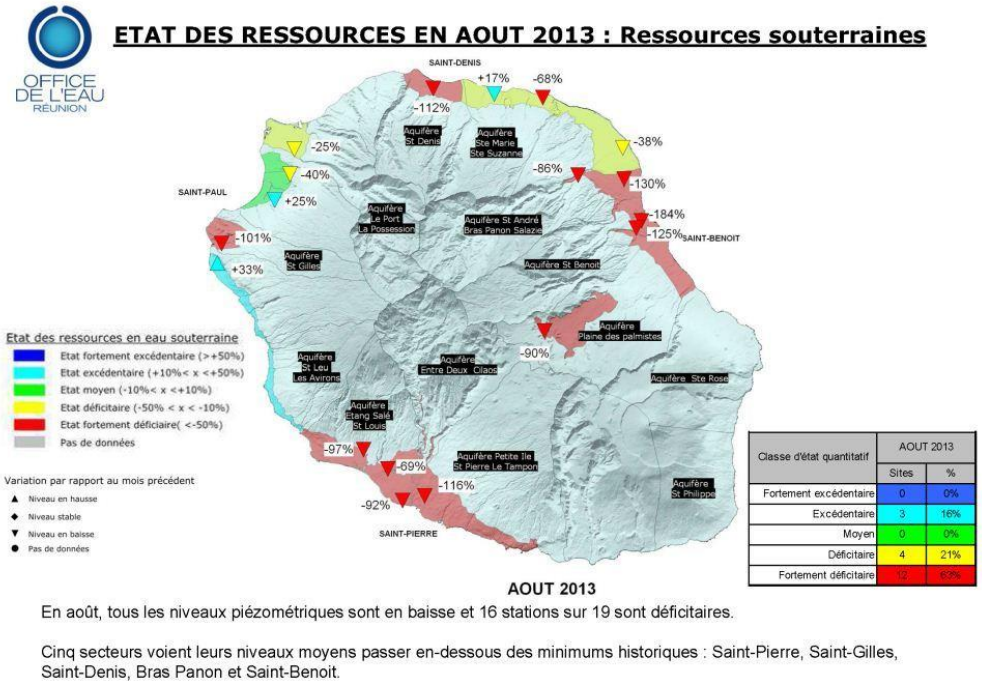


Illustration 19 : Exemple de l'état des ressources d'août 2013 extrait des chroniques de l'eau Réunion (Office de l'eau Réunion).

2e étape : choix du débit maximum à pomper en fonction de la situation climatique et du trimestre. Ces maxima sont rappelés dans le tableau suivant :

	Volume prélevable (m3)		
	Année sèche	Année normale	Année humide
Janvier-Février-Mars	1 092 000	1 337 700	1 642 550
Avril-Mai-Juin	637 000	919 100	1 010 100
Juillet-Aout-Sept	717 600	920 000	1 012 000
Oct-Nov-Déc	932 750	1 114 750	1 155 700
Annuel	3 379 350	4 291 550	4 820 350

Tableau 8 : Contraintes sur les volumes prélevables selon le type d'année climatique

4.3.5. Simulations des règles de gestion sur les années 2008-2013

Pour tester et évaluer la démarche proposée, les règles de gestion précédentes ont été appliquées sur les années 2008-2013. Ce test reste néanmoins approximatif car les données de pompage ne sont pas disponibles sur toute cette période. Les données manquantes de pompage ont été comblées de la manière suivante : les débits prélevés au Gol et à Bois de nèfles de 2012 ont été supposés être identiques pour chacune des années 2008 à 2011. Les données de pompage des puits A, B et C sont disponibles. Les données sont présentées et mises en rapport avec les limites maximales de débits prélevables dans le tableau 9 et sur les illustration 20 à illustration 22.

ANNEE	Date par trimestre	Puits A	Puits B	Puits C	BDN	Gol	Q A+B+C	Q GOL+BDN	Q A+B+C+Gol+ BDN	Q max (règle de gestion)	Ecart (positif =marge de pompage supplémentaire)
MOY.	2008 T1	101 400	41 200	43 000	294 600	629 600	185 500	924 200	1 109 800	1 337 700	227 900
	2008 T2	9 100	11 200	19 300	119 500	593 000	39 500	712 500	752 100	919 100	167 000
	2008 T3	10 500	8 800	11 100	234 100	499 500	30 400	733 600	764 000	920 000	156 000
	2008 T4	55 800	46 600	69 200	241 300	524 200	171 700	765 400	937 100	1 114 800	177 600
HUM.	2009 T1	122 600	61 700	69 300	294 600	629 600	253 600	924 200	1 177 800	1 624 600	446 700
	2009 T2	12 800	6 200	7 000	119 500	593 000	26 100	712 500	738 600	1 010 100	271 500
	2009 T3	5 900	2 100	3 200	234 100	499 500	11 200	733 600	744 800	1 012 000	267 200
	2009 T4	40 300	25 500	32 600	241 300	524 200	98 400	765 400	863 800	1 155 700	291 900
MOY.	2010 T1	109 200	57 000	54 500	294 600	629 600	220 600	924 200	1 144 900	1 337 700	192 800
	2010 T2	31 300	15 700	18 600	119 500	593 000	65 600	712 500	778 100	919 100	141 000
	2010 T3	20 700	11 700	15 700	234 100	499 500	48 100	733 600	781 700	920 000	138 300
	2010 T4	105 000	100 800	77 000	241 300	524 200	282 900	765 400	1 048 300	1 114 800	66 400
SECHE	2011 T1	161 800	81 900	90 800	294 600	629 600	334 500	924 200	1 258 800	1 092 000	-166 800
	2011 T2	55 000	0	49 400	119 500	593 000	104 300	712 500	816 800	637 000	-179 800
	2011 T3	24 200	0	31 800	234 100	499 500	55 900	733 600	789 500	717 600	-71 900
	2011 T4	315 400	0	142 700	241 300	524 200	458 100	765 400	1 223 500	932 800	-290 800
SECHE	2012 T1	306 900	210 400	109 800	294 600	629 600	627 100	924 200	1 551 400	1 092 000	-459 400
	2012 T2	102 800	43 500	47 000	119 500	593 000	193 300	712 500	905 800	637 000	-268 800
	2012 T3	123 500	76 700	81 100	234 100	499 500	281 400	733 600	1 015 000	717 600	-297 400
	2012 T4	256 100	188 300	130 100	241 300	524 200	574 400	765 400	1 339 900	932 800	-407 100

Tableau 9 : Compilations des débits prélevés au Gol par trimestre et comparaison avec le prélèvements maximum proposés dans les règles de gestion.

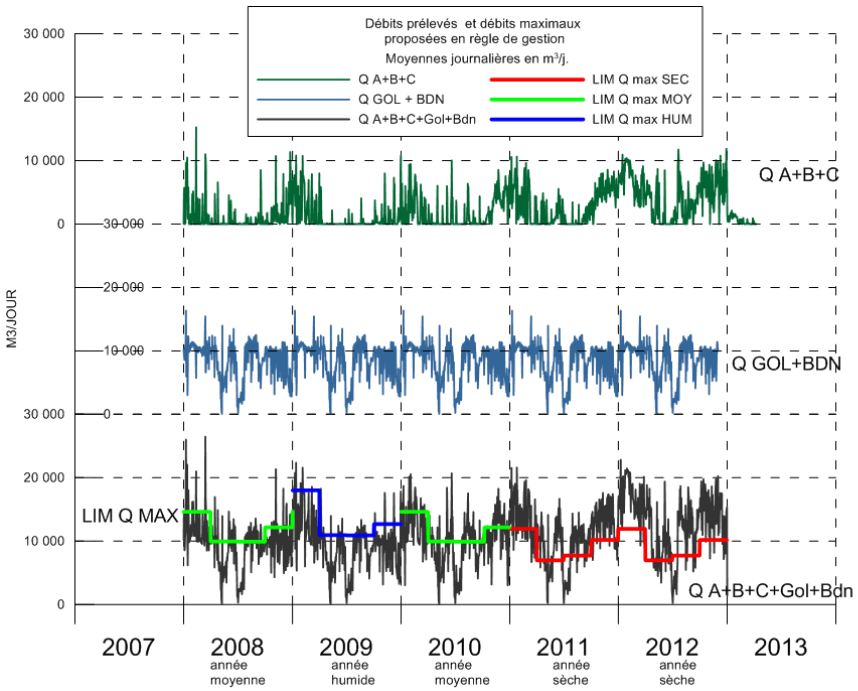
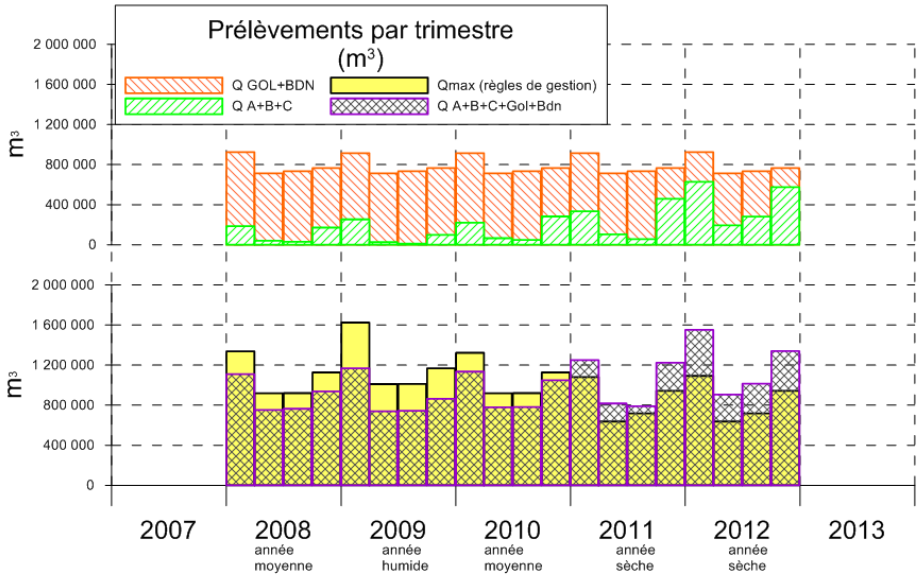


Illustration 20 : Chroniques des prélèvements (en partie reconstituées)



.

Illustration 21 : Prélèvements réels comparés aux contraintes de gestion par trimestre.

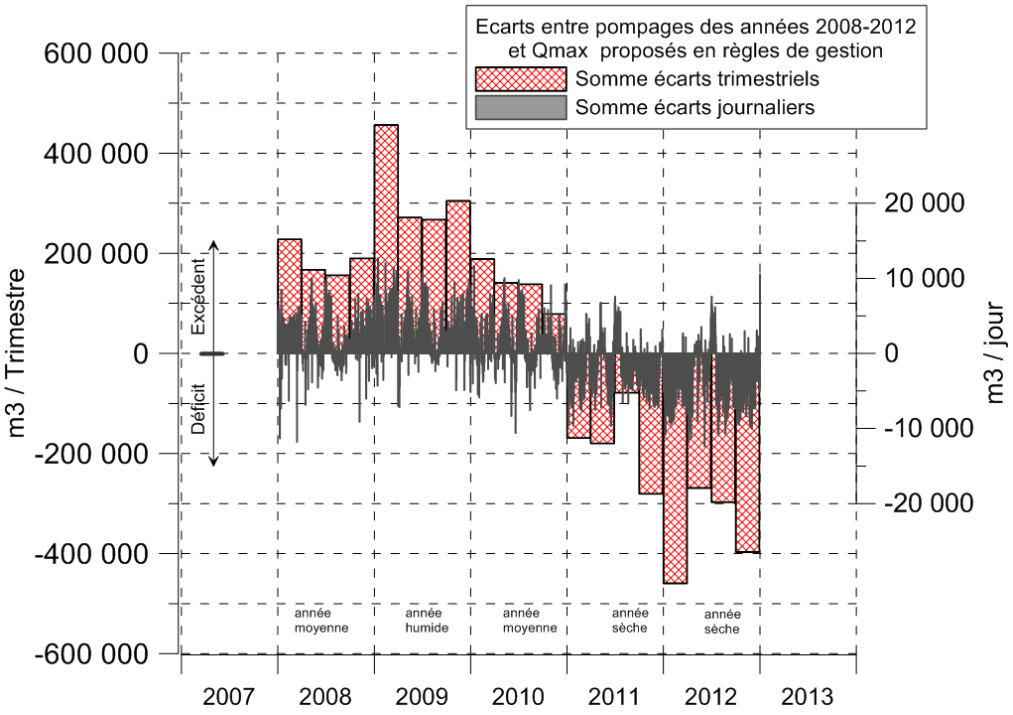


Illustration 22 : Ecarts positifs et négatifs entre prélèvements et contraintes de gestion.

Ces comparaisons montrent que pour les années 2008, 2009 et 2010 (années normales ou humides), les prélèvements réels ont respecté les contraintes de prélèvements trimestrielles proposées dans les règles de gestion. La simulation des années 2008 et 2009 avec les données de pompages réelles indique bien que la conductivité moyenne annuelle est restée sous le seuil des 500 µS/cm (respectivement 427 et 387 µS/cm).

En revanche, pour les années 2011 et 2012, les débits prélevés ont été supérieurs aux recommandations formulées dans ce rapport. La simulation de l'année 2012 a fourni une valeur de 627 µS/cm pour la conductivité moyenne annuelle. Les résultats numériques montrent également que pour respecter la contrainte de 500 µS/cm en moyenne par an, il aurait fallu prélever 267 000 m^3 en moins par trimestre.

Le nombre de jours en excédent et en déficit d'eau, en respectant les règles de gestion, a également été évalué sur la période 2008-2012. Cette évaluation est cependant très imprécise en l'absence de la connaissance des prélèvements à l'échelle journalière sur les puits du Gol et de Bois de Nèfles. Elle reste donc peu réaliste. Pour information donc, le nombre de jours en excédent sur les années 2008 à 2012 est respectivement de 303, 271, 230, 108 et 62 jours. A l'inverse, les jours en déficit et pour lesquels une restriction de pompage aurait dû être imposée sont respectivement au nombre de 52, 95, 135, 257 et 304. Dans la mesure où les connaissances acquises sur le système hydrogéologique n'ont pas permis de spatialiser la contrainte sur les prélèvements, la restriction s'impose au débit total pompé. Aucun élément hydrogéologique ne permet de répartir la contrainte entre les

usagers de l'aquifère, et on ne peut pas estimer le nombre de jours de restriction qui aurait été imposé à chaque captage sur la période 2008-2012.

4.3.6. Les contraintes de seuil

Des consignes basées sur un seuil de conductivité et de niveau viennent **compléter** la recommandation principale du volume exploitable. Elles se justifient pour palier des situations de crises tant en conductivité qu'en niveau piézométrique. Elles visent à maintenir la conductivité et le niveau piézométrique dans des plages de valeurs acceptables. Il s'agit donc de préciser les seuils de conductivité et de niveau piézométrique, dont le franchissement pendant plusieurs jours consécutifs, justifie d'imposer une restriction ponctuelle des pompages. La mesure de restriction est prévue pour être appliquée sur de courtes périodes.

La précision du modèle pour prédire la conductivité n'est pas suffisante pour qu'on puisse exploiter les seuls résultats numériques pour déterminer les seuils de conductivité. Les seuils de conductivité ont donc été fixés à partir de l'observation des chroniques disponibles et de l'expérience acquise lors de l'exploitation des puits de la Saphir depuis 2007 (date des premiers enregistrements en continu). En revanche, les performances du modèle pour simuler les niveaux piézométriques étant quant-à-elles satisfaisantes, les seuils de niveau piézométrique ont pu être fixés à partir de l'analyse des chroniques de niveaux piézométriques calculées selon différents scénarios. Les valeurs retenues ont été ensuite contrôlées par rapport aux caractéristiques des ouvrages.

Seuil pour la conductivité :

Les actions sont à entreprendre seulement si le seuil est franchi pendant une certaine durée, que nous proposons de fixer à 5 jours dans une phase test.

- Ouvrages en exploitation :

La règle habituellement appliquée par la Saphir est de réduire les débits pompés lorsque la conductivité dépasse 800 µS/cm. **Nous préconisons d'appliquer ce seuil aux ouvrages en exploitation, et d'y ajouter un seuil d'arrêt des pompages à 1000 µS/cm.** C'est en effet la valeur maximale atteinte lors des simulations sur la période 2012-2013.

Afin de situer ces seuils dans leur contexte, on rappelle que sur la période de suivi 2012-avril 2013, la conductivité maximale mesurée au puits Bois de Nèfle est de 689 µS/cm. Les conductivités mesurées aux puits A et C ont dépassé environ 75 fois le seuil de 800 µS/cm, mais seulement 5 fois pendant plus de 5 jours consécutifs. Le seuil de 1000 µS/cm n'a été dépassé qu'une fois au puits A, jamais aux autres puits.

La conductivité mesurée au puits du Gol varie peu et est très nettement inférieure à celle mesurée aux autres ouvrages, avec un maximum de 415 µS/cm sur la période suivie. Le seuil de 800 µS/cm pour cet ouvrage est donc déjà bien au-delà d'un seuil d'alerte. Compte-tenu des caractéristiques particulières de la chronique de conductivité **au puits du Gol**, et pour cet ouvrage uniquement, on propose d'abaisser le seuil

d'alerte justifiant la **réduction du débit pompé à 500 µS/cm** ; avec arrêt des pompages si la conductivité dépasse 600 µS/cm.

- Piézomètre de suivi PIB5D :

La localisation de ce piézomètre en flûte de pan entre les forages d'exploitation et l'océan en fait un point privilégié d'acquisition de connaissances sur la position de l'interface eau douce / eau salée. Sur la base des chroniques de conductivité disponibles en ce point, confortées par les logs réalisés par l'Office de l'eau en 2013/2014 (Illustration 23), il est proposé dans un premier temps de maintenir une valeur de conductivité inférieure au maximum observé, soit 8500 µS/cm. Un objectif plus ambitieux pourra être proposé après la mise en place des règles de gestion et sur la base des futures mesures.

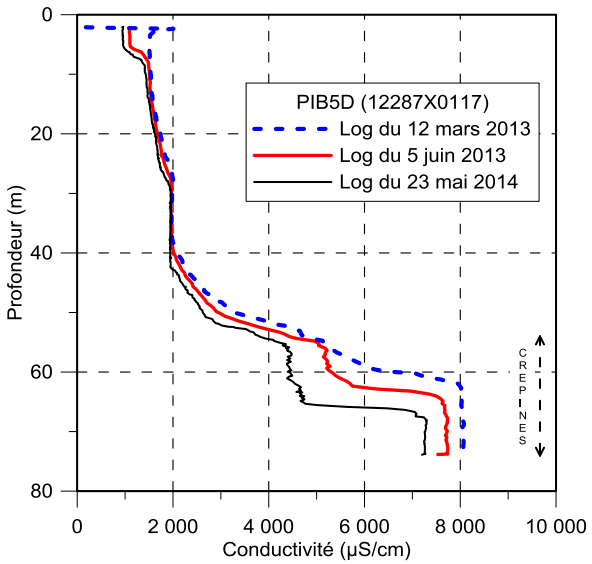


Illustration 23 : Logs de conductivité (PIB5D)

Seuil pour les niveaux piézométriques :

Le niveau piézométrique dans tous les ouvrages est fixé principalement par le niveau de la mer, à savoir qu'il est relativement stable, fluctue peu et subit l'influence de la marée. De plus, en raison de la forte transmissivité de l'aquifère, les rabattements de niveau piézométrique restent faibles même quand les débits d'exploitation sont élevés. A titre d'exemple, le niveau piézométrique dans le puits de Bois de Nèfle fluctue autour de 3.5 m NGR, l'influence de la marée est de l'ordre de 0.05 m, et un pompage de 220 m^3/h provoque un rabattement de 0.1 m. Enfin, il n'a pas été établi au cours de la phase de modélisation, de lien direct et univoque entre le niveau piézométrique dans un puits et la conductivité de la nappe supérieure.

Pour ces différentes raisons, il n'est pas possible d'utiliser le niveau piézométrique comme seul critère de gestion pour éviter l'intrusion saline. En revanche, on peut

proposer des valeurs d'alerte confortant une gestion basée sur le volume annuel prélevable.

Ainsi, les niveaux piézométriques étant bien reproduits par le modèle, nous proposons de fixer les valeurs seuil à ne pas dépasser au niveau des valeurs minimales calculées par le modèle dans les conditions pluviométriques les plus sèches.

Ces valeurs sont :

- Puits A : 2.5 m NGR
- Puits B : 0 m NGR (les niveaux sont plus bas dans ce forage à cause des pertes de charge quadratiques plus élevées).
- Puits C : 2.5 m NGR
- Puits du Gol : 1 m NGR

Puits Bois de Nèfles : 3.0 m NGR.

A noter que sur la période 2008-2012, les niveaux piézométriques mesurés dans chacun des cinq ouvrages n'ont jamais franchis ces seuils.

.

5. Conclusion

Les connaissances acquises sur le fonctionnement hydrogéologique du compartiment Est du système aquifère du Gol ont été traduites dans un modèle conceptuel prenant en compte deux aquifères (la nappe supérieure et le complexe de base), la mer, des réservoirs annexes et les apports à partir des précipitations. En s'appuyant sur ce modèle conceptuel et sur une approche globale de description des flux au travers des réservoirs, un simulateur numérique a pu être développé. Calé et validé par confrontation avec les chroniques piézométriques disponibles, il permet de reproduire fidèlement les niveaux d'eau dans les puits. Il fournit, sur une base empirique, une estimation de la conductivité de la nappe supérieure qui présente un comportement similaire aux conductivités observées aux puits A, B et C. Il ne propose pas une évaluation précise et spatialisée de la conductivité. Le modèle a été construit à partir d'une connaissance hydrogéologique partielle en regard de la complexité du site. Les connaissances manquantes concernent essentiellement la géométrie précise des aquifères (limites externes et changements de faciès à l'intérieur de l'aquifère entre les alluvions et les coulées basaltiques), la piézométrie sur l'ensemble de la plaine, les conditions d'alimentation par l'amont et celles de vidange vers la mer, la faible durée des chroniques de mesure ou même leur inexistence. L'étude de 2012 (BRGM/RP-81834-FR) a cependant nettement amélioré les connaissances grâce à un programme de mesure in situ et à des techniques d'interprétations élaborées (isotopes, traitement du signal, géochimie…). Ce programme n'a cependant pas levé les incertitudes précédentes, ce qui exigerait une étude d'une toute autre ampleur (réalisation de piézomètres, de sondages carottés, acquisition des chroniques de mesures sur plusieurs années…).

Sur la base de la compréhension du fonctionnement du système acquise au cours de cette étude, des règles de gestion ont pu être proposées. Elles regroupent les règles classiques de gestion des aquifères côtiers, les consignes de suivi de l'aquifère, des contraintes sur les prélèvements et des contraintes de seuil.

Le critère de gestion durable de l'aquifère qui a été retenu, et identifié grâce au modèle, est la conductivité moyenne annuelle de l'aquifère supérieur, qui doit demeurer en dessous de 500 µS/cm. Au regard des temps de réponse du système aux sollicitations (infiltration et pompages), et des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère, il semble pertinent de fixer des contraintes de prélèvements aux échelles spatiales et temporelles de l'aquifère et du trimestre. Le modèle numérique calé a été mis en œuvre en explorant plusieurs scénarios de pompage pour des années pluviométriques contrastées, en vue de déterminer les prélèvements maximums permettant de respecter le critère de gestion durable. Ainsi, des prélèvements ont été simulés pour trois types d'années climatiques : année sèche, année normale et année humide. Les volumes maximums de prélèvement proposés sont les suivants : 3.5 millions de m^3/an en année sèche, 4.5 millions de m^3/an en année normale et 5 millions de m^3/an en année humide. Ces valeurs sont ensuite déclinées à l'échelle trimestrielle par type d'année (sèche, normale, humide).

Ces volumes prélevables trimestriels constituent la principale règle de gestion proposée. Ils visent à la protection de l'aquifère à long terme.
Ces règles sont complétées par des mesures à prendre en cas de dépassement de seuils en conductivité et en niveau. Ces compléments aux règles principales auront un rôle en cas de crise, pour produire une réaction à court terme. Ainsi, il a été préconisé de réduire le pompage si la conductivité au niveau d'un ouvrage dépasse pendant 5 jours consécutifs 800 µS/cm (500 µS/cm pour le puits du Gol) et de stopper le pompage si elle dépasse 1000 µS/cm (600 µS/cm pour le puits du Gol). Il convient également de diminuer les débits pompés si les niveaux piézométriques descendent en dessous de 3 m NGR pour le puits de Bois de Nèfles, 2.5 m NGR pour les puits A et C, 1 m NGR pour le puits du Gol et 0 m NGR pour le puits B.

Le but de la mise en place de règles de gestion est d'éviter une intrusion saline polluant l'aquifère à long terme. L'ensemble des règles proposées répondent aux contraintes suivantes :

- Les transferts de masse dans l'aquifère du Gol présentent une inertie qui permet une modulation des débits en cours d'année pour qu'ils soient adaptés le mieux possible aux besoins (c'est-à-dire des dépassements temporaires, en conductivité par exemple, sont autorisés). Cette inertie est prise en compte par le modèle. Les simulations montrent que la valeur de la conductivité de la nappe supérieure peut dépasser ponctuellement la valeur seuil de 500 µS/cm tout en respectant la valeur moyenne annuelle.
- L'étude approfondie du Gol a montré que le fonctionnement hydrogéologique du système aquifère était complexe. *Des contraintes simples correspondant à une situation simple ne sont donc pas possibles (exemple : lien établi entre niveau de nappe et position d'une interface eau douce/eau salée).*
- L'intrusion saline a été reconnue relativement loin des forages au piézomètre PIB5D. *Le suivi doit intégrer un point à proximité de cette interface.*
- L'aquifère du Gol est dans un état de pseudo-équilibre entre recharge et pompage, éloigné de l'état naturel où les niveaux piézométriques étaient plus hauts de 1.5 m environ. A cette cote, la nappe était alors drainée par la ravine Maniron, avec un écoulement pérenne vers l'étang du Gol. *Un retour à cette situation d'équilibre d'origine, signifiant un arrêt des pompages, n'est pas une obligation au vu des potentialités de cet aquifère. Une exploitation raisonnée a été proposée à l'aide du modèle.*

    - Le niveau piézométrique dans tous les ouvrages est fixé principalement par le niveau de la mer. Les rabattements y sont faibles en raison de la forte transmissivité de l'aquifère. Le niveau piézométrique mesuré dans les puits est influencé par les pertes de charge quadratiques qui sont différentes selon l'ouvrage : elles sont 40 fois plus élevées au puits B qu'au puits A ; pour un

débit de 200 m^3/h, elles sont de 5.2 m dans B et de 0.1 m dans A[7]. Pour ces différentes raisons, il n'est pas possible d'utiliser le niveau piézométrique comme seul critère de gestion pour éviter l'intrusion saline. En revanche, on a proposé des valeurs d'alerte confortant une gestion basée sur le volume annuel prélevable. Ces valeurs ont été fixées comme les valeurs les plus basses calculées par le modèle pour chaque puits en année sèche.

Recommandations

La complexité du site du Gol a nécessité des investigations poussées qui ont eu lieu essentiellement en 2012-2013. Cela a deux conséquences :

1) les règles de gestion doivent être testées et adaptées à la situation réelle en fonction des attentes des gestionnaires et du résultat de leur application ;

2) le fait d'avoir pu observer la période d'étude 2012-2013 est un avantage, car cela a permis d'observer une situation défavorable (précipitations faibles).

Cependant, la représentativité de la longueur de la chronique étant limitée, elle ne permet pas de compenser le manque d'observation et d'interprétation sur des périodes de moyennes ou de hautes eaux. Il convient donc d'assurer un suivi effectif de l'aquifère et d'en confier l'interprétation à un service ou un bureau d'étude compétent en hydrogéologie.

Enfin, une concertation entre les exploitants doit être organisée pour un suivi des prélèvements et pour que le prélèvement total annuel respecte les recommandations.

[7] Pour rappel, les pertes de charges quadratiques ont lieu au niveau du massif filtrant et dans les ouvertures des crépines et leur impact est limité dans l'aquifère. Le rabattement mesuré dans le puits A est donc très différent du niveau d'eau dans l'aquifère.

6. Références

ANTÉA (2002) – Cône alluvial de la rivière Saint-Étienne ; Actualisation des données hydrologiques et hydrogéologiques, Élaboration d'un modèle mathématique de gestion des ressources en eau souterraine. Rapport A 27584.

ANTÉA (mars 2013). Gestion des effluents traités de la commune de St-Louis dans le secteur du Gol. Étude de faisabilité. 70079/A.

Cary L., Petit V., Lucas C., Lions J. (2012). Détermination des valeurs seuils de quatre polluants spécifiques pour la définition de l'état des eaux souterraines de La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-61486-FR. 59 p.

Charlier J.-B., Ollivier P., Lucas C., Olivia Z. (2012) - Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Rapport intermédiaire, BRGM/RP-61834-FR.

Chopard Mezino Natival (2003) - Fluctuation saisonnière de l'Evapotranspiration (ET0 Penman-Monteith) dans le Nord, l'Est et le Sud-est de l'île de la Réunion. Influence de l'altitude et comparaison avec l'Ouest et le Sud.

Frissant N., Barthélemy L., Petit V. (2006) – Synthèse des ressources en eaux souterraines potentiellement mobilisables à La Réunion. Rapport BRGM/RP-55035-FR, 225 p, 30 ill., 52 tabl., 2 ann.

Jaques E., Frissant N., Graveline N. et Lanini S. (2008): Modèle intégré pour l'aide à la gestion des ressources en eau ans la micro-région Sud de La Réunion – Rapport intermédiaire de fin de Phase 1 – BRGM/RP-55473–FR.

Lanini S., Aunay B., Graveline N. (2009) : Modèle Intégré pour l'aide à la gestion des ressources en eau dans la microrégion Sud de La Réunion. Rapport final. BRGM/RP 57041 FR.

Lopez B., Petit B., Lucas C. (2012) – Évolution des tendances à la hausse de polluants dans les masses d'eau souterraines de La Réunion. Rapport final. BRGM/RP-61792-FR. 83 p.

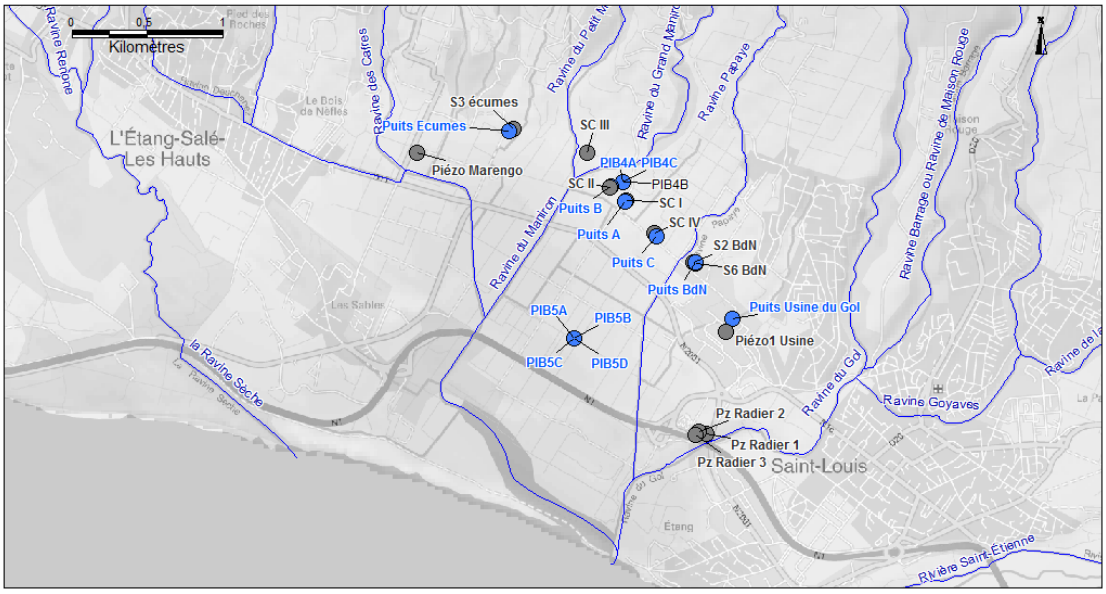
Thornthwaite C.W. (1948) - An Approach Toward a Rational Classification of Climate, Geogr. Rev., p. 55-94.

Annexe 1 :

Présentation du réseau de suivi et des chroniques de données 2012 - 2013

Les données acquises sur la période juillet 2012 à juillet 2013 sont présentées dans cette annexe.

1. Réseau de suivi



N°BSS pt installation	Localisation actuelle	Date installation	Profondeur d'installation (m/rep) (valeur calculée)	C	T	N	B	Type de sonde	N° de série	Marque
12287X0035/F	Puits Usine SR Gol	18/07/2012	16	X	X			Dipper PTEC	T2L 0 1009	SEBA
12287X0038/P2	Puits Bois de Nèfles	18/07/2012	16.33		X	X		Mini Diver 0-10 m	L3854	Schlumberger
12287X0038/P2	Puits Bois de Nèfles	18/07/2012	16.7	X	X			Dipper PTEC	T2L 0 1008	SEBA
12287X0054/P1	Piézo Usine SR Gol	03/10/2012	17.91		X	X		Mini Diver 0-10 m	L3346	Schlumberger
12287X0054/P1	Piézo Usine SR Gol	18/07/2012	20	X	X			Dipper PTEC	T2L 0 1007	SEBA
12287X0057/PIB5A	PIB5A	07/06/2012	14.49	X	X	X		Diver CTD 0-50 m	K1885	Schlumberger
12287X0114/PIB4-C	PIB4C	05/09/2012	80.71	X	X	X		Diver CTD 0-100 m	J8985	Schlumberger
12287X0115/PIB5B	PIB5B	07/06/2012	34.69	X	X	X		Diver CTD 0-50 m	K1897	Schlumberger
12287X0116/PIB5-C	PIB5C	07/06/2012	42.83	X	X	X		Diver CTD 0-100 m	J8985	Schlumberger
12287X0117/PIB5-D	PIB5D	07/06/2012	0.45				X	Baro	H3426	Schlumberger
12287X0117/PIB5-D	PIB5D	07/06/2012	55.89	X	X	X		Diver CTD 0-100 m	K1257	Schlumberger
C	Conductivité	B : Pression atmosphérique ou compensation automatique de la mesure du niveau d'eau.			Conductivité					
T	Température				Température					
N	Pression eau				Pression eau					

Illustration 1 : Réseau de suivi du Gol

Les points suivis dans le réseau de mesure (Illustration 1) sont les suivants :

- Puits du Gol (12287X0035/F) : Le puits du Gol est implanté sur le site de l'Usine Sucrière. Durant la campagne sucrière, ce puits est exploité principalement par Tereos pour les besoins de l'usine. En dehors de cette période, le puits alimente CTG. Dans

cette configuration, les volumes prélevés ne sont pas comptabilisés par Tereos, mais fournis par la CTG au pas de temps journaliers. Tereos dispose d'une sonde de niveau et d'un débitmètre qui enregistrent à un pas de temps de 2 minutes. Une sonde de niveau et une sonde de conductivité ont été installées par le BRGM en juillet 2012. La comparaison des données de niveau fournies par la sonde BRGM et celles fournies par Tereos montrant qu'elles sont identiques, la sonde de niveau BRGM a été retirée fin 2012.

• Puits Bois de Nèfles (12287X0037/P2) : L'équipement de mesure est similaire à celui du puits du Gol : Tereos a mis en place une sonde de niveau et un débitmètre qui enregistrent au pas de temps 2 minutes ; une sonde de conductivité et de niveau ont été installées par le BRGM en juillet 2012. La CTG fournit les volumes journaliers prélevés. Les valeurs de niveaux d'eau et de conductivité exploitées sont celles de la sonde installée par le BRGM.

• Piézomètre du Gol (12287X0054/P1) : Le piézomètre du Gol est équipé d'une sonde de niveau – conductivité et d'une sonde barométrique depuis juillet 2012. Les données sont enregistrées au pas de temps 2 minutes.

• Piézomètres PIB4C et PIB5A/B/D (12287X0114/PIB4C – 12287X0057/PIB5A – 12287X0115/PIB5B – 12287X0117/PIB5D) : Les piézomètres sont équipés d'une sonde de niveau – conductivité qui enregistre au pas de temps 10 minutes. Une sonde barométrique est également disposée au niveau de PIB5D. L'équipement est resté identique à celui en place en 2012.

• Puits A, B et C (12287X0061/P1 - 12287X0062/P2 - 12287X0064/P-C) : Ces puits sont exploités par la Saphir qui fournit les valeurs de niveau, de conductivité et de débits au pas de temps de 10 mn.

• Schémas de fonctionnement Gol/Bois de Nèfles

Les deux puits (Gol et Bois de Nèfles) alimentent l'Usine Sucrière du Gol et la CTG. La CTG utilise les eaux du puits du Gol lorsqu'il n'est pas exploité par l'usine sucrière. Lorsque l'un des deux puits est exploité, l'autre est à l'arrêt (Illustration 2). Les points de mesure du débit sont indiqués sur l'Illustration 3.

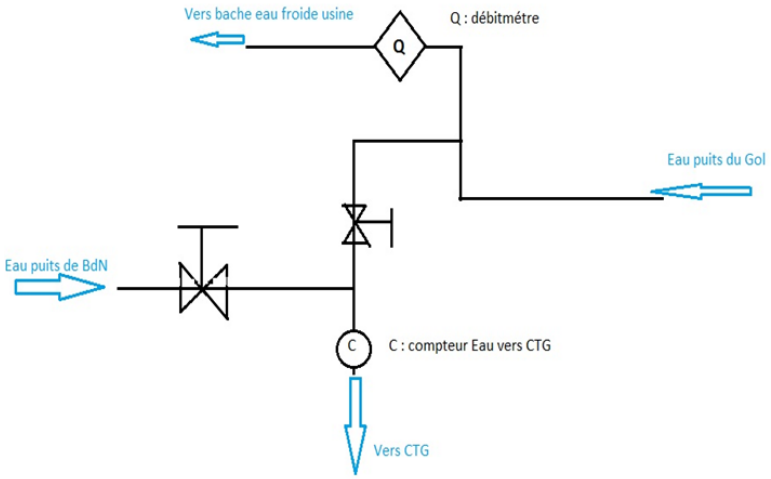


Illustration 2 : Schéma simplifié du circuit des eaux au Gol

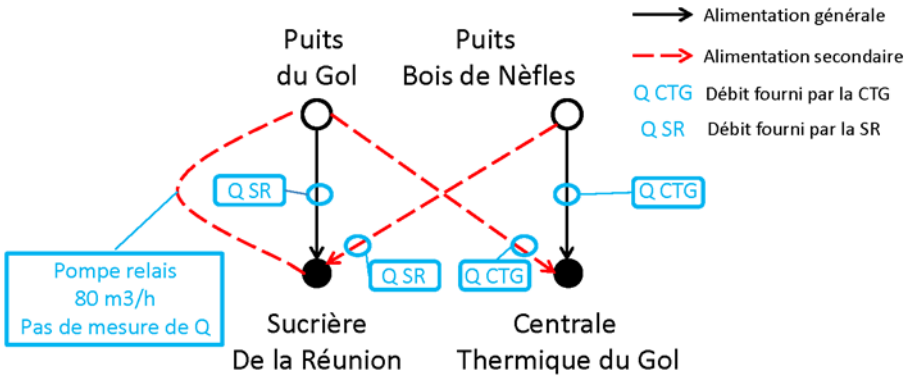


Illustration 3 : Schéma de fonctionnement et de répartition des débits

- **Chroniques hydrogéologiques**

L'ensemble des données obtenues par ce suivi est présentée ci-dessous (Illustration 4). La phase d'acquisition s'étend sur une année, de juillet 2012 à juillet 2013.

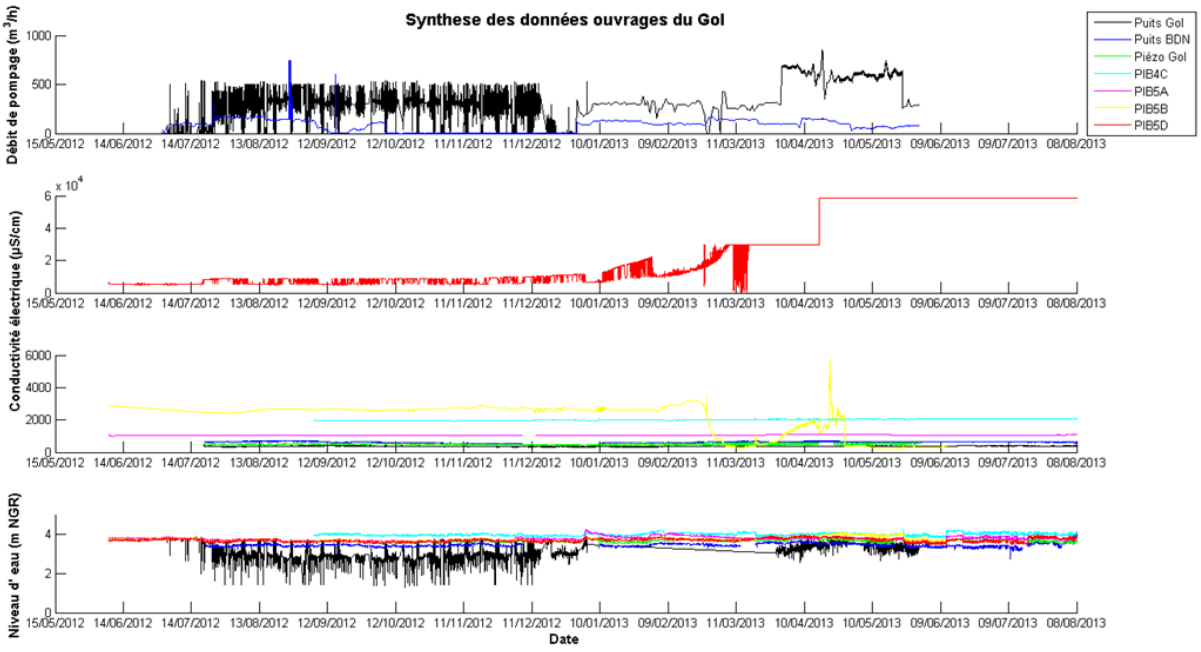


Illustration 4 : Chroniques hydrogéologiques des ouvrages suivis sur le site du Gol.

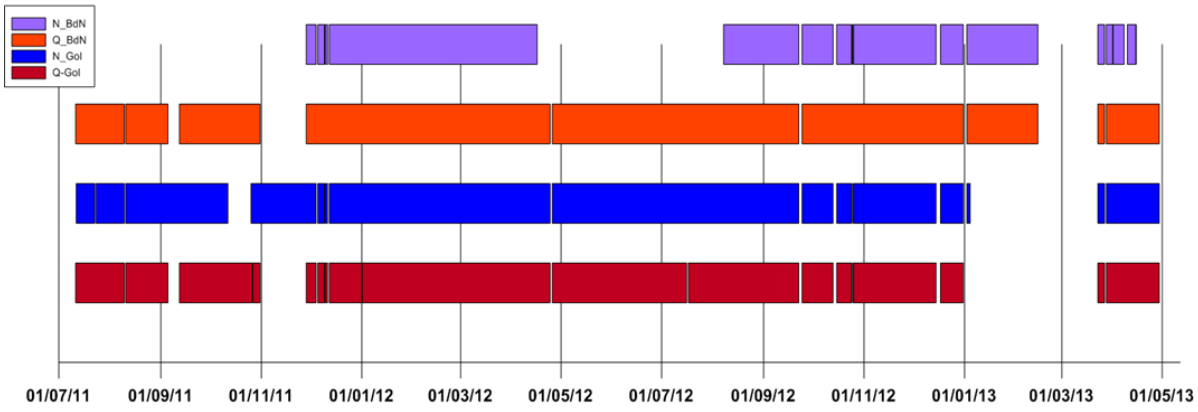


Illustration 5 :Données disponibles (Tereos)

Les valeurs de débit sont au pas de temps de 2 mn jusqu'à la fin de 2012 (données SR), puis au pas de temps journaliers (données CTG) : La CTG contrôle ses pompages par la mesure des volumes d'eau prélevés par jour. Les volumes journaliers sont répartis sur 24 h et exprimés en m^3/h. Les débits de pompage de l'Usine Sucrière sont de l'ordre de 400 à 500 m^3/h, voire 600 m^3/h pour le puits BDN, ceux de la CTG peuvent atteindre 800 m^3/h.

On observe globalement des variations de niveaux d'eau similaires pour le puits Bois de Nèfles et les piézomètres du GoI, PIB4C, PIB5A, PIB5B et PIB5D (Illustration 6).

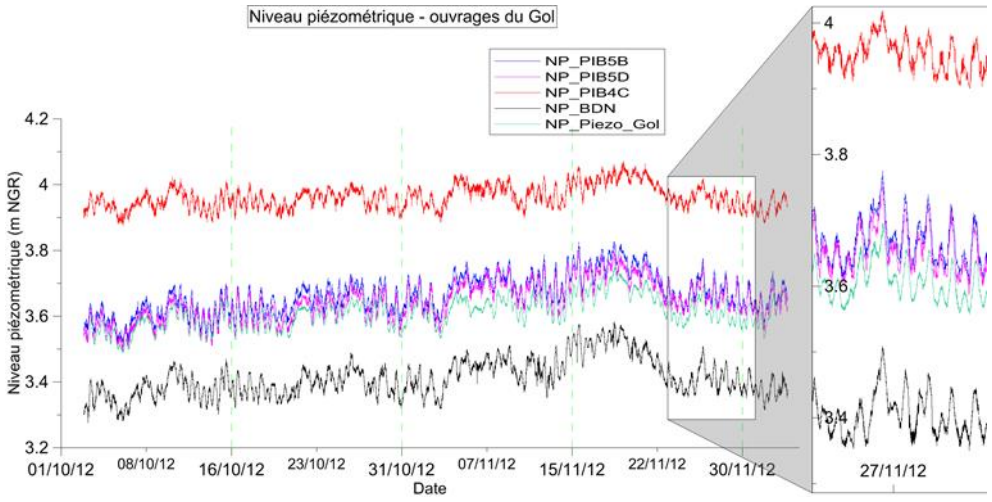


Illustration 6 : Niveaux piézométriques - Piézomètre du GoI, Bois de Nèfles, PIB4 et PIB5.

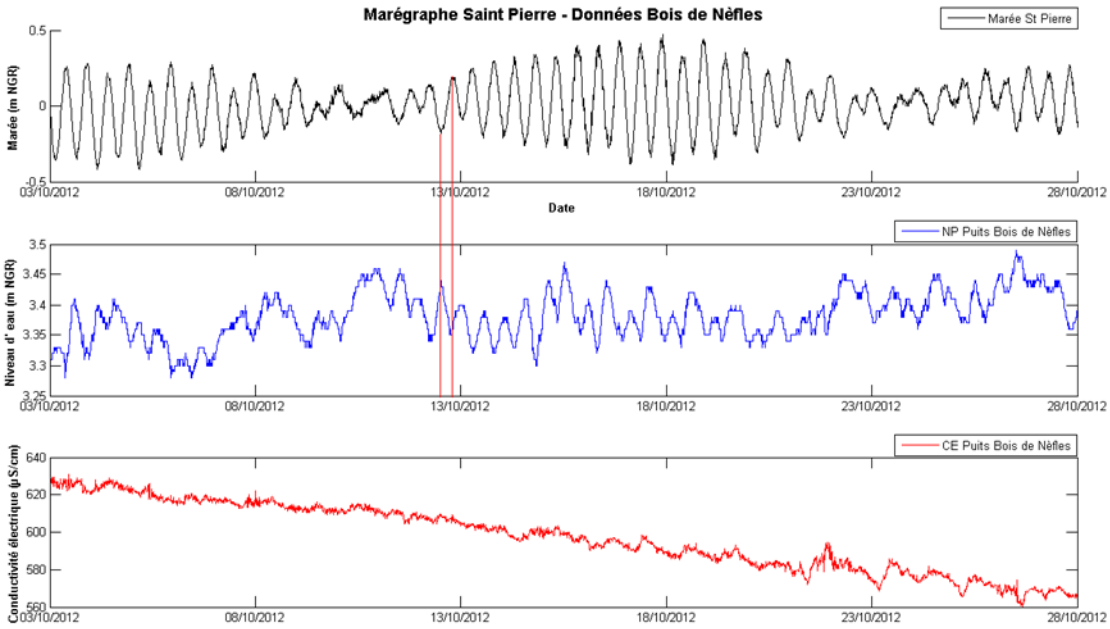


Illustration 7 : Niveau de la mer (marégraphe de St-Pierre) et données BDN.

2. Analyses des chroniques hydrogéologiques

Les points du réseau de mesure, les données de piézométrie et de conductivité acquises en 2012 et 2013 sont présentées en détail en Annexe 1. Les analyses des chroniques hydrogéologiques du Puits du Gol et de Bois de Nèfles, pour lesquelles des données manquaient sur la période 2011/2012, sont présentées dans ce chapitre. Les autres chroniques sont en annexe 1.

2.1. PUITS DU GOL

L'Illustration 8 présente les données de niveau d'eau (NP), de conductivité électrique (CE) et de débit de pompage (Q) au puits du Gol. Les chroniques de pompage de Bois de Nèfles et du puits C sont également tracées. Les chroniques (débit, niveau et conductivité) sur le puits du Gol ne sont pas disponibles en début d'année 2013 (du 01/01/2013 au 24/03/2013) du fait de travaux de maintenance réalisés par Tereos sur cet ouvrage.

Les variations de niveau d'eau dans le puits du Gol, liées directement à celles des débits pompés dans l'ouvrage, sont comprises entre 2.5 et 4 m NGR. La conductivité reste faible par rapport au seuil d'alerte de 500 µS/cm et varie peu sur l'année de mesure (350 – 400 µS/cm); les fluctuations quotidiennes sont faibles : environ 5 µS/cm. L'arrêt des pompages engendre une baisse d'amplitude de variation de la conductivité et des niveaux d'eau qui tendent à n'être cette fois influencés que par la marée.

Durant les phases de pompage, on observe de variations brutales de niveau d'eau : Les débits pompés sont élevés (400 m^3/h) et les phases d'arrêt-démarrage des pompes peuvent être fréquentes. L'impact des pompages sur le niveau d'eau dépend des caractéristiques de l'ouvrage mais aussi du mode d'exploitation. Le niveau d'eau est relativement stable à 2.75 m NGR lors des phases de pompage continues (Mode 1) et à 3.75 m NGR en l'absence de pompage (Mode 2) (Illustration 9).

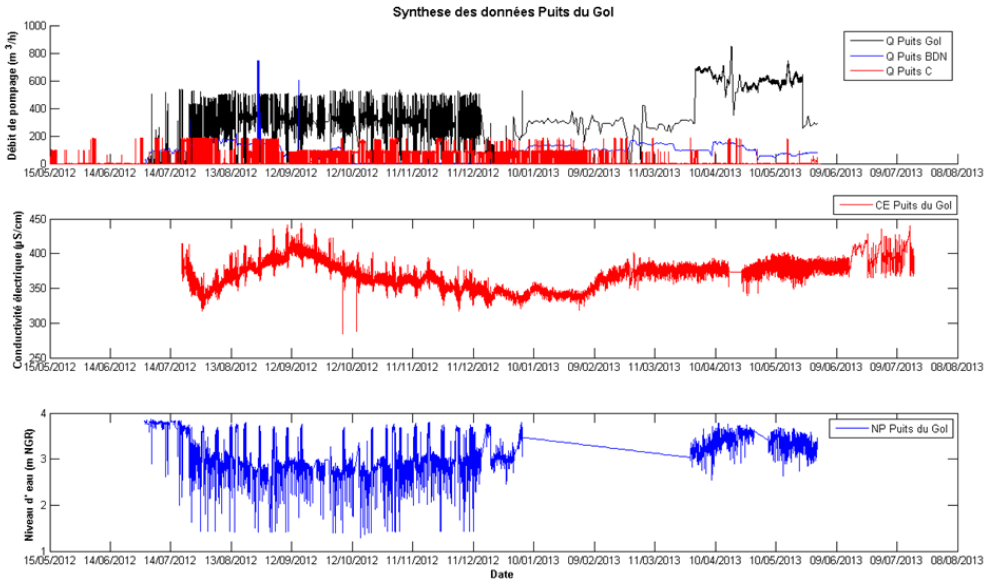


Illustration 8 : Chroniques des données au puits du Gol.

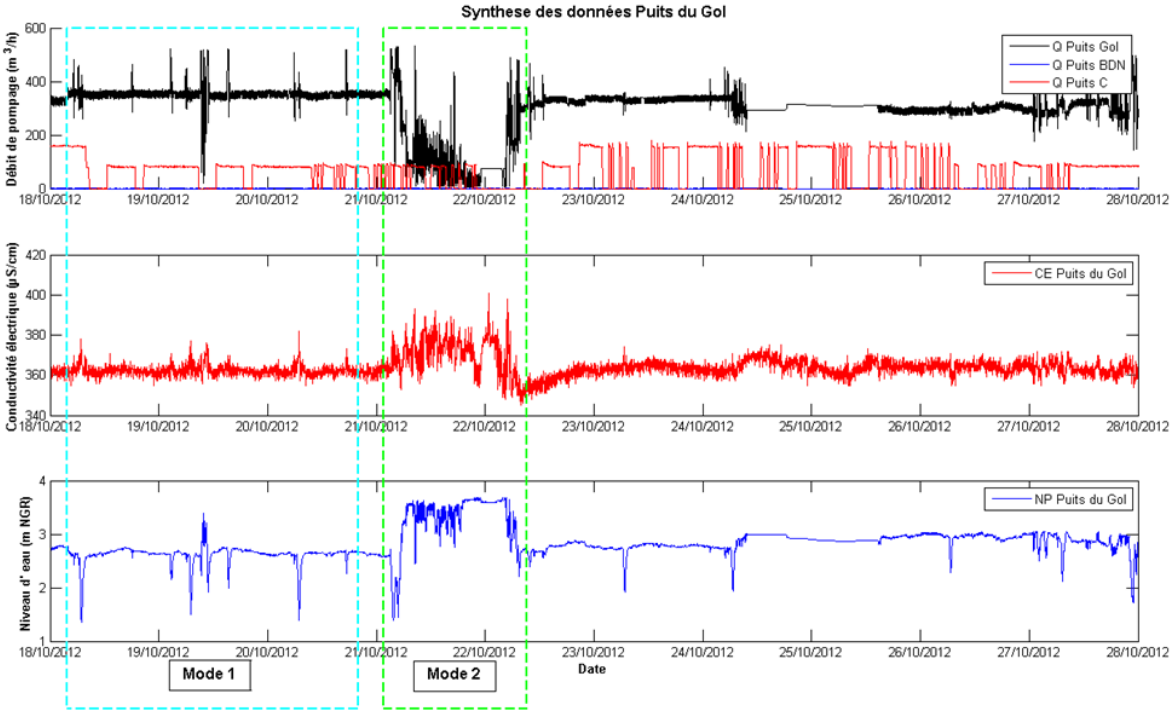


Illustration 9 : Zoom sur la période 18/10/2012 au 28/10/2012.

2.2. PUITS BOIS DE NEFLES

Le niveau piézométrique reste stable autour de 3.5 m NGR car le puits Bois de Nèfles est exploité à un régime de débit régulier et à un débit d'exploitation induisant un rabattement faible, peu observable à ce niveau de prélèvement. Pour rappel, le rabattement est d'environ 10 cm pour 200 m^3/h (observés lors du pompage par palier). Les fluctuations saisonnières sont très peu marquées : le passage des cyclones Dumile et Felleng qui ont eu lieu début et fin janvier 2013, ne sont pas visibles. L'influence de la marée sur les niveaux piézométriques (Illustration 10) est observable sur cet ouvrage.

La conductivité électrique évolue au cours de la saison entre 550 et 700 µS/cm. L'influence du pompage sur la conductivité est peu visible car l'exploitation du puits est régulière. L'amplitude de variation de la CE sous l'effet de la marée est de seulement 15 µS/cm.

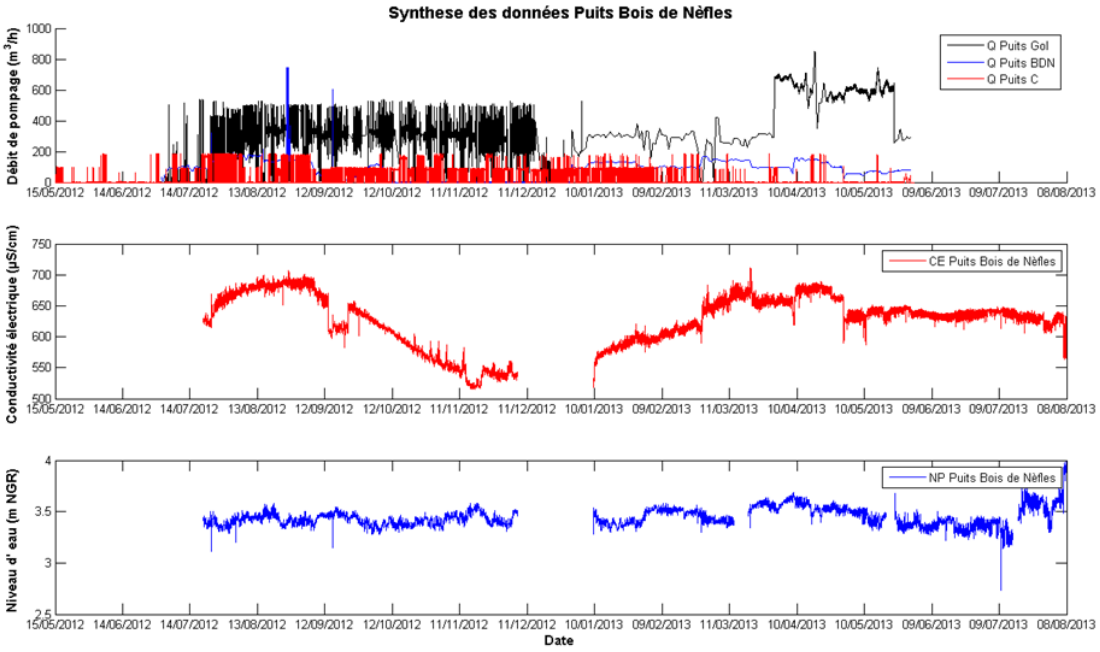


Illustration 10 : Chroniques au puits Bois de Nèfles.

- **Piézomètre du Gol**

La chronique de niveau piézométrique débute en juillet 2012 ; elle est plus courte que pour les autres ouvrages. Les niveaux d'eau dans le piézomètre du Gol sont influencés par les pompages du puits du Gol (Illustration 11) et sont compris entre 3.5 et 3.85 m NGR. Cette valeur maximale correspond au cyclone Dumile du 03/01/2013. La montée du niveau d'eau est très rapide (une journée) et le niveau de base est retrouvé au bout d'une quinzaine de jours. Les amplitudes sont très faibles : une dizaine de cm dus aux pompages et au maximum 25 cm lors de Dumile.

La conductivité électrique est influencée par les pompages au puits du Gol (Illustration 12).

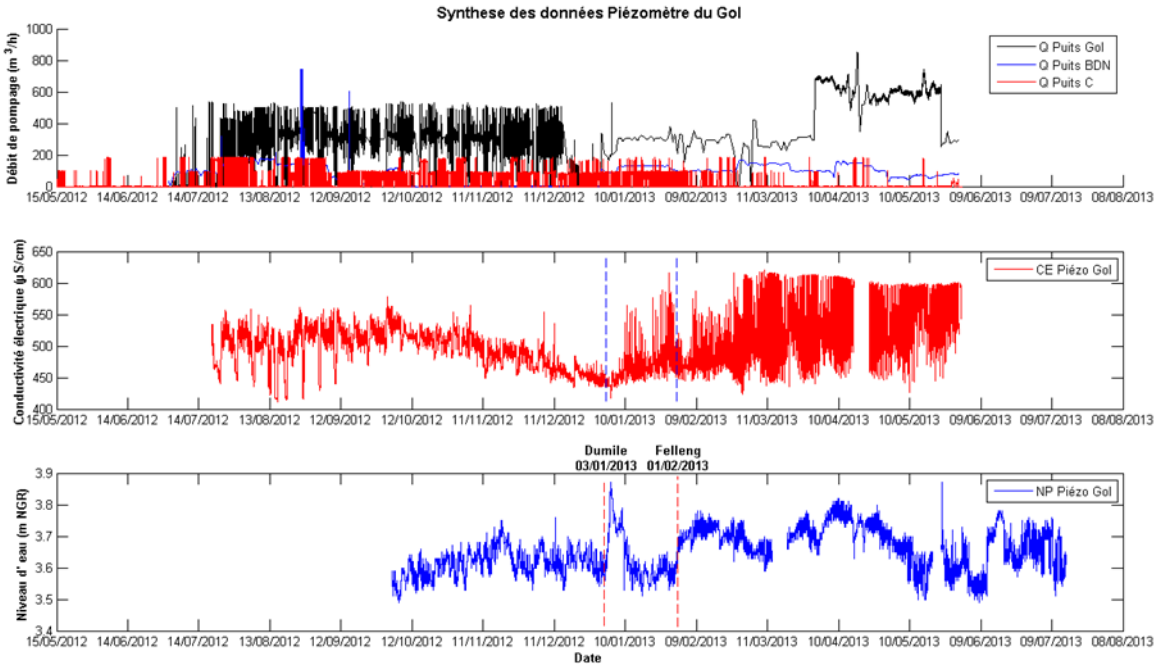


Illustration 11 : Chroniques au piézomètre du Gol.

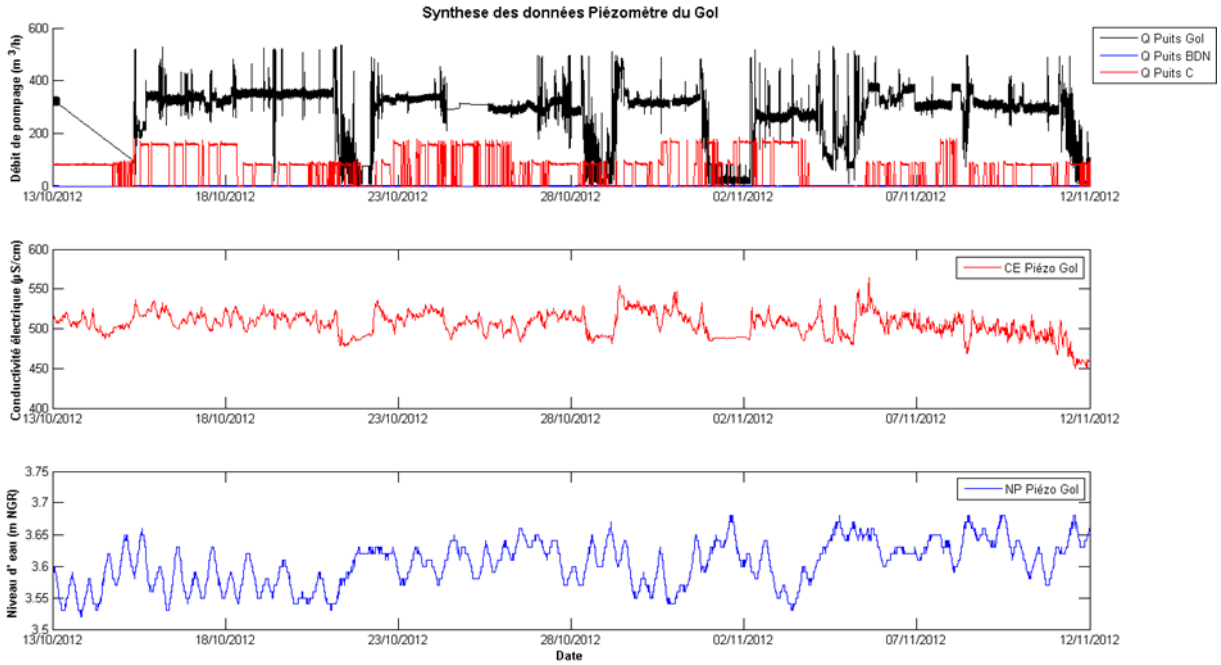


Illustration 12 : Zoom sur la période du 12/10/2012 au 12/11/2012 sur le piézomètre du Gol.

Les deux cyclones (Dumile et Felleng) provoquent une modification de la fréquence de variation de la conductivité électrique (Fig. 14). On passe d'un régime de variation avec des valeurs comprises entre 475 µS/cm et 575 µS/cm (valeurs extrêmes) à un régime de fluctuations entre 475 µS/cm et 625 µS/cm. Ce phénomène se prolonge sur plusieurs mois. *Compte tenu des valeurs observées, de leur sens de variation et de la position de la sonde à 20 m de profondeur, les intrusions salines ne sont pas en cause. Rythme des pompages au Gol (données uniquement journalières ne permettent pas de répondre*). Un lessivage des sols et de la ZNS est une hypothèse possible.

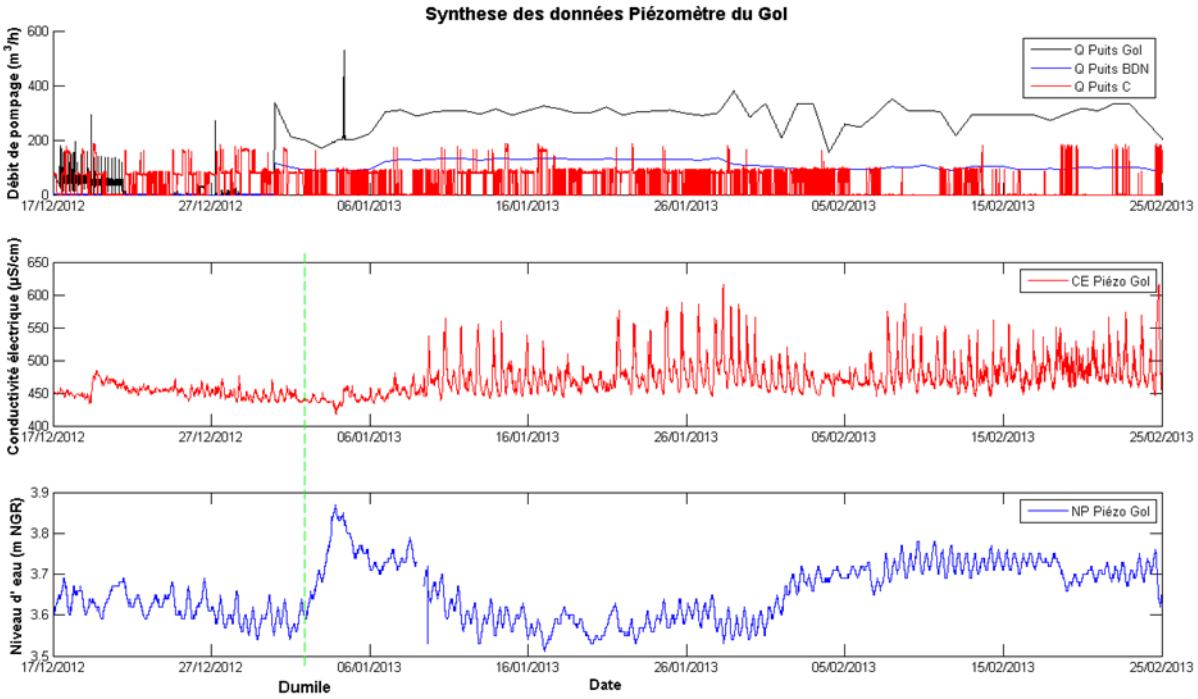


Illustration 13 : Piézomètre du Gol : Zoom sur la période du 17/12/2012 au 25/02/2013.

- **Piézomètre PIB4C**

Le niveau piézométrique est relativement stable ; il varie entre 3.8 m NGR et 4.2 m NGR (maximum correspondant au cyclone Felleng du 01/02/2013). La conductivité électrique augmente de façon régulière par paliers avec le temps. Elle passe de 1950 µS/cm en septembre 2012 à 2100 µS/cm en juillet 2013 (Illustration 14). Autre caractéristique de ce piézomètre, la conductivité enregistrée se présente en créneaux, quelle que soit l'échelle de mesure utilisée. En effet la sonde peut être programmée sur une gamme de 0 – 30 000 µS/cm ou 0 – 120 000 µS/cm ; les 2 gammes ont été testées.

Le niveau piézométrique suit les mouvements de marée (Illustration 15Illustration 14). L'influence des puits du Gol et puits Bois de Nèfles sur le niveau piézométrique et la conductivité ne sont pas détectables sur ces chroniques.

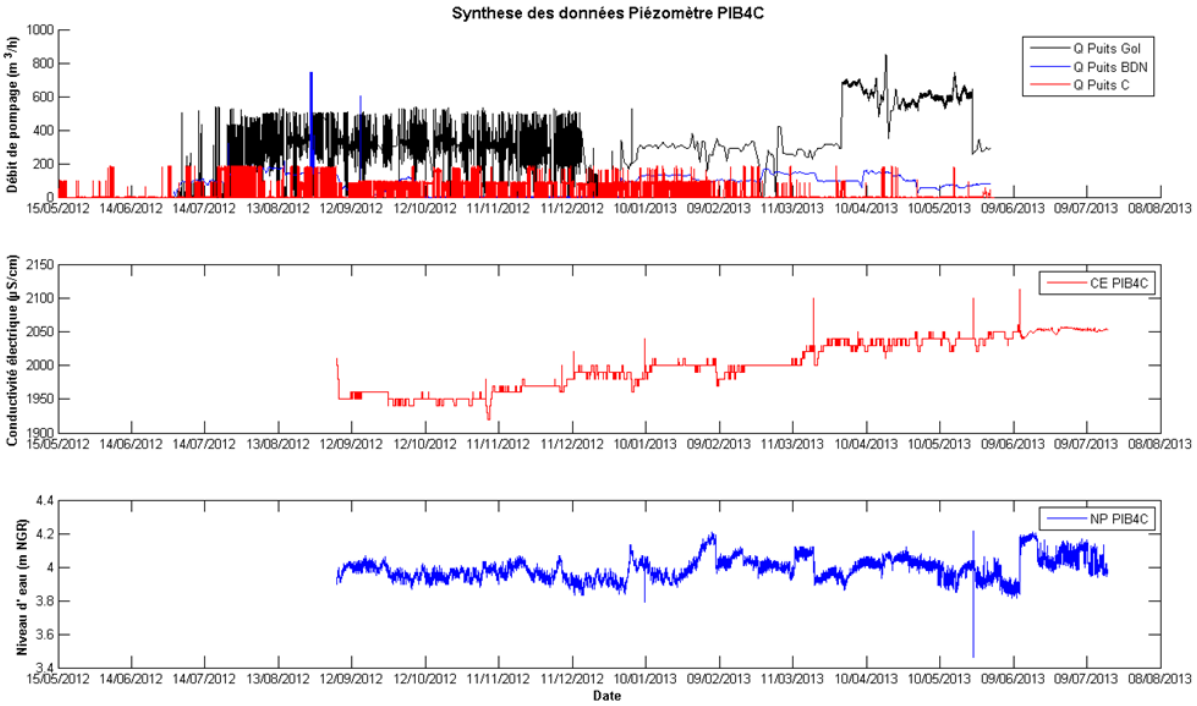


Illustration 14 : Chroniques de données Piézomètre PIB4C

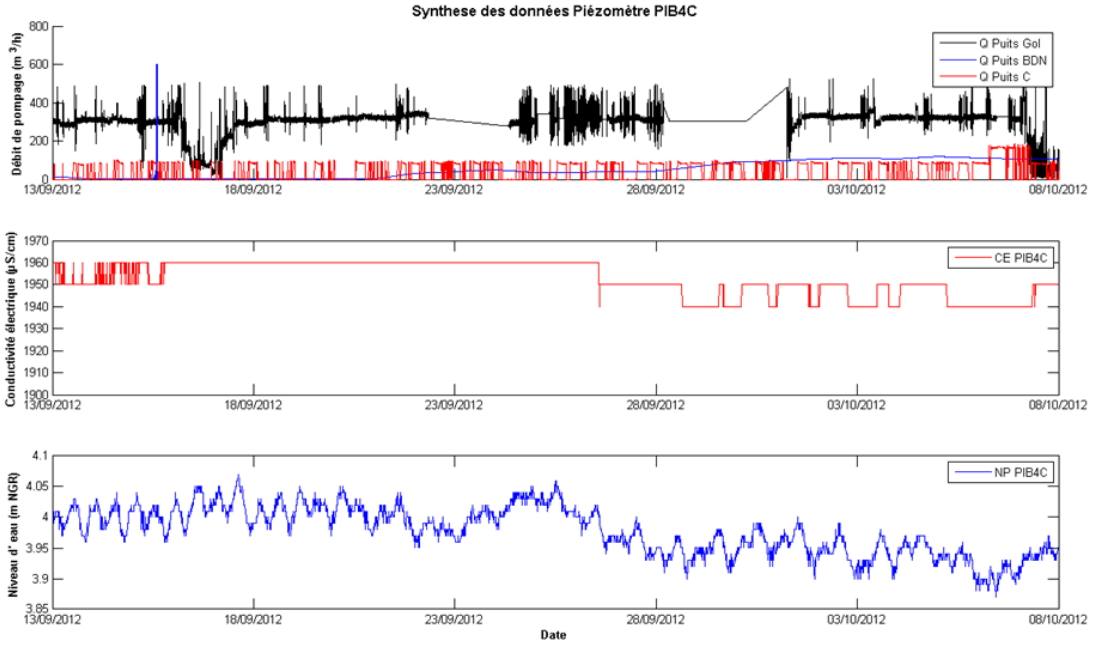


Illustration 15 : PIB4C : Zoom période du 10/09/2012 au 10/10/2012 sur PIB4C.

- **Piézomètre PIB5A**

La chronique de niveau piézométrique est relativement stable entre 3.6 m NGR et 4.2 m NGR. Le maximum correspond au cyclone Dumile dont l'effet se manifeste avec un décalage dans le temps de moins d'un jour; le niveau d'eau suit les mouvements de marée. La chronique de conductivité présente deux parties : de juin 2012 à février 2013, la conductivité reste stable autour de 1040 µS/cm. A partir de février 2013, la conductivité passe rapidement de 1020 µS/cm à 1195 µS/cm et reste depuis à des valeurs comprises entre 1060 µS/cm et 1080 µS/cm. Les données de la chronique à venir devront être examinées pour observer l'évolution ce phénomène dans le temps. Illustration 16.

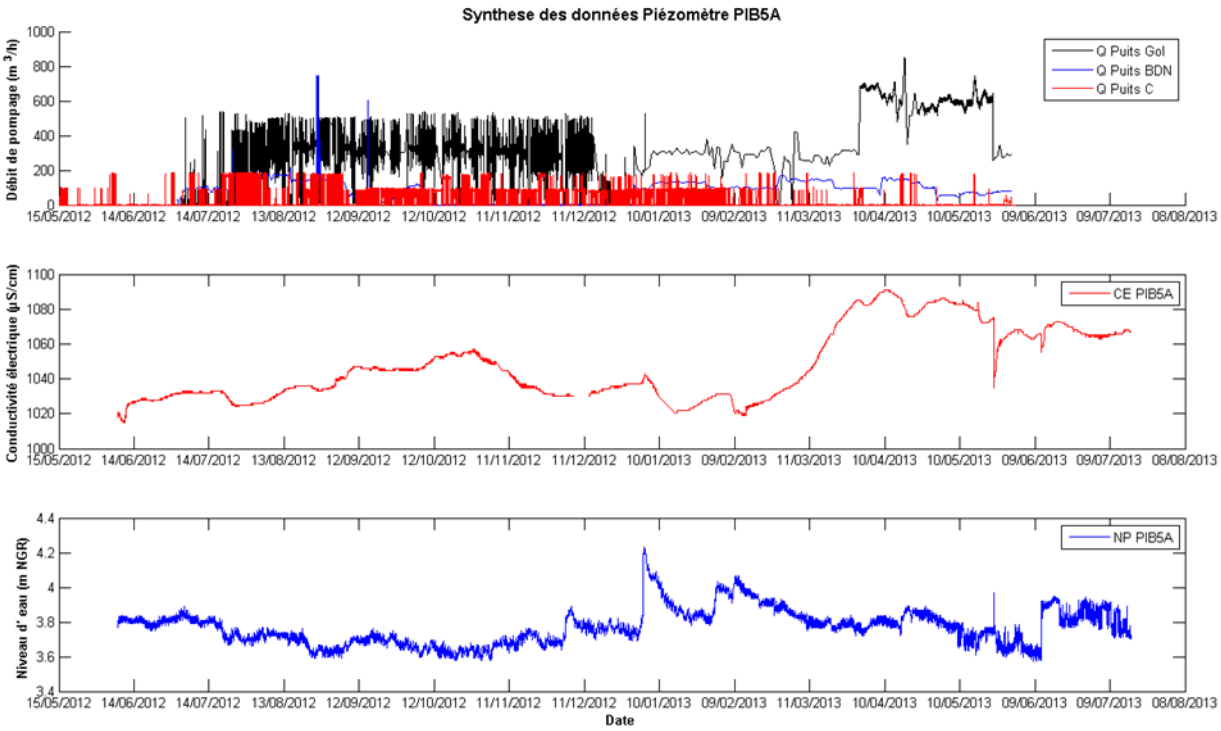


Illustration 16 : Chroniques des données au piézomètre PIB5A.

- **Piézomètre PIB5B**

Les niveaux piézométriques sont relativement stables entre 3.6 m NGR et 4.2 m NGR, et suivent les mouvements de marée. La chronique de conductivité présente une évolution singulière : de juin 2012 à février 2013, la conductivité reste stable autour de 3000 µS/cm. A partir de février 2013, la conductivité passe rapidement de 3000 µS/cm à 500 µS/cm, puis remonte en pic à 6000 µS/cm et chute de nouveau à 500 µS/cm. Cette sonde a été retirée le 17/07/2013 (Illustration 17).

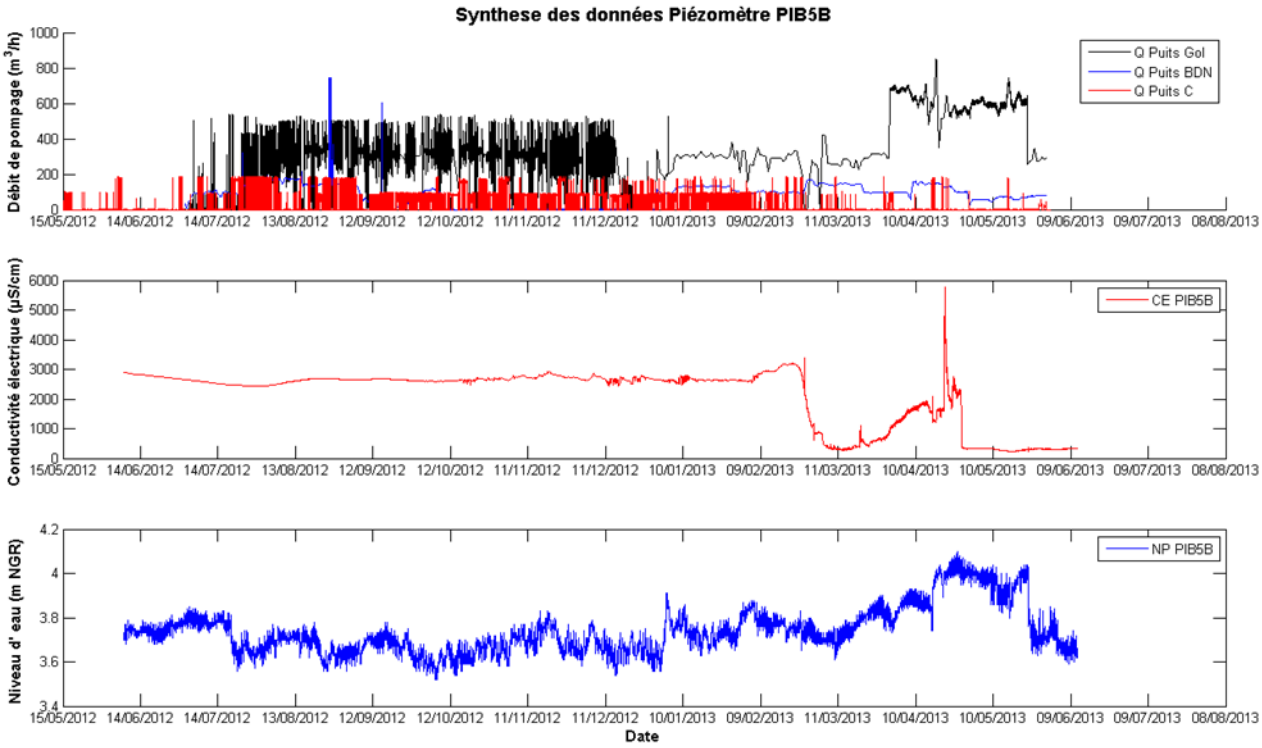


Illustration 17 : Chroniques des données au PIB5B.

- **Piézomètre PIB5D**

Les niveaux piézométriques sont relativement stables entre 3.4 m NGR et 4 m NGR et suivent les mouvements de marée (Illustration 18).

De juin 2012 à juillet 2012, la conductivité est de 7000 µS/cm avec des variations journalières infimes (*inférieures à XX µS/cm)*. De juillet 2012 à janvier 2013, la conductivité présente de plus grandes fluctuations et sa valeur augmente continuellement avec le temps. A partir de janvier, la valeur de la conductivité augmente rapidement (de 10 000 µS/cm en janvier 2013 elle passe par un palier à 30 000 µS/cm en mars 2013 puis à un second palier à plus de 58 000 µS/cm).

La chronique de niveau ne permet pas d'expliquer ce phénomène. Les valeurs atteintes semblent indiquer une avancée de l'intrusion saline.

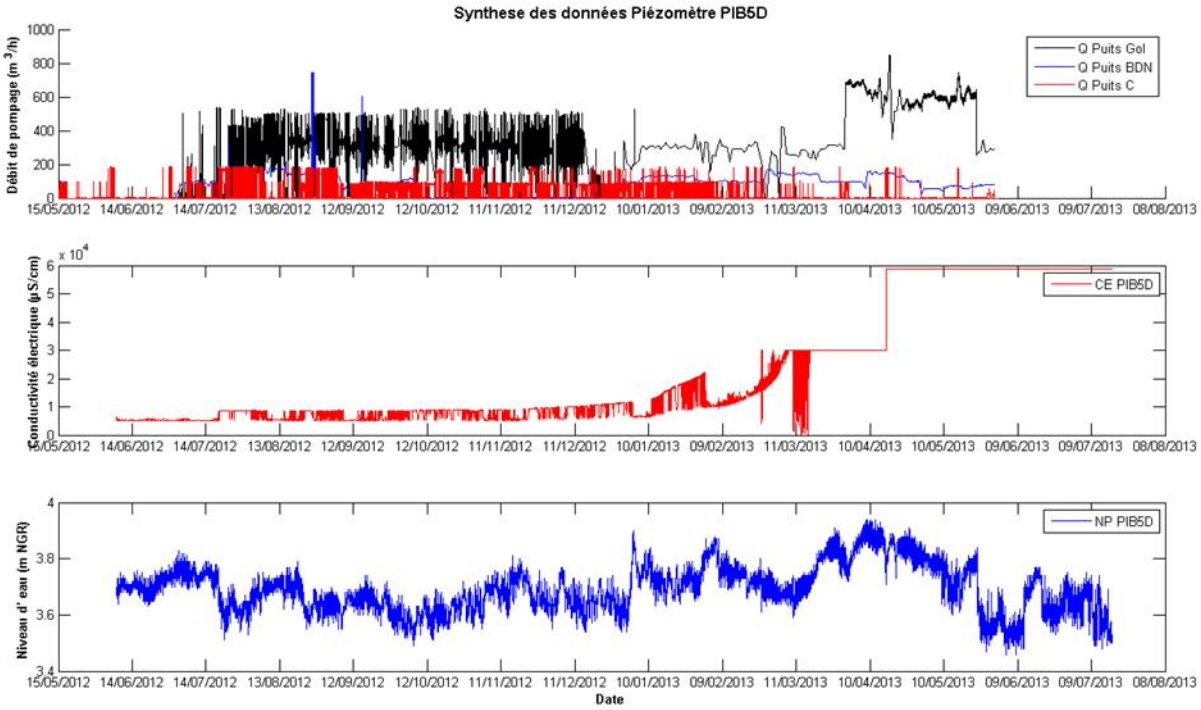


Illustration 18 : Chroniques des données au PIB5D.

L'illustration présente les chroniques de niveaux d'eau dans les différents piézomètres. L'évolution des niveaux d'eau dans ces ouvrages sont similaires, confirmant les relations hydrauliques étroites entre les différents ouvrages.

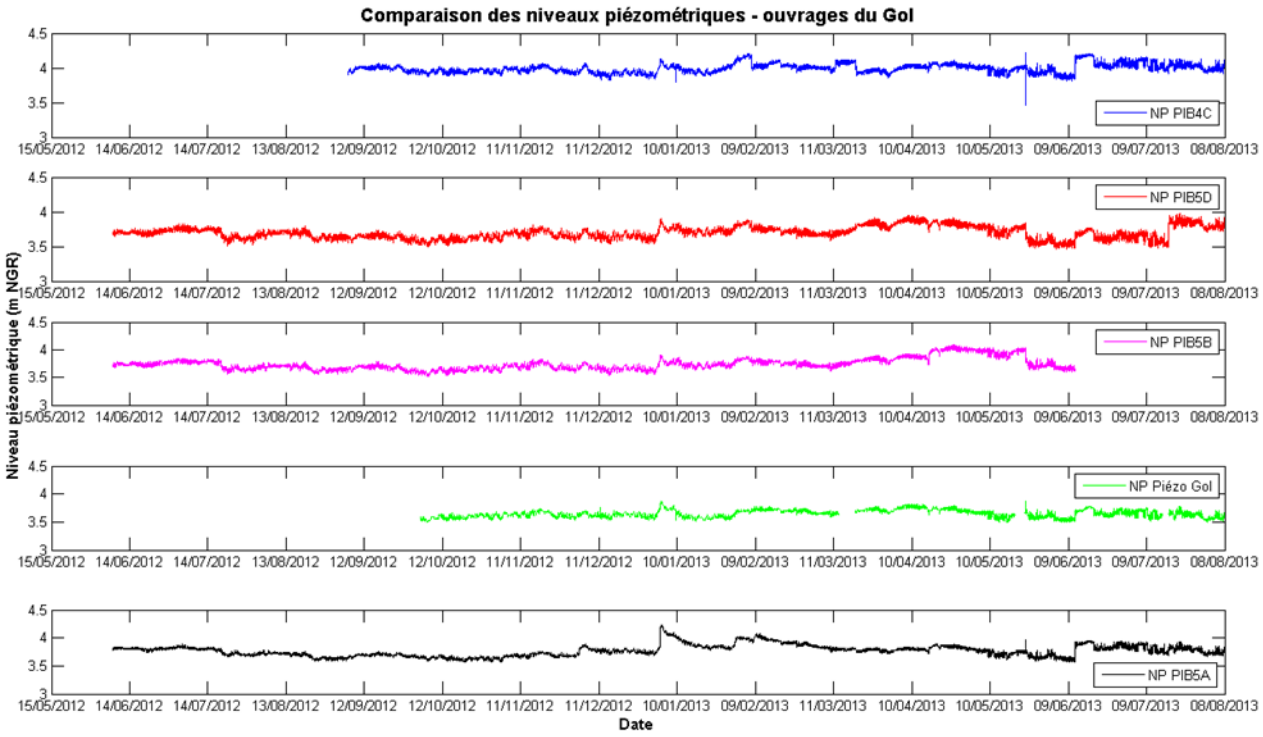


Illustration 19 : Niveaux piézométriques des piézomètres.

En 2012, les variations de conductivité sont limitées. L'Illustration 20 présente les conductivités aux différents piézomètres sur la période de janvier à mars 2013. Une augmentation de la conductivité aux piézomètres PIB4C, PIB5A et PIB5D s'amorce et continue jusqu'à aujourd'hui. Au contraire, le piézomètre PIB5B révèle au même moment une baisse significative de la conductivité. En PIB5B, la sonde a cessé de fonctionner et a été retirée le 17/07/2013. Cependant, il se pourrait également qu'au moment de la mesure ponctuelle il y ait eu une augmentation de la conductivité comme observé précédemment.

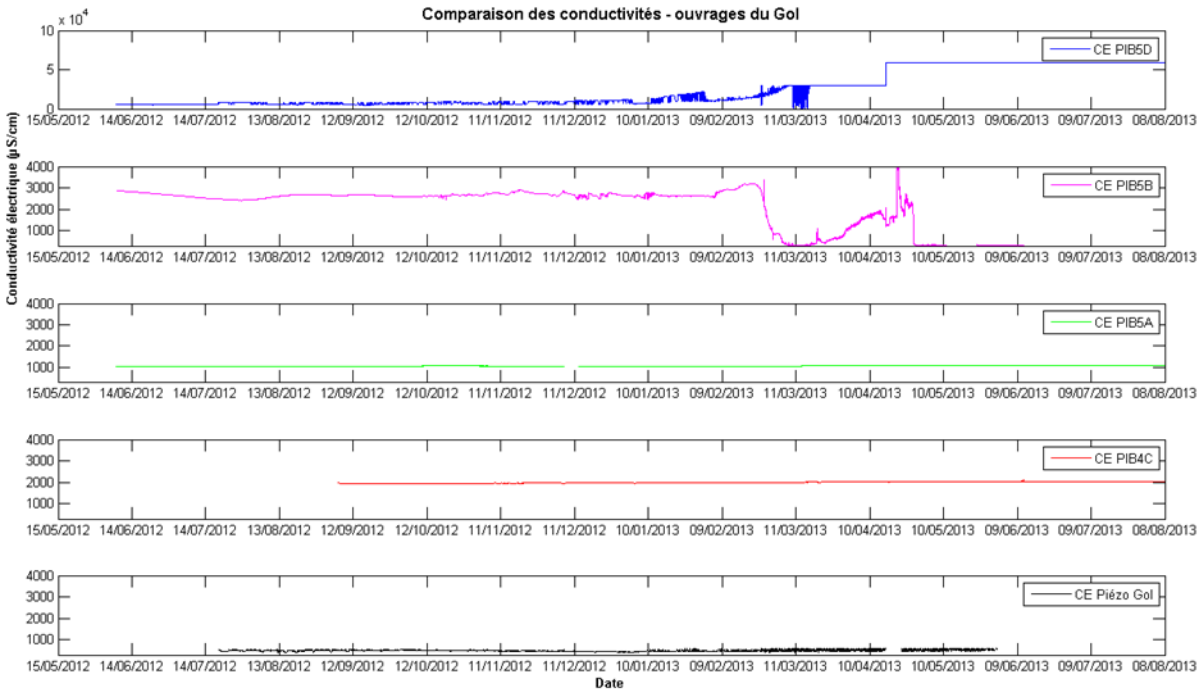


Illustration 20 : Conductivité dans les piézomètres du GoI.

Puits A, B et C

Les chroniques de pompage montrent globalement des variations synchrones et d'amplitude comparable pour les puits A, B et C (BRGM/RP-61834-FR). Les niveaux piézométriques sont fortement influencés par les pompages ; des variations de niveau d'eau de plusieurs mètres engendrées par des pertes de charges quadratiques et linéaires sont visibles lorsque des marches/arrêts des pompages (Illustration 21 et Illustration 22). La valeur de la conductivité électrique est également fortement influencée par les pompages. Pour les puits A et C, les niveaux d'eau sont stationnaires à presque 4 m NGR, la perte de charge lors d'un pompage entre 200 m^3/h et 300 m^3/h est d'environ 1 m, le niveau d'eau lors d'un pompage tombe alors à 3 m NGR. Pour le puits B, le niveau d'eau tombe à moins de 1 m NGR lors d'un pompage à 200 m^3/h. La conductivité électrique est comprise entre 400 µS/cm et 1000 µS/cm, elle fluctue avec les pompages. Lors d'une période longue de pompage (juillet – fin janvier), la conductivité au niveau de ces trois puits atteint 800 µS/cm à 1000 µS/cm, lors de période de moindre exploitation, la valeur de la conductivité est d'environ 500 µS/cm. Ces caractéristiques de l'exploitation restent relativement homogènes dans le temps.

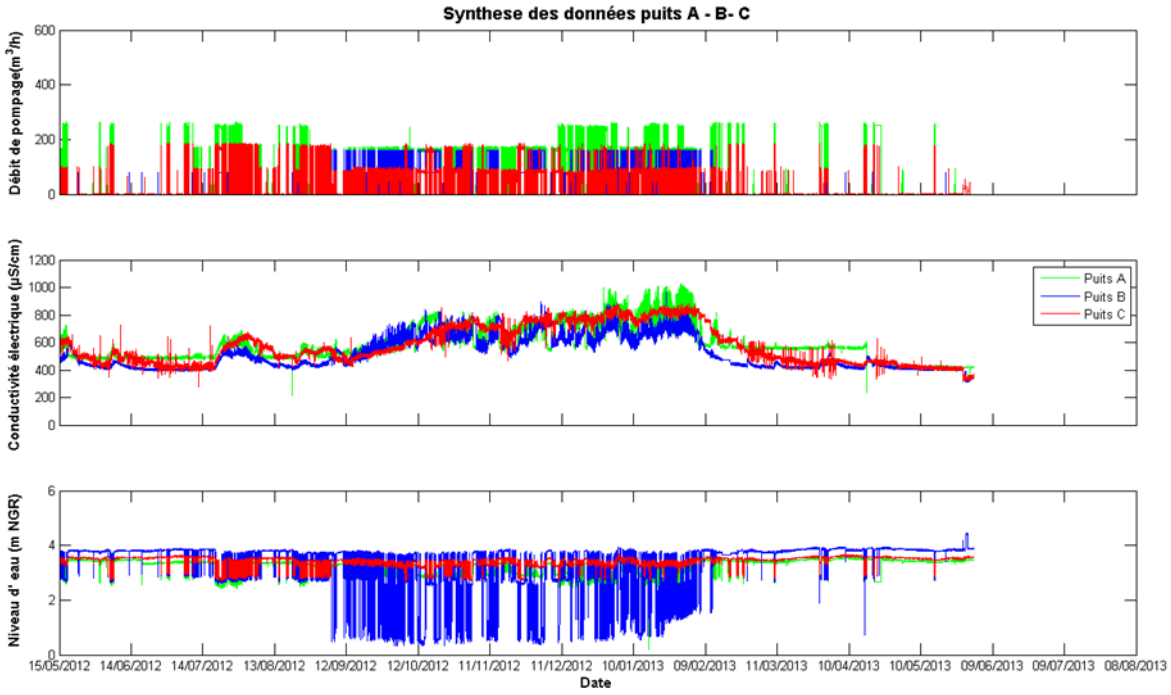


Illustration 21 : Chroniques des données au puits A, B et C;

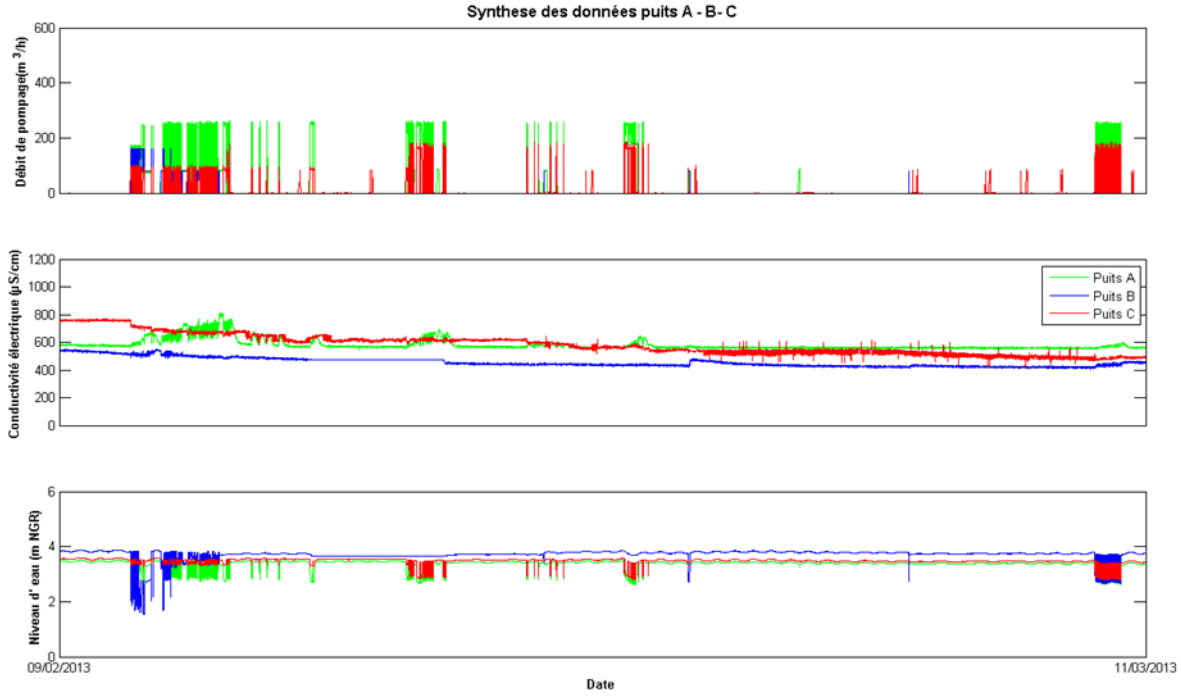


Illustration 22 : Puits A, B et C. Zoom sur la période du 09/02/2013 au 11/03/2013.

Les ouvrages les plus exploités (Puits du Gol, Puits A, B et C) présentent des valeurs de conductivité électrique et de niveau déterminées par l'intensité et la durée des

pompages. Les valeurs de niveau d'eau et de conductivité au puits BDN sont moins impactées par les pompages. Les chroniques de niveau des différents piézomètres sont relativement similaires : on retrouve sur chacune des variations communes (cyclones, marée…).

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

BRGM Réunion
5, rue Ste-Anne
CS 51016
97404 Saint-Denis Cedex
Tél. : 02 62 21 22 14