



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Diagnostic de l'outil de gestion HydroGol en vue de son actualisation

Rapport final

BRGM/RP-72730-FR

Version 2 du 27 mai 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Lanini S., Aunay B., Burdairon M.

Vérificateur :

Nom : Benoît Dewandel

Fonction : Hydrogéologue

Date : 25/08/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : Ingrid Girardeau

Fonction : Directrice régionale

Date : 11/09/2023

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : hydrogéologie ; simulation numérique, intrusion saline, hydrochimie, hydrogéochimie, géophysique, alimentation en eau industrielle, hydraulique agricole, pompage, La Réunion, Saint-Louis, Le Gol

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

Lanini S., Aunay B., Burdairon M. 2024. Diagnostic de l'outil de gestion HydroGol en vue de son actualisation. Rapport final V2. BRGM/RP-72730-FR, 68 p.

© BRGM, 2024, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-09/03/2023

Synthèse

L'aquifère côtier du Gol, au sud-ouest de La Réunion, constitue une ressource en eau souterraine caractérisée par des propriétés hydrodynamiques remarquables permettant une importante exploitation des eaux souterraines depuis les années 80 (≈ 4 millions de m^3 prélevés par an). Les risques d'intrusions salines sont cependant réels sur cet aquifère. Sur la base d'une caractérisation des processus hydrogéologiques, un outil de gestion de la ressource a été construit en 2015 (Lanini and Petit, 2015). Cet outil « HydroGol » avait été élaboré en intégrant les données disponibles au moment du déroulement du projet et en se basant sur certaines hypothèses de fonctionnement, notamment en ce qui concerne les données « industrielles » qui n'étaient pas disponibles.

Depuis la livraison de cet outil de gestion en 2015, un comité de gestion concertée de la ressource en eau du Gol a été mis en place et les récentes données de suivi interrogent le fonctionnement proposé par l'outil HydroGol. Ainsi, une actualisation de l'outil HydroGol apparaissait nécessaire.

Le principal **objectif du projet**¹ est de réaliser un diagnostic de l'outil de gestion HydroGol au regard des nouvelles données et des connaissances acquises depuis l'élaboration de l'outil en 2015. Ce diagnostic nécessite la réalisation des tâches suivantes : (i) rappel de l'approche de la modélisation retenue pour l'outil HydroGol en 2015 et mise en œuvre du modèle HydroGol sur la période 2012-2022, (ii) retraitement et interprétation des données de géophysique héliportée acquises en 2014 et (iii) et intégration des nouvelles données disponibles.

En terme de résultats, l'actualisation **du modèle** sur une période de 10 ans (2012-2022) permet de mieux évaluer sa capacité à rendre compte du comportement de l'hydrosystème. Il apparaît que le modèle reproduit de manière satisfaisante les variations annuelles ainsi que la tendance à la hausse depuis 2013 de la charge hydraulique. De plus, l'évolution de la conductivité aux puits A, B et C est bien reproduite², ainsi que la tendance à la baisse observée dans la nappe de base. En revanche, le modèle n'arrive pas à reproduire les faibles variations de conductivité aux puits Bois de Nèfles et Gol-usine.

Les résultats des simulations ont mis en évidence que les volumes prélevés sur l'ensemble des cinq puits, volumes qui représentaient plus de 50% de la recharge entre 2012 et 2014, avec un maximum à plus de 90% en 2013, se sont établis entre 20% et 45% à partir de 2015.

Il a également été montré que les échanges avec l'océan sont orientés de l'aquifère vers l'océan, il n'y a donc pas de flux d'eau salée qui envahit l'aquifère exploité par les puits selon le schéma conceptuel du modèle numérique. La minéralisation ne semble donc pas provenir de l'intrusion saline *sensu stricto* mais de la présence d'eau plus minéralisée qui envahit la nappe.

¹ Le présent rapport présente certaines conclusions issues du projet HydroGol, sans pour autant présenter les données utilisées, les méthodologies et les raisonnements. A ce titre, il conviendra de se référer aux deux rapports HydroGol (Petit *et al.* (2013) [BRGM/RP-61834-FR](#) et Lanini *et al.* (2015) - [BRGM/RP-61834-FR](#)) afin de bénéficier de l'intégralité de la démarche scientifique.

² Les résultats des approches géophysiques et hydrochimiques indiquent que les variations de conductivité électrique observées aux différents puits ne sont pas directement en relation avec l'évolution de l'intrusion saline. Ces résultats tendent à montrer que cette minéralisation serait plutôt en relation avec des flux plus minéralisés en provenance d'horizons proches de la surface.

En ce qui concerne les **compléments techniques sur le fonctionnement de l'aquifère du Gol**, les conclusions sont les suivantes :

- Les résultats des pompes d'essai en interférence de 2011 confirment l'existence d'une connexion hydraulique entre les puits industriels et les puits Saphir. Les résultats des analyses corrélatrices mettent en évidence des fonctionnements différents entre les puits Saphir et les puits industriels. Ces derniers étant marqués par un flux spécifique d'eau moins minéralisée lors de la mise en service des pompes. L'origine de ce flux spécifique n'est pas déterminée actuellement ;
- Le phénomène d'intrusion saline est présent sur la Plaine du Gol et de manière prépondérante en profondeur. La variation de la conductivité électrique sur PIB5D est fonction de la recharge saisonnière et des prélèvements. Toutefois, les variations de conductivité électrique sur les différents ouvrages de prélèvement sont en relation avec des apports superficiels d'eau contaminés en NO_3 (drainance des formations de surface plus exposées à l'agriculture). La conductivité électrique mesurée sur les ouvrages d'exploitation n'est donc pas un marqueur univoque de la concentration en chlorures et de l'évolution du phénomène d'intrusion saline.
- Les données actuellement disponibles ne permettent pas de répondre à la question du rôle favorable ou défavorable des bassins d'infiltration des eaux de process industriel sur les eaux souterraines ou les eaux de surface.

Le retraitement des **données de géophysique héliportée** (AEM) a permis de bénéficier d'une visualisation 2D et 3D de différentes entités géophysiques : (i) un conducteur profond identifié comme l'intrusion saline qui s'approfondit du littoral vers l'intérieur des terres pour atteindre une profondeur de 180-200 m sous les puits A, B et C de la Saphir et (ii) un conducteur plus superficiel dont l'origine précise n'est pas déterminée, mais qui pourrait être associée à la présence de l'étang du Gol au Sud, et à la contamination de formations superficielles par les intrants agricoles et/ou industriels plus au Nord (ravine Maniron et bassins d'infiltration).

En ce qui concerne le partage de la ressource en eau de l'aquifère du Gol, il est prioritaire de poursuivre le suivi en continu de la ressource en eau souterraine sur les ouvrages de prélèvement et sur les piézomètres d'observation (débit, conductivité électrique, niveau d'eau). La disponibilité de ces données permettra de s'assurer que les hypothèses de fonctionnement actuelles se vérifieront dans le futur pour d'autres conditions climatiques et d'autres conditions d'exploitation.

Dans le cadre du présent diagnostic, certaines interrogations subsistent sur les différents processus de minéralisation des ouvrages de prélèvements. Des investigations complémentaires pourraient permettre de discriminer spatialement les contributions de l'Océan, de l'étang du Gol ou des intrants agricoles et/ou industriels. Ces investigations consisteraient en la réalisation d'analyses hydrochimiques et isotopiques (bore) selon une approche spatiale et saisonnière.

La réalisation de piézomètres complémentaires permettrait de réduire les incertitudes relatives (i) aux flux de recharge sur le secteur Est concerné par les prélèvements industriels et (ii) de suivre l'intrusion saline en profondeur. Pour mémoire, seul le piézomètre PIB5 permet actuellement de suivre l'évolution du phénomène d'intrusion saline en profondeur. Ce phénomène d'intrusion saline prend de l'ampleur lorsque le ratio prélèvement / recharge augmente. Un autre piézomètre profond situé plus au Sud-est permettrait de bénéficier de connaissances sur l'intrusion saline en profondeur afin d'optimiser les volumes qui pourraient être exploitées en préservant la ressource à long terme.

Sommaire

1. Introduction	8
1.1. Contexte.....	8
1.2. Objectif.....	8
1.3. Enjeux du projet	9
1.4. Contenu du rapport	9
2. Mise en œuvre du modèle HydroGol sur la période 2012-2022	11
2.1. Présentation du modèle	11
2.1.1. Schéma conceptuel.....	12
2.1.2. Calage et validation (2013 et 2017).....	13
2.2. Mise à jour des données d'entrée du modèle	13
2.2.1. Données météorologiques	13
2.2.2. Volumes prélevés dans la nappe du Gol	15
2.2.3. Piézométrie	16
2.2.4. Conductivité électrique	18
2.2.5. Variation du niveau marin.....	19
2.3. Simulation des niveaux piézométriques et de la conductivité sur la période 2012-2022	20
2.3.1. Prise en compte de la variation du niveau marin (basses fréquences)	20
2.3.2. Calibration du modèle	20
2.3.3. Comparaison des variables observées et simulées.....	21
2.3.4. Bilan des flux.....	24
2.4. Conclusions	27
3. Compléments techniques sur le fonctionnement de l'aquifère du Gol.....	29
3.1.1. Compartimentation de l'aquifère du Gol entre les puits industriels et les puits Saphir	29
3.1.2. Relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline.....	41
3.1.3. Rôle des bassins d'infiltration – Albioma	47
4. Retraitement et interprétation des données de géophysique héliportée de 2014	50
4.1. Principe de mesure et traitement spécifique	50
4.2. Résultats et Interprétations.....	52
4.2.1. Conducteur profond	52
4.2.2. Conducteur superficiel.....	52
5. Conclusion générale.....	57
5.1. Synthèse des résultats	57
5.2. Perspectives	60
6. Références bibliographiques	61

Liste des figures

Figure 1 - Compartimentation de la nappe du Gol et localisation des ouvrages	11
Figure 2 - Schéma conceptuel de fonctionnement du système aquifère du Gol	12
Figure 3 - Cumuls annuels de pluie sur la plaine et sur la planèze	14
Figure 4 - Cumuls annuels d'ETP sur la plaine et la planèze	14
Figure 5 - Volumes annuels prélevés dans la nappe du Gol pour l'agriculture et l'industrie.....	15
Figure 6 - Evolution des niveaux piézométriques journaliers observés dans la nappe du Gol ..	17
Figure 7 - Evolution de la conductivité électrique mesurée dans différents ouvrages de la nappe du Gol	18
Figure 8 - Variations du niveau marin au marégraphe de Saint-Pierre (SHOM)	19
Figure 9 - Charges hydrauliques observées et simulées (en vert) dans la nappe supérieure, aux puits, et dans la nappe de base	22
Figure 10 - Conductivité observée et simulée (en vert) dans la nappe supérieure et la nappe de base.....	23
Figure 11 - Bilan des flux entrant et sortant de la nappe supérieure.....	25
Figure 12 - Bilan des flux entrant et sortant de la nappe de base	26
Figure 13 - Ratio annuel volume prélevé / recharge de la plaine du Gol	27
Figure 14 - Compartimentation de la nappe du Gol et localisation des ouvrages	29
Figure 15 - Liste des données suivies par ouvrage durant l'essai du 15 au 17/10/2011 (Petit et al., 2013).....	31
Figure 16 – Suivi des niveaux et des débits lors de l'essai du 15 au 17/10/2011 (Petit et al., 2013)	31
Figure 17 - Situation des puits, des piézomètres et des limites de l'aquifère (Petit et al., 2013)	32
Figure 18 - Modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011 (Petit et al., 2013).....	33
Figure 19 - Filtres de valeurs appliqués aux chroniques hydrogéologiques des puits étudiés ..	35
Figure 20 - Comparaison des données filtrées (courbe noire) et non filtrées (courbe et points marrons) sur la chronique piézométrique journalière du Puits A.....	35
Figure 21 - Corrélations croisées. Le titre des graphiques indique : « donnée en entrée – donnée en sortie »	39
Figure 22 - Diagramme binaire Na vs. Cl des eaux du bassin d'alimentation du Gol (Petit et al., 2013)	43
Figure 23 - Diagramme binaire NO ₃ vs. K des eaux du bassin d'alimentation du Gol (Petit et al., 2013)	44
Figure 24 - Contribution d'eau de mer pour chaque site calculée à partir des teneurs en Cl, K, SO ₄ et Sr (Sr x ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr). (Petit et al., 2013)	45
Figure 25 – ACP sur les analyses chimiques d'octobre 2011	46

Figure 26 – Localisation et emprise des deux bassins d'infiltration d'Albioma	49
Figure 27 – Bassin d'infiltration et piézomètres	49
Figure 28 – Vue cartographique et en 3D des profils géophysiques	51
Figure 29 – Profil de résistivité N-S passant par le puits B de la Saphir et le PIB4 (BSS002....)	52
Figure 30 – Différentes vues en 3D extraites de Paraview - https://www.paraview.org/	55
Figure 31 - Altitude et profondeur de l'interface marquant le phénomène d'intrusion saline	56

Liste des annexes

Annexe 1	Paramètres du modèle HydroGol	63
Annexe 2	Simulations à niveau marin constant	65

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

L'aquifère côtier du Gol, au sud-ouest de La Réunion, constitue une ressource en eau souterraine caractérisée par des propriétés hydrodynamiques remarquables permettant une importante exploitation des eaux souterraines depuis les années 80 (≈ 4 millions de m^3 prélevés par an).

Les risques d'intrusions salines sont cependant réels. Un programme d'étude a été lancé en 2010 pour mieux connaître le fonctionnement de cet aquifère dans le but d'en pérenniser la ressource (Petit et al., 2013). Il est ainsi apparu que l'aquifère du Gol était exceptionnellement productif, mais que l'augmentation de la salinité était liée à une augmentation des prélèvements pour l'irrigation (les 3 puits « A, B et C » du Département, exploités par la Saphir) et pour l'industrie (2 puits : Puits Usine du Gol exploité par Tereos³ et Puits Bois de Nèfles (ou BdN) exploité par Albioma⁴).

Sur la base d'une caractérisation des processus hydrogéologiques de cet aquifère volcanique hétérogène par diverses méthodes combinées (pompage d'essai inter-puits, traitement du signal, hydrogéochimie), un outil de gestion de la ressource a été construit (Lanini and Petit, 2015). Cet outil « HydroGol » avait été élaboré en intégrant les données disponibles et en se basant sur certaines hypothèses de fonctionnement, notamment en ce qui concerne les données « industrielles ». Pour mémoire, l'absence de suivi hydrogéologique par les industriels ne permettait pas de caractériser l'intégralité du fonctionnement de la ressource.

Depuis la livraison de cet outil de gestion en 2015, un comité de gestion concertée de la ressource en eau du Gol a été mis en place. En parallèle, les industriels ont mis en œuvre un suivi hydrogéologique sur la ressource en eau (niveau d'eau et conductivité électrique) et leurs prélèvements depuis 2019. Pour mémoire, le suivi de la Saphir était opérationnel depuis 2010.

Les nouvelles données acquises sur les puits industriels interrogent le fonctionnement proposé par l'outil HydroGol. Ainsi, il apparaît qu'une actualisation de l'outil « HydroGol » est nécessaire afin d'intégrer les éventuelles spécificités relatives au fonctionnement des ouvrages industriels. Il est notamment évoqué une hypothèse de compartimentation à vérifier entre les puits du Département et ceux des industriels.

1.2. OBJECTIF

Le principal objectif du projet est de réaliser un diagnostic de l'outil de gestion HydroGol au regard des nouvelles données et des connaissances acquises depuis l'élaboration de l'outil en 2015. La finalité est de pouvoir déterminer si l'outil peut être actualisé avec quelques simples modifications de calage ou si une refonte plus profonde est nécessaire afin que l'outil puisse répondre aux enjeux de gestion sur l'aquifère du Gol.

³ <https://www.tereos.re/> - Sucrerie du Gol

⁴ <https://www.albioma.com/implantation/la-reunion/le-gol/> - Producteur d'énergie renouvelable

1.3. ENJEUX DU PROJET

Le projet historique HydroGol a nécessité le développement de méthodologies originales pour le calcul des flux d'eau souterraine dans un contexte influencé par les intrusions salines. Deux rapports sont issus de ce programme. Pour Petit *et al.* (2013) [BRGM/RP-61834-FR](#), la démarche a consisté en une caractérisation interdisciplinaire de l'aquifère du Gol (hydrogéochimie, isotopes, pompages d'essai, méthode des dérivées, analyse fonctionnelle, traitement des chroniques en ondelette...) afin d'élaborer (Lanini *et al.* (2015) - [BRGM/RP-61834-FR](#)) un outil de simulation numérique qui vise à reproduire les conditions d'exploitation à l'échelle des différents points de prélèvement et d'observation.

Cet outil éponyme a été spécifiquement développé dans le cadre du projet HydroGol. Il répond aux enjeux scientifiques de développement d'outils de modélisation et d'aide à la gestion des eaux souterraines des milieux complexes pour le BRGM.

1.4. CONTENU DU RAPPORT

Le diagnostic nécessite notamment la réalisation des tâches suivantes, qui sont présentées de manière successive dans le présent rapport :

- Rappel de l'approche de la modélisation retenue pour l'outil HydroGol en 2015 et mise en œuvre du modèle HydroGol sur la période 2012-2022 ;
- Rappel des résultats des investigations réalisées entre 2010 et 2015 (hydrogéochimie et pompage d'essai) et intégration des nouvelles données disponibles afin de répondre aux interrogations soulevées par le Comité de Gestion ;
 - o Existe-t-il une compartimentation entre le secteur exploité par les deux puits industriels et le secteur exploité par les trois puits Saphir ?
 - o Quelle est la relation entre la conductivité électrique et l'intrusion saline ?
 - o Quel rôle joue le rejet des eaux de process de l'industriel Albioma dans les bassins d'infiltration sur l'aquifère du Gol ?
- Retraitement et interprétation des données de géophysique héliportée acquises en 2014 (Martelet *et al.*, 2014) sur le secteur du Gol afin d'identifier les structures géologiques et hydrogéologiques (position de l'interface eau douce / eau salée).

Nota Bene : le présent rapport présente certaines conclusions issues du projet HydroGol, sans pour autant présenter les données utilisées, les méthodologies et les raisonnements. A ce titre, il conviendra de se référer aux deux rapports HydroGol (Petit *et al.* (2013) [BRGM/RP-61834-FR](#) et Lanini *et al.* (2015) - [BRGM/RP-61834-FR](#)) afin de bénéficier de l'intégralité de la démarche scientifique.

2. Mise en œuvre du modèle HydroGol sur la période 2012-2022

2.1. PRESENTATION DU MODELE

Le travail de modélisation réalisé entre 2013 et 2015⁵ visait à développer un simulateur numérique capable de reproduire l'évolution journalière du niveau piézométrique et de la conductivité dans la nappe du Gol en fonction des forçages extérieurs (météorologie et pompages).

Les connaissances acquises lors de l'étude "Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol" (Petit et al., 2013) ont été utilisées pour bâtir un schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère du Gol. En particulier, une compartimentation de la nappe ayant été mise en évidence, seul le compartiment compris entre les ravines du Maniron et du Gol a été modélisé (Figure 1).

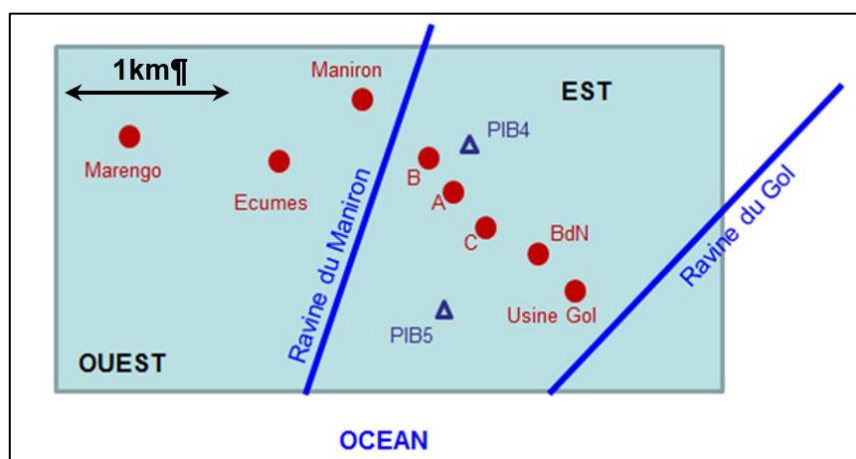


Figure 1 - Compartimentation de la nappe du Gol et localisation des ouvrages
Echelle approximative (schéma conceptuel synthétique).

Un plan de localisation plus détaillé est disponible en figure 17 - Situation des puits, des piézomètres et des limites de l'aquifère (Petit et al., 2013).

⁵ Présentation détaillée dans le rapport BRGM/ RP-62893-FR, 2015 - (Lanini and Petit, 2015)

2.1.1. Schéma conceptuel

Un modèle global, non spatialisé, a été proposé pour expliquer l'évolution des niveaux piézométriques dans la nappe supérieure et dans la nappe de base. Il repose sur l'approche du réseau de réservoirs et la réalisation d'un bilan d'entrée et de sortie de l'eau dans chaque réservoir du système. Les transferts d'eau et de masse entre les réservoirs, et entre les réservoirs et l'océan, sont contrôlés par les différences de charge (Figure 2).

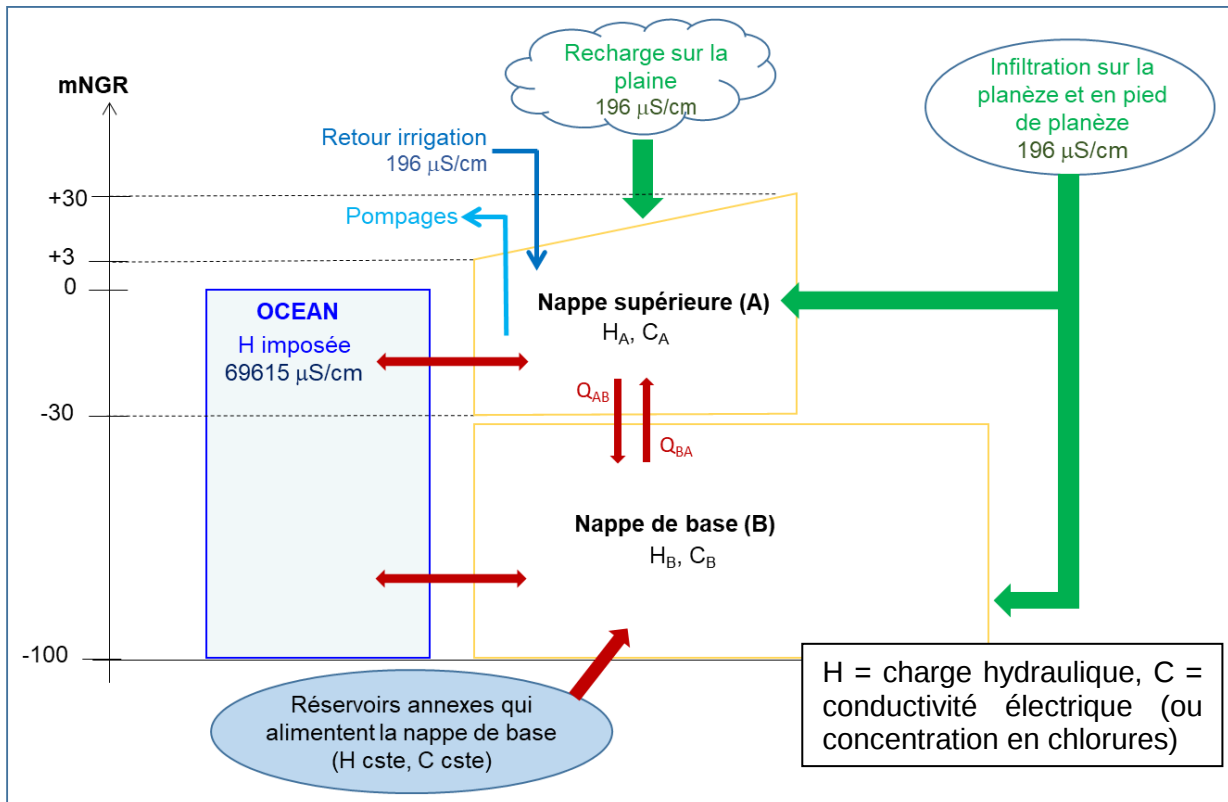


Figure 2 - Schéma conceptuel de fonctionnement du système aquifère du Gol

Ce schéma correspond à l'état de connaissance disponible lors de l'élaboration de l'outil HydroGol en 2015. En conséquence, il ne tient pas compte des nouvelles connaissances présentées dans la suite du présent rapport (chapitre 3).

La résolution des équations qui décrivent la conservation de la masse et les échanges permet de calculer à chaque pas de temps une charge hydraulique moyenne dans le réservoir superficiel et une seconde dans le réservoir de base. Une correction analytique est ensuite apportée à la charge de la nappe supérieure pour tenir compte des influences croisées des pompages et des pertes de charge quadratique aux puits, et en déduire la piézométrie à chaque puits.

L'eau de la nappe supérieure est un mélange entre une eau initiale, l'eau de pluie qui s'infiltre, et de l'eau plus minéralisée provenant de la nappe de base ou de l'océan. Le bilan de masse n'ayant pas pu reproduire la conductivité observée (voir §2.1.2), une formulation empirique a été proposée pour rendre compte de l'augmentation de conductivité liée à la drainance de la nappe de base. La conductivité moyenne dans la nappe supérieure est ainsi en partie proportionnelle au flux d'eau de B vers A calculé par le modèle : $C_A = C_{A_init} + \alpha \cdot \text{Flux}_{B \rightarrow A}$.

2.1.2. Calage et validation (2013 et 2017)

Le modèle numérique HydroGol a été développé en 2013 à l'aide du logiciel Matlab/Simulink®. Il est mis en œuvre au pas de temps journalier. Il a été calé une première fois et validé sur la courte période de disponibilité des données (01/01/2012 – 31/05/2013). Il a été à nouveau mis en œuvre en 2017, avec une modification à la marge du calage de paramètres (uniquement les coefficients de puits), sur la période 2012 – 2015.

Sur cette période (2012-2015), il a été constaté que les niveaux piézométriques dans les puits sont reproduits correctement par le modèle, que ce soit la dynamique annuelle ou la tendance à la remontée des niveaux depuis 2013. La dynamique d'évolution de la conductivité aux puits A, B et C est également bien reproduite, mais ce n'était pas le cas pour les puits du Gol et de Bois de Nèfles qui semblent présenter un comportement différent d'après le peu de données disponibles.

Enfin, le modèle ne paraît pas adapté pour reproduire de manière satisfaisante la conductivité électrique mesurée dans la nappe de base. Les raisons principales sont d'une part qu'il s'agit d'un modèle non spatialisé qui en l'état ne peut rendre compte d'une stratification de la minéralisation de l'eau, et d'autre part que les flux d'alimentation de ce réservoir sont peu ou pas connus. L'introduction dans le modèle d'un « réservoir amont » à charge constante pour représenter l'impact de ces différents flux mal connus permet de reproduire de manière satisfaisante la piézométrie de la nappe de base, mais est insuffisante pour simuler correctement la conductivité.

2.2. MISE A JOUR DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE

Les données, de 2012 à 2022, qui alimentent le modèle sont des chroniques d'observation au pas de temps journalier. Le choix des données et le traitement éventuel appliqué aux données brutes ont été expliqués lors de l'étude initiale (Lanini and Petit, 2015) et ne sont pas modifiés ici.

2.2.1. Données météorologiques

La pluviométrie observée à Pierrefonds (station MétéoFrance 97416463) est utilisée sur la plaine du Gol. La pluviométrie sur la plaine correspond aux observations à Le Gol- Les Hauts (station CIRAD n°97414431) multipliée par un facteur 1,3. Les cumuls annuels sont reportés sur la figure 3. On constate que les années 2011 et 2012 ont été particulièrement déficitaires, alors que l'année 2018 a été exceptionnellement arrosée (65% de plus que la moyenne 2011-2022 sur la plaine).

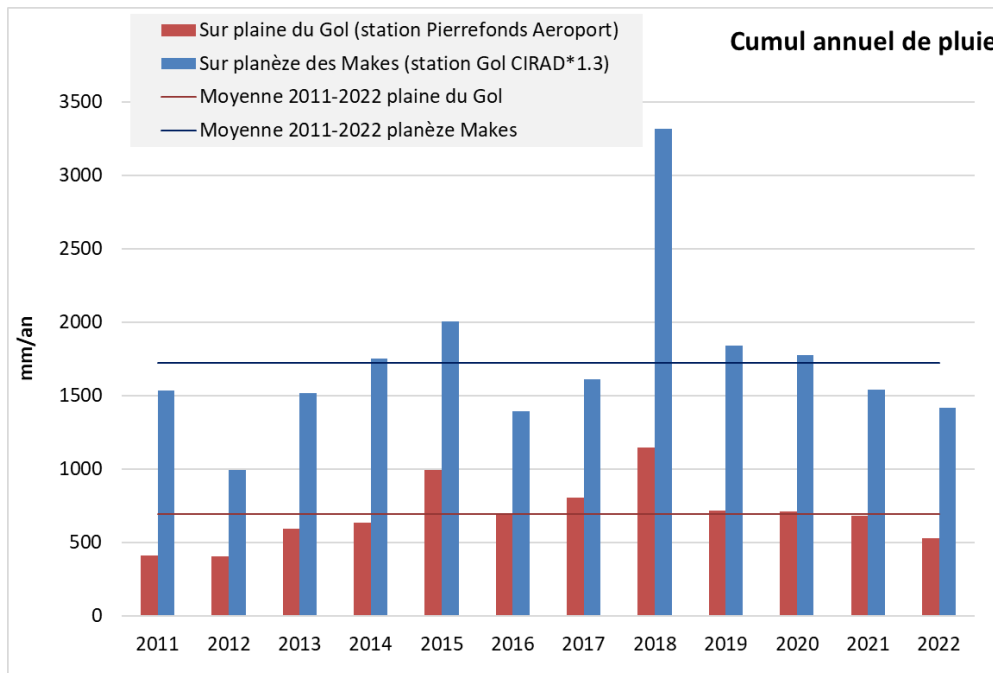


Figure 3 - Cumuls annuels de pluie sur la plaine et sur la planèze

L'évapotranspiration potentielle n'est pas une donnée observée mais une variable calculée à partir des observations météorologiques (rayonnement, humidité, vent...). Les données fournies par le CIRAD à la station de Pierrefonds (n°97416415) sont utilisées sur la plaine du Gol. Elles sont également utilisées pour la planèze, en leur appliquant la correction proposée par le CIRAD (Chopart et al., 2003) pour tenir compte de la différence d'altitude (1400 m).

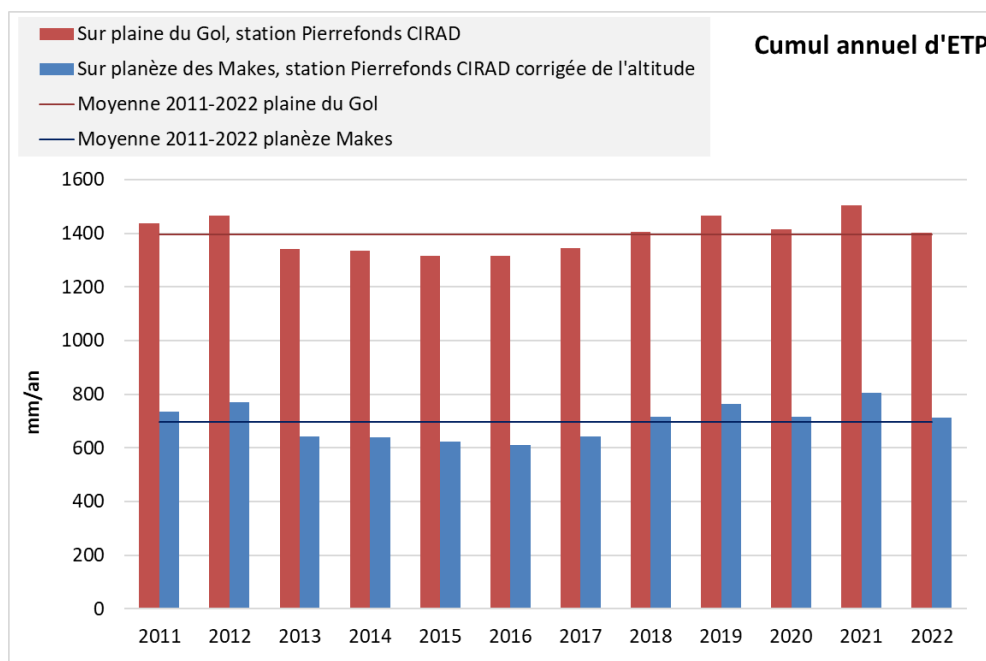


Figure 4 - Cumuls annuels d'ETP sur la plaine et la planèze
L'ETP est relativement stable sur la période car les moyennes annuelles des observations météorologiques (rayonnement, humidité, vent...) varient peu.

2.2.2. Volumes prélevés dans la nappe du Gol

Les volumes prélevés dans la nappe du Gol pour les usages agricoles (puits A, B et C de la SAPHIR) et industriels (puits Bois de Nêfles et Usine Gol-CTG) sont globalement disponibles depuis 2012, à des pas de temps variables (de 2 minutes à décadaires). Les cumuls annuels prélevés sont présentés sur la figure 5. Ils ont nettement diminué après 2013, et particulièrement en 2022. A noter que les données dont on dispose pour les puits A, B et C contiennent des lacunes importantes en 2012-2014, qui conduisent à sous-évaluer les prélèvements sur cette période.

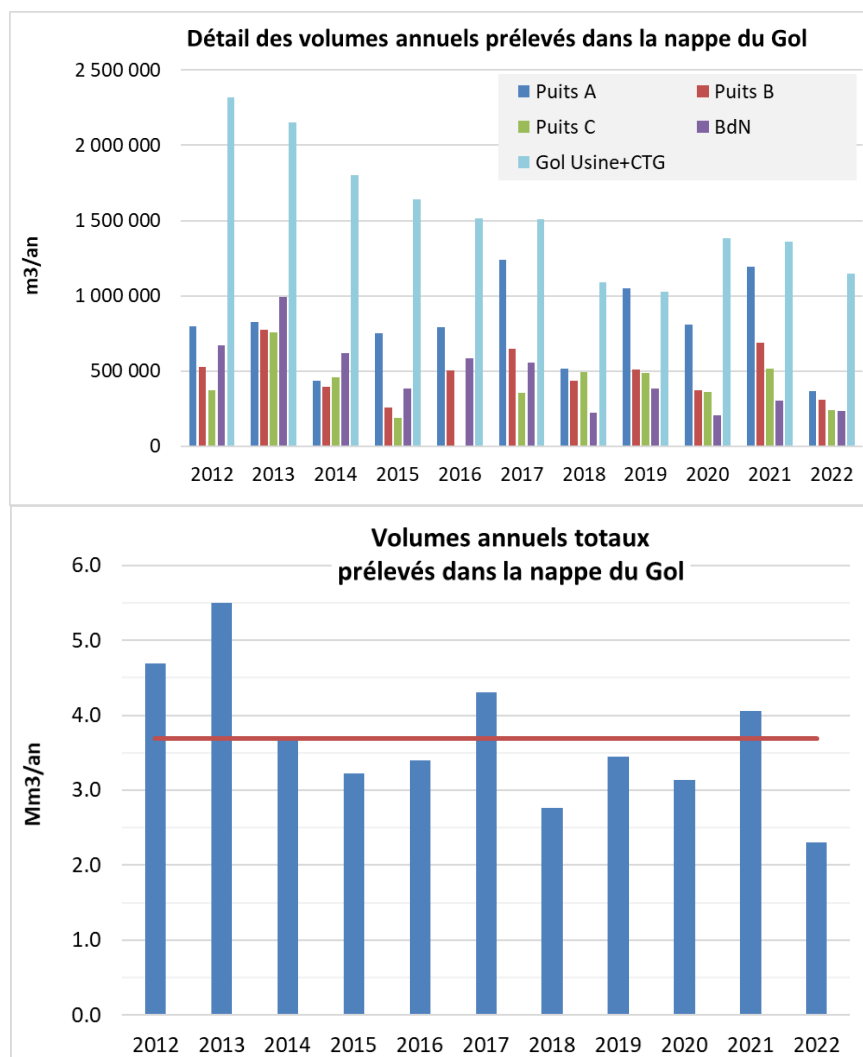


Figure 5 - Volumes annuels prélevés dans la nappe du Gol pour l'agriculture et l'industrie
Légende : le trait rouge matérialise la moyenne des prélèvements annuels sur la dernière décennie

2.2.3. Piézométrie

Les données piézométriques disponibles pour calibrer et valider le modèle sont présentées sur la figure 6. Les puits (A, B, C et industriels) ainsi que les piézomètres S1, S2 et S6 sont situés dans la même nappe supérieure (proximité géographique et profondeurs similaires). Dans ce contexte, les variations de piézométrie et de conductivité électrique sont assez proches (Tableau 1 et figure 6).

Code	Nom	Puits surveillé (profondeur)	Altitude (mNGR)	Profondeur (m)	Ordre de grandeur des variations de CE sur les piézo' ($\mu\text{S/cm}$)	Ordre de grandeur des variations de CE sur les puits ($\mu\text{S/cm}$)
12287X0054/P1	S1	Usine du Gol (17.5 m)	16.67	25.88	500 - 600	300 - 500
12287X0039/S2	S2	Bois de Nèfles (17 m)	19	17.85	250 - 600	500 - 650
12287X0107	S6	Bois de Nèfles (17 m)	20.17	19.76	500 - 700	500 - 650

Tableau 1 – Caractéristiques des piézomètres de surveillance et des puits surveillés

Les piézomètres PIB4C et PIB5D mesurent quant à eux la charge hydraulique dans la nappe de base (à respectivement 100 et 90 mètres de profondeur).

Le piézomètre PIB4 (12287X0056) est en flûte de pan avec la distribution des crépines suivante (Petit et al., 2013) :

- PIB4A intercepte la nappe des basaltes entre 20.0 et 40.0 m de profondeur,
- PIB4B intercepte la nappe des basaltes entre 60.2 et 70.2 m,
- PIB4C intercepte la nappe des basaltes entre 80.0 et 98.0 m.

Le piézomètre PIB5 (12287X0057) est en flûte de pan avec la distribution des crépines suivante (Petit et al., 2013) :

- PIB5A intercepte la nappe des alluvions entre 11.9 et 16.9 m de profondeur,
- PIB5B intercepte la nappe des basaltes entre 32.2 et 36.3 m,
- PIB5C intercepte la nappe des basaltes entre 41.2 et 44.2 m,
- PIB5D intercepte la nappe des basaltes entre 53.8 et 73.2 m de profondeur.

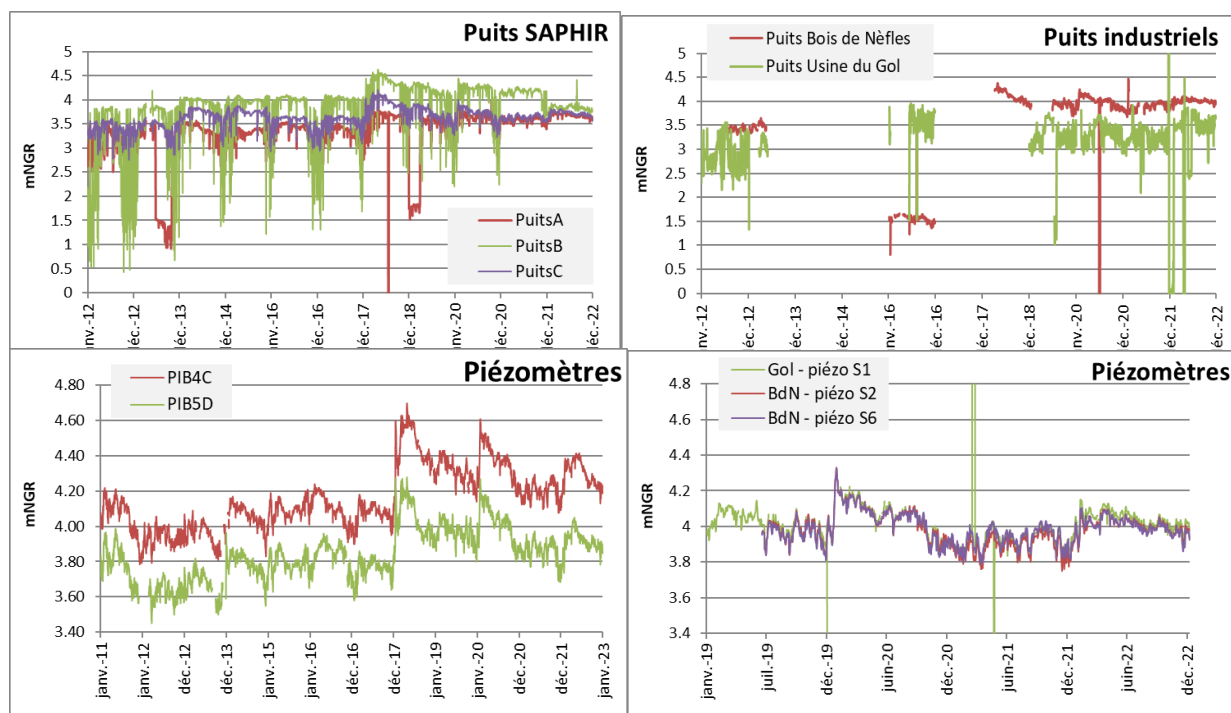


Figure 6 - Evolution des niveaux piézométriques journaliers observés dans la nappe du Gol

Sur les séries les plus longues (puits SAPHIR et piézomètre PIB4C et PIB5D), on observe un comportement régulier avec des cycles annuels plus ou moins marqués. Les niveaux maximums ont augmenté significativement (environ 50 cm) en 2017 et les deux années suivantes. Globalement, les niveaux présentent une tendance à la hausse de l'ordre de 25 cm en 10 ans.

2.2.4. Conductivité électrique

Les observations en continu de la conductivité électrique de l'eau de l'aquifère pour calibrer et valider le modèle sont présentées sur la figure 7.

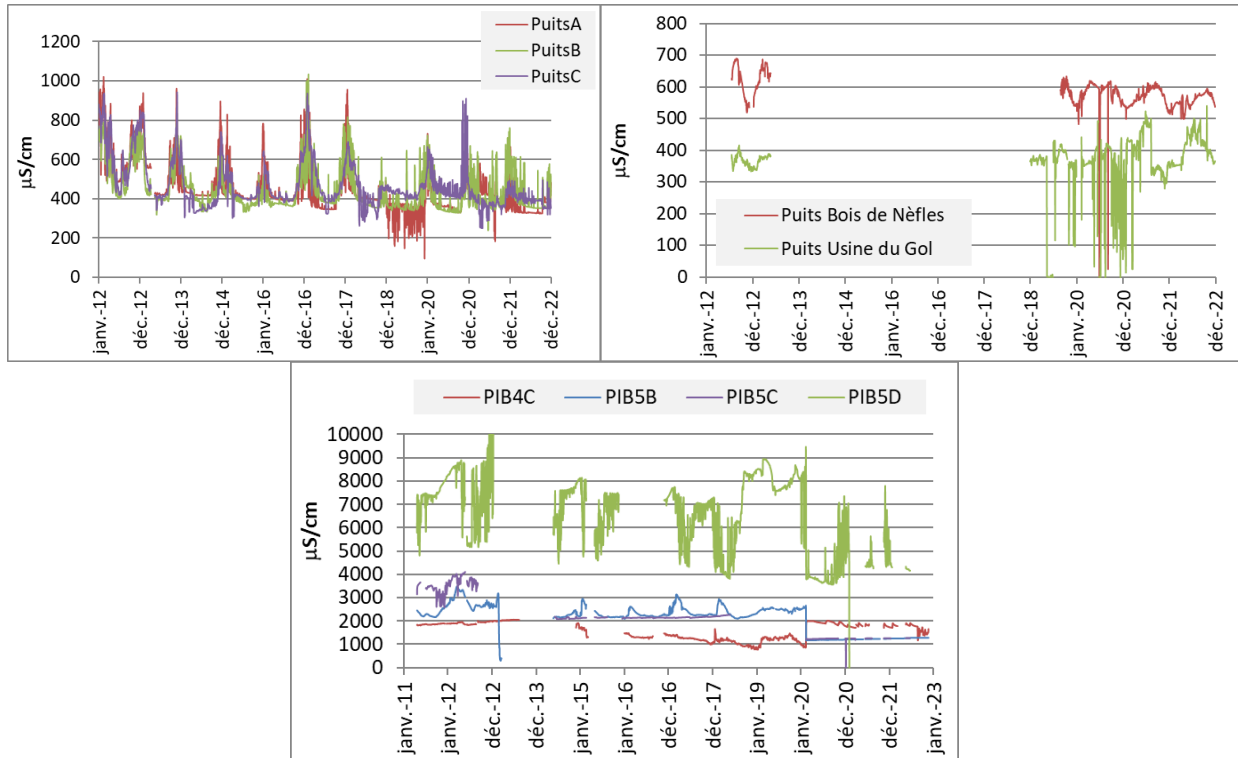


Figure 7 - Evolution de la conductivité électrique mesurée dans différents ouvrages de la nappe du Gol

Pour les puits A, B et C, on dispose désormais de plus de 10 ans de chroniques. La cyclicité annuelle de la conductivité est très marquée avec un maximum atteint en décembre – janvier (période de pompage important). L'année 2018-2019 fait néanmoins exception, avec une augmentation limitée. Sur le long terme, les conductivités mesurées dans ces puits présentent une tendance à la baisse. La conductivité dans l'ouvrage profond PIB5D semble également présenter cette tendance à la baisse. Les chroniques disponibles sur les autres ouvrages sont très bruitées ou lacunaires.

2.2.5. Variation du niveau marin

La chronique de variation moyenne journalière du niveau marin a été ajoutée aux données d'entrée du modèle (voir §2.3.1). La chronique des variations relatives (par rapport au zéro NGR) fournies par l'Office de l'Eau est disponible jusqu'en novembre 2019. Elle a été complétée par la chronique de niveau mesuré par le marégraphe de Saint-Pierre⁶, auquel une valeur constante de 0,578 m a été soustraite (Figure 8) afin d'homogénéiser les chroniques dont le référentiel semble être différent.

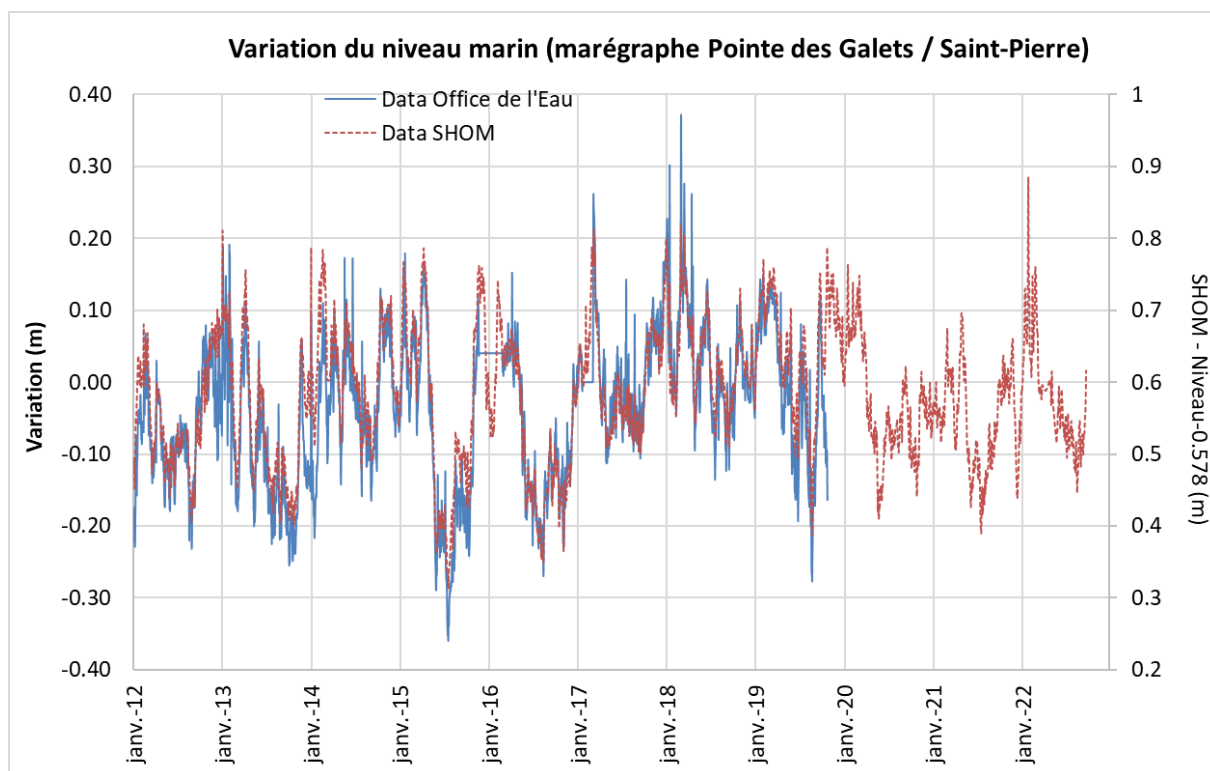


Figure 8 - Variations du niveau marin au marégraphe de Saint-Pierre (SHOM)

⁶ Disponible en ligne sur le site du SHOM (http://refmar.shom.fr/POINTE_DES_GALETS)

2.3. SIMULATION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DE LA CONDUCTIVITE SUR LA PERIODE 2012-2022

2.3.1. Prise en compte de la variation du niveau marin (basses fréquences)

Une analyse conduite en 2021 sur les chroniques de piézométrie, de précipitations, de marée, de hauteurs de rivière et de prélèvements a montré que les variations du niveau marin peuvent entraîner une baisse du niveau piézométrique de quelques centimètres sur les mois de juillet à septembre, et une hausse de l'ordre du centimètre sur les mois de novembre à février pour les piézomètres PIB5D et PIB4C (Laurencelle et al., 2021).

Sur la base de ce constat, il a été choisi d'inclure la variation du niveau marin dans le modèle (au lieu d'un niveau constant à 0 m NGR). Cette modification a permis d'améliorer la simulation de la piézométrie de la nappe de base⁷, mais a peu modifié les autres variables simulées. Les résultats présentés dans les paragraphes qui suivent tiennent compte de cette amélioration du modèle. A titre d'information, les résultats obtenus avec le modèle initial (qui ne prend pas en compte la variation du niveau marin) sont fournis en annexe.

2.3.2. Calibration du modèle

Lors de la calibration du modèle réalisée en 2017, les valeurs des paramètres avaient été fixées, au sein de plages de valeurs réalistes, de façon à ce que le modèle reproduise au mieux les données de piézométrie et de conductivité alors disponibles. Ce jeu de paramètres 2017 a été modifié a minima pour reproduire au mieux les observations⁸ désormais disponibles sur toute la période 2012-2022.

Ainsi, pour reproduire au mieux les évolutions piézométriques, les paramètres qui ont été recalés sont essentiellement ceux qui interviennent dans la formule de calcul de la charge hydraulique en chaque puits de pompage à partir de la charge hydraulique uniforme simulée dans le réservoir⁹. Ainsi, seuls les coefficients de puits (qui pondèrent les pertes de charge quadratiques) ont été réduits ou annulés.

La transmissivité locale autour du puits A a également été augmentée et celle autour du puits B diminuée. Le coefficient d'échange entre le réservoir superficiel et l'océan a été augmenté de 25%.

	Calage 2023	Calage 2017
Coefficient de puits (en $m^5.s^{-2}$) A / B / C / BdN / Gol	5 / 0 / 0 / 0 / 50	40 / 1680 / 250 / 24 / 80
Transmissivité (en m^2/s) A / B / C / BdN / Gol	0.8 / 0.1 / 0.8 / 0.8 / 0.6	0.1 / 0.8 / 0.8 / 0.8 / 0.6

Tableau 2 – Comparaison des paramètres hydrodynamiques du modèle entre les calages 2023 et 2017

Concernant le calcul de la conductivité électrique dans les réservoirs :

⁷ Le coefficient de corrélation observation / simulation sur PIB5D a été augmenté de 6 %.

⁸ Les coefficients de corrélation observation / simulation ont été augmentés de 6%, 16% et 12% pour la piézométrie des puits A, B et C.

⁹ En 2017, l'ajustement de ces paramètres avait été la seule modification apportée au calage de 2013.

- la valeur initiale de concentration en chlorures dans le réservoir supérieur (C_{A_init}) a été ajustée à 35 mg/L, ce qui correspond à une conductivité de 305 $\mu\text{S}/\text{cm}$, au lieu de 5 mg/L auparavant. Cette valeur initiale, supérieure à la concentration de la recharge (5 mg/L), rend compte de la présence d'eau (faiblement) minéralisée dans le réservoir depuis de nombreuses années (voir Poul, 1969). Le coefficient (α) de la formule empirique qui relie la conductivité de ce réservoir et le flux en provenance de la nappe de base est diminué d'un tiers. Ces ajustements permettent de mieux reproduire les faibles valeurs de concentration observées périodiquement dans les puits A, B et C de la SAPHIR.
- La valeur initiale de concentration en chlorures dans la nappe de base, ainsi que la concentration de l'eau minéralisée provenant du « réservoir amont » sont ajustées pour que la conductivité simulée dans la nappe de base reproduise les ordres de grandeurs observés. Les valeurs optimales diffèrent selon que l'on souhaite comparer la conductivité simulée dans la nappe de base à celle observée en PIB5B ou en PIB5D (90m de profondeur).

	PIB5B	PIB5D
Minéralisation initiale de la nappe de base	700 mg/L (~2680 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	2000 mg/L (~7325 $\mu\text{S}/\text{cm}$)
Minéralisation du réservoir amont	750 mg/L (~2860 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	2500 mg/L (~9110 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

Tableau 3 - Ajustement des paramètres liés au calcul de la conductivité (2023)

2.3.3. Comparaison des variables observées et simulées

Le modèle HydroGol a été mis en œuvre avec les données d'entrée et les paramètres décrits précédemment. Les variables simulées (charge hydraulique aux cinq puits, dans la nappe supérieure et dans la nappe de base, ainsi que la conductivité de la nappe supérieure et de la nappe de base) sont comparées aux observations (Figure 9 - Figure 10). La qualité de la simulation peut être évaluée par le coefficient de corrélation entre la série observée et la série simulée (Tableau 4).

On constate que la piézométrie de la nappe de base est bien reproduite par le modèle. Le niveau piézométrique simulé dans la nappe supérieure (supposé uniforme en dehors des zones influencées par les pompages) correspond relativement bien à celui observé au piézomètre S2. Le modèle reproduit de manière satisfaisante les variations annuelles ainsi que la tendance à la hausse depuis 2013 de la charge hydraulique aux puits A, B, C, Bois de Nèfles et puits du Gol.

L'évolution de la conductivité aux puits A, B et C est bien reproduite, ainsi que la tendance à la baisse observée dans la nappe de base. En revanche, le modèle n'arrive pas à reproduire les faibles variations de conductivité aux puits Bois de Nèfles et Puits de l'usine du Gol.

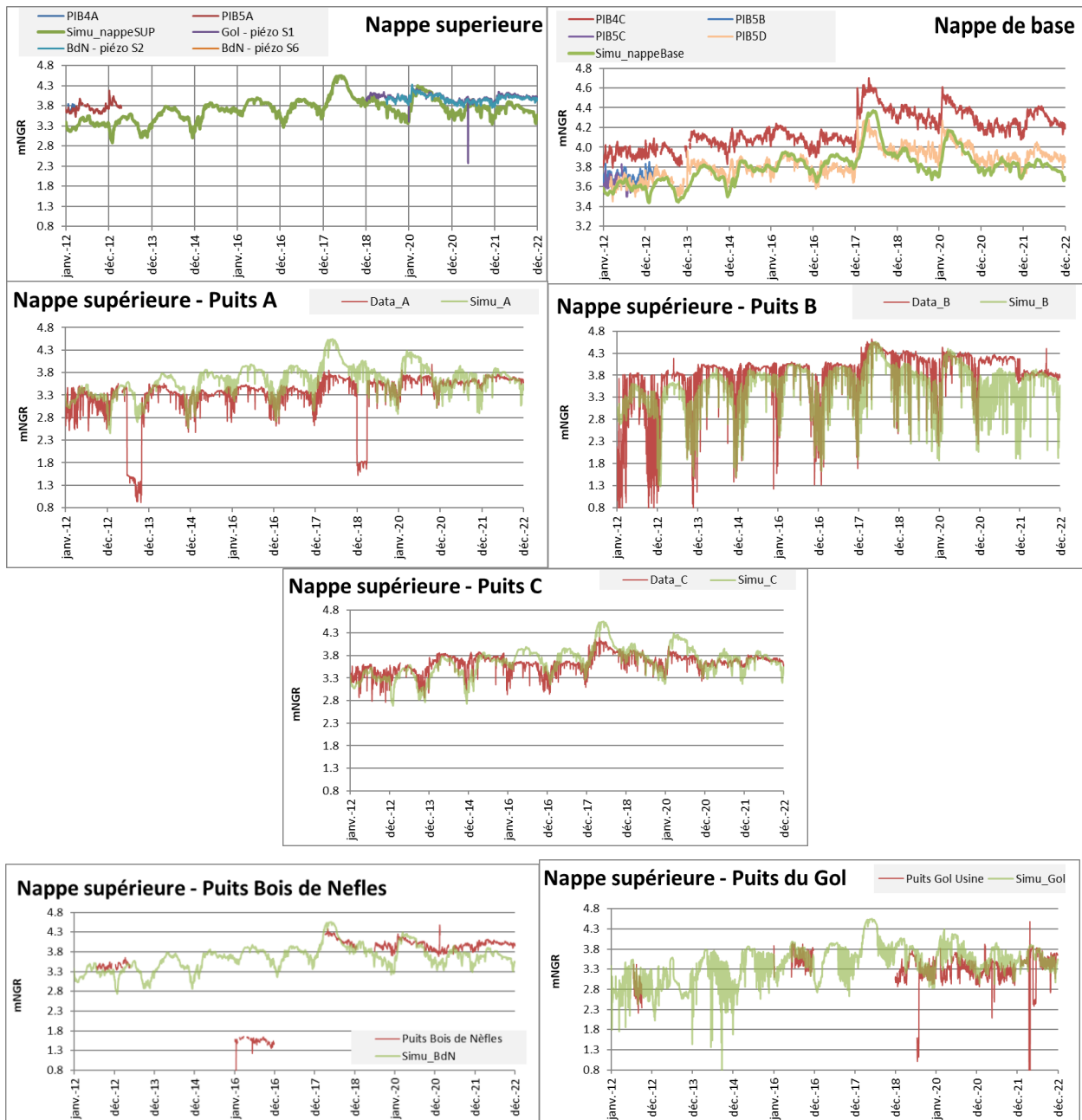


Figure 9 - Charges hydrauliques observées et simulées (en vert) dans la nappe supérieure, aux puits, et dans la nappe de base

Nappe supérieure S2	Nappe de base PIB5D	Puits A	Puits B	Puits C	Puits Bois de Nêfles	Puits du Gol
0.71	0.82	0.43	0.74	0.77	0.17	0.26

Tableau 4 - Coefficient de corrélation entre la piézométrie simulée et les observations

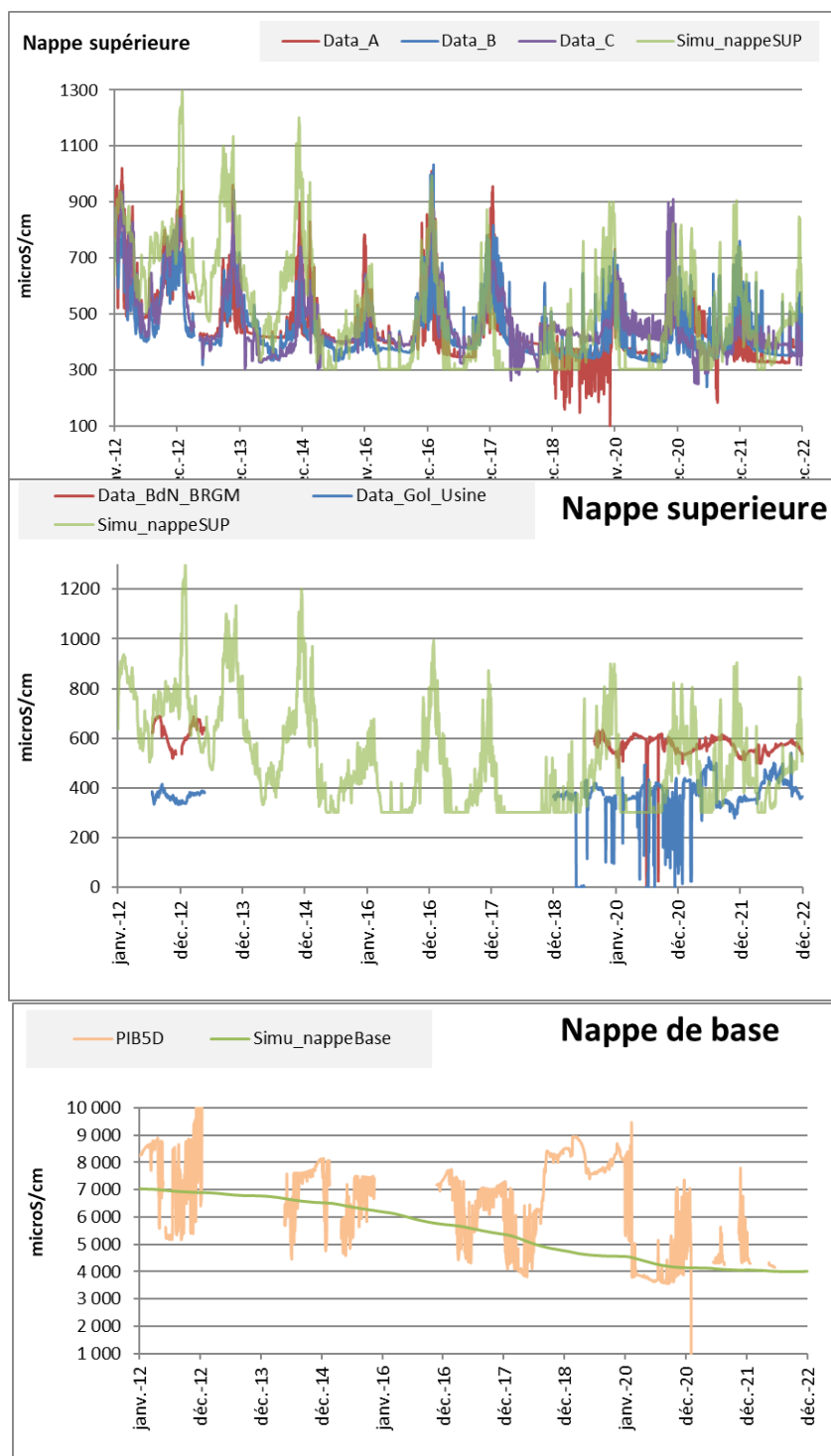


Figure 10 - Conductivité observée et simulée (en vert) dans la nappe supérieure et la nappe de base

2.3.4. Bilan des flux

L'analyse des flux annuels qui composent le bilan hydrique des différents compartiments (réservoirs) du modèle apporte des éléments de compréhension du fonctionnement (Figure 11 - Figure 12). Trois points sont en particulier à noter :

1. Les deux nappes sont essentiellement alimentées par l'infiltration des précipitations sur la planèze et en pied de planèze¹⁰. L'infiltration sur la plaine du Gol elle-même représente un volume beaucoup moins important, et du même ordre de grandeur que l'apport par excès d'irrigation (fixé à 1500 m³/jour sur toute la période, à défaut de données ou d'informations permettant de le faire évoluer).
2. Les échanges entre la nappe supérieure et la nappe de base sont toujours orientés de la nappe de base vers la nappe supérieure, sauf en 2018 et 2020 qui sont des années avec une pluviométrie supérieure à la moyenne (même exceptionnelle en 2018), dans un contexte de niveaux de nappe plutôt haut (contrairement à 2015 par exemple).
3. Sur toute la durée de la simulation, les échanges des réservoirs avec l'océan sont orientés de l'aquifère vers l'océan. D'après le modèle, il n'y a donc pas de flux d'eau salée qui envahit l'aquifère. L'augmentation de conductivité observée résulte essentiellement d'un processus de diffusion/dispersion. Comme mentionné en 2013 (rapport BRGM/RP-61834-FR), les valeurs de conductivités observées ne sont pas liées à une intrusion saline profonde, mais à la présence d'eau plus minéralisée qui envahit la nappe depuis la surface et qui elle-même résulte d'un mélange variable entre de l'eau douce et de l'eau minéralisée.

La recharge par infiltration de la pluie efficace sur la plaine du Gol correspond à la somme de la pluie efficace infiltrée directement sur la plaine et de la part de l'infiltration sur la planèze et en pied de planèze qui alimente la nappe supérieure. Les volumes prélevés sur l'ensemble des cinq puits représentaient plus de 50% de cette recharge entre 2012 et 2014, avec un maximum à plus de 90% en 2013. A partir de 2015, ce ratio s'établit entre 20% et 45% (Figure 13).

¹⁰ Pour rappel, le bassin d'alimentation pris en compte dans le modèle pour estimer l'infiltration sur la planèze a une superficie de 50 km². Il a été défini suite à l'étude des isotopes stables de l'eau (rapport BRGM/RP-61834-FR de 2013) qui a montré que l'altitude de recharge pour les puits A, B, C et les piézomètres PIB4 et PIB5 était comprise entre 1 500 mNGR et 1 750 mNGR, ce qui correspond à l'altitude de la plaine des Makes jusqu'aux remparts qui surplombent la plaine du Gol.

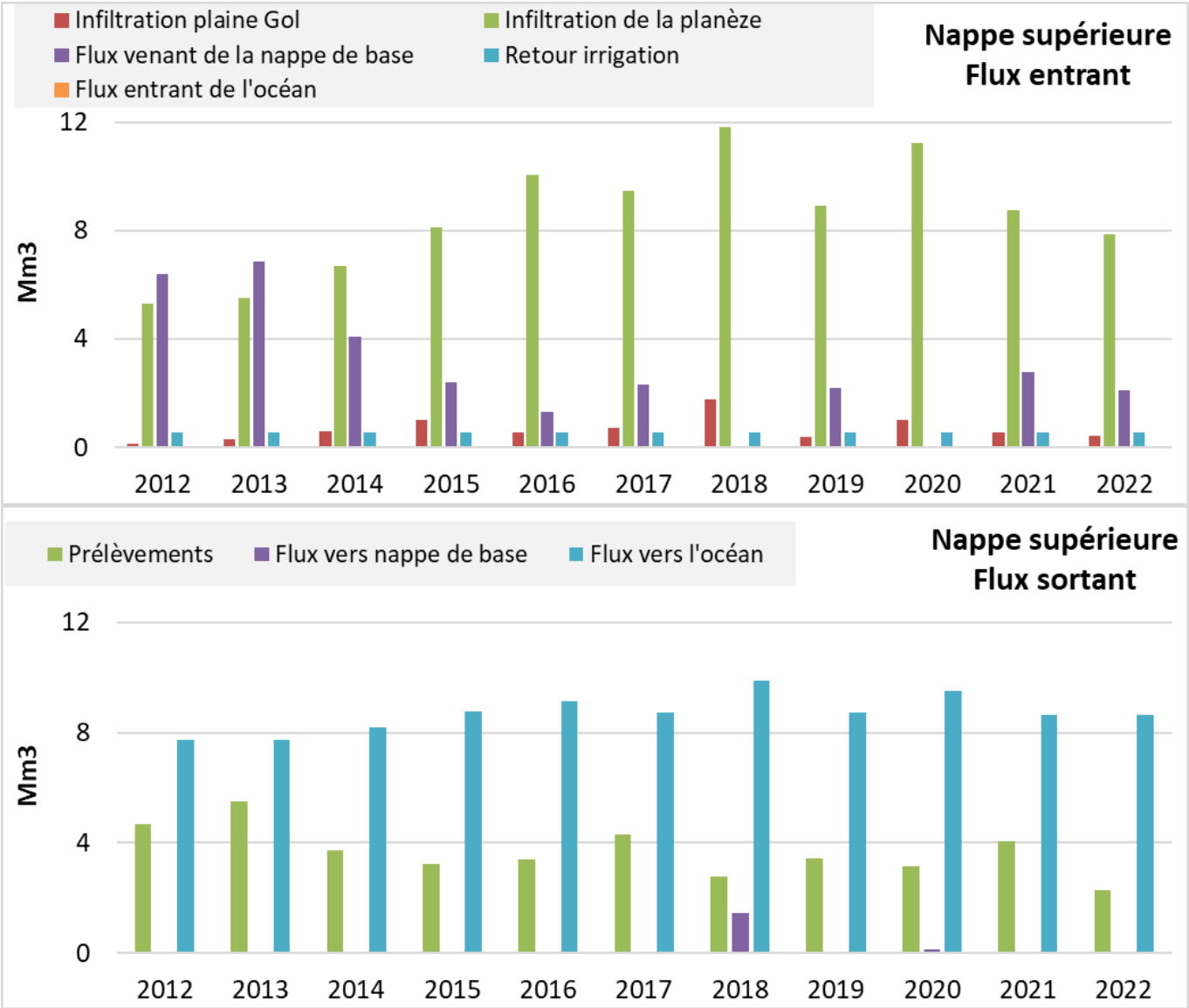


Figure 11 - Bilan des flux entrant et sortant de la nappe supérieure

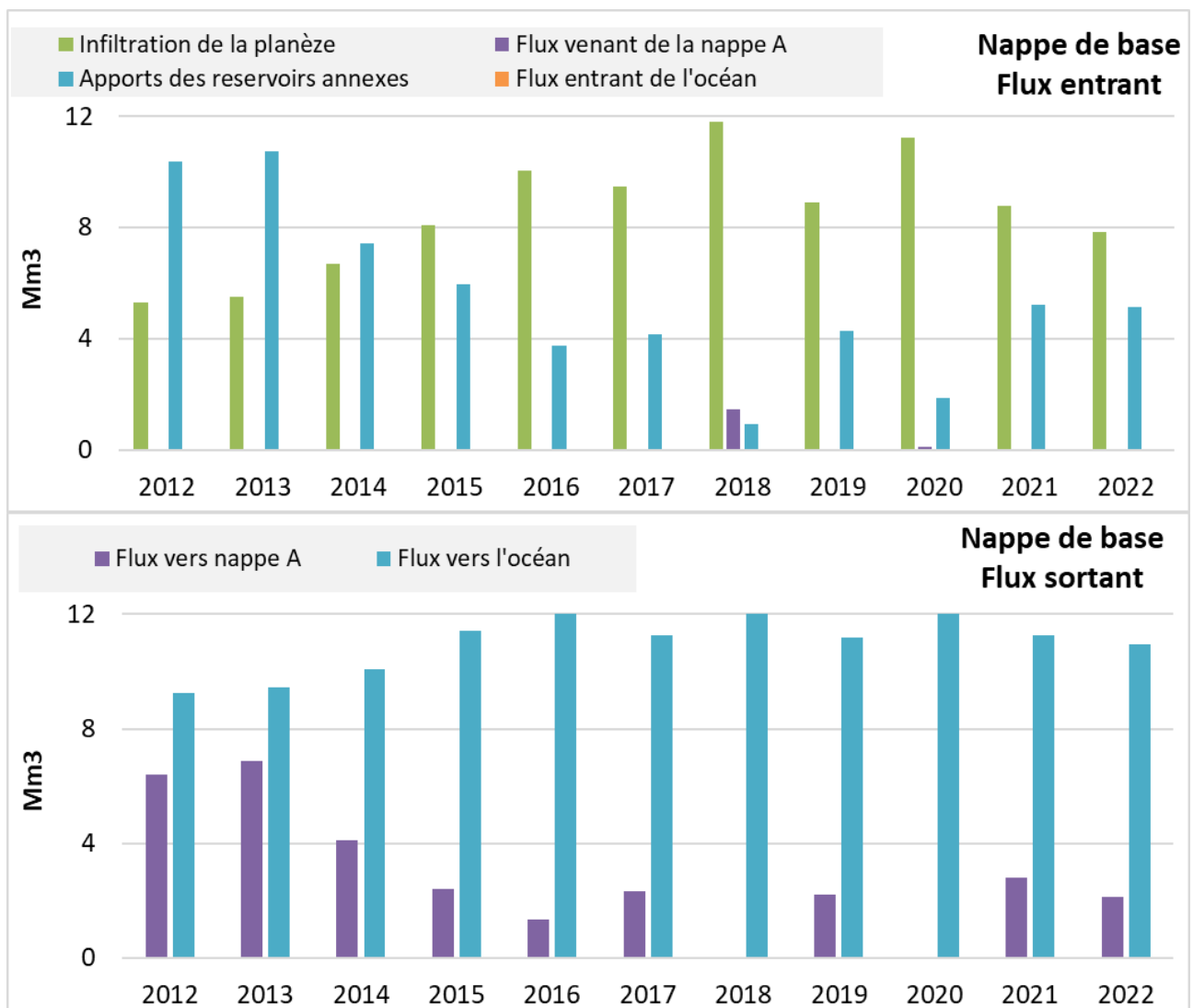


Figure 12 - Bilan des flux entrant et sortant de la nappe de base

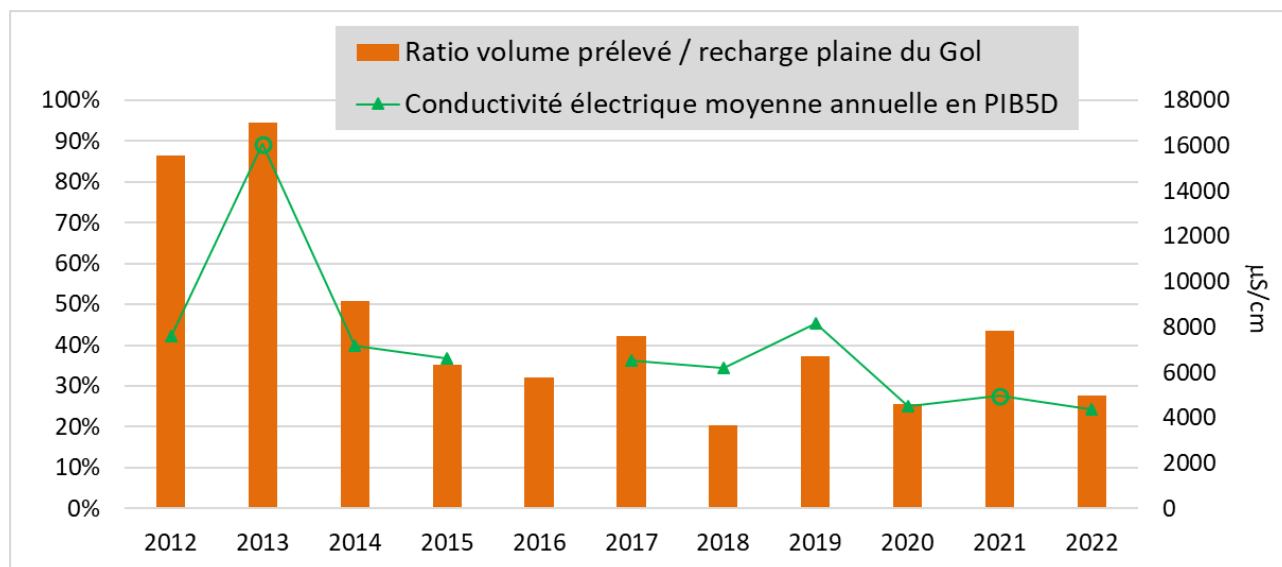


Figure 13 - Ratio annuel volume prélevé / recharge de la plaine du Gol

Remarque : données de CE indisponibles d'avril à décembre en 2013, et de février à octobre en 2021

2.4. CONCLUSIONS

Le modèle HydroGol a été initialement développé et calé pour reproduire la piézométrie et la conductivité électrique mesurées dans les nappes supérieures et de base de l'hydrosystème du Gol au cours de l'année 2012 (et premier semestre de 2013). L'année 2012 était pluviométriquement déficitaire (tout comme 2011). Depuis, des années plus humides se sont succédées, notamment en 2018 qui a présenté un excédent de 65% par rapport à la moyenne 2011-2022 (station Météo France Pierrefonds). Parallèlement, les volumes annuels totaux prélevés dans la nappe du Gol pour les usages agricoles et industriels, qui atteignaient 5,5 Mm³ en 2013, ont baissé avec une moyenne s'établissant autour de 3,4 Mm³ entre 2014 et 2022. Ces deux éléments ont naturellement conduit à une augmentation progressive des niveaux piézométriques observés dans la nappe supérieure et donc aux puits, et dans la nappe de base pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres en 10 ans. Parallèlement, cet apport d'eau « douce » a induit une diminution de la conductivité de l'eau aux puits A, B et C et dans la nappe de base.

La mise en œuvre du modèle sur une période de 10 ans (2012-2022), incluant des forçages externes très variables (pluviométrie et prélèvements) permet de mieux évaluer sa capacité à rendre compte du comportement de l'hydrosystème. Ainsi, il apparaît que le modèle reproduit de manière satisfaisante les variations annuelles ainsi que la tendance à la hausse depuis 2013 de la charge hydraulique dans la nappe supérieure et la nappe de base, ainsi qu'aux puits A, B, C, Bois de Nêfles et Gol-Usine. De plus, l'évolution de la conductivité aux puits A, B et C est bien reproduite, ainsi que la tendance à la baisse observée dans la nappe de base. En revanche, le modèle échoue à reproduire les faibles variations de conductivité aux puits Bois de Nêfles et Gol-usine.

Il a été vérifié que le modèle appliqué sur la période 2012-2022 avec des prélèvements qui respectent exactement les recommandations prescrites en 2015 (rapport BRGM/RP-62893-FR), simule des valeurs de conductivités dans la nappe supérieure telles que la valeur moyenne annuelle ne dépasse pas 500 µS/cm. Les critères permettant dès le mois d'avril d'indiquer si l'on

se situe dans une année pluviométrique sèche, normale ou humide, pour fixer les niveaux de prélèvements acceptables, seraient toutefois à préciser ou actualiser.

Le modèle conceptuel sur lequel repose le simulateur (Figure 2) suppose que la conductivité dans la nappe supérieure est liée à un apport d'eau minéralisée provenant de la nappe de base¹¹. Cet apport est d'autant plus important que la différence de charge entre les deux réservoirs est importante. C'est bien ce que l'on observe aux puits A, B et C et qui est correctement reproduit. Pour ces puits, on peut d'ailleurs noter que l'analyse de corrélogrammes croisés entre les chroniques journalières des prélèvements et celle des mesures de conductivité électrique montre que les augmentations de conductivité sont fortement corrélées (≈ 0.6) aux prélèvements dans les jours qui suivent ceux-ci (voir Présentation des analyses corrélatrices - p. 34). Les corrélogrammes croisés prélèvements – conductivité ne présentent pas ce comportement pour les puits Bois de Nèfle et Gol-usine. La conductivité autour de ces deux ouvrages semble être tamponnée, comme si une partie de l'eau qui alimente la nappe supérieure était localement moins minéralisée que l'eau de la nappe de base. L'origine possible de cette alimentation locale n'est pas identifiée.

Enfin, l'analyse des flux calculés par le modèle apporte quelques éléments intéressants sur le fonctionnement de l'hydrosystème dans son ensemble. On constate que les deux nappes sont essentiellement alimentées par l'infiltration des précipitations sur la planèze et en pied de planèze. Les volumes prélevés sur l'ensemble des cinq puits représentaient plus de 50% de la recharge de la nappe supérieure entre 2012 et 2014, et varient depuis entre 20% et 45%. Les échanges avec l'océan sont orientés de l'aquifère vers l'océan, il n'y a donc pas de flux d'eau salée qui envahit l'aquifère exploité par les puits. La minéralisation ne semble pas provenir de l'intrusion saline *sensu stricto* mais de la présence d'eau plus minéralisée qui envahit la nappe et dont l'origine serait à préciser pour améliorer la modélisation.

¹¹ Au vu de l'analyse de la relation conductivité électrique / intrusion saline (voir § 3.1.2. Relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline – p. 35), le modèle conceptuel pourrait être amélioré afin d'introduire différentes sources de minéralisation et se rapprocher de la réalité physique hydrogéologique.

3. Compléments techniques sur le fonctionnement de l'aquifère du Gol

Le Comité de gestion du Gol a soulevé les interrogations suivantes sur le fonctionnement de l'aquifère du Gol et du modèle HydroGol :

- Existe-t-il une compartimentation entre le secteur Est (puits industriels) et Ouest (puits Saphir) ?
- Quelle est la relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline ?
- Quel rôle joue le rejet des eaux de process de l'industriel Albioma dans les bassins d'infiltration sur l'aquifère du Gol ?

Afin de répondre à ces interrogations, les résultats des investigations réalisées entre 2010 et 2015 (hydrogéochimie et pompage d'essai) sont rappelées dans le présent chapitre. Par ailleurs, un traitement des nouvelles données de suivi vient compléter les résultats historiques.

3.1.1. Compartimentation de l'aquifère du Gol entre les puits industriels et les puits Saphir

La question de la compartimentation concerne l'existence ou l'absence d'une limite hydrogéologique entre les trois puits Saphir (A, B et C) et les deux puits industriels (Bois de Nèfles et Gol) - Figure 14. Les limites de l'aquifère du Gol modélisé par l'outil HydroGol (Lanini and Petit, 2015 ; Petit et al., 2013) ne sont pas remises en question.

Afin de répondre à la question de la compartimentation puits Saphir / puits industriels, les résultats du pompage d'essai sont repris ci-après et des analyses corrélatoires ont été réalisées.

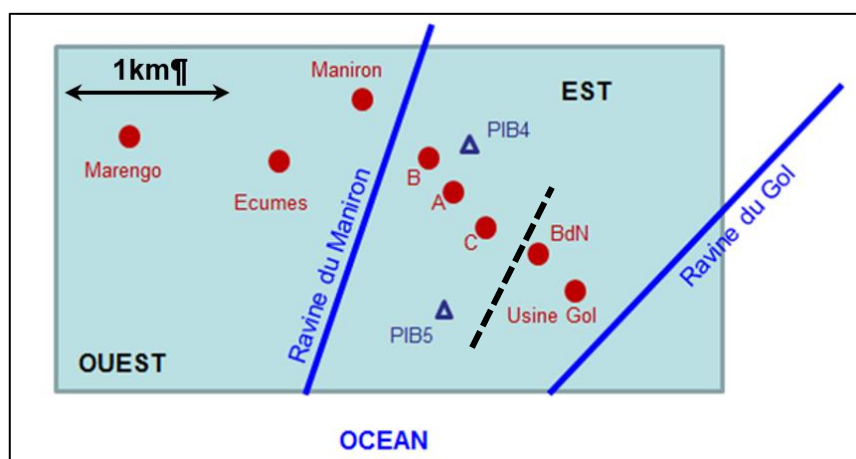


Figure 14 - Compartimentation de la nappe du Gol et localisation des ouvrages
 Lignes bleues : limite de l'aquifère du Gol modélisé par l'outil HydroGol
 Tirets noirs : compartimentation hypothétique entre les trois puits Saphir (A, B et C) et les deux puits industriels (Bois de Nèfles et Gol)
 Echelle approximative (schéma conceptuel synthétique)

a) *Pompages d'essai - Rappel des conclusions du rapport BRGM/RP-61834-FR (Petit et al. 2013)*

Les interprétations des pompages d'essai sont issues du rapport Petit et al. (2013). Dans cette étude, la démarche avait consisté en :

- La réinterprétation avec des méthodes plus performantes et plus adaptées au milieu complexe des formations volcaniques des 14 pompages d'essai anciens réalisés entre 1971 et 2006 ;
- La réalisation d'un pompage d'essai en interférence en octobre 2011 (Figure 15 - Figure 16) : ce pompage avait été organisé afin de mettre en évidence les connexions hydrauliques, ou leur absence, entre les différents ouvrages avec un protocole qui consistait à mettre en service et arrêter de manière successive les pompes.

Sur la base de ces interprétations, les conclusions sont rappelées ci-après.

Les aquifères de la plaine du Gol sont d'un point de vue hydrodynamique divisés en deux unités principales (Figure 17) :

- le secteur avec les puits industriels (Puits du Gol, Bois de Nèfles), les puits Saphir (A, B, C) et les piézomètres PIB4 et 5 est caractérisé par un aquifère relativement homogène d'une transmissivité élevée de l'ordre de $0,8 \text{ m}^2/\text{s}$ et d'emmagasinement de l'ordre de 0,05. Le contraste vertical de transmissivité de l'aquifère est estimé à environ 7. L'aquifère est par ailleurs caractérisé par un léger effet de drainance provenant des formations superficielles peu perméables (tufs volcaniques et alluvions). Question géométrie, l'aquifère est limité à l'Ouest et à l'Est par deux limites étanches – ou peu perméables – de direction environ N50-60. Celles-ci correspondent vraisemblablement à la limite de la paléo-vallée couvrant, d'après les calculs, une largeur d'environ deux kilomètres (Figure 14) ;
- A contrario, le puits des Ecumes et le forage de Maniron sont situés dans un secteur où les aquifères sont plus complexes. La transmissivité des aquifères est plus faible, $0,07$ à $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$, et leur structure compartimentée (compartiments à transmissivité plus faible, discontinuité, etc.). Leur emmagasinement apparaît aussi plus faible ($1,3 \times 10^{-4}$ - valeur moyenne au puits des Ecumes).

Lors du pompage d'essai en interférence, il a été mis en évidence des baisses de niveau sur le puits Bois de Nèfles qui confirment la connexion hydraulique entre les puits industriels et les puits Saphir (Figure 18). Cette observation réfute donc l'existence d'une limite étanche entre les puits industriels et les puits Saphir.

	Prof. (m)	Prof. captée (m)		Suivi du débit	Suivi du niveau d'eau	Suivi cond. & T°	Géologie
Puits A	17.5	9.8	17.5	oui	oui	oui	Basaltes
Puits B	20.6	9.6	20.6	estimé*	oui	oui	Basaltes
Puits C	20.2	12.2	20.2	oui	oui	oui	Basaltes
Gol	17.5	15.35	17.5	oui	Non, capteur HS	non	Basaltes
BdN	16.95	15.0	16.95	oui	oui	non	Basaltes
PiB4a	40.0	20.0	40.0	Non pompé	Non, capteur HS	oui	Basaltes
PiB4c	98.0	80.0	98.0	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5a	16.9	11.9	16.9	Non pompé	oui	oui	Alluvions
PiB5b	36.3	32.2	36.3	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5c	44.2	41.2	44.2	Non pompé	oui	oui	Basaltes
PiB5d	73.2	53.8	73.2	Non pompé	oui	oui	Basaltes
Ecumes	15.0	5.3	15.0	oui	oui	oui	Basaltes
Marengo-Piézo	?	?	?	Non pompé	oui	oui	Basaltes

Figure 15 - Liste des données suivies par ouvrage durant l'essai du 15 au 17/10/2011 (Petit et al., 2013)

* débit estimé à partir des pompes en place.

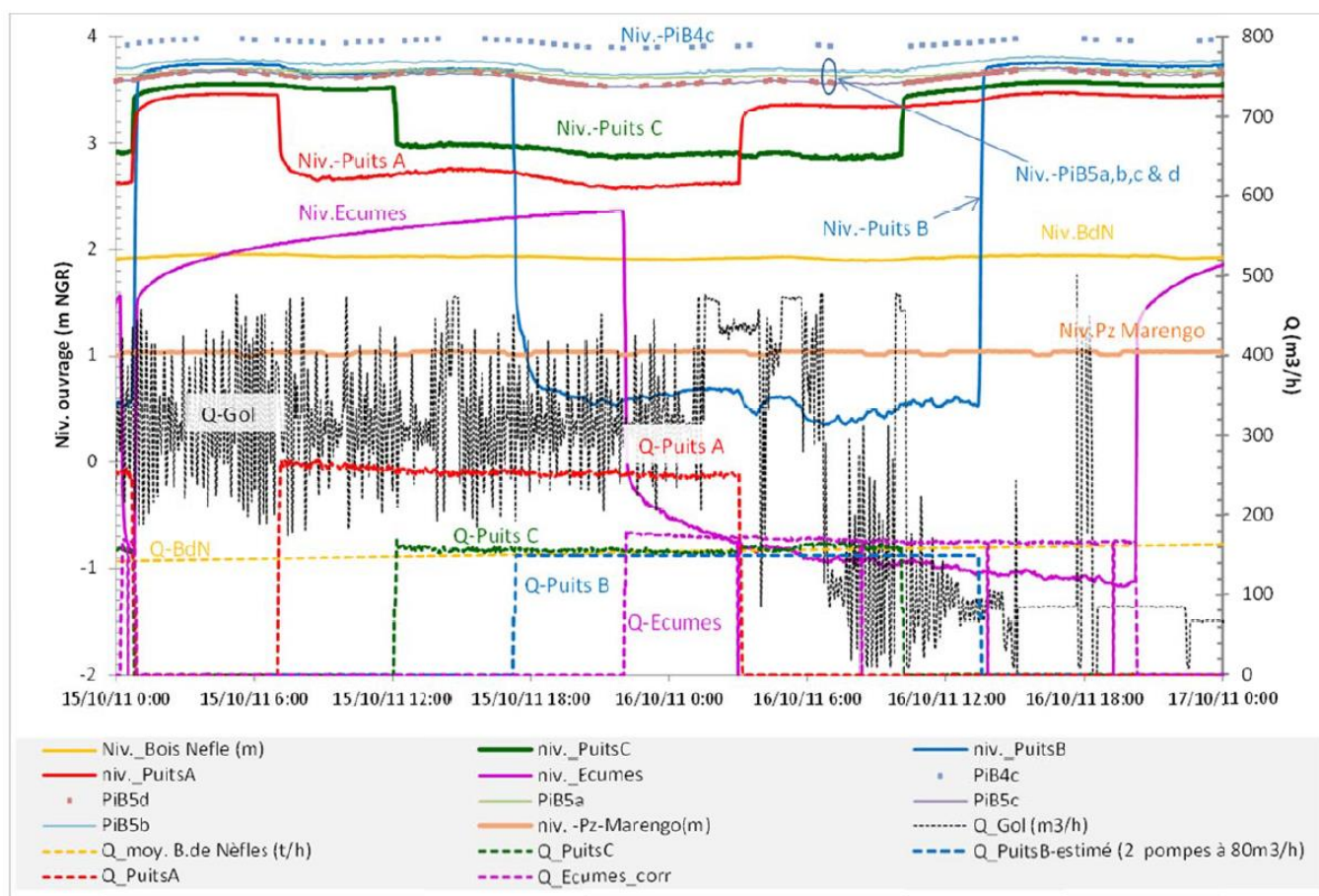


Figure 16 – Suivi des niveaux et des débits lors de l'essai du 15 au 17/10/2011 (Petit et al., 2013)

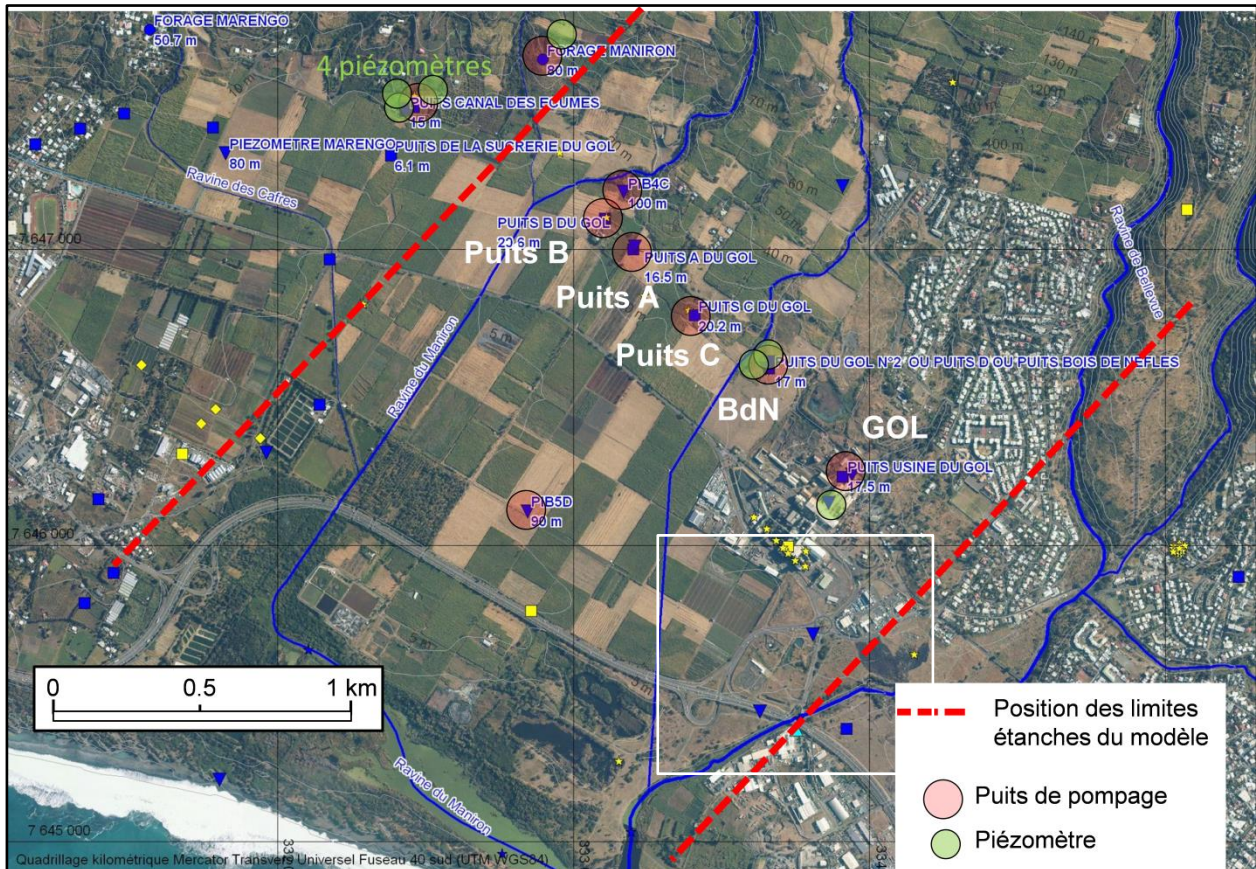


Figure 17 - Situation des puits, des piézomètres et des limites de l'aquifère (Petit et al., 2013)
Le cadre blanc représente l'emprise de la figure 26 (Localisation et emprise des deux bassins d'infiltration d'Albioma).

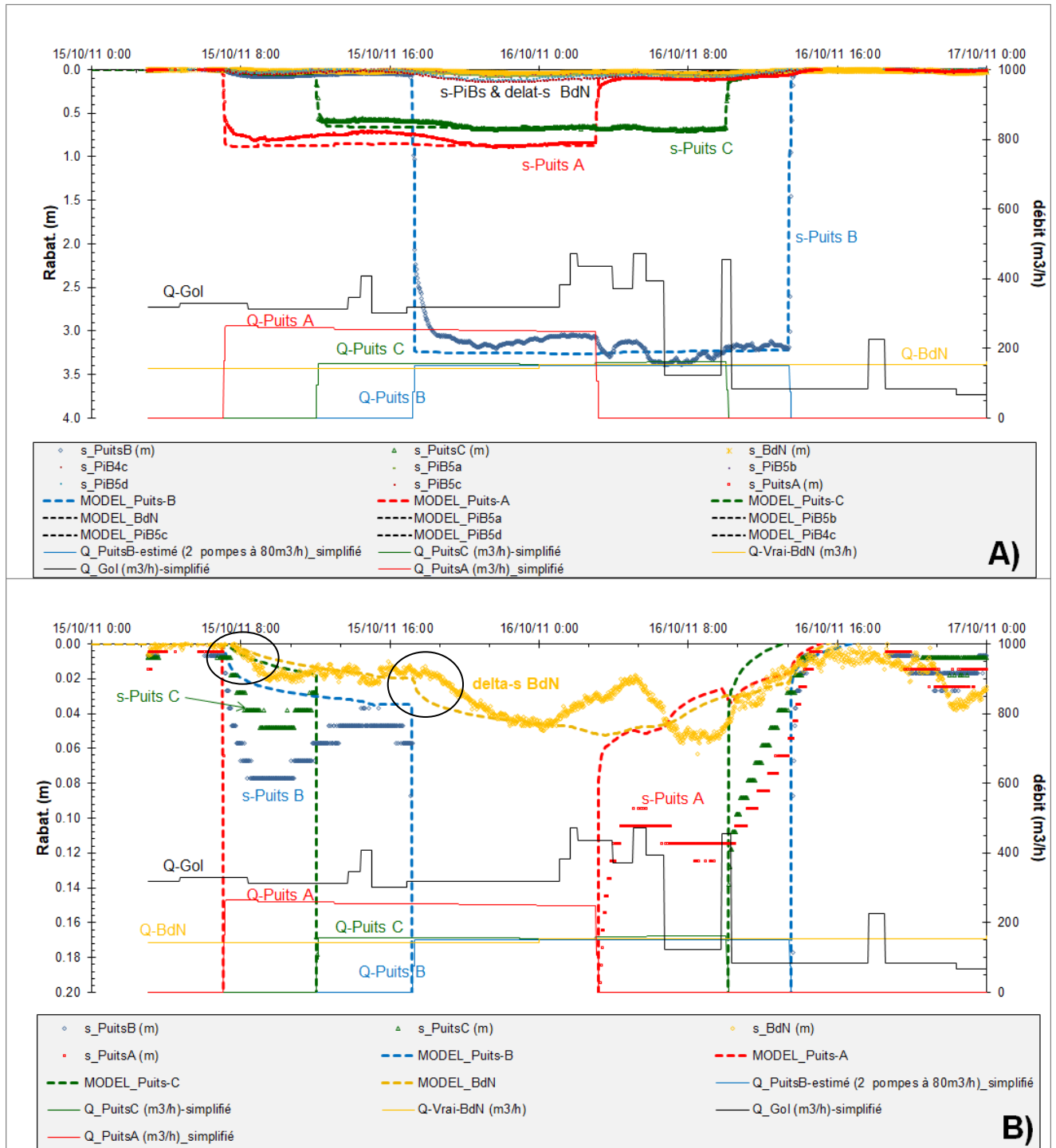


Figure 18 - Modélisation des rabattements de l'essai multi-puits réalisé en octobre 2011 (Petit et al., 2013).

Les modèles correspondent aux courbes en pointillés. A) ensemble des puits, B) détail sur Bois de Nèfles (BdN)

Les baisses de niveau entourées en noir matérialisent la connexion hydraulique entre les puits industriels et les puits Saphir.

b) Présentation des analyses corrélatoires

Une approche par traitement du signal sur les chroniques hydrogéologiques de la Plaine du Gol avait déjà été effectuée dans le cadre de l'étude historique HydroGol (Petit *et al.*, 2013), avec une application d'analyse corrélatoire, spectrale et en ondelettes. Les données avaient été traitées sur la période 2007-2012 pour les puits de la Saphir (A, B, C et Ecumes). Dans le présent rapport, cette démarche a été actualisée en considérant les nouvelles données jusqu'à 2022, et en ajoutant les puits industriels (Usine du Gol et Bois de Nèfles).

Méthodologie

Le système aquifère est assimilé à une « boîte noire » avec un signal d'entrée et un signal de sortie (par exemple : la pluie et la piézométrie). Dans le cas d'une analyse corrélatoire, les chroniques des signaux d'entrée et de sortie sont traitées dans le domaine temporel.

Une analyse corrélatoire croisée (ou fonction de corrélation croisée - CCF¹²) permet l'étude de la relation entrée-sortie et fournit une image approchée de la réponse impulsionnelle du système (corrélogramme croisé). Le décalage temporel (lag) obtenu pour le maximum de corrélation entre les deux séries détermine le temps de réponse du système. Le coefficient de corrélation (CR) varie de -1 à +1, et plus ce CR est proche de 0, plus la corrélation est négligeable. Il a été choisi ici de réaliser les corrélations sur un décalage temporel maximum de 90 jours afin d'illustrer la réaction de l'aquifère à court-moyen terme, ne nous permettant donc pas d'observer les cyclicités annuelles des pompages, qui ont été relevées lors de l'étude HydroGol (Petit *et al.*, 2013).

Les analyses corrélatoires ont été réalisées sur l'application XLSTAT, qui reprend notamment les travaux suivants : Box *et al.*, 1976; Brockwell *et al.*, 1996; Shumway *et al.*, 2000.

Chroniques hydrogéologiques

Les chroniques des cinq forages exploités du modèle HydroGol ont ici été étudiées : puits Saphir A, B, C et puits industriels (Usine du Gol et Bois de Nèfles).

Les chroniques de charge hydraulique (en m NGR), de prélèvement (m³/j) et de conductivité électrique (μS/cm) ont été étudiées au pas de temps journalier. Les processus impliqués dans le transfert de pression sont étudiés par les corrélogrammes croisés sur la base des chroniques piézométriques en sortie, et ceux impliqués dans le transfert de masse sont étudiés sur la base des chroniques de conductivité électrique.

Concernant les puits A, B et C de la Saphir, les données sont relativement complètes sur la période retenue 2012-2022. Pour les puits industriels Usine du Gol et Bois de Nèfles, les données continues et complètes ne sont disponibles que sur la période 2019-2022 (Arrêtés Préfectoraux de 2019).

Les valeurs aberrantes¹³ ont été supprimées par des filtres sur les valeurs minimales et maximales des chroniques. Les filtres sont décrits sur la figure 19 et une comparaison entre les données non filtrées et filtrées est illustrée pour le Puits A (Figure 20).

¹² CCF - cross-correlation function

¹³ Les valeurs aberrantes correspondent à des dysfonctionnements ponctuels des sondes.

Afin de tester la démarche, les analyses ont été réalisées sur les données brutes¹⁴. Au vu des résultats qui permettent de répondre aux interrogations, il n'a pas été nécessaire de pousser la préparation des données avec des corrections complémentaires.

	Niveau piézométrique (m NGR)	Conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$)	Débit d'exploitation ($\text{m}^3/\text{j.}$)
Puits A	< 2	< 250	-
Puits B	< 2.5	< 250	-
Puits C	-	-	-
Puits Usine du Gol	<1.9 ou >5	< 200	-
Puits Bois de Nêfles	< 2.5	< 400	-

Figure 19 - Filtres de valeurs appliqués aux chroniques hydrogéologiques des puits étudiés

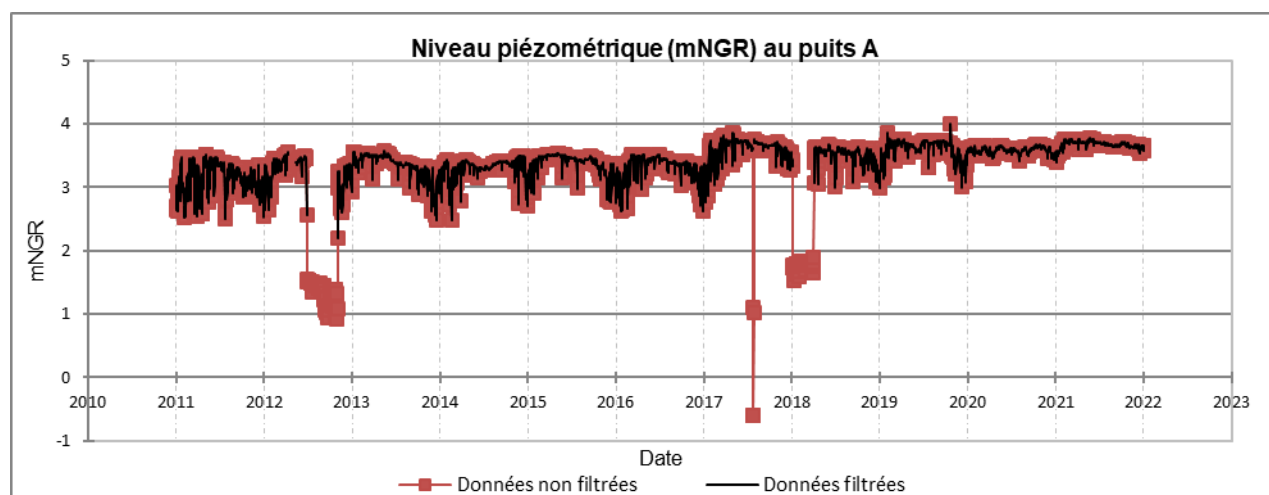


Figure 20 - Comparaison des données filtrées (courbe noire) et non filtrées (courbe et points marrons) sur la chronique piézométrique journalière du Puits A

Résultats

L'ensemble des résultats présentés ci-dessous est illustré en figure 21.

i. Transfert de pression : relation pompage-piézométrie

Une corrélation négative de -0,4 à -0,6 pour un décalage temporel de 0 jour indique que l'augmentation des prélèvements provoque la diminution des niveaux piézométriques. Les niveaux piézométriques des cinq puits exploités semblent avoir un comportement similaire aux prélèvements.

¹⁴ Aucune correction de l'influence de la marée sur les niveaux piézométriques n'a été effectuée pour les analyses corrélatrices. De même, aucune correction n'a été réalisée sur les niveaux piézométriques vis-à-vis des pertes de charge quadratique dues à l'exploitation des puits.

Des corrélations croisées pluviométrie (entrée) - piézométrie (sortie) ont été réalisées mais ont montré des CR très faibles¹⁵ $\leq 0,1$, illustrant alors que les fluctuations piézométriques sont principalement influencées par les pompages, qui masquent donc probablement le signal de recharge pluviométrique. Par ailleurs, les pluies considérées ici sont celles calculées au niveau de la plaine des Makes, avec donc un éloignement important entre la zone de recharge et les puits.

ii. Transfert de masse : relation piézométrie-conductivité

Les corrélations croisées niveau piézométrique (entrée) et conductivité électrique (sortie) indiquent pour les puits Saphir (A, B et C) une corrélation négative allant jusqu'à un CR de -0,7 pour un lag de 0 jour. Cette tendance se poursuit sur 2 à 3 mois en fonction des ouvrages. Cela signifie que l'augmentation des rabattements (baisse de la piézométrie), principalement due aux pompages, induit une augmentation de la conductivité électrique instantanément. Ceci traduit une augmentation de la minéralisation de l'eau lorsque les pompages sont mis en route.

En revanche, pour les puits Bois de Nèfles et Usine du Gol, un fonctionnement différent est observé. Les corrélations sont positives jusqu'à 25 à 30 jours après le début des pompages, avec des CR allant jusqu'à 0,15 pour Usine du Gol et 0,2 pour Bois de Nèfles. Bien que ces coefficients soient relativement faibles, ils sont cohérents avec les observations réalisées par les exploitants des forages : lorsque les pompages sont démarrés, la conductivité électrique au puits diminue. Après 30 jours de pompage, une corrélation inverse se manifeste sur le puits Bois de Nèfles uniquement avec un CR de l'ordre de -0,2. Cela pourrait signifier que l'augmentation des rabattements (baisse de la piézométrie), principalement due aux pompages, induit une augmentation de la conductivité électrique après 30 jours.

Cette réaction de l'aquifère aux pompages pourrait être expliquée par des apports d'eaux moins minéralisées contenues dans des couches plus transmissives dans un premier temps puis un retour à une eau minéralisée, comme sur les puits Saphir (A, B et C).

iii. Transfert de masse : relation pompage-conductivité

Les résultats des corrélations pompage (entrée) et conductivité (sortie) sont globalement inversés par rapport aux corrélations piézométrie-conductivité. Les puits Saphir (A, B et C) montrent donc une corrélation positive jusqu'à un CR = 0,6 sur des lags de 0 jour témoignant bien que l'augmentation des pompages engendrent une augmentation de la minéralisation de l'eau exploitée.

Les puits Bois de Nèfles et Usine du Gol montrent une corrélation inverse :

- Usine du Gol : CR= -0,2 au lag = 0 jour, négatif jusqu'à une vingtaine de jours, puis la corrélation devient positive ;
- Bois de Nèfles : CR= -0,4 au lag = 0 jour, négatif jusqu'à presque 80 jours, puis la corrélation devient positive.

La mise en service des pompages industriels engendre une diminution de la conductivité électrique.

¹⁵ Les CR restent également faibles avec un décalage temporel important (≈ 90 jours). Cela signifie que le signal des pluies précipitées dans les Hauts (plaine des Makes) et rechargeant l'aquifère du Gol ne s'illustre pas dans cette démarche de CCF.

Les 5 puits se différencient donc en deux fonctionnements pour ce qui concerne le transfert de masse :

- Fonctionnement 1 - Industriel : les puits Bois de Nèfles et Usine du Gol sont marqués par un flux d'eau moins minéralisée lorsque les pompages sont mis en service ;
- Fonctionnement 2 - Saphir : les puits A, B et C sont marqués par un flux d'eau plus minéralisée lorsque les pompages sont mis en service.

L'origine de la minéralisation de l'eau est abordée au paragraphe suivant.

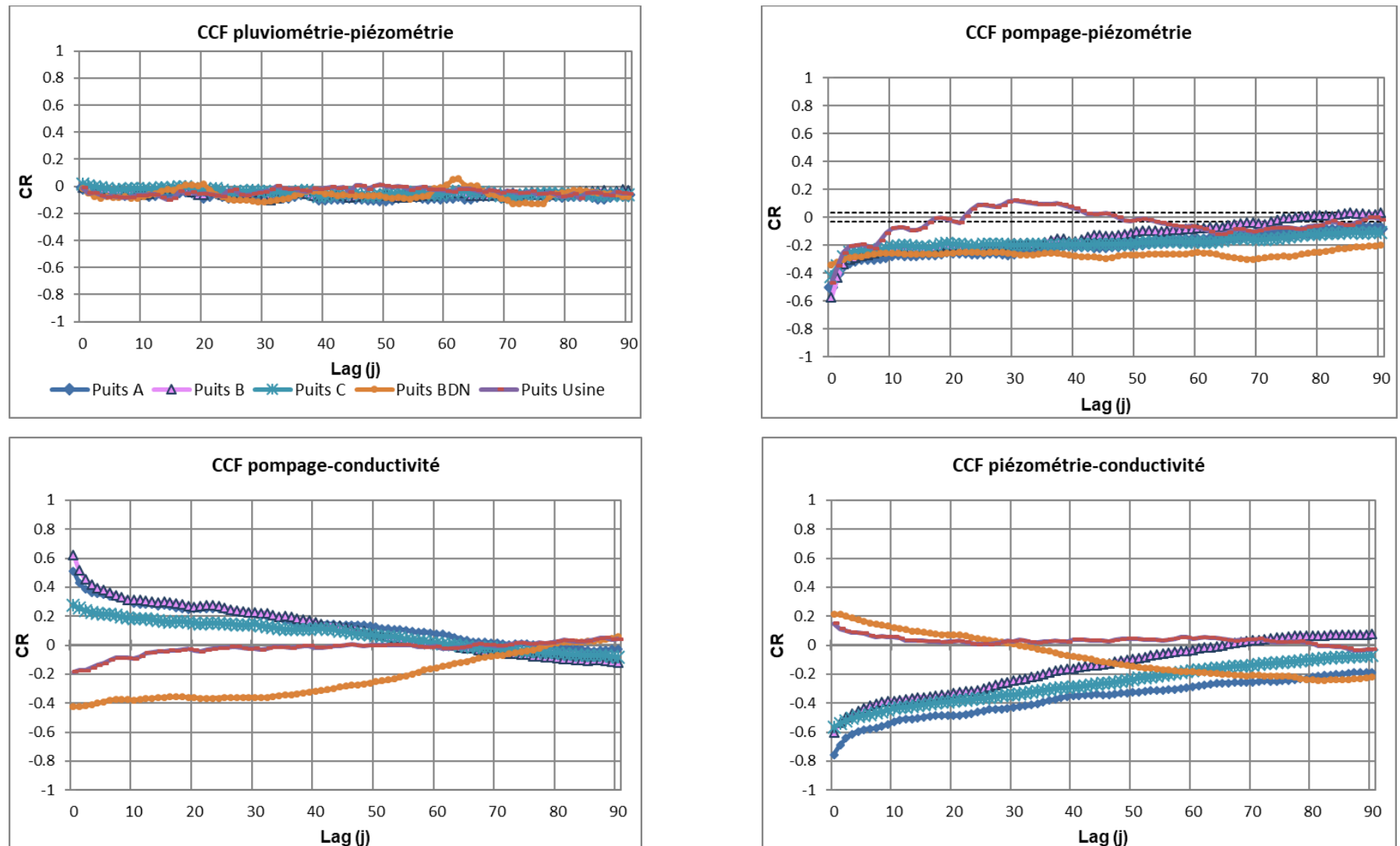


Figure 21 - Corrélations croisées. Le titre des graphiques indique : « donnée en entrée – donnée en sortie »

c) *Conclusion sur la question de la compartimentation de l'aquifère du Gol entre les puits industriels et les puits Saphir*

Les résultats des pompages d'essai en interférence confirment l'existence d'une connexion hydraulique entre les puits industriels et les puits Saphir (absence de compartimentation). Les résultats des analyses corrélatrices mettent en évidence des fonctionnements différents entre les puits Saphir et les puits industriels. Ces derniers étant marqués par un flux spécifique d'eau moins minéralisée lors de la mise en service des pompes. Ce fonctionnement localisé a pu être mis en évidence à partir des données de suivi acquises entre 2019 et 2022 sur les puits industriels (Puits Usine du Gol et Bois de Nèfles). Pour mémoire, cet apport d'eau douce n'est pas considéré dans l'outil HydroGol tel qu'il a été élaboré entre 2013 et 2015.

3.1.2. Relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline

La question de la relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline vise à déterminer si les variations de conductivité électrique mesurées sont le marqueur d'une modification de la position de l'interface eau douce / eau salée.

Afin de répondre à cette question, dans un premier temps, les résultats des investigations historiques sont repris ci-après et, dans un second temps, une analyse en composantes principales a été réalisée.

a) *Approche hydrogéochimique - Rappel des conclusions du rapport BRGM/RP-61834-FR (Petit et al. 2013)*

Les interprétations de l'approche hydrogéochimique sont issues du rapport Petit *et al.* (2013). Dans cette étude, la démarche avait consisté en :

- i. une intégration des analyses hydrochimiques disponibles à La Réunion ;
- ii. l'interprétation des diagrammes élémentaires binaires (qui permet la comparaison d'informations apportées par deux éléments ou des rapports entre éléments) ;
- iii. l'analyse de la signature isotopique des eaux.

Une campagne d'échantillonnage des eaux de 10 sites (du 04 au 06 octobre 2011) avait permis de cibler spécifiquement les eaux de l'aquifère du Gol (Puits Usine Gol, Puits Marengo, Puits Ecumes, Puits A, Puits B, Puits C, et les eaux des piézomètres PIB4A, PIB4C, PIB5B et PIB5D).

Sur la base de cette approche, les conclusions sont rappelées ci-après :

La salinité est plus élevée vers le littoral et en profondeur (Figure 22), ce qui est cohérent avec une profondeur de l'interface eau douce/eau salée qui augmente lorsque l'on s'éloigne du littoral. Les contributions respectives d'eau de mer sont les suivantes (Figure 24) :

- Les Puits A, B, C, PIB4A, et Usine du Gol autour de 0,6%,
- PIB4C, PIB5B autour de 3,3%,
- PIB5D (piézomètre le plus profond) à 11,9%.

Les pompages sont à l'origine de la variabilité hydrochimique entre forages d'exploitation et les piézomètres¹⁶. Au contraire des ouvrages exploités (Puits A, B, C, Bois de Nèfles, Usine du Gol), les piézomètres PIB4A, PIB4C, PIB5B sont préservés de toute activité anthropique et présentent les plus fortes salinités. Les pompages semblent donc être à l'origine d'apports superficiels (peu salés et contaminés en NO₃) liés à un accroissement de la drainance des formations quaternaires plus exposées à l'agriculture (Figure 23).

Sur le transect des forages d'exploitation Puits B, A, C, Bois de Nèfles, et Puits Usine du Gol, on observe une augmentation des apports superficiels dans une direction Ouest-Est : l'altitude de recharge est plus basse pour le Puits Usine du Gol et est associée à des pics de nitrates plus élevés. En l'état, nous ne pouvons clairement définir si ces apports à l'Est sont liés à une plus grande pression anthropique (retour de flux à la nappe lié à l'irrigation, rejets d'usine ou zone urbaine de Camp du Gol), mais ils sont également associés à un plus faible impact de l'intrusion saline et à des eaux avec un temps de résidence légèrement plus long.

¹⁶ Il apparaît que l'augmentation de la conductivité électrique est en relation avec l'augmentation du débit pour les puits A, B et C (Saphir). Cette observation n'a pas été vérifiée sur les Puits industriels (BdN et Usine-Gol) car les données n'étaient pas disponibles.

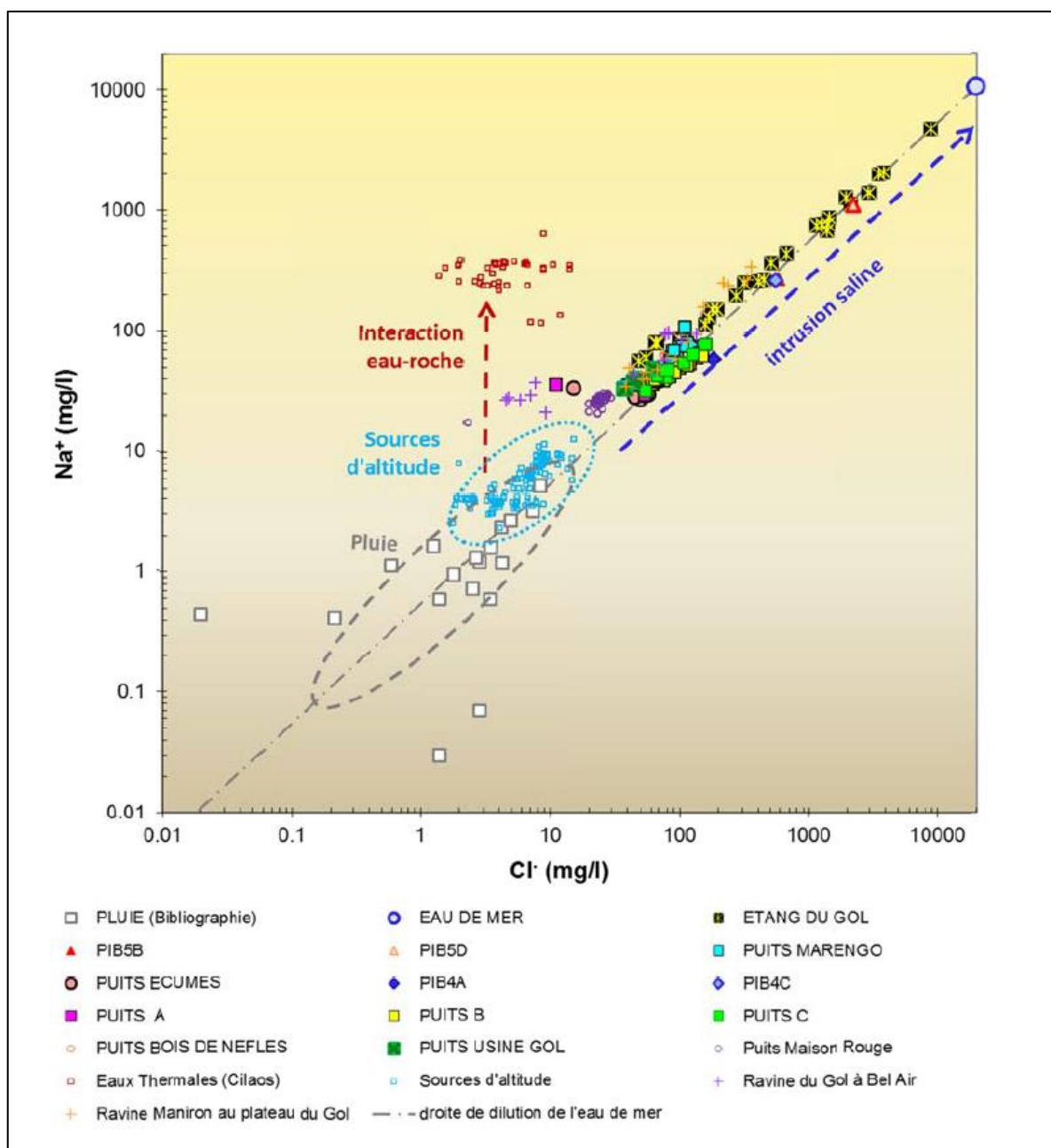


Figure 22 - Diagramme binaire Na vs. Cl des eaux du bassin d'alimentation du Gol (Petit et al., 2013)

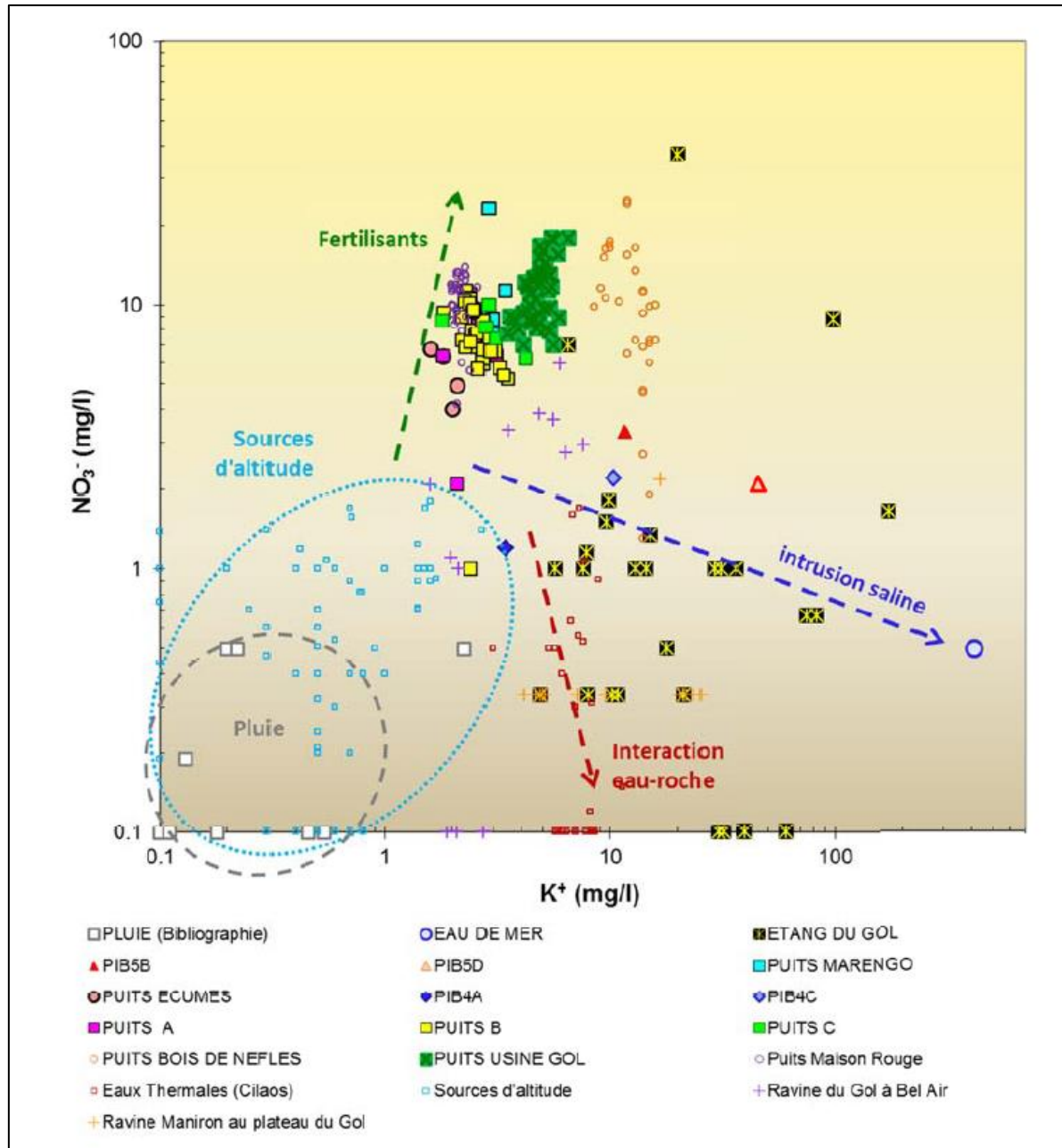


Figure 23 - Diagramme binaire NO_3^- vs. K^+ des eaux du bassin d'alimentation du Gol (Petit et al., 2013)

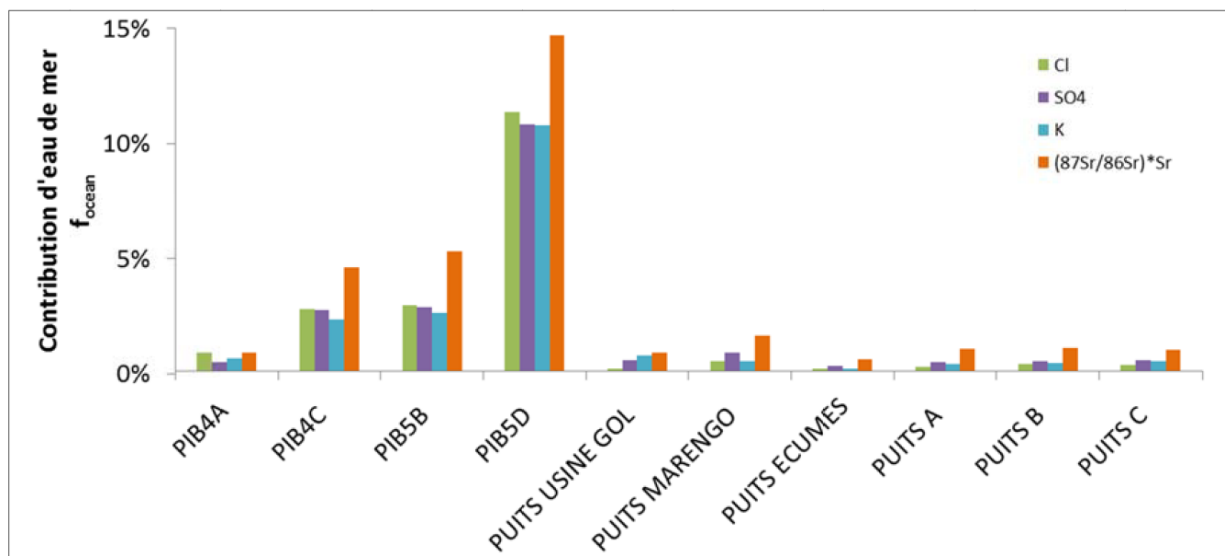


Figure 24 - Contribution d'eau de mer pour chaque site calculée à partir des teneurs en Cl, K, SO₄ et Sr (Sr x ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr). (Petit et al., 2013)

Une très bonne cohérence des résultats est constatée selon les quatre éléments testés pour calculer la contribution d'eau de mer.

b) Analyse en composantes principales - ACP

Une ACP permet de résumer l'information en réduisant le nombre de variables en identifiant les corrélations et dé-corrélations (pôles de mélange). Ce traitement statistique a été réalisé sur les analyses hydrochimiques d'octobre 2011¹⁷ (Petit et al., 2013). Les interprétations suivantes sont proposées (Figure 25) :

- Un pôle relativement homogène est constitué par les puits Saphir et par le puits de l'Usine du Gol ;
- Le Puits des Nèfles s'illustre par une hydrochimie différente, probablement marquée par une composante agricole (pôle NO₃, NO₃ ou PO₄) ;
- Le piézomètre PIB5D et l'étang du Gol sont légèrement décalés en direction du pôle Eau de mer.

¹⁷ Analyse hydrogéochimique (éléments majeurs et quelques éléments traces) sur les points : PIB5D, Puits industriels (Usine du Gol et Puits Bois de nèfles), Puits Saphir (A, C et C), étang du Gol et eau de mer

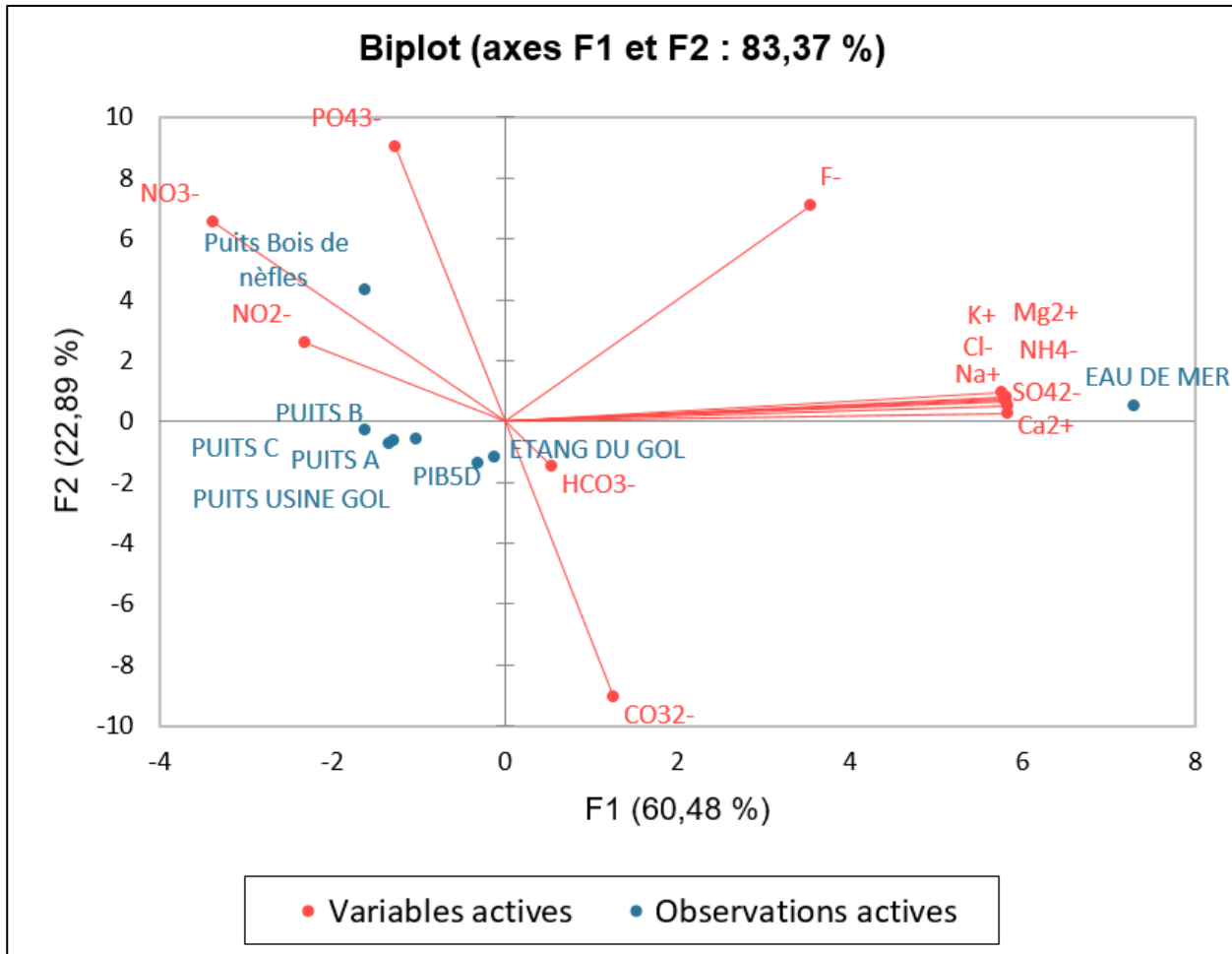


Figure 25 – ACP sur les analyses chimiques d'octobre 2011

c) *Conclusion sur la relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline*

Le phénomène d'intrusion saline est présent sur la Plaine du Gol et de manière prépondérante en profondeur (plus de 10% d'eau de mer sur le piézomètre PIB5D). L'aquifère exploité est donc sensible aux phénomènes d'intrusion saline. La variation de la conductivité électrique sur PIB5D est fonction de la recharge saisonnière et des prélèvements (Petit *et al.*, 2013).

Toutefois, les variations de conductivité électrique sur les différents ouvrages de prélèvement sont en relation avec des apports superficiels d'eau contaminés en NO_3 (drainance des formations plus exposées à l'agriculture). La conductivité électrique mesurée sur les ouvrages d'exploitation n'est donc pas un marqueur univoque de l'évolution du phénomène d'intrusion saline.

Afin de suivre l'évolution du phénomène d'intrusion saline, le suivi de la conductivité électrique sur les piézomètres existants PIB4 et PIB5 est nécessaire, et plus particulièrement en profondeur. Le suivi de la conductivité électrique sur les ouvrages d'exploitation reste néanmoins nécessaire et pertinent afin de s'assurer que les hypothèses de fonctionnement actuelles se vérifieront dans le futur pour d'autres conditions climatiques et d'autres conditions d'exploitation.

3.1.3. Rôle des bassins d'infiltration – Albioma

Albioma rejette ses eaux de process dans deux bassins d'infiltration localisés entre 500 et 600 mètres au sud du site de l'usine (Figure 26 - Figure 27). Les surfaces des bassins sont de l'ordre de 3 350 m² pour le bassin amont et 1 250 m² pour le bassin aval.

Le débit d'exhaure et la conductivité électrique sont suivis par Albioma sur l'année 2022 dans le cadre d'une procédure interne. Le débit de rejet est de l'ordre de 1 500 et 2 000 m³/j. (soit ≈65-85m³/h ou ≈0,55 à 0,75 Mm³/an). Le rejet se fait en alternance sur le bassin amont ou le bassin aval.

Les conductivités sont de l'ordre de 2 000 et 2 600 µS/cm. Par ailleurs, deux piézomètres d'observation sont localisés au Nord (PZA) et au Sud (PZB) des bassins d'infiltration. Les données relatives à l'éventuel suivi de ces piézomètres ne sont pas disponibles.

La question du rôle des deux bassins d'infiltration des eaux de rejet reste présente selon deux hypothèses :

- Rôle bénéfique en raison de la recharge par infiltration qui est notable au regard des flux de recharge et des prélèvements sur l'aquifère du Gol (de l'ordre de 10 à 20% selon les hypothèses retenues¹⁸). Concrètement, cette recharge pourrait former une barrière hydraulique¹⁹ pour contrer localement le phénomène d'intrusion saline (voir chapitre 4. Retraitement et interprétation des données de géophysique héliportée de 2014) ;
- Rôle défavorable pour la qualité des eaux souterraines en raison de la minéralisation élevée des eaux infiltrées. Les conductivités de l'ordre de 2 000 et 2 600 µS/cm sont largement supérieures à la valeur seuil de 600 µS/cm du SDAGE²⁰. Les conductivités des eaux qui atteignent l'aquifère ne sont pas connues.

Au-delà des interactions entre les bassins d'infiltration et l'aquifère, la ravine du Gol est située à moins de 100 m en aval des bassins et son hydrologie pourrait être influencée par l'infiltration des bassins.

Les données actuellement disponibles ne permettent pas de répondre à la question du rôle favorable ou défavorable de ces bassins sur les eaux souterraines ou les eaux de surface.

Afin de déterminer ce rôle favorable ou défavorable, il est nécessaire d'acquérir les données complémentaires suivantes sur un cycle hydrologique au minimum :

- Pour les piézomètres amont et aval :
 - Suivi en continu de la charge hydraulique, de la température et de la conductivité électrique ;
 - Analyse hydrochimique trimestrielle des ions majeurs et éventuellement de polluants traceurs de l'activité industrielle (HAP, ETM, phénols...) ;
- Pour les bassins et le rejet

¹⁸ Pour mémoire, les prélèvements annuels sont de l'ordre de 4 Mm³/an pour une infiltration de l'ordre de 8 Mm³/an. Par ailleurs, l'évaporation à la surface des bassins est peu significative au regard du flux total : 15 000 à 20 000 m³/an évaporés pour un débit rejeté de l'ordre de 550 000 à 750 000 m³/an, soit de l'ordre de 2 à 3 %.

¹⁹ Phénomènes de limitation de la propagation et de réduction de l'amplitude du rabattement induit par les ouvrages d'exploitation.

²⁰ SDAGE : schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.

- Suivi en continu du niveau des bassins ;
- Suivi du débit et de la conductivité des eaux rejetées ;
- Analyse hydrochimique trimestrielle des ions majeurs ;
- Suivi de l'alternance entre le rejet sur les bassins amont ou aval ;
- Pour la ravine du Gol
 - Suivi du niveau d'eau, du débit et de la conductivité électrique sur plusieurs stations de mesure ;
- Une campagne de géophysique électrique pourrait apporter des éléments complémentaires sur la géométrie du panache des eaux infiltrées.

Sur la base des données acquises, une modélisation déterministe localisée devrait permettre de déterminer le rôle favorable ou défavorable de l'infiltration des bassins.

Dans le contexte réglementaire actuel, il est prévu que l'infiltration des eaux dans les bassins soient remplacée par un rejet vers un émissaire en mer²¹ comme le stipule l'arrêté du 10 juillet 1990 relatif à l'interdiction des rejets de certaines substances dans les eaux souterraines en provenance d'installations classées. L'acquisition de connaissances décrite ci-dessus pourrait être nécessaire afin d'évaluer l'impact de la modification du rejet. En effet, la modification du rejet risque de déséquilibrer le bilan hydrologique des compartiments aquifères et de leurs échanges (le flux d'infiltration actuel pouvant contribuer à former une barrière hydraulique).



²¹ Article 4.3.9.IV de l'arrêté préfectoral du 01/03/2022 d'autorisation relatif à l'exploitation et à la conversion biomasse, par la société Albioma: « L'exploitant transmet avant le 30 avril 2022 un porter-à-connaissance précisant les modalités de mise en œuvre d'un émissaire en mer permettant le rejet des eaux industrielles en substitution du rejet dans les bassins d'infiltration »

*Figure 26 – Localisation et emprise des deux bassins d'infiltration d'Albioma
L'emprise de la carte est représentée sur la figure 17.*

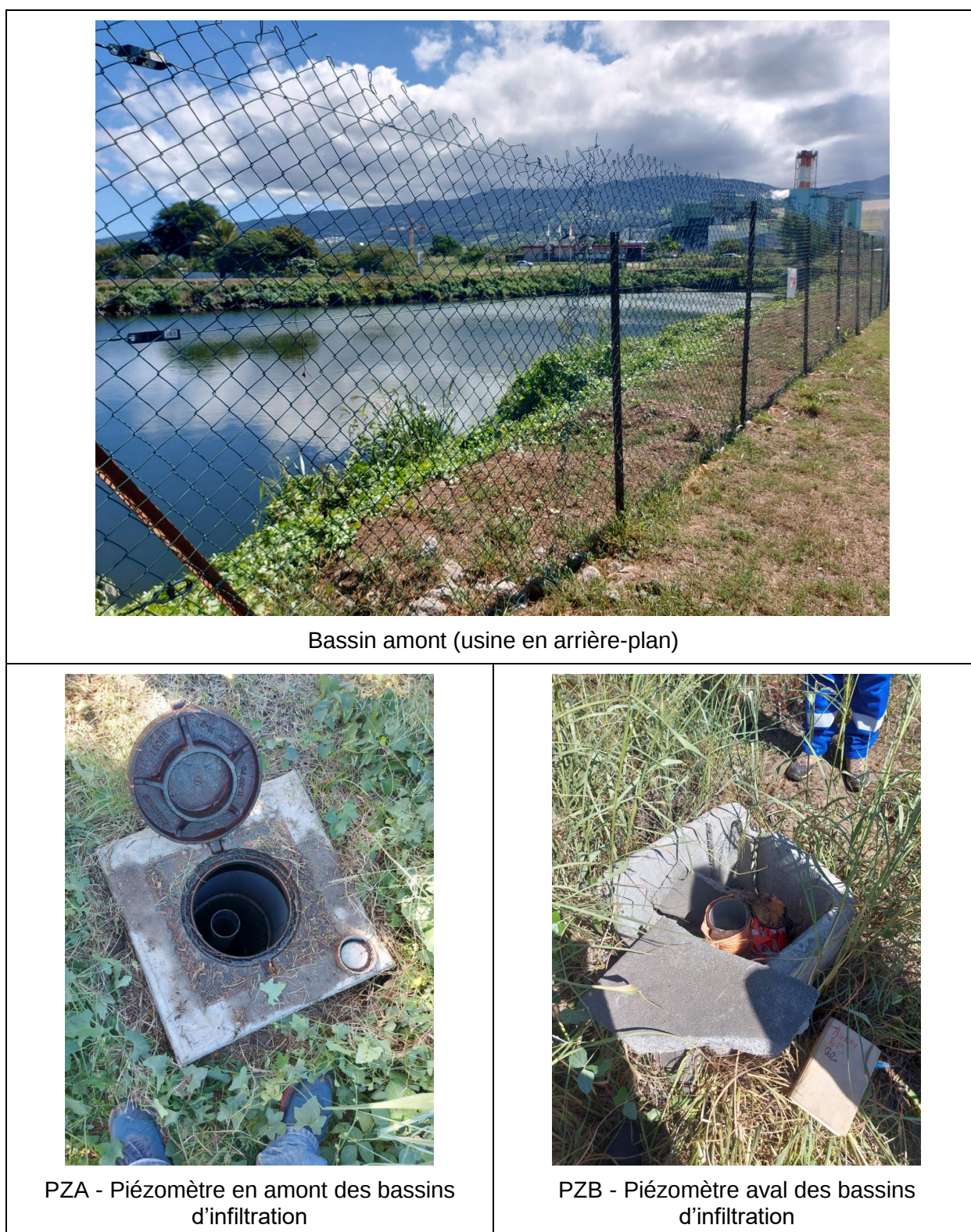


Figure 27 – Bassin d'infiltration et piézomètres

4. Retraitement et interprétation des données de géophysique héliportée de 2014

4.1. PRINCIPE DE MESURE ET TRAITEMENT SPECIFIQUE

Le principe de mesure et les informations détaillées relatives au levé de géophysique héliportée (AEM) de 2014 sont consignés dans le rapport BRGM/RP-63818-FR (Martelet et al., 2014). Pour ce levé à l'échelle de La Réunion, l'espacement entre chaque ligne de vol est de l'ordre de 400 m. Sur chaque ligne de vol, les sondages EM sont espacés de 50 m. La couverture AEM est uniquement disponible hors zones urbanisées. Ces données AEM de 2014 ont été inversées de manière homogène avec un bruit traité de façon globale et automatique.

Afin d'améliorer l'information géophysique, des traitements spécifiques²² sont réalisés en fonction des besoins locaux et sont notamment détaillés dans ces rapports : Aunay *et al.*, 2017, 2016; Frissant *et al.*, 2021; Peyrefitte *et al.*, 2020.

Dans le cadre du présent diagnostic, le retraitement a consisté en l'édition manuelle des données afin de retirer le bruit tout en conservant au maximum la donnée. Une inversion 1D, contrainte latéralement a également été réalisée sur ce jeu de données. Ainsi, la zone traitée couvre une superficie de 22 km² imagée par un espacement d'interligne de 200 m selon la direction Ouest/Est et de 400 m selon la direction Nord/Sud (Figure 28). Cette surface correspond à environ 130 km linéaires retraités, pour lesquels 25 profils ont été édités manuellement afin de construire un bloc de résistivité 3D. Sur ce bloc, l'intrusion saline a été pointée pour les valeurs inférieures à 10 Ω .m (Dumont, 2018; Dumont et al., 2018).

Il convient de noter que très peu de données sont disponibles à proximité des usines en raison du bruit magnétique généré par les activités anthropiques (Figure 30). En conséquence, il ne sera pas envisageable de bénéficier d'informations complémentaires sur l'origine de la salinisation sur les puits industriels (voir § 3.1.2 - p. 41) ou le rôle des bassins d'infiltration (voir § 3.1.3. – p. 47). De manière similaire, la résolution des données d'AEM ne permet pas de mettre en évidence une éventuelle compartimentation de l'aquifère du Gol (voir § 3.1.1 – p. 29).

²² Les traitements spécifiques concernent les données de navigation (GPS, attitude de la boucle, altitude).

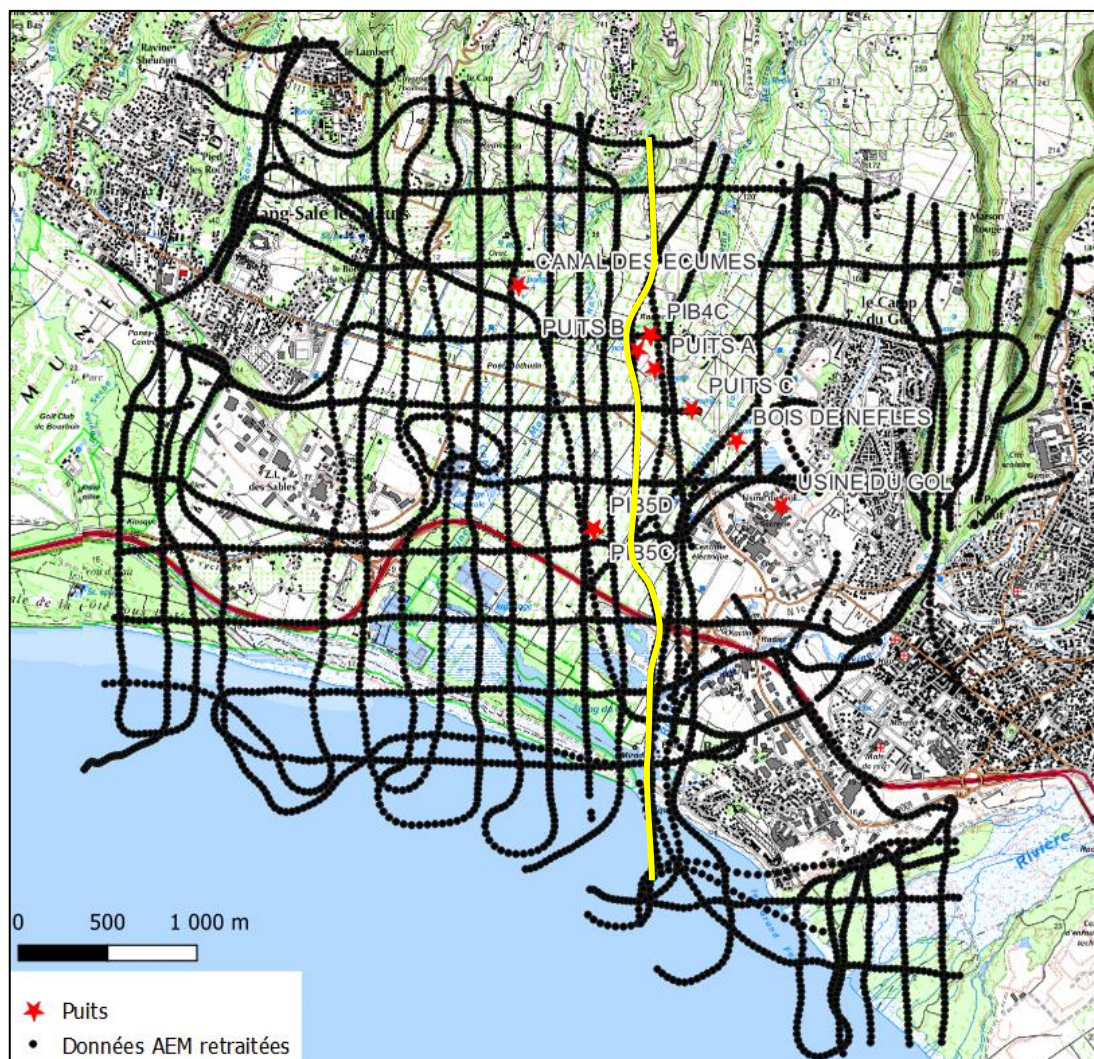


Figure 28 – Vue cartographique et en 3D des profils géophysiques
 Couleurs froides : faibles résistivités (Océan ou intrusion saline)
 Couleurs chaudes : résistivités élevées
 Le profil jaune de la carte de localisation correspond au profil présenté en figure 29.

4.2. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Différents profils verticaux 2D et différentes vues en 3D permettent d'illustrer les principaux résultats extraits de l'AEM. Les profils 2D visent à établir les différentes entités géophysiques (Figure 29), qui sont ensuite visualisées en 3D en y appliquant des seuils sur des plages de résistivités et de profondeur (Figure 30).

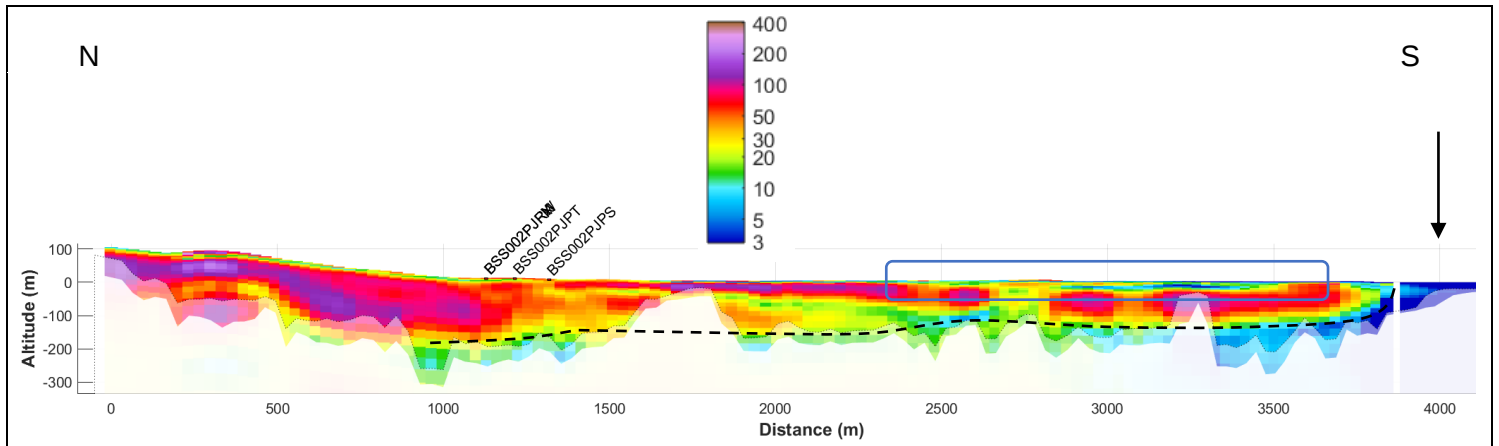


Figure 29 – Profil de résistivité N-S passant par le puits B de la Saphir et le PIB4 (BSS002....)

La flèche noire matérialise le trait de côte.

Un fin conducteur superficiel se développe sur la partie sud du profil (cadre bleu).

Un conducteur profond est présent vers 150 à 200 m de profondeur (sous les pointillés noirs). Ce conducteur profond correspond très probablement au phénomène d'intrusion saline en raison de sa géométrie plongeante vers l'intérieur des terres et de sa continuité avec l'Océan.

Le profil est localisé sur la figure 28.

4.2.1. Conducteur profond

Avec un seuil de 0-10 $\Omega.m$ sur la résistivité et un seuil de 50-300 m sur la profondeur, un conducteur est mis en évidence en profondeur (Figure 30). Ce conducteur est en continuité avec l'Océan au niveau du littoral et s'approfondit jusqu'à 200-250 m vers l'intérieur des terres. Ce conducteur profond correspond très probablement au phénomène d'intrusion saline. Cette géométrie est cohérente avec les mesures de conductivité électrique effectuées sur le piézomètre PIB5. Elle est également en cohérence avec les interprétations de l'approche hydrochimique (Petit et al., 2013).

La cartographie de ce conducteur profond identifié comme l'intrusion saline permet de mettre en évidence des eaux très minéralisées vers 180-200 m de profondeur au droit des puits A, B et C de la Saphir (Figure 31). En raison de l'anisotropie de l'aquifère (contraste vertical de perméabilité) qui est estimée à 7 ($T_{horiz.} = 7 \times T_{vert.}$), les interactions ou le mélange entre les eaux profondes minéralisées et les eaux plus superficielles exploitées est peu probable.

4.2.2. Conducteur superficiel

Avec un seuil de 0-10 $\Omega.m$ sur la résistivité et un seuil de 0-50 m sur la profondeur, un conducteur est mis en évidence en surface (Figure 30). Ce conducteur se développe au droit de l'étang du Gol et sur la partie Nord de la plaine du Gol, jusqu'au Puits des Ecumes.

Pour ce qui concerne le secteur de l'étang du Gol, la présence du conducteur superficiel peut être mis en relation avec la présence des eaux saumâtres de l'étang.

Néanmoins, l'origine de ce conducteur superficiel n'est pas déterminée dans la partie Nord de la plaine du Gol. Les hypothèses d'interprétation suivantes peuvent être proposées (ces hypothèses peuvent être combinées et coexister) :

- Origine naturelle : présence d'une géologie ou d'une hydrogéologie particulière en surface (terrain particulièrement argileux et/ou présence d'un paléo-étang) ;
- Origines anthropiques :
 - Présence de sols marqués par la fertilisation ou l'amendement ;
 - Phénomène de return Flow (augmentation de la minéralisation des terrains en raison de l'irrigation avec des eaux déjà minéralisées).

La réalisation de piézomètres à faible profondeur ($\approx 15-20$ m) et d'analyses hydrochimiques pourrait permettre de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses.

Bien que l'origine du conducteur superficiel ne soit pas précisément déterminée, sa présence est cohérente avec le phénomène de minéralisation de l'aquifère par drainance (voir et § Conclusion sur la relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline – p. 40 et (Petit et al., 2013)). En effet, les variations de conductivité électrique sur les différents ouvrages de prélèvement sont en relation avec des apports superficiels d'eau contaminés en NO_3 (drainance des formations plus exposées à l'agriculture). Ces formations superficielles contaminées par les intrants agricoles et/ou industriels pourraient être marquées par des faibles résistivités mises en évidence par l'AEM.

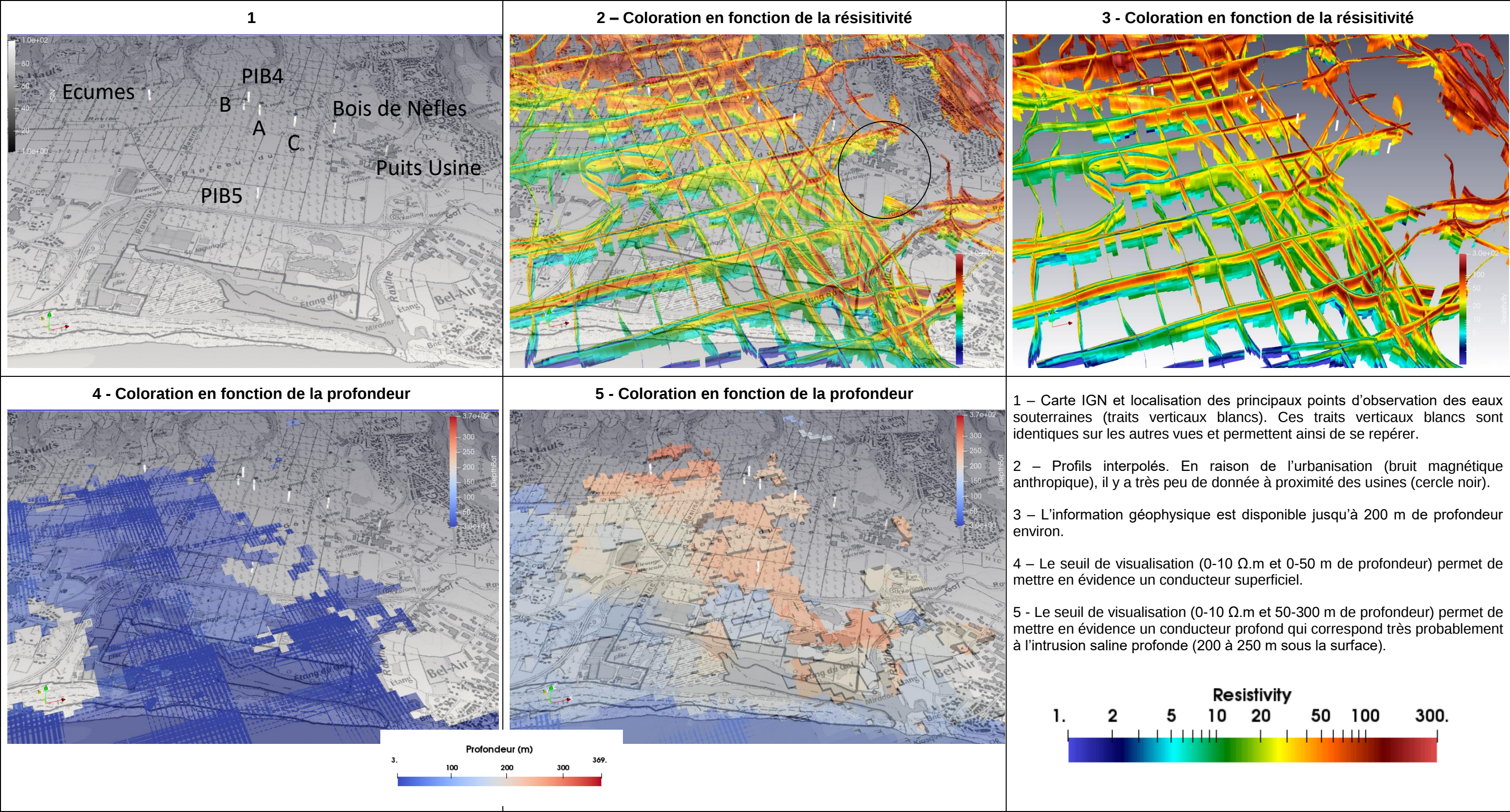


Figure 30 – Différentes vues en 3D extraites de Paraview - <https://www.paraview.org/>

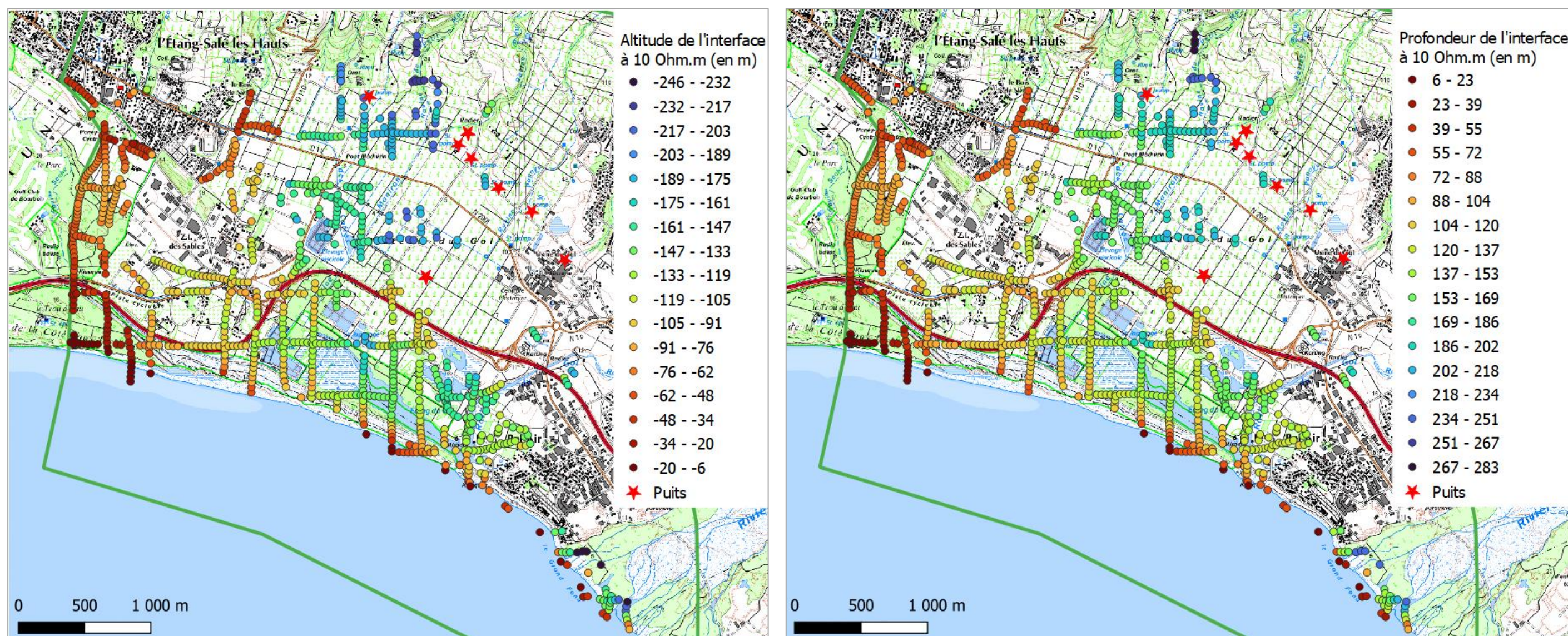


Figure 31 - Altitude et profondeur de l'interface marquant le phénomène d'intrusion saline
Pointé automatique du toit du corps inférieur à 10 Ohm.m en profondeur

5. Conclusion générale

5.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Le modèle HydroGol a été initialement développé et calé pour reproduire la piézométrie et la conductivité électrique mesurées dans les nappes supérieures et de base de l'hydrosystème du Gol au cours de l'année 2012 (et premier semestre de 2013). L'année 2012 était pluviométriquement déficitaire (tout comme 2011). Depuis, des années plus humides se sont succédées, notamment l'année 2018 qui a présenté un excédent de 65% par rapport à la moyenne 2011-2022 (station Météo France Pierrefonds). Parallèlement, les volumes totaux prélevés dans la nappe du Gol pour les usages agricoles et industriels, qui atteignaient 5,5 Mm³ en 2013, ont baissé avec une moyenne de 3,4 Mm³ entre 2014 et 2022. Ces deux éléments ont naturellement conduit à une augmentation progressive des niveaux piézométriques observés aux puits et dans la nappe de base pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres en 10 ans. Parallèlement, la conductivité de l'eau a diminué aux puits A, B et C et dans la nappe de base.

La mise en œuvre du modèle sur une période de 10 ans (2012-2022), incluant des forçages externes très variables (pluviométrie et prélèvements) permet de mieux évaluer sa capacité à rendre compte du comportement de l'hydrosystème. Ainsi, il apparaît que le modèle reproduit de manière satisfaisante également les variations annuelles ainsi que la tendance à la hausse depuis 2013 de la charge hydraulique dans la nappe supérieure et la nappe de base, ainsi qu'aux puits A, B, C, Bois de Nêfles et Gol-Usine. De plus, l'évolution de la conductivité aux puits A, B et C est bien reproduite, ainsi que la tendance à la baisse observée dans la nappe de base. En revanche, le modèle ne reproduit pas les faibles variations de conductivité aux puits Bois de Nêfles et Gol-usine.

Le modèle conceptuel sur lequel repose le simulateur suppose que la conductivité dans la nappe supérieure est liée à un apport d'eau minéralisée provenant de la nappe de base²³. Cet apport est d'autant plus important que la différence de charge entre les deux réservoirs est importante. C'est bien ce que l'on observe aux puits A, B et C et qui est correctement reproduit. Pour ces puits, on peut d'ailleurs noter que l'analyse de corrélogrammes croisés entre les chroniques journalières des prélèvements et celle des mesures de conductivité électrique montre que les augmentations de conductivité sont fortement corrélés (≈ 0.6) aux prélèvements dans les jours qui suivent ceux-ci (voir Présentation des analyses corrélatrices - p. 34). Les corrélogrammes croisés prélèvements – conductivité ne présentent pas ce comportement pour les puits Bois de Nêfle et Gol-usine. La conductivité autour de ces deux ouvrages semble être tamponnée, comme si une partie de l'eau qui alimente la nappe supérieure était localement moins minéralisée que l'eau de la nappe de base. L'origine possible de cette alimentation locale n'est pas identifiée (voir § relatif au rôle joué par le rejet des eaux de process de l'industriel Albioma dans les bassins d'infiltration page suivante).

Enfin, l'étude des flux calculés par le modèle apporte des éléments intéressants sur le fonctionnement de l'hydrosystème dans son ensemble. On constate que les deux nappes sont essentiellement alimentées par l'infiltration des précipitations sur la plaine et en pied de plaine. Les volumes prélevés sur l'ensemble des cinq puits représentaient plus de 50% de cette

²³ Au vu de l'analyse de la relation conductivité électrique / intrusion saline (voir § Relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline – p. 35), le modèle conceptuel pourrait être amélioré et inclure différentes sources de minéralisation afin de se rapprocher de la réalité physique hydrogéologique.

recharge entre 2012 et 2014, avec un maximum à plus de 90% en 2013. A partir de 2015, ce ratio s'établit entre 20% et 45%.

Les échanges avec l'océan sont orientés de l'aquifère vers l'océan, il n'y a donc pas de flux d'eau salée qui envahit l'aquifère exploité par les puits. La minéralisation ne semble pas provenir de l'intrusion saline sensu stricto mais de la présence d'eau plus minéralisée qui envahit la nappe.

En conclusion, il a été vérifié que le modèle appliqué sur la période 2012-2022 avec des prélèvements qui respectent exactement les recommandations prescrites en 2015 (rapport BRGM/RP-62893-FR), simule des valeurs de conductivités dans la nappe supérieure telles que la valeur moyenne annuelle ne dépasse pas 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ainsi, les règles de gestion proposées en 2015 restent cohérentes suite au présent diagnostic de l'outil HydroGol.

En ce qui concerne les compléments techniques sur le fonctionnement de l'aquifère du Gol qui visent à répondre aux interrogations du Comité de gestion du Gol, les éléments de réponse sont les suivants :

- Existe-t-il une compartimentation entre le secteur Est (puits industriels) et Ouest (puits Saphir) ?
 - o Les résultats des pompages d'essai en interférence confirment l'existence d'une connexion hydraulique entre les puits industriels et les puits Saphir (absence de compartimentation). Les résultats des analyses corrélatoires mettent en évidence des fonctionnements différents entre les puits Saphir et les puits industriels. Ces derniers étant marqués par un flux spécifique d'eau moins minéralisée lors de la mise en service des pompes. Ce fonctionnement localisé a pu être mis en évidence à partir des données de suivi acquises entre 2019 et 2022 sur les puits industriels (Puits Usine du Gol et Bois de Nèfles). Pour mémoire, cet apport d'eau douce n'est pas considéré dans l'outil HydroGol tel qu'il a été élaboré entre 2013 et 2015.

- Quelle est la relation entre la conductivité électrique et le phénomène d'intrusion saline ?
 - o Le phénomène d'intrusion saline est présent sur la Plaine du Gol et de manière prépondérante en profondeur (plus de 10% d'eau de mer sur le piézomètre PIB5D). L'aquifère exploité est donc sensible aux phénomènes d'intrusion saline. La variation de la conductivité électrique sur PIB5D est fonction de la recharge saisonnière et des prélèvements (Petit *et al.*, 2013).
Toutefois, les variations de conductivité électrique sur les différents ouvrages de prélèvement sont en relation avec des apports superficiels d'eau contaminés en NO_3 (drainance des formations de surface plus exposées à l'agriculture). La conductivité électrique mesurée sur les ouvrages d'exploitation n'est donc pas un marqueur univoque de la concentration en sel et de l'évolution du phénomène d'intrusion saline, et plus particulièrement pour les ouvrages industriels.
Afin de suivre l'évolution du phénomène d'intrusion saline, le suivi de la conductivité électrique sur les piézomètres existants PIB4 et PIB5 est nécessaire, et plus particulièrement en profondeur. Le suivi de la conductivité électrique sur les ouvrages d'exploitation reste néanmoins nécessaire et pertinent afin de s'assurer que les hypothèses de fonctionnement actuelles se vérifieront dans le futur pour d'autres conditions climatiques et d'autres conditions d'exploitation.

- Quel rôle joue le rejet des eaux de process de l'industriel Albioma dans les bassins d'infiltration sur l'aquifère du Gol ?
 - o Pour cette dernière question, les données actuellement disponibles ne permettent pas de répondre à la question du rôle favorable ou non de ces bassins sur les eaux souterraines ou les eaux de surface.

Le rôle favorable de cette infiltration est en relation avec la recharge qui est notable au regard des flux de recharge et des prélèvements sur l'aquifère du Gol (de l'ordre de 10 à 20% selon les hypothèses retenues).

Le rôle défavorable est en relation avec la qualité des eaux souterraines en raison de la minéralisation élevée des eaux des bassins. Les conductivités de l'ordre de 2 000 et 2 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sont largement supérieures à la valeur seuil de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ du SDAGE.

Différentes acquisitions de données sont proposées afin de répondre à la question du rôle des bassins d'infiltration. Dans le contexte réglementaire actuel, il est prévu que l'infiltration des eaux dans les bassins soient remplacée par un rejet vers un émissaire en mer comme le stipule l'arrêté du 10 juillet 1990 relatif à l'interdiction des rejets de certaines substances dans les eaux souterraines en provenance d'installations classées. Cette acquisition de connaissances pourrait être nécessaire afin d'évaluer l'impact de la modification du rejet. En effet, la modification du rejet risque de déséquilibrer le bilan hydrologique des compartiments aquifères et de leurs échanges (le flux d'infiltration actuel pouvant contribuer à former une barrière hydraulique).

Enfin, le retraitement des données de géophysique héliportée (AEM) a permis de bénéficier d'une visualisation 2D et 3D de différentes entités géophysiques :

- Un conducteur profond identifié comme l'intrusion saline qui s'approfondit du littoral vers l'intérieur des terres pour atteindre une profondeur de 180-200 m sous les puits A, B et C de la Saphir ;
- Un conducteur plus superficiel dont l'origine précise n'est pas déterminée, mais qui pourrait être associé à la présence de l'étang du Gol au Sud, et à la contamination de formations superficielles par les intrants agricoles et/ou industriels plus au Nord. Des investigations complémentaires (piézomètres, hydrochimie) sont nécessaires afin de déterminer plus précisément l'origine de ce conducteur.

Pour conclure, il apparaît que l'outil HydroGol a pu être utilisé sur la période 2012-2022 avec quelques modifications mineures des paramètres afin de reproduire la piézométrie, établir des bilans et répondre aux enjeux de la gestion concertée sur l'aquifère du Gol. Toutefois, des modifications plus structurelles (comme l'ajout de différentes sources de minéralisation, ou de l'asservissement du flux de retour d'irrigation aux volumes prélevés dans les puits A, B et C et dans les eaux de surface) seraient nécessaires afin que l'outil puisse reproduire fidèlement les évolutions de la minéralisation des eaux souterraines.

5.2. PERSPECTIVES

En ce qui concerne le partage de la ressource en eau de l'aquifère du Gol, il est prioritaire de poursuivre le suivi en continu de la ressource en eau souterraine sur les ouvrages de prélèvement et sur les piézomètres d'observation (débit, conductivité électrique, niveau d'eau). La disponibilité de ces données est nécessaire pour s'assurer si les hypothèses de fonctionnement actuelles se vérifieront dans le futur pour d'autres conditions climatiques et d'autres conditions d'exploitation.

Dans le cadre du présent diagnostic, certaines interrogations subsistent sur les différents processus de minéralisation des ouvrages de prélèvements. Des investigations complémentaires pourraient permettre de discriminer spatialement les contributions de l'Océan, de l'étang du Gol ou des intrants agricoles et/ou industriels. Ces investigations consisteraient en la réalisation d'analyses hydrochimiques et isotopiques (bore) selon une approche spatiale et saisonnière.

La réalisation de piézomètres complémentaires permettrait de réduire les incertitudes relatives (i) aux flux de recharge sur le secteur Est concerné par les prélèvements industriels et (ii) de suivre l'intrusion saline en profondeur. Pour mémoire, seul le piézomètre PIB5 permet de suivre l'évolution du phénomène d'intrusion saline en profondeur actuellement. Ce phénomène d'intrusion saline prend de l'ampleur lorsque le ratio prélèvement / recharge augmente. Un autre piézomètre profond situé plus au Sud-est permettrait de bénéficier de connaissances sur l'intrusion saline en profondeur afin d'optimiser les volumes qui pourraient être exploitées en préservant la ressource à long terme.

Par ailleurs, les critères permettant, dès le mois d'avril, d'indiquer si l'on se situe dans une année pluviométrique sèche, normale ou humide, pour fixer les niveaux de prélèvements acceptables, seraient toutefois à préciser ou actualiser, notamment en intégrant des approches statistiques sur des périodes plus longues que celles utilisées en 2015.

Dans le cas où l'infiltration dans les bassins serait stoppée, il sera utile d'évaluer l'impact de cette modification sur la ressource en eau souterraine. En effet, la modification du rejet pourrait déséquilibrer le bilan des aquifères car le flux d'infiltration actuel pourrait notamment former une barrière hydraulique. Afin de déterminer cet impact, il est nécessaire d'acquérir les données complémentaires suivantes sur un cycle hydrologique au minimum :

- Pour les piézomètres amont et aval :
 - o Suivi en continu de la charge hydraulique, de la température et de la conductivité électrique
 - o Analyse hydrochimique trimestrielle des ions majeurs
- Pour les bassins et le rejet
 - o Suivi en continu du niveau des bassins
 - o Suivi du débit et de la conductivité des eaux rejetées
 - o Analyse hydrochimique trimestrielle des ions majeurs et éventuellement de polluants traceurs de l'activité industrielle (HAP, ETM, phénols...) ;
 - o Suivi de l'alternance entre le rejet sur les bassins amont ou aval
- Pour la ravine du Gol
 - o Suivi du niveau d'eau, du débit et de la conductivité électrique sur plusieurs stations de mesure
- Une campagne de géophysique électrique pourrait apporter des éléments complémentaires sur la géométrie du panache des eaux infiltrées.

Sur la base des données acquises, une modélisation déterministe localisée devrait permettre de déterminer le rôle favorable ou défavorable de l'infiltration des bassins.

6. Références bibliographiques

- Aunay, B., Dewandel, B., Le Moigne, B., Reninger, P.-A., Dumont, M., 2017. Evaluation et actualisation des potentialités hydrogéologiques sur le territoire de la commune de Saint-Benoit. Rapport final. (No. BRGM/RP-66680-FR). BRGM, La Réunion.
- Aunay, B., Reninger, P.-A., Dumont, M., 2016. Interprétation hydrogéologique des données de géophysique aéroportée sur le secteur de Pierrefonds. Rapport final (No. BRGM/RP-65621-FR). BRGM, La Réunion.
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel Gregory, C., Ljung Greta, M., 1976. Time series analysis: forecasting and control. San Franc. Holden Bay.
- Brockwell, P.J., Davis, R.A., 1996. Introduction to time series and forecasting. Springer.
- Chopart, J.-L., Mézino, M., Nativel, R., 2003. Fluctuation saisonnière de l'évapotranspiration (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. (Note technique - Pôle Canne à Sucre Réunion - Service Gestion de l'Eau (GE)).
- Dumont, M., 2018. Caractérisation des structures hydrogéologiques de l'île de La Réunion à partir des données de géophysique héliportée REUN-EM (Thèse de doctorat). BRGM / Université de La Réunion.
- Dumont, M., Reninger, P.A., Pryet, A., Martelet, G., Aunay, B., Join, J.L., 2018. Agglomerative hierarchical clustering of airborne electromagnetic data for multi-scale geological studies. J. Appl. Geophys. 157, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.06.020>
- Frissant, N., Raingeard, A., Laurent, L., 2021. Prospection des ressources en eau souterraine par géophysique aéroportée sur les communes de Saint-Paul et Trois-Bassins (La Réunion) - Rapport final (No. BRGM/RP-70959-FR). BRGM, La Réunion.
- Lanini, S., Petit, V., 2015. Définition par modélisation des recommandations de pompage pour les puits du Gol. (Rapport final No. BRGM/RP-62893-FR). BRGM, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62893-FR.pdf>.
- Laurencelle, M., Givodan, E., Aunay, B., 2021. Développement de l'outil numérique « ASPIR - Analyse des Séries Piézométriques Influencées à La Réunion » - Approche exploratoire, méthodologie et notice de l'outil - Rapport final (No. BRGM/RP-71097-FR). BRGM, <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-71097-FR>.
- Martelet, G., Reninger, P.-A., Perrin, J., Deparis, J., 2014. Acquisition géophysique héliportée de l'île de La Réunion. Rapport final (No. BRGM/RP-63818-FR). BRGM, <http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-63818-FR>.
- Petit, V., Dewandel, B., Charlier, J.-B., Ollivier, P., Lucas, C., Olivia, Z., 2013. Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Rapport intermédiaire. (No. BRGM/RP-61834-FR). <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61834-FR.pdf>.
- Peyrefitte, A., Reninger, P.-A., Malard, A., Aunay, B., 2020. Interprétation préliminaire des données de géophysique héliportée (Electromagnétiques et Magnétiques) en vue de

l'implantation d'une galerie souterraine (GANOR) au niveau de la Plaine des Fougères (La Réunion) - Rapport final (No. BRGM/RP-69720-FR). BRGM, La Réunion.

Poul, X., 1969. Département de la Reunion. Etude hydrogéologique de la plaine du Gol. (No. BRGM/69-TAN-023). BRGM, La Réunion.

Shumway, R.H., Stoffer, D.S., 2000. Time series analysis and its applications. Springer.

Annexe 1 Paramètres du modèle HydroGol

En dehors des paramètres qui ont été modifiés lors de la mise en œuvre du modèle pour cette étude et qui sont présentés dans le paragraphe 2.3.2, les autres paramètres ont gardé les valeurs qui leur avaient été attribuées lors de la première calibration du modèle en 2013. Pour mémoire, ils sont rappelés ci-dessous.

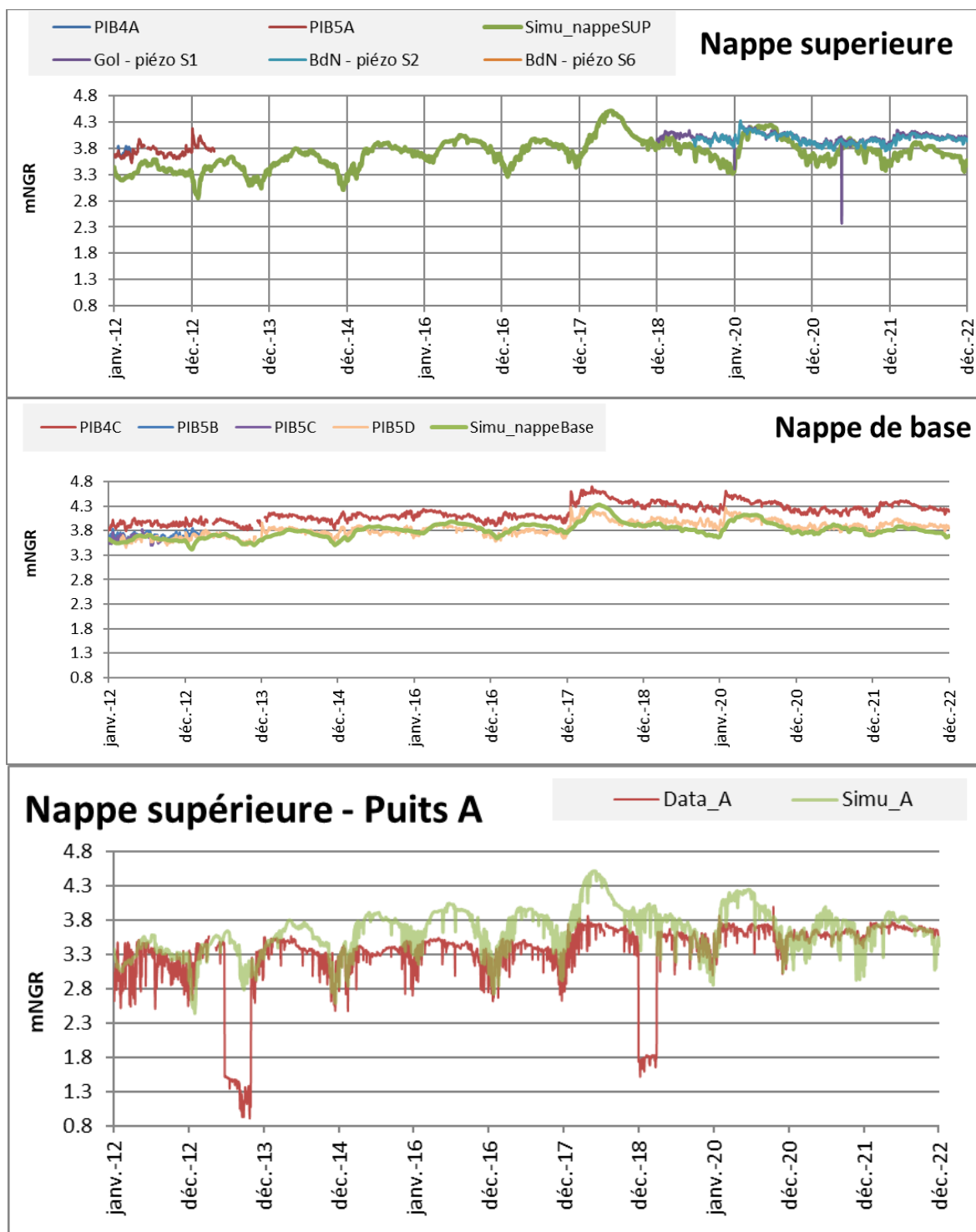
Paramètre	Unité	Valeur retenue
Surface Réservoir A	km ²	5
Surface Réservoir B	km ²	20
Surface Réservoir Planèze	km ²	50
Charge (constante) du réservoir amont	mNGR	4
Coefficient emmagasinement (A et B)		5%
Coefficient d'échange entre A et B (T_{AB})	m ² /j	70000
Coefficient d'échange des réservoirs annexes vers B (T_{annex})	m ² /j	70000
Coefficient d'échange entre A et océan (T_A)	m ² /j	8330 ²⁴
Coefficient d'échange entre B et océan (T_B)	m ² /j	33333
RU max plaine du Gol	mm	75
RU max plaine des Makes	mm	90
Coefficient de ruissellement plaine du Gol		44%
Taux d'infiltration total sur la Planèze ²⁵ (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 (α)	g/j/m ⁶	0.0002 ²⁶

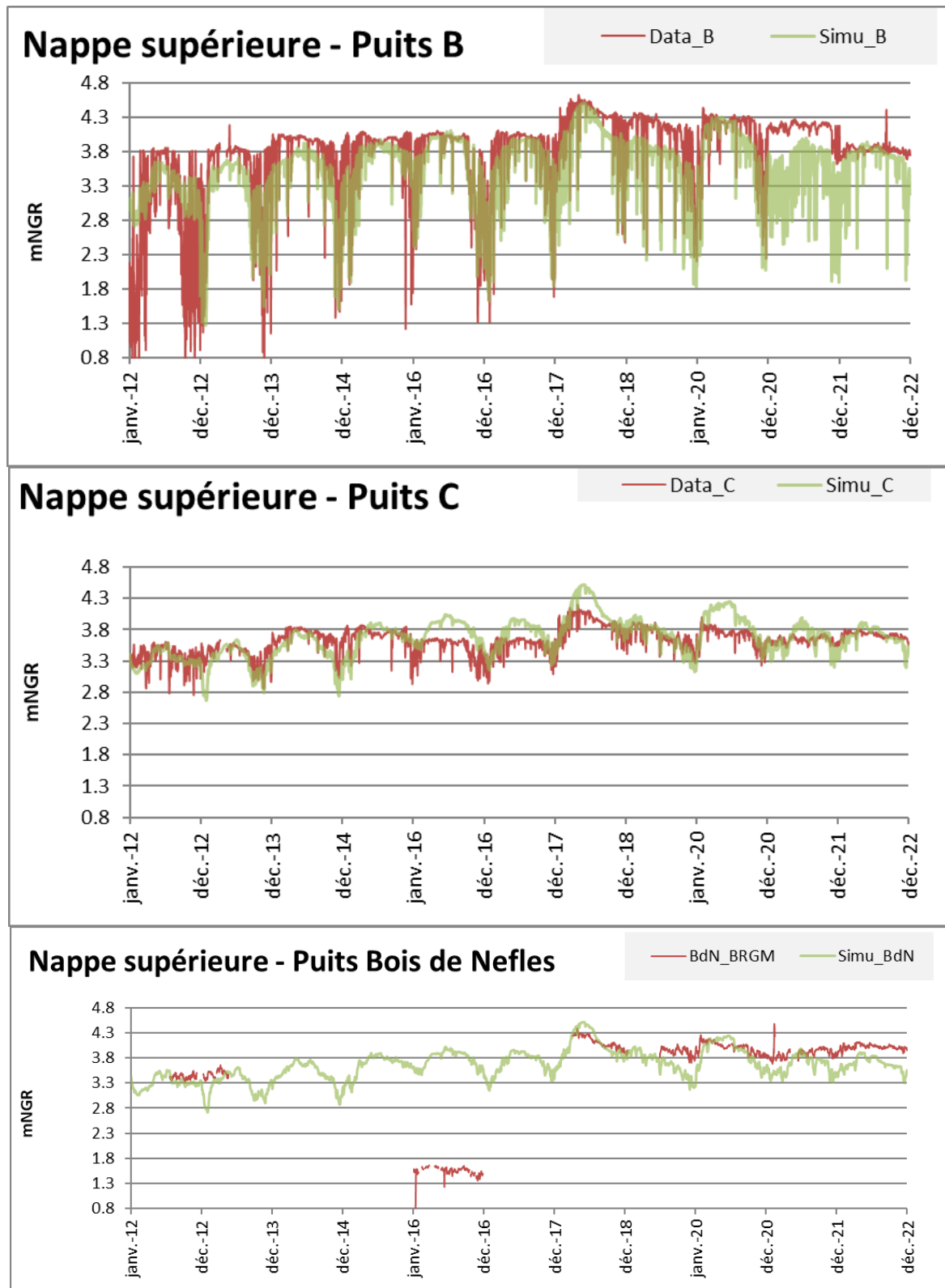
²⁴ Valait 6666 dans la calibration 2013

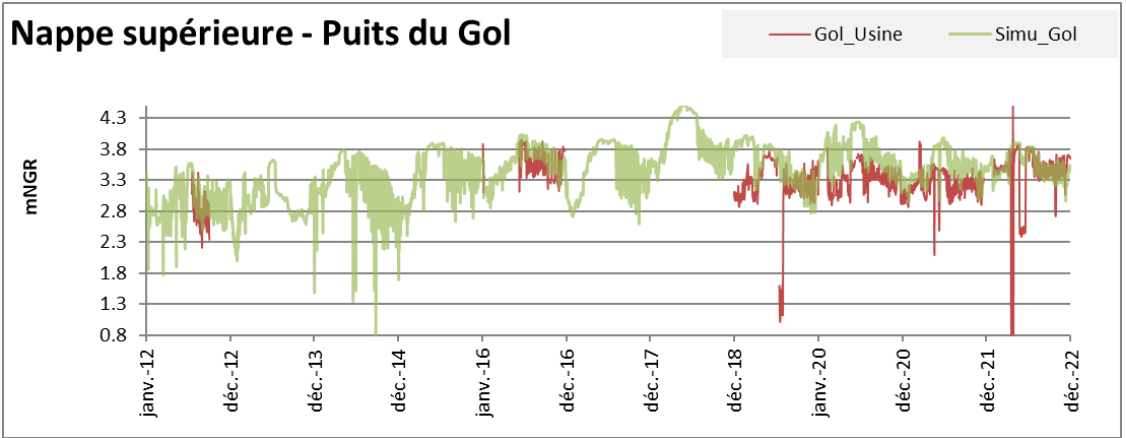
²⁵ Pour les pluies journalières inférieures à 60 mm

²⁶ Valait 0.0003 dans la calibration 2013

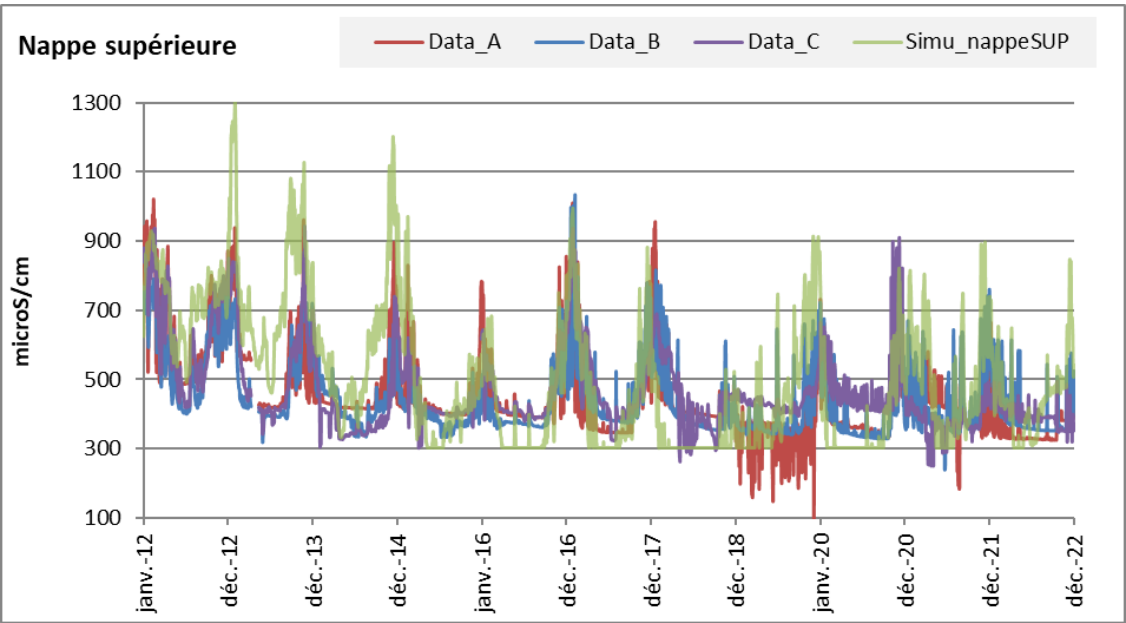
Annexe 2 Simulations à niveau marin constant

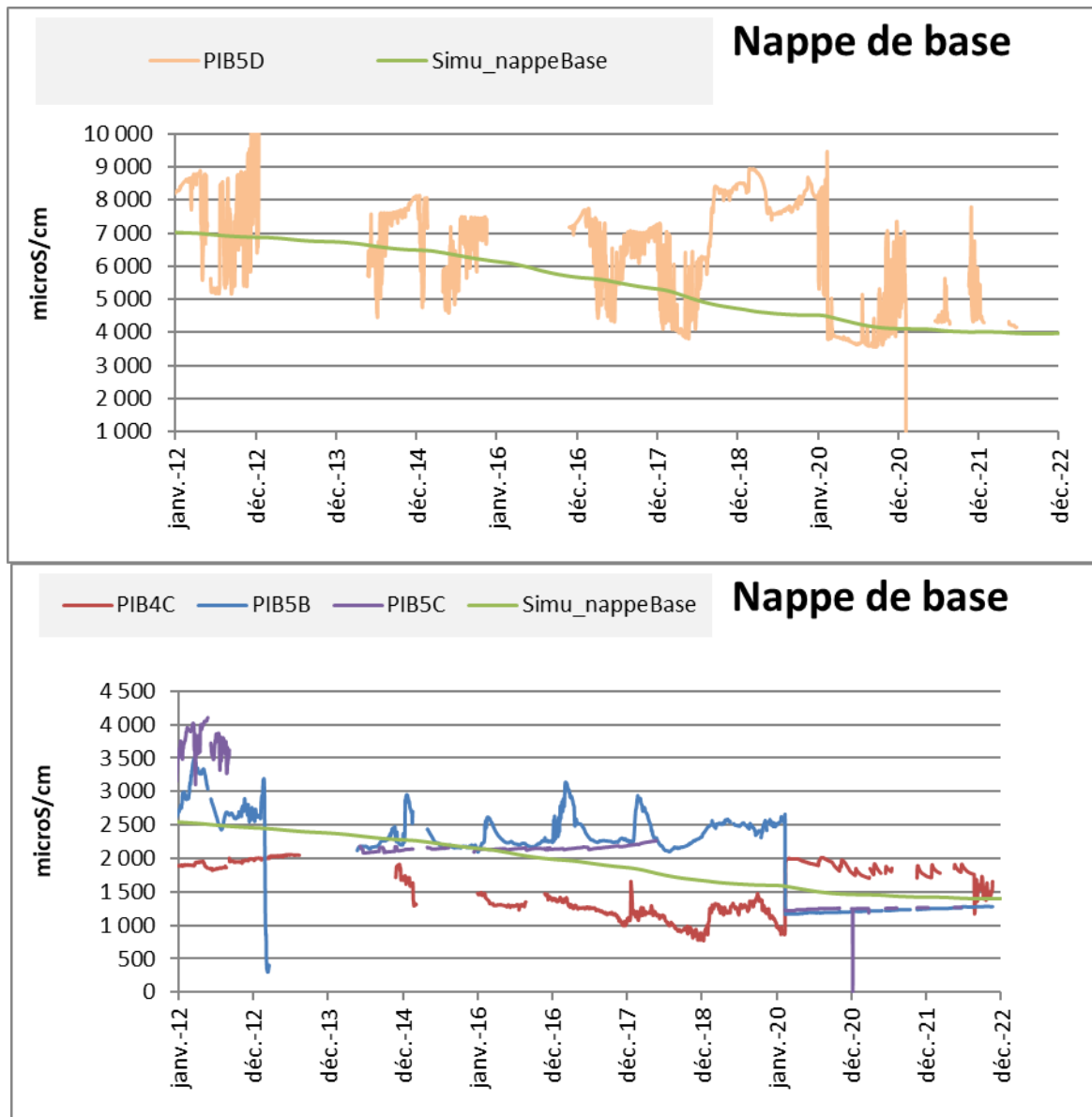






	Nappe supérieure S2	Nappe de base PIB5D	Puits A	Puits B	Puits C	Puits Bois de Nêfles	Puits du Gol
R2	0.65	0.78	0.41	0.73	0.75	0.13	0.27







**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale La Réunion

5, rue Sainte Anne - CS 51016

97404 Saint-Denis Cedex

02 62 21 22 14

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm