



Document à accès immédiat

**Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau**

Rapport final

BRGM/RP-72605-FR

Version 1 du 25 juin 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Jean-Charles Manceau, Etienne Buscarlet, Marine Burdairon, Bertrand Aunay

Vérificateur :

Nom :

Luc ARNAUD

Nom :

Ingrid GIRARDEAU

Fonction :

Hydrogéologue

Fonction :

Directrice régionale

Date :

1.89 3740 46 -625 25/07/2023

Date :

14/08/2024

Approbateur :

Signature :

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 règlementation 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/yMqFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots clés : hydrogéologie, modélisation, bilan, calage, incertitude, analyse de sensibilité, scenarii de gestion de la ressource, changement climatique, aquifère volcanique, La Réunion, Saint-Denis, Sainte-Marie, Sainte-Suzanne, Saint-André

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

Jean-Charles Manceau, Etienne Buscarlet, Marine Burdairon, Bertrand Aunay (2025) – Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101. Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau. Rapport final V1. BRGM/RP-72605-FR, 134 p.

Synthèse

L'état des lieux 2019, porté par l'Office de l'Eau et la DEAL, fait état d'un risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) global à l'horizon 2027 pour la masse d'eau souterraine (MESO) FRLG101 – Formations volcaniques du littoral Nord. Ce RNAOE étant établi, il devient nécessaire d'infléchir ce risque en agissant sur la situation d'exploitation des eaux souterraines dans le but d'atteindre le bon état quantitatif à l'horizon 2027.

Pour cela, il convient d'objectiver l'état réel de la MESO et de déterminer les volumes d'eau souterraine qui peuvent être prélevés sur le milieu tout en assurant l'équilibre quantitatif de la masse d'eau. Cette évaluation des volumes prélevables repose principalement sur la réalisation d'une modélisation numérique de l'hydrodynamique en régime transitoire qui permet de déterminer les flux souterrains pour différents états du stock et différentes conditions temporelles (hautes eaux, étiage, années humide ou sèche...). Dans le cadre d'une convention de recherche et développement et de ses activités de service public, le BRGM contribue à l'évaluation des volumes prélevables des formations volcaniques du littoral nord. Ce projet comporte trois phases, incluant (i) l'établissement d'un diagnostic, des bilans et d'une conceptualisation des ressources en eau souterraine des formations volcaniques du littoral nord, (ii) l'élaboration d'un modèle hydrogéologique de ces ressources et (iii) la détermination et la mise en œuvre de scénarios de gestion de la ressource en eau.

Ce rapport détaille les réalisations de la phase 2 et de la phase 3 de ce projet. Il fait suite aux travaux réalisés en phase 1 (Laurent et Aunay, 2022) qui ont permis de caractériser le complexe aquifère régional du secteur d'étude.

La deuxième phase de l'étude a permis la construction d'un modèle hydrogéologique à partir de la connaissance et des données acquises en phase 1. Le modèle développé permet de reproduire le modèle conceptuel identifié pour expliquer le fonctionnement de l'hydrosystème local et plus précisément de la nappe de base s'établissant dans les horizons volcaniques aquifères. Il est construit avec le code MARTHE, développé par le BRGM.

Il s'étend de l'océan (limite nord) jusqu'aux remparts (limite sud) et depuis la rivière du Mât (limite est) jusqu'aux limites ouest du bassin versant de la rivière Saint-Denis, couvrant ainsi tout l'impluvium alimentant la masse d'eau souterraine d'intérêt (MESO FRGRLG101). Toute cette emprise est discrétisée horizontalement en mailles de 100m x 100m. La géométrie de la formation aquifère considérée, correspondant aux formations volcaniques les plus récentes dites PN3-PN4, a été estimée à partir des données de géophysique héliportée disponibles sur une partie du secteur d'étude (Peyrefitte *et al.*, 2022). Du fait de la perméabilité en grand de ce système aquifère, il est considéré comme un milieu poreux équivalent dans la modélisation hydrogéologique et représenté numériquement par un modèle monocouche, essentiellement libre.

Le système aquifère régional (nappe de base) est alimenté par les précipitations, et par des infiltrations localisées au droit des rivières et des ravines du secteur. Le rôle du sol et de la zone non saturée (exceptionnellement importante dans certains secteurs de l'emprise du modèle) est pris en compte *via* un bilan dit hydroclimatique permettant de quantifier des flux de ruissellement vers les cours d'eau et de recharge vers la nappe à partir des chroniques de pluie et d'évapotranspiration disponibles sur le secteur. Le retard attendu dans l'arrivée de la recharge au toit de la nappe du fait de l'épaisseur de la zone non saturée est également pris en considération. Les nappes perchées ne peuvent être modélisées explicitement, mais leur

influence dans le retard de l'infiltration des eaux de pluie vers la nappe régionale et dans l'alimentation des débits des cours d'eau est considérée dans les bilans hydroclimatiques. Enfin les principaux cours d'eau du secteur pérennes ou intermittents sont modélisés explicitement, de sorte à retranscrire au mieux, en zone côtière, les infiltrations de leurs débits vers la nappe de base. L'exutoire de cette nappe de base, étant l'océan, les variations marégraphiques sont intégrées comme limite Nord du modèle. Enfin, les prélèvements et rejets d'eau du secteur, associés à la nappe ou aux cours d'eau, sont retracés dans le modèle.

Au final, le modèle hydrodynamique construit permet de simuler en régime transitoire (pas de temps mensuel) les niveaux piézométriques en tout point du modèle ainsi que les débits des cours d'eau en tout point de leur linéaire. Le modèle a été calibré entre 1995 et 2020 à partir de la connaissance débitmétrique et piézométrique disponible sur le secteur. Afin de traduire les hétérogénéités attendues, le modèle est paramétré en utilisant des zones de propriétés homogènes pour la perméabilité et l'emmagasinement libre de l'aquifère simulé (79 zones). Les perméabilités de rivière sont quant à elle ajustées par affluent sur la partie aval (29 affluents), et les propriétés du sol et de la ZNS sont ajustées par zone de sol (24 zones). L'estimation de ces 291 paramètres du modèle est réalisée de manière algorithmique, par la méthode de Gauss-Levenberg-Marquardt, implémentée via l'outil PEST++. Le modèle calibré fournit des résultats satisfaisants à plusieurs titres :

- les débits des cours d'eau suivis sont très correctement reproduits malgré les comportements complexes et variés : en particulier, les caractères pérennes vs. intermittents sont bien retracés ;
- les résultats sont également satisfaisants concernant la piézométrie malgré la diversité des dynamiques observées (inertielles et/ou réactives). A noter également le bon comportement du modèle vis-à-vis des prélèvements qui peuvent être significatifs : le modèle permet en effet simultanément de respecter la totalité des volumes prélevés tout en reproduisant les charges observées ;
- les transmissivités obtenues à l'issue de cette étape de calibration sont dans les ordres de grandeur attendus au regard des mesures ayant pu être faites par le passé.

Certains secteurs, connus pour leur piézométrie atypique (établissement de plusieurs nappes, gradient hydraulique très hétérogène, etc.), restent délicats à modéliser à partir des connaissances et des données à disposition. Ces secteurs ont été identifiés et des hypothèses explicatives ont été émises. En outre, même si la dynamique n'y est pas toujours exactement reproduite, le comportement global du modèle hydrodynamique reste satisfaisant.

Des bilans hydrologiques permettant d'éclairer le fonctionnement de l'hydrosystème ont été établis à l'échelle du modèle et à l'échelle de la MESO FRGRLG101 sur le secteur d'intérêt de Saint-Denis / Sainte Marie. Ces bilans permettent également de calculer la proportion des prélèvements en eau souterraine au regard des différents apports du secteur (apports amont, infiltration par les rivières et hors rivières) : sur le secteur d'intérêt, ce ratio est relativement stable entre 2000 et 2020 et avoisine les 5 % en moyenne.

Afin de renforcer la robustesse du modèle et la confiance dans les sorties calculées, une analyse des incertitudes associées à la paramétrisation du modèle a également été menée selon une approche de type Monte-Carlo basée sur la méthode Iterative Ensemble Smoother (IES). Cette approche permet de produire un ensemble de plus de 200 modèles additionnels également calibrés sur les observations mais avec des jeux de paramètres différents du modèle de référence. Les résultats de cet ensemble de modèles permettent :

- 1- l'évaluation des zones du domaine d'étude où les paramètres du modèle ne sont pas bien contraints et où ils sont donc incertains. Ces zones correspondent aux secteurs où peu d'observations sont disponibles pour contraindre le modèle ;
- 2- l'impact de ces incertitudes sur différentes variables de sortie du modèle comme la piézométrie ou le ratio prélèvements en eau souterraine au regard des différents apports du secteur. En particulier, l'incertitude sur le ratio prélèvements/recharge simulé est inférieur à $\pm 1\%$. Cet ordre de grandeur est acceptable pour les objectifs du modèle.

Cette robustesse a permis l'utilisation du modèle pour tester des scénarios prospectifs de gestion de la ressource en eau afin de caractériser l'état réel de la masse d'eau et apporter des éléments utiles aux acteurs de la ressource en eau (phase 3 du projet). Ainsi 6 scénarios prospectifs ont été co-construits avec le Comité de Pilotage :

- Scénarios 1 et 2 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau sans modification de la demande, avec deux projections climatiques différentes (SSP2-4.5 et SSP5-8.5, projections issues du projet BRIO, produites à partir du modèle RCM Aladin-V6 couplé au GCM CNRM-ESM2-1) ;
- Scénarios 3 et 4 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique (deux scénarios d'évolution de la demande) ;
- Scénarios 5 et 6 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique et reports des prélèvements réalisés en eau superficielle vers les eaux souterraines (deux scénarios de reports testés).

Les résultats de ces 6 simulations ont été analysés sous différents angles :

- Evolution des niveaux piézométriques globalement sur la zone modélisée ;
- Evolution du stock en eau souterraine, de la recharge et de l'évolution du ratio prélèvements sur recharge globale au droit du secteur Saint-Denis / Sainte-Marie de la masse d'eau FRLG101 ;
- Sécurisation AEP sur 2 aspects différents : atteinte des niveaux critiques d'étiage du passé et l'évolution de la position eau douce / eau salée (problématique intrusion saline) au droit des forages existants ;
- Evolution des débits des cours d'eau pérennes du secteur, en moyenne et à l'étiage.

De l'analyse des résultats se dégagent les messages clés suivants :

- La continuation dans le futur des prélèvements en eau souterraine actuels est admissible au regard d'un futur tel que celui décrit par les scénarios 1 et 2 (SSP2-4.5/SSP5-8.5) ;
- Dans le cadre d'un futur plus sec (scénario 2, SSP5-8.5), le modèle montre une remontée de l'interface eau douce/eau salé et l'évolution de la problématique intrusion saline est à surveiller, en raison d'un risque de la dégradation de la qualité des eaux pour les différents usages agricoles et AEP. La mise en œuvre d'un suivi régulier de l'intrusion saline en aval des ouvrages permettrait de suivre l'évolution de cette problématique au cours du temps (suivi géophysique, piézomètres à créer / suivre à proximité du trait de côte, suivi de la conductivité électrique en continu, réalisation de logs ponctuels de conductivité...) ;
- Les simulations des scénarios 1 et 2 montrent une évolution modérée au cours du siècle (respectivement à la hausse et à la baisse) des débits des rivières pérennes du secteur d'intérêt à l'étiage ;
- Les impacts cumulés du changement climatique et de l'augmentation de prélèvements (scénarios 3 à 6, prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique) sont

- visibles sur l'évolution de la ressource en eau souterraine au cours du siècle (en particulier sur la période 2041-2070) ;
- Sous ces 4 scénarios, les niveaux piézométriques moyens simulés en étiage à l'horizon 2041-2070 sont de l'ordre des niveaux atteints lors des étiages sévères historiques. Ces résultats doivent être mis en regard des problématiques induites et observées sur les ouvrages lors des étiages historiques pour déterminer si ces tendances sont admissibles ou non ;
 - Le risque d'intrusion saline est augmenté avec le temps, sous l'effet cumulé du changement climatique et de l'augmentation des prélèvements.

Lors de la phase 3 de l'étude, certaines limites ont pu être notées :

- Les scénarios 1 et 2 considèrent une stabilité des prélèvements au cours du siècle alors qu'est intégrée aux scénarios 3 à 6 une augmentation très significative des prélèvements et sur des ouvrages aux localisations certes cohérentes mais fictives : le modèle pourrait dans le futur être utilisé pour tester des scénarios intermédiaires et plus réalistes dans le cadre d'une réflexion avancée sur de futurs projets (avec localisation alternative de nouveaux forages et volumes associés) ;
- Même si des indicateurs de criticité ont été proposés pour caractériser l'évolution de la vulnérabilité des eaux souterraines et en particulier des forages AEP (par ex. niveaux piézométriques à l'étiage, position de l'interface eau douce – eau salée), permettant ainsi de mettre en évidence l'évolution de telle ou telle problématique, le manque de seuils existants pour caractériser l'atteinte d'une situation critique est limitante pour l'analyse.

Enfin, il convient de rappeler qu'un modèle numérique hydrogéologique est un outil évolutif au regard des nouveaux prélèvements et des nouvelles observations piézométriques. Ainsi, le modèle développé dans le cadre de l'évaluation des volumes prélevables constitue un outil de la gestion de la ressource en eau souterraine disponible et performant. D'une part, il peut être utilisé pour répondre à des questions spécifiques et d'autre part, il convient de programmer sa réactualisation périodiquement afin d'intégrer les nouvelles données. Pour le présent modèle numérique, une actualisation tous les 5 ans semble pertinente afin de vérifier la robustesse du modèle et que les suivis mis en œuvre sont adaptés.

Sommaire

1. Introduction	12
2. Résultats de l'actualisation des tests de tendance	15
2.1. Description des données et de la méthodologie.....	15
2.1.1. <i>Piézomètres analysés</i>	15
2.1.2. <i>Longueur des chroniques piézométriques</i>	17
2.1.3. <i>Méthodologie</i>	17
2.2. Résultats des tests statistiques.....	19
2.3. Potentielle influence des forages exploités	21
3. Modèle conceptuel du complexe aquifère du littoral Nord	22
4. Construction du modèle hydrodynamique	25
4.1. Objectif du modèle hydrodynamique	25
4.2. Solutions numériques proposées au modèle conceptuel	25
4.2.1. <i>Représentation de la nappe de base</i>	25
4.2.2. <i>Représentation de la zone non saturée</i>	26
4.2.3. <i>Représentation des nappes perchées</i>	26
4.2.4. <i>Représentation explicite des cours d'eau</i>	27
4.2.5. <i>Identification des niveaux aquifères multiples en contexte alluvial</i>	27
4.3. Choix de modélisation : extension, discréétisation spatiale et temporelle.....	27
4.4. Géométrie.....	28
4.5. Climatologie et recharge	30
4.5.1. <i>Données de pluie et d'ETP</i>	30
4.5.2. <i>Bilan hydroclimatique</i>	31
4.6. Marégraphie et échanges avec l'océan.....	33
4.7. Echanges nappe-rivière	33
4.8. Prélèvements.....	34
5. Calibration du modèle	36
5.1. Stratégie de calibration	36
5.2. Résultats de la calibration	39
5.2.1. <i>Piézométrie, débit des rivières et ravines</i>	39
5.2.2. <i>Cartes piézométriques</i>	55
5.2.3. <i>Transmissivités estimées</i>	55
5.3. Première utilisation du modèle : Bilan hydraulique et Test Balance simulé	60
5.4. Analyses de sensibilité – incertitudes paramétriques	63
5.4.1. <i>Méthode</i>	63
5.4.2. <i>Résultats</i>	64
5.4.3. <i>Conclusion</i>	68
6. Détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau	69
6.1. Construction concertée des scénarios prospectifs à simuler	69
6.2. Informations sur Les projections climatiques sur l'île de la Réunion - projet BRIO ...	70
6.3. Scénario 1 : prise en compte des chroniques climatiques associées au scénario SSP2–4.5	72
6.3.1. <i>Modalités de mise en œuvre de la simulation</i>	72
6.3.2. <i>Résultats</i>	74
6.4. Scénario 2 : prise en compte des chroniques climatiques associées au scénario SSP5–8.5	81
6.4.1. <i>Modalités de mise en œuvre de la simulation</i>	81
6.4.2. <i>Résultats</i>	81

6.5.	Scénarios 3 à 6 : évolutions des besoins en eaux souterraines	87
6.5.1.	<i>Modalités de mise en œuvre des simulations</i>	87
6.5.2.	<i>Résultats</i>	88
6.6.	Synthèse - Messages clés	95
7.	Conclusion et perspectives.....	97
8.	Références bibliographiques	101
a)	<i>Piézomètres analysés</i>	107
b)	<i>Description des chroniques piézométriques</i>	109
c)	<i>Méthodologie</i>	111
a)	<i>Tendances sur les médianes annuelles</i>	113
b)	<i>Tendances sur les minimums des médianes mensuelles</i>	119
c)	<i>Tendances sur les maximums des médianes mensuelles</i>	124
d)	<i>Tendances saisonnières sur les médianes mensuelles</i>	124
a)	<i>Bilan des analyses statistiques</i>	129
b)	<i>Influence des forages exploités</i>	132

Liste des figures

Figure 1 :	Evaluation de l'état quantitatif (Office de l'eau Réunion, 2019)	12
Figure 2 :	Localisation des piézomètres traités pour les tests de tendance	15
Figure 3 :	Caractéristiques et comportement piézométrique des forages analysés.	16
Figure 4 :	Longueur et complétude des chroniques piézométriques.....	17
Figure 5 :	Synthèse des tendances identifiées et légende.....	20
Figure 6 :	Mise en service des exploitations proches des forages avec tendance à la baisse.21	21
Figure 7 :	Modèle conceptuel du système aquifère du littoral nord (Laurent et Aunay, 2022, modifié d'après Join et al, 2005).....	22
Figure 8 :	Modèle conceptuel d'une île volcanique jeune, proposé par Pryet (2011)	26
Figure 9 :	Extension du domaine modélisé.....	27
Figure 10 :	Détail du maillage sur la partie nord-ouest du modèle	28
Figure 11 :	Caractéristiques géométriques de l'aquifère simulé.....	29
Figure 12 :	Synthèse des données des stations Météo-France sur la période 2010-2015	30
Figure 13 :	Spatialisation des données d'ETP sur une grille régulière 1 km x 1 km (en noir) ..	31
Figure 14 :	Schéma du bilan hydroclimatique intégré	32
Figure 15 :	Zones de sol aux propriétés homogènes.....	32
Figure 16 :	Variation du potentiel imposé sur la façade littorale	33
Figure 17 :	Recensement des prélèvements de surface et souterrains intégrés dans le modèle	34
Figure 18 :	Prélèvements imposés totaux, en nappe et en rivière	35
Figure 19 :	Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage disponibles pour le calage du modèle	37

Figure 20 : Distribution des zones de paramètres utilisées pour l'estimation des paramètres du modèle.....	38
Figure 21 : Evolution de la fonction objectif au cours de l'optimisation	39
Figure 22 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Saint-Denis.....	43
Figure 23 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : débits aux stations hydrométriques	49
Figure 24 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézométrie dans le sous-secteur Ouest.....	49
Figure 25 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézomètres présentant un saut piézométrique inexplicable	50
Figure 26 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézométrie dans le sous-secteur Est	50
Figure 27 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Suzanne / Saint-André : débits aux stations hydrométriques	53
Figure 28 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Suzanne / Saint-André	53
Figure 29 : Comparaison entre les résultats du modèle et les cartes piézométriques levées [A]	57
Figure 30 : Transmissivités estimées et introduites dans le modèle calibré.....	59
Figure 31 : Bilans hydrauliques issus du modèle calibré : à gauche, à l'échelle de l'emprise du modèle, à droite à l'échelle de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie	61
Figure 32 : Volumes prélevés et volumes « rechargés » calculé par le modèle au pas de temps annuel.....	62
Figure 33 : Fonction objectif obtenue par itérations (gauche) et nombre de simulations (droite).	64
Figure 34 : Niveaux piézométriques simulés pour chacun des 241 ensembles de paramètres (gauche) et leur densité de distribution pour un pas de temps donné (droite).	65
Figure 35 : Carte des perméabilités simulées issues du calage (en haut à gauche) et écart-type des perméabilités (en bas à gauche)	66
Figure 36 : Isopièzes simulées pour le mois de décembre 2020 (en haut) et écart-type des charges simulées correspondantes (en bas).....	67
Figure 37 : Ratio prélèvements/recharge annuel moyen simulé pour la masse d'eau FRLG101 secteur Saint Denis/Sainte Marie.	68
Figure 38 - Description synthétique des six scénarios testés par le modèle hydrogéologique	70
Figure 39 – Projections des émissions de gaz à effet de serre suivant les 5 scénarios SSP du GIEC	71
Figure 40 – Projection utilisée pour le niveau marin intégré au modèle pour le scénario 1	73
Figure 41 - Evolution des variables climatiques annuelles (Haut et milieu), et de la pluie efficace cumulée sur la saison sèche et sur la saison humide (Bas).	75
Figure 42 – Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.	76
Figure 43 - Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : évolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie.	77

Figure 44 - Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : Evolution de la problématique intrusion saline	79
Figure 45 – Evolutions attendues des débits des rivières pérennes, simulation associée au scénario 1. [Haut] Débits moyens annuels [Bas] Débits à l'étiage	80
Figure 46 - Projection utilisée pour le niveau marin intégré au modèle pour le scénario 2	81
Figure 47 - Evolution des variables climatiques annuelles (Haut et milieu) et de la pluie efficace cumulée sur la saison sèche et sur la saison humide (Bas).	82
Figure 48 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.....	83
Figure 49 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : Evolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie.....	84
Figure 50 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : évolution de la problématique intrusion saline	85
Figure 51 - Evolutions attendues des débits des rivières pérennes, simulation associée au scénario 2. [Haut] Débits moyens annuels [Bas] Débits à l'étiage	86
Figure 52 – Localisation des nouveaux forages fictifs intégrés au modèle pour les simulations des scénarios 3 à 6 (en transparence sont indiqués les zones considérées comme favorables à l'implantation de nouveaux forages).....	88
Figure 53 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.....	91
Figure 54 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie. 93	93
Figure 55 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution de la problématique intrusion saline.....	94
<i>Figure 56 : Inventaire des piézomètres analysés</i>	107
<i>Figure 57 : Localisation des piézomètres analysés</i>	108
<i>Figure 58 : Comportement de la piézométrie des piézomètres analysés.....</i>	109
<i>Figure 59 : Longueur des chroniques piézométriques</i>	110
<i>Figure 60 : Caractéristiques principales des chroniques.....</i>	111
<i>Figure 61 : Résultats des tests de tendances sur les médianes annuelles des niveaux piézométriques.....</i>	114
<i>Figure 62 : Graphiques des chroniques annuelles avec tendance à la baisse.....</i>	115
<i>Figure 63 : Graphiques des chroniques annuelles avec tendance à la hausse.....</i>	117
Figure 64 : Résultats des tests de tendances sur les « minimums annuels » des niveaux piézométriques.....	120
<i>Figure 65 : Graphiques des chroniques des minimums annuels avec tendance à la baisse.</i>	122
<i>Figure 66 : Chronique des maximums annuels du forage Quinquina.....</i>	124
<i>Figure 67 : Résultats des tests de tendance saisonnière de Mann-Kendall sur les chroniques des médianes mensuelles des niveaux piézométriques pour la période trimestrielle.....</i>	126
<i>Figure 68 : Résultats des tests de tendance saisonnière de Mann-Kendall sur les chroniques des médianes mensuelles des niveaux piézométriques pour la période semestrielle.....</i>	127

<i>Figure 69 : Synthèse des tendances identifiées et légende.....</i>	131
<i>Figure 70 : Mise en service des exploitations proches des forages avec tendance à la baisse.</i>	132

Liste des annexes

Annexe 1 Prélèvements simulés sur la période 1990-2020 par ouvrage.....	103
Annexe 2 Analyse statistique des tendances piézométriques	107

1. Introduction

L'état des lieux de 2019, porté par l'Office de l'eau et la DEAL, fait état d'un risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) global à l'horizon 2027 pour la masse d'eau souterraine (MESO) FRLG101 – Formations volcaniques du littoral Nord (Office de l'eau Réunion, 2019). La zone concernée est présente en figure 1.

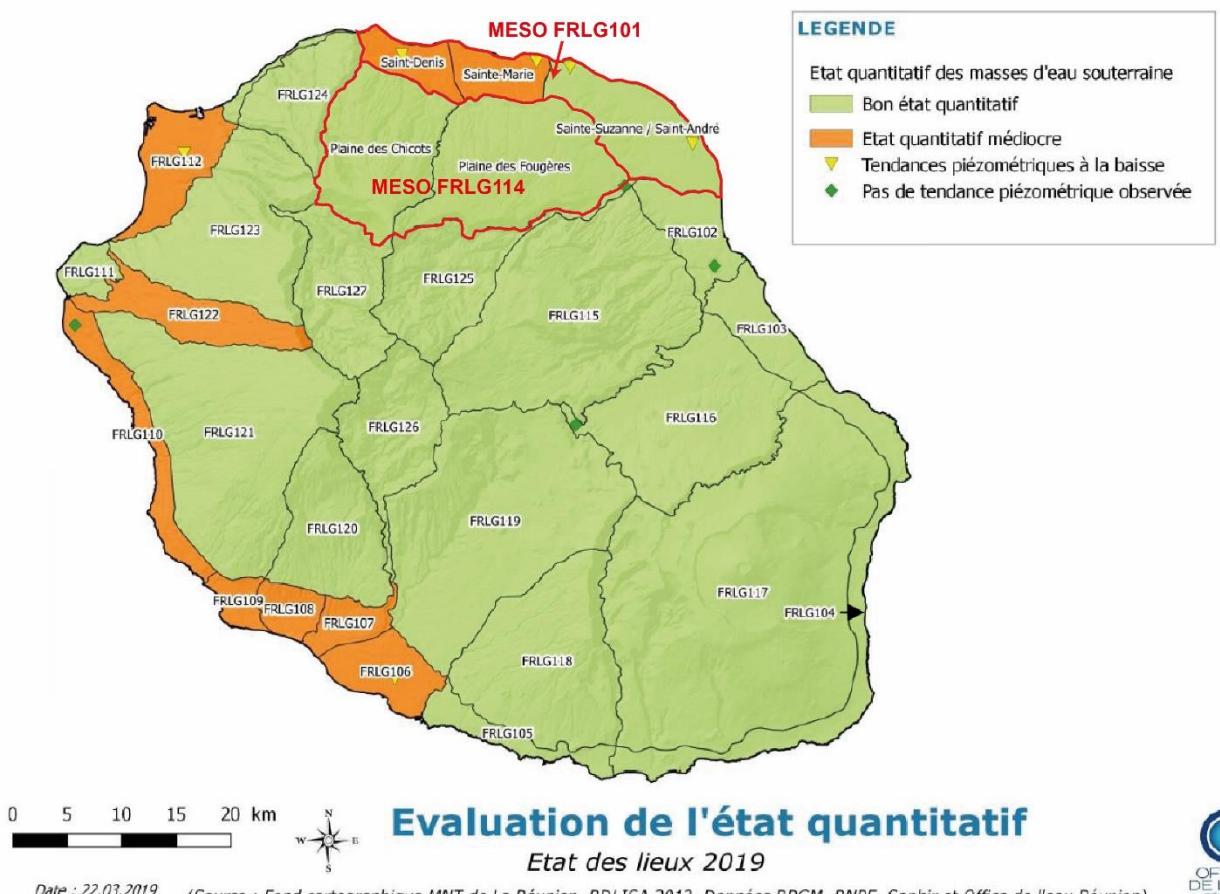


Figure 1 : Evaluation de l'état quantitatif (Office de l'eau Réunion, 2019)

D'une part, des tendances à la baisse ont été mises en évidence sur 4 piézomètres (S1 Champ Fleuri, P27 Belle Eau, P14 Champ Borne, Piézomètre de la Ravine des Chèvres). D'autre part, le calcul du « ratio Prélèvements/Recharge » souligne un déséquilibre quantitatif qui affecte les secteurs de Saint-Denis et de Sainte-Marie (ratio de $0.09 > 0.05$). Le secteur de Sainte-Suzanne et Saint-André n'est pas concerné par ce déséquilibre quantitatif.

Ce RNAOE étant établi, il devient nécessaire d'infléchir ce risque en agissant sur la situation d'exploitation des eaux souterraines dans le but d'atteindre le bon état quantitatif à l'horizon 2027. Pour cela, il convient d'objectiver l'état réel de la MESO et de déterminer les volumes d'eau souterraine qui peuvent être prélevés sur le milieu tout en assurant l'équilibre quantitatif de la masse d'eau.

Cette évaluation des volumes prélevables repose principalement sur la réalisation d'une modélisation numérique de l'hydrodynamique en régime transitoire qui permet de déterminer

les flux souterrains pour différents états du stock et différentes conditions temporelles (hautes eaux, étiage, années humide ou sèche...).

Dans le cadre d'une convention de recherche et développement et de ses activités de service public, le BRGM a entrepris l'évaluation des volumes prélevables des formations volcaniques du littoral nord. Ce projet comporte trois phases, incluant (i) l'établissement d'un diagnostic, des bilans et d'une conceptualisation des ressources en eau souterraine des formations volcaniques du littoral nord, (ii) l'élaboration d'un modèle hydrogéologique de ces ressources et (iii) la détermination et la mise en œuvre de scénarios de gestion de la ressource en eau.

Ce rapport détaille les réalisations de la phase 2 (chapitres 3, 4 et 5) et de la phase 3 (chapitre 6) de ce projet. Il fait suite aux travaux réalisés en phase 1 (Laurent et Aunay, 2022) qui ont permis de caractériser le complexe aquifère régional du secteur d'étude.

Au préalable, des analyses de tendance complémentaires, avec les données piézométriques mises à jour, sont proposées dans cette partie introductory, avec un focus sur les ouvrages pour lesquels des tendances avaient été mises en évidence (chapitre 2).

2. Résultats de l'actualisation des tests de tendance

L'objectif est ici d'évaluer la stationnarité des chroniques piézométriques au droit de différents piézomètres du secteur d'étude afin de déterminer l'existence de tendances à long terme, à la baisse ou à la hausse.

2.1. DESCRIPTION DES DONNEES ET DE LA METHODOLOGIE

2.1.1. Piézomètres analysés

Ainsi, seize piézomètres ont été analysés au travers de tests statistiques, pour différents indicateurs. Leur localisation et leur comportement piézométrique sont donnés en figure 2 et figure 3.

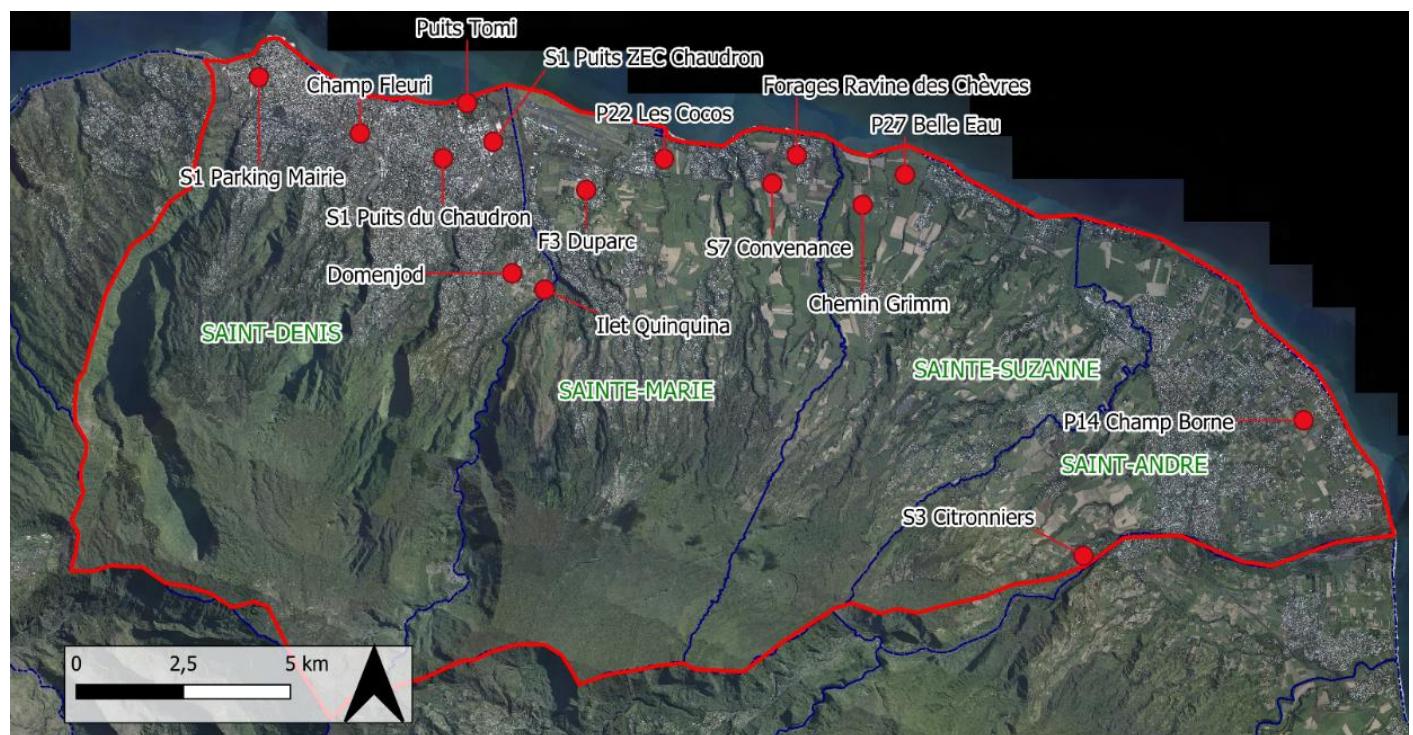


Figure 2 : Localisation des piézomètres traités pour les tests de tendance

Piézomètre	Altitude (mNGR)	Distance Mer (m)	Distance Rivière (m)	Epaisseur ZNS (m)	Gradient hydraulique (pente en %)	Comportement piézométrique
P14 Champ Borne	23,7	800	2800	124	12	Inertiel
Champ Fleuri	/	850	400	/	5	Réactif
S1 Puits Chaudron	25,7	1200	1100	23,8	1	Réactif
S1 Puits ZEC Chaudron	30,4	1200	50	27,75	3	Réactif
F4 Ilet Quinquina					1	Hybride
Ravine des Chèvres INF	53,36	470	870	131,5	2	Inertiel
Ravine des Chèvres SUP				/		Hybride
F3 Duparc	64,5	1800	400	78	1	Hybride
F7 La Convenance	59,5	1200	1	57	2	Inertiel
P22 Les Cocos	35,3	500	200	33,9	2	Hybride
P27 Belle Eau	56,43	600	1500	67	2	Réactif
Forage Chemin Grimm	83,1	1100	800	104,5	2	Hybride
La Bretagne - Domenjod	196	4200	1000	191	1	Inertiel
Puits Tomi		100			6	Réactif

Figure 3 : Caractéristiques et comportement piézométrique des forages analysés.

Vert : réactif
 Orange : inertiel
 Bleu : hybride.

Pour rappel, les comportements sont définis comme suit (Aunay *et al.*, 2010) :

- Réactif : le forage réagit en quelques jours aux précipitations, la recharge est plus rapide que la vidange, qui se fait en quelques semaines ;
- Inertiel : le forage réagit en quelques semaines aux précipitations. La recharge et la vidange sont assez symétriques avec un pic de recharge plusieurs semaines / mois après la saison des pluies ;
- Hybride : le niveau piézométrique varie de plusieurs décimètres à quelques mètres d'une saison à l'autre. Le forage réagit rapidement aux précipitations (quelques jours).

2.1.2. Longueur des chroniques piézométriques

La durée des chroniques et le nombre de données par chronique mensuelle ou annuelle sont donnés en figure 7.

Piézomètre	Code national	Date début	Date fin	Durée chronique (années)	Nombre de données	
					Données mensuelles	Données annuelles
P14 Champ Borne	12273X0009	24/04/1990	25/08/2022	32,4	377	33
S3 Citronniers	12272X0070	27/06/1991	25/08/2022	16,2	194	17
Champ Fleuri	12264X0218	10/05/1988	20/07/2022	34,2	394	35
S1 Puits Chaudron	12264X0113	15/04/1997	20/07/2022	25,3	234	23
S1 Puits ZEC Chaudron	12271X0038	15/04/1997	20/07/2022	25,3	262	24
F4 Ilet Quinquina	12271X0049	23/11/1993	20/07/2022	28,7	241	26
Puits Tomi	12264X0018	01/04/1997	20/07/2022	15,3	147	17
S1 Parking Mairie	12264X0263	15/04/1997	10/05/2014	17,2	127	15
La Bretagne - Domenjod	12271X0090	06/07/1999	06/02/2012	12,6	91	11
Ravine des Chèvres INF	12271X0064	05/12/1994	20/07/2022	27,6	300	28
Ravine des Chèvres SUP	12271X0162	18/10/1994	20/07/2022	27,8	306	29
F3 Duparc	12271X0059	05/12/1994	20/07/2022	27,6	306	29
F7 La Convenance	12271X0034	23/04/1997	20/07/2022	25,3	214	21
P22 Les Cocos	12271X0066	05/01/1996	22/08/2021	25,6	287	26
P27 Belle Eau	12272X0095	25/09/1996	20/07/2022	25,8	306	27
Forage Chemin Grimm	12272X0137	15/07/1999	20/07/2022	23	196	24

Figure 4 : Longueur et complétude des chroniques piézométriques

Données mensuelles = médiane mensuelle (sans nombre minimum de données)

Données annuelles = minimum ou maximum ou médiane annuelle (sans nombre minimum de données)

2.1.3. Méthodologie

L'outil Hype¹ est un outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité ou de la quantité des eaux souterraines.

Chaque chronique piézométrique sera analysée au travers du logiciel Hype. Ces différentes séries temporelles représentent des indicateurs de l'évolution temporelle de la piézométrie. Une différence sera faite entre les indicateurs annuels (médianes, minimums et maximums annuels) et les indicateurs saisonniers opérés sur les médianes mensuelles.

¹ <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/hype-outil-caracterisation-evaluation-tendances-evolution-temporelle-qualite-eaux> - (Croiset et Lopez, 2013)

L'outil est divisé en plusieurs modules dont 3 ont été utilisés. Les modules et les tests statistiques sont décrits ci-après.

i. Module « Caractérisation »

Le module « Caractérisation » permet de calculer les statistiques de base préalablement à l'application des autres modules de l'outil. Les statistiques principales sont présentées en annexe 2.

ii. Module « Tendances et ruptures »

Le module « Tendances et ruptures » permet d'appliquer des tests statistiques de détection des tendances et des ruptures sur les chroniques. L'hypothèse nulle de ces tests statistiques est l'absence de tendance ou de rupture.

Plusieurs tests peuvent être opérés dans ce module en fonction des caractéristiques des chroniques et notamment de la normalité des distributions : test de tendance de Mann-Kendall (Renard, 2006), test de rupture (Darken, 1999) et régression linéaire.

Le test de Mann-Kendall est associé au calcul de la pente de Sen. Ce test est appliqué sur toutes les chroniques non stationnaires, pour une hypothèse nulle qui est l'absence de tendance. La pente de Sen est la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de points (Sen, 1968).

Le test d'inversion de tendance détecte un changement de signe de la pente de Sen.

Enfin, la régression linéaire est un test paramétrique faisant une hypothèse de normalité sur la distribution des données. Les données piézométriques sont rarement normalement distribuées, le test de régression linéaire n'est donc pas conseillé pour évaluer des tendances piézométriques. Il sera tout de même opéré, mais les résultats devront donc prendre en considération les limites ici mentionnées.

iii. Module « Saisonnier »

Le module « Saisonnier » permet d'estimer les tendances des séries cycliques saisonnières.

Le principe est identique à celui du test de Mann-Kendall mais les tests ne vont plus être menés sur la chronique totale mais sur tous les mois de janvier, les mois de février et ainsi de suite. On peut effectuer le test sur trois périodes : le mois calendaire (exemple ci-dessus), le trimestre et le semestre. Seules les deux dernières périodes seront ici testées.

iv. P-value des tests statistiques

La P-value quantifie la significativité statistique du résultat d'un test statistique avec une hypothèse nulle : plus la P-value est faible, plus la présomption est forte contre l'hypothèse nulle, soit contre l'absence de tendance. Les résultats des tests sont classiquement considérés statistiquement significatifs lorsque la P-value est inférieure à 5%, on dit alors que l'hypothèse nulle est rejetée.

2.2. RESULTATS DES TESTS STATISTIQUES

Les différents tests statistiques de tendance piézométrique sur les différentes chroniques, pour plusieurs indicateurs de l'évolution de la piézométrie, permettent de déterminer les piézomètres :

- N'ayant aucune tendance ;
- Ayant une tendance certaine avec au moins 4 indicateurs témoins sur 5 ;
- Ayant une tendance un peu moins certaine avec 3 indicateurs du 5 ;
- Ayant une tendance incertaine avec seulement 2 indicateurs sur 5.

Les résultats sont présentés en figure 5 et le détail des analyses figure en annexe 2.

Sur les 16 piézomètres analysés, seulement 4, appartenant principalement à la commune de Saint-Denis, montrent des tendances à la baisse :

- Champ Fleuri de l'ordre plurimillimétrique par an ;
- Illet Quinquina de l'ordre pluricentimétrique par an ;
- Domenjod du même ordre ;
- Et Chemin Grimm, moins certain, de l'ordre pluricentimétrique également.

Il est à noter qu'il est particulièrement certain pour Quinquina qu'il y a une tendance à la baisse sur le long terme car tous les indicateurs sont témoins de cette tendance.

Vis-à-vis des forages classés en RNAOE à l'horizon 2027 par l'Office de l'Eau, seul le forage Champ Fleuri concorde, mais il s'agit de celui qui a le plus faible ordre de tendance.

En revanche, les tests statistiques ont mis en évidence une tendance à la hausse certaine ou moins certaine pour notamment 6 forages, principalement rattachés aux communes de Sainte-Marie et Saint-Denis :

- S1 Parking Mairie ;
- S7 Convenance ;
- F3 Duparc ;
- P22 Les Cocos ;
- S1 Puits du Chaudron ;
- Et Puits Tomi.

Ainsi sont identifiées les tendances des piézomètres du secteur d'étude. Cependant, il est à noter que la disponibilité des données piézométriques diffère d'un piézomètre à l'autre, avec certaines chroniques présentant des lacunes de données. Ainsi, bien que les médianes des niveaux piézométriques permettent de s'affranchir de l'autocorrélation, des cycles saisonniers et des valeurs extrêmes enregistrées, elles lisent également ces erreurs ou manques de mesure, et peuvent donc influencer voire fausser les résultats des tests statistiques. Par ailleurs, il est rappelé que l'autocorrélation peut également avoir une influence sur les résultats des indicateurs saisonniers au vu de la méthodologie de calcul du test de Mann-Kendall saisonnier. Les indicateurs les plus fiables restent les indicateurs annuels. Les indicateurs saisonniers ont été réalisés pour apporter de potentielles explications ou arguments supplémentaires.

Le tableau suivant synthétise les tendances identifiées par rapport aux cinq indicateurs ici analysés :

TENDANCES PIEZOMETRIQUES			INDICATEURS ANNUELS			INDICATEURS SAISONNERS	
Commune	Code National	Nom	Médiennes annuelles	Minimums des médianes mensuelles	Maximums des médianes mensuelles	Médiannes mensuelles par période trimestrielle	Médiannes mensuelles par période semestrielle
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE					X
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS					
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF					
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZO	RAVINE CHEVRES SUP					
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU					
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	X	X		X	X
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	X	X	X	X	X
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	X	X		X	X
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM		X		X	X
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENANCE	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	X	X		X	X
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON		X		X	X
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI		X		X	X
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON		X		X	

LÉGENDE	
	AUCUNE TENDANCE (moins de 2 indicateurs)
	TENDANCE A LA BAISSE (au moins 4 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA BAISSE (3 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (4 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (3 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (2 indicateurs / 5)
X	TEMOIN TENDANCE A LA BAISSE
X	TEMOIN TENDANCE A LA HAUSSE

Figure 5 : Synthèse des tendances identifiées et légende.

2.3. POTENTIELLE INFLUENCE DES FORAGES EXPLOITES

En figure 6 sont présentés, pour les forages concernés par une tendance à la baisse, les forages exploités proches et leur année de mise en service.

Piézomètre	Forage concerné	Année de mise en service du forage
Champ Fleuri	Trinité	2003
	Trinité 2	2020
Quinquina	Domenjod	2003
	Rivière des Pluies	1986 - 2019
Chemin Grimm	Bel Air	2014
	Belle Eau	1996

Figure 6 : Mise en service des exploitations proches des forages avec tendance à la baisse.

Domenjod est pompé et se trouve à proximité du forage F4 Ilet Quinquina.

Pour le piézomètre Champ Fleuri, une diminution du niveau piézométrique d'environ 0,4 m est observée en 2020 et pourrait correspondre à la mise en service du forage Trinité 2.

Pour le forage Ilet Quinquina dont l'exploitation a débuté en 2003, une diminution soudaine des médianes du niveau piézométrique est remarquable en 2007-2008. Les données d'exploitation disponibles ne permettent pas d'établir une relation entre les volumes prélevés et la tendance observée.

Pour Chemin Grimm, une diminution du niveau piézométrique est visible en 2014 mais ce n'est pas suffisant pour affirmer l'influence du forage Bel Air.

Au vu des années de mise en service des forages environnants des points d'observation ici concernés, il est difficile d'établir clairement une influence des prélèvements sur les tendances piézométriques à la baisse.

Sous réserve de la disponibilité des données, une analyse plus poussée des prélèvements permettrait de déterminer une potentielle influence des forages. Cet aspect est pris en compte dans la modélisation pour l'évaluation des volumes prélevables.

3. Modèle conceptuel du complexe aquifère du littoral Nord

La géomorphologie de l'île de la Réunion correspond aux pentes externes d'un volcan bouclier et le secteur d'étude se distingue en particulier par des contrastes topographiques significatifs : la limite sud amont du secteur d'étude correspond au sommet de le Roche Ecrite à 2 276 m NGR, et sa limite nord correspond au littoral océanique (0 m NGR), 15 km en aval ; avec une nette rupture de pente à environ 250 m NGR d'altitude.

Le système aquifère du littoral nord en particulier se caractérise donc par un fonctionnement hydrogéologique très spécifique. Ce fonctionnement est principalement décrit par Join et collaborateurs (1991, 2005), tandis que des études sur le littoral nord ont permis de préciser les spécificités du secteur (Aunay et al., 2010, Laurent et Aunay, 2022).

Le système aquifère du littoral nord est vu comme un système dit canarien (Figure 7), dans lequel **une nappe de base** se développe dans les horizons volcaniques liés aux différentes périodes d'activité du Piton des Neiges au cours des 500 000 dernières années (laves massives, interlits scoriacés, brèches) ainsi que dans les formations sédimentaires littorales. Les formations volcaniques les plus récentes (PN4 – PN3, selon la géologie locale, Famin et al., 2022) sont considérées comme les plus perméables ; à l'échelle des territoires du nord, ces horizons ont une perméabilité en grand et constitue un massif très transmissif avec une porosité importante. A l'inverse, les formations les plus anciennes (PN2 et ultérieures), plus altérées, sont des horizons moins perméables qui constituerait le substratum de la nappe de base.

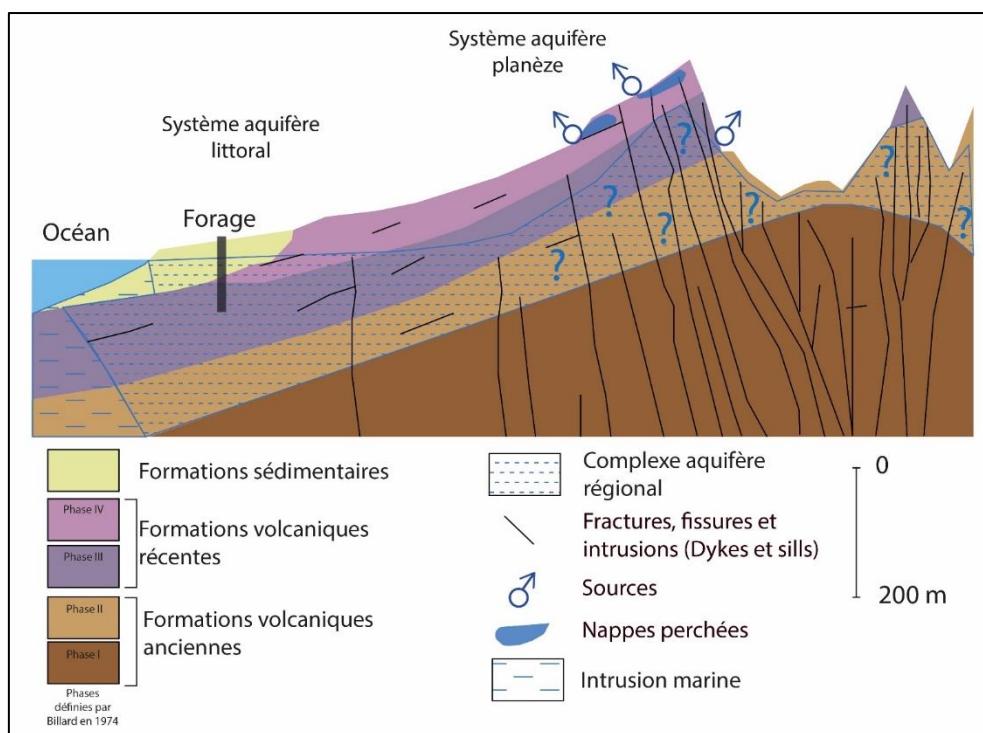


Figure 7 : Modèle conceptuel du système aquifère du littoral nord (Laurent et Aunay, 2022, modifié d'après Join et al., 2005)

L'aquifère de base est alimenté par les précipitations, et par des infiltrations localisées au droit des rivières et des ravines du secteur. Son exutoire est principalement l'océan.

Localement, du fait des hétérogénéités des formations volcaniques, des nappes perchées de faible extension peuvent se développer avec l'apparition d'émergences en surface. Ces sources sont captées ou rejoignent le réseau hydrographique assurant une partie plus ou moins conséquente des débits (de base) des cours d'eau : on peut par exemple citer les sources du Chaudron et du Bras Guillaume qui peuvent débiter à l'étiage plusieurs centaines de L/s (Laurent et Aunay, 2022).

Ces hétérogénéités peuvent induire localement une mise en captivité de la nappe de base. De la même manière, dans les zones proches du littoral, les formations alluviales récentes peuvent constituer des horizons semi-perméables avec l'établissement de nappes superposées, libres et captives.

On peut distinguer 3 processus dans les mécanismes de recharge de la nappe de base :

- Dans les hauts, la zone non saturée peut atteindre des épaisseurs exceptionnelles (jusqu'à 1 000 m), et l'infiltration de la pluie ou depuis les rivières vers la nappe de base sont supposées subir un retard et une atténuation importante ;
- Dans les hauts, les émergences liées aux nappes perchées rejoignent par la suite le réseau hydrographique, dont l'infiltration ultérieure vers la nappe est également retardée et atténuée ;
- Dans les bas, les rivières sont largement infiltrantes, infiltration à dynamique bien plus rapide que dans les hauts.

Les chroniques piézométriques disponibles sur le secteur d'étude expriment trois types de comportement principaux qui traduisent en partie la part variable de ces processus d'infiltration : ils peuvent être très réactifs avec des variations saisonnières de grand amplitude ; inertIELS et présentant une réponse lente aux précipitations ; et enfin hybrides, manifestant une pluralité de ces contributions (voir Aunay, 2010).

Il est donc essentiel que le modèle numérique hydrodynamique puisse représenter ces différents mécanismes pour reproduire la dynamique de la nappe de base et des cours d'eau du secteur.

4. Construction du modèle hydrodynamique

4.1. OBJECTIF DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle hydrodynamique vise à fournir des éléments d'évaluation des volumes prélevables des formations volcaniques du littoral nord. Dans ce cadre, il est élaboré pour estimer au mieux les flux transitant dans le complexe aquifère : recharge, ruissellement, échanges nappe-rivière, vidange du système. Ces flux sont évalués sur la base d'une représentation fidèle et acceptable des niveaux piézométriques mesurés sur le secteur ainsi que des débits des principales rivières.

En répondant à cet objectif, on disposera d'un outil suffisamment robuste pour simuler des scénarios de gestion de la ressource et permettre une évaluation pertinente des volumes prélevables ; ceux-ci se basant sur une acceptation de critères piézométriques et de débits de rivière définis par les gestionnaires de l'eau dans ce secteur.

4.2. SOLUTIONS NUMERIQUES PROPOSEES AU MODELE CONCEPTUEL

Ce paragraphe décrit les choix numériques effectués pour répliquer au mieux le fonctionnement attendu de la nappe de base au regard du modèle conceptuel.

4.2.1. Représentation de la nappe de base

Du fait de la perméabilité en grand de ce système aquifère, on le considérera en première approche **comme un milieu poreux équivalent** que l'on représentera numériquement par un **modèle monocouche, essentiellement libre** : à noter que ce choix d'un modèle monocouche est adapté au degré de connaissance sur la géométrie des formations aquifères où siège la nappe de base.

De plus, une **tolérance importante** sera considérée sur **la variabilité spatiale des paramètres hydrodynamiques** afin de prendre en compte l'hétérogénéité de ces formations volcaniques.

En outre, une difficulté de modélisation attendue est la différence entre le **faible gradient hydraulique de la nappe et le fort pendage de la formation aquifère ciblée** (formations PN4 – PN3 décrites dans la section précédente) : cette différence entraînera logiquement un dénoyage de l'aquifère à partir d'une certaine altitude si le gradient hydraulique reste constant au-delà des zones proches du littoral où le gradient hydraulique peut être mesuré et si la géométrie de la formation aquifère est bien celle attendue. Différentes explications ont été données à cette apparente contradiction dans les différentes études réalisées dans ce type de contextes volcaniques :

- 1) Une altitude du substratum plus faible que celle attendue (d'autres formations volcaniques seraient intégrées au complexe aquifère comme dans le modèle conceptuel Hawaïen par exemple) ;
- 2) Une perméabilité qui diminuerait en fonction de l'altitude et donc un gradient hydraulique plus important en altitude que proche de la cote (hypothèse privilégiée dans Join et al., 2005 pour la modélisation hydrogéologique du Piton de la Fournaise) ;

- 3) Un ruisseau souterrain sans possibilité d'établissement d'une nappe en altitude étant donnés les paramètres hydrodynamiques très favorables aux écoulements. Cette situation est illustrée en figure 8.

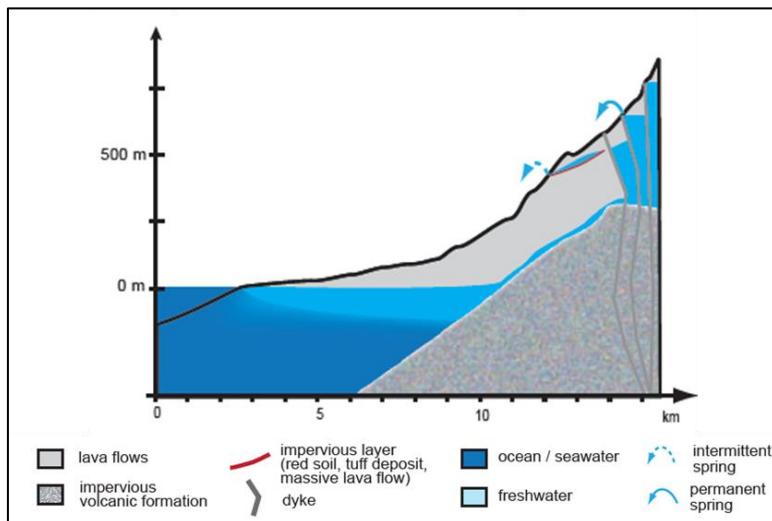


Figure 8 : Modèle conceptuel d'une île volcanique jeune, proposé par Pryet (2011)

Au vu de la connaissance actuelle, ces différentes hypothèses restent envisageables sur le secteur d'étude. Devant cette incertitude, le choix a alors été fait d'autoriser dans le modèle numérique un dénoyage avec possibilité de calcul d'une charge hydraulique à des valeurs inférieures au substratum : ce schéma de calcul appelé « pseudo-ZNS » dans le code de calcul utilisé MARTHE (Thiéry, 2015) permet à la fois d'assurer la stabilité numérique des calculs et d'estimer correctement les flux souterrains provenant des Hauts et ce, quelle que soit l'explication réelle parmi les trois hypothèses explicitées ci-dessus.

4.2.2. Représentation de la zone non saturée

L'épaisseur exceptionnellement importante de la ZNS attendue sur une grande partie du secteur d'étude implique une attention particulière sur la prise en compte de son rôle dans la dynamique des eaux souterraines. Classiquement dans les modélisations numériques de ce type, la zone non-saturée n'est pas modélisée explicitement dans le domaine maillé mais de façon globale au sein d'un bilan hydro-climatique. A noter que, pour ce contexte atypique, un bilan particulier a été mis en œuvre avec une distinction entre la **ZNS proche surface** (permettant la partition ruissellement / infiltration) et la **ZNS en profondeur** (permettant le retard induit de la recharge) (voir section 4.5.2).

4.2.3. Représentation des nappes perchées

Les **nappes perchées** ne peuvent être modélisées explicitement dans le domaine maillé principalement du fait du peu de connaissances sur ces dernières. Néanmoins, ces nappes jouent un rôle potentiellement important dans la dynamique des bilans hydrauliques, puisqu'elles peuvent retarder l'infiltration des eaux de pluie vers la nappe régionale et que certaines participent significativement à l'alimentation des débits des cours d'eau. Par conséquent, on représentera ces nappes perchées de façon globale, par leur intégration dans les bilans hydroclimatiques mentionnés ci-dessus.

4.2.4. Représentation explicite des cours d'eau

Les cours d'eau et les échanges entre ces derniers et la nappe régionale jouent également un rôle important dans les bilans hydrauliques et leur dynamique. **Les cours d'eau sont donc modélisés de façon explicite**, avec un calcul des débits des cours d'eau dans chacune des « mailles cours d'eau ». A noter que d'éventuelles infiltrations des cours d'eau vers la nappe régionale ayant lieu dans les hauts à travers la ZNS d'épaisseur importante seront soumises aux mêmes retard et atténuation que l'infiltration des eaux de pluie : ces infiltrations seront donc gérées de manière globale *via* les bilans hydroclimatiques. A l'inverse, en zone côtière, les infiltrations via les cours d'eau seront traitées classiquement sans retard additionnel.

4.2.5. Identification des niveaux aquifères multiples en contexte alluvial

Dans certains secteurs, en particulier en rive gauche de la Rivière du Mât et dans le secteur de la Ravine des chèvres, l'existence d'hétérogénéités permet l'établissement de plusieurs nappes superposées. Le comportement hydrodynamique de ces nappes alluviales locales pourra donc s'éloigner du comportement de la nappe régionale qui est modélisée. Cela ne remet toutefois pas en cause la pertinence du modèle de la nappe de base en termes de bilan hydraulique ; en outre, le modèle permettra d'identifier ces ouvrages captant des nappes peu ou pas connectées à la nappe de base et suivant un schéma conceptuel différent.

4.3. CHOIX DE MODELISATION : EXTENSION, DISCRETISATION SPATIALE ET TEMPORELLE

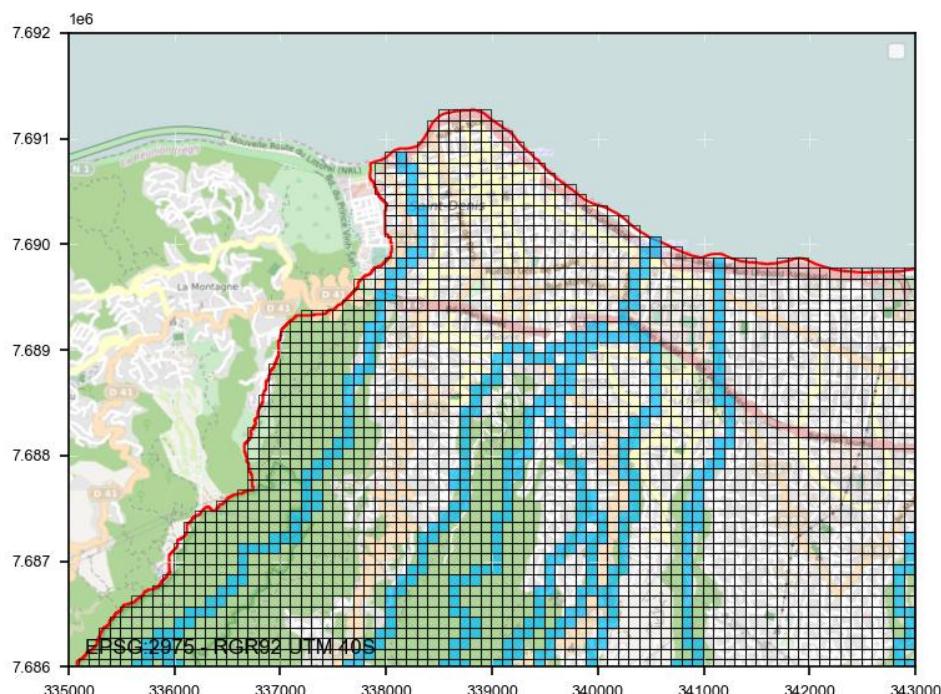
Afin d'introduire des conditions aux limites aussi naturelles que possible, le modèle s'étend sur les limites de bassins versants topographiques des principales rivières du secteur d'étude, jusqu'à la limite littorale au nord et enfin la rivière du Mât à l'est (Figure 9). Ce domaine intègre la MESO FRGRLG101, objet de cette étude, mais également toute la partie amont, qui contribue à l'alimentation de cette masse d'eau.



Figure 9 : Extension du domaine modélisé

L'équation de diffusivité en milieu poreux est résolue à l'aide d'un schéma en différences finies, en utilisant le code de calcul MARTHE développé au BRGM (Thiéry, 2015). Le domaine est discrétezé par un maillage régulier avec des mailles de 100 m de côté (Figure 10). Il se compose finalement d'environ **31 000 mailles actives**.

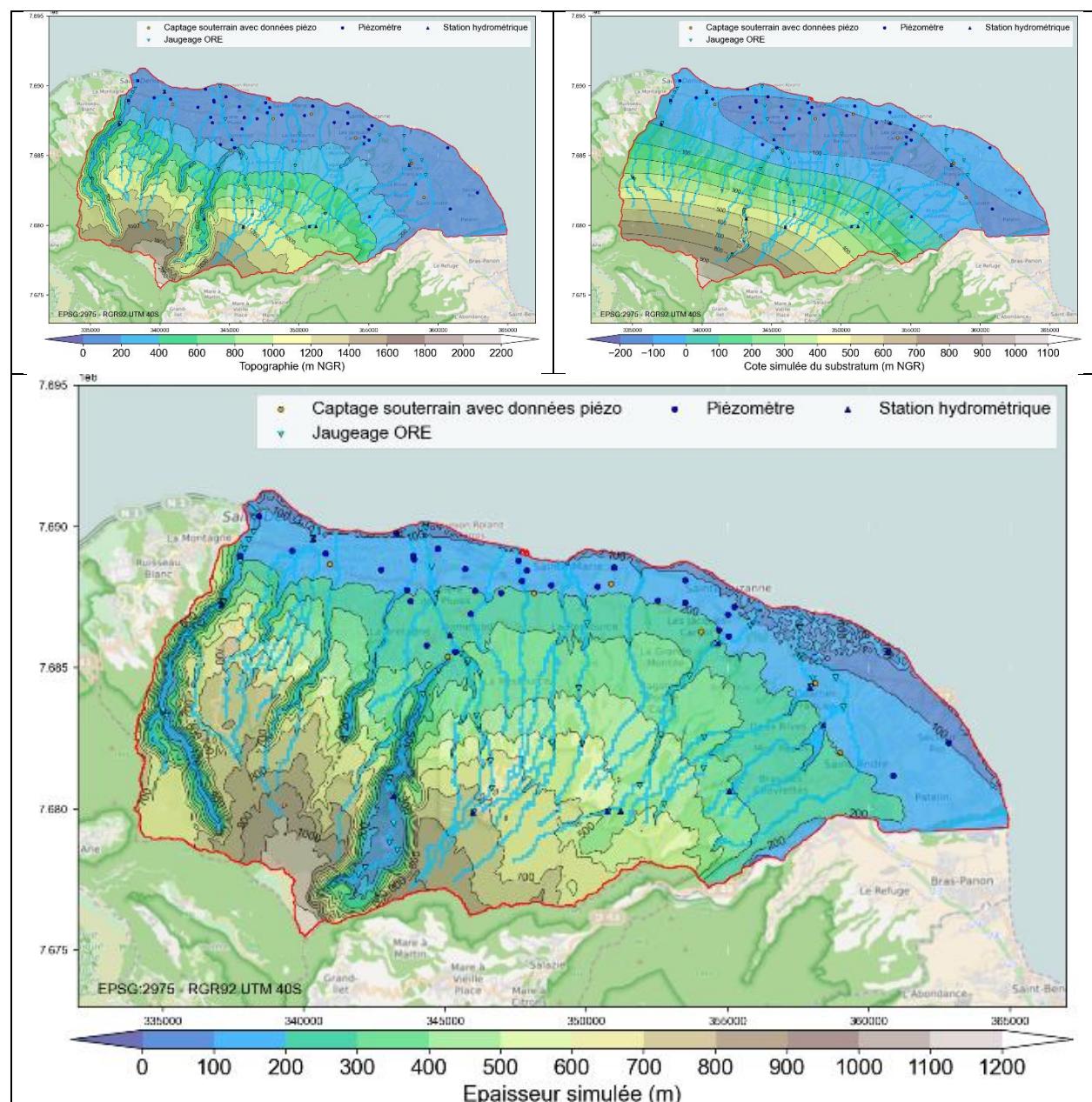
Les écoulements sont simulés en régime transitoire au pas de temps mensuel de 1995 à 2020 (période d'utilisation du modèle). A noter qu'afin d'assurer la validité du modèle à partir de 1995, les simulations démarrent auparavant au pas de temps annuel de sorte à mettre en charge le modèle, et d'assurer notamment la bonne représentation des phénomènes inertIELS.



Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau

- A partir de cette relation, le substratum sur l'ensemble du secteur d'étude a été reconstitué à partir de la topographie ;
- Ce substratum a été lissé au niveau des rivières et des ravines pour prendre en compte l'érosion.

La géométrie simulée de l'aquifère est présentée à la figure 11 ci-dessous.



4.5. CLIMATOLOGIE ET RECHARGE

Les flux d'eau entrant dans l'hydrosystème sont estimés à l'aide d'un bilan hydroclimatique, qui permet de calculer en chaque maille un flux d'infiltration et de ruissellement. Ce bilan est réalisé à l'aide d'une modélisation globale de type GARDENIA (Thiéry, 2014), adaptée au contexte de cette étude (en particulier à l'épaisseur importante de la zone non saturée, cf. 4.2).

4.5.1. Données de pluie et d'ETP

Les données de pluie sont issues de données de stations météorologiques collectées sur le secteur d'étude (Figure 12) et spatialisées sur l'ensemble du domaine modélisé à l'aide de zones d'influence de Voronoï. Le cumul annuel moyen des précipitations disponibles sur la période 2010-2015 montrent une grande variabilité spatiale des pluies. Les données n'étant pas disponibles sur toutes les stations et sur toute la durée des simulations, les données de pluie manquantes ont été comblées à partir des stations montrant les cumuls de pluie les plus proches ; une correction des pluies comblées a été appliquée de sorte à reproduire au mieux les disparités de pluie sur le secteur.

A noter qu'une tentative de spatialisation plus fine a été menée en utilisant le système d'information SMARTIS/Meteor du CIRAD (<https://smartis.re/METEOR>). Cependant des tests de comparaison entre les données de précipitations stations et données SMARTIS ont montré que ces dernières étaient trop moyennées pour être utilisées dans le cadre de ce modèle.

Les données d'ETP ont été en revanche déterminées à partir de ce système, en utilisant une grille régulière de 1km de côté (Figure 13). Cette discréttisation vise à bien reproduire la corrélation de cette variable avec l'altitude. L'ETP disponible sur le site SMARTIS/Meteor est calculée à l'aide de la formule de Penman-Monteith.

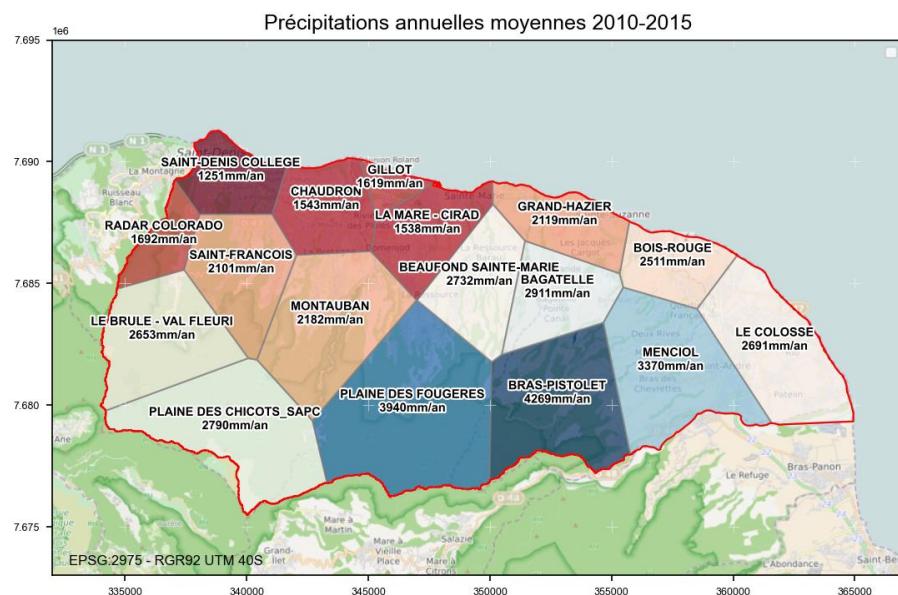


Figure 12 : Synthèse des données des stations Météo-France sur la période 2010-2015

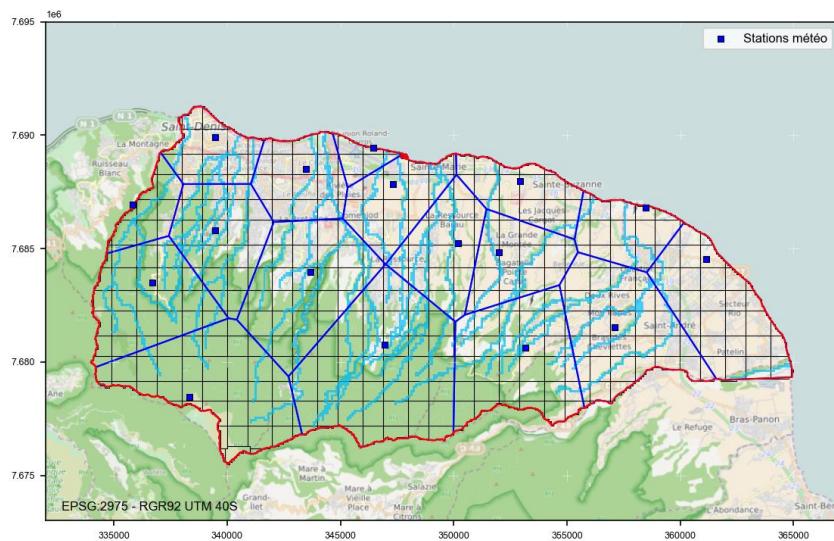


Figure 13 : Spatialisation des données d'ETP sur une grille régulière 1 km x 1 km (en noir)

4.5.2. Bilan hydroclimatique

Ce calcul est réalisé avec l'outil GARDENIA (intégré au code MARTHE) au pas de temps journalier à partir de données spatialisées de pluie et d'ETP (sur des zones « météo »), et de paramètres de sol (spatialisés sur des zones de « sol ») qui incluent une réserve disponible pour l'évapotranspiration, une hauteur d'équi-repartition entre ruissellement et infiltration vers la nappe, et un temps de demi-percolation.

Le principe du bilan hydroclimatique est le suivant (Figure 14) :

- Sur une période de temps donnée (ex. 1j.), la combinaison de la pluie et de l'évaporation assèche ou humidifie le sol. Lorsque le sol est suffisamment humide, alors l'eau peut atteindre les horizons inférieurs : le réservoir sol produit de la pluie efficace. Ce calcul fait intervenir la réserve disponible pour l'évapotranspiration du sol ;
- La pluie efficace ainsi produite s'infiltra vers la nappe de base ou ruisselle vers les rivières selon un schéma de partition qui dépend d'une hauteur d'équipartition et d'un temps de demi-percolation : cela traduit l'influence de la zone non saturée « peu profonde » qui produit le ruissellement ;
- La portion qui s'infiltra via la zone non saturée en profondeur rejoint la nappe progressivement (recharge), avec un retard caractérisé là aussi par un temps de percolation. Dans le contexte de la nappe de base, ce dernier processus a un rôle important dans la mesure où la ZNS peut être très épaisse et les temps de parcours significatifs. Ce paramètre n'est pas pris en compte dans un schéma GARDENIA « classique » mais est intégré au modèle dans un second temps pour permettre la prise en compte des spécificités du secteur d'étude. Ce processus de « routage » (retard) de l'infiltration et du ruissellement est implémenté dans Marthe par la définition d'un temps de demi-percolation sur ces flux.

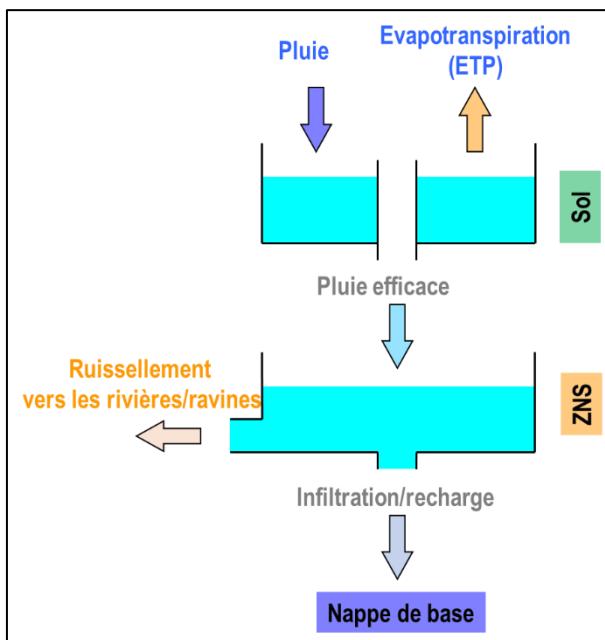


Figure 14 : Schéma du bilan hydroclimatique intégré

Les paramètres de sol (réserve disponible pour l'évapotranspiration, une hauteur d'équilibre entre ruissellement et infiltration vers la nappe, temps de demi-percolation et temps de demi-percolation de la recharge) sont spatialisés sur des zones de sol homogènes (Figure 15). Cette distribution résulte d'une agrégation entre la distribution des principaux bassins versants des rivières et ravines simulés, une épaisseur de ZNS moyenne, et la grille spatialisée des données météo. 21 zones homogènes sont ainsi définies.

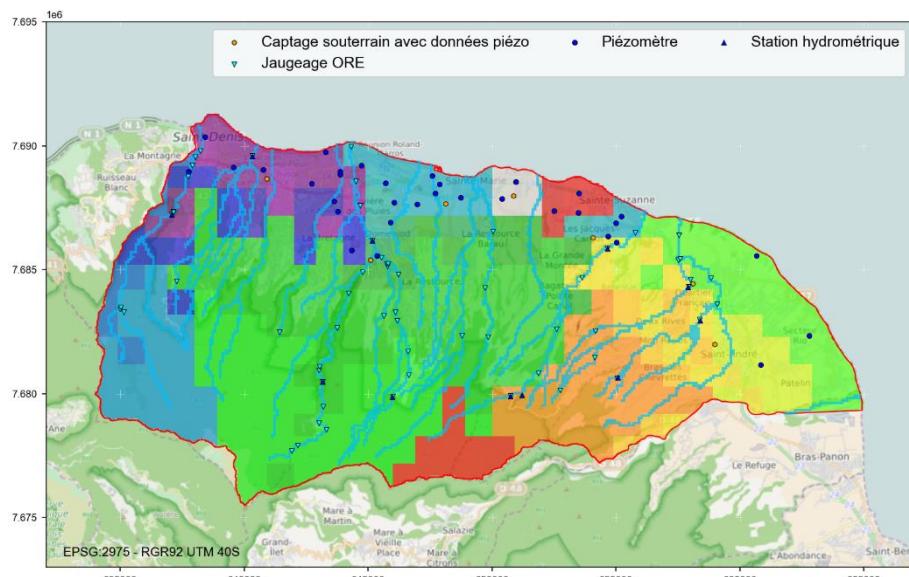


Figure 15 : Zones de sol aux propriétés homogènes

4.6. MAREGRAPHIE ET ECHANGES AVEC L'OCEAN

La façade littorale constitue l'exutoire terminal du système aquifère et du réseau hydrographique. Il est considéré comme une condition à potentiel imposé, où le niveau piézométrique correspond au niveau marin mesuré. Celui-ci est reconstitué sur la période modélisée à partir du marégraphe de Ste Marie et de la Pointe des Galets (Figure 16).

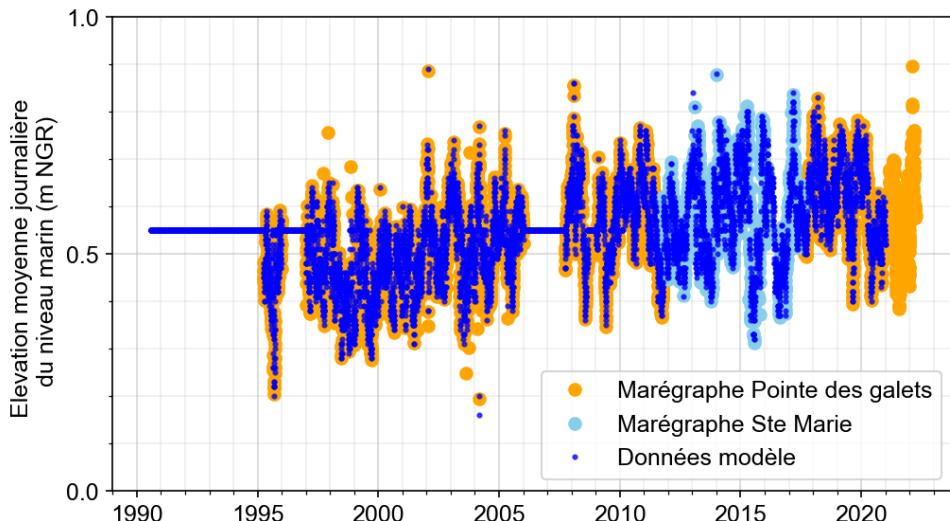


Figure 16 : Variation du potentiel imposé sur la façade littorale

4.7. ECHANGES NAPPE-RIVIERE

Le réseau hydrographique principal (rivières pérennes et intermittentes) est explicitement modélisé avec les propriétés des différentes rivières / ravines (linéaire, largeur, côtes du lit), afin de pouvoir (i) calculer les débits d'eau s'écoulant au sein des rivières et (ii) calculer les échanges entre la nappe et les rivières (apports ou infiltration). Une épaisseur de colmatage du lit des rivières est nécessaire pour le calcul, à laquelle une valeur uniforme de 1 m est attribuée. Les perméabilités de colmatage des rivières sont estimées au cours du processus de calibration du modèle.

Les éléments de phase 1 (Laurent et Aunay, 2022) ont montré que sur le secteur d'étude, les échanges sont essentiellement de deux ordres :

- Dans les hauts, l'alimentation des cours d'eau pérennes et les ravines par le ruissellement est prédominante. Ces rivières infiltrent vers la nappe dans une moindre mesure : le débit augmente généralement depuis l'amont vers l'aval ;
- Dans les bas, l'infiltration depuis les rivières est prédominante : les diverses campagnes de jaugeage ont montré des pertes importantes sur les portions avals des cours d'eau, indiquant que ceux-ci alimentaient principalement la nappe.

Du fait de la géométrie de l'aquifère, les occurrences de drainage de la nappe de base par les cours d'eau (flux depuis la nappe vers la rivière) sont rares, le niveau piézométrique moyen étant situé sous la cote du lit des principaux cours d'eau.

4.8. PRELEVEMENTS

Les prélèvements sur le secteur d'étude ont été recensés auprès des gestionnaires de l'eau (DEAL, CINOR) ainsi que des délégataires (RUNEO, CISE), sur la période 1990-2020. 20 captages souterrains et 16 captages de surface ont été inventoriés et intégrés dans le modèle (Figure 17). Les prélèvements recensés sont tous dédiés à l'alimentation en eau potable, à l'exception des prélèvements liés à la centrale thermique de Bois-Rouge (CTBR) et la sucrerie Bois Rouge. Ces deux prélèvements sont réalisés dans la rivière Foutaque (affluent de la rivière Saint-Jean) sur la commune de Sainte-Suzanne.

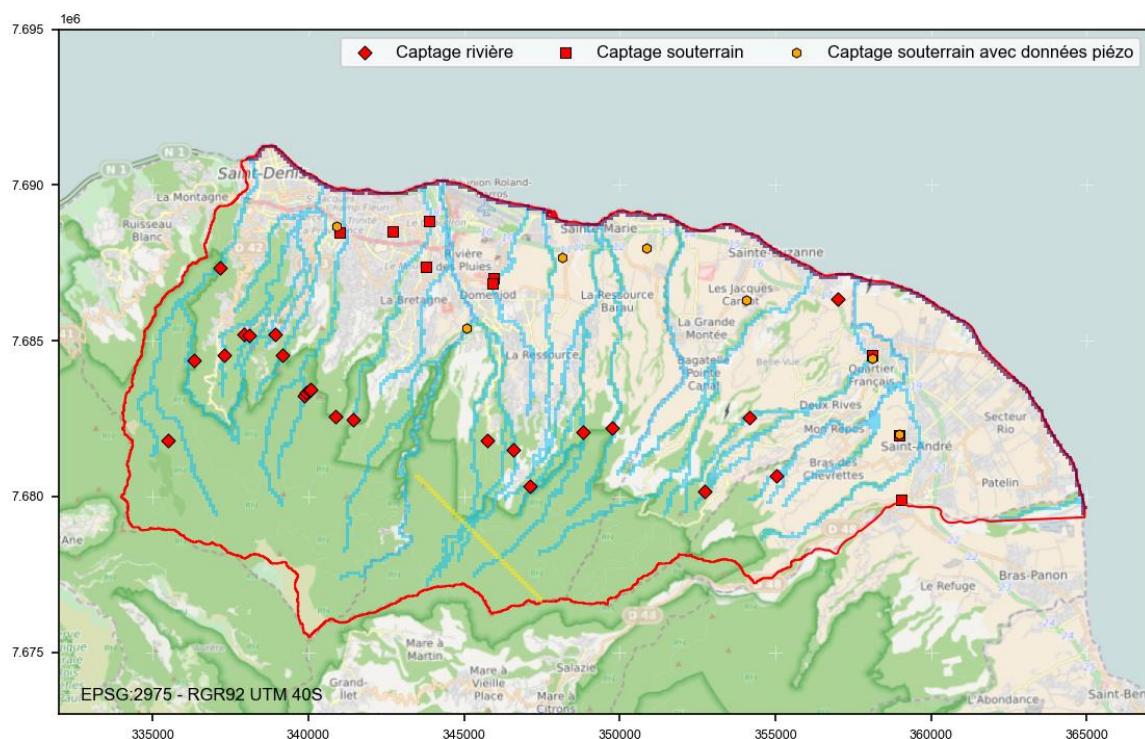


Figure 17 : Recensement des prélèvements de surface et souterrains intégrés dans le modèle

Dans la mesure du possible, des chroniques de prélèvements au pas de temps mensuel ont été établies. Les volumes mensuels sont issus des rapports de délégataires. Pour certains ouvrages, les volumes disponibles sont annuels uniquement, avec années manquantes. Les prélèvements ont alors été reconstruits à partir de la date de création de l'ouvrage (indiquée en BSS) ou l'année de mise en service (quand cette information est disponible) et des dates d'arrêt des prélèvements si disponibles ; une répartition moyenne annuelle a été utilisée pour combler les lacunes. Les volumes prélevés simulés sont présentés par ouvrage en Annexe 1. Au total, ce sont entre 30 et 40 Mm³/an qui sont prélevés sur le domaine (Figure 18).

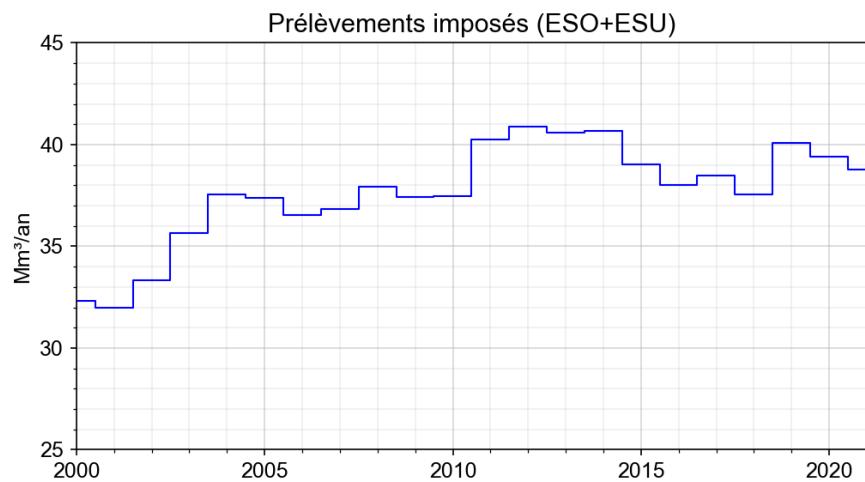


Figure 18 : Prélèvements imposés totaux, en nappe et en rivière

Enfin les venues d'eau depuis la galerie Salazie amont (figuré en jaune sur figure 17) ont été prises en compte (386 L/s) sous forme de prélèvements répartis sur le linéaire de la galerie. De ces venues d'eau, 157 L/s en moyenne sont rejetés dans la Rivière des Pluies. Celles-ci sont intégrées par une injection d'eau constante dans la maille rivière associée.

5. Calibration du modèle

5.1. STRATEGIE DE CALIBRATION

Au préalable de son utilisation en phase 3, le modèle doit être « calibré » sur la période d'utilisation 1995-2020. Cette opération est réalisée en réajustant les paramètres du modèle, c'est-à-dire les perméabilités, les emmagasinements libres, les perméabilités de rivière et les caractéristiques de zone de sol (réserve disponible pour l'évapotranspiration, hauteur d'équarépartition entre ruissellement et infiltration vers la nappe, temps de demi-percolation, temps de demi-percolation de l'infiltration vers la nappe) dans chaque maille associée, pour reproduire au mieux les niveaux piézométriques et les débits de rivière observés sur cette période.

La localisation des données d'observations disponibles est présentée dans la figure 19 ci-dessous. Elles se composent de 35 chroniques piézométriques, 7 captages souterrains avec données piézométriques, 11 stations de débit et enfin 61 sites de jaugeage ponctuels. La plupart de ces informations ont été collectées sur le système d'information sur l'eau du bassin Réunion (<https://donnees.eaureunion.fr/>).

Pour les niveaux piézométriques observés dans les ouvrages en pompage, la chronique horaire a été récupérée, en particulier pour les ouvrages Ilet Quinquina (12271X0049) et Domenjod (12271X0090). Pour ces ouvrages, le modèle s'attache à reproduire le niveau maximum journalier, que l'on considère comme représentatif du niveau statique.

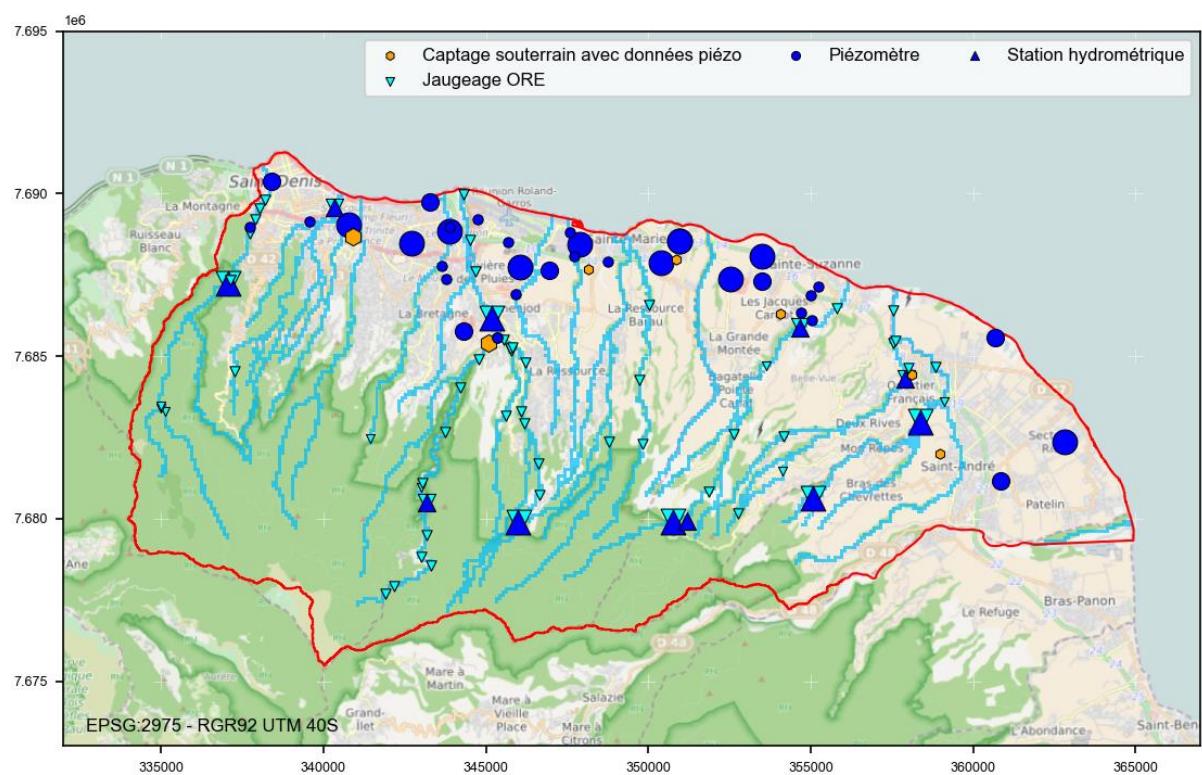


Figure 19 : Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage disponibles pour le calage du modèle

La taille des points correspond à la quantité de données journalières disponibles, par taille croissante : <365, entre 365 et 3650, >3650.

Le modèle est paramétré en utilisant des zones de propriétés homogènes pour la perméabilité et l'emmagasinement libre de l'aquifère simulé, selon le zonage illustré figure 20 (79 zones). Les perméabilités de rivière sont quant à elle ajustées par affluent sur la partie aval (29 affluents), et les temps de transfert dans la ZNS sont ajustés par zone de sol (24 zones).

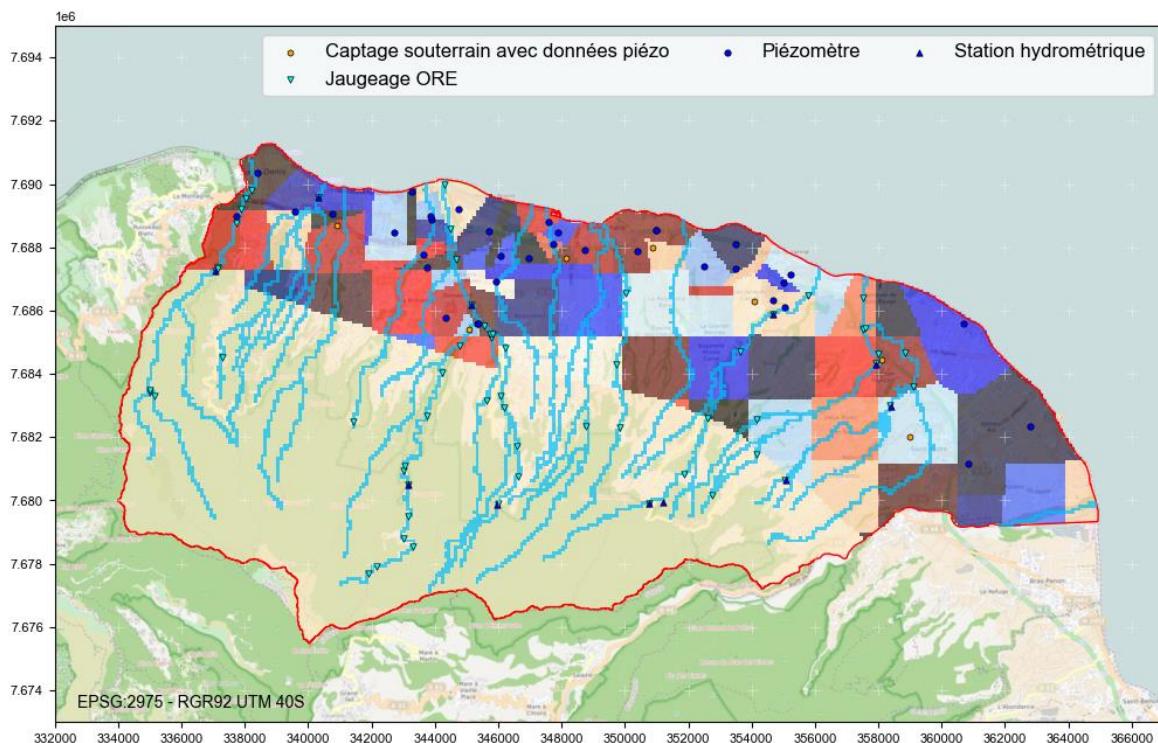


Figure 20 : Distribution des zones de paramètres utilisées pour l'estimation des paramètres du modèle

L'estimation de ces 291 paramètres du modèle est réalisée de manière algorithmique, par la méthode de Gauss-Levenberg-Marquardt. Cette méthode est implémentée dans l'outil PEST++ (White, 2020), utilisé conjointement avec le code MARTHE. Dans cette approche, les paramètres du modèle sont ajustés systématiquement pour minimiser une fonction objectif, qui est la somme des différences pondérées entre les sorties du modèle et leurs équivalents observés au carré :

$$\emptyset = \sum_i \varepsilon_i (H_{sim} - H_{obs})^2$$

où H représente le niveau piézométrique ou le débit d'une rivière simulé/observé dans une maille pour un pas de temps donné. Cet ajustement est réalisé par le calcul répétitif d'une matrice dite Jacobienne et requiert de nombreux appels de modèle.

Plus de 5 500 simulations sont nécessaires pour minimiser la fonction objectif (Figure 21) au-dessous d'un seuil pour lequel il n'y a plus d'améliorations notables, et qui aboutit à des résultats de simulation jugés suffisants. Cette procédure d'optimisation a également amené à revoir à de nombreuses reprises le modèle conceptuel, la zonation des zones météorologiques homogènes, la prise en compte ou non de certaines rivières intermittentes, etc. afin de mieux représenter les observations à disposition.

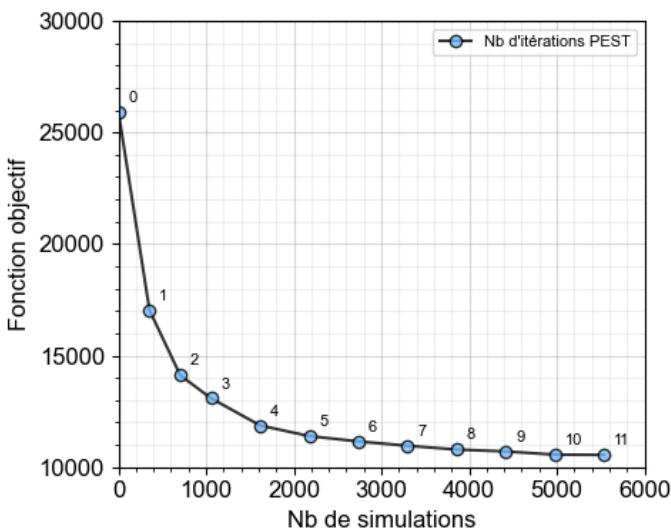


Figure 21 : Evolution de la fonction objectif au cours de l'optimisation

Au terme de cette optimisation, un jeu de paramètres est obtenu permettant de reproduire de manière satisfaisante les observations sur la période 1995-2020.

5.2. RESULTATS DE LA CALIBRATION

5.2.1. Piézométrie, débit des rivières et ravines

i. Secteur Saint-Denis

Sur ce secteur, les cours d'eau principaux sont la rivière Saint-Denis (rivière pérenne), et les ravines du Butor, des Patates à Durand et du Chaudron (rivières intermittentes). 2 d'entre elles sont suivies ou l'ont été par des stations hydrométriques : la Rivière Saint-Denis à l'amont du captage AEP (code Office 14015, débits moyens journaliers disponibles depuis fin 1999) et la ravine du Butor (code Office 14289, débits moyens journaliers disponibles entre 2006 et 2008). La figure 22 montre ces observations et les résultats du modèle sur ces deux stations. Sur ces graphes, -et les suivants-, les observations disponibles sont indiquées en bleu clair tandis que leurs moyennes mensuelles sont indiquées en bleu foncé. La calibration du modèle sur ces deux stations montre la bonne retranscription du caractère pérenne vs. intermittent de ces rivières. On peut également noter la représentation numérique fidèle du débit de base de la rivière St-Denis alimenté par des résurgences issues des nappes perchées par rapport à la nappe régionale, renforçant la crédibilité du modèle sur ce point de la prise en compte des nappes perchées. L'ordre de grandeur des débits de la ravine du Butor, en eau seulement lors de forts épisodes de précipitations, est également bien respecté, notamment au regard des limites suivantes :1) la difficulté à bien quantifier à la fois les précipitations et les débits lors de ces épisodes et 2) le pas de temps du modèle (mensuel) peu adapté à la représentation de ces épisodes ponctuels.

Les observations faites sur ouvrages piézométriques présentant des données sur ce secteur Saint-Denis ainsi que les résultats de la modélisation sont fournis à la figure 22. Ce sont ces dernières données que le modèle s'efforce de représenter. Les chroniques piézométriques de ces ouvrages montrent toute la diversité des comportements attendus, avec des dynamiques dites inertielles avec des battements annuels relativement faibles au regard de la variation interannuelle, inversement des dynamiques très rapides avec des battements pouvant être très

conséquents sur une année donnée et des dynamiques hybrides où les deux comportements sont visibles (catégorisation issue du rapport Aunay *et al.*, 2010). Les résultats du modèle montrent que cette diversité de comportements est la plupart du temps bien reproduite sur le secteur :

- A l'ouest du secteur, les ouvrages Champ-Fleuri et La Trinité (respectivement 12264X0218/S1 et 12264X0265) situés à moins de 500 m l'un de l'autre présentent des niveaux piézométriques caractérisés par une dynamique aux évolutions majoritairement annuelles, avec des remontées brèves et importantes au plus fort de la saison des pluies dues au moins en partie aux infiltrations via les cours d'eau. Même si les niveaux hauts atteints chaque année lors de ces événements intenses ne peuvent être reproduits exactement pour les raisons évoquées au-dessus, la calibration est très acceptable montrant que le modèle permet de reproduire l'interaction complexe entre l'influence rapide des cours d'eau et l'influence plus inertielle des écoulements souterrains issus de l'amont de la nappe de base ;
- Le double fonctionnement est particulièrement visible à l'ouest du secteur Saint Denis, avec en amont hydraulique les forages Domenjod et F4 Ilet Quinquina (resp. 12271X0090/F et 12271X0049) présentant des niveaux inertiels (quelques dizaines de cm de variation annuelle), puis le Forage F3 CERF la Bretagne (12271X044/F3) situé 1.7 km en aval hydraulique au droit duquel la nappe captée présente également des niveaux inertiels (~0.5 m de variation annuelle), puis les deux ouvrages Puits ZEC et Forage parc expositions (respectivement 12271X0038/S1 et 12271X0060/FORAGE), situés plus de 3 km en aval des premiers et montrant une dynamique très rapide avec des niveaux pouvant varier de quasiment 10 m sur une année hydrogéologique. Cette diversité de comportement hydrodynamique de la nappe de base est correctement reproduite par le modèle numérique. A noter également le bon comportement du modèle vis-à-vis des prélèvements qui peuvent être significatifs : le modèle permet en effet simultanément de respecter la totalité des volumes prélevés tout en reproduisant les charges observées par exemple sur le secteur ZEC ou Domenjod/Ilet Quinquina où les prélèvements sont importants, élément supplémentaire de confiance aux propriétés hydrodynamiques affectées au modèle. Ce constat est d'ailleurs valide sur la totalité de l'emprise du modèle.
- Entre le secteur de Champ Fleuri et le secteur ZEC, le secteur du Chaudron est caractérisé par une piézométrie bien plus faible : en moyenne moins de 2 m NGR pour le puit du Chaudron S1 (12264X0113/S1) et autour de 5 m NGR pour le Forage la Trinité, les deux ouvrages étant à une distance équivalente de l'océan. Si on fait l'hypothèse que la nappe captée par le puits du Chaudron S1 est bien la nappe de base et qu'aucun problème de nivellation n'existe, la reproduction des niveaux piézométriques observés n'est possible que par une hétérogénéité locale à perméabilité plus faible au sud et à l'ouest de l'ouvrage jouant le rôle de barrière et limitant l'écoulement depuis l'amont vers le Chaudron. C'est cette hypothèse qui a été intégrée au modèle. A noter que la configuration utilisée pose la question de la relation entre la nappe captée par cet ouvrage et la nappe régionale (est-ce la même nappe ?) : nous verrons par la suite que ce secteur n'est pas le seul, à l'échelle du modèle à poser ce type de question.

Des difficultés de calibration sont toutefois notées pour d'autres ouvrages du secteur. Ces difficultés de calibration semblent expliquées par différentes raisons ne remettant pas en cause la pertinence du modèle pour les objectifs poursuivis :

- Le puits Tomi (12264X0018/F) est situé à proximité immédiate de l'océan : les niveaux piézométriques observés au droit de cet ouvrage hors saison des pluies sont inférieurs au niveau de l'océan mesuré au marégraphe de Sainte-Marie, en contradiction avec le rôle attendu de l'océan comme exutoire de la nappe : le modèle, logiquement, ne peut reproduire cette apparente incohérence ;
- Le forage Tranchée Boulevard Sud (12264X0354/SD4-98) montre des niveaux piézométriques très hauts (~18 m NGR) en comparaison avec les niveaux piézométriques mesurés dans le reste du secteur : l'analyse du log de l'ouvrage montre que seuls les horizons supérieurs à 10 m NGR ont été atteints, cet ouvrage capte donc vraisemblablement une nappe locale perchée, différente de la nappe de base modélisée ;
- A l'ouest du secteur, la chronique observée sur le piézomètre Parking Mairie (12264X0263/S1) montre des variations assez atypiques, peut-être dues à des prélèvements au moins pour les observations les plus anciennes. Dans la mesure où ces prélèvements sont inconnus et que le modèle ne peut en tenir compte, la calibration ne peut être qu'approximative de sorte à reproduire un niveau piézométrique moyen. Les données les plus récentes (2014-2015) au droit de ce piézomètre, très proche de la rivière Saint-Denis, semblent montrer une alimentation par la rivière quand les débits le permettent puis une chute des niveaux quand les débits ne le permettent plus. Ce comportement est reproduit par le modèle ;
- Le forage F5 EST (12271X0057/F5) montre des variations de plus de 25 m et est situé relativement proche du forage CERF, à dynamique inertielle : ce qui sous entendrait une relation très locale et particulière avec la ravine du Chaudron que le modèle ne parvient pas à expliquer sans dégrader la calibration du forage CERF. A noter également que l'absence de données de débit sur la ravine de Chaudron ne permet pas de calibrer le modèle sur cette ravine et de fait la calibration des ouvrages en relation avec cette ravine est sujette à plus d'incertitudes.

On notera ici un des intérêts additionnels de la modélisation hydrodynamique qui permet d'identifier les ouvrages aux comportements atypiques vis-à-vis du modèle conceptuel attendu.

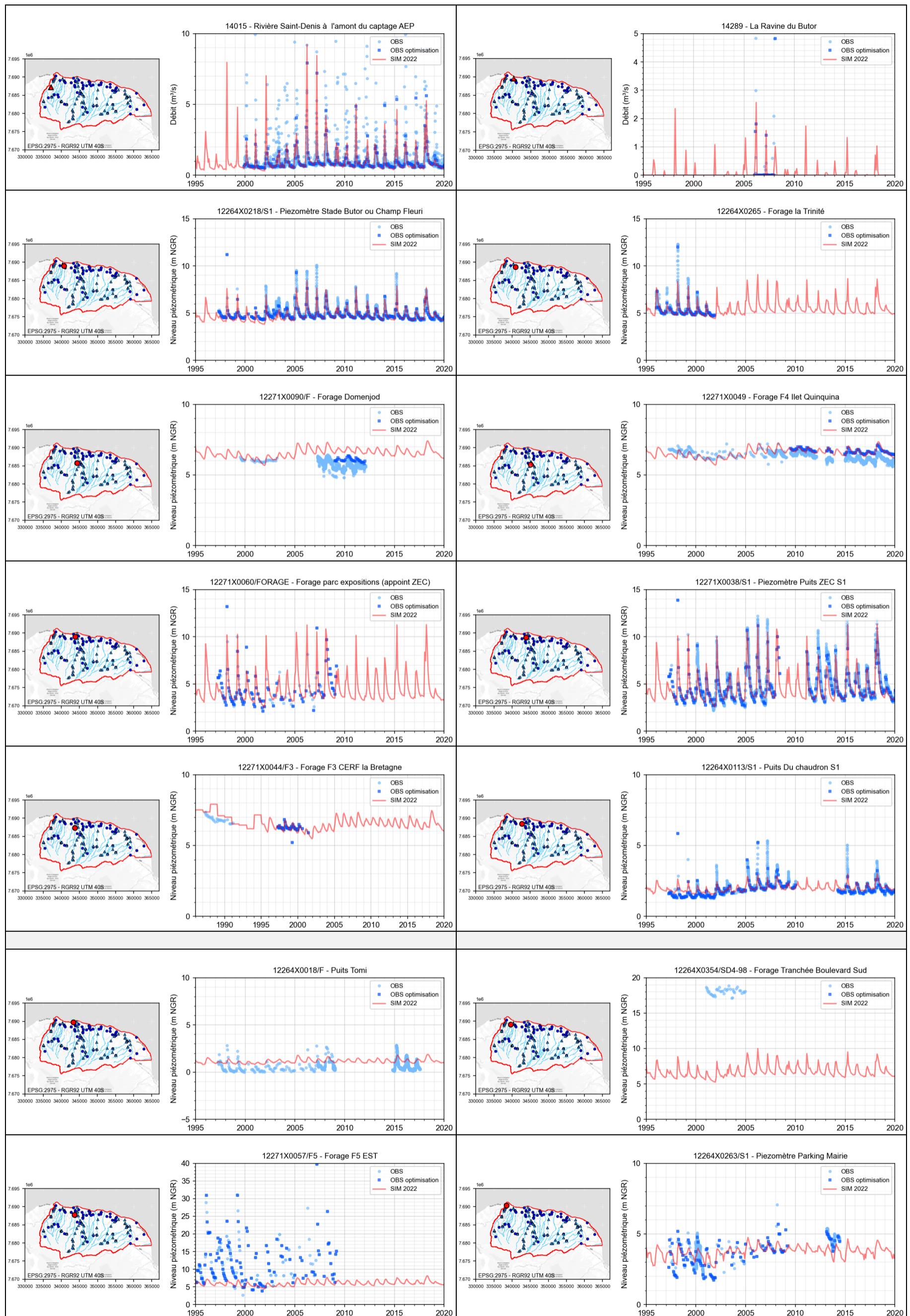


Figure 22 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Saint-Denis

ii. Secteur Sainte-Marie

La rivière des pluies, à cheval entre le secteur Saint-Denis et Sainte-Marie est suivie par deux stations hydrométriques (La Rivière des Pluies à l'aplomb du piton Tanan, code Office 14287 et La Rivière des Pluies au pont Domenjod, code Office 21101) et par des jaugeages réguliers depuis l'amont jusqu'à l'aval. On note que les débits aux deux stations sont globalement correctement reproduits par le modèle en terme de débit de base et de dynamique. Ce constat est également fait sur les jaugeages intermédiaires, renforçant la confiance dans les bilans hydroclimatiques réalisés sur ce secteur. A noter toutefois :

- des ruptures d'homogénéité dans les mesures des débits au pont Domenjod non reproduites par le modèle : c'est le cas par exemple des mesures des années 2015 et 2016, pour lesquelles la dynamique des débits ne reflètent pas les évolutions météorologiques, dynamique que le modèle ne parvient pas à reproduire alors qu'entre 2011 et 2015 et après 2016, les observations semblent plus cohérentes ;
- une relative sous-estimation des débits de crue en amont, du fait de la prise en compte des jaugeages ponctuels (montrant des débits moyens mensuels plus faibles) dans la calibration du modèle ainsi que les difficultés inhérentes à ce type de modèle hydrodynamique évoquées plus hauts (i.e. incertitudes sur la quantification des précipitations et pas de temps du modèle – mensuel - peu adapté à la représentation de ces épisodes ponctuels).

Le modèle parvient à également bien reproduire les rivières intermittentes comme la ravine Mère Canal suivie par une station hydrométrique à La Plaine des Fougères (code OFFICE 21201).

La piézométrie du secteur Sainte Marie proche du littoral est spécifique à deux titres : dans la suite, nous divisons le secteur de Sainte Marie en 2 sous-secteurs, l'un à l'est et l'autre à l'ouest pour détailler ces spécificités.

Sous-secteur Ouest : on note à l'ouest du secteur, une piézométrie particulièrement faible, indiquant des relations plus importantes avec l'océan qu'avec les apports amonts de la nappe régionale. Comme pour le cas évoqué précédemment du Puits Chaudron S1, le comportement de ce secteur semble dévier du comportement attendu du comportement de la nappe régionale si on se fie au modèle conceptuel présenté dans ce rapport : le cas illustrant ce phénomène sur le secteur ouest de Sainte-Marie est le forage F3 Duparc (12271X0059/F3) localisé à 1.7 km de l'océan mais mesurant des niveaux à peine au-dessus de 1 m NGR. L'analyse de la piézométrie des ouvrages à proximité semble montrer des gradients piézométriques également faibles dans une zone située à l'est de F3 Duparc, incluant le forage du Grand Prado (12271X0063/CERF, sur lequel des transmissivités de 3 m²/s ont été mesurées), le forage Le Verger (12271X0061), le Puits Barau (12271X0002), le forage P22 Les Cocos (12271X0066/P22) et le Puits Usine la Mare (12271X0001) : ces 4 derniers ouvrages sont situés sur un tronçon de 1.3 km le long de la Ravine des Figues mais montrent à la fin des années 1990 des charges quasiment identiques et donc un gradient hydraulique quasiment nul. A l'inverse, le forage F2 Gillot (12271X0058/F2), en aval hydraulique du forage F3 Duparc montre des niveaux supérieurs : ces observations montrent un fonctionnement hydrodynamique particulier résultant vraisemblablement d'hétérogénéités très fortes (drains, limites étanches), voire de nappes différentes.

A noter que cette analyse de la piézométrie locale à partir des chroniques à disposition est rendue difficile par des disparités entre les données mesurées dans les années 1990 et de nouvelles mesures réalisées en 2007 et 2008. Ces disparités, montrant une hausse des niveaux

piézométriques de plusieurs mètres, se produisent pour les ouvrages du Grand Prado, du Verger, F2 Gillot, et F6 Rivière des pluies. Ces ruptures de comportement observées ne semblent pas en adéquation avec les évolutions piézométriques des ouvrages bénéficiant de mesures sans interruption et situés à proximité (F3 Duparc, P22 Les Cocos) : même s'il n'est pas possible de l'affirmer avec certitude, il semble qu'au moins l'une des périodes de mesures soit donc sujette à caution. Les ouvrages présentant ces « sauts » piézométriques ne sont pas considérés dans la calibration du modèle.

Dans ce sous-secteur Ouest, les spécificités hydrogéologiques évoquées au-dessus ont comme conséquence un calage du modèle moins satisfaisant que dans le secteur de Saint Denis : par exemple, la dynamique observée des niveaux piézométriques au droit du forage F3 Duparc est plutôt bien reproduite mais, en l'état, le modèle ne parvient pas à reproduire les niveaux absolus très faibles observés. La question de la pertinence du modèle conceptuel (les forages captent la même nappe régionale) sur ce secteur se pose, même si les très faibles piézométries observées rendent également le modèle plus sensible aux éventuelles imprécisions de nivellement.

Sous-secteur Est : on note à l'est du secteur l'existence de deux nappes superposées, constatée par les forages n°1 et n°2 Ravine des Chèvres les Bas (resp. 12271X0162/PIEZ0 et 12271X0064/F) captant respectivement la nappe supérieure libre et une nappe inférieure captive. A noter le peu de relation au moins localement entre les deux nappes, la nappe inférieure ayant une charge hydraulique de 3 m plus élevée que la nappe supérieure. Aux alentours, l'analyse de la piézométrie tendrait à associer à la nappe supérieure les niveaux captés par les ouvrages Belle Eau P27 (12272X0095/P27), Forage Chemin Grimm (12272X0137/F) et le forage Les Cafés (12271X0065) et à la nappe inférieure ceux captés par les forages Bel Air (12272X0096/F) et S7 Convenance II (12271X0034/2-1-S7). Les relations entre ces nappes inférieure et supérieure et la nappe régionale restent inconnues.

Une question additionnelle concerne le pourquoi des niveaux piézométriques élevés mesurés au droit du forage n°2 Ravine des Chèvres les Bas (~4 m NGR à moins de 500 m de l'océan), ces niveaux suivant fidèlement les évolutions marégraphiques et montrant donc une connexion avec l'océan : une explication possible serait l'existence d'exutoires de cette nappe vers l'océan localisés en profondeur et non en surface (les exutoires en surface seraient associés à la nappe supérieure montrant des niveaux piézométriques en cohérence avec les niveaux mesurés au marégraphe). Les exutoires en profondeur impliqueraient une colonne d'eau salée importante, et la différence de densité entre l'eau douce et l'eau salée expliqueraient alors la différence de charge observée entre l'océan (charge d'eau salée) et la nappe inférieure (charge d'eau douce) : en guise d'ordre de grandeur, pour un exutoire localisé à 100 m de profondeur, une hauteur d'eau salée de 100 m correspond environ à une hauteur d'eau douce de 102.5 m. Cette différence associée à la distance entre ces exutoires et le forage seraient donc en mesure d'expliquer les charges élevées observées.

Cette analyse du secteur autour des forages de la Ravine des Chèvres les Bas montre la complexité de l'hydrodynamique locale : des nappes superposées s'établissent sans connaissance ni sur leurs extensions et plus généralement sur leur géométrie ni sur la relation de ces dernières avec la nappe dite régionale ; en outre, ces nappes semblent avoir des conditions aux limites bien particulières avec l'océan qui sont également inconnues.

Au final, sur ce sous-secteur Est de Sainte Marie, seuls des modèles fins locaux permettraient de représenter toutes les spécificités hydrologiques listées. Le modèle de la nappe régionale construit ici ne peut donc en l'état des connaissances reproduire fidèlement tous les niveaux piézométriques mesurés : ont été exclus de la calibration les ouvrages de la nappe inférieure indiquant des conditions aux limites inconnues et ne pouvant être intégrées au modèle (forage

n°2 Ravine des Chèvres les Bas et forage Bel Air). C'est donc la nappe supérieure qui est modélisée, avec une bonne reproduction générale des niveaux piézométriques des autres ouvrages (S7 Convenance II, Belle Eau P27, Forage Chemin Grimm, et forages n°1 Ravine des Chèvres les Bas). Le modèle numérique étant un outil évolutif, il pourra être mis à jour si de nouvelles connaissances permettent de définir un modèle conceptuel local.

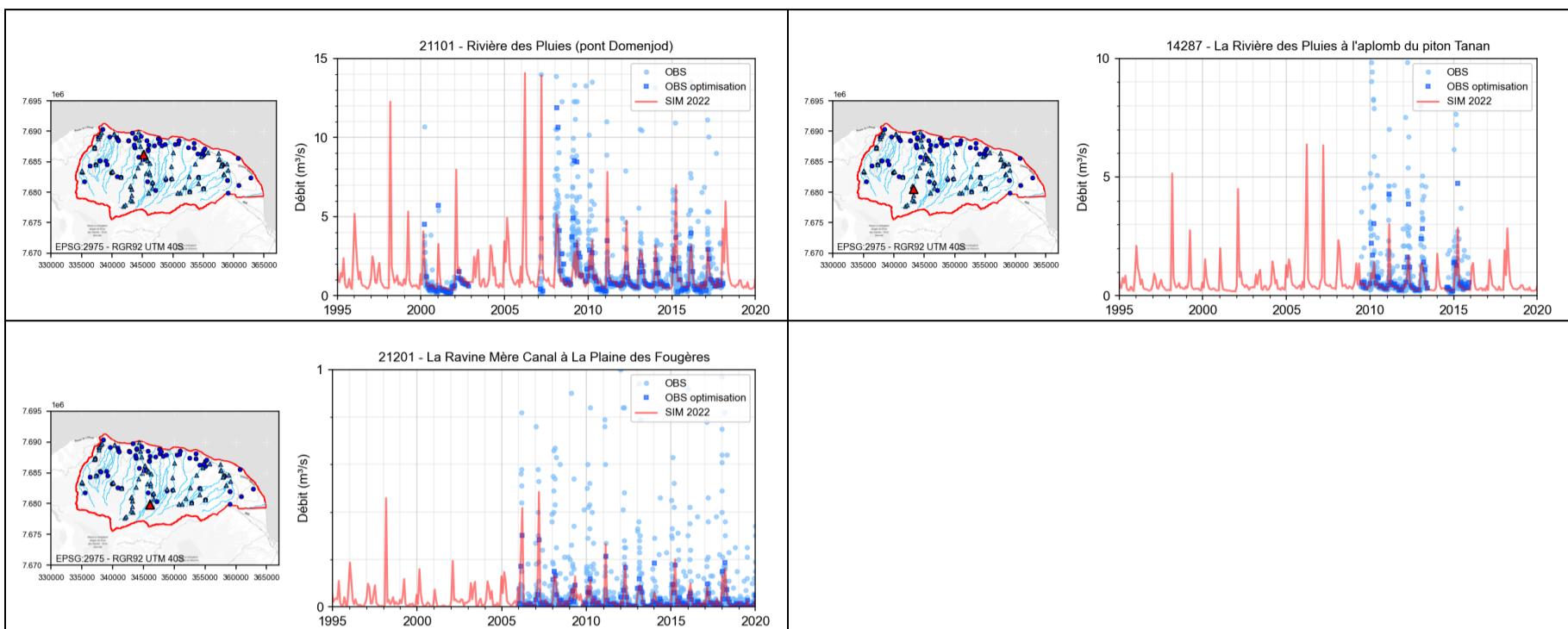


Figure 23 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : débits aux stations hydrométriques

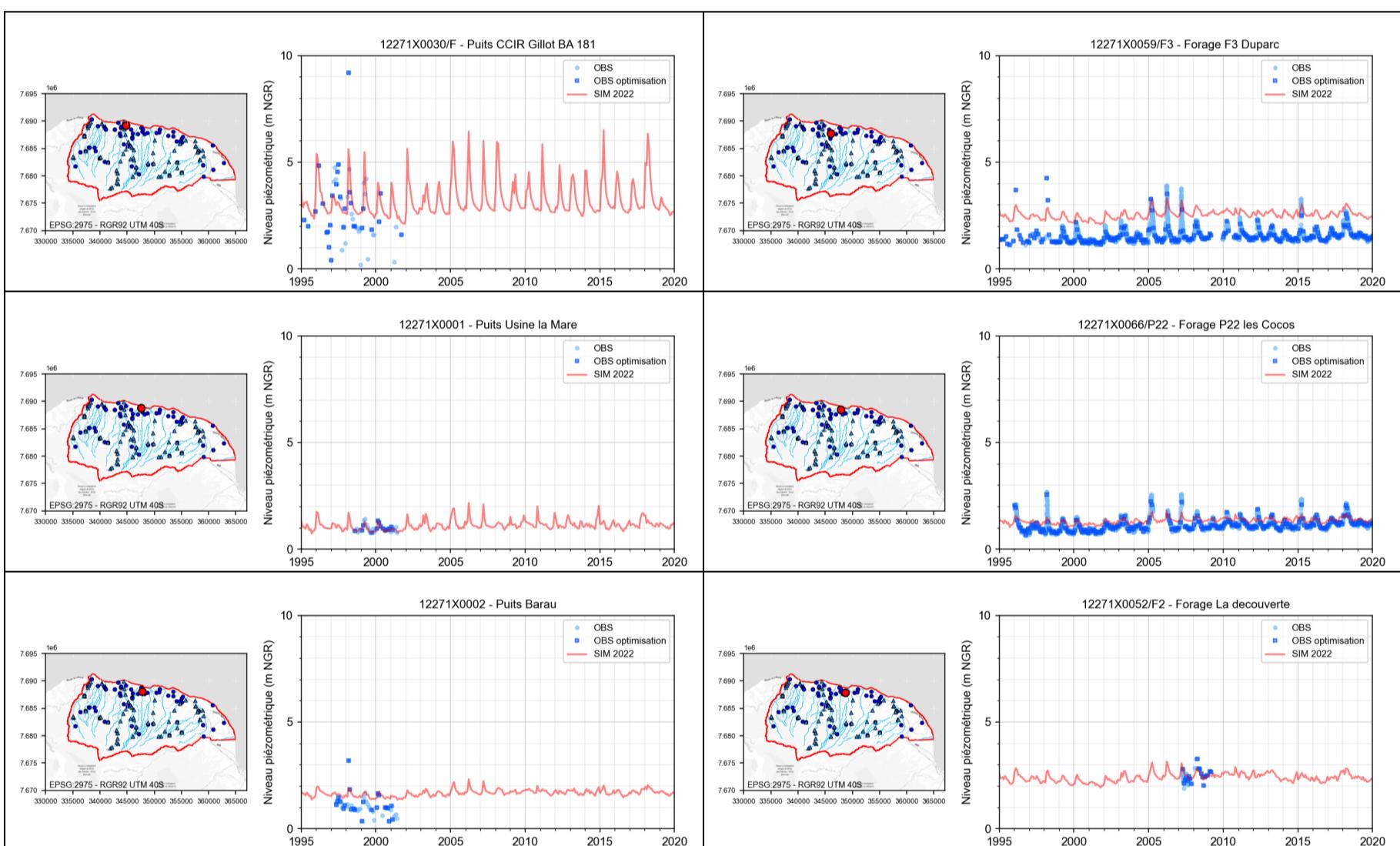


Figure 24 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézométrie dans le sous-secteur Ouest

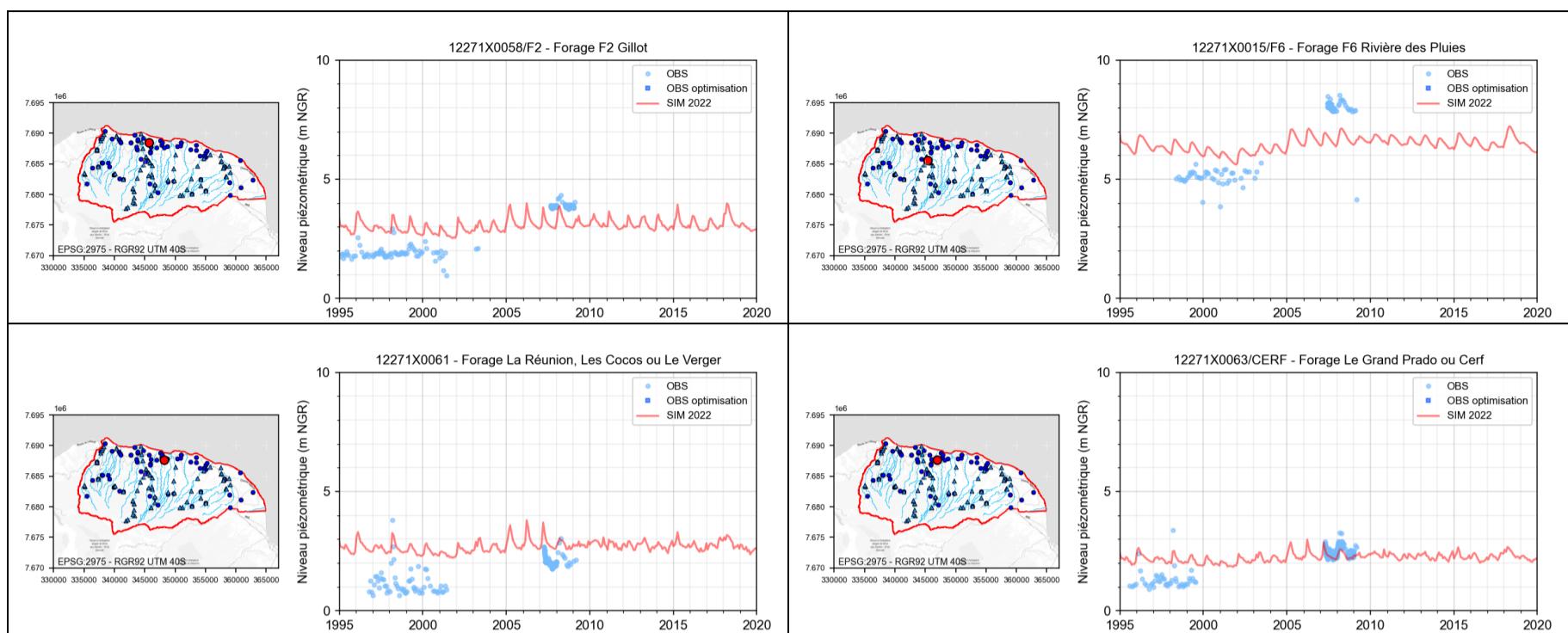


Figure 25 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézomètres présentant un saut piézométrique inexplicable

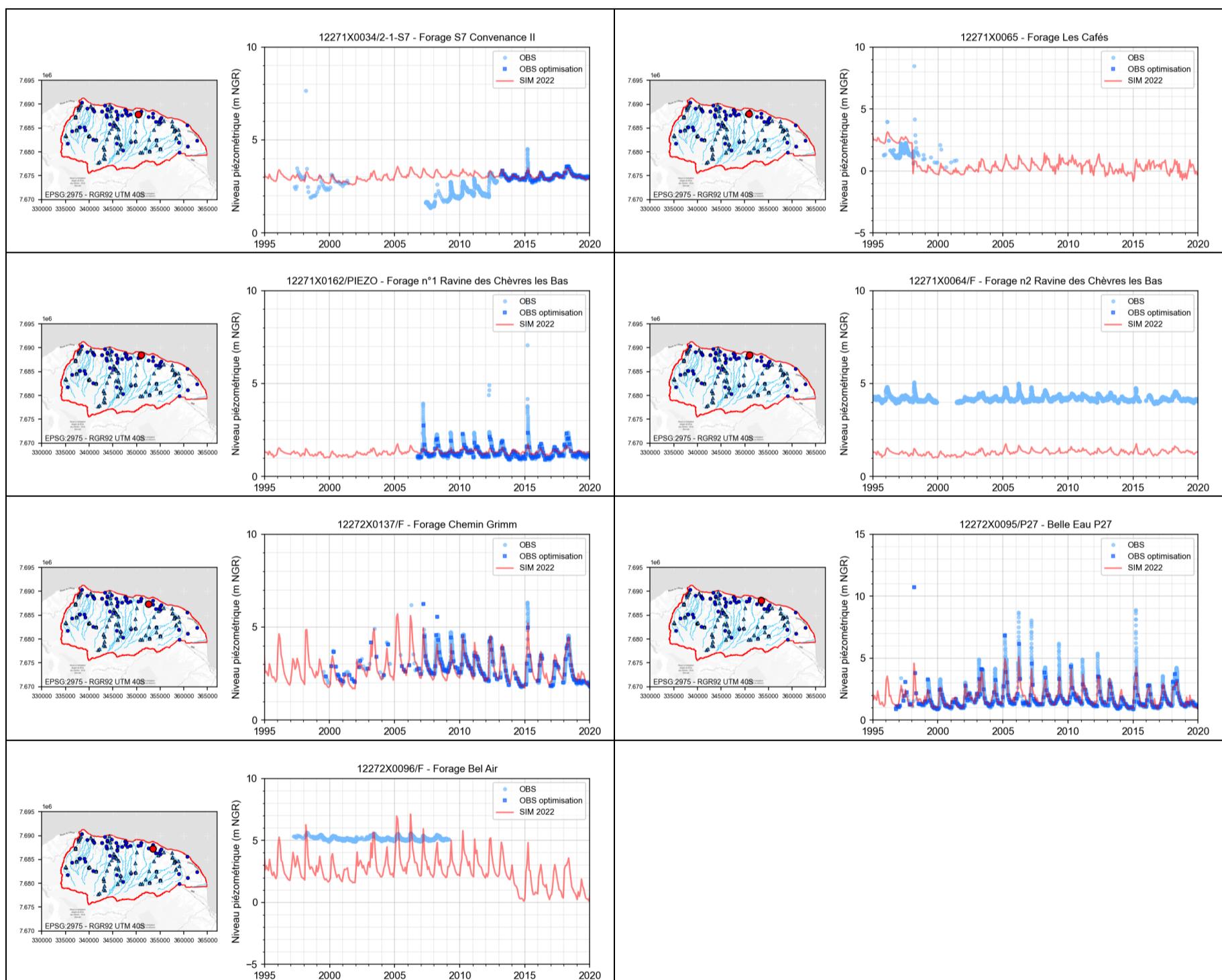


Figure 26 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Marie : piézométrie dans le sous-secteur Est

iii. Secteurs de Sainte-Suzanne et de Saint-André

Plusieurs stations hydrométriques permettent de suivre les deux cours d'eau du secteur :

- Sur la rivière Sainte-Suzanne : en amont de la confluence avec le Bras Laurent (21083), sur le bras Laurent en amont de la confluence (21062) et en amont de la cascade Niagara (22180) ;
- Sur la rivière Saint-Jean : au niveau du Grand Bras de la Grande Rivière Saint-Jean (22011), de la cascade Pichon (22181) et au niveau de la Petite-Rivière Saint-Jean (22182).

Tous les débits mesurés à ces stations hydrométriques sont très bien reproduits par le modèle. Seuls les débits du Bras Laurent en amont de la confluence sont surestimés, mais le problème semble local puisque cela reste sans conséquence sur les débits aval de la rivière Sainte Suzanne.

Les ouvrages piézométriques situés à proximité de Sainte Suzanne (Forages des Trois Frères – 12272X0072 ; Forage F3 Marenco – 12272X0052/2-2-F3 ; Puits SAFRER Cascade Niagara – 12272X0017/F ; 12272X0075/P1 Sainte Suzanne P1 et 12272X0076/P2 Sainte Suzanne P2) captent des niveaux aux comportements proches mais plus inertIELS en amont qu'en aval. Le modèle parvient correctement à reproduire les niveaux des forages amont des Trois Frères et de Marenco et du puits SAFRER Cascade Niagara : afin d'obtenir ces niveaux inertIELS, il est nécessaire d'intégrer dans le modèle une zone de plus faible perméabilité entre ce secteur et le secteur Est de Sainte Marie, les ouvrages étant relativement proches du Forage Chemin Grimm montrant une toute autre dynamique : cette observation vient confirmer les hétérogénéités de comportements évoqués plus haut. Une anomalie piézométrique est notée entre les ouvrages Sainte-Suzanne P1 et P2 (en aval hydraulique de P1) avec plus de 2 m de variation de charge pour 300 m de distance entre les ouvrages. De plus, l'ouvrage P2 montre des niveaux piézométriques régulièrement inférieurs au niveau de l'océan, ce qui n'est pas modélisable en l'état. Cet ouvrage a donc été exclu de la calibration.

Plus à l'Est, deux nappes superposées s'établissent progressivement et le même mode de fonctionnement semble se produire que celui décrit concernant les nappes captées par le forage Ravine des Chèvres Les Bas sur le secteur de Sainte Marie. Aucun ouvrage ne capte les deux formations mais il est possible de comparer les niveaux de deux ouvrages l'un profond captant une nappe inférieure qui pourrait s'apparenter à la nappe de base (forage P14 Champ Borne 2 ; 12273X0009/P14) et l'autre captant la formation alluvionnaire perchée de surface (Puits Robert Cambuston – 12272X0001) tous deux situés dans une configuration relativement similaire (situés à moins d'1 km de la côte). Les niveaux du puits Robert Cambuston montrent une dynamique plus rapide que ceux de l'ouvrage profond et le puits profond enregistre des niveaux piézométriques 6 m plus hauts tout en étant corrélés aux effets de marée. Ces charges élevées traduisent vraisemblablement les conditions aux limites bien particulières de la nappe inférieure, avec des exutoires potentiellement profonds et éloignés de la côte pour expliquer de telles valeurs de niveaux piézométriques tout en assurant une connexion avec l'océan. Comme pour le secteur de la Ravine des Chèvres, la modélisation fine des niveaux piézométriques du secteur nécessiterait *a minima* des éléments sur la géométrie des nappes superposées et sur les conditions aux limites à appliquer : ce sont les niveaux de la nappe supérieure qui ont été modélisés puisque c'est la seule dont les conditions aux limites sont connues. Pour une modélisation locale plus fine de ce secteur de St André, le modèle pourrait éventuellement être mis à jour dans une version ultérieure.

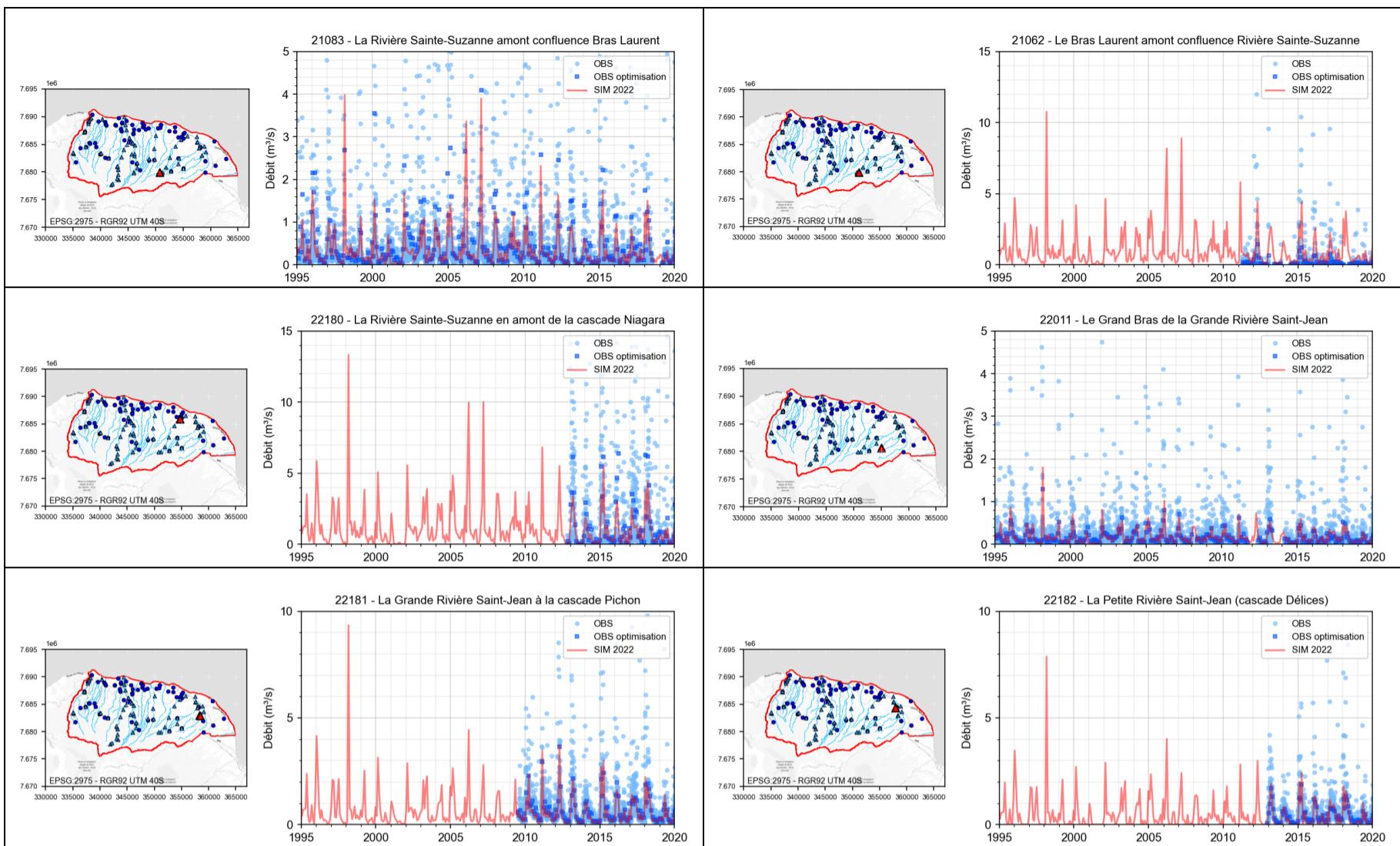


Figure 27 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Suzanne / Saint-André : débits aux stations hydrométriques

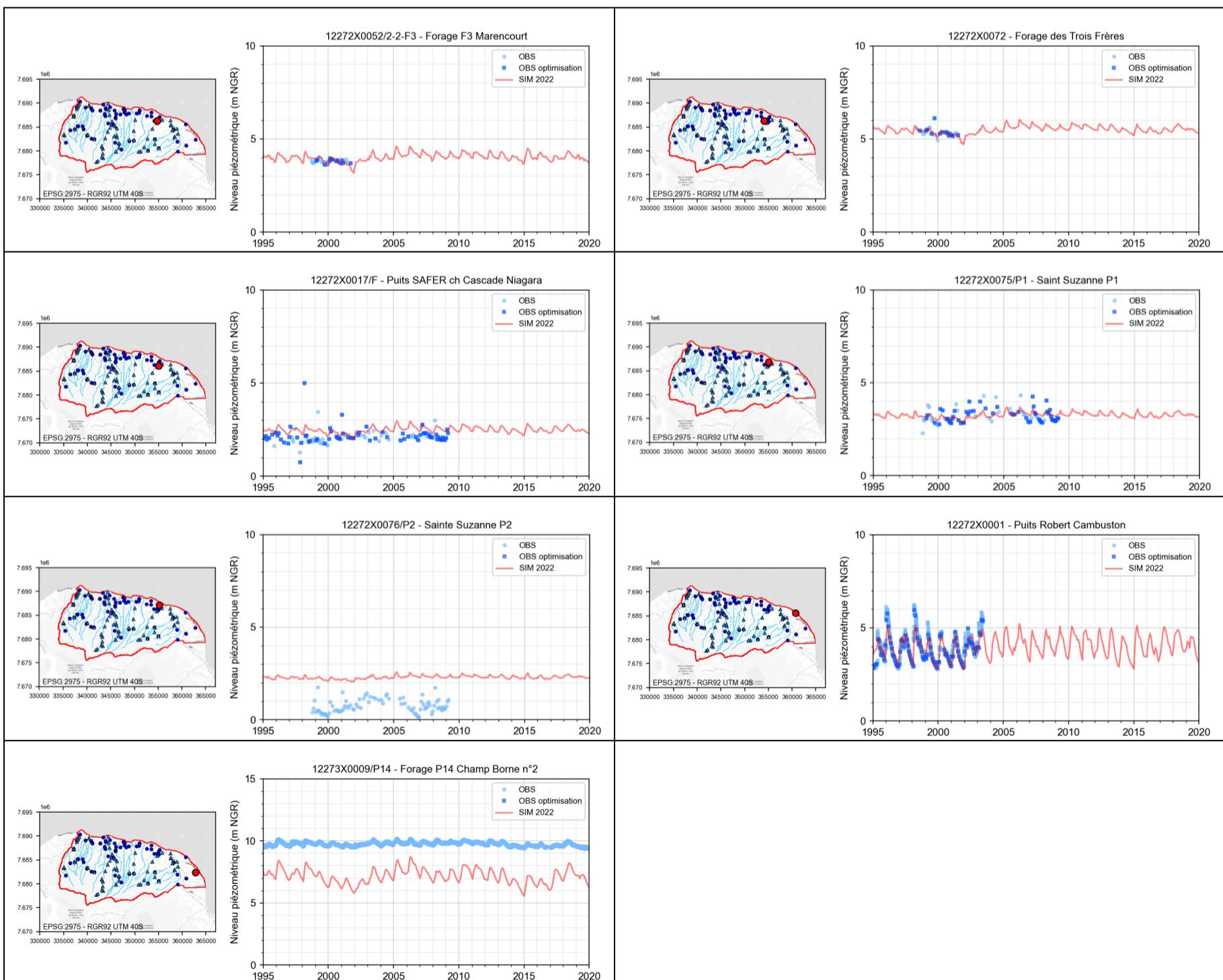


Figure 28 : Résultats du modèle calibré sur le secteur de Sainte-Suzanne / Saint-André

5.2.2. Cartes piézométriques

Différentes cartes piézométriques du secteur ont été levées à différentes dates, et peuvent être comparées aux cartes piézométriques calculées par le modèle à ces mêmes dates. Trois comparaisons ont ainsi été réalisées, à partir de cartes piézométriques de 1998 sur les secteurs de Saint-Denis et Sainte-Marie (Chemin, 1999), de 1998 (hautes eaux et basses eaux) sur le secteur de Sainte-Marie (ORE, 1998), et une carte de décembre 2010 sur la partie aval de la rivière des pluies (Office de l'Eau, 2012). Les comparaisons entre les cartes levées et les cartes obtenues à l'aide du modèle hydrodynamique sont présentées à la figure 29. On note une bonne reproduction générale des isopièzes, avec en particulier :

- Une confirmation des « hétérogénéités de piézométrie » le long du littoral avec une alternance visible de zones à plus ou moins fort gradient hydraulique (carte A).
- Une confirmation de la difficulté à bien caractériser la piézométrie du secteur de Ste-Marie visible sur les figures B et C : on note en effet des esquisses piézométriques discontinues devant la complexité à bien identifier les lignes de courant, et des esquisses piézométriques ne suivant que très peu la ligne littorale et dénotant des hétérogénéités de transmissivité vraisemblablement importantes.
- Une confirmation de l'influence, en hautes eaux, de certaines rivières dont la rivière des pluies traduisant l'infiltration importante des eaux de surface lors de cette période (figure B).

5.2.3. Transmissivités estimées

Il est souvent délicat de comparer les transmissivités d'un modèle hydrodynamique aux mesures de transmissivité issus d'essais de pompage, notamment du fait 1) de la différence des échelles auxquelles sont pertinentes ces deux types de transmissivité et 2) de l'impact des hétérogénéités sur les valeurs mesurées en pompage (voir par exemple Wu et al., 2005 sur ce sujet).

Toutefois, la première phase de l'étude (Laurent et Aunay, 2022) a montré qu'il existait sur le secteur d'étude un nombre relativement important de valeurs de transmissivité et que la plupart de ces transmissivités étaient particulièrement importantes (la plus forte, mesurée au droit du forage du Grand Prado, était de $3.4 \text{ m}^2/\text{s}$), mais que des transmissivités inférieures de plusieurs ordres de grandeur avaient également été notées (au forage F5-Est, elle était par exemple de $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$).

Il semble donc intéressant, toujours dans un souci de vérifier la cohérence du modèle hydrodynamique, de comparer ces valeurs avec les transmissivités estimées par ce modèle, non pas pour vérifier que les deux sont identiques, mais pour s'assurer 1) que les mêmes ordres de grandeur sont obtenus et 2) qu'une variabilité également similaire à celle observée était bien identifiée par le modèle. La figure 30 montre cette comparaison et confirme le bon comportement du modèle sur ces deux aspects. Les seules incohérences notables se situent à l'extrême Est du modèle (secteur de Ste-Suzanne), là où aucun ouvrage ne captant la nappe de base n'a pu être utilisé pour calibrer le modèle, et là où l'incertitude est donc importante (voir la section 5.4.2 où les incertitudes sont discutées).

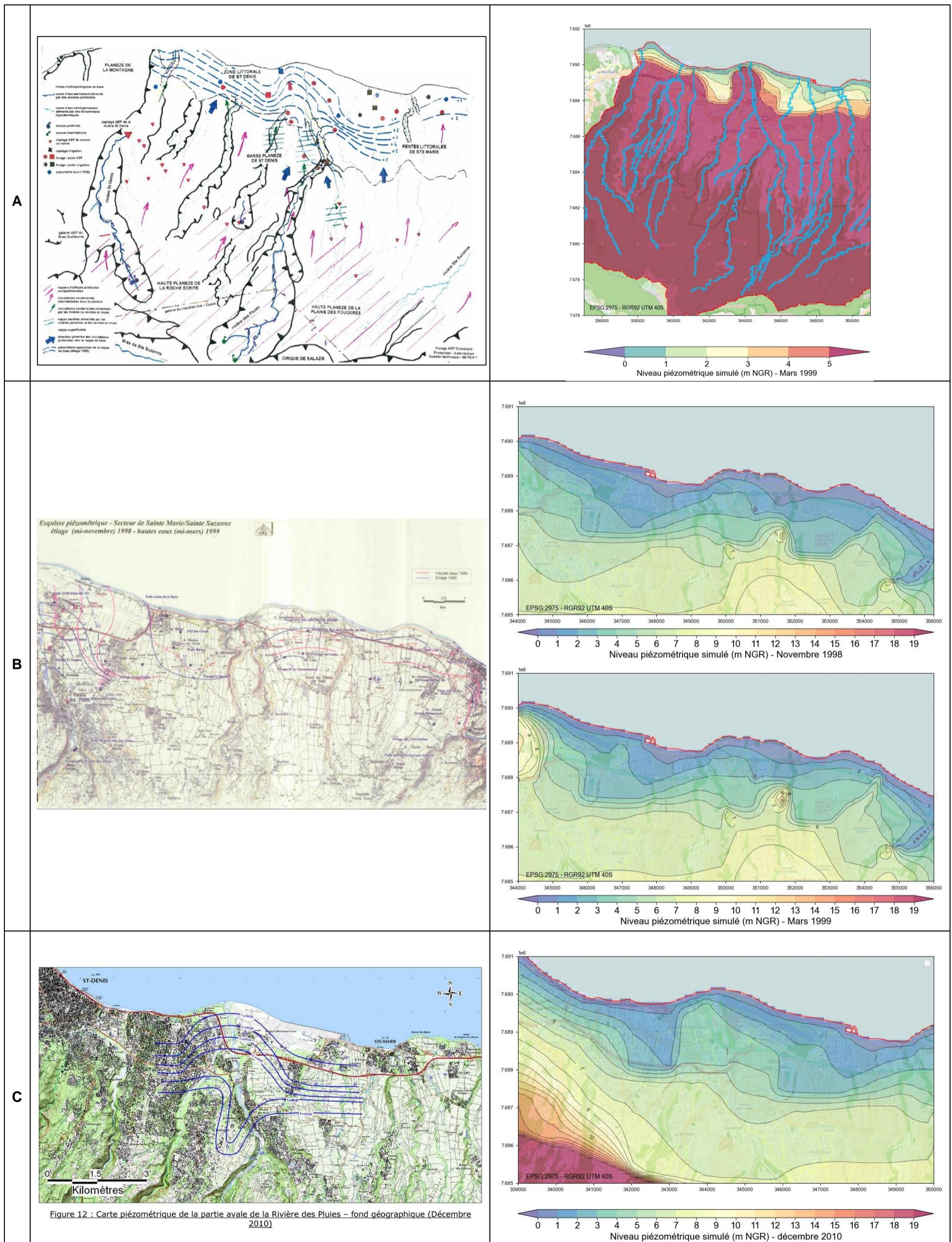


Figure 29 : Comparaison entre les résultats du modèle et les cartes piézométriques levées [A] en 1998 sur les secteurs de Saint-Denis et Sainte-Marie (Chemin, 1999), [B] en 1998 (hautes eaux et basses eaux) sur le secteur de Sainte-Marie (ORE, 1998), et [C] une carte de décembre 2010 sur la partie aval de la rivière des pluies (Office de l'Eau, 2012).

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarios de gestion de la ressource en eau

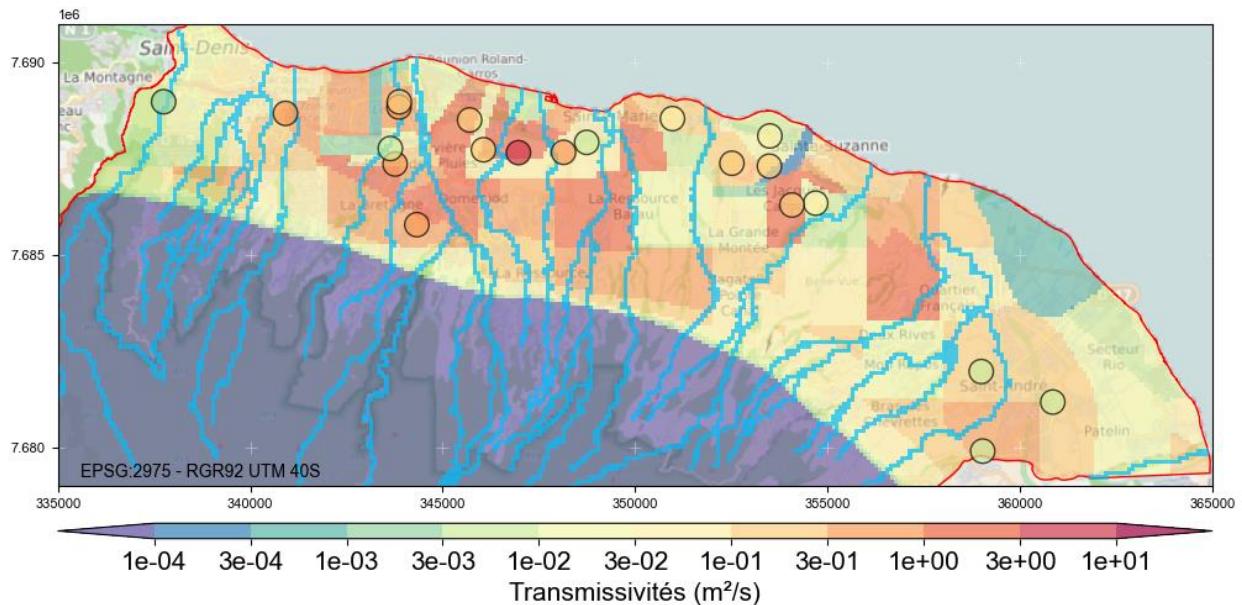


Figure 30 : Transmissivités estimées et introduites dans le modèle calibré.

Les points correspondent aux transmissivités estimées par pompage d'essais (nb. la zone bleue correspond à la zone où aucune nappe ne s'établit au-dessus du substratum de la formation aquifère considérée, voir section 4.2.1)

5.3. PREMIERE UTILISATION DU MODELE : BILAN HYDRAULIQUE ET TEST BALANCE SIMULE

La calibration du modèle présentée dans les sections précédentes montre que la piézométrie de la nappe régionale est au global bien reproduite, sauf au droit de configurations hydrogéologiques très particulières, où des hétérogénéités semblent mettre à mal localement le modèle conceptuel d'une nappe régionale en continuité depuis les hauts jusqu'à l'océan. Malgré la complexité du réseau hydrographique (alimentation via des nappes perchées, infiltration vers la nappe, etc.), les débits des cours d'eau semblent être également correctement reproduits, renforçant la confiance dans le modèle.

Une fois calibré, le modèle peut donc être utilisé à différentes fins. L'une d'entre elles est la fourniture de bilans hydrologiques permettant d'éclairer le fonctionnement de l'hydrosystème. Ces bilans sont proposés à l'échelle du modèle et à l'échelle de la MESO FRLG101 sur le secteur d'intérêt de Saint-Denis / Sainte Marie (Figure 31).

A l'échelle du modèle, les bilans hydrauliques permettent d'évaluer les quantités d'eau apportées au modèle par infiltration (incluant l'infiltration via les cours d'eau), et les quantités d'eau exportées soit via l'exutoire du modèle que constitue l'océan, soit via les prélèvements. Les variations de stockage et la variation du stock en eau souterraine depuis début 2000 montrent que les quantités d'eau souterraine du secteur évoluent au gré des successions d'années plus sèches ou plus humides, sans qu'aucune tendance ne se dégage depuis les deux dernières décennies.

A l'échelle du secteur Saint-Denis / Sainte-Marie de la masse d'eau FRLG101, les alimentations sont principalement dues à l'arrivée d'eau depuis l'amont de cette zone et à l'infiltration des cours d'eau en cohérence avec le modèle conceptuel sous-jacent. On voit une certaine inertie de l'évolution du stock de cette zone, ce qui permet d'expliquer la variation des niveaux piézométriques au droit des ouvrages dits « inertiel ».

Ces bilans permettent également de calculer la proportion des prélèvements en eau souterraine au regard des différents apports du secteur (apports amont, infiltration par les rivières et hors rivières) : on voit que sur le secteur d'intérêt, ce ratio est relativement stable entre 2000 et 2020 et avoisine les 5 % en moyenne. La différence avec l'état des lieux 2019 (Office de l'eau) qui proposait un ratio de 9% s'explique par des méthodes de calcul différentes (approche basée sur des estimations de la recharge vs. approche numérique). La figure 32 permet également de synthétiser annuellement à l'échelle du modèle et à celle de la zone d'intérêt les prélèvements en eau souterraine et en eau de surface, ainsi que la « recharge » (intégrant les échanges avec les rivières et les apports amont) calculés par le modèle.

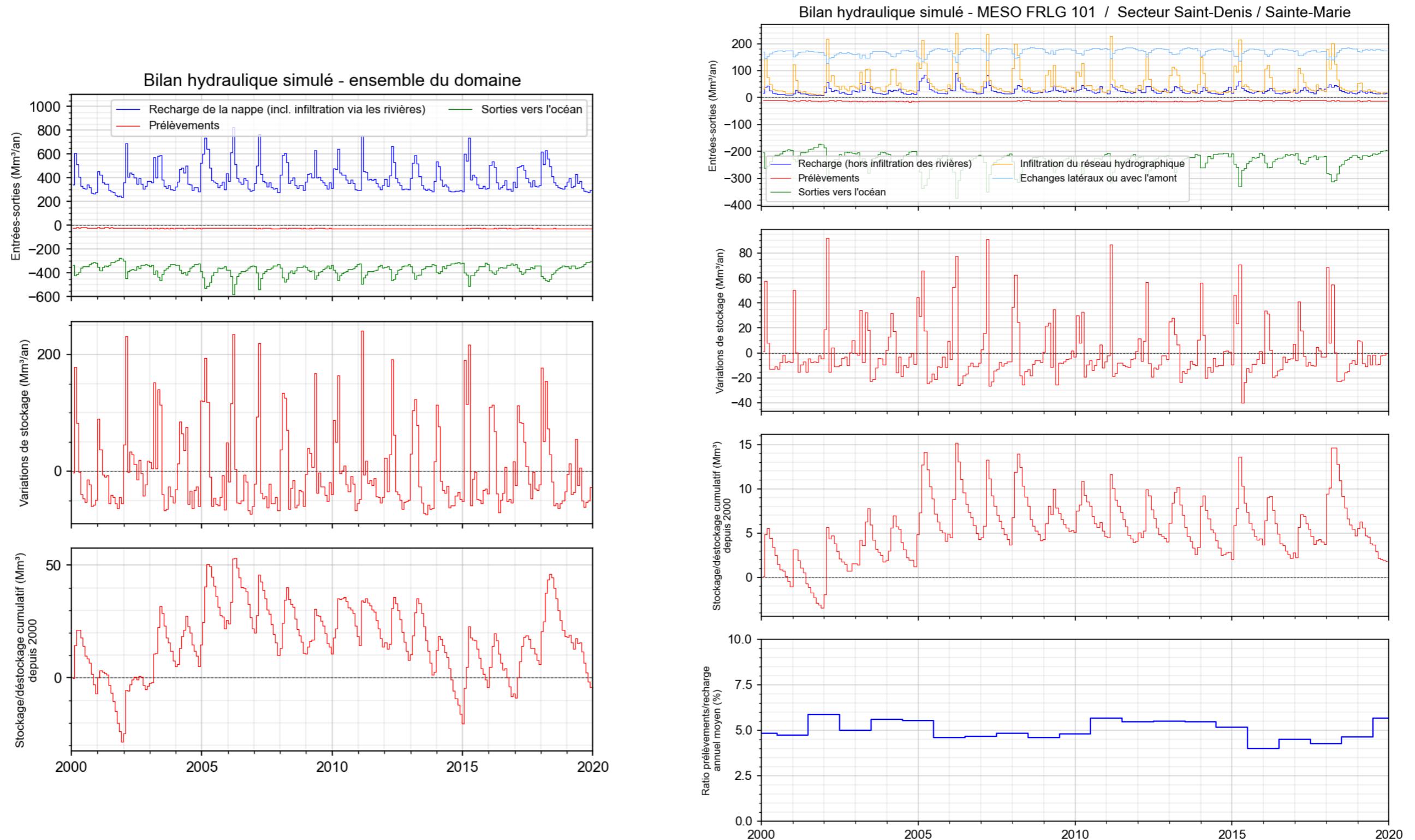


Figure 31 : Bilans hydrauliques issus du modèle calibré : à gauche, à l'échelle de l'emprise du modèle, à droite à l'échelle de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie
 Le stockage/déstockage est un paramètre corrélé à l'alternance des cycles plus ou moins pluvieux. Le système est inertiel vers l'amont (impact tamponné des pluies) et plus réactif dans les bas.

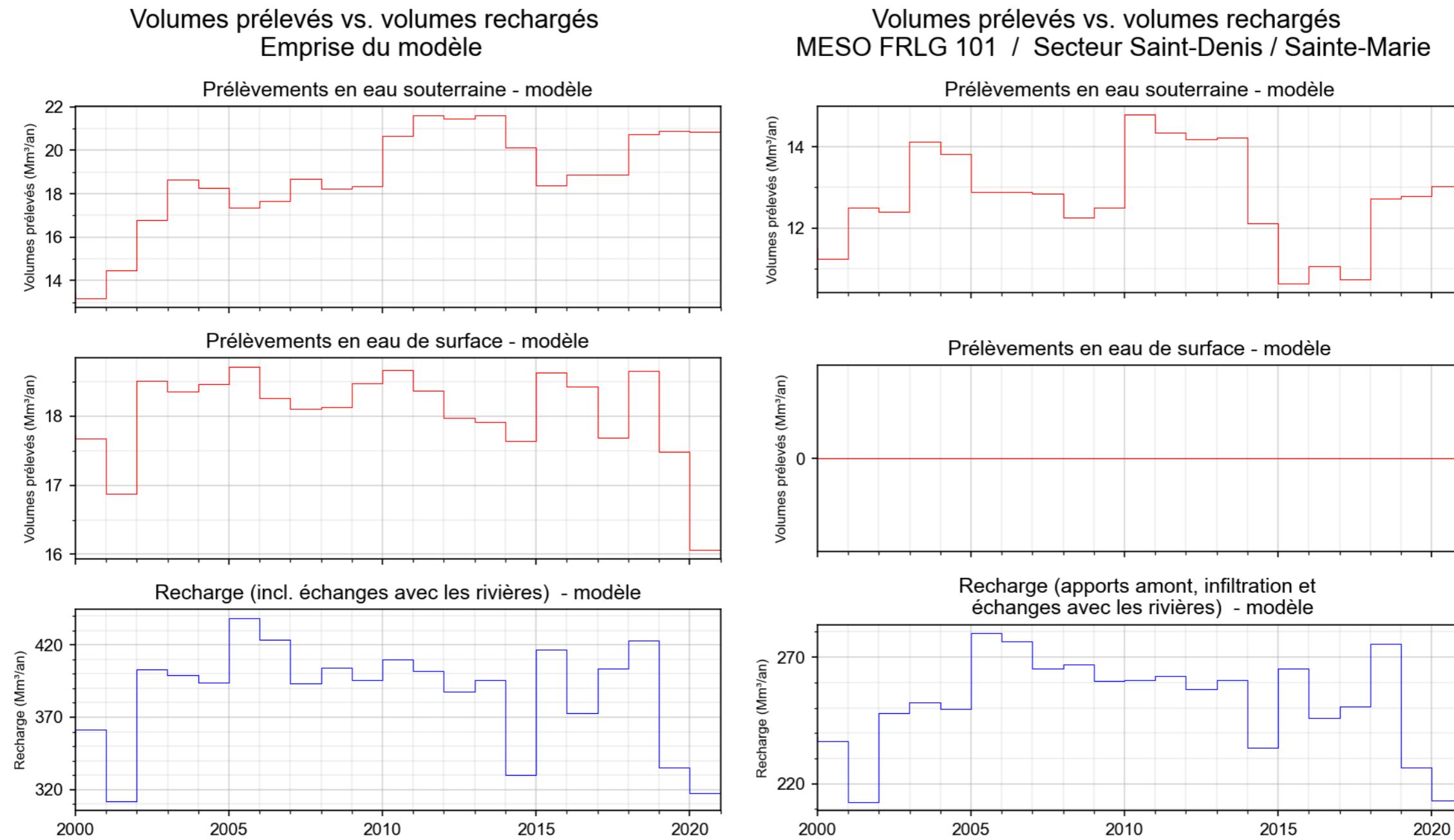


Figure 32 : Volumes prélevés et volumes « rechargés » calculé par le modèle au pas de temps annuel
 A gauche, à l'échelle de l'emprise du modèle.
 A droite à l'échelle du secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie de la MESO FRLG101.

5.4. ANALYSES DE SENSIBILITE – INCERTITUDES PARAMETRIQUES

Toute tentative de reproduire les phénomènes naturels s'accompagne inévitablement d'incertitudes et les modèles hydrogéologiques n'y font pas exception. Dans ce paragraphe, on s'attache à estimer la sensibilité du modèle aux paramètres issus du calage et à évaluer les erreurs de modélisations associées aux variables simulées.

5.4.1. Méthode

On peut catégoriser les principales sources d'erreurs et d'incertitudes dans les modèles hydrogéologiques de la manière suivante (Middlemis *et al.*, 2019) :

- **Les incertitudes structurelles/conceptuelles**, qui regroupent l'ensemble des hypothèses ayant conduit au modèle conceptuel : les processus hydrogéologiques pris en compte, la géométrie du réservoir aquifère, le rôle des discontinuités, les limites d'alimentation, de drainage, etc. ;
- **Les incertitudes de paramétrisation du modèle**, qui désignent les erreurs liées à l'ensemble des paramètres appliqués au modèle : la discréétisation spatiale et temporelle, les propriétés hydrogéologiques choisies (perméabilité, emmagasinement, etc.), les données d'entrée (recharge, prélèvements) ;
- **Les erreurs de mesure**, liées comme leurs noms l'indiquent aux erreurs de mesure sur la piézométrie, les débits de rivières, les prélèvements, etc. ;
- **Les incertitudes liées aux scénarios, aux projections**, correspondantes aux incertitudes relatives aux conditions futures, aux changement des conditions aux limites (par ex : changement climatique, usages des sols, etc.).

On évalue dans ce cas les **incertitudes de paramétrisation du modèle** : les modèles hydrogéologiques sont fondamentalement non-uniques (Anderson *et al.*, 2015) et le modèle calé n'est qu'une expression d'un ensemble de plusieurs modèles possibles (tout en notant que le processus de calage présenté plus haut conduit en théorie à l'obtention d'un modèle où les erreurs possibles sont les plus réduites). En particulier, seules les incertitudes sur la perméabilité, l'emmagasinement de l'aquifère et des perméabilités en rivière, sont étudiées.

L'analyse d'incertitude sur les paramètres du modèle est menée selon une approche de type Monte-Carlo basée sur la méthode **Iterative Ensemble Smoother** (IES) implémentée dans l'outil Pest++ (White, 2018 ; White *et al.* 2020) et appliquée au modèle Marthe. Cette analyse est menée selon les étapes suivantes :

- 500 ensembles de paramètres sont aléatoirement échantillonnés en supposant une distribution gaussienne de chacun des paramètres du modèle, centrée sur des valeurs a priori. Ces paramètres correspondent à la perméabilité et l'emmagasinement par zone homogène (pour rappel, la distribution des zones homogènes est indiquée § 5.1 – p. 36), la perméabilité aval des rivières, et le temps de parcours dans la zone non-saturée. Cela correspond à un jeu initial de 500 x 291 paramètres ;
- Les 500 ensembles de paramètres sont ensuite réajustés pour reproduire au mieux les observations sur la période de calage, en utilisant une forme « lissée » de la formulation Gauss-Levenberg-Marquardt (§ 5.1 – p. 36). Cette opération est réalisée itérativement.

Sur les 500 ensembles de paramètres initiaux, tous ne permettent pas d'obtenir un calage satisfaisant et ceux-ci sont retirés de l'analyse ;

- Au terme des itérations, on obtient plus de 200 ensembles de paramètres contraints aux observations, qui représentent autant de modèles possibles que l'on peut évaluer par la suite.

5.4.2. Résultats

Au terme de 5 itérations IES (et plus de 2 000 simulations), on obtient 241 ensembles de paramètres qui permettent de reproduire les observations disponibles (Figure 33). Les niveaux piézométriques simulés pour ces ensembles sont illustrés pour deux piézomètres à la figure 34.

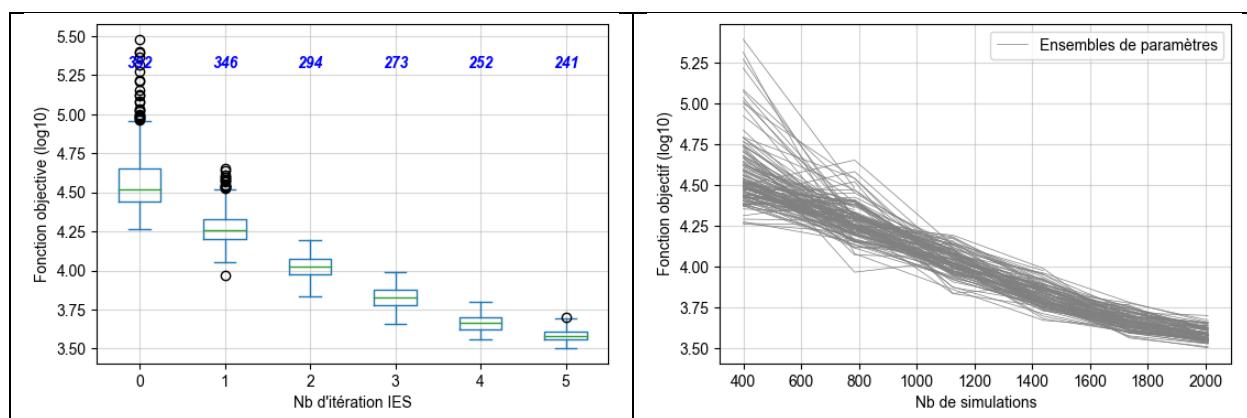


Figure 33 : Fonction objectif obtenue par itérations (gauche) et nombre de simulations (droite).
 A gauche, les chiffres bleus indiquent le nombre d'ensemble de paramètres résultants.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau

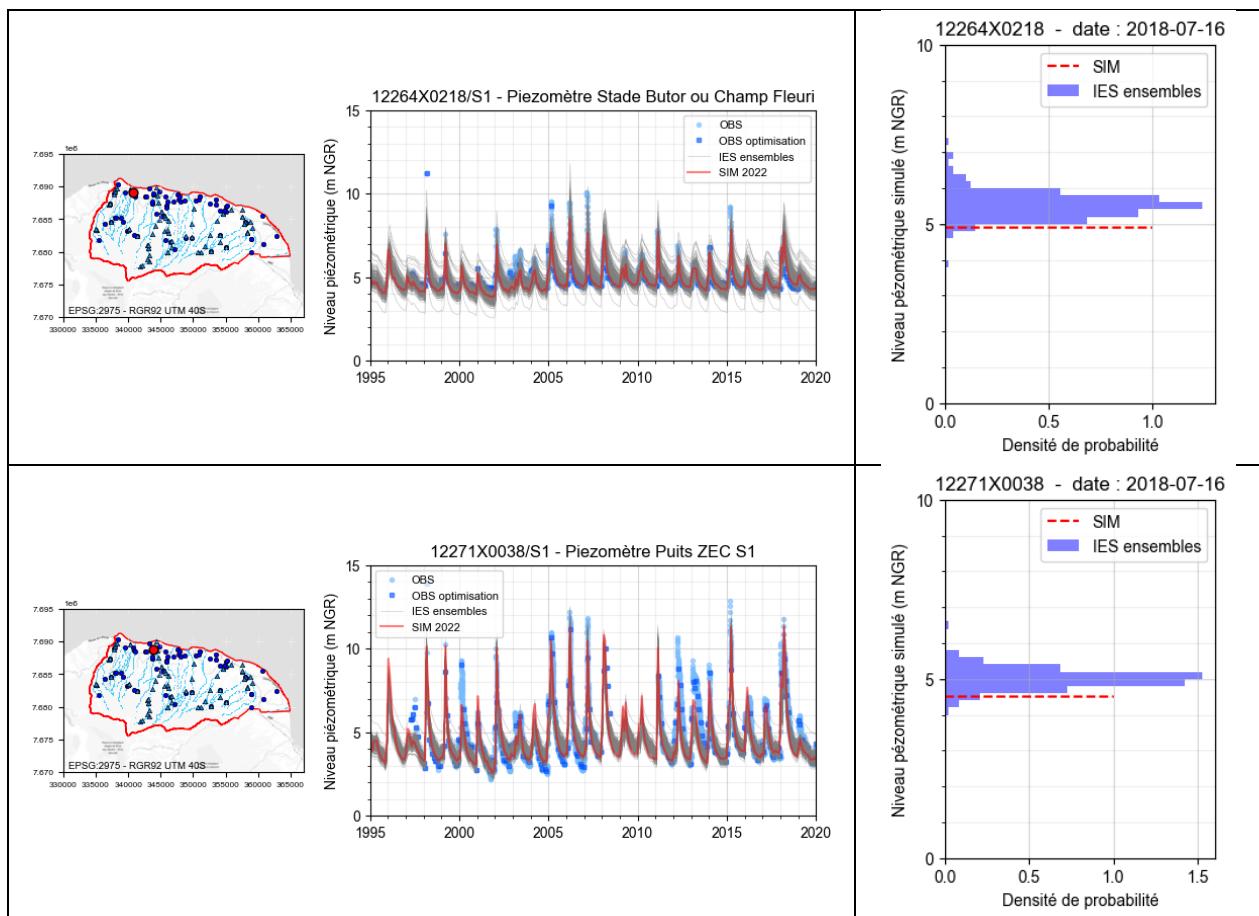


Figure 34 : Niveaux piézométriques simulés pour chacun des 241 ensembles de paramètres (gauche) et leur densité de distribution pour un pas de temps donné (droite).
Le modèle calé est indiqué en rouge.

A partir des ensembles de paramètres obtenus, on peut alors déterminer des écart-types de perméabilités et d'emmagasinement (Figure 35) ; ceux-ci traduisent directement la sensibilité des paramètres du modèle aux observations : ceux avec un écart-type élevé correspondent à des paramètres moins sensibles que ceux avec un écart-type faible, pour représenter les observations disponibles. En général, les secteurs avec peu de données d'observations ont des paramètres avec des écarts-types plus élevés car non contraints par calage.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarii de gestion de la ressource en eau

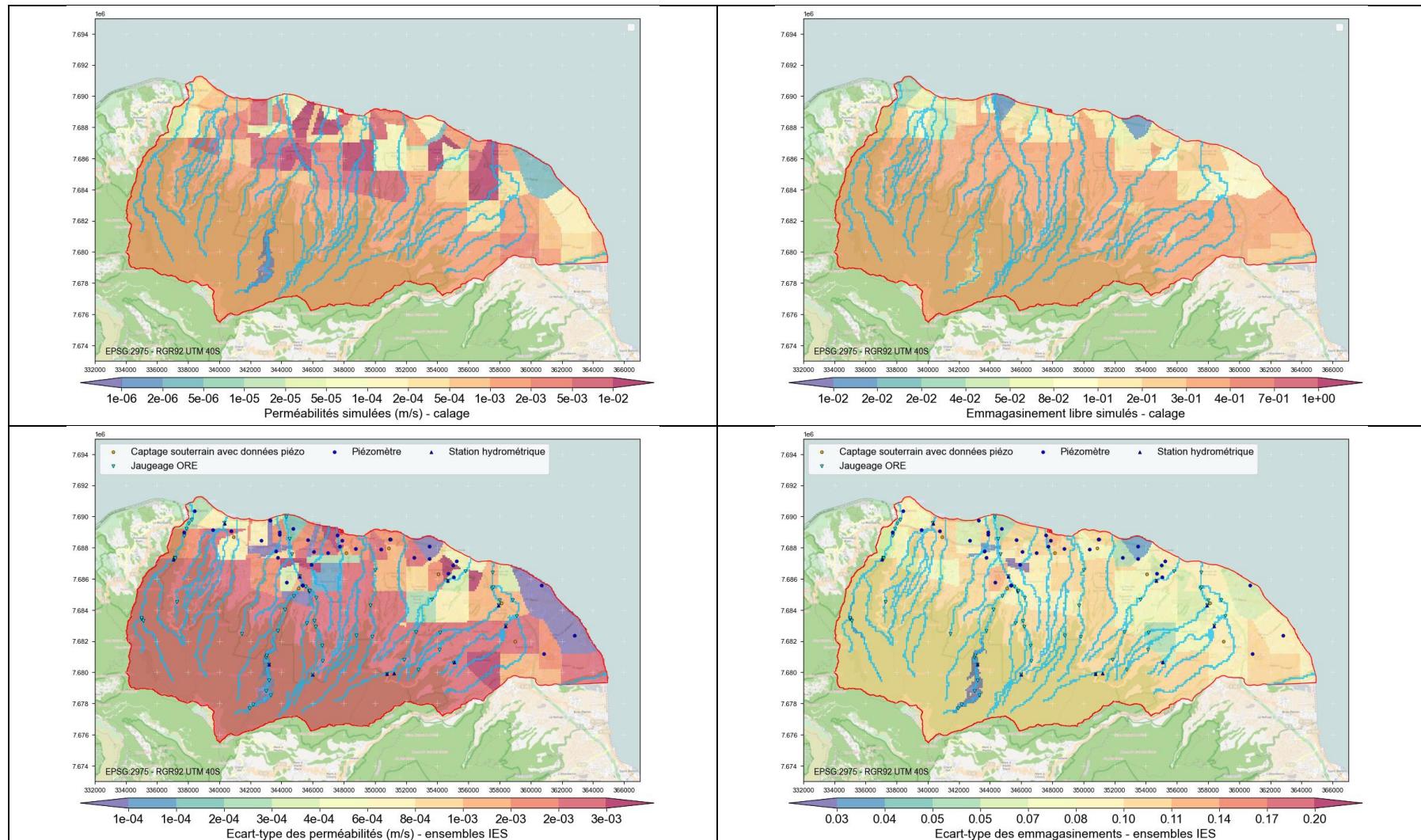


Figure 35 : Carte des perméabilités simulées issues du calage (en haut à gauche) et écart-type des perméabilités (en bas à gauche) des 241 ensembles de paramètres déterminés par IES. Carte des emmagasainements simulés par calage (en haut à droite) et écart-type des emmagasainements déterminés par IES (en bas à droite)

Enfin, ces jeux de paramètres permettent d'évaluer l'incertitude du modèle sur les variables simulées d'intérêt. C'est ce qui peut s'appeler la propagation d'incertitudes. A ce stade de l'étude, il semble intéressant d'évaluer l'incertitude associée à deux variables d'intérêt : la piézométrie et le bilan hydraulique. Dans la suite du projet, d'autres variables pourront également faire l'objet d'une telle analyse.

La figure 36 présente la charge piézométrique pour le mois de décembre 2020 et l'écart-type des charges simulées pour les 241 ensembles de paramètres déterminés : dans les secteurs où les observations sont nombreuses et contraignent suffisamment les paramètres du modèle, l'écart-type y est faible, inférieur à 1 m. A l'inverse, dans les secteurs avec peu de données, l'écart-type peut être largement supérieur à 5 m.

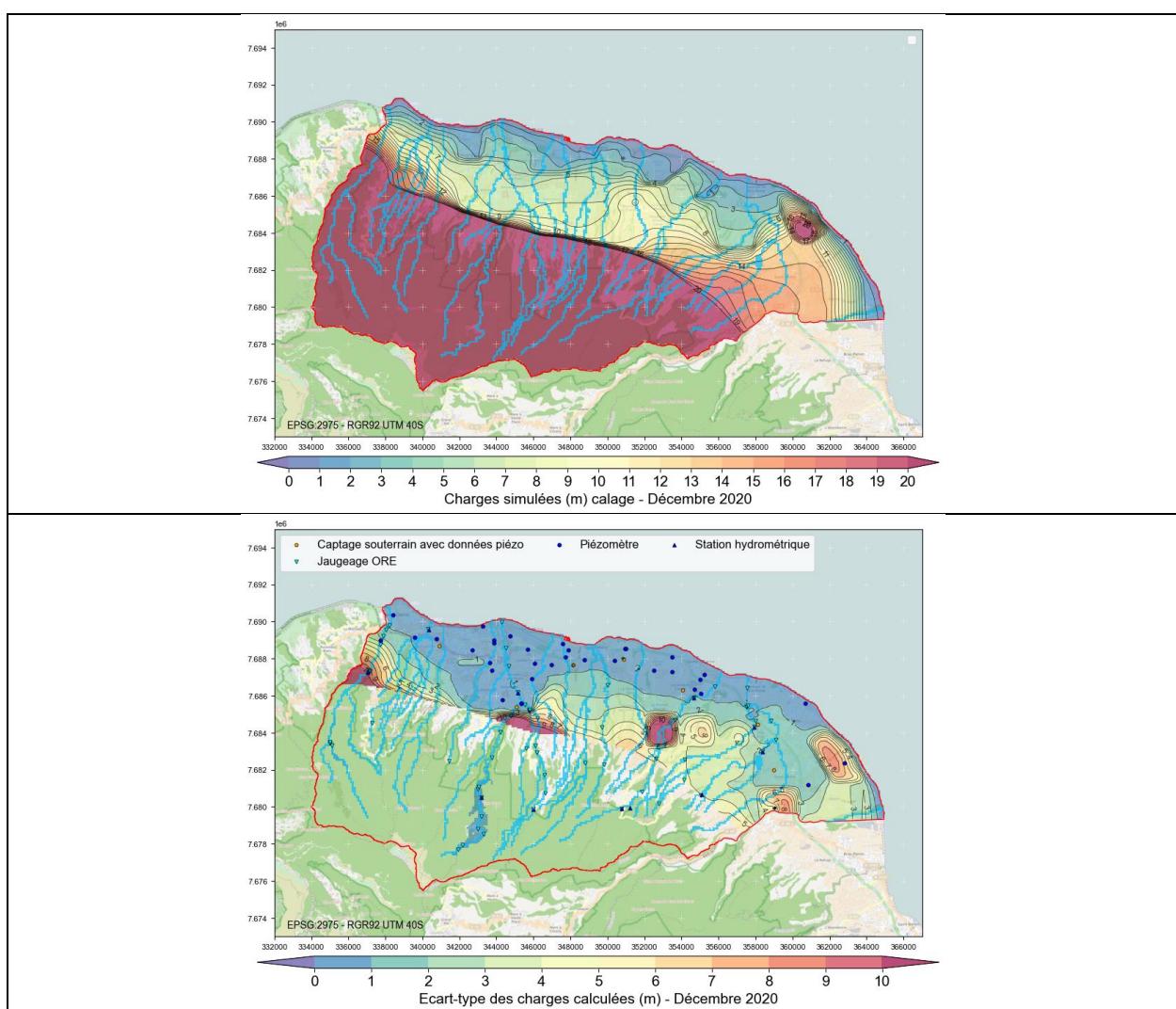


Figure 36 : Isopièzes simulées pour le mois de décembre 2020 (en haut) et écart-type des charges simulées correspondantes (en bas)

De manière identique, on peut évaluer les incertitudes associées au bilan hydraulique simulé de la nappe et en particulier au ratio prélèvements/recharge au pas de temps annuel présenté précédemment (Figure 37) : selon les années celui-ci varie entre 4 et 7%. En calculant ce ratio

pour l'ensemble de modèles déduits de la méthode IES, le ratio calculé varie de +/- 0.5% environ, ce qui est relativement faible. Cette estimation ne concerne cependant que les incertitudes liées aux propriétés hydrogéologiques (perméabilité, emmagasinement, perméabilité des rivières) et n'inclut pas par exemple l'incertitude sur la connaissance des prélèvements. La phase de recensement de ces prélèvements et d'intégration dans le modèle (§ 4.8) a montré que les incertitudes liées à ce paramètre (Localisation exacte, volume, répartition temporelle) ne sont sans doute pas négligeables et peuvent influer sur le calcul du ratio.

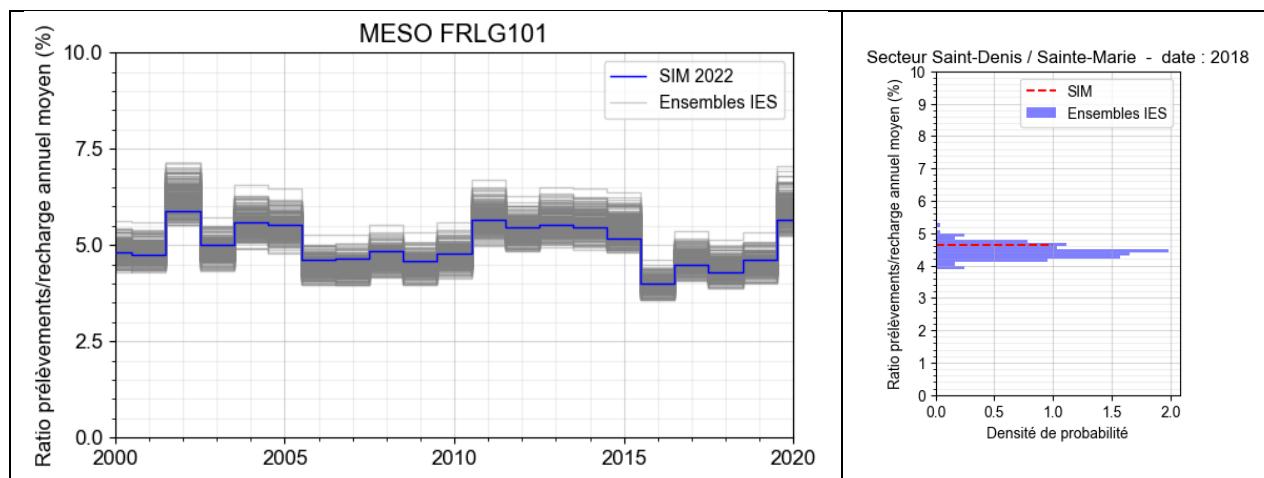


Figure 37 : Ratio prélèvements/recharge annuel moyen simulé pour la masse d'eau FRLG101 secteur Saint Denis/Sainte Marie.

En bleu : modèle calé, en gris : réalisations issues de la méthode IES.

5.4.3. Conclusion

En considérant seulement l'incertitude liée aux paramètres du modèle (perméabilité, emmagasinement, perméabilité des rivières, temps de transfert dans la ZNS), cette approche non-linéaire a permis d'identifier 241 ensembles de paramètres alternatifs au calage. On peut dès lors caractériser la sensibilité de ces paramètres et leurs effets sur les variables simulées. En particulier, l'incertitude calculée sur le ratio prélèvements/recharge actuel est suffisamment faible au regard des objectifs du modèle, qui vise à évaluer les volumes prélevables. Cette approche confirme que le modèle construit et calé est approprié pour mener la suite de l'étude.

6. Détermination et mise en œuvre de scenarii de gestion de la ressource en eau

6.1. CONSTRUCTION CONCERTEE DES SCENARIOS PROSPECTIFS A SIMULER

Le chapitre précédent a pu montrer que le modèle, calibré sur tout l'historique disponible, permettait de reproduire convenablement les observations, hormis quelques piézométries particulières moins bien représentées mais non représentatives du fonctionnement général. Cette robustesse permet d'envisager son utilisation pour tester des scénarios prospectifs qui permettent de répondre aux besoins des acteurs du territoire et aux enjeux auxquels ils sont confrontés.

Ainsi 6 scénarios prospectifs ont été construits afin d'être intégrés dans le modèle et simulés. Ces scénarios ont été élaborés suite à un atelier participatif qui s'est tenu lors du Comité de Pilotage n°3 de l'étude, complété par des échanges bilatéraux sur les évolutions de la demande en eau sur les aspects AEP et irrigation. Les scénarios ont ensuite été présentés au Comité de Pilotage (COPIL n°4) puis ajustés en fonction des différents retours reçus en séance avant d'être validés.

On rappelle que l'une des exigences principales lors de l'élaboration de ces scénarios était la nécessité de décrire les scénarios à partir d'éléments quantitatifs chiffrés de sorte à pouvoir au mieux les intégrer dans le modèle numérique.

Au final, trois ensembles de scénarios ont été identifiés avec 6 scénarios simulés (les scénarios sont plus amplement décrits dans la suite du chapitre) :

- **Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau sans modification de la demande.** Cet ensemble se décline sous la forme de deux scénarios intégrant notamment 2 projections climatiques haute résolution décrivant des climats futurs possibles dans la région jusqu'à l'horizon 2100 :
 - o Scénario 1 : *prise en compte des chroniques climatiques associées au scénario SSP2–4.5*
 - o Scénario 2 : *prise en compte des chroniques climatiques associées au scénario SSP5–8.5*
- **Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique.** Cet ensemble se décline sous la forme de 2 scénarios intégrant les données d'évolutions des besoins en eau issues de l'analyse besoins-ressources menée actuellement dans le cadre du Plan Départemental de l'Eau et des Aménagements Hydrauliques (PDEAH), notamment avec l'objectif de sécuriser le projet MEREN (Mobilisation des Ressources en Eau des Micro-régions Est et Nord) :
 - o Scénario 3 : *prise en compte de débits additionnels à prélever en eau souterraine de 1 160 l/s*
 - o Scénario 4 : *prise en compte de débits additionnels à prélever en eau souterraine de 1 560 l/s*
- **Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique et avec reports des**

prélèvements réalisés en eau superficielle vers les eaux souterraines. Cet ensemble se décline sous la forme de deux scénarios :

- Scénario 5 : report vers la nappe de 100% des débits prélevés en cours d'eau entre les mois d'octobre et décembre
- Scénario 6 : report vers la nappe de 100% des débits prélevés en cours d'eau toute l'année.

Ces six scénarios et les hypothèses associées sont résumés à la figure 38.

Numéro du scénario	Projections Climatiques	Evolution de la demande en eau en période critique	Report vers la nappe des prélèvements en rivière
1	SSP2-4.5	X	X
2	SSP5-8.5	X	X
3	SSP5-8.5	1160 l/s à répartir	X
4	SSP5-8.5	1560 l/s à répartir	X
5	SSP5-8.5	1560 l/s à répartir	100% des débits prélevés en rivière lors de la période Octobre - Décembre
6	SSP5-8.5	1560 l/s à répartir	100% des débits prélevés en rivière toute l'année

Figure 38 - Description synthétique des six scénarios testés par le modèle hydrogéologique

Pour chacun de ces scénarios, l'évolution de la ressource en eau projetée par le modèle est analysée sous l'angle de plusieurs indicateurs :

- [Piézométrie générale] : évolution des niveaux piézométriques moyens à l'échelle de la zone modélisée ;
- [Bilan hydraulique au droit de la zone d'intérêt] : évolution du stock en eau souterraine, de la recharge et de l'évolution du ratio prélèvements sur recharge globale (ratio « bon état ») au droit du secteur Saint-Denis / Sainte-Marie de la masse d'eau FRLG101 (déjà calculé sur le passé, voir sections 5.3 et 5.4) ;
- [Sécurisation AEP] : évolution des niveaux piézométriques à l'étiage au droit des forages existants. Nous verrons dans la suite que, sur ce point, les problématiques de salinité seront également discutées ;
- [Débit des cours d'eau] : évolution des débits des cours d'eau pérennes du secteur, en moyenne et à l'étiage.

6.2. INFORMATIONS SUR LES PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR L'ILE DE LA REUNION - PROJET BRIO

Dans cette section, les éléments essentiels à la bonne compréhension de la suite du rapport sur les simulations prospectives sont fournis. Toutefois, ils ne sont pas exhaustifs et le lecteur est invité à se référer au rapport « Régionalisation du changement climatique et développement de

services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires » [Leroux et al., 2023] pour plus d'information.

La construction de projections hydrologiques/hydrogéologiques sous l'effet du changement climatique consiste à intégrer des projections climatiques locales au modèle EVP-Nord présenté dans les chapitres précédents, en l'occurrence des chroniques de précipitations et d'évapotranspiration potentielle futures plausibles. La construction de projections hydrogéologiques suit donc une chaîne de modélisation constituée de plusieurs étapes résumées brièvement ci-dessous :

1. Les scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre : évaluer l'évolution du climat dépend des émissions de gaz à effet de serre attendues dans les décennies à venir. Des incertitudes importantes existent sur la trajectoire que vont suivre ces émissions dans la mesure où ces dernières dépendent de nombreux facteurs démographiques, socio-économiques, technologiques et politiques. Dans le cadre du 5^{ème} rapport du GIEC (IPCC, 2014), 4 scénarios d'évolution représentatifs dits RCP (pour Representative Concentration Pathways ou Profils Représentatifs d'évolution de Concentration) ont été sélectionnés et ont servi de base aux experts du climat. En parallèle, les sociologues et les économistes travaillent sur des scénarios présentant diverses caractéristiques de développements socio-économiques et diverses stratégies d'adaptation et d'atténuation pour parvenir aux profils de concentration correspondants aux RCP. Cinq familles de scénarios, nommées SSP (pour Shared Socioeconomic Pathways), ont ainsi été définies dans le 6^{ème} rapport du GIEC (IPCC, 2023) permettant de mettre en cohérence les travaux des climatologues et des économistes (Figure 39).

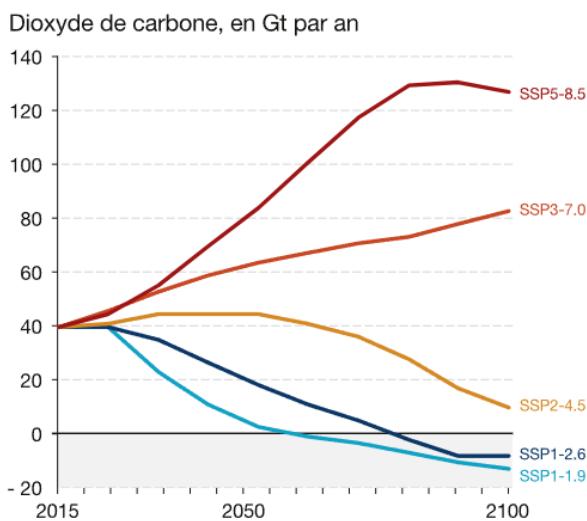


Figure 39 – Projections des émissions de gaz à effet de serre suivant les 5 scénarios SSP du GIEC²

2. Les modèles climatiques : des modèles climatiques globaux (Global Climate Models, GCM) sont ensuite utilisés pour simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale sous l'effet des différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Pour un même scénario d'émission, différents groupes de recherche ont réalisé de façon coordonnée des simulations climatiques à partir de différents modèles dans le cadre d'un projet

² <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2022/3-scenarios-et-projections-climatiques>

d'intercomparaison des modèles couplés (nommé CMIP6 pour les scénarios d'émission du 6^{ème} rapport du GIEC). La résolution spatiale des modèles climatiques globaux est de l'ordre de 150 km (généralement supérieure à 100 km). Des modèles climatiques régionaux (Regional Climate Models, RCM) peuvent alors être utilisés pour des modélisations plus fines au droit d'une région donnée. Une coopération internationale au sein d'un projet prénommé CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) permet également de fournir un cadre commun aux centres de modélisation régionale du climat : des simulations régionalisées sur le continent africain et la péninsule arabique à 50 km de résolution ont ainsi été produites mais ce domaine ne couvre qu'une partie des pays du sud-ouest de l'océan Indien et ne permet pas de représenter convenablement l'activité cyclonique du bassin océanique. Le projet BRIO (Building Resilience in Indian Ocean) a alors été lancé avec comme objectif d'étendre le projet CORDEX à la zone sud-ouest de l'océan Indien : pour répondre à cet objectif, des simulations régionales ont été produites à partir du RCM Aladin-V6 de 12 km de résolution couplé au GCM CNRM-ESM2-1 de 150 km de résolution et ce pour 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre : SSP1-2.6, SSP2-4.5 et SSP5-8.5.

3. La correction de biais : en général, un biais existe entre les projections climatiques réalisées sur le passé et les observations locales. Ainsi, afin de pouvoir exploiter au mieux les projections climatiques dans le cadre d'une étude d'impact, des méthodes de correction de ce biais ont été développées. Cette correction permet généralement de descendre en résolution, selon la résolution effective des observations. Dans le cadre du projet BRIO, la méthode CDF-t a été utilisée et appliquée à partir des observations du réseau Météo France interpolées sur une grille de résolution 3 km environ.
4. L'intégration des projections dans les modèles d'impact : au terme de cette chaîne de modélisation, les projections climatiques sont utilisées comme données d'entrée au modèle d'impact (modèle hydrogéologique du Nord de la Réunion construit dans le cadre de cette étude). Les résultats du modèle d'impact permettent ainsi d'évaluer les conséquences du changement climatique sur des variables hydro-climatiques d'intérêt défini, c'est-à-dire dans notre cas de simuler des projections hydrogéologiques. Parmi les variables produites, les chroniques de précipitations et d'ETP sont nécessaires au bon fonctionnement du modèle hydrogéologique. Ces chroniques sont disponibles de 1981 à 2100 au pas de temps journalier pour les 3 scénarios SSPs intégrés au projet BRIO.

6.3. SCENARIO 1 : PRISE EN COMPTE DES CHRONIQUES CLIMATIQUES ASSOCIEES AU SCENARIO SSP2–4.5

6.3.1. Modalités de mise en œuvre de la simulation

L'approche de production des projections climatiques dans le cadre du projet BRIO a été synthétisée à la section 6.2 ci-dessus. Les chroniques de précipitation et d'ETP associées au scénario SSP2-4.5 ont donc été intégrées au modèle.

Les données climatiques ne sont pas les seuls paramètres du modèle susceptibles d'évoluer avec le changement climatique. Comme nous l'avons vu lors de sa construction, le modèle est contraint par d'autres forçages dont il va falloir quantifier l'évolution afin de pouvoir simuler les projections hydrogéologiques. C'est le cas notamment du niveau de la mer, imposé aux limites du modèle hydrogéologique et des prélevements (en nappe et en rivière).

A l'image des projections climatiques, des projections de l'élévation du niveau de la mer existent. Ont été utilisées les trajectoires de remontée du niveau global de la mer issues du rapport du GIEC sur les océans et la cryosphère (SROCC, IPCC, 2019), avec régionalisation au droit de La Réunion. A noter que ces trajectoires utilisent des données issues du 5^{ème} rapport du GIEC, mais donnent des résultats très proches des résultats basés sur le 6^{ème} rapport du GIEC. En outre, des études du BRGM ont montré la possibilité de l'existence d'une subsidence, s'ajoutant aux effets de remontée du niveau de la mer. Même si des incertitudes existent sur l'ampleur de cette subsidence, elle pourrait être de l'ordre de 2 mm/an (Projet RenovRisk-Transferts, résultats en cours de publication). Ces deux phénomènes ont été intégrés au modèle de la façon suivante : une période historique de référence sans lacune importante disponible aux marégraphes a été reproduite dans le futur de sorte à prendre en compte une certaine variabilité du niveau de la mer ; puis ont été ajoutées progressivement les composantes liées à la remontée du niveau de la mer et à la subsidence. Cette approche de reconstruction simple peut présenter des limites mais l'idée est ici de respecter les ordres de grandeur à la fois de remontée du niveau de la mer estimée (incluant la subsidence) et de la variabilité marégraphique. La projection marégraphique obtenue et intégrée au modèle hydrogéologique est présentée à la figure 40.

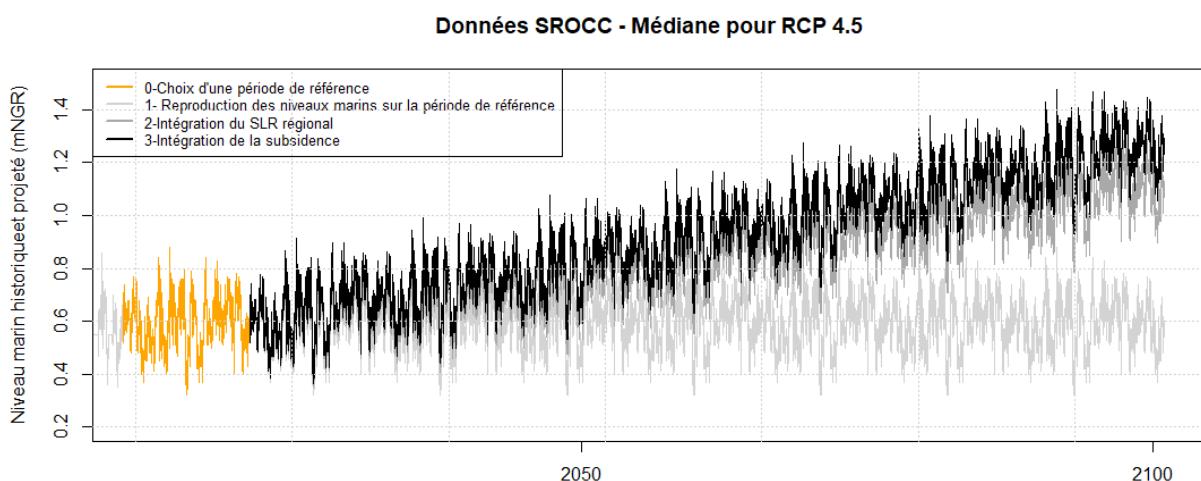


Figure 40 – Projection utilisée pour le niveau marin intégré au modèle pour le scénario 1

Sur le second point qui concerne les prélèvements en nappe et en rivière, un statu quo est considéré pour ce scénario 1, c'est-à-dire une reproduction des débits prélevés sur la dernière année connue (2020).

6.3.2. Résultats

Les résultats sont fournis sous la forme de graphiques d'évolution de différents indicateurs au cours du siècle et de cartes. Pour s'affranchir de la variabilité interne du climat qui peut masquer le signal du changement climatique, il est nécessaire de réaliser des analyses sur des périodes de 30 ans (voir par exemple DRIAS, 2020). Deux périodes prospectives sont considérées : **2041-2070** (horizon moyen/intermédiaire) et **2071-2100** (horizon lointain – fin de siècle). Par ailleurs, comme le recommandent les documents d'accompagnement DRIAS³, les simulations climatiques ne sont pas des prévisions et aucune échelle de probabilité ne leur est attachée (aucun scénario n'est plus probable qu'un autre). Elles représentent *a priori* des évolutions plausibles du climat de l'île de La Réunion sur le XXI^{ème} siècle basées sur les connaissances actuelles. C'est pourquoi, on s'attache surtout à déterminer les tendances du changement climatique en évaluant des écarts (que l'on appelle aussi « anomalies ») par rapport à la période de référence **1993-2022**, plutôt que d'analyser les variables absolues. Cette période de référence intègre la période de calibration du modèle et correspond à une période où les usages (prélèvements) sont les mieux connus sur le secteur.

Les chroniques climatiques annuelles (Pluie, Température, ETP directement issus du projet BRIO et Pluie efficace calculée par le modèle hydrogéologique) associées au scénario 1 sont fournies à la figure 41. On note une augmentation nette de la température associée à une augmentation de l'évapotranspiration. Une relative stabilité est notée sur les cumuls annuels de précipitation et de pluie efficace, même si en moyenne les précipitations semblent un peu plus importantes sur les horizons intermédiaires (2041-2070) et lointains (2071-2100) que sur la période de référence. Sur une période que nous définirons comme **saison sèche (mai-novembre)**, on note par contre une tendance à la baisse des précipitations et des pluies efficaces significative statistiquement⁴, avec une occurrence plus fréquente d'années considérées comme très sèches aux horizons intermédiaires et lointains. Sur une période que l'on peut considérer comme **la saison humide (décembre-avril)**, il semble à l'inverse que les années très humides (en terme de pluie efficace) soient plus fréquentes dans le futur avec, comme conséquence, une augmentation des pluies efficaces moyennes sur les horizons intermédiaires et lointains en comparaison avec la période de référence.

³ <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/335>

⁴ Au sens du test statistique de Mann-Kendall corrigé par Hamed et Rao, seuil de 10% (Hamed et Rao, 1998)

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénario de gestion de la ressource en eau

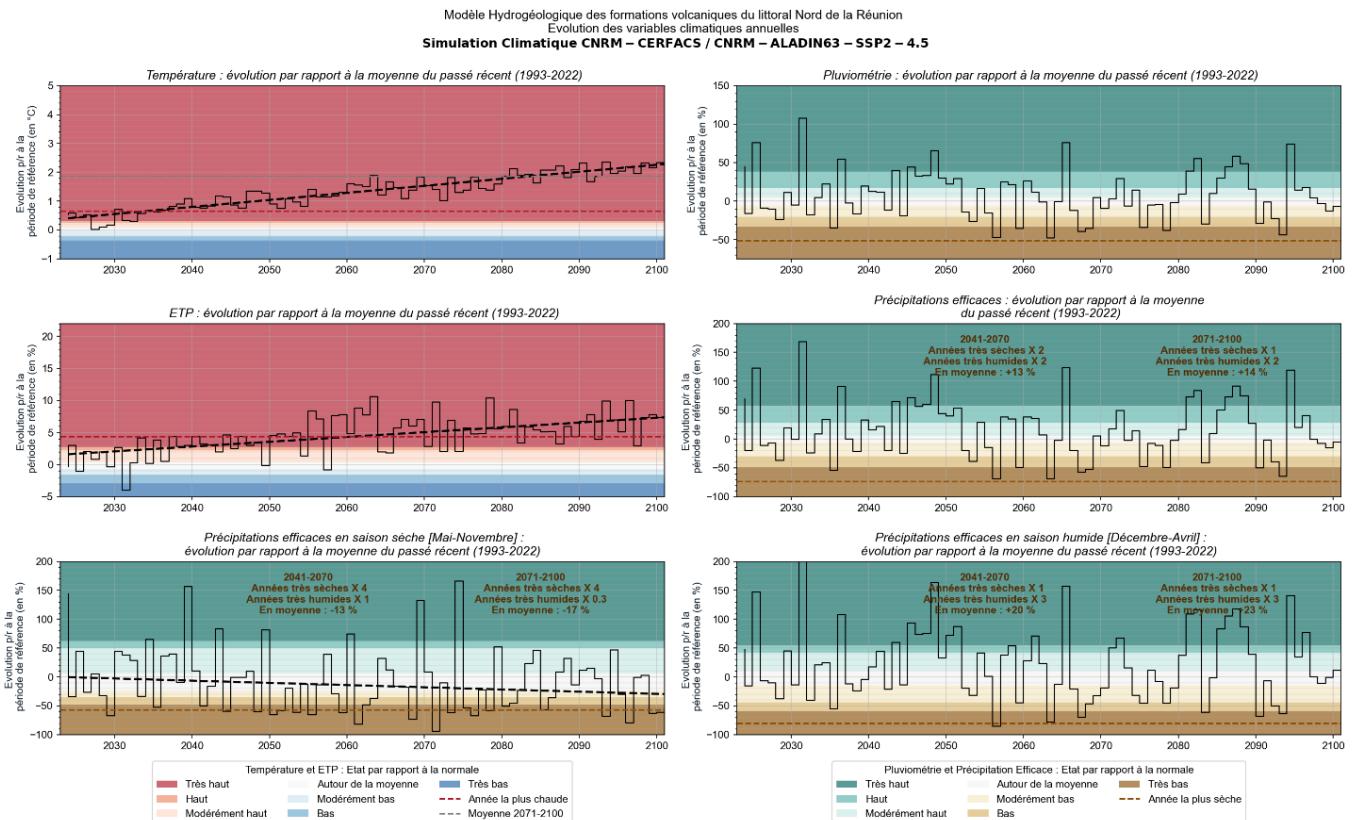


Figure 41 - Evolution des variables climatiques annuelles (Haut et milieu), et de la pluie efficace cumulée sur la saison sèche et sur la saison humide (Bas).

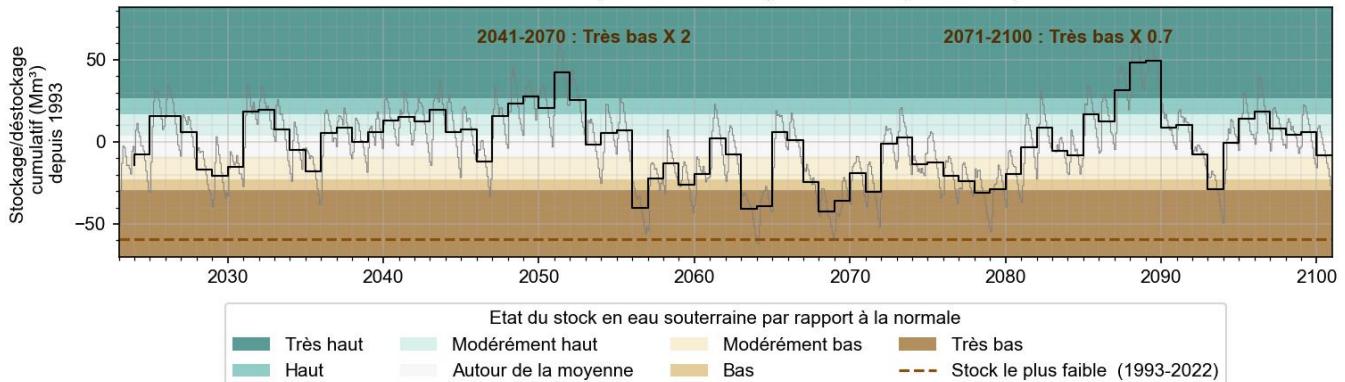
Scénario SSP2 – 4.5. Lorsque la tendance est significative, la pente de Sen de la tendance est figurée en tiretés noirs.

Les résultats en matière **d'évolution de la piézométrie moyenne et du stock moyen en eau souterraine** sont fournis à la figure 42. On note une certaine stabilité de la ressource en eau souterraine au cours du siècle. D'un point de vue spatial, une hétérogénéité de comportement est notée sur les différences entre les niveaux piézométriques moyens calculés à l'horizon intermédiaire (2041-2070) et ceux du passé récent (1993-2022). A proximité des côtes, on observe une remontée des niveaux piézométriques qui s'atténue progressivement quand on s'en éloigne. Cette hausse est liée à la remontée du niveau de la mer. A noter qu'à l'Est, la baisse des charges piézométriques est à considérer avec précaution : le modèle ne permet pas de reproduire ici la complexité de ce secteur éloigné du secteur d'intérêt majeur de l'étude (établissement de deux nappes superposées et du peu de mesures piézométriques permettant de contraindre la calibration, voir section 5.2 – p. 39).

Modèle Hydrogéologique des formations volcaniques du littoral Nord de la Réunion
 Projection hydrogéologique : Evolutions moyennes attendues
 EMPIRE DU MODELE

SCENARIO 1 – Simulation Climatique CNRM – CERFACS / CNRM – ALADIN63 – SSP2 – 4.5

Variation du stock en eau souterraine moyen :
 tendance et comparaison avec le passé récent (1993-2022)



Différence entre les charges moyenne du passé récent (1993-2022)
 et de l'horizon intermédiaire (2041-2070)

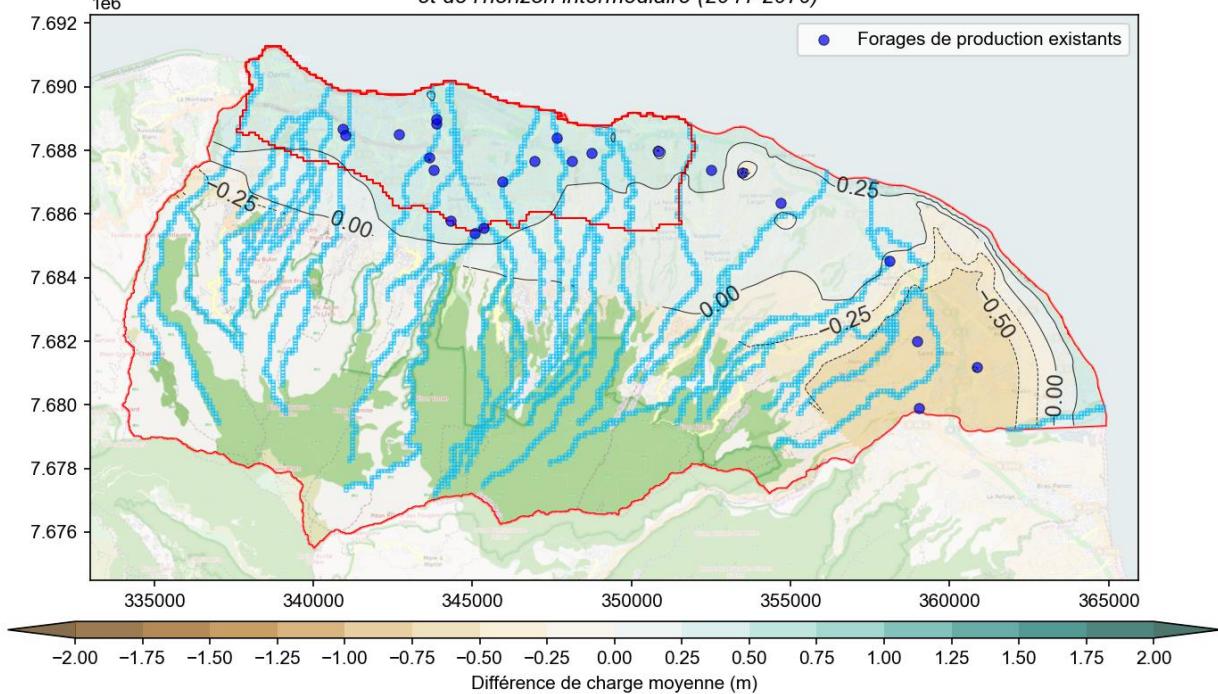


Figure 42 – Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.

[Haut] Evolution du stock en eau souterraine moyen sur l'emprise du modèle au cours du siècle. [Bas] Anomalie des niveaux piézométriques moyens projetés à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022)

Plusieurs indicateurs sont également calculés à l'échelle de la MESO FRLG101 sur le secteur d'intérêt de Saint-Denis / Sainte Marie (Figure 43), localisée à proximité de l'océan. On retrouve ainsi une hausse du stock en eau souterraine au cours du siècle évoquée plus haut. Au droit des forages existants du secteur, on note également une hausse du niveau piézométrique moyen à l'étiage aux horizons intermédiaire et lointain par rapport au passé récent, cette hausse est plus forte en fin de siècle du fait de la remontée continue du niveau de la mer.

Toutefois, même si les niveaux piézométriques augmentent, la recharge moyenne du secteur (recharge assurée par les écoulements amont depuis les hauts, par la recharge météorique au droit de la zone et par les pertes des cours d'eau) semble en légère baisse au cours du siècle : cette baisse peut paraître surprenante au regard de l'évolution stable des pluies efficaces au cours du siècle. Cette tendance simulée est issue de la combinaison de plusieurs facteurs : les modifications des précipitations saisonnières (baisse des pluies efficaces en saison sèche, augmentation des pluies efficaces intenses) entraînent une modification de la répartition infiltration / ruissellement impactant l'infiltration moyenne. En outre l'inertie importante des écoulements provenant de l'amont de la zone d'intérêt due à l'infiltration via la zone non saturée (ZNS) et le transit au sein des aquifères pourraient venir lisser la variabilité visible sur la chronique annuelle des précipitations efficaces. Enfin, l'augmentation du niveau de la mer changeant les conditions aux limites du modèle, les échanges via l'exutoire que constitue l'océan se trouvent modifiés. Cette baisse reste cependant modérée : -3% à l'horizon fin de siècle par rapport à la période de référence. Le ratio prélèvement / infiltration n'évolue d'ailleurs pas considérablement : il est légèrement à la hausse au cours du siècle.

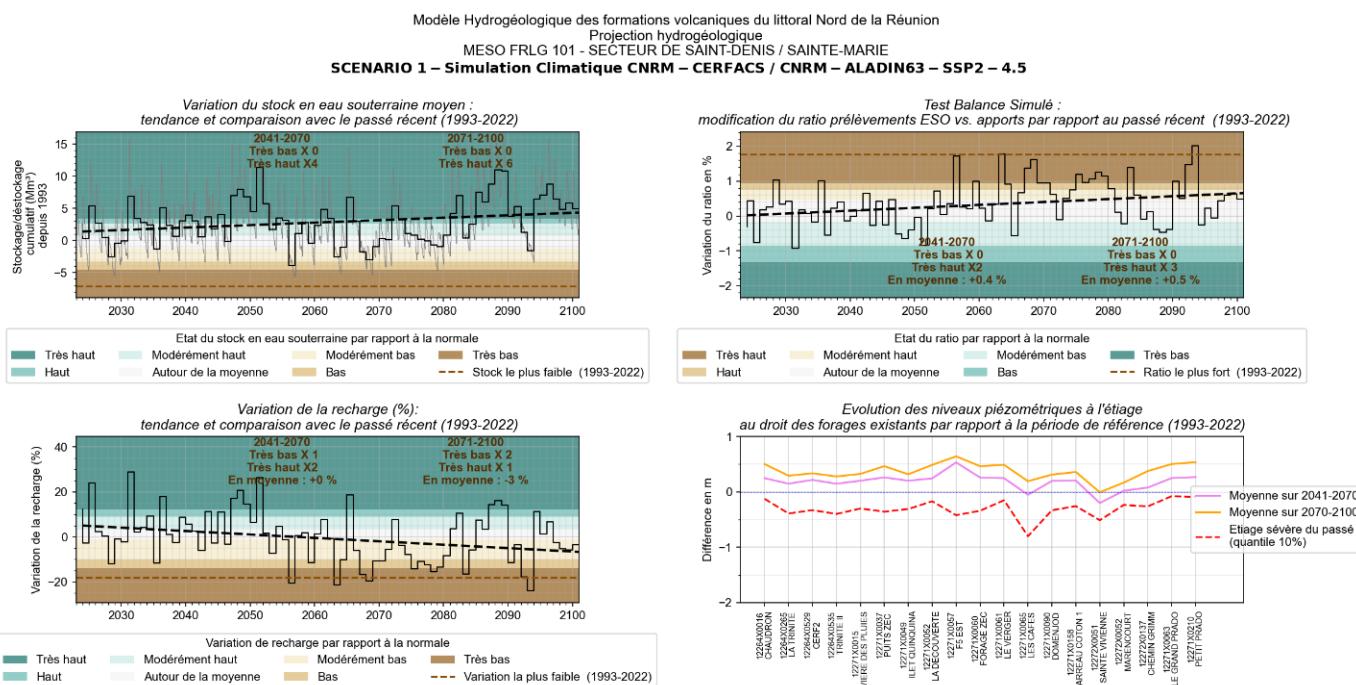


Figure 43 - Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : évolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie.

[Haut, Gauche] Evolution du stock en eau souterraine moyen au cours du siècle

[Bas, Gauche] Evolution de la recharge au cours du siècle.

[Haut, Droite] Evolution du ratio Prélèvements / Recharge au cours du siècle. Pour une situation de départ théorique à 5%, une augmentation de 1% fait passer à 5+1 = 6%.

[Bas, Droite] Anomalie des niveaux piézométriques atteints à l'étage à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022) au droit des forages existants. Les étages les plus sévères du passé (quantile 10%) sont également indiqués.

L'impact visible de la remontée du niveau de la mer sur les niveaux piézométriques des secteurs côtiers implique des modifications de la position de l'interface eau douce / eau salée. Les forages du secteur n'étant pas sujets à des problématiques de type intrusion saline, le modèle construit ici ne permet pas directement de calculer les changements de position de l'interface eau douce / eau salée. Toutefois, afin d'évaluer les grandes tendances d'évolution de cette interface sous l'effet du changement climatique, une approche simple est proposée.

L'interface eau douce / eau salée (ou biseau salé) est le terme utilisé pour décrire l'interface de contact entre l'eau douce présente dans un aquifère côtier et provenant de la recharge due aux précipitations et l'eau salée issue de l'intrusion latérale d'eau de mer dans l'aquifère. De nombreux travaux ont été menés depuis 100 ans sur cette question (une synthèse complète est faite par exemple par Bear, 1999). Depuis le début du 21^{ème} siècle se pose la question de l'évolution de cette interface du fait du changement climatique : selon Werner et al. (2013), des évolutions de la problématique d'intrusion saline seraient causées par des changements prolongés (voire des modifications épisodiques sévères) du niveau de la mer qui augmente mais également des conditions climatiques, de la demande en eau souterraine et de l'occupation du sol. Estimer cette évolution peut se faire à l'aide de modèles numériques ou bien à l'aide de modèles analytiques, basés sur des approximations mais plus simples à mettre en œuvre. Werner et Simmons (2009) et Chesnaux (2015) ont proposé différentes solutions analytiques toutes basées sur la même approche pour calculer l'impact de l'augmentation du niveau de la mer sur l'intrusion saline : l'épaisseur d'eau douce est calculée dans des conditions d'équilibre hydrodynamique (régime permanent) et considérant une interface eau douce-eau salée nette (approximation dite de Ghyben-Herzberg) à partir de la connaissance de la surface piézométrique. Cette surface piézométrique est estimée à partir de différentes solutions analytiques tenant compte par exemple de paramètres hydrodynamiques, de valeur de recharge, des conditions d'alimentations amont (débit, charge hydraulique) et d'un niveau donné de la mer. Dans notre cas, le modèle hydrodynamique calcule cette surface piézométrique en régime transitoire, en fonction de l'évolution des forçages climatiques, marégraphiques et de l'évolution des prélèvements. Nous proposons donc de considérer une interface eau douce-eau salée basée sur les surfaces piézométriques moyennes calculées par le modèle sur le passé récent (1993-2022), pour l'horizon intermédiaire (2041-2070) et pour l'horizon lointain (2071-2100). Ces surfaces piézométriques moyennes intègrent les évolutions attendues pour chacun des scénarios 1 à 6 en matière de remontée du niveau de la mer, d'évolution de la recharge et d'évolution des besoins en eau souterraine sur des périodes longues au cours du siècle (en cohérence avec les bonnes pratiques d'analyse des résultats des projections climatiques et avec l'hypothèse de régime permanent de la solution de Ghyben-Herzberg). La différence entre les horizons futurs et le passé fournira une estimation des modifications attendues sur la position de l'interface eau douce / eau salée. Cette approche simple a comme objectif de fournir un indicateur permettant la comparaison des différents scénarios sous l'angle de la problématique intrusion saline. A noter enfin qu'une approche couplant également modèle maillé et modèle analytique mais d'une façon légèrement différente a été mise en œuvre dans le cadre d'une étude du BRGM sur la vulnérabilité des aquifères côtiers aux intrusions salines en Normandie (Croiset et al., 2016).

Les résultats obtenus par cette approche pour la simulation du scénario 1 (Figure 44) montrent une remontée limitée du biseau salé dans le secteur d'intérêt. A noter que ce n'est pas la remontée du niveau de la mer seule qui induit cette remontée de l'interface eau douce / eau salée mais sa conjonction avec la modification sur l'alimentation en eau douce (recharge). On notera également la faible profondeur de l'interface simulée au droit du forage Les Cafés : ce résultat traduit surtout les incertitudes existant sur les niveaux piézométriques simulés au droit du forage Les Cafés, dont les données piézométriques (anciennes) n'ont pas été intégrées à la calibration du modèle (voir discussion à la section 5.2.1 et la figure 26).

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénario de gestion de la ressource en eau

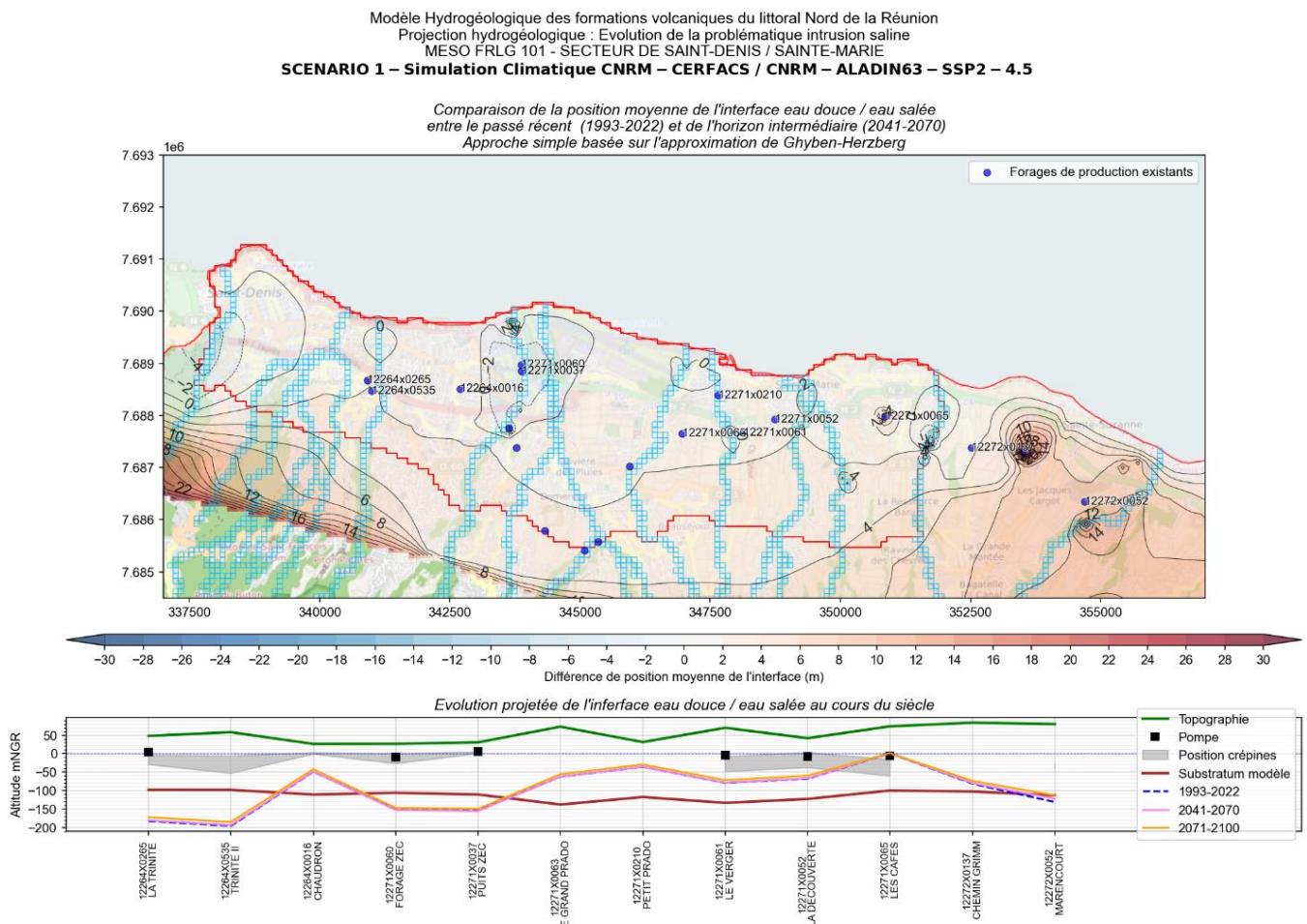


Figure 44 - Projection hydrogéologique issue du scénario 1 : Evolution de la problématique intrusion saline.

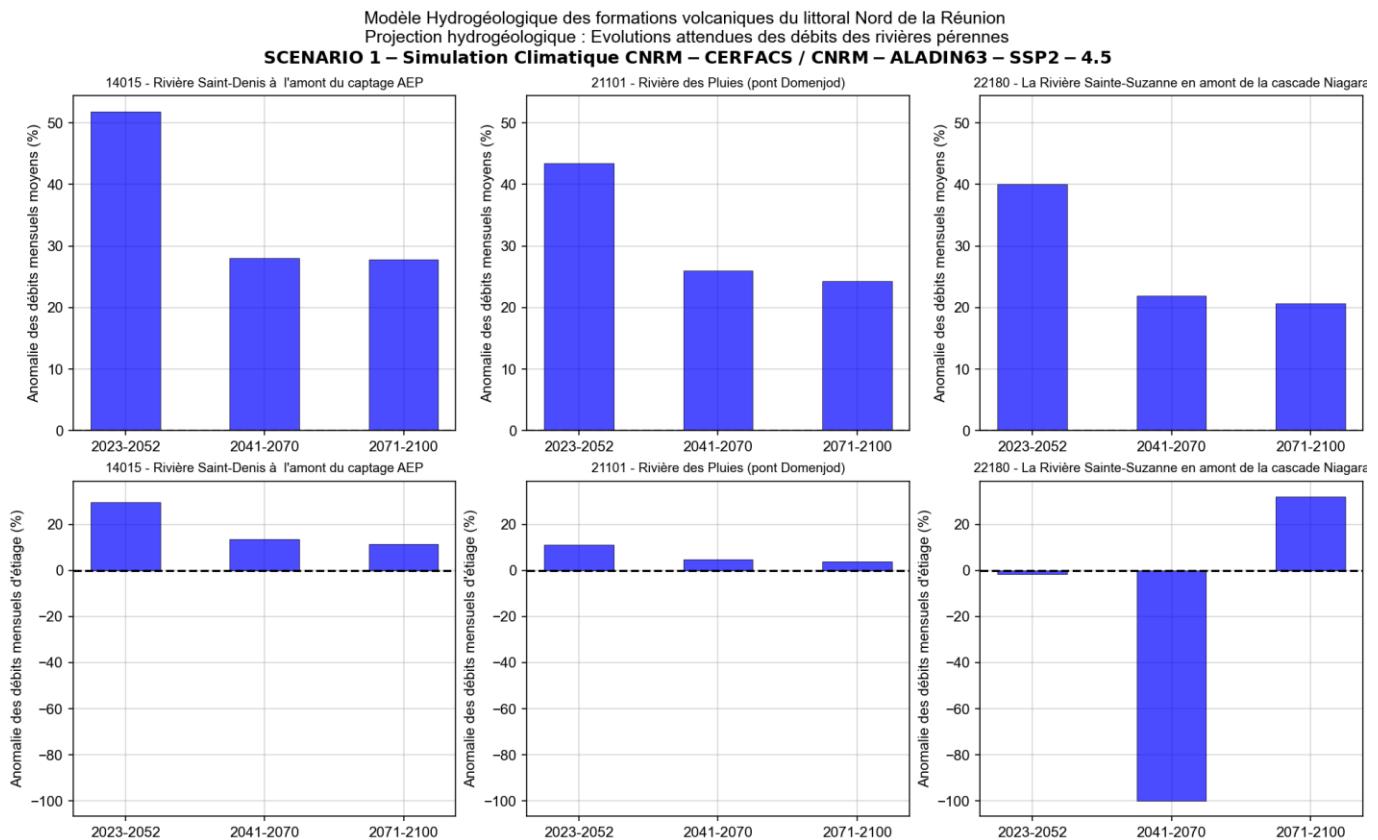
[Haut] Anomalie de la position de l'interface eau douce – eau salée projetée à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022) : les valeurs positives (nuances rouges) indiquent une remontée de l'interface, tandis que les valeurs négatives (nuances bleues) indiquent une baisse. [Bas] Evolution de la position moyenne de l'interface eau douce – eau salée au cours du siècle au droit des forages situés à proximité de l'océan.

La partie sud du modèle n'est pas contrainte par des observations ce qui engendre des valeurs non réalisistes.

La figure 45 présente les résultats des projections hydrogéologiques obtenus pour **les rivières pérennes du secteur modélisé**. On remarque une augmentation assez importante des débits moyens : cette tendance simulée peut également surprendre dans la mesure où les augmentations calculées sont plus importantes que celles notées sur les pluies efficaces annuelles (Figure 41). Cela traduit une évolution de la répartition ruissellement / infiltration au sein des pluies efficaces, avec en proportion plus de ruissellement et moins d'infiltration.

Les conséquences sur les débits d'étiage sont plus modérées d'autant plus que les valeurs absolues des débits sont faibles. On notera une plus forte baisse des débits d'étiage au droit de la rivière Sainte-Suzanne, mais les débits d'étiage y sont très faibles : les fortes baisses en pourcentage correspondent donc à des débits très faibles et sont donc peu interprétables.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarii de gestion de la ressource en eau



*Figure 45 – Evolutions attendues des débits des rivières pérennes, simulation associée au scénario 1.
[Haut] Débits moyens annuels [Bas] Débits à l'étiage*

6.4. SCENARIO 2 : PRISE EN COMPTE DES CHRONIQUES CLIMATIQUES ASSOCIEES AU SCENARIO SSP5-8.5

6.4.1. Modalités de mise en œuvre de la simulation

L'approche de production des projections climatiques dans le cadre du projet BRIO a été synthétisée à la section 6.2. Les chroniques de précipitation et d'ETP associées au scénario SSP5-8.5 ont donc été intégrées au modèle.

Comme pour le scénario 1, une projection marégraphique intégrant une chronique de remontée du niveau de la mer cohérente avec le SSP5-8.5 a été construite (voir la méthode décrite à la section 6.3.1) et intégrée au modèle hydrogéologique (Figure 46). Comme pour le scénario 1, la dernière année de prélèvement connue est prolongée jusqu'à la fin du siècle.

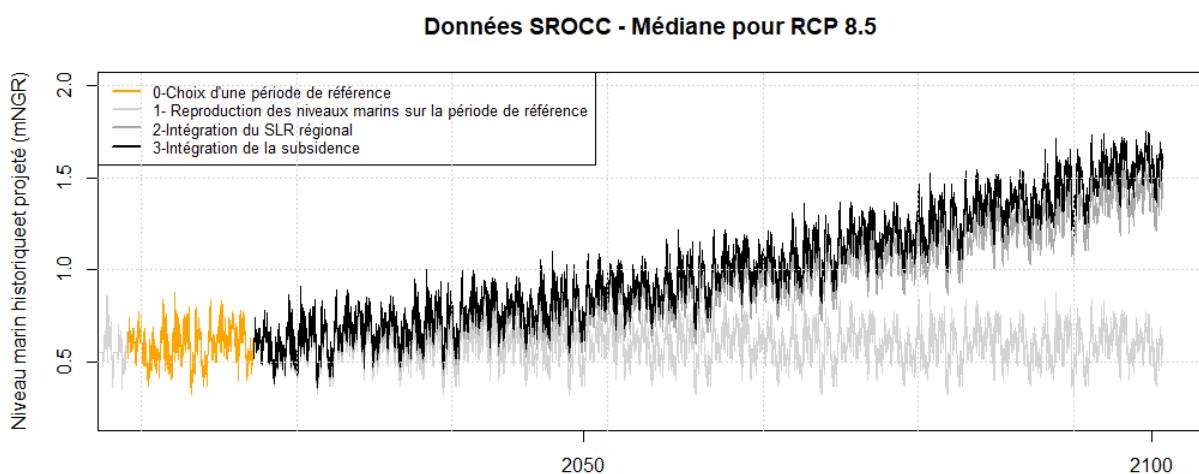


Figure 46 - Projection utilisée pour le niveau marin intégré au modèle pour le scénario 2

6.4.2. Résultats

Les résultats sont fournis sous la forme de graphiques d'évolution de différents indicateurs au cours du siècle et de cartes.

Les chroniques climatiques annuelles (Pluie, Température, ETP directement issus du projet BRIO et Pluie efficace calculée par le modèle hydrogéologique) associées au scénario 2 sont fournies à la Figure 47. On note une augmentation nette de la température associée à une augmentation de l'évapotranspiration, plus forte que pour le scénario 1 (SSP2-4.5). Une relative stabilité est notée sur les cumuls annuels de précipitation et de pluie efficace, mais contrairement au précédent scénario, les précipitations efficaces moyennes semblent légèrement plus faibles sur les horizons intermédiaires et lointains que sur la période de référence. Sur une période que nous définirons comme **saison sèche (mai-novembre)**, on note par contre une tendance à la baisse des pluies efficaces significative statistiquement⁵, avec une occurrence plus fréquente d'années considérées comme très sèches aux horizons intermédiaires et lointains : la baisse est plus marquée que pour le scénario précédent. Sur une période que l'on peut considérer comme **la saison humide (décembre-avril)**, une certaine stabilité est notée contrairement au scénario

⁵ Au sens du test statistique de Mann-Kendall corrigé par Hamed et Rao, seuil de 10%

précédent pour lequel les pluies efficaces de cette saison étaient plus importantes en intensité moyenne et en fréquence.

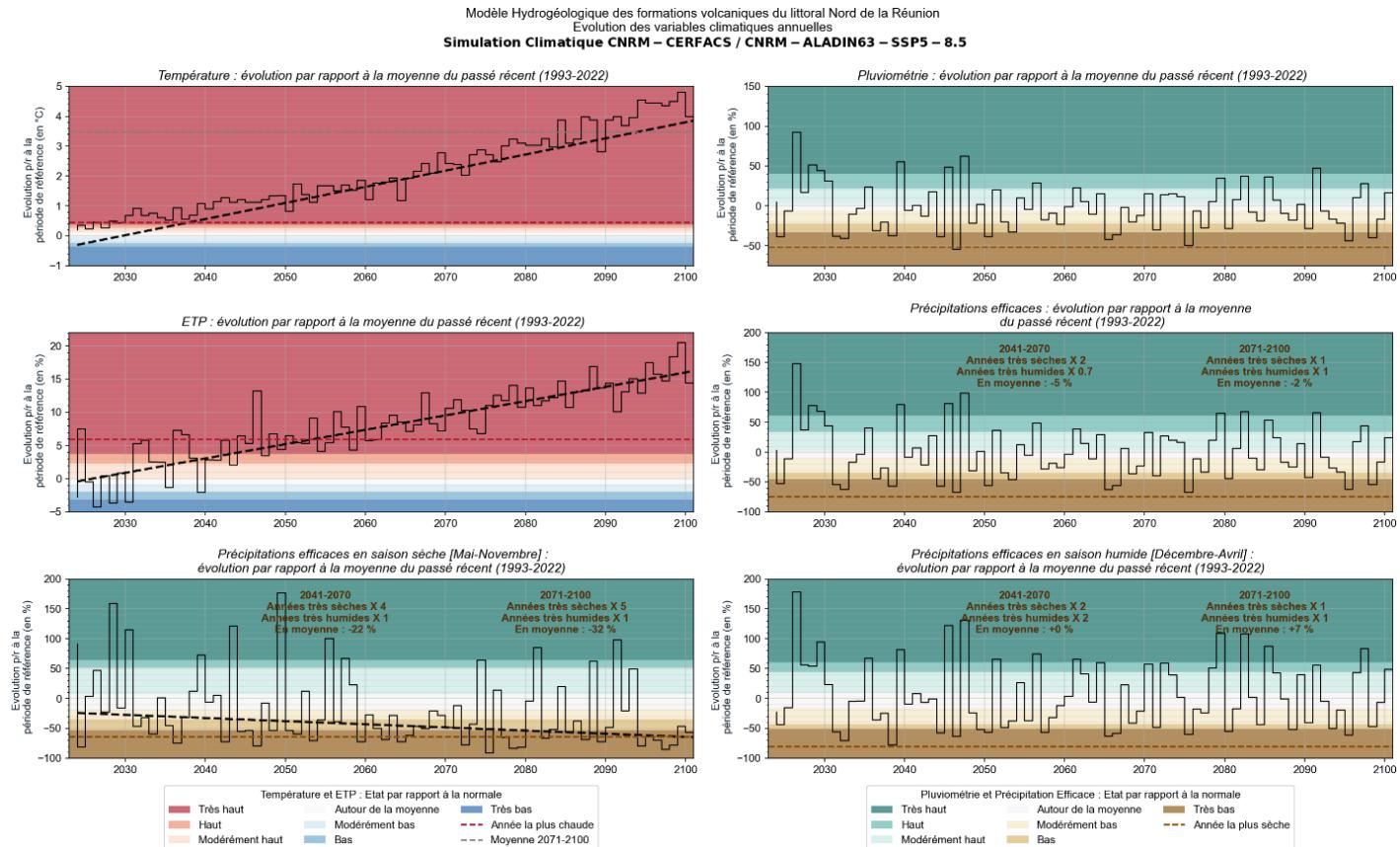


Figure 47 - Evolution des variables climatiques annuelles (Haut et milieu) et de la pluie efficace cumulée sur la saison sèche et sur la saison humide (Bas).

Scénario SSP5 – 8.5. Lorsque la tendance est significative, la pente de Sen de la tendance est figurée en tireté noir.

Les résultats en matière **d'évolution de la piézométrie moyenne et du stock moyen en eau souterraine** sur toute la zone modélisée sont fournis à la figure 48. On note des stocks en eau souterraine plus faibles en moyenne sur les horizons intermédiaires et lointains que sur la période de référence mais aucune tendance significative à la baisse n'est détectée. D'un point de vue spatial, on retrouve l'hétérogénéité spatiale identifiée lors de la simulation du scénario 1 sur les différences entre les niveaux piézométriques moyens calculés à l'horizon intermédiaire (2041-2070) et ceux du passé récent (1993-2022). A proximité des côtes, on observe une remontée des niveaux piézométriques au cours du siècle qui s'atténue progressivement quand on s'en éloigne. Cette hausse est liée à la remontée du niveau de la mer. Contrairement au scénario 1, l'effet de la remontée est plus limité dans l'espace malgré une remontée du niveau de la mer plus importante (ceci est en cohérence avec des stocks en eau souterraine plus bas notés aux horizons lointains et intermédiaires en comparaison avec les stocks moyens de la période de référence). A noter qu'à l'Est, la baisse des charges piézométriques est à considérer avec précaution : le modèle ne permet pas de reproduire ici la complexité de ce secteur éloigné du secteur d'intérêt majeur du fait de l'établissement de deux nappes superposées et du peu de mesures piézométriques permettant de contraindre la calibration (voir section 5.2).

Modèle Hydrogéologique des formations volcaniques du littoral Nord de la Réunion
 Projection hydrogéologique : Evolutions moyennes attendues
 EMPRISE DU MODELE

SCENARIO 2 – Simulation Climatique CNRM – CERFACS / CNRM – ALADIN63 – SSP5 – 8.5

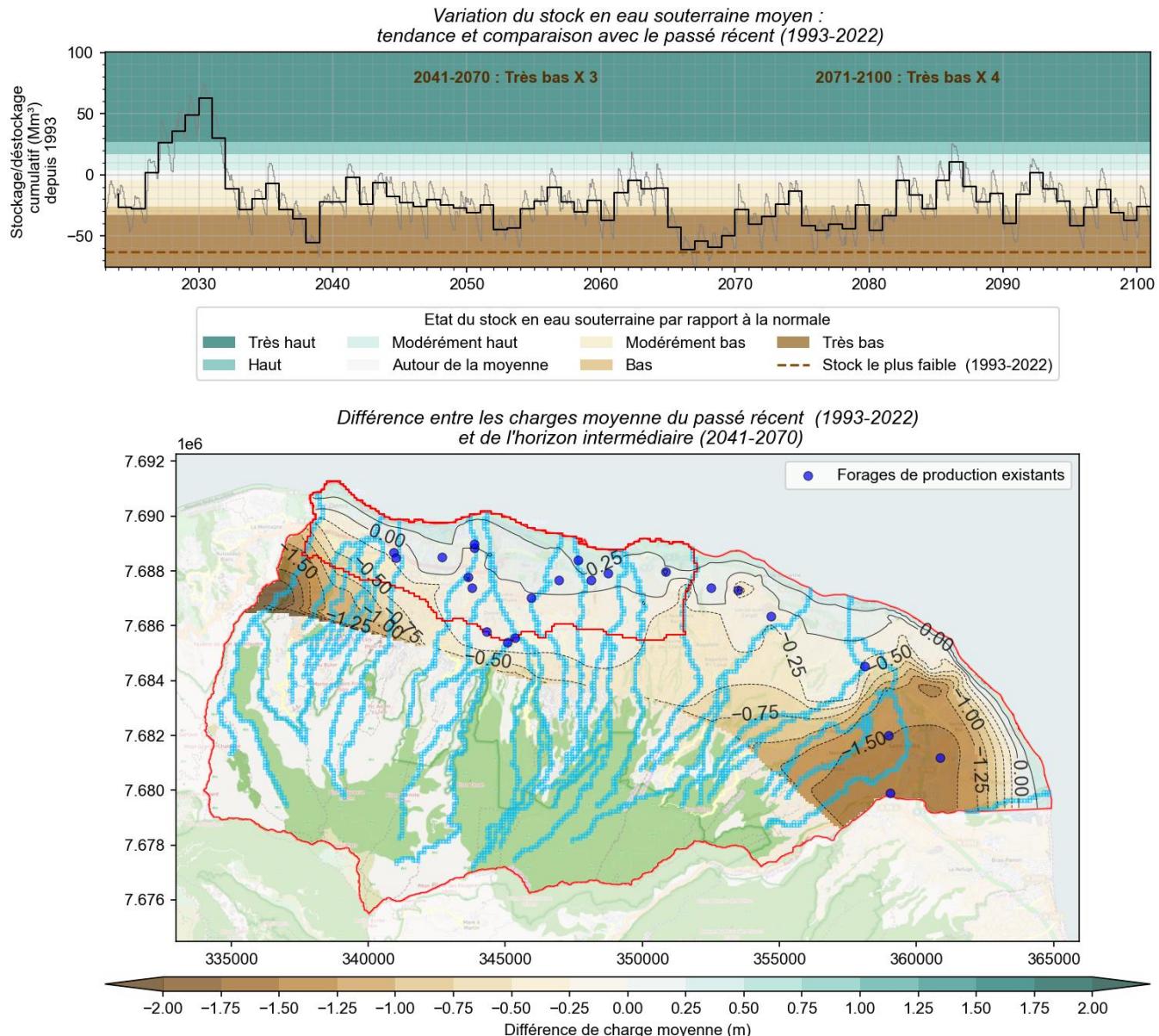


Figure 48 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.

[Haut] Evolution du stock en eau souterraine moyen sur l'emprise du modèle au cours du siècle. [Bas] Anomalie des niveaux piézométriques moyens projetés à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022)

A l'échelle de la MESO FRLG101 sur le secteur d'intérêt de Saint-Denis / Sainte Marie (Figure 49), les stocks en eau souterraine sont à la hausse au cours du siècle du fait de l'augmentation du niveau de la mer. On note toutefois dans ce secteur une baisse de la recharge moyenne du secteur au cours du siècle, plus marquée pour ce scénario 2 que pour le scénario 1. Cette baisse de la recharge s'explique en partie, comme pour le scénario 1, par une modification de la répartition infiltration / ruissellement et donc une diminution de l'infiltration

moyenne. On a donc ici une compétition entre les effets de la hausse du niveau de la mer et ceux de la baisse de la recharge : cette compétition est visible sur les graphiques d'évolution des niveaux piézométriques à l'étiage au droit des forages existants. Une baisse est simulée pour certains ouvrages à l'horizon intermédiaire, baisse qui n'était pas simulée pour le scénario 1 : lorsque c'est le cas, la baisse reste modérée au regard des niveaux piézométriques observés lors des étiages sévères historiques. A l'horizon fin de siècle la quasi-totalité des forages présentent des niveaux moyens à l'étiage plus hauts que par le passé du fait de la remontée du niveau de la mer. En outre, le ratio prélèvement / infiltration évolue logiquement à la hausse mais dans des proportions modérées (ratio augmenté en moyenne de +1.2% à l'horizon fin de siècle).

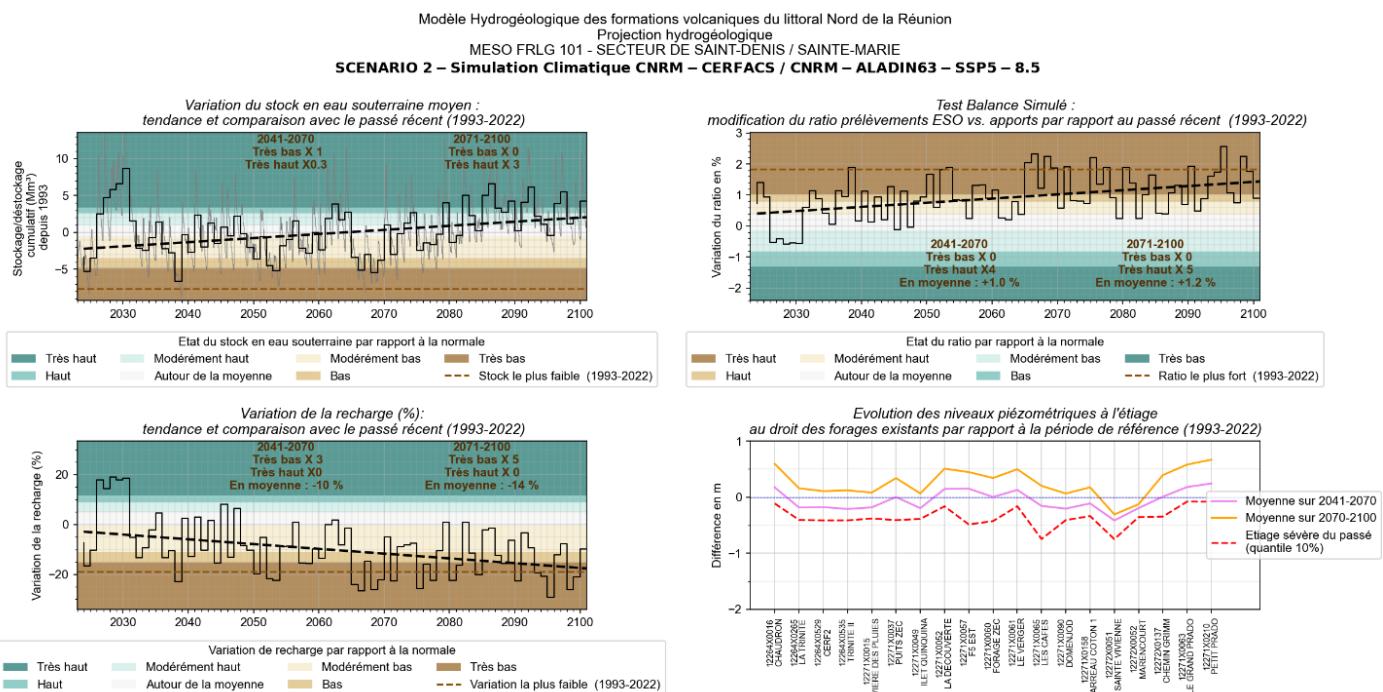


Figure 49 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : Evolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie.

[Haut, Gauche] Evolution du stock en eau souterraine moyen au cours du siècle [Bas, Gauche] Evolution de la recharge au cours du siècle. [Haut, Droite] Evolution du ratio Prélèvements / Recharge au cours du siècle [Bas, Droite] Anomalie des niveaux piézométriques atteints à l'étiage à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022) au droit des forages existants. Les étiages les plus sévères du passé (quantile 10%) sont également indiqués.

Les conséquences en matière de **remontée de l'interface eau douce / eau salée**, déjà évoquées pour le scénario 1 sont plus importantes, comme le montre la figure 50, pour ce scénario 2 du fait 1) de la remontée plus importante du niveau de la mer et 2) de la moindre recharge observée. Bien qu'elle soit non calibrée, il s'agit d'une remontée qui pourrait être de l'ordre de quelques mètres au droit des forages exploités. C'est donc un point de vigilance important quant à la sécurisation des forages, et un suivi pourrait être mis en place pour évaluer l'évolution de ce phénomène au cours du temps.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénario de gestion de la ressource en eau

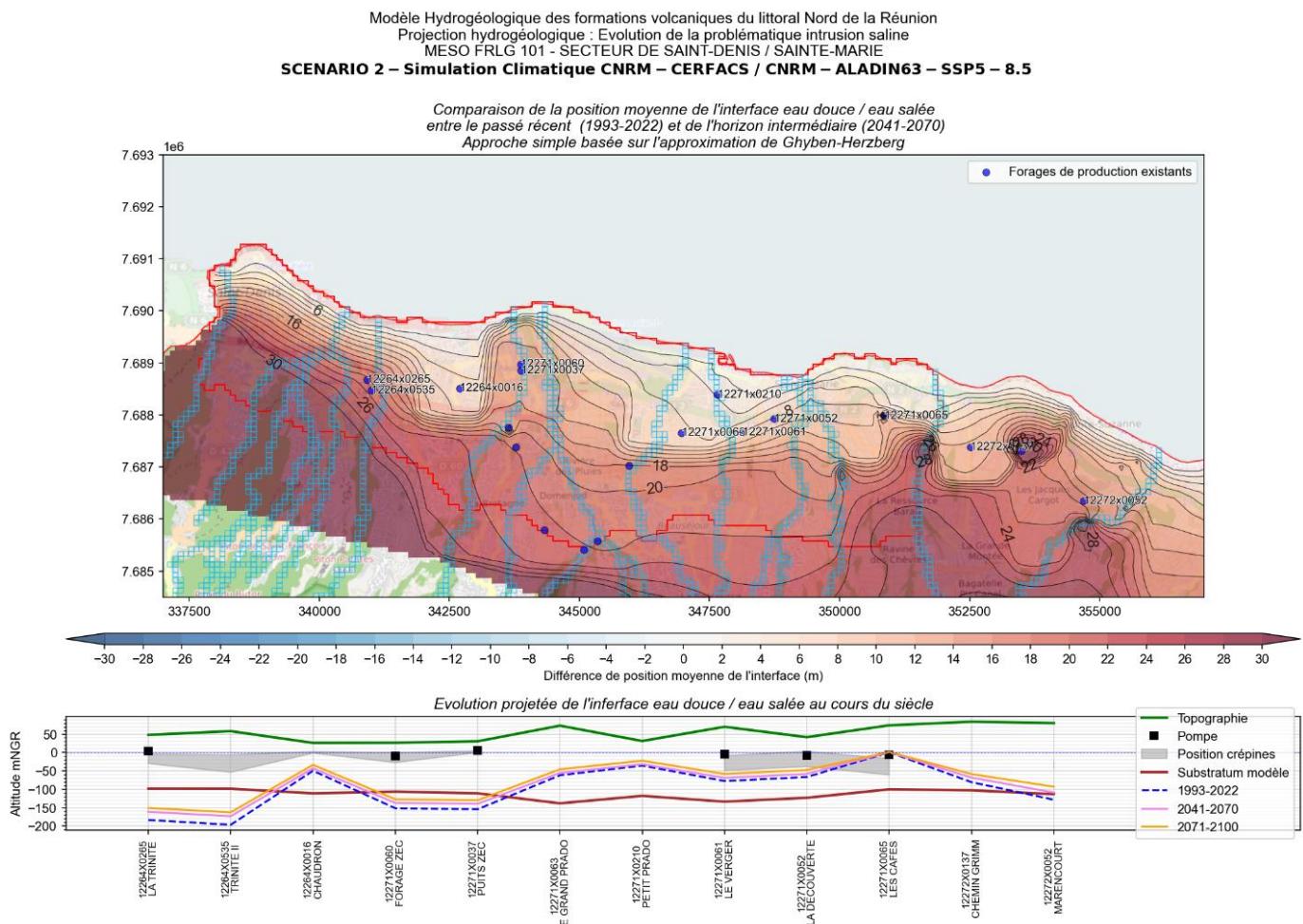
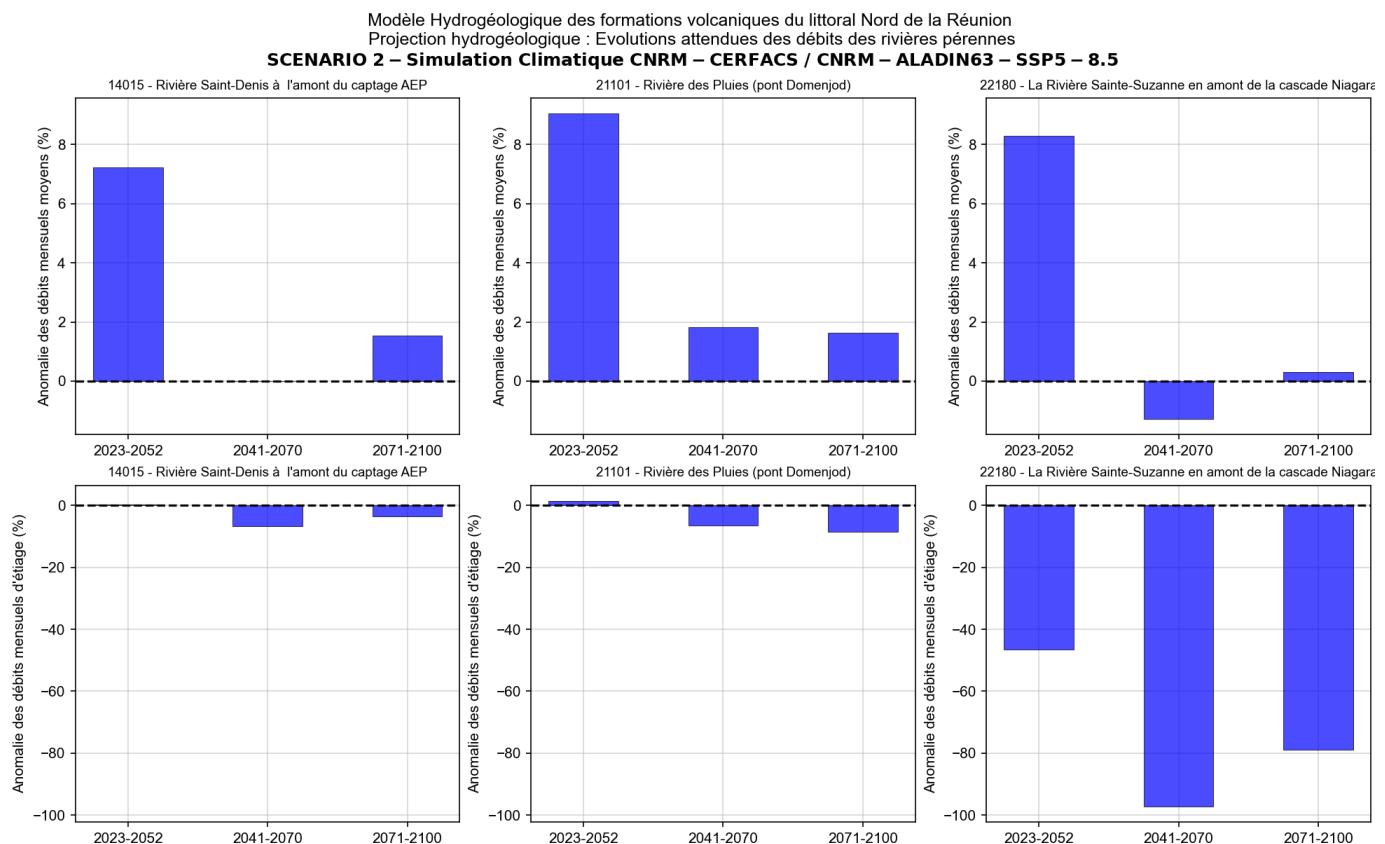


Figure 50 - Projection hydrogéologique issue du scénario 2 : évolution de la problématique intrusion saline.

[Haut] Anomalie de la position de l'interface eau douce – eau salée projetée à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022). [Bas] Evolution de la position moyenne de l'interface eau douce – eau salée au cours du siècle au droit des forages situés à proximité de l'océan. La partie sud du modèle n'est pas contrainte par des observations ce qui engendre des valeurs non réalisistes.

Au niveau des cours d'eau pérennes, on remarque une évolution modérée des débits moyens (globalement à la hausse) et d'étiage (globalement à la baisse) : cette tendance simulée est plutôt cohérente avec la faible évolution des pluies efficaces attendues. On notera une plus forte baisse des débits d'étiage au droit de la rivière Sainte-Suzanne, mais les débits d'étiage y sont très faibles : les fortes baisses en pourcentage correspondent donc à des débits très faibles et sont donc peu interprétables.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarii de gestion de la ressource en eau



*Figure 51 - Evolutions attendues des débits des rivières pérennes, simulation associée au scénario 2.
[Haut] Débits moyens annuels [Bas] Débits à l'étiage*

6.5. SCENARIOS 3 A 6 : EVOLUTIONS DES BESOINS EN EAUX SOUTERRAINES

6.5.1. Modalités de mise en œuvre des simulations

Les scénarios 3 à 6 sont basés sur les projections climatiques et marégraphiques intégrées au scénario 2. Ces scénarios se distinguent du scénario 2 par les projections choisies pour les prélèvements. Ces projections sont basées sur les données d'évolutions des besoins issues de l'analyse besoins-ressources menée actuellement dans le cadre du PDEAH, notamment avec l'objectif de sécuriser le projet MEREN.

Dans ce cadre, des débits additionnels à prélever en année critique (correspondant à une année quinquennale sèche pour les précipitations) ont été estimés avec et sans restriction des besoins : ils sont respectivement de 850 l/s et de 1 160 l/s pendant 10 mois sur 12 d'avril à fin janvier. Ces débits pourraient être augmentés de 400 l/s dans la situation où le projet de réutilisation des eaux usées traitées (REUT) ne serait pas réalisé (soit 1 250 l/s et 1 560 l/s avec et sans restriction des besoins). Les débits estimés par l'analyse besoins-ressources pour mobiliser une ressource en eau supplémentaire lors d'années critiques intègrent les usages AEP et irrigation. Par ailleurs, les débits sont estimés pour l'horizon 2052, avec une mise en œuvre des forages de secours prévue après 2032 (avec une montée en charge estimée à +35% par an).

Trois forages existants non utilisés ont été identifiés pour prélever une partie de ces volumes : il s'agit des forages Grimm, Grand Prado, et Petit Prado. En outre, dans le cadre d'une étude récente pour le Département de la Réunion (Laurent et Aunay, 2023 ; Rapport BRGM RP-72159-FR), des secteurs ont également été identifiés comme favorables à l'implantation de nouveaux forages. Afin de pouvoir satisfaire le reste des volumes nécessaires à des débits raisonnables par ouvrage, 24 ouvrages fictifs ont été aléatoirement implantés au sein de ces zones favorables (Figure 52).

Il a été décidé en concertation avec le Comité de Pilotage de tester deux débits critiques dans deux nouveaux scénarios (**scénario 3 : débit critique de 1 160 l/s** ; **scénario 4 : débit critique de 1 560 l/s**), sous les conditions temporelles et spatiales présentées ci-dessus, c'est-à-dire après 2032 et sur les 27 forages ciblés (3 existants et 24 forages fictifs).

Il est également proposé, en l'absence de valeur cible pour les débits critiques des cours d'eau principaux du secteur, d'ajouter aux volumes prélevés en nappe dans le scénario 4, la totalité des débits prélevés dans les cours d'eau et cela, soit pour les mois où les débits des cours d'eau sont les plus faibles (Octobre, Novembre, Décembre) (**scénario 5**), soit pour tous les mois de l'année (**scénario 6**).

Pour clarifier le propos, les résultats des scénarios 3 à 6 qui ne diffèrent que par les volumes prélevés (Figure 38) sont présentés ensemble dans la section suivante. Les mêmes figures établies pour les simulations 1 et 2 sont établies pour ces 4 nouveaux scénarios.

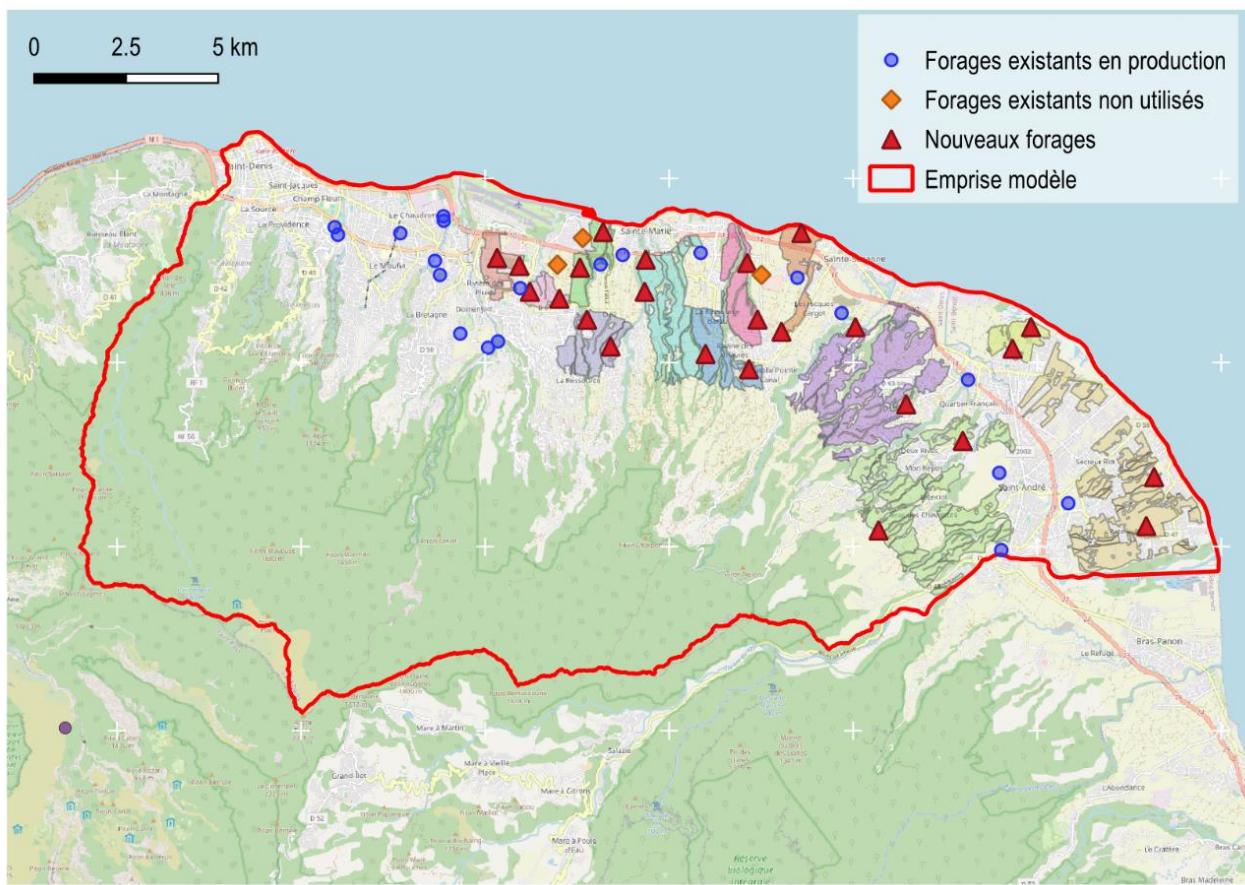


Figure 52 – Localisation des nouveaux forages fictifs intégrés au modèle pour les simulations des scénarios 3 à 6 (en transparence sont indiquées les zones considérées comme favorables à l'implantation de nouveaux forages)

6.5.2. Résultats

Les résultats sont fournis sous la forme de graphiques d'évolution de différents indicateurs au cours du siècle et de cartes.

En matière de **piézométrie générale** (Figure 53), on note, en comparaison avec les résultats du scénario 2, une baisse des stocks en eau souterraine qui s'intensifie au fil des scénarios avec l'augmentation croissante des prélèvements. Géographiquement, on note logiquement une baisse des niveaux piézométriques dans les secteurs où les nouveaux forages ont été implantés.

Au droit de la zone d'intérêt (MESO 101, secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie) (Figure 54), on rappelle que le scénario 2 montrait au global une hausse du **stock en eau souterraine** en raison de la remontée du niveau de la mer et de la proximité de ce secteur à l'océan. Cette hausse n'est plus identifiée à partir du scénario 3 du fait des quantités d'eau additionnelles prélevées et on note que le stock en eau souterraine atteint fréquemment des niveaux jugés très bas (c'est à dire inférieur ou égal au quantile 10 % simulé sur la période de référence) notamment lors de la période 2040-2070 lorsque la remontée du niveau de la mer est moindre. Ce constat s'intensifie du scénario 3 au scénario 6 avec l'augmentation des débits prélevés. **L'évolution de la recharge** pour les scénarios 3 à 6 est très similaire à celle associée au scénario 2 : elle est en réalité légèrement inférieure du fait de la baisse des niveaux piézométriques et de la recharge amont lorsque les prélèvements y sont plus importants mais quantitativement la différence ne semble

pas significative. Au total, du fait de prélèvements bien plus importants et d'une recharge quasiment similaire, le **ratio prélèvement / apports** (apports amont, infiltration) subit une hausse à partir de la mise en route des prélèvements, hausse allant de ~+8.5 % pour le scénario 3 à ~+13 % pour le scénario 6 à l'horizon 2041-2070. On rappelle que cette hausse n'était que de +1% pour le scénario 2 à l'horizon 2041-2070. L'effet de l'augmentation importante des prélèvements simulée dans les scénarios 3 à 6 est également bien visible sur **les niveaux piézométriques à l'étiage**. La figure 54 montrent qu'au droit des ouvrages existants (y compris au droit de ceux pour lesquels les prélèvements sont restés constants), les niveaux moyens en étiage sur la période 2041-2070 sont du même ordre que ceux atteints lors des étiages sévères historiques voire les dépassent. Ces résultats doivent être mis en regard des problématiques induites et observées sur les ouvrages lors des étiages historiques pour déterminer si ces tendances sont admissibles ou non.

On rappelle que les conséquences en matière de **remontée de l'interface eau douce / eau salée** étaient plus importantes pour le scénario 2 que pour le scénario 1, du fait 1) de la remontée plus importante du niveau de la mer et 2) de la moindre recharge observée. L'augmentation des prélèvements accentue ce phénomène, et les effets de ces nouveaux prélèvements s'additionnent aux effets climatiques (Figure 55). On note donc au droit des forages existants situés à proximité de l'océan, une augmentation de l'interface au cours du siècle hausse croissante du scénario 3 au scénario 6. Même si ces résultats sont obtenus à partir d'une approche simple d'évaluation de la position de l'interface eau-douce / eau salée, le phénomène d'intrusion saline et son suivi constituent donc un point de vigilance important dans la mesure où les évolutions climatiques et d'exploitation pourraient entraîner une vulnérabilité plus importante des ouvrages sur ce point. Pour mémoire, la remonté de l'interface eau douce / eau salée risque d'engendrer une dégradation des eaux exploitées, les rendant ainsi improches pour les usages d'eau potable et d'irrigation.

NB. Les résultats sur les rivières pérennes ne sont pas montrés ici car ils sont logiquement inchangés par rapport aux résultats associés au scénario 2 : on rappelle (cf. section 4.7), que du fait de la géométrie de l'aquifère, les occurrences de drainage de la nappe de base par les cours d'eau (flux depuis la nappe vers la rivière) sont rares, et que par conséquent, l'impact de l'augmentation des prélèvements en eau souterraine n'est pas visible sur les débits des cours d'eau. Seuls les débits de la rivière St-Denis en aval du captage AEP sont augmentés pour les scénarios 5 et 6, suite à la diminution des prélèvements en eau de surface.

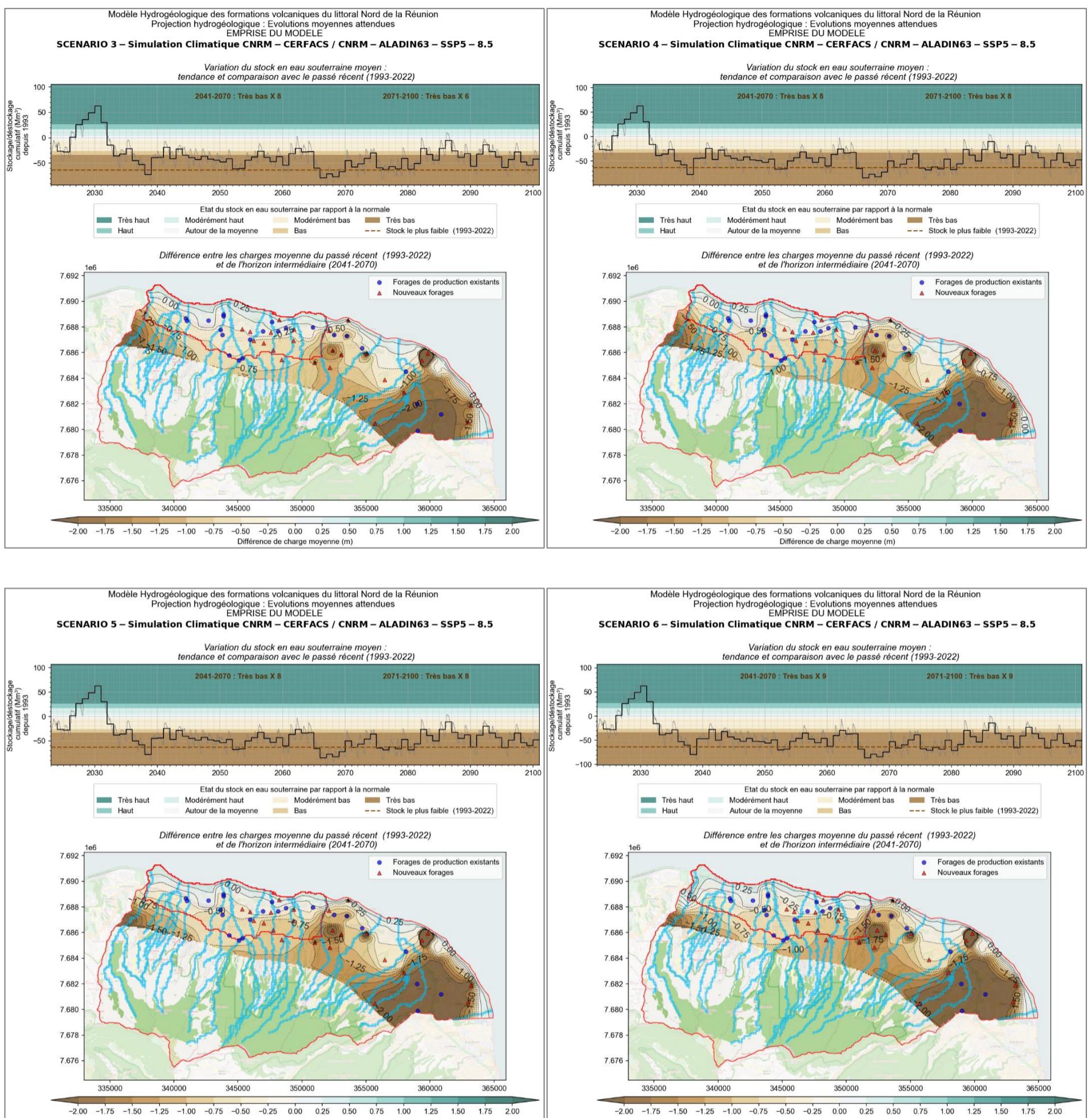


Figure 53 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution moyenne attendue sur la piézométrie.
[Haut] Evolution du stock en eau souterraine moyen sur l'emprise du modèle au cours du siècle. [Bas] Anomalie des niveaux piézométriques moyens projetés à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022).

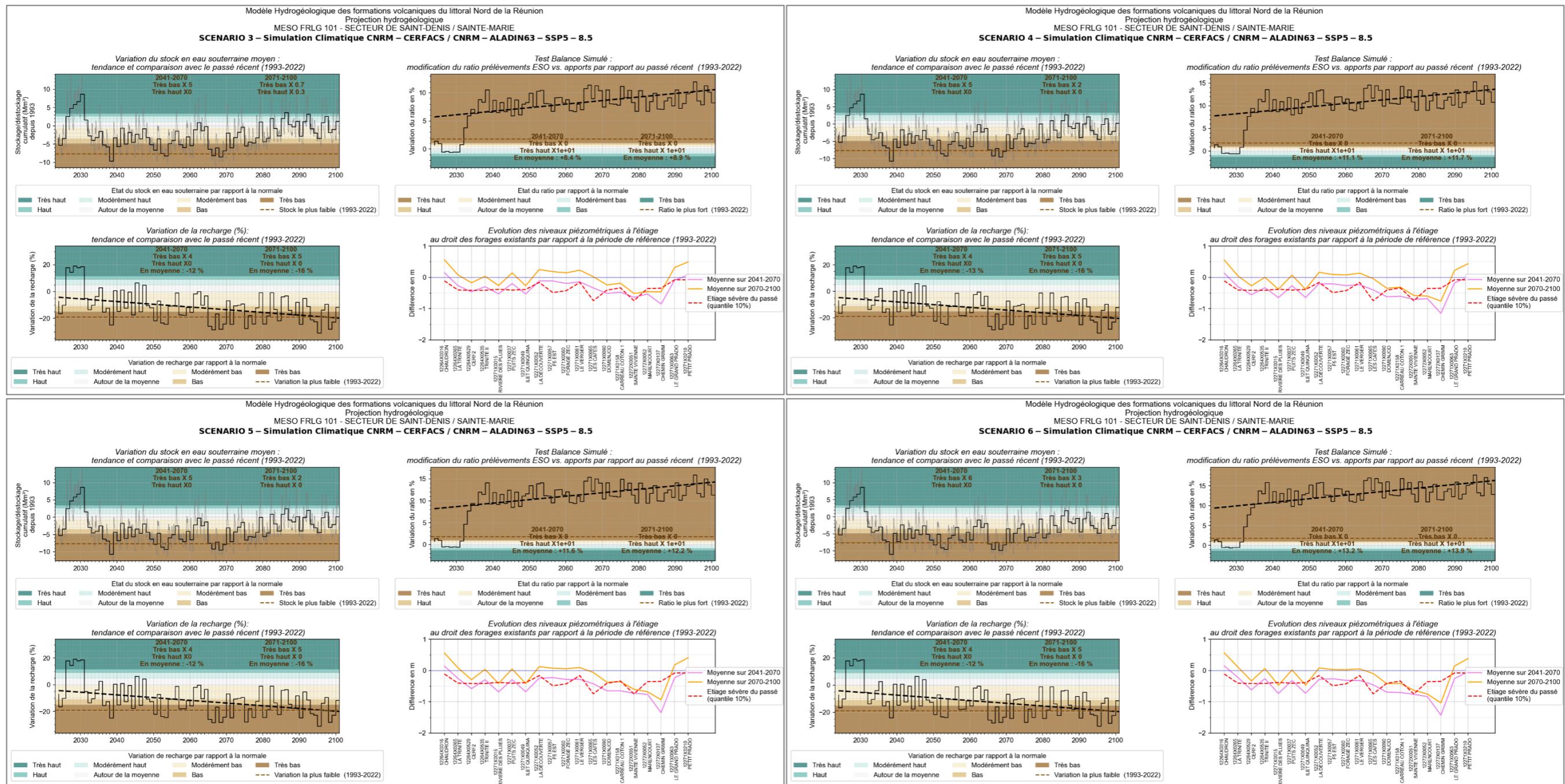


Figure 54 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution attendue sur les eaux souterraines au droit du de la MESO 101 – Secteur de Saint-Denis / Sainte-Marie.

[Haut, Gauche] Evolution du stock en eau souterraine moyen au cours du siècle [Bas, Gauche] Evolution de la recharge au cours du siècle. [Haut, Droite] Evolution du ratio Prélèvements / Recharge au cours du siècle [Bas, Droite] Anomalie des niveaux piézométriques atteints à l'étage à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022) au droit des forages existants. Les étages les plus sévères du passé (quantile 10%) sont également indiqués.

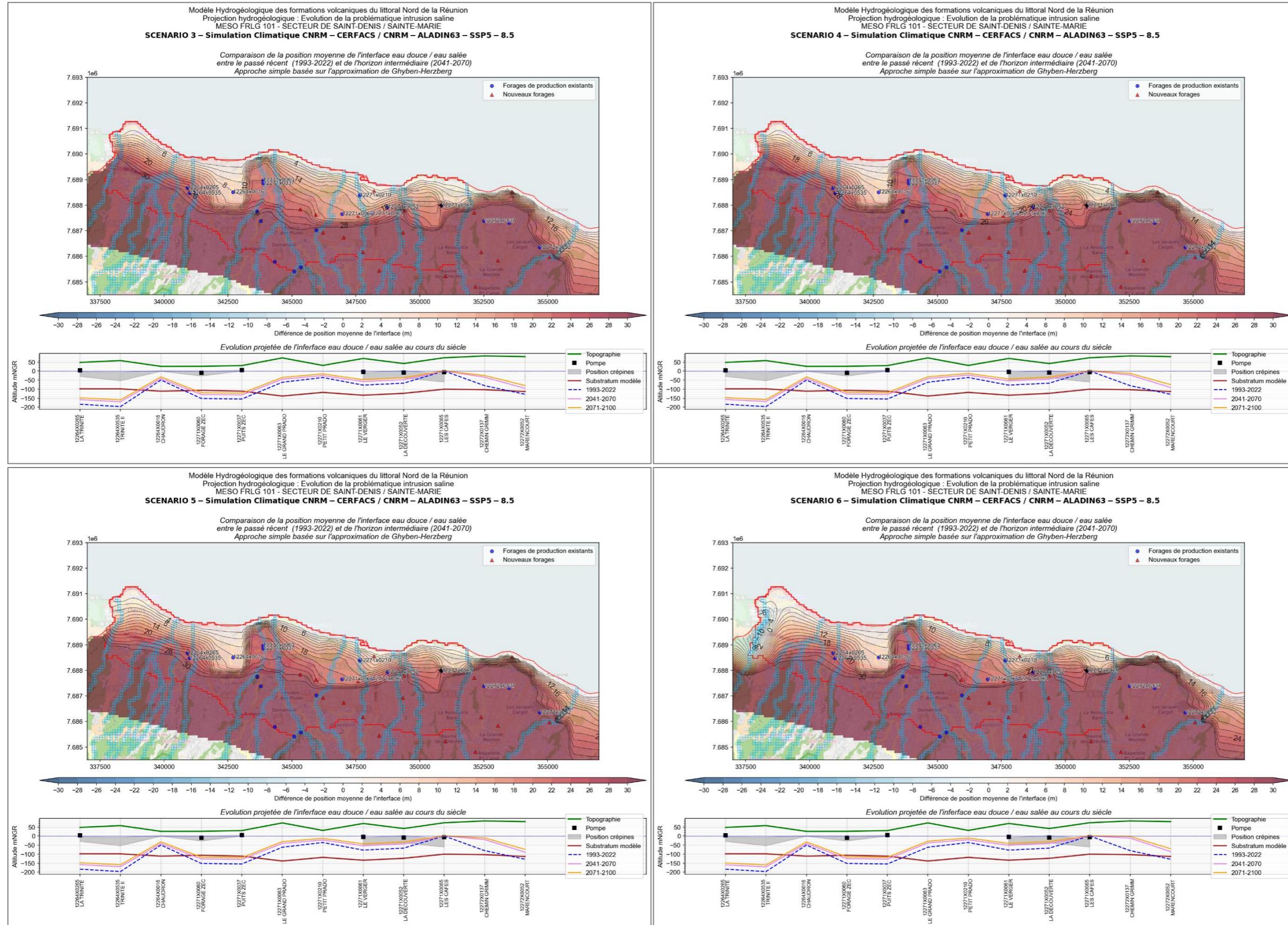


Figure 55 - Projections hydrogéologiques issues des scénarios 3 à 6 : Evolution de la problématique intrusion saline.

[Haut] Anomalie de la position de l'interface eau douce – eau salée projetée à l'horizon intermédiaire (2041-2070) par rapport à la période de référence (1993-2022). [Bas] Evolution de la position moyenne de l'interface eau douce – eau salée au cours du siècle au droit des forages situés à proximité de l'océan.

6.6. SYNTHESE - MESSAGES CLES

Le modèle hydrogéologique a permis de simuler 6 scénarios prospectifs différents choisis par le Comité de Pilotage :

- Scénarios 1 et 2 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau sans modification de la demande, avec deux projections climatiques différentes (SSP2-4.5 et SSP5-8.5, projections issues du projet BRIO, produites à partir du RCM Aladin-V6 couplé au GCM CNRM-ESM2-1) ;
- Scénarios 3 et 4 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique (deux scénarios d'évolution de la demande) ;
- Scénarios 5 et 6 : conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique et reports des prélèvements réalisés en eau superficielle vers les eaux souterraines (deux scénarios de reports testés).

De l'analyse des résultats se dégagent les messages clés suivants :

- La continuation dans le futur des prélèvements en eau souterraine actuels est admissible au regard d'un futur tel que celui décrit par les scénarios 1 et 2 (SSP2-4.5/SSP5-8.5) ;
- Dans le cadre d'un futur plus sec (scénario 2, SSP5-8.5), le modèle engendre une remontée de l'interface eau douce/eau salé et l'évolution de la problématique intrusion saline est à surveiller. La mise en œuvre d'un suivi régulier de l'intrusion saline en aval des ouvrages permettrait de suivre l'évolution de cette problématique au cours du temps (suivi géophysique, piézomètres à créer / suivre à proximité du trait de côte, suivi de la conductivité électrique en continu, réalisation de logs ponctuels de conductivité...) ;
- Les simulations des scénarios 1 et 2 montrent une évolution modérée au cours du siècle (respectivement à la hausse et à la baisse) des débits à l'étiage des rivières pérennes du secteur d'intérêt ;
- Les impacts cumulés du changement climatique et de l'augmentation de prélèvements (scénarios 3 à 6, prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique) sont visibles sur l'évolution de la ressource en eau souterraine au cours du siècle (en particulier sur la période 2041-2070) ;
- Sous ces 4 scénarios, les niveaux piézométriques moyens simulés en étiage à l'horizon 2041-2070 sont de l'ordre des niveaux atteints lors des étiages sévères historiques. Ces résultats doivent être mis en regard des problématiques induites et observées sur les ouvrages lors des étiages historiques pour déterminer si ces tendances sont admissibles ou non ;
- Le risque d'intrusion saline est augmenté avec le temps, sous l'effet cumulé du changement climatique et de l'augmentation des prélèvements. A ce stade, il n'est pas envisageable d'évaluer la qualité de l'eau prélevée dans le futur;

Lors de l'étude, certaines limites ont pu être notées :

- Les scénarios 1 et 2 considèrent une stabilité des prélèvements au cours du siècle alors qu'est intégrée aux scénarios 3 à 6 une augmentation très significative des prélèvements et sur des ouvrages aux localisations certes cohérentes mais fictives : le modèle pourrait dans le futur être utilisé pour tester des scénarios intermédiaires et plus réalistes dans le cadre d'une réflexion avancée sur de futurs projets (avec localisation alternative de nouveaux forages et volumes associés).
- Même si des indicateurs de criticité ont été proposés pour caractériser l'évolution de la vulnérabilité des eaux souterraines et en particulier des forages AEP (par ex. niveaux piézométriques à l'étiage, position de l'interface eau douce – eau salée), permettant ainsi de mettre en évidence l'évolution de telle ou telle problématique, le manque de seuils existants pour caractériser l'atteinte d'une situation critique est limitante pour l'analyse.

7. Conclusion et perspectives

Les deuxième et troisième phases de l'étude détaillées dans ce rapport ont permis la construction d'un modèle numérique hydrogéologique à partir de la connaissance et des données acquises en phase 1, puis son utilisation pour tester des scénarios de gestion de la ressource en eau définis en accord avec le Comité de Pilotage.

Le modèle développé permet de reproduire le modèle conceptuel identifié pour expliquer le fonctionnement de l'hydrosystème local et plus précisément de la nappe de base s'établissant dans les horizons volcaniques aquifères. Il est construit avec le code MARTHE, développé par le BRGM. Il s'étend du Nord au Sud, de l'océan jusqu'aux remparts et d'Est en Ouest, depuis la rivière du Mât jusqu'aux limites ouest du bassin versant de la rivière Saint-Denis, couvrant ainsi tout l'impluvium alimentant en eaux souterraines la MESO d'intérêt FRLG101. Toute cette emprise est discréétisée horizontalement en mailles de 100m x 100m. La géométrie de la formation aquifère considérée, correspondant aux formations volcaniques les plus récentes dites PN3-PN4, a été estimée à partir des données de géophysique héliportée (AEM) disponibles sur une partie du secteur d'étude. Du fait de la perméabilité en grand de ce système aquifère, il est considéré comme un milieu poreux équivalent dans la modélisation hydrogéologique et représenté numériquement par un modèle monocouche, essentiellement libre.

Le système aquifère régional (nappe de base) est alimenté par les précipitations, et par des infiltrations localisées au droit des rivières et des ravines du secteur. Le rôle du sol et de la zone non saturée (exceptionnellement importante dans certains secteurs de l'emprise du modèle) est pris en compte via un bilan dit hydroclimatique permettant de quantifier des flux de ruissellement vers les cours d'eau et de recharge vers la nappe à partir des chroniques de pluie et d'évapotranspiration disponibles sur le secteur. Le retard attendu dans l'arrivée de la recharge au toit de la nappe du fait de l'épaisseur de la zone non saturée est également pris en considération. Les nappes perchées ne peuvent être modélisées explicitement, mais leur influence dans le retard de l'infiltration des eaux de pluie vers la nappe régionale et dans l'alimentation des débits des cours d'eau est considérée dans les bilans hydroclimatiques. Enfin les principaux cours d'eau du secteur pérennes ou intermittents sont modélisés explicitement, de sorte à retranscrire au mieux, en zone côtière, les infiltrations de leurs débits vers la nappe de base. L'exutoire de cette nappe de base, étant l'océan, les variations du niveau océanique sont intégrées comme limite Nord du modèle. Enfin, les prélèvements et rejets d'eau du secteur, associés à la nappe ou aux cours d'eau, sont retranscrites dans le modèle.

Au final, le modèle numérique hydrodynamique construit permet de simuler en régime transitoire (pas de temps mensuel) les niveaux piézométriques en tout point du modèle ainsi que les débits des cours d'eau en tout point de leur linéaire. Le modèle a été calibré entre 1995 et 2020 à partir de la connaissance débitmétrique et piézométrique disponible sur le secteur. Afin de traduire les hétérogénéités attendues, le modèle est paramétré en utilisant des zones de propriétés homogènes pour la perméabilité et l'emmagasinement libre de l'aquifère simulé (79 zones). Les perméabilités de rivière sont quant à elle ajustées par affluents sur la partie aval (29 affluents), et les propriétés du sol et de la ZNS sont ajustées par zone de sol (24 zones). L'estimation de ces 291 paramètres du modèle est réalisée de manière algorithmique, par la méthode de Gauss-Levenberg-Marquardt, implémentée via l'outil PEST++. Le modèle calibré fournit des résultats satisfaisants à plusieurs titres :

- les débits des cours d'eau suivis sont très correctement reproduits malgré les comportements complexes et variées : en particulier, les caractères pérennes vs. intermittents sont bien retracés ;
- les résultats sont également satisfaisants concernant la piézométrie malgré la diversité des dynamiques observées (inertielles et dynamiques). A noter également le bon comportement du modèle vis-à-vis des prélèvements qui peuvent être significatifs : le modèle permet en effet simultanément de respecter la totalité des volumes prélevés tout en reproduisant les charges observées ;
- les transmissivités obtenues à l'issue de cette étape de calibration sont dans les ordres de grandeurs attendus au regard des mesures ayant pu être faites par le passé.

Certains secteurs, connus pour leur piézométrie atypique (plusieurs nappes superposées, gradient hydraulique très hétérogène, etc.) restent délicats à modéliser à partir des connaissances et des données à disposition. Ces secteurs ont été identifiés et des hypothèses explicatives ont été émises. En outre, même si la dynamique n'y est pas toujours exactement reproduite, le comportement global du modèle hydrodynamique reste satisfaisant.

Des bilans hydrologiques permettant d'éclairer le fonctionnement de l'hydrosystème ont été établis à l'échelle du modèle et à l'échelle de la MESO FRLG101 sur le secteur d'intérêt de Saint-Denis / Sainte Marie. Ces bilans permettent également de calculer la proportion des prélèvements en eau souterraine au regard des différents apports du secteur (apports amont, infiltration par les rivières et hors rivières) : sur le secteur d'intérêt, ce ratio est relativement stable entre 2000 et 2020 et avoisine les 5 % en moyenne.

Afin de renforcer la robustesse du modèle et la confiance dans les sorties calculées, une analyse des incertitudes associées à la paramétrisation du modèle a également été menée selon une approche de type Monte-Carlo basée sur la méthode Iterative Ensemble Smoother (IES). Cette approche permet de produire un ensemble de plus de 200 modèles additionnels également calibrés sur les observations mais avec des jeux de paramètres différents du modèle de référence. Les résultats de cet ensemble de modèles permettent :

- 1- l'évaluation des zones du domaine d'étude où les paramètres du modèle ne sont pas bien contraints et où ils sont donc incertains. Ces zones correspondent aux secteurs où peu d'observations sont disponibles pour contraindre le modèle ;
- 2- l'impact de ces incertitudes sur différentes variables de sortie du modèle comme la piézométrie ou le ratio prélèvements en eau souterraines au regard des différents apports du secteur. En particulier, l'incertitude sur le ratio prélèvements/recharge simulé est inférieur à $\pm 1\%$. Cet ordre de grandeur est adapté aux objectifs du modèle.

La mise en œuvre du modèle a permis de souligner plusieurs domaines où la connaissance gagnerait à être améliorée :

- 1- L'estimation des volumes théoriquement exploitables commence avant tout par une surveillance robuste des volumes prélevés actuels. Dans la mesure où le nombre de captages (souterrains ou en rivière) reste limité, un suivi à minima mensuel des volumes prélevés est préconisé ;
- 2- L'étape de calage du modèle a mis en évidence des incohérences sur certaines chroniques piézométriques existantes. Il est préconisé de procéder à des nivelingments

des ouvrages et des maintenances régulières des ouvrages de suivi (voir § 5.2.1 – p.39 pour le détail).

La robustesse générale du modèle a permis son exploitation pour tester des scénarios prospectifs de gestion de la ressource en eau afin d'apporter des éléments utiles aux acteurs de la ressource en eau (phase 3 du projet). Ainsi 6 scénarios prospectifs ont été co-construits avec le Comité de Pilotage :

- Scénarios 1 et 2 : Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau sans modification de la demande, avec deux projections climatiques différentes (SSP2-4.5 et SSP5-8.5 données issues du projet BRIO, projections issues du projet BRIO, produites à partir du RCM Aladin-V6 couplé au GCM CNRM-ESM2-1) ;
- Scénarios 3 et 4 : Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique (deux scénarios d'évolution de la demande) ;
- Scénarios 5 et 6 : Conséquences du changement climatique sur la ressource en eau avec prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique et reports des prélèvements réalisés en eau superficielle vers les eaux souterraines (deux scénarios de reports testés).

De l'analyse des résultats se dégagent les messages clés suivants :

- La continuation dans le futur des prélèvements en eau souterraine actuels sont admissibles au regard d'un futur tel que celui décrit par les scénarios 1 et 2 (SSP2-4.5/SSP5-8.5) ;
- Dans le cadre d'un futur plus sec (scénario 2, SSP5-8.5), le modèle montre une remontée de l'interface eau douce/eau salé et l'évolution de la problématique intrusion saline est à surveiller. Actuellement, il n'est pas possible de statuer sur l'éventuelle dégradation de la qualité des eaux dans le futur en raison de l'augmentation de la minéralisation. La mise en œuvre d'un suivi régulier de l'intrusion saline en aval des ouvrages permettrait de suivre l'évolution de cette problématique au cours du temps (suivi géophysique, piézomètres à créer / suivre à proximité du trait de côte, suivi de la conductivité électrique en continu, réalisation de logs ponctuels de conductivité...). Ce suivi pourrait permettre d'alimenter un modèle numérique visant à quantifier plus précisément le risque intrusion saline ;
- Les simulations des scénarios 1 et 2 montrent une évolution modérée au cours du siècle (respectivement à la hausse et à la baisse) des débits des rivières pérennes du secteur d'intérêt à l'étiage ;
- Les impacts cumulés du changement climatique et de l'augmentation de prélèvements (scénarios 3 à 6, prise en compte de l'évolution de la demande en situation critique) sont visibles sur l'évolution de la ressource en eau souterraine au cours du siècle (en particulier sur la période 2041-2070) ;
- Sous ces 4 scénarios, les niveaux piézométriques moyens simulés en étiage à l'horizon 2041-2070 sont de l'ordre des niveaux atteints lors des étiages sévères historiques. Ces résultats doivent être mis en regard des problématiques induites et observées sur les ouvrages lors des étiages historiques pour déterminer si ces tendances sont admissibles ou non ;

- Le risque d'intrusion saline est augmenté avec le temps, sous l'effet cumulé du changement climatique et de l'augmentation des prélèvements.

Lors de la phase 3 de l'étude, certaines limites ont pu être notées :

- Les scénarios 1 et 2 considèrent une stabilité des prélèvements au cours du siècle alors qu'est intégrée aux scénarios 3 à 6 une augmentation très significative des prélèvements et sur des ouvrages aux localisations certes cohérentes mais fictives : le modèle pourrait dans le futur être utilisé pour tester des scénarios intermédiaires plus réalistes dans le cadre d'une réflexion avancée sur de futurs projets (avec localisation alternative de nouveaux forages et volumes associés) ;
- Même si des indicateurs de criticité ont été proposés pour caractériser l'évolution de la vulnérabilité des eaux souterraines et en particulier des forages AEP (par ex. niveaux piézométriques à l'étiage, position de l'interface eau douce – eau salée), permettant ainsi de mettre en évidence, l'évolution de telle ou telle problématique selon les scénarios testés, le manque de seuils existants pour caractériser l'atteinte d'une situation critique est limitante pour l'analyse.

Enfin, il convient de rappeler qu'un modèle numérique hydrogéologique est un outil évolutif au regard des nouveaux prélèvements et des nouvelles observations piézométriques. Ainsi, le modèle développé dans le cadre de l'évaluation des volumes prélevables constitue un outil de la gestion de la ressource en eau souterraine disponible et performant. D'une part, il peut être utilisé pour répondre à des questions spécifiques et d'autre part, il convient de programmer sa réactualisation périodiquement afin d'intégrer les nouvelles données. Pour le présent modèle numérique, une actualisation tous les 5 ans semble pertinente afin de vérifier la robustesse du modèle et que les suivis mis en œuvre sont adaptés.

8. Références bibliographiques

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J., 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press.
- Aunay, B., Genevier, G., Ladouche, B., Maréchal, J.-C., 2010. Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion, BRGM/RP-57955-FR
- Bear J, Cheng AH-D, Sorek S, Ouazar D, Herrera I (1999) Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands
- Chesnaux, R. Closed-form analytical solutions for assessing the consequences of sea-level rise on groundwater resources in sloping coastal aquifers. *Hydrogeol J* 23, 1399–1413 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1276-8>
- Croiset N., Lopez B. (2013) – HYPE : Outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines – Manuel d'utilisation. BRGM/RP-63066-FR. 64 p., 33 fig.
- Croiset N., Le Cozannet G., Laurent A. (2016) – Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport final. BRGM/RP-66229-FR, 57 p., 43 ill.
- Darken P.F. (1999) - Testing for changes in trend in water quality data. PhD Faculty of Virginia Polytehcnic Institute and State University.
- DRIAS, 2020, Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>
- Famin, V., Paquez, C., Danišík, M., Gardiner, N. J., Michon, L., Kirkland, C. L., et al. (2022). Multitechnique geochronology of intrusive and explosive activity on Piton des Neiges volcano, Réunion Island. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 23, e2021GC010214. <https://doi.org/10.1029/2021GC010214>
- Hamed K, Rao A., 1998, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data, *Journal of Hydrology*, 204, Issues 1-4, p182-196
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 755 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Join, J.-L., 1991. Caractérisation hydrogéologique du milieu volcanique insulaire, Le piton des neiges. Montpellier II.
- Join, J.L., Folio, J.L., Robineau, B., 2005. Aquifers and groundwater within active shield volcanoes. Evolution of conceptual models in the Piton de la Fournaise volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 147, 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.03.013>
- Laurent L. et Aunay B. (2022) - Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101. Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire. Rapport final. BRGM/RP-71143-FR

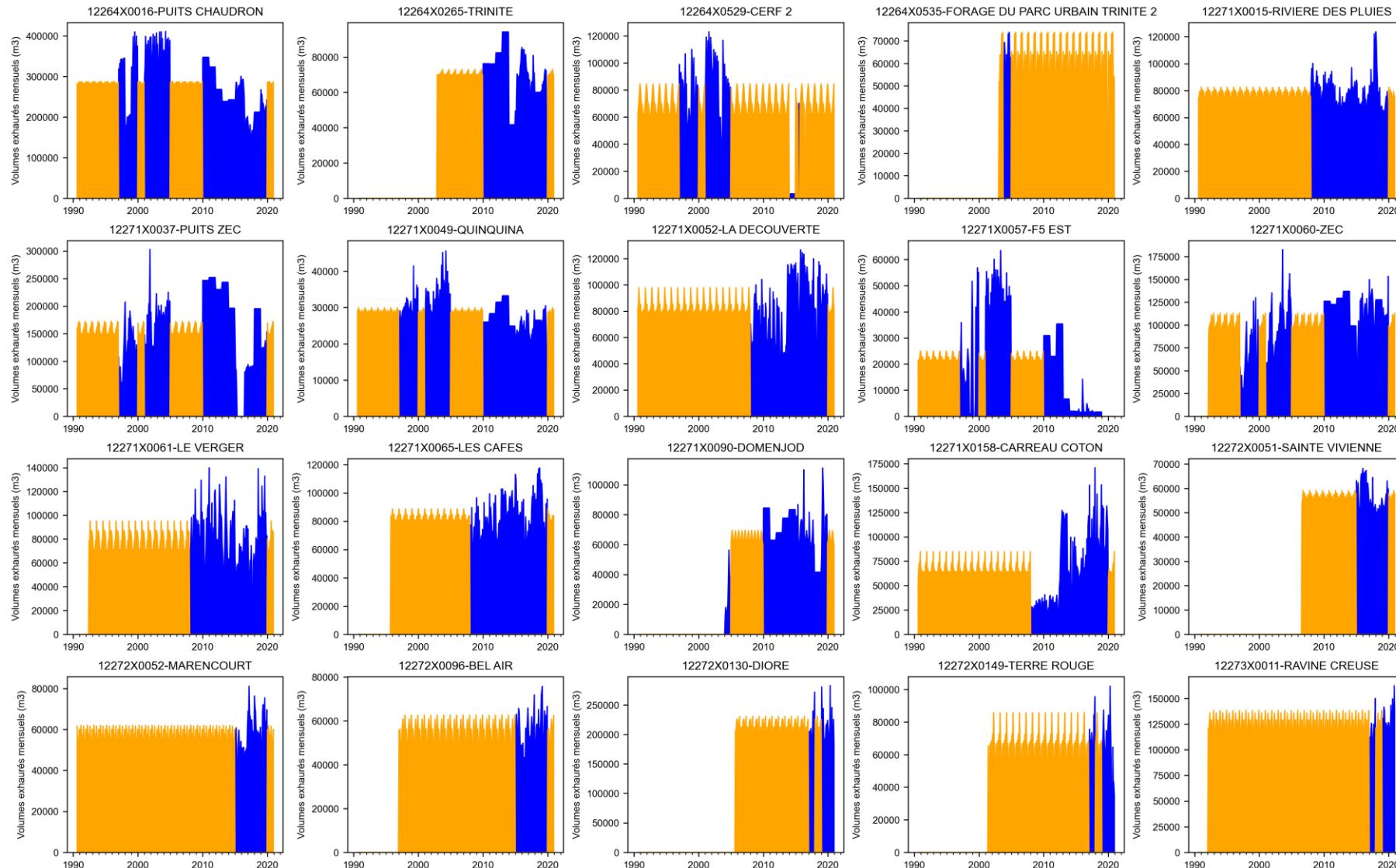
Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

- Leroux M-D., Bonnardot F., Kotomangazafy SF., Said AO., Veerabadren P., et al.. (2023) - Régionalisation du changement climatique et développement de services climatiques dans le sud-ouest de l'océan Indien et ses territoires insulaires. METEO FRANCE. 2023.
- Martelet G., Reninger P-A., Perrin J., Deparis J. (2014) – Acquisition géophysique héliportée de l'île de La Réunion. Rapport final BRGM/RP-63818-FR, 90 p.
- Middlemis H, Walker G, Peeters L, Richardson S, Hayes P, Moore C., 2019, Groundwater modelling uncertainty – implications for decision making. Summary report of the national groundwater modelling uncertainty workshop, 10 July 2017, Sydney, Australia. Flinders University, National Centre for Groundwater Research and Training, Australia. ISBN: 978-0-646-98608-1 DOI: <https://doi.org/10.25957/5ca5641defe56>
- Office de l'Eau Réunion, 2012. Modélisation hydrogéologique des systèmes aquifères du Nord de la Réunion.
- Office de l'eau Réunion, 2019. Evaluation de l'état quantitatif et chimique des masses d'eau souterraine (No. Version du 23 avril 2019). Office de l'Eau.
- Peyrefitte A. ; Reninger P-A., Malard A., Raingeard A., Aunay B. (2022) - Aide à l'implantation d'une galerie souterraine (GANOR) : acquisition et valorisation de données géophysiques héliportées pour la caractérisation profonde géologique et hydrogéologique de la Plaine des Fougères. Rapport final. BRGM/RP-71628-FR, 126 p.
- Pryet A., 2011, Hydrogeology of volcanic islands: a case-study in the Galapagos Archipelago (Ecuador), Thèse de doctorat, UPMC
- Renard B. (2006) - Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Cemagref (Lyon).
- Sen P.K. (1968) - Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.
- Thiéry D., 2014, Logiciel GARDENIA. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR
- Thiéry D., 2015, Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes- Notice d'utilisation de la version 7.5. BRGM/RP-64554-FR
- Werner AD, Simmons CT (2009) Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water* 46(2):197–204
- Werner AD, Bakker M, Post VEA, Vandenbohede A, Lu C, Ataie- Ashtiani B, Simmons CT, Barry DA (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Adv Water Resour* 51:3–26
- White, J.T., 2018, A model-independent iterative ensemble smoother for efficient history-matching and uncertainty quantification in very high dimensions, *Environmental Modelling & Software*, Volume 109, November 2018, Pages 191-201, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.009>
- White, J.T., Hunt, R.J., Fienen, M.N., and Doherty, J.E., 2020, Approaches to Highly Parameterized Inversion: PEST++ Version 5, a Software Suite for Parameter Estimation, Uncertainty Analysis, Management Optimization and Sensitivity Analysis: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 7C26, 52 p., <https://doi.org/10.3133/tm7C26>
- Wu, C.-M., T.-C. J. Yeh, J. Zhu, T. H. Lee, N.-S. Hsu, C.-H. Chen, and A. F. Sancho (2005), Traditional analysis of aquifer tests: Comparing apples to oranges?, *Water Resour. Res.*, 41, W09402, doi:10.1029/2004WR003717.

Annexe 1 Prélèvements simulés sur la période 1990-2020 par ouvrage

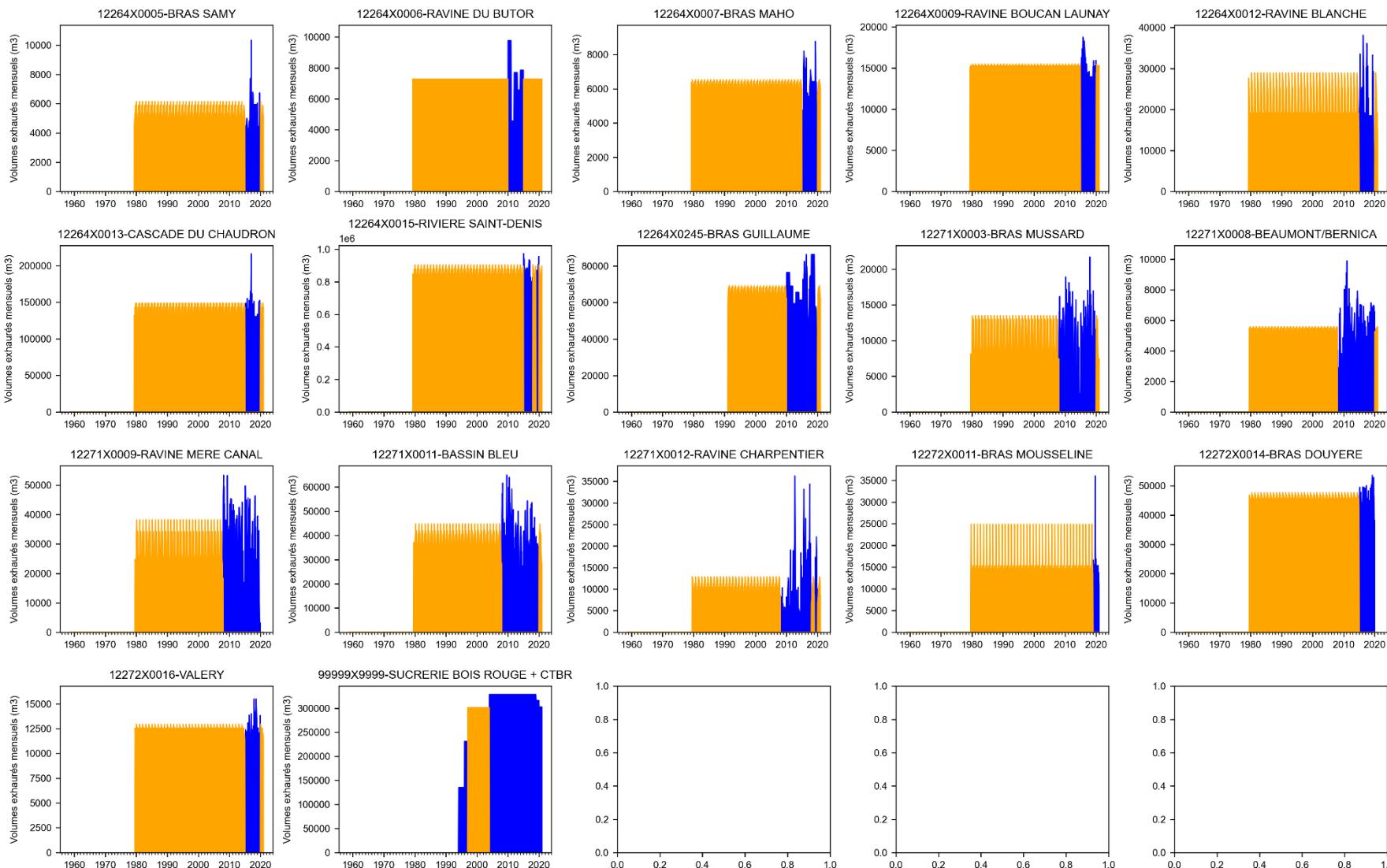
Captages souterrains (en bleu : données réelles, en orange : données reconstruites)

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scénarii de gestion de la ressource en eau



Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarii de gestion de la ressource en eau

Captages de surface (en bleu : données réelles, en orange : données reconstruites)



Annexe 2 Analyse statistique des tendances piézométriques

L'objectif est ici d'évaluer la stationnarité des chroniques piézométriques au droit de différents piézomètres du secteur d'étude afin de déterminer l'existence de tendances à long terme, à la baisse ou à la hausse.

Ainsi, seize piézomètres seront analysés au travers de tests statistiques, pour différents indicateurs. La description des piézomètres analysés et de la méthodologie sera présentée dans une première partie. Les résultats des tests statistiques sont donnés dans une seconde partie. Enfin, un bilan de l'analyse statistique sera établi et des hypothèses sur la potentielle influence des forages exploités aux alentours des piézomètres témoignant de tendance à la baisse seront proposées.

A. DESCRIPTION DES DONNEES ET DE LA METHODOLOGIE

a) Piézomètres analysés

i. Localisation géographique

Le nom, le code national BSS et la commune des piézomètres analysés sont inventoriés dans le tableau suivant (*Figure 56*) et leur localisation est donnée en *figure 57*.

Piézomètre	Code national	Commune
P14 Champ Borne	12273X0009	SAINT-ANDRE
S3 Citronniers	12272X0070	SAINT-ANDRE
Champ Fleuri	12264X0218	SAINT-DENIS
S1 Puits Chaudron	12264X0113	SAINT-DENIS
S1 Puits ZEC Chaudron	12271X0038	SAINT-DENIS
F4 Ilet Quinquina	12271X0049	SAINT-DENIS
Puits Tomi	12264X0018	SAINT-DENIS
S1 Parking Mairie	12264X0263	SAINT-DENIS
La Bretagne - Domenjod	12271X0090	SAINT-DENIS
Ravine des Chèvres INF	12271X0064	SAINTE-MARIE
Ravine des Chèvres SUP	12271X0162	SAINTE-MARIE
F3 Duparc	12271X0059	SAINTE-MARIE
F7 La Convenance	12271X0034	SAINTE-MARIE
P22 Les Cocos	12271X0066	SAINTE-MARIE
P27 Belle Eau	12272X0095	SAINTE-SUZANNE
Forage Chemin Grimm	12272X0137	SAINTE-SUZANNE

Figure 56 : Inventaire des piézomètres analysés

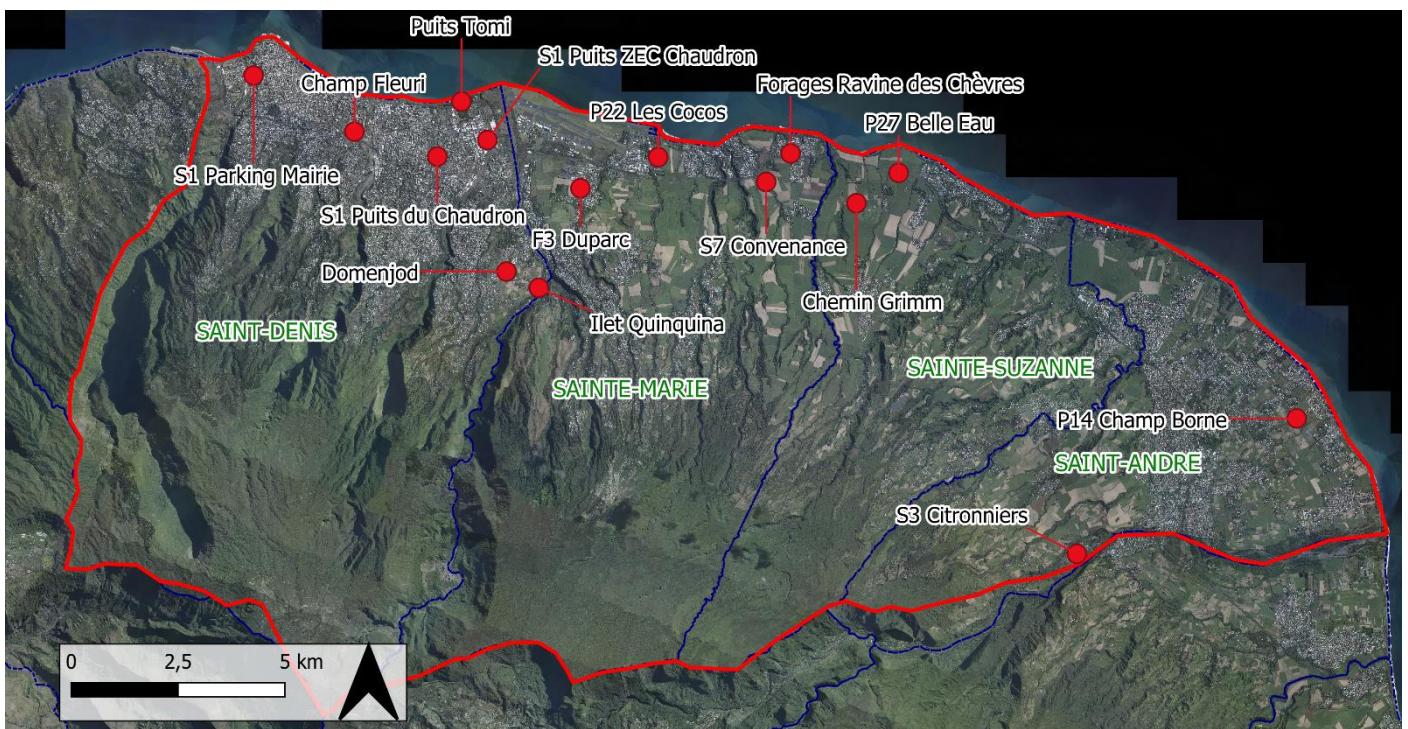


Figure 57 : Localisation des piézomètres analysés

ii. Comportement piézométrique et conditions aux limites

Les comportements piézométriques des différents piézomètres surveillés ont été rappelés lors de la phase 1 (BRGM/RP-71143-FR⁶) du présent projet, d'après l'analyse fonctionnelle par traitement du signal des aquifères du nord de la Réunion (BRGM/RP-57955-FR⁷). Les résultats sont synthétisés en Figure 58. Y sont présentés les différents facteurs qui peuvent influencer le niveau piézométrique, autres que les prélèvements. Les données sont absentes pour S1 Parking Mairie et S3 Citronniers.

Pour rappel, les comportements sont définis comme suit :

- Réactif : Le forage réagit en quelques jours aux précipitations, la recharge est plus rapide que la vidange, qui se fait en quelques semaines.
- Inertiel : Le forage réagit en quelques semaines aux précipitations. La recharge et la vidange sont assez symétriques avec un pic de recharge plusieurs semaines / mois après la saison des pluies.
- Hybride : Le niveau piézométrique varie de plusieurs décimètres à quelques mètres d'une saison à l'autre. Le forage réagit rapidement aux précipitations (quelques jours).

⁶ Laurent L. et Aunay B. (2022) - Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord - FRLG101. Phase 1 – Diagnostic, bilan et conceptualisation en vue de la réalisation d'un modèle de simulation hydrodynamique en régime transitoire. Rapport final. BRGM/RP-71143-FR, 92 p.

⁷ Aunay B., Genevier M., Ladouche B., Marechal JC. (2010) – Analyse fonctionnelle par traitement du signal et approche hydrochimique des aquifères du nord de la Réunion. BRGM/RP-57955-FR. 190 p.

Piézomètre	Altitude (mNGR)	Distance Mer (m)	Distance Rivière (m)	Epaisseur ZNS (m)	Gradient hydraulique (pente en %)	Comportement piézométrique
P14 Champ Borne	23,7	800	2800	124	12	Inertiel
Champ Fleuri	/	850	400	/	5	Réactif
S1 Puits Chaudron	25,7	1200	1100	23,8	1	Réactif
S1 Puits ZEC Chaudron	30,4	1200	50	27,75	3	Réactif
F4 Ilet Quinquina					1	Hybride
Ravine des Chèvres INF	53,36	470	870	131,5	2	Inertiel
Ravine des Chèvres SUP				/		Hybride
F3 Duparc	64,5	1800	400	78	1	Hybride
F7 La Convenance	59,5	1200	1	57	2	Inertiel
P22 Les Cocos	35,3	500	200	33,9	2	Hybride
P27 Belle Eau	56,43	600	1500	67	2	Réactif
Forage Chemin Grimm	83,1	1100	800	104,5	2	Hybride
La Bretagne - Domenjod	196	4200	1000	191	1	Inertiel
Puits Tomi		100			6	Réactif

Figure 58 : Comportement de la piézométrie des piézomètres analysés.
 Vert : Réactif ; Orange : Inertiel ; Bleu : Hybride.

b) Description des chroniques piézométriques

Les chroniques piézométriques ici étudiées sont issues du portail national dédié aux eaux souterraines (<https://ades.eaufrance.fr/>), complétées par les données de l'Office de l'Eau (<https://donnees.eaureunion.fr/opendata>).

Les données extraites sont au pas de temps journalier voire horaire. Les niveaux piézométriques au pas de temps journalier ou mensuel sont corrélés entre eux (évolution à court terme). Cette autocorrélation biaise les tests statistiques dont l'objectif est de rechercher des tendances à long terme. Par ailleurs, l'autocorrélation est particulièrement forte pour les chroniques issues des piézomètres inertIELS. Ainsi, l'autocorrélation des données sera filtrée en choisissant des indicateurs annuels, soit la médiane annuelle, soit les minimums et maximums annuels. De plus, le formatage des données en médianes permet également de s'affranchir des valeurs extrêmes minimales et maximales.

Ainsi, plusieurs séries temporelles seront analysées pour chaque piézomètre :

- Les médianes mensuelles ;
- Les médianes annuelles ;
- Les minimums et les maximums annuels des médianes mensuelles.

Par souci de simplification, les minimums des médianes mensuelles et les maximums des médianes mensuelles (soit une donnée par an) seront dans le présent rapport nommées respectivement « minimums annuels » et « maximums annuels ». Cependant, il ne s'agit pas des valeurs minimums/maximums annuelles mais bien des valeurs minimums/maximums des médianes mensuelles, permettant ainsi de s'affranchir des valeurs extrêmes.

La longueur des chroniques étudiées, ainsi que leurs caractéristiques statistiques principales, sont présentées en *Figure 59* et en *Figure 60*. Le nombre de données disponibles par piézomètre est donné pour les données mensuelles et annuelles.

Piézomètre	Code national	Date début	Date fin	Durée chronique (années)	Nombre de données	
					Données mensuelles	Données annuelles
P14 Champ Borne	12273X0009	24/04/1990	25/08/2022	32,4	377	33
S3 Citronniers	12272X0070	27/06/1991	25/08/2022	16,2	194	17
Champ Fleuri	12264X0218	10/05/1988	20/07/2022	34,2	394	35
S1 Puits Chaudron	12264X0113	15/04/1997	20/07/2022	25,3	234	23
S1 Puits ZEC Chaudron	12271X0038	15/04/1997	20/07/2022	25,3	262	24
F4 Ilet Quinquina	12271X0049	23/11/1993	20/07/2022	28,7	241	26
Puits Tomi	12264X0018	01/04/1997	20/07/2022	15,3	147	17
S1 Parking Mairie	12264X0263	15/04/1997	10/05/2014	17,2	127	15
La Bretagne - Domenjod	12271X0090	06/07/1999	06/02/2012	12,6	91	11
Ravine des Chèvres INF	12271X0064	05/12/1994	20/07/2022	27,6	300	28
Ravine des Chèvres SUP	12271X0162	18/10/1994	20/07/2022	27,8	306	29
F3 Duparc	12271X0059	05/12/1994	20/07/2022	27,6	306	29
F7 La Convenance	12271X0034	23/04/1997	20/07/2022	25,3	214	21
P22 Les Cocos	12271X0066	05/01/1996	22/08/2021	25,6	287	26
P27 Belle Eau	12272X0095	25/09/1996	20/07/2022	25,8	306	27
Forage Chemin Grimm	12272X0137	15/07/1999	20/07/2022	23	196	24

Figure 59 : Longueur des chroniques piézométriques.

Piézomètre	Niveau piézométrique (mNGR)		
	Moyenne	Médiane	Ecart-type
P14 Champ Borne	9,73	9,73	9,62
S3 Citronniers	134,22	134,46	135,55
Champ Fleuri	4,83	4,66	4,50
S1 Puits Chaudron	1,90	1,79	1,62
S1 Puits ZEC Chaudron	4,76	4,21	3,62
F4 Illet Quinquina	6,34	6,35	6,09
Puits Tomi	0,61	0,38	0,23
S1 Parking Mairie	3,70	3,82	3,06
La Bretagne - Domenjod	5,82	5,91	5,61
Ravine des Chèvres INF	4,18	4,15	4,09
Ravine des Chèvres SUP	1,30	1,17	1,07
F3 Duparc	1,54	1,46	1,36
F7 La Convenance	2,71	2,90	2,32
P22 Les Cocos	1,12	1,08	0,96
P27 Belle Eau	1,72	1,42	1,24
Forage Chemin Grimm	2,82	2,66	2,20

Figure 60 : Caractéristiques principales des chroniques

c) Méthodologie

L'outil logiciel Hype⁸ est un outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité ou de la quantité des eaux souterraines.

Chaque chronique piézométrique sera analysée au travers du logiciel Hype. Ces différentes séries temporelles représentent des indicateurs de l'évolution temporelle de la piézométrie. Une différence sera faite entre les indicateurs annuels (médianes, minimums et maximums annuels) et les indicateurs saisonniers opérés sur les médianes mensuelles.

L'outil est divisé en plusieurs modules dont 3 ont été utilisés. Les modules et les tests statistiques sont décrits ci-après.

⁸ Croiset N., Lopez B. (2013) – HYPE : Outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines – Manuel d'utilisation. BRGM/RP-63066-FR. 64 p., 33 fig.

i. Module « Caractérisation »

Le module « Caractérisation » permet de calculer les statistiques de base préalablement à l'application des autres modules de l'outil. Les statistiques principales sont présentées en *Figure 60*.

ii. Module « Tendances et ruptures »

Le module « Tendances et ruptures » permet d'appliquer des tests statistiques de détection des tendances et des ruptures sur les chroniques. L'hypothèse nulle de ces tests statistiques est l'absence de tendance ou de rupture.

Plusieurs tests peuvent être opérés dans ce module en fonction des caractéristiques des chroniques et notamment de la normalité des distributions : test de tendance de Mann-Kendall (Renard, 2006⁹), test de rupture (Darken, 1999¹⁰) et régression linéaire.

Le test de Mann-Kendall est associé au calcul de la pente de Sen. Ce test est appliqué sur toutes les chroniques non stationnaires, pour une hypothèse nulle qui est l'absence de tendance. La pente de Sen est la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de point (Sen, 1968¹¹).

Le test d'inversion de tendance détecte un changement de signe de la pente de Sen.

Enfin, la régression linéaire est un test paramétrique faisant une hypothèse de normalité sur la distribution des données. Les données piézométriques sont rarement normalement distribuées, le test de régression linéaire n'est donc pas conseillé pour évaluer des tendances piézométriques. Il sera tout de même opéré, mais les résultats devront donc prendre en considération les limites ici mentionnées.

iii. Module « Saisonnier »

Le module « Saisonnier » permet d'estimer les tendances des séries cycliques saisonnières.

Le principe est identique à celui du test de Mann-Kendall mais les tests ne vont plus être menés sur la chronique totale mais sur tous les mois de janvier, les mois de février et ainsi de suite. On peut effectuer le test sur trois périodes : le mois calendaire (exemple ci-dessus), le trimestre et le semestre. Seules les deux dernières périodes seront ici testées.

iv. P-value des tests statistiques

La P-value quantifie la significativité statistique du résultat d'un test statistique avec une hypothèse nulle : plus la P-value est faible, plus la présomption est forte contre l'hypothèse nulle, soit contre l'absence de tendance. Les résultats des tests sont classiquement considérés statistiquement significatifs lorsque la P-value est inférieure à 5%, on dit alors que l'hypothèse nulle est rejetée.

⁹ Renard B. (2006) - Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Cemagref (Lyon).

¹⁰ Darken P.F. (1999) - Testing for changes in trend in water quality data. PhD Faculty of Virginia Polytehcnic Institute and State University.

¹¹ Sen P.K. (1968) - Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 63, 1379-1389.

B. Analyses statistiques de la piézométrie

Afin d'analyser l'évolution tendancielle des niveaux piézométriques, différents indicateurs sont utilisés :

- Trois indicateurs annuels :
 - Les médianes annuelles qui permettent de définir une tendance moyenne ;
 - Les minimums des médianes mensuelles (« minimums annuels ») qui permettent d'observer les tendances piézométriques à l'étiage ;
 - Les maximums des médianes mensuelles (« maximums annuels ») qui permettent d'observer les tendances piézométriques en hautes eaux ;
- Deux indicateurs saisonniers :
 - Les médianes mensuelles qui permettent de déterminer les tendances en fonction des différentes périodes du cycle hydrologique :
 - Le trimestre ;
 - Le semestre.

Les différents tests de tendances et de rupture seront opérés sur les chroniques annuelles des niveaux piézométriques. Les tests de tendances saisonnières seront opérés sur les chroniques mensuelles. En considérant l'ensemble de ces indicateurs, il sera possible de vérifier si le comportement piézométrique au droit d'un forage est révélateur d'une tendance à la baisse ou à la hausse. Les résultats des différents tests statistiques appliqués sur les différentes séries temporelles sont présentés ci-dessous.

Seuls les graphiques des chroniques présentant des tendances à la baisse ou à la hausse remarquables seront ici illustrés.

a) Tendances sur les médianes annuelles

Sur les médianes annuelles ont été opérés le test de tendance de Mann-Kendall, le test de rupture et la régression linéaire.

Pour chaque test, la pente de Sen (soit la pente de la tendance) est donnée en cm/an. Pour les tests de Mann-Kendall et la régression linéaire, la significativité statistique illustrée par la P-value est également donnée (Cf. *Figure 61*).

Les médianes annuelles sont un indicateur de la tendance moyenne des niveaux piézométriques. On conclut de ces résultats que :

- Tendance à la baisse :
 - ⇒ **Champ Fleuri** montre une tendance à la baisse de **-7 mm/an soit -0,7 cm/an** ;
 - ⇒ **Quinquina** montre une tendance à la baisse de **-2,6 cm/an** ;
 - ⇒ **Domenjod** montre une tendance à la baisse de **-3,4 cm/an**.
- Tendance à la hausse :
 - ⇒ **S1 Parking Mairie** montre une tendance à la hausse de **+ 11,6 cm/an** ;
 - ⇒ **S7 Convenance** montre une tendance à la hausse de **+3,9 cm/an** ;
 - ⇒ **F3 Duparc** montre une tendance à la hausse de **+1,1 cm/an** ;
 - ⇒ Et le forage **Les Cocos** montre une tendance à la hausse de **+1,3 cm/an**.

MEDIANES ANNUELLES					Test de tendance Mann-Kendall		Régression linéaire		Test d'inversion de tendance		
Commune	Code National	Nom	Nombre de données	Tendance à la baisse	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente (cm/an)	P-value	Date d'inversion	Pente de Sen avant (cm/an)	Pente de Sen après (cm/an)
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE	33	NON	-	-	-	-	2009	0,8	-2,8
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS	17	NON	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	35	OUI	-0,7	3,30E-02	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON	23	NON	-	-	-	-	2007	8,3	-
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	26	OUI	-2,6	1,50E-03	-2,2	6,20E-04	-	-	-
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON	24	NON	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI	17	NON	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	15	NON	11,6	3,30E-04	12,4	5,20E-04	-	-	-
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	11	OUI	-3,4	1,20E-02	-3,7	4,10E-03	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF	28	NON	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZO	RAVINE CHEVRES SUP	29	NON	-	-	0,9	1,90E-02	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENANCE	21	NON	3,9	3,20E-04	3,4	2,20E-02	2011	-	4,2
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	29	NON	1,1	3,60E-04	1,3	1,60E-04	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	26	NON	1,3	1,40E-05	1,3	1,20E-02	-	-	-
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU	27	NON	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM	24	NON	-	-	-	-	-	-	-

*Figure 61 : Résultats des tests de tendances sur les médianes annuelles des niveaux piézométriques
 Tendance à la baisse en vert et tendance à la hausse en bleu.*

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
 Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
 scénarii de gestion de la ressource en eau

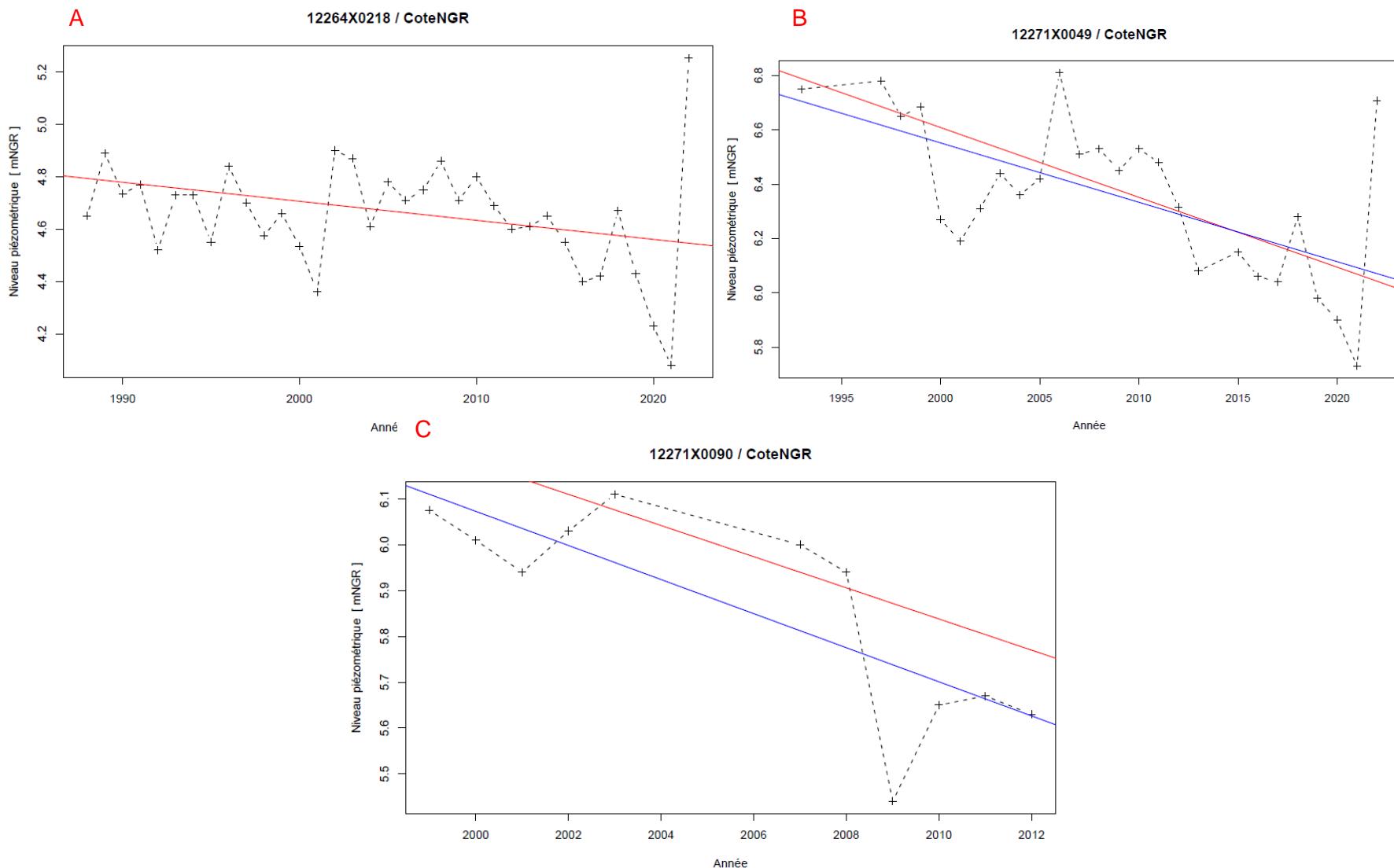


Figure 62 : Graphiques des chroniques annuelles avec tendance à la baisse.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

A : Champ Fleuri, B : Quinquina, C : Domenjod, Rouge : Tendance de Mann-Kendall, Bleu : Régression linéaire.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scénarii de gestion de la ressource en eau

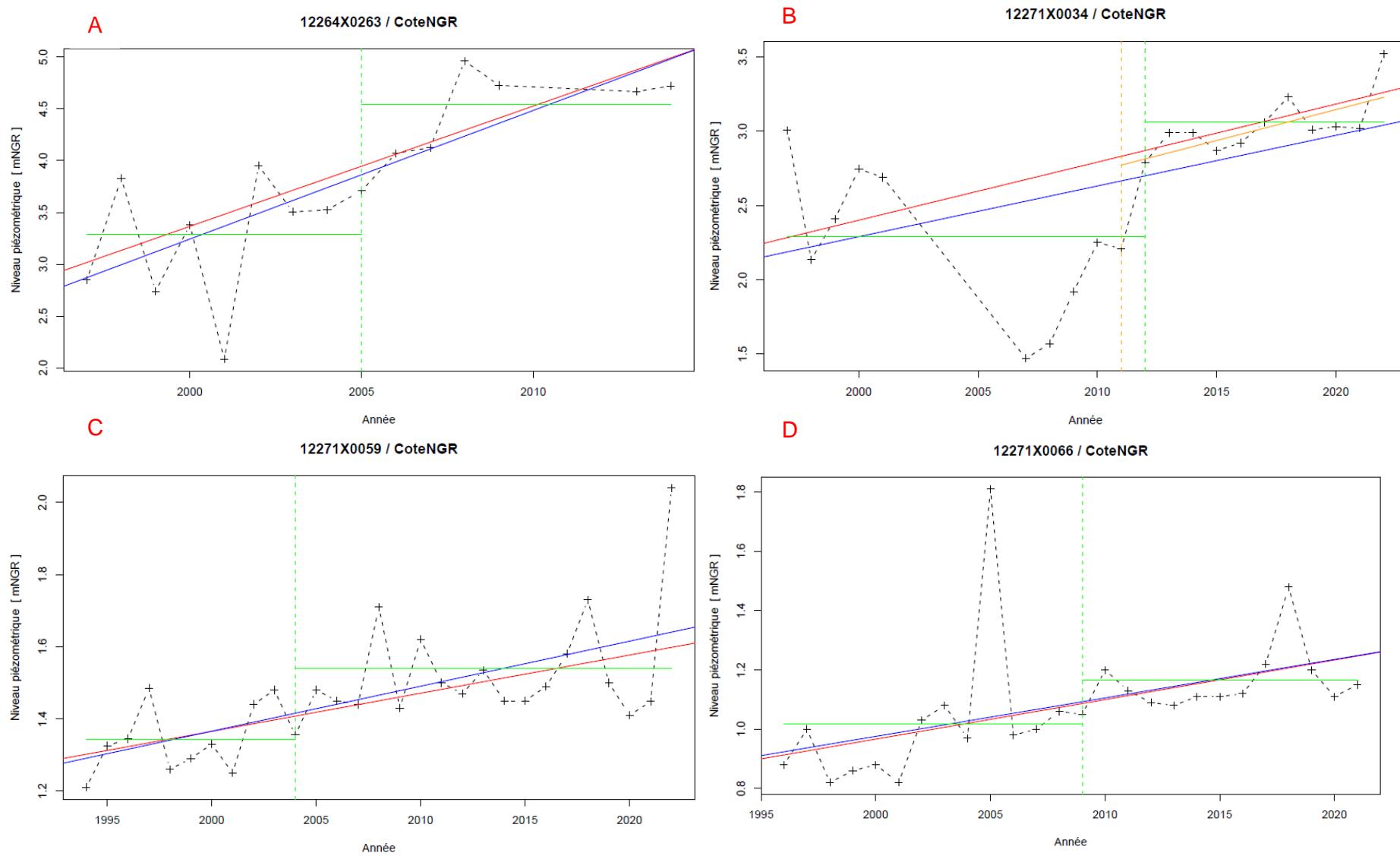


Figure 63 : Graphiques des chroniques annuelles avec tendance à la hausse.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scénarios de gestion de la ressource en eau

A : S1 Parking Mairie, B : S7 Convenance, C : F3 Duparc, D : Les Cocos, Rouge : Tendance de Mann-Kendall, Bleu : Régression linéaire.

b) Tendances sur les minimums des médianes mensuelles

Les « minimums annuels » sont un indicateur de l'évolution des niveaux piézométriques à l'étiage. Il prend en compte la vidange naturelle du système aquifère mais également les prélèvements qui y sont réalisés (AEP et/ou irrigation).

Les mêmes tests que précédemment ont été opérés sur les minimums des médianes mensuelles. Les résultats figurent en Figure 64. On conclut de ces résultats que :

- Tendance à la baisse :
 - ⇒ **Champ Fleuri** montre une tendance à la baisse de **-6 mm/an soit -0,6 cm/an** ;
 - ⇒ **Quinquina** montre une tendance à la baisse de **-2,5 cm/an** ;
 - ⇒ **Domenjod** montre une tendance à la baisse de **-5,4 cm/an** ;
 - ⇒ Et le forage **Chemin Grimm** montre une tendance à la baisse de **-2,8 cm/an**.
- Tendance à la hausse :
 - ⇒ **S1 Puits du Chaudron** montre une tendance à la hausse de **+1,4 cm/an** ;
 - ⇒ **S1 puits ZEC Chaudron** montre une tendance à la hausse de **+3,2 cm/an** ;
 - ⇒ **Puits Tomi** montre une tendance à la hausse de **+1,3 cm/an** ;
 - ⇒ **S1 Parking Mairie** montre une tendance à la hausse de **+ 17,5 cm/an** ;
 - ⇒ **S7 Convenance** montre une tendance à la hausse de **+4,4 cm/an** ;
 - ⇒ **F3 Duparc** montre une tendance à la hausse de **+1 cm/an** ;
 - ⇒ Et le forage **Les Cocos** montre une tendance à la hausse de **+1,3 cm/an**.

Sont nouvellement apparus en tendance (baisse ou hausse) à l'étiage les forages Chemin Grimm, Puits du Chaudron, Puits ZEC Chaudron et Puits Tomi. Sont montrés en *Figure 65* uniquement les chroniques avec tendance à la baisse.

MINIMUMS DES MEDIANES MENSUELLES					Test de tendance Mann-Kendall		Régression linéaire		Test d'inversion de tendance		
Commune	Code National	Nom	Nombre de données	Tendance à la baisse	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente (cm/an)	P-value	Date d'inversion	Pente de Sen avant (cm/an)	Pente de Sen après (cm/an)
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE	33	NON	-	-	-	-	2009	0,8	-3,3
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS	17	NON	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	35	OUI	-0,6	1,10E-02	-0,9	1,50E-03	-	-	-
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON	23	NON	1,4	3,70E-02	-	-	2007	8,0	-3,0
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	26	OUI	-2,5	2,90E-03	-2,4	4,40E-05	-	-	-
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON	24	NON	3,2	4,30E-03	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI	17	NON	1,3	6,00E-03	1,1	1,80E-02	-	-	-
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	15	NON	17,5	2,30E-06	16,4	4,60E-07	-	-	-
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	11	OUI	-5,4	1,90E-02	-5,3	4,90E-04	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF	28	NON	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZ0	RAVINE CHEVRES SUP	29	NON	-	-	-	-	2009	1,2	-
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENIENCE	21	NON	4,4	9,70E-05	4,0	5,00E-03	2011	-	5,5
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	29	NON	1,0	1,10E-05	1,0	6,10E-07	2008	1,3	-
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	26	NON	1,3	9,20E-06	1,2	6,70E-04	-	-	-
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU	27	NON	-	-	-	-	2008	3,5	-
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM	24	OUI	-2,8	2,70E-02	-	-	2008	-	-5,9

Figure 64 : Résultats des tests de tendances sur les « minimums annuels » des niveaux piézométriques
Tendance à la baisse en vert et tendance à la hausse en bleu.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scénarii de gestion de la ressource en eau

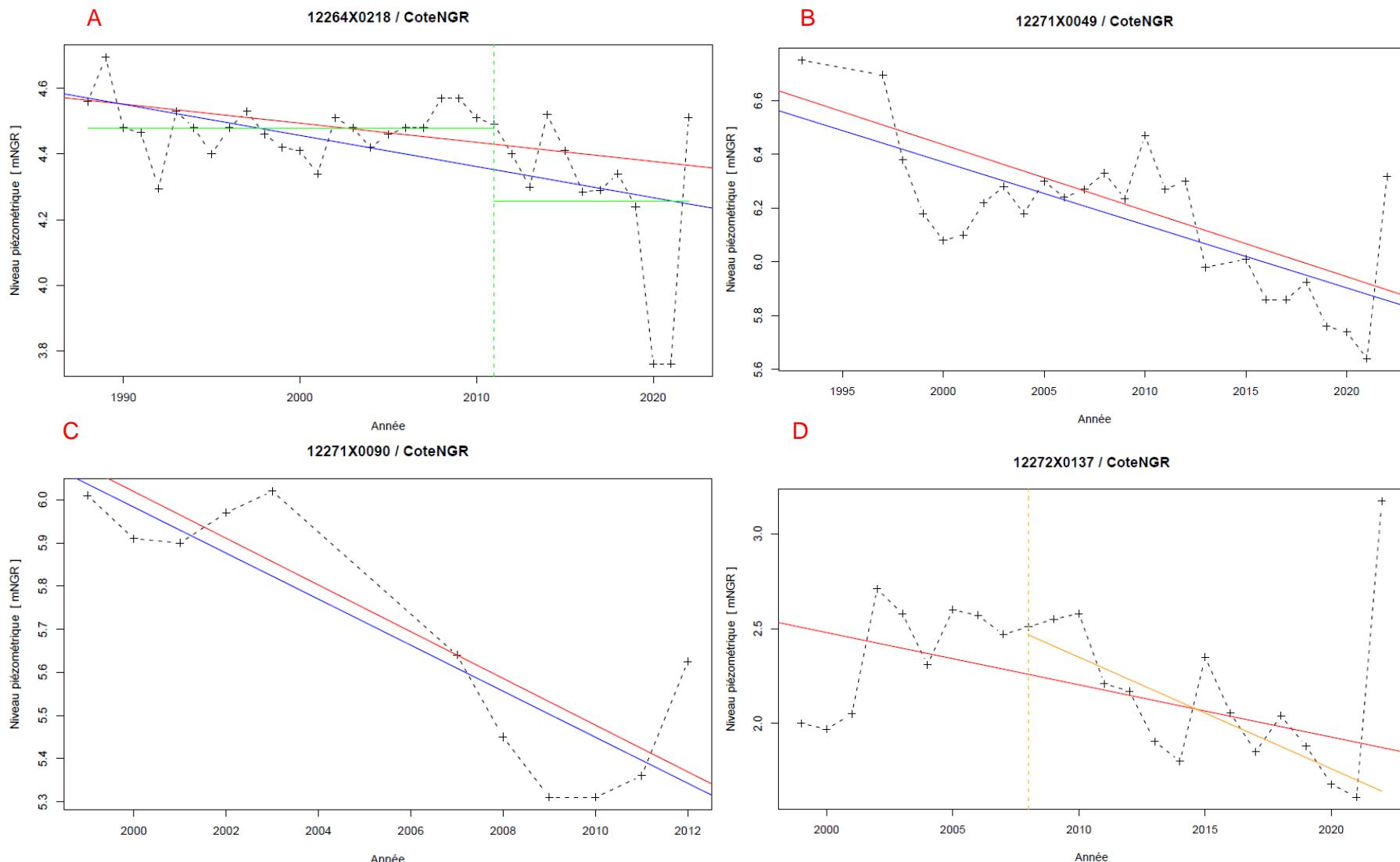


Figure 65 : Graphiques des chroniques des minimums annuels avec tendance à la baisse.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

A : Champ Fleuri, B : Quinquina, C : Domenjod, D : Chemin Grimm, Rouge : Tendance de Mann-Kendall, Bleu : Régression linéaire.

c) Tendances sur les maximums des médianes mensuelles

Les maximums annuels (issus des médianes mensuelles) sont un indicateur de l'évolution du niveau piézométrique en hautes eaux. Il prend notamment en compte la recharge du système aquifère.

La seule chronique témoignant d'une tendance est celle du forage **Quinquina** qui montre une tendance à la baisse de **-2,8 cm/an** (Cf. Figure 66).

La régression linéaire n'est pas ici considérée comme argument probant pour les tendances piézométriques mais il est tout de même notable que le forage Domenjod montre une régression linéaire négative d'environ -3,3 cm/an.

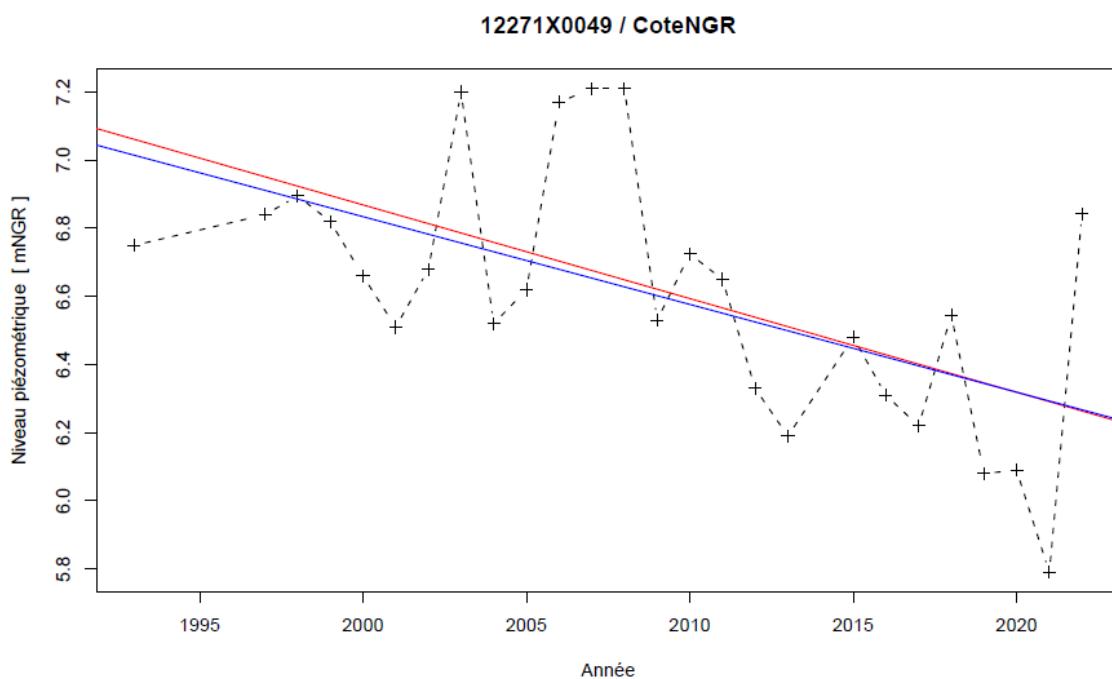


Figure 66 : Chronique des maximums annuels du forage Quinquina.
 Rouge : Tendance de Mann-Kendall, Bleu : Régression linéaire.

d) Tendances saisonnières sur les médianes mensuelles

Les derniers indicateurs de l'évolution temporelle des niveaux piézométriques sont ceux des tendances saisonnières. Sera appliqué ici le test statistique de Mann-Kendall saisonnier sur les chroniques des médianes mensuelles des niveaux piézométriques.

Les périodes choisies sont :

- Le trimestre, soit 4 périodes réparties sur une année calendaire de la sorte :
 - Trimestre 1 : Novembre, Décembre, Janvier ;
 - Trimestre 2 : Février, Mars, Avril ;
 - Trimestre 3 : Mai, Juin, Juillet ;
 - Trimestre 4 : Août, Septembre, Octobre.
- Le semestre, soit deux périodes représentant la saison humide et sèche d'une année hydrologique :
 - Semestre 1 : de début Novembre à fin Avril pour la saison humide (équivalent Trimestre 1 + Trimestre 2) ;

- Semestre 2 : de début Mai à fin Octobre pour la saison sèche (équivalent Trimestre 3 + Trimestre 4).

Le principe du test de tendance saisonnière est donné au paragraphe c). Ce test permettra de déterminer si les tendances sont plus accentuées sur des périodes particulières ou si celles-ci sont homogènes sur l'année calendaire et/ou hydrologique. Le comportement piézométrique sera ici rappelé.

Le calcul de la pente de Sen associé au test saisonnier se fait en calculant une pente médiane entre les trois valeurs mensuelles au sein du trimestre, puis en calculant la pente médiane entre les mêmes trimestres sur différentes années. L'autocorrélation des données mensuelles n'est pourtant pas exclu et peut ainsi faire apparaître une tendance pas suffisamment significative.

i. *Période trimestrielle*

On conclut de ces résultats que :

- Tendance à la baisse :
 - ⇒ **Champ Fleuri (réactif)** montre une tendance à la baisse sur 3 trimestres, notamment en entrée et sortie de saison humide ;
 - ⇒ **Quinquina (hybride)** montre une tendance à la baisse homogène sur l'année ;
 - ⇒ **Domenjod (inertiel)** montre une tendance à la baisse toute l'année, plus faible en sortie de saison humide ;
 - ⇒ Et le forage **Chemin Grimm (hybride)** montre une tendance à la baisse sur 3 trimestres, dont une tendance plus importante sur la seconde partie de la saison humide.
- Tendance à la hausse :
 - ⇒ **S1 puits ZEC Chaudron (réactif)** montre une tendance à la hausse seulement sur le trimestre de début de saison humide ;
 - ⇒ **Puits Tomi (réactif)** montre une tendance à la hausse sur la fin de la saison sèche et le début de la saison humide ;
 - ⇒ **S1 Parking Mairie** montre une tendance à la hausse sur 3 trimestres et notamment en début de saison des pluies ;
 - ⇒ **S7 Convenance (inertiel)** montre une tendance à la hausse sur toute l'année, légèrement plus importante en sortie de saison humide ;
 - ⇒ **S1 Puits du Chaudron (réactif), F3 Duparc (hybride)** et le forage **Les Cocos (hybride)** montrent une tendance à la hausse homogène sur 3 trimestres.

Les observations sont en accord avec les comportements piézométriques des forages, et sont également en cohérence avec les observations sur les indicateurs annuels (tendance globale, à l'étiage et en hautes eaux).

MEDIANES MENSUELLES - Test de Mann-Kendall saisonnier					Été austral				Hiver austral				Global	
					Trimestre 1 Novembre-Décembre-Janvier		Trimestre 2 Février-Mars-Avril		Trimestre 3 Mai-Juin-Juillet		Trimestre 4 Août-Septembre-Octobre			
Commune	Code National	Nom	Nombre de données	Tendance à la baisse	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente de Sen (cm/an)	Pente de Sen (cm/an)	Pente de Sen (cm/an)	Pente de Sen (cm/an)
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE	377	NON	-	-	-0,6	1,80E-02	-	-	-	-	-0,3	1,48E-03
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS	194	NON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	394	OUI	-0,9	1,20E-03	-	-	-0,9	5,20E-02	-0,1	1,70E-04	-0,8	1,28E-10
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON	234	NON	1,9	5,90E-04	-	-	1,2	9,10E-03	1,5	4,70E-04	1,4	3,66E-07
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	241	OUI	-3,1	4,40E-10	-2,6	1,00E-05	-2,9	2,60E-07	-3,3	2,10E-11	-3,0	0
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON	262	NON	2,6	1,30E-02	-	-	-	-	-	-	1,3	3,81E-02
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI	147	NON	1,2	6,10E-03	-	-	-	-	1,0	1,30E-02	1,1	6,76E-04
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	127	NON	17,0	1,50E-04	-	-	6,1	4,50E-03	10,0	2,20E-04	8,5	1,43E-09
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	91	OUI	-5,8	3,50E-05	-4,3	3,00E-02	-2,5	3,70E-02	-4,3	1,70E-06	-4,6	7,05E-12
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF	300	NON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZO	RAVINE CHEVRES SUP	306	NON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENANCE	214	NON	3,7	5,50E-06	2,8	1,20E-03	5,0	4,70E-08	4,2	6,70E-07	3,9	0
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	306	NON	0,9	4,60E-08	-	-	0,7	4,10E-03	0,9	2,70E-10	0,8	1,15E-14
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	287	NON	1,6	1,80E-11	-	-	1,3	2,40E-06	1,4	9,50E-14	1,3	0
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU	306	NON	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM	196	OUI	-3,5	1,60E-03	-5,7	5,40E-03	-	-	-2,9	6,80E-03	-3,6	5,61E-07

Figure 67 : Résultats des tests de tendance saisonnière de Mann-Kendall sur les chroniques des médianes mensuelles des niveaux piézométriques pour la période trimestrielle.

Tendance à la baisse en vert et tendance à la hausse en bleu.

					Été austral		Hiver austral			
					Semestre 1 Novembre-Avril		Semestre 2 Mai-Octobre		Global	
Commune	Code National	Nom	Nombre de données	Tendance à la baisse	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente de Sen (cm/an)	P-value	Pente de Sen (cm/an)	Pente de Sen (cm/an)
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE	377	OUI	-0,3	1,60E-02	-0,3	2,10E-02	-0,3	8,76E-04
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS	194	NON	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	394	OUI	-1,0	7,40E-03	-0,8	8,90E-07	-0,9	6,49E-08
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON	234	NON	1,4	7,90E-03	1,3	4,70E-05	1,3	1,57E-06
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	241	OUI	-2,8	1,30E-12	-3,2	1,00E-16	-3,0	0
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON	262	NON	-	-	-	-	-	-
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI	147	NON	1,8	2,80E-02	-	-	1,2	3,66E-03
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	127	NON	12,0	1,20E-04	7,8	1,00E-04	9,8	6,34E-08
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	91	OUI	-4,8	1,90E-05	-3,7	2,00E-06	-4,2	1,65E-10
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF	300	NON	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZO	RAVINE CHEVRES SUP	306	NON	-	-	-	-	-	-
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENANCE	214	NON	3,3	5,60E-08	4,6	5,60E-13	3,9	0
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	306	NON	0,9	1,70E-04	0,8	1,30E-07	0,8	2,93E-10
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	287	NON	1,3	4,30E-06	1,3	2,00E-13	1,3	0
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU	306	NON	-	-	-	-	-	-
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM	196	OUI	-3,7	8,80E-04	-2,4	2,80E-02	-3,0	1,03E-04

Figure 68 : Résultats des tests de tendance saisonnière de Mann-Kendall sur les chroniques des médianes mensuelles des niveaux piézométriques pour la période semestrielle.

Tendance à la baisse en vert et tendance à la hausse en bleu.

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

ii. Période semestrielle

On conclut de ces résultats que :

- Tendance à la baisse :
 - ⇒ **Champ Borne (inertiel)** montre une tendance à la baisse homogène sur les 2 semestres ;
 - ⇒ **Champ Fleuri (réactif), Domenjod (inertiel) et Chemin Grimm (hybride)** montrent une tendance à la baisse sur les deux semestres, mais légèrement plus marquée en saison humide ;
 - ⇒ **Quinquina (hybride)** montre une tendance à la baisse légèrement plus marquée en saison sèche.
- Tendance à la hausse :
 - ⇒ **S1 Puits du Chaudron (réactif), F3 Duparc (hybride)** et le forage **Les Cocos (hybride)** montrent une tendance à la hausse homogène sur les 2 semestres ;
 - ⇒ **Puits Tomi (réactif)** montre une tendance à la hausse uniquement en saison humide (attention à la significativité des résultats) ;
 - ⇒ **S1 Parking Mairie** montre une tendance à la hausse beaucoup plus marquée en saison humide ;
 - ⇒ Et **S7 Convenance (inertiel)** montre une tendance à la hausse légèrement plus marquée en saison sèche.

Les tendances à la hausse identifiées sont en accord avec les comportements piézométriques au droit des forages, sauf concernant Champ Fleuri qui a un comportement réactif mais qui montre une tendance à la baisse (très légèrement) plus marquée lors de la saison des pluies. Concernant la comparaison avec les tendances identifiées avec les indicateurs annuels, Champ Borne apparaît seulement ici à la baisse alors qu'il ne l'était sur aucun autre indicateur. Nous ne considérerons donc pas ce résultat. De même, les forages Champ Fleuri, Domenjod et Chemin Grimm ne montraient aucune tendance sur les indicateurs annuels de hautes eaux mais ont ici une baisse plus marquée en saison des pluies. Il en va de même pour le Puits Tomi qui ne montrait une tendance à la hausse que sur l'indicateur annuel à l'étiage.

Pour rappel, le regroupement de données mensuelles par période comme il est le cas avec le test de Mann-Kendall saisonnier peut être à l'origine d'une autocorrélation, faussant ainsi les résultats, car relevant des tendances non significatives.

C. Conclusion

a) Bilan des analyses statistiques

Les différents tests statistiques de tendance piézométrique sur les différentes chroniques, pour plusieurs indicateurs de l'évolution de la piézométrie, permettent de déterminer les piézomètres :

- N'ayant aucune tendance ;
- Ayant une tendance certaine à la baisse avec au moins 4 indicateurs témoins sur 5 ;
- Ayant une tendance un peu moins certaine à la baisse avec 3 indicateurs du 5 ;
- Ayant une tendance à la hausse certaine avec au moins 4 indicateurs sur 5 ;
- Ayant une tendance à la hausse moins certaine avec 3 indicateurs sur 5 ;
- Ayant une tendance à la hausse incertaine avec seulement 2 indicateurs sur 5.

Le tableau suivant synthétise les tendances identifiées par rapport aux cinq indicateurs ici analysés :

TENDANCES PIEZOMETRIQUES			INDICATEURS ANNUELS			INDICATEURS SAISONNERS	
Commune	Code National	Nom	Médiennes annuelles	Minimums des médianes mensuelles	Maximums des médianes mensuelles	Médiannes mensuelles par période trimestrielle	Médiannes mensuelles par période semestrielle
Saint-André	12273X0009/P14	CHAMP BORNE					X
Saint-André	12272X0070/S3	CITRONNIERS					
Sainte-Marie	12271X0064/F	RAVINE CHEVRES INF					
Sainte-Marie	12271X0162/PIEZO	RAVINE CHEVRES SUP					
Sainte-Suzanne	12272X0095/P27	BELLE EAU					
Saint-Denis	12264X0218/S1	CHAMP FLEURI	X	X		X	X
Saint-Denis	12271X0049/F4	ILET A QUINQUINA	X	X	X	X	X
Saint-Denis	12271X0090	LA BRETAGNE - DOMENJOD	X	X		X	X
Sainte-Suzanne	12272X0137/F	CHEMIN GRIMM		X		X	X
Saint-Denis	12264X0263/S1	S1 PARKING MAIRIE	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0034/2-1-S7	CONVENANCE	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0059/F3	DUPARC	X	X		X	X
Sainte-Marie	12271X0066/P22	LES COCOS	X	X		X	X
Saint-Denis	12264X0113/S1	PUITS DU CHAUDRON		X		X	X
Saint-Denis	12264X0018	PUITS TOMI		X		X	X
Saint-Denis	12271X0038/S1	PUITS ZEC CHAUDRON		X		X	

LÉGENDE	
	AUCUNE TENDANCE (moins de 2 indicateurs)
	TENDANCE A LA BAISSE (au moins 4 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA BAISSE (3 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (4 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (3 indicateurs / 5)
	TENDANCE A LA HAUSSE (2 indicateurs / 5)
X	TEMOIN TENDANCE A LA BAISSE
X	TEMOIN TENDANCE A LA HAUSSE

Contribution à l'évaluation des volumes prélevables (EVP) des formations volcaniques du littoral Nord – FRLG101.
Phases 2 et 3 – Elaboration d'un modèle numérique hydrogéologique, détermination et mise en œuvre de
scenarii de gestion de la ressource en eau

Figure 69 : Synthèse des tendances identifiées et légende.

Sur les 16 piézomètres analysés, seulement 4, appartenant principalement à la commune de Saint-Denis, montrent des tendances à la baisse :

- Champ Fleuri de l'ordre plurimillimétrique par an ;
- Ilet a Quinquina de l'ordre pluricentimétrique par an ;
- Domenjod du même ordre ;
- Et Chemin Grimm, moins certain, de l'ordre pluricentimétrique également.

Il est à noter qu'il est particulièrement certain pour Quinquina qu'"il y a une tendance à la baisse sur le long terme car tous les indicateurs sont témoins de cette tendance.

Vis-à-vis des forages classés en RNAOE à l'horizon 2027 par l'Office de l'Eau, seul le forage Champ Fleuri concorde, mais il s'agit de celui qui a le plus faible ordre de tendance.

En revanche, les tests statistiques ont mis en évidence une tendance à la hausse certaine ou moins certaine pour notamment 6 forages, principalement rattachés aux communes de Sainte-Marie et Saint-Denis :

- S1 Parking Mairie ;
- S7 Convenance ;
- F3 Duparc ;
- P22 Les Cocos ;
- S1 Puits du Chaudron ;
- Et Puits Tomi.

Ainsi sont identifiées les tendances à la baisse des piézomètres du secteur d'étude. Cependant, il est à noter que la disponibilité des données piézométriques diffère d'un piézomètre à l'autre, avec certaines chroniques présentant des gaps de données. Ainsi, bien que les médianes des niveaux piézométriques permettent de s'affranchir de l'autocorrélation, des cycles saisonniers et des valeurs extrêmes enregistrées, elles lisent également ces erreurs ou manques de mesure, et peuvent donc influencer voire fausser les résultats des tests statistiques. Par ailleurs, il est rappelé que l'autocorrélation peut également avoir une influence sur les résultats des indicateurs saisonniers au vu de la méthodologie de calcul du test de Mann-Kendall saisonnier. Les indicateurs les plus fiables restent les indicateurs annuels. Les indicateurs saisonniers ont été réalisés pour apporter de potentielles explications ou arguments supplémentaires.

b) Influence des forages exploités

En *Figure 70* sont présentés, pour les forages concernés par une tendance à la baisse, les forages exploités proches et leur année de mise en service. Domenjod est pompé et se trouve à proximité du forage F4 Ilet Quinquina.

Piézomètre	Forage concerné	Année de mise en service du forage
Champ Fleuri	Trinité	2003
	Trinité 2	2020
Quinquina	Domenjod	2003
	Rivière des Pluies	1986 - 2019
Chemin Grimm	Bel Air	2014
	Belle Eau	1996

Figure 70 : Mise en service des exploitations proches des forages avec tendance à la baisse.

Pour Champ Fleuri, une diminution du niveau piézométrique d'environ 0,4 mNGF est remarquable en 2020 et pourrait correspondre à la mise en service du forage Trinité 2.

Pour Quinquina, aucune correspondance n'est remarquable.

Pour Chemin Grimm, une diminution du niveau piézométrique est visible en 2014 mais ce n'est pas suffisant pour affirmer l'influence du forage Bel Air.

Pour Ilet Quinquina dont l'exploitation a débuté en 2003, une diminution soudaine des médianes du niveau piézométrique est remarquable en 2007-2008.

Au vu des années de mise en service des forages environnants les piézomètres ici concernés, il est difficile d'établir clairement une influence des prélèvements sur les tendances piézométriques à la baisse.

Une analyse plus poussée des prélèvements proches des piézomètres permettrait de déterminer une potentielle influence des forages. Cet aspect est pris en compte dans la modélisation pour l'évaluation des volumes prélevables.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
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
Tél. : 02 62 21 22 14
www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm