

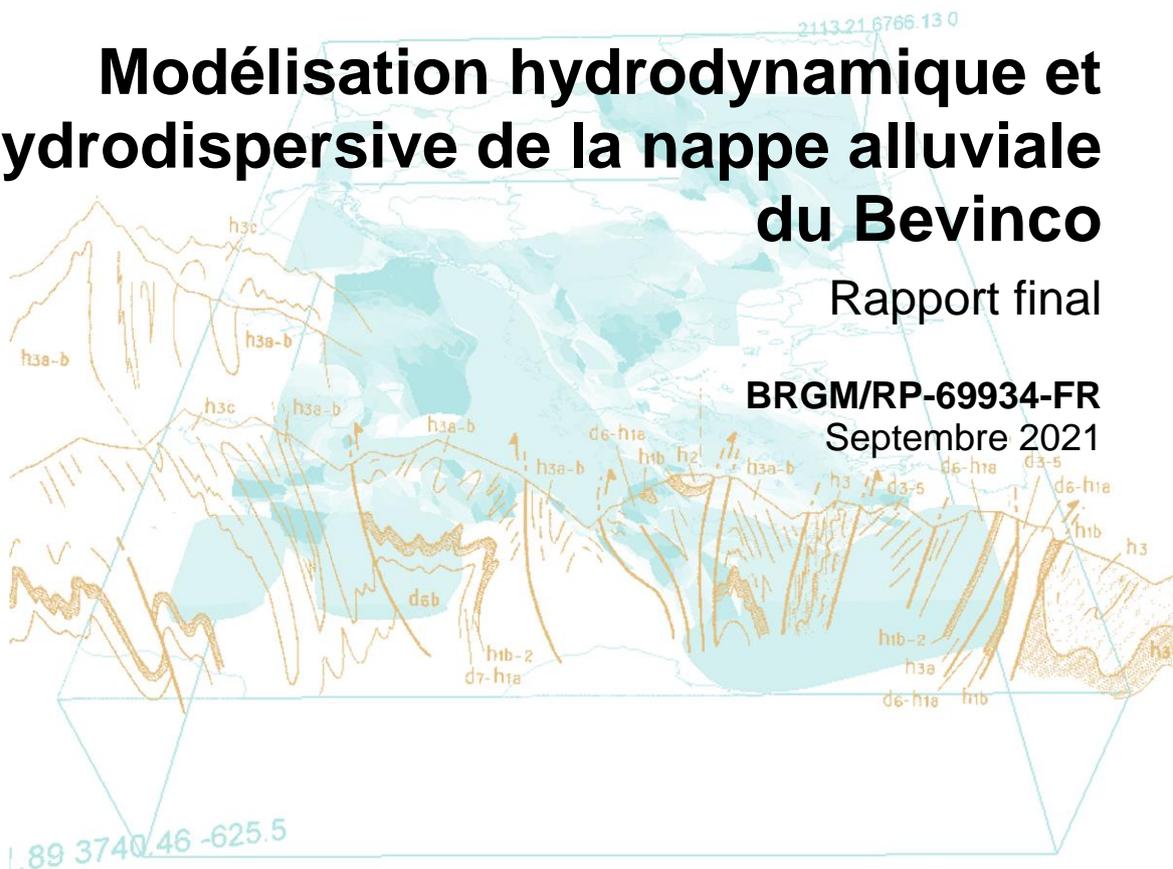


Document public

Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive de la nappe alluviale du Bevinco

Rapport final

BRGM/RP-69934-FR
Septembre 2021



Document public

Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive de la nappe alluviale du Bevinco

Rapport final

BRGM/RP-69934-FR
Septembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM

L. Arnaud
avec la collaboration de
M. Genevier

Vérificateur :

Nom : N. Amraoui

Fonction : Hydrogéologue modélisatrice

Date : 26/08/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : A. Rey

Fonction : Directeur régional BRGM Corse

Date : 06/09/2021

Signature :



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

Contact : qualite@brgm.fr

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/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots-clés : Alimentation en eau potable, Échanges nappe-rivière, Gestion de la ressource en eau, Indicateurs de gestion, Intrusion saline, Modèle MARTHE, Modélisation hydrodynamique, Modélisation hydrodispersive, Nappe alluviale, Bevinco, Corse.

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

Arnaud L., Geneviev M. (2021) – Modélisation hydrodynamique et hydrodispersive de la nappe alluviale du Bevinco. Rapport final. BRGM/RP-69934-FR, 143 p., 101 ill., 2 ann.

Synthèse

La présente étude de modélisation hydrogéologique de la nappe du Bevinco s'inscrit dans un contexte de déséquilibre quantitatif de la masse d'eau souterraine au sein de laquelle elle se situe (FREG335) et répond aux objectifs fixés par le SDAGE, le SAGE et le Contrat de milieu de l'Étang de Biguglia.

La Communauté d'agglomération de Bastia (CAB) gère, par le biais de sa régie publique *Acqua Publica*, l'approvisionnement en eau potable des cinq communes de l'agglomération (Furiani, Bastia, Ville di Pietrabugno, San Martino di Lota et Santa Maria di Lota). Les deux principaux points de production sont la prise d'eau du Lancone sur le Bevinco et la nappe alluviale de la plaine du Bevinco. En complément, un raccordement au réseau d'eau brute de l'Office d'équipement hydraulique de Corse (OEHC) permet de recourir aux eaux en provenance du Golo (bassin versant voisin).

Afin d'étudier la possibilité d'optimiser les prélèvements dans l'hydrosystème du Bevinco (rivière et aquifère) tout en respectant le maintien d'un débit réglementaire dans la rivière et en évitant toute salinisation de la nappe, *Acqua Publica*, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, l'Office de l'Environnement de la Corse et le BRGM se sont associés pour réaliser un programme d'études.

D'un point de vue méthodologique, l'étude menée par le BRGM a tout d'abord consisté à faire l'acquisition de données nouvelles sur la structure de l'aquifère du Bevinco et sur son fonctionnement hydrogéologique. Dans une seconde phase d'étude, objet du présent rapport, un modèle hydrogéologique maillé a été développé et utilisé pour simuler différents scénarios d'exploitation et ainsi contribuer à la proposition d'indicateurs de gestion.

Le modèle hydrogéologique de l'aquifère du Bevinco, développé sous MARTHE, permet de bien reproduire les débits du Bevinco et les niveaux piézométriques de la nappe, plus particulièrement dans l'axe d'écoulement privilégié des eaux souterraines passant par le champ captant d'*Acqua Publica*. Concernant le Bevinco, la zone d'infiltration à l'entrée de la plaine et la retranscription spatio-temporelle des assecs apparaît très satisfaisante. Les résultats sont, en revanche, moins bons dans le compartiment nord de l'aquifère, secteur où de nombreuses inconnues demeurent (géométrie des couches géologiques, piézométrie de la nappe, etc.).

Le modèle du Bevinco a permis de quantifier les différentes composantes du bilan hydraulique de l'hydrosystème ou encore de reconstituer les régimes naturels du Bevinco et de la nappe. Le modèle apporte ainsi un éclairage nouveau sur le fonctionnement de l'hydrosystème du Bevinco.

Le modèle dispose cependant de peu de recul avec des chroniques de suivi de courte durée (un peu moins d'une année pour les nouveaux piézomètres) ou devenues opérationnelles après le processus de calage du modèle. C'est pourquoi, il est préconisé de **poursuivre l'acquisition des données engagée et de maintenir le modèle afin d'aboutir à un outil de gestion robuste.**

La modélisation hydrodispersive visant à reproduire les concentrations en chlorures dans la nappe a rencontré plusieurs difficultés. En particulier, le calage du modèle hydrodispersif n'a pas été suffisamment contraint sur la période simulée, notamment en raison de l'absence de suivis des concentrations en chlorures ou en conductivité électrique pendant des épisodes d'augmentation des concentrations. En outre, les phénomènes de salinisation des puits 7 et 8 n'ont été portés à la connaissance du BRGM qu'après le processus de calage du modèle. En l'état, il n'apparaît pas possible de s'appuyer sur le modèle hydrodispersif actuel pour définir des règles de gestion du champ captant.

Plusieurs pistes d'amélioration du modèle sont proposées :

- 1) poursuite de l'acquisition haute fréquence des débits de pompage sur les six puits de Suariccia, des niveaux piézométriques et des conductivités électriques sur les différents ouvrages instrumentés dans le cadre de l'étude ;
- 2) valorisation des suivis en continu des débits du Bevinco mis en place en fin d'étude sur la plaine par la Réserve (au passage à gué) et par la DREAL (pont RT11) ;
- 3) poursuite par Acqua Publica des suivis des concentrations en chlorures à la sortie des deux unités de Suariccia et archivage numérique de celles-ci pour permettre de contraindre le calage du modèle hydrodispersif ;
- 4) mise à jour du modèle à partir de l'allongement des chroniques de données listées précédemment pour validation de celui-ci ;
- 5) caractérisation des processus de salinisation des puits 7 et 8 non expliqués à ce jour.

Le modèle du Bevinco a été exploité à travers la simulation de différents scénarios prospectifs. Ces derniers permettent d'envisager des solutions alternatives pour augmenter l'exploitation de la ressource : report des prélèvements du Golo sur le Bevinco en étiage, comme en hiver et possible augmentation des pompages en nappe certaines années.

À partir de ces résultats de simulation et des observations de terrain, des indicateurs piézométriques de gestion de l'aquifère ont pu être proposés (piézomètres Casatorra, PZ1 et Pz4). Les seuils de gestion définis de façon préliminaire méritent d'être consolidés avec l'allongement des chroniques de suivi et les retours d'expérience du terrain.

En termes de perspectives, et au-delà du fait qu'un modèle hydrogéologique doit être régulièrement mis à jour par les données qui continuent d'être acquises pour être utile, **plusieurs applications du modèle pourraient être envisagées**. Il serait en effet très intéressant de simuler d'autres types de scénarios d'exploitation pour aider Acqua Publica à optimiser son exploitation de la nappe :

- pompage au niveau de Suariccia II, en aval de la zone d'infiltration du Bevinco,
- régulation des débits de pompage pour les 6 puits du champ captant qui fonctionnent aujourd'hui en tout ou rien,
- impact du changement climatique sur les ressources en eau superficielle et souterraine.

D'un point de vue opérationnel, **la gestion du champ captant de Suariccia pourrait être améliorée avec le maintien d'un monitoring haute fréquence** (prélèvements, niveaux, conductivités électriques et concentrations en chlorures). Acqua Publica pourrait reprendre la maintenance du réseau de surveillance mis en place dans le cadre de l'étude. Le BRGM se tient à disposition pour assurer la passation via des actions de formation. Les ouvrages à conserver en priorité sont : Casatorra, le puits 7 de Suariccia III (à compléter par SIII-8), Pz1, Pz2, Pz4, Pz5 et Pz3 dans une moindre mesure.

En outre, **afin de caractériser les processus de salinisation des puits 7 et 8 qui constitue actuellement le facteur limitant de l'exploitation du champ captant, un programme d'actions a été proposé par le BRGM et est en cours de discussion avec Acqua Publica.**

Enfin, dans la mesure où le bassin versant du Golo est indirectement interconnecté avec celui du Bevinco via les achats d'eau du Golo faits pour l'alimentation en eau du territoire de la CAB, l'optimisation de l'exploitation de l'hydrosystème du Bevinco pourrait engendrer une réduction des prélèvements sur le Golo. Aussi, la mise en place d'un outil de gestion quantitative de l'hydrosystème du Golo (nappe + rivière) permettrait d'avoir une meilleure maîtrise de l'approvisionnement en eau potable du territoire de la CCMG et de l'alimentation du réseau de distribution de l'eau brute vers la Plaine Orientale. Ainsi, **intégrer le modèle du Bevinco à un dispositif plus global de gestion des prélèvements à l'échelle de la masse d'eau de la Marana-Casinca permettrait d'y maîtriser la ressource en eau et ses usages.**

Sommaire

1. Introduction	15
1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE.....	15
1.2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE	18
1.3. PRINCIPALES ÉTAPES D'UN PROJET DE MODÉLISATION	19
1.4. SCHÉMA HYDROGÉOLOGIQUE CONCEPTUEL.....	21
1.4.1. Fonctionnement hydrodynamique	21
1.4.2. Intrusions salines	22
2. Construction du modèle hydrodynamique.....	25
2.1. LE CODE DE CALCUL MARTHE	25
2.2. STRUCTURE ET EMPRISE DU MODÈLE	26
2.2.1. Extension.....	26
2.2.2. Maillage	27
2.2.3. Géométrie.....	28
2.3. CONDITIONS HYDRAULIQUES AUX LIMITES DU MODÈLE.....	32
2.3.1. Types de conditions aux limites	32
2.3.2. Prise en compte de la marée	33
2.4. REPRÉSENTATION DES EAUX SUPERFICIELLES.....	34
2.4.1. Modélisation du Bevinco	34
2.4.2. Représentation de l'étang de Biguglia.....	38
2.4.3. Représentation des fossés de drainage.....	38
2.5. CALCUL DES FLUX D'INFILTRATION ET DE RUISSELLEMENT	40
2.5.1. Principe de calcul du bilan hydroclimatique avec le code de calcul MARTHE	40
2.5.2. Zones météorologique et zones de sol.....	41
2.5.3. Devenir des flux de débordement et de ruissellement.....	41
2.6. PRÉLÈVEMENTS.....	42
2.6.1. CCMG.....	42
2.6.2. Acqua Publica.....	43
2.7. PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES.....	45
2.7.1. Pompages d'essai.....	45
2.7.2. Modélisations CATHERINE	45

3. Calage du modèle hydrodynamique et résultats	47
3.1. MÉTHODOLOGIE DE CALAGE	47
3.1.1. Démarche générale	47
3.1.2. Paramètres de calage	47
3.1.3. Période de calage et situation hydrologique	48
3.2. DONNÉES DE RÉFÉRENCE POUR LE CALAGE	49
3.2.1. Niveaux piézométriques	49
3.2.2. Débits du Bevinco	50
3.2.3. Débits pompés à la station de Petriccia	51
3.3. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES DE CALAGE	52
3.3.1. Paramètres hydrodynamiques	52
3.3.2. Paramètres hydro-climatiques	54
3.3.3. Colmatage et rugosité du lit du Bevinco	54
3.4. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES	55
3.4.1. Cartes piézométriques	55
3.4.2. Chroniques piézométriques	57
3.5. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DÉBITS DU BEVINCO	64
3.5.1. Simulations des débits	64
3.5.2. Échanges nappe-rivière	65
3.5.3. Assecs du Bevinco	66
3.6. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DÉBITS DU DRAIN PRINCIPAL	68
3.7. BILAN HYDRAULIQUE DES FLUX	69
3.8. PRINCIPALES LIMITES	74
4. Modélisation hydrodispersive des chlorures	75
4.1. CONCEPTS THÉORIQUES	75
4.2. CONCENTRATIONS OBSERVÉES	77
4.3. CALAGE DES CONCENTRATIONS EN CHLORURES	78
4.3.1. Concentrations extérieures	78
4.3.2. Concentrations imposées	79
4.3.3. Conditions initiales de salinité	80
4.4. RÉSULTATS OBTENUS	82
4.5. CONCLUSIONS	85

5. Exploitation du modèle du Bevinco	87
5.1. CHOIX DES SCÉNARIOS SIMULÉS	87
5.2. SCÉNARIO 1 – CONDITIONS NATURELLES	88
5.2.1. Impact sur les niveaux de nappe.....	88
5.2.2. Impact sur les débits du Bevinco.....	92
5.2.3. Impact sur les bilans hydrauliques annuels de la nappe	94
5.2.4. Principales conclusions.....	95
5.3. SCENARIO 2 – SCÉNARIO DE CRISE	96
5.3.1. Impact sur les niveaux de nappe.....	97
5.3.2. Impact sur les débits du Bevinco.....	99
5.3.3. Impact sur le bilan hydraulique annuel.....	101
5.3.4. Impact sur la salinité de l'aquifère	102
5.3.5. Principales conclusions.....	103
5.4. SCENARIO 3 – OPTIMISATION DU CHAMP CAPTANT.....	105
5.4.1. Impact sur les niveaux de nappe.....	106
5.4.2. Impact sur les débits du Bevinco.....	109
5.4.3. Principales conclusions.....	111
5.5. SCENARIO 4 – AUGMENTATION DES PRÉLÈVEMENTS SUR LE BEVINCO EN ÉTIAGE.....	112
5.5.1. Impact sur les niveaux de la nappe.....	113
5.5.2. Impact sur les débits du Bevinco.....	114
5.5.3. Principales conclusions.....	115
5.6. SCÉNARIO 5 – STOCKAGE HIVERNAL.....	116
5.6.1. Impact sur les niveaux de nappe.....	117
5.6.2. Impact sur les débits du Bevinco.....	117
5.6.3. Principales conclusions.....	118
5.7. VERS DES INDICATEURS DE GESTION.....	118
5.7.1. Proposition de seuils de gestion sur le piézomètre de Casatorra	119
5.7.2. Proposition de seuils de gestion sur les piézomètres Pz1 et Pz4	122
5.7.3. Volumes exploitables	124
6. Conclusions et perspectives	127
6.1. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE DE LA NAPPE DU BEVINCO	127
6.2. GESTION DU CHAMP CAPTANT DE SUARICCIA	129
6.3. PERSPECTIVES RÉGIONALES	130
7. Bibliographie	131

Liste des figures

Illustration 1 -	Hydrosystème du Bevinco et localisation des prélèvements (extrait de Genevier et al., 2021).	17
Illustration 2 -	Localisation des piézomètres instrumentés pour un suivi en continu des niveaux.	18
Illustration 3 -	Identification de deux compartiments de l'aquifère du Bevinco présentant des caractéristiques différentes (extrait de Genevier et al., 2021).	23
Illustration 4 -	Coupe hydrogéologique interprétative est-ouest de l'aquifère du Bevinco en période de moyennes eaux (extrait de Genevier et al., 2021).	24
Illustration 5 -	Extension du modèle sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000 avec les différentes terrasses alluviales visibles à l'affleurement (extrait de Genevier et al., 2021).	26
Illustration 6 -	Maillage du modèle du Bevinco sur fond d'altitude topographique.	27
Illustration 7 -	Nombre de mailles par couche modélisée.....	28
Illustration 8 -	Tableau récapitulatif des couches du modèle hydrogéologique.....	28
Illustration 9 -	Vues en coupe (orientation O-E) : du modèle géologique initial (coupe du haut) vers le modèle adapté pour les besoins du modèle hydrogéologique (coupe du bas). ..	29
Illustration 10 -	Épaisseurs des 5 couches du modèle hydrogéologique en mètre (contour noir = étang de Biguglia, en bleu le Bevinco).	30
Illustration 11 -	Épaisseurs minimales, maximales et moyennes par couche (en mètres).....	31
Illustration 12 -	Limites concernées par une condition de type charges imposées (mailles représentées en gris).....	32
Illustration 13 -	Variations du niveau de la mer au marégraphe de Solenzara sur la période 2009-2019 (http://refmar.shom.fr/fr/solenzara).	33
Illustration 14 -	Tronçons de rivière introduits dans le modèle (Bevinco + étang).	34
Illustration 15 -	Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE (Thiéry, 2015).	35
Illustration 16 -	Profils en long et largeurs (m) du Bevinco considérés dans le modèle (graphe du haut : cote d'eau en bleu, cote du fond en marron).	35
Illustration 17 -	Sous-bassins versants amont considérés pour le calcul du débit du Bevinco à l'entrée du modèle.	37
Illustration 18 -	Débits du Bevinco considérés à l'entrée du modèle hydrogéologique (période 2018/2019).	37
Illustration 19 -	Mailles rivière (roses) et étang (bleues) du modèle du Bevinco.....	38
Illustration 20 -	Réseau de drains modélisé (couleurs fonction du n° de drain).	39
Illustration 21 -	Schéma de fonctionnement du calcul de la recharge et du ruissellement dans le module GARDENIA intégré à MARTHE (Thiéry, 2014).	40
Illustration 22 -	Zones de sol définies dans le modèle du Bevinco.....	41
Illustration 23 -	Carte de localisation des forages de production d'eau potable (extrait de Genevier et al., 2021).	42
Illustration 24 -	Chronique des débits pompés reconstituée pour les 3 forages exploités par la CCMG sur la période 01/01/2009-31/08/2019.	43
Illustration 25 -	Chronique des débits pompés reconstituée pour les 2 unités Suariccia I et III d'Acqua Publica sur la période 01/01/2009-31/08/2019.	43

Illustration 26 - Comparaison entre le relevé hebdomadaire et le relevé journalier pour l'unité Suariccia III sur la période 10/2018-07/2019.....	44
Illustration 27 - Niveaux piézométriques simulés par CATHERINE vs niveaux observés au droit du piézomètre Pz4 (période 20/12-31/12/2018).....	46
Illustration 28 - Débits moyens mensuels du Bevinco des années 2010 à 2019 comparés aux débits mensuels décennaux secs et décennaux humides calculés sur la période de 1960 à 2020. L'échelle verticale est logarithmique.....	48
Illustration 29 - Carte piézométrique de la nappe du Bevinco en condition de basses eaux le 27/08/2019 et de moyennes eaux le 01/03/2019 (extrait de Genevier et al., 2021).	50
Illustration 30 - Localisation des sites de jaugeage du Bevinco (extrait de Genevier et al., 2021).....	51
Illustration 31 - Champs de perméabilité (à gauche) et de transmissivité (à droite) issus du calage du modèle pour l'aquifère principal du Bevinco (couche 5).....	52
Illustration 32 - Coefficients d'emmagasinement en nappe captive issus du calage du modèle pour l'aquifère principal du Bevinco (couche 5) (emmagasinement spécifique en m-1 à gauche, emmagasinement sans dimension à droite).....	53
Illustration 33 - Coefficients d'emmagasinement en nappe libre et en nappe captive issus du calage pour les cinq couches modélisées.....	53
Illustration 34 - Valeurs des paramètres hydro-climatiques issus du calage pour les trois zones de sol (cf. définition des paramètres, § 2.5.1).	54
Illustration 35 - Perméabilité de colmatage du Bevinco et de l'étang (à droite) et coefficient de rugosité du lit de la rivière (à droite).	54
Illustration 36 - Piézométrie de la nappe alluviale du Bevinco simulée au 31/08/2019 vs piézométrie interprétée à partir de relevés de terrain du 27/08/2019.....	55
Illustration 37 - Piézométrie de la nappe alluviale du Bevinco simulée en condition de pompage (graphe du haut, 31/08/2018) et sans pompage sur le champ captant de Suariccia (graphe du bas, 31/08/2019).	57
Illustration 38 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés dans la partie libre de la nappe et en rive droite du Bevinco (couches 3 à 5).	59
Illustration 39 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés dans la partie libre de la nappe et en rive gauche du Bevinco (couche 5).	60
Illustration 40 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés au droit des différents ouvrages de surveillance de la nappe alluviale du Bevinco dans sa partie captive (couches 3 à 5).	62
Illustration 41 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés au droit de PZ5 et LIM5 (compartiment nord).....	62
Illustration 42 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés pour les limons de couverture (couche 2).	63
Illustration 43 - Débits du Bevinco simulés vs jaugeages différentiels (période 2016-2019).....	65
Illustration 44 - Hauteurs d'eau et débits simulés au passage à gué confrontés aux valeurs mesurées à la station hydrométrique de la Réserve (graphe du haut = hauteur d'eau, graphe du bas = débit).	65
Illustration 45 - Echanges simulés entre les eaux souterraines et les eaux superficielles le 31/12/2018 (carte de gauche) et le 31/08/2019 (carte de droite) (si $Q < 0$, l'échange se fait de la nappe vers le cours d'eau ou l'étang et inversement si $Q > 0$).	66
Illustration 46 - Débits du Bevinco simulés à la date du 18/07/2017.....	67
Illustration 47 - Nombre de jours d'assec par mois simulé au niveau du passage à gué sur la période 2009-2019.....	67

Illustration 48 - Débits simulés en sortie du réseau de drain (en rouge) comparés aux débits pompés à la station de Petriccia (en bleu).....	68
Illustration 49 - Evolution du bilan hydraulique annuel simulé par le modèle sur la période 2010-2019 (graphe du haut : couche des limons, graphe du bas : aquifère alluvial).	70
Illustration 50 - Relations entre le niveau de prélèvement dans l'aquifère et l'infiltration du Bevinco, les entrées par la limite littorale et les échanges entre la nappe et les limons sus-jacents au pas de temps annuel.	70
Illustration 51 - Evolution des bilans hydrauliques mensuels de l'aquifère alluvial simulés par le modèle pour les années hydrologiques 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019.	72
Illustration 52 - Schéma conceptuel du bilan hydraulique annuel moyen (2009-2019) de l'hydro-système Bevinco.	73
Illustration 53 - Equation du transport de masse standard résolue par MARTHE dans un cas monodimensionnel (Thiéry, 2020).	75
Illustration 54 - Concentration en chlorure vs conductivité électrique pour les eaux souterraines de la zone d'étude.	77
Illustration 55 - Concentration en chlorures vs conductivité électrique pour les eaux souterraines faiblement minéralisées.	78
Illustration 56 - Chronique de concentrations en chlorures reconstituée pour les eaux du Bevinco à l'entrée du modèle.....	79
Illustration 57 - Domaine de l'aquifère à concentration imposée en chlorures (en gris, valeur imposée à 6 500 mg/l, en vert : valeur initiale à 20 mg/l).	80
Illustration 58 - Concentrations en chlorures initiales au sein de l'aquifère Fy12 (couche n°5 du modèle).	81
Illustration 59 - Concentrations en chlorures initiales dans les eaux superficielles.....	81
Illustration 60 - Carte des concentrations en chlorures simulée de la nappe alluviale du Bevinco au 31/08/2019.	82
Illustration 61 - Concentrations en chlorures simulées et observées sur la partie amont de la nappe alluviale.	83
Illustration 62 - Concentrations en chlorures simulées et observées au droit du champ captant et en aval.....	84
Illustration 63 - Tableau récapitulatif décrivant les 5 scénarios d'exploitation simulés.	87
Illustration 64 - Tableau récapitulatif décrivant les 5 scénarios d'exploitation simulés.	87
Illustration 65 - Remontée des niveaux piézométriques simulés en l'absence de prélèvement (scénario SC1) à la date du 31/12/2018 (hautes eaux + arrêt du champ captant).	88
Illustration 66 - Remontée des niveaux piézométriques simulée en l'absence de prélèvement (scénario SC1) à la date du 31/08/2018 (basses eaux + champ captant en service).	89
Illustration 67 - Impact du scénario SC1 sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.....	90
Illustration 68 - Impact du scénario SC1 sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.....	91
Illustration 69 - Impact du scénario SC1 sur les débits du Bevinco (2014-2019).....	93
Illustration 70 - Impact du scénario SC1 sur les assecs du Bevinco aux stations Virage à 90° et Passage à gué (2010-2019).	93
Illustration 71 - Impact du scénario SC1 sur les bilans hydrauliques annuels de l'aquifère (2010-2019).	95
Illustration 72 - Débits de prélèvement reportés sur le champ captant d'Acqua Publica (scénario 2).	96

Illustration 73 - Prélèvements annuels sur le champ captant d'Acqua Publica dans les conditions réelles (REF) et dans les conditions du scénario 2 (SC2).....	96
Illustration 74 - Impact du scénario SC2 sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.	97
Illustration 75 - Impact du scénario SC2 sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.	98
Illustration 76 - Impact du scénario SC2 sur les débits du Bevinco (2014-2019).	99
Illustration 77 - Impact du scénario SC2 sur les assecs du Bevinco aux stations Virage à 90°, Passage à gué et Réserve (2010-2019).....	100
Illustration 78 - Impact du scénario SC2 sur les bilans hydrauliques annuels de l'aquifère (2010-2019).....	101
Illustration 79 - Carte des concentrations en chlorures simulées pour le scénario de crise (SC2) aux dates du 31/12/2012 (à gauche) et du 31/12/2016 (à droite).	102
Illustration 80 - Prélèvements annuels simulés pour le champ captant d'Aqua Publica en conditions réelles (REF) et dans les scénarios SC2, SC3B et SC3C.	105
Illustration 81 - Impact du scénario SC3A sur la piézométrie de la nappe au 31/08/2017.	106
Illustration 82 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.....	107
Illustration 83 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.....	108
Illustration 84 - Impact du scénario SC3A sur les assecs au seuil de Casatorra (2010-2019).....	109
Illustration 85 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les débits du Bevinco (2014-2019).....	110
Illustration 86 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les assecs du Bevinco à la station de la Réserve (2010-2019).	110
Illustration 87 - Reports de prélèvements théoriques et reports satisfaits sur la prise d'eau du Lancone en période d'étiage (scénario SC4) (reports théoriques en orange sur le graphique du haut, reports satisfaits en bleu).	113
Illustration 88 - Impact du scénario SC4 sur la piézométrie de la nappe au 25/07/2012 (situation la plus impactée sur la période modélisée).	114
Illustration 89 - Impact du scénario SC4 sur les débits du Bevinco (2010-2019).	115
Illustration 90 - Impact du scénario SC4 sur les assecs du Bevinco (2010-2019).....	115
Illustration 91 - Reports de prélèvements théoriques et satisfaits sur la prise d'eau du Lancone en période hivernale (scénario SC5) (reports théoriques en rouge sur le graphique du haut, reports satisfaits en bleu).	116
Illustration 92 - Impact du scénario SC5 sur la piézométrie de la nappe au 28/01/2012 (situation la plus impactée sur la période modélisée).	117
Illustration 93 - Impact du scénario SC5 sur les débits du Bevinco (2010-2019).	118
Illustration 94 - Répartition de l'altitude de la nappe au piézomètre DCE Casatorra en fonction du débit de la rivière à la station DREAL pour les débits compris entre 0 et 0.2 m3/s (extrait de Genevier et al., 2021).	120
Illustration 95 - Débits du Bevinco simulés au seuil de Casatorra versus niveaux piézométriques simulés à Casatorra (des assecs sont simulés en deça d'un niveau de 2.1 m NGF). ...	120
Illustration 96 - Débits du Bevinco simulés à la Réserve versus niveaux piézométriques simulés à Casatorra pour les différents scénarios simulés (des assecs sont simulés en deça d'un niveau de 0.6 m NGF).....	121

Illustration 97 - Chronique piézométrique mesurée à Casatorra de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.	122
Illustration 98 - Chronique piézométrique simulée en Pz4 de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.....	123
Illustration 99 - Niveaux simulés en Pz4 versus niveaux simulés en Pz1 pour les différents scénarios simulés.	123
Illustration 100 - Flux d'eau simulés en provenance du littoral versus niveaux simulés en Pz1 avec report des seuils de gestion retenus pour Pz1.	124
Illustration 101 - Chronique piézométrique simulée en Pz1 de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.....	124
Illustration 102 - Identification des scénarios d'exploitation de la nappe permettant de respecter les seuils d'alerte (en gras : scénario acceptable) et volumes potentiellement mobilisables.	125

Liste des annexes

Annexe 1 : Champs de perméabilité ajustés pour les couches 1 à 4 du modèle.....	133
Annexe 2 : Résultats des analyses chimiques des prélèvements réalisés en avril 2019	137

1. Introduction

1.1. CONTEXTE DE L'ÉTUDE

La présente étude de modélisation hydrogéologique de la nappe du Bevinco s'inscrit dans un contexte de déséquilibre quantitatif de la masse d'eau souterraine au sein de laquelle elle se situe (FREG335) et répond aux objectifs fixés par le SDAGE, le SAGE et le Contrat de milieu de l'Étang de Biguglia.

Le bassin versant de l'étang de Biguglia fait l'objet d'un SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion des eaux) approuvé en avril 2014, ayant donné lieu à un contrat d'étang (2014-2018), qui identifient comme enjeu majeur la mise en œuvre d'une gestion quantitative durable de la ressource en eau sur ce territoire.

Dans le cadre de l'état des lieux du bassin de Corse de 2015, la masse d'eau des alluvions de la plaine de Marana-Casinca (FREG335) qui contient l'aquifère du Bevinco a été définie en mauvais état quantitatif, en raison d'un déséquilibre lié à des sollicitations qui excèdent la recharge et de problèmes d'intrusion saline. Le SDAGE 2016-2021 fixe un objectif d'atteinte du bon état de cette masse d'eau à 2021. L'état médiocre de cette dernière ne correspond pas à une dégradation de l'état par rapport à 2009, mais à une amélioration de la connaissance. L'analyse succincte des données de prélèvements (fichier des redevances de l'AE RMC) et de recharge (débit des cours d'eau en amont de la Plaine de la Marana-Casinca) par le BRGM dans le cadre d'un appui aux administrations auprès de l'Agence en 2016 a mis en évidence un ratio prélèvements / recharge qui apparaissait élevé sur la période d'étiage : les prélèvements autorisés sur les ouvrages de la CCMG et ceux d'Acqua Publica représentaient en période d'étiage normal 47 % du débit de la rivière en amont de l'aquifère.

En parallèle de ce constat préliminaire et du souhait d'Acqua Publica d'optimiser ses prélèvements dans l'hydrosystème du Bevinco, en étudiant les marges de prélèvements supplémentaires envisageables, la réalisation d'une étude de modélisation hydrogéologique de la nappe du Bevinco pour disposer d'un outil de gestion de la ressource en eau a été inscrite dans les objectifs du Contrat de milieu de l'Étang de Biguglia – Bevinco (2014 – 2015).

Cette action (numérotée 1-5 au contrat d'étang) s'inscrit dans le cadre du SAGE de l'étang de Biguglia (mesure 8), de l'objectif « Equilibre quantitatif de la ressource » du Contrat ainsi que dans le cadre de l'orientation fondamentale 1 « Assurer l'équilibre quantitatif de la ressource » du SDAGE du bassin de Corse et des objectifs environnementaux fixés sur chacun des milieux de l'hydrosystème. Sur ce dernier aspect, il s'agit d'assurer le rétablissement du bon état quantitatif de la masse d'eau souterraine de la Marana-Casinca, le maintien du bon état du Bevinco, et de ne pas générer de pression supplémentaire sur l'étang de Biguglia (en mauvais état écologique).

Le Contrat de milieu prévoit également que les résultats de l'étude de modélisation, ainsi que les autres études prévues pour l'amélioration des connaissances sur le territoire du SAGE (notamment définition du débit biologique du Bevinco), alimentent la réflexion autour de la définition future d'un plan de gestion de la ressource. Il s'agit de l'action 1-2 du Contrat qui vise à mobiliser les membres de la CLE (Commission Locale de l'Eau), au premier rang desquels les gestionnaires de la ressource (ainsi que les Offices, les Services de l'État et l'Agence de l'Eau), pour parvenir à définir un plan de gestion en concertation et une maîtrise d'ouvrage adaptée de ce plan. Selon l'instruction gouvernementale de 2019, ce plan devra prendre la forme d'un Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau (PTGE), dont les modalités de mise en œuvre sont fixées par délibération 19/380 AC de l'Assemblée de Corse.

La Communauté d'agglomération de Bastia (CAB) gère, par le biais de sa régie publique *Acqua Publica*, l'approvisionnement en eau potable des cinq communes de l'agglomération (Furiani, Bastia, Ville di Pietrabugno, San Martino di Lota et Santa Maria di Lota) représentant 29 000 abonnés. L'eau distribuée dans le réseau a quatre origines différentes :

- des aménagements gravitaires (prises d'eau et sources) qui approvisionnent essentiellement les petits hameaux et villages de montagne ;
- la prise d'eau sur le Bevinco située dans le défilé du Lancone (Illustration 1) qui est la principale ressource de l'agglomération lorsque le débit de la rivière est suffisamment important et en dehors de la période d'interdiction définie par l'arrêté préfectoral (de la deuxième semaine de juillet à la deuxième semaine d'octobre incluse) ;
- le raccordement au réseau d'eau brute de l'Office d'équipement hydraulique de Corse (OEHC) qui permet de recourir aux eaux en provenance du Golo (principalement pendant la période d'étiage lorsque la prise du Lancone ne peut être utilisée et en complément ponctuel des autres ressources) ;
- six forages dans l'aquifère alluvial du Bevinco (Illustration 1) qui sont principalement mobilisés dans les périodes de transition et qui constituent la principale source d'appoint à la prise d'eau et l'eau brute. L'aquifère est également exploité par la Communauté de Communes Marana-Golo (CCMG) au travers de trois forages (Illustration 1).

Acqua Publica souhaite augmenter ses prélèvements dans l'hydrosystème du Bevinco (rivière et aquifère) tout en respectant les objectifs environnementaux du SDAGE, le maintien d'un débit réglementaire dans la rivière et éviter par des prélèvements excessifs toute contamination saline dans l'aquifère. Acqua Publica a besoin de connaître les débits qu'elle peut prélever dans le respect de ces objectifs environnementaux.

C'est dans ce contexte que Acqua Publica, l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, l'Office de l'Environnement de la Corse et le BRGM se sont associés pour réaliser un programme d'études visant à répondre aux objectifs suivants :

- définir les débits d'eau qui pourraient être mobilisés dans la rivière du Bevinco et dans la nappe alluviale sans entraîner d'impact jugé inacceptable sur le débit de la rivière et la salinité de la nappe alluviale et les niveaux piézométriques dans la nappe alluviale ;
- définir un système de surveillance de la nappe et des indicateurs de gestion portant sur les niveaux piézométriques et/ou les niveaux d'eau dans la rivière et/ou la minéralisation des eaux.

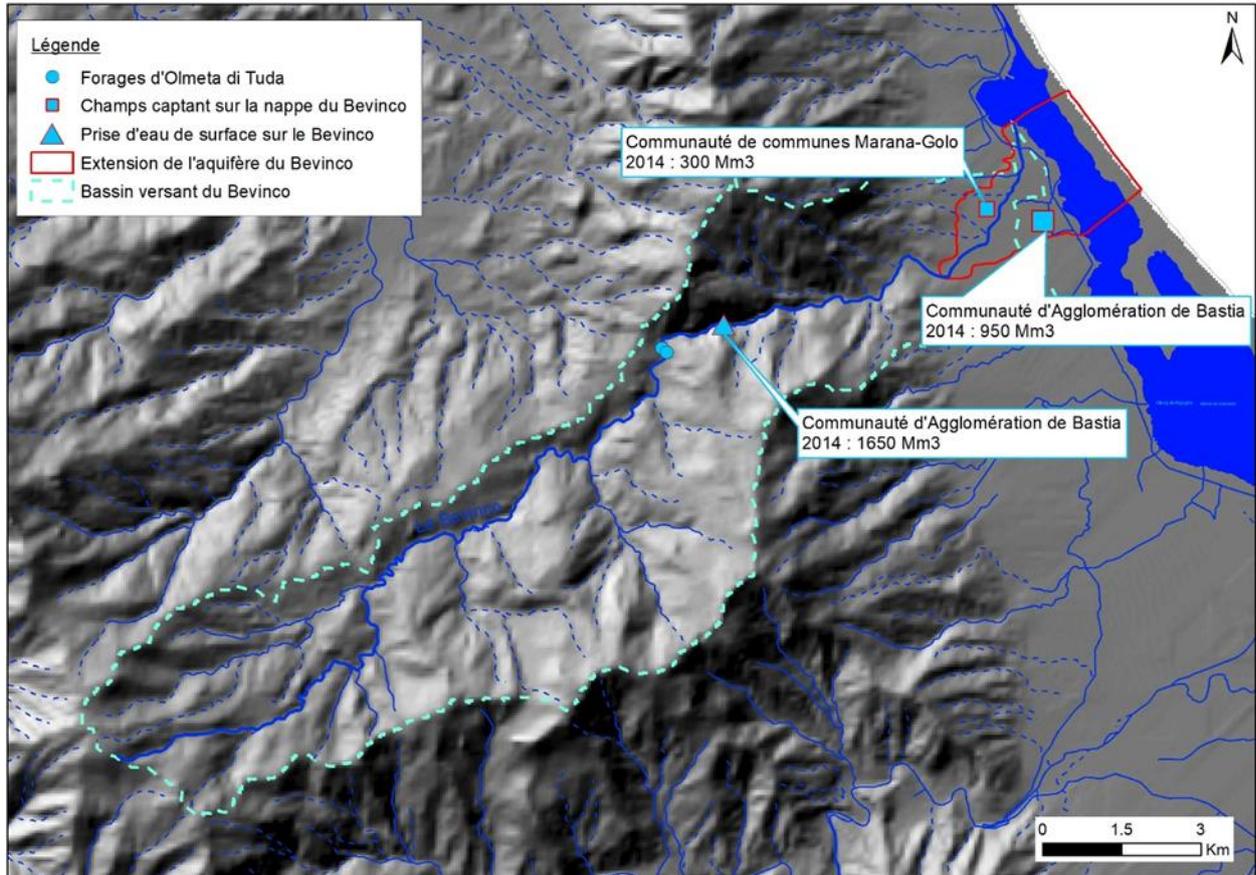


Illustration 1 - Hydrosystème du Bevinco et localisation des prélèvements (extrait de Genevier et al., 2021).

1.2. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Pour atteindre les objectifs précités, l'étude menée par le BRGM a tout d'abord consisté à faire l'acquisition de données nouvelles sur la structure de l'aquifère du Bevinco et sur son fonctionnement hydrogéologique. Les investigations réalisées et le schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère élaboré par le BRGM sont détaillées dans le rapport de fin de travaux des cinq piézomètres réalisés (Genevier, 2019) et dans le rapport de phase 1 (Genevier *et al.*, 2021). Les nouvelles connaissances acquises concernent principalement :

- la structure géologique de l'aquifère par des investigations géophysiques, des prospections de terrain et la réalisation de nouveaux forages pour ainsi pouvoir modéliser la structure de l'aquifère en 3D ;
- le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère consistant en la définition des relations nappe – rivière, la caractérisation des intrusions salines, l'étude de la dynamique de la nappe (piézométrie et détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère) et l'analyse de l'impact des prélèvements sur la nappe. Les moyens mis en œuvre pour y parvenir sont la réalisation de campagnes de jaugeages différentiels du Bevinco, des campagnes de mesure des niveaux d'eau et de la conductivité électrique dans les différents compartiments de l'hydrosystème, le suivi piézométrique en continu de la nappe en différents secteurs (cf. Illustration 2) et l'inventaire des prélèvements d'eau sur l'hydrosystème.

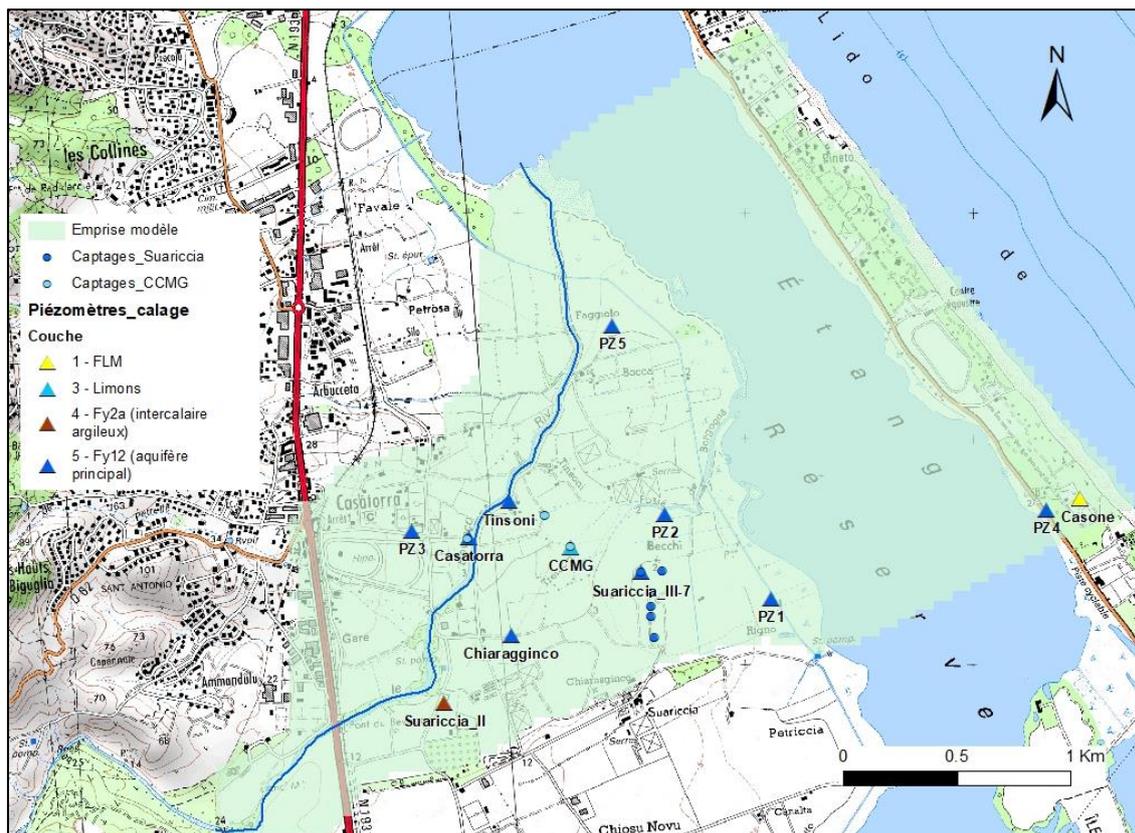


Illustration 2 - Localisation des piézomètres instrumentés pour un suivi en continu des niveaux.

Dans une seconde phase d'étude, objet du présent rapport, un modèle hydrodynamique maillé a été développé par le BRGM et exploité pour simuler différents scénarios d'exploitation et ainsi contribuer à la proposition d'indicateurs de gestion.

1.3. PRINCIPALES ÉTAPES D'UN PROJET DE MODÉLISATION

Une fois le cadre et l'objectif d'une modélisation hydrogéologique posés, un projet de modélisation comporte plusieurs phases distinctes, décrites ci-après (Barthélémy et Seguin, 2016) :

- 1) Collecte, analyse et synthèse des données. Les données à acquérir et à traiter pour un modèle maillé sont nombreuses et variées. Elles concernent la structure géologique du/des réservoir(s) et des encaissants, les propriétés hydrogéologiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement) de toutes ces formations, les mesures hydrauliques (niveaux piézométriques, débits des sources et des cours d'eau, les données climatiques (pluies et évapotranspiration « ETP » pour calculer la recharge naturelle des nappes), les paramètres caractérisant les sols, les volumes d'eau prélevés et ou injectés en nappe et dans les cours d'eau (localisation et chroniques des pompages pour l'eau potable, l'agriculture et l'industrie) et la caractérisation du réseau hydrographique pour estimer les échanges nappe-rivière. À ceux-ci s'ajoutent dans notre cas les paramètres régissant le transport hydro-dispersif (Cf. chapitre 4).
- 2) Construction d'un modèle géologique 3D. Pour un modèle spatialisé complexe, couvrant par exemple un système aquifère multicouche comme dans notre cas, il est fortement recommandé d'utiliser un modeleur géologique 3D pour valoriser toutes les données structurales disponibles et construire une structure géologique cohérente et actualisable, qui servira ensuite d'ossature au modèle d'écoulement. Ce travail a été mené en phase 1 de l'étude (Genevier *et al.*, 2021).
- 3) Élaboration du schéma conceptuel du fonctionnement hydrogéologique. Sur la base de la synthèse hydrogéologique et des données précédemment compilées, le schéma conceptuel d'écoulement définit l'extension horizontale et verticale du système aquifère à modéliser, la succession des ensembles à simuler, leur lithologie et leurs principales caractéristiques hydrogéologiques, les conditions hydrauliques aux limites du modèle, la nature des relations nappe-rivière, les ordres de grandeur des principaux débits d'entrée et de sortie, l'origine des contaminations en chlorures, etc. Ce schéma conceptuel est détaillé dans le rapport de phase 1 (Genevier *et al.*, 2021), les principaux éléments sont repris dans le paragraphe suivant.
- 4) Construction d'un modèle d'écoulement : traduction numérique du schéma conceptuel d'écoulement. La construction d'un modèle maillé consiste à découper l'espace selon une grille plus ou moins régulière en 3 dimensions, puis à renseigner chacune des mailles ainsi créées avec des données chiffrées décrivant la géométrie du système aquifère, les propriétés hydrogéologiques du milieu, les conditions aux limites et les entrées/sorties hydrauliques. Les chapitres 2 et 4 du présent rapport reviennent sur l'ensemble des étapes de construction du modèle et sur les hypothèses prises, respectivement pour les aspects hydrodynamiques et pour le transport de masse.
- 5) Calage du modèle. Durant cette phase, on recherche l'ensemble des valeurs des paramètres permettant la meilleure adéquation possible entre les observations disponibles et les valeurs calculées par le modèle : niveaux piézométriques et débits des cours d'eau pour un modèle d'écoulement souterrain ainsi que les concentrations pour un modèle hydro-dispersif (concentrations en chlorures dans notre cas). Pour l'hydrodynamique, sont principalement concernés par le calage, les champs de perméabilité et du coefficient d'emmagasinement qui ne sont pas connus *a priori*, les coefficients de partage ruissellement/infiltration et la conductance des lits des cours d'eau. Pour un modèle hydro-dispersif, s'ajoutent notamment la dispersivité et la porosité cinématique. Le processus de calage du modèle hydrodynamique et les résultats associés sont présentés au chapitre 3 tandis que le calage du modèle hydro-dispersif est décrit au chapitre 4. Plus les chroniques d'observation seront de longue durée, plus le calage du modèle sera robuste (à minima 3-4 cycles annuels pour un hydrosystème peu inertiel comme le Bevinco, et idéalement les plus contrastés possibles).

- 6) Validation du modèle. Elle consiste à simuler, avec le modèle calé, une période volontairement mise de côté pendant le calage. L'objectif est de vérifier que le modèle restitue correctement les évolutions du système aquifère lorsqu'il est soumis à des sollicitations (principalement des chroniques de recharge et de pompage) différentes de celles qui ont été utilisées pour le calage. La validation n'est pas toujours possible dans les faits, notamment quand les chroniques d'observations sont de relativement courtes durées comme dans notre cas. Ce travail serait donc à mener dans le futur avec l'allongement des chroniques (sur quelques cycles annuels).
- 7) Exploitation du modèle. Une fois calé, le modèle est en général utilisé pour simuler différents scénarios prévisionnels. Ceux-ci sont définis en fonction des objectifs assignés au départ de l'étude : prévision d'un état piézométrique résultant de nouvelles sollicitations de l'hydrosystème, recherche d'une configuration de pompage permettant de respecter un jeu de contraintes, détermination de « volumes exploitables », etc. C'est l'objet du chapitre 5 du présent rapport.

1.4. SCHÉMA HYDROGÉOLOGIQUE CONCEPTUEL

Les principales caractéristiques du fonctionnement de l'hydrosystème ici rapportées sont extraites du rapport de phase 1 (Genevier *et al.*, 2021). Pour plus de détails, le lecteur est invité à se reporter à ce dernier.

1.4.1. Fonctionnement hydrodynamique

- L'aquifère du Bevinco est constitué d'alluvions graveleuses et sableuses qui se répartissent selon deux horizons entre lesquels s'intercale en partie une éponte argileuse. Le réservoir se poursuit en mer comme démontré par la création du piézomètre PZ4 implanté sur le cordon dunaire. Aucune information n'est cependant disponible plus en aval.
- La présence de limons (Fy3l) peu perméables à l'affleurement sur la majeure partie de l'extension de l'aquifère en rive droite du Bevinco induit la mise en captivité de la nappe. Des phénomènes d'artésianisme sont reconnus ponctuellement. Globalement, les suivis piézométriques mis en place mettent en évidence une drainance ascendante.
- La nappe alluviale du Bevinco est principalement alimentée en eau par l'infiltration de la rivière à son entrée dans la plaine au contact des alluvions sableuses récentes sur lesquelles elle s'écoule. L'infiltration de la rivière se produit sur le tronçon amont, jusqu'au virage à 90° de la rivière vers le nord. D'après les campagnes de jaugeages différentiels réalisées entre 2016 et 2019, son débit d'infiltration vers la nappe est d'environ 100 à 200 l/s en période de moyennes eaux et diminue jusqu'à une quarantaine de litres par secondes en basses eaux. Le débit de la rivière s'infiltré alors totalement et son écoulement de surface est interrompu en aval.
- Le canal de la Réserve Naturelle de l'étang de Biguglia ainsi que le réseau de fossés drainent l'aquifère via les passées sableuses présentes au sein des limons (nappe perchée) et permettent d'évacuer les flux de débordement vers l'étang.
- Deux compartiments distincts ont été mis en évidence, ils sont identifiés sur l'illustration 3 et leurs principales caractéristiques y sont synthétisées :
 - le compartiment sud de l'aquifère présente une épaisseur plus importante (de 30 à 60 m) et une très bonne perméabilité. Le champ captant d'Acqua Publica est implanté dans ce compartiment, dans l'axe d'un paléo-chenal drainant la majorité des eaux infiltrées par le Bevinco ;
 - le compartiment nord se caractérise par des épaisseurs de limons et d'alluvions plus réduites (puissance de l'aquifère de 5 m au droit de PZ5). Plus en profondeur, les alluvions présentent un faciès argileux. Dans ce secteur, l'aquifère apparaît peu réalimenté. La contribution des eaux souterraines à l'écoulement du Bevinco aval est limitée (peu visible sur le terrain), mais un sous-écoulement est probable. Aucune exploitation de la nappe n'est signalée dans ce secteur (présence de quelques puits agricoles non exploités).

1.4.2. Intrusions salines

- L'aval de la rivière est impacté par un rentrant salé en provenance de l'Étang de Biguglia en période d'étiage, lorsque le débit de la rivière sur cette portion devient inférieur à environ 25 l/s. Ce rentrant salé se limite au « banc de galets » qui agit comme un seuil hydraulique, bien que l'altitude du lit de la rivière soit inférieure au 0 m NGF en amont de ce point.
- Les eaux de l'étang présentent une salinité importante, avec des valeurs similaires à l'eau de mer au nord (à proximité du grau, chenal qui relie l'étang et la mer) et des valeurs plus faibles vers le sud (20 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, gradient nord-sud).
- Les eaux contenues dans les limons superficiels présentent une minéralisation importante au sein de la zone de débordement de l'étang (cf. délimitation, Illustration 3). Au droit du champ captant, des sondages réalisés à la tarière en décembre 2020 montreraient que les limons ne sont pas salinisés.
- Dans le compartiment nord, les propriétés hydrodynamiques médiocres de l'aquifère semblent favoriser l'intrusion saline (conductivités électriques comprises entre 10 000 et 12 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au droit de PZ5) tandis que, dans le compartiment sud, celle-ci semble être contenue par la charge hydraulique de la nappe. Au droit du lido (entre la mer et l'étang), la nappe alluviale présente une conductivité comprise entre 11 500 et 14 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en PZ4 tandis qu'aucune salinisation n'est mise en évidence sur PZ1 et PZ2 (en amont de l'étang, conductivité < 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Les logs de conductivité mis en œuvre sur les piézomètres PZ4 et Pz5 ne mettent pas en évidence une stratification verticale de la salinité. Il n'a pas été possible de positionner une éventuelle interface eau douce – eau salée. L'hypothèse faite est que ces piézomètres suivent la zone de diffusion entre les deux masses d'eau.
- Pour les débits de pompage les plus importants sur le champ captant, une augmentation des concentrations en chlorures a été observée par le passé (régime d'exploitation plus important dans les années 70 et 80). Les épisodes anciens sont très peu documentés (débits de pompage inconnus, quelques rares suivis ponctuels au niveau de résurgences à l'aval des forages). Les rares données disponibles dont le suivi piézométrique sur Casatorra amènent à privilégier une contamination par progression du biseau salé.
- En toute fin d'étude, une opération de pompage forcé a été réalisée en concertation avec Acqua Publica (automne 2020). Celle-ci est décrite en détail dans le rapport de phase 1. Les augmentations de la salinité mesurées par Acqua Publica, uniquement sur les 2 puits nord (SIII-7 et SIII-8) ne sont pas vérifiées par les suivis en continu de la conductivité réalisés sur PZ1 et PZ2, ouvrages de surveillance implantés à l'aval. Les observations faites tendent à privilégier une autre hypothèse que celle de la progression du biseau salé. La contamination pourrait être expliquée par l'influence des eaux minéralisées du fossé Borgogna qui remonte dans les canaux de drainage jusqu'aux puits nord. Il faut en outre souligner la mauvaise étanchéité des forages, dont la réhabilitation est à l'étude par Acqua Publica. La dynamique de salinisation de l'aquifère en condition de pompage reste ainsi difficile à expliquer et devra être mieux caractérisée (cf. préconisations, § 6). Par ailleurs, il faut noter que ces informations nous sont parvenues après le calage du modèle.

Une coupe hydrogéologique interprétée, orientée est-ouest et passant par le champ captant d'Acqua Publica (compartiment sud), est reportée en Illustration 4.

Que ce soit concernant les aspects hydrodynamiques ou la dynamique des intrusions salines, des inconnues demeurent, celles-ci seront reprises dans les chapitres suivants lorsque seront abordées les limites du modèle. On peut d'ores et déjà souligner l'absence d'informations (géométrie, échanges étang- eaux souterraines, salinité des eaux souterraines, etc.) sous l'étang de Biguglia qui occupe une superficie importante à l'échelle de la plaine alluviale.

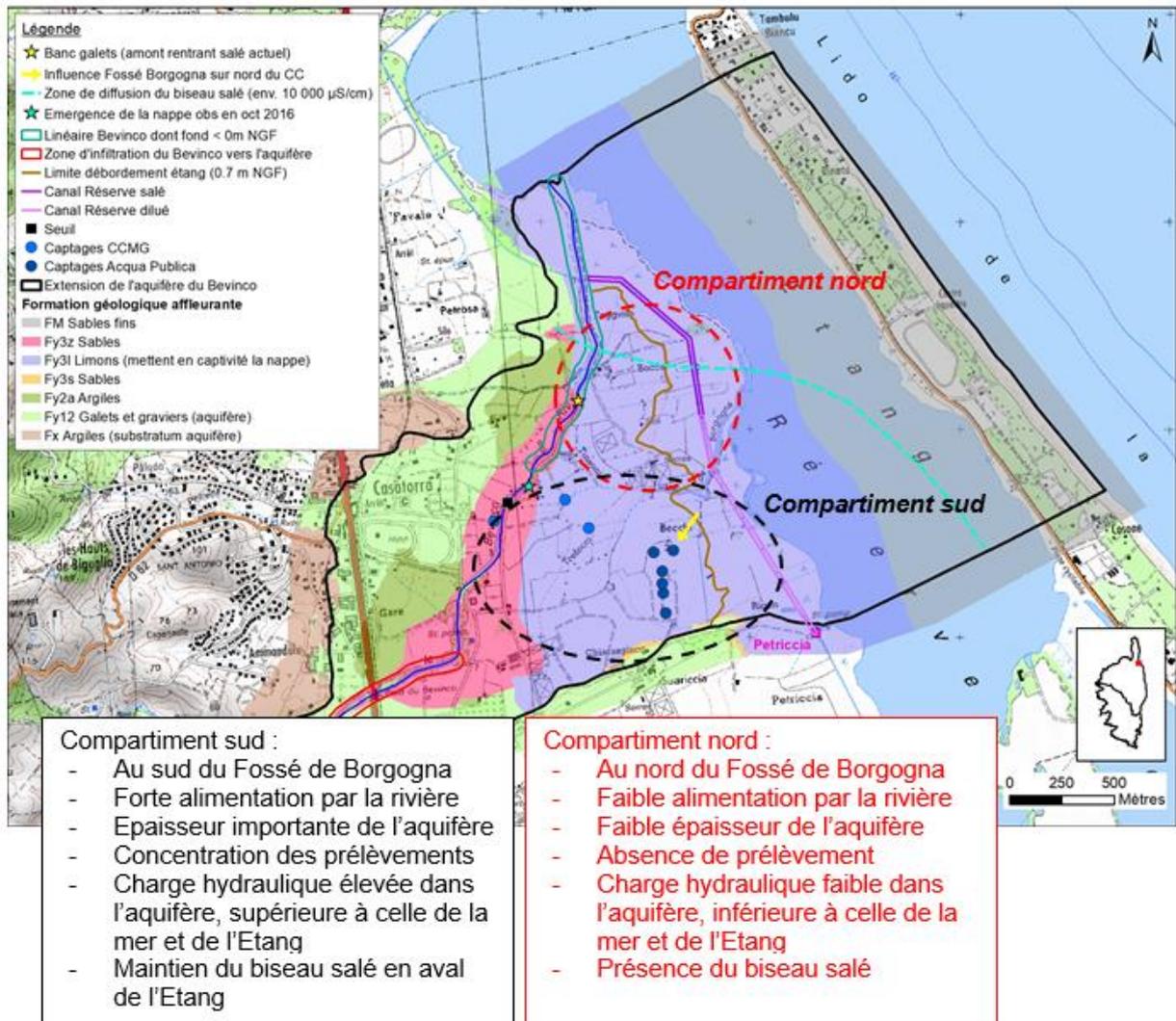


Illustration 3 - Identification de deux compartiments de l'aquifère du Bevinco présentant des caractéristiques différentes (extrait de Genevier et al., 2021).

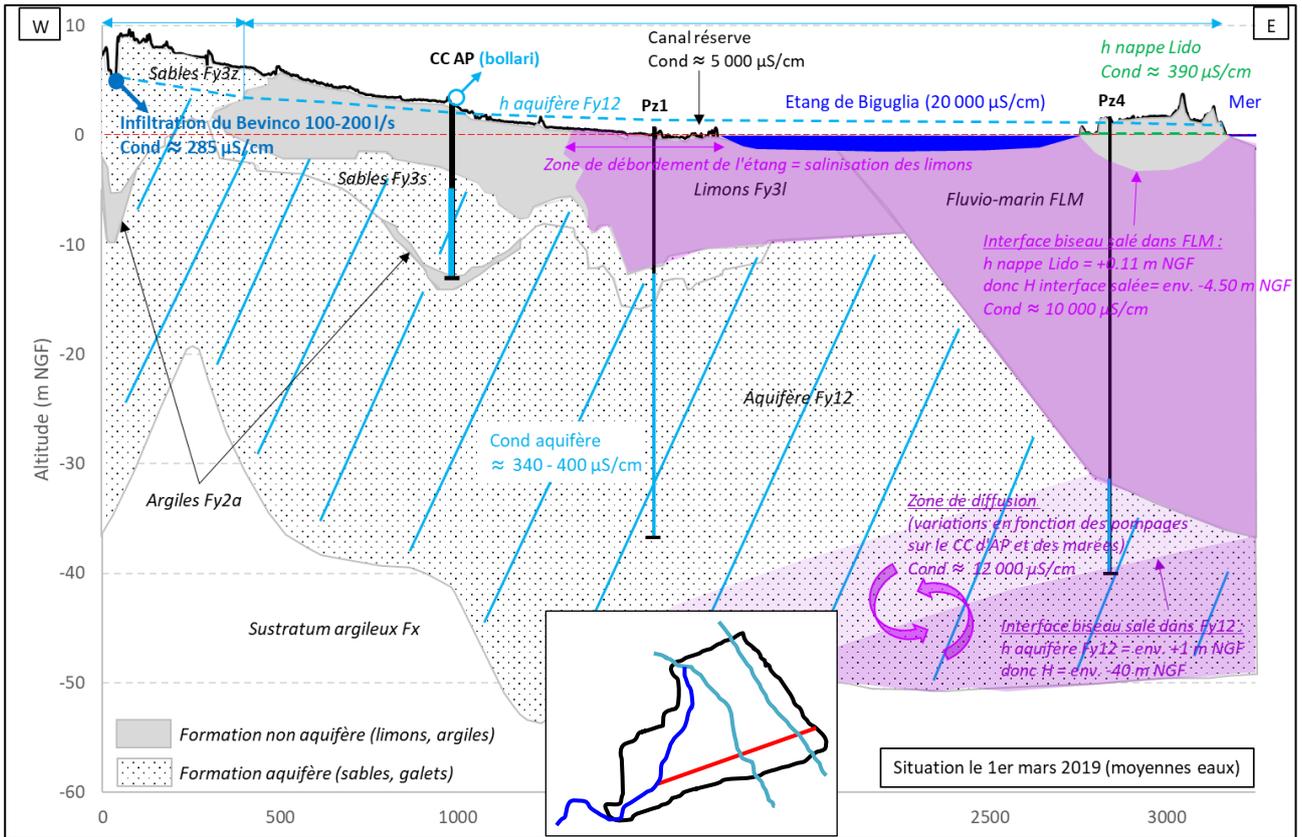


Illustration 4 - Coupe hydrogéologique interprétative est-ouest de l'aquifère du Bevinco en période de moyennes eaux (extrait de Genevier et al., 2021).

2. Construction du modèle hydrodynamique

2.1. LE CODE DE CALCUL MARTHE

Le logiciel MARTHE est développé au BRGM depuis plus de 30 ans. Une documentation détaillée est proposée sur le site internet du BRGM : <http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/marthe-logiciel-modelisation-ecoulements>.

Le code de calcul MARTHE (Modélisation d'Aquifères par maillage Rectangulaire en régime Transitoire pour le calcul Hydrodynamique des Écoulements) permet le calcul des écoulements de fluides et de transfert de masse et d'énergie en milieux poreux tridimensionnels avec une approche en volumes finis (Différences Finies Intégrées) en établissant l'équation d'équilibre des débits entre la maille de calcul et les six mailles voisines (Nord, Sud, Est et Ouest appartenant à la même couche, puis Haut et Bas des couches sus- et sous-jacentes dans le cas d'un modèle multicouche).

Dans chaque maille, l'équation suivante est respectée :

$$\sum_{i=1}^6 T_i \cdot (H_i - H_t) + Q + Rech.Surf = S.Surf \cdot \left(\frac{H_t - H_{(t-dt)}}{dt} \right)$$

Avec T_i le coefficient d'échange global (« transmissivité ») entre la maille de calcul et une maille voisine i , H_i la charge d'une maille voisine à la date t , H_t la charge de la maille calculée en son centre en fin de pas de temps et H_{t-dt} pour le calcul en début de pas de temps, Q le débit prélevé ou injecté dans la maille, $Rech$ le flux de recharge, $Surf$ la surface horizontale de la maille, et S le coefficient d'emmagasinement et dt la durée du pas de temps.

On obtient ainsi un système d'équations linéaires (si on considère que les coefficients d'échanges sont connus) conduisant à une matrice creuse. La résolution se fait de manière itérative. Plusieurs algorithmes de résolution par gradients conjugués sont proposés pour résoudre ce système d'équations : gradients conjugués avec pré-conditionnement de Cholesky, méthode Eisenstat. Cette schématisation en volumes finis fait intervenir des mailles organisées en couches empilées, chaque couche étant formée de mailles organisées en lignes et colonnes. Les schémas peuvent être simples ou complexes (zone non saturée, écoulement multiphasique, prise en compte de la densité du fluide, prise en compte de la végétation, interaction avec des cours d'eau, transferts d'énergie, etc.).

La convergence des calculs itératifs est contrôlée par plusieurs critères, principalement les écarts de charge moyens et maximaux entre deux itérations successives et les débits résiduels d'erreur (global sur l'ensemble du modèle et ponctuel dans chacune des mailles). En pratique, l'état de convergence d'un modèle est principalement évalué par des indicateurs portant sur le bilan hydraulique des différentes couches, et plus particulièrement sur le déséquilibre de bilan dans chaque maille, chaque couche, et pour l'ensemble du modèle.

En régime transitoire, la modélisation fait intervenir deux coefficients d'emmagasinement : le coefficient d'emmagasinement en nappe libre (équivalent à la porosité efficace) lorsque la maille n'est pas entièrement saturée en eau, et le coefficient d'emmagasinement captif lorsque la maille est saturée en eau.

La nappe peut s'assécher localement et se re-saturer ultérieurement. Elle peut également déborder.

Le modèle permet de prendre en compte les échanges entre un réseau hydrographique (rivières, lacs, étangs, fossés drainant) et les nappes sous-jacentes.

Enfin, l'interface graphique Win-MARTHE est utilisée en pré- et post-processeur pour la préparation et la mise en forme des données, ainsi que pour la visualisation des données et des résultats.

2.2. STRUCTURE ET EMPRISE DU MODÈLE

2.2.1. Extension

L'extension du modèle est contrainte par la géologie : les limites correspondent au maximum à celles de l'aquifère principal, c'est-à-dire les limites d'affleurement de la terrasse Fy2 par rapport aux formations plus anciennes réputées non aquifères. La superficie du domaine modélisé est de 6.9 km².

Sous l'étang de Biguglia, les limites physiques (latérales) de l'aquifère ne sont pas connues, elles sont donc ici plus arbitraires (Cf. Illustration 5).

Enfin, le trait de côte a été retenu comme limite aval, même si le forage Pz4 a démontré que l'aquifère se poursuivait sous l'étang et au-delà en mer. Sans plus d'information en mer, il n'y a cependant pas d'intérêt à étendre le modèle.

Dans le cas de limites non physiques, l'affectation de conditions hydrauliques (§ 2.3) permettra de représenter au mieux les échanges avec le milieu extérieur au modèle.

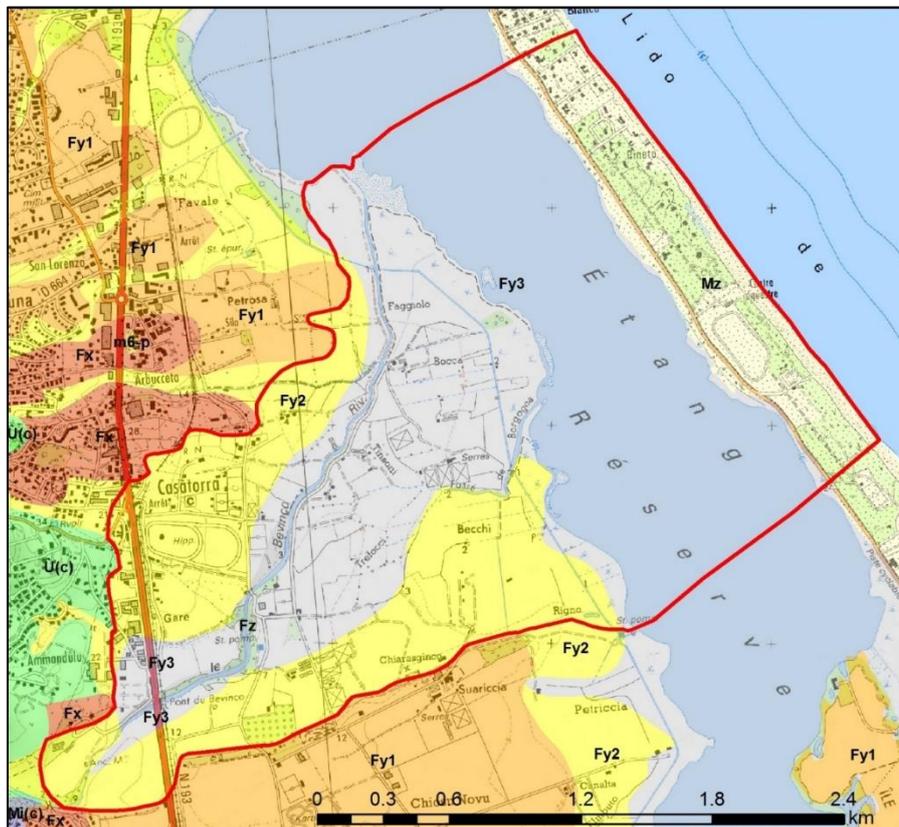


Illustration 5 - Extension du modèle sur fond de carte géologique harmonisée au 1/50 000 avec les différentes terrasses alluviales visibles à l'affleurement (extrait de Genevier et al., 2021).

2.2.2. Maillage

Le maillage est uniforme sur l'ensemble du domaine modélisé, il est constitué de **mailles carrés de 40 m de côté** (Illustration 6).

D'une manière générale, les dimensions affectées aux mailles d'un modèle sont le fruit d'un compromis entre (Barthélémy *et al.*, 2016) :

- la précision de calcul recherchée ;
- le pas et la variabilité spatiale des données de terrain disponibles ;
- la taille et la complexité géométrique / hydrogéologique des aménagements à simuler ;
- le respect des critères numériques assurant la représentativité des calculs ;
- un nombre de mailles compatibles avec une durée de calcul « raisonnable » sur un micro-ordinateur courant.

Dans le cas du modèle de la nappe du Bevinco, un maillage de 40 m permet de bien différencier les forages d'exploitation entre eux (pas plus d'un forage par maille et aucun pompage en nappe affecté à une maille rivière), de caractériser de façon suffisamment précise les échanges nappe-rivière tout en respectant un temps de calcul acceptable.

À titre indicatif, les temps de calcul, pour une simulation sur la période 2009-2019 au pas de temps journalier, sont de l'ordre de 22 minutes pour le calcul hydrodynamique seul et de l'ordre de 40 minutes avec un calcul de concentrations.

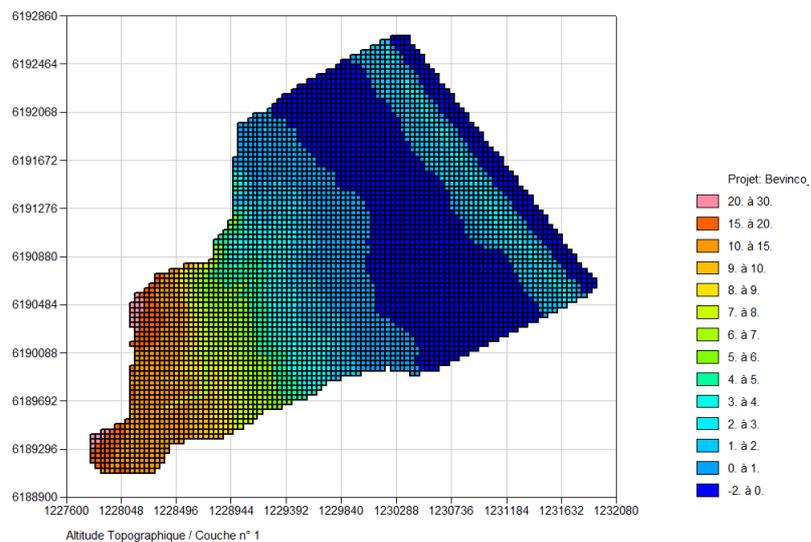


Illustration 6 - Maillage du modèle du Bevinco sur fond d'altitude topographique.

Le modèle est constitué de 5 couches (Cf. § 2.2.3), avec pour chacune le nombre de mailles suivant (Illustration 7) :

Couche	Nombre de mailles
1	675
2	3 193
3	849
4	703
5	4 316
Total	9 736

Illustration 7 - Nombre de mailles par couche modélisée.

2.2.3. Géométrie

La topographie du modèle hydrogéologique a été importée du modèle géologique. Pour rappel, un modèle numérique de terrain couvrant l'ensemble de la zone d'étude a été constitué en combinant un MNT LiDAR (maille 1 m), à terre, acquis par l'IGN (2013), le MNT IGN de maille 25 m en dehors de l'emprise du MNT LiDAR et les levés bathymétriques au droit de l'étang de Biguglia (Orsoni et Tomasino, 2015).

Au droit de l'étang, la topographie du modèle correspond au fond de l'étang.

Après différents tests, le modèle géologique importé initialement a finalement été adapté pour répondre aux besoins du modèle hydrogéologique. Le tableau de l'illustration 8 dresse un récapitulatif des modifications apportées.

La couche associée à la formation Fy3z présente une faible épaisseur sur ses pourtours, la plupart des mailles se retrouvaient donc dénoyées ; ce qui génère des problèmes numériques. Cette couche n'étant pas suivie en piézométrie ni soumise à des prélèvements, il a été décidé de la fusionner avec les couches sous-jacentes : son épaisseur est ajoutée à celle de la couche directement sous-jacente (Fy3l, Fy2a ou Fy12 selon les endroits).

Modèle géologique		Modèle hydrogéologique		
		N° couche	Formations	Modifications
FLM	Formation fluviomarine	1	FLM	Limitée au lido (cordon dunaire)
Fy3z	Ensemble perméable (Fz +sommet Fy3 + colluvions)			Couche supprimée => son épaisseur s'ajoute à la 1 ^{ère} couche sous-jacente (Fy3l, Fy2a ou Fy12)
Fy3l	Limons très peu perméables	2	Fy3l (+ Fy3z) + FLM	Fusionnée avec la couche FLM uniquement en amont du lido) => continuité hydraulique
Fy3s	Sables perméables	3	Fy3s	
Fy2a	Niveau d'argile au sommet de Fy12	4	Fy2a (+ Fy3z)	
Fy12	Fy1 + Fy2 : aquifère principal	5	Fy12 (+ Fy3z)	

Illustration 8 - Tableau récapitulatif des couches du modèle hydrogéologique.

Les vues en coupe proposées par l'illustration 9, selon une orientation ouest-est, permettent de mieux visualiser les modifications apportées, en particulier pour les couches FLM et Fy3l. Cette fusion est principalement justifiée pour éviter de considérer une limite fixée arbitrairement entre FLM et Fy3l pour les besoins du modèle géologique, en l'absence d'information sous l'étang (Illustration 9).

Des cartes d'épaisseur par couche ainsi que quelques valeurs caractéristiques sont respectivement présentées par l'illustration 10 et l'illustration 11.

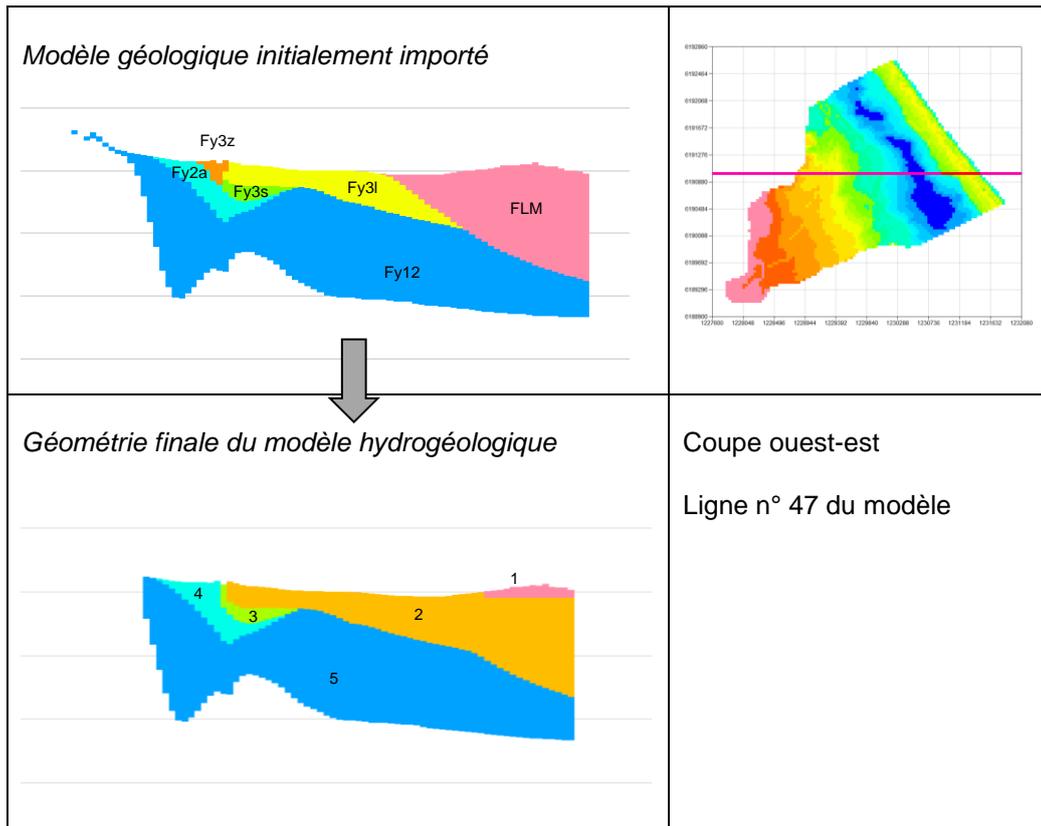


Illustration 9 - Vues en coupe (orientation O-E) : du modèle géologique initial (coupe du haut) vers le modèle adapté pour les besoins du modèle hydrogéologique (coupe du bas).

Modélisation de la nappe alluviale du Bevinco

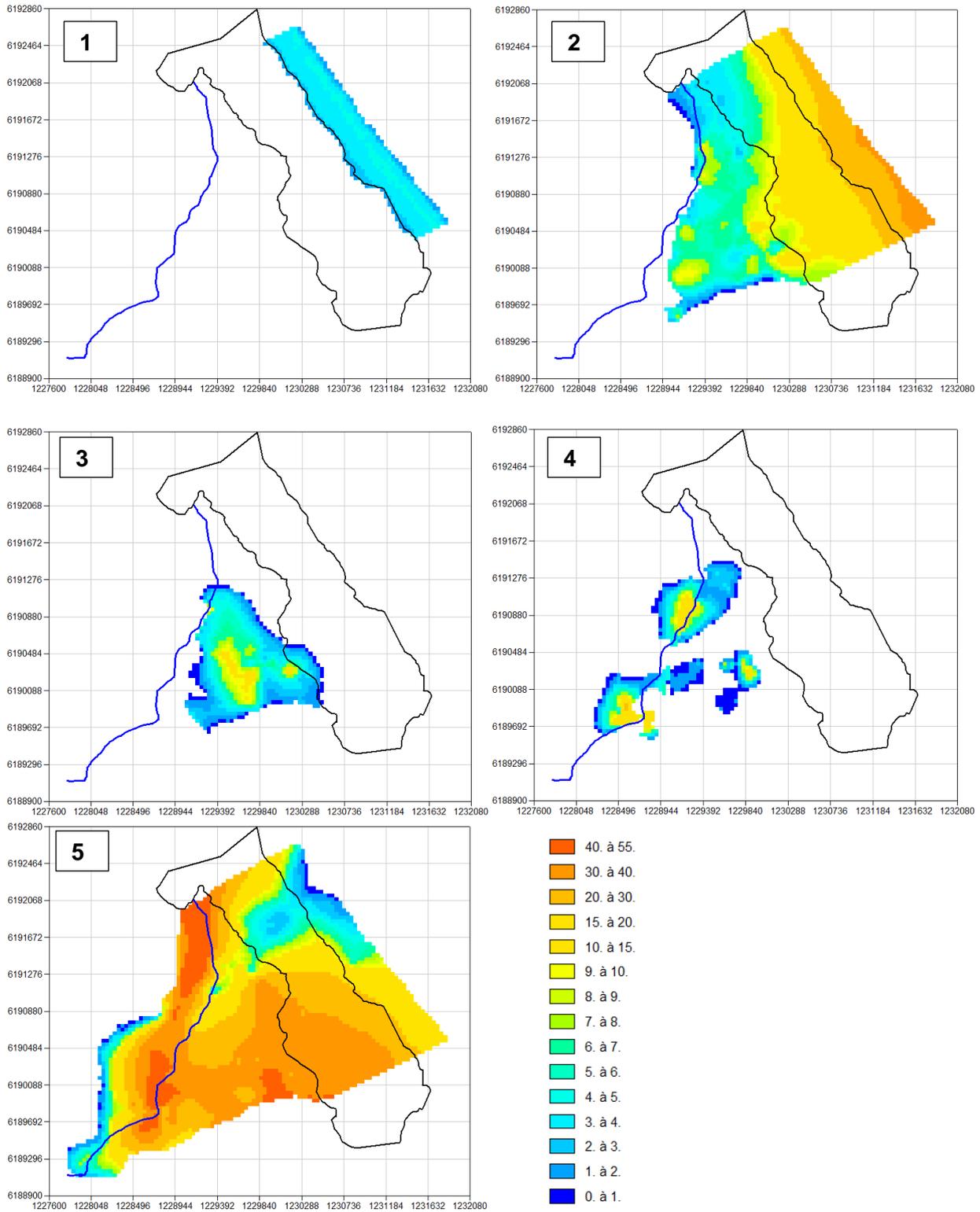


Illustration 10 - Epaisseurs des 5 couches du modèle hydrogéologique en mètre (contour noir = étang de Biguglia, en bleu le Bevinco).

Epaisseurs (m)	Couches				
	1	2	3	4	5
Min.	1.4	0.4	0.5	0.2	0.2
Max.	4.9	34.0	12.8	21.3	53.6
Moyenne	3.3	11.9	4.3	4.2	23.3

Illustration 11 - Epaisseurs minimales, maximales et moyennes par couche (en mètres).

2.3. CONDITIONS HYDRAULIQUES AUX LIMITES DU MODÈLE

Il est impératif de fournir au logiciel de modélisation les conditions hydrauliques aux limites du modèle, de façon à ce que celui-ci puisse correctement intégrer l'influence du « milieu extérieur » (règles d'échange entre le domaine modélisé et le milieu extérieur).

2.3.1. Types de conditions aux limites

Après plusieurs tests réalisés lors de l'opération de calage du modèle (chapitre 3), les conditions aux limites introduites dans le modèle sont de trois types :

- **à charge imposée (niveau piézométrique imposé)** :
 - pour la couche 1 (FLM, sables marins), le long du trait de côte et de l'étang avec une charge hydraulique imposée à l'altitude topographique des mailles concernées (Cf. localisation, Illustration 12),
 - pour la couche 5 (Fy12, aquifère principal), au droit des bordures nord-est et sud-est, contraintes respectivement par le niveau de la mer et par le niveau de la mer + 0.9 m (Cf. localisation, Illustration 12). La surcharge de 0.9 m a été ajustée sur la base du suivi piézométrique implanté sur Pz4, 300 m en amont du trait de côte. Le niveau de la mer variant au gré des marées, les charges imposées évoluent à chaque pas de temps (Cf. paragraphe suivant ;
- **à flux nul (aucun échange d'eau avec l'extérieur du modèle)** : sur toutes les autres limites latérales qui correspondent à des lignes de courant (par définition, aucun flux ne traverse une ligne de courant) et des limites d'affleurement. Les lignes de courant correspondent aux trajectoires de l'eau et sont donc perpendiculaires aux courbes isopièzes ;
- **à débordement** : sur toute l'emprise du modèle. Si la charge calculée dans une maille est supérieure à la cote de débordement assignée à cette maille (topographie dans notre cas), il y a débordement et la charge effective est ramenée à la cote du sol, l'excès de charge étant converti en débit de débordement.

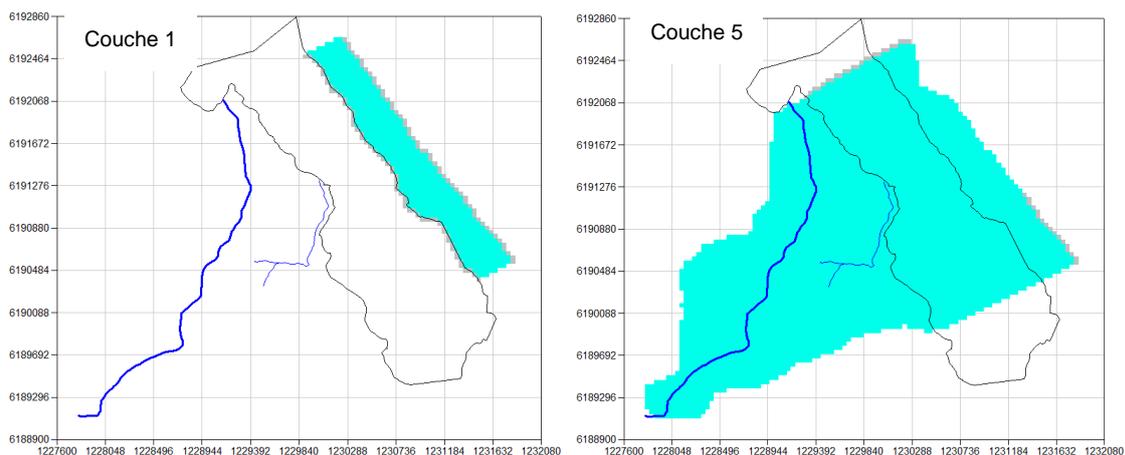


Illustration 12 - Limites concernées par une condition de type charges imposées (mailles représentées en gris).

2.3.2. Prise en compte de la marée

Après analyse des fluctuations piézométriques sur les ouvrages PZ4 et PZ5, il a été décidé d'intégrer dans le modèle l'influence de la marée sur la piézométrie. Les charges imposées sur la bordure littorale varient donc au cours du temps.

Les données du marégraphe de Solenzara, récupérées sur le site du SHOM¹, ont été utilisées : le graphique de l'illustration 13 représente les variations du niveau de la mer aux pas de temps horaire et journalier.

Il faut souligner l'absence d'informations pour les années 2009 et 2010, ainsi que plusieurs courtes périodes de lacunes de données en 2011, 2014, 2015, 2016 et 2019. En l'absence de données sur le marégraphe de Solenzara, les données manquantes ont été reconstituées à partir des moyennes journalières calculées sur la période 2011-2019 (Cf. courbe en pointillé noir, Illustration 13).

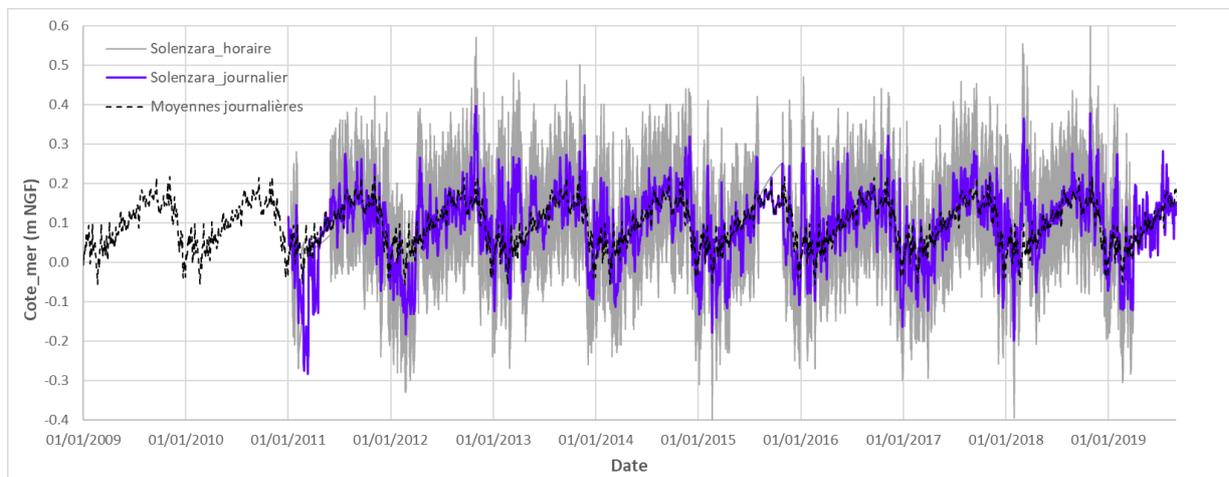


Illustration 13 - Variations du niveau de la mer au marégraphe de Solenzara sur la période 2009-2019 (<http://refmar.shom.fr/fr/solenzara>).

¹ <http://refmar.shom.fr/fr/solenzara>

2.4. REPRÉSENTATION DES EAUX SUPERFICIELLES

2.4.1. Modélisation du Bevinco

Le Bevinco a été explicitement modélisé, en tant qu'entité hydraulique bien individualisée. Il s'agit du degré de conceptualisation le plus avancé en termes de caractérisation des échanges nappe-rivière.

Le réseau hydrographique, qui se superpose alors au maillage de surface, est composé d'un système arborescent de tronçons de rivières organisés en affluents. Un tronçon constitue en fait une « maille rivière » en relation avec une maille du modèle d'écoulement souterrain. Dans notre cas, un seul affluent est modélisé représentant ainsi le Bevinco (numérotation croissante des tronçons de l'amont vers l'aval, Illustration 14).

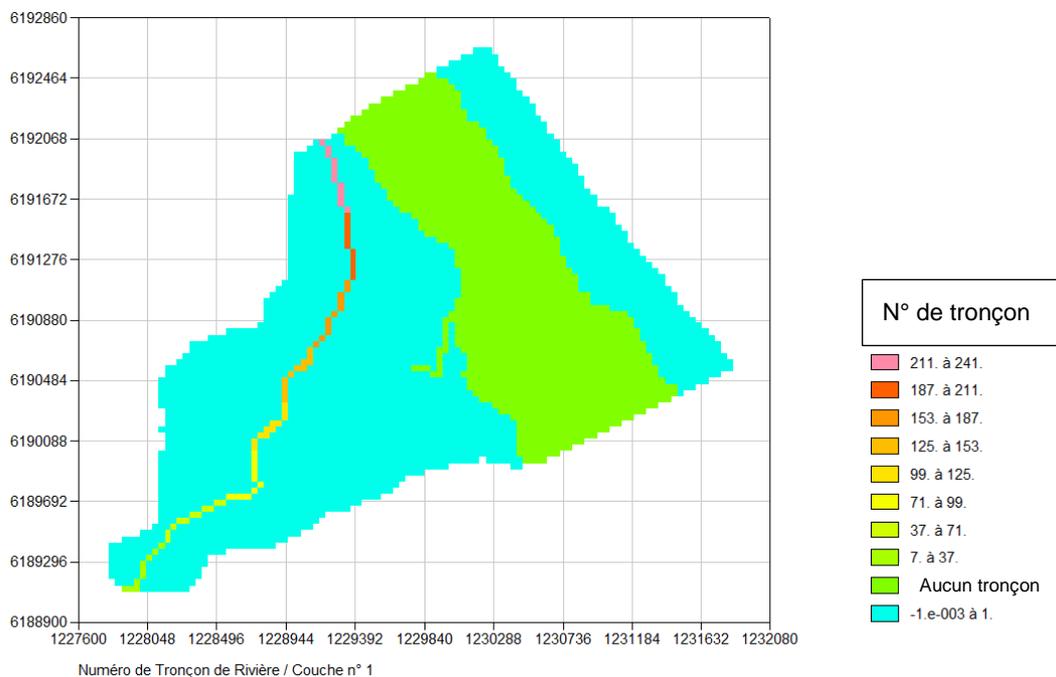


Illustration 14 - Tronçons de rivière introduits dans le modèle (Bevinco + étang).

Un tronçon est décrit par sa géométrie (longueur, largeur, et altitude du lit), par ses propriétés physiques (épaisseur et perméabilité du lit et des berges), par ses termes sources (pompages ou injections) et par son état (hauteur d'eau dans la rivière).

Selon la position relative de la ligne d'eau dans la rivière et de la surface libre dans l'aquifère, un débit peut être échangé depuis un tronçon de rivière vers l'aquifère, ou réciproquement depuis l'aquifère vers la rivière (Illustration 15). Le débit d'échange est par ailleurs contrôlé par le lit et les berges du cours d'eau en fonction de leur surface, épaisseur et perméabilité.

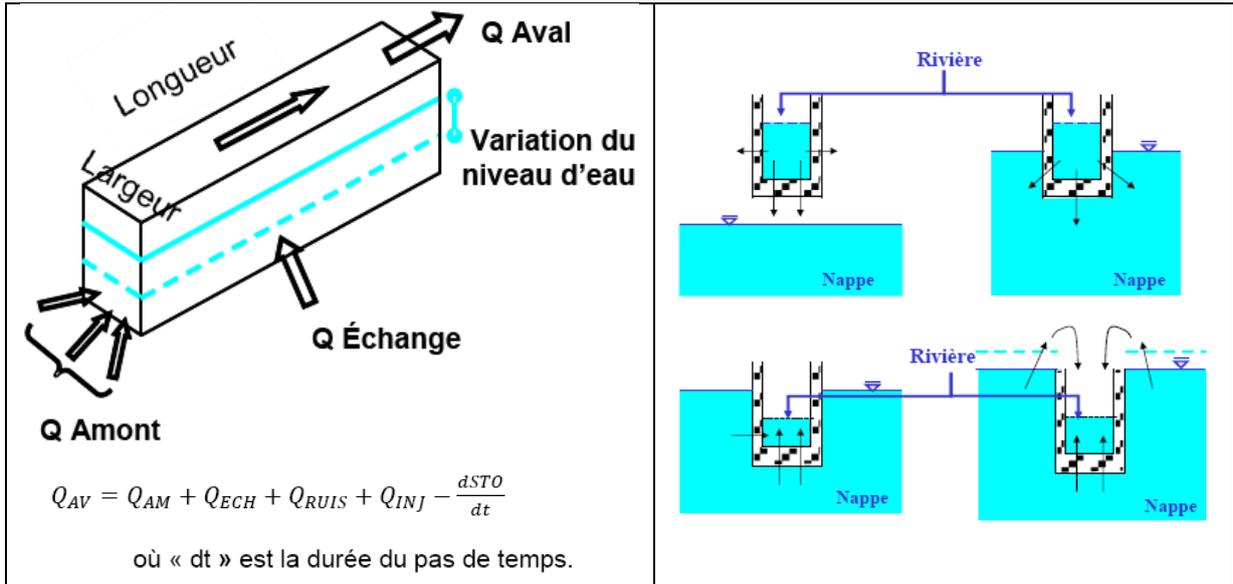


Illustration 15 - Bilan des débits dans un tronçon de rivière et différentes configurations d'échange modélisées par MARTHE (Thiéry, 2015).

Les caractéristiques géométriques du cours d'eau (ligne d'eau, fond, largeur) ont été obtenues à partir de relevés topographiques réalisés par le BRGM en octobre 2016 et juillet 2018, à l'aide d'un GPS différentiel. Au total, nous avons pu nous appuyer sur 40 points de mesure (Genevier *et al.*, 2021). L'illustration 16 présente le profil en long (altitude initiale du fil d'eau à l'étiage et altitude du fond) ainsi que les largeurs du Bevinco tels que modélisés.

Les longueurs de tronçon ont été calculées à l'aide d'une jointure spatiale sous QGIS entre le linéaire du cours d'eau et le maillage du modèle.

Une attention particulière a été portée aux aménagements perturbant la ligne d'eau du Bevinco, à savoir le passage à gué et le seuil de Casatorra (Illustration 16).

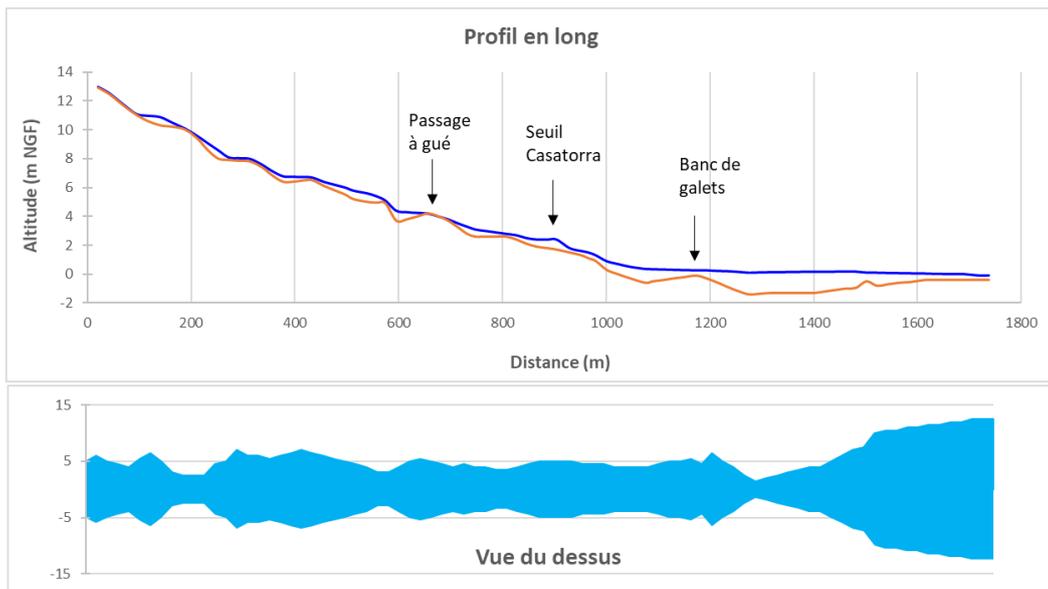


Illustration 16 - Profils en long et largeurs (m) du Bevinco considérés dans le modèle (graphe du haut : cote d'eau en bleu, cote du fond en marron).

En première approche, la perméabilité de colmatage a été affectée selon la nature lithologique du lit de la rivière décrite lors des reconnaissances de terrain (sable, graviers, cailloux, vase ... ; Geneviev *et al.*, 2021) puis ajustée lors du calage du modèle (Cf. chapitre 3).

Dans le cas de la nappe alluviale du Bevinco, sa piézométrie étant influencée significativement par les variations du niveau d'eau dans la rivière, une loi hauteur-débit (Manning-Strickler) a été introduite. De cette façon, à chaque pas de temps de calcul, le niveau d'eau évolue en fonction du débit calculé dans le tronçon de la rivière. Cette option a permis d'améliorer significativement la représentation des niveaux piézométriques, en particulier dans la partie amont.

Pour appliquer une loi de Manning-Strickler, il faut renseigner deux paramètres supplémentaires : la rugosité du lit de la rivière et la pente du lit.

Enfin, le modèle ne couvrant pas la totalité du bassin versant du Bevinco, il est nécessaire d'introduire une chronique de débit amont dans le premier tronçon de rivière, i.e. à l'entrée du modèle. Pour ce faire une chronique de débit a été reconstituée à partir du suivi de la DREAL en amont de la prise d'eau du Lancone (station hydrologique Y7315010) : les prélèvements effectués sur la prise d'eau ont été soustraits et les apports par les pluies efficaces entre la station et le point d'entrée du modèle ont été ajoutées (Cf. carte de situation, Illustration 17). Le fonctionnement de la prise d'eau du Lancone est détaillé dans le rapport de phase 1 (Geneviev *et al.*, 2021).

La chronique de débit ainsi reconstituée à l'entrée du modèle est présentée par l'illustration 18 (extrait sur la période 2018/2019).

Cette donnée de forçage étant particulièrement sensible, il aurait été préférable de pouvoir s'appuyer sur des mesures de terrain, mais aucune station hydrométrique n'était en service sur l'amont de la plaine alluviale au moment de l'étude.

Il faut cependant noter qu'un suivi des débits du Bevinco a été mis en place par la Réserve Naturelle de Biguglia au niveau du passage à gué à partir de mai 2019 tandis qu'une station hydrométrique a été installée par la DREAL en juin 2020 (Y7310004) au niveau de pont de la RT11, soit à l'entrée de la plaine alluviale. Cette dernière sera précieuse pour une mise à jour éventuelle du modèle. Le suivi de la réserve a pu être valorisé lors du calage du modèle, mais sur une très courte période (juin à août 2019).

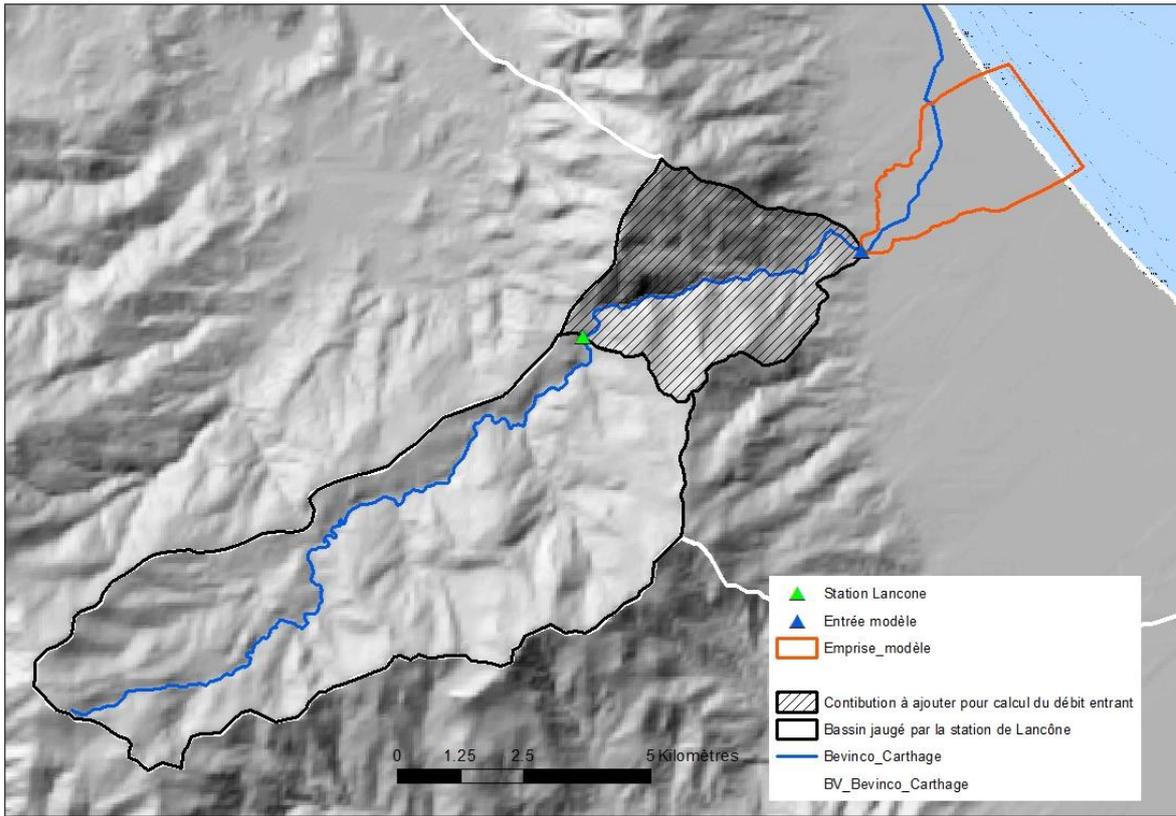


Illustration 17 - Sous-bassins versants amont considérés pour le calcul du débit du Bevinco à l'entrée du modèle.

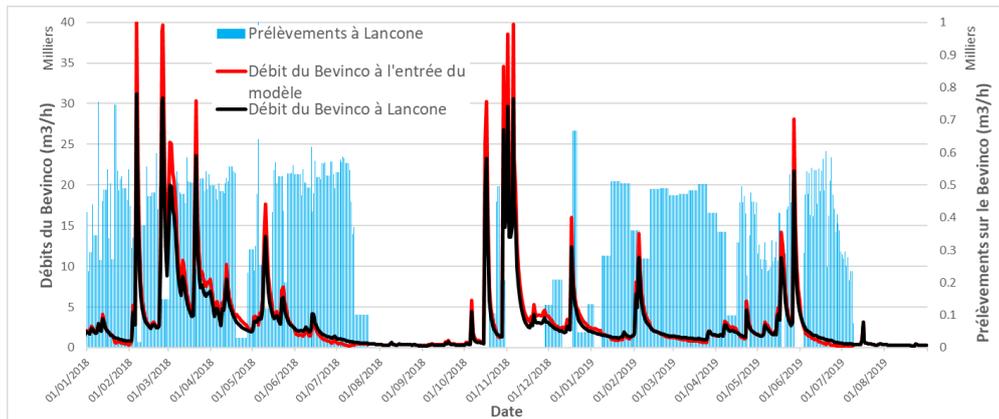


Illustration 18 - Débits du Bevinco considérés à l'entrée du modèle hydrogéologique (période 2018/2019).

2.4.2. Représentation de l'étang de Biguglia

MARTHE permet de simuler simplement les étangs avec la même loi d'échange nappe-rivière que pour le réseau hydrographique (Cf. § 2.4.1). C'est le choix qui a été fait pour l'étang de Biguglia ainsi que pour le fossé de Borgogna, considéré comme un appendice de l'étang.

Un numéro d'affluent négatif est alors assigné à l'étang (Illustration 19). Il n'y a pas de notion d'amont et d'aval au sein de l'étang ; il n'est donc pas nécessaire de renseigner des numéros de tronçon.

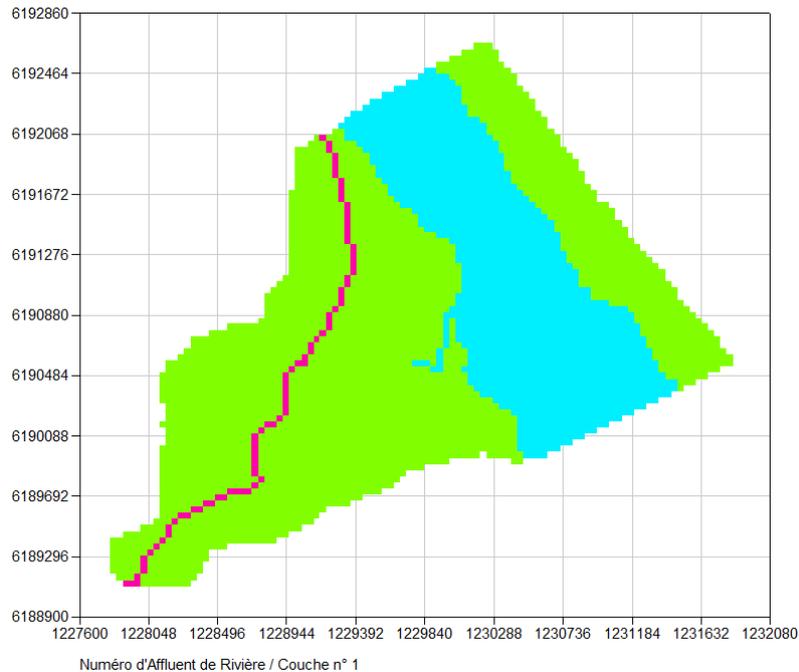


Illustration 19 - Mailles rivière (roses) et étang (bleues) du modèle du Bevinco.

L'altitude de l'eau dans l'étang peut varier au cours du temps, mais il n'y a pas de loi hauteur-débit. Sur la base des suivis ponctuels transmis par la Réserve Naturelle, les niveaux d'eau de l'étang ont été fixés au niveau de la mer moins 20 cm : les niveaux fluctuent donc à chaque pas de temps journalier en fonction de la marée.

Pour le reste des paramètres, les valeurs suivantes ont été retenues :

- largeur et longueur = taille des mailles = 40 m ;
- altitude du fond de l'étang : bathymétrie (Orsoni et Tomasino, 2015) ;
- épaisseur de colmatage : valeur uniforme de 1 mètre, ajustée en cours de calage ;
- perméabilité de colmatage : valeur uniforme de 1.10^{-8} m/s, ajustée en cours de calage.

2.4.3. Représentation des fossés de drainage

La zone d'étude est traversée par un canal principal de drainage, en bordure de l'étang, ainsi que de nombreux fossés. Le fonctionnement et l'origine de ce dispositif de drainage sont décrits dans le rapport de phase 1 (Genevier *et al.*, 2021).

Dans un premier temps, il a été décidé de ne modéliser que le fossé de drainage de la Réserve naturelle. Pour ce faire, un drain dit « classique » dans MARTHE (Thiéry, 2015) a été introduit au niveau de la couche des limons (couche 2). À la différence de l'option « drain-conduit », celui-ci peut uniquement drainer la nappe contenue dans les limons sans jamais l'alimenter.

Le débit drainé est proportionnel à la différence entre la charge hydraulique locale dans la nappe et l'altitude du fond du drain. Si la charge hydraulique est inférieure à l'altitude du drain, alors le débit drainé est nul. Le débit drainé est contrôlé par un coefficient de perméabilité d'échange nappe-drain. Une valeur unique de 0.01 m/s a été retenue. À noter que ce paramètre est apparu peu sensible en cours de calage. La profondeur du fossé a été considérée uniforme sur tout le linéaire, et égale à 2 mètres : l'altitude du fond du drain est donc l'altitude topographique (LIDAR) moins 2 mètres.

Pour le cumul du débit drainé, la propagation d'un tronçon vers le tronçon aval est instantanée et dans un sens imposé de l'amont vers l'aval.

Lors du processus de calage, le réseau de drains a été fortement densifié afin de tenir compte des nombreux fossés présents sur la plaine et d'évacuer ainsi une partie des flux de débordement vers le fossé principal. Au total, 43 fossés, interconnectés ou non, ont été modélisés (Illustration 20). Une profondeur de 1 mètre a été fixée pour tous les drains secondaires.

Les pompages ne sont pas directement simulés, mais le cumul des débits drainés à l'aval du fossé principal pourra être comparé aux volumes pompés à la station de Petriccia, située en limite du modèle (Illustration 20).

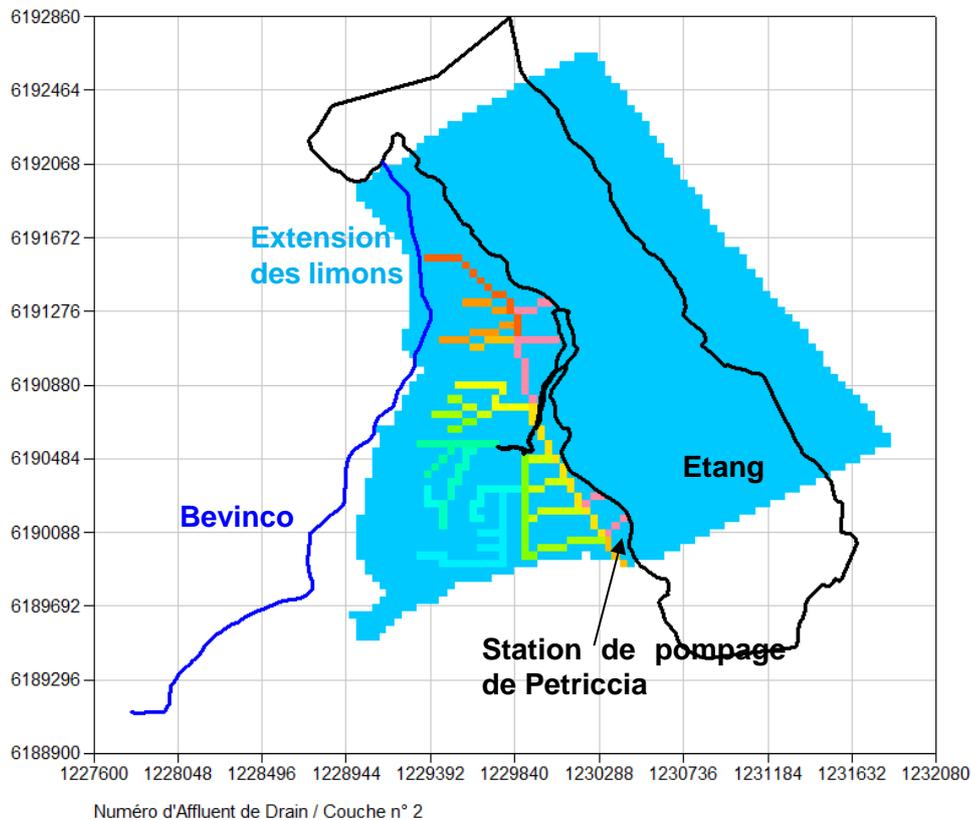


Illustration 20 - Réseau de drains modélisé (couleurs fonction du n° de drain).

2.5. CALCUL DES FLUX D'INFILTRATION ET DE RUISSELLEMENT

2.5.1. Principe de calcul du bilan hydroclimatique avec le code de calcul MARTHE

Avec MARTHE, les calculs du bilan hydroclimatique (Pluie, ETP, fonte de neige, ruissellement vers les cours d'eau, infiltration) peuvent être totalement couplés avec les écoulements souterrains. Ils suivent la même logique que celle qui est mise en œuvre dans GARDENIA² (Thiéry, 2014), avec deux réservoirs : « sol » et « zone non saturée ». En revanche, il n'y a pas de réservoir « zone saturée » puisque les écoulements souterrains sont directement simulés dans les différentes couches du modèle.

Une telle approche nécessite d'intégrer au modèle :

- **des zones météorologiques** associées à des chroniques de pluie et d'ETP ;
- **des zones de sol** pour lesquelles sont définies les paramètres hydro-climatiques utilisés dans GARDENIA : la Réserve Disponible pour l'Evapotranspiration (RDE) pour les premiers mètres du sol (autrement appelé réserve utile) et deux paramètres qui permettent la répartition des pluies efficaces entre écoulement rapide (ruissellement) et écoulement lent (infiltration ou percolation) : la hauteur d'équi-répartition entre écoulement rapide et percolation (NRUIP) et le temps de demi-percolation du réservoir représentant la zone non saturée (TPERC).

Le module GARDÉNIA intégré à Marthe utilise le principe des modèles réservoirs (Illustration 21) :

- un premier réservoir U) modélise la partie supérieure du sol, sa hauteur maximale est fixée par la RDE. Il se vidange ou se remplit suivant les précipitations et l'ETP. L'alimentation du réservoir H sous-jacent est possible lorsque la capacité de rétention en eau du sol est atteinte ;
- un second réservoir H modélise la zone non saturée au-dessus du niveau de la nappe. Il est alimenté par le réservoir U et se vidange par percolation dans le réservoir souterrain (aquifère) suivant une loi exponentielle de constante de temps TPERC (ALIM aquifère = $H \cdot dt / TPERC$) et par ruissellement suivant le paramètre NRUIP. Ce dernier permet de rendre compte du déphasage entre la pluie et la recharge effective de la nappe, associé à la traversée de la zone non saturée.

Les trois paramètres (RDE, TPERC et NRUIP) sont ajustés lors du calage du modèle maillé en régime transitoire. Un premier jeu de données a cependant été introduit à partir de modélisations globales pluie-niveau réalisées de façon préliminaire avec le code de calcul GARDÉNIA.

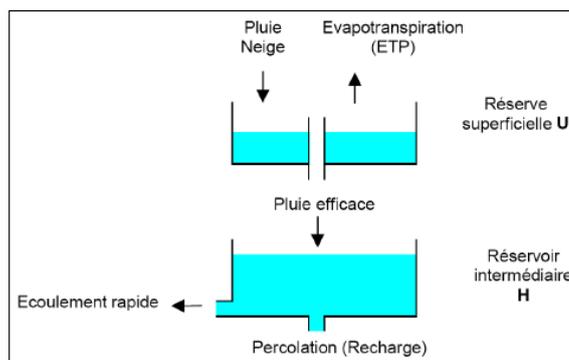


Illustration 21 - Schéma de fonctionnement du calcul de la recharge et du ruissellement dans le module GARDENIA intégré à MARTHE (Thiéry, 2014).

² Le logiciel GARDÉNIA (Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères, développé par le BRGM) est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

2.5.2. Zones météorologique et zones de sol

La pluie et l'ETP journalières mesurées à la station météorologique de Poretta (n° 20148001) ont été acquises auprès de Météo France. Compte tenu de la faible superficie du domaine modélisé, seule cette station est utilisée : le modèle est ainsi constitué d'une seule zone météorologique.

Trois zones de sol, délimitées sur la base des affleurements géologiques, ont été identifiées : une première zone amont correspondant aux affleurements des deux principales formations aquifères (Fz et Fy12), une deuxième correspondant aux affleurements de limons peu perméables et une troisième pour les sables dunaires (Illustration 22).

En l'absence de zone de sol, aucun calcul hydro-climatique n'est effectué au droit de l'étang de Biguglia et de la mer. De la même façon, le calcul n'est pas réalisé sur les mailles situées en bordure amont du modèle (cf. zone bleu en amont, Illustration 22). Ces dernières étant souvent dénoyées, des flux d'infiltration importants peuvent empêcher la bonne convergence des calculs. Ce secteur urbain correspondant principalement à des surfaces imperméabilisées, l'absence d'infiltration ainsi simulée reste réaliste.

Les valeurs des paramètres hydro-climatiques retenues en fin de calage sont présentées dans le chapitre relatif au calage du modèle (§ 3.3.2).

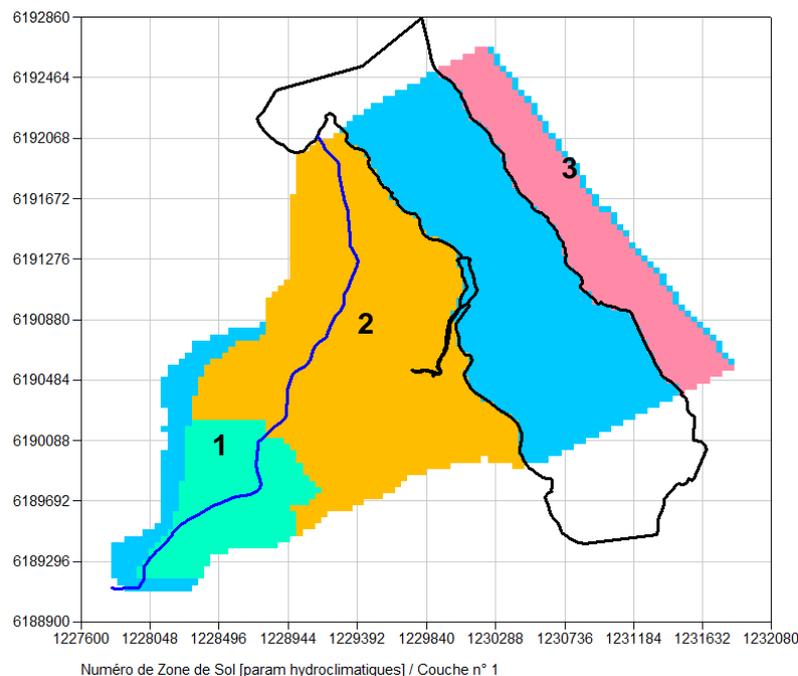


Illustration 22 - Zones de sol définies dans le modèle du Bevinco.

2.5.3. Devenir des flux de débordement et de ruissellement

Les flux de débordement et de ruissellement cheminent selon la surface topographique. En effet, MARTHE permet de générer des directions de ruissellement à partir des altitudes topographiques. Chaque maille se voit affectée d'un code (compris entre 1001 et 1008) décrivant la direction aval de ruissellement.

Les flux de débordement et de ruissellement peuvent soit être dirigés vers le Bevinco (et participer à son débit d'écoulement), soit être évacués du système quand ils sont dirigés vers l'exutoire du réseau de drains (ne participent pas aux débits simulés dans les drains).

2.6. PRÉLÈVEMENTS

Aucun pompage ni rejet n'est considéré dans le cours d'eau. Pour rappel, la prise d'eau du Lancone est située bien en amont de la plaine alluviale (Cf. Illustration 17).

Les pompages en nappe concernent les forages de production d'eau potable de la CCMG et d'Acqua Publica (Cf. localisation, Illustration 23).

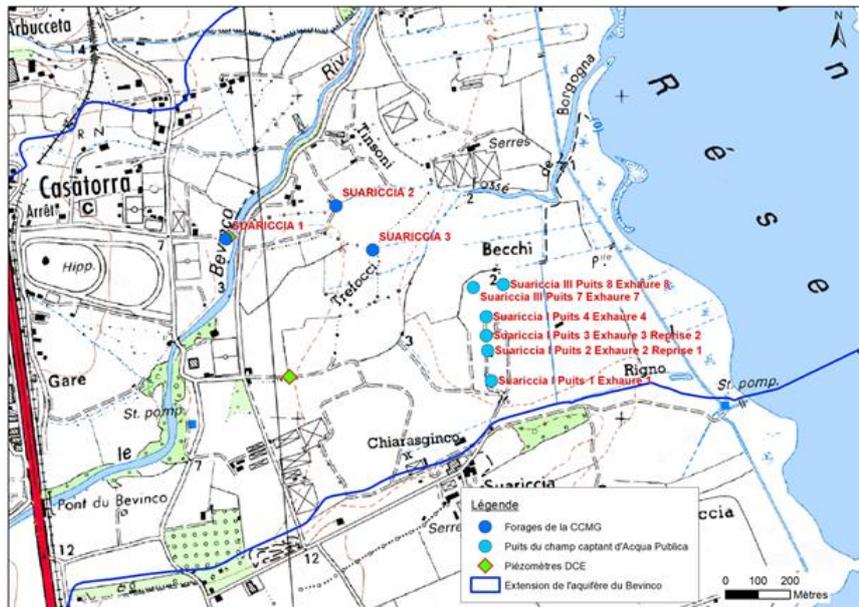


Illustration 23 - Carte de localisation des forages de production d'eau potable (extrait de Genevier et al., 2021).

2.6.1. CCMG

Trois forages sont exploités par la CCMG : Suariccia 1 (11071X0063), Suariccia 2 (11072X0058) et Suariccia 3 (11072X0001).

Pour chacun de ces 3 forages, les volumes hebdomadaires ont été fournis par la CCMG du 30/12/2011 au 04/08/2017. Les volumes hebdomadaires ont tout d'abord été convertis en volumes journaliers, de façon uniforme en l'absence de plus d'informations.

Pour les années manquantes, les volumes journaliers moyens ont été calculés sur la période 2012-2016 (cinq années complètes) afin d'être affectés aux périodes sans donnée, soit du 01/01/2009 au 29/12/2011 et du 05/08/2017 au 31/08/2019.

La chronique des débits pompés ainsi reconstituée est présentée par l'illustration 24.

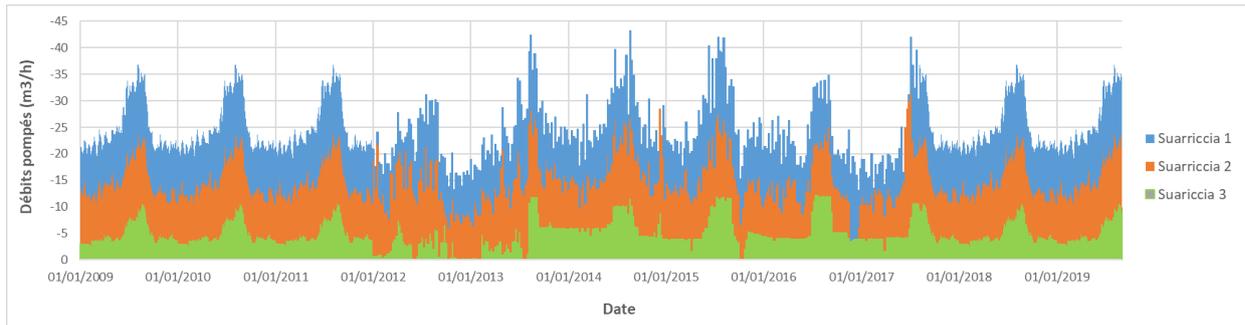


Illustration 24 - Chronique des débits pompés reconstituée pour les 3 forages exploités par la CCMG sur la période 01/01/2009-31/08/2019.

Après analyse des coupes géologiques et techniques de ces ouvrages, les prélèvements exercés sur les puits 1 et 2 ont été attribués à la couche 5 du modèle (aquifère principal, Fy12) tandis que ceux du puits 3 ont été distribués paritairement sur les couches 3 et 5 (50% du volume pour chaque couche).

Malgré plusieurs relances, les données récentes n'ont pu être obtenues. Ceci est préjudiciable pour le calage du modèle hydrodynamique.

2.6.2. Acqua Publica

Le champ captant d'Acqua Publica situé au lieu-dit Suariccia, implanté dans la partie captive de la nappe, est constitué de six puits répartis en deux unités : Suariccia I (puits 1 à 4) et Suariccia III (puits 7 et 8).

Tout d'abord, au regard des informations enregistrées et remontées par Acqua Publica, il n'a pas été possible d'estimer les débits unitaires de chaque puits. Le volume par unité a finalement été répartie de façon équivalente sur chaque puits : 25 % pour chacun des quatre puits de l'unité Suariccia I et 50 % pour chacun des deux puits de Suariccia III. Le fonctionnement du dispositif de pompage associé au champ captant est détaillé dans le rapport de phase 1 (Genevier *et al.*, 2021).

Les volumes pompés sont fournis au pas de temps hebdomadaire puis journalier à partir du 14/03/2019 pour l'unité Suariccia I et du 17/10/2018 pour Suariccia III.

La chronique des débits pompés ainsi reconstituée est présentée par l'illustration 25.

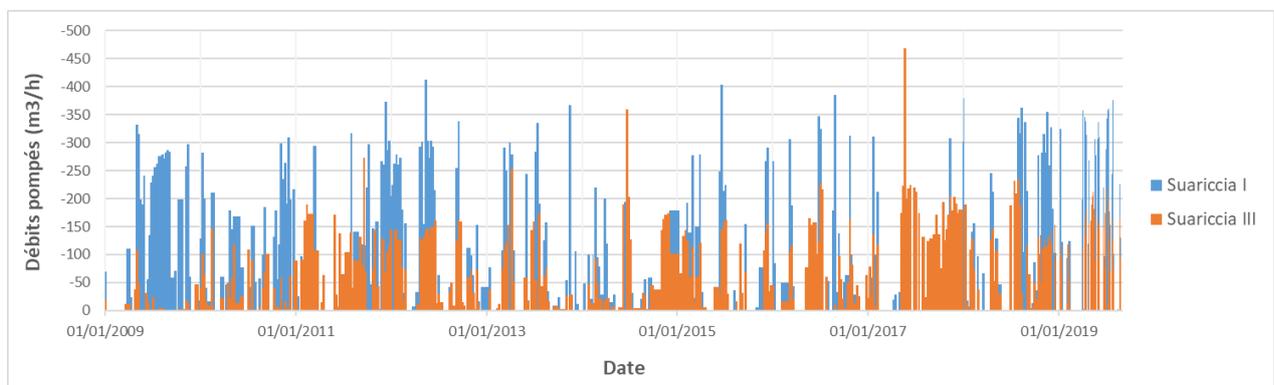


Illustration 25 - Chronique des débits pompés reconstituée pour les 2 unités Suariccia I et III d'Acqua Publica sur la période 01/01/2009-31/08/2019.

Pour la période couverte à la fois par un relevé hebdomadaire et un relevé journalier, des comparaisons ont mis en évidence des différences significatives dans la répartition temporelle des prélèvements. Ce point est illustré par le graphique suivant pour l'unité Suariccia III sur la période 10/2018-07/2019 (Illustration 26). Ces différences posent question quant à la fiabilité des prélèvements intégrés dans le modèle pour les périodes uniquement couvertes par un relevé hebdomadaire.

Au regard de ce constat, lors du calage du modèle, il a été décidé de modifier la répartition des prélèvements sur Suariccia I en cohérence avec les relevés journaliers sur Suariccia III pour deux épisodes (du 14 au 18/12/2018 et du 01 au 08/02/2019) où les niveaux de la nappe autour du champ captant n'apparaissent pas en cohérence avec les pompages.

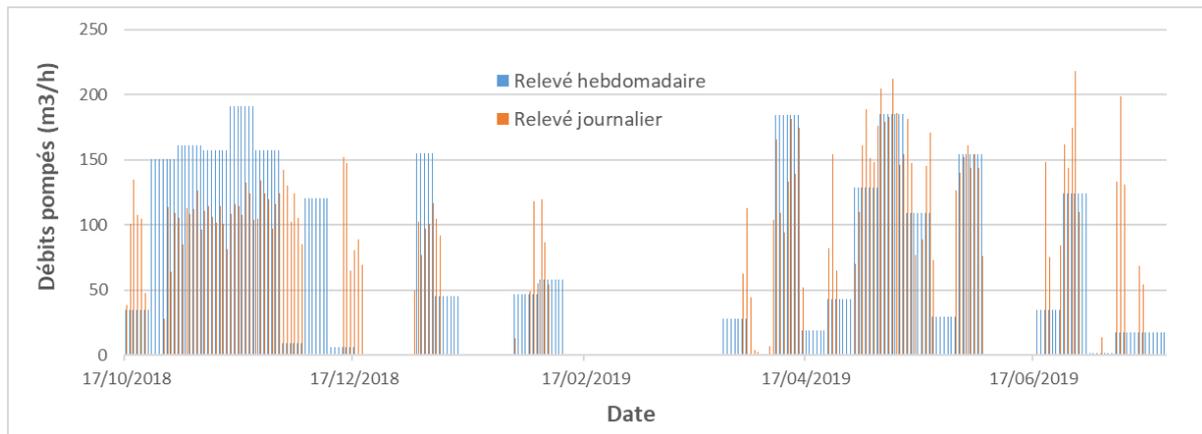


Illustration 26 - Comparaison entre le relevé hebdomadaire et le relevé journalier pour l'unité Suariccia III sur la période 10/2018-07/2019.

Enfin, après analyse des coupes géologiques et techniques de chaque ouvrage, il a été décidé pour chaque puits, d'attribuer les prélèvements aux couches 3 et 5 du modèle (répartition 50/50 à chaque fois).

2.7. PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES

2.7.1. Pompages d'essai

Des essais de nappe ont été menés sur un puits de Suariccia I en mai 1953 et juillet 1965 et sur un puits de Suariccia II (à côté de la salle des fêtes de Biguglia) en novembre 1965 (Genevier *et al.*, 2021).

Les conditions de réalisation de ces essais n'autorisent pas une évaluation fiable des paramètres hydrodynamiques ; la durée de l'essai n'a par exemple été que de 2h15 pour le puits de Suariccia I en 1965, pour lequel des transmissivités et des coefficients d'emmagasinement ont été calculés. Ceci étant dit, les résultats obtenus étaient les suivants :

- une transmissivité T comprise entre $4.3.10^{-3}$ m²/s (mai 1953) et $1.6.10^{-2}$ à $4.3.10^{-2}$ m²/s en 1965 pour Suariccia I ;
- un coefficient d'emmagasinement S évalué à $6.2.10^{-3}$ et $3.1.10^{-3}$ en 1965 sur Suariccia I (le résultat diffère d'un puits d'observation à l'autre).

2.7.2. Modélisations CATHERINE

Le code de calcul CATHERINE v4.4 (développé par le BRGM) permet, pour un aquifère bordé par une limite rectiligne (rivière, lac, mer), de calculer la diffusivité hydraulique³ (T/S) à partir d'un suivi des variations temporelles simultanées du niveau piézométrique en un point de la nappe et du niveau d'eau dans une rivière, dans un plan d'eau ou dans la mer (Thiéry, 2012).

Les principales conditions d'application sont les suivantes : la limite de l'aquifère doit être rectiligne, la diffusivité hydraulique doit être à peu près constante (valable en nappe captive), et le niveau piézométrique doit réagir uniquement aux variations de niveau de la limite (pas d'autres phénomènes perturbateurs comme des pompages voisins ou des précipitations).

La chronique du piézomètre Pz4 a pu être correctement modélisée à partir des variations de la marée, au pas de temps horaire (Illustration 27). À noter que les modélisations n'ont pu être conduites que pendant des périodes où le champ captant est à l'arrêt (du 20/12 au 31/12/2018 dans l'exemple de l'illustration 27).

La diffusivité résultante est ici de 7.1 m²/s. Cette valeur permettra de contrôler l'ajustement de la perméabilité et du coefficient d'emmagasinement dans ce secteur. À titre d'exemple, pour un coefficient d'emmagasinement de $4.6.10^{-3}$ (valeur moyenne calculée pour les pompages d'essai de 1965), cela donne une transmissivité de $3.3.10^{-2}$ m²/s, valeur cohérente avec celle calculée à partir du pompage d'essai.

³ La diffusivité caractérise la vitesse de réaction d'un aquifère lors d'une perturbation. Plus sa valeur est élevée, plus la nappe est dite "nerveuse".

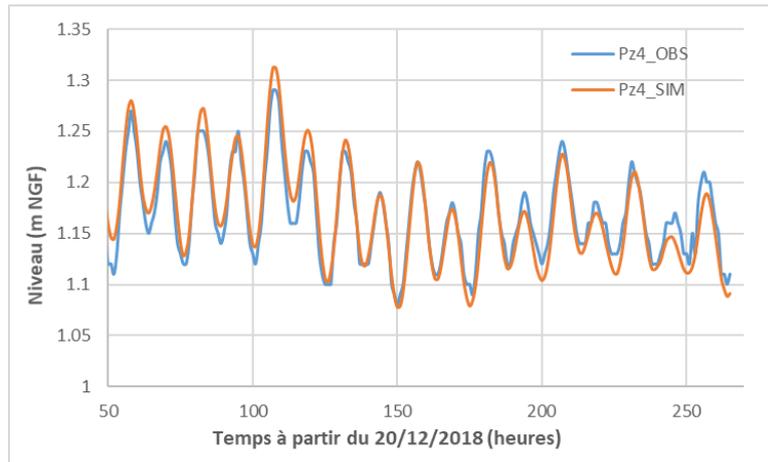


Illustration 27 - Niveaux piézométriques simulés par CATHERINE vs niveaux observés au droit du piézomètre Pz4 (période 20/12-31/12/2018).

Pour les autres ouvrages (Pz1, Pz2, Pz5) également influencés par la marée, les modélisations se sont avérées moins satisfaisantes car la piézométrie est contrôlée par d'autres phénomènes prédominants (pompages, recharge par le Bevinco).

3. Calage du modèle hydrodynamique et résultats

3.1. MÉTHODOLOGIE DE CALAGE

3.1.1. Démarche générale

La période de modélisation s'étend du 01/01/2009 au 31/08/2019, les simulations sont réalisées en régime hydraulique transitoire au pas de temps journalier.

Cependant, le modèle a été calé sur une courte période, car comme nous le verrons plus loin, les observations de terrain (Cf. § 3.2) ne sont disponibles pour la grande majorité qu'à partir de 2016 (pour les mesures ponctuelles) et 2018 pour le suivi en continu des niveaux piézométriques. Dans le même ordre d'idée, le suivi des prélèvements à fréquence journalière n'est que très récent. Il faut donc d'ores et déjà souligner que la période de calage du modèle apparaît particulièrement courte.

Le calage du modèle hydrodynamique a été initié en régime permanent, mais il a très rapidement été mené en régime transitoire. En effet, dans le cas de la nappe du Bevinco, fortement réactive et soumise à différentes contraintes (pompage, infiltration de la rivière, marée), le régime permanent n'a pas vraiment de sens (pas d'état stabilisé). Cette première étape du processus de calage permet cependant de traiter les premières difficultés de convergence des calculs et de proposer les premières conditions initiales au régime transitoire.

Du point de vue hydrodynamique, le modèle du Bevinco est calé à la fois sur les niveaux piézométriques et sur les débits du cours d'eau.

Si le calage en transport hydro-dispersif (Cf. chapitre 4) a été lancé dans un second temps, les deux opérations ne sont pas totalement découplées, et des allers-retours entre l'hydrodynamique et le transport sont nécessaires.

3.1.2. Paramètres de calage

Dans le cas de la modélisation hydrodynamique de la nappe du Bevinco, de nombreux paramètres de calage sont à considérer dans le but de reproduire au mieux les niveaux piézométriques de la nappe et les débits de la rivière. Les principaux à retenir sont :

- les champs de perméabilité et des coefficients d'emménagement libre et captif des cinq couches modélisées. Les valeurs retenues pour l'aquifère sont présentées et discutées au § 3.3. Pour les autres couches, les champs de perméabilité et d'emménagement sont reportés en Annexe 1 ;
- les paramètres intervenant dans le calcul du bilan hydro-climatique et permettant le calcul de la recharge (RDE, TPERC et NRUIP, cf. § 2.5.1) ;
- les conditions hydrauliques aux limites du modèle, en particulier les limites à charge imposée (couches 1 et 5, cf. § 2.3.1). De nombreux ajustements ont été testés pour sélectionner les mailles concernées au niveau de la couche 5 représentant l'aquifère principal et définir les valeurs de charge imposée. Il est rappelé que ces dernières évoluent à chaque pas de temps journalier avec la marée.

D'autres conditions hydrauliques aux limites du modèle ont été testées puis abandonnées car elles se sont révélées peu sensibles et n'apportent aucune amélioration du modèle : charges imposées sur la limite nord pour la couche des limons, flux imposées pour la limite amont de l'aquifère principal sur la base d'un calcul de pluies efficaces sur les superficies drainées en amont de la plaine. Cette dernière cherchait notamment à résoudre les problèmes de mailles dénoyées en périphérie du modèle, mais cela s'est révélée infructueux et sans impact sur la piézométrie simulée. Pour toutes ces limites, une condition de type flux nul a donc finalement été privilégiée.

- l'épaisseur et la perméabilité du colmatage associées au lit du cours d'eau ainsi que la rugosité du fond intervenant dans la loi de Manning-Strickler (§ 2.4.1) ;
- l'épaisseur et la perméabilité de colmatage du lit de l'étang (§ 2.4.2) ;
- Le coefficient de perméabilité d'échange nappe-drain pour le canal de la réserve et les fossés secondaires. Une valeur unique de 0.01 m/s a finalement été retenue (§ 2.4.3).

Le processus de calage est itératif selon une approche par « essais et erreurs ». Au regard du nombre de paramètres de calage et des cinq couches modélisées, un très grand nombre de simulations a été nécessaire avant de parvenir aux résultats présentés ci-après.

3.1.3. Période de calage et situation hydrologique

Comme précisé au début de ce chapitre, la période de modélisation choisie s'étend de janvier 2009 à août 2019.

Pour apprécier la situation hydrologique de ces onze années, le débit moyen mensuel du Bevinco de chacune d'elle a été reporté dans le graphique de l'illustration 28 et comparé aux débits mensuels décennaux secs et humides calculés sur la période de données disponibles de la station limnimétrique du Bevinco (1960 à 2020).

Ainsi, les étiages des années 2014, 2016 et 2017 apparaissent particulièrement secs tandis que les étiages des années 2009, 2010, 2012 et 2018 apparaissent particulièrement humides. La période de modélisation choisie permet donc de modéliser des conditions hydrologiques contrastées de l'hydrosystème.

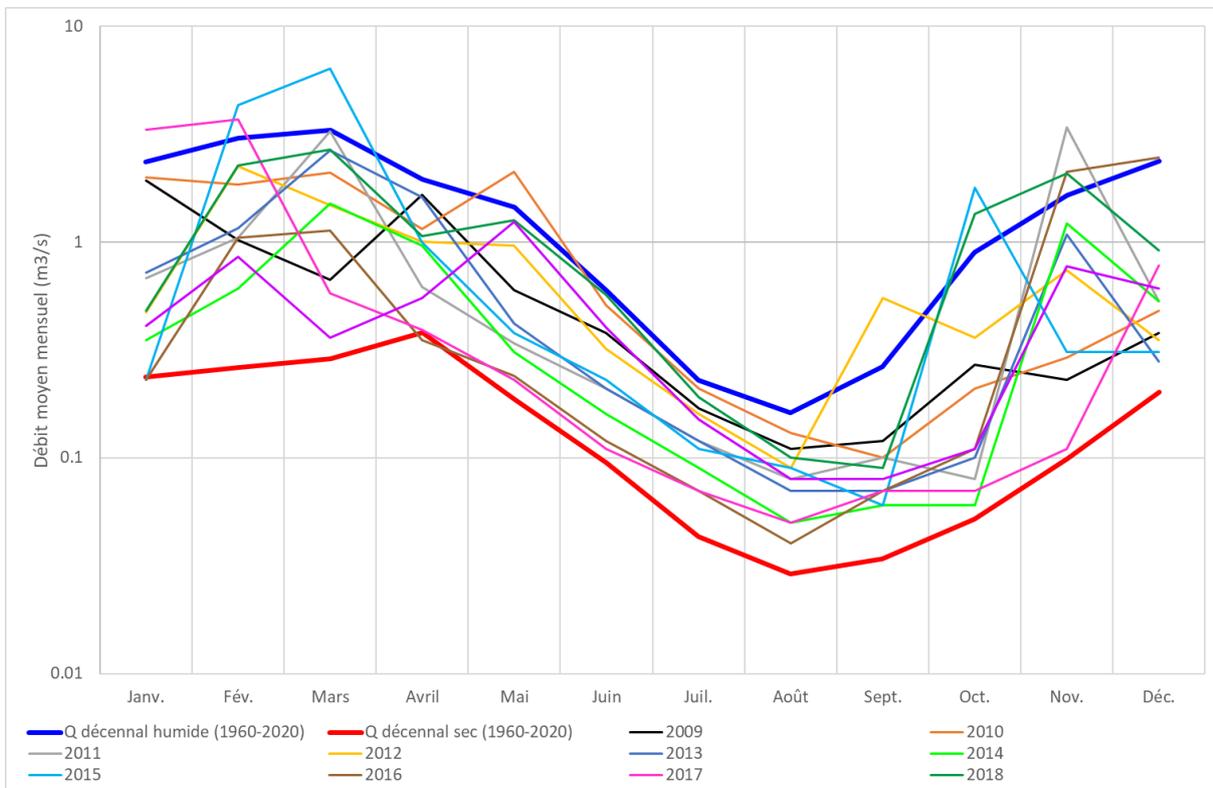


Illustration 28 - Débits moyens mensuels du Bevinco des années 2010 à 2019 comparés aux débits mensuels décennaux secs et décennaux humides calculés sur la période de 1960 à 2020. L'échelle verticale est logarithmique.

3.2. DONNÉES DE RÉFÉRENCE POUR LE CALAGE

Pour s'assurer que le modèle reproduit correctement le fonctionnement du système aquifère, il faut disposer de mesures de terrain permettant de comparer les résultats de simulation aux relevés effectués dans un réseau d'observation. Dans le cas du Bevinco, ces données de référence concernent principalement les niveaux piézométriques et les débits du cours d'eau.

3.2.1. Niveaux piézométriques

Le suivi existant sur les piézomètres DCE de Casatorra et de Chiaragginco a été complété par l'instrumentation de 10 ouvrages supplémentaires, dont 5 nouveaux piézomètres créés dans le cadre de l'étude (Illustration 2).

L'aquifère principal est suivi au droit de 8 ouvrages, dont le puits Suariccia III-7 qui est exploité par Acqua Publica. Pour le reste :

- un puits privé (Casone) suit la nappe perchée contenue dans les sables dunaires du Lido, depuis mars 2019 ;
- le piézomètre CCMG, implanté à proximité immédiate d'un puits AEP, capte les limons ;
- deux piézomètres courts, foncés à l'aide d'une tarière en avril 2019, permettent de compléter le suivi des limons. LIM1 et LIM5 sont respectivement implantés à proximité immédiate des piézomètres PZ1 et PZ5 ;
- le forage Suariccia II intercepte l'intercalaire argileux identifié au sein de l'aquifère alluvial. La profondeur de ce dernier n'aurait pas permis d'atteindre la formation Fy12.

Comme évoqué précédemment, hormis le suivi historique sur Casatorra (démarré en 1986), il faut souligner que les chroniques piézométriques sont toutes de courte durée (< 1 année pour les piézomètres forés pour les besoins de l'étude).

Par ailleurs, plusieurs campagnes de relevés piézométriques conduites en phase 1 ont permis d'établir des cartes piézométriques aux dates suivantes : 05/10/2016, 29/11/2016, 01/06/2017, 18/07/2017, 01/03/2019 et 27/08/2019 (Genevier *et al.*, 2021). À noter que les cartes élaborées en 2019 permettent d'intégrer les cinq nouveaux piézomètres et sont ainsi plus complètes (Illustration 29).

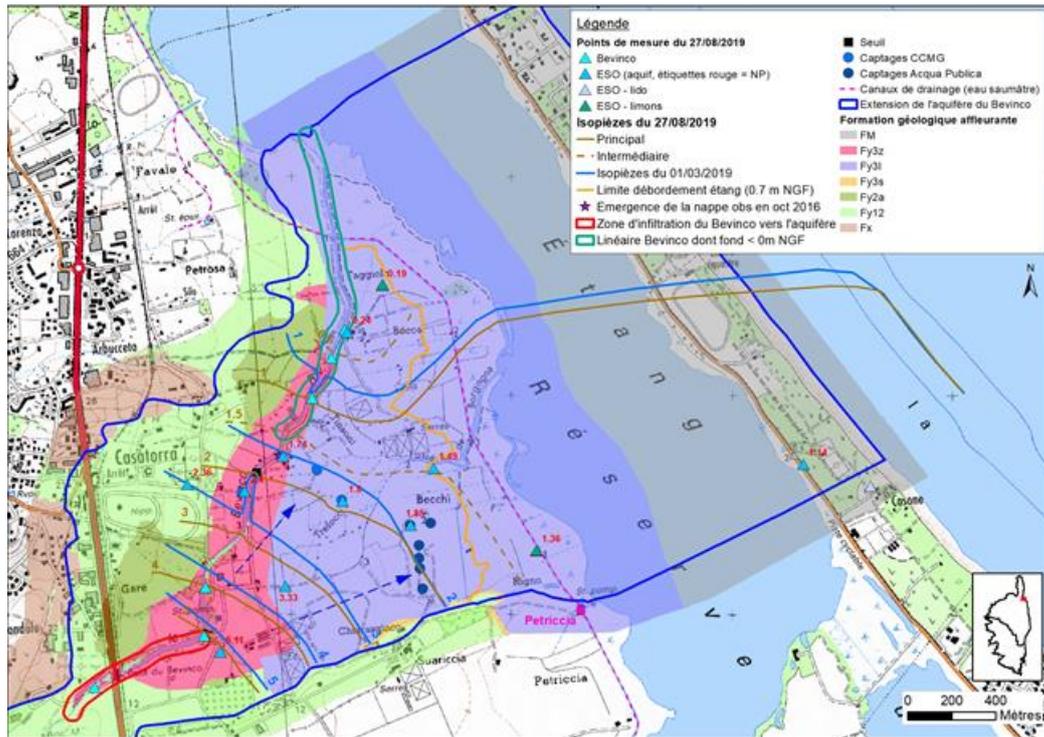


Illustration 29 - Carte piézométrique de la nappe du Bevinco en condition de basses eaux le 27/08/2019 et de moyennes eaux le 01/03/2019 (extrait de Geneviev et al., 2021).

3.2.2. Débits du Bevinco

En cours de calage, le suivi des débits mis en place par la Réserve Naturelle au niveau de passage à gué a été mis à notre disposition (Illustration 30).

En complément, des jaugeages différentiels du Bevinco ont été mis en œuvre par le BRGM à différentes dates : juin 2016, juillet 2016, avril et mai 2017, avril et août 2019 (cf. rapport de phase 1, Geneviev *et al.*, 2021). La localisation des sites de jaugeages est reportée sur l'illustration 30.

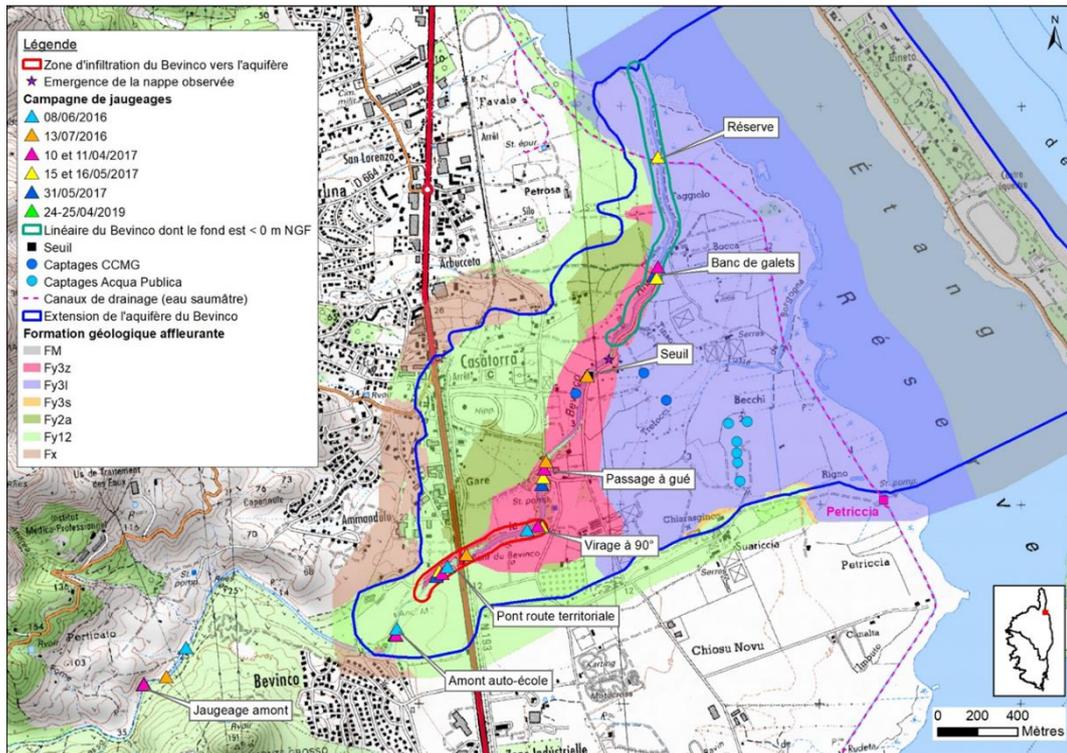


Illustration 30 - Localisation des sites de jaugeage du Bevinco (extrait de Genevier et al., 2021).

3.2.3. Débits pompés à la station de Petriccia

Les volumes pompés mensuellement sur le canal de drainage via la station de Petriccia sont disponibles depuis 2003. Les valeurs ne pourront pas être directement comparées à des résultats de modélisation car d'une part, le linéaire de drain présent sur l'emprise du modèle n'est que de 1880 m (contre 4169 m pour la longueur du tronçon drainé par la station de Petriccia) et d'autre part, le modèle ne simule pas les débordements de l'étang.

Cela permettra cependant de comparer la dynamique des débits drainés par le réseau de fossés modélisé et des flux de débordement simulés aux volumes prélevés à Petriccia (Cf. § 3.6).

3.3. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES DE CALAGE

3.3.1. Paramètres hydrodynamiques

Avec le logiciel MARTHE, c'est la perméabilité qui est ajustée lors du processus de calage et non la transmissivité (= perméabilité x épaisseur saturée de l'aquifère) comme dans certains codes de calcul. L'illustration 31 présente le champ de perméabilité retenu à l'issue du calage pour l'aquifère principal (couche 5 du modèle) d'une part et la transmissivité résultante d'autre part. Les champs de perméabilité des autres couches sont reportés en Annexe 1.

Un minimum de plages de valeur uniforme a été privilégié plutôt que des mosaïques contrastées de valeurs qui chercheraient, sans argumentation hydrogéologique, à reproduire au plus près les chroniques piézométriques observées. Pour l'aquifère principal, les perméabilités sont comprises entre 5.10^{-5} m/s et 3.10^{-3} m/s. La valeur de perméabilité la plus représentée est de 5.10^{-4} m/s (Illustration 31).

En accord avec les faciès argileux observés sur Pz3, une perméabilité plus faible, de 1.10^{-4} m/s, a été retenue en rive gauche du Bevinco dans la partie amont. Une faible valeur (5.10^{-5} m/s) a également dû être appliquée sur l'extrémité aval du Bevinco. En l'absence totale d'information dans ce secteur, cette valeur doit être considérée avec vigilance car elle compense peut-être une erreur de géométrie. Quoi qu'il en soit, seul un secteur à faible perméabilité permettait de reproduire le niveau général de la nappe observé en PZ5.

Les plus fortes perméabilités concernent l'extrémité amont de la plaine jusqu'au virage à 90° du Bevinco (3.10^{-3} m/s), en accord avec les faciès grossiers observés à l'affleurement. Pour rappel, c'est sur ce tronçon que la rivière s'infiltre vers la nappe. Un chenal présentant également une perméabilité élevée (8.10^{-4} à 1.10^{-3} m/s) a été identifié à l'aval du champ captant d'Acqua Publica.

Les transmissivités résultantes varient entre 1.10^{-4} et $1.3.10^{-1}$ m²/s (Illustration 31). À titre d'exemple, au droit du puits 7 de Suariccia III, la transmissivité de $1.8.10^{-2}$ m²/s retenue dans le modèle est tout à fait comparable à la transmissivité calculée à partir d'un pompage d'essai réalisé sur cet ouvrage en 1969 ($2.2.10^{-2}$ m²/s).

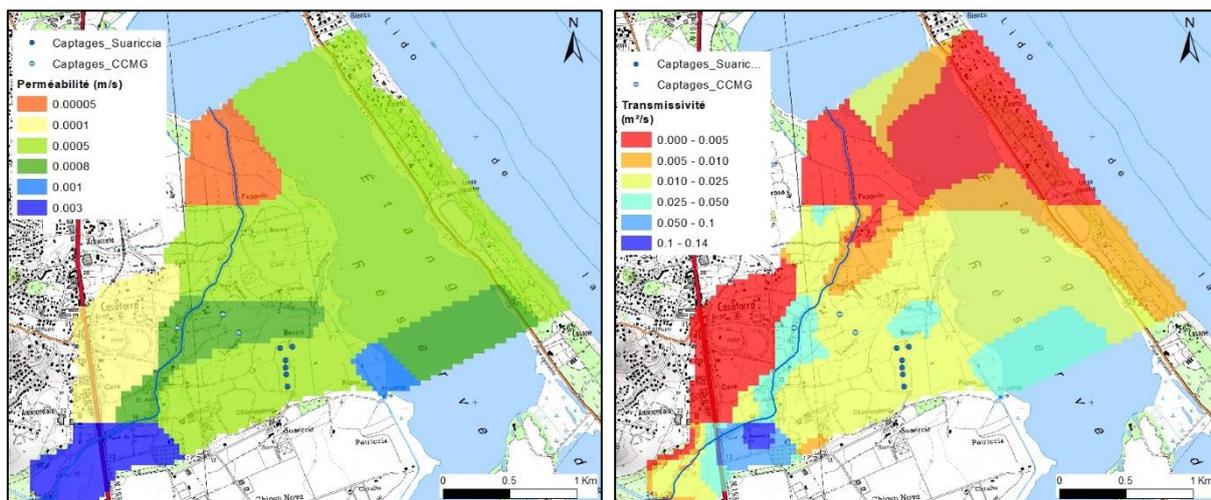


Illustration 31 - Champs de perméabilité (à gauche) et de transmissivité (à droite) issus du calage du modèle pour l'aquifère principal du Bevinco (couche 5).

En régime transitoire, la modélisation fait intervenir deux coefficients d’emmagasinement : le coefficient d’emmagasinement en nappe libre (équivalent à la porosité efficace) lorsque la maille n’est pas entièrement saturée en eau, et le coefficient d’emmagasinement captif lorsque la maille est saturée en eau.

Dans un aquifère captif, le coefficient d’emmagasinement est lié à la compressibilité et à l’expansibilité de l’eau et du milieu aquifère, ainsi qu’à l’épaisseur de la couche aquifère. Pour cette raison, il ne faut utiliser que la notion de coefficient d’emmagasinement captif spécifique (noté S_s , de dimension m^{-1}), paramètre intrinsèque de la formation égal au rapport entre le coefficient d’emmagasinement et la hauteur aquifère saturée ($S_s=S/e$, où e désigne l’épaisseur de la formation saturée) (Barthélémy *et al.*, 2016). Le recours à l’emmagasinement spécifique permet ainsi de s’affranchir des variations d’épaisseur de la formation et d’appliquer des valeurs uniquement fonction du matériau géologique.

L’Illustration 32 présente la spatialisation de ces deux types de coefficient d’emmagasinement captif. Dans la partie où la nappe est captive, le coefficient d’emmagasinement spécifique est de $1.10^{-5} m^{-1}$.

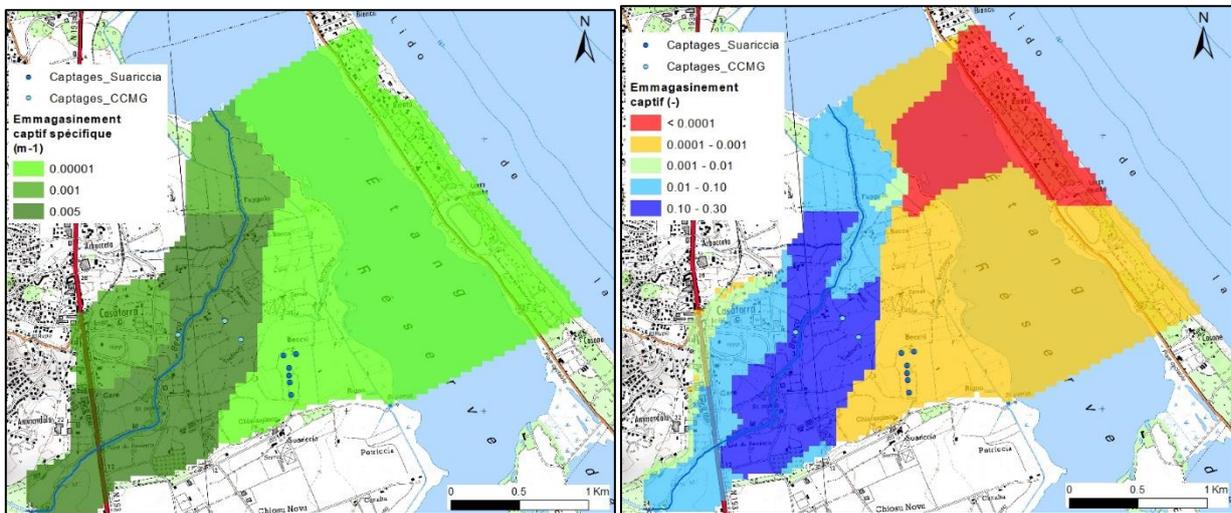


Illustration 32 - Coefficients d’emmagasinement en nappe captive issus du calage du modèle pour l’aquifère principal du Bevinco (couche 5) (emmagasinement spécifique en m^{-1} à gauche, emmagasinement sans dimension à droite).

Un coefficient d’emmagasinement en nappe libre uniforme a été retenu pour l’aquifère, sa valeur est de 0.005. Pour le reste, à l’exception de la couche 3 où deux valeurs d’emmagasinement en nappe captive ont été affectées, les coefficients sont uniformes pour chacune des couches (Illustration 33).

Couche	S en nappe libre (-)	S en nappe captive (m^{-1})
1 - FLM	3.10^{-2}	1.10^{-3}
2 – $Fy3I (+Fy3z)$	1.10^{-3}	1.10^{-3}
3 – $Fy3s$	5.10^{-3}	5.10^{-3} et 1.10^{-5}
4 – $Fy2a (+ Fy3z)$	1.10^{-3}	1.10^{-5}
5 – $Fy12 (+ Fy3z)$	5.10^{-3}	1.10^{-5} à 5.10^{-3}

Illustration 33 - Coefficients d’emmagasinement en nappe libre et en nappe captive issus du calage pour les cinq couches modélisées.

3.3.2. Paramètres hydro-climatiques

L'alimentation de la nappe alluviale se faisant majoritairement par les infiltrations du Bevinco, l'ajustement des paramètres intervenant dans le calcul de la recharge de la nappe par les eaux pluviales est apparu peu sensible. Des valeurs usuelles ont été retenues pour chaque zone de sol (Cf. cartographie, Illustration 22) en veillant à distinguer le caractère moins infiltrant de la zone 2 correspondant aux limons à l'affleurement (Illustration 34) :

Zone de sol	RDE (mm)	RUIPER (mm)	T1/2 PERCO (mois)
1	80	100	0.1
2	100	50	0.1
3	80	100	0.1

Illustration 34 - Valeurs des paramètres hydro-climatiques issus du calage pour les trois zones de sol (cf. définition des paramètres, § 2.5.1).

3.3.3. Colmatage et rugosité du lit du Bevinco

L'illustration 35 présente les valeurs spatialisées de la perméabilité de colmatage du lit et des berges du Bevinco ainsi que la rugosité issues du calage. Ce dernier paramètre intervient dans la loi de Manning-Strickler avec la pente du lit (Cf. § 2.4.1).

Encore une fois, il a été choisi de limiter au maximum les plages de valeur, seul le tronçon du Bevinco compris entre son débouché dans la plaine alluviale et le virage à 90° a été distingué avec une perméabilité de colmatage un peu plus élevée (8.10^{-6} m/s contre 1.10^{-6} m/s pour le reste de la rivière) et un coefficient de rugosité un peu plus faible (1.10^{-2} m^{-1/3}/s contre 4.10^{-2} m^{-1/3}/s).

Concernant l'étang, il a été nécessaire d'introduire un colmatage plus important avec une perméabilité de colmatage de 1.10^{-8} m/s (équivalente à la perméabilité des limons sous-jacents) afin de bien reproduire la mise en charge de la nappe.

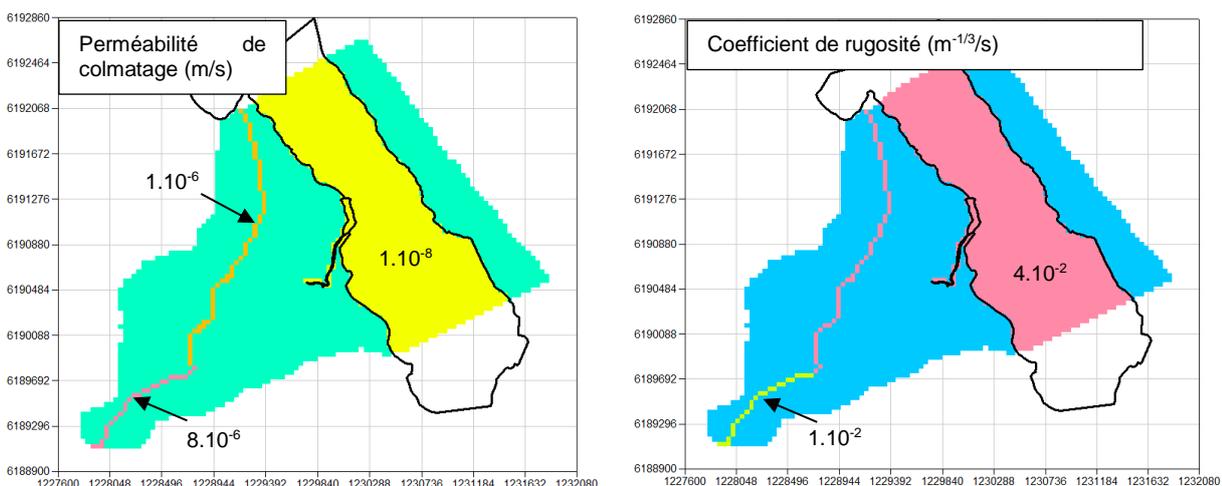


Illustration 35 - Perméabilité de colmatage du Bevinco et de l'étang (à droite) et coefficient de rugosité du lit de la rivière (à droite).

3.4. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

3.4.1. Cartes piézométriques

À titre d'exemple, la piézométrie de la nappe alluviale simulée à la date du 31/08/2019 est comparée à la carte piézométrique élaborée suite à une campagne de relevés réalisée à la même date (Illustration 36). À cette date, le champ captant d'Acqua Publica n'était pas en service. Il est intéressant de souligner les points suivants :

- les deux axes d'écoulement de la nappe, identifiés en phase 1 de l'étude, sont bien reproduits par le modèle : un premier orienté sud-ouest / nord-est dans l'axe de la rivière, et un second ouest sud-ouest / est nord-est dans l'axe de la paléo-vallée, en direction du champ captant d'Acqua Publica ;
- la piézométrie est très bien retranscrite sur la moitié amont de la plaine, pour les isopièzes supérieures à 1.5 m NGF. Entre les isopièzes 1.5 et 5 m NGF, le gradient hydraulique moyen simulé est de 3.6 ‰ dans l'axe du Bevinco et de 2.7 ‰ dans l'axe du champ captant (gradients moyens identiques pour la piézométrie interprétée à partir des mesures de terrain) ;
- plus en aval, en l'absence de mesures de terrain sous l'étang et dans toute la partie nord, il est difficile de comparer la piézométrie simulée et celle interprétée. Au droit du Bevinco, les isopièzes 0.5 m NGF et 1 m NGF se superposent bien et c'est moins le cas quand on s'éloigne de la rivière. L'isopièze 1 m NGF interprétée n'étant contrainte vers l'aval qu'à partir du piézomètre PZ4, celle-ci reste très incertaine et ne remet donc pas ici en cause les résultats de la simulation. En aval du champ captant, un gradient hydraulique plus faible est bien vérifié par le modèle (gradient simulé de 0.3 ‰ entre l'isopièze 1.5 m NGF et le littoral).

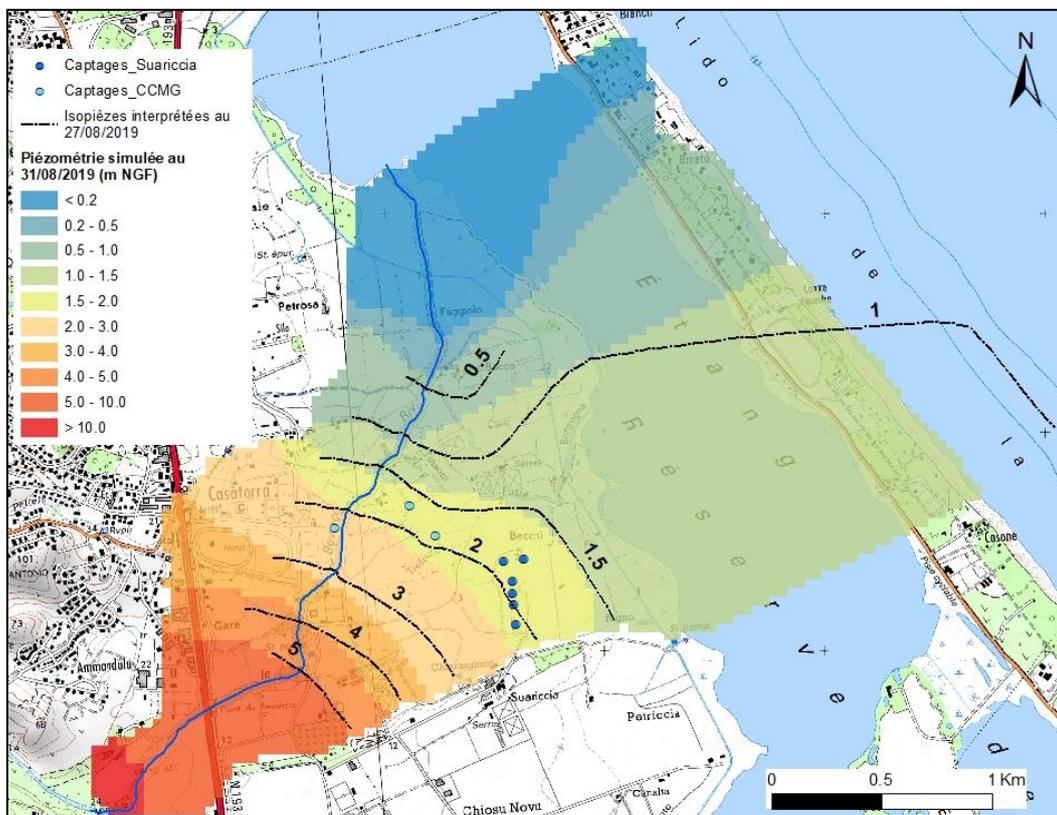
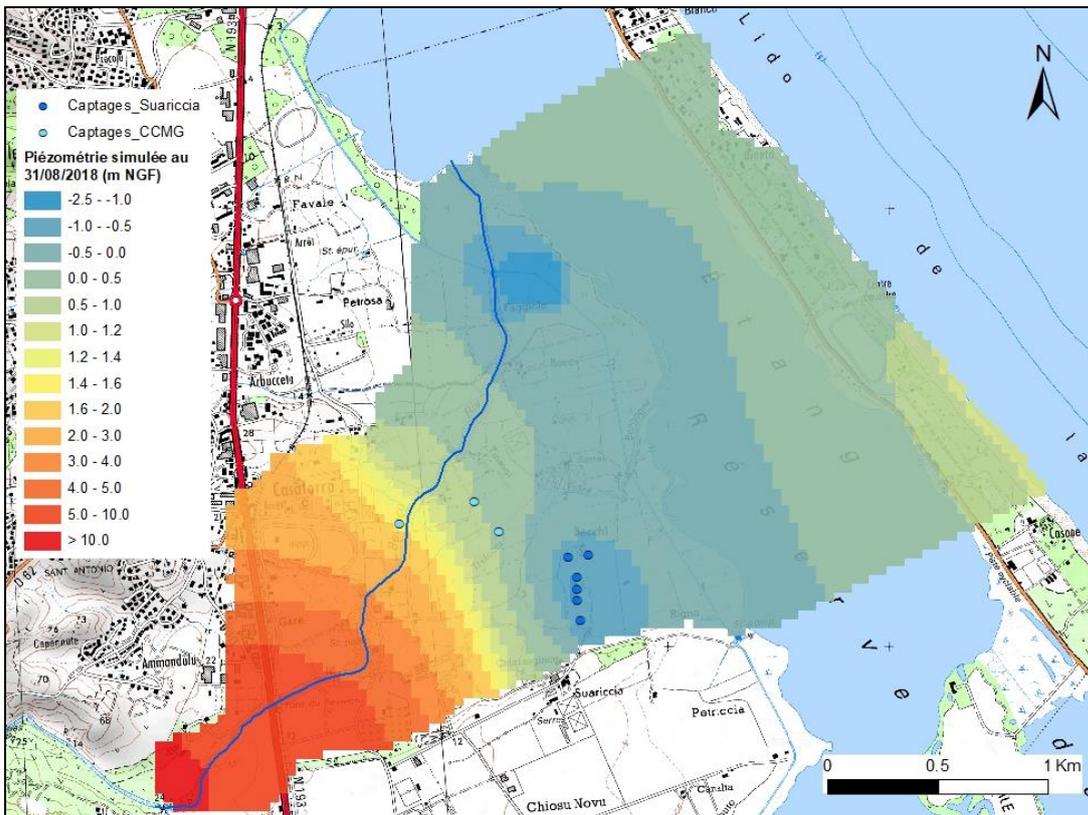


Illustration 36 - Piézométrie de la nappe alluviale du Bevinco simulée au 31/08/2019 vs piézométrie interprétée à partir de relevés de terrain du 27/08/2019.

L'impact simulé des pompages du champ captant d'Acqua Publica peut être observé à l'aide de l'illustration 37. La dépression piézométrique, centrée sur le champ captant, est tout d'abord bien retranscrite. Comme observé sur le terrain à partir de la différence de charge entre PZ4 et PZ1, le sens d'écoulement est bien inversé, avec dans certaines conditions de pompage, un écoulement de la nappe qui se fait du littoral vers l'intérieur des terres. En outre, l'impact des pompages se fait bien ressentir sur quasiment toute la plaine alluviale, même en rive gauche du Bevinco comme observé sur le piézomètre PZ3.

On peut constater que le modèle simule une dépression piézométrique dans le nord, au droit du piézomètre PZ5, avec ou sans pompage sur le champ captant. En l'absence de données vers l'aval, il n'est pas possible de confirmer la fiabilité de celle-ci, mais comme nous le verrons par la suite, l'objectif était ici de retranscrire le niveau moyen de la nappe au droit de PZ5.



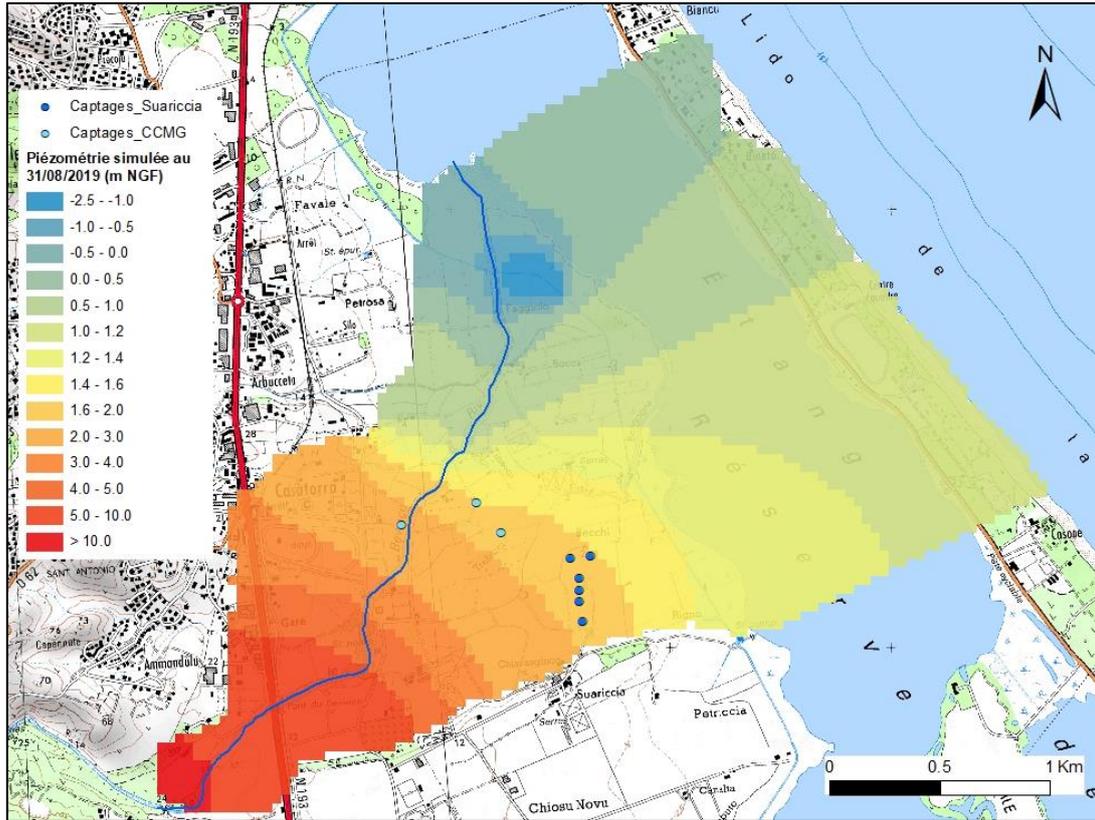


Illustration 37 - Piézométrie de la nappe alluviale du Bevinco simulée en condition de pompage (graphe du haut, 31/08/2018) et sans pompage sur le champ captant de Suariccia (graphe du bas, 31/08/2019).

3.4.2. Chroniques piézométriques

a) Préambule

Calcul des niveaux piézométriques au droit des puits de pompage :

Dans un modèle maillé développé avec un logiciel en différences finies, conséquence de la discrétisation, un débit introduit dans une maille est considéré dans les calculs comme réparti uniformément sur toute la surface de la maille. Le niveau calculé dans la maille est donc un niveau dont l'effet sur la nappe correspond à ce mode de répartition et non pas au niveau qui serait celui observé (théoriquement) au forage de pompage (hors pertes de charge).

Si l'on souhaite connaître (approximativement) le niveau au forage, le résultat du modèle peut être "corrigé" en utilisant la formule suivante (intégrée dans le logiciel MARTHE) qui fournit le rabattement supplémentaire à prendre en compte :

$$H_{\text{maille}} - H_{\text{forage}} = \frac{Q}{2\pi T} \left(\text{Log} \frac{\Delta x}{r_p} - \frac{\pi}{2} \right)$$

H_{maille} (m) est le niveau moyen dans la maille contenant le forage, calculé par le modèle ;

H_{forage} (m) est le niveau au forage ;

Q (m³/s) est le débit de pompage ;

T (m²/s) est la transmissivité ;

Δx (m) est le côté de la maille (la démonstration de la formule est faite avec des mailles carrées) ;

r_p (m) est le rayon du forage.

Le rabattement supplémentaire est inversement proportionnel à la transmissivité.

Cette correction a été appliquée au puits Suariccia III-7 dans le but de comparer les résultats de la simulation aux niveaux enregistrés dans le forage. En outre, un coefficient de perte de charge quadratique de $500 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$ a été considéré (valeur modérée).

Indicateurs de performance :

Le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) est proposé pour juger de la performance du modèle à reproduire les niveaux piézométriques. Il correspond à l'écart quadratique moyen entre valeurs observées et simulées rapporté à la variance des observations. Plus précisément :

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (X_{obs}(t) - X_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^n (X_{obs}(t) - \bar{X}_{obs})^2}$$

La valeur de ce critère est de 1 quand le modèle restitue parfaitement les observations. Une simulation est considérée comme acceptable quand le critère de Nash est supérieur à 0.5 et très satisfaisant au-dessus de 0.7.

b) Analyse des résultats dans la partie libre de la nappe

Les Illustration 38 et Illustration 39 permettent de confronter les chroniques piézométriques simulées aux chroniques observées pour les ouvrages implantés dans la partie libre de la nappe alluviale, respectivement en rive droite et en rive gauche. Pour chaque graphique, une graduation de l'axe des ordonnées correspond à 0.2 m.

La chronique piézométrique de Suariccia II (suivi depuis août 2016), ouvrage le plus amont, est très bien reproduite par le modèle ; le coefficient de Nash est de 0.77. À quelques exceptions près, les fluctuations piézométriques sont correctement simulées en amplitude comme en phase. L'impact des crues du Bevinco sur la nappe apparaît particulièrement bien simulé. En revanche, les niveaux de la nappe apparaissent légèrement sous-estimés lors de l'étiage 2018.

Plus en aval, la correspondance est un peu moins satisfaisante pour Chiaragginco (Nash=0.58) et Tinsoni (Nash=0.58) même si la dynamique de la nappe est globalement bien simulée. À partir d'août 2018, les niveaux apparaissent globalement sous-estimés par le modèle. Comme pour Suariccia II, on peut constater que le modèle sous-estime en particulier les niveaux de la nappe durant l'étiage 2018. Il faut cependant ici rappeler, en particulier pour Tinsoni, que les débits pompés sur les trois forages de la CCMG implantés à proximité ne sont connus qu'à la fréquence hebdomadaire jusqu'au 04/08/2017 et inconnus ensuite.

Le même constat peut être fait pour le piézomètre PZ3 (Nash=0.52, suivi depuis août 2018) : niveaux globalement sous-estimés à partir de l'étiage 2018 (Illustration 39). De très nombreux tests ont été menés lors du calage du modèle pour améliorer cette situation qui concerne tous les piézomètres implantés dans la partie libre de la nappe, mais sans succès. Comme nous le verrons plus tard, l'étiage 2018 n'a pas fait l'objet d'une campagne de jaugeages sur le Bevinco, dont les résultats auraient peut-être permis de contraindre davantage le calage du modèle.

Au droit du piézomètre DCE de Casatorra (période de calage : 2009-2019), la dynamique de la nappe est une nouvelle fois modélisée de façon satisfaisante, le coefficient de Nash est de 0.58. Certains pics de hautes eaux, liés à des crues du Bevinco, sont cependant sous-estimés tandis que les basses eaux les plus marquées sont au contraire surestimées par le modèle (2011, 2014, 2016 et 2018, cf. Illustration 39). En l'état actuel le modèle ne représente pas les flux de débordement du cours d'eau en période de crue, or ceux-ci sont susceptibles de recharger davantage la nappe au droit des zones inondées. Ceci pourrait expliquer les pics de crue sous-estimés par le modèle. Enfin, pour le piézomètre de Casatorra, sous l'influence direct d'un forage de la CCMG, il faut rappeler que la méconnaissance des débits pompés nuit à une amélioration du calage.

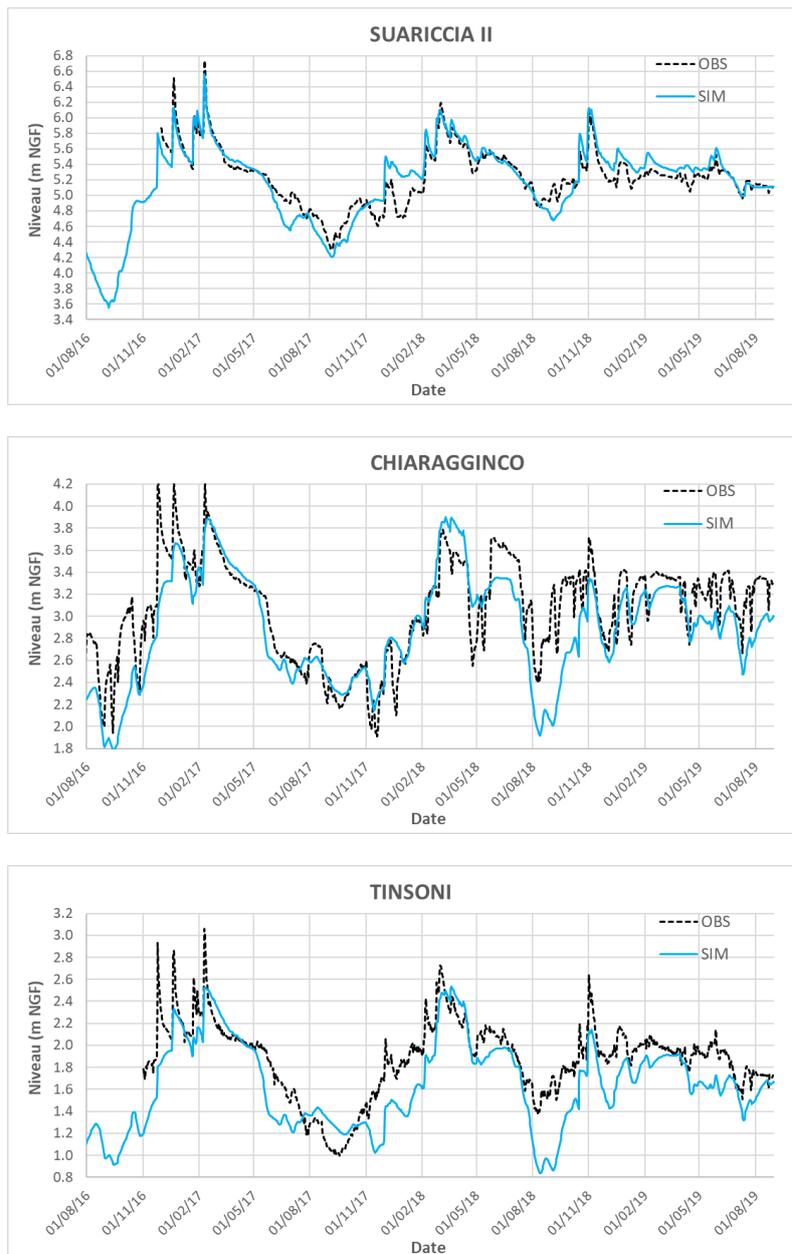


Illustration 38 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés dans la partie libre de la nappe et en rive droite du Bevinco (couches 3 à 5).

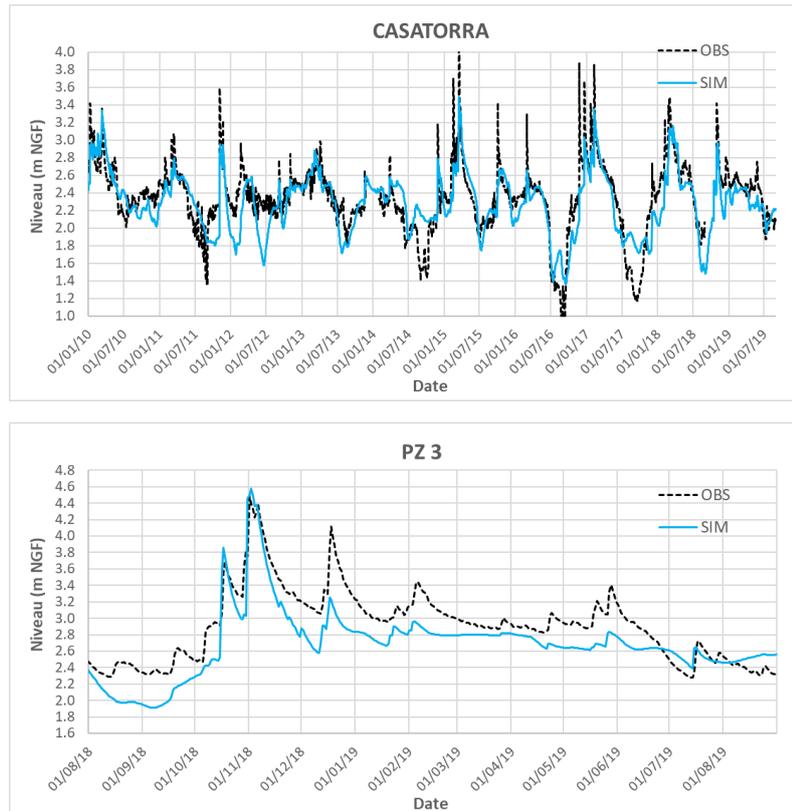


Illustration 39 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés dans la partie libre de la nappe et en rive gauche du Bevinco (couche 5).

c) Analyse des résultats autour et en aval du champ captant

Les fluctuations piézométriques au droit du champ captant d'Acqua Publica, aux alentours immédiats (PZ1 et PZ2) et plus en aval sur la bordure littorale (PZ4) sont très bien reproduites par le modèle (Illustration 40).

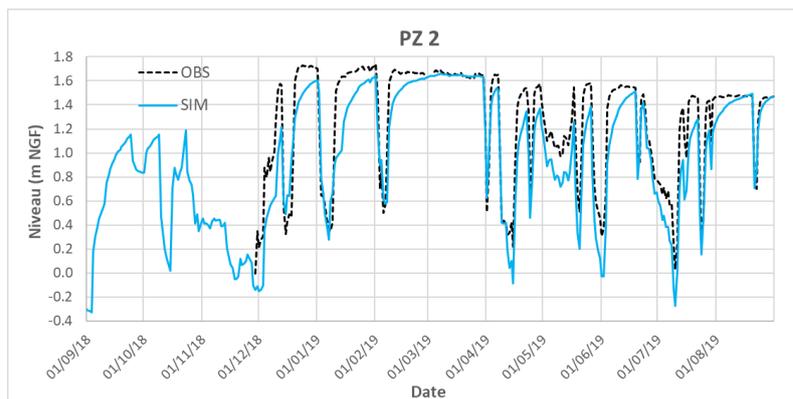
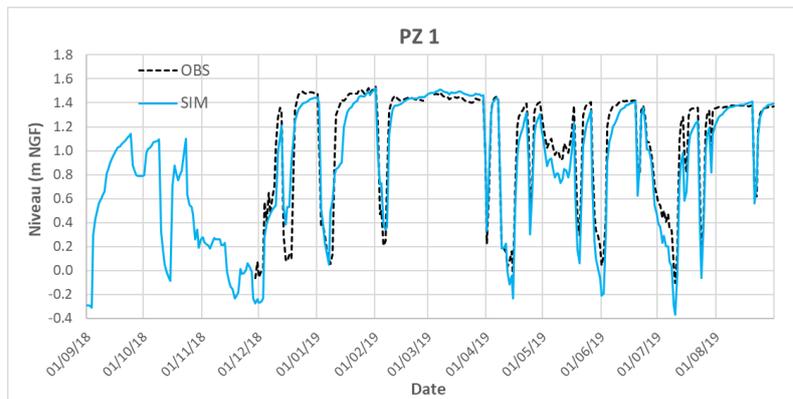
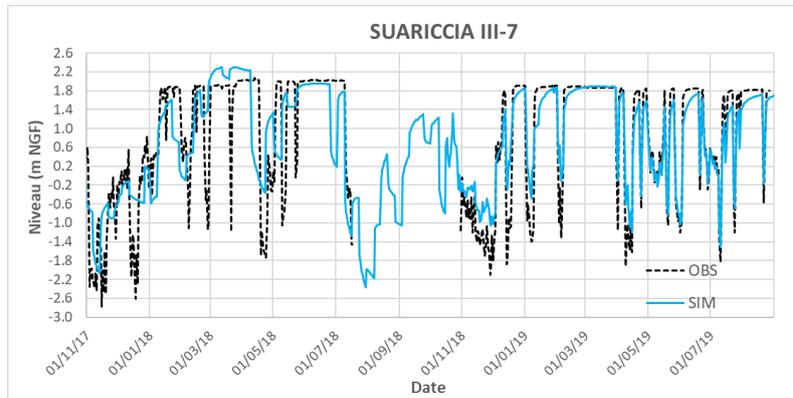
Volontairement, il n'a pas été cherché à reproduire parfaitement les niveaux minimums sur le puits Suariccia III-7 car ceux-ci dépendent en partie des pertes de charge quadratiques de l'ouvrage qui ne sont pas connues et que nous avons arbitrairement fixé à $500 \text{ m}^{-5} \cdot \text{s}^2$ (valeur modérée).

En toute logique, les niveaux sont moins bien reproduits pour le puits de pompage sur la période antérieure à octobre 2018 où les débits de pompage ne sont connus qu'au pas de temps hebdomadaire. Cela montre l'importance de disposer des débits de pompage *a minima* au pas de temps journalier et idéalement de façon individualisée sur chaque forage (impossible dans la configuration de pompage actuelle). Sur la période récente, le coefficient de Nash pour le puits de pompage SIII-7 est très élevé (0.87).

Pour PZ1 et PZ2, les niveaux hauts ainsi que les rabattements induits par les pompages du champ captant sont très bien retranscrits. En revanche, la fin de la remontée des niveaux qui suit l'arrêt des pompages n'est pas parfaitement simulée, en particulier sur PZ2 (Illustration 40). Ceci étant dit, les coefficients de Nash sont très bons avec respectivement des valeurs de 0.86 et 0.73 pour PZ1 et PZ2.

La chronique piézométrique de PZ4 est également bien reproduite par le modèle, en particulier les rabattements générés par les pompages exercés sur le champ captant. Concernant les niveaux hauts, un décrochage des observations semble être mis en évidence, cela semblait également le cas sur PZ1 et PZ2 mais dans une moindre mesure.

Il a été choisi de privilégier les niveaux récents, ce qui fait que les niveaux hauts sont légèrement sous-estimés (5 à 10 cm) en 2018 et début 2019. Il n'est pas exclu que ce décrochage s'explique par une cause anthropique non prise en compte par le modèle, par exemple un colmatage des ouvrages. Quoiqu'il en soit, le coefficient de Nash est une nouvelle fois très élevé (0.84) et vient souligner la qualité du calage dans ce secteur.



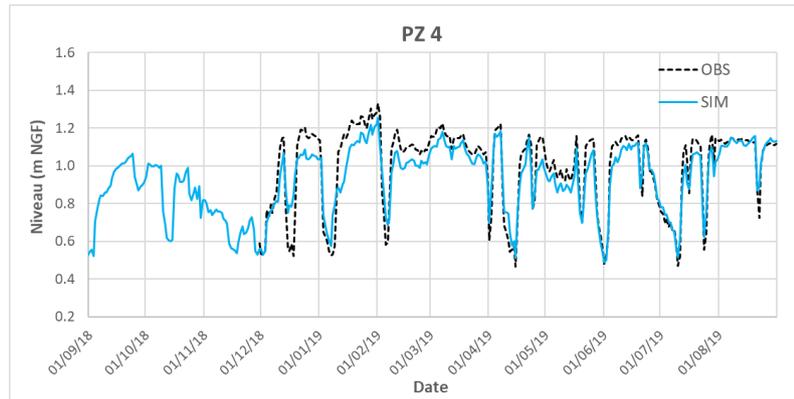


Illustration 40 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés au droit des différents ouvrages de surveillance de la nappe alluviale du Bevinco dans sa partie captive (couches 3 à 5).

d) Analyse des résultats dans le compartiment nord

Dans le compartiment nord de la nappe où l'épaisseur et la productivité de l'aquifère diminuent, le modèle a des difficultés à reproduire les fluctuations piézométriques au droit de PZ5 (Illustration 41). Face aux difficultés rencontrées, la priorité a été donnée au respect de la différence de charge hydraulique entre les alluvions et les limons sus-jacents (drainance ascendante dans la grande majorité du temps) au détriment d'une retranscription plus rigoureuse de la chronique piézométrique de PZ5. En d'autres termes, la simulation des fluctuations piézométriques a été volontairement dégradée afin de respecter cette drainance ascendante (charge hydraulique de l'aquifère supérieure à celle des limons).

Les inconnues étant nombreuses dans ce secteur de la plaine alluviale, en particulier sur la géologie, il n'a pas été possible d'obtenir de meilleurs résultats malgré les nombreuses hypothèses testées.

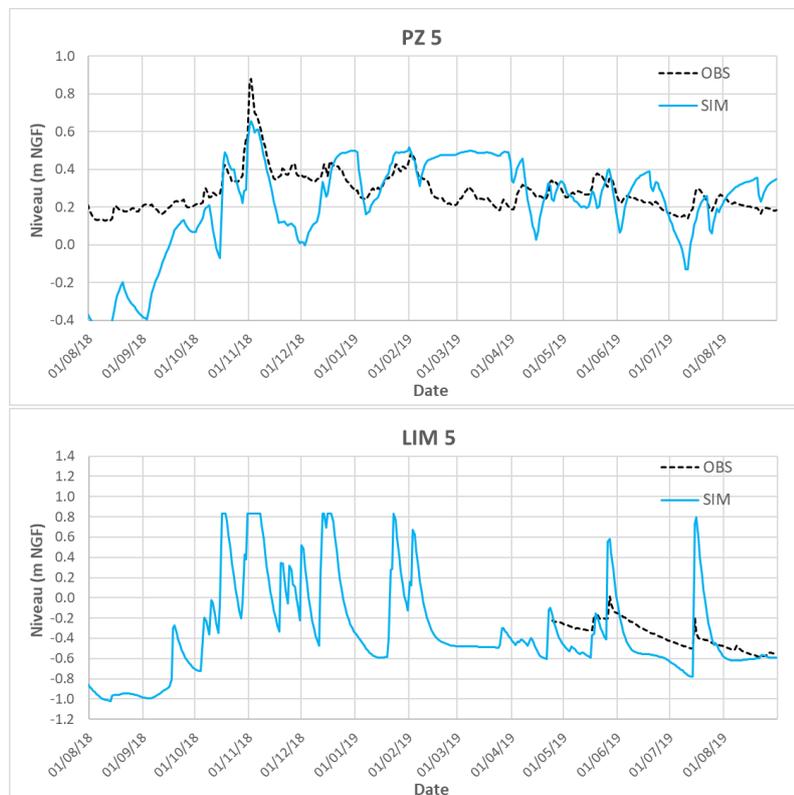


Illustration 41 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés au droit de PZ5 et LIM5 (compartiment nord).

e) Analyse des résultats dans les limons de couverture

Le piézomètre dit CCMG capte les limons superficiels à proximité immédiate du forage Suariccia 3 de la CCMG (Cf. carte de l'illustration 28). Les débits de pompage n'étant connus qu'au pas de temps hebdomadaire et inconnus à partir d'août 2017, les influences du pompage ne peuvent pas être précisément simulées. La chronique piézométrique simulée apparaît ainsi beaucoup plus lissée (Illustration 42). On peut noter une nouvelle fois des niveaux simulés sous-estimés pour l'étiage 2018. Les grandes tendances (cyclicité, battements) sont tout de même bien retranscrites par le modèle, mais l'impossibilité de restituer les influences journalières du pompage à proximité aboutit à un coefficient de Nash médiocre (0.38).

Concernant LIM1, le modèle est en mesure de simuler uniquement le niveau moyen de la nappe perchée. En effet, celui-ci étant implanté en bordure du canal de drainage de la Réserve (< 5 m), le niveau est tamponné par le niveau du drain modélisé, et les fluctuations résultantes en sont très fortement atténuées (Illustration 42). Encore une fois, l'objectif était ici de respecter les différences de charge entre les alluvions et les limons.

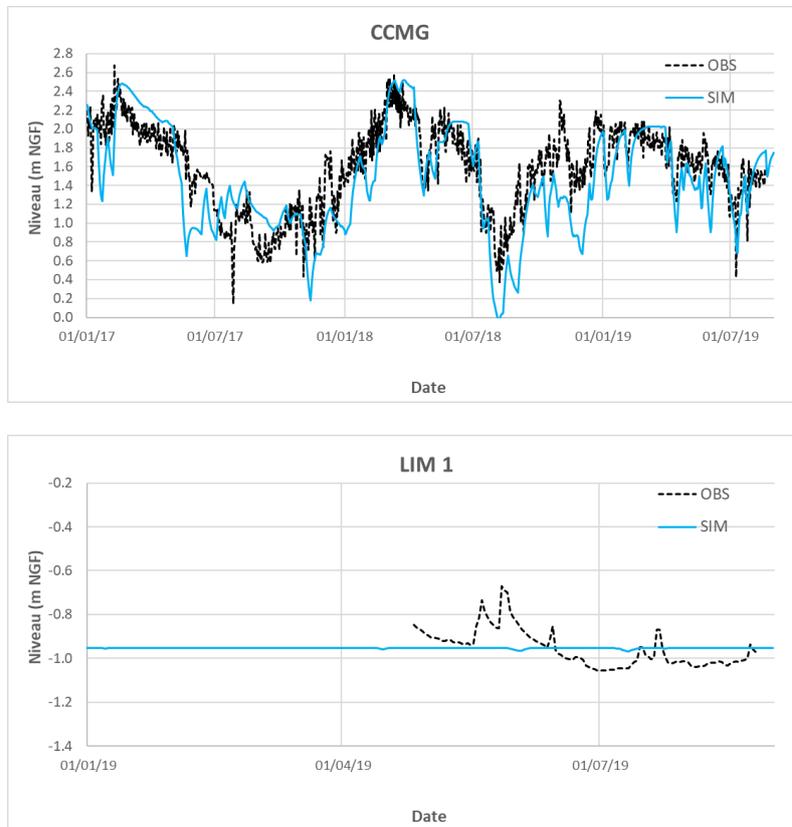


Illustration 42 - Niveaux piézométriques simulés vs niveaux observés pour les limons de couverture (couche 2).

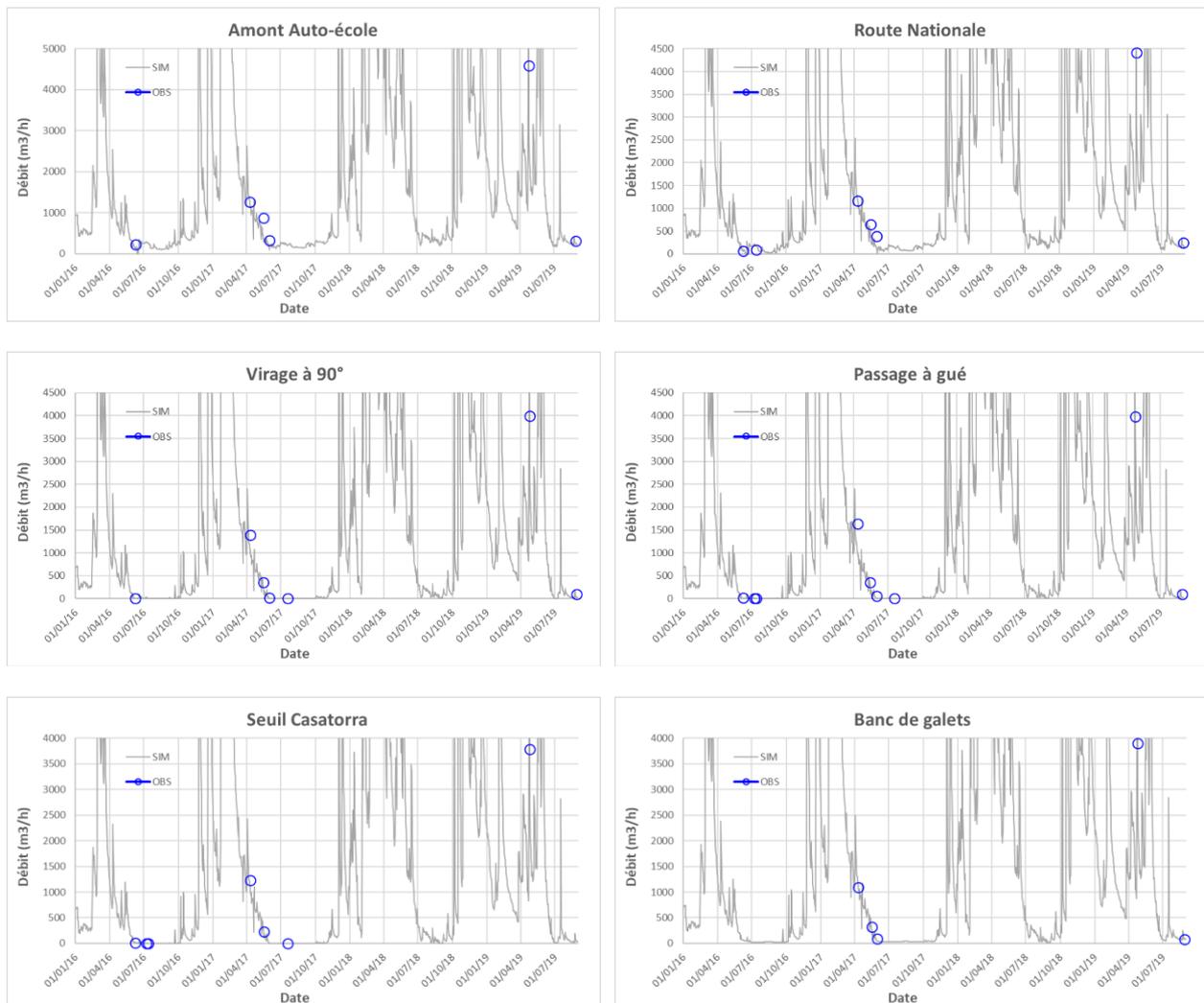
3.5. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DÉBITS DU BEVINCO

3.5.1. Simulations des débits

Les débits du Bevinco simulés par le modèle sont comparés aux résultats des campagnes de jaugeages différentiels conduites en 2016, 2017 et 2019 (Illustration 43). Pour la section la plus aval, dite Réserve, seule une mesure est disponible en 2017. Et, comme évoqué précédemment, l'année 2018 n'a pas fait l'objet de jaugeages.

Pour chaque section, les ordres de grandeur des débits apparaissent bien respectés, ainsi que les assecs observés en 2017 à partir de la section du virage à 90° (Illustration 43).

La Réserve naturelle de Biguglia a mis en place à partir de mai 2019 un suivi des hauteurs d'eau du Bevinco en amont immédiat du passage à gué. Une courbe de tarage a pu être établie au fil du temps (conversion de hauteurs en débit), mais les données n'ont pu être mises à notre disposition qu'après le calage du modèle. Il est cependant très intéressant de noter que le modèle reproduit très bien les débits observés (Cf. Illustration 44). À partir de mi-juin 2019, le cours d'eau est à sec et le capteur mis en place par la Réserve se retrouve *a priori* dénoyé (cf. évolution stable sur le graphe des hauteurs d'eau, Illustration 44), cela explique le décrochage du modèle qui simule correctement la période d'assec.



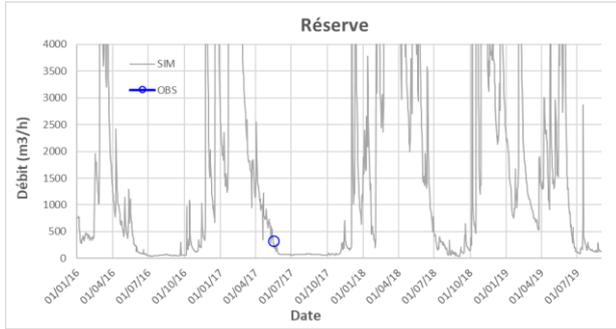


Illustration 43 - Débits du Bevinco simulés vs jaugeages différentiels (période 2016-2019).

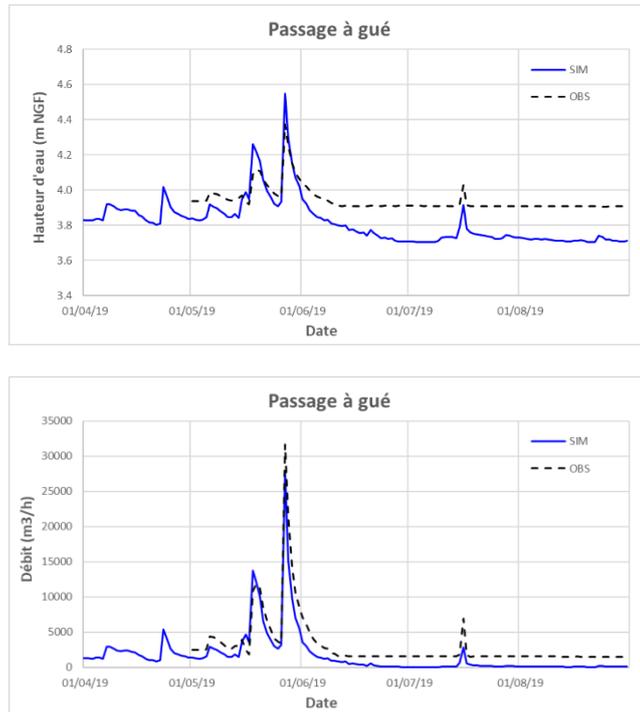


Illustration 44 - Hauteurs d'eau et débits simulés au passage à gué confrontés aux valeurs mesurées à la station hydrométrique de la Réserve (graphe du haut = hauteur d'eau, graphe du bas = débit).

3.5.2. Échanges nappe-rivière

Les cartes de l'illustration 45 présentent les débits d'échange simulés par le modèle entre la nappe et le Bevinco, pour deux situations hydrologiques contrastées : 31/12/2018 et 31/08/2019. Quand le flux échangé est négatif, l'écoulement se fait de la nappe vers la rivière.

Comme cela a été mis en évidence par les investigations de terrain en phase 1 de l'étude (Genevier *et al.*, 2021), le tronçon sur lequel la rivière s'infiltré vers la nappe s'étend bien de l'entrée dans la plaine alluviale jusqu'au virage à 90°. En aval, à quelques mailles près, les eaux souterraines contribuent à l'écoulement du Bevinco. Pour le modèle, cette alimentation se fait jusqu'à l'embouchure (Illustration 45), mais les flux simulés restent très faibles (< 1 L/s par maille sur l'extrémité aval).

Concernant les échanges avec l'étang, les résultats du modèle montrent une drainance ascendante (échanges de la nappe vers l'étang), en hautes eaux comme en basses eaux (Illustration 45). Les débits d'échange simulés restent modérés (< 1.4 L/s par maille). Pour les quelques mailles où la drainance est descendante (mailles bleu en bordure d'étang), les valeurs de débit ne sont pas significatives.

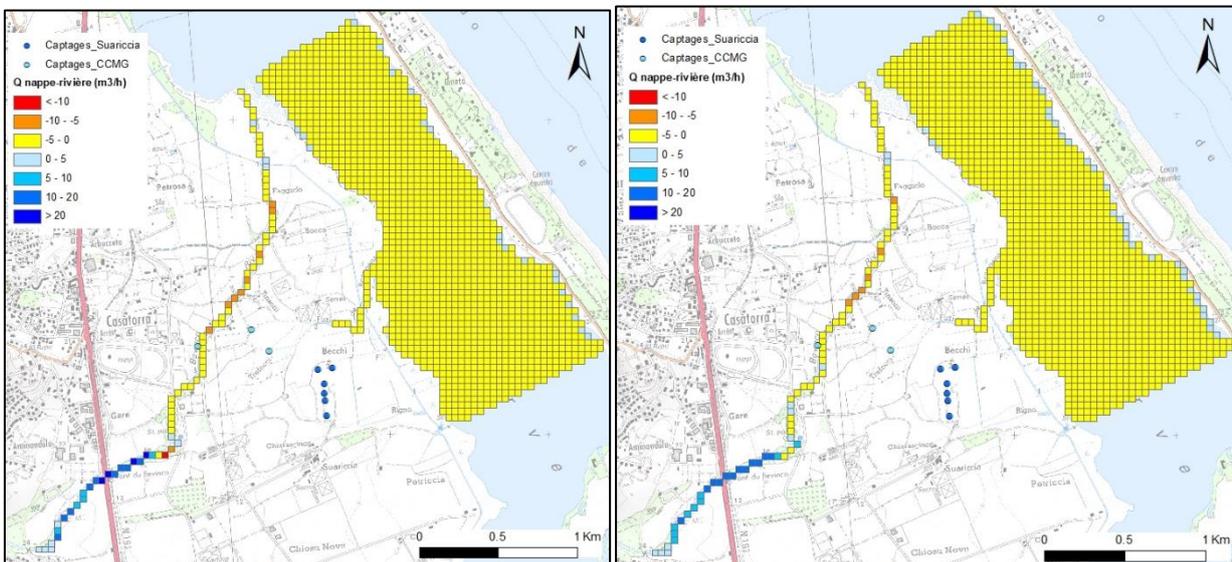


Illustration 45 - Echanges simulés entre les eaux souterraines et les eaux superficielles le 31/12/2018 (carte de gauche) et le 31/08/2019 (carte de droite) (si $Q < 0$, l'échange se fait de la nappe vers le cours d'eau ou l'étang et inversement si $Q > 0$).

3.5.3. Assecs du Bevinco

Afin de juger la capacité du modèle à reproduire les assecs du Bevinco, les observations de terrain relevées le 18/07/2017 ont été comparées aux débits simulés par le modèle après calage (Illustration 46). Les écoulements du cours d'eau ont été décrits sur le terrain de la façon suivante : écoulements visible faible, visible très faible, non visible (flaques) et en assec. Concernant les résultats du modèle, les mailles rivière sont indiquées en assec lorsque le débit simulé est inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit 1.4 L/s).

On constate que la correspondance est très bonne dans cet exemple du 18/07/2017. Les tronçons simulés en assec se superposent aux tronçons pour lesquels aucun écoulement n'a été observé sur le terrain. La seule différence concerne la disparition de l'écoulement qui est observée sur le terrain à partir du virage à 90° du Bevinco alors qu'elle est simulée légèrement plus en amont (Illustration 46). À partir de Tinsoni, un faible écoulement est ensuite à nouveau visible (sur le terrain comme dans le modèle). Celui-ci s'explique par le soutien des eaux souterraines, qui se fait ressentir même si l'aquifère est peu épais et peu productif dans ce secteur. Il faut noter que cette reprise de l'écoulement sur l'extrémité aval de la rivière a été observée lors de l'étiage 2016 (Genevier *et al.*, 2021).

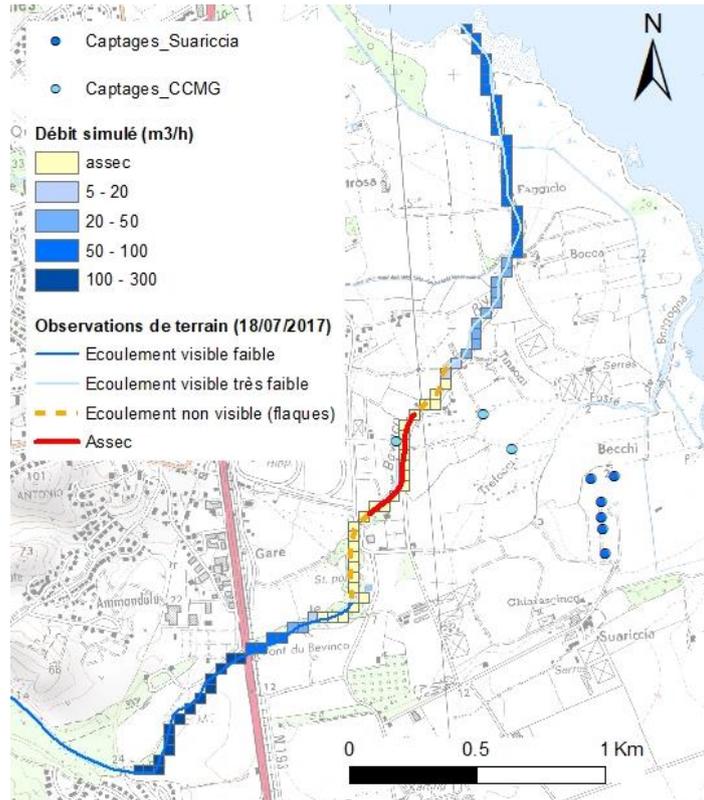


Illustration 46 - Débits du Bevinco simulés à la date du 18/07/2017.

Par ailleurs, le nombre de jours par mois où le Bevinco se retrouve en assec a été comptabilisé sur la période de modélisation (2009-2019) pour les différentes sections de jaugeage (assec considéré en deçà d'un débit simulé de 1.4 L/s). L'illustration 47 présente l'exemple du passage à gué.

En cohérence avec les observations de terrain, les longues périodes d'assec des étiages 2016 et 2017 sont bien mises en évidence par le modèle : de mi-juin à début octobre pour l'année 2017.

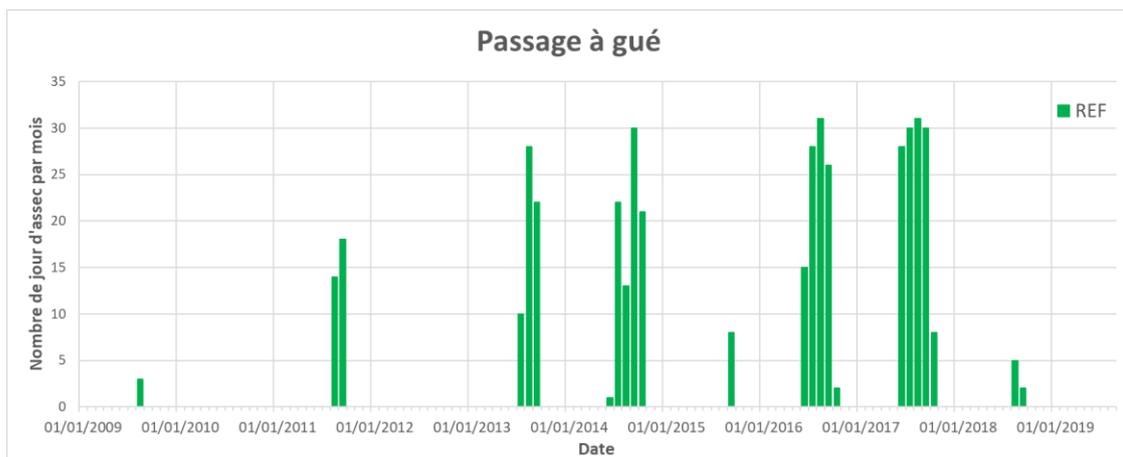


Illustration 47 - Nombre de jours d'assec par mois simulé au niveau du passage à gué sur la période 2009-2019.

3.6. RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DÉBITS DU DRAIN PRINCIPAL

Afin de vérifier la cohérence des débits simulés par le réseau de drainage modélisé, ceux-ci ont été comparés aux volumes pompés à la station de Petriccia. Les volumes fournis par la Réserve naturelle de Biguglia au pas de temps mensuel ont été corrigés (par une simple règle de trois) pour les rapporter au linéaire de canal modélisé. En effet, la station de Petriccia concerne 4169 m de canal (Genevier *et al.*, 2021) alors que seuls 1880 m sont couverts par l'emprise du modèle.

Pour les débits simulés à l'exutoire du drain principal, ont été considérés les débits des drains ainsi que les débits de débordement évacués vers le réseau de drainage. Le graphique de l'illustration 48 permet de comparer les résultats de la simulation aux volumes pompés à la station de Petriccia sur la période 2009-2019, station qui récupère les eaux de drainage du linéaire de canal modélisé (Cf. Illustration 1).

La dynamique saisonnière est très bien modélisée, en revanche, les valeurs ne sont pas directement comparables car le modèle n'est pas en mesure de prendre en compte les flux de débordement de l'étang. Les débits simulés en sortie du canal de la Réserve sont donc logiquement très largement inférieurs aux volumes drainés par la station de Petriccia (Illustration 48).

Comme observé sur le terrain (Genevier *et al.*, 2021 ; Orofino *et al.*, 2010), la nappe alluviale reste drainée par le canal de la Réserve en période d'étiage, même en condition de pompage.

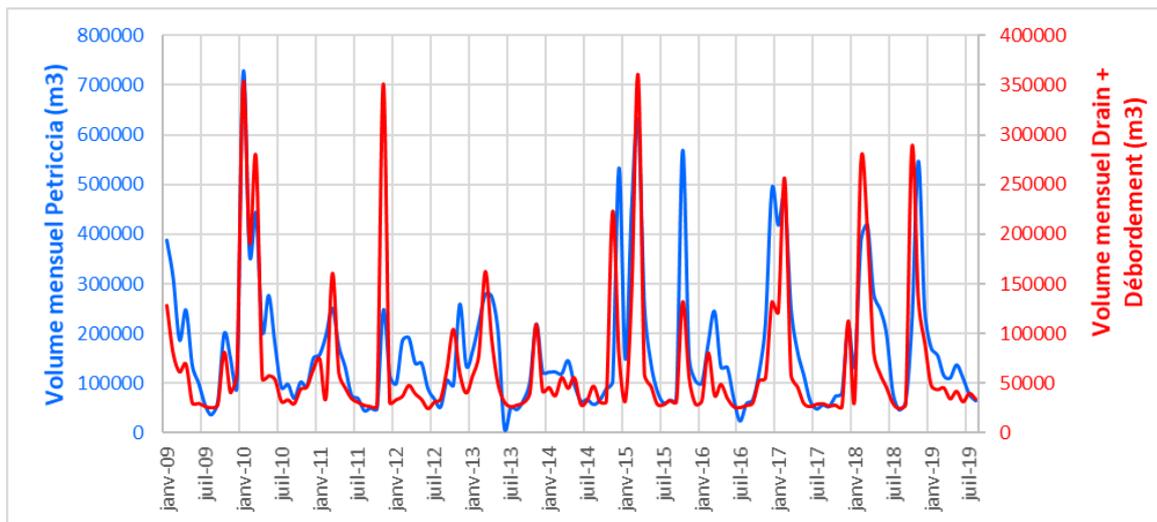


Illustration 48 - Débits simulés en sortie du réseau de drain (en rouge) comparés aux débits pompés à la station de Petriccia (en bleu).

3.7. BILAN HYDRAULIQUE DES FLUX

Le présent paragraphe s'attache à décrire les bilans hydrauliques du système aquifère du Bevinco tels que calculés par le modèle hydrodynamique, d'abord au pas de temps annuel (Illustration 49) puis au pas de temps mensuel pour les années hydrologiques 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019 (Illustration 51). L'année hydrologique considéré s'étend du mois de septembre de l'année n au mois d'août de l'année n+1. Par convention, les flux alimentant le système aquifère sont positifs.

Pour les bilans hydrauliques annuels, nous distinguons les limons superficiels (graphique du haut, cf. Illustration 49) et l'aquifère du Bevinco correspondant au regroupement des couches 3 à 5 du modèle, c'est-à-dire les deux horizons perméables et l'intercalaire argileux (couche 4).

L'alimentation de la nappe alluviale se fait majoritairement par l'infiltration des eaux du Bevinco sur le tronçon amont du cours d'eau. Sur la période modélisée, ce flux apparaît relativement stable au pas de temps annuel : il varie entre 2.27 Mm³/an (2015-2016) et 2.52 Mm³/an (2018-2019), à l'exception de l'année 2011-2012 qui se démarque avec un flux d'infiltration plus important (2.75 Mm³/an). Comme nous le verrons plus loin, cette infiltration plus marquée du Bevinco s'explique par un niveau de prélèvement plus élevé (Illustration 49).

La recharge directe de la nappe par les précipitations (au droit des affleurements) représente un flux beaucoup plus limité : de 0.20 Mm³/an en 2013/2014 ou 2015-2016 à 0.84 Mm³/an en 2014-2015. Il faut noter que la recharge par les précipitations des limons sus-jacents ne parvient à l'aquifère alluvial que de façon très marginale, la recharge étant en grande partie évacuée par débordement et par le réseau de drainage.

L'autre flux participant à l'alimentation de la nappe sont les apports depuis les limons sus-jacents ou encore les entrées par les limites littorales sous l'effet des pompages, mais ceux-ci restent très secondaires : avec des flux annuels moyens respectifs de 0.18 Mm³/an et 0.14 Mm³/an (Illustration 49).

Les échanges entre les limons et la nappe alluviale se font très majoritairement par drainance ascendante (Illustration 49).

L'exutoire naturel principal de la nappe est le Bevinco, avec un flux annuel qui varie entre 0.61 Mm³/an (2011-2012) et 0.93 Mm³/an (2012-2013). Ces flux n'intègrent pas les eaux de la nappe perchée des limons drainées par le cours d'eau lorsque ces derniers sont à l'affleurement. Les sorties par les limites littorales apparaissent peu significatives.

Enfin, les échanges avec l'étang de Biguglia sont limités et se font très majoritairement de la nappe vers l'étang via la couche des limons.

Concernant l'exploitation de la nappe pour l'alimentation en eau potable, les prélèvements représentent une part importante du bilan des flux, avec des volumes annuels qui varient de 0.84 Mm³/an (2013-2014) à 1.69 Mm³/an (2017-2018), à l'exception de l'année 2011-2012 qui se démarque avec un niveau de prélèvement plus important : 2.03 Mm³/an. En moyenne, les prélèvements représentent environ 50 % des flux de renouvellement de l'aquifère (recharge météorique + infiltration du Bevinco).

Il est intéressant de noter la bonne corrélation entre le flux de prélèvement annuel et les flux d'infiltration du Bevinco vers la nappe ($R^2=0.74$), et entre les flux entrant par la limite littorale ($R^2=0.84$) et les flux de drainance ascendante (alluvions => limons) ($R^2=0.87$) (Illustration 50). Une telle corrélation n'est pas observée pour toutes les autres composantes du bilan hydraulique.

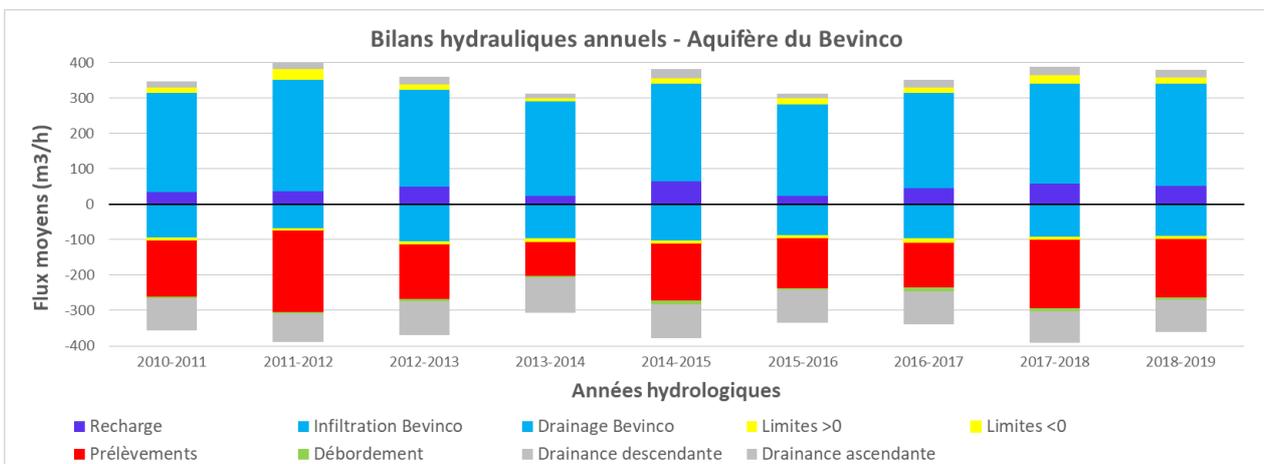
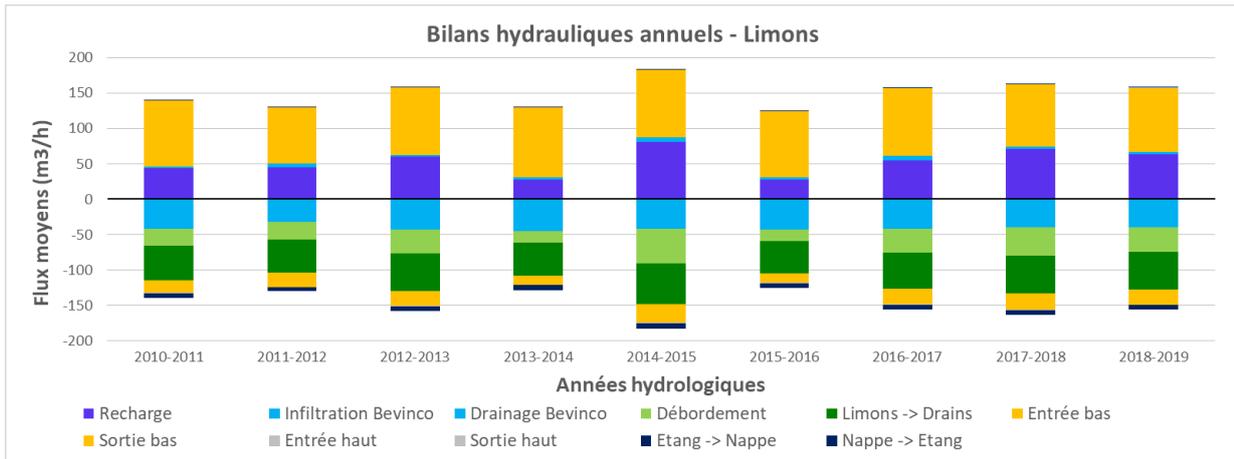


Illustration 49 - Evolution du bilan hydraulique annuel simulé par le modèle sur la période 2010-2019 (graphe du haut : couche des limons, graphe du bas : aquifère alluvial).

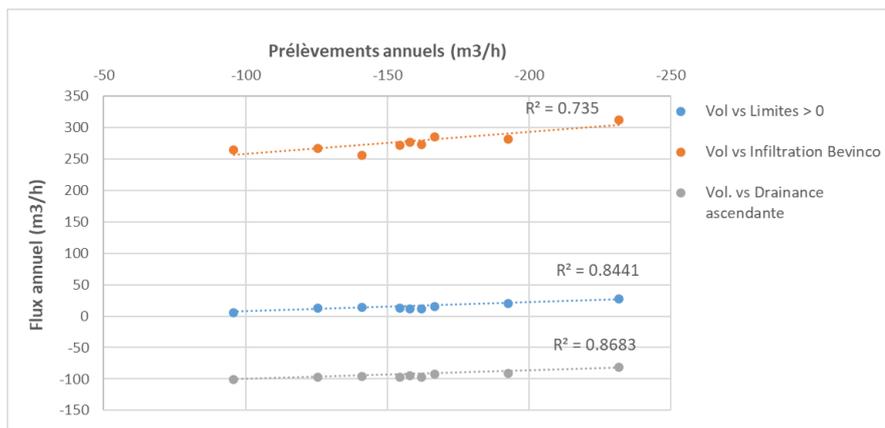


Illustration 50 - Relations entre le niveau de prélèvement dans l'aquifère et l'infiltration du Bevinco, les entrées par la limite littorale et les échanges entre la nappe et les limons sus-jacents au pas de temps annuel.

Si on s'intéresse à l'évolution du bilan hydraulique mensuel, on s'aperçoit que la dynamique est très contrastée d'une année à l'autre (Illustration 51). La variabilité des forçages explique ces contrastes :

- la période de recharge météorique modélisée est tout d'abord différente d'une année à l'autre : elle s'étend d'octobre à février pour l'année 2016-2017 (44.3 Mm³), de décembre à mai en 2017-2018 (57.0 Mm³) et d'octobre à février en 2018-2019 (51.9 Mm³). La période de recharge est identique pour les années 2016-2017 et 2018-2019 mais la variabilité mensuelle est totalement différente ;
- concernant l'infiltration du Bevinco, les flux mensuels modélisés sont relativement stables d'un mois à l'autre pour les années 2017-2018 et 2018-2019 tandis que les débits d'infiltration sont plus importants d'octobre à janvier pour l'année 2016-2017 ;
- les prélèvements exercés sur la nappe suivent enfin des dynamiques très différentes. Par exemple, les mois de plus forte exploitation sont octobre et mai pour 2016-2017 (> 200 m³/h en moyenne), novembre, juillet et août (> 300 m³/h en moyenne) pour 2017-2018 et octobre et novembre pour 2018-2019 (respectivement 241 et 439 m³/h).

Il en résulte des périodes de stockage / déstockage de l'aquifère alluvial qui varient au cours du temps (Illustration 51) :

- Cycle 2016-2017 : l'aquifère du Bevinco est globalement en situation de stockage de septembre 2016 à février 2017, en cohérence avec la période de recharge et des débits d'infiltration plus marqués sur cette même période. La situation s'inverse ensuite, avec un déstockage simulé de mars à août 2017 en l'absence de recharge par les précipitations et un niveau de prélèvement élevé à partir du mois de mai (à l'exception du mois de juillet qui présente un bilan positif). Dans le cas de l'aquifère du Bevinco, il faut être vigilant quant à la notion de stockage, car un bilan hydraulique positif peut être obtenu en raison de flux d'eau entrant par la limite littorale avec les problèmes d'intrusion saline que cela peut poser. C'est par exemple ce qui semble être observé pour le mois de juillet 2017 ;
- Cycle 2017-2018 : le bilan hydraulique est positif en octobre 2017 et de décembre 2017 à février 2018 alors qu'il est légèrement négatif en septembre et novembre 2017 en lien avec les prélèvements. Une phase de déstockage de l'aquifère est ensuite modélisée de mars à août 2018 (à l'exception d'un bilan positif en mai en raison d'un ratio Infiltration du Bevinco / Prélèvements plus favorable) ;
- Cycle 2018-2019 : l'aquifère serait en situation de stockage en septembre, octobre et décembre 2018 tandis qu'il déstockerait de l'eau en novembre en raison de sa forte exploitation. Par la suite, les bilans hydrauliques mensuels apparaissent proches de l'équilibre de janvier à août 2019.

Au pas de temps mensuel, les corrélations évoquées précédemment entre les prélèvements et le flux d'infiltration du Bevinco, la drainance ascendante et les flux entrant par la limite littorale sont moins bonnes mais restent acceptables pour ces deux derniers.

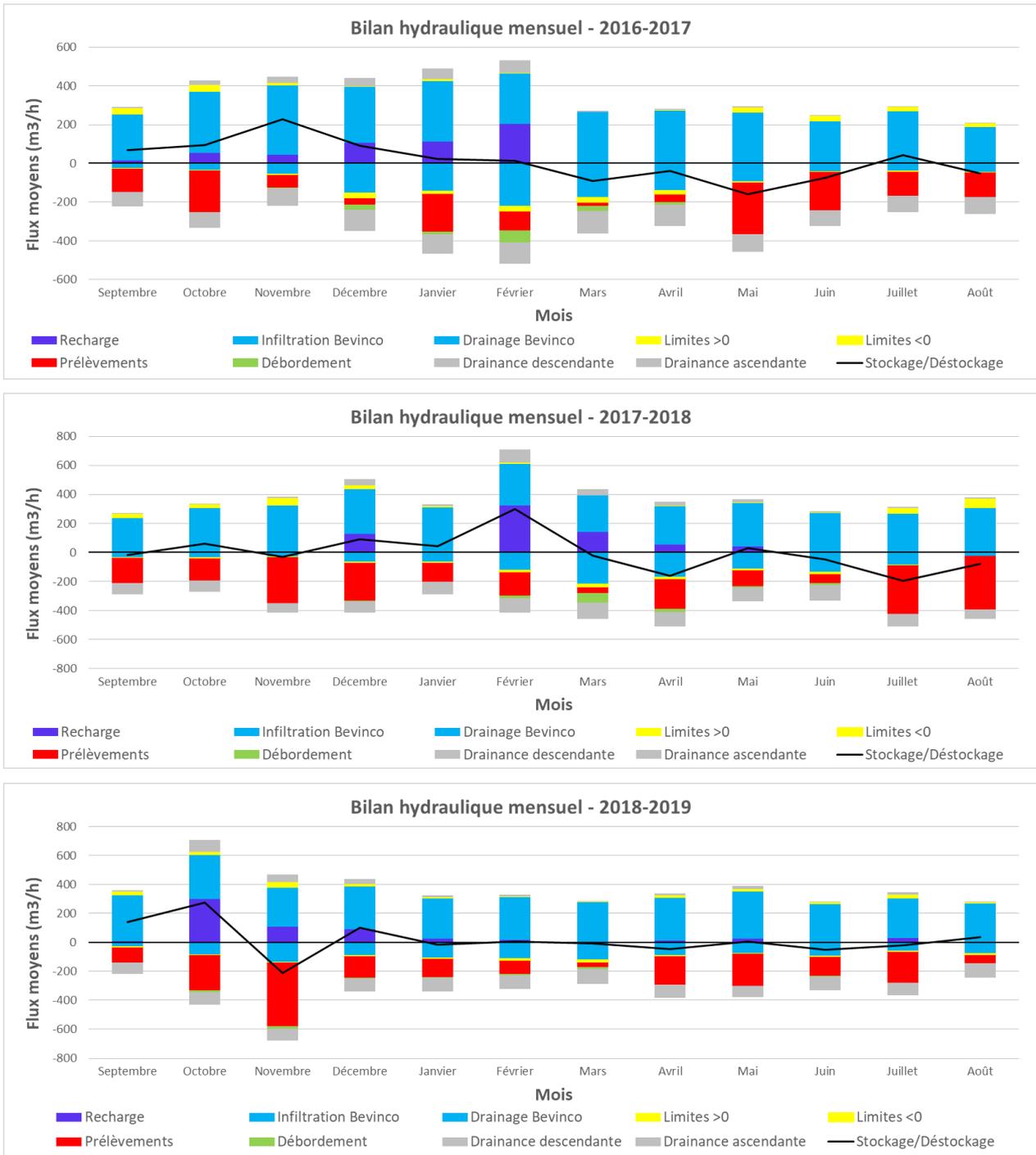


Illustration 51 - Evolution des bilans hydrauliques mensuels de l'aquifère alluvial simulés par le modèle pour les années hydrologiques 2016-2017, 2017-2018 et 2018-2019.

À titre d'illustration, le schéma suivant représente les différents termes du bilan hydraulique annuel moyen (2009-2019) associé à l'hydrosystème du Bevinco. Celui-ci apparaît globalement à l'équilibre (somme des flux entrant/sortant dans la nappe alluviale ~ 0).

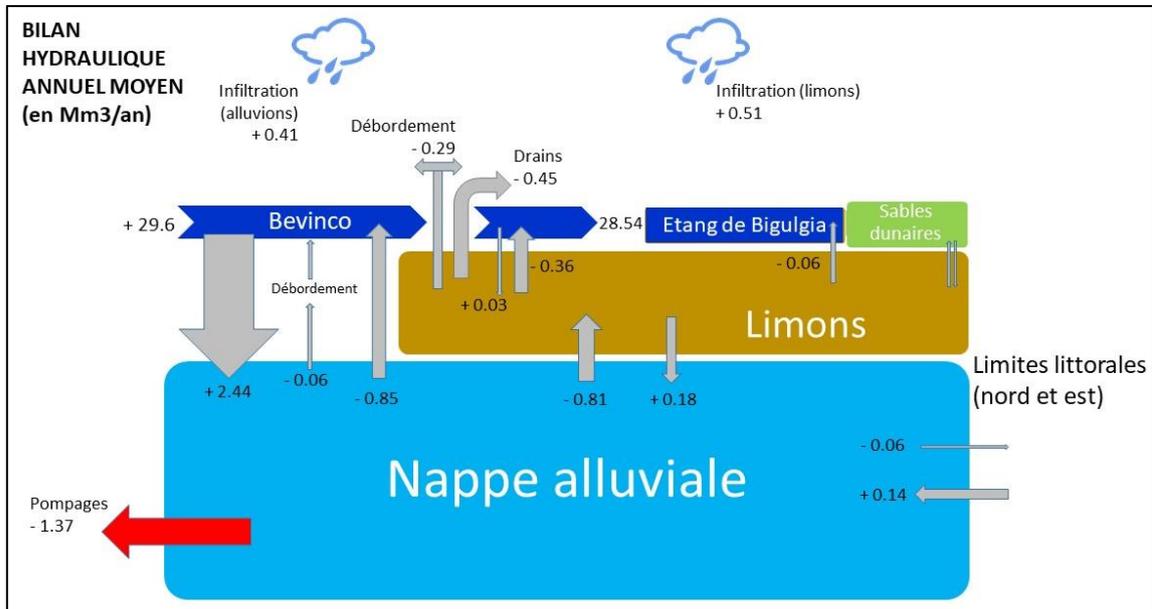


Illustration 52 - Schéma conceptuel du bilan hydraulique annuel moyen (2009-2019) de l'hydrosystème Bevinco.

3.8. PRINCIPALES LIMITES

Le modèle hydrodynamique présente des résultats tout à fait satisfaisants et apporte un éclairage nouveau sur le fonctionnement de l'hydrosystème du Bevinco. Ceci étant dit, il est important de garder à l'esprit les principales sources d'incertitude et limites, inhérentes à tout projet de modélisation hydrodynamique.

Tout d'abord, du point de vue des données d'entrée et des données de référence, plusieurs inconnues demeurent, pour les principales :

- les investigations de terrain réalisées en phase 1 ont montré la complexité du contexte géologique local avec une très forte hétérogénéité des faciès lithologiques au sein d'un même dépôt alluvionnaire et une absence d'information au droit de l'étang de Biguglia (Genevier *et al.*, 2021). La géométrie du modèle n'est ainsi pas contrainte par des observations de terrain sur une part importante de son emprise (sous l'étang et au-delà au nord) ;
- au-delà de la géologie, la zone couverte par l'étang, et plus largement le coin nord du modèle, est concerné par de nombreuses inconnues : piézométrie, échanges étang-eaux souterraines, salinité des eaux souterraines, etc. ;
- l'absence d'informations relatives aux pompages exercés sur les trois forages de la CCMG depuis le 05/08/2017 ;
- l'absence d'un suivi en continu des débits du Bevinco au niveau de la plaine alluviale, excepté sur les quatre derniers mois avec la surveillance mise en œuvre par la Réserve naturelle au niveau du passage à gué (mai à août 2019, dont une durée de plus de 2 mois où le capteur s'est retrouvé dénoyé). En complément, il faut souligner qu'une station hydrométrique a été implantée par la DREAL en amont de la plaine. Ces deux nouveaux points de surveillance pourront permettre de consolider le calage dans le futur ;
- si les nouveaux piézomètres réalisés dans le cadre de l'étude, complétés par une instrumentation d'ouvrages existants, permettent une bonne couverture de la nappe en termes de suivi des niveaux (hormis sous l'étang et dans le coin nord peu accessible), les périodes d'observation sont en très grande majorité de courte durée (> 1 année). Là aussi, le calage du modèle hydrodynamique pourrait être consolidé avec l'allongement des chroniques ;
- dans le même ordre d'idée, les chroniques de suivi des débits pompés sur les unités de Suariccia I et III ne sont disponibles au pas de temps journalier que depuis octobre 2018 et mars 2019 respectivement. Or, les résultats du calage montrent bien que seule des pompages journaliers permettent de reconstituer fidèlement les niveaux piézométriques du secteur. Par ailleurs, il est rappelé que le dispositif de pompage empêche de remonter aux débits unitaires de chaque ouvrage.

En outre, les phénomènes de débordement du Bevinco et de l'étang ne sont actuellement pas pris en compte par le modèle car le code de calcul ne le permettait pas au moment de l'étude. La recharge de la nappe induite par ces flux de débordement n'est donc pas modélisée. Les développements récents réalisés par le BRGM autorisent désormais à intégrer ces phénomènes. Des améliorations pourraient ainsi être attendues sur la reproduction de certains niveaux de très hautes eaux.

4. Modélisation hydrodispersive des chlorures

En préambule, il est important de noter que pour le présent projet, il avait été fait le choix, en première approche, d'étudier l'intrusion saline par une modélisation du transport de masse standard en zone saturée (modélisation dite hydrodispersive). Avec une telle approche, les effets densitaires ne sont notamment pas pris en compte.

Aussi, la modélisation de la salinité des eaux superficielles et souterraines ici mise en œuvre est une première approche.

4.1. CONCEPTS THÉORIQUES

Dans le cas monodimensionnel, l'équation du transport de masse standard s'écrit de la façon suivante (extrait de Thiéry, 2020) :

$$\frac{\partial(\theta_m \cdot C)}{\partial t} = \frac{\partial^2(D \cdot \theta_m \cdot C)}{\partial x^2} - \frac{\partial(q \cdot C)}{\partial x} - \frac{C \cdot \theta_m}{T_d} + q_m - (\theta_f + \text{RhoKD}) \cdot \frac{\partial S_v}{\partial t}$$

$\frac{\partial^2(D \cdot \theta_m \cdot C)}{\partial x^2}$ = Dispersion
 $-\frac{\partial(q \cdot C)}{\partial x}$ = Convection
 $-\frac{C \cdot \theta_m}{T_d}$ = Dégradation
 $-(\theta_f + \text{RhoKD}) \cdot \frac{\partial S_v}{\partial t}$ = Échanges

Avec :

- C = Concentration dans l'eau mobile (kg de soluté / m³ d'eau mobile)
- S_v = Concentration volumique dans la phase immobile, identique dans l'eau liée et dans le solide, (kg de soluté / m³ d'eau liée) et (kg de soluté / m³ de terrain)
- θ_m = Teneur en eau mobile [-]
- θ_f = Teneur en eau liée [-]
- RhoKD = Coefficient de partage volumique = teneur en eau équivalente du solide [-]
- q = Vitesse de Darcy [LT⁻¹]
- D = Coefficient de dispersion [L²T⁻¹]
- T_d = Constante de temps de dégradation [T]
Selon le cas T_d peut parfois s'appliquer également à la concentration S_v
- q_m = Flux massique injecté par unité de volume [M.L⁻³.T⁻¹]

Illustration 53 - Equation du transport de masse standard résolue par MARTHE dans un cas monodimensionnel (Thiéry, 2020).

Le transport de masse standard dans la nappe implique des mécanismes de convection, de dispersion, de dégradation et d'adsorption (échanges avec la matrice rocheuse et l'eau liée).

La convection traduit le déplacement de l'élément à la vitesse moyenne de l'eau, le flux associé dépend de la porosité dite cinématique qui correspond à la fraction d'eau mobile dans le milieu poreux.

La dispersion est liée à l'hétérogénéité du milieu poreux à petite et grande échelle. Elle contribue à étaler et diluer les concentrations. Le flux de dispersion est proportionnel au gradient de concentration C (loi de Fick). La dispersivité s'exprime dans les trois dimensions (dispersivités longitudinale, transversale et verticale).

Le soluté en solution dans l'eau peut se dégrader de façon exponentielle. Dans le code de calcul MARTHE, on peut par exemple utiliser le « temps de 1/2 vie » qui est le temps après lequel la moitié de la masse a été dégradée.

Afin de traduire le mécanisme d'adsorption, MARTHE permet de prendre en compte des échanges instantanés entre l'eau libre (porosité cinématique) et l'eau liée et le solide. Ces échanges sont appréhendés par l'intermédiaire d'un coefficient de partage volumique Kd ou l'application d'un coefficient de retard R (coefficient adimensionnel dans les deux cas). Ces deux derniers mécanismes (dégradation et adsorption) ont été négligés car peu sensibles pour le transport des chlorures.

En définitive, dans le cas de la modélisation des chlorures dans la nappe du Bevinco, les nouveaux paramètres de calage à considérer sont la porosité cinématique et les coefficients de dispersivité (§ 4.3.1). A ces derniers s'ajoutent les concentrations initiales dans l'hydrosystème (§ 4.3.2) ainsi que les concentrations aux limites du modèle (§ 4.3.3).

4.2. CONCENTRATIONS OBSERVÉES

Peu de suivi des concentrations en chlorures sont disponibles sur la zone d'étude, pour les eaux superficielles comme souterraines. Aussi, afin de disposer d'un maximum d'informations, nous nous sommes également appuyés sur les suivis de la conductivité électrique de l'eau, en particulier ceux mis en place dans le cadre du présent projet.

Pour ce faire, tous les couples de valeurs *concentration en chlorures – conductivité électrique* disponibles ont été compilés à partir des différentes sources d'information disponibles :

- les données issues du réseau national de suivi au titre du contrôle sanitaire sur les eaux brutes utilisées pour la production d'eau potable géré par l'ARS et bancarisées dans la base de données nationale SISE-Eaux. Ces données concernent les ouvrages AEP de la CCMG et d'Acqua Publica ;
- les données disponibles sur ADES issues d'autres réseaux de surveillance de la qualité des eaux souterraines ;
- les données des campagnes de prélèvement menées par l'Université de Corse en avril 2015 dans le cadre de ses travaux de recherche (Erostate *et al.*, 2019) ;
- les données des deux campagnes de prélèvement qui avaient été réalisées dans le cadre de l'étude de l'Etang de Biguglia par le BRGM (Orofino *et al.*, 2010) ;
- une campagne de prélèvement complémentaire initialement non prévue dans le cadre de l'étude a été menée par le BRGM en avril 2019. Cinq prélèvements ont été réalisés et concernent LIM1, LIM5, PZ4, Puits sel et le Fossé de Borgogna. Les paramètres analysés sont les chlorures, le sodium et les nitrates (résultats complets des analyses disponibles à l'Annexe 2).

Pour les eaux souterraines, une relation polynomiale d'ordre 3 permet de relier les deux variables avec un très bon coefficient de détermination (Illustration 54) : $[Cl] = -2.10^{-9}x^3 + 5.10^{-5}x^2 + 0.092x$ ($R^2=0.996$).

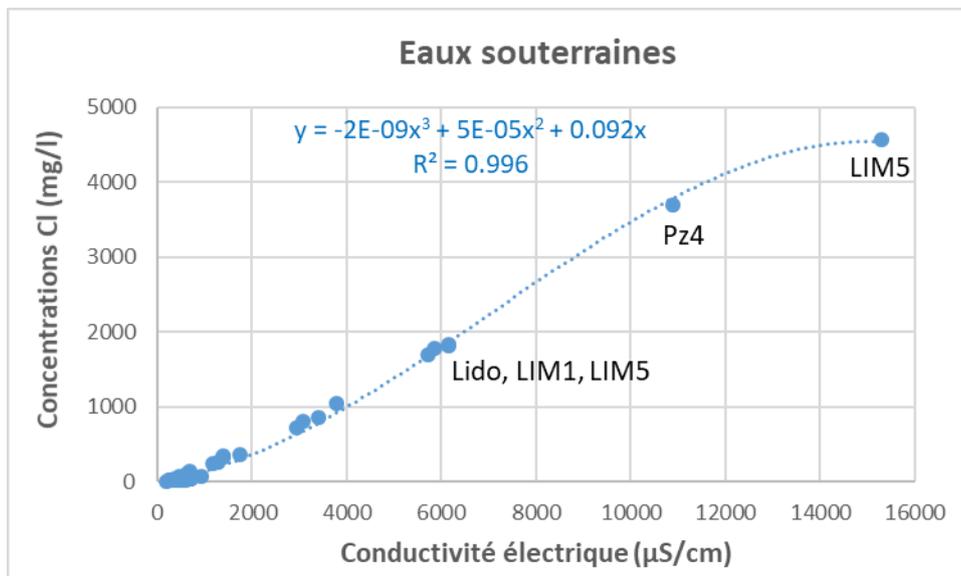


Illustration 54 - Concentration en chlorure vs conductivité électrique pour les eaux souterraines de la zone d'étude.

La relation calculée sur la totalité des échantillons est moins robuste pour les faibles concentrations (< 50 mg/l), avec globalement une surestimation des concentrations. C'est pourquoi, une relation polynomiale différente a été retenue pour les faibles valeurs (Illustration 55) : $[Cl^-] = 1.10^{-7}x^3 - 1.10^{-4}x^2 + 0.0798x$.

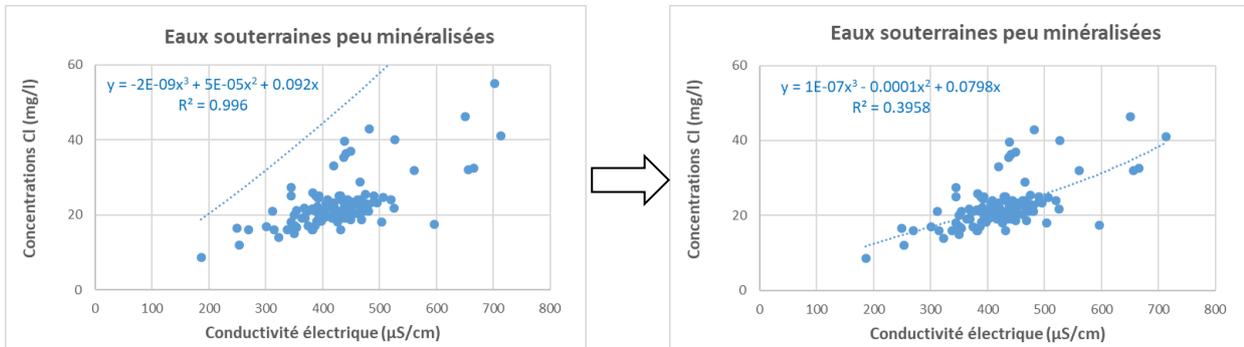


Illustration 55 - Concentration en chlorures vs conductivité électrique pour les eaux souterraines faiblement minéralisées.

En définitive, pour le calage des concentrations en chlorures, les données de référence suivantes sont disponibles :

- mesures ponctuelles des concentrations en chlorures pour de nombreux ouvrages, mais en nombre très limité : LIM1, LIM5, Puits_sel, 11072X0058/SUER, puits sur le Lido (Pineto, Haras et Casone), puits du champ captant d'Acqua Publica, Dolesi Ouest, Dolesi Est, Tinsoni et Bocca 2 ;
- chroniques de conductivité électrique continues pour les ouvrages Pz1, Pz2 et Pz4 depuis le 30/11/2018, Pz5 depuis le 26/07/2018, Casatorra depuis le 22/08/2017, Chiaragginco depuis le 26/04/2017 et le puits Suarriccia III-7 depuis le 30/10/2018. Il faut ici souligner que les chroniques disponibles sont une nouvelle fois de courte durée ;
- plusieurs campagnes de mesure de la conductivité électrique des eaux du Bevinco, du canal de la Réserve naturelle et du fossé de Borgogna réalisées en 2017 et 2019 (pas de mesure en 2018).

4.3. CALAGE DES CONCENTRATIONS EN CHLORURES

Les hypothèses de construction décrites ci-après reposent sur le schéma conceptuel d'origine des chlorures élaboré lors de la première phase de l'étude (Genevier *et al.*, 2021) et dont les principaux éléments ont été rappelés en introduction (§ 1.4.2).

4.3.1. Concentrations extérieures

Il s'agit de la concentration à laquelle se trouve l'eau qui rentre dans l'hydrosystème modélisé. Dans notre cas, les apports d'eau extérieure peuvent se faire par les limites à charges hydrauliques imposées sur le littoral (cf. § 2.3.1), en condition de pompage, par le Bevinco à l'entrée du modèle et par la recharge météorique.

a) Concentrations des eaux souterraines entrant par les limites littorales

Les valeurs des concentrations extérieures des eaux souterraines ont été ajustées lors du processus de calage du modèle : elle est de 20 000 mg/l pour la limite nord et de 6 500 mg/l pour la limite est (axe du champ captant). Cette dernière est contrainte par les valeurs mesurées sur le piézomètre Pz4 immédiatement en amont de la limite.

b) Concentrations des eaux du Bevinco à l'entrée du modèle

Les concentrations en chlorures des eaux du Bevinco sont mesurées à la station de surveillance de Rutali (n° 06215000), les données ont été exportées depuis le portail national des données sur la qualité des eaux de surface Naiades (<http://www.naiades.eaufrance.fr>). À partir de ces mesures ponctuelles (fréquence semestrielle jusqu'en 2014 puis mensuelle ensuite), une chronique continue des concentrations a été reconstituée (Illustration 56).

Afin de tenir compte de la minéralisation acquise entre la station située sur la partie amont du bassin versant et la plaine et pour se rapprocher des mesures disponibles sur la plaine, les valeurs de la chronique ont finalement été augmentées de 5 mg/l (Cf. courbe bleu foncé, Illustration 56).

À l'entrée du modèle, les eaux de la rivière présentent ainsi des concentrations en chlorure comprises entre 11.5 et 22 mg/l, pour une valeur moyenne de 17.1 mg/l.

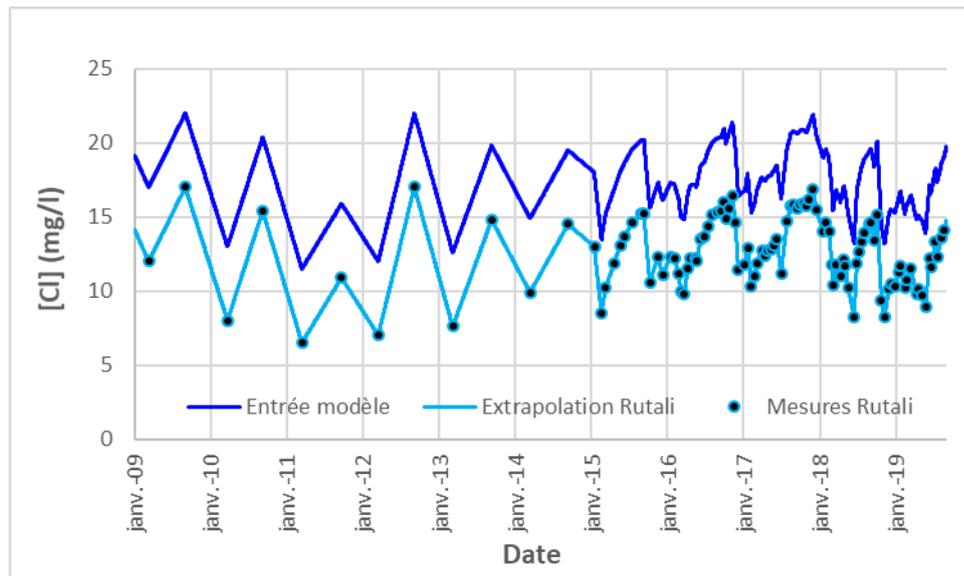


Illustration 56 - Chronique de concentrations en chlorures reconstituée pour les eaux du Bevinco à l'entrée du modèle.

c) Concentration de l'eau de la recharge

Par défaut, la concentration des eaux de pluie a été fixée à 20 mg/l.

4.3.2. Concentrations imposées

À l'instar d'une maille à charge imposée, il est possible d'imposer la concentration dans n'importe quelle maille du domaine. Cela revient à introduire le flux massique (calculé par MARTHE) nécessaire au maintien de cette concentration compte tenu des concentrations des mailles voisines.

Il a été nécessaire de recourir à des concentrations imposées au niveau du coin nord-est du modèle afin de retranscrire la salinisation avérée de ce secteur (en aval de Pz5). Une concentration de 6 500 mg/l a été imposée en couche 5 (cf. secteur concerné, Illustration 57).

D'autres pistes ont été étudiées mais elles se sont toutes avérées infructueuses : salinisation par le rentrant salé du Bevinco et/ou par la limite littorale nord et/ou par l'étang. Il n'a pas été possible de reproduire les concentrations observées sur Pz5 à partir de ces sources de contamination. Il est fort probable que la période de modélisation (2009-2019) ne soit pas suffisante pour reproduire une progression lente du front salé. Des investigations de terrain complémentaires pourraient permettre de vérifier s'il s'agit bien d'eaux salées anciennes.

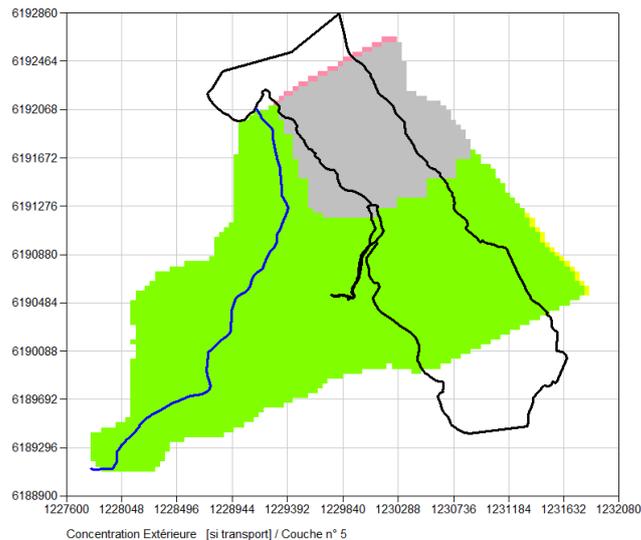


Illustration 57 - Domaine de l'aquifère à concentration imposée en chlorures (en gris, valeur imposée à 6 500 mg/l, en vert : valeur initiale à 20 mg/l).

4.3.3. Conditions initiales de salinité

Les résultats du transport se sont avérés fortement dépendants des concentrations initiales en chlorures au sein des différentes couches du modèle. L'absence de toute information au droit de l'étang représente une nouvelle fois un obstacle significatif. Dans l'axe du champ captant, la concentration moyenne est de 5 000 mg/l au droit de Pz4 et de 20 mg/l sur Pz1, entre les deux le gradient de concentration est inconnu, or il est clair que celui-ci va impacter directement la propagation éventuelle d'un front salé.

Après différents tests, le champ de concentrations retenu finalement pour l'aquifère (couche 5) est présenté par l'illustration 58. En aval du champ captant, la courbe d'isovaleur de concentration 250 mg/l est ainsi positionnée au milieu de l'étang au lancement de la simulation (01/01/2009). On peut noter une intrusion saline plus marquée dans le coin nord, en cohérence avec le schéma conceptuel.

Pour les eaux superficielles, les concentrations initiales sont un peu plus contraintes grâce à des mesures in situ pour le Bevinco, le fossé de Borgogna et l'étang :

- le rentrant salé observé de l'embouchure du Bevinco jusqu'au banc de galets est représenté par des concentrations imposées variant de 20 000 mg/l à l'embouchure à 5 000 mg/l au niveau du banc de galets (Illustration 59) ;

- les concentrations des eaux de l'étang de Biguglia et du fossé de Borgogna sont également imposées constantes au cours du temps : au nord (à proximité du grau), les concentrations sont de 20 000 mg/l et évoluent régulièrement à la baisse vers le sud, jusqu'à atteindre 8 000 mg/l (Illustration 59).

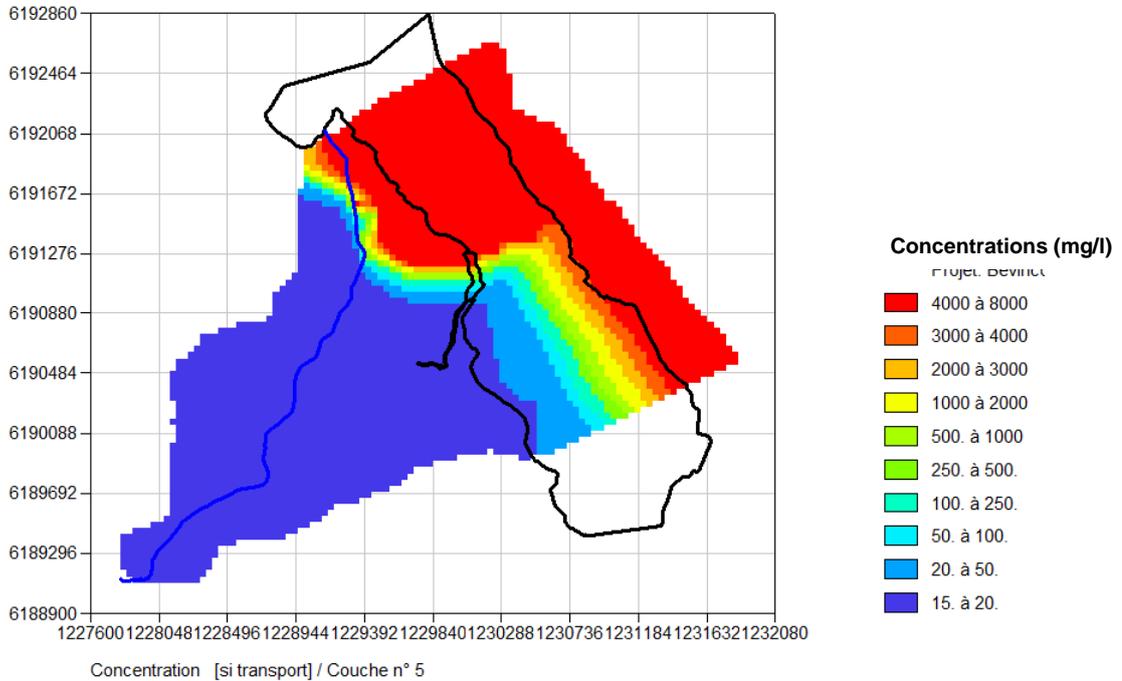


Illustration 58 - Concentrations en chlorures initiales au sein de l'aquifère Fy12 (couche n°5 du modèle).

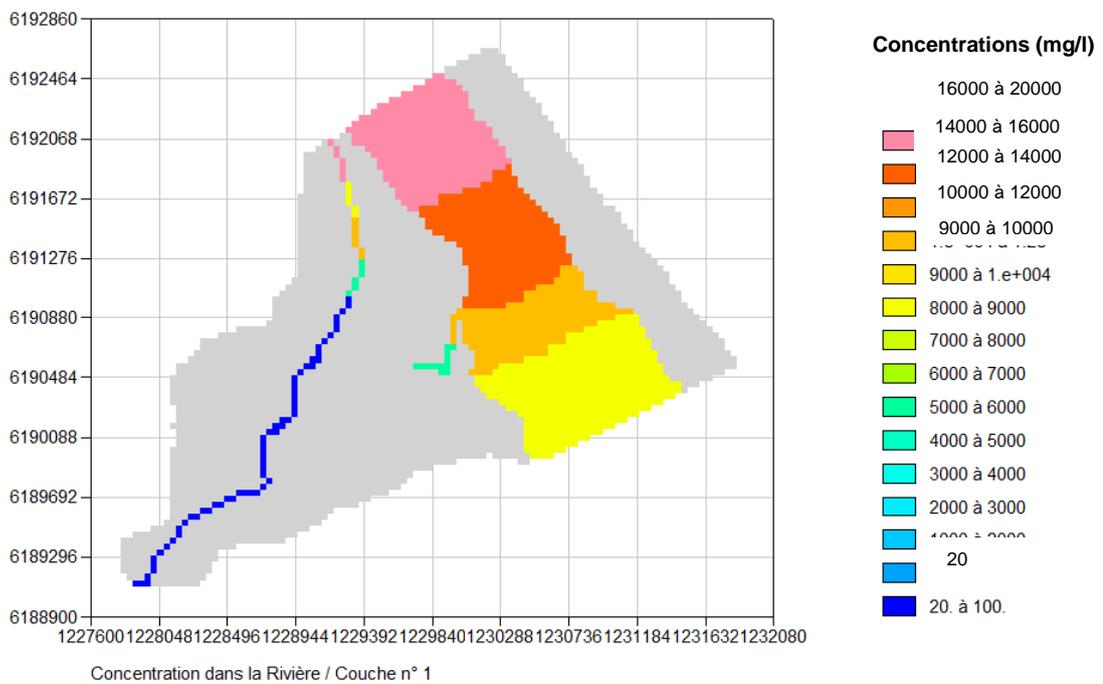


Illustration 59 - Concentrations en chlorures initiales dans les eaux superficielles.

4.4. RÉSULTATS OBTENUS

À titre d'exemple, l'illustration 60 présente la carte des concentrations en chlorures simulée par le modèle dans l'aquifère Fy12 au 31/08/2019. Par rapport aux conditions initiales (§ 4.3.3), le modèle simule une légère progression du front salé en provenance du littoral. Celle-ci s'explique par les différents cycles de pompage sur le champ captant d'Acqua Publica.

Comme observé sur les piézomètres de surveillance Pz1 et Pz2 (entre les forages et l'étang), les concentrations simulées restent systématiquement faibles (≤ 20 mg/l). Dans cet exemple, la courbe d'isovaleur de concentration à 250 mg/l est située à une distance de l'ordre de 500 m de Pz1 (Illustration 60).

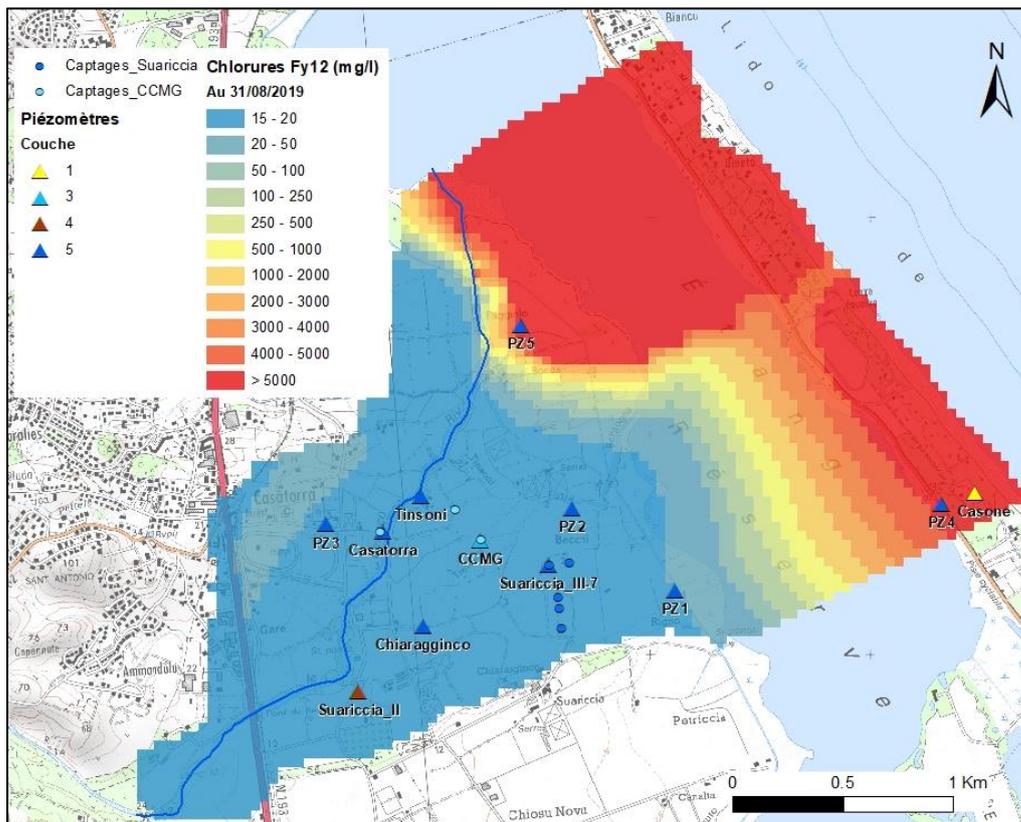


Illustration 60 - Carte des concentrations en chlorures simulée de la nappe alluviale du Bevinco au 31/08/2019.

Sur la partie amont de la plaine, les concentrations en chlorures (contrôlées par les eaux de recharge et les eaux du Bevinco) sont globalement bien reproduites, même si la dynamique des fluctuations n'est pas toujours correcte (Illustration 61). Cela pourrait en partie être lié au fait que, faute d'informations, les concentrations en chlorures des eaux de pluie ont été considérées constantes au cours du temps (20 mg/l).

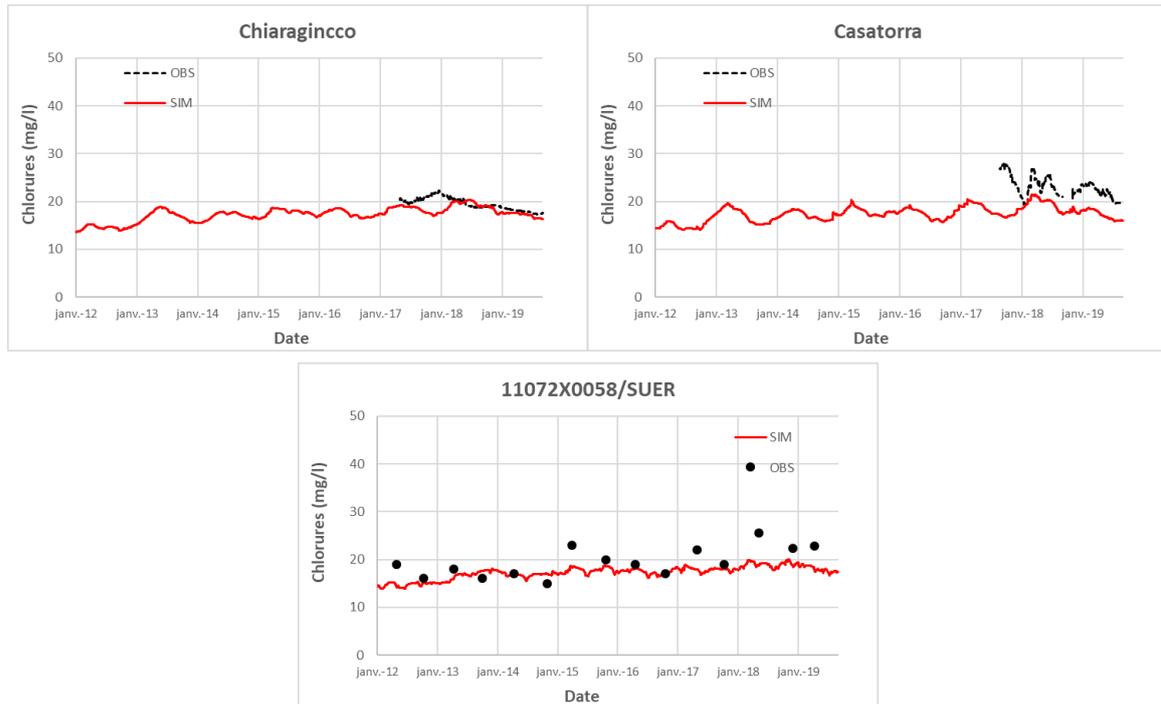


Illustration 61 - Concentrations en chlorures simulées et observées sur la partie amont de la nappe alluviale.

L'illustration 62 présente les chroniques de concentration simulées et observées pour certains puits du champ captant (SIII-7, SI-1 et SI-4) et pour les nouveaux piézomètres suivis en conductivité (Pz1, Pz2, Pz4 et Pz5). Les deux premiers graphiques concernent le puits SIII-7, avec à gauche la chronique issue du suivi de la conductivité mis en place fin 2018 et à droite les mesures réalisées ponctuellement depuis 2009 et mises à disposition en amont du calage.

On peut tout d'abord noter que le modèle ne parvient pas à représenter les variations observées sur le puits SIII-7. Au moment du calage, seule une mesure pouvant se démarquer des autres était disponible, à savoir une concentration de 97 mg/l le 11/09/2012 (Illustration 62). À noter que ces résultats d'analyse représentent *a priori* un mélange d'eaux issues des puits 7 et 8. À cette date, les débits de pompage sont effectivement importants, avec au total un débit moyen de 500 m³/h sur les 6 forages pendant une semaine (débits journaliers non connus).

Depuis que le puits est suivi en conductivité (01/11/2018), de tels niveaux de prélèvement ont été atteints à plusieurs reprises, mais sans générer une augmentation de la conductivité électrique de l'eau pompée. Compte tenu de ces incohérences et de l'absence de données (concentrations et débits de pompage) lors des épisodes des années 70 et 80 pour lesquels des contaminations en chlorures ont été observées (non documentées), une opération de pompage forcé a été mise en œuvre en 2020, en concertation étroite avec Acqua Publica. Les données acquises ne pouvaient pas être prises en compte dans le calage du modèle, mais l'opération avait pour objectif de vérifier l'influence des pompages sur la minéralisation de la nappe (suivie en continu sur SIII-7, PZ1 et PZ2). En effet, depuis le début des suivis mis en place, aucune augmentation significative de la conductivité électrique de la nappe n'a été observée.

Or, les résultats de cette opération de pompage forcé amènent finalement plus de questions que de réponses, comme évoqué en introduction : l'augmentation des concentrations en chlorures n'est relevée que sur la bêche alimentée par les puits 7 et 8 (pas d'augmentation sur les quatre puits sud) tandis que les conductivités restent stables sur les deux piézomètres voisins Pz1 et Pz2, implantés à l'aval. Une influence du fossé de Borgogna et une salinisation depuis la surface (via les limons) est supposée mais mérite d'être investiguée (analyse détaillée dans le rapport de phase 1, Genevier *et al.*, 2021).

Plus en aval, les concentrations moyennes en chlorures sont simulées par le modèle sur Pz4 et Pz5, mais celui-ci rencontre des difficultés pour retranscrire les variations observées. Au droit de Pz4, la conductivité et les débits de pompage apparaissent anti-corrélés : la conductivité baisse lors de la mise en service du champ captant. Cette observation pourrait s'expliquer par un problème de conception de l'ouvrage qui mettrait en communication l'aquifère alluvial et les sables sus-jacents moins minéralisés. Les charges hydrauliques simulées par le modèle générant une drainance ascendante (comme observé sur le terrain), cet apport d'eau au droit du proche puits ne peut pas être modélisé.

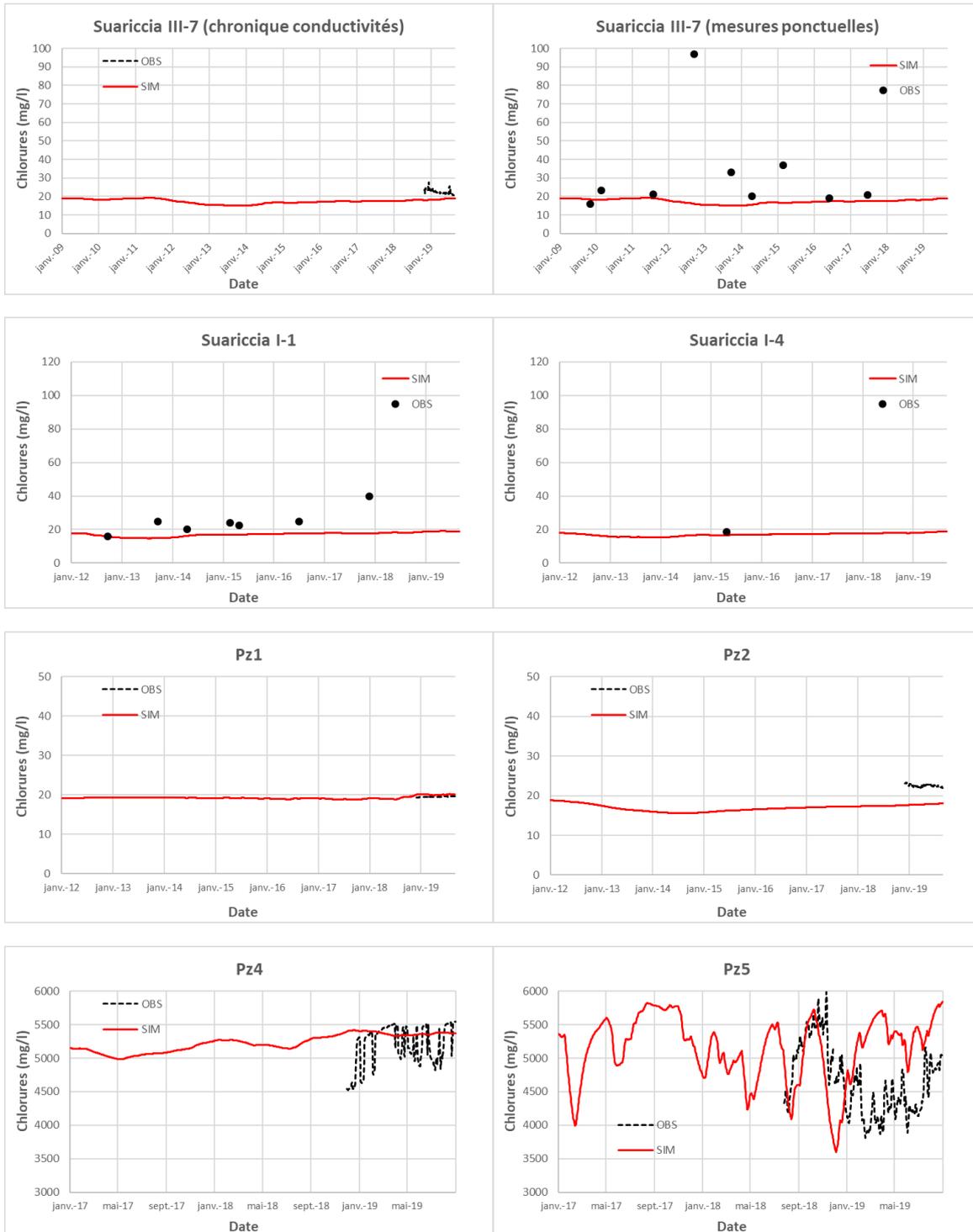


Illustration 62 - Concentrations en chlorures simulées et observées au droit du champ captant et en aval.

4.5. CONCLUSIONS

Le calage du modèle hydrodispersif n'a pas été suffisamment contraint sur la période simulée (2009 – août 2019), notamment en raison de l'absence de suivi des concentrations en chlorures ou en conductivité pendant des épisodes d'augmentation des concentrations. Les phénomènes de salinisation des puits 7 et 8 n'ont été portés à la connaissance du BRGM que très récemment, après le processus de calage du modèle. En complément, les principales limites du modèle hydrodispersif pouvant être soulignées sont :

- les limites évoquées pour le modèle hydrodynamique qui bien entendu impactent le transport de masse ;
- l'absence de suivi des chlorures couplée à un suivi des conductivités électriques de la nappe de courte durée (< 1an). La conversion des conductivités en chlorures est inévitablement entachée d'incertitudes ;
- la forte sensibilité des résultats aux concentrations initiales affectées aux eaux souterraines et le fait qu'elles soient totalement inconnues au droit de l'étang. Un calage sur des variations de conductivités en Pz1 et Pz2 aurait permis de mieux contraindre ces conditions initiales ;
- des mécanismes de salinisation non maîtrisés qu'il reste à caractériser plus précisément au niveau des puits 7 et 8. Des facteurs anthropiques comme par exemple les défauts d'étanchéité des ouvrages ne pourront par ailleurs pas être pris en compte par le modèle. En l'état actuel, le phénomène modélisé à l'origine de la salinisation est la progression du front salé en provenance du littoral ;
- l'approche de modélisation par transport de masse standard n'est peut-être pas adaptée, même si aucune observation de terrain ne plaide pour une modélisation densitaire (pas d'interface eau douce – eau salée mise en évidence par les diagraphies de conductivité, même en bordure littorale), beaucoup plus complexe à mettre en place.

En conclusion, il n'apparaît pas possible de s'appuyer sur le modèle hydrodispersif actuel pour définir des règles de gestion du champ captant. Les scénarios d'exploitation détaillés dans le prochain chapitre seront donc analysés essentiellement à la lumière des impacts hydrodynamiques.

Seules la mise en place de suivis complémentaires, la poursuite des suivis actuels et une étude de caractérisation des contaminations observées sur les puits 7 et 8 pourront permettre de reprendre et d'améliorer le modèle hydrodispersif.

5. Exploitation du modèle du Bevinco

5.1. CHOIX DES SCÉNARIOS SIMULÉS

Le choix des cinq scénarios à simuler, inscrits au programme technique de l'étude, a été arrêté en concertation étroite avec les membres du Comité de Pilotage. Le tableau suivant présente les principales caractéristiques de chacun des scénarios retenus.

SCÉNARIOS		Période simulée	Prélèvements sur le Bevinco (Lancone)	Prélèvements en nappe - CCMG	Prélèvements en nappe - Acqua Publica	Débits du Bevinco à l'entrée du modèle	Pluie / ETP
N°	INTITULÉ						
1	Conditions naturelles	2009-2019	0 sur toute la période	0 sur toute la période	0 sur toute la période	calculés en l'absence de prélèvement sur le Bevinco	réelles
2	Scénario de crise	2009-2019	prélèvements réels 2009-2019	prélèvements réels 2009-2019	Les volumes mensuels du Golo de l'année 2014 (plus fort prélèvement connu sur 2010-2019, soit 1.7 Mm ³ /an) sont répartis de façon homogène sur les 6 puits d'AP pour toutes les années de la période	inchangés	réelles
3	Optimisation du champ captant Acqua Publica	2009-2019	réels	augmentation de 30%	Débits augmentés par essai-erreur de mai à novembre sur la base de la répartition des volumes achetés à l'OEHC en 2014	inchangés	réelles
4	Prise d'eau Lancone étage	2009-2019	calculés sur la base de la répartition des volumes achetés à l'OEHC en 2014 avec respect d'un débit minimal de 85 l/s	réels	réels	calculés en soustrayant les pompages supplémentaires de mai à novembre	réelles
5	Stockage hivernal	2009-2019	Prélèvements supplémentaires calculés sur la base d'un stockage de 1.2 Mm ³ réparti sur 5 mois, soient 92 l/s supplémentaires de décembre à avril, avec respect d'un débit minimal de 85 l/s	réels	réels	calculés en soustrayant les pompages supplémentaires de décembre à avril	réelles

Illustration 63 - Tableau récapitulatif décrivant les 5 scénarios d'exploitation simulés.

5.2. SCÉNARIO 1 – CONDITIONS NATURELLES

Dans ce premier scénario, la période 2009-2019 est simulée sans aucun prélèvement sur l'hydrosystème, que ce soit en nappe ou sur le Bevinco. L'objectif est ici de reconstituer les conditions naturelles et d'évaluer ainsi l'impact de l'exploitation actuelle sur les débits du Bevinco et sur les niveaux piézométriques de la nappe alluviale.

En entrée du modèle, les débits du Bevinco ont été modifiés de façon à ne plus déduire les volumes prélevés.

5.2.1. Impact sur les niveaux de nappe

L'illustration 65 présente une cartographie de la remontée du niveau de la nappe en lien avec l'absence de prélèvement à la date du 31/12/2018. À cette date, le champ captant de Suariccia était à l'arrêt, seuls les forages de la CCMG étaient en service (débit journalier moyen de 21 m³/h). Concernant la prise d'eau du Lancone, le débit de prélèvement moyen était de 133 m³/h.

Dans ces conditions (hautes eaux + arrêt du champ captant), on peut noter que l'élévation du niveau de la nappe est limitée : elle est inférieure à 20 cm sur la zone d'infiltration du Bevinco tandis qu'elle est maximale dans la zone d'influence des forages de la CCMG (environ 50 cm) (Cf. Illustration 65).

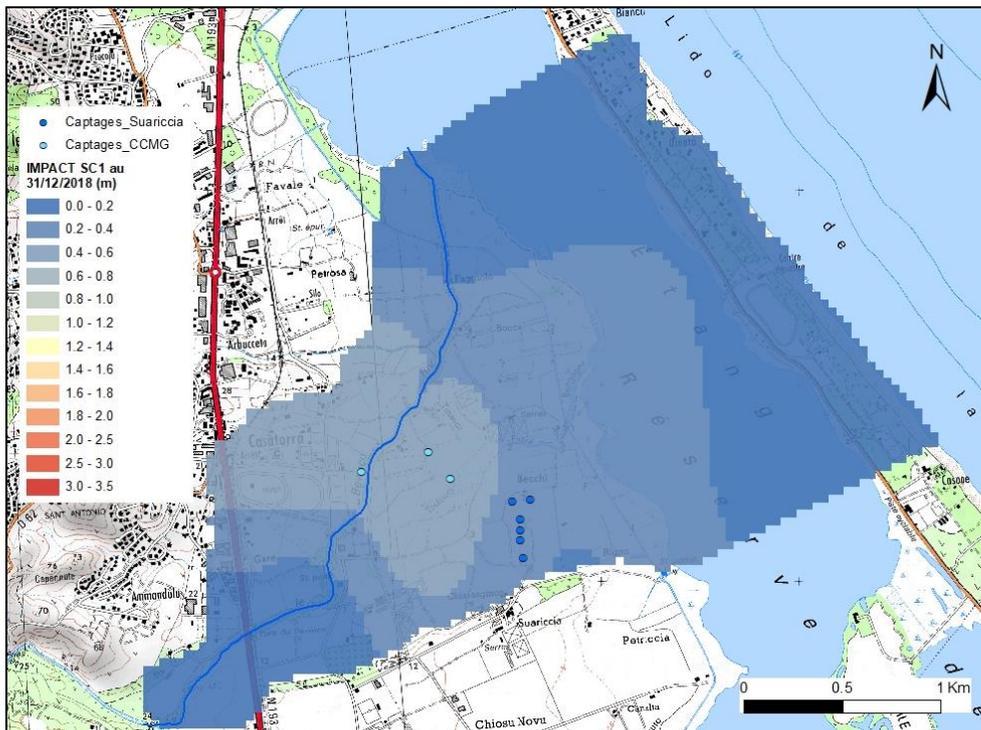


Illustration 65 - Remontée des niveaux piézométriques simulés en l'absence de prélèvement (scénario SC1) à la date du 31/12/2018 (hautes eaux + arrêt du champ captant).

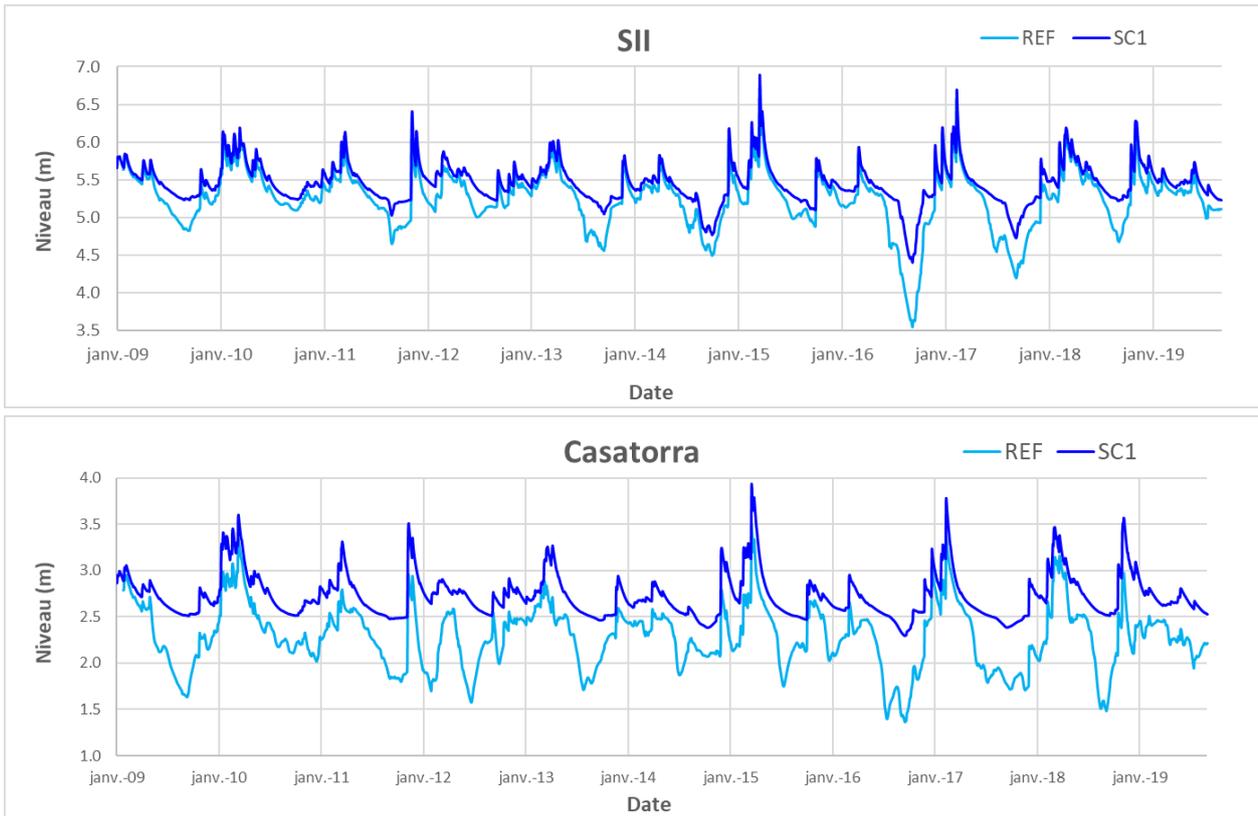


Illustration 67 - Impact du scénario SC1 sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.

Dans la portion de la nappe comprise entre le champ captant et le littoral, l'impact des pompages se fait ressentir en hautes eaux comme en basses eaux (Illustration 68).

En conditions naturelles, les fluctuations piézométriques seraient logiquement bien plus limitées avec un battement annuel maximum de l'ordre de 70 cm sur le puits SIII-7, de 50 cm sur Pz1 et de 1 m sur Pz2. En aval du champ captant (Pz1), un niveau de base de 1.5 m NGF est simulé en conditions naturelles (niveau minimal atteint en fin de période de vidange).

Au maximum, l'impact des pompages simulé par le modèle est de l'ordre de 4.5 m au droit du puits SIII-7 (niveau simulé dans la maille et corrigé en fonction du rayon du puits + pertes de charge quadratiques), de 2.5 m sur Pz1 (2016) et de 2.25 m sur Pz2. Dans les conditions actuelles d'exploitation, le niveau de la nappe est ainsi très régulièrement inférieur au 0 m NGF.

Au droit de Pz4 (bordure littorale), les fluctuations piézométriques naturelles sont principalement contrôlées par la marée (Illustration 68). Les niveaux naturels simulés varient entre 1 m NGF et 1.5 m NGF. Les rabattements générés par l'exploitation du champ captant atteignent au maximum 1 m (2012, 2016), mais ils sont le plus souvent limités à 50 cm.



Illustration 68 - Impact du scénario SC1 sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.

5.2.2. Impact sur les débits du Bevinco

L'augmentation des débits s'expliquent bien entendu par l'absence de prélèvement sur le cours d'eau à Lancone mais également par l'absence des pompages en nappe. En effet, en conditions naturelles, le débit du Bevinco infiltré vers la nappe serait moindre car la différence de charge hydraulique entre la rivière et la nappe serait plus faible en l'absence de pompage en nappe (Cf. § 5.2.3).

L'illustration 69 présente les gains de débit simulés par le modèle en quatre points du Bevinco, avec d'amont en aval : Virage à 90° à hauteur de SII, passage à gué, seuil de Casatorra et point d'observation de la Réserve (Cf. localisation, Illustration 30).

En période d'étiage, le gain de débit est croissant de l'amont vers l'aval, en raison du soutien de la nappe, qui en conditions naturelles serait un peu plus marqué, notamment sur l'aval. Les gains de débit varient d'une année à l'autre, mais ils restent limités sur le tronçon amont en période d'étiage : < 10 L/s excepté en 2018 où ils atteignent 20 L/s au niveau du passage à gué (Illustration 69).

Il est intéressant de noter que des assecs⁴ du Bevinco seraient toujours observés en conditions naturelles, entre les stations Virage à 90° et le passage à gué (Illustration 70). D'après le modèle, ce serait notamment le cas pour les conditions d'étiage 2014, 2016 et 2017. En revanche, les assecs seraient moins intenses et de moins longue durée. Les assecs surviendraient, en effet, plus tardivement, mais l'incidence des pompages sur les assecs est variable d'une année à l'autre. Celle-ci est par exemple plus forte dans les conditions de l'année 2017 qu'en 2016. Prenons l'exemple de la section du virage à 90°:

- en 2016, dans les conditions naturelles, la période d'assec est réduite d'un mois (apparition en juillet contre juin en conditions réelles) et le nombre de jours d'assec simulé baisse de 99 à 64. En août et septembre, l'intensité des assecs apparaît aussi forte qu'en conditions de pompage ;
- en 2017, la période d'assec est réduite de deux à trois mois (apparition en août contre juin en conditions réelles) et le nombre de jours d'assec simulé baisse très nettement, de 120 à 53.

Cependant, il faut souligner que plus en aval, à partir du seuil de Casatorra, aucun assec n'est simulé par le modèle en conditions naturelles. Le soutien de la nappe, plus marqué en l'absence de pompage, permettrait d'assurer un écoulement pérenne du Bevinco sur sa moitié amont.

⁴ Un assec est considéré à partir d'un débit journalier simulé inférieur à 5 m³/h, soit 1.4 L/s.

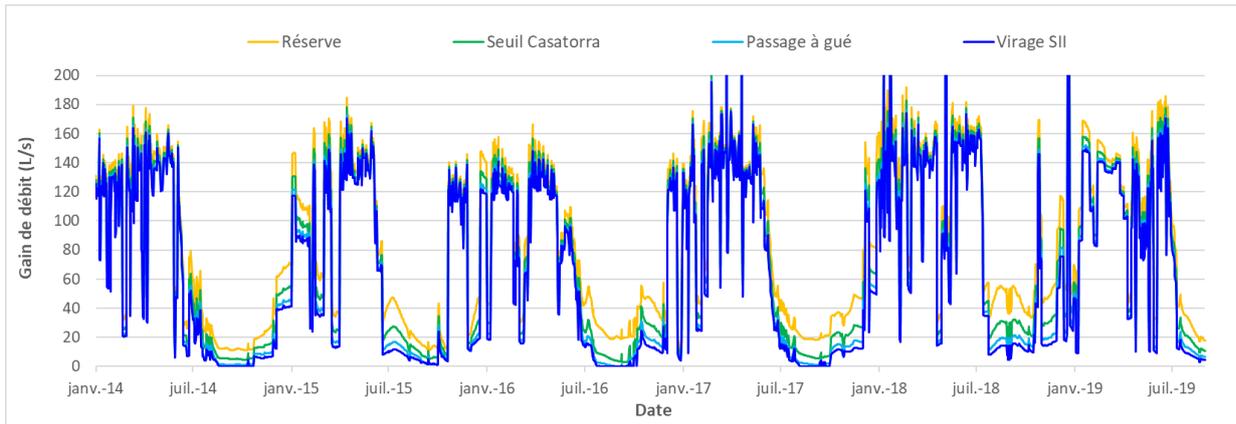


Illustration 69 - Impact du scénario SC1 sur les débits du Bevinco (2014-2019).

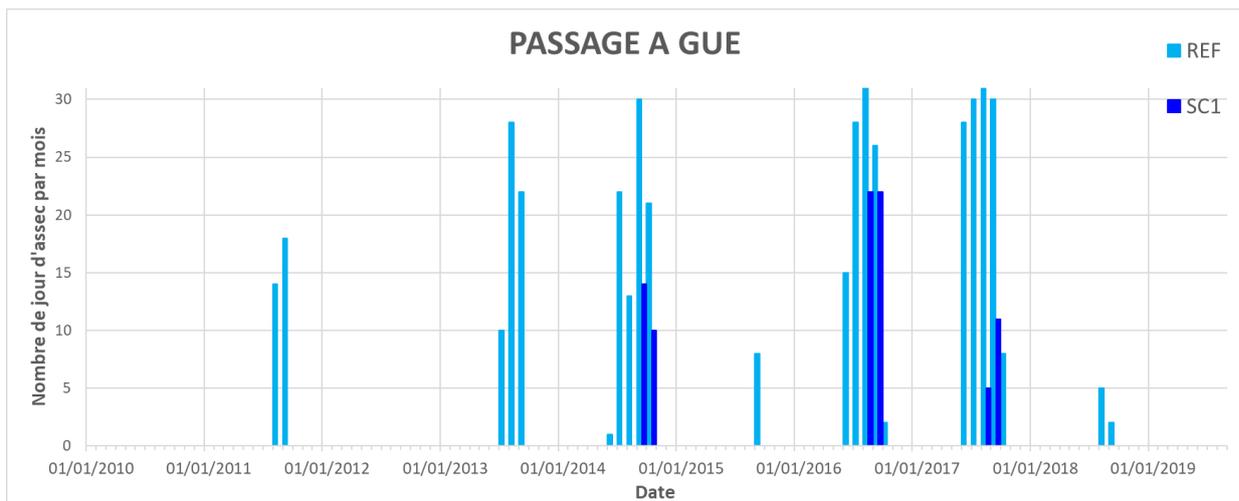
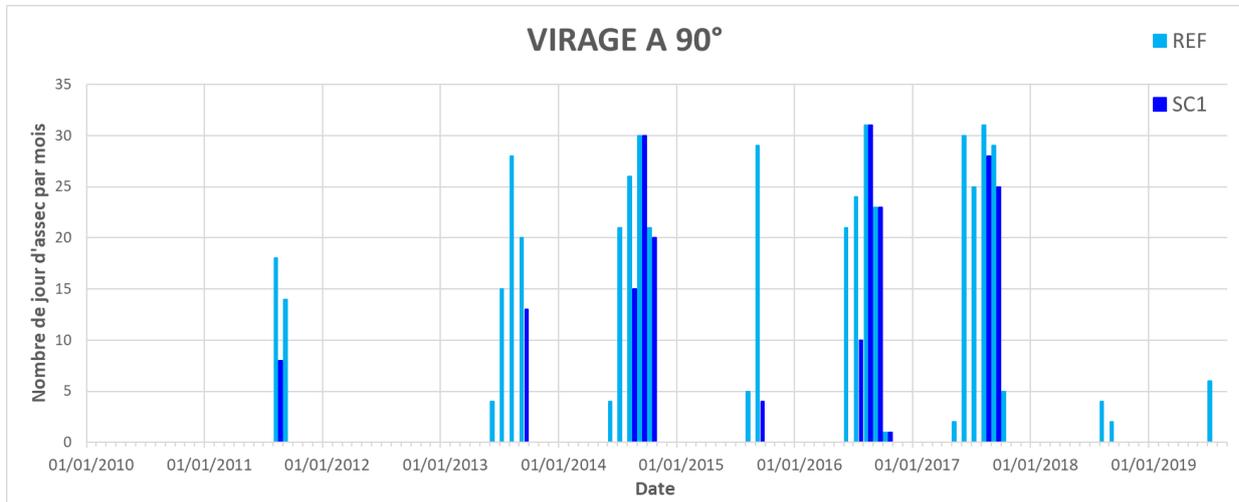


Illustration 70 - Impact du scénario SC1 sur les assecs du Bevinco aux stations Virage à 90° et Passage à gué (2010-2019).

5.2.3. Impact sur les bilans hydrauliques annuels de la nappe

L'impact de ce premier scénario sur les différentes composantes du bilan hydraulique annuel de la nappe pour la période 2010-2019 est présenté par l'illustration 71. Le graphique du haut présente l'impact sur les flux d'eau entrant dans la nappe (recharge, infiltration du Bevinco, limites littorales, drainance descendante depuis les couches sus-jacentes) tandis que le graphique du bas présente l'impact sur les flux sortant de la nappe (drainage par le Bevinco, débordement, limites littorales, drainance ascendante vers les couches géologiques sus-jacentes).

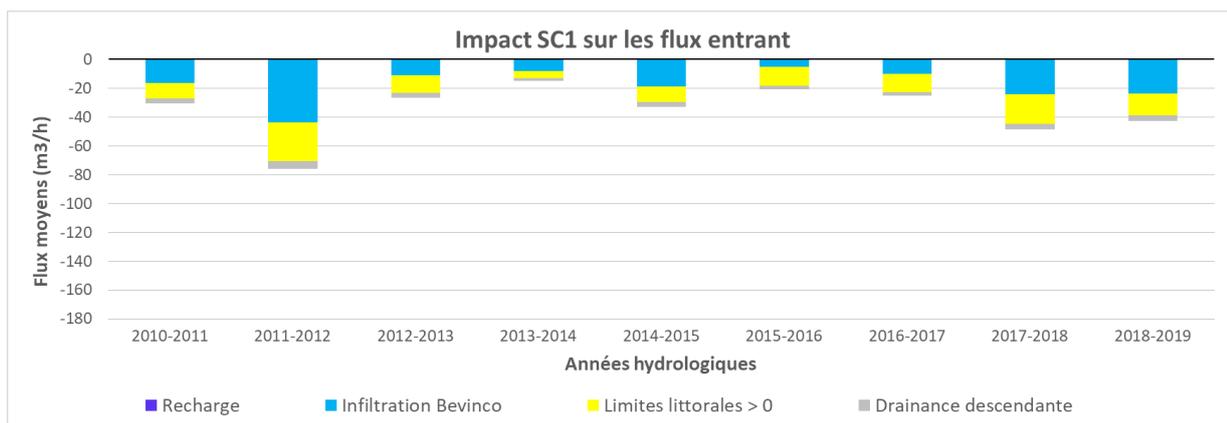
Globalement, les flux sortant sont augmentés en conditions naturelles tandis que les flux entrant sont diminués. L'impact apparaît plus marqué sur les flux sortant (Illustration 71).

En l'absence de pompages, la vidange de la nappe par ses exutoires naturels (mer, Bevinco, débordement) est augmentée de façon significative. En termes de débit, les augmentations moyennes interannuelles se répartissent de la façon suivante : 64.5 m³/h pour le drainage par le Bevinco, 22.2 m³/h pour le flux de débordement, 21.5 m³/h pour la drainance ascendante et 15.2 m³/h pour la vidange en mer.

Concernant les flux d'eau entrant, les baisses de débit moyennes sont de 18 m³/h pour l'infiltration du Bevinco, 14 m³/h pour les entrées par les limites littorales et 3.4 m³/h pour la drainance descendante (flux en provenance des couches sus-jacentes). Le flux de recharge reste bien entendu inchangé (Illustration 71).

Le prélèvement annuel moyen exercé sur la nappe est de 158.8 m³/h sur la période 2010-2019. Les évolutions sur les flux discutés précédemment viennent bien compenser ce flux de prélèvement.

Ces impacts sur les flux traduisent une piézométrie plus élevée en l'absence de pompage (§ 5.2.1) qui se répercute sur les flux d'eau échangés, directement dépendants des différences de charges hydrauliques. Autrement dit, la dépression piézométrique engendrée inévitablement par les pompages en nappe impacte de façon significative les gradients hydrauliques et donc les flux échangés avec l'extérieur (dynamiques de recharge et de vidange).



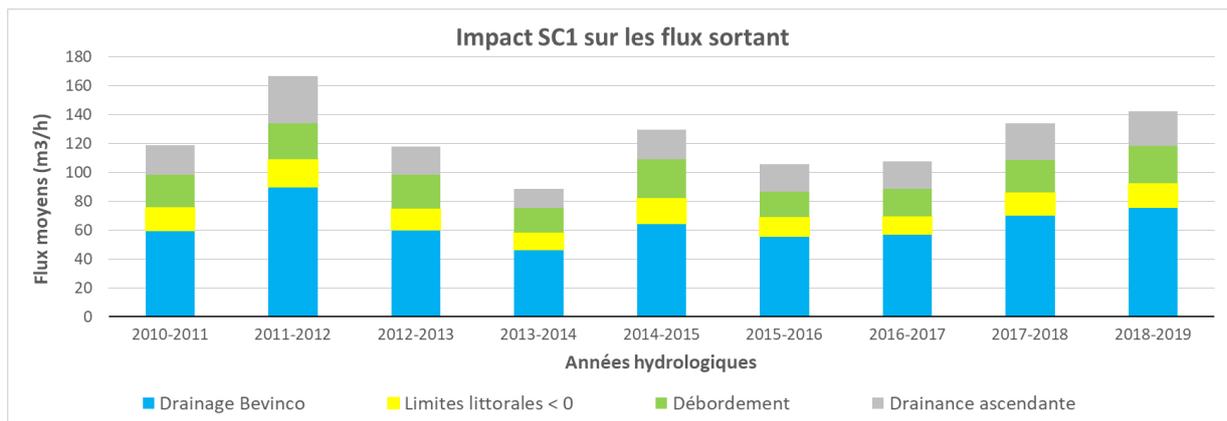


Illustration 71 - Impact du scénario SC1 sur les bilans hydrauliques annuels de l'aquifère (2010-2019).

5.2.4. Principales conclusions

La simulation en conditions naturelles permet d'appréhender l'impact de l'exploitation actuelle sur les différents milieux et de reconstituer les débits naturels du Bevinco. Plusieurs enseignements peuvent en être tirés :

- l'influence des pompages du champ captant d'Acqua Publica s'étend à la quasi-totalité de l'aquifère : de la zone d'infiltration du Bevinco jusqu'au littoral, et également en rive gauche du cours d'eau ;
- les niveaux piézométriques minimums naturels à Casatorra et au PZ1 (aval du champ captant) seraient respectivement de l'ordre de 2.5 et 1.5 m NGF (niveaux de base) ;
- le module du Bevinco simulé à la Réserve (donc tronçon aval de la plaine) est de 0.281 m³/s en conditions naturelles contre 0.259 m³/s dans la simulation de référence, soit une augmentation du module de l'ordre de 9% ;
- les pompages en nappe favorisent l'infiltration du Bevinco, cette dernière serait donc moindre en conditions naturelles. Par exemple, lorsque le champ captant est mis en route lors des crues de la rivière, l'infiltration de la rivière vers la nappe est favorisée et réduirait d'autant le débit dans la plaine ;
- en conditions naturelles, la vidange de la nappe vers ses exutoires est favorisée : les flux d'eau sortant par le littoral, par drainance ascendante et vers le Bevinco ou encore les flux de débordement sont augmentés ;
- même si des assecs persisteraient en conditions naturelles (étiages 2014, 2016 et 2017), leur intensité serait réduite : cela serait d'autant plus vrai vers l'aval où le soutien par la nappe serait plus marqué en l'absence de pompages.

5.3. SCENARIO 2 – SCÉNARIO DE CRISE

Dans ce scénario de crise (SC2), la période 2009-2019 est simulée avec un report des prélèvements effectués sur le Golo vers le champ captant d'Acqua Publica (achat auprès de l'OEHC). Les volumes reportés correspondent à ceux de l'année 2014, année correspondant au prélèvement annuel sur le Golo le plus important sur la période étudiée, soit 1.7 Mm³/an.

Ces achats d'eau ne concernent que la période comprise entre les mois de mai et novembre. Sur cette base, les débits horaires reportés ne concernent donc que cette même période (Illustration 72). Le report est appliqué chaque année de la période simulée. Les débits de prélèvement sont répartis de façon homogène sur les 6 forages.

Les autres prélèvements (3 forages de la CCMG + prise d'eau du Lancone) ainsi que les conditions climatiques sont inchangés.

L'objectif est ici d'appréhender la réaction de l'hydrosystème à des conditions d'exploitation extrêmes. L'augmentation de la pression, est, en effet, très forte puisque les prélèvements annuels sont plus que doublés dans ce scénario de crise (Illustration 73). Ce scénario se rapproche des conditions d'exploitation de l'aquifère dans les années 70 et 80 avant la mise en place de l'achat d'eau brute du Golo en 1991.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Débits reportés (m3/h)	0	0	0	0	96	96	461	504	456	468	211	0

Illustration 72 - Débits de prélèvement reportés sur le champ captant d'Acqua Publica (scénario 2).

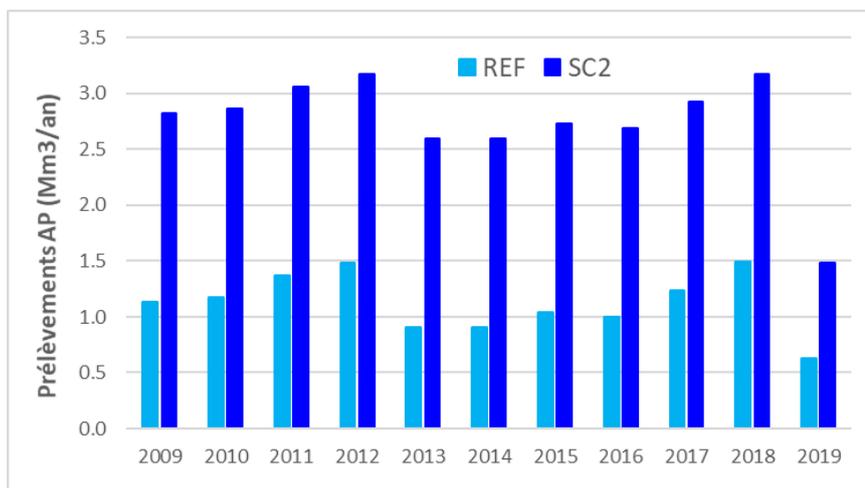


Illustration 73 - Prélèvements annuels sur le champ captant d'Acqua Publica dans les conditions réelles (REF) et dans les conditions du scénario 2 (SC2).

5.3.1. Impact sur les niveaux de nappe

Une telle augmentation des prélèvements génère inévitablement des rabattements de la nappe alluviale très marqués (Illustration 74 et Illustration 75) :

- dans la partie amont de la nappe (nappe libre), le rabattement est métrique à pluri-métrique en période d'étiage, au droit du piézomètre SII. Sur la période 2009-2019, le rabattement annuel moyen, simulé par le modèle, est de 2.2 m, pour un rabattement maximal de 3.2 m (en 2017). Le renouvellement de la nappe reste satisfaisant pendant la période de recharge. En l'absence de prélèvements supplémentaires de décembre à avril, les niveaux simulés rejoignent ceux de la simulation de référence (conditions réelles), avec cependant un déphasage de 1 à 2 mois. Cette observation est également valable plus en aval, jusqu'au littoral ;
- pour le piézomètre de Casatorra, dont le suivi a démarré en 1986, le niveau simulé sous l'effet des pompages supplémentaires atteint quasiment la cote -2 m NGF lors des basses eaux 2017. Il est intéressant de noter que cela correspond au niveau le plus bas jamais enregistré sur ce piézomètre, niveau qui avait été atteint à l'étiage 1990. À cette époque, la CAB ne s'alimentait pas encore à partir du Golo (convention entre l'OEHC et la CAB mise en place en février 1991), les besoins en eau étaient alors uniquement satisfaits à partir de la nappe du Bevinco. Le résultat apparaît donc cohérent avec les observations historiques ;
- au droit du puits SIII-7 (niveau simulé dans la maille et corrigé en fonction du rayon du puits + pertes de charge quadratiques), l'impact annuel moyen est de 5.45 m pour une valeur maximale de 6.2 m (en 2017). Cela se traduit par un niveau piézométrique qui atteint ou dépasse la cote -4 m NGF chaque année. La cote -6 m NGF est même dépassée nettement en 2016, 2017 et 2018 ;
- en aval du champ captant, le rabattement moyen annuel généré par le scénario SC2 est respectivement de 3.6 m et 1.4 m au droit de Pz1 et Pz4. Dans ces conditions, les niveaux piézométriques simulés en Pz4 se retrouvent chaque année en deçà du niveau de la mer. La cote - 1 m NGF est atteinte pendant les étiages 2016 et 2017. Cela se traduit inévitablement dans le modèle par une intrusion d'eaux salines (cf. § 5.3.4).

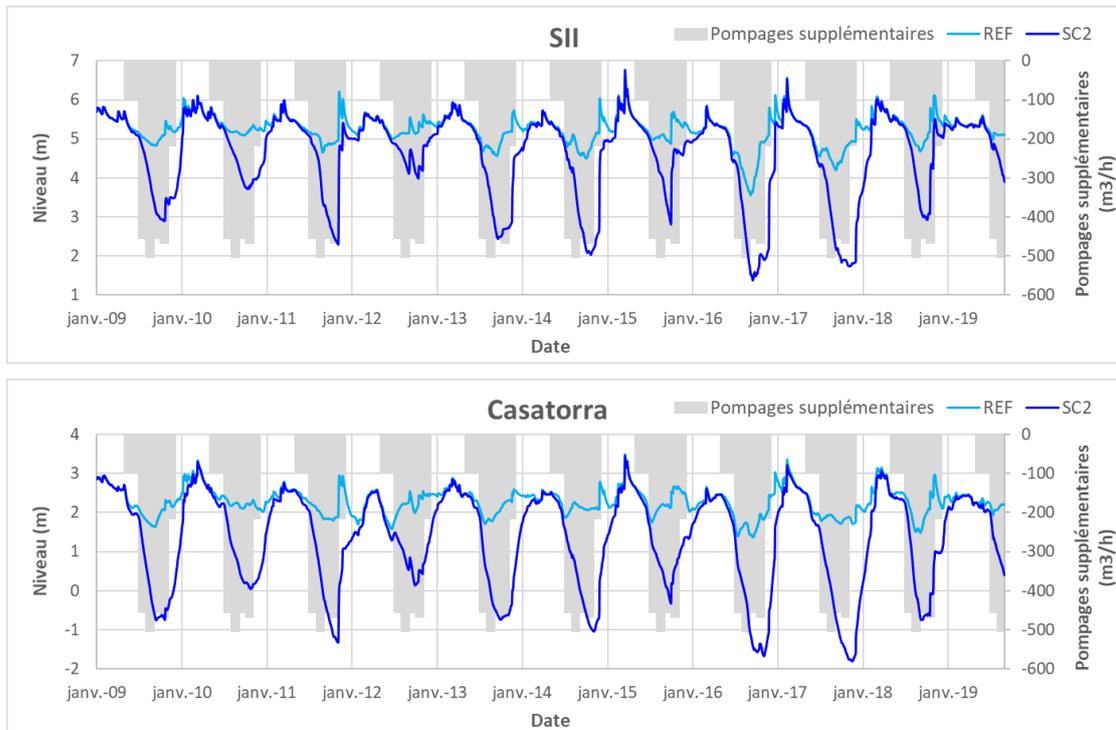


Illustration 74 - Impact du scénario SC2 sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.

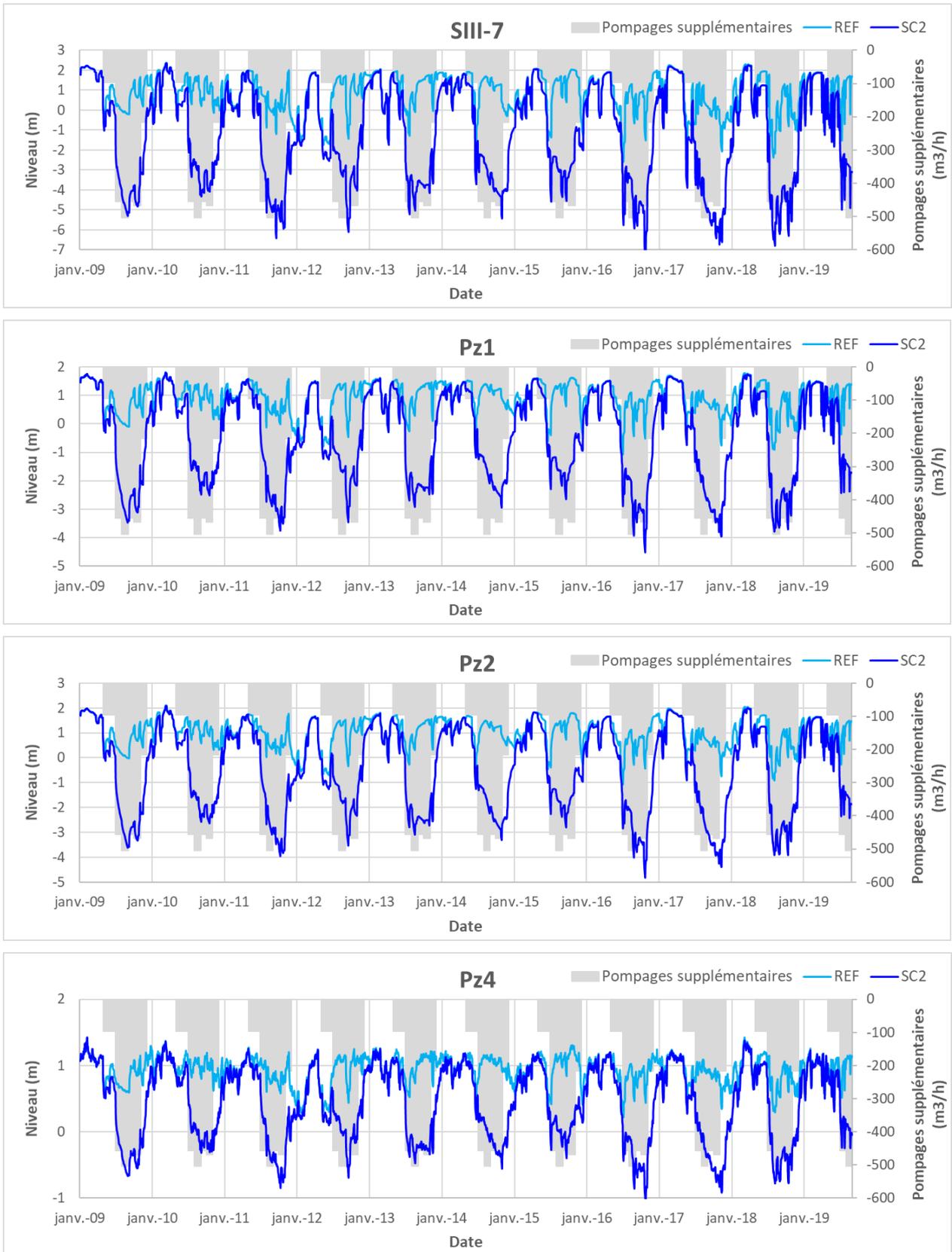


Illustration 75 - Impact du scénario SC2 sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.

5.3.2. Impact sur les débits du Bevinco

Le graphique de l'illustration 76 retranscrit les pertes de débit simulées dans le cas du scénario SC2 sur la période 2014-2019, d'amont en aval (stations du virage à 90°, du passage à gué, du seuil de Casatorra et de la Réserve). Les pompages supplémentaires associés au scénario de crise sont également reportés sur le graphique, jusqu'à 140 L/s au mois d'août.

Les baisses de débits commencent à se faire ressentir à partir du mois de juin, et deviennent ensuite significatives au cours du mois de juillet lorsque l'augmentation des pompages s'accroît (+ 128 L/s sur le champ captant).

Les baisses de débit simulées croissent de l'amont vers l'aval, avec un impact plus marqué sur l'extrémité aval du Bevinco. En période d'étiage, l'écoulement du Bevinco est soutenu par la nappe à partir du virage à 90°. Les pompages supplémentaires venant réduire significativement le flux d'eau souterraine drainé par le Bevinco, les débits simulés sur l'extrémité aval sont plus fortement impactés.

Les plus fortes pertes de débit sont simulées à partir du mois de novembre, parfois même après la période concernée par l'augmentation des prélèvements, ils correspondent à des épisodes de crue (Cf. pics, Illustration 76). Comme vu précédemment, un décalage temporel de 1 à 2 mois est simulé entre l'arrêt des reports de prélèvements (fin novembre) et le retour aux niveaux piézométriques du scénario de référence. De ce fait, en période de crue, les flux de débordement simulés restent impactés à la baisse, ce qui engendre moins de ruissellement et donc des débits de crue moins importants.

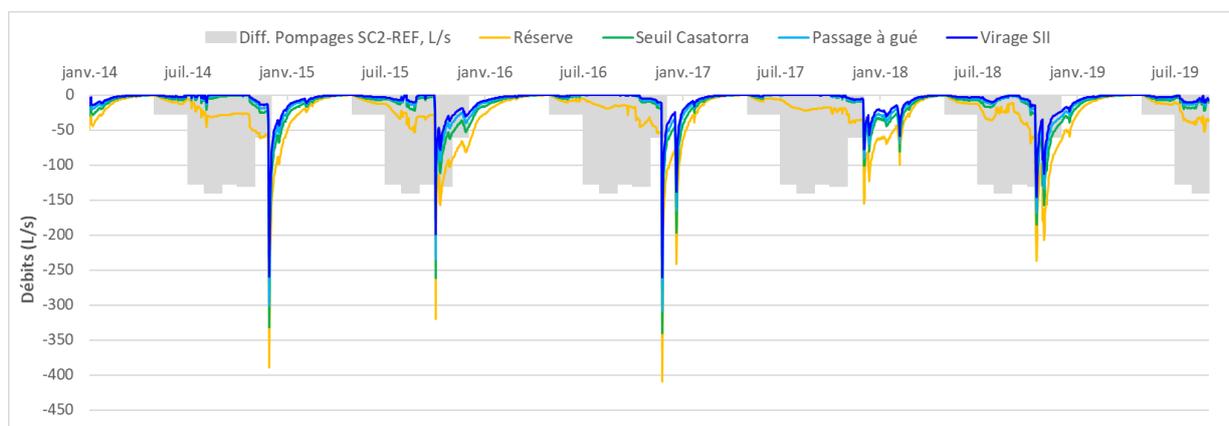


Illustration 76 - Impact du scénario SC2 sur les débits du Bevinco (2014-2019).

Concernant les assècs du Bevinco, l'impact du scénario de crise se fait surtout ressentir à partir du passage à gué et de façon très nette sur l'extrémité aval du cours d'eau où aucun assec n'était simulé dans la simulation de référence. Dans les conditions du scénario de crise, des assècs sont simulés quasiment chaque année à la station de la Réserve (Illustration 77). Cela s'explique simplement par la baisse de la piézométrie qui engendre une baisse du soutien de la nappe au Bevinco. Ces assècs sont susceptibles de se traduire dans la réalité par la progression vers l'amont du rentrant salé en provenance de l'étang.

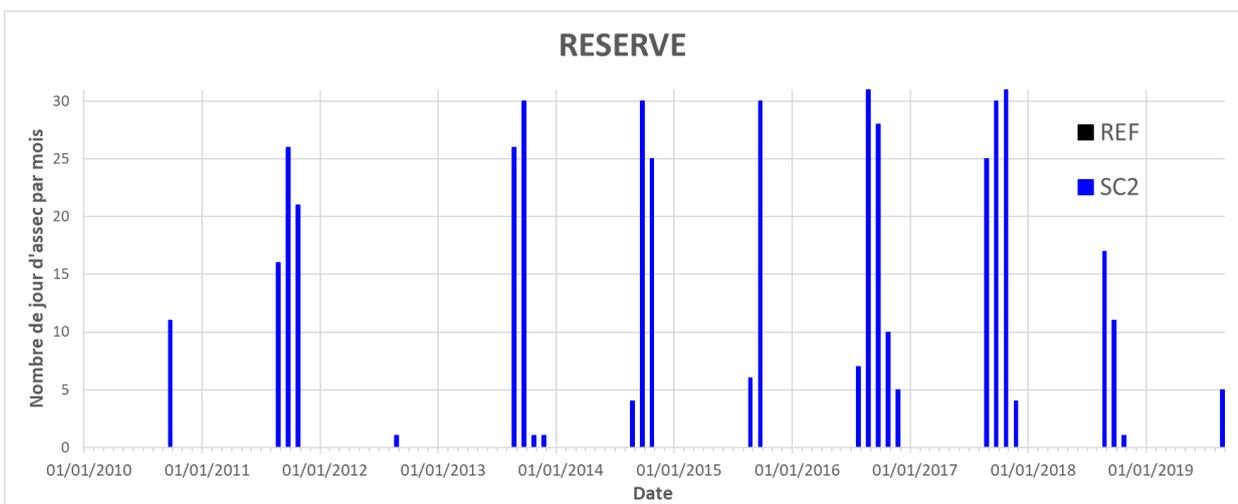
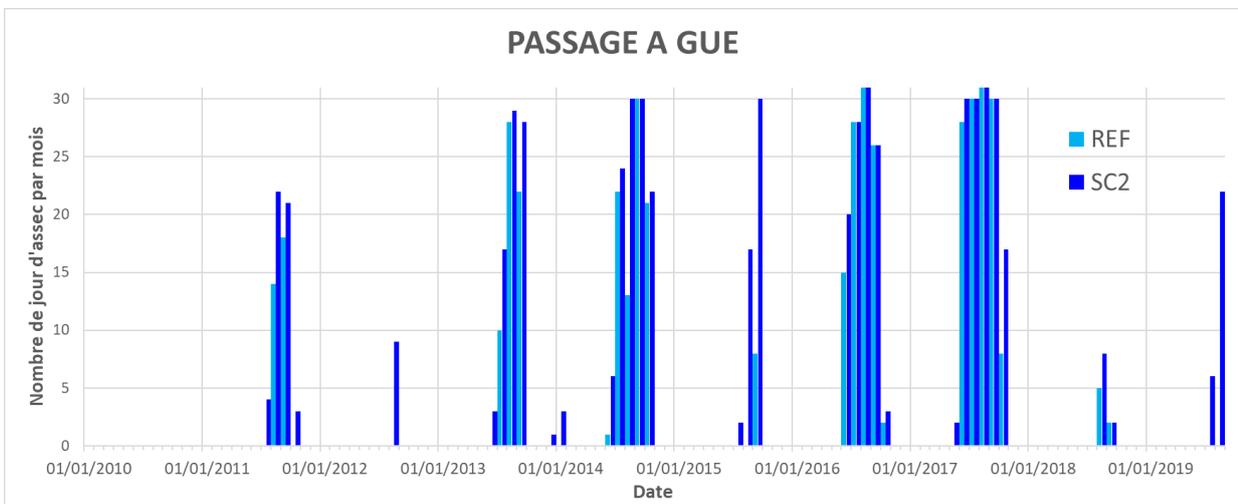
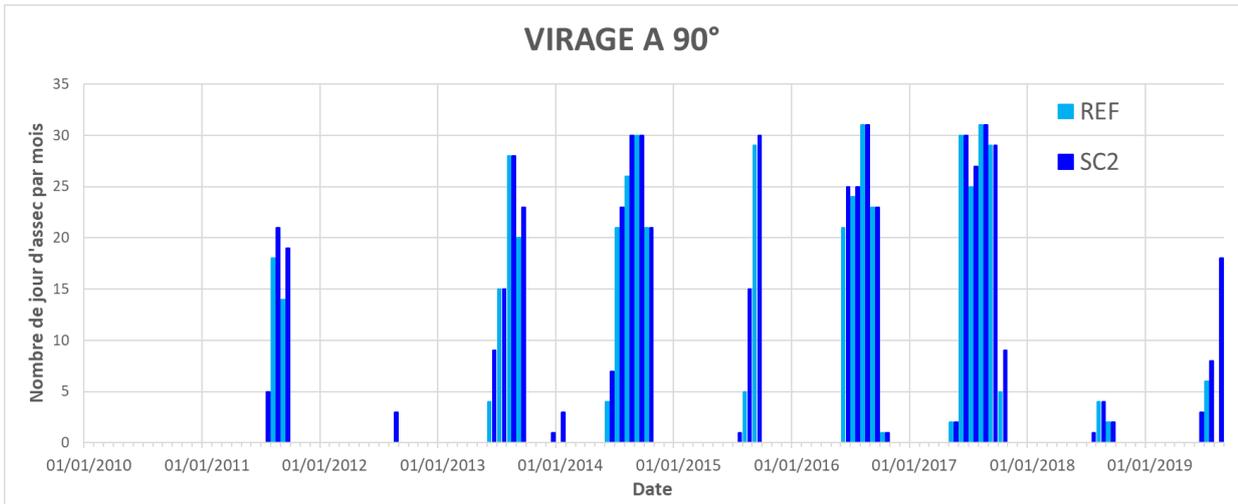


Illustration 77 - Impact du scénario SC2 sur les assecs du Bevinco aux stations Virage à 90°, Passage à gué et Réserve (2010-2019).

5.3.3. Impact sur le bilan hydraulique annuel

A l'inverse du scénario SC1 (conditions naturelles), les flux d'eau entrant dans la nappe sont systématiquement augmentés et les flux sortant sont diminués. En termes de débits, l'impact apparaît plus marqué sur les flux entrant (Illustration 78).

La baisse généralisée de la piézométrie simulée dans le scénario SC2 provoque :

- une accentuation de l'infiltration des eaux du Bevinco sur l'amont de la plaine alluviale : le débit d'infiltration moyen inter-annuel est augmenté de 45.5 m³/h ;
- une inversion des écoulements plus récurrente avec des écoulements qui peuvent davantage se faire de la mer vers l'intérieur des terres : le flux annuel d'eau souterraine en provenance de la limite littorale est augmenté en moyenne de 54 m³/h. Comme déjà souligné avec les niveaux piézométriques de Pz4 inférieurs au niveau de la mer, cela devrait se traduire dans le modèle par une intrusion d'eau saline ;
- une légère augmentation de la drainance descendante (eaux en provenance des limons sus-jacents vers l'aquifère), avec un débit moyen supplémentaire de 13 m³/h ;
- une diminution de la vidange de l'aquifère vers ses exutoires naturels (Bevinco, mer, débordements, étang). En termes de baisse de débit, les composantes les plus impactées sont le drainage de la nappe par le Bevinco (baisse annuelle de débit en moyenne de 44.5 m³/h) et la drainance ascendante (baisse annuelle moyenne de 29 m³/h). L'impact est beaucoup moins significatif pour les flux sortant par la limite littorale ou encore pour le flux de débordement sur l'extrémité amont de la plaine. Concernant la baisse des flux de débordement, il faut cependant ajouter celle associée aux limons.

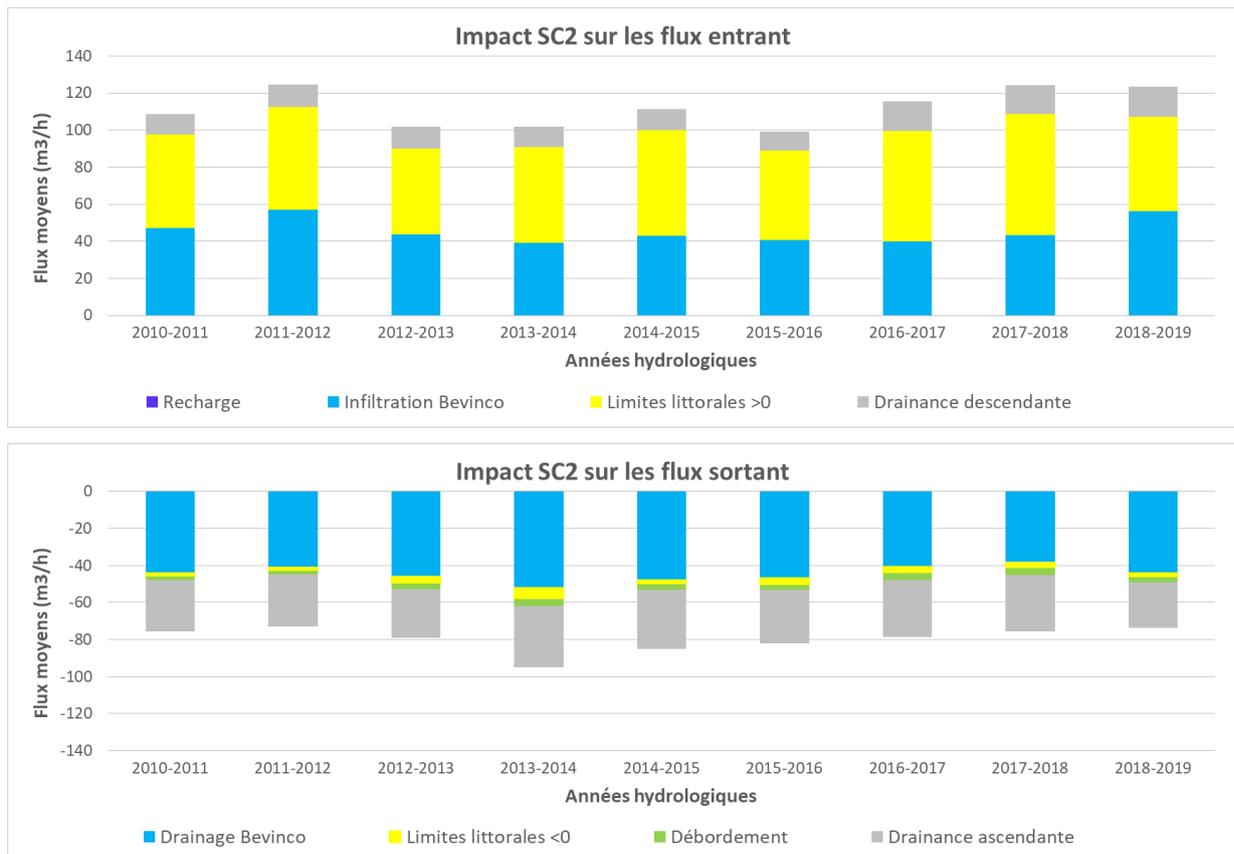


Illustration 78 - Impact du scénario SC2 sur les bilans hydrauliques annuels de l'aquifère (2010-2019).

5.3.4. Impact sur la salinité de l'aquifère

Dans le but d'illustrer l'impact du scénario de crise sur l'intrusion saline en provenance de la mer, les cartographies de la concentration en chlorure calculée par le modèle sont présentées aux dates du 31/12/2012 et du 31/12/2016, soit 3 et 7 années après la mise en route du scénario (Illustration 79).

On constate que la progression du front salé au sein de la nappe alluviale est nette. Les 3 forages du nord sont les plus rapidement impactés. À titre d'exemple, après 3 années de fonctionnement, les concentrations en période de hautes eaux (situation favorable) sont de 140 mg/l au droit du puits SIII-8 et 920 mg/l en Pz1. Après 7 années, elles atteignent respectivement 870 mg/l et 3960 mg/l. Pour rappel, la norme de potabilité pour le paramètre chlorures est de 250 mg/l.

Il est intéressant de noter, qu'avec le temps, une contamination via le Bevinco se dessine au nord (Cf. carte au 31/12/2016, Illustration 79). Cela pourrait s'expliquer par une infiltration du rentrant salé vers les eaux souterraines sous l'effet des pompages extrêmes.

Ces résultats sont présentés à titre indicatif et ne pourront être fiabilisés qu'avec une évolution du modèle hydro-dispersif (Cf. § 4.6). En effet, les quelques informations disponibles sur les intrusions salines observées dans les années 70-80 indiquent une dynamique de progression du biseau salé plus rapide (quelques semaines) que celles qui sont reproduites par le modèle (données disponibles présentées dans le rapport de phase 1, Genevier *et al.*, 2021). Ceci étant dit, le risque d'intrusion saline apparaît inéluctable pour un tel régime d'exploitation de la nappe.

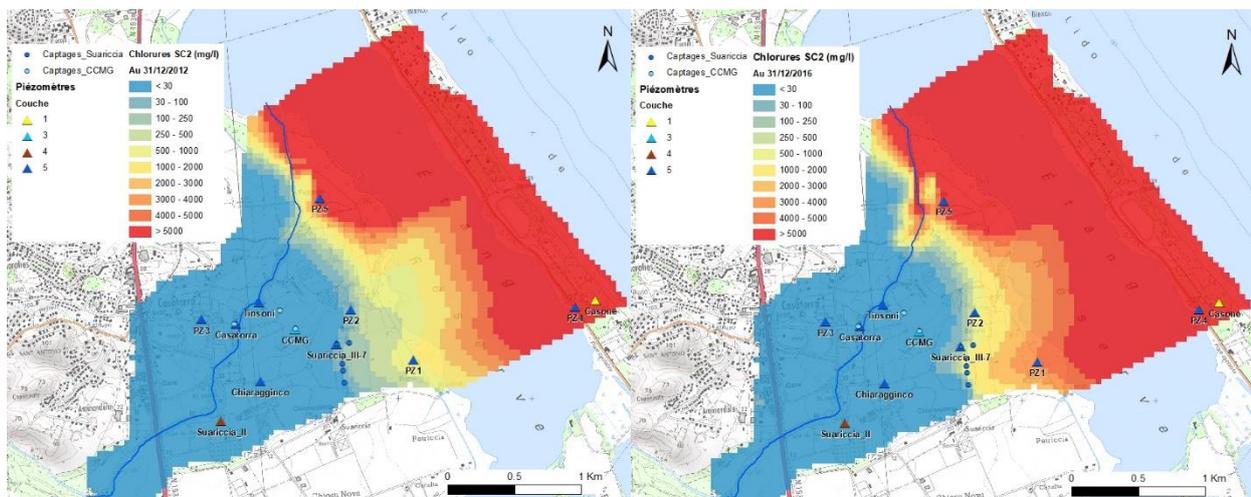


Illustration 79 - Carte des concentrations en chlorures simulées pour le scénario de crise (SC2) aux dates du 31/12/2012 (à gauche) et du 31/12/2016 (à droite).

5.3.5. Principales conclusions

Ce scénario de crise apporte des éléments de réponse quant à une exploitation extrême de l'hydrosystème. Une telle augmentation des prélèvements ne serait clairement pas soutenable pour les différents milieux.

La large dépression piézométrique générée entrainerait une intensification des assecs du Bevinco en aval de la zone d'infiltration en raison d'un soutien de nappe très déficitaire. Les assecs simulés deviendraient notamment très réguliers sur l'extrémité aval du cours d'eau.

Elle viendrait également modifier de façon sensible les flux d'eau échangés au sein de l'hydrosystème : d'après les résultats de la modélisation, les flux d'eau entrant sont systématiquement augmentés et les flux sortant sont diminués. De ce fait, une intrusion saline depuis la limite littorale est simulée, et même si les résultats des simulations hydro-dispersives sont à considérer avec circonspection, plusieurs indicateurs tangibles viennent confirmer le risque de salinisation : niveaux piézométriques inférieurs au 0 m NGF à Casatorra et au PZ4, flux d'eau entrant par la limite littorale largement augmenté, même en année humide.

5.4. SCENARIO 3 – OPTIMISATION DU CHAMP CAPTANT

L'objectif de ce troisième scénario est de contribuer à définir les volumes exploitables sur le champ captant d'Acqua Publica et les indicateurs de gestion associés (cf. 5.7). Ce scénario tient également compte d'une augmentation des prélèvements sur les trois forages de la CCMG.

En réalité, trois scénarios ont ici été simulés sur la période 2009-2019 :

- **SC3A** : augmentation de 30 % des volumes prélevés par la CCMG, les prélèvements d'Acqua Publica sont inchangés. Cela représente des augmentations comprises entre 4 et 13 m³/h, pour une moyenne de 7.4 m³/h ;
- **SC3B** : scénario SC3A + report d'une partie des prélèvements effectués sur le Golo vers le champ captant d'Acqua Publica. Il s'agit d'un scénario intermédiaire entre SC3A et le scénario de crise SC2. L'augmentation annuelle est ici de 982 000 m³/an (contre 1.7 Mm³/an pour SC2) ;
- **SC3C** : scénario intermédiaire entre SC3A et SC3B, le report des prélèvements effectués sur le Golo est encore réduit. Les volumes annuels sont augmentés de 581 000 m³/an.

Un récapitulatif des prélèvements annuels du champ captant qui sont simulés en conditions réelles et pour les scénarios SC2, SC3B et SC3C est présenté par l'illustration 80. L'année 2019, incomplète, n'est pas reportée.

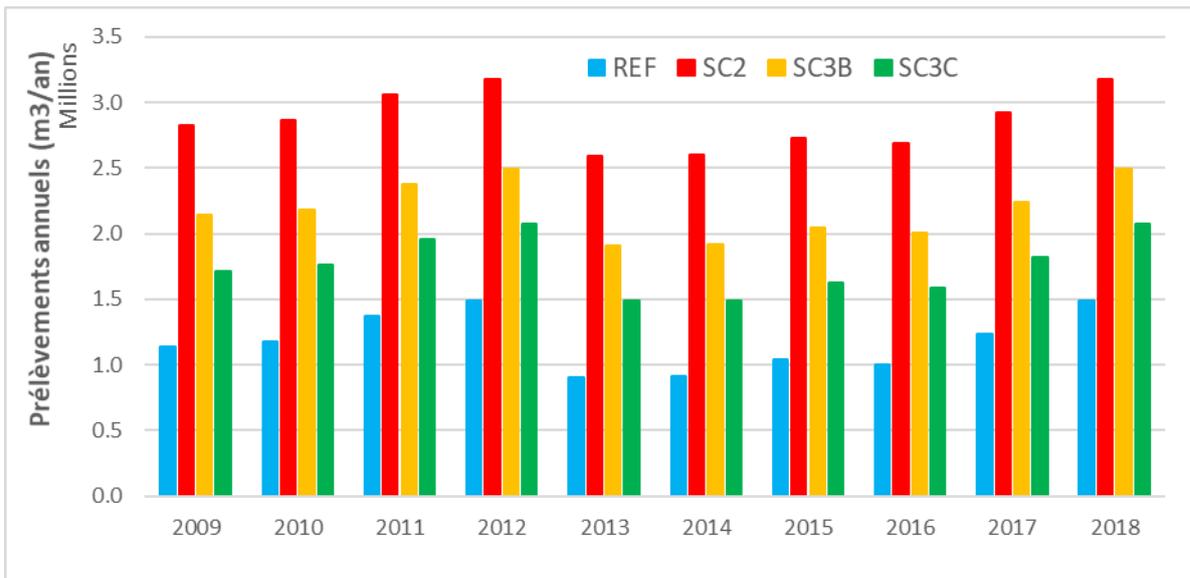


Illustration 80 - Prélèvements annuels simulés pour le champ captant d'Acqua Publica en conditions réelles (REF) et dans les scénarios SC2, SC3B et SC3C.

Pour ces trois scénarios SC3, les prélèvements sur le Bevinco et les conditions climatiques sont inchangés sur la période 2009-2019.

5.4.1. Impact sur les niveaux de nappe

a) Scénario SC3A

Tout d’abord, l’impact simulé d’une augmentation de 30 % des prélèvements de la CCMG (scénario SC3A) sur la piézométrie de la nappe apparaît limité, avec des rabattements supplémentaires qui sont inférieurs à 10 cm au droit des forages d’exploitation (les pertes de charges quadratiques liées aux ouvrages en eux-mêmes ne sont toutefois pas prises en compte ici) (Illustration 81).

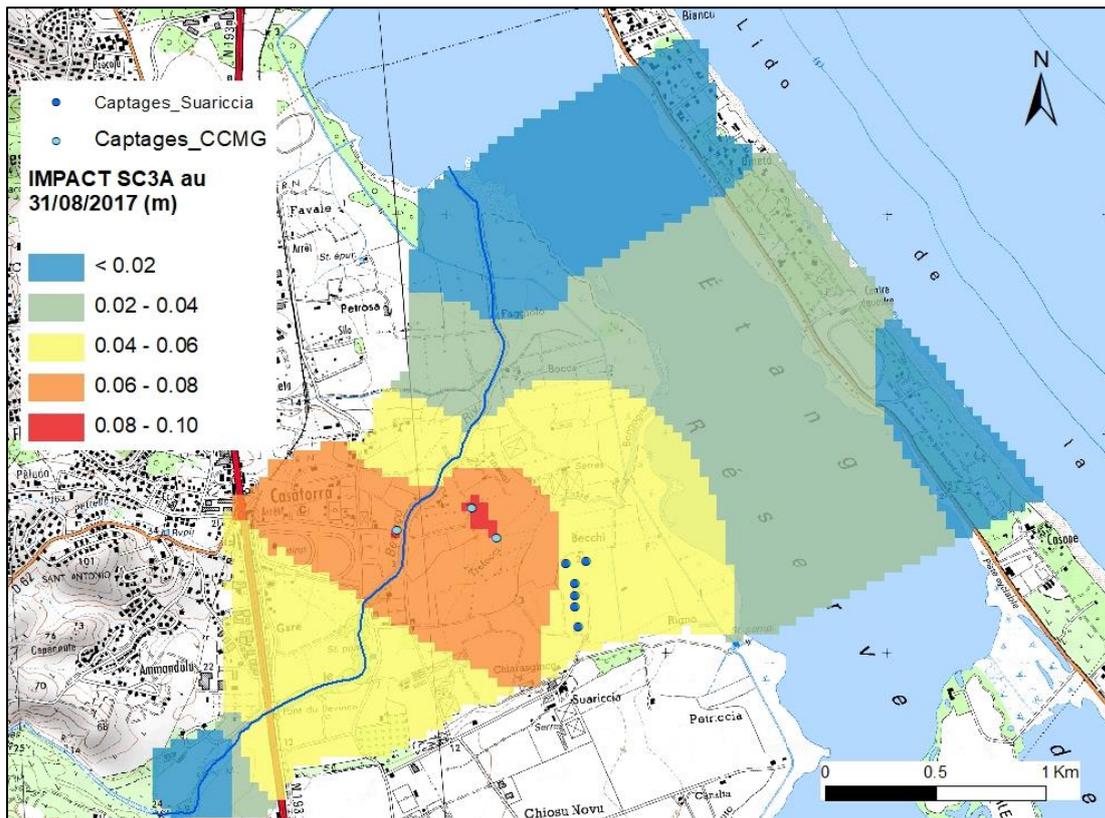


Illustration 81 - Impact du scénario SC3A sur la piézométrie de la nappe au 31/08/2017.

b) Scénarios SC3B et SC3C

Concernant les scénarios SC3B et SC3C, les impacts simulés sur la piézométrie correspondent logiquement à des situations intermédiaires entre les niveaux simulés en conditions réelles et ceux simulés dans le cadre du scénario de crise SC2 (Illustration 82 et Illustration 83).

À titre d’exemple, les impacts maximaux sont observés en novembre 2017, avec pour les scénarios SC3B et SC3C, des rabattements respectifs de 1.5 m et 0.8 m au droit du piézomètre Suariccia II (contre 3.2 m dans le cas du scénario SC2) et de 1.9 m et 1.0 m au droit de Pz1 en aval du champ captant (contre 4.2 m pour SC2).

Pour le piézomètre historique de Casatorra, la cote 0 m NGF est atteinte uniquement dans le cas du scénario SC3B lors des basses eaux de 2016 et 2017 (Illustration 82). Pour rappel, cette cote d’alerte est atteinte chaque année dans le cas du scénario de crise (SC2), et largement dépassée en 2016 et 2017 (entre -1 et -2 m NGF).

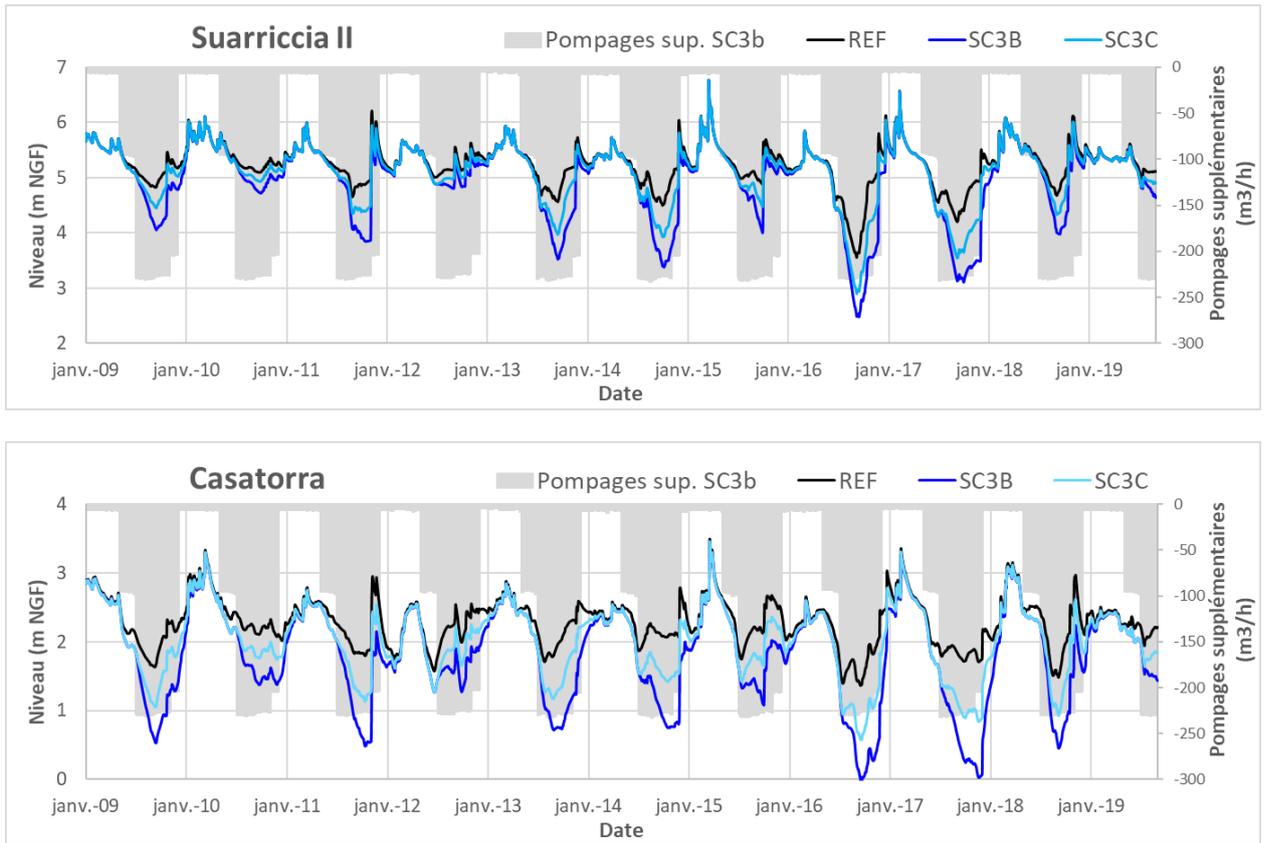


Illustration 82 - Impact des scénario SC3B et SC3C sur les niveaux piézométriques de SII et Casatorra (2009-2019), nappe libre.

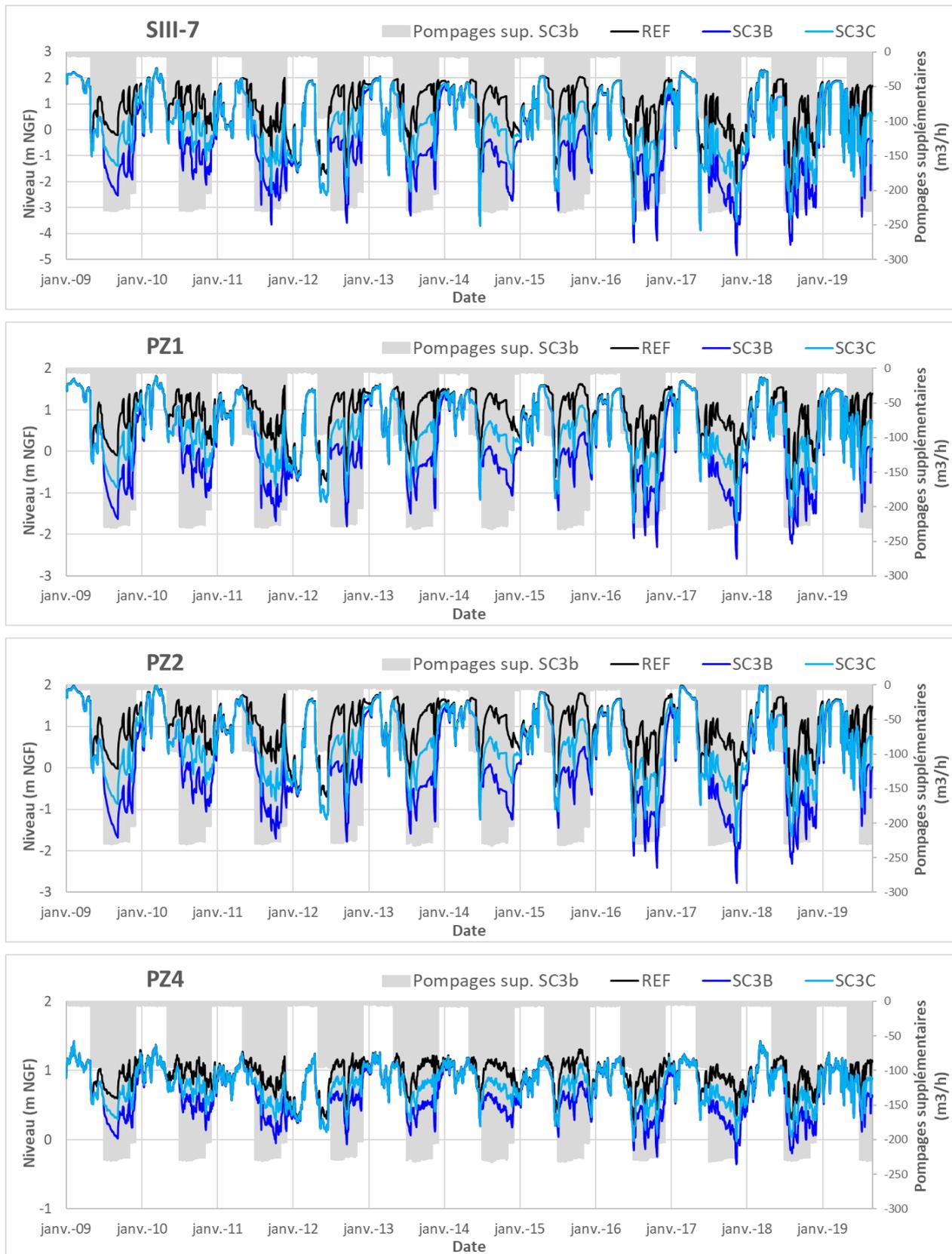


Illustration 83 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les niveaux piézométriques du puits de pompage SIII-7 et des piézomètres Pz1, Pz2 et Pz4 (2009-2019), nappe captive.

5.4.2. Impact sur les débits du Bevinco

a) Scénario SC3A

Dans le cas du scénario SC3A, les pertes de débits simulés pour le Bevinco restent modérées avec par exemple des impacts de moins de 2 L/s au seuil de Casatorra. À la station de la Réserve, les impacts simulés atteignent au maximum 4 à 6 L/s très ponctuellement (oct. 2015, nov. 2016, déc. 2017). Pour rappel, l'augmentation moyenne des débits de prélèvement simulée pour ce scénario est de 2 L/s.

De ce fait, l'impact de ce scénario SC3A sur les assecs du Bevinco apparaît très peu significatif. Sur le graphique de l'illustration 84, il est net au cours du mois de septembre 2014 (de 14 à 30 jours d'asec), mais cela est biaisé par le choix de la valeur seuil à 5 m³/h (en conditions réelles, le modèle simule sur les 15 premiers jours de septembre des débits « flirtant » avec cette valeur de 5 m³/h).

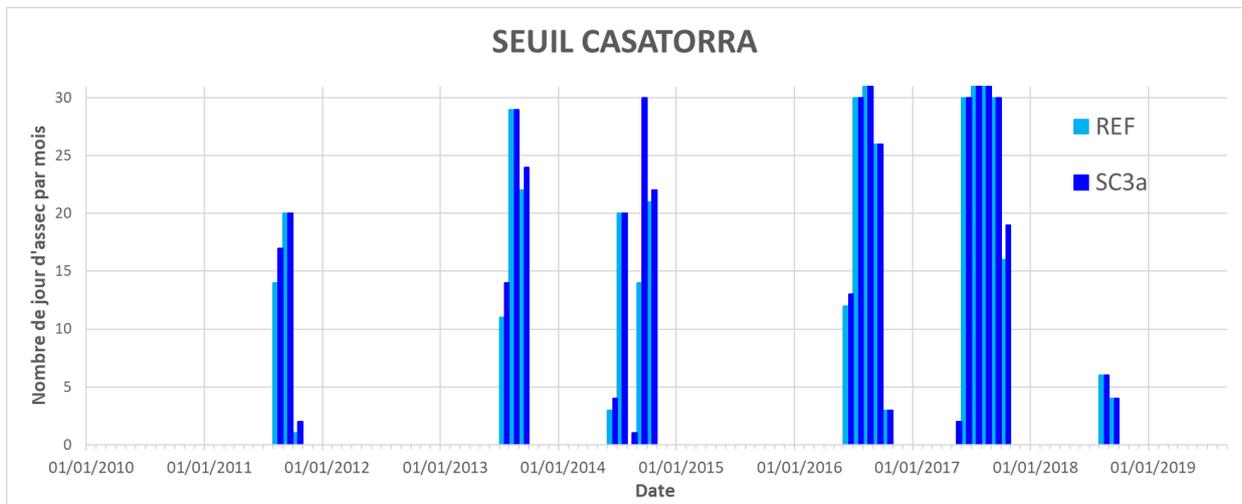


Illustration 84 - Impact du scénario SC3A sur les assecs au seuil de Casatorra (2010-2019).

b) Scénarios SC3B et SC3C

De la même façon, des états intermédiaires sont simulés pour ces deux scénarios par rapport au scénario de crise SC2. Les mêmes observations peuvent être faites : l'impact est croissant d'amont en aval et maximal en période de crue où, en complément d'un soutien de nappe à la baisse, les flux de débordement diminuent significativement sous l'effet d'une augmentation des pompages (Illustration 85).

Il est intéressant de noter que des assecs sont simulés à la station aval de la Réserve à partir du scénario SC3B, ce qui n'est pas encore le cas pour le scénario SC3C (Illustration 86). Pour rappel, dans le cas du scénario SC2, 455 jours d'asec sont simulés en ce point sur la période 2009-2019, contre 34 jours avec le scénario SC3B (et aucun assec pour SC3C et en conditions réelles).

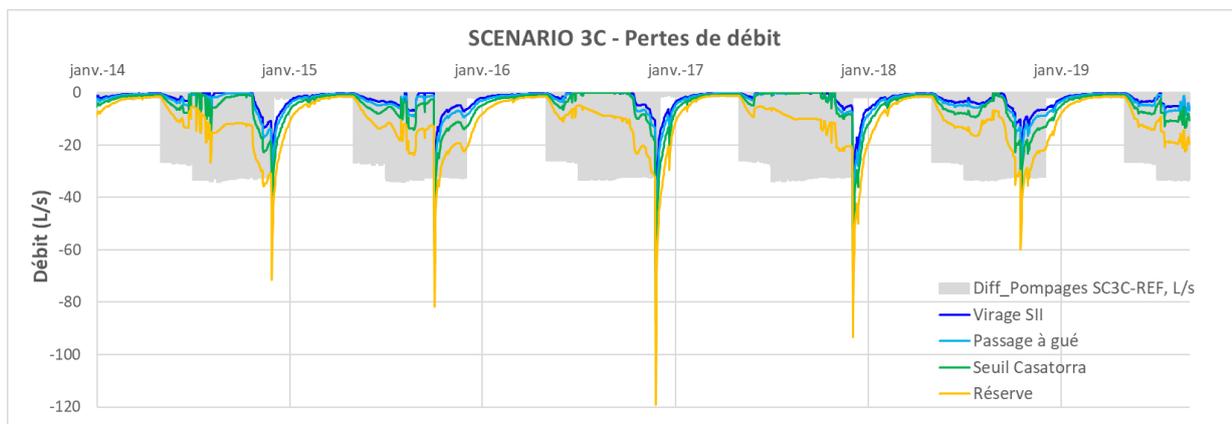
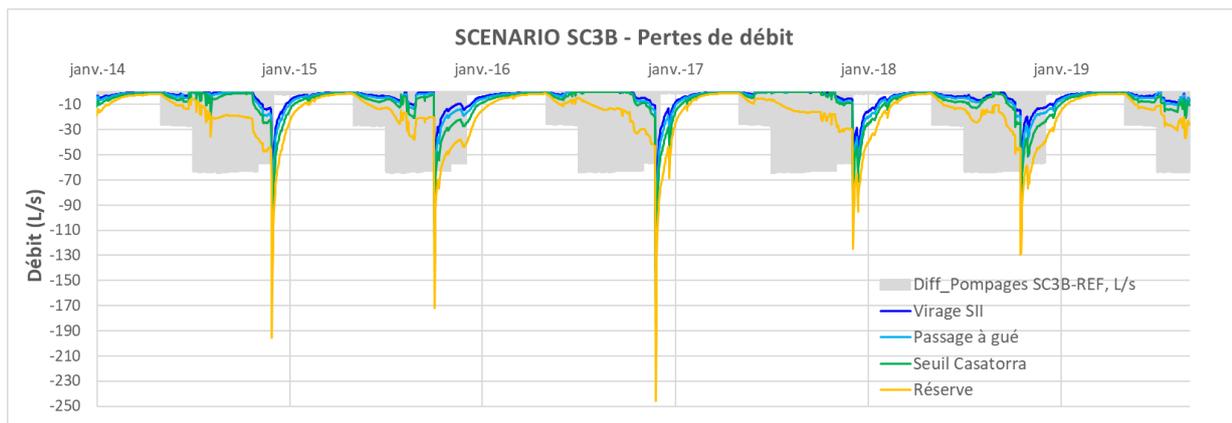


Illustration 85 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les débits du Bevinco (2014-2019).

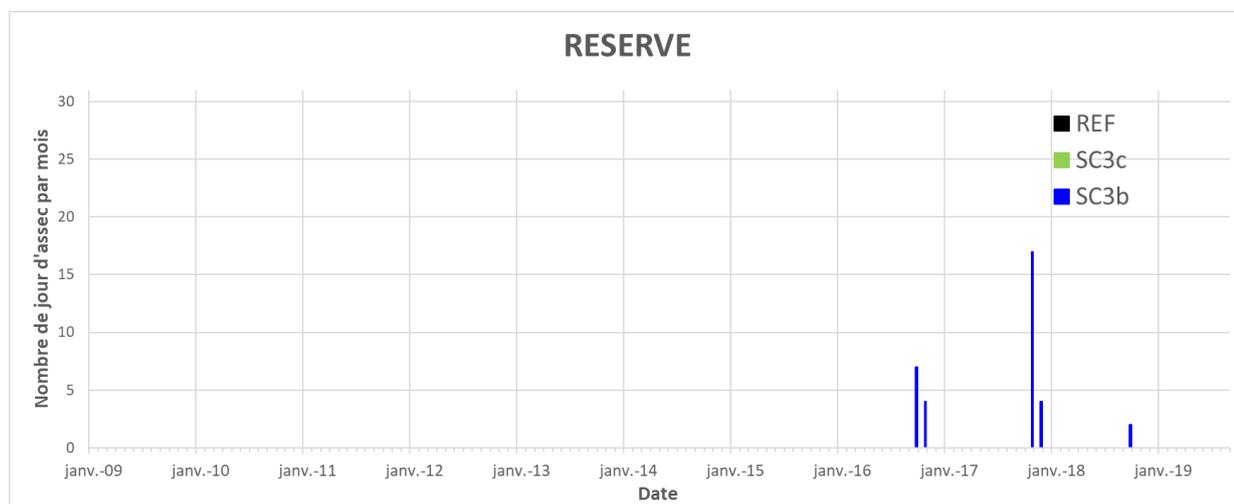


Illustration 86 - Impact des scénarios SC3B et SC3C sur les assecs du Bevinco à la station de la Réserve (2010-2019).

5.4.3. Principales conclusions

Tout d'abord, une augmentation moyenne de 30% des prélèvements exercés sur les trois forages de la CCMG apparaît soutenable, du point de vue de la nappe et du Bevinco. Il est cependant rappelé que les débits prélevés sur ces ouvrages n'ont pas été totalement portés à notre connaissance, aussi, la fiabilisation des résultats du modèle dans ce secteur passe par un suivi journalier des prélèvements.

La simulation de scénarios identiques mais avec des augmentations progressives de prélèvements (SC3C, SC3B et SC2) permet de relever l'apparition de certains phénomènes. On peut notamment souligner des assecs simulés à l'extrémité aval du Bevinco à partir du scénario SC3B ou encore les niveaux piézométriques simulés sur Casatorra inférieurs au 0 m NGF à partir du scénario SC3B.

En définitive, ces différents scénarios fournissent des pistes pour optimiser l'exploitation du champ captant d'Acqua Publica et permettent de contribuer à proposer des indicateurs de gestion. Ces points sont spécifiquement traités au paragraphe 5.7.

5.5. SCENARIO 4 – AUGMENTATION DES PRÉLÈVEMENTS SUR LE BEVINCO EN ÉTIAGE

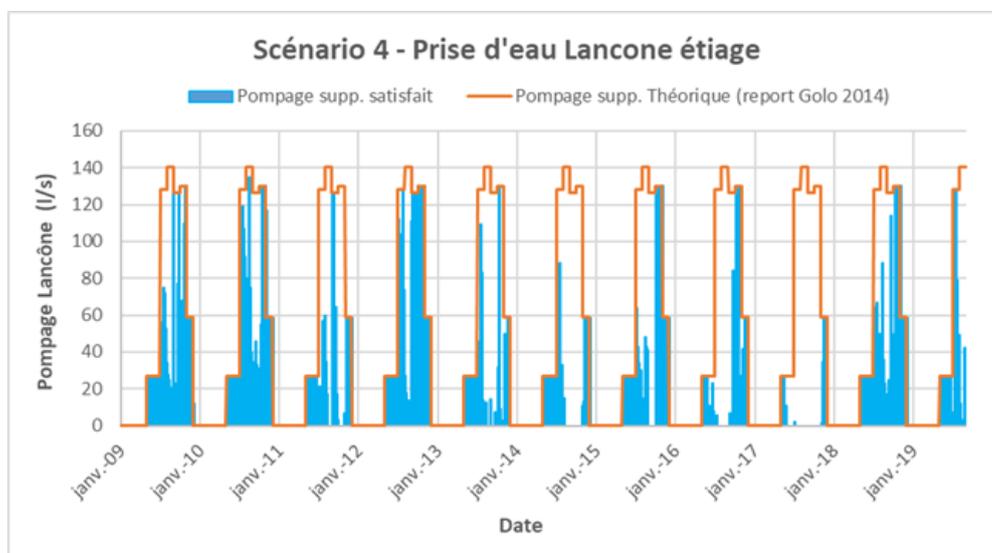
Dans ce quatrième scénario (SC4), la période 2009-2019 est simulée avec un report d'une partie des prélèvements effectués sur le Golo vers la prise d'eau du Lancone (captage en rivière en amont de la plaine). Comme pour le scénario de crise, les volumes reportés sont calculés sur la base de l'année 2014, année correspondant au prélèvement annuel sur le Golo le plus important sur la période étudiée, soit 1.7 Mm³/an répartis entre mai et novembre.

Dans le cas du scénario SC4, ce report n'est cependant que partiel (Illustration 87) car une contrainte est fixée avec le respect d'un débit minimal de 85 L/s à la prise d'eau. Il est rappelé qu'en dessous de ce débit à la prise d'eau, des assecs sont observés dans la plaine (Genevier *et al.*, 2021). Les reports de production sont ainsi très variables d'une année à l'autre, ils varient entre 77 000 m³ dans les conditions hydrologiques de l'année 2017 et 995 000 m³ pour l'année 2012, pour une valeur moyenne de 500 000 m³/an. (Illustration 87).

Au niveau du modèle, l'augmentation des prélèvements sur la prise d'eau du Lancone est traduite par une baisse des débits du Bevinco à l'entrée de la plaine, c'est-à-dire en entrée du modèle.

Les autres prélèvements (3 forages de la CCMG + prise d'eau du Lancone) ainsi que les conditions climatiques sont inchangés.

L'objectif de ce scénario est de contribuer à la réflexion quant à la révision des autorisations de prélèvement actuellement en vigueur sur le captage du Lancone, à savoir une interdiction de prélèvement du 15 juillet au 15 octobre et un débit réservé de 63 L/s à respecter. Le scénario simulé est plus restrictif du point de vue du débit réservé, en revanche, les prélèvements sont possibles toute l'année.



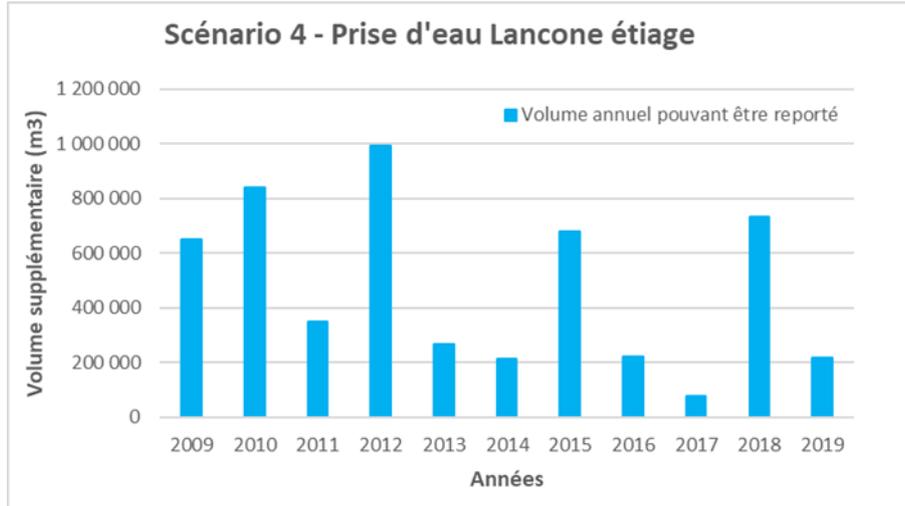


Illustration 87 - Reports de prélèvements théoriques et reports satisfaits sur la prise d'eau du Lancone en période d'étiage (scénario SC4) (reports théoriques en orange sur le graphique du haut, reports satisfaits en bleu).

5.5.1. Impact sur les niveaux de la nappe

L'impact de ce scénario sur la piézométrie reste très limité, et ne se ferait ressentir que dans la zone d'infiltration du Bevinco avec des rabattements de la nappe pluri-centimétriques. La carte de l'illustration 88 représente le rabattement de la nappe généré par le scénario SC4 au 25/07/2012, date à laquelle l'impact est le plus marqué. Dans cette situation, le rabattement supplémentaire simulé reste inférieur à 4 cm au niveau du champ captant.

Le flux d'infiltration du Bevinco vers la nappe serait donc peu impacté dans les conditions du scénario SC4.

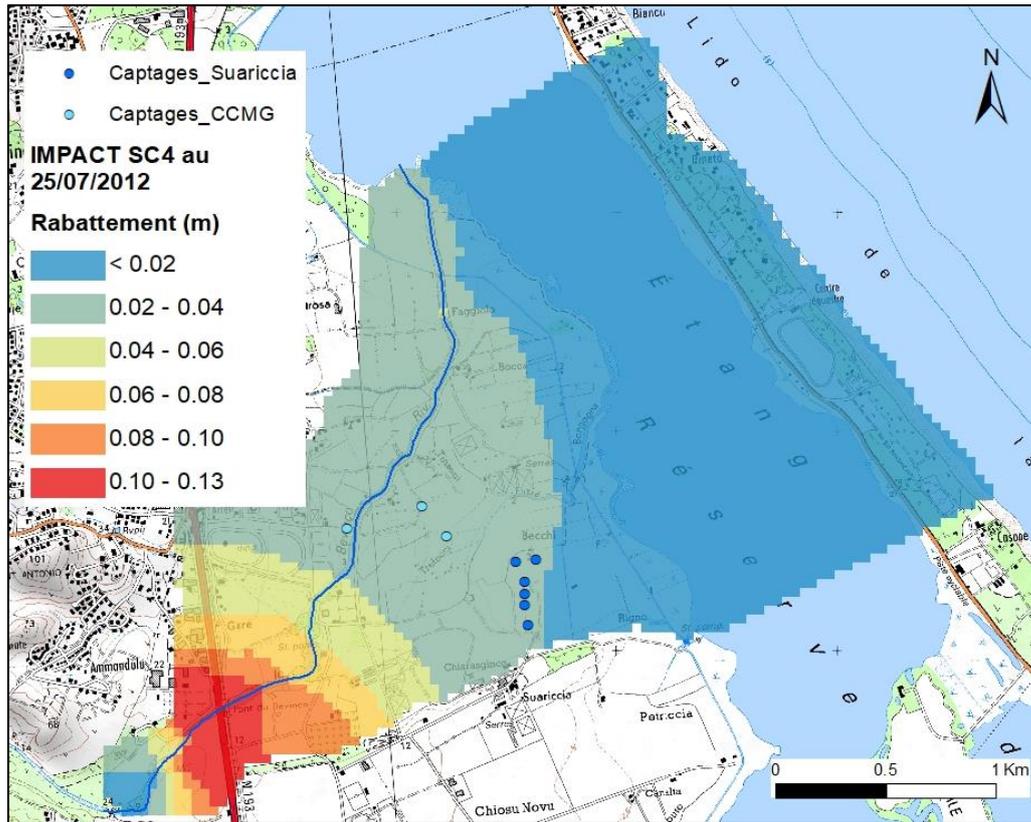
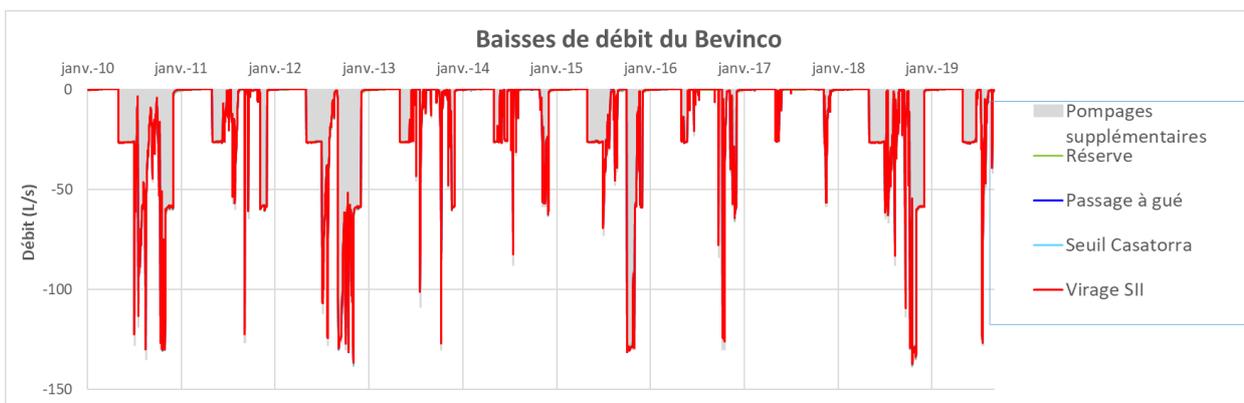


Illustration 88 - Impact du scénario SC4 sur la piézométrie de la nappe au 25/07/2012 (situation la plus impactée sur la période modélisée).

5.5.2. Impact sur les débits du Bevinco

Globalement, l'impact de ce scénario SC4 sur le Bevinco dans la plaine correspond à des baisses de débit équivalentes aux augmentations de débits prélevés au Lancone (Illustration 89). Le soutien de la nappe semble réduire l'impact sur l'extrémité aval du cours d'eau (Cf. Réserve, Illustration 89), mais cela serait peu significatif (moins de 3 L/s de différence en moyenne entre les stations Réserve et Virage à 90°).



Baisses de débit (l/s)	Virage	Passage à gué	Seuil Casatorra	Réserve
MAX	137.4	137.9	138.3	138.6
MOY	18.5	17.1	17.2	16.1

Illustration 89 - Impact du scénario SC4 sur les débits du Bevinco (2010-2019).

Concernant les assecs du Bevinco, l'impact est non significatif (Illustration 90). Le résultat de la modélisation vient ici confirmer les observations de terrain quant à l'apparition des assecs dans la plaine en deçà d'un débit de 85 L/s à Lancone.

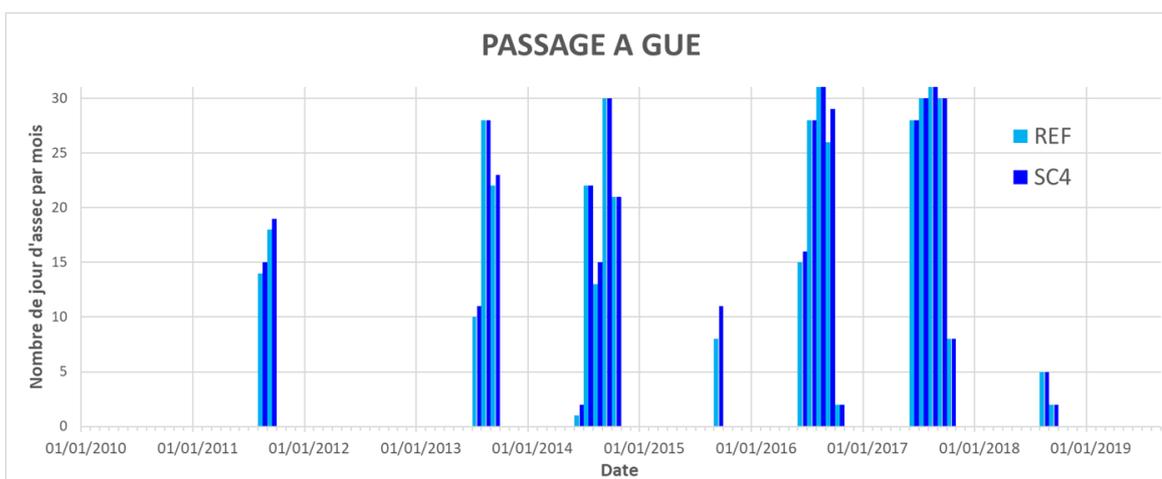


Illustration 90 - Impact du scénario SC4 sur les assecs du Bevinco (2010-2019).

5.5.3. Principales conclusions

Une augmentation des prélèvements sur le Bevinco entre les mois de mai et novembre apparaît soutenable d'après les résultats de modélisation, du point de vue des impacts sur la nappe et sur les débits du cours d'eau dans la plaine.

En effet, si un débit minimal de 85 L/s est respecté, les prélèvements supplémentaires au Lancone n'impactent que modérément les débits d'étiage et seraient donc sans conséquence sur les assecs du Bevinco.

Les augmentations de prélèvement sont fortement dépendantes des conditions hydrologiques (respect d'un débit minimal de 85 L/s). Sur la période étudiée (2009-2018⁵), l'augmentation est maximale en 2012 avec un volume supplémentaire mobilisable de 995 000 m³ (Illustration 87), pour une valeur moyenne de 500 000 m³/an.

⁵ La période modélisée s'arrêtant au 31/08/2019, l'année 2019 incomplète n'est pas considérée.

5.6. SCÉNARIO 5 – STOCKAGE HIVERNAL

Dans ce cinquième et dernier scénario (SC5), il s'agit de simuler l'alimentation d'un bassin de stockage à partir d'une augmentation des prélèvements sur la prise d'eau du Lancone entre les mois de décembre et avril.

Sur la base des volumes prélevés sur le Golo, l'objectif est ici d'accroître les prélèvements de 1.5 Mm³/an, avec une répartition uniforme de décembre à avril, soit une augmentation de 116 L/s. Encore une fois, un débit minimal de 85 L/s doit être respecté au Lancone, l'objectif initial de 1.5 Mm³/an n'est par conséquent pas atteint chaque année : les augmentations de prélèvements varient entre 1.19 Mm³/an (2016) et 1.5 Mm³/an (2010 et 2011) pour une valeur moyenne de 1.40 Mm³/an sur la période 2009-2018 (2019 = année incomplète) (Cf. Illustration 91).

À l'instar du scénario SC4, l'augmentation des prélèvements au Lancone est traduite par une baisse des débits du Bevinco en entrée du modèle. Les autres prélèvements (3 forages de la CCMG + prise d'eau du Lancone) ainsi que les conditions climatiques sont inchangés.

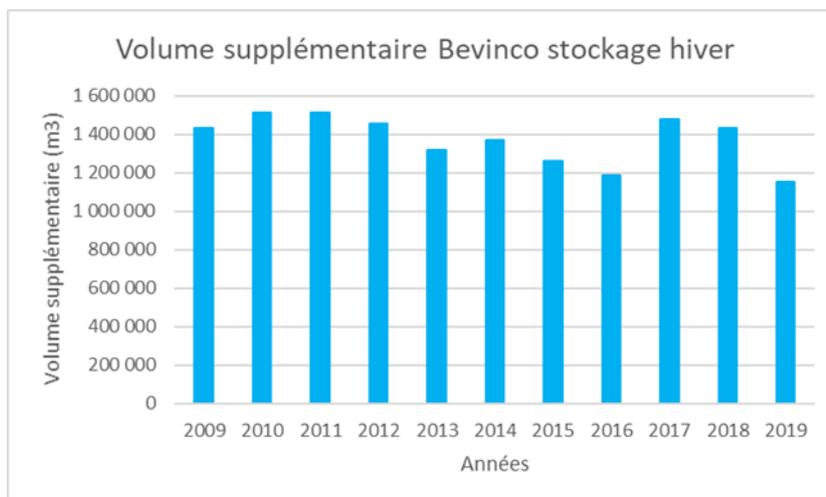
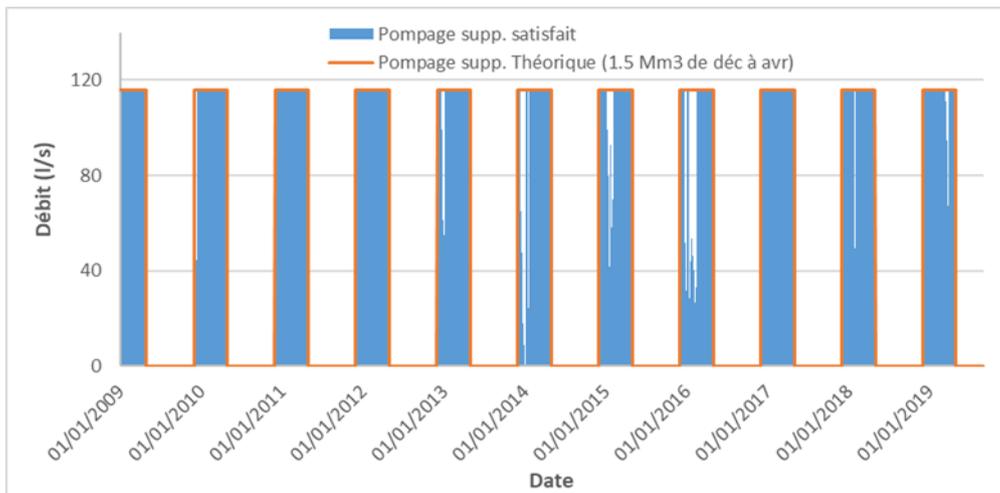


Illustration 91 - Reports de prélèvements théoriques et satisfaits sur la prise d'eau du Lancone en période hivernale (scénario SC5) (reports théoriques en rouge sur le graphique du haut, reports satisfaits en bleu).

5.6.1. Impact sur les niveaux de nappe

Le constat est similaire au scénario SC4, avec un impact sur la piézométrie de la nappe qui ne serait significatif (rabattements pluri-centimétriques) que dans la zone d'infiltration du Bevinco. La carte de l'illustration 92 représente le rabattement de la nappe généré par le scénario SC5 au 28/01/2012, date à laquelle l'impact est le plus marqué. Dans cette situation, le rabattement simulé reste inférieur à 4 cm au niveau du champ captant.

Encore une fois, le flux d'infiltration du Bevinco vers la nappe serait donc peu impacté dans les conditions du scénario SC5.

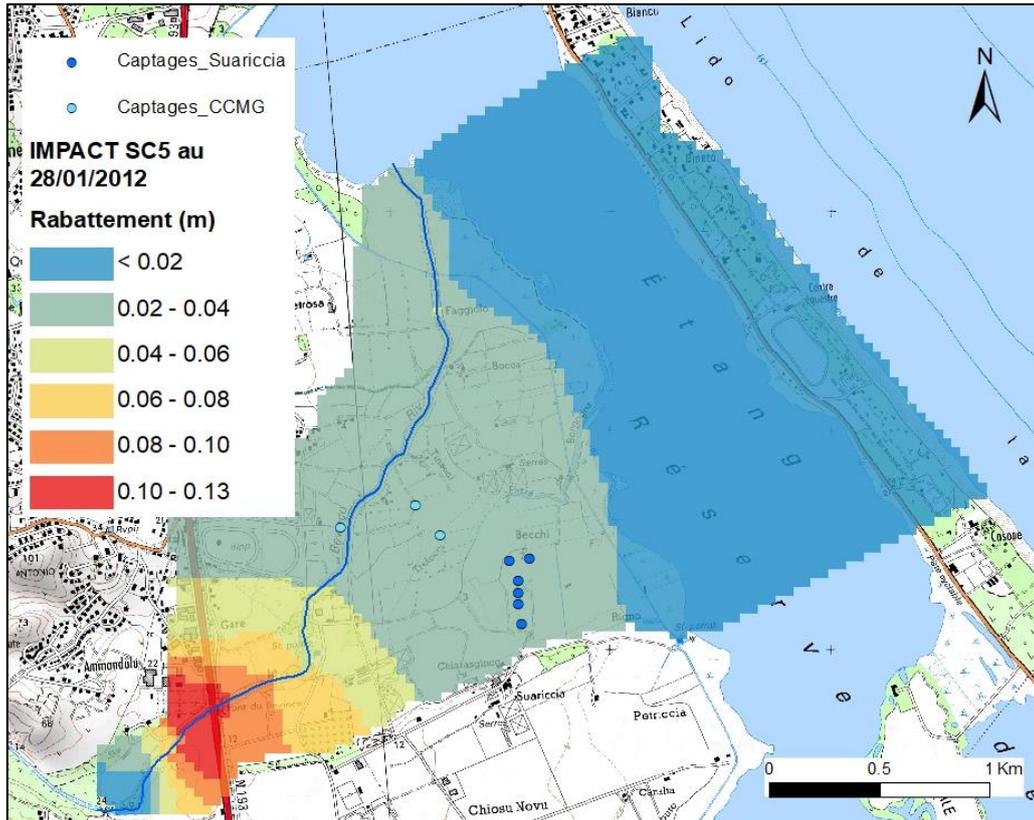
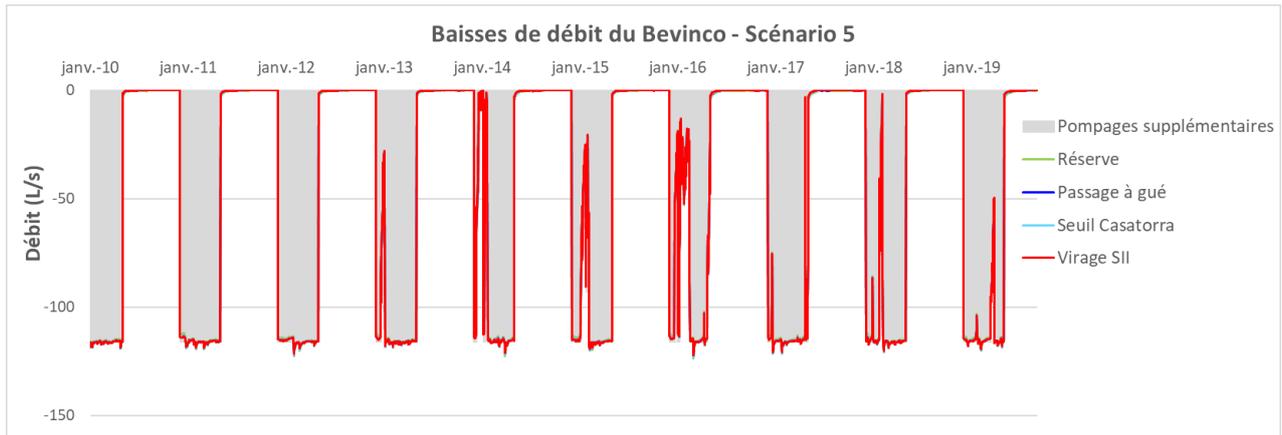


Illustration 92 - Impact du scénario SC5 sur la piézométrie de la nappe au 28/01/2012 (situation la plus impactée sur la période modélisée).

5.6.2. Impact sur les débits du Bevinco

À l'instar du scénario SC4, l'impact du scénario SC5 sur le Bevinco dans la plaine correspond à des baisses de débit équivalentes aux augmentations de débit prélevés au Lancone, mais cette fois-ci c'est la période hivernale qui est concernée (Illustration 93). De ce fait, aucun impact sur les assècs du Bevinco n'est à relever.

Une évolution plus nette de l'amont vers l'aval peut par contre être notée : un soutien de nappe plus marqué en hiver viendrait réduire l'impact du scénario sur l'extrémité aval du cours d'eau : perte de débit moyenne de 51.7 L/s au virage à 90° contre 45.4 L/s à la Réserve (Illustration 93).



Baisses de débit (l/s)	Virage	Passage à gué	Seuil Casatorra	Réserve
MAX	122.3	122.8	123.2	123.7
MOY	51.7	48.2	48.3	45.4

Illustration 93 - Impact du scénario SC5 sur les débits du Bevinco (2010-2019).

5.6.3. Principales conclusions

Une augmentation des prélèvements sur le Bevinco en période hivernale (décembre à avril) apparaît peu impactante et donc tout à fait soutenable d'après les résultats de modélisation, du point de vue de la nappe comme des débits du cours d'eau dans la plaine.

Contrairement au scénario SC4 (étiage), les augmentations de prélèvement attendues sont ici moins variables d'une année à l'autre (débit minimal de 85 L/s le plus souvent satisfait en hiver). Un report moyen de 1.4 Mm³/an serait ainsi envisageable en période hivernale. Les contraintes techniques et réglementaires liées à un bassin de stockage, non considérées dans le cadre de la modélisation, restent à étudier. De même, l'impact de la réduction des apports d'eau douce en provenance du Bevinco sur l'équilibre hydrobiologique de l'étang que représente ce scénario est également à étudier.

5.7. VERS DES INDICATEURS DE GESTION

Le maintien du bon état quantitatif d'une masse d'eau souterraine poursuit les objectifs suivants (Directive Cadre sur l'Eau) :

- assurer un équilibre sur le long terme entre les volumes s'écoulant au profit des autres milieux et/ou d'autres nappes, les volumes captés et la recharge de chaque nappe ;
- éviter une altération significative de l'état chimique et/ou écologique des eaux de surface liée à une baisse d'origine anthropique du niveau piézométrique ;
- éviter une dégradation significative des écosystèmes terrestres dépendants des eaux souterraines en relation avec une baisse du niveau piézométrique ;
- empêcher toute invasion saline ou autre liée à une modification d'origine anthropique des écoulements.

Dans le cas de la nappe alluviale du Bevinco, les deux objectifs environnementaux à considérer sont 1) maintenir un écoulement minimal du cours d'eau dans la plaine et 2) éviter les intrusions salines.

Le plus souvent, les contraintes environnementales sont directement traduites par le respect de débits ou niveaux piézométriques d'objectif. Dans le cas de la nappe du Bevinco, il est pour l'instant prématuré de s'appuyer sur des débits objectifs, car le suivi n'est que très récent et postérieur à la présente étude.

Il est rappelé qu'il n'est pas non plus possible de s'appuyer sur les paramètres chlorures (absence de suivi) ou conductivité électrique (évolution stable sur les quelques mois de suivi disponibles) ou les résultats du modèle hydrodispersif qui ne sont pas suffisamment contraints en l'état actuel.

En revanche, il apparaît tout à fait possible de s'appuyer sur des indicateurs piézométriques pour répondre aux deux objectifs environnementaux identifiés. Au regard des acquis de l'étude et des résultats de modélisation, il est proposé de définir des seuils de gestion sur les piézomètres de référence suivants :

- le piézomètre de **Casatorra** en lien avec le maintien d'un débit minimal du Bevinco ;
- les piézomètres **Pz1 et/ou Pz4** en lien avec la problématique de progression du biseau salé.
Comme vu précédemment, ces indicateurs ne considèrent pas à ce stade la salinisation des puits 7 et 8 qui doit être caractérisée au préalable.

Pour chacun de ces indicateurs, des seuils de gestion sont proposés selon une approche pragmatique visant à valoriser les observations de terrain et les chroniques simulées par le modèle hydrodynamique. Celle-ci diffère d'une approche plus classique reposant sur des analyses statistiques de chroniques observées de longue durée, mais elle se justifie ici dans un contexte où les suivis sont de courte durée (à l'exception des niveaux sur Casatorra).

5.7.1. Proposition de seuils de gestion sur le piézomètre de Casatorra

Lors de la phase 1 de l'étude, une corrélation intéressante a été mise en évidence entre les débits du Bevinco mesurés par la DREAL au Lancone et les niveaux piézométriques à Casatorra. Un niveau seuil de 2 m NGF à Casatorra peut ainsi être associé à un débit de 85 L/s au Lancone (Illustration 94), débit en deçà duquel des assecs commencent à apparaître dans la plaine (Genevier *et al.*, 2021).

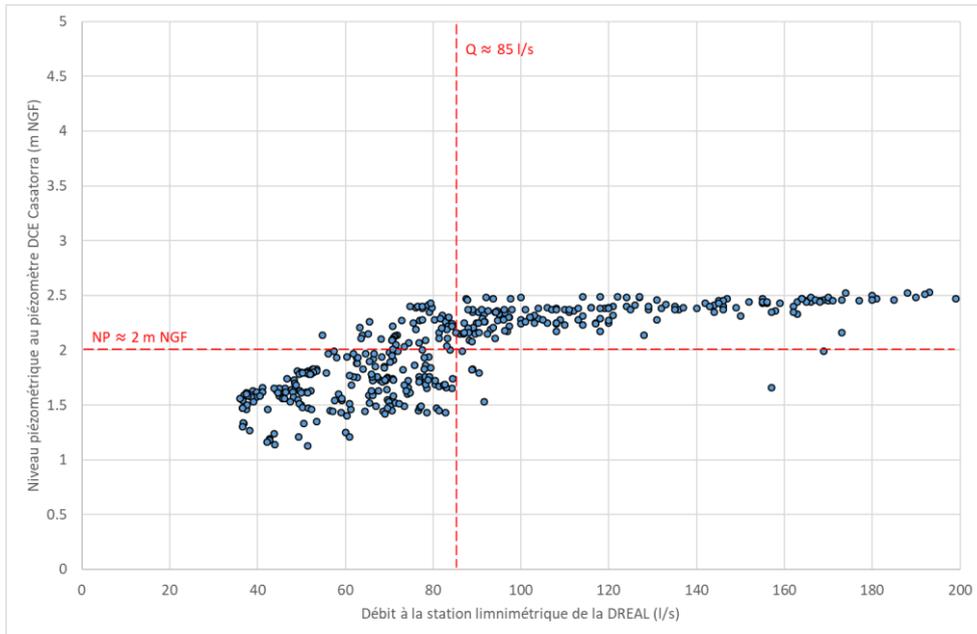


Illustration 94 - Répartition de l'altitude de la nappe au piézomètre DCE Casatorra en fonction du débit de la rivière à la station DREAL pour les débits compris entre 0 et 0.2 m³/s (extrait de Genevier et al., 2021).

Les résultats des différentes simulations réalisées avec le modèle apparaissent concordants : des assecs du Bevinco au seuil de Casatorra sont simulés en deçà d'une cote de 2.1 m NGF (Illustration 95).

Il est ainsi proposé de retenir un seuil de vigilance sur le piézomètre Casatorra équivalent à 2 m NGF pour prévenir des assecs du Bevinco dans la plaine.

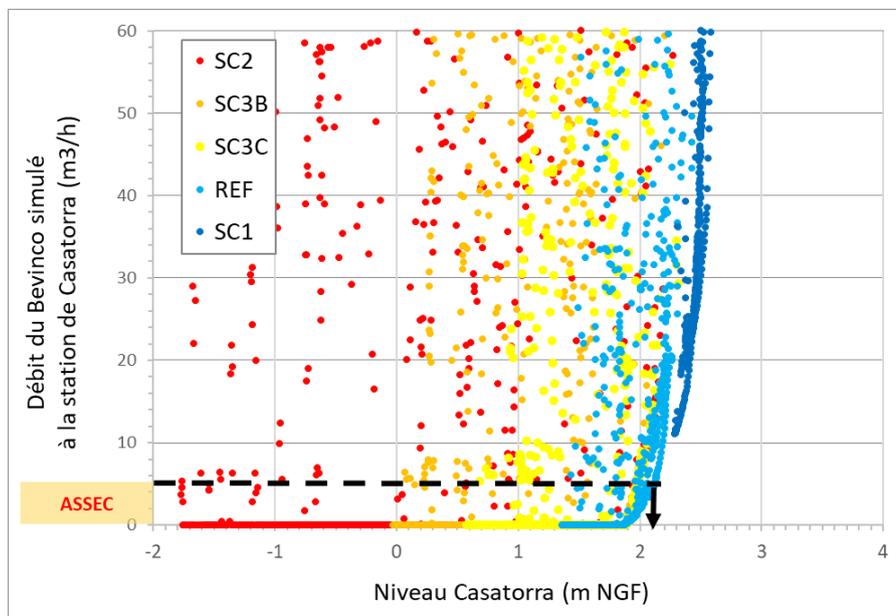


Illustration 95 - Débits du Bevinco simulés au seuil de Casatorra versus niveaux piézométriques simulés à Casatorra (des assecs sont simulés en deçà d'un niveau de 2.1 m NGF).

À partir d'un certain niveau de prélèvement sur le champ captant, le modèle a montré que des assecs finissaient par apparaître à l'extrémité aval du Bevinco (interruption d'apports d'eau douce à l'étang). Il est proposé de considérer ces assecs comme une situation de crise à éviter car ils sont susceptibles de se traduire par une progression du rentrant salé vers l'amont. Sur la base des différents scénarios simulés, un seuil de crise de 0.6 m NGF peut être défini (Illustration 96).

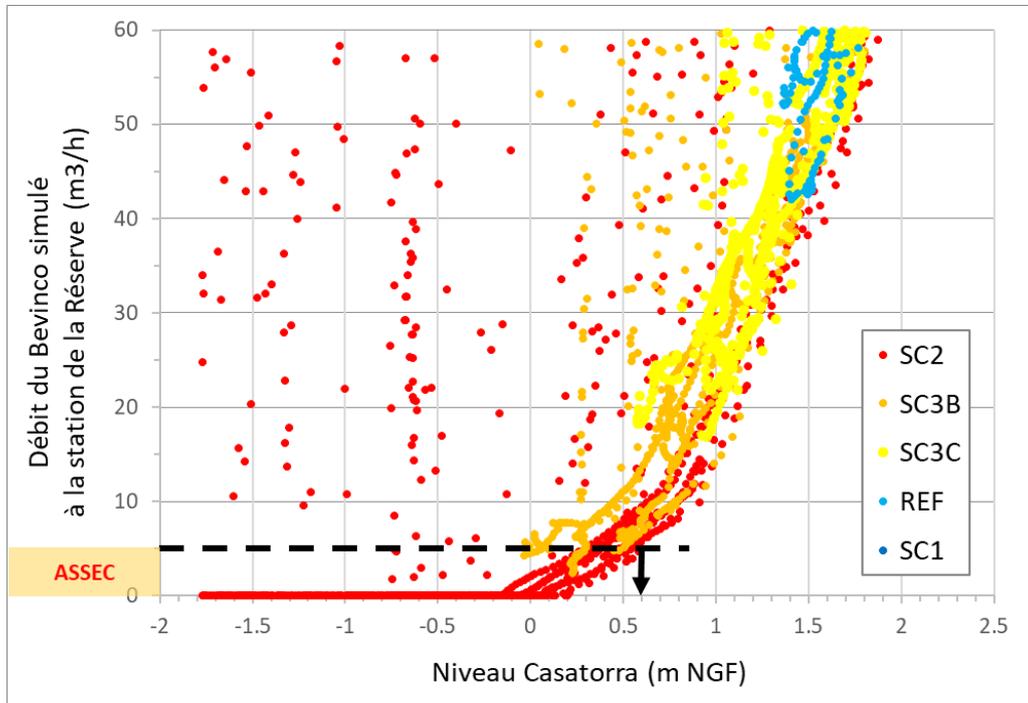


Illustration 96 - Débits du Bevinco simulés à la Réserve versus niveaux piézométriques simulés à Casatorra pour les différents scénarios simulés (des assecs sont simulés en deça d'un niveau de 0.6 m NGF).

Afin d'être cohérent avec les seuils de gestion en cours de définition en Corse (Corbier *et al.*, 2021, à paraître), deux seuils intermédiaires peuvent être considérés : alerte et alerte renforcée. Leur détermination reste à « dire d'expert » à ce stade et les valeurs pourront être ajustées après un premier retour d'expérience. En définitive, les seuils de gestion proposés sur le piézomètre de Casatorra sont les suivants :

- seuil de vigilance : 2 m NGF ;
- seuil d'alerte : 1.2 m NGF ;
- seuil d'alerte renforcée : 0.9 m NGF ;
- seuil de crise : 0.6 m NGF.

Le seuil de vigilance a été atteint ou dépassé quasiment chaque année depuis 2009, à l'exception des années 2009 et 2012 (Illustration 97). Le seuil d'alerte a été atteint en 2017 tandis que le seuil d'alerte renforcée était atteint en 2016.

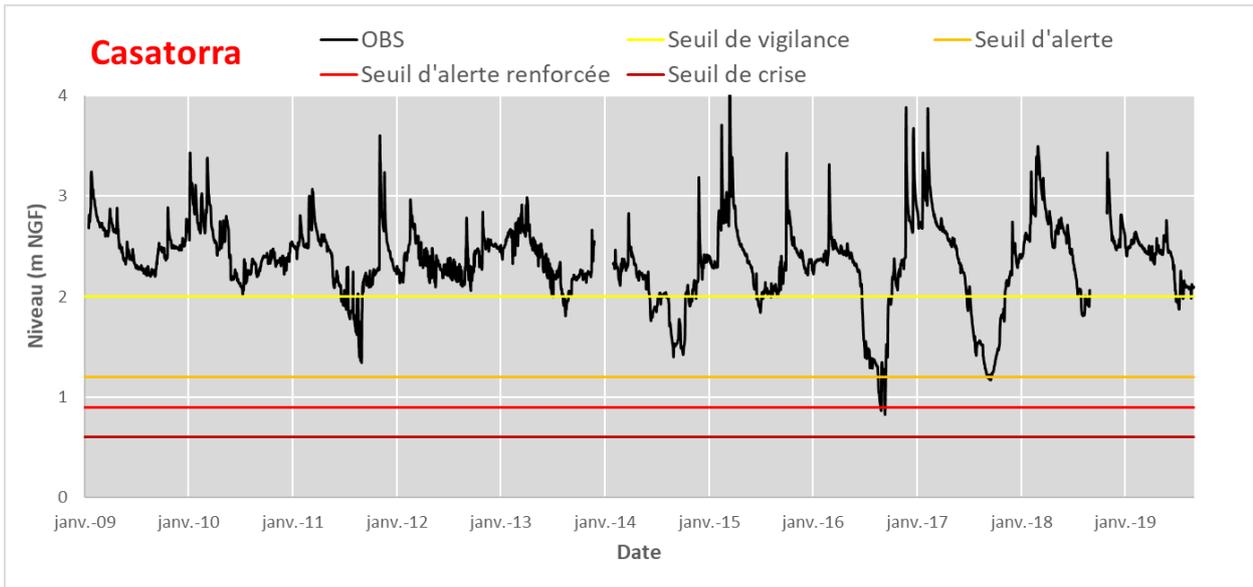


Illustration 97 - Chronique piézométrique mesurée à Casatorra de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.

5.7.2. Proposition de seuils de gestion sur les piézomètres Pz1 et Pz4

Concernant l'intrusion saline, aucun suivi piézométrique de longue durée n'est disponible. Il est donc ici proposé de s'appuyer sur les chroniques simulées par le modèle sur la période 2009-2019.

Un premier critère d'objectif à respecter pour maintenir le biseau salé est de maintenir le niveau piézométrique sur Pz4 supérieur au niveau de la mer. Pour ce faire, deux niveaux seuils sont calculés à partir des données du marégraphe de Solenzara :

- un seuil de vigilance correspondant au 3^{ème} quartile des niveaux de la mer (75% des niveaux marins restent inférieurs à ce seuil), soit 0.4 m NGF ;
- un seuil d'alerte correspondant au niveau moyen de la mer, soit 0.1 m NGF.

Les résultats du modèle montrent que le seuil de vigilance aurait été atteint en 2012 et de 2014 à 2018 (Illustration 98). Le seuil d'alerte n'aurait pas été atteint depuis 2009.

Dans le cas de l'objectif « intrusion saline », à ce stade, il n'apparaît pas opportun de proposer des seuils supplémentaires, seuils qui seraient définis de façon arbitraire en l'absence d'informations apportées par les observations de terrain. Il s'agira d'abord de consolider ces premières propositions par une confrontation à la surveillance mise en place.

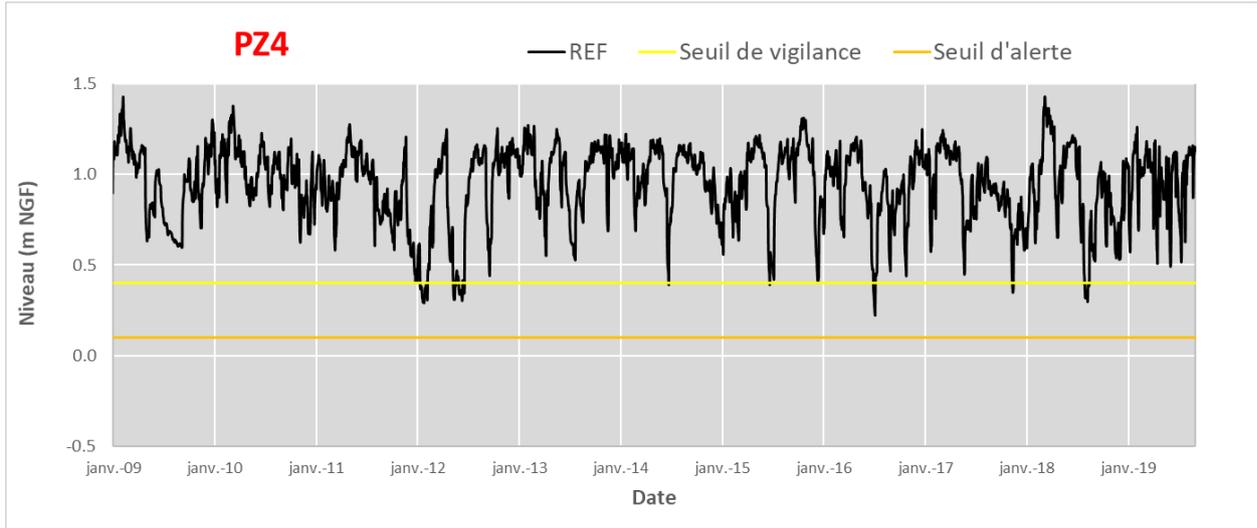


Illustration 98 - Chronique piézométrique simulée en Pz4 de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.

Une très bonne corrélation est observée entre les niveaux de Pz1 et ceux de Pz4, et ce quel que soit le scénario d'exploitation simulé. Il est par conséquent aisé de traduire le critère utilisé en Pz4 sur Pz1, ce qui amène aux seuils suivants pour Pz1 (Illustration 99) :

- un seuil de vigilance de -0.2 m NGF ;
- un seuil d'alerte de -1.0 m NGF.

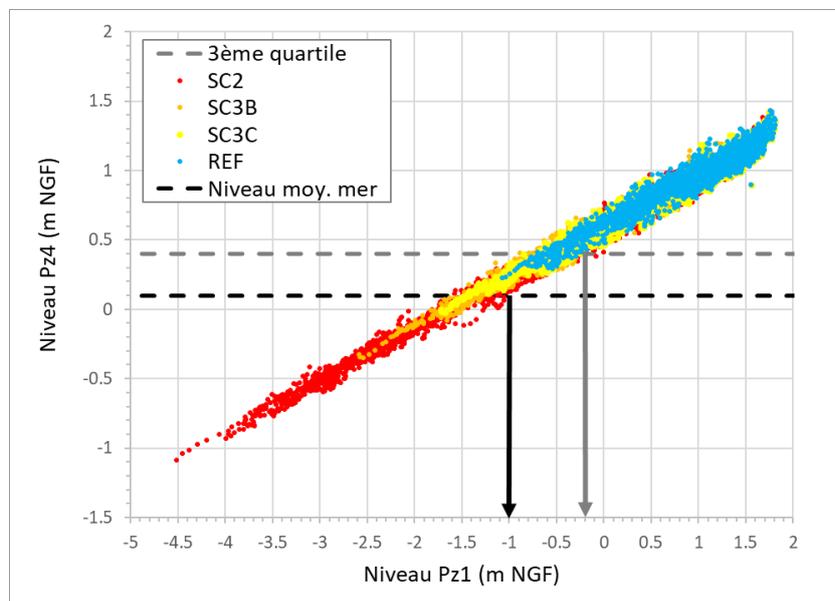


Illustration 99 - Niveaux simulés en Pz4 versus niveaux simulés en Pz1 pour les différents scénarios simulés.

Les niveaux simulés en Pz1 étant également corrélés aux flux d'eau entrant par la limite littorale (apports d'eaux minéralisées en provenance du domaine marin), cela permet de conforter l'approche ici retenue (Illustration 100).

Pour ces deux piézomètres, il est bien entendu primordial de poursuivre le suivi de la conductivité électrique de la nappe qui pourrait à terme aider à l'élaboration de règles de gestion.

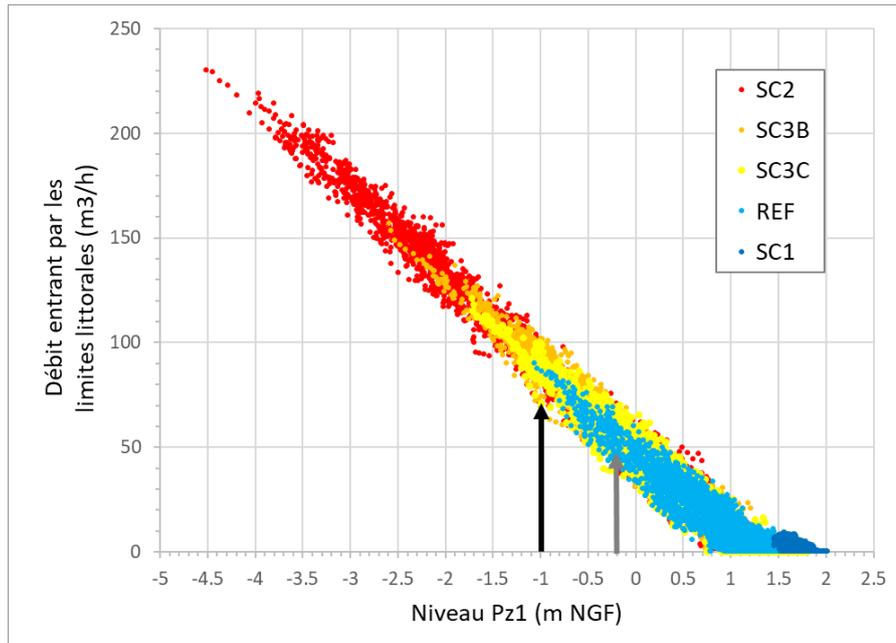


Illustration 100 - Flux d'eau simulés en provenance du littoral versus niveaux simulés en Pz1 avec report des seuils de gestion retenus pour Pz1.

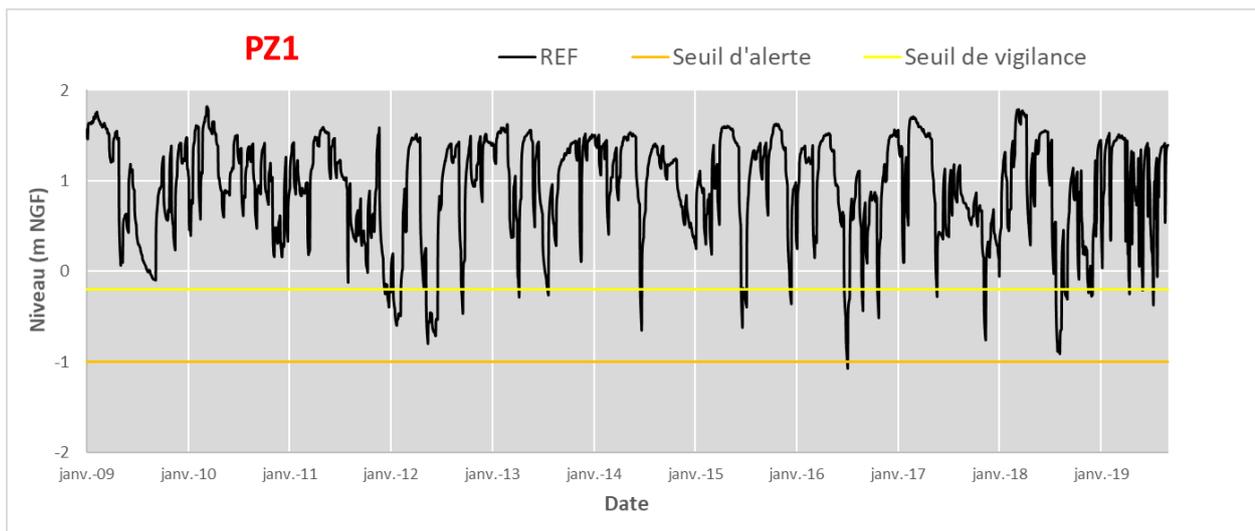


Illustration 101 - Chronique piézométrique simulée en Pz1 de 2009 à 2019 et report des seuils de gestion proposés.

5.7.3. Volumes exploitables

Les résultats des différents scénarios d'exploitation de la nappe simulés avec le modèle (scénario de référence, SC2, SC3B et SC3C) ont été analysés à la lumière des seuils de gestion discutés précédemment. Pour chaque indicateur, l'objectif était d'identifier les scénarios permettant de respecter les seuils d'alerte, année par année.

Les résultats sont compilés au niveau de l'illustration 102 avec un tableau récapitulatif et un graphique des volumes annuels potentiellement mobilisables par le champ captant.

Si on s'intéresse au maintien d'un débit minimum du Bevinco dans la plaine et à repousser le biseau salé, il semblerait que des volumes supplémentaires puissent être exploités par Acqua Publica. Cela semblerait particulièrement vrai pour les années 2010 et 2013 à 2015. En revanche, dans les conditions hydrologiques des années 2016 et 2017, les prélèvements effectués correspondraient à un maximum. Pour les années 2011, 2012 et 2018, de faibles gains de production pourraient également être envisagés (Illustration 102).

Il est cependant rappelé que l'exploitation des puits 7 et 8 est aujourd'hui freinée par une salinisation des eaux captées, a priori en provenance de la surface sous l'influence du canal de Borgogna. Par conséquent, les premières conclusions quant à la disponibilité de la ressource en eau souterraine ne pourront être vérifiées que si des actions correctives permettent de contrer le processus de salinisation des puits 7 et 8. Les grandes lignes d'un programme d'étude et de mesures sont discutées dans le dernier chapitre du présent rapport (conclusions et perspectives).

Année	Casa > 1.2 mNGF	PZ1 > -1 mNGF	PZ4 > 0.1 mNGF
2010	SC3B +	SC3B	SC3B
2011	REF +	SC3C +	SC3C +
2012	SC3B	REF +	SC3C
2013	SC3C	SC3C	SC3C +
2014	SC3C +	SC3B	SC3B
2015	SC3C +	SC3C	SC3C
2016	REF -	REF +	REF +
2017	REF	REF +	REF +
2018	REF +	REF +	REF +

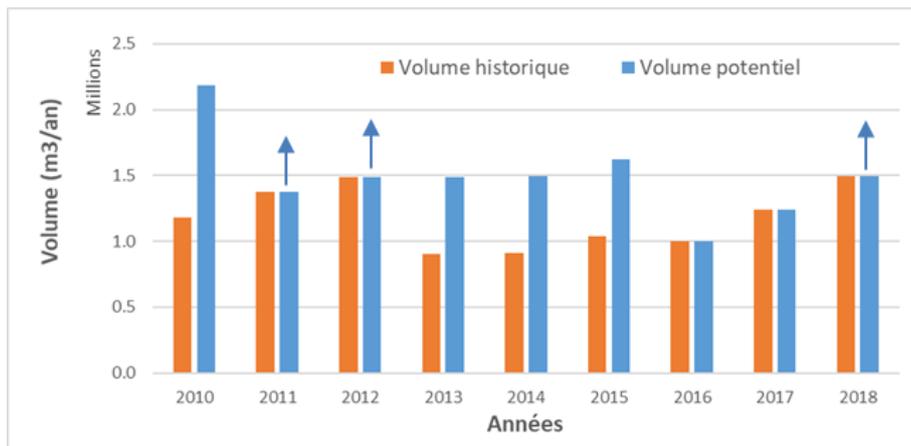


Illustration 102 - Identification des scénarios d'exploitation de la nappe permettant de respecter les seuils d'alerte (en gras : scénario acceptable) et volumes potentiellement mobilisables.

L'exercice présenté ici se limite à l'étude de scénarios d'exploitation suivant le même schéma (augmentation des prélèvements répartie de façon uniforme sur les six puits, augmentation uniquement comprise entre mai et novembre et selon une répartition mensuelle identique). Il serait donc très intéressant de simuler d'autres types de scénarios d'exploitation pour aider Acqua Publica à optimiser son exploitation de la nappe. Parmi ceux-ci, on peut citer, de façon non exhaustive :

- un pompage au niveau de Suariccia II, en aval de la zone d'infiltration du Bevinco, en amont du champ captant. Le forage existant s'était révélé peu productif mais il faut rappeler qu'il n'atteint pas l'aquifère principal. Une exploitation dans ce secteur permettrait de s'affranchir de la salinisation constatée sur les puits 7 et 8 ;
- une régulation des débits de pompage pour les six puits du champ captant qui fonctionnent aujourd'hui en tout ou rien (débit unitaire de 100 m³/h), avec des débits variables d'un ouvrage à l'autre. Une optimisation de l'exploitation actuelle est probable ;
- l'impact du changement climatique, à partir des projections climatiques disponibles, sur les ressources en eau superficielle et souterraine du Bevinco pourrait permettre à Acqua Publica d'avoir une vision à plus long terme.

6. Conclusions et perspectives

6.1. MODÉLISATION HYDROGÉOLOGIQUE DE LA NAPPE DU BEVINCO

Le modèle hydrogéologique de l'aquifère du Bevinco, développé sous MARTHE, permet de bien reproduire les débits du Bevinco et les niveaux piézométriques de la nappe, plus particulièrement dans l'axe d'écoulement privilégié des eaux souterraines passant par le champ captant d'Acqua Publica. Concernant le Bevinco, la zone d'infiltration à l'entrée de la plaine et la retranscription spatio-temporelle des assecs apparaît très satisfaisante. Les résultats sont, en revanche, moins bons dans le compartiment nord de l'aquifère, secteur où de nombreuses inconnues demeurent.

En complément des nombreuses connaissances acquises suite à la phase 1 de l'étude, le modèle du Bevinco a permis de quantifier les différentes composantes du bilan hydraulique de l'hydrosystème ou encore de reconstituer les régimes naturels du Bevinco et de la nappe (scénario 1). Le modèle apporte ainsi un éclairage nouveau sur le fonctionnement de l'hydrosystème du Bevinco.

Ceci étant dit, le modèle dispose de peu de recul avec des chroniques de suivi de courte durée ou devenues opérationnelles après le processus de calage du modèle. C'est pourquoi, il est préconisé de poursuivre l'acquisition des données engagée et de maintenir le modèle afin d'aboutir à un outil de gestion robuste.

La modélisation hydrodispersive visant à reproduire les concentrations en chlorures dans la nappe a rencontré plusieurs difficultés. En particulier, le calage du modèle hydrodispersif n'a pas été suffisamment contraint sur la période simulée (2009 – août 2019), notamment en raison de l'absence de suivis des concentrations en chlorures ou en conductivité électrique pendant des épisodes d'augmentation des concentrations. En outre, les phénomènes de salinisation des puits 7 et 8 n'ont été portés à la connaissance du BRGM que très récemment, après le processus de calage du modèle. En l'état, il n'apparaît pas possible de s'appuyer sur le modèle hydrodispersif actuel pour définir des règles de gestion du champ captant.

Les principales **pistes d'amélioration** du modèle sont les suivantes :

- mise à disposition par la CCMG des prélèvements journaliers exercés sur leurs trois forages (données inconnues depuis août 2017) ;
- poursuite de l'acquisition haute fréquence (horaire) des débits de pompage sur les six puits de Suariccia par Acqua Publica. Le calage du modèle a montré l'importance de disposer des volumes minima journaliers. Il est rappelé que le dispositif de pompage actuel ne permet pas de remonter aux prélèvements unitaires ;
- poursuite de l'acquisition haute fréquence (horaire) des niveaux piézométriques et des conductivités électriques sur les différents ouvrages instrumentés dans le cadre de l'étude ;
- valorisation des suivis en continu des débits du Bevinco mis en place sur la plaine par la Réserve (au passage à gué) et par la DREAL (pont RT11, Y7310004). En termes de débit, le modèle n'a pu être calé que sur les campagnes de jaugeages différentiels conduites pendant l'étude. Ces deux nouveaux points de surveillance pourront donc permettre de consolider le calage dans le futur ;
- poursuite par Acqua Publica des suivis des concentrations en chlorures à la sortie des deux unités de Suariccia et archivage numérique de celles-ci pour permettre de contraindre le calage du modèle hydrodispersif (évolutions stables sur la période de calage) ;

- mise à jour du modèle à partir de l'allongement des chroniques de données listées précédemment pour validation de celui-ci. Une actualisation pourrait intervenir rapidement puisqu'à fin août 2021, deux années de données supplémentaires seront d'ores et déjà disponibles ;
- les phénomènes de débordement du Bevinco et de l'étang (en surface) ne sont actuellement pas pris en compte par le modèle car le code de calcul ne le permettait pas au moment de l'étude. La recharge de la nappe induite par ces flux de débordement n'est donc pas modélisée. Des développements, en cours sur le sujet au BRGM, pourraient autoriser à terme d'intégrer ces phénomènes. Des améliorations pourraient ainsi être attendues sur la reproduction de certains niveaux de très hautes eaux, en particulier au piézomètre de Casatorra ;
- enfin, les processus à l'origine des augmentations de salinité observées sur les puits 7 et 8 sont mal maîtrisés. Il est donc impératif de les caractériser, de confirmer les hypothèses formulées si on veut parvenir à les modéliser. Trop d'inconnues subsistent, en particulier des facteurs anthropiques comme le défaut d'étanchéité des puits. Il est rappelé qu'en l'état actuel, le phénomène modélisé à l'origine de la salinisation de l'aquifère est la progression du front salé en provenance du littoral (biseau salé).

Le modèle du Bevinco a été exploité à travers la simulation de différents scénarios prospectifs. Ces derniers permettent d'envisager des solutions alternatives pour augmenter l'exploitation de la ressource : report des prélèvements effectués sur le Golo sur le Bevinco en étiage (scénario 4), comme en hiver (scénario 5), possible augmentation des pompages en nappe certaines années (scénarios 3).

À partir de ces résultats de simulation et des observations de terrain, des **indicateurs piézométriques de gestion de l'aquifère** ont pu être proposés (Casatorra, PZ1 et Pz4). À ce stade, ceux-ci ne prennent pas en compte les contaminations en chlorures observées sur les puits 7 et 8 (trop peu documentées, maîtrisées et découvertes après calage du modèle).

En tout état de cause, les seuils de gestion définis en première approche méritent d'être consolidés avec l'allongement des chroniques de suivi et les retours d'expérience du terrain.

En termes de **perspectives**, plusieurs applications du modèle pourraient être envisagées. Il serait en effet très intéressant de simuler d'autres types de scénarios d'exploitation pour aider Acqua Publica à optimiser son exploitation de la nappe. On peut par exemple citer :

- un pompage au niveau de Suariccia II, situé en aval de la zone d'infiltration du Bevinco et en amont du champ captant. Le forage existant s'était révélé peu productif mais il faut rappeler qu'il n'atteint pas l'aquifère principal. Une exploitation dans ce secteur permettrait de s'affranchir de la salinisation constatée sur les puits 7 et 8. Compte tenu du dimensionnement de l'ouvrage existant, la création d'un nouveau forage serait nécessaire si un tel scénario devait se concrétiser ;
- une régulation des débits de pompage pour les 6 puits du champ captant qui fonctionnent aujourd'hui en tout ou rien (débit unitaire de 100 m³/h), avec des débits variables d'un ouvrage à l'autre. Une optimisation de l'exploitation actuelle est probable ;
- l'impact du changement climatique, à partir des projections climatiques disponibles, sur les ressources en eau superficielle et souterraine du Bevinco pourrait permettre à Acqua Publica d'avoir une vision à plus long terme.

6.2. GESTION DU CHAMP CAPTANT DE SUARICCIA

Compte tenu de la forte réactivité de l'hydrosystème du Bevinco et des influences marquées des débits d'infiltration du cours d'eau et des pompages, la bonne gestion du champ captant nécessite un monitoring haute fréquence comme évoqué précédemment (prélèvements, niveaux, conductivités électriques et concentrations en chlorures).

Acqua Publica pourrait reprendre la maintenance du réseau de surveillance mis en place dans le cadre de l'étude. Le BRGM se tient à disposition pour assurer la passation via des actions de formation. Les ouvrages à conserver en priorité sont : Casatorra, le puits 7 de Suariccia III (à compléter par SIII-8), Pz1, Pz2, Pz4, Pz5 et Pz3 dans une moindre mesure.

Afin de caractériser les processus de salinisation des puits 7 et 8, il est préconisé les actions suivantes :

- reconnaissances caméra des six puits du champ captant afin d'évaluer leur état, notamment vis-à-vis de problèmes d'étanchéité ;
- observations des écoulements dans les fossés pendant et en dehors des phases de pompage (faire la différence entre pompages sur Suariccia III uniquement / Suariccia I uniquement / Suariccia III + Suariccia I), associées à des mesures de conductivité électrique dans le canal de drainage ;
- réalisation de diagraphies de conductivité sur les puits et les piézomètres alentours avant, pendant et après les phases de pompage sur Suariccia III ;
- mise en place d'un suivi continu de la conductivité sur les puits 7 et 8 (actuellement, seul le puits 7 est suivi) ;
- analyses chimiques pour pouvoir discriminer l'origine de l'eau salée dans SIII (étang/Borgogna ou mer) avec l'analyse des éléments majeurs et des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}O$ et δ^2H) afin d'identifier la provenance de l'eau salée captée par les puits 7 et 8. Les isotopes du Bore ($\delta^{11}B$) constitueraient également un co-traceur intéressant puisqu'ils peuvent marquer des sources anthropiques de salinisation telles que les eaux usées et la salinisation d'origine agricole (irrigation), et permettraient ainsi de distinguer avec certitude l'origine de l'augmentation des chlorures (Kloppmann *et al.*, 2011) ;
- opérations de régulation des débits de pompage sur ces deux puits qui fonctionnent actuellement en « tout ou rien » ;
- valorisation / interprétation des données acquises après septembre 2019 (date de fin de calage du modèle).

À ce stade de la compréhension du phénomène, les pistes de gestion de ce problème de salinisation à court terme pourraient consister à :

- travailler sur l'étanchéification des puits du champ captant ;
- mettre en place un système permettant d'éviter la remontée des eaux du Fossé de Borgogna dans le canal de drainage du champ captant ;
- réguler les débits unitaires des puits 7 et 8.

6.3. PERSPECTIVES RÉGIONALES

L'étude de modélisation hydrogéologique du Bevinco menée par le BRGM en partenariat avec Acqua Publica, l'OEC et l'AERMC permet désormais de disposer d'un outil de gestion quantitative de l'hydrosystème du Bevinco.

Dans la mesure où le bassin versant du Golo est indirectement interconnecté avec celui du Bevinco via les achats d'eau du Golo faits pour l'alimentation en eau du territoire de la CAB, l'optimisation de l'exploitation de l'hydrosystème du Bevinco pourrait engendrer une réduction des prélèvements sur le Golo.

La mise en place d'un outil de gestion quantitative de l'hydrosystème du Golo (nappe + rivière) permettrait d'avoir une meilleure maîtrise de l'approvisionnement en eau potable du territoire de la CCMG et de l'alimentation du réseau de distribution de l'eau brute vers la Plaine Orientale. Ainsi, intégrer le modèle du Bevinco à un dispositif plus global de gestion des prélèvements à l'échelle de la masse d'eau de la Marana-Casinca permettrait d'y maîtriser la ressource en eau et ses usages.

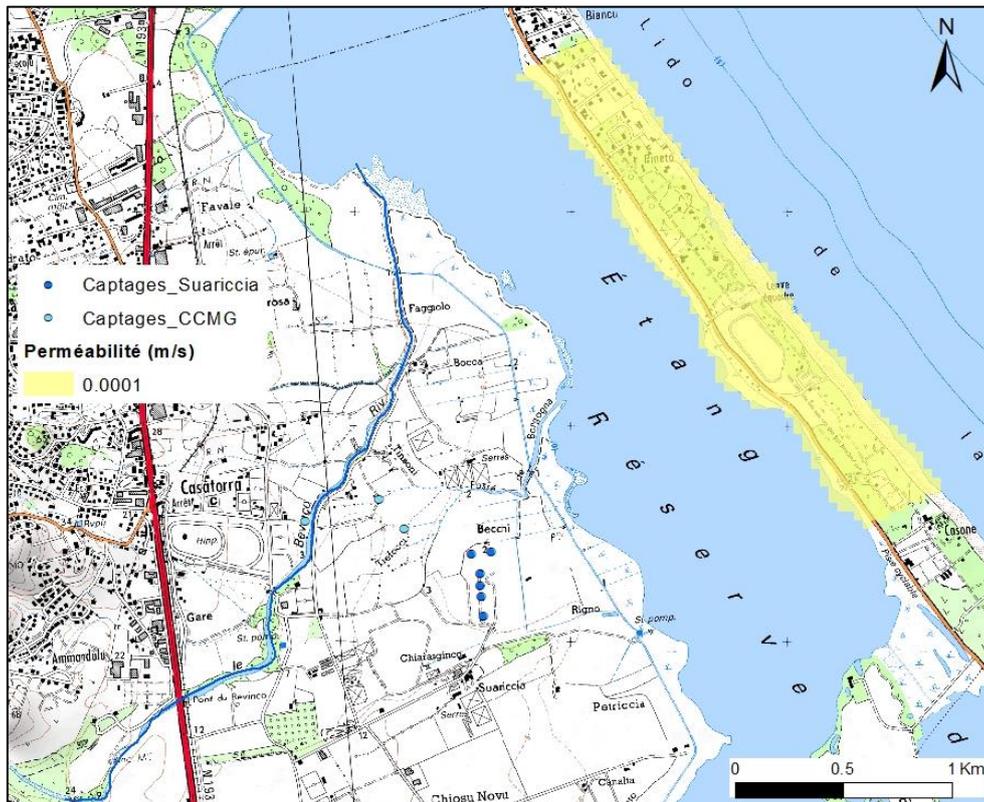
7. Bibliographie

- Barthélémy Y., Seguin J.-J.** (2016) - Modélisation maillée des écoulements souterrains – Principes, démarche et recommandations. Rapport final. BRGM/RP-62549-FR., 140 p, 50 ill., 2 tabl., 3 ann.
- Corbier P. et Laurencelle M.** (2021) - Définition d'indicateurs piézométriques sur le bassin Corse pour la gestion de la ressource en eau souterraine. Rapport final. BRGM/RP-70631-FR, à paraître.
- Erostate M., Huneau F., Garel E. et al.** (2019) - Coupling isotope hydrology, geochemical tracers and emerging compounds to evaluate mixing processes and groundwater dependence of a highly anthropized coastal hydrosystem. *Journal of Hydrology* 578 (2019) 123979.
- Genevier M.** (2019) - Modélisation hydrogéologique de la nappe alluviale du Bevinco (Haute-Corse). Résultats de la campagne de réalisation de cinq piézomètres. Rapport de fin de travaux. Rapport final. BRGM/RP-68641-FR, 112 p., 43 ill., 5 ann.
- Genevier M., Tissoux H., Portal A. et al.** (2021) - Modélisation hydrogéologique de la nappe alluviale du Bevinco (Haute-Corse). Rapport de la phase 1. Rapport final. BRGM/RP-67551-FR, 245 p., 136 ill., 10 tabl., 9 ann.
- Kloppmann et al.** (2011) - Building materials as intrinsic sources of sulphate: a hidden face of salt weathering of historical monuments investigated through multi-isotope tracing (B, O, S). *Science of the Total Environment*. Volume 409, Issue 9, pp 1658-1669.
- Nash, J. E. et Sutcliffe, J. V.** (1970) - River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Orofino, S., Winckel, A., Frissant, N. et a..** (2010) - Etude des interactions entre les eaux souterraines, les eaux de surface et l'étang de Biguglia - Rapport final - Tranche 1, rapport BRGM/RP-59068-FR, 150 p., 87 ill., 3 ann.
- Orsoni V. et Tomasino C.** (2015) - Bathymétrie de l'étang de Biguglia, Synthèse et cartographie Rapport Ifremer (2015, ODE/LITTORAL/LER-PAC/15/06).
- Thiéry D.** (2012) - Code de calcul CATHERINE - Principe et mode d'emploi. BRGM/RP-61430-FR, 50 p., 26 fig., 5 tabl.
- Thiéry D.** (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 128 p., 65 fig., 2 ann.
- Thiéry D.** (2015) - Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 320 p., 154 fig.
- Thiéry D.** (2020) - Modélisation 3D du transport de masse et du transfert thermique avec le code de calcul MARTHE. Version 7.8. Rapport BRGM/RP-64765-FR, 340 p., 159 fig.

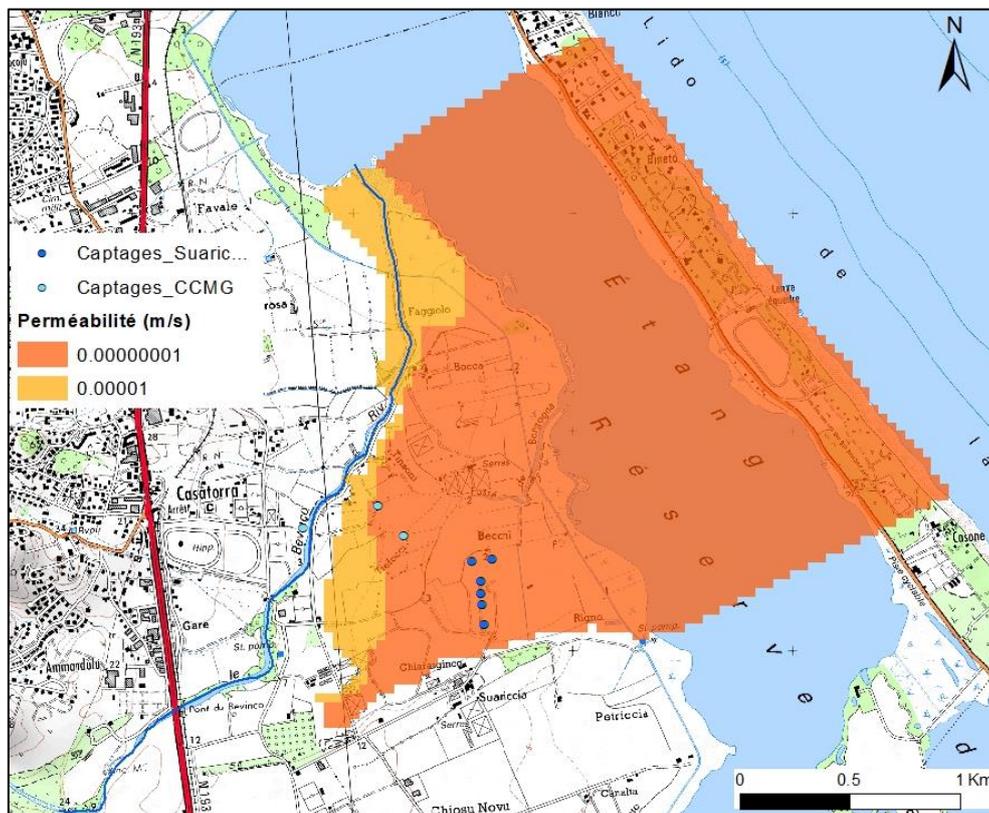
Annexe 1

Champs de perméabilité ajustés pour les couches 1 à 4 du modèle

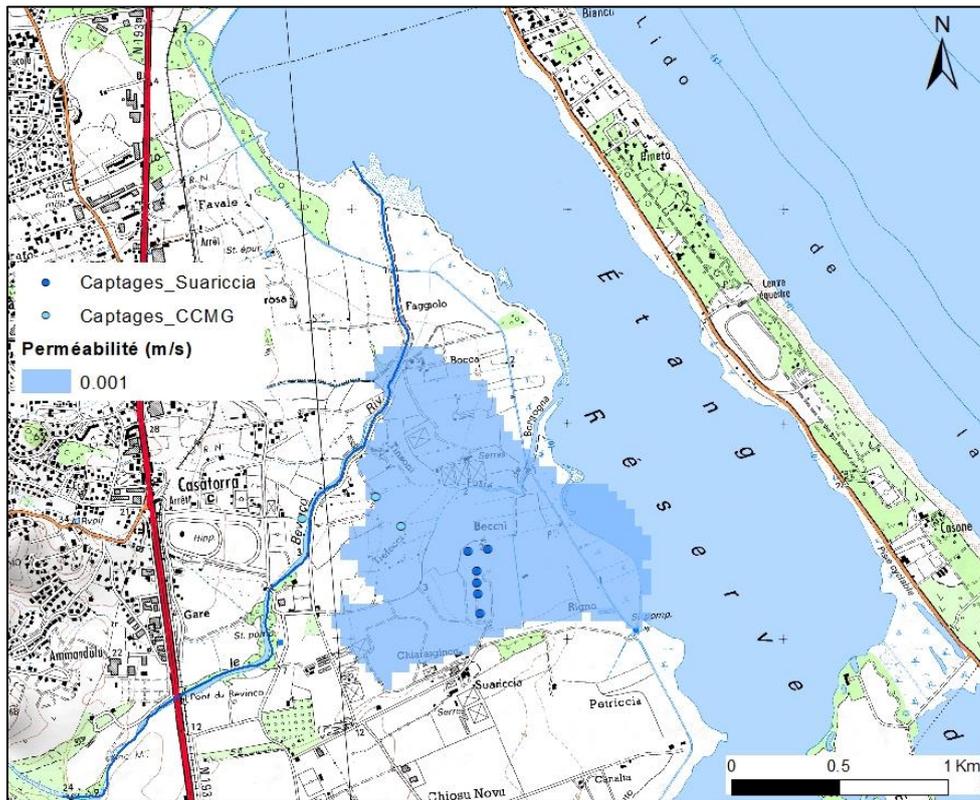
Couche 1 – Sables dunaires du Lido



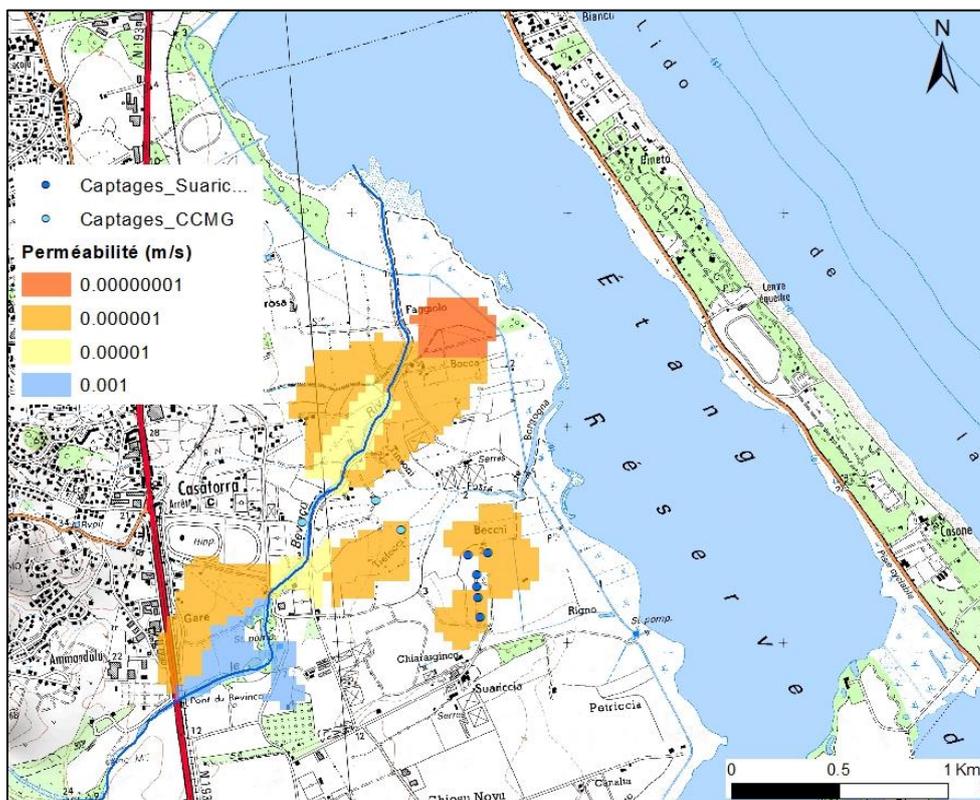
Couche 2 – Limons argileux



Couche 3 – Sables perméables Fy3s (horizon supérieur de l'aquifère)



Couche 4 – Intercalaire argileux au sommet de l'aquifère Fy12



Annexe 2

Résultats des analyses chimiques des prélèvements réalisés en avril 2019

**LABORATOIRE D'ANALYSES ET DE CONTRÔLE DES EAUX**

Agréé par le Ministère de la Santé

Agréé par le Ministère de l'Environnement *

Accréditation COFRAC n° 1-1874. Portée disponible sur www.cofrac.fr

Avenue Paul GIACOBBI B.P. 697 20601 BASTIA Cedex
Tél : 04.95.30.93.73 Fax : 04.95.30.92.73 e-mail : secretariat-labo@oehc.fr**RAPPORT D'ANALYSES**

Tenant compte des paramètres accrédités et non accrédités, la déclaration de conformité (conclusion) n'est pas couverte par l'accréditation.
Les résultats et les commentaires ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et ne tiennent pas compte de l'incertitude de mesure.

Laboratoire agréé par le ministre chargé de l'environnement-se reporter à la liste des laboratoires sur le site internet de gestion des agréments du ministère chargé de l'environnement.

Analyse effectuée pour le compte de :		BRGM		
		Direction Générale de Corse imm Agostini Z.I. FURIANI		
		20600	FURIANI	
Numéro de laboratoire :	119269	Code client :	180310	
Type de visite :	ANALYSE SPECIALE	Date de prélèvement :	23/04/2019	
Code prélèvement ARS :		Heure de prélèvement :	15h40	
Lieu de prélèvement :	LIM 5	Date de réception :	23/04/2019	
Localisation :		Prélevé par :	CLIENT	
Unité de gestion :		Date début d'analyse :	23/04/2019	

Paramètres recherchés	Résultats	valeur limite	COFRAC	Méthodes
Nitrates (mg/l NO ₃ -):	<1		☐	NF EN ISO 10304-1
Chlorures (mg/l Cl-):	4567		☐	NF EN ISO 10304-1
Sodium (mg/l Na):	2150		☐	NF EN ISO 11885

Fait à BASTIA, le 03/05/19
Le Directeur du Laboratoire,

Dr. F. SANTONI.

Nota: le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes et/ou soustraire en cas de nécessité.

Seules les analyses repérées par le symbole ☐ sont réalisées sous couvert de l'accréditation COFRAC.
Le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes analytiques et/ou soustraire en cas de nécessité.



LABORATOIRE D'ANALYSES ET DE CONTRÔLE DES EAUX

Agréé par le Ministère de la Santé

Agréé par le Ministère de l'Environnement *

Accréditation COFRAC n° 1-1874. Portée disponible sur www.cofrac.fr

Avenue Paul GIACOBBI B.P. 697 20601 BASTIA Cedex

Tél : 04.95.30.93.73 Fax : 04.95.30.92.73 e-mail : secretariat-labo@oehc.fr



RAPPORT D'ANALYSES

Tenant compte des paramètres accrédités et non accrédités, la déclaration de conformité (conclusion) n'est pas couverte par l'accréditation. Les résultats et les commentaires ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et ne tiennent pas compte de l'incertitude de mesure.

Laboratoire agréé par le ministre chargé de l'environnement-se reporter à la liste des laboratoires sur le site internet de gestion des agréments du ministre chargé de l'environnement

Analyse effectuée pour le compte de :		BRGM	
		Direction Générale de Corse imm Agostini Z.I. FURIANI	
		20600 FURIANI	
Numéro de laboratoire :	119270	Code client :	180310
Type de visite :	ANALYSE SPECIALE	Date de prélèvement :	23/04/2019
Code prélèvement ARS :		Heure de prélèvement :	11H30
Lieu de prélèvement :	PUITS SEL	Date de réception :	23/04/2019
Localisation :		Prélevé par :	CLIENT
Unité de gestion :		Date début d'analyse :	23/04/2019

Paramètres recherchés	Résultats	valeur limite	COFRAC	Méthodes
Nitrates (mg/l NO ₃ -):	6,4		☐	NF EN ISO 10304-1
Chlorures (mg/l Cl-):	32		☐	NF EN ISO 10304-1
Sodium (mg/l Na):	26,3		☐	NF EN ISO 11885

Fait à BASTIA, le 03/05/19
Le Directeur du Laboratoire,

Dr. F. SANTONI.

Note: le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes et/ou soustraire en cas de nécessité.

Seules les analyses repérés par le symbole # sont réalisées sous couvert de l'accréditation COFRAC. Le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes analytiques et/ou soustraire en cas de nécessité.



LABORATOIRE D'ANALYSES ET DE CONTRÔLE DES EAUX

Agréé par le Ministère de la Santé

Agréé par le Ministère de l'Environnement *

Accréditation COFRAC n° 1-1874. Portée disponible sur www.cofrac.fr

Avenue Paul GIACOBBI B.P. 697 20601 BASTIA Cedex
Tél : 04.95.30.93.73 Fax : 04.95.30.92.73 e-mail : secretariat-labo@oehc.fr



RAPPORT D'ANALYSES

Tenant compte des paramètres accrédités et non accrédités, la déclaration de conformité (conclusion) n'est pas couverte par l'accréditation. Les résultats et les commentaires ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et ne tiennent pas compte de l'incertitude de mesure.

Laboratoire agréé par le ministre chargé de l'environnement-se reporter à la liste des laboratoires sur le site internet de gestion des agréments du ministère chargé de l'environnement.

Analyse effectuée pour le compte de :		BRGM		
		Direction Générale de Corse imm Agostini Z.I. FURIANI		
		20600	FURIANI	
Numéro de laboratoire :	119271	Code client :	180310	
Type de visite :	ANALYSE SPECIALE	Date de prélèvement :	23/04/2019	
Code prélèvement ARS :		Heure de prélèvement :	18H40	
Lieu de prélèvement :	PZ 4	Date de réception :	24/04/2019	
Localisation :		Prélevé par :	CLIENT	
Unité de gestion :		Date début d'analyse :	24/04/2019	

Paramètres recherchés	Résultats	valeur limite	COFRAC	Méthodes
Nitrates (mg/l NO ₃ -):	<1		☐	NF EN ISO 10304-1
Chlorures (mg/l Cl-):	3688		☐	NF EN ISO 10304-1
Sodium (mg/l Na):	1300		☐	NF EN ISO 11885

Fait à BASTIA, le 02/05/19
Le Directeur du Laboratoire,

Dr. F. SANSONI.

Nota: le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes et/ou soustraire en cas de nécessité,

Seules les analyses repérés par le symbole ☐ sont réalisées sous couvert de l'accréditation COFRAC. Le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes analytiques et/ou soustraire en cas de nécessité.



LABORATOIRE D'ANALYSES ET DE CONTRÔLE DES EAUX

Agréé par le Ministère de la Santé

Agréé par le Ministère de l'Environnement *

Accréditation COFRAC n° 1-1874. Portée disponible sur www.cofrac.fr

Avenue Paul GIACOBBI B.P. 697 20601 BASTIA Cedex

Tél : 04.95.30.93.73 Fax : 04.95.30.92.73 e-mail : secretariat-labo@oehc.fr



RAPPORT D'ANALYSES

Tenant compte des paramètres accrédités et non accrédités, la déclaration de conformité (conclusion) n'est pas couverte par l'accréditation.

Les résultats et les commentaires ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et ne tiennent pas compte de l'incertitude de mesure.

Laboratoire agréé par le ministre chargé de l'environnement-se reporter à la liste des laboratoires sur le site internet de gestion des agréments du ministre chargé de l'environnement.

Analyse effectuée pour le compte de :		BRGM	
		Direction Générale de Corse imm Agostini Z.I. FURIANI	
		20600	FURIANI
Numéro de laboratoire :	119309	Code client :	180310
Type de visite :	ANALYSE SPECIALE	Date de prélèvement :	25/04/2019
Code prélèvement ARS :		Heure de prélèvement :	15H00
Lieu de prélèvement :	BORGOGNA	Date de réception :	26/04/2019
Localisation :		Prélevé par :	CLIENT
Unité de gestion :		Date début d'analyse :	26/04/2019

Paramètres recherchés	Résultats	valeur limite	COFRAC	Méthodes
Nitrates (mg/l NO3-):	17,0		☐	NF EN ISO 10304-1
Chlorures (mg/l Cl-):	4847		☐	NF EN ISO 10304-1
Sodium (mg/l Na):	2115		☐	NF EN ISO 11885

Fait à BASTIA, le 07/05/19
Le Directeur du Laboratoire,

Dr. F. SANTONI.

Note: le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes afin d'assurer en cas de nécessité.

Seules les analyses repérées par le symbole # sont réalisées sous couvert de l'accréditation COFRAC.
Le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes analytiques et/ou soustraire en cas de nécessité.



LABORATOIRE D'ANALYSES ET DE CONTRÔLE DES EAUX
 Agréé par le Ministère de la Santé
 Agréé par le Ministère de l'Environnement *

Accréditation COFRAC n° 1-1874. Portée disponible sur www.cofrac.fr

Avenue Paul GIACOBBI B.P. 697 20601 BASTIA Cedex
 Tél : 04.95.30.93.73 Fax : 04.95.30.92.73 e-mail : secretariat-labo@oehc.fr



RAPPORT D'ANALYSES

Tenant compte des paramètres accrédités et non accrédités, la déclaration de conformité (conclusion) n'est pas couverte par l'accréditation.
 Les résultats et les commentaires ne concernent que l'échantillon soumis à l'analyse et ne tiennent pas compte de l'incertitude de mesure.

Laboratoire agréé par le ministre chargé de l'environnement - se reporter à la liste des laboratoires sur le site internet de gestion des agréments du ministère chargé de l'environnement

Analyse effectuée pour le compte de : **BRGM**
 Direction Générale de Corse imm Agostini Z.I. FURIANI
 20600 FURIANI

Numéro de laboratoire : **119310** Code client : 180310
 Type de visite : **ANALYSE SPECIALE** Date de prélèvement : 25/04/2019
 Code prélèvement ARS : Heures de prélèvement : 15H00
 Lieu de prélèvement : **LIM I** Date de réception : 26/04/2019
 Localisation : Prélevé par : CLIENT
 Unité de gestion : Date début d'analyse : 26/04/2019

Paramètres recherchés	Résultats	valeur limite*	COFRAC	Méthodes
Nitrates (mg/l NO3-):	15		☐	NF EN ISO 10304-1
Chlorures (mg/l Cl-):	1815		☐	NF EN ISO 10304-1
Sodium (mg/l Na):	680		☐	NF EN ISO 11885

Fait à BASTIA, le 27/05/19
 Pour le Directeur, L'Ingénieur,

F. MARTINI

Nota: le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes et/ou soustraire en cas de nécessité.

Seules les analyses repérés par le symbole # sont réalisées sous couvert de l'accréditation COFRAC.
 Le laboratoire se réserve le droit de modifier les méthodes analytiques et/ou soustraire en cas de nécessité.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

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

Direction régionale Corse

Immeuble Agostini
ZI Furiani
20600 – Bastia – France
Tél. : 04 95 58 04 33

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm