



Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives

Rapport final

BRGM/RP-66229-FR
Novembre 2016



Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives

Rapport final

BRGM/RP 66229-FR
Novembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2015-2016 (projet AP15BNO012)

Nolwenn CROISET, Gonéri LE COZANNET, Alexandra LAURENT

Vérificateur :

Nom : Jean-Jacques Seguin
Fonction : Expert hydrogéologue
Date : 02/12/2016
Signature :



Approbateur :

Nom : D. Pennequin
Fonction : Directeur régional
Normandie
Date : 12/12/2016

Signature :



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

Mots-clés :

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

Croiset N., Le Cozannet G., Laurent A. (2016) – Vulnérabilité des aquifères côtiers face aux intrusions salines en Normandie occidentale - Utilisation du modèle hydrodynamique de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Rapport final. BRGM/RP-66229-FR, 57 p.,43 ill.

Synthèse

Les côtes de Basse-Normandie ont été identifiées comme des zones sensibles à la montée du niveau marin dans une étude du BRGM réalisée pour l'ONEMA en 2011 à l'échelle de la France métropolitaine. Afin de préciser les résultats dans ce secteur et pour pouvoir proposer des actions de suivi, l'agence de l'eau Seine-Normandie et le BRGM ont mené une étude comportant les tâches suivantes :

- Synthèse bibliographique des données hydrogéologiques, hydrochimiques et géologiques existantes dans le Calvados et dans la Manche
- Identification et cartographie des secteurs à enjeux
- Utilisation du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour l'identification des secteurs vulnérables à la montée du niveau marin et aux intrusions salines associées
- Cartographie des secteurs potentiellement sensibles et recommandations pour la mise en place de dispositifs de suivi des intrusions salines.

Le présent rapport décrit la méthode et les résultats obtenus dans le volet de l'étude concernant l'utilisation du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives réalisé en 2013 (voir Willemier et al., 2013).

Ce modèle a été réalisé par le BRGM en partenariat avec la DREAL de Basse-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN) afin d'aider à la révision de la Zone de Répartition des Eaux de l'aquifère Bajo-Bathonien et d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable. La construction du modèle est décrite dans le rapport de Croiset et al., 2013.

Le modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives a été utilisé dans cette étude afin de répondre aux questions suivantes :

- quels sont les **processus prédominants** qui déterminent la position du biseau salé ?
- au vu des modifications possibles des variables climatiques et des prélèvements attendus dans les années à venir, à **quel impact sur la position du biseau salé** peut-on s'attendre et quels sont **les secteurs les plus vulnérables**?

En préalable à l'utilisation du modèle pour l'étude de l'intrusion saline, l'étude a permis de mettre à jour le modèle avec les données nouvellement disponibles et de porter quelques améliorations locales au calage. Ces résultats sont présentés dans une première partie.

La résolution du modèle et les données disponibles ne permettent pas la modélisation des écoulements diphasiques : la modélisation de la diffusion du sel et des écoulements densitaires dans ces aquifères multicouches nécessiterait en effet de nombreuses données de calage (suivi temporel de conductivité multi-profondeur dans les ouvrages impactés par l'intrusion saline notamment). L'approche choisie dans ce travail a donc été de coupler le modèle maillé à un modèle analytique simple, très instructif sur les ordres de grandeur des changements attendus.

Cinq scénarios ont été élaborés en concertation avec le comité de suivi pour étudier l'influence de la montée du niveau marin, de la modification des variables climatiques et d'une augmentation des prélèvements.

Ces scénarios ont permis d'identifier les zones les plus vulnérables au développement d'un biseau salé : ce sont les basses vallées de l'Aure, de la Dives et de l'Orne. Dans ces zones les gradients piézométriques sont très plats et les cours d'eau jouent le rôle de condition limite à charge imposée. De plus, l'élévation du niveau marin ainsi que l'augmentation des températures risquent d'entraîner une diminution notable des débits sortant en mer dans ce secteur, ce qui favoriserait la pénétration du biseau salé. Dans un scénario pessimiste, l'avancée du biseau salé pourrait atteindre plusieurs kilomètres dans ces secteurs, tandis qu'elle ne dépasserait pas quelques centaines de mètres en dehors.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Mise à jour du modèle maillé	11
2.1. INTEGRATION DE NOUVELLES DONNEES	11
2.1.1. Données d'entrée	11
2.1.2. Données de calage	13
2.2. PROPOSITIONS DE SCENARIOS D'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER (G. LE COZANNET)	13
2.2.1. Etat des connaissances	13
2.2.2. Cas de la Basse Normandie	17
2.2.3. Intégration de ces données dans le modèle	17
2.3. REPRISE PARTIELLE DU CALAGE	18
3. Méthode d'étude de l'impact de la variation des facteurs climatiques et du niveau marin sur la position du biseau salé	23
3.1. UTILISATION CONJOINTE DU MODELE MAILLE ET D'UN MODELE ANALYTIQUE	23
3.2. DESCRIPTION DU MODELE ANALYTIQUE UTILISE	24
3.3. ETUDE DE SENSIBILITE DU MODELE ANALYTIQUE	25
4. Scénarios	31
4.1. DONNEES UTILISEES	31
4.1.1. Elévation du niveau marin	31
4.1.2. Modification des variables climatiques	31
4.1.3. Evolution des prélèvements	34
4.2. DESCRIPTION DES SCENARIOS	35
4.3. RESULTATS	37
4.3.1. Précautions dans l'interprétation	37
4.3.2. Scénario 1 : élévation du niveau marin de 0,5 m	39
4.3.3. Scénario 2 : élévation du niveau marin de 0.5 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP2.6	42
4.3.4. Scénario 3 : élévation du niveau marin de 1 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP8.5	45
4.3.5. Scénario 4 : élévation du niveau marin de 1 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP8.5 et augmentation de 10% des prélèvements	48
4.3.6. Scénario 5 : comparaison des situations hautes eaux et basses eaux	50

5. Conclusions	53
6. Bibliographie.....	55

Liste des figures

Illustration 1: Pluviométrie et ETP trimestrielle à la station d'Englesqueville. En rouge sont figurées les 3 années 2010 à 2013, nouvellement intégrées au modèle.	12
Illustration 2 : Volumes annuels prélevés dans la zone d'étude par usage et par type d'eau prélevé (eau de surface ou eau souterraine).....	12
Illustration 3: Scénarios d'élévation du niveau de la mer global du GIEC (GIEC, WG1, Ch 13, 2013), trait plein : valeurs médianes, enveloppe : valeurs vraisemblables (dont probabilité > 66 %).....	13
Illustration 4 : exemple d'interprétation des scénarios d'élévation du niveau de la mer globaux du GIEC pour quatre scénarios de changement climatique : RCP 2.6 (réduction forte des émissions de CO ₂), RCP 8.5 (poursuite des émissions). (D'après Le Cozannet et al., 2015)	14
Illustration 5 : Valeurs médianes et vraisemblables (entre crochets) pour le niveau de la mer global par rapport à un niveau moyen en 1986-2005 (Source : GIEC, AR5, WG1, Ch13, 2013)	15
Illustration 6 : synthèse de scénarios d'élévation du niveau marin global moyen pour le XXI ^{ème} siècle et au-delà, indiquant la vraisemblance de chacun de ces scénarios (D'après GIEC, WG1, Ch 13, 2013).	16
Illustration 7 : Différence entre les niveaux piézométriques simulées dans le Bathonien en régime permanent en considérant un niveau marin à 0 NGF et à 0.5 m NGF. Les différences sont exprimées en mètres.....	18
Illustration 8 : Bassin versant de surface réel de la Cance à la station de Tanques (en rouge) et bassin versant modélisé en considérant que les écoulements sont dirigés vers le cours d'eau le plus proche (en marron). Source : Croiset et al., 2013.	19
Illustration 9 : Débit de la Cance à Tanques (station I3103030).	20
Illustration 10 : Chronique piézométrique au piézomètre de Beaumont-en-Auge.....	21
Illustration 11 : Débit de la Touques à Lisieux.....	21
Illustration 12 : Schéma de la méthode de travail faisant intervenir un modèle maillé suivi d'un modèle analytique	23
Illustration 13 : Schéma du modèle analytique et notations utilisées. Source : Werner & Simmons, 2009	24
Illustration 14 : Définition des deux indicateurs utilisés pour caractériser l'évolution de l'interface eau douce - eau salée.	26
Illustration 15 : Schéma du modèle analytique avec une condition limite de charge imposée (h_{fixe}) à l'amont de l'aquifère	26
Illustration 16 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et un scénario d'élévation d'1 m du niveau marin dans le cas où la condition limite est un flux imposé.	27

Illustration 17 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et un scénario d'élévation d'1 m du niveau marin dans le cas où la condition limite est une charge imposée à 2 km de la côte.	27
Illustration 18 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et deux scénarios de baisse de recharge, de 10% en bleu et 25% en noir ; le tableau reprend les valeurs caractéristiques du déplacement de l'interface pour les deux scénarios.	28
Illustration 19 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et deux scénarios de baisse de recharge, de 10% en bleu et 25% en noir ; le tableau reprend les valeurs caractéristiques du déplacement de l'interface pour les deux scénarios.	29
Illustration 20 : Anomalies dans le cumul des précipitations. De gauche à droite : pluviométrie annuelle moyenne dans le scénario de référence (1976-2005) et écart entre la période considérée (horizon proche 2020-2050, horizon moyen 2040-2070 et horizon lointain 2070-2100) et la période de référence en utilisant le modèle Aladin de Météo-France. De haut en bas : trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.....	32
Illustration 21 : Pluie et température mensuelles pour le scénario de référence, et deux scénarios RCP à l'horizon moyen sur le littoral bas-normand. Source : DRIAS.....	33
Illustration 22 : Anomalies de pluie et d'ETP appliquées aux chroniques pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5.	34
Illustration 23 : Evolution des prélèvements d'eau par usage de 1960 à 2006 et projections 2006 à 2070. Source : BIPE, 2011.	34
Illustration 24 : Hypothèses d'évolution de la population sur le territoire de Caen métropole. Source : Caen métropole , Conférence du commerce – Présentation de l'analyse prospective, nov. 2013	35
Illustration 25 : Description des 5 scénarios réalisés	36
Illustration 26 : Niveaux piézométriques dans les aquifères du Trias/Lias, du Bajocien et du Bathonien dans le modèle permanent de référence. En rouge sont entourées les zones littorales de faibles gradients.....	37
Illustration 27 : Flux d'eau souterraine moyens (en m ³ /s) sortant du modèle pour 5 entités hydrographiques littorales de la plaine de Caen et du Bessin	38
Illustration 28 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0.5 m du niveau marin.	39
Illustration 29 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bajocien et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0.5 m du niveau marin	40
Illustration 30 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias-Lias et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0,5 m du niveau marin.....	41
Illustration 31 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 1. Pour les zones avec des flux sortants très proches, un seul modèle analytique est réalisé.	42
Illustration 32 : Comparaison des flux de recharge entre le scénario de référence (en bleu) et le scénario 2 (en rouge) pour deux zones littorales.	43
Illustration 33 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle dans le scénario 2 par rapport au scénario de référence.	44
Illustration 34 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias-Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 2 par rapport au scénario de référence.	44
Illustration 35 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 2.	45

Illustration 36 : Comparaison des flux de recharge entre le scénario de référence (en bleu) et le scénario 3 (en rouge) pour deux zones littorales.....	46
Illustration 37 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle dans le scénario 3 par rapport au scénario de référence. ...	46
Illustration 38 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias/Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 3 par rapport au scénario de référence	47
Illustration 39 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 3.....	48
Illustration 40 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortants du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence. .	49
Illustration 41 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias/Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence	49
Illustration 42 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline étudiés pour le scénario 4.	50
Illustration 43 : Diminution de la recharge entre le scénario 3 et le scénario de référence sur la période 1994-2013.....	51
Illustration 44 : Baisse des flux d'eau souterraine sortant du modèle entre le scénario 3 et le scénario de référence. Comparaison d'une situation de hautes eaux (en vert) et d'une situation de basses eaux (en orange).	51

1. Introduction

Le travail présenté dans ce rapport constitue la tâche 3 d'une étude sur la vulnérabilité des aquifères côtiers de Normandie Occidentale face aux intrusions salines. Après une phase de synthèse bibliographique des connaissances hydrogéologiques et hydrochimiques et une phase de caractérisation hydrochimique des secteurs à enjeux, la présente tâche avait pour but d'utiliser des outils de modélisation afin de répondre aux questions suivantes :

- quels sont les **processus prédominants** qui déterminent la position du biseau salé ?
- au vu des modifications possibles des variables climatiques et des prélèvements attendus dans les années à venir, à **quel impact sur la position du biseau salé** peut-on s'attendre et quels sont **les secteurs les plus vulnérables**?

Un modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives avait été réalisé en 2013 par le BRGM en partenariat avec la DREAL de Basse-Normandie et l'Agence de l'Eau Seine-Normandie afin d'aider à la révision de la Zone de Répartition des Eaux de l'aquifère Bajo-Bathonien et d'évaluer la ressource en eau souterraine exploitable. La construction du modèle est décrite dans le rapport de Croiset et al., 2013 Ce modèle, dont la construction et le calage ont été encadré et validé par un Comité de Pilotage composé de l'AESN, la DREAL, l'Agence Régionale de Santé (ARS), la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM) du Calvados et la Direction Départementale des Territoire (DDT) de l'Orne, a permis de redéfinir le contour de la Zone de Répartition des Eaux et a été utilisé à plusieurs reprises depuis sa construction, notamment pour aider à évaluer l'impact de prélèvements envisagés. Il a semblé intéressant d'utiliser ce modèle complet et servant de référence pour les aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives pour étudier l'intrusion saline.

La résolution du modèle et les données disponibles ne permettent pas la modélisation des écoulements diphasiques : la modélisation de la diffusion du sel et des écoulements densitaires dans ces aquifères multicouches nécessiterait en effet de nombreuses données de calage (suivi temporel de conductivité multi-profondeur dans les ouvrages impactés par l'intrusion saline notamment). L'approche choisie dans ce travail a donc été de coupler le modèle maillé à un modèle analytique simple très instructif sur les ordres de grandeur des changements attendus.

En préalable à l'utilisation du modèle pour l'étude de l'intrusion saline, l'étude a permis de mettre à jour le modèle avec les données nouvellement disponibles et d'apporter quelques améliorations locales au calage. Ces résultats sont présentés dans une première partie.

Dans une seconde partie la méthode de travail, couplant le modèle maillé et un modèle analytique est présenté.

Pour finir, les scénarios réalisés et les résultats obtenus sont détaillés.

2. Mise à jour du modèle maillé

La période modélisée en 2013 s'étendait de 1994 à 2010, période pour laquelle les données de prélèvements étaient disponibles. Au démarrage de la présente étude, les données de prélèvements de trois années supplémentaires (2011 à 2013) ont pu être collectées. La période modélisée a donc été étendue jusque fin 2013. L'intégration des nouvelles données est brièvement décrite au paragraphe 2.1.

La présente étude a également permis de reprendre le calage du modèle sur quelques points particuliers identifiés comme perfectibles lors de la construction. Les améliorations apportées au modèle sont décrites dans le paragraphe 2.3.

2.1. INTEGRATION DE NOUVELLES DONNEES

2.1.1. Données d'entrée

- **Chroniques météorologiques**

Les données décennales de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) des années 2011 à 2013 ont été achetées auprès de Météo France pour 11 stations de la zone d'étude. De la même manière que cela avait été fait lors de la construction du modèle (voir Croiset *et al.*, 2013, paragraphe 3.3), les données sont ensuite affectées à chaque maille du modèle en fonction de zones météorologiques déterminées à partir de la grille AURELHY de Météo France.

Météo France ne fournissant plus les données à la station de Saint-Georges-d'Aunay, cette chronique a été remplacée pour les années 2011 à 2013 par celle de Lassy (distante de 13 km et disposant d'une pluviométrie moyenne proche).

L'illustration 1 présente les chroniques de pluie et d'ETP à la station d'Englesqueville, située dans le Bessin. Ces graphiques montrent que les années 2011 à 2013 ne sont pas des années exceptionnelles pour ces variables météorologiques.

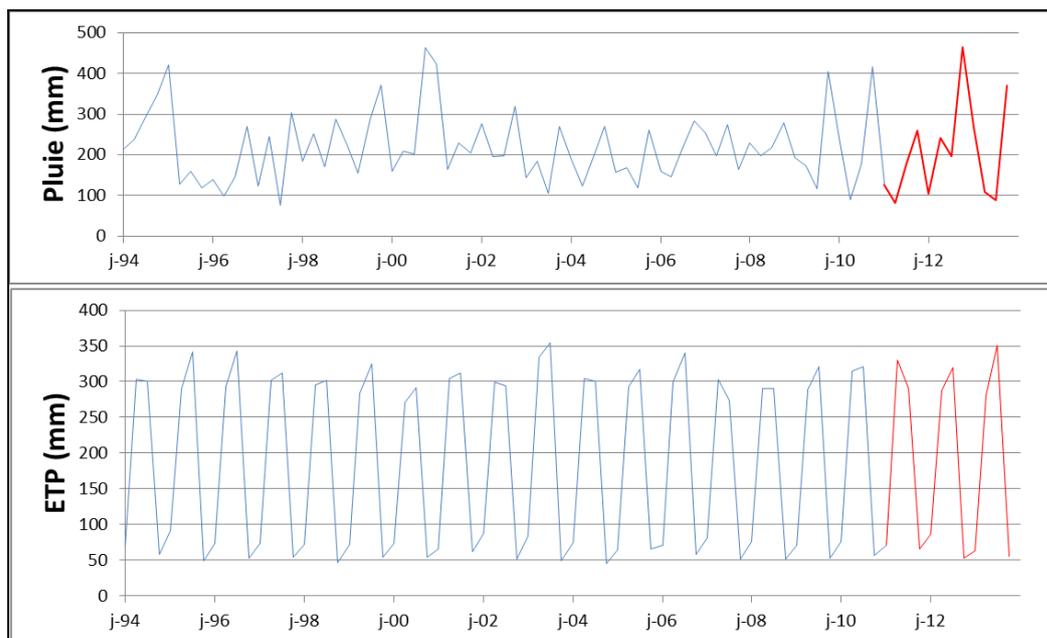


Illustration 1: Pluviométrie et ETP trimestrielle à la station d'Englesqueville. En rouge sont figurées les 3 années 2010 à 2013, nouvellement intégrées au modèle.

- **Prélèvements**

L'Agence de l'Eau Seine-Normandie a transmis les volumes prélevés par les collectivités, les industriels et les irrigants pour les années 2011 à 2013. Ces données font apparaître une légère baisse des prélèvements entre 2010 et 2012 (-6%) et une stabilisation des volumes en 2013 (cf. Illustration 2).

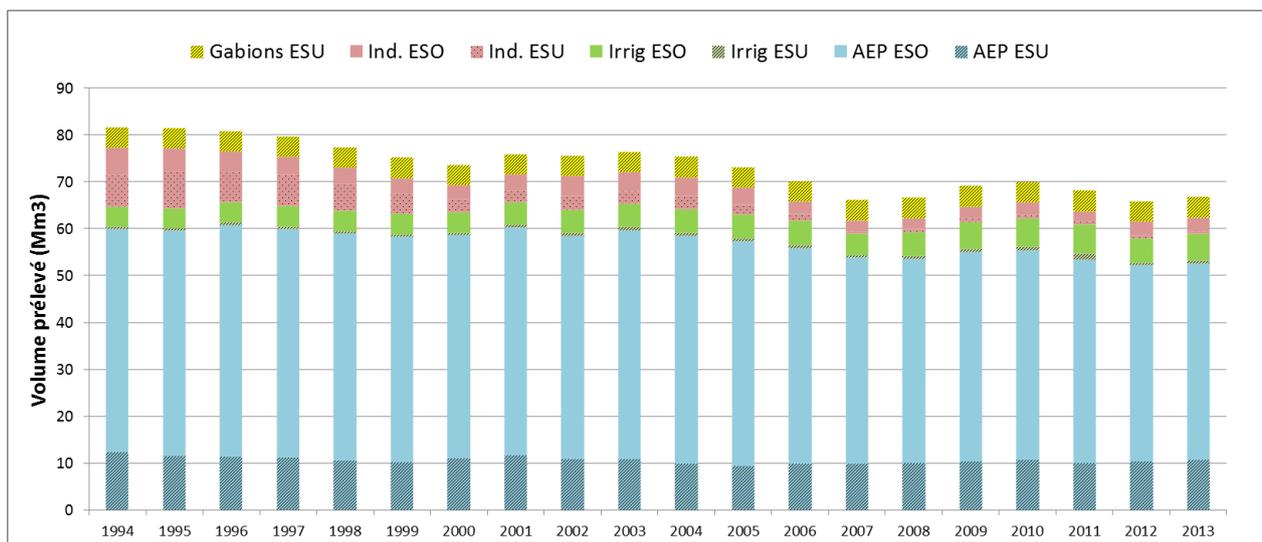


Illustration 2 : Volumes annuels prélevés dans la zone d'étude par usage et par type d'eau prélevé (eau de surface ou eau souterraine)

2.1.2. Données de calage

Les observations utilisées pour le calage sont principalement des chroniques de débits des rivières de la zone d'étude et des chroniques piézométriques. Les chroniques utilisées pour le calage en 2013 ont été mises à jour avec les nouvelles données disponibles afin de vérifier que le modèle était toujours bien calé pour cette période.

- **Chroniques de débits**

La DREAL de Basse-Normandie a fourni les données de débits journaliers aux 36 stations utilisées pour le calage en régime transitoire pour les années 2011 à 2013.

- **Chroniques piézométriques**

Les données piézométriques des années 2011 à 2013 pour les piézomètres utilisées lors du calage ont été récupérées de la base de données ADES¹.

2.2. PROPOSITIONS DE SCENARIOS D'ELEVATION DU NIVEAU DE LA MER (G. LE COZANNET)

2.2.1. Etat des connaissances

Dans son dernier rapport de 2013, le GIEC propose un certain nombre de scénarios d'élévation du niveau marin (GIEC, WG1, Ch 13, 2013). L'illustration 3 présente ces scénarios globaux pour deux scénarios de changement climatique : le RCP 8.5 (en rouge) et le RCP 2.6 (en bleu). Le scénario RCP 2.6 suppose une réduction très importante des émissions de gaz à effet de serre, afin d'atteindre l'objectif de limiter le réchauffement à +2° par rapport à la période préindustrielle. Le scénario RCP 8.5 suppose une poursuite des émissions de gaz à effet de serre.

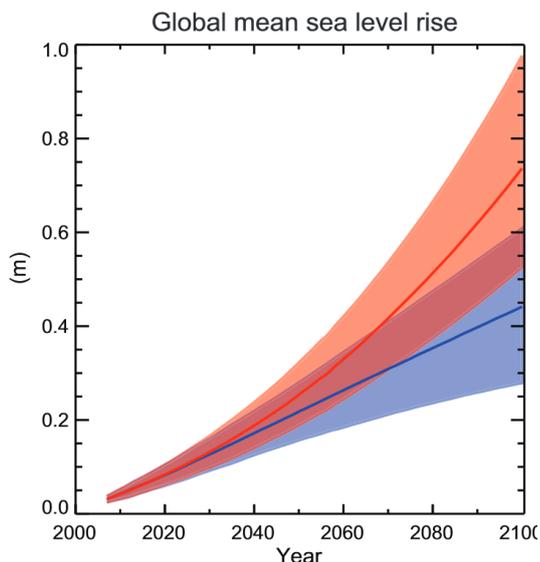


Illustration 3: Scénarios d'élévation du niveau de la mer global du GIEC (GIEC, WG1, Ch 13, 2013), trait plein : valeurs médianes, enveloppe : valeurs vraisemblables (dont probabilité > 66 %)

¹ www.ades.eaufrance.fr

Les scénarios du GIEC indiquent une fourchette vraisemblable jusqu'à 2100, qui n'exclue pas des valeurs supérieures. Les scénarios excédant le mètre en 2100 supposent une contribution des calottes de glace de l'Antarctique ou du Groenland. Il n'est pas possible aujourd'hui d'exclure de tels scénarios, quels que soient les scénarios de changement climatique considérés.

Dans son rapport de 2013, le GIEC s'est refusé à donner des estimations probabilistes au-delà de 2100 (Church et al., 2013), mais certaines études commencent à proposer des valeurs (ex : Jevrejeva et al., 2014). Ainsi, on peut anticiper que, dans quelques années, l'illustration 3 pourra être remplacée par des visualisations analogues à celles de l'illustration 4, dans laquelle l'intensité de la couleur représente la probabilité d'atteindre une valeur d'élévation du niveau marin donnée (par exemple : 1 m) à diverses échéances (par exemple 2100) et pour un scénario de changement climatique (par exemple RCP 8.5). L'avantage de cette visualisation et de montrer que des valeurs au-delà de la fourchette vraisemblable (par exemple : 0.5 à 1 m pour le scénario RCP 8.5 en 2100) peuvent être prises en compte pour anticiper les impacts du changement climatique.

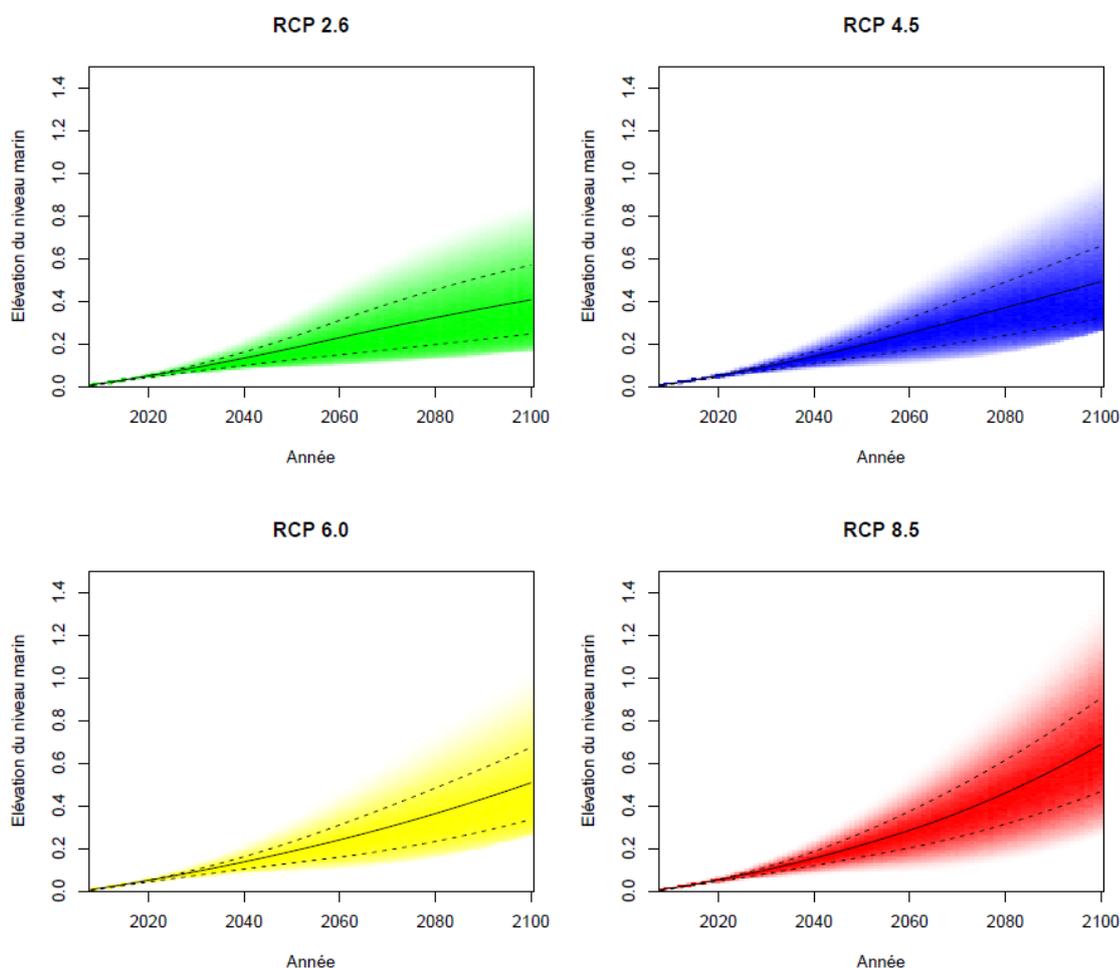


Illustration 4 : exemple d'interprétation des scénarios d'élévation du niveau de la mer globaux du GIEC pour quatre scénarios de changement climatique : RCP 2.6 (réduction forte des émissions de CO₂), RCP 8.5 (poursuite des émissions). (D'après Le Cozannet et al., 2015)

L'illustration 5 présente les valeurs médianes (traits pleins, Illustration 4) et les valeurs vraisemblables (traits pointillés, Illustration 4) pour chaque scénario présenté.

	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
Niveau marin moyen global en 2046–2065	0.24 [0.17 à 0.32]	0.26 [0.19 à 0.33]	0.25 [0.18 à 0.32]	0.30 [0.22 à 0.38]
Niveau marin moyen global en 2100	0.44 [0.28 à 0.61]	0.53 [0.36 à 0.71]	0.55 [0.38 à 0.73]	0.74 [0.52 à 0.98]

Illustration 5 : Valeurs médianes et vraisemblables (entre crochets) pour le niveau de la mer global par rapport à un niveau moyen en 1986-2005 (Source : GIEC, AR5, WG1, Ch13, 2013)

Le niveau de la mer continuera à s'élever après 2100, et on considère que la partie instable des calottes de glaces groenlandaises et antarctique représentent au moins 10 m d'élévation du niveau de la mer. Certes, la dynamique de cette fonte est très lente. Cependant, on retiendra que pour les prochains siècles, on peut retenir des scénarios allant jusqu'à plusieurs mètres au-dessus de la valeur actuelle du niveau marin moyen.

Pour résumer, on pourra retenir les valeurs de l'illustration 6 pour les scénarios d'élévation du niveau marin global. A chacune des valeurs données, nous proposons d'associer une description qualitative de sa vraisemblance à différentes échéances de temps. Par exemple, un scénario d'élévation du niveau de la mer de 1 à 2 m apparaît extrêmement improbable en 2050-2070, mais possible après le XXI^{ème} siècle. Toutes ces données sont basées sur le rapport du GIEC sur le niveau de la mer de 2013 (D'après GIEC, WG1, Ch 13, 2013).

	2050-2070	Vers 2100	Entre 2150 et au-delà
Plus de 10m	Extrêmement improbable	Extrêmement improbable	Supposerait une contribution de la partie la plus stable de la calotte Antarctique.
De 2 à 10m	Extrêmement improbable	Très peu probable	Possible : suppose la fonte de larges parties des calottes du Groenland et de l'Antarctique Ouest
De 1 à 2m	Extrêmement improbable	Possible : suppose une contribution des calottes du Groenland et de l'Antarctique Ouest	Possible : suppose une contribution des calottes du Groenland et de l'Antarctique Ouest
De 50cm à 1m	Peu probable	Probable pour le scénario de changement climatique RCP 8.5 (poursuite des émissions de gaz à effet de serre)	Possible
De 20cm à 50cm	Probable	Probable pour des scénarios de changement climatique RCP 2.6 (forte réduction des émissions de gaz à effet de serre)	Possible
Moins de 20cm	Peu probable	Peu probable	Supposerait une baisse du niveau de la mer après 2100

Illustration 6 : synthèse de scénarios d'élévation du niveau marin global moyen pour le XXI^{ème} siècle et au-delà, indiquant la vraisemblance de chacun de ces scénarios (D'après GIEC, WG1, Ch 13, 2013).

2.2.2. Cas de la Basse Normandie

En première analyse, on peut faire l'hypothèse que les scénarios d'élévation du niveau de la mer globaux du GIEC sont une approximation raisonnable de l'élévation du niveau de la mer le long des côtes métropolitaines françaises. Cependant, nous avons vu que d'autres processus peuvent être pris en compte :

- La variabilité régionale du niveau de la mer (Slangen et al., 2014) : nous pouvons retenir en première approximation que la variabilité régionale du niveau de la mer pourra induire des fluctuations de +/-20 cm autour des valeurs globales données dans l'illustration 6.
- Les mouvements verticaux du sol : nous avons vu qu'une subsidence de 1 à 2 mm/an affecte peut-être les côtes de Basse-Normandie, à l'exception du Cotentin. Sur 50 ans, ce processus induirait 5 à 10 cm d'élévation supplémentaire du niveau marin moyen relatif par rapport aux scénarios globaux.

Ces processus ne constituent pas une source d'incertitude aussi importante que l'élévation du niveau marin moyen global, mais on peut les prendre en compte pour moduler les valeurs de l'illustration 6.

En première approximation, pour l'élaboration des scénarios d'élévation du niveau de la mer qui seront utilisés en entrée des modèles hydrogéologiques, on retiendra donc les valeurs de l'illustration 6 en notant que ces valeurs peuvent être majorées de 20 cm vers 2050 et de 40 cm vers 2100 pour prendre en compte les deux processus de subsidence régionale et de variabilité régionale du niveau marin.

2.2.3. Intégration de ces données dans le modèle

Dans le modèle de 2013, le niveau marin avait été fixé à 0 m NGF. Etant donné les résultats de l'étude bibliographique précédente, le niveau marin a été modifié dans le modèle pour être égal à 0,5 m.

D'autre part, ces résultats ont servi à l'élaboration des scénarios présentés au paragraphe 4.2.

2.3. REPRISE PARTIELLE DU CALAGE

L'extension de la période modélisée et la modification du niveau marin n'apporte que très peu de modification au calage du modèle.

La modification du niveau marin a un effet notable sur les niveaux piézométriques du littoral. Cependant les hausses de niveaux piézométriques s'atténuent rapidement dès que l'on s'éloigne de la côte (cf. Illustration 7). Or, les données de calage ne sont pas suffisantes pour vérifier que le modèle reproduit bien la piézométrie dans le cordon littoral. Dans le Bajocien, aucun piézomètre utilisé lors du calage ne se trouve à moins de 4 km du littoral, distance à laquelle les modifications du niveau piézométrique induites par un changement du niveau marin sont très faibles. Dans le Bathonien, le piézomètre de Vierville-sur-Mer est très proche de la côte mais dans ce secteur, le Bathonien est perché au-dessus des marnes de Port-en-Bessin et donc le niveau piézométrique est décorrélé du niveau marin.

Ces observations montrent qu'il serait très intéressant de disposer d'un réseau de suivi piézométrique très proche du littoral afin de pouvoir mieux contraindre le modèle dans cette zone.



Illustration 7 : Différence entre les niveaux piézométriques simulées dans le Bathonien en régime permanent en considérant un niveau marin à 0 NGF et à 0.5 m NGF. Les différences sont exprimées en mètres.

D'autre part, les 3 années supplémentaires modélisées, notamment parce qu'elles sont dans la moyenne des autres années en termes de pluviométrie et d'ETP, n'apportent pas de modifications particulières au calage.

Lors de la phase de calage de 2013, plusieurs points d'amélioration du modèle avaient été identifiés mais il n'avait pas été possible de les résoudre dans le cadre de cette première étude. Deux points (amélioration de la modélisation de la recharge et du ruissellement dans le bassin versant de la Touques et prise en compte de la topographie pour les écoulements de surface) ont été traités dans le cadre de la présente étude.

Même s'ils ne concernent pas directement les objectifs principaux du travail, il a été jugé intéressant de profiter de la mise à jour importante du modèle pour apporter ces améliorations significatives qui pourront profiter aux études à venir. Ces deux points sont détaillés dans les paragraphes suivants.

- **Prise en compte des directions d'écoulement réelles**

Dans le modèle maillé, les écoulements d'eau en surface ne sont pas explicitement représentés : tous les volumes d'eau qui s'écoulent en surface (issus de ruissellement et de débordement) sont transférés sans retard vers un tronçon de cours d'eau.

Dans la version de 2013 du modèle, l'eau en surface rejoignait le tronçon de cours d'eau le plus proche. Cette approche avait l'avantage d'être très simple à mettre en œuvre et donnait des résultats satisfaisant pour la quasi-totalité de la zone d'étude. Cependant, il avait été observé que dans certains bassins hydrographiques, étant donné la topographie, le ruissellement n'est pas dirigé vers le cours d'eau le plus proche mais vers un cours d'eau plus éloigné, comme le montre l'illustration 8 pour le bassin versant de la Cance à la station de Tanques.

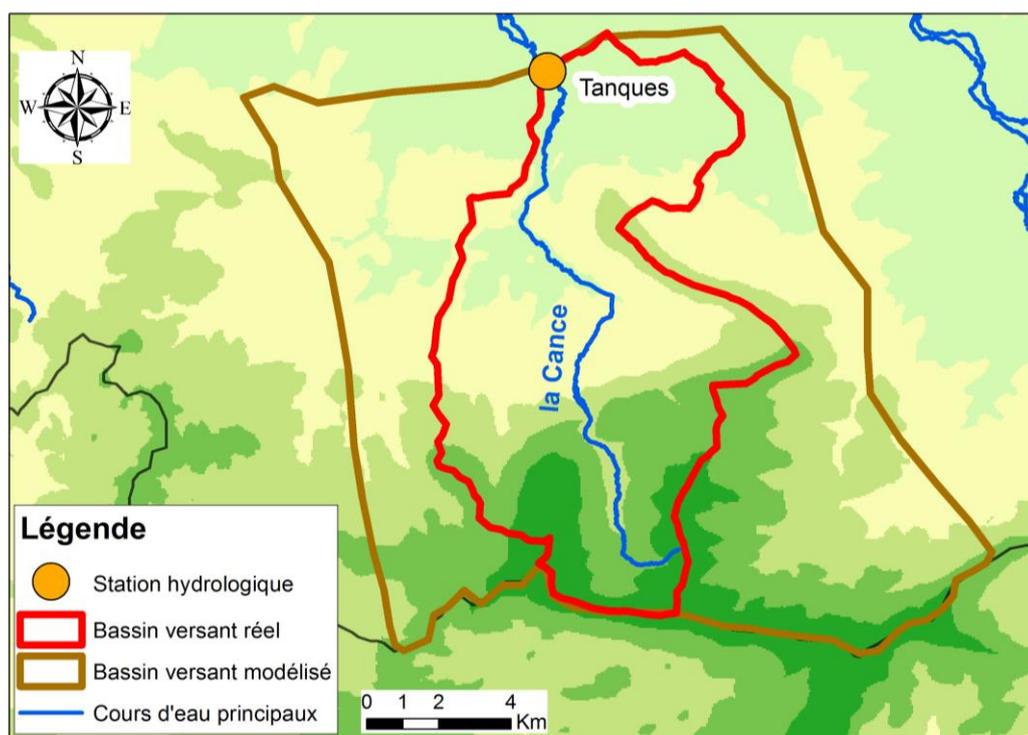


Illustration 8 : Bassin versant de surface réel de la Cance à la station de Tanques (en rouge) et bassin versant modélisé en considérant que les écoulements sont dirigés vers le cours d'eau le plus proche (en marron). Source : Croiset et al., 2013.

Il a donc été décidé d'introduire des directions de drainage, calculées à partir du MNT, ce qui permet aux écoulements de surface d'être dirigés par la topographie. Cette modification du modèle a permis d'améliorer significativement le calage des chroniques de débits pour plusieurs bassins versant du socle comme le montre l'illustration 9.

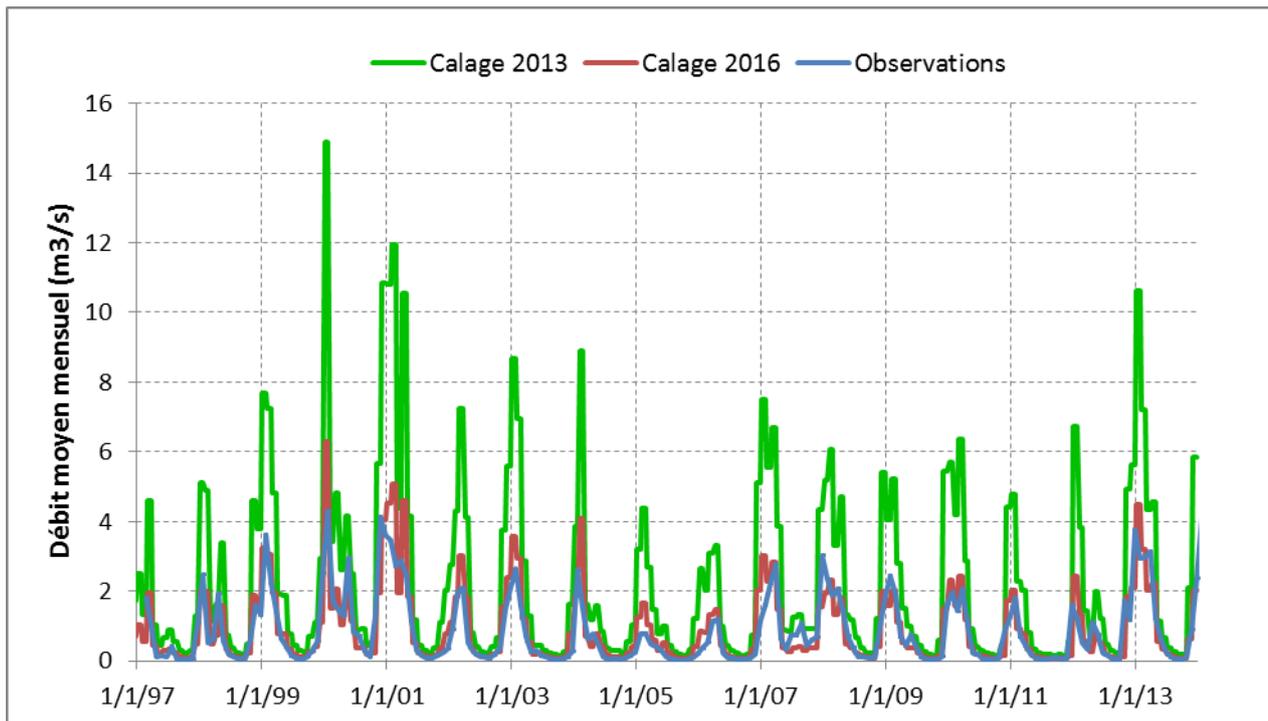


Illustration 9 : Débit de la Cance à Tanques (station I3103030).

Comparaison des débits observés (en bleu) et des débits simulés en considérant un ruissellement vers le cours d'eau le plus proche (en vert) et en tenant compte de la topographie du bassin versant (en rouge).

- **Reprise de la modélisation de la recharge et du ruissellement dans le bassin versant de la Touques**

Dans le bassin versant de la Touques, le calage tel qu'il avait été arrêté en 2013 était imparfait : dans les cours d'eau, les tarissements simulés étaient souvent plus rapides que les tarissements observés et les débits d'étiage étaient sous-estimés tandis que les niveaux piézométriques étaient globalement bien reproduits.

Les paramètres de recharge (temps de demi-percolation et coefficient de partage ruissellement/infiltration) ont été ajustés afin de mieux reproduire les chroniques observées. Le calage obtenu à l'issue de ces tests est présenté sur les illustrations suivantes.

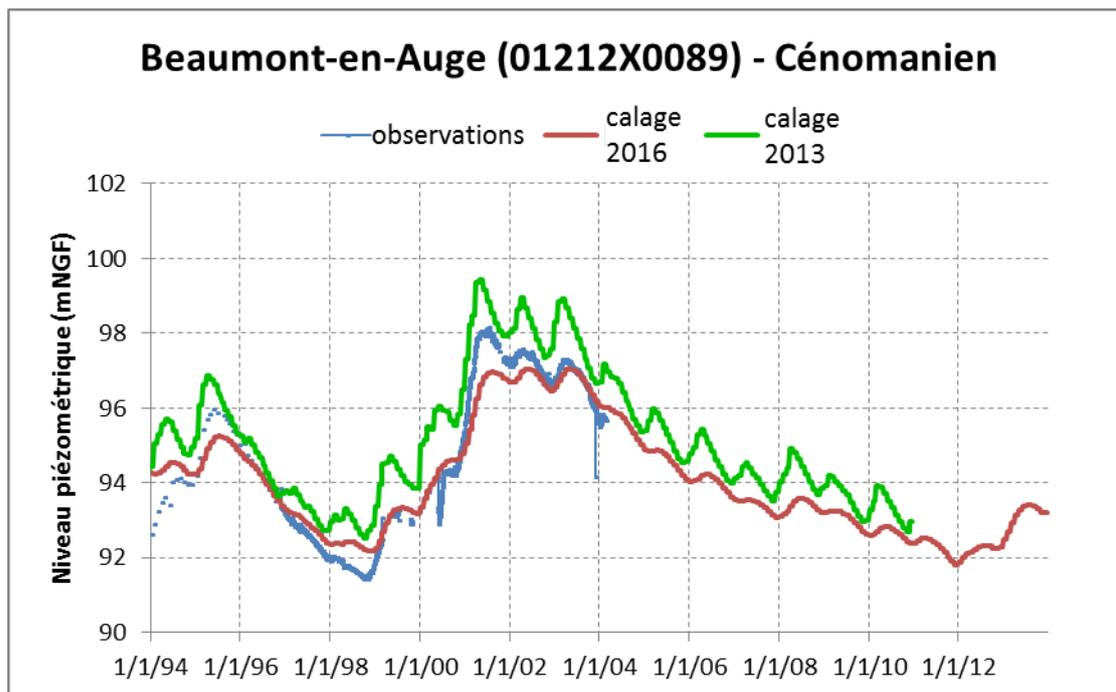


Illustration 10 : Chronique piézométrique au piézomètre de Beaumont-en-Auge.

Comparaison des chroniques observée (en bleu), simulée en 2013 (en vert) et avec les modifications apportées dans la présente étude (en rouge)

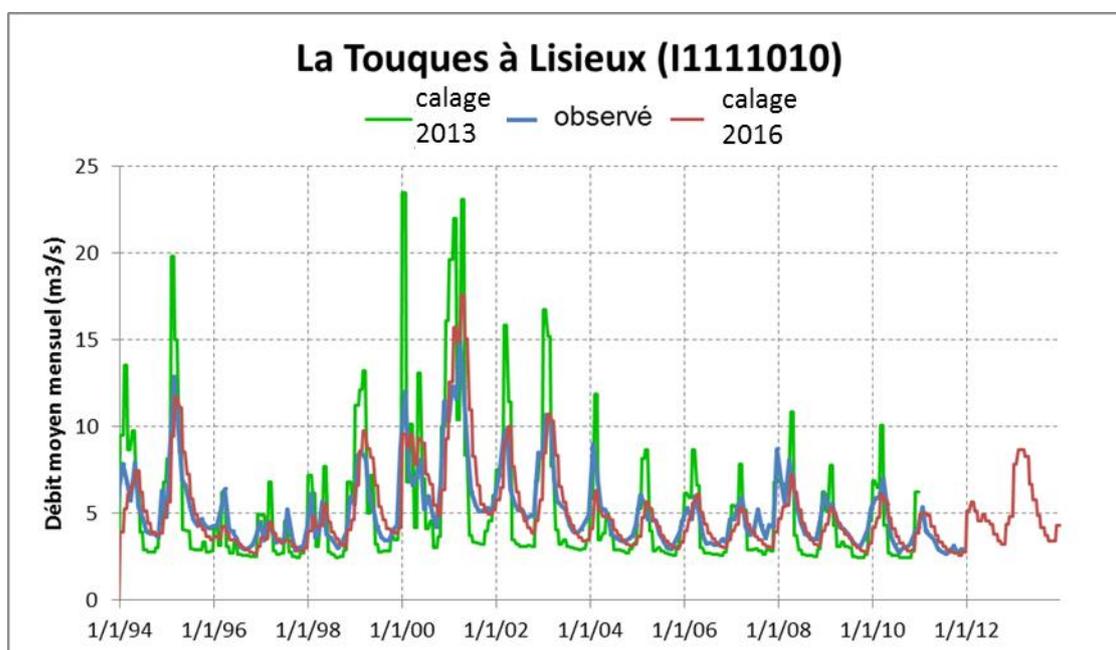


Illustration 11 : Débit de la Touques à Lisieux.

Comparaison des débits observés (en bleu), des débits simulés en 2013 (en vert) et dans la présente étude (en rouge).

3. Méthode d'étude de l'impact de la variation des facteurs climatiques et du niveau marin sur la position du biseau salé

3.1. UTILISATION CONJOINTE DU MODELE MAILLE ET D'UN MODELE ANALYTIQUE

La modélisation des écoulements densitaires prenant en compte le mélange de l'eau douce et de l'eau salée est possible avec l'outil de modélisation MARTHE, mais étant donné le nombre de paramètres requis pour une telle modélisation, un nombre très important de données de calage (profil de conductivité dans les forages, connaissance fine des différents niveaux de l'aquifère et de leurs propriétés hydrodynamiques,...) serait nécessaire. Il n'était pas possible d'acquérir de si nombreuses données dans le cadre de cette étude.

L'approche choisie dans ce travail est inspirée de l'approche de Werner et Simmons (2009). Ces auteurs proposent un cadre conceptuel simple permettant d'évaluer, à l'aide d'un modèle analytique, l'ordre de grandeur des modifications de l'intrusion saline dans les régions côtières en réponse à l'élévation du niveau marin et à la modification des conditions hydrodynamiques dans l'aquifère. Ce modèle se base sur les hypothèses suivantes : les écoulements se font en régime permanent, l'interface entre eau douce et eau salée est franche (pas de zone de mélange), l'aquifère est homogène et isotrope et la recharge constante. Ce modèle permet de tester l'influence de différents paramètres, notamment l'élévation du niveau marin, les flux de recharge et les conditions limites à l'amont de l'aquifère.

Dans un premier temps, le modèle maillé est utilisé en régime transitoire pour évaluer l'impact de la modification de données d'entrée sur les flux de recharge et les flux sortant du modèle. Ensuite, le modèle maillé est utilisé en régime permanent en utilisant les valeurs de recharge moyenne déterminée lors de la première étape pour simuler l'impact de la modification de la recharge moyenne, des prélèvements et/ou du niveau marin sur les niveaux piézométriques. Ces résultats sont ensuite utilisés dans le modèle analytique pour étudier l'impact de ces changements sur l'interface eau douce - eau salée.

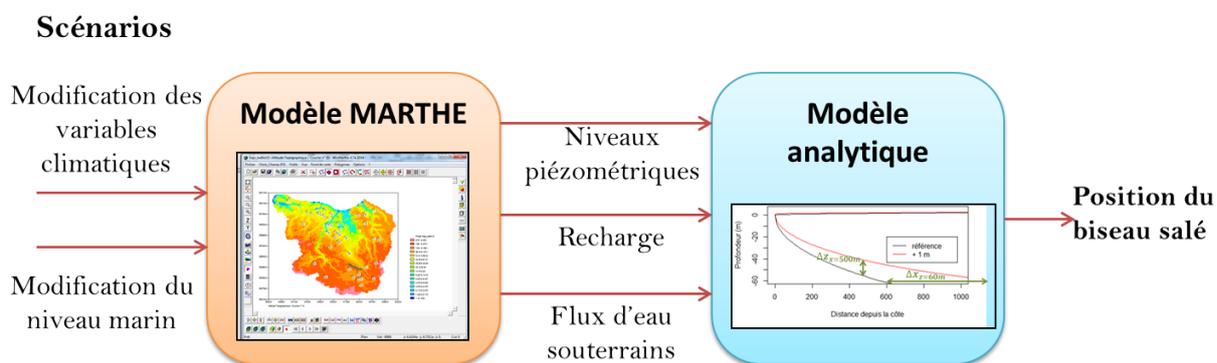


Illustration 12 : Schéma de la méthode de travail faisant intervenir un modèle maillé suivi d'un modèle analytique

Cette approche, utilisant un modèle analytique simple quant à la représentation des phénomènes en jeu dans la zone complexe qu'est la frange littorale, est cependant très instructive sur l'identification des processus prédominants et sur les ordres de grandeur des changements attendus.

3.2. DESCRIPTION DU MODELE ANALYTIQUE UTILISE

Le modèle analytique utilisé considère un aquifère libre dont le substratum est horizontal et imperméable. L'aquifère est par ailleurs considéré comme homogène et isotrope et le régime d'écoulement comme permanent. A l'aval le niveau piézométrique est contrôlé par le niveau de la mer (condition de charge imposée).

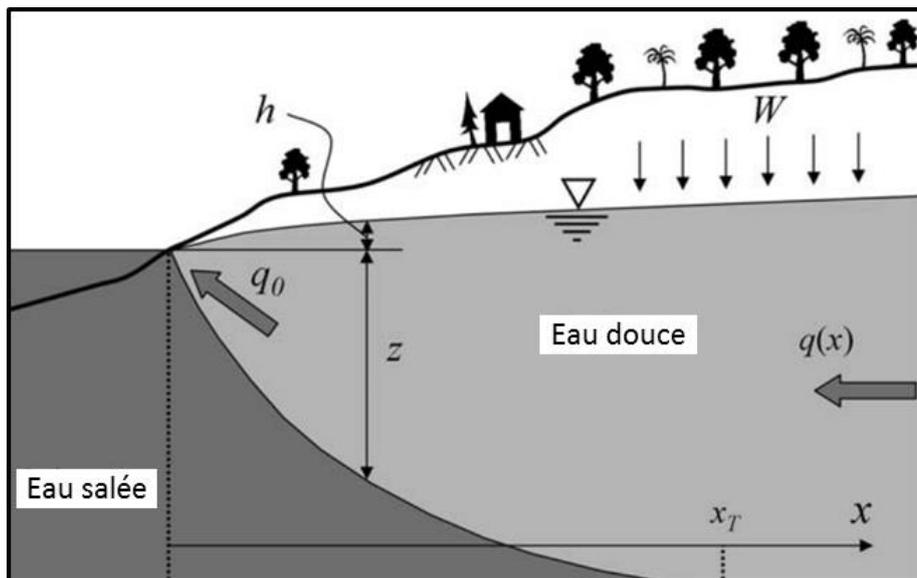


Illustration 13 : Schéma du modèle analytique et notations utilisées. Source : Werner & Simmons, 2009

On se place dans le cas d'un équilibre hydrodynamique, on utilisera donc l'approximation de Ghyben-Herzberg :

$$z(x) = \frac{h(x)}{\delta} \quad (1)$$

où $\delta = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d} \approx 0.025$, ρ_d et ρ_s étant respectivement la densité de l'eau douce et celle de l'eau salée.

Pour la mise en équation du problème l'équation de Darcy combinée avec l'approximation de Dupuit (qui considère que les flux sont horizontaux dans l'aquifère) est utilisée :

$$q(x) = q_0 - Wx = K(h + z) \frac{dh}{dx} \quad (2)$$

où $h(x)$ [L] est le niveau piézométrique dans l'aquifère, W est le flux de recharge [L/T], considéré comme constant sur l'aquifère, K [L/T] est la conductivité hydraulique, $z(x)$ [L] est la profondeur de l'interface eau douce/eau salée, q_0 est le débit sortant en mer et x [L] est la distance horizontale depuis la côte (toutes les notations sont reportées sur l'illustration 13). L'approximation de Dupuit sous-estime la profondeur de l'interface mais van der Veer (1977) et

Cheng et Ouazar (1999) ont montré que l'erreur induite diminuait rapidement en s'éloignant de la côte.

La condition limite au niveau de la côte est : $h(0) = 0$

En utilisant l'équation (1) et en intégrant l'équation (2), on obtient le niveau piézométrique h en fonction de la distance x à la côte :

$$h(x) = \sqrt{\delta \frac{2q_0x - Wx^2}{K(1 + \delta)}} \quad (3)$$

A l'amont, la condition limite peut être soit une condition limite de flux nul soit une condition de charge imposée.

Lorsque la condition est un flux nul, on définit $q_0 = x_m/W$ où x_m [L] est fixé et représente la longueur de l'aquifère. Lorsque la condition limite est une charge imposée, on fixe $h(x_{fix})$, et on peut alors calculer q_0 en utilisant l'équation (3).

Le modèle analytique a été développé à l'aide du logiciel R².

3.3. ETUDE DE SENSIBILITE DU MODELE ANALYTIQUE

En premier lieu, quelques tests de sensibilité ont été réalisés avec le modèle analytique. Ces cas théoriques ont pour objectif d'évaluer l'impact attendu sur le biseau salé lors de la modification des paramètres suivants :

- hausse du niveau marin ;
- baisse de la recharge.

Pour tous les exemples suivants, sauf mention contraire, les paramètres utilisés sont les suivants :

- perméabilité de l'aquifère : $K = 10 \text{ m/j}$ ($1.16 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$)
- recharge : $W = 80 \text{ mm/an}$
- débit sortant : $q_0 = 320 \text{ m}^2/\text{an}$

Deux indicateurs ont été choisis pour représenter l'évolution de l'interface : la remontée de l'interface à 500 m de la côte, appelée $\Delta z_{(x=500m)}$, et le déplacement de l'interface à 60 m de profondeur, appelée $\Delta x_{(z=60m)}$. Ces deux indicateurs sont représentés sur l'illustration 14. Ils peuvent être calculés directement à l'aide du logiciel R étant donné l'équation de l'interface entre eau douce et eau salée.

² <https://www.r-project.org/>

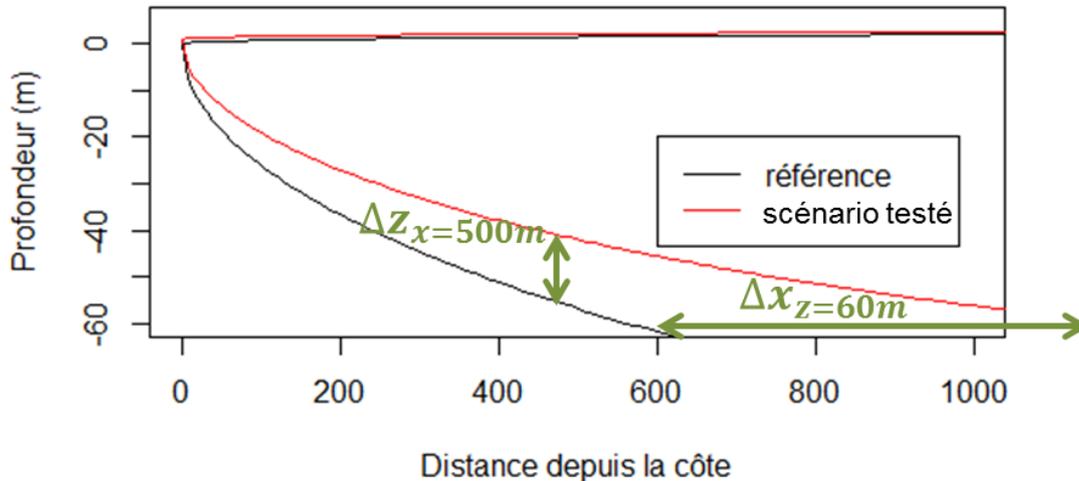


Illustration 14 : Définition des deux indicateurs utilisés pour caractériser l'évolution de l'interface eau douce - eau salée.

- **Sensibilité à l'élévation du niveau marin**

On considèrera deux cas de figure différents, selon la condition limite à l'amont de l'aquifère :

- Cas 1 : une condition limite de flux nul qui correspondrait à une crête piézométrique (comme représenté sur l'illustration 13) :
- Cas 2 : une condition limite de charge imposée (comme représenté sur l'illustration 15) à 2 km de la côte.

Dans les deux cas, on considèrera une recharge constante sur toute la surface de l'aquifère.

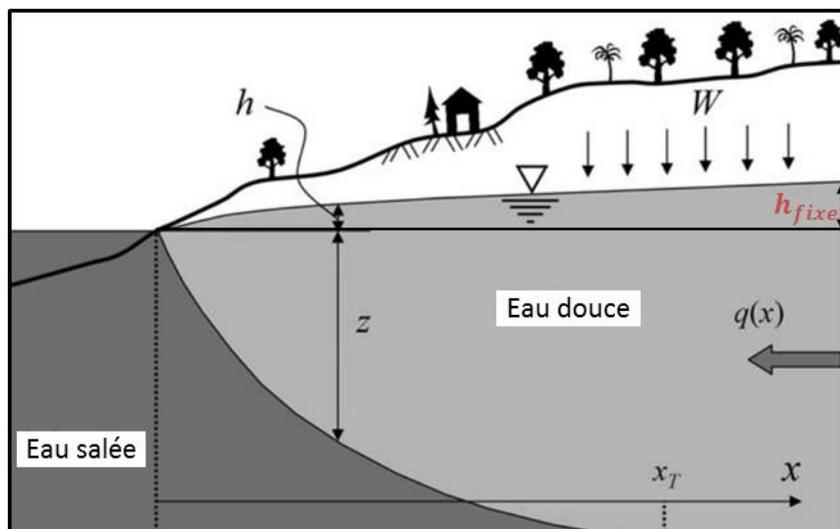


Illustration 15 : Schéma du modèle analytique avec une condition limite de charge imposée (h_{fixe}) à l'amont de l'aquifère

Dans le premier cas, si le niveau marin augmente de 1 m (c'est-à-dire la condition limite de charge imposée à l'aval de l'aquifère), les gradients piézométriques de la situation de référence sont conservés car les flux imposés (aval et amont) restent inchangés. La hausse de la charge au niveau de la côte se répercute donc sur tout l'aquifère, et les débits restent constants.

La profondeur de l'interface eau douce/eau salée est uniquement décalée également de 1 m vers le haut. Cette remontée correspond à un déplacement de l'interface d'environ 16 m à 60 m de profondeur.

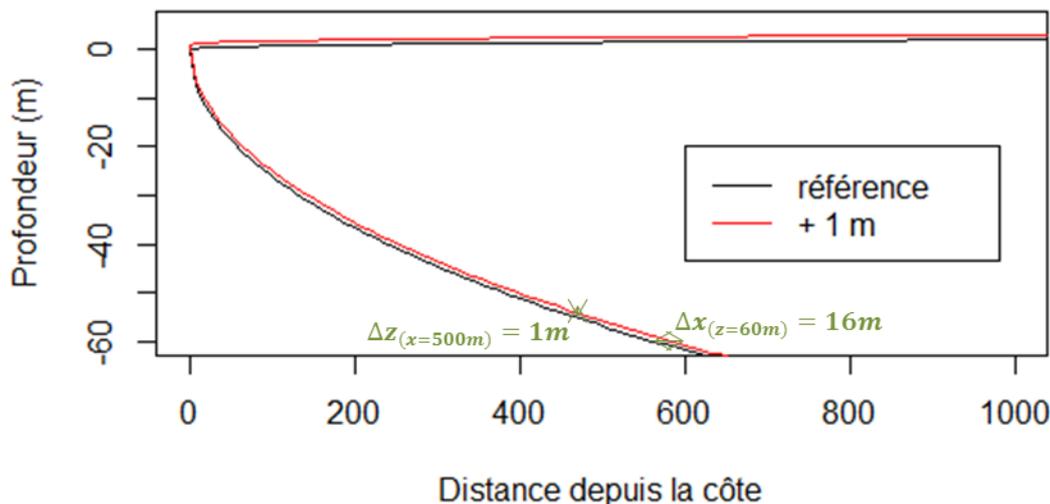


Illustration 16 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et un scénario d'élévation d'1 m du niveau marin dans le cas où la condition limite est un flux imposé.

Dans le second cas, où la limite à l'amont est une charge imposée (un lac ou une rivière par exemple), la situation est très différente. Les charges sont fixées à l'amont et à l'aval. Lorsque le niveau marin monte la différence de charge entre amont et aval diminue et les débits sortants sont donc diminués. L'impact sur la position de l'interface est alors très fort comme on peut le voir sur l'illustration 17.

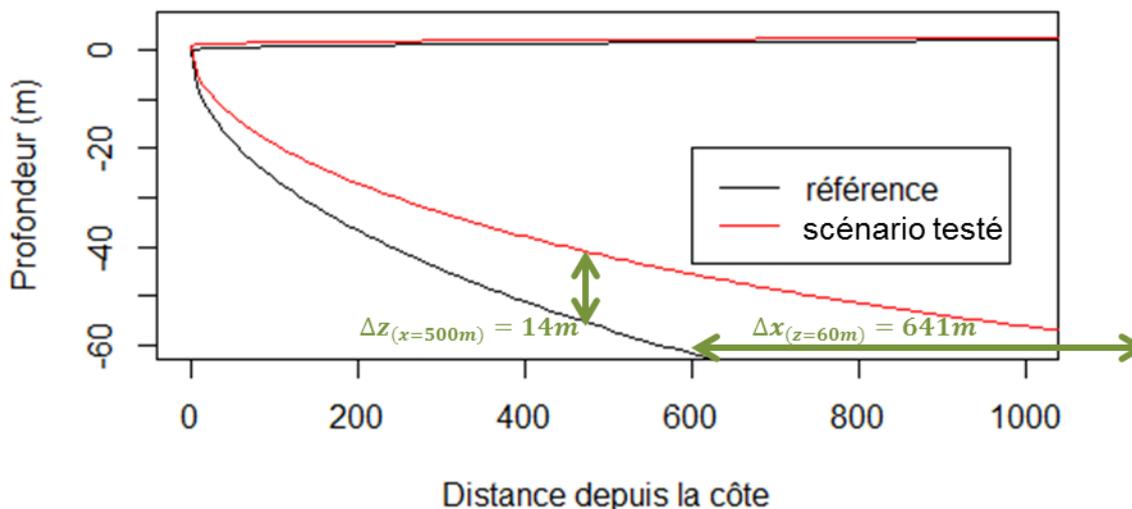
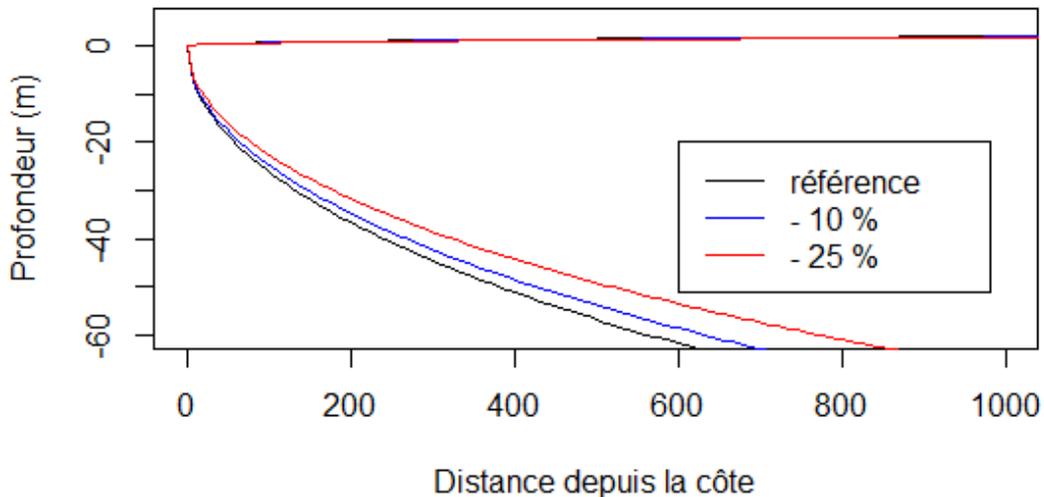


Illustration 17 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et un scénario d'élévation d'1 m du niveau marin dans le cas où la condition limite est une charge imposée à 2 km de la côte.

- **Sensibilité à une baisse de la recharge**

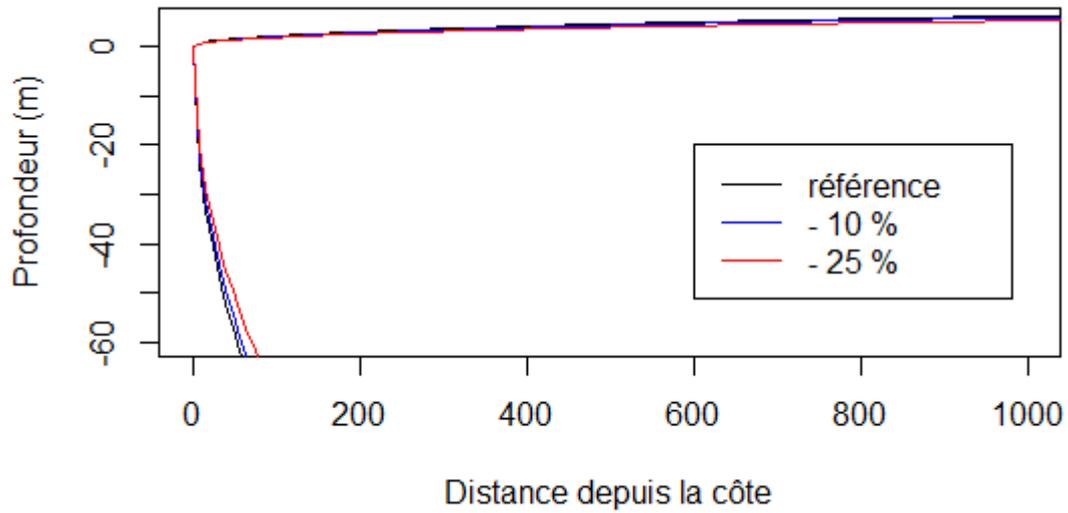
Pour ces tests, une condition limite à flux nul est imposée en amont de l'aquifère. L'impact d'une baisse de la recharge de 10 et 25 % est testé, pour deux valeurs de perméabilité de l'aquifère différente : $K= 10 \text{ m/j}$ et $K= 1 \text{ m/j}$.

Les résultats sont présentés sur l'illustration 18 pour une perméabilité de 10 m/j et sur l'illustration 19 pour une perméabilité de 1 m/j . L'illustration 18 montre que l'impact d'une baisse de la recharge est assez limité sur la position de l'interface. La comparaison des résultats des deux simulations montre que, pour une recharge identique, les gradients piézométriques sont d'autant plus forts que la perméabilité de l'aquifère est faible et l'impact d'une baisse de la recharge est d'autant plus faible que la perméabilité est faible.



Recharge -10 %	Recharge -25 %
$\Delta z_{(x=500m)} = 3 \text{ m}$	$\Delta z_{(x=500m)} = 8 \text{ m}$
$\Delta x_{(z=60m)} = 64 \text{ m}$	$\Delta x_{(z=60m)} = 208 \text{ m}$

Illustration 18 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et deux scénarios de baisse de recharge, de 10% en bleu et 25% en noir ; le tableau reprend les valeurs caractéristiques du déplacement de l'interface pour les deux scénarios.



Recharge -10 %	Recharge -25 %
$\Delta z_{x=500m} = 10 m$	$\Delta z_{x=500m} = 25 m$
$\Delta x_{z=60m} = 8 m$	$\Delta x_{z=60m} = 16 m$

Illustration 19 : Evolution de l'interface entre eau douce et eau salée entre le scénario de référence (en noir) et deux scénarios de baisse de recharge, de 10% en bleu et 25% en noir ; le tableau reprend les valeurs caractéristiques du déplacement de l'interface pour les deux scénarios.

4. Scénarios

Cinq scénarios ont été définis en concertation avec les membres du comité de pilotage. Ces scénarios ont pour objectif d'étudier les effets de l'évolution probable des paramètres climatiques, du niveau marin et des prélèvements sur l'intrusion saline.

4.1. DONNEES UTILISEES

4.1.1. Elévation du niveau marin

En ce qui concerne l'élévation du niveau marin, les scénarios ont été définis en prenant en compte les résultats de la tâche 1 du projet (*cf.* paragraphe 2.2). Des élévations du niveau marin de 0,5 m (augmentation probable à l'horizon 2100 pour le scénario RCP 2.6) et 1 m (augmentation possible à l'horizon 2150 pour le scénario climatique RCP 8.5) ont été testées.

4.1.2. Modification des variables climatiques

Pour l'évolution des variables climatiques, les données utilisées sont extraites du portail DRIAS³, portail qui a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME). Ce portail permet d'accéder à plusieurs variables climatiques (température et pluviométrie mensuelle notamment) calculées à différents horizons temporels et pour différents scénarios RCP d'émissions de gaz à effet de serre⁴. Les données sont fournies sur tout le territoire français pour des mailles de 8 km sur 8 km.

Pour la Basse-Normandie, les modèles prédisent, pour l'horizon moyen (2040-2070), une stabilité ou une légère baisse des précipitations moyennes (*cf.* Illustration 20) et une hausse notable des températures moyennes et du nombre de jours au-dessus de 25°C.

³ <http://www.drias-climat.fr>

⁴ Les scénarios RCP sont les scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre établis par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Quatre scénarios ont été définis, plus ou moins optimistes quant à la réduction des gaz à effets de serre. Ils sont nommés par rapport au forçage radiatif (bilan radiatif au sommet de la troposphère) exprimé en W/m^2 .

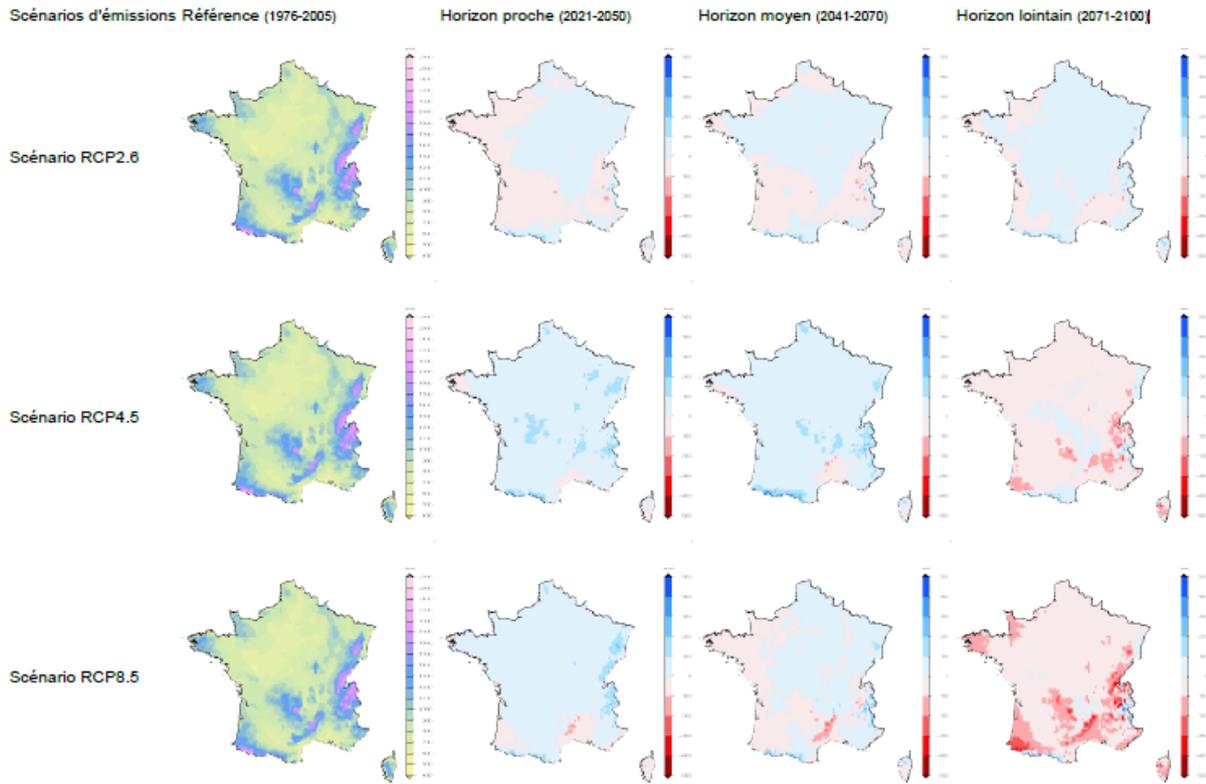


Illustration 20 : Anomalies dans le cumul des précipitations. De gauche à droite : pluviométrie annuelle moyenne dans le scénario de référence (1976-2005) et écart entre la période considérée (horizon proche 2020-2050, horizon moyen 2040-2070 et horizon lointain 2070-2100) et la période de référence en utilisant le modèle Aladin de Météo-France. De haut en bas : trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5.

Les anomalies de précipitations et de température extraites du portail DRIAS sont représentées sur l'illustration 21.

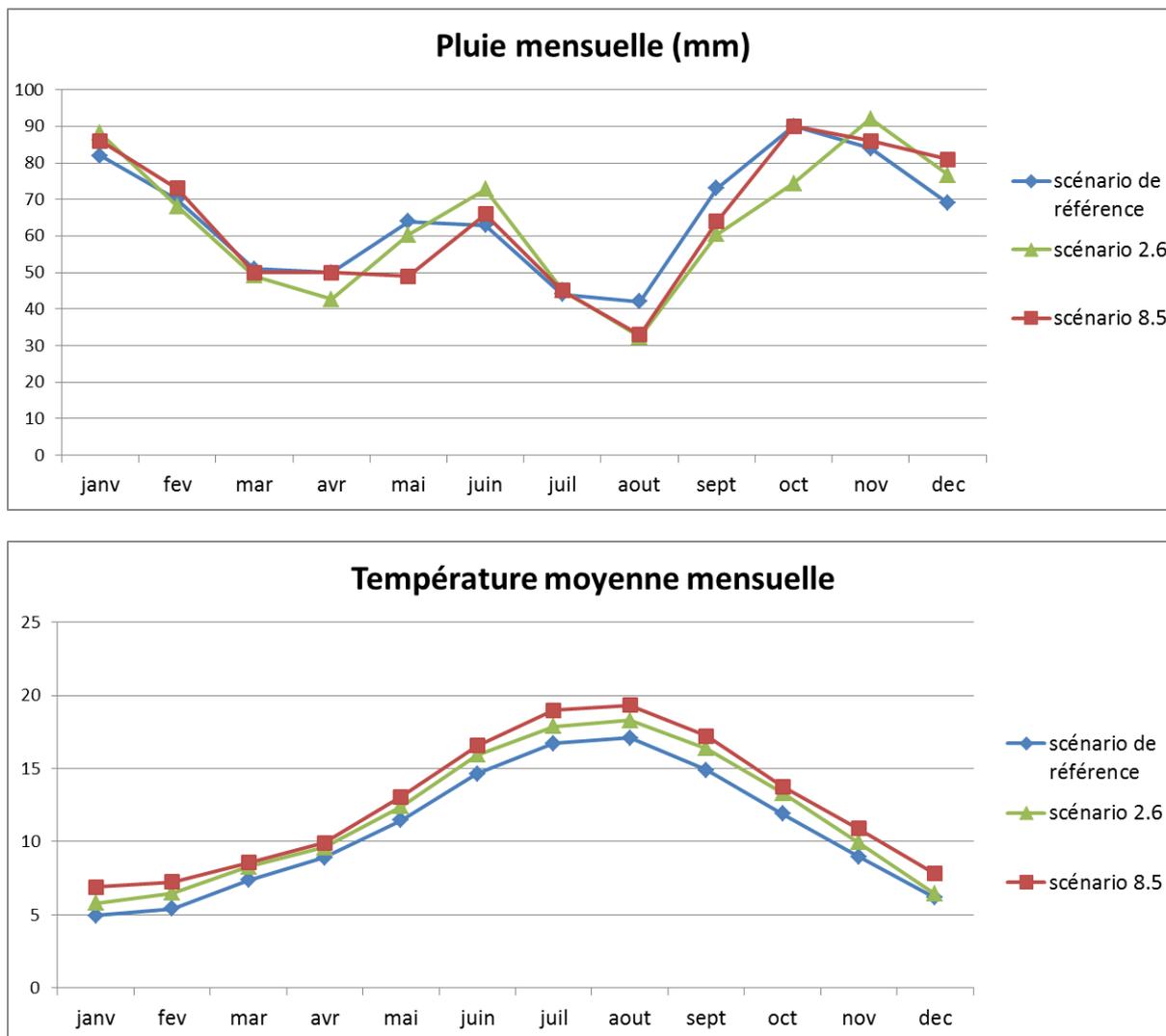


Illustration 21 : Pluie et température mensuelles pour le scénario de référence, et deux scénarios RCP à l'horizon moyen sur le littoral bas-normand. Source : DRIAS

Les scénarios de modélisation ont été créés en utilisant les chroniques de pluie et d'ETP existantes (94-2013) et en y appliquant des coefficients correctifs calculés à partir de ces données. Pour les précipitations, le coefficient correctif mensuel est calculé comme suit :

$$\alpha = \text{pluie}_{\text{mois } i}(\text{scen}_{\text{ref}}) / \text{pluie}_{\text{mois } i}(\text{scen}_{\text{RCP}})$$

Les corrections appliquées à l'ETP sont calculées à partir des valeurs en température en utilisant deux formules : celle de Holland (1978)⁵ et celle de McGuinness (1974)⁶ qui donnent des résultats très similaires. Les coefficients correctifs appliqués pour les deux scénarios RCP utilisés sont donnés sur l'illustration 22.

⁵ ETP (mm/j) = $3.3 \times 10^7 \times \exp(-4620 / (T + 273.15))$, où T est la température moyenne annuelle en °C

⁶ ETP (mm/j) = $\text{Rextrax}(T+5)/1938$ où T est la température moyenne annuelle en °C et Rextrax (en MJ/j) est le rayonnement extraterrestre qui ne dépend que de la latitude et dont la moyenne annuelle s'obtient par l'équation : $\text{Rextrax} = -0.0427 \times \text{LAT}^2 - 0.6548 \times \text{LAT} + 430.27$

Mois	Scénario 2.6		Scénario 8.5	
	Pluie	ETP	Pluie	ETP
janv	7%	9%	5%	12%
fev	-3%	10%	4%	11%
mar	-4%	7%	-2%	7%
avr	-15%	5%	0%	6%
mai	-6%	6%	-23%	10%
juin	16%	7%	5%	11%
juil	3%	5%	2%	13%
aout	-23%	5%	-21%	13%
sept	-17%	7%	-12%	14%
oct	-17%	8%	0%	11%
nov	10%	7%	2%	12%
dec	11%	2%	17%	10%

Illustration 22 : Anomalies de pluie et d'ETP appliquées aux chroniques pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5.

4.1.3. Evolution des prélèvements

Une étude bibliographique ainsi que la consultation des partenaires de l'étude ont été menées afin d'établir des scénarios d'évolution des prélèvements dans la zone d'étude.

Le graphique de l'évolution des prélèvements dans la zone du modèle (Illustration 2) montre une baisse significative des prélèvements (tous usages confondus) depuis 1994, principalement liée à la baisse des prélèvements industriels (en raison de la baisse des activités industrielles et de la réduction des consommations) et à usage AEP.

En ce qui concerne l'AEP, les études prospectives consultées (BRL, 2012, BIPE, 2011) semblent privilégier une légère baisse de la consommation des ménages et pas de hausse significative de population dans la région ni dans le secteur de Caen (voir Illustration 23 et Illustration 24).

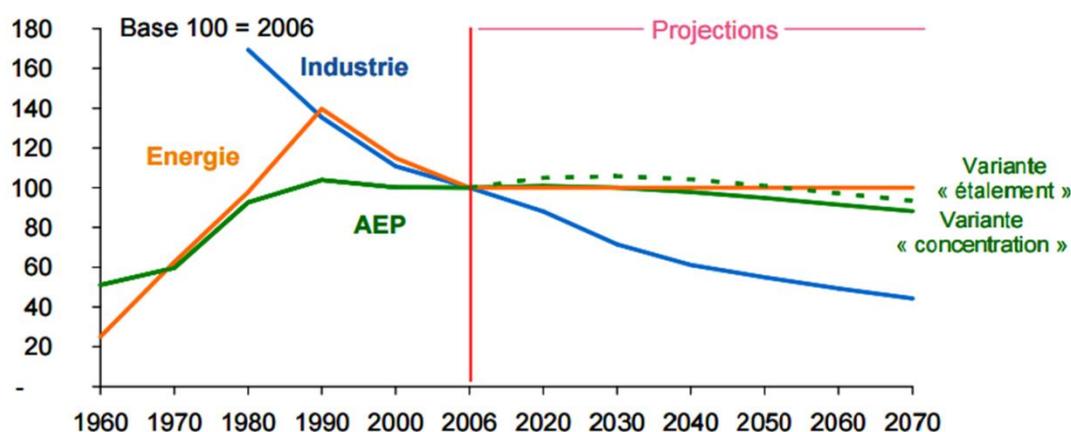


Illustration 23 : Evolution des prélèvements d'eau par usage de 1960 à 2006 et projections 2006 à 2070. Source : BIPE, 2011.

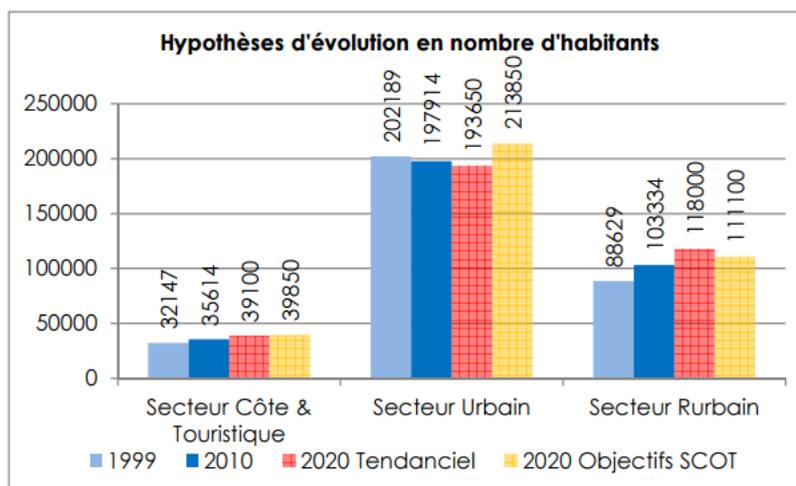


Illustration 24 : Hypothèses d'évolution de la population sur le territoire de Caen métropole. Source : Caen métropole , Conférence du commerce – Présentation de l'analyse prospective, nov. 2013

En ce qui concerne les prélèvements à usage industriel et agricole, aucune étude ni connaissance particulière des partenaires ne permet de prévoir les évolutions attendues. Cependant, au regard de l'évolution constatée entre 1994 et 2013, rien ne permet de penser qu'une augmentation significative de ces prélèvements est probable.

Il a donc été choisi de considérer un scénario optimiste dans lequel les prélèvements seraient inchangés et un scénario pessimiste moins probable d'augmentation de 10 % des prélèvements dans la zone d'étude.

4.2. DESCRIPTION DES SCENARIOS

A partir des données collectées décrites dans le paragraphe précédent, cinq scénarios ont été construits en concertation avec le Comité de Pilotage de l'étude, qui permettent de tester l'influence de la montée du niveau marin, d'un changement des conditions climatiques et d'une augmentation des prélèvements. Les quatre premiers scénarios représentent un état moyen sur l'année, tandis que dans le dernier on a différencié un état de basses eaux et un état de hautes eaux. Les scénarios sont présentés sur l'illustration 25 ci-dessous.

	Hausse du niveau marin	Modification des variables climatiques	Evolution des prélèvements	Régime testé
Scénario 1	0,5 m	inchangées	inchangés	Permanent moyen
Scénario 2	0,5 m	selon scénario RCP2.6	inchangés	Permanent moyen
Scénario 3	1 m	selon scénario RCP8.5	inchangés	Permanent moyen
Scénario 4	1 m	selon scénario RCP8.5	+ 10 %	Permanent moyen
Scénario 5	1 m	selon scénario RCP8.5	inchangés	Permanent basses eaux et hautes eaux

Illustration 25 : Description des 5 scénarios réalisés

4.3. RESULTATS

4.3.1. Précautions dans l'interprétation

De manière générale, la modélisation maillée apporte des éléments intéressants pour caractériser l'intrusion saline due au biseau salé (et non au rentrant salé par les cours d'eau par exemple). Ce processus est plus particulièrement marqué dans les zones où les gradients piézométriques sont très faibles (Illustration 26).

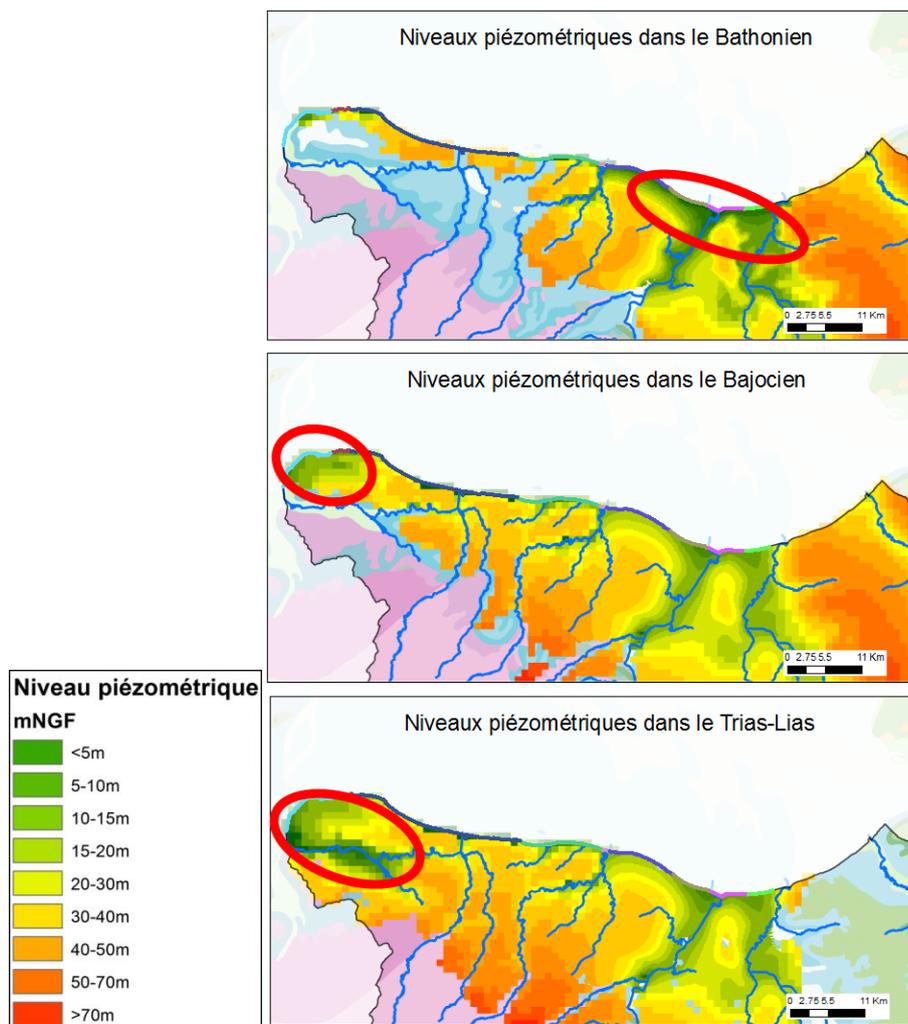


Illustration 26 : Niveaux piézométriques dans les aquifères du Trias/Lias, du Bajocien et du Bathonien dans le modèle permanent de référence. En rouge sont entourées les zones littorales de faibles gradients.

Pour chacun des 5 scénarios, les résultats suivants seront présentés :

- A l'aide du modèle maillé dans un premier temps : la modification moyenne des niveaux piézométriques et la modification moyenne des flux sortant du modèle entre le scénario et la référence
- A l'aide du modèle analytique ensuite : la remontée de l'interface à 500 m de la côte et l'impact de l'intrusion à 60 m de profondeur (ces 2 indicateurs sont définis sur l'illustration 14)

Les flux sortants du modèle sont les flux d'eau évacués du modèle pour respecter une condition limite de charge imposée. Cette charge imposée (fixée égale au niveau de la mer) concerne les mailles des aquifères placés directement en équilibre avec la mer. Pour les mailles situées sur la côte mais dans un aquifère en dessous ou au-dessus de l'aquifère en équilibre avec la mer, la condition imposée est une condition de flux nul. Ces flux sortants sont calculés sur des portions de littoral, comme la somme des flux sortant dans chaque maille de la zone, quelle que soit la couche en contact avec la mer. Les portions sont découpées selon les bassins versants de surface utilisés pour la délimitation de la Zone de Répartition des Eaux (Wuilleumier *et al.*, 2014). L'illustration 27 présente les flux d'eau souterraine sortant en mer pour le scénario de référence.

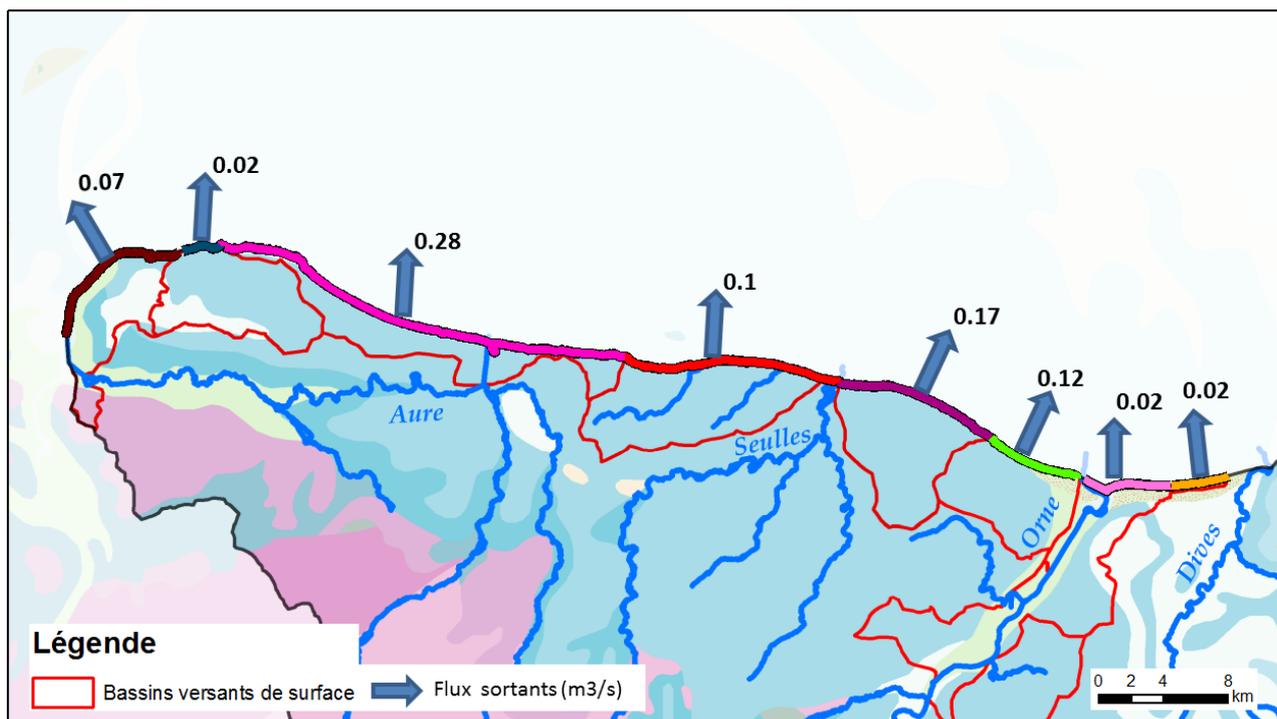


Illustration 27 : Flux d'eau souterraine moyens (en m³/s) sortant du modèle pour 5 entités hydrographiques littorales de la plaine de Caen et du Bessin

Les résultats des différents scénarios présentés ci-dessous sont à prendre avec précaution. En effet, le modèle analytique est basé sur de nombreuses hypothèses simplificatrices, détaillées ci-dessous. Il est par contre intéressant de comparer les résultats des différents scénarios et des différentes zones et de regarder les ordres de grandeur des indicateurs simulés.

Les principales implications des hypothèses simplificatrices sont les suivantes :

- Le modèle analytique considère un aquifère horizontal. Dans la zone d'étude, ce n'est pas toujours le cas, dans une grande partie de la zone littorale, les couches ont un pendage marqué vers le Nord-Est. En étudiant le cas d'un aquifère horizontal, on se place dans un cas défavorable, la pénétration de l'eau salée est plus importante que dans le cas d'un aquifère incliné : la distance de pénétration de l'eau salée modélisée est donc une valeur maximale attendue.

4.3.2. Scénario 1 : élévation du niveau marin de 0,5 m

Dans ce scénario, une montée du niveau marin de 0,5 m sans modification des variables climatiques est testée afin de pouvoir bien différencier les effets des deux phénomènes.

L'illustration 28 présente la modification des niveaux piézométriques dans le Bathonien pour ce scénario par rapport au scénario de référence.

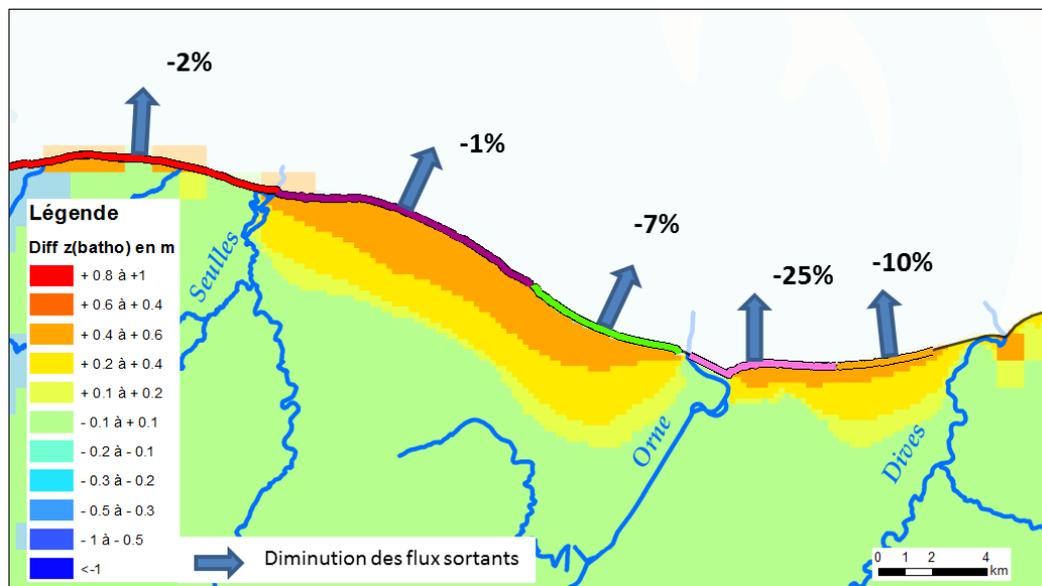


Illustration 28 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0.5 m du niveau marin.

Dans la plaine de Caen, on distingue plusieurs situations. Loin des cours d'eau principaux (entre Orne et Seulles par exemple), l'augmentation des niveaux piézométriques se répercute à l'amont sur plusieurs kilomètres et les flux sont assez peu modifiés. A l'inverse, près des cours d'eau, qui agissent comme des limites à charge imposée, les niveaux piézométriques à l'amont sont peu modifiés et les flux sont localement fortement diminués. La diminution de 25% des flux sortant au niveau de l'embouchure de l'Orne est à mettre en relation avec le faible flux d'eau souterraine sortant dans cette zone assez étroite.

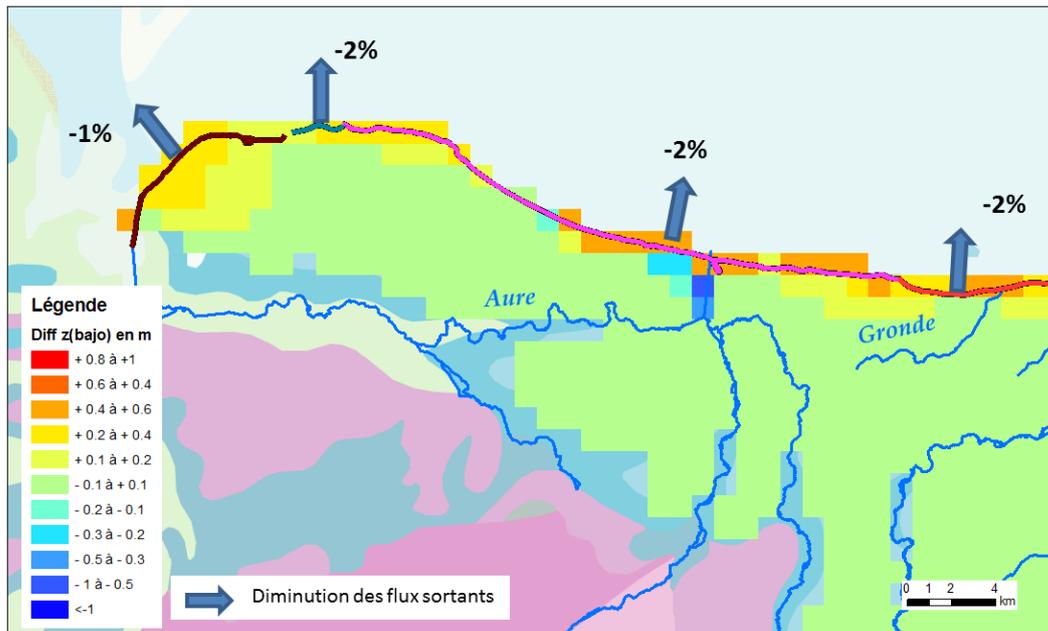


Illustration 29 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bajocien et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0.5 m du niveau marin

Dans le Bajocien (cf. Illustration 29), l'impact de la hausse du niveau marin est limité. Entre la Seulles et l'Aure, la zone correspondant aux bassins versants de la Gronde et de la Provence, montre une baisse limitée des flux sortants. Cela s'explique par le fait que ces ruisseaux ne sont pas des exutoires importants des nappes bathoniennes et bajociennes, elles ne jouent un rôle de charge imposée que très localement. Les flux d'eau souterraine sont essentiellement dirigés vers le littoral.

Dans la couche du modèle correspondant aux aquifères triasiques et liasiques (cf. Illustration 30), les niveaux piézométriques ne sont également impactés que de manière limitée dans la basse vallée de l'Aure. Cependant, il faut noter que cette zone est située en bordure de modèle (la limite est fixée au niveau de la confluence entre l'Aure et la Vire). Dans ce secteur, on a considéré une condition limite à flux nul sur la bordure Ouest du modèle alors que les charges sont très probablement fortement contraintes par le niveau de la mer et les échanges avec la Vire.

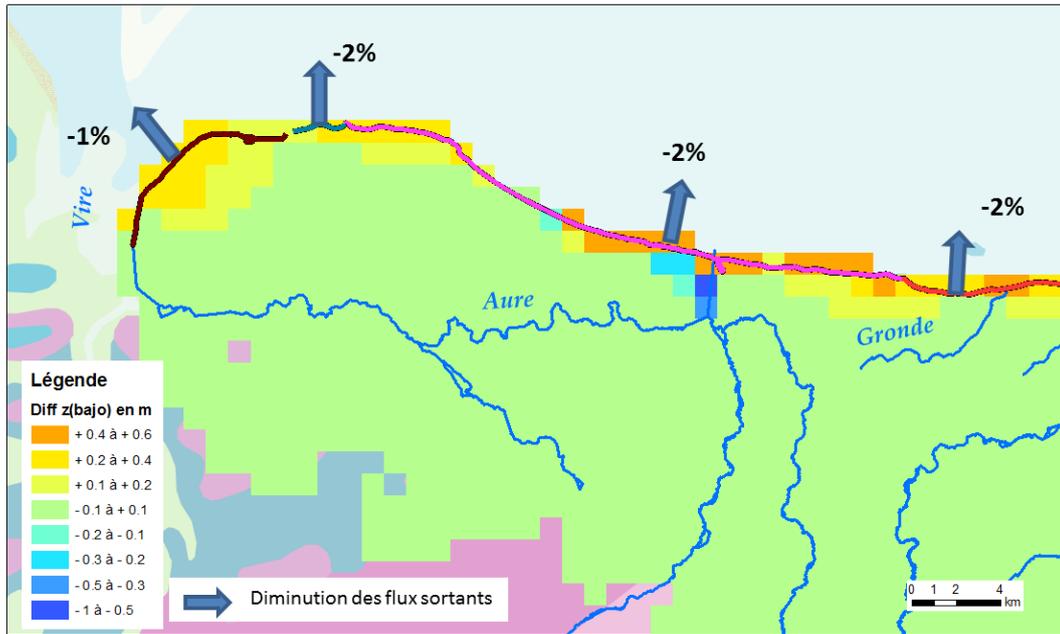


Illustration 30 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias-Lias et des flux sortant du modèle en considérant une élévation de 0,5 m du niveau marin

L'illustration 31 présente les résultats du modèle analytique en termes de remontée et avancée du biseau salé, calculés à partir des résultats du modèle maillé. Le modèle simule une avancée du biseau salé très marquée au niveau de l'embouchure de l'Orne et une avancée plus limitée dans les autres secteurs.

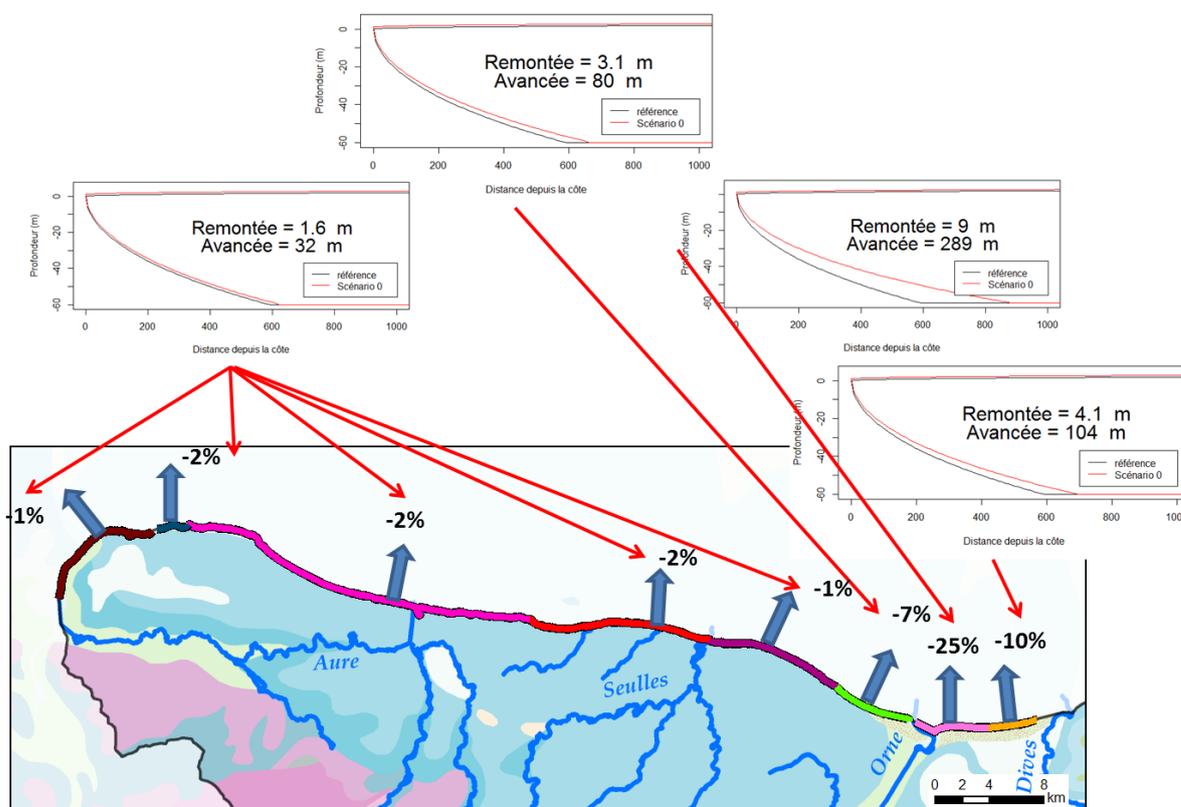


Illustration 31 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 1. Pour les zones avec des flux sortants très proches, un seul modèle analytique est réalisé.

4.3.3. Scénario 2 : élévation du niveau marin de 0.5 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP2.6

Dans ce scénario, le modèle maillé est utilisé tout d'abord en régime transitoire pour le calcul de la recharge moyenne. Pour cela, les flux d'infiltration sont calculés dans chaque zone possédant des paramètres de recharge homogènes. Pour chaque zone, la différence de recharge moyenne est calculée. L'illustration 32 présente les flux de recharge pour deux zones littorales. Ces graphiques montrent que la modification des variables climatiques selon le scénario RCP2.6 entraîne une diminution de la recharge d'environ 10% par rapport au scénario de référence, cette baisse étant homogène sur tout le modèle.

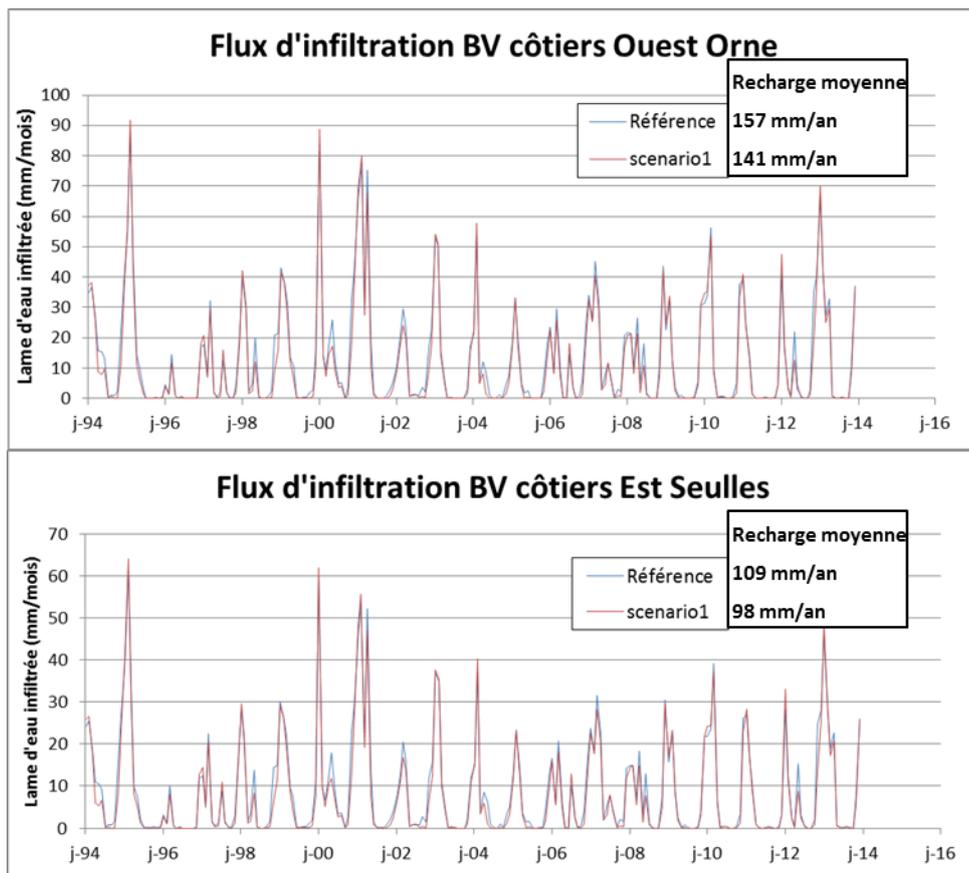


Illustration 32 : Comparaison des flux de recharge entre le scénario de référence (en bleu) et le scénario 2 (en rouge) pour deux zones littorales.

La modification des niveaux piézométriques et des flux sortant du modèle est présentée sur l'illustration 33 (la baisse des niveaux piézométriques dans le Bajocien est présentée en annexe 1) On remarque tout d'abord que, lorsque l'on s'éloigne de la côte, les niveaux piézométriques sont plus bas que dans le scénario de référence. Cette baisse des niveaux piézométriques est directement liée à la baisse de la recharge. La diminution des gradients piézométriques est donc accentuée par rapport au scénario 1 et les flux sortant du modèle sont donc encore diminués.

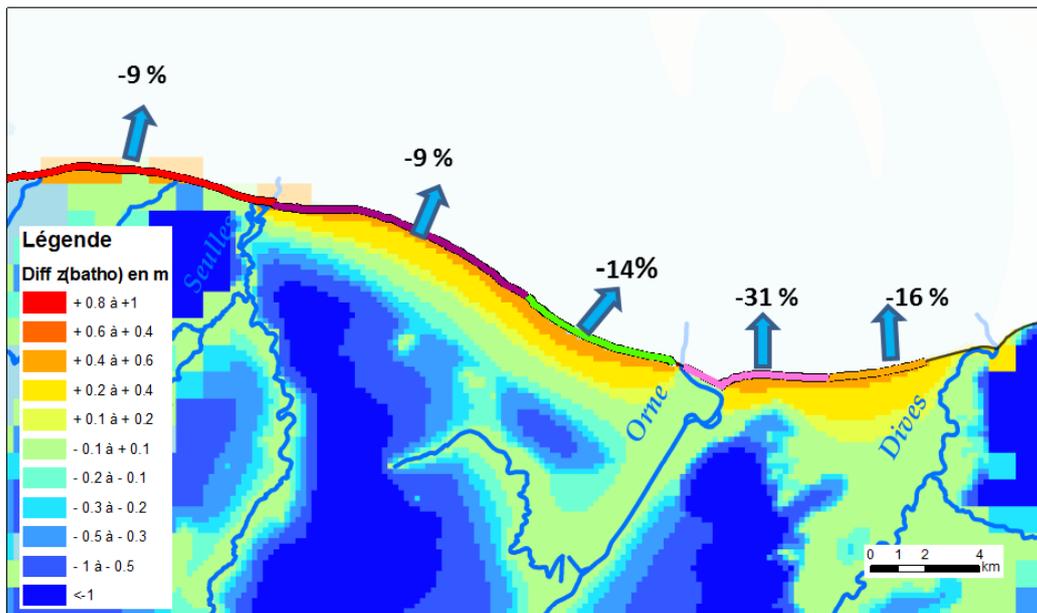


Illustration 33 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle dans le scénario 2 par rapport au scénario de référence.

L'illustration 34 montre l'évolution des niveaux piézométriques dans le Trias-Lias et des flux d'eau souterraine sortant du modèle. La diminution des flux de recharge est marquée de manière assez homogène sur la zone d'étude. Dans le Bessin, la baisse des flux souterrains est faible : la baisse de la recharge est plus fortement ressentie dans les écoulements de surface que dans les écoulements souterrains.

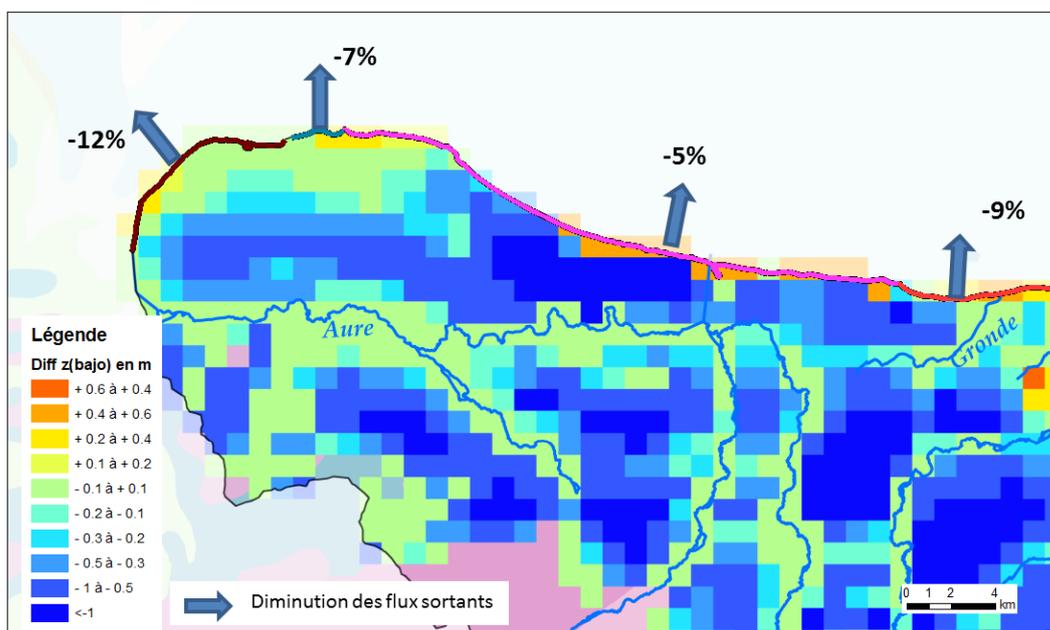


Illustration 34 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias-Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 2 par rapport au scénario de référence.

L'illustration 35 montre que les baisses des flux d'eau souterraine pourraient se traduire par des avancées notables du biseau salé à l'intérieur des terres, notamment dans les vallées de la Dives et de l'Orne.

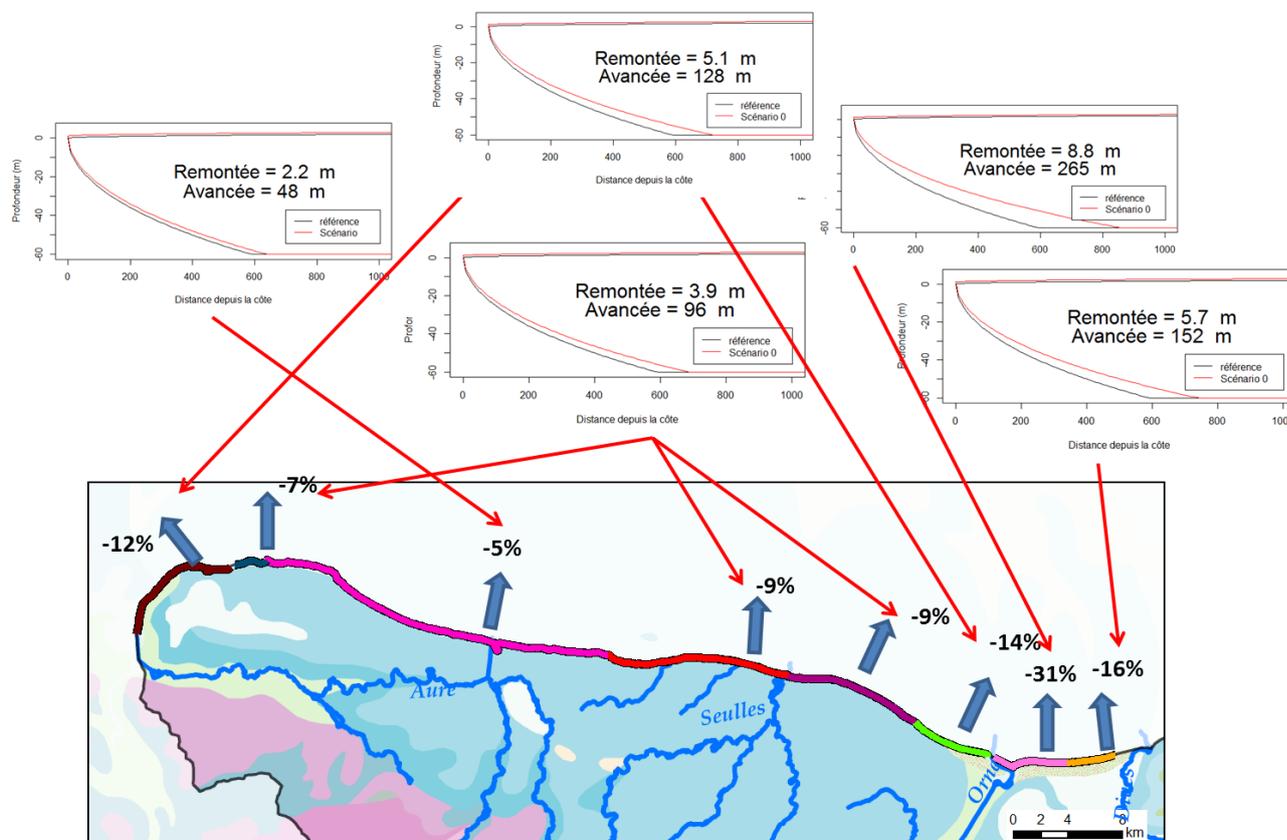


Illustration 35 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 2.

4.3.4. Scénario 3 : élévation du niveau marin de 1 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP8.5

Comme pour le scénario précédent, il est tout d'abord nécessaire de calculer la modification des flux de recharge avec ces nouvelles conditions climatiques. L'illustration 36 présente les flux de recharge pour deux zones littorales pour le scénario de référence et pour le scénario 3. On constate que la modification des variables climatiques selon le scénario RCP8.5 entraîne une diminution de la recharge d'environ 7% par rapport au scénario de référence, cette baisse étant homogène sur tout le modèle.

Cette moindre baisse par rapport au scénario 2 (où la baisse était de 10 %, voir Illustration 32) s'explique par le fait que, même si les températures, et donc les évapotranspirations, sont plus élevées, les pluies moyennes sont légèrement plus élevées également (cf. Illustration 21 et l'illustration 22).

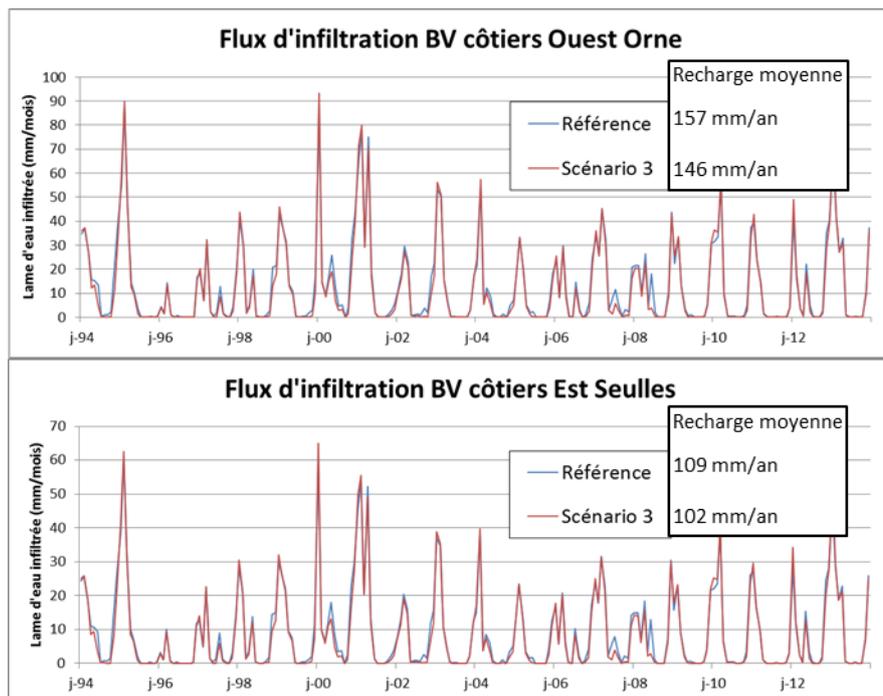


Illustration 36 : Comparaison des flux de recharge entre le scénario de référence (en bleu) et le scénario 3 (en rouge) pour deux zones littorales.

La modification des niveaux piézométriques et des flux sortant du modèle est présentée sur l'illustration 37. On peut voir que l'impact de la hausse du niveau marin et de la baisse de la recharge sur les flux sortants est très fort, la diminution des flux sortants atteint 50% dans l'estuaire de l'Orne.

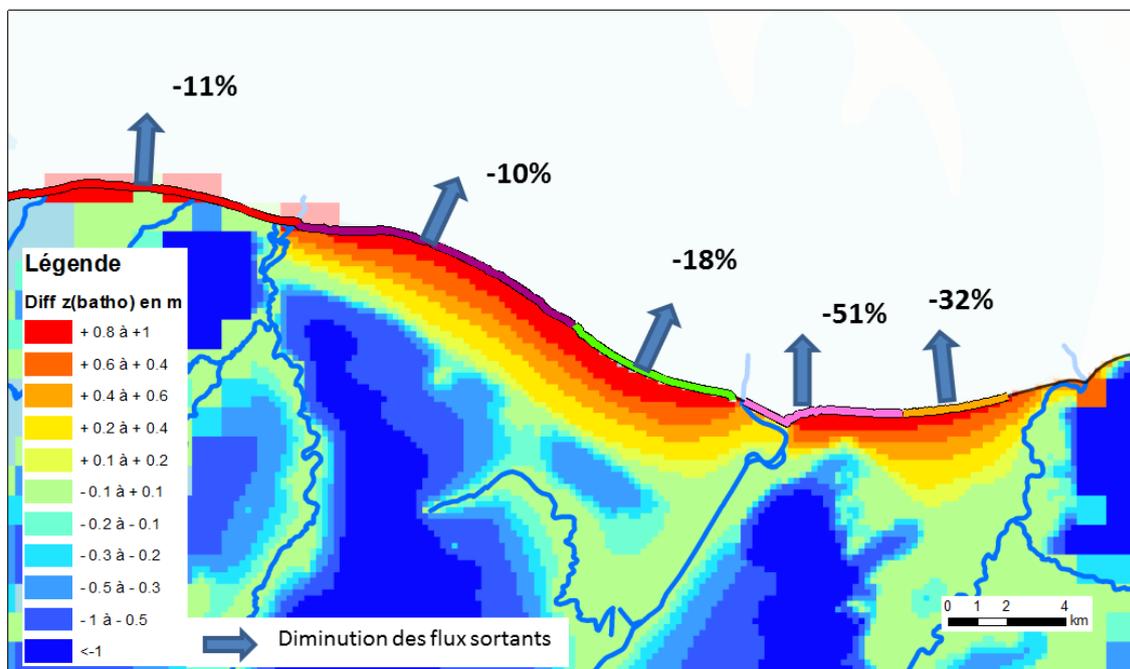


Illustration 37 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortant du modèle dans le scénario 3 par rapport au scénario de référence.

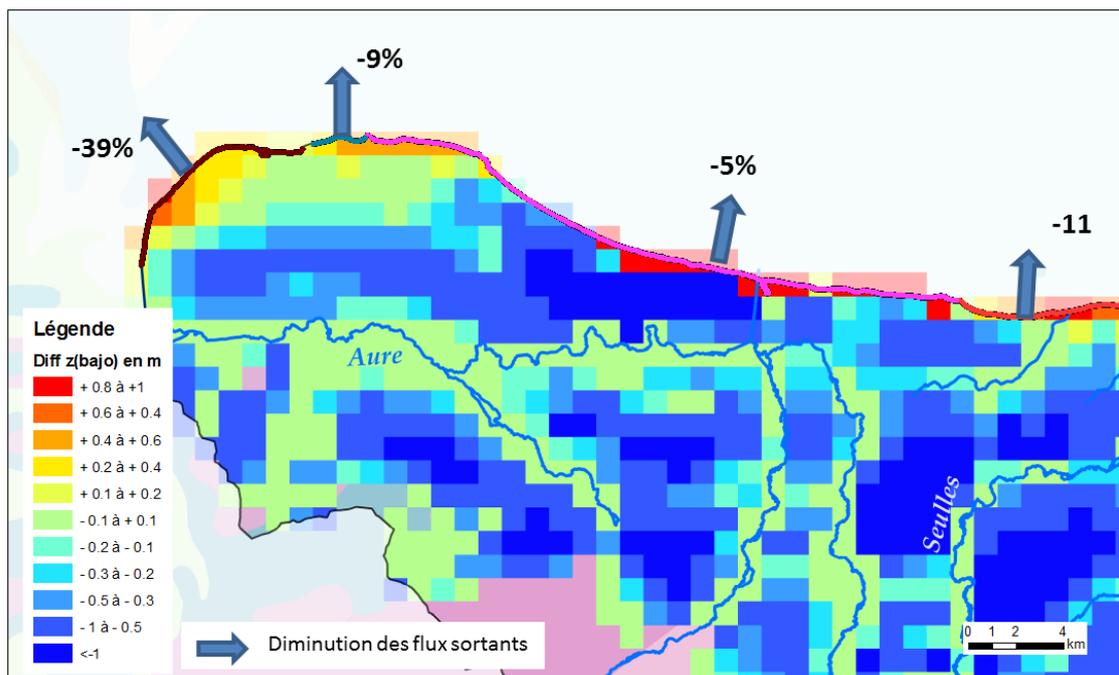


Illustration 38 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias/Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 3 par rapport au scénario de référence

Dans le Bessin, on remarque que, par rapport au scénario précédent, la diminution des gradients piézométriques est encore plus marquée et les flux d'eau souterraine sortant en mer sont localement très fortement diminués.

L'illustration 39 présente les résultats du modèle analytique pour ce scénario. L'avancée simulée du biseau salé est très importante ; elle atteint plusieurs kilomètres dans l'embouchure de l'Orne.

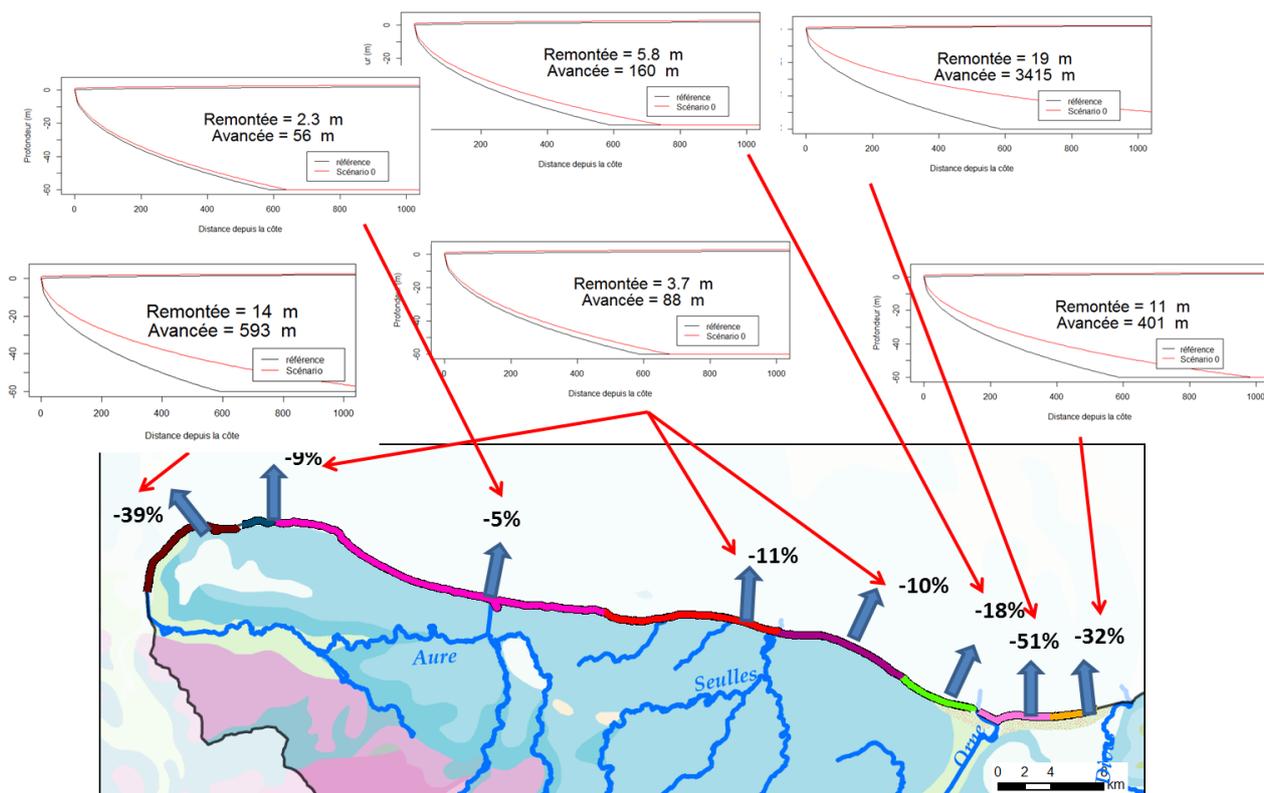


Illustration 39 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline pour le scénario 3

4.3.5. Scénario 4 : élévation du niveau marin de 1 m et évolution des variables climatiques selon le scénario RCP8.5 et augmentation de 10% des prélèvements

La baisse locale des niveaux piézométriques due à un prélèvement peut avoir un impact considérable sur la position de l'interface eau douce – eau salée (tant que l'on est dans la zone d'extension de l'intrusion saline) : en se basant sur les hypothèses de Ghyben Herzberg (voir équation (1), page 24), si le niveau baisse d'1m, l'interface peut remonter de 40 m !

On ne s'intéressera pas à ces modifications locales avec le modèle analytique mais à l'impact global des prélèvements sur la zone littorale.

A cette échelle, l'impact de l'augmentation des prélèvements sur les débits sortant du modèle est généralement faible, sauf entre la Dives et l'Orne où l'impact est plus marqué (cf. Illustration 40 et Illustration 41).

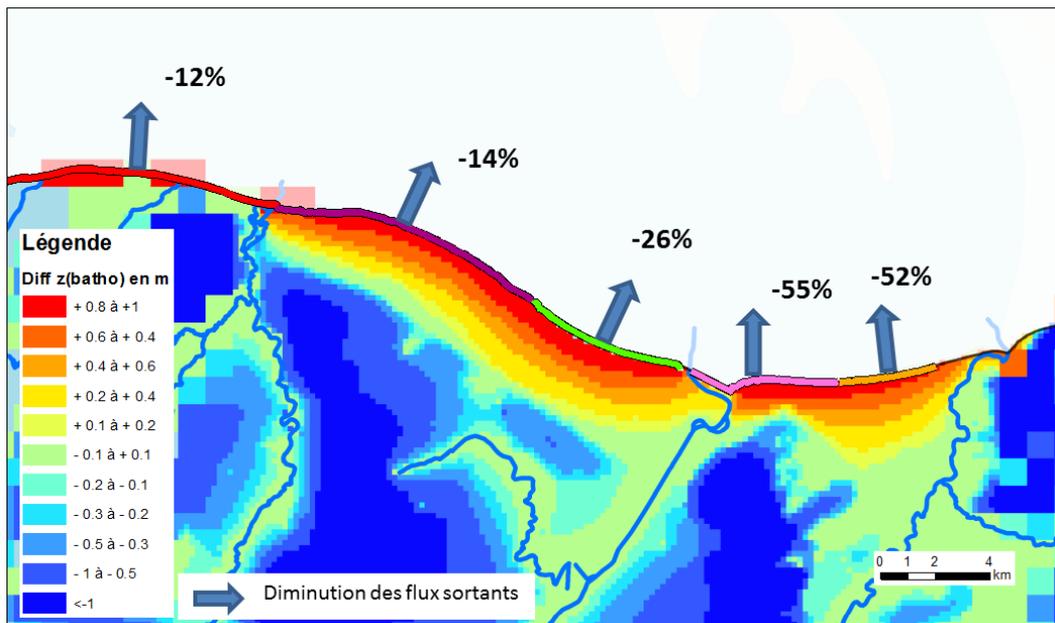


Illustration 40 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Bathonien et des flux sortants du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence.

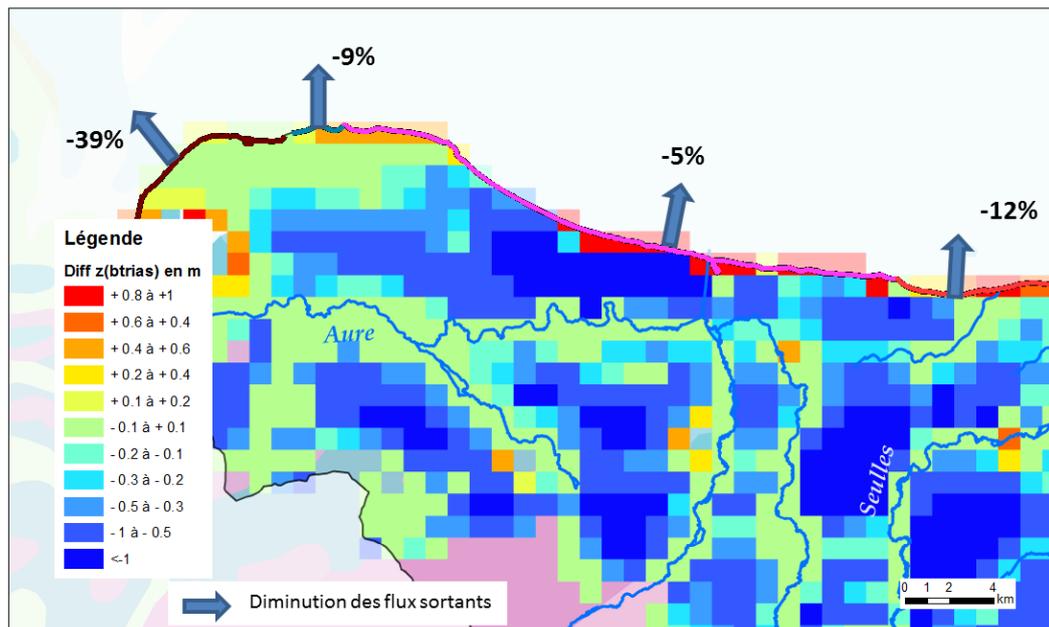


Illustration 41 : Modification des niveaux piézométriques simulés dans le Trias/Lias et des flux sortant du modèle dans le scénario 4 par rapport au scénario de référence

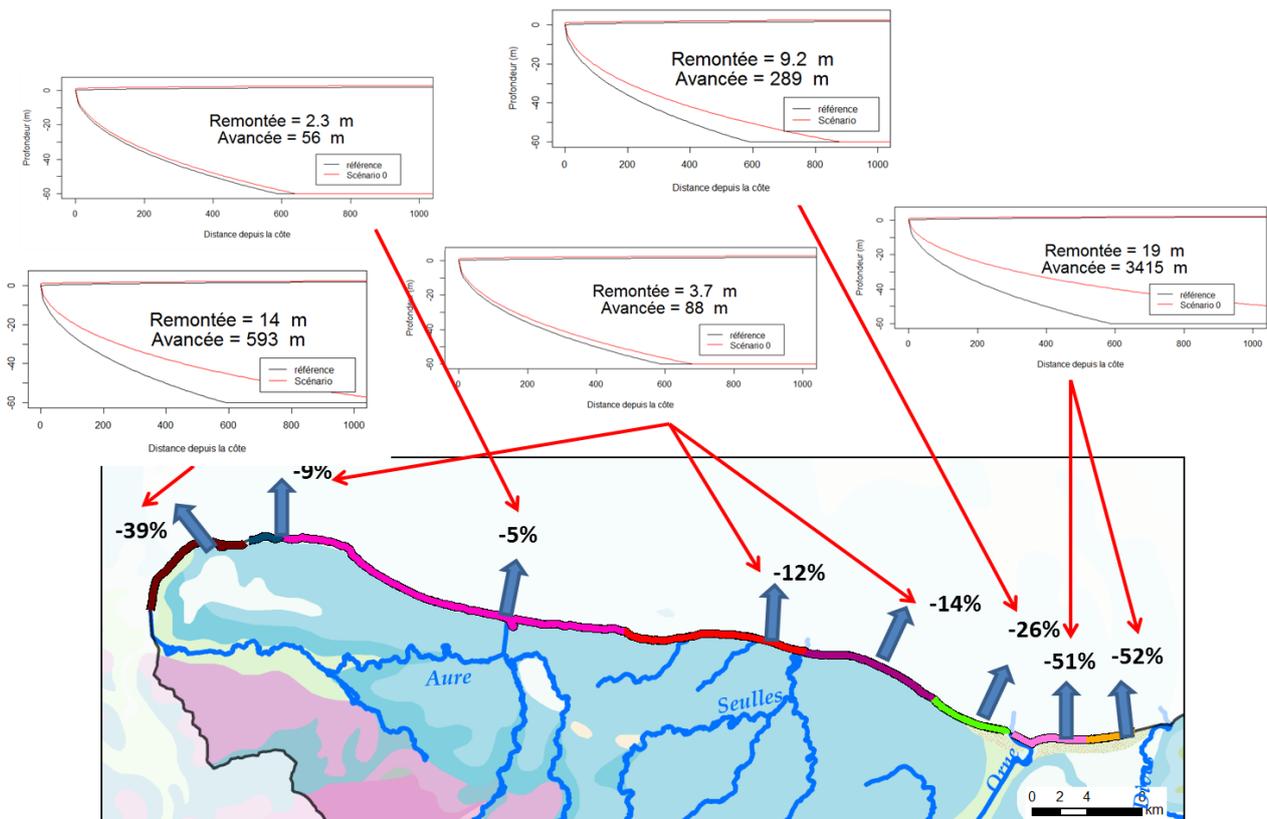


Illustration 42 : Evolution des indicateurs caractéristiques de l'évolution de l'intrusion saline étudiés pour le scénario 4.

4.3.6. Scénario 5 : comparaison des situations hautes eaux et basses eaux

Dans ce scénario, on a utilisé les mêmes hypothèses que pour le scénario 3 et on a différencié une situation de hautes eaux et une situation de basses eaux afin de savoir si l'impact d'une baisse de la recharge et de la position du niveau marin avait un impact identique en basses et hautes eaux.

Pour cela, on a calculé, en utilisant le modèle maillé en régime transitoire, les recharges, niveaux piézométriques et flux moyens pour les mois d'août à octobre qui définissent une période de basses eaux et pour les mois de février à avril qui définissent une période de hautes eaux.

En été, l'évapotranspiration joue un rôle très important. La hausse des températures dans le scénario 3 est telle que les pluies d'été sont beaucoup moins génératrices de recharge par rapport au scénario de référence. La recharge moyenne des mois d'août à octobre, déjà très faible, est diminuée de 65% entre le scénario 3 et le scénario de référence (cf. Illustration 43), tandis que la recharge des mois de février à avril est quasiment identique entre les deux scénarios.

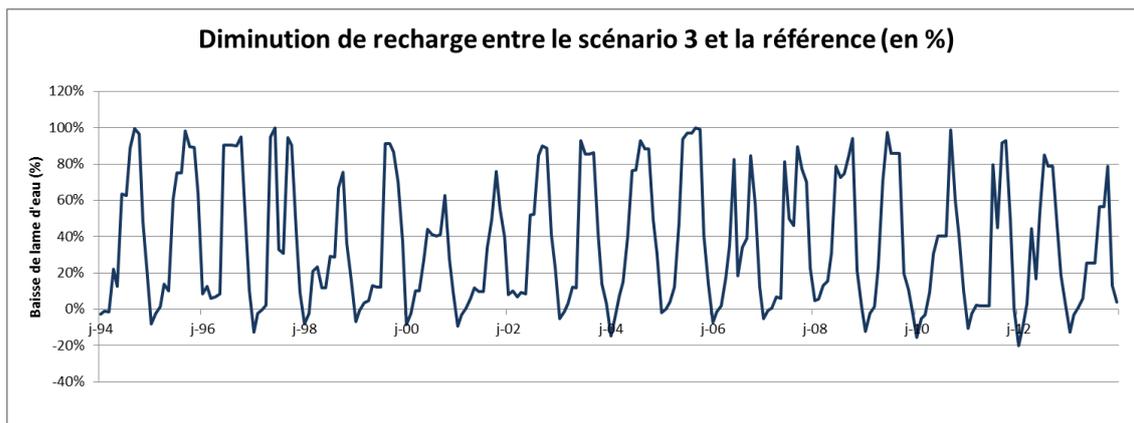


Illustration 43 : Diminution de la recharge entre le scénario 3 et le scénario de référence sur la période 1994-2013

En utilisant le modèle en régime transitoire, on a calculé des flux sortants moyens en hautes eaux (moyenne des mois de février à avril) et en basses eaux (moyenne des mois d'août à octobre). Sur l'illustration 44 est présentée la baisse des flux sortants entre le scénario 3 et le scénario de référence pour les deux périodes. Cette illustration montre que les flux sortants diminuent plus fortement en basses eaux, période déjà la plus critique quant à la pénétration du biseau salé.

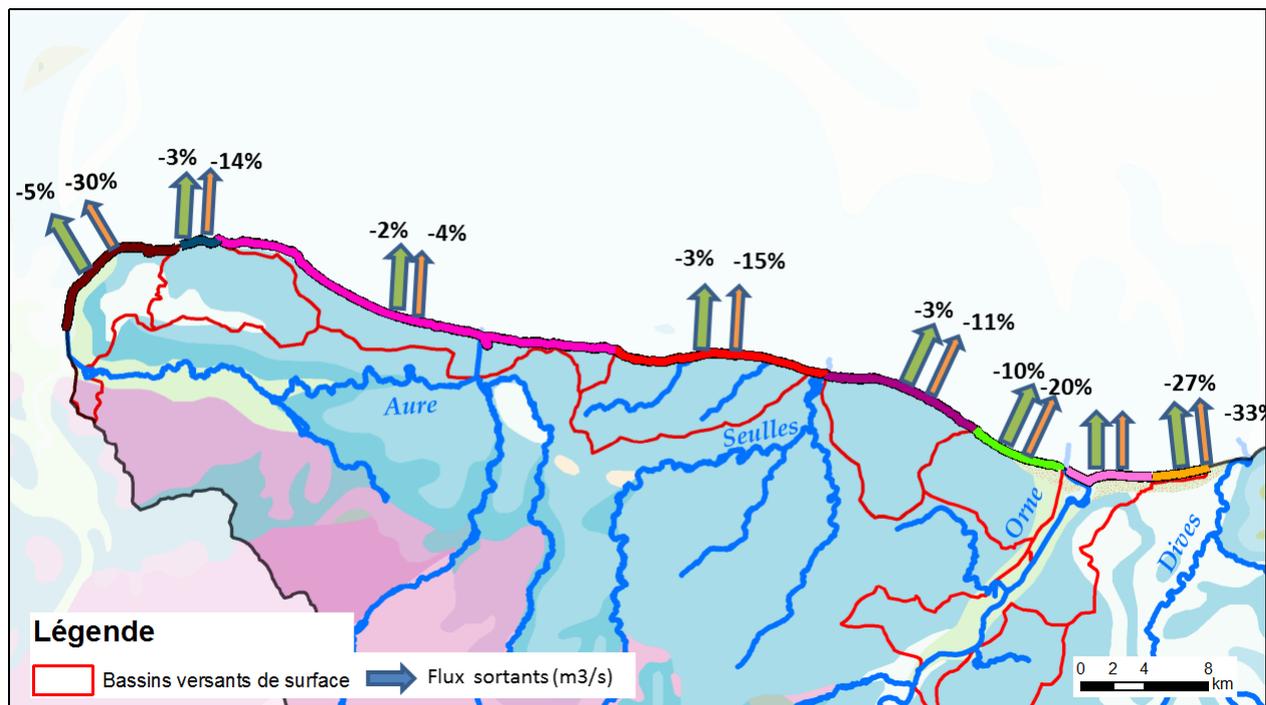


Illustration 44 : Baisse des flux d'eau souterraine sortant du modèle entre le scénario 3 et le scénario de référence. Comparaison d'une situation de hautes eaux (en vert) et d'une situation de basses eaux (en orange).

5. Conclusions

La réalisation de cinq scénarios prédictifs à l'aide du modèle maillé de la plaine de Caen et du bassin de la Dives apporte des éléments intéressants sur les évolutions des niveaux piézométriques et des flux d'eau souterraine sortant en mer que l'on peut attendre suite à une modification des variables climatiques, à une hausse du niveau marin et à une hausse des prélèvements. L'utilisation conjointe d'un modèle analytique simple a permis de traduire ces résultats en termes d'avancée du biseau salé.

Les résultats sont à considérer avec précaution. Le modèle analytique est basé sur de nombreuses hypothèses simplificatrices (aquifère homogène, régime permanent, limite franche entre eau douce et eau salée notamment), les valeurs d'avancée et de remontée du biseau salé ne sont que des ordres de grandeur ; il est par contre intéressant de comparer entre eux les résultats des différentes zones et des différents scénarios.

Le modèle analytique a permis de montrer que la position de l'interface eau douce – eau salée est impactée par une montée du niveau de la mer d'autant plus qu'une limite à charge imposée (cours d'eau notamment) se trouve à proximité du littoral. D'autre part, pour une recharge donnée, plus la perméabilité de l'aquifère est faible, plus les gradients piézométriques sont forts et donc moins le biseau salé pénètre à l'intérieur des terres. L'influence d'une baisse de la recharge est d'autant plus forte que la perméabilité est forte.

D'après les modélisations réalisées, les zones les plus vulnérables au développement d'un biseau salé sont les basses vallées de l'Aure, de la Dives et de l'Orne. Dans ces zones les gradients piézométriques sont très plats et les cours d'eau jouent le rôle de condition limite à charge imposée. D'après les résultats du modèle, l'élévation du niveau marin ainsi que l'augmentation des températures risquent d'entraîner une diminution notable des débits sortant en mer dans ce secteur, ce qui favoriserait la pénétration du biseau salé. Dans un scénario pessimiste, l'avancée du biseau salé pourrait atteindre plusieurs kilomètres dans ces secteurs, tandis qu'elle ne dépasserait pas quelques centaines de mètres en dehors.

Une augmentation des prélèvements n'entraînerait a priori pas de diminution très importante des débits d'eau souterraine sortant en mer : si l'influence de certains pompages peut être localement très forte et entraîner une remontée de l'interface eau douce-eau salée, on ne s'attend pas, d'après les résultats du modèle, à un effet marqué à plus grande échelle.

Un autre résultat intéressant est que les effets les plus importants des modifications des variables climatiques sont à attendre en période de basses eaux, période déjà la plus critique quant à la pénétration du biseau salé.

Afin de préciser les résultats du modèle, l'acquisition de données plus précises dans les secteurs les plus sensibles serait très utile :

- des suivis de conductivité dans le temps dans des forages impactés par le biseau salé permettraient d'étudier la vitesse de réaction du système aux alternances piézométriques de hautes eaux et de basses eaux et d'étudier le temps nécessaire à la mise à l'équilibre suite à la hausse du niveau marin ;
- pour préciser l'avancée de l'intrusion saline dans les basses vallées des rivières, il serait nécessaire de prendre en compte la salinisation des nappes par rentrant salé au niveau des cours d'eau et donc de connaître les échanges entre aquifères alluviaux et aquifères sous-jacents

6. Bibliographie

Ablain, M., Cazenave, A., Larnicol, G., Balmaseda, M., Cipollini, P., Faugère, Y., Fernandes, M. J., Henry, O., Johannessen, J. A., Knudsen, P., Andersen, O., Legeais, J., Meyssignac, B., Picot, N., Roca, M., Rudenko, S., Scharffenberg, M. G., Stammer, D., Timms, G., and Benveniste, J.: Improved sea level record over the satellite altimetry era (1993–2010) from the Climate Change Initiative project, *Ocean Sci.*, 11, 67-82, doi:10.5194/os-11-67-2015, 2015.

Bard, E., Hamelin, B., Arnold, M., Montaggioni, L., Cabioch, G., Faure, G. et Rougerie, F. 1996, Deglacial sea-level record from tahiti corals and the timing of global meltwater discharge. *Nature*, vol. 382, no 6588, p. 241–244.

BIPE, 2011. Prospective socio-économique et démographique, Rapport d'étape n°3. Projet MEEDTL Explore 2070.

BRL, 2012. Ressources et besoins en eau en France à l'horizon 2030. Rapport final.

Cazenave A., Dieng H.-B., Meyssignac B., K. von Schuckmann, Decharme B. et Berthier E. 2014, «The rate of sea-level rise», *Nature Climate Change*, vol. 4, no 5, p. 358–361.

Cazenave, A. et Le Cozannet G, 2014. «Sea level rise and its coastal impacts», *Earth's Future*, vol. 2, n°2, doi :10.1002/2013EF000188, p. 15–34, ISSN 2328-4277.

Church, J. A. et White N. J. 2006, «A 20th century acceleration in global sea-level rise», *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no 1, doi :10.1029/2005gl024826, ISSN 0094-8276.

Church, J. A. et White N. J. 2011, «Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century», *Surveys in Geophysics*, vol. 32, no 4-5, doi :10.1007/s10712-011-9119-1, p.585–602, ISSN 0169-3298.

Church, J. A., Clark P. U., Cazenave A., Gregory J. M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M. A., Milne G. A., Nerem R. S., Nunn P. D. et al.. 2013b, «Sea-level rise by 2100», *Science*, vol. 342, no 6165, p. 1445–1445.

Croiset N., Wulleumier A., Bessière H., Gresselin F., Seguin J.-J., 2013. Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 2 : Construction et calage du modèle hydrogéologique. Rapport BRGM/RP-62648-FR, 130 p.

GIEC, WG1, Ch13, 2013 : Church J., Clark P., Cazenave A., Gregory J., Jevrejeva S., Merrifield M., Milne G., Nerem R., Nunn P., Payne A., Pfeffer W., Stammer D. et U. A.S. 2013a, *Sea Level Change*, Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 1137–1216, doi :10.1017/CBO9781107415324.026.http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf

Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2010). Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD. *Climate Dynamics*, 34(4), 461-472.

Hay C C, Morrow E, Kopp R E and Mitrovica J X., 2015. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nat. Clim. Change* 517 481–4

Kemp A. C., Horton B. P., Donnelly J. P., Mann M. E., Vermeer M. et Rahmstorf S., 2011. Climate related sea-level variations over the past two millennia, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, no 27, doi :10.1073/pnas.1015619108, p. 11 017–11 022, ISSN 0027-8424.

Lenotre N., Thierry P., Blanchin R. et Brochard G. 1999, Current vertical movement demonstrated by comparative levelling in brittany (northwestern France). *Tectonophysics*, vol. 301, no 3-4, doi :10.1016/s0040-1951(98)00228-5, ISSN 0040-1951.

Meysignac, B. et Cazenave A.. 2012. Sea level : A review of present-day and recent-past changes and variability. *Journal of Geodynamics*, vol. 58, p. 96–109, ISSN 0264-3707.

Nicholls R. J. et Lowe J. A. 2004. Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global environmental change*, 14(3), 229-244.

Nicholls R. J., Hanson S. E., Lowe J. A., Warrick R. A., Lu X. & Long A. J., 2014.. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 129-150.

Planton S., Le Cozannet, G., Cazenave A., Costa S., Douez O., Gauffrès P., Hissel F., Idier D., Laborie V., Petit V., Sergent P., 2015 : Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Rapports DGEC, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Mars 2015. [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC Climat France XXI Volume 5 VF revisee 27fevrier2015.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_5_VF_revisee_27fevrier2015.pdf)

Slangen, A., Carson M., Katsman C., R. van de Wal, Köhl A., Vermeersen L. et Stammer D. 2014, «Projecting twenty-first century regional sea-level changes», *Climatic Change*, vol. 124, no 1-2, doi :10.1007/s10584-014-1080-9, p. 317–332.

Stammer D., Cazenave A., Ponte R. M., Tamisiea M.E., 2013. Causes for contemporary regional sea level changes, *Annual review of marine science*, vol. 5, doi : 10.1146/annurev-marine-121211-172406, p. 21–46, ISSN 1941-1405.

Stéphan P., Goslin J., 2014. Evolution du niveau marin relatif à l'Holocène le long des côtes françaises de l'Atlantique et de la Manche : réactualisation des données par la méthode des « sea-level index points ». *Quaternaire*, Centre National de la Recherche Scientifique, 25 (4), pp.295-312.<hal-01102292>.

Tamisiea M. E., 2011. Ongoing glacial isostatic contributions to observations of sea level change, *Geophysical Journal International*, vol. 186, no 3, doi :10.1111/j.1365-246X.2011.05116.x, p. 1036–1044, ISSN 0956-540X.

Wahl T., Haigh I. D., Woodworth P. L., Albrecht F., Dillingh D., Jensen J. & Wöppelmann G., 2013. Observed mean sea level changes around the North Sea coastline from 1800 to present. *Earth-Science Reviews*, 124, 51-67.

Watson C. S., White N. J., Church J. A., King M. A., Burgette R. J. et Legresy B.. 2015. Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era, *Nature Climate Change*.

Werner A.D., Simmons C.T., 2009. Impact of Sea-Level Rise on Sea Water Intrusion in Coastal Aquifers. *Ground Water* 47(2), pp 1979-204.

Wuilleumier A., Croiset N., Seguin J-J., 2014. Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 3 : Utilisation du modèle hydrogéologique pour la mise à jour de la ZRE et le calcul des volumes prélevables. Rapport BRGM/RP-62863-FR, 75 p.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Normandie
Direction territoriale Basse-Normandie
4 Avenue de Cambridge
14200 Hérouville Saint-Clair - France
Tél. : 02.31.06.66.40