



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

Rapport final

BRGM/RP-71398-FR

20 avril 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Pierre-Yann David avec la collaboration de Sandra Lanini et Fabrice Compère

Vérificateur :

Nom : Yvan Caballero

Fonction : Hydrogéologue

Date : 09/06/2022

Signature :

Approbateur :

Nom : Didier Pennequin

Fonction : Directeur BRGM Normandie

Date : 24/06/2022

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr



Avertissement

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

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

Choisissez un élément.

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

Votre avis nous intéresse

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

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



Mots clés : Modélisation Gardenia, Modélisation EROS, Débits d'étiage, Alimentation en eau potable, Prévisions climatiques, changement climatique, Prélèvement en rivières, Bilans hydrologiques, relation nappe rivière, Thar, Braize, Sée, Sélune, Beuvron, Airon, Baie du Mont Saint Michel, Manche, Normandie.

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

Pierre-Yann David avec la collaboration de Sandra Lanini et Fabrice Compère (2022) – Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050. Rapport final. **BRGM/RP-71398-FR**, 222 p.

Synthèse

Dans le département de la Manche, la succession d'étiages sévères et de sécheresses estivales (1975-79 ; 1983-84, 1989 à 1991 ; 1996-97 ; 2003-2004 ; 2017-2018, 2019) mais également de sécheresses hivernales (comme l'épisode de 2016-2017) a mis en évidence la précarité de certaines ressources (de socle principalement). Or, la production de l'Alimentation en Eau Potable du département de la Manche est assurée pour près de 40% de la population (principalement les agglomérations et le Sud-Manche) à partir de captages d'eaux superficielles.

La dépendance des ressources en eau de surface aux épisodes de sécheresse impose d'avoir une vision à moyen et long terme de l'évolution potentielle du climat et de son impact sur les ressources en eau. Une telle vision permet d'être mieux armé pour anticiper les épisodes de sécheresse futurs et de réfléchir aux stratégies d'adaptation pouvant être intégrées à la gestion du territoire et de ces ressources en eau.

Ainsi, le SDEAU 50 souhaite bénéficier d'un retour d'expérience sur les épisodes de sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017 et une évaluation de la reproductibilité de ces situations à l'horizon 2050. L'objectif d'un tel travail consiste à disposer de moyens d'anticiper d'éventuels manques d'eau à l'horizon 2050 sur les différentes ressources en eaux superficielles du Sud Manche et, le cas échéant, de réfléchir aux mesures d'adaptation qui peuvent être mises en œuvre (recherche de ressources en eaux souterraines alternatives, création de nouvelles prises d'eau sur la Sée) et de planifier les investissements correspondant à ces actions.

Cette étude est menée dans le cadre d'un projet de recherche et développement partagé entre le BRGM et le SDEAU50.

Le premier volet de cette étude a consisté à établir un retour d'expérience de l'incidence sur la production d'eau potable des épisodes de sécheresses récents notamment la sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017. Il a en particulier permis d'estimer les pénuries d'eau potable (en terme de quantité d'eau manquante et de nombre de jours de pénurie) qui auraient eu lieu si les débits réservés avaient été respectés.

Ces analyses ont montré que pour certaines rivières, la pression des prélèvements qui sont actuellement réalisés ou qui ont pu l'être dans le passé, étaient et sont compatibles avec le respect des débits réservés (ou du 10^{ième} du module de la rivière pour les prises d'eau ne disposant pas de débit réservé défini). C'est le cas par exemple des prélèvements réalisés dans les bassins versants de la Braize et de la Sée.

Dans d'autres cas, le respect des débits réservés aurait provoqué des pénuries de production d'eau potable lors de certains épisodes de sécheresse. C'est le cas du bassin versant du Thar, où des pénuries sont mises en évidence sur 5 des 27 années étudiées (période 1994-2020). Enfin, il existe un cas plus critique, où le débit de la rivière est parfois même naturellement en-dessous du débit réservé. Il s'agit du cas de la Sélune amont (à Notre-Dame-du-Touchet). Les prélèvements réalisés en rivière viennent alors augmenter la fréquence de dépassement naturel du débit réservé. Ainsi pour les prises d'eau de la Sélune amont (et ses affluents), le respect du débit réservé fait apparaître des pénuries sur 17 des 27 années étudiées (période 1994-2020), soit 62% des années étudiées.

Attention toutefois, ces conclusions sont à prendre avec précaution car des hypothèses ont dû être formulées afin de combler des lacunes de connaissance (cf. limites de la démarche présentées au §5).

Le second volet de l'étude a consisté à analyser l'évolution de la ressource en eau superficielle dans le contexte du changement climatique pour estimer les tensions éventuelles à venir sur la production d'eau potable à l'horizon 2050.

Le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des rivières du Sud Manche a tout d'abord été modélisé à l'aide de modèles dits « globaux » ou « à réservoirs » semi-spatialisés, construits au niveau de stations de jaugeages disponibles dans les différents bassins versants. Ces modèles sont structurés et calés sur la base des chroniques de données existantes, notamment de débit des rivières et de niveaux piézométriques. Ces modèles globaux ont été réalisés avec le logiciel EROS et ont permis de simuler les débits de la Braize (à Lolif), du Thar (à Jullouville), de la Sée (à Chérencé-le-Roussel et à Tirepiéd), de l'Oir (à Ducey), de la Sélune (à Notre-Dame-du-Touchet, à Virey, à Vezins et à Ducey), de l'Airon (à Landivy) et du Beuvron (à Saint-James et Saint-Senier), soit un total de 12 « grappes » de rivières modélisées.

Une fois ces modèles EROS calés, des projections climatiques les plus adaptées aux conditions climatiques de la Normandie ont été récupérées depuis les plateformes disponibles (<http://www.drias-climat.fr/>) et utilisées pour forcer les modèles globaux et analyser leurs impacts en termes de débits pour différents horizons futurs (dont l'horizon 2050). La modélisation du climat étant une science complexe, il existe des incertitudes importantes concernant le devenir du climat, dont les deux principales sont 1) la capacité des modèles climatiques à reproduire le climat présent et 2) l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre. La première incertitude a été prise en compte et minimisée en utilisant les prévisions du climat issues d'un ensemble de 5 modèles climatiques différents (tous issus du jeu de données DRIAS-2020). La deuxième a pu être approchée en proposant des simulations obtenues en prenant en compte 2 scénarios d'émission (RCP4.5 et 8.5).

Ces deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP4.5 et 8.5) simulés par 5 modèles climatiques différents (soit un total de 10 scénarios distincts de pluie et d'évapotranspiration) ont été utilisés en tant que données d'entrée du modèle EROS. Cela a permis de simuler 10 scénarios de prévisions de débit pour chacune des 12 grappes de rivières modélisées.

Une première analyse globale des résultats a montré les grandes tendances qui semblent se dessiner sur les différents cours d'eau (avec des intensités variables selon les cours d'eau) à savoir : une augmentation du débit moyen (moyenne annuelle), une augmentation de la variabilité des débits (i.e. des épisodes extrêmes plus fréquents) et une augmentation de l'amplitude des pics de crue. L'augmentation du débit moyen s'explique par le fait que, en moyenne, 4 modèles climatiques sur 5 prévoient plus de précipitations dans le futur (dans le détail, ce nombre est variable selon l'horizon temporel et la RCP considérés).

Concernant l'évolution des débits d'étiage, la situation est très variable d'une rivière à l'autre. Ainsi pour chaque grappe de rivière, l'évolution des débits d'étiage a été présentée via une fourchette de dispersion de l'évolution du QMNA5 par rapport à la période actuelle : évolution maximum (issue du modèle climatique et de la RCP les plus optimistes amenant à des débits les plus favorables), évolution minimum (issue du modèle climatique et de la RCP les plus pessimistes amenant à des débits les moins favorables), et évolution moyenne (issue des 10 combinaisons de modèles climatiques et trajectoires testés).

Si l'on prend l'exemple de l'évolution moyenne du QMNA5 à l'horizon 2085 (comparé à la période de référence 1976-2005) pour la RCP8.5 (RCP et horizon temporel les plus défavorables), on distingue 4 groupes de rivières :

- la Braize (à Lolif) dont le QMNA5 est globalement stable (+1%)
- 3 rivières dont le QMNA5 diminue en moyenne de -1.5% à -5% : le Beuvron (à Saint-James et à Saint-Senier), la Sée (à Chérencé et à Tirepied) et l'Airon (à Landivy)
- 3 rivières dont le QMNA5 diminue en moyenne de -9.5 à -15% : le Thar (à Jullouville), l'Oir (à Ducey), la Sélune médiane et avale (à Vezins, à Virey, à Ducey)
- 1 rivière dont le QMNA5 diminue en moyenne de -26% : la Sélune amont (à Notre-Dame-du-Toucher)

Un ensemble de tableaux de résultats de ce type pour les différents horizons temporels testés est présenté en Annexe 4.

Concernant les pénuries de production AEP dans le futur, le nombre de jours de pénuries à l'horizon 2085 (estimé en considérant les 10 combinaisons de modèles climatiques et trajectoires testés) a été estimé. Cette estimation met en évidence une tendance à l'augmentation du nombre de jours de pénuries (par rapport à la période actuelle de référence) pour les captages présentant déjà aujourd'hui des pénuries en cas de respect des débits réservés. Ainsi deux prises d'eau se distinguent du point de vue de leur vulnérabilité au contexte climatique futur : il s'agit des captages de la Sélune Amont et du Thar.

Pour les autres prises d'eau (situées sur les rivières de la Braize, de l'Airon, de la Sée et de la Sélune aval/Beuvron) l'augmentation du nombre de jours de pénurie reste limitée.

Sommaire

1. INTRODUCTION	19
2. PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE	21
2.1. PRESENTATION DES 4 BASSINS VERSANTS.....	21
2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE	23
2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	23
2.3.1. <i>Le milieu fissuré.....</i>	23
2.3.2. <i>Le milieu poreux.....</i>	24
2.4. DEBITS SPECIFIQUES DES COURS D'EAU DU SECTEUR D'ETUDE	27
3. VOLET 1 : ANALYSE DE L'INCIDENCE SUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE DES EPISODES DE SECHERESSE ESTIVALE DE 2019 ET HIVERNALE DE 2016/2017	31
3.1. LES CAPTAGES AEP EN RIVIERE DE LA ZONE D'ETUDE.....	31
3.2. LES DEBITS RESERVES	33
3.3. ESTIMATION DES PENURIES EN EAU POTABLE EN CAS DE RESPECT DES DEBITS RESERVES : REANALYSE DE LA PERIODE 1994-2020	37
3.3.1. <i>Méthodologie générale.....</i>	37
3.3.2. <i>Résultats</i>	37
3.4. CONCLUSION DU VOLET 1.....	47
4. VOLET 2 : ESTIMATION DES TENSIONS SUR LA PRODUCTION D'EAU POTABLE A L'HORIZON 2050 DANS LES BASSINS VERSANTS DU SUD MANCHE.....	49
4.1. METHODOLOGIE GENERALE.....	49
4.2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DU MODELE EROS	49
4.3. COLLECTE ET ANALYSE DES DONNEES DISPONIBLES ET REALISATION DU MODELE CONCEPTUEL	52
4.3.1. <i>Données météorologiques</i>	53
4.3.2. <i>Données hydrométriques</i>	57
4.3.3. <i>Données piézométriques.....</i>	67
4.3.4. <i>Données de prélèvement</i>	68
4.3.5. <i>Données de rejets.....</i>	79
4.4. RECONSTITUTION DE CHRONIQUES DE DEBITS « PSEUDO » NATURELS.....	85
4.5. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE EROS	86
4.5.1. <i>Principe du calage.....</i>	86
4.5.2. <i>Propriétés du modèle : synthèse des données retenues après calage du modèle et schéma conceptuel final</i>	87
4.5.3. <i>Comparaison des coefficients d'ajustement du modèle</i>	91
4.5.4. <i>Résultats du calage : comparaison des chroniques observées et simulées.....</i>	93
4.5.5. <i>Comparaison et interprétation des bilans hydrologiques</i>	119
4.6. PROJECTION CLIMATIQUES	125
4.6.1. <i>Choix de deux trajectoires climatiques</i>	125
4.6.2. <i>Choix de cinq modèles climatiques</i>	127
4.6.3. <i>Tendances des pluies et températures pour les 12 couples de modèles climatiques DRIAS 2020 à l'échelle de la Métropole</i>	130
4.6.4. <i>Tendances des pluies et températures pour les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la France métropolitaine.....</i>	137
4.6.5. <i>Tendances des pluies et températures pour les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la zone d'étude.....</i>	139
4.7. SIMULATION DES DEBITS JUSQU'À L'HORIZON 2050	143
4.8. ANALYSE GLOBALE DES TENDANCES D'EVOLUTION DES DEBITS NATURELS DU SUD MANCHE A L'HORIZON 2050 (ET AU DELA)	144
4.8.1. <i>Méthodologie.....</i>	144

4.8.2.	<i>Résultats</i>	146
4.9.	ANALYSES SPECIFIQUES RELATIVES AUX ETIAGES DES COURS D'EAU	175
4.9.1.	<i>Etudes des évolutions du QMNA5 et comparaison des rivières modélisées</i>	175
4.9.2.	<i>Calcul des 10iemes du module (débits réservés)</i>	183
4.9.3.	<i>Satisfaction des besoins AEP à l'horizon 2050</i>	184
5.	RAPPELS DES PRINCIPALES INCERTITUDES ASSOCIEES AUX RESULTATS DE L'ETUDE	197
6.	CONCLUSION	201
7.	BIBLIOGRAPHIE	205
8.	ANNEXES	207
8.1.	ANNEXE 1 : COMPARAISON DES DEBITS RESERVE A LA PRISE D'EAU ET DES SEUILS DE RESTICTION (ARRETE SECHERESSE)	207
8.2.	ANNEXE 2 : SAISONNALITE DES STEU	209
8.3.	ANNEXE 3 : RECONSTITUTION DES CHRONIQUES DE REJET DES STEU	211
8.4.	ANNEXE 4 : EVOLUTION DES QMNA5 DES RIVIERES DU SUD MANCHE PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE (1976-2005) (RESULTATS POUR LES 5 MODELES CLIMATIQUES UTILISES EN ENTREE DU MODELE EROS DU SUD MANCHE)	215

Liste des figures

Figure 1 :	Lien entre Relief (b) et géologie (a) pour les bassins versants du Sud Manche.....	22
Figure 2 :	Schéma structural de la zone étude (source notice carte géologique n°209 : http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0209N.pdf)	23
Figure 3 :	Carte simplifiée des épaisseurs de loess et sables de couverture dans la paléobaie du Mont-Saint-Michel et dans le secteur d'étude (cercle rouge) (Lautridou, 1991 dans http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0248N.pdf)	24
Figure 4 :	Cartes (A) des dépôts de surface (loëss et sables) et (B) des Altérites (carte BRGM du Régolithe au 1/1 000 000).....	25
Figure 5 :	Localisation des sources par rapport à (A) la nature des roches et Dépôts de surface (loëss et sables) et (B) des Altérites (carte BRGM du Régolithe au 1/1 000 000)	25
Figure 6 :	Débits spécifiques des cours d'eau du Sud Manche (d'après les données de la Banque Hydro, DREAL)	28
Figure 7 :	Pluie moyenne annuelle (période 1994-2020), par bassin versant de chaque station hydrométrique (données issues du modèle EROS (cf. § 4.5.5) ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France).....	28
Figure 8 :	Moyennes mensuelles interannuelles des débits spécifiques des cours d'eau du Sud Manche (sources DREAL)	29
Figure 9 :	Carte de localisation des captages AEP en rivière recensés sur la période 1994-2019	32

Figure 10 : Débits réservés associés aux prises d'eau dans les rivières de la zone d'études comparés aux statistiques d'étiages des rivières aux stations de référence (données fournies par la DREAL)	35
Figure 11 : Localisation de la prise d'eau du MOULIN MARCEY (La Braize) - BSS000RBDP par rapport à la station de jaugeage de la DREAL.....	37
Figure 12 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour la prise d'eau du MOULIN MARCEY (La Braize) - BSS000RBDP : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel	38
Figure 13 : Localisation des prises d'eau HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et BOUILLON - BSS000RAVY (Rivière du Thar) par rapport à la station de jaugeage de la DREAL.....	39
Figure 14 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et de BOUILLON - BSS000RAVY (Rivière du Thar): (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel	40
Figure 15 : Localisation des prises d'eau de LA PELTERIE (La Cance, affluent de la Sélune amont) - BSS000RCRQ et de La LANDE-MILLY (La Sélune amont) - BSS000TRHA par rapport à la station de jaugeage de la DREAL	41
Figure 16 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de LA PELTERIE (La Cance, affluent de la Sélune amont) - BSS000RCRQ et de La LANDE-MILLY (La Sélune amont) - BSS000TRHA: (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel.....	42
Figure 17 : Localisation de la prise d'eau de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX par rapport aux stations de jaugeage de la DREAL	43
Figure 18 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de CUVES (LE GLANON, affluent de la Sée) - BSS000RBLX. Calcul réalisé sur la Sée à Tirepied : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel	44
Figure 19 : Localisation des prises d'eau de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY par rapport aux stations de jaugeage de la DREAL	45
Figure 20 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel.....	46
Figure 21 : Exemple d'application d'un bassin complexe décomposé en 9 sous bassins (Thiéry, 2018).....	50
Figure 22 : Schéma de fonctionnement pour un sous bassin, modèle hydrologique global à réservoir (Gardenia ou EROS)	51
Figure 23 : Schéma de fonctionnement pour un (à gauche) ou deux (à droite) réservoirs souterrains (Thiéry, 2018) pour GARDENIA ou EROS	52

Figure 24 : Carte générale du réseau hydrologique, des aménagements hydrauliques et des stations de jaugeage disponibles (stations en service ou abandonnées). La légende du fond de carte géologique est présentée sur la Figure 1.	53
Figure 25 : Carte des mailles SAFRAN dans le secteur d'étude, représentées par leur centroïde (point vert correspondant au centroïde de chaque maille SAFRAN de dimension 8km x 8km). 54	54
Figure 26 : Evolution des précipitations sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes.....	55
Figure 27 : Evolution de l'Evaporation Potentielle (ETP) sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes.....	56
Figure 28 : Résultat du modèle Gardenia réalisé pour la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] (I9221020) - comparaison du débit observé (en rouge) et du débit simulé (en vert)	58
Figure 29 : Analyses statistiques de 5 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS.....	61
Figure 30 : Analyses statistiques de 5 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS.....	63
Figure 31 : Analyses statistiques de 2 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS.....	65
Figure 32 : Piézomètres disponibles dans la zone d'étude. La légende du fond de carte est disponible sur la Figure 1a.	68
Figure 33 : Carte des points de prélèvement par usage.....	70
Figure 34 : Carte des points de prélèvement par nature.....	70
Figure 35 : Recensement des 13 captages AEP en rivière de la zone d'étude recensés sur la période 1994 à 2019 – correspondance des codes des différentes bases de données (SISEAU, AESN, BSS, BNPE,...).....	71
Figure 36 : Exemple de l'étude de la saisonnalité de 6 points de prélèvement en rivière	75
Figure 37 : Volumes moyens mensuels de prélèvements en rivière.....	76
Figure 38 : Courbes de mensualisation de 7 captages AEP en rivière	76
Figure 39 : Moyenne des courbes de mensualisation des captages AEP en rivière	77
Figure 40 : Chroniques journalières (ou quotidianisées) des 13 prélèvements en rivière de la zone d'étude sur la période 1994 – 2020.....	77
Figure 41 : Chroniques journalières (ou quotidianisées) des prélèvements en rivière de la zone d'étude – zoom sur la période 2018 – 2020 pour les 9 prélèvements les plus importants	78
Figure 42 : 140 points de rejets de STEU recensés dans la zone d'étude.....	80

Figure 43 : Courbe de rejet moyenne normalisée (moyenne annuelle égale à 1 m ³ /jour) issue de la moyenne des chroniques de STEU ayant fait l'objet d'une modélisation GARDENIA	81
Figure 44 : Relation entre la capacité nominale en EH (en abscisse) et le débit moyen en m ³ /j (en ordonnées) pour les STEU de la zone d'étude disposant de ces deux informations	82
Figure 45 : Localisation des 95 STEU rejetant en rivière ayant fait l'objet d'une reconstitution de leurs chroniques journalières de débits rejetés sur la période 1994-2020.....	83
Figure 46 : Localisation des 5 chroniques de rejets industriels collectées	84
Figure 47 : Part des prélèvements sur le débit pseudo-naturel reconstitué.....	85
Figure 48 : Principe de fonctionnement du logiciel EROS (d'après rapport BRGM/RP 63922-FR)	86
Figure 49 : Schématisation finale du modèle semi-distribué EROS des bassins versants de la Sélune, de la Sée et du Thar (obtenu après le processus du calage du modèle)	88
Figure 50 : Description des différentes grappes du modèle EROS du Sud Manche	89
Figure 51 : Résultats des calages des paramètres des différents réservoirs du modèle	89
Figure 52 : Comparaison des coefficients d'ajustement, des coefficients de Nash des débits et des niveaux et des biais des débits (moyenne du débit simulée - moyenne du débit observée) pour les différentes grappes du modèle EROS du Sud Manche	91
Figure 53 : Comparaison des coefficients de Nash sur les débits, la racine carrée des débits et le logarithme des débits	92
Figure 54 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Thar à Jullouville.....	95
Figure 55 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Braize à Lolif	97
Figure 56 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sée à Chérencé-le-Roussel.....	99
Figure 57 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sée à Tirepiéd	101
Figure 58 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet.....	103
Figure 59 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Virey.....	105
Figure 60 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Vézins	107
Figure 61 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Beuvron à St James	109

Figure 62 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Beuvron à St Senier.....	111
Figure 63 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Ducey (aval du Beuvron).....	113
Figure 64 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de l'Oir à Ducey	115
Figure 65 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de l'Airon à Landivy	117
Figure 66 : Bilan hydrologique moyen annuel (en mm) des différentes grappes composant le modèle EROS du Sud Manche	121
Figure 67 : Bilan hydrologique moyen annuel (en mm) cumulé de l'amont vers l'aval des différents bassins versant composant le modèle EROS du Sud Manche.....	121
Figure 68 : Pluie efficace moyennée par bassin versant de chaque station hydrométrique (résultat du modèle EROS ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France).....	123
Figure 69 : Débit spécifique moyen (en l/s/km ²) de sous bassin versant modélisé (résultat du modèle EROS ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France).....	123
Figure 70 : Part de la composante « lente » (cf. %Q_Souterr de la Figure 67) dans le débit des cours d'eau	124
Figure 71 : Évolution des émissions entre 1980 et 2100, selon les différents scénarios disponibles. Les quatre scénarios sélectionnés dans le cadre du 5e rapport du Giec (RCP) sont mis en évidence. Source : Global Carbon Project (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf).....	125
Figure 72 : RCP 8.5 et RCP4.5 retenues pour l'étude du Sud Manche	126
Figure 73 : Illustration de la différence de résolution entre la modélisation climatique globale (150 km de résolution) et la modélisation climatique régionale (12 km) sur le relief et le trait de côte de la France (C. Cassou, Cerfacs). L'échelle de couleur représente l'altitude des mailles des modèles (en mètres) (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf)	128
Figure 74 : Nouveau jeu de données climatiques « DRIAS 2020 » : couples GCM-RCM.....	129
Figure 75 : Comparaison de l'ancien jeu de données climatiques (2014) et du nouveau jeu « DRIAS 2020 ».....	129
Figure 76 : Graphe de l'évolution des écarts relatifs du cumul des précipitations totales par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf).....	131
Figure 77 : Graphe de l'évolution saisonnière des écarts relatifs du cumul des précipitations totales par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf).....	132

Figure 78 : Graphe de l'évolution des écarts de températures par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf)	133
Figure 79 : Graphe de l'évolution saisonnière des écarts de températures par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf)	134
Figure 80 : Sécheresse météorologique - référence 1976-2005 (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf)	135
Figure 81 : Cartes des écarts du nombre maximum de jours secs consécutifs en été pour la RCP8.5 et les trois horizons selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95 (figure extraite du rapport DRIAS 2020 http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf)	136
Figure 82 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)	137
Figure 83 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 pour la saison d'été (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)	138
Figure 84 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 pour la saison d'hiver (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)	138
Figure 85 : Anomalies de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 calculées pour les 5 modèles climatiques retenus : comparaison des anomalies moyennes à l'échelle de la France et à l'échelle de la zone d'étude	139
Figure 86 : Evolutions des moyennes trentenaires des précipitations et des ETP sur la zone d'étude pour les 5 modèles climatiques retenus	140
Figure 87 : Carte des anomalies de précipitations (en %) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques)	141
Figure 88 : Carte des anomalies de température (en °C) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques)	141
Figure 89 : Carte des anomalies d'évapotranspiration (en %) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques).....	142
Figure 90 : Principe des simulations réalisées à l'horizon 2100 avec le modèle EROS du Sud-Manche	143
Figure 91 : Exemple d'une des 120 chroniques de débits simulées : la Sée à Tirepiéd pour le modèle CNRM-CM5_ALADIN63 et la trajectoire RCP 4.5	144

Figure 92 : Paramètres statistiques calculés pour les débits des rivières du Sud Manche simulés jusqu'à l'horizon 2100 145

Figure 93 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à la station de Notre-Dame-du-Touchet à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 151

Figure 94 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à la station de Notre-Dame-du-Touchet à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 151

Figure 95 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques..... 151

Figure 96 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Virey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 153

Figure 97 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Virey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 153

Figure 98 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Virey est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques 153

Figure 99 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Vézins à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 155

Figure 100 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Vézins à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 155

Figure 101 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Vézins est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques 155

Figure 102 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint James à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en

données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)..... 157

Figure 103 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint James à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 157

Figure 104 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Beuvron à Saint James est inférieur au 10ieme du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques..... 157

Figure 105 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint Senier à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)..... 159

Figure 106 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint Senier à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 159

Figure 107 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Beuvron à Saint Senier est inférieur au 10ieme du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques..... 159

Figure 108 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Airon à Landivy à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 161

Figure 109 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Airon à Landivy à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 161

Figure 110 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de l'Airon à Landivy est inférieur au 10ieme du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques..... 161

Figure 111 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Chérencé à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 163

Figure 112 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Chérencé à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 163

Figure 113 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sée à Chérencé est inférieur au 10^{ème} du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques163

Figure 114 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Tirepied à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)165

Figure 115 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Tirepied à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité).....165

Figure 116 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sée à Tirepied est inférieur au 10^{ème} du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques165

Figure 117 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Thar à Jullouville à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)167

Figure 118 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Thar à Jullouville à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité).....167

Figure 119 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Thar à Jullouville est inférieur au 10^{ème} du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques167

Figure 120 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Braize à Lolif à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)169

Figure 121 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Braize à Lolif à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)169

Figure 122 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Braize à Lolif est inférieur au 10^{ème} du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques169

Figure 123 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Oir à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données

d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 171

Figure 124 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Oir à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)..... 171

Figure 125 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de l'Oir à Ducey est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques 171

Figure 126 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 173

Figure 127 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité) 173

Figure 128 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Ducey est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques..... 173

Figure 129 : Comparaison des 5 modèles climatiques pour la RCP8.5 en termes (a) de prévisions des évolutions de précipitations et des ETP et (b) des anomalies de précipitations et de températures pour l'horizon 2085 par rapport à la période actuelle (1976-2005) 176

Figure 130 : Comparaison des 5 modèles climatiques pour la RCP8.5 en termes de tendances saisonnières : anomalies de précipitations et de températures pour l'horizon 2085 par rapport à la période actuelle (1976-2005) (figures Météo France P. Etchevers et al., 2020) 177

Figure 131 : Evolution du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issue des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée la trajectoire RCP4.5 pour les 5 modèles climatiques 178

Figure 132 : Evolution du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issue des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée la trajectoire RCP8.5 pour les 5 modèles climatiques 179

Figure 133 : Moyenne des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issues des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 5 modèles climatiques : (a) moyenne des évolutions pour la RCP4.5 des 5 modèles climatiques ; (b) moyenne des évolutions pour la RCP8.5 des 5 modèles climatiques 180

Figure 134 : Moyenne, Minimum et Maximum des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issues des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 10 scénarios climatiques (5 modèles climatiques x 2 RCP 4.5 et 8.5) 182

Figure 135 : Moyenne, Minimum et Maximum des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issus des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 5 modèles climatiques (exemple pris du dernier horizon simulé 2071-2010 pour la RCP8.5).....	182
Figure 136 : 10iemes du module calculés sur la période de référence 1976-2005 pour les débits simulés naturels ou impactés (par les rejets et pompages).....	183
Figure 137 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les Captage de LA PELTERIE (La Cance) - BSS000RCRQ et Captage de La LANDE-MILLY (La Sélune) - BSS000TRHA.....	186
Figure 138 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage de PONT JUHEL (L'Airon) - BSS000TRMQ.....	188
Figure 139 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les captages de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY.....	190
Figure 140 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX.....	192
Figure 141 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage du MOULIN MARCEY (La Braize à Avranches) - BSS000RBDP.....	193
Figure 142 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les captages du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et de BOUILLON - BSS000RAVY.....	195

1. Introduction

Dans le département de la Manche, la succession d'étiages sévères et de sécheresses estivales (1975-79 ; 1983-84, 1989 à 1991 ; 1996-97 ; 2003-2004 ; 2017-2018, 2019) mais également de sécheresses hivernales (comme l'épisode de 2016-2017) a mis en évidence la précarité de certaines ressources (de socle principalement).

L'épisode de **sécheresse estivale de 2019**, notamment, avec un bilan pluviométrique globalement déficitaire sur plusieurs mois successifs (juillet, août, septembre), avait abouti à des situations hydrologiques exceptionnellement sèches sur les cours d'eau du Nord Cotentin (Divette, Saire) mais également du Sud du département (la Selune et son affluent l'Airon).

L'épisode de **sécheresse hivernale 2016/2017** a été caractérisé par un déficit pluviométrique de 45 % environ dans le département de la Manche et a abouti à des débits de base nettement inférieurs aux normales. La Vire (Coulonces, Tessy), la Divette (Octeville), le Thar (Jullouville), la Sée (Chérencé-le-R.), la Sélune amont (ND-du-Touchet), l'Airon (Landivy) et la Varenne (Domfront) ont présenté des situations très sèches avec des périodes de retour supérieures à la vicennale sèche. Pour ces stations, il s'est agi des débits de base les plus bas jamais observés pour un mois de janvier depuis le début des enregistrements (1970 pour les plus anciens).

Or, la production de l'Alimentation en Eau Potable du département de la Manche est assurée pour près de 40% de la population (principalement les agglomérations et le Sud-Manche) à partir de captages d'eaux superficielles.

Ces différents épisodes de sécheresse ayant impliqué de sérieuses tensions sur les usages, la Préfecture de la Manche a demandé à ce que soit réalisé, dans le cadre du Plan de Gestion de la Ressource en Eau, un état des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines à l'échelle départementale. Cet état des lieux (rapport BRGM/RP-69128-FR) réalisé en 2019 a notamment mis en évidence certains secteurs où les prélèvements en eaux superficielles sont sensibles à l'étiage (Sélune, Braize et Thar, Vire, Sienne...).

La dépendance des ressources en eau de surface aux épisodes de sécheresse impose d'avoir une vision à moyen et long terme de l'évolution potentielle du climat et de son impact sur les ressources en eau. Une telle vision permet d'être mieux armé pour anticiper les épisodes de sécheresse futurs et de réfléchir aux stratégies d'adaptation pouvant être intégrées à la gestion du territoire et de ces ressources en eau.

Ainsi, le SDEAU 50 souhaite bénéficier d'un retour d'expérience sur les épisodes de sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017 et une évaluation de la reproductibilité de ces situations à l'horizon 2050. L'objectif d'un tel travail consiste à disposer de moyens d'anticiper d'éventuels manques d'eau à l'horizon 2050 sur les différentes ressources en eaux superficielles du Sud Manche et, le cas échéant, de réfléchir aux mesures d'adaptation qui peuvent être mises en œuvre (recherche de ressources en eaux souterraines alternatives, création de nouvelles prises d'eau sur la Sée) et de planifier les investissements correspondant à ces actions.

Cette étude est menée dans le cadre d'un projet de recherche et développement partagé entre le BRGM et le SDEAU50.

2. Présentation du secteur d'étude

2.1. PRESENTATION DES 4 BASSINS VERSANTS

La zone d'étude est constituée de 4 bassins versants : le Thar, la Sée, La Braize et la Sélune tous situés dans le département de la Manche en Normandie à l'exception de la Sélune qui déborde, en tête de son bassin, en Bretagne et en Pays de la Loire.

- **La Sélune** est un petit fleuve côtier du Sud du Département de la Manche qui prend sa source à Saint-Cyr-du-Bailleul (dpt 50) et se jette dans la baie du Mont-Saint-Michel.

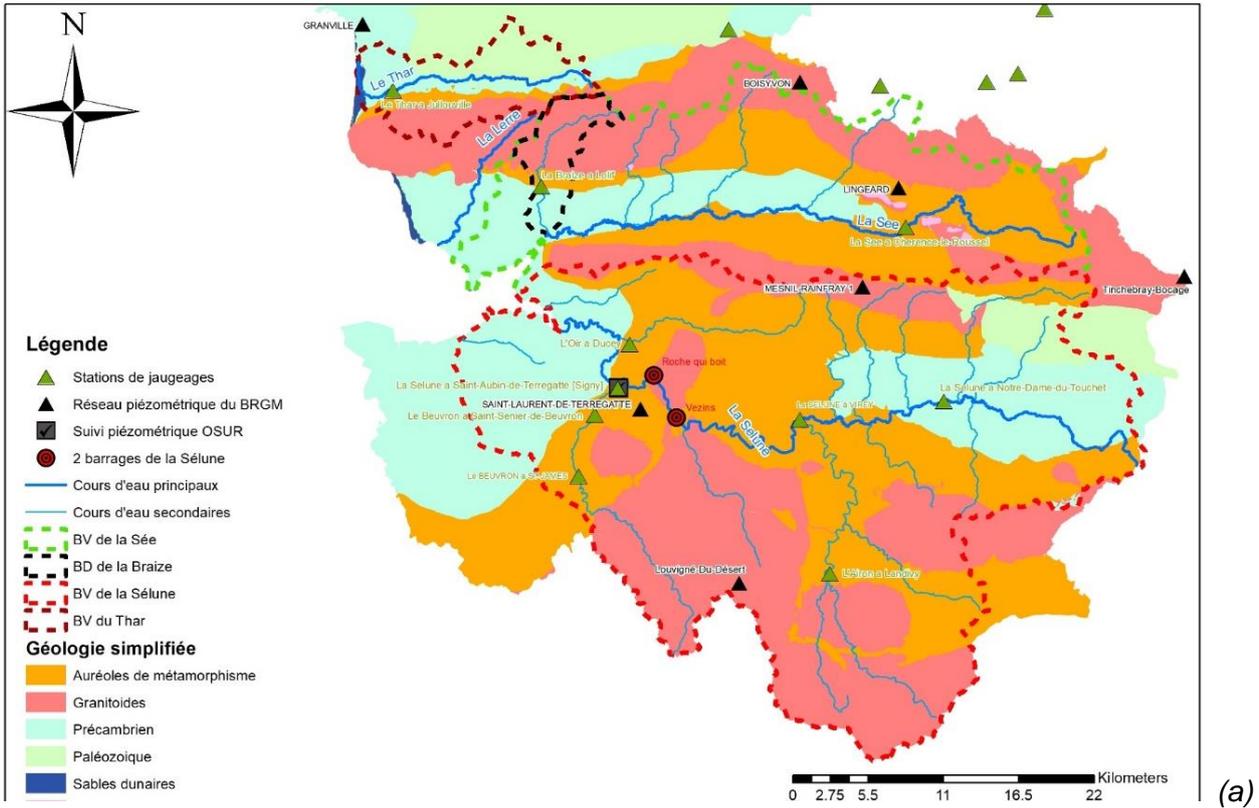
Le contexte géologique de ce bassin versant est assez variable d'un sous bassin à l'autre avec la présence de terrains précambriens et paléozoïques en tête de bassin et à l'extrême aval (à l'embouchure) tandis que la partie centrale du BV et de ses affluents est couverte par des Granitoïdes et leurs auréoles de métamorphisme (Figure 1).

Le fonctionnement de la rivière de la Sélune a été impacté dans le passé par la présence de deux barrages hydroélectriques (barrages de la Roche-qui-boit et de Vezins construits en 1914 et 1927, Figure 1). Ceux-ci influent sur le débit du cours d'eau à l'aval ainsi que localement sur les échanges nappes-rivières. Afin de rétablir la continuité écologique, un projet d'arasement de ces barrages est en cours.

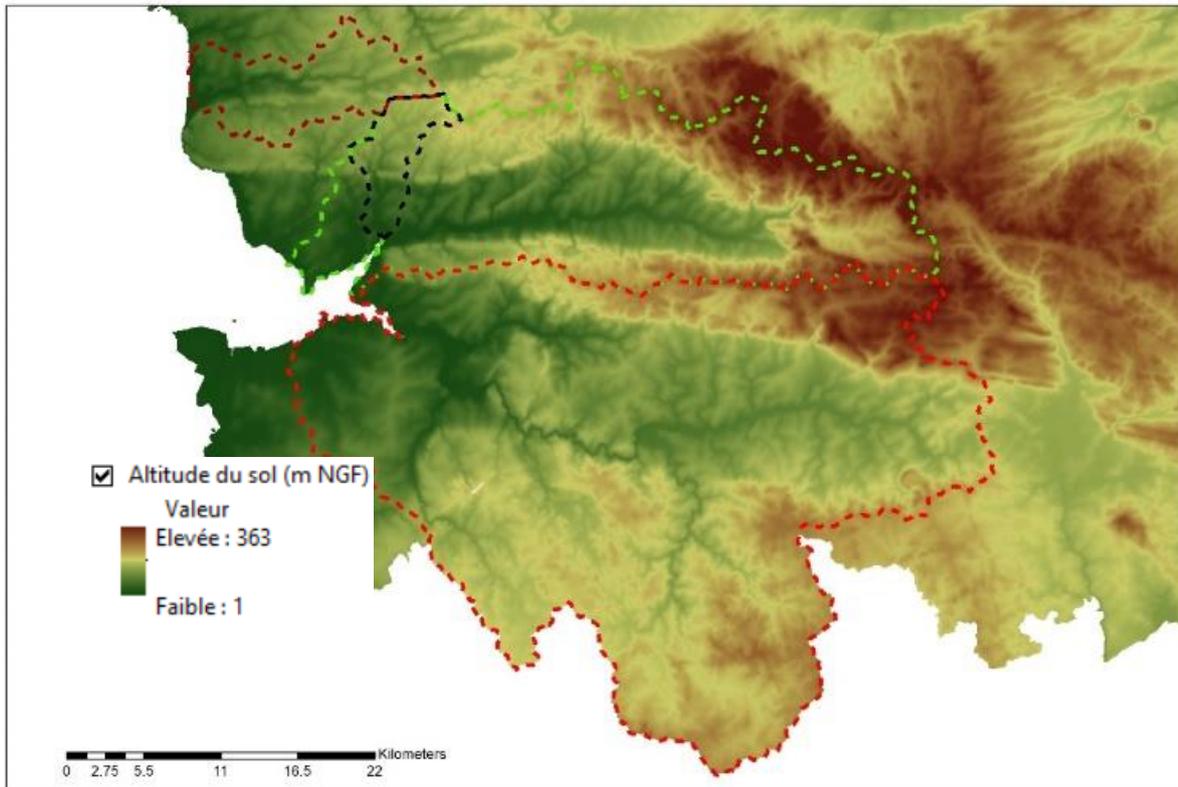
La retenue de Vezins (barrage le plus important) a été vidangée en avril 2019, et les travaux d'arasement ont duré jusqu'à la fin de l'année 2020. Il peut être considéré que la Sélune a retrouvé un écoulement naturel à Vezins depuis mai 2019.

En juin 2021, le barrage de la Roche Qui Boit n'était toujours pas arasé, sa vidange étant programmée pour septembre 2021.

- **La Sée** est un petit fleuve côtier du Sud du Département de la Manche qui prend sa source à Sourdeval (dpt 50) et se jette dans la baie du Mont-Saint-Michel. Le contexte géologique de ce bassin versant est assez variable et constitué de granitoïdes sur les crêtes topographiques, leurs auréoles de métamorphisme sur les versants puis de formations précambriennes sur la partie médiane et avale du bassin (Figure 1).
- **La Braize** est l'affluent le plus aval de la Sée en rive droite. Situé dans le département de la Manche, il rejoint le fleuve de la Sée juste avant qu'il ne se jette dans la baie du Mont-Saint-Michel. D'un point de vue géologique, les deux tiers amonts du bassin versant sont constitués de granitoïdes et de leurs auréoles de métamorphisme. Le tiers aval est constitué de formations précambriennes (Figure 1).
- **Le Thar** est un petit fleuve côtier du Sud du Département de la Manche qui prend sa source à l'est de La Haye-Pesnel (dpt 50) et se jette à Saint-Pair-sur-Mer dans la Manche. Le contexte géologique de ce bassin versant est constitué en rive droite de formations précambriennes sur les deux tiers amont et de formations paléozoïques sur le dernier tiers aval et en rive gauche de granitoïdes, de leurs auréoles de métamorphisme puis de formations précambriennes (respectivement des crêtes vers le centre de la vallée (Figure 1)).



(a)



(b)

Figure 1 : Lien entre Relief (b) et géologie (a) pour les bassins versants du Sud Manche

2.2. CONTEXTE GEOMORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE

Le secteur d'étude est parcouru de crêtes topographiques étirées d'Ouest en Est (Figure 1). La présence de ces éperons est liée à celle de roches plus dures (granodiorites notamment) mises en relief par l'érosion. Ces granodiorites constituent, respectivement du Nord au Sud de la Zone d'études, les massifs de Carolles-Vire, d'Avranches, de Chalandrey et de Louvigné (cf. Figure 1 et Figure 2). Les altitudes y sont parmi les plus élevées de la région, avec 350 mètres en moyenne sur les sommets.

Lors de la mise en place de ces massifs, le magma granitique a traversé des terrains briovériens plissés qu'il a métamorphisés en cornéennes et en schistes tachetés (auréole de métamorphisme).

Ces massifs granodioritiques forment des lignes maîtresses du paysage du Sud Manche. Les roches magmatiques situées au cœur de ces massifs sont recouvertes de limons des plateaux et d'arènes. Lors de la traversée des barres de cornéennes les cours d'eau creusent généralement des vallées plus profondes. Ces incisions s'estompent progressivement, une fois l'auréole de cornéennes franchie (hydrologie Basse-Normandie, F. Gresselin <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/hydrometrie-et-hydrologie-r275.html>).

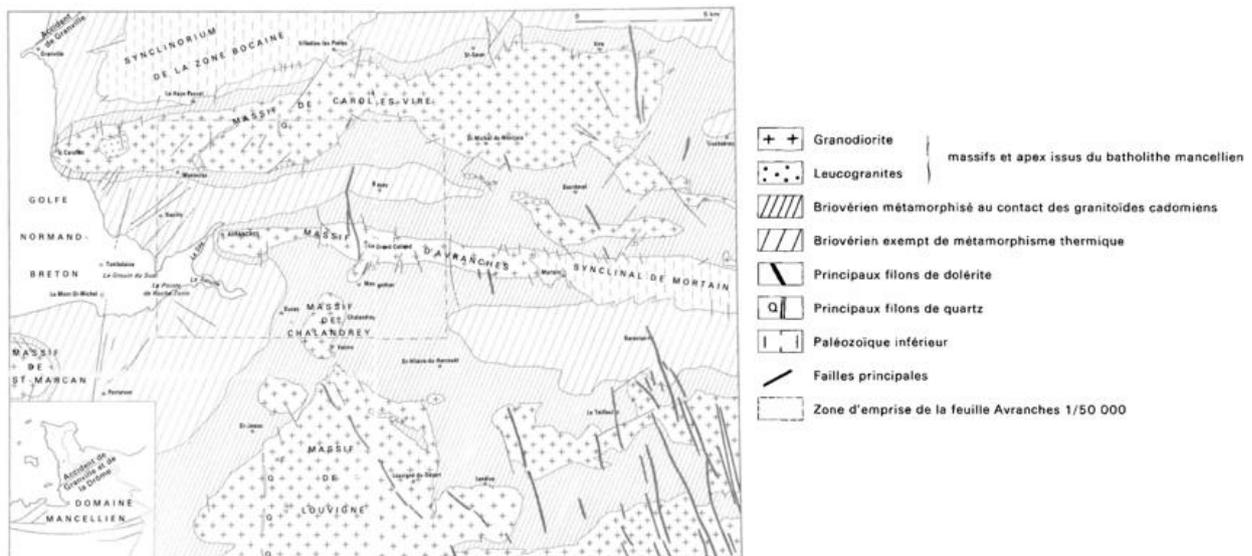


Figure 2 : Schéma structural de la zone étudiée (source notice carte géologique n°209 : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0209N.pdf>)

2.3. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les aquifères présents dans la zone d'étude sont essentiellement des aquifères de milieux fissurés et plus modestement de milieux poreux avec les arènes granodioritiques.

2.3.1. Le milieu fissuré

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, les principales formations géologiques présentes sont les granodiorites, les schistes et grès briovériens métamorphisés à leur contact en cornéennes. Toutes ces roches anciennes plutôt dures et massives sont par nature peu perméables et possèdent une très faible porosité d'interstices. Cependant, les contraintes tectoniques passées ont provoqué de très nombreuses fissures, cassures, fractures à travers lesquelles l'eau circule. Ce type d'aquifère fissuré est par nature hétérogène et la productivité de ces aquifères est essentiellement fonction de la densité de fissuration et de fracturation du terrain.

Les granodiorites, mais surtout les cornéennes, sont généralement considérées comme les formations fournissant les meilleurs débits. Le caractère capacitif de ce milieu fissuré est généralement acquis grâce aux arènes granodioritiques (milieu poreux) qui les surmontent. (notice carte géologique n°248 : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0248N.pdf>).

Au passage de l'auréole de cornéennes, les débits des ruisseaux varient généralement brutalement dans un sens ou dans un autre à la faveur de la densité de fracturation du massif rocheux (notice carte géologique n°209 <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0209N.pdf>).

2.3.2. Le milieu poreux

Dans les massifs granitiques, la zone altérée et arénisée (Figure 4), ainsi que les pacages loessiques (Figure 4 et Figure 3), sont irrégulièrement développés en épaisseur et disposés sans continuité à la surface des massifs cristallins. Leur nature granulaire en fait un milieu poreux susceptible d'emmagasiner les eaux souterraines. Ces formations constituent généralement des petits horizons aquifères capacitifs dont les eaux percolent ensuite vers l'aquifère fissuré sous-jacent.

De nombreux jaugeages de cours d'eau en étiage ont mis en évidence des débits de vidange des nappes parfois importante, principalement là où sont rencontrées les épaisseurs d'altération ou les recouvrements de loess les plus importants. C'est le cas notamment de la Braize (source notice carte géologique n°209 : <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0209N.pdf>).

Dans ce contexte, les sources sont très nombreuses et apparaissent souvent à la faveur d'une discontinuité dans les formations (contacts granodiorites sur cornéennes ou à la base des arènes au contact de la roche saine), mais aussi au sein des granodiorites ou des cornéennes ; dans ce cas, la localisation de la source est généralement liée à une rupture de pente accentuée (Sources : notice carte géologique n°248: <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0248N.pdf>).

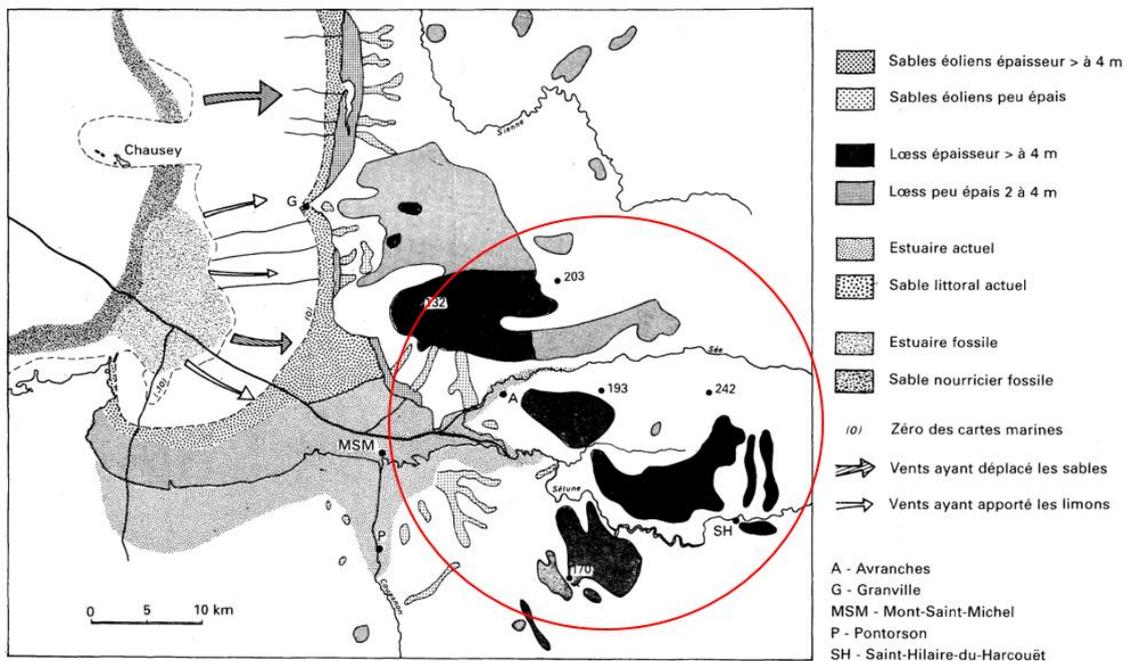


Figure 3 : Carte simplifiée des épaisseurs de loess et sables de couverture dans la paléobaie du Mont-Saint-Michel et dans le secteur d'étude (cercle rouge) (Lautridou, 1991 dans <http://ficheinfoterre.brgm.fr/Notices/0248N.pdf>)

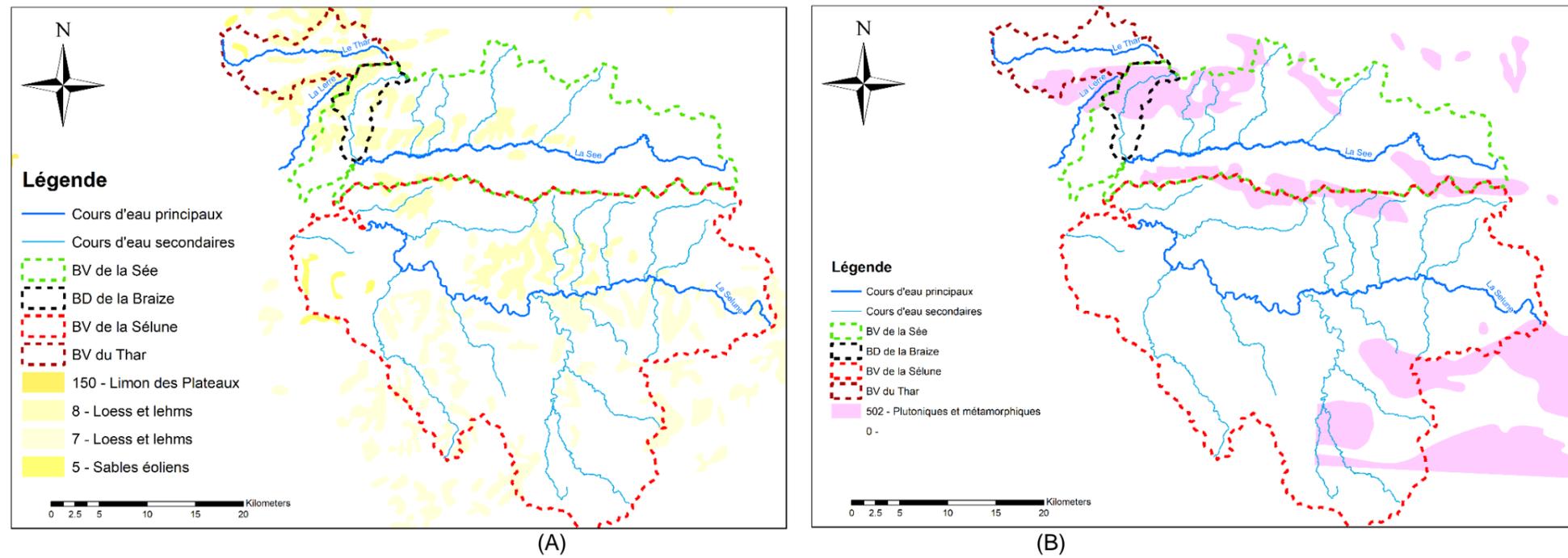


Figure 4 : Cartes (A) des dépôts de surface (loëss et sables) et (B) des Altérites (carte BRGM du Régolithe au 1/1 000 000)

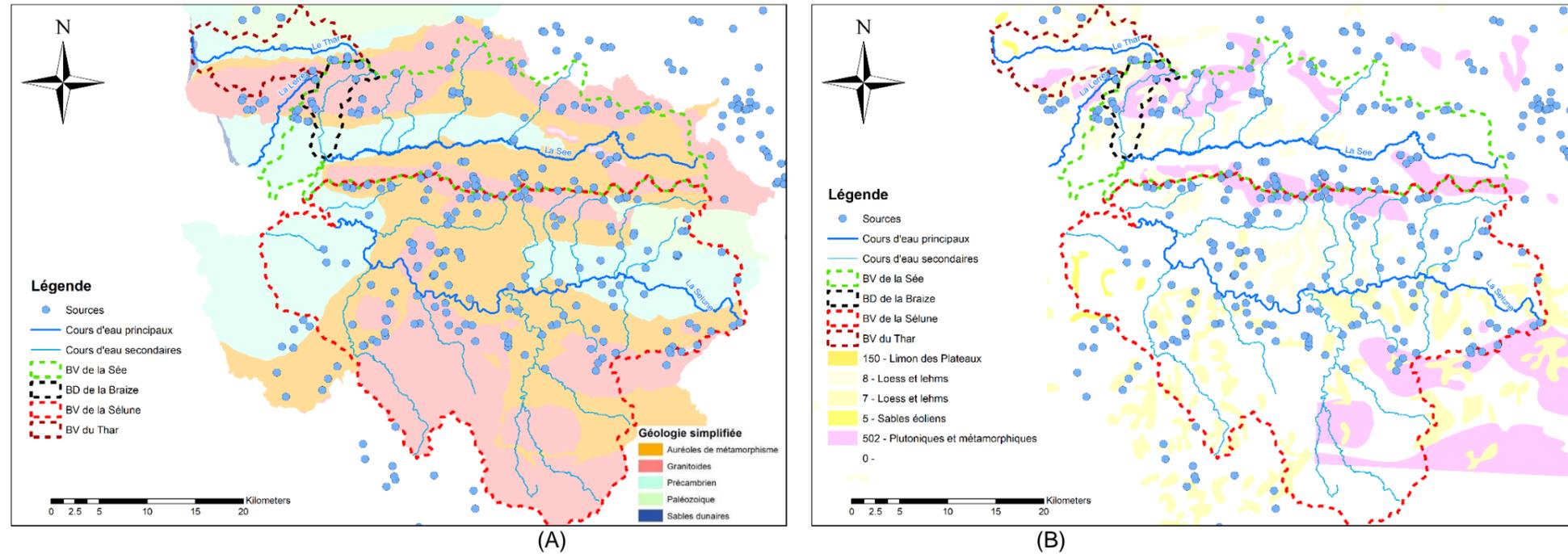


Figure 5 : Localisation des sources par rapport à (A) la nature des roches et Dépôts de surface (loëss et sables) et (B) des Altérites (carte BRGM du Régolithe au 1/1 000 000)

2.4. DEBITS SPECIFIQUES DES COURS D'EAU DU SECTEUR D'ETUDE

Dans le secteur d'étude, les débits spécifiques des cours d'eau (données banque hydro) de ces massifs sont compris entre un minimum de 10.3 l/s/km² pour le Beuvron et un maximum de 20.3 l/s/km² pour la Sée Amont (Figure 6). Il apparaît que les trois cours d'eau étudiés les plus au nord de la Zone d'étude et dont les débits sont soutenus au moins en partie par les eaux souterraines du massif granodioritiques de Caroles-Vires et son auréole de métamorphisme sont ceux ayant les débits spécifiques les plus importants (13.6 l/s/km² pour le Thar, 14.9 l/s/km² pour la Braize et 20.3 l/s/km² pour la Sée amont).

Les eaux souterraines semblent apporter un soutien aux débits d'étiage plus ou moins important selon les cours d'eau comme le montre la variabilité des moyennes mensuelles interannuelles des débits spécifiques présentée à la Figure 8.

Cette différence entre les différents cours d'eau peut s'expliquer par une différence de pluviométrie. Toutefois, la comparaison de la carte des débits spécifiques (Figure 6) avec la carte de la pluviométrie (Figure 7), montre que les stations hydrométriques les plus arrosées et ayant une pluviométrie similaire (la Sée Amont et la Sélune à Notre Dame du Touchet) ont des débits spécifiques très différents (la Sée Amont ayant un débit spécifique 1.6 fois à celui de la Sélune Amont). Ainsi, il apparaît qu'au-delà de la pluviométrie, les différents cours d'eau semblent avoir des comportements très différents (part plus ou moins importante de la composante souterraine dans le débit des cours d'eau, répartition ruissellement / infiltration différente selon les bassins versants et la géologie du sous-sol).

Généralement, les caractéristiques géologiques influencent :

- la distribution des pentes (et donc la vitesse des écoulements) ;
- la perméabilité des formations superficielles ;
- et les capacités d'emmagasinement des aquifères qui contrôlent le soutien des débits des rivières en période d'étiage notamment.

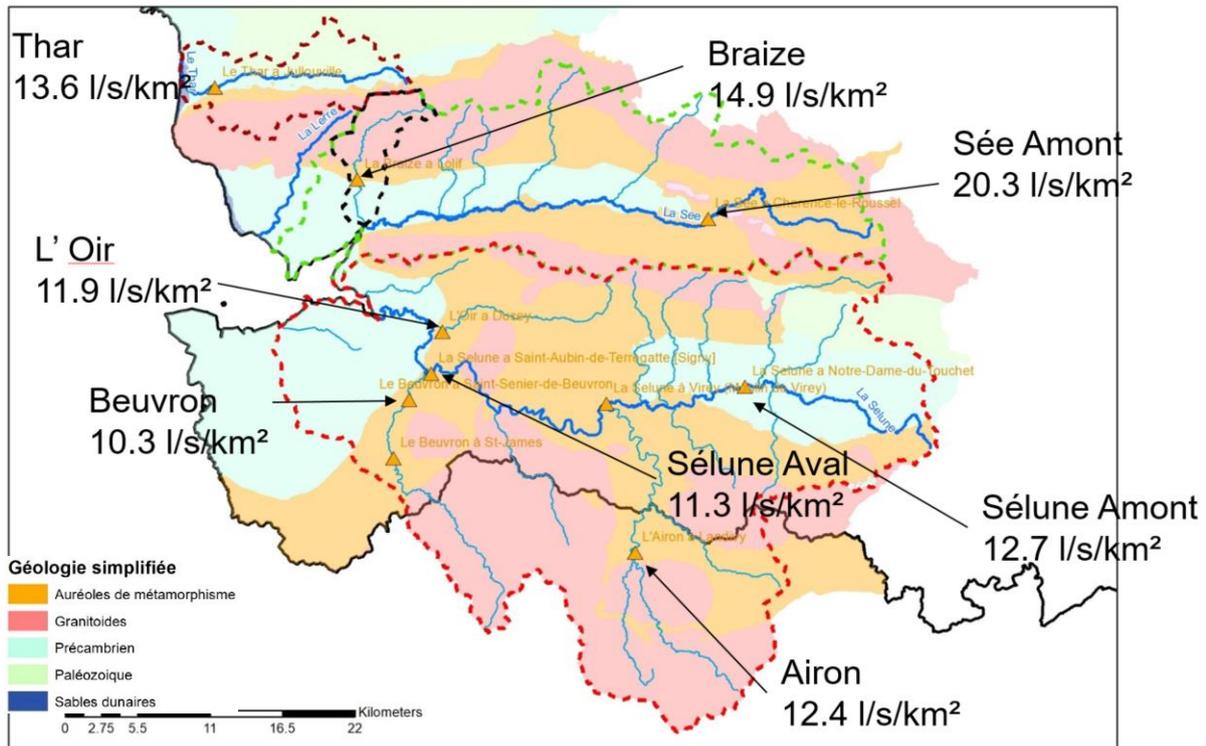


Figure 6 : Débits spécifiques des cours d'eau du Sud Manche (d'après les données de la Banque Hydro, DREAL)

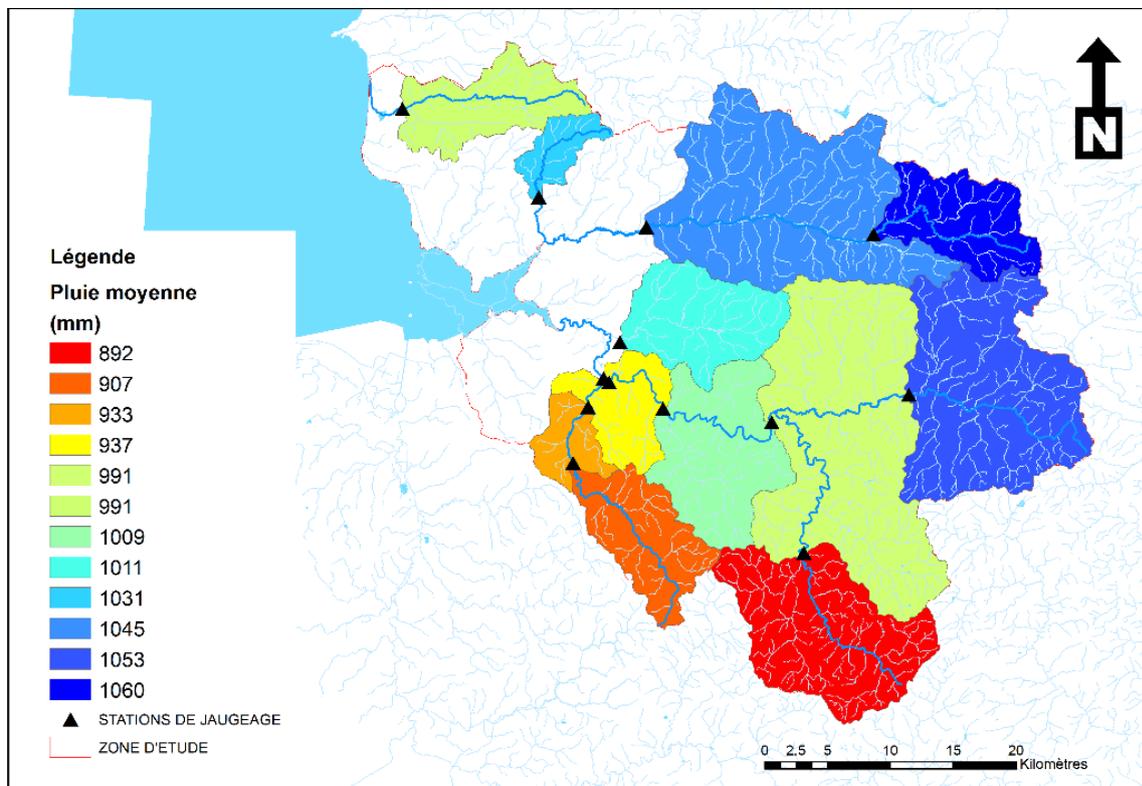


Figure 7 : Pluie moyenne annuelle (période 1994-2020), par bassin versant de chaque station hydrométrique (données issues du modèle EROS (cf. § 4.5.4) ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France)

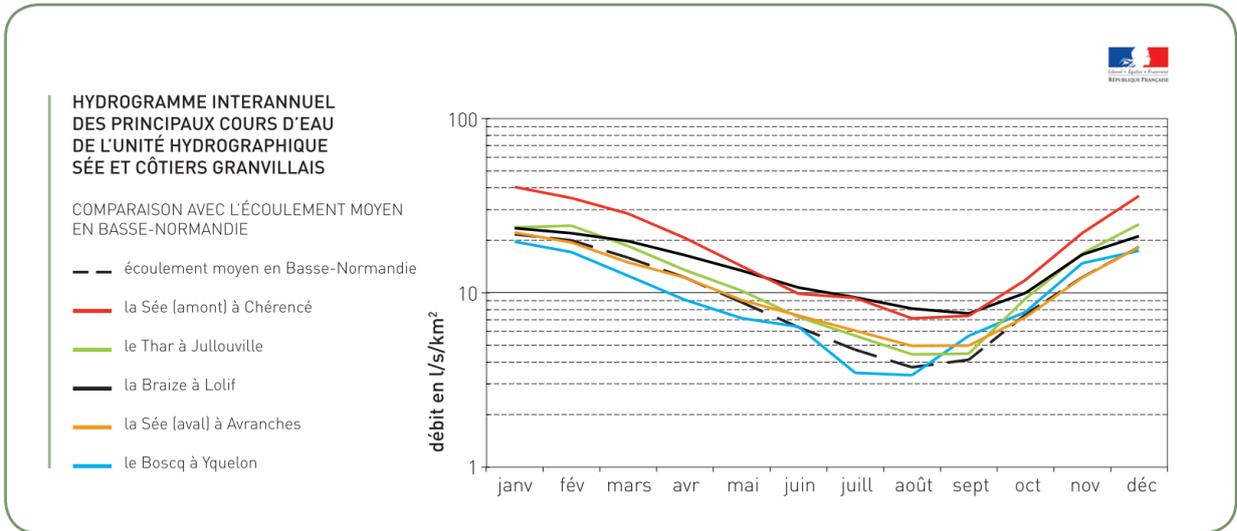
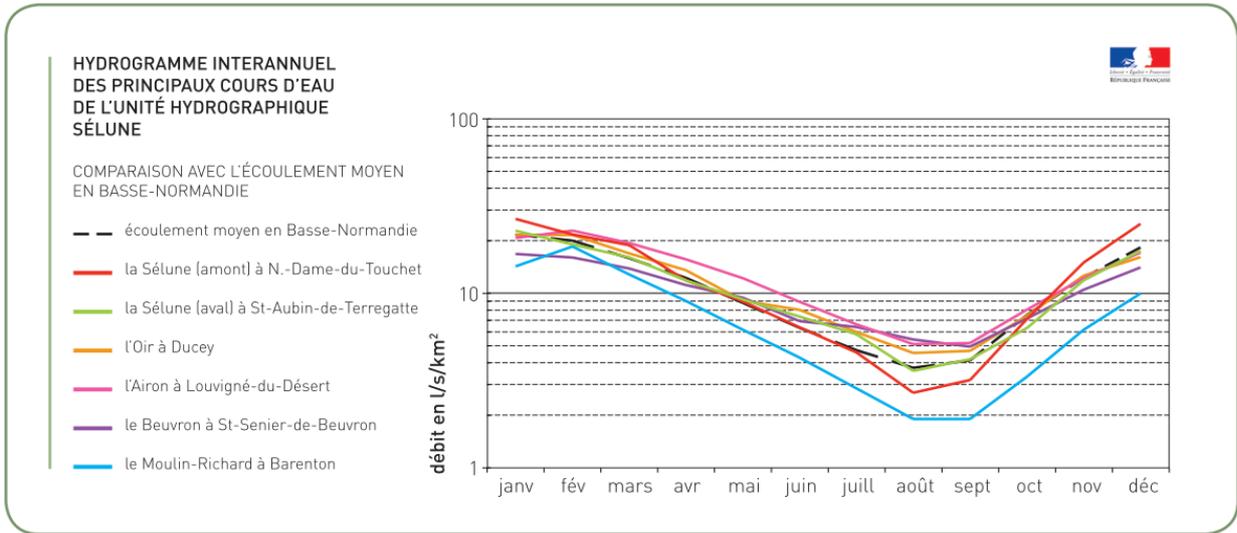


Figure 8 : Moyennes mensuelles interannuelles des débits spécifiques des cours d'eau du Sud Manche (sources DREAL)

3. Volet 1 : Analyse de l'incidence sur la production d'eau potable des épisodes de sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017

Le premier volet consiste à réaliser un retour d'expérience de l'incidence sur la production d'eau potable des épisodes de sécheresses, notamment la sécheresse estivale de 2019 et l'hivernale de 2016/2017.

Ce volet 1 vise à estimer les pénuries d'eau potable (en termes de quantité d'eau manquante et de nombre de jours de pénurie) qui auraient eu lieu si les débits réservés (§ 3.2) avaient été respectés. A cet effet, ont été réalisées dans le cadre de cette démarche, les tâches suivantes :

1. l'inventaire des prises d'eau en rivière sur la zone d'étude (§3.1) ;
2. l'inventaire des débits réservés existants dans la zone d'étude (§ 3.2) ;
3. la compilation des débits qui ont été prélevés sur ces prises d'eau, de 1994 à 2020 pour la production d'eau potable (§ 4.3.4),
4. le calcul des débits maximums qui pouvaient être prélevés dans le respect des débits réservés pour le milieu (§ 3.3),
5. le calcul des pénuries en eau potable qui auraient eu lieu en cas de respect des débits réservés (§ 3.3).

3.1. LES CAPTAGES AEP EN RIVIERE DE LA ZONE D'ETUDE

Un travail de recensement de l'ensemble des prélèvements réalisés dans la zone d'étude de 1994 à 2020 a été réalisé (cf. § 4.3.4) et a mis en évidence 13 captages AEP en rivière (« prise d'eau ») sur cette période dont 9 captages étaient encore actifs les 5 dernières années (2016-2020) :

- Captage du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX
- Captage de BOUILLON - BSS000RAVY
- Captage du MOULIN MARCEY (La Braize à Avranches) - BSS000RBDP
- Captage de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX
- Captage de la Houssaye (Le BEUVRON) - BSS000TQGM
- Captage de PONT JUHEL (L'Airon) - BSS000TRMQ
- Captage de LA PELTERIE (La Cance) - BSS000RCRQ
- Captage de La LANDE-MILLY (La Sélune) - BSS000TRHA
- Captage du Pont de BATEAU (La gauberdrière) - BSS000RBTR

La liste des 13 captages AEP en rivière ainsi que la correspondance entre les codes des différentes bases de données (SISEAU, AESN, BSS, BNPE,...) est présentée sur la Figure 35. Ces captages sont localisés sur la Figure 9.

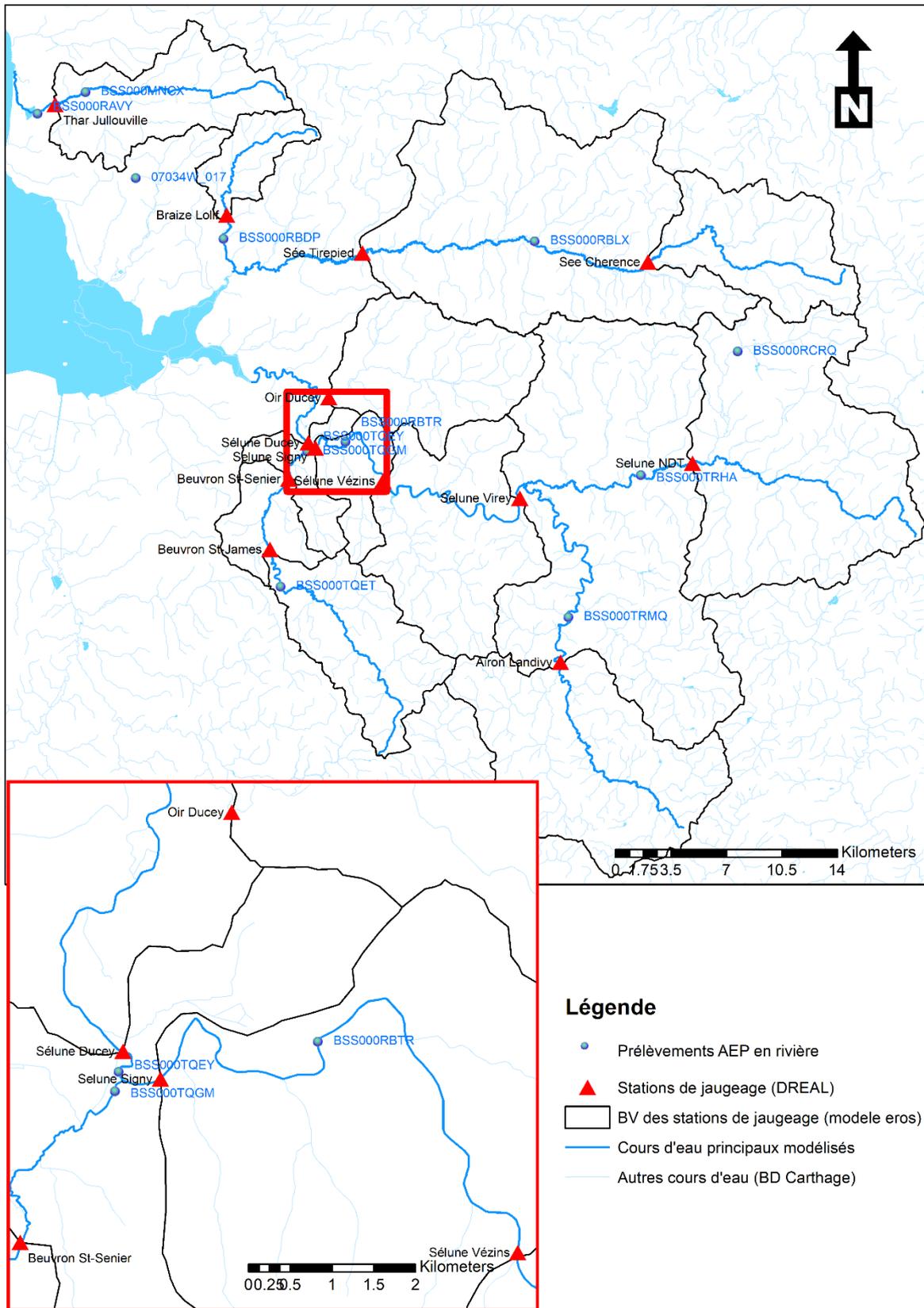


Figure 9 : Carte de localisation des captages AEP en rivière recensés sur la période 1994-2019

3.2. LES DEBITS RESERVES

Le débit réservé est le débit minimal d'eau imposé par l'autorité administrative aux propriétaires ou gestionnaires d'un ouvrage hydraulique (barrage, seuil, unité hydroélectrique...) ou d'une prise d'eau en rivière pour assurer un minimum d'écoulement dans le cours d'eau et ainsi préserver le fonctionnement des écosystèmes aquatiques ou ceux situés en proche périphérie du lit.

Les débits réservés existants pour les prises d'eau de la zone d'étude ont été collectés auprès de la DREAL et sont présentés sur la Figure 10.

Sur les 9 prises d'eau en rivière encore actives ces 5 dernières années, 5 ne disposent pas de débits réservés :

- Captage de Pont de BATEAU (La gauberdrière) - BSS000RBTR
- Captage de la Houssaye - BSS000TQGM
- Captage de PONT JUHEL (L'Airon) - BSS000TRMQ
- Captage de LA PELTERIE (La Cance) - BSS000RCRQ
- Captage du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX

Prise d'eau en rivière pour l'Alimentation en Eau Potable			Station hydrométrique de référence					
Prises d'eau de surface	Cours d'eau	Débit réservé (m³/s)	Station	Module/10 Banque hydro (2022) (m³/s)	Module / 10 Fiches 2013 (m³/s)	QMNA5 Hydro2 (m³/s)	QMNA5 Fiches 2013 (m³/s)	Q réservé transposé à la station (m³/s)
Prise d'eau de la LANDE-MILLY - BSS000TRHA	Sélune	0.36	La Sélune à NDT	0.270	0.258	0.23	0.25	0.281
Prise d'eau de LA PELTERIE- BSS000RCRQ	La Cance	Aucun						
Prise d'eau de la Ponterie à CUVES - BSS000RBLX	Glanon	0.170 du 15/10 au 15/06 0.050 du 15/06 au 15/10	Sée à Tirepied (abandonnée)	0.633		1.63		
Prise d'eau du Thar (BOUILLON - BSS000RAVY)	Thar	0.104	Le Thar à Jullouville [Lézeaux]	0.100	0.099	0.15	0.14	0.101
Prise d'eau du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX	Thar	Aucun						
Prise d'eau du MOULIN MARCEY (La Braize à Avranches) - BSS000RBDP	Braize	0.043	La Braize à Lolif [Les Planches]	0.0387	0.038	0.14	0.14	0.036
Prise d'eau du Pont de BATEAU (La gauberdrière) - BSS000RBTR	Sélune	Aucun	La Sélune à Ducey (aval confluence Beuvron)	1.13		2.3		
Prise d'eau de la Houssaye - BSS000TQGM	Beuvron	Aucun						
Prise d'eau de PONT JUHEL - BSS000TRMQ	Airon	Aucun	L'Airon à Landivy	0.192		0.408		

Rivière	station	Code Hydro	Année de mise en service	Seuils 2012				Q réservé transposé à la station (m³/s)	Module /10 (m³/s)	QMNA5 (m³/s)
				Vigilance (m³/s)	Alerte (m³/s)	Alerte renforcée (m³/s)	Crise (m³/s)			
Thar	Jullouville	I7913610	1970	0.16	0.1	0.083	0.07	0.101	0.10	0.150
Sée	Chérencé-le-Roussel	I8002010	1993	0.24	0.2	0.18	0.15			
Braize	Lolif	I8033810	1991					0.036	0.0387	0.140
Sélune	St Aubin de Terregatte	I9221010	1990	2	1.5	1	0.83			
Sélune	ND du Touchet	I9031010	1991	0.26	0.19	0.16	0.14	0.281	0.270	0.230
Airon	Landivy	I9122020	1973	0.42	0.31	0.26	0.23			

Figure 10 : Débits réservés associés aux prises d'eau dans les rivières de la zone d'études comparés aux statistiques d'étiages des rivières aux stations de référence (données fournies par la DREAL)

3.3. ESTIMATION DES PENURIES EN EAU POTABLE EN CAS DE RESPECT DES DEBITS RESERVES : REANALYSE DE LA PERIODE 1994-2020

3.3.1. Méthodologie générale

Les pénuries potentielles ont été estimées par l'intermédiaire de plusieurs paramètres calculés au pas de temps journalier sur les périodes d'exploitation de chaque AEP :

- Calcul du nombre de jours où le débit de la rivière (non impacté par les prélèvements AEP en eau de surface) est inférieur au débit réservé ;
- Calcul du nombre de jours où le débit de la rivière une fois les prélèvements AEP réalisés, est inférieur au débit réservé ;
- Calcul du volume d'eau potable non produit (pénurie) :
 - Ce volume est égal à la totalité du volume qui avait été réellement prélevé dans le cas où le débit de la rivière est naturellement inférieur au débit réservé
 - Sinon, ce volume est égal à la différence entre le débit réservé et le débit de la rivière impacté par les prélèvements.

Pour les prises d'eau ne disposant pas de valeur de débit réservé, le 10ième du module de la station de référence a été retenu (le 10ième du module est la base de la définition des débits réservés actuellement en vigueur dans ce secteur).

3.3.2. Résultats

a) Captage du MOULIN MARCEY (La Braize) - BSS000RBDP

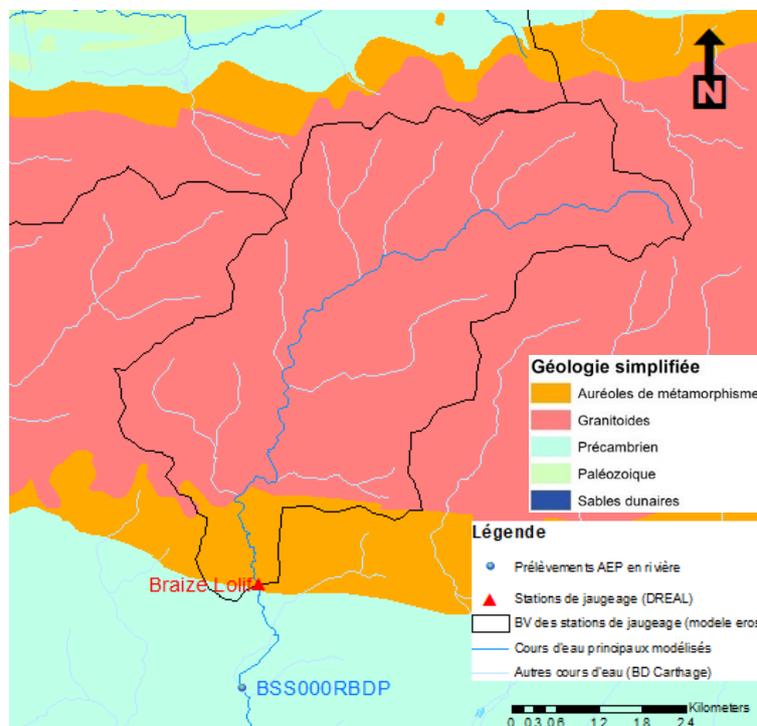


Figure 11 : Localisation de la prise d'eau du MOULIN MARCEY (La Braize) - BSS000RBDP par rapport à la station de jaugeage de la DREAL

Pour le captage de Moulin Marcey, l'hypothèse a été prise que le débit de la Braize au niveau de la prise d'eau était celui de la Braize à Lolif (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul est donc pessimiste. Le débit réservé pris en compte est 0.043 m³/s (pour information, le débit réservé transposé à la station aurait été 0.036 m³/s – données DREAL).

Malgré cette hypothèse pessimiste, le débit réservé est respecté sur toute la période 1994-2020. Aucune pénurie de production d'eau potable n'est mise en évidence (cf. Figure 12).

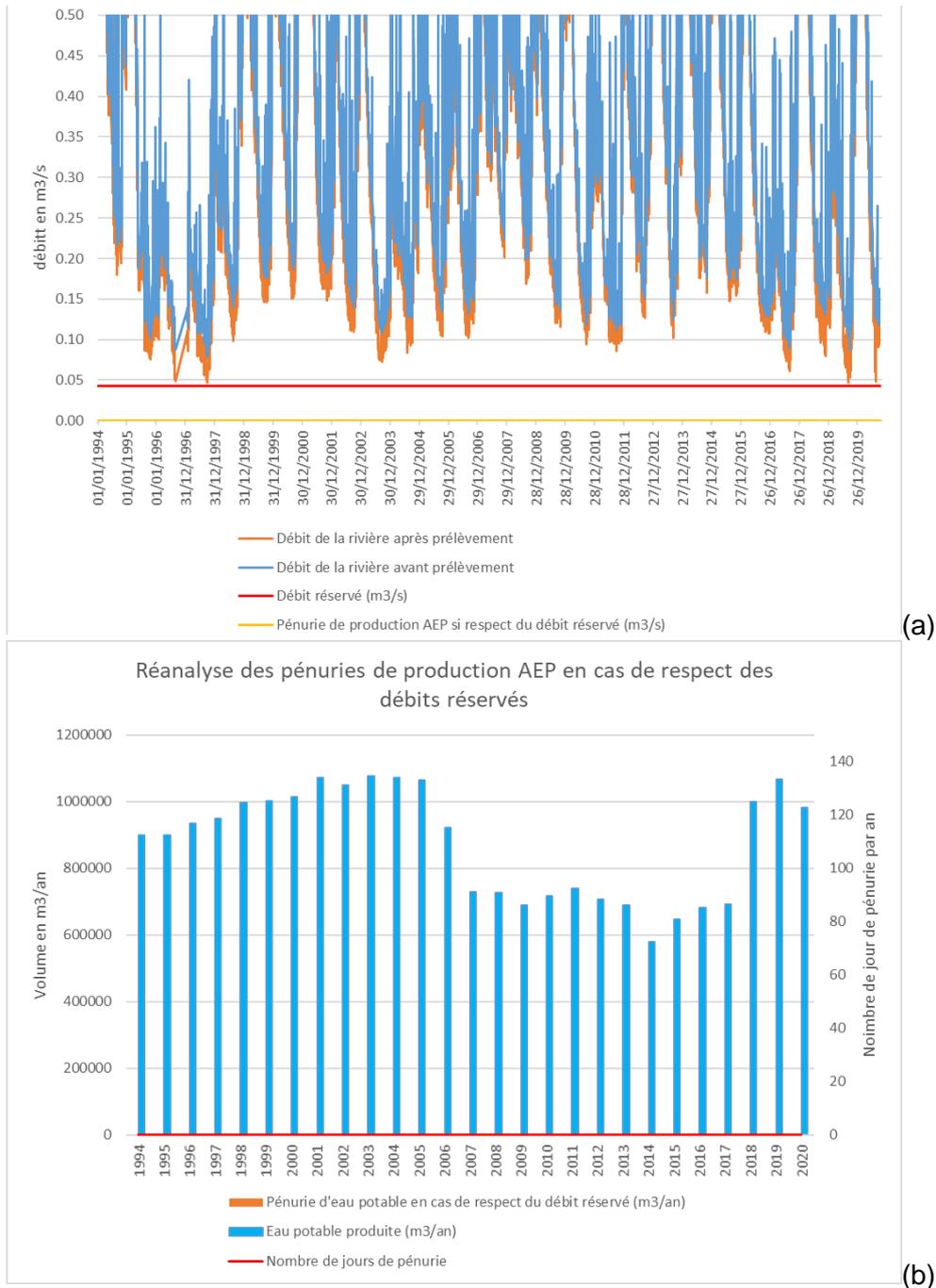


Figure 12 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour la prise d'eau du MOULIN MARCEY (La Braize) - BSS000RBDP : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel

b) Captages du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et de BOUILLON - BSS000RAVY (Rivière du Thar)

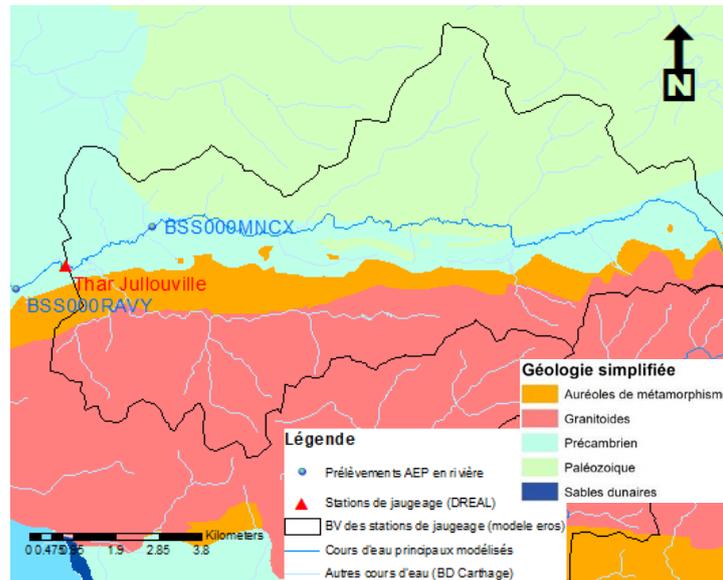


Figure 13 : Localisation des prises d'eau HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et BOUILLON - BSS000RAVY (Rivière du Thar) par rapport à la station de jaugeage de la DREAL

Pour ce captage, l'hypothèse a été prise que le débit du Thar au niveau de la prise d'eau BSS000RAVY était celui du Thar à Jullouville (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul n'est que faiblement pessimiste car le débit réservé pris en compte est $0.104 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit réservé transposé à la station aurait été de $0.101 \text{ m}^3/\text{s}$ (données DREAL).

La courbe bleue sur la Figure 14a) « Débit de la rivière avant prélèvement » correspond au débit du Thar à Jullouville enregistré par la DREAL auquel a été ajouté le débit prélevé à la prise d'eau BSS000MNCX située à l'amont de Jullouville.

La courbe orange sur la Figure 14a) « Débit de la rivière après prélèvement » correspond au débit du Thar à Jullouville enregistré par la DREAL auquel a été retranché le débit prélevé à la prise d'eau BSS000RAVY. Cette courbe orange prend donc en compte les deux prélèvements BSS000MNCX et BSS000RAVY.

Pour les prises d'eau du Thar, le respect du débit réservé fait apparaître des pénuries :

- en 1998 (1 jour – $230 \text{ m}^3/\text{an}$),
- en 2003 (29 jours – $29\,308 \text{ m}^3/\text{an}$),
- en 2017 (9 jours – $7\,648 \text{ m}^3/\text{an}$),
- en 2019 (8 jours – $9\,804 \text{ m}^3/\text{an}$),
- en 2020 (année incomplète) (8 jours – $7\,660 \text{ m}^3/\text{an}$).

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

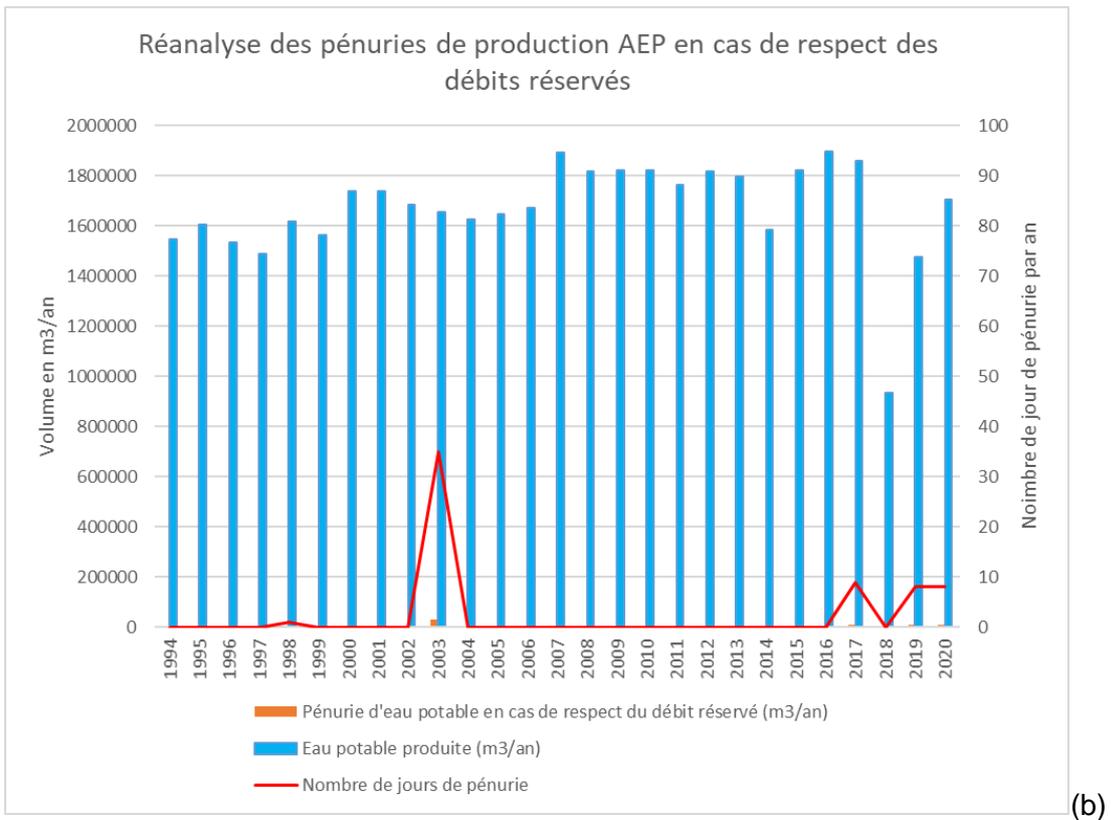


Figure 14 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et de BOUILLON - BSS000RAVY (Rivière du Thar): (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel

c) Captages de LA PELTERIE (La Cance, affluent de la Sélune amont) - BSS000RCRQ et de La LANDE-MILLY (La Sélune amont) - BSS000TRHA

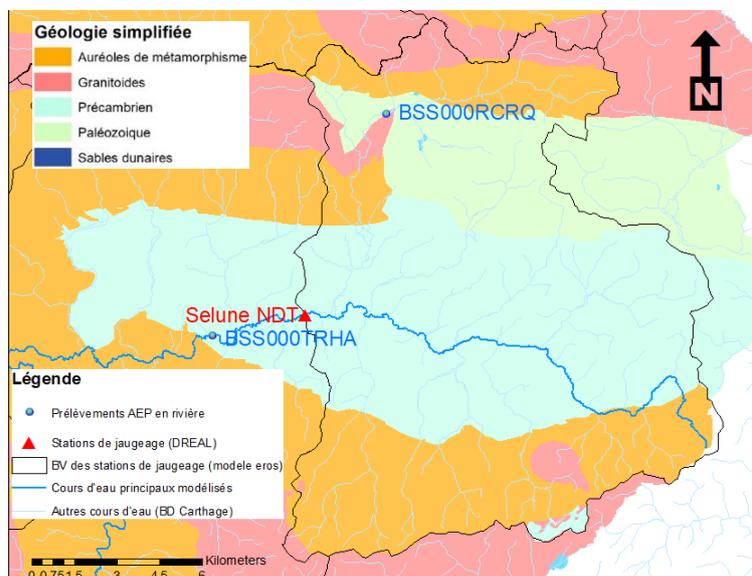


Figure 15 : Localisation des prises d'eau de LA PELTERIE (La Cance, affluent de la Sélune amont) - BSS000RCRQ et de La LANDE-MILLY (La Sélune amont) - BSS000TRHA par rapport à la station de jaugeage de la DREAL

Pour ces captages, l'hypothèse a été prise que le débit de la Sélune au niveau de la prise d'eau BSS000TRHA était celui de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul est légèrement pessimiste car le débit réservé pris en compte est $0.360 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit réservé transposé à la station aurait été $0.281 \text{ m}^3/\text{s}$ (données DREAL).

La courbe bleue sur la Figure 16a) « Débit de la rivière avant prélèvement » correspond au débit de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet enregistré par la DREAL auquel a été ajouté le débit prélevé à la prise d'eau BSS000RCRQ située sur la Cance, affluent de la Sélune à l'amont de Notre-Dame-du-Touchet.

La courbe orange sur la Figure 16a) « Débit de la rivière après prélèvement » correspond au débit de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet enregistré par la DREAL auquel a été retranché le débit prélevé à la prise d'eau BSS000TRHA. Cette courbe orange prend donc en compte les deux prélèvements BSS000TRHA et BSS000RCRQ.

Pour les prises d'eau de la Sélune amont et Cance, le respect du débit réservé sur la Sélune amont fait apparaître des pénuries sur 17 des 27 années étudiées (période 1994-2020), soit 62% des années étudiées :

En terme de nombre de jours de pénurie :

- La pénurie maximum est enregistrée en 1996 (114 jours correspondant à $62\,485 \text{ m}^3/\text{an}$),
- La pénurie médiane est de 65 jours,
- La pénurie moyenne est de 62 jours.

En terme de volume d'eau potable non produit :

- La pénurie maximum est enregistrée en 2010 ($361\,963 \text{ m}^3/\text{an}$ correspondant à 113 jours de pénurie)
- La pénurie médiane est de $83\,830 \text{ m}^3/\text{an}$,
- La pénurie moyenne est de $131\,644 \text{ m}^3/\text{an}$.

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

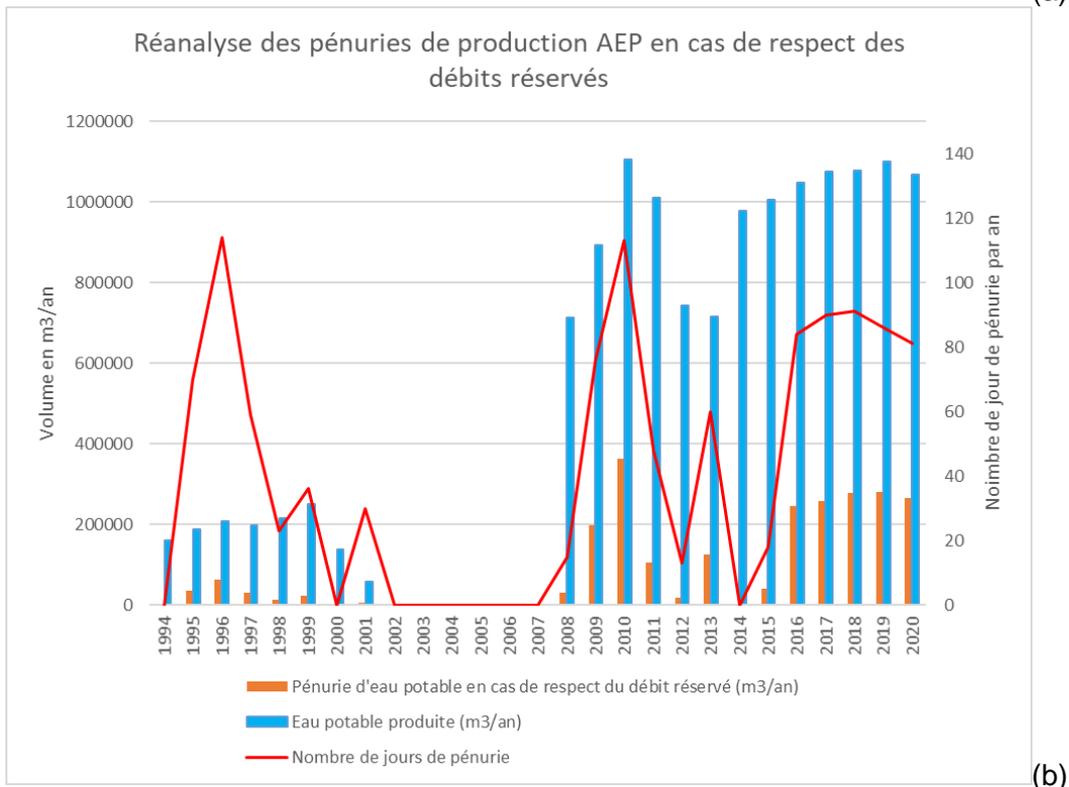
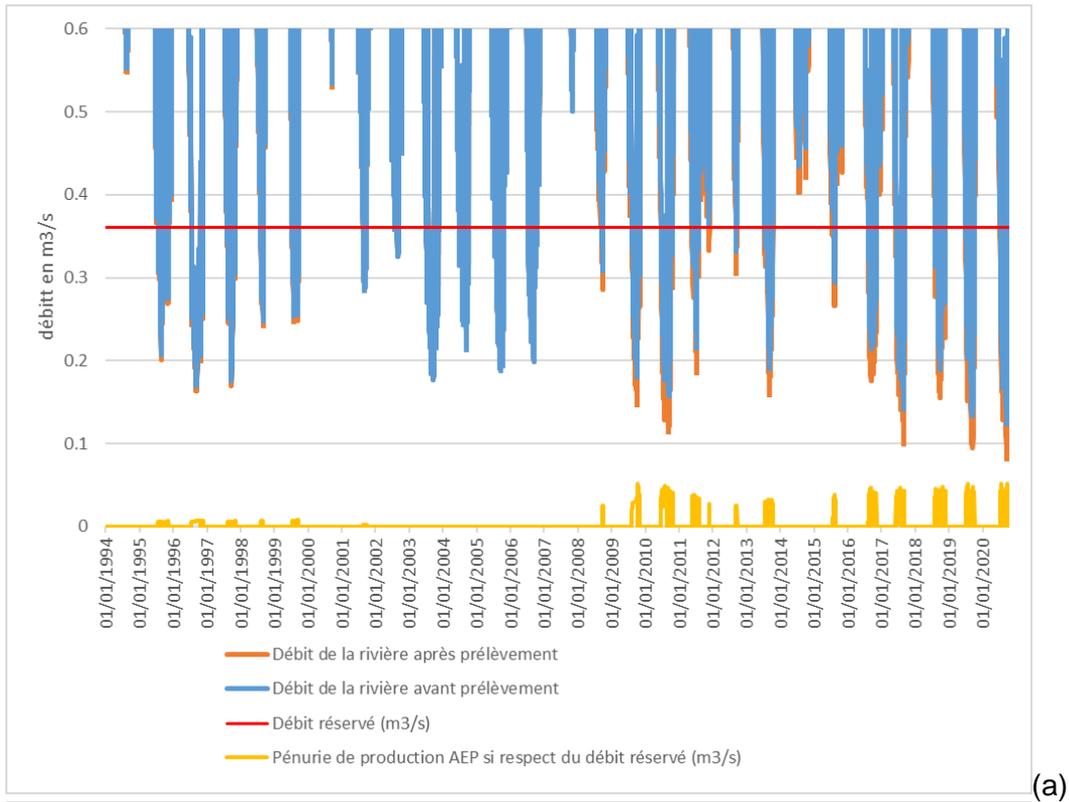


Figure 16 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de LA PELTERIE (La Cance, affluent de la Sélune amont) - BSS000RCRQ et de La LANDE-MILLY (La Sélune amont) - BSS000TRHA: (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel

d) Captage de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX

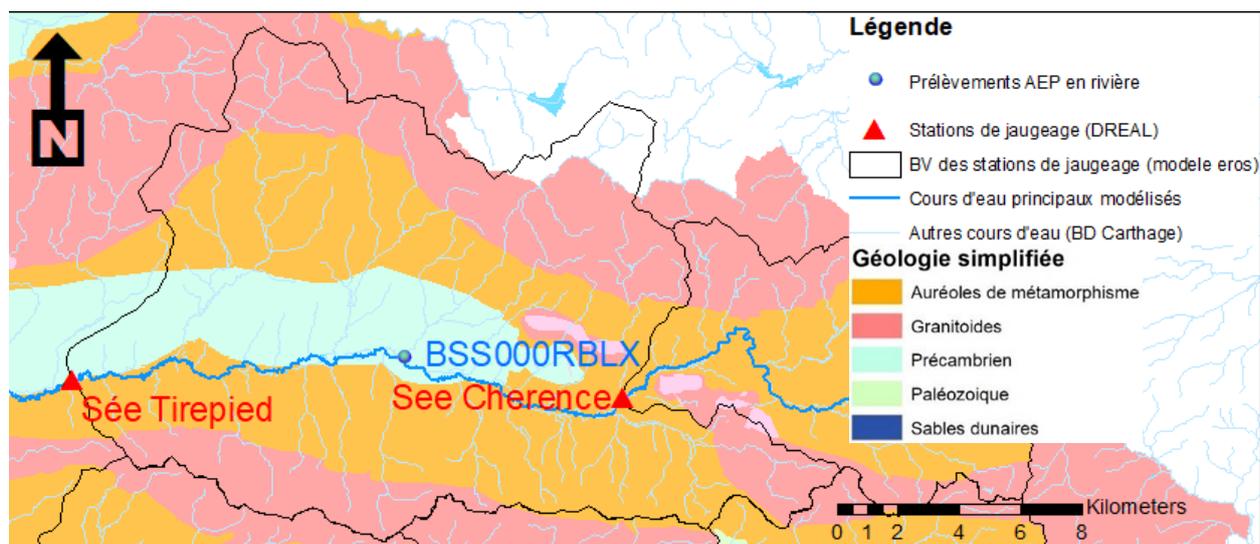


Figure 17 : Localisation de la prise d'eau de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX par rapport aux stations de jaugeage de la DREAL

La prise d'eau BSS000RBLX est réalisée sur le Glanon, affluent de la Sée entre Chérencé-le-Roussel et Tirepiéd.

Cette prise d'eau dispose d'un débit réservé (0.170 m³/s du 15/10 au 15/06 et 0.050 m³/s du 15/06 au 15/10). Toutefois, il n'existe pas de suivi des débits en continu au niveau de la prise d'eau ni au niveau du Glanon en général. Ce débit réservé ne peut donc pas être pris en compte pour l'estimation des pénuries.

Pour contourner ce problème, un calcul a été fait en prenant en compte le débit de la Sée à Tirepiéd. Le bassin versant de la Sée à Tirepiéd englobe en effet le Glanon et donc la prise d'eau. Le suivi des débits sur cette station s'arrête au début de l'année 2006. Toutefois, dans le cadre du volet 2 (§4), le débit sur cette station a été simulé de 1994 et 2020.

Le débit naturel simulé par le modèle a été converti en débit équivalent réel, tel qu'il aurait été mesuré par la DREAL à la station, en retirant l'ensemble des prélèvements du bassin versant réalisés sur les sources et les rivières et en ajoutant l'ensemble des rejets réalisés en rivière.

Le débit réservé pris en compte pour le calcul est le 10^{ième} du module de cette chronique soit 0.579m³/s (sur la période 1994-2005). A titre de comparaison le 10^{ième} du module calculé sur la chronique de débit mesuré par la DREAL sur la même période est 0.619m³/s. L'écart entre le 10^{ième} du module mesuré et simulé est donc de 6%.

La prise en compte du débit simulé permet de couvrir la période 2006-2020 non couverte par les mesures de la DREAL.

La Figure 18 montre que le 10^{ième} du module de la Sée à Tirepiéd est respecté sur toute la période 1994-2020. Ce résultat est à prendre avec précaution dans la mesure où le débit réservé simulé est légèrement plus faible que le débit réservé mesuré, ce qui entraîne une sous-estimation des éventuelles pénuries.

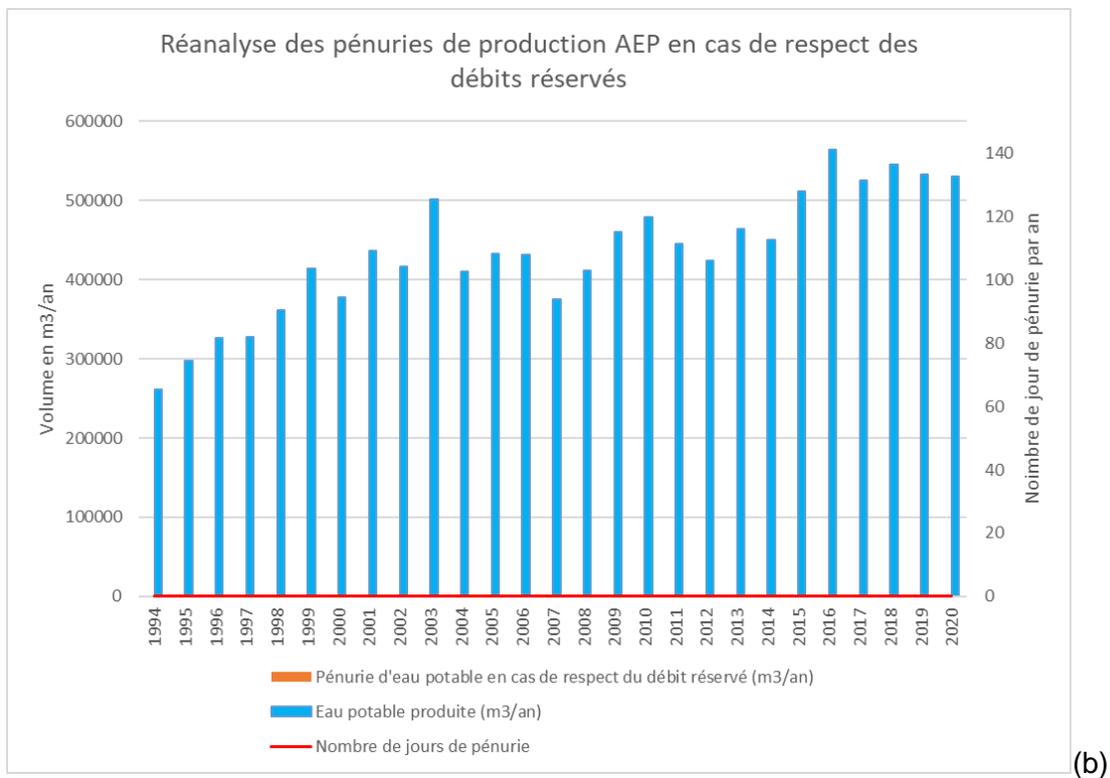
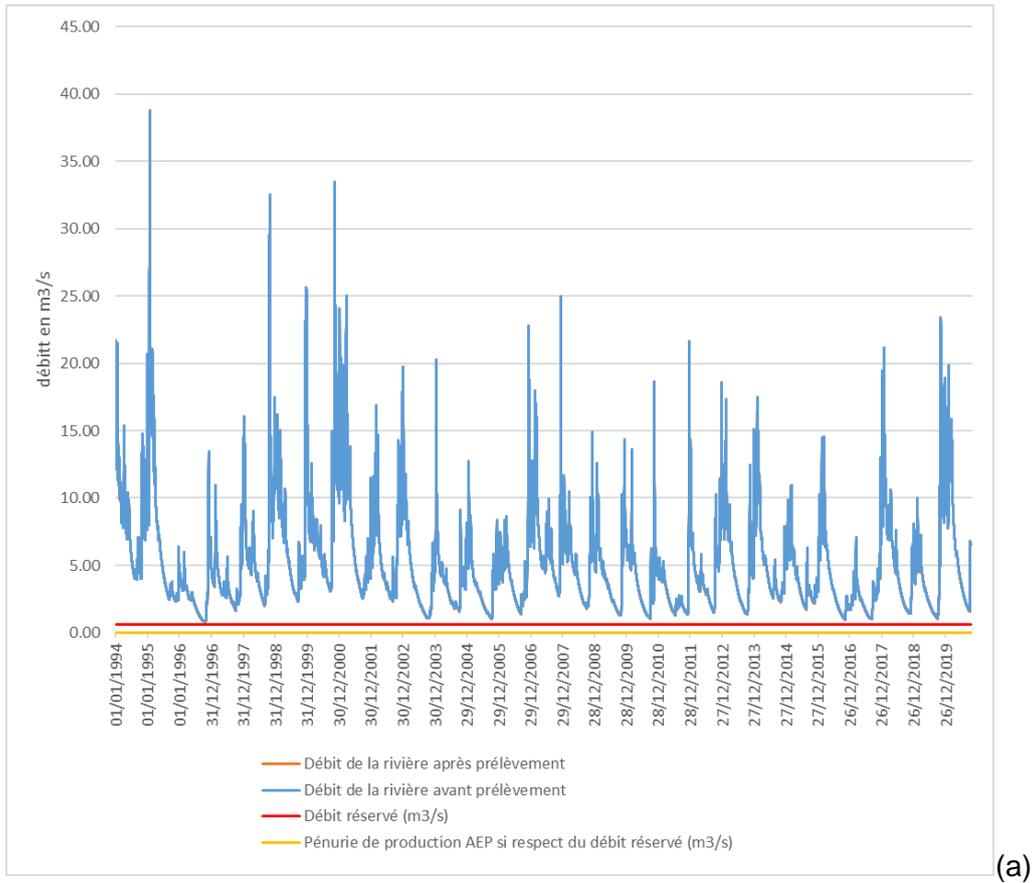


Figure 18 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de CUVES (LE GLANON, affluent de la Sée) - BSS000RBLX. Calcul réalisé sur la Sée à Tirepiéd : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel

- e) Captages de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY

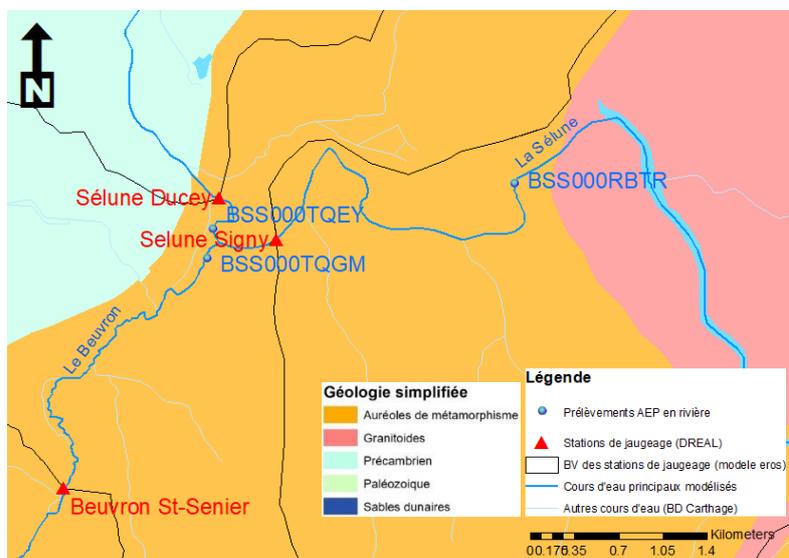


Figure 19 : Localisation des prises d'eau de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY par rapport aux stations de jaugeage de la DREAL

Ces trois captages sont les prises d'eau situées les plus à l'aval du grand bassin versant de la Sélune. La prise d'eau de MONTMOREL (La Sélune) BSS000TQEY a été arrêtée en 2001. Les deux autres prises d'eau : Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR et la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM, sont toujours actives et sont gérées de façon conjointe par le SDEAU, les débits étant parfois prélevés en totalité sur l'une des deux ou de façon répartie sur les deux. Aucune de ces prises d'eau ne dispose de débits réservés.

La station hydrométrique de la Sélune à Signy n'est pas exploitable d'un point de vue hydrologique du fait de l'influence du Barrage EDF à l'amont (cf. § 4.3.2). En revanche la station fictive de la Sélune à Ducey (à l'aval du Beuvron) obtenue par somme pondérée des stations du Beuvron à Saint-Senier et de la Sélune à Signy a étonnamment montré de très bons coefficients d'ajustement lors de la modélisation (cf. § 4.3.2. A défaut d'une station hydrométrique réelle existante à l'aval du BV de la Sélune, c'est donc le 10^{ème} du module de cette station fictive qui a été utilisée pour comme débit réservé pour la somme de ces trois prises d'eau.

Avec toutes les précautions qu'il convient de prendre du fait de l'utilisation d'une station hydrométrique fictive, la Figure 24 montre que le 10^{ème} du module de la Sélune à l'aval de la confluence avec le Beuvron est respecté sur quasiment toute la période 1994-2020 à l'exception de l'année 1997 (pénurie de 19 jours – 14 914 m³/an).

Une fois les barrages totalement effacés, la station de la Sélune à Signy retrouvera une signification hydrologique et permettra de faire une analyse plus fiable pour ces prélèvements.

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

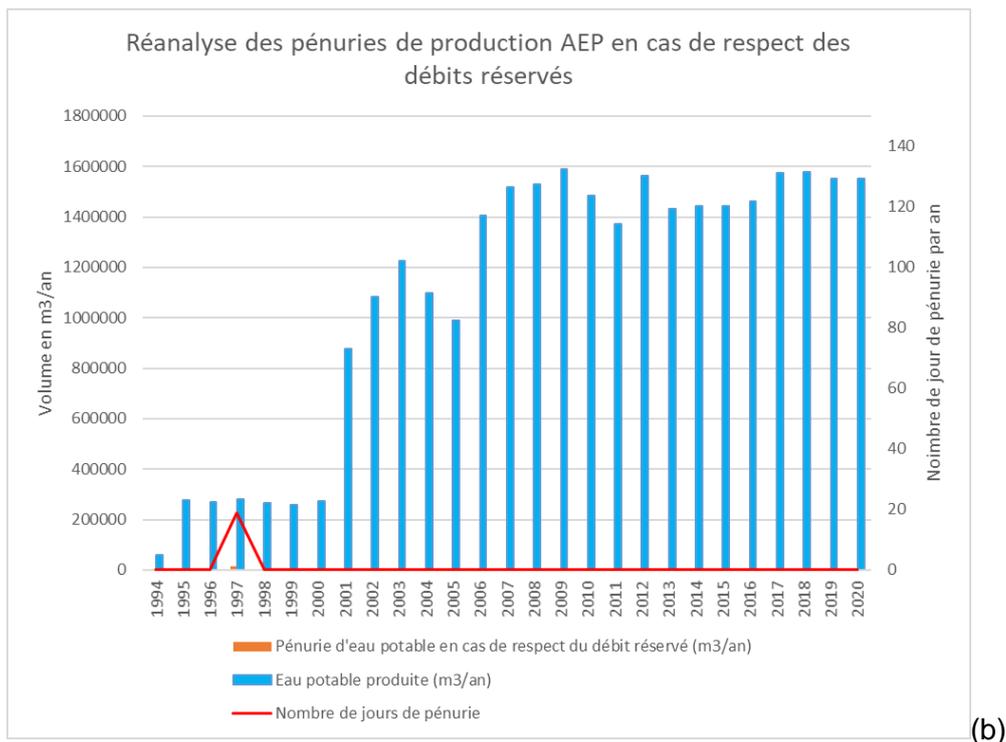
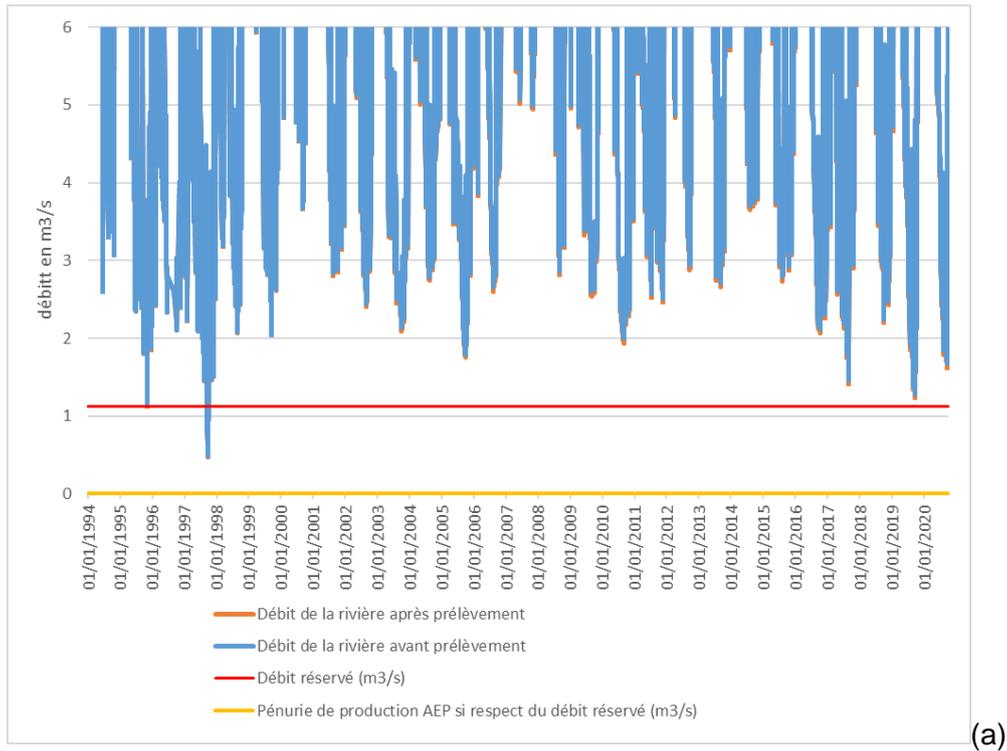


Figure 20 : Résultat des estimations des pénuries de production d'eau potable en cas de respect des débits réservés pour les prises d'eau de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY : (a) pas de temps journalier ; (b) pas de temps annuel

3.4. CONCLUSION DU VOLET 1

Ce premier volet de l'étude a consisté à établir un retour d'expérience de l'incidence sur la production d'eau potable des épisodes de sécheresses récents notamment la sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017. Il a en particulier permis d'estimer les pénuries d'eau potable (en termes de quantité d'eau manquante et de nombre de jours de pénurie) qui auraient eu lieu si les débits réservés avaient été respectés.

Ces analyses ont montré que pour certaines rivières, la pression des prélèvements qui sont actuellement réalisés ou qui ont pu l'être dans le passé, étaient et sont compatibles avec le respect des débits réservés (ou du 10^{ième} du module de la rivière pour les prises d'eau ne disposant pas de débit réservé défini). C'est le cas par exemple des prélèvements réalisés dans les bassins versants de la Braize et de la Sée.

Dans d'autres cas, le respect des débits réservés aurait provoqué des pénuries de production d'eau potable lors de certains épisodes de sécheresse. C'est le cas du bassin versant du Thar, où des pénuries sont mises en évidence sur 5 des 27 années étudiées (période 1994-2020). Cela correspond à une fourchette de 8 à 29 jours par an de pénurie d'eau (représentant un volume allant de 230 à 29 000 m³/an) selon les années.

Enfin, il existe un cas plus critique, où le débit de la rivière est parfois même naturellement en-dessous du débit réservé. Il s'agit du cas de la Sélune amont (à Notre-Dame-du-Touchet). Les prélèvements réalisés en rivière viennent alors augmenter la fréquence de dépassement naturel du débit réservé. Ainsi pour les prises d'eau de la Sélune amont (et ses affluents), le respect du débit réservé fait apparaître des pénuries sur 17 des 27 années étudiées (période 1994-2020), soit 62% des années étudiées. Ces pénuries peuvent atteindre pour les pires années jusqu'à 114 jours de pénurie et 362 000 m³/an.

Attention toutefois, ces conclusions sont à prendre avec précaution car des hypothèses ont dû être formulées afin de combler des lacunes de connaissance (cf. limites de la démarche présentées au §5), dont, l'une d'entre elles, est que les suivis des débits de rivières disponibles sont rarement réalisés au droit de la prise d'eau. Les 10^{èmes} du module calculés ne correspondent alors sans doute pas exactement au 10^{ième} du module réel au droit de la prise d'eau.

Le second volet de l'étude qui suit, a pour objectif d'analyser l'évolution de la ressource en eau superficielle dans le contexte du changement climatique pour estimer les tensions éventuelles à venir sur la production d'eau potable à l'horizon 2050.

4. Volet 2 : Estimation des tensions sur la production d'eau potable à l'horizon 2050 dans les bassins versants du Sud Manche

4.1. METHODOLOGIE GENERALE

Ce volet 2 consiste à analyser l'évolution de la ressource en eau superficielle dans le contexte du changement climatique pour estimer les tensions éventuelles à venir sur la production d'eau potable à l'horizon 2050. Ce travail est réalisé à l'aide de plusieurs modèles globaux construits au niveau de stations de jaugeages disponibles dans les différents bassins versants. Ces modèles sont structurés et calés sur la base des chroniques de données existantes, notamment de débits des rivières et de niveaux piézométriques. Les modèles globaux sont réalisés avec le logiciel EROS (cf. § 4.2) : il s'agit de modèles individuels ou de modèles emboîtés (semi-spatialisés) pour le cas des bassins versants disposant de plusieurs points de contrôle du débit.

Une fois ces modèles calés, les projections climatiques les plus adaptées aux conditions climatiques de la Normandie ont été récupérées depuis les plateformes disponibles (<http://www.drias-climat.fr/>) et utilisées pour forcer les modèles globaux et analyser leurs impacts en termes de débits, à l'horizon 2050.

4.2. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT DU MODELE EROS

Le code de calcul EROS (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins) est un modèle hydrologique global « pluie – débit - niveau » spatialisé dédié à la simulation de grands bassins. Il permet la modélisation des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques des aquifères de bassins versants hétérogènes (différences de pluviométrie et d'ETP, d'occupation du sol, de taux de ruissellement et donc d'infiltration, de débits d'échanges, etc.), par une grappe de modèles hydrologiques globaux emboîtés modélisant chacun un sous bassin versant (Thiéry, 2018).

La zone d'étude est décomposée en un certain nombre de sous bassins composant une grappe et reliés entre eux par une relation d'arborescence. On affecte à chaque sous bassin un numéro d'ordre. La Figure 21 présente un exemple schématique d'un bassin formé de 9 sous bassins (numérotés de 1 à 9).

La partie gauche est un plan du bassin versant et la partie droite montre l'arborescence correspondante. Dans cet exemple, on dispose de 5 points d'observations : à l'exutoire des sous bassins n° 1, 2, 3, 6 et 9. On remarque que 3 « points de jonction » ont été introduits : en aval des sous bassin 4 et 5, du sous bassin 7 et en aval du sous bassin 8. Ces 3 points de confluence (de superficie égale à zéro) ont été introduits pour permettre le calcul des débits (mais pas des niveaux piézométriques car il s'agit de point de jonction sans surface et donc sans bilan hydroclimatique).

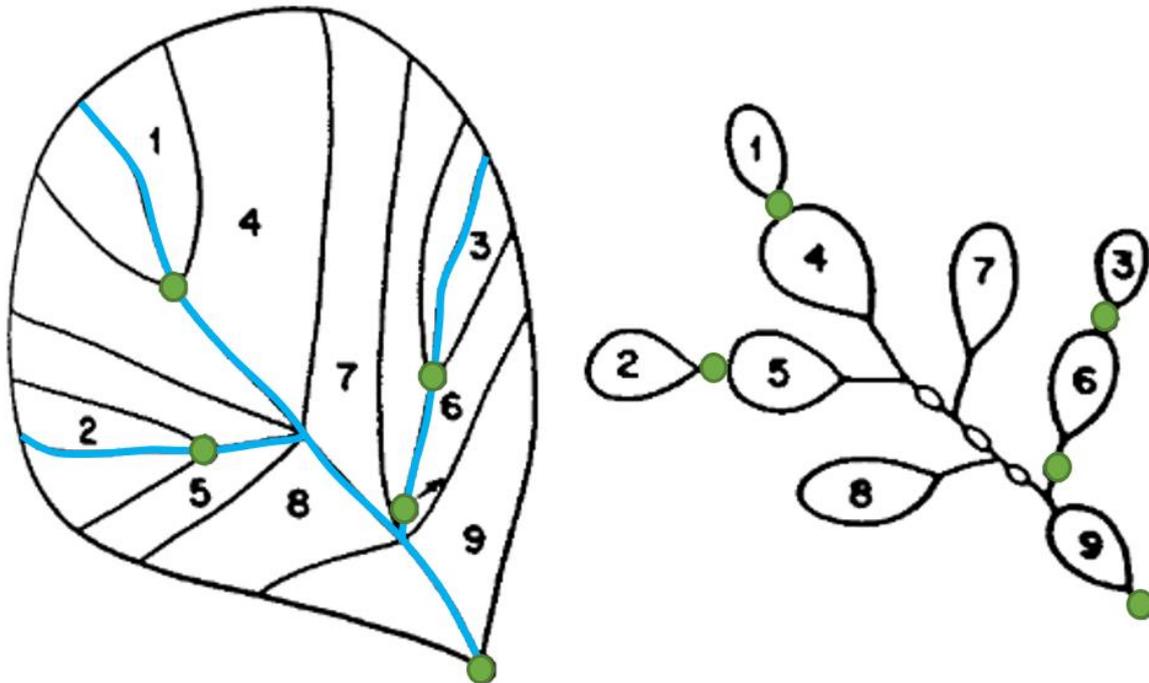


Figure 21 : Exemple d'application d'un bassin complexe décomposé en 9 sous bassins (Thiéry, 2018)

Chaque sous bassin est schématisé par un modèle hydrologique global avec ses paramètres propres. Le débit calculé à l'exutoire des sous bassins amont arrive directement dans le sous bassin aval et chaque exutoire peut être :

- un point d'observation : on y dispose d'une chronique de débits d'observation et/ou de chroniques de niveaux piézométriques ;
- un point d'édition : on ne connaît pas le débit mais on veut le déterminer ;
- un point intermédiaire.

Le comportement d'un sous bassin est représenté par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres.

Ce modèle simule le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade (modèle GARDÉNIA ; Thiéry, 2014 ; Thiéry, 2015) (Figure 22 et Figure 23) :

- les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide et la recharge vers la zone nappe ;
- une ou deux zones aquifères qui produisent un écoulement lent.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont :

- régis par des lois simples ou fonction de transferts non linéaires (particulières à chaque réservoir) ;
- contrôlés par les paramètres des modèles (réserve utile, temps de transferts, seuils de débordement, etc.).

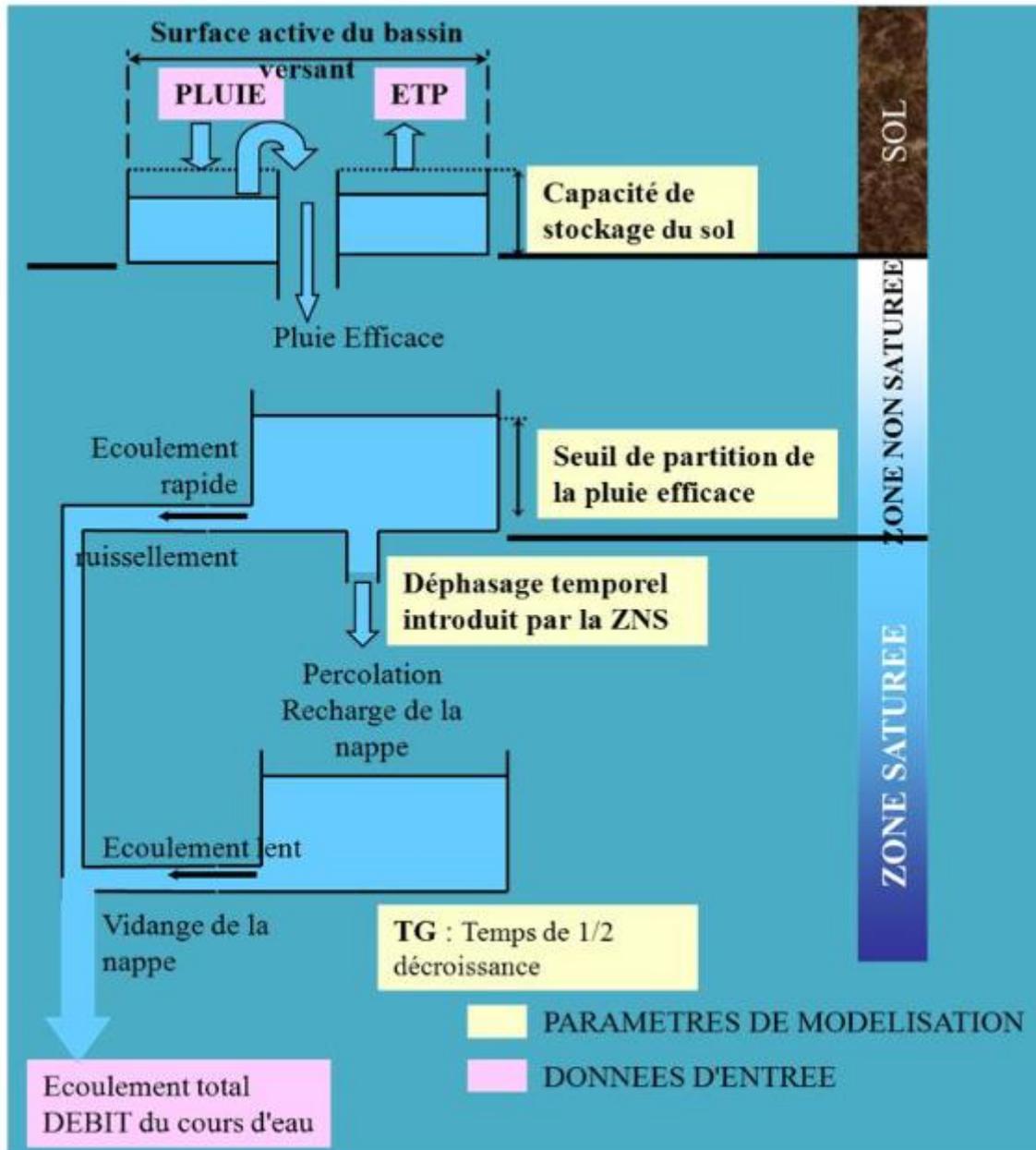


Figure 22 : Schéma de fonctionnement pour un sous bassin, modèle hydrologique global à réservoir (Gardenia ou EROS)

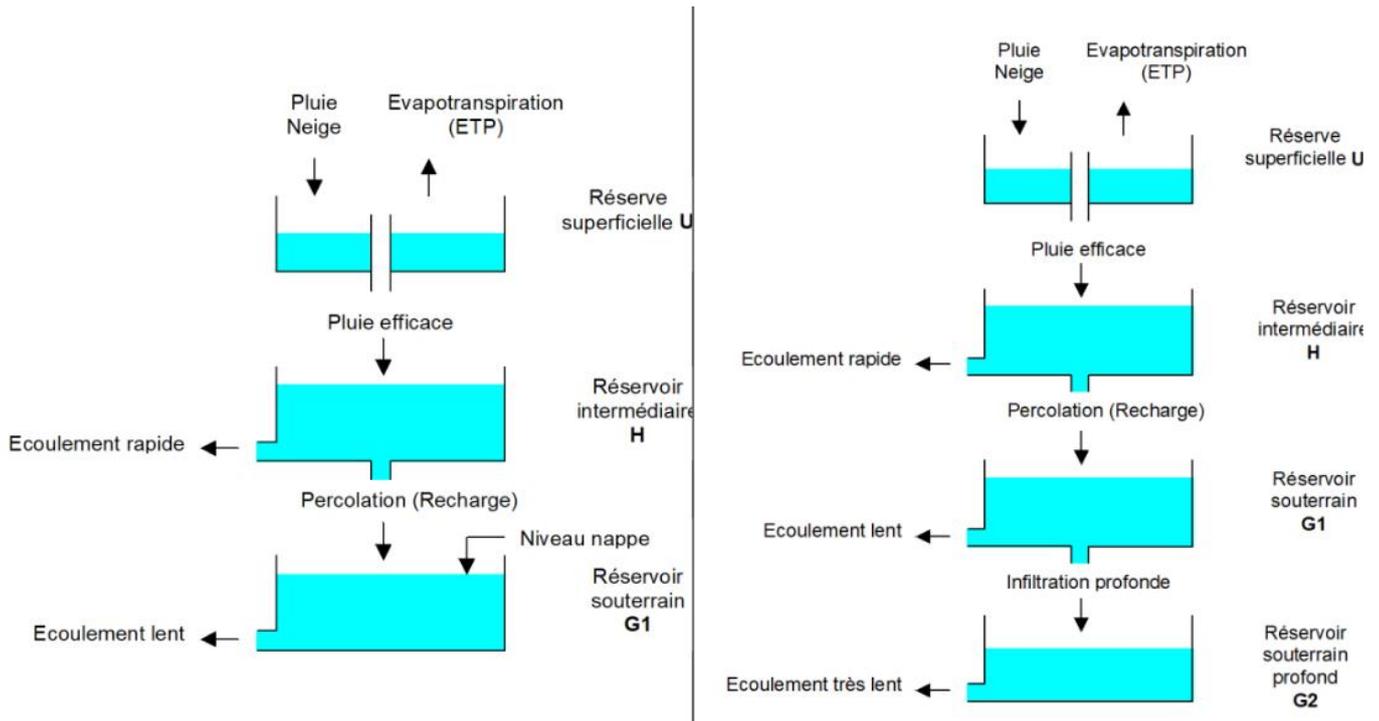


Figure 23 : Schéma de fonctionnement pour un (à gauche) ou deux (à droite) réservoirs souterrains (Thiéry, 2018) pour GARDENIA ou EROS

Notons que dans ce type de modèle, comme pour le modèle GARDENIA, toutes les données d'entrée (données météorologiques, débits d'exportations, débits d'importations) doivent être sans lacune d'observation. Par contre, il est possible d'avoir des lacunes dans les données de sortie (débits des cours d'eau). Cette souplesse permet de prendre en compte de longues périodes de calage donc représentatives des grandes fluctuations interannuelles climatiques (notamment pluviométriques) et des potentialités des aquifères (effet « mémoire »).

Dans ce type de modèle, on prend en compte implicitement mais globalement, par le biais du débit global des rivières, les apports par les principaux aquifères contributifs aux débits des cours d'eau.

4.3. COLLECTE ET ANALYSE DES DONNEES DISPONIBLES ET REALISATION DU MODELE CONCEPTUEL

Le modèle conceptuel est réalisé en fonction des bassins versants topographiques, du réseau hydrographique et de ses aménagements, des entités hydrogéologiques (masses d'eau souterraines, BDLisa), ainsi que des données disponibles au sein de ces entités. Le principe est de découper le bassin versant en un certain nombre de bassins élémentaires homogènes qui seront associés par une relation d'arborescence.

La Figure 24 représente le réseau hydrographique et hydraulique des bassins versants du Sud Manche modélisés avec la position des principales stations hydrométriques de la DREAL et les limites des sous-bassins versants topographiques correspondants.

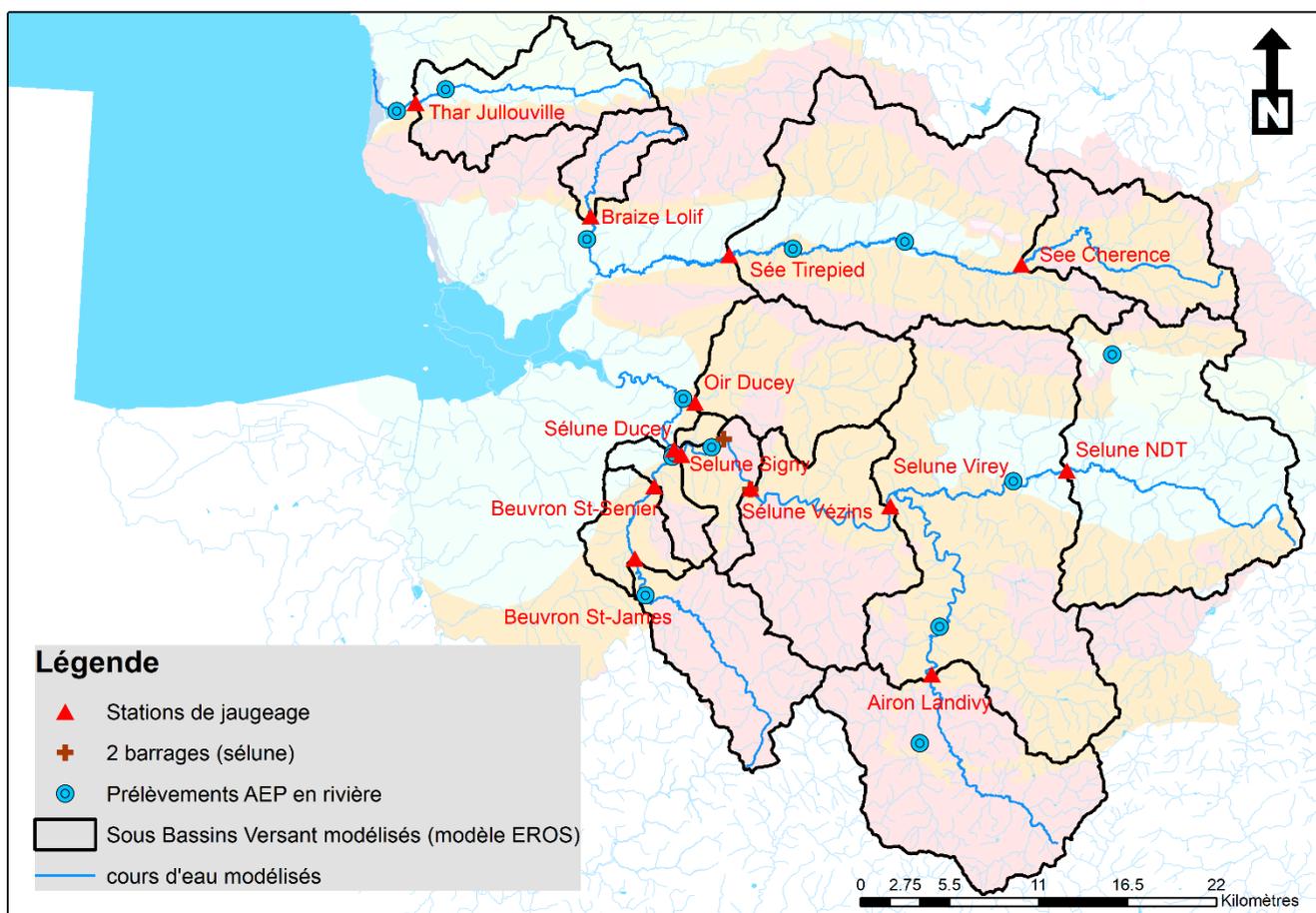


Figure 24 : Carte générale du réseau hydrologique, des aménagements hydrauliques et des stations de jaugeage disponibles (stations en service ou abandonnées). La légende du fond de carte géologique est présentée sur la Figure 1.

4.3.1. Données météorologiques

Les données de pluie et d'ETP « SAFRAN » (Vidal et al. 2010) de météo-France ont été utilisées pour ce modèle EROS. Safran est un système d'analyse à méso-échelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire, au pas de temps horaire, les paramètres suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). Les pluies et ETP SAFRAN ont été utilisées au pas de temps journalier dans le modèle EROS.

Les chroniques pluie et ETP ont été extraites de la publitèque de Météo-France (fichiers disponibles par décennies pour l'ensemble des mailles du territoire Français pour la période 1958 à 2020). Un script Python a été développé pour extraire de ces fichiers de données la trentaine de mailles qui concernent la zone d'étude et reconstituer des séries temporelles de pluie et d'ETP pour chacune de ces mailles.

Une chronique moyenne de pluie et d'ETP a ensuite été calculée pour chaque sous bassin versant modélisé, en calculant la moyenne pondérée de chaque maille SAFRAN au prorata de la part de sa surface incluse dans le sous-BV.

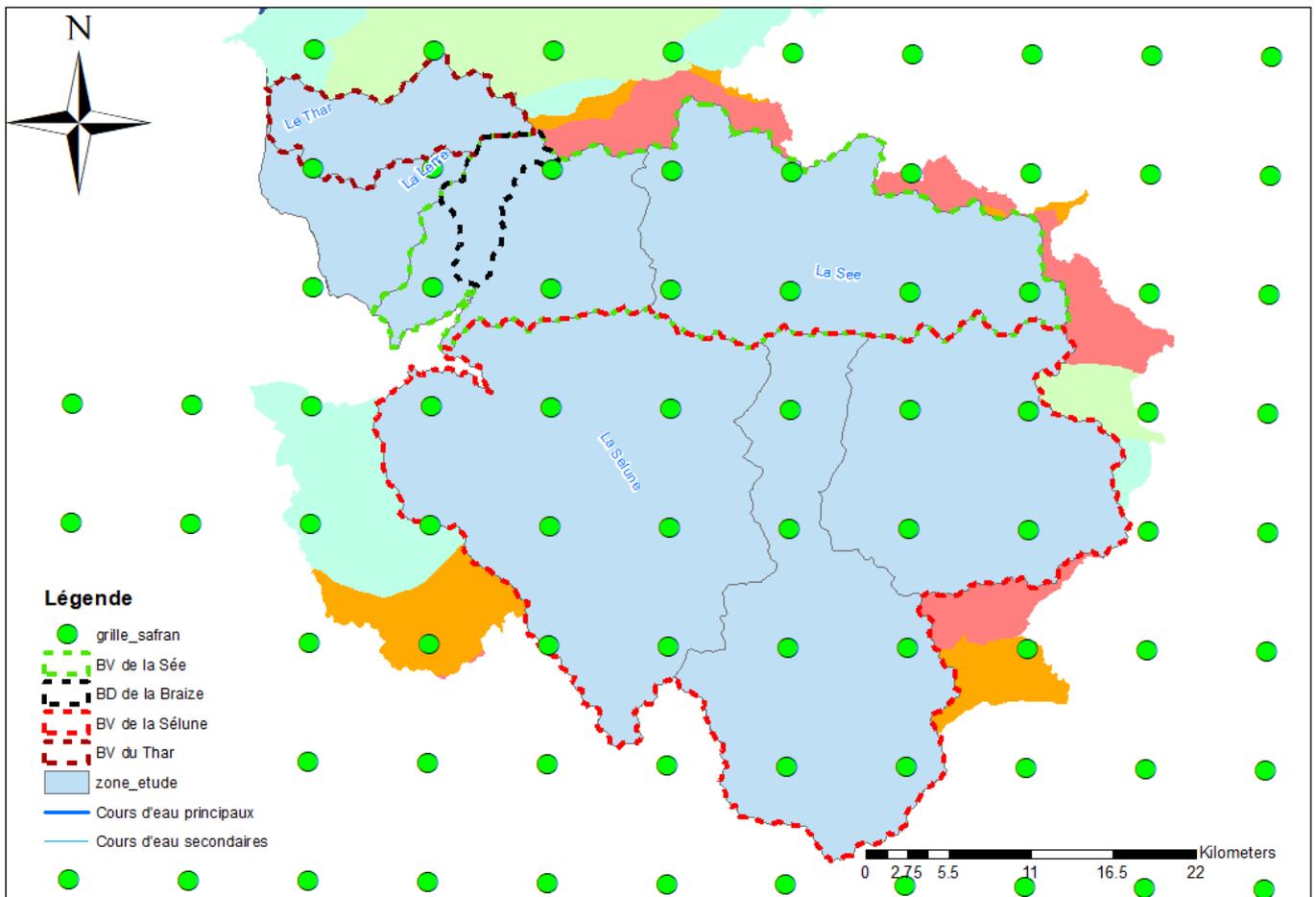
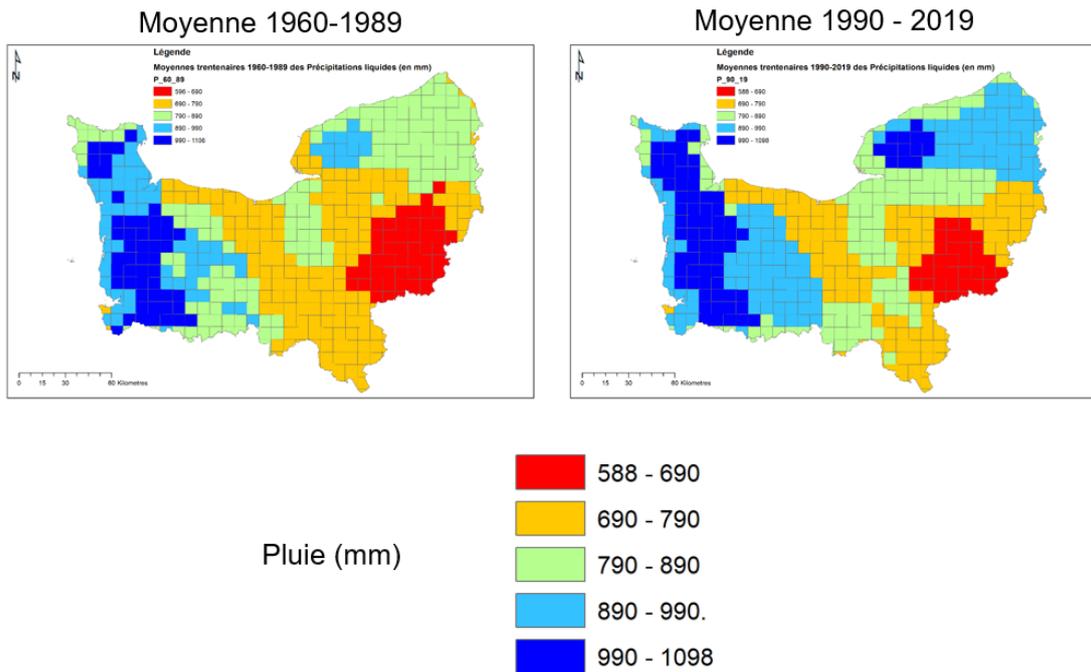


Figure 25 : Carte des mailles SAFRAN dans le secteur d'étude, représentées par leur centroïde (point vert correspondant au centroïde de chaque maille SAFRAN de dimension 8km x 8km)

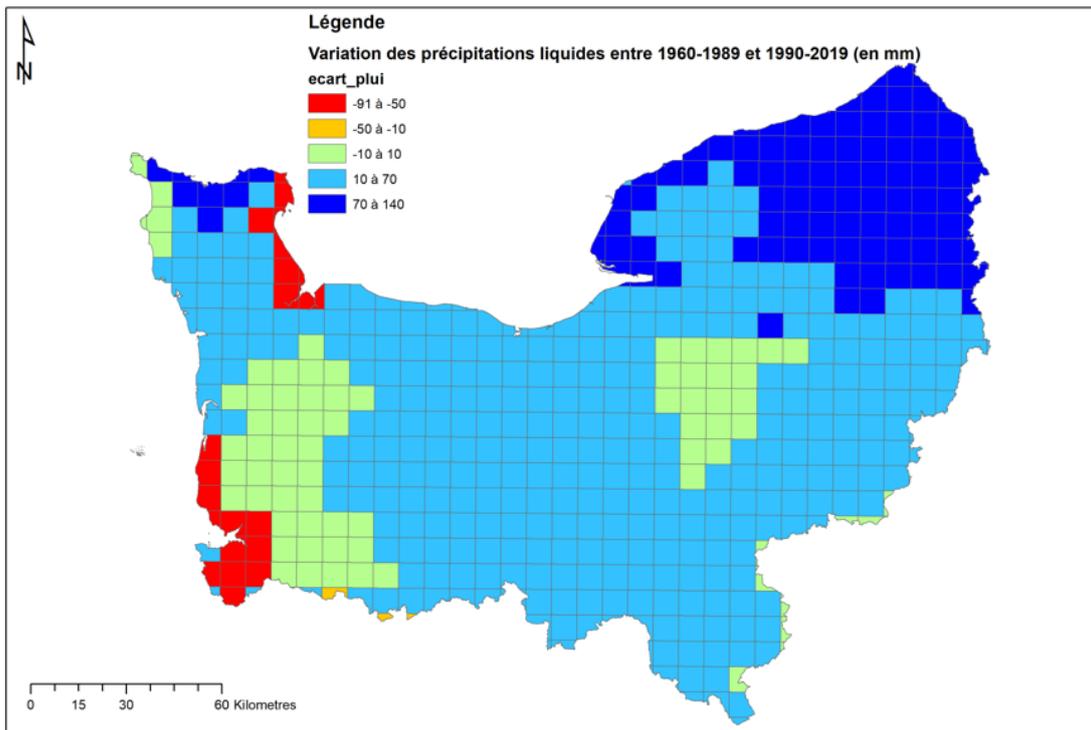
L'analyse de ces données (Figure 26a) montre que la zone d'étude (Sud Manche) est l'un des secteurs le plus arrosé de Normandie avec des moyennes trentenaires de Précipitation de l'ordre de 890 à 1098 mm/an. La comparaison des moyennes trentenaires de 1960-1989 et 1990-2019 (Figure 26b) montre une augmentation globale des précipitation sur la Normandie mais une baisse de la pluviométrie de 50 à 90 mm/an sur la zone littorale de la zone d'étude, la pluviométrie étant relativement stationnaire sur le reste de la zone d'étude.

La comparaison des moyennes trentenaires de l'Evapotranspiration potentielle (ETP) de 1960-1989 et 1990-2019 (Figure 27b) montre dans la même période une augmentation de l'Evapotranspiration dans la zone d'étude (passant d'une fourchette de 610 à 700mm/an à une fourchette de 700 à 790 mm/an).



Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE

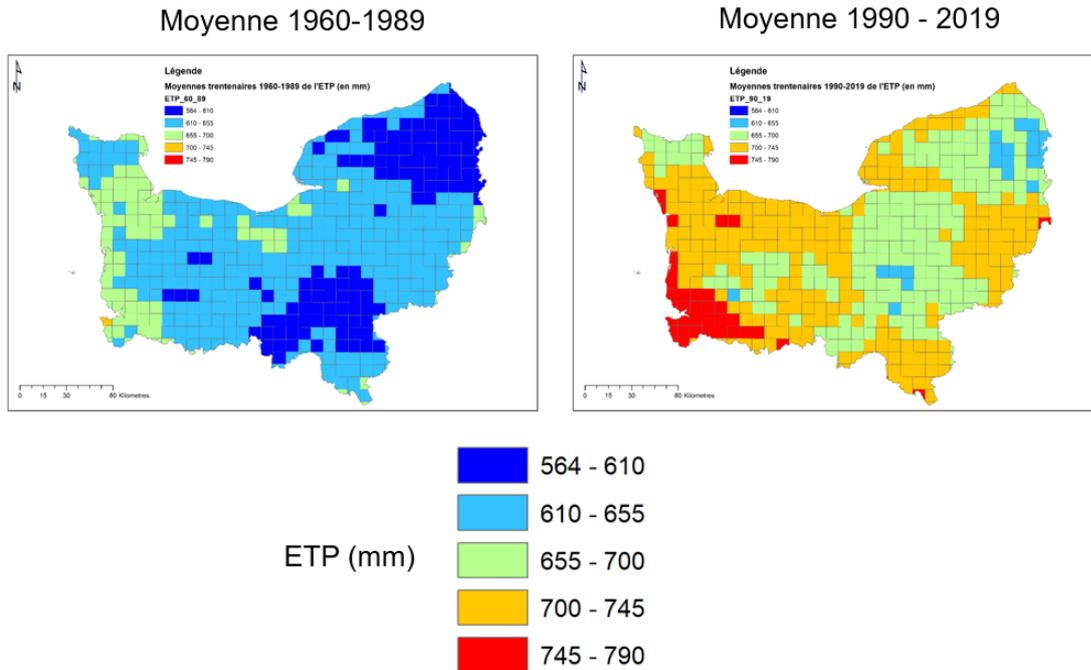
(a)



Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE

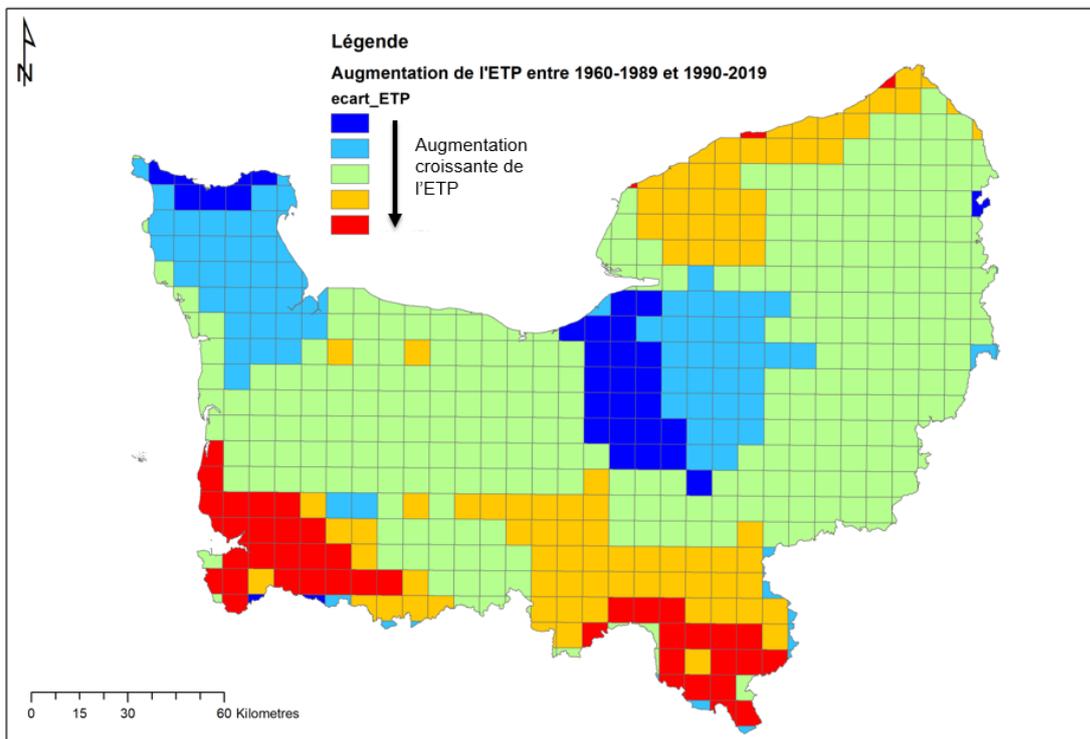
(b)

Figure 26 : Evolution des précipitations sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes



Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE

(a)



Cartes réalisées par le BRGM à partir des données SAFRAN – publithèque METEO FRANCE

(b)

Figure 27 : Evolution de l'Evaporation Potentielle (ETP) sur le territoire de la Normandie de 1960 à 2019 (données SAFRAN – Météo France) : (a) cartes moyennes trentenaires 1960-1989 et 1990-2019 ; (b) évolution entre ces deux périodes

4.3.2. Données hydrométriques

Les données de débit des 16 stations hydrométriques de la DREAL ont été récupérées auprès de la banque hydro et de la DREAL (Tableau 1).

Code station	Nom de la station	Producteur	Début	Débit journaliers récupérés	
				Début chronique	Fin chronique
I9031010	La Selune a Notre-Dame-du-Touchet	DREAL Normandie	1991	10/03/1991	09/10/2020
I9221010	La Sélune à Ducey [Vézins]	DREAL Normandie	1933 - 2014	01/01/1933	31/12/2016
I9241010	La Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron]	DREAL Normandie	1994 – 2018 ?	01/01/1994	13/10/2020
I9221020	La Selune a Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy]	DREAL Normandie	1990	04/07/1990	13/10/2020
I9122020	L'Airon a Landivy	DREAL Normandie	1998	21/10/1998	07/10/2020
I9253010	L'Oir a Ducey (lacune entre 10/05/20014 et 11/02/2012)	DREAL Normandie	1986	16/05/1986	09/10/2020
I9253020	L'Oir à Ducey	DREAL Normandie	2004	11/05/2004	24/02/2013
I9233010	Le Beuvron à Saint-Senier-de-Beuvron	DREAL Normandie	1993	01/01/1994	13/10/2020
I9233040	Le Beuvron à Saint-James [Moulin du Prieur]	DREAL Normandie	2009	24/09/2009	09/09/2020
I9122010	L'Airon à Louvigné-du-Désert [Moulin du Pont]	DREAL Normandie	1973	01/01/1973	08/07/2002
I8002010	Sée à Chérencé-le-Roussel	DREAL Normandie	1993	26/06/1993	07/10/2020
I8032020	La Sée à Tirepied [CD 104]	DREAL Normandie	1993	26/06/1993	01/01/2006
I8033810	La Braize à Lolif	DREAL Normandie	1991	08/03/1991	20/09/2020
I7913610	Le Thar à Jullouville	DREAL Normandie	1970	15/09/1970	04/10/2020
I7913649	Le Thar à Jullouville [Lézeaux]	DREAL Normandie	2005	22/04/2005	31/12/2012
I7913659	Le Thar à Jullouville [Mare de Bouillon]	DREAL Normandie	2005	19/05/2005	30/12/2012

Tableau 1 : Données collectées concernant les 16 stations hydrométriques de la DREAL (banque hydro)

En complément des données de la DREAL, le BRGM a par ailleurs passé une « Convention de Fourniture de Données historiques des débits » (convention n°ID432) avec EDF afin de disposer des débits de la Sélune mesurés par EDF à la station de Virey (Moulin de Virey).

Des modèles Gardenia individuels ont été réalisés afin de tester la faisabilité de leur modélisation, notamment pour les séries temporelles de débit de la Sélune issues des stations situées à l'aval hydraulique des 2 barrages.

Il est apparu que les débits de la Sélune à l'aval des barrages étaient trop influencés pour faire l'objet d'une modélisation. Le coefficient de calage pour le modèle GARDENIA de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] (I9221020) était en effet très insuffisant (0.380) (Figure 28).

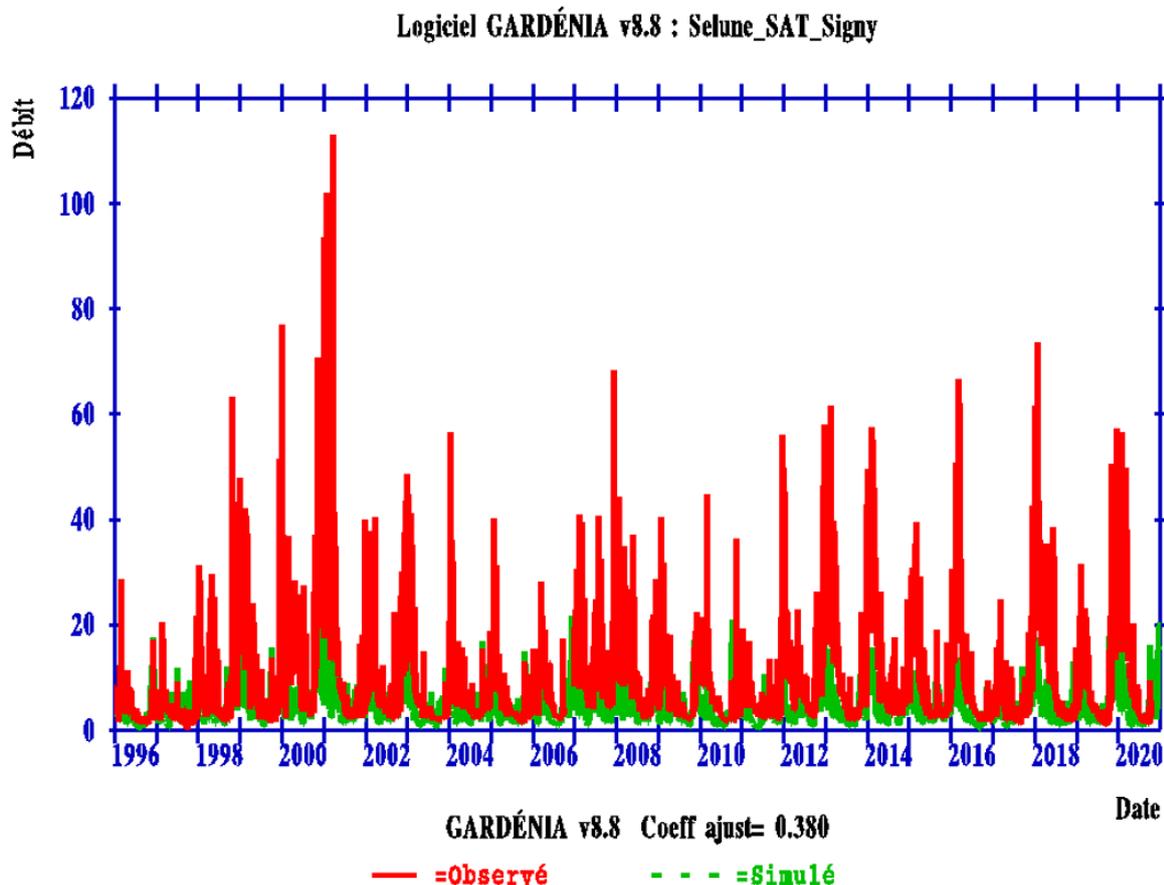


Figure 28 : Résultat du modèle Gardenia réalisé pour la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] (19221020) - comparaison du débit observé (en rouge) et du débit simulé (en vert)

Deux stations « reconstituées » ont toutefois été conservées pour la construction du modèle semi-distribué EROS car elles donnaient un calage satisfaisant avec GARDENIA. Il s'agit des stations :

- 19221010 : La Sélune à Ducey [Vézins]
- 19241010 : La Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron]

La station de la Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron] est une station fictive de la DREAL dont les données sont mises en ligne sur le portail de la banque hydro. Cette station fictive est obtenue par la somme pondérée des stations amont suivantes :

- 19221020: La Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] – coefficient 1
- 19233010: Le Beuvron à Saint-Senier-de-Beuvron – coefficient 1.16

La station fictive de la Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron] a été retenue pour le modèle EROS car, contrairement à la station de la Sélune à Saint-Aubin-de-Terregatte [Signy] (19221020), les tests de modélisation GARDENIA ont donné des coefficients de calage satisfaisants.

Concernant la station de la Sélune « Vézins » : il s'agit de la station de suivi des débits de sortie du barrage de Vézins (bassin versant de 720 km²), dont les données sont produites par EDF. Cette chronique est ancienne et remonte à 1934, peu après la mise en service du barrage de Vézins (1932). Une telle ancienneté aurait pu a priori être très précieuse pour mener une analyse statistique robuste. La DREAL indique toutefois que, sur cette longue période, l'hétérogénéité dans le temps des règles de gestion du barrage pendant l'été ont fortement évolué, rendant cette longue chronique difficilement exploitable pour une analyse statistique dont l'objectif est d'en tirer des règles applicables pour le fonctionnement hydrologique actuel et à venir de la Sélune. Interrogé sur l'origine des données de débits mises à disposition pour la Sélune à « Vézins », EDF indique que les données correspondent aux apports naturels reconstitués (ANR) c'est-à-dire au débit qui coulerait si aucun barrage n'existait. EDF précise que les ANR sont calculés de la manière suivante : variation de réserve du lac + débit sortant du barrage (turbiné, réservé, déversé, vanne). Ces données sont issues de mesures faites sur l'exploitation puis d'abaques (mesure de la cote du barrage, mesure de la puissance turbinée, mesure de la lame d'eau déversante, etc.). L'ANR de Vézins est une somme de termes qui sont souvent issus d'abaques à partir de données mesurées. Cet ANR est produit, lissé si besoin et critiqué avec des témoins de débits naturels. EDF conclut que, même si c'est une série calculée, en débit moyen journalier, elle peut être considérée comme étant de bonne qualité. Nous avons donc retenu cette station pour la construction du modèle semi-distribué EROS, même s'il conviendra de rester prudent sur les interprétations faites des prévisions pour cette station.

Un autre élément de vigilance à retenir concerne la station de la Sée à Tirepied dont le suivi a été arrêté début 2006 du fait de la perturbation des débits en période d'étiage. Cette station a toutefois été conservée afin de combler les lacunes de suivi débitométrique de la rivière et dans la mesure où la banque hydro considère qu'elle a bien une signification hydrologique.

Concernant l'Airon à Louvigné-du-Désert (dpt 35) et Landivy (dpt 53) (I9122020) : la station de l'Airon à Landivy a été mise en service en octobre 1998. Elle a été précédée par la station de l'Airon à Louvigné-du-Désert, en service de 1973 à juillet 2002, avec une période de fonctionnement commun de près de 4 ans. Ces deux stations sont très proches (les superficies de bassin versant qu'elles drainent sont respectivement de 150 km² et 148 km²). Pour le présent rapport, c'est la chronique de l'Airon à Landivy (station toujours en activité) qui a été utilisée.

Les données des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS, ont fait l'objet d'analyses statistiques dont quelques-unes sont présentées sur les Figure 29 à Figure 31 :

- Graphique de la chronique de débit
- Calcul de la moyenne, écart type, max, min, moyenne des minima annuels
- Nombre d'années avec mesures
- Nombre de jours avec mesures
- Graphique des moyennes mensuelles
- Graphique des moyennes, mini et maxi annuels
- Boxplot par mois des moyennes mensuelles
- Périodogramme de la chronique (au pas de temps mensuel)

Les box-plots et périodogrammes montrent que les 12 chroniques de débits ont une périodicité annuelle (pic n°1 à 12 mois). Toutefois, certaines stations ont un second pic autour de 80 mois (entre 6.5 et 7 ans) avec une puissance spectrale normée relativement importante : le Beuvron à St James, le Beuvron à St Senier, l'Oir à Ducey, la Sée à Tirepied, la Braize à Lolif. Cette composante pluriannuelle est peut-être le reflet d'une contribution plus importante de la nappe aux débits de ces cours d'eau. Cette hypothèse semble être confirmée par les résultats du modèle

EROS qui montre que ces stations sont celles où les contributions relatives des eaux souterraines au débit de la rivière sont les plus importantes (cf. colonne « %Q_Souterr » du tableau de la Figure 67).

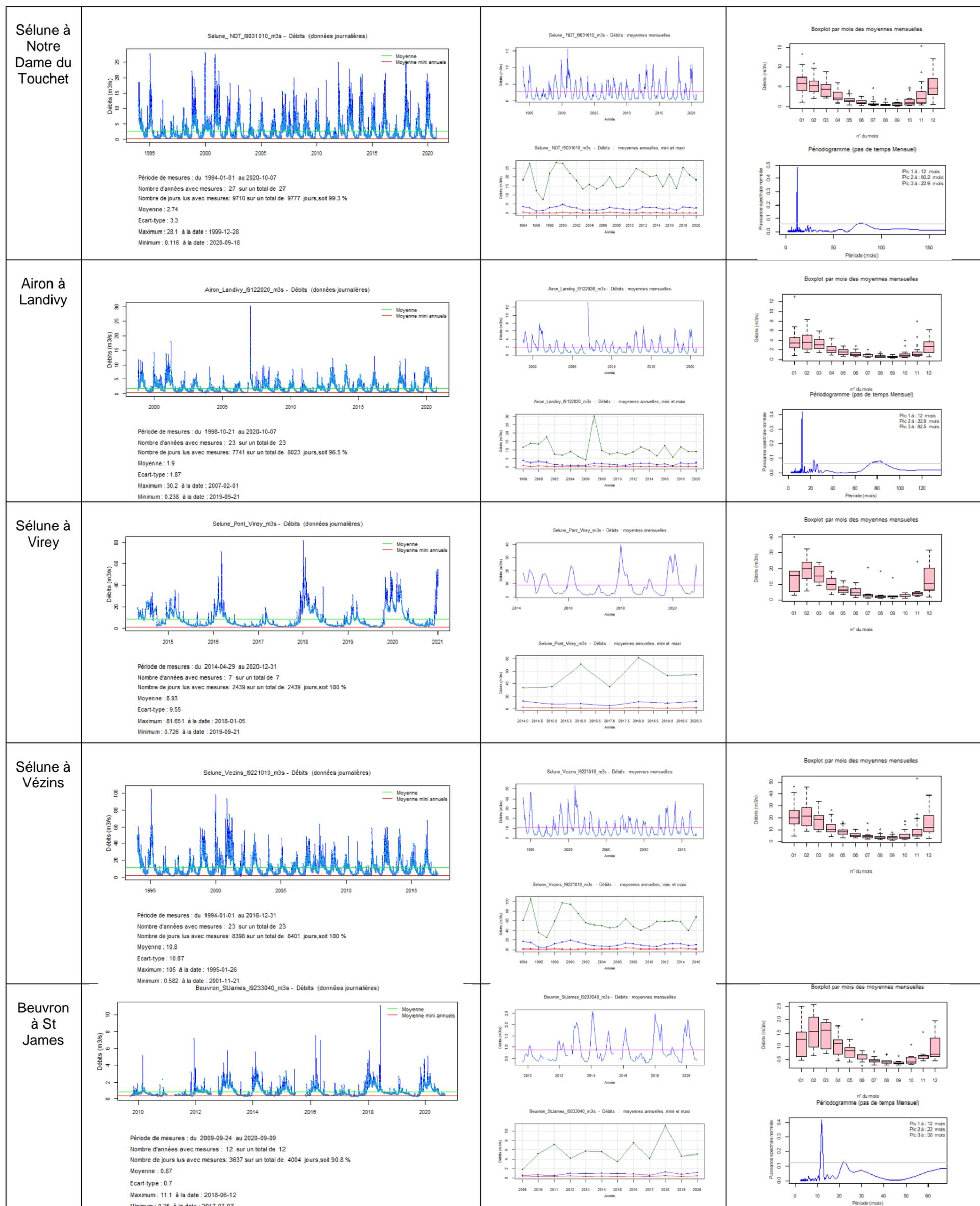


Figure 29 : Analyses statistiques de 5 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS

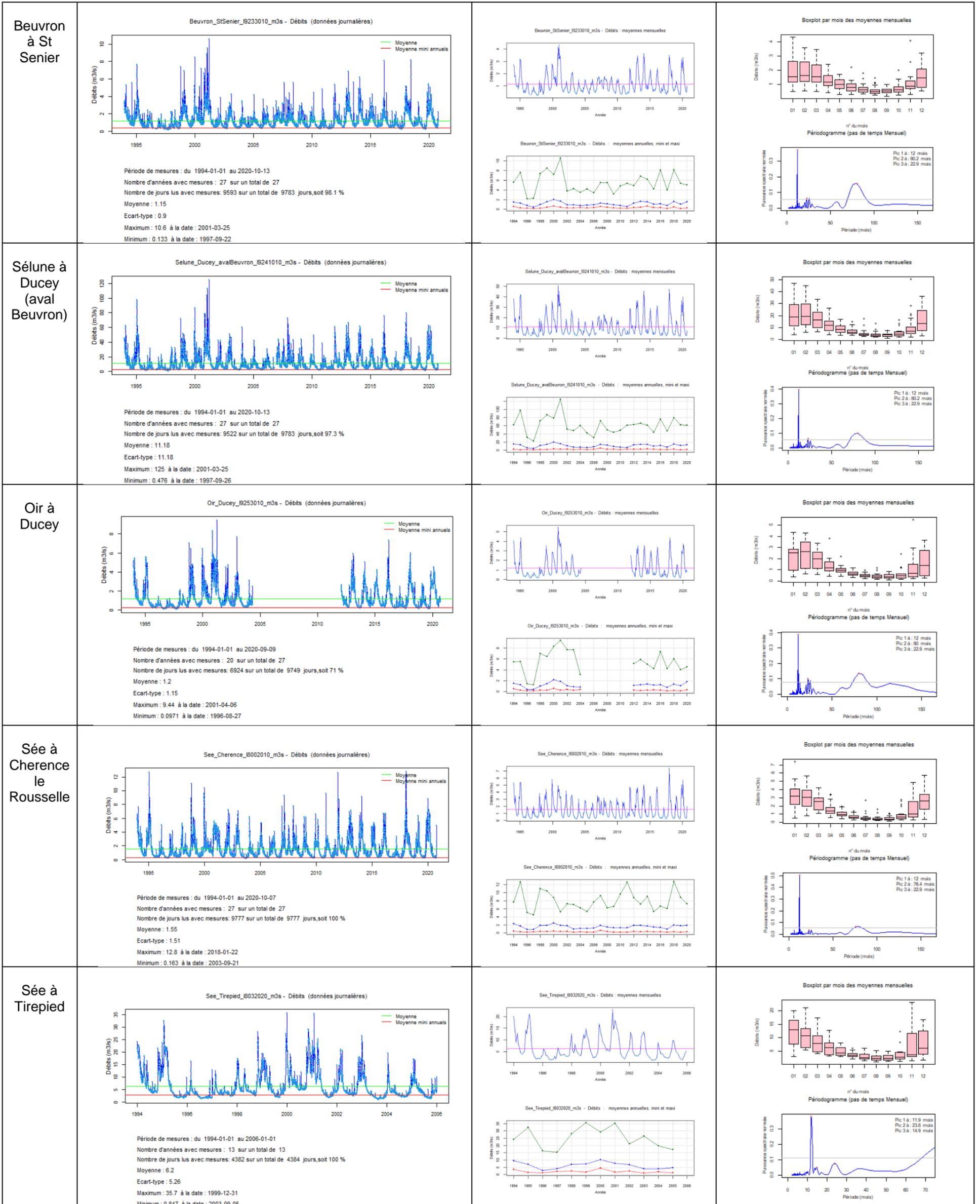


Figure 30 : Analyses statistiques de 5 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS

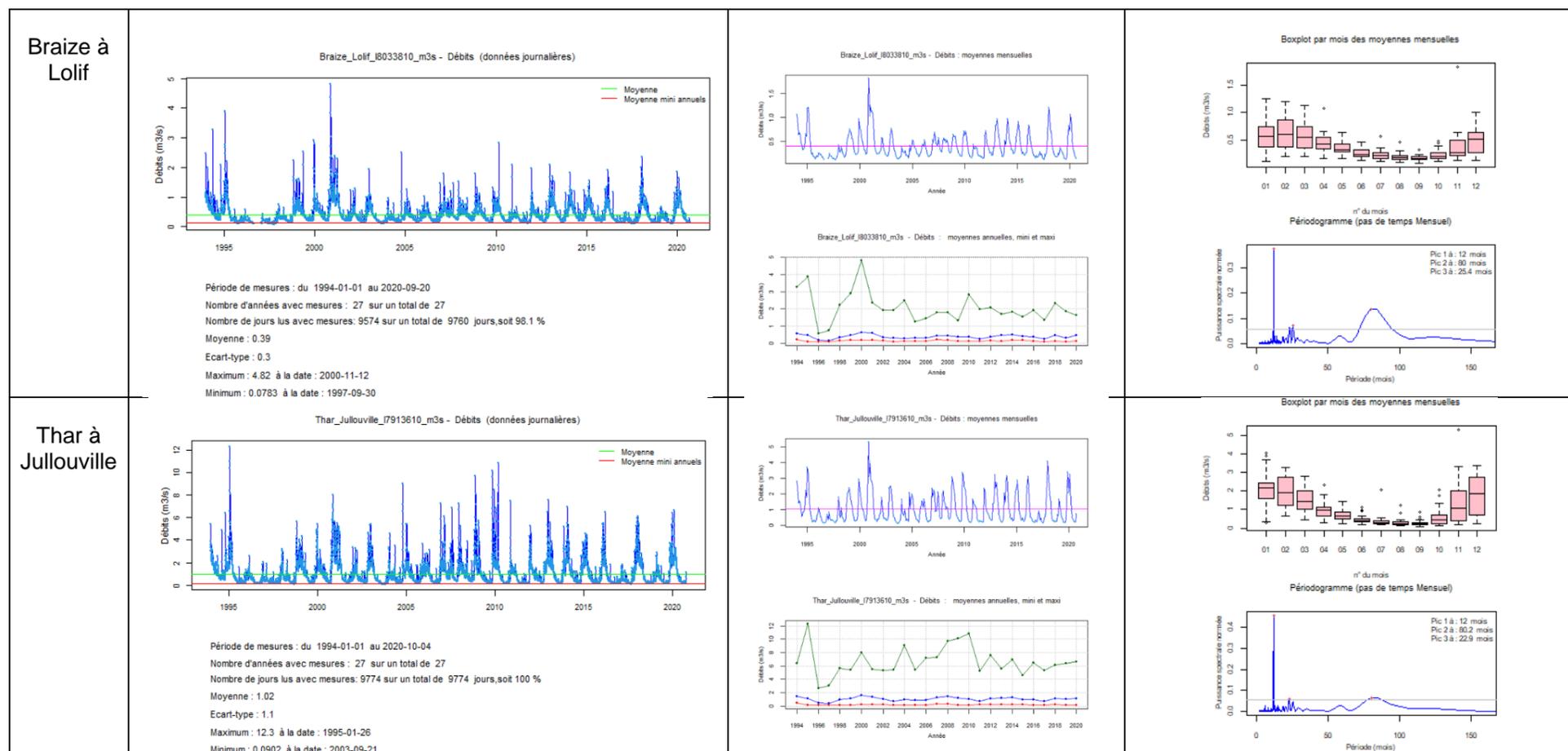


Figure 31 : Analyses statistiques de 2 des 12 stations hydrométriques retenues pour la construction du modèle semi-distribué EROS

4.3.3. Données piézométriques

Les données piézométriques disponibles sur le secteur d'étude sont uniquement les piézomètres suivis par le BRGM :

- **BV SELUNE :**
 - 02473X0037 suivi depuis 2007 à Saint Laurent de Terregate (50)
 - 02478X0156 suivi depuis juin 2016 à Louvigné-du-désert (35)
 - (02105X0025 suivi depuis 2019 à Mesnil-Rainfray (50))
- **BV de la SEE (dans ou à proximité) :**
 - 02101X0044 suivi depuis 2007 à Lingeard (50)
 - (BSS003EGRU suivi depuis décembre 2018 à Bois-Yvon (50))
 - (02105X0025 suivi depuis 2019 à Mesnil-Rainfray (50))
- **BV de la BRAIZE :**
 - Aucun ouvrage suivi en continu par le BRGM
- **BV du THAR :**
 - Aucun ouvrage suivi en continu par le BRGM mais existence du piézomètre littoral de Granville (n° 01727X0123) suivi depuis décembre 2014, situé à proximité au Nord de la limite de bassin versant.

Ces suivis sont mis en ligne sur le fédérateur de données ADES.

L'OSUR a également instrumenté récemment 3 piézomètres sur les berges de la Sélune au droit de la station de jaugeage de Saint-Aubin-de-Terregatte dans le cadre d'un projet de recherche. Toutefois, après contact pris auprès de l'OSUR, ces données ne sont pas rendues publiques ni mises en ligne sur le fédérateur national des données (ADES).

Ces piézomètres sont localisés à la Figure 32.

Les piézomètres suivis depuis fin 2018 ou 2019 ayant une chronique trop courte pour assurer un calage satisfaisant des modèles, seuls trois piézomètres sont disponibles pour le modèle EROS : 02473X0037 à Saint-Laurent-de-Terregate (50), 02478X0156 à Louvigné-du-Désert (35), 02101X0044 à Lingeard (50)

Après des tests réalisés avec ces différents piézomètres pour chaque bassin versant, il s'avère que les meilleurs coefficients d'ajustement sont obtenus avec le piézomètre 02101X0044 à Lingeard (50) pour les bassins versants Nord (Sée, Braize, Thar) et avec le piézomètre 02478X0156 à Louvigné-du-désert (35) pour les bassins versants de la Sélune et ses affluents.

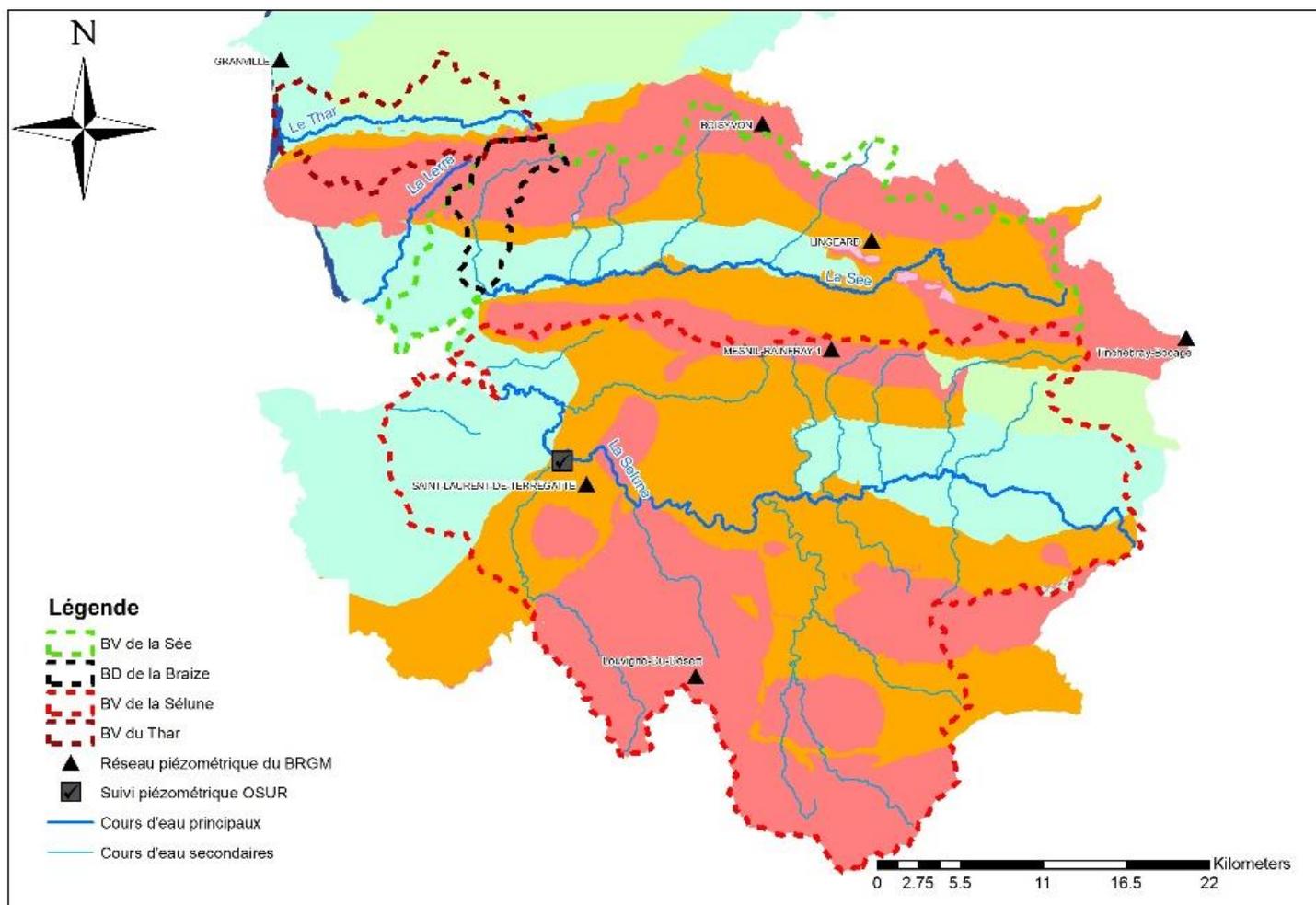


Figure 32 : Piézomètres disponibles dans la zone d'étude. La légende du fond de carte est disponible sur la Figure 1a.

4.3.4. Données de prélèvement

Un travail complexe d'inventaire des données de prélèvement a été réalisé dans le cadre de cette étude : inventaire des points de prélèvement d'une part et collecte des volumes prélevés d'autre part.

L'objectif était de collecter les données de volumes prélevés au pas de temps journalier ou à défaut mensuel ou annuel.

Inventaire des points de prélèvement

Les données collectées ont été les suivantes :

- Base de données AESN : inventaire des prélèvements AEP, Agricoles et Industriels
- Référentiel national des captages AEP (issu du croisement de la base SISEAU de l'ARS et la BSS du BRGM) : inventaire exhaustif des captages AEP ; pas de données de volume
- Base de données GEREP (DREAL) = inventaire des prélèvements Industriels (ICPE)
- Base de données BNPE (issues de la base de données AESN)

Le recoupement de ces différentes bases de données a été un travail extrêmement compliqué dans la mesure où chaque base de données possède ses propres identifiants et ne localise pas les prélèvements de façon précise. De même, chaque base de données n'utilise pas nécessairement le même nom pour un même point de prélèvement. Ainsi les recoupements entre base de données ne peuvent se faire ni de façon systématique par identifiant ou par libellé ni par un recoupement géographique. Chaque base de données a dû être traitée une à une et point par point afin d'attribuer, dans la mesure du possible, un identifiant BSS à chacun des points de prélèvements recensés. Une fois ce travail effectué, la correspondance entre les différences bases de données a pu être étudiée et un référentiel fiable des points de prélèvement a été établi.

A titre d'exemple, la base de données de l'AESN, pour la période 2008-2018, n'a rattaché à la BSS que pour 58% des captages AEP en eaux souterraines. 42% des AEP ne sont rattachés à aucun ouvrage de la banque du sous-sol. Pour la période 1994-2007, aucun des points de prélèvement recensés dans la base AESN ne sont rattachés à la BSS.

Une base de données consolidée des prélèvements a ainsi été constituée. Après compilation, 170 points de prélèvement sont recensés dans la zone d'étude, pour la période 1994-2020 (Figure 33), dont :

- 125 captages AEP ;
- 13 captages pour l'irrigation ou l'agroalimentaire ;
- 23 captages industriels ;
- 9 captages dont l'usage n'est pas renseigné.

L'objectif de cette base de données consolidées et du rattachement de chaque point de prélèvement à la BSS, était de pouvoir distinguer la nature des points de prélèvements en termes de ressource sollicitée (eaux de surface, puits-forages (=Eaux souterraines), sources (=Eaux souterraines)) afin de pouvoir reconstituer des débits pseudo-naturels des différents cours d'eau en corrigeant les débits mesurés par les prélèvements ayant un impact direct sur le débit (prélèvements en rivière ou sur les sources). La carte des points de prélèvement classés par nature est présentée sur la Figure 34. La zone d'étude compte ainsi (ou a compté dans le passé sur la période 1994-2020) :

- 16 points de prélèvements en rivière (dont 13 AEP)
- 68 points de prélèvement sur des sources

Le tableau de synthèse pour les prélèvements en rivière indiquant la correspondance entre les codes des différentes bases de données est présenté sur la Figure 35.

Malgré ce travail important de recoupement de ces différentes bases de données, il convient de souligner que le recensement n'est pas exhaustif. Par exemple, cette base de données n'inclut pas les prélèvements pour l'abreuvement des animaux, données non disponibles au moment de l'étude et faisant l'objet d'un recensement spécifique, en cours, par la chambre d'agriculture de la Manche dans le cadre du PGRE.

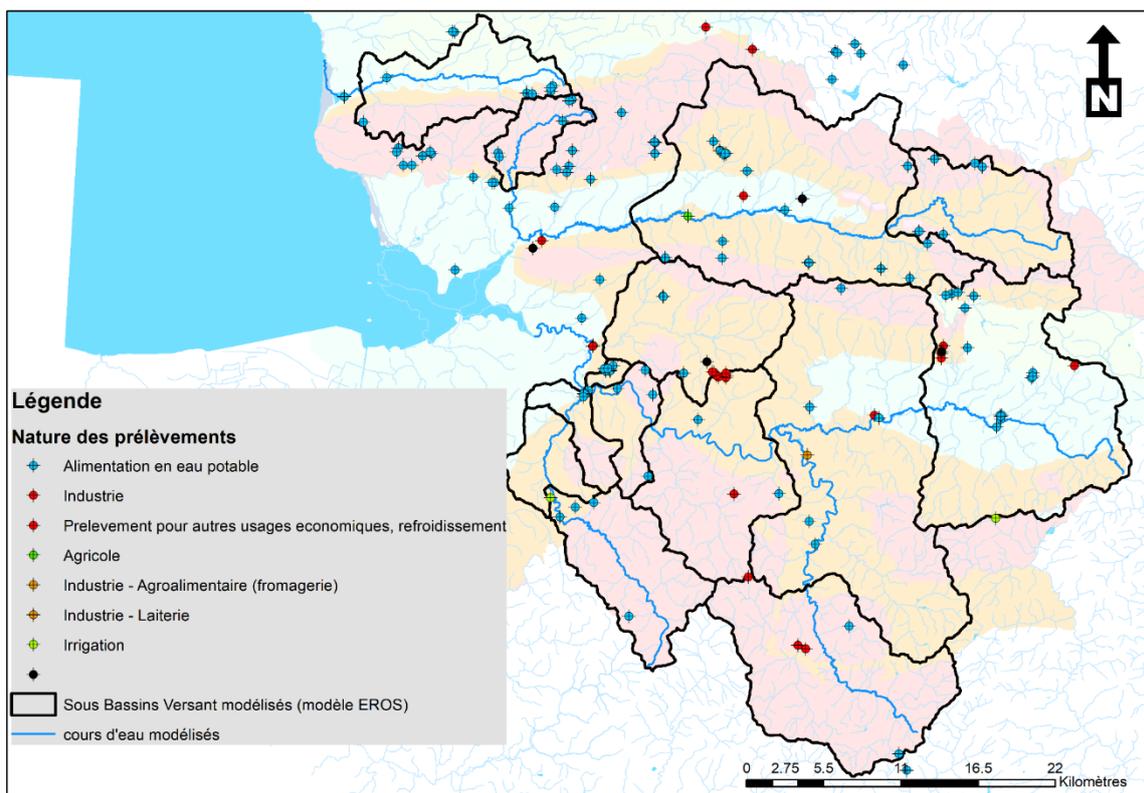


Figure 33 : Carte des points de prélèvement par usage

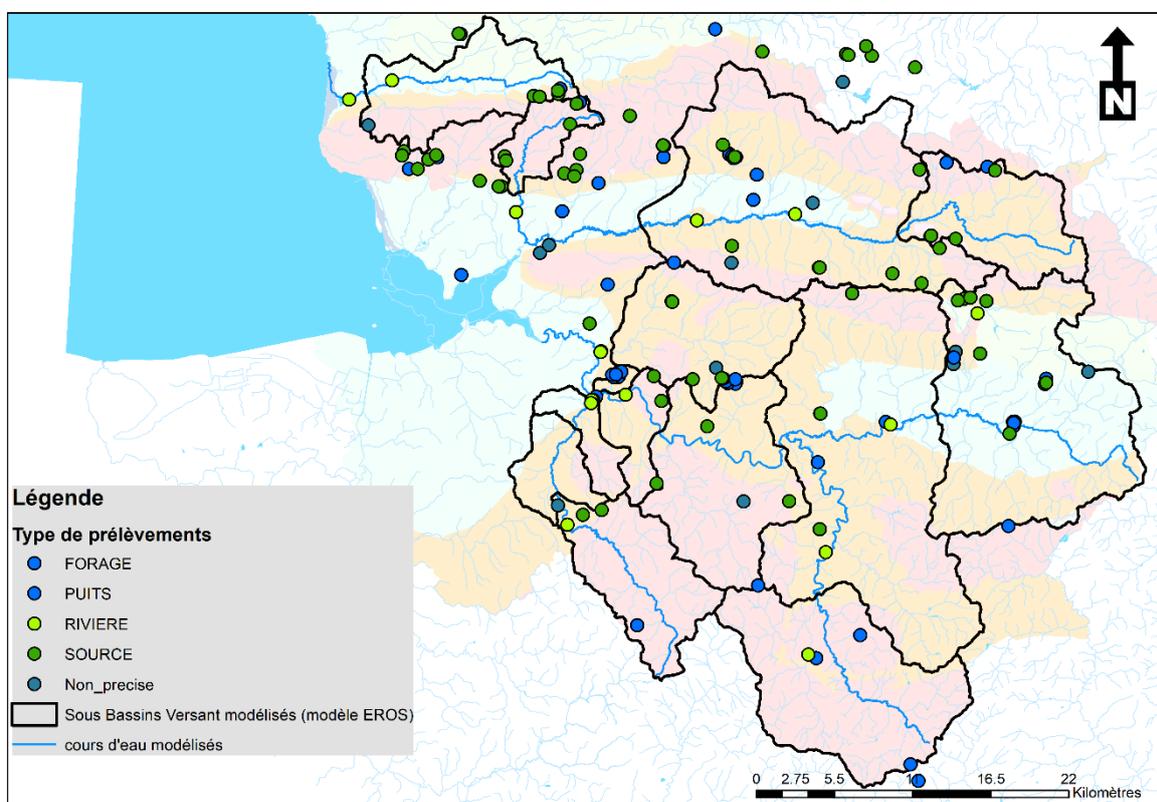


Figure 34 : Carte des points de prélèvement par nature

CODE AESN (N° pt prélèvement)	Ancien Code BSS	Nouveau Code BSS	code SISEAU (num ARS)	code BNPE (= code SANDRE)	Nom de l'installation	Autres noms utilisés	date installation	ETAT	Débit_réglementaire
04147H_017	02091X0016	BSS000RBDP	50000199	OPR0000033496	RIVIERE BRAIZE-MOULIN MARCEY	(=BRAIZE MOULIN DE MARCEY AVRANCHES = STAT QUARTIER DE LA GARE REFOUL+5% (50300 AVRANCHES) - MOULIN DE MARCEY)	22/02/1983	Actif	4600
04227V_017	01728X0010	BSS000MNCX	50000293	OPR0000033497 OPR00000333168	RIVIERE LE THAR-HAMEAU DU THAR	(= USINE DU THAR REFOUL = USINE DU THAR REFOUL+5% (50400 GRANVILLE))	28/04/1982	Abandonné le 10 juillet 2018	6000
27942_017									
04986V_017	02083X0006	BSS000RAVY	50000031	OPR0000035190	RIVIERE LE THAR - BOUILLON	(=THAR STAT DE JULLOVILLE = STAT DE JULLOVILLE REFOUL+5% (50610 JULLOUVILLE))	01/04/1985	Actif	4000
07034W_017	?		?	non recensé dans la BNPE	mal localisé ? RIV.LE THAR A DED. LA HERBERDIERE (eau de surface) - GR1 ET O SECOURS (50530 SARTILLY)				
09442N_017	02094X0003	BSS000RBLX	50000097	OPR0000034064 OPR0000034068 OPR0000034069	RIVIERE LE GLANON - CUVES	(= STAT DE CUVES = SIAEP DE REFFUVEILLE REFOUL + 5% (50670 ST POIS); STAT DE CUVES REFOUL 1 + 5% (50670 ST POIS); STAT DE CUVES REFOUL 2 + 5% (50670 ST POIS))	14/09/1982	Actif	2000
09541W_017									
09542X_017									
30016B_017	02096X0047	BSS000RBTR	50002028	OPR0000033367	RIVIERE SELUNE - PT DU BATEAU (La gauberdrière)		19/12/2000	Actif	7000
(30016B_017) 06915S_	02472X0039	BSS000TQEY	50000109	non recensé dans la BNPE	R. LA SELUNE - MONTMOREL	(= LA SELUNE MONTMOREL (50220 DUCEY) =LA SELUNE REFOUL+5% (50220 DUCEY) - SELUNE MONTMOREL)	26/10/1979	Abandonné (01/01/2001)	3000
36666 36664_017 04154R 06628E	02106X0020	BSS000RCRQ	50000227	OPR0000546626	R. LA CANCE - LA PELTERIE (Mortain)	(= STATION LA PELTERIE STAT DE LA PELLETERIE REFOUL)	25/10/1983	Actif	800
24111_017	02472X0076	BSS000TQGM	50000110	OPR00000333169	RIVIERE LE BEUVRON - HOUSSAYE	(= PRISE D'eau du BEUVRON)	14/09/1982	Actif	7000
06547S_017 (SDEAU) 29796 et 06548T_017 (SIAEP ST HILAIRE HARCOUET)	02481X0017	BSS000TRHA	50000218	OPR0000033403 OPR0000033404	RIVIERE LA SELUNE-LA LANDE (MILLY)	(=La Selune - Station Milly La lande = SIAE REG ST HILAIRE HARCOUET - Milly La lande)	23/11/1982	Actif	4000
13033_017 16552	02485X0002	BSS000TRMQ	35000242	OPR0000034993	PONT JUHEL (L'AIRON)	(=Station PONT JUHEL (L'AIRON =PONT JUHEL (L'AIRON) - UNITE DE PRODUCTION D'EAU POTABLE)	08/02/1983	Actif	2400
04182W_;04183X_;04184Y_;04185Z_	02472X0034	BSS000TQET	50000318	non recensé dans la BNPE	R. LE BEUVRON - VALJOIE (vers st james)	(= VALJOIE MONTJOIE REFOUL =VALJOIE R5 MONTJOIE REFOUL+5% (50220 DUCEY);VALJOIE R8 ST JAMES REFOUL+5% (50220 DUCEY);VALJOIE R7 ST-JAMES REFOUL+5% (50220 DUCEY);VALJOIE R9 ST-JAMES MET REFOUL+5% (50220 DUCEY))		Abandonné (30/06/2000)	690
09926P_020	02483X0013	BSS000TRKQ	50000160	OPR0000033424	R. LA SELUNE/LAFELAIE (commune HUSSON)			Abandonné (01/08/1999)	500

Figure 35 : Recensement des 13 captages AEP en rivière de la zone d'étude recensés sur la période 1994 à 2019 – correspondance des codes des différentes bases de données (SISEAU, AESN, BSS, BNPE,...)

D'après cette compilation de données, le bassin versant de la Sélune contiendrait 5 points de prélèvements dans les eaux de surface pour l'AEP :

- En tête de bassin :
 - o **Sur la Cance (BSS000RCRQ)**, affluent de la Sélune en rive droite, à l'amont de la station de jaugeage de Notre-Dame-du-Touchet ;
 - o **Sur la Sélune (BSS000TRHA)**, à l'amont de la station de jaugeage de Virey ;
 - o **Sur l'Airon à Landivy (BSS000TRMQ)** à l'aval de la station de jaugeage de Landivy ;
- A l'aval du bassin (à l'aval des barrages) :
 - o **Sur le Beuvron (BSS000TQGM)**, affluent de la Sélune en rive droite, à l'aval de la station de jaugeage de Saint-Seunier-de-Beuvron ;
 - o **Sur la Sélune, à l'aval des barrages (BSS000RBTR)**.

Le bassin versant de la Sée contiendrait un seul point de prélèvement dans les eaux de surface pour l'AEP :

- **sur le Glanon (BSS000RBLX), affluent de la Sée en rive droite.** Cet affluent se jette dans la Sée à environ 8 km l'aval de la station de jaugeage de Chérencé-le-Roussel.

Le bassin versant de la Braize contiendrait un seul point de prélèvement dans les eaux de surface pour l'AEP :

- **sur la Braize (BSS000RBDP)** à environ 1.7km l'aval de la station de jaugeage de Lolif.

Le bassin versant du Thar contiendrait (jusqu'à juillet 2018) seulement 2 points de prélèvements en rivière :

- **Le premier (BSS000MNCX) sur la Thar** à environ 2 km à l'amont de la station de jaugeage de Jullouville. Ce point de prélèvement a été abandonné le 10 juillet 2018 ;
- **Le second (BSS000RAVY)** à environ 1.5 km à l'aval de la station de jaugeage de Jullouville.

Collecte des volumes prélevés

Une fois le travail d'inventaire réalisé et le référentiel stabilisé, une collecte et compilation des données de volumes prélevés ont été effectuées pour chaque point de prélèvement. Ce travail de collecte s'est appuyé sur les sources d'information suivantes :

- Base AESN : chroniques au pas de temps annuel de 1994 à 2018 pour les prélèvements AEP, agricoles et industriels ;
- Base de données BNPE : chroniques au pas de temps annuel de 2012 à 2019 (essentiellement issues de la base AESN) ;
- Données des producteurs d'eau (Syndicats AEP, ...) : pas de temps journaliers ou à défaut mensuels collectés pour les prélèvements en rivière ;
- Base de données GEREP : chroniques au pas de temps annuel pour les prélèvements industriels.

Les volumes recensés par les différentes bases de données étant rarement cohérents, les choix suivants ont été faits en termes de priorité de la donnée (du plus fiable au moins fiable) : données producteur >> données AESN = données BNPE >> données GEREP.

Du fait de la faible profondeur de chronique des données de prélèvement au pas de temps journalier ou mensuel, il a été nécessaire de compléter les données mensuelles collectées par une mensualisation des données annuelles de l'AESN. Pour cela une étude de la saisonnalité des prélèvements en rivière a été effectuée (Figure 36 et Figure 37) et a mis en évidence des prélèvements plus importants sur les mois d'été sur une majorité des captages.

Des courbes de mensualisation ont été établies sur la base de ces moyennes mensuelles pour 7 prélèvements en rivières (Figure 38). Ces courbes ont été utilisées pour mensualiser les prélèvements des années où elles n'existaient qu'au pas de temps annuel.

Une moyenne de ces courbes de mensualisation a été réalisée (Figure 39) et a été utilisée pour mensualiser les données des captages en rivière ne disposant que de données annuelles.

Les chroniques journalières obtenues (ou rendues journalières pour les chroniques annuelles mensualisées ou les chroniques mensuelles) sont présentées sur les Figure 40 et Figure 41.

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

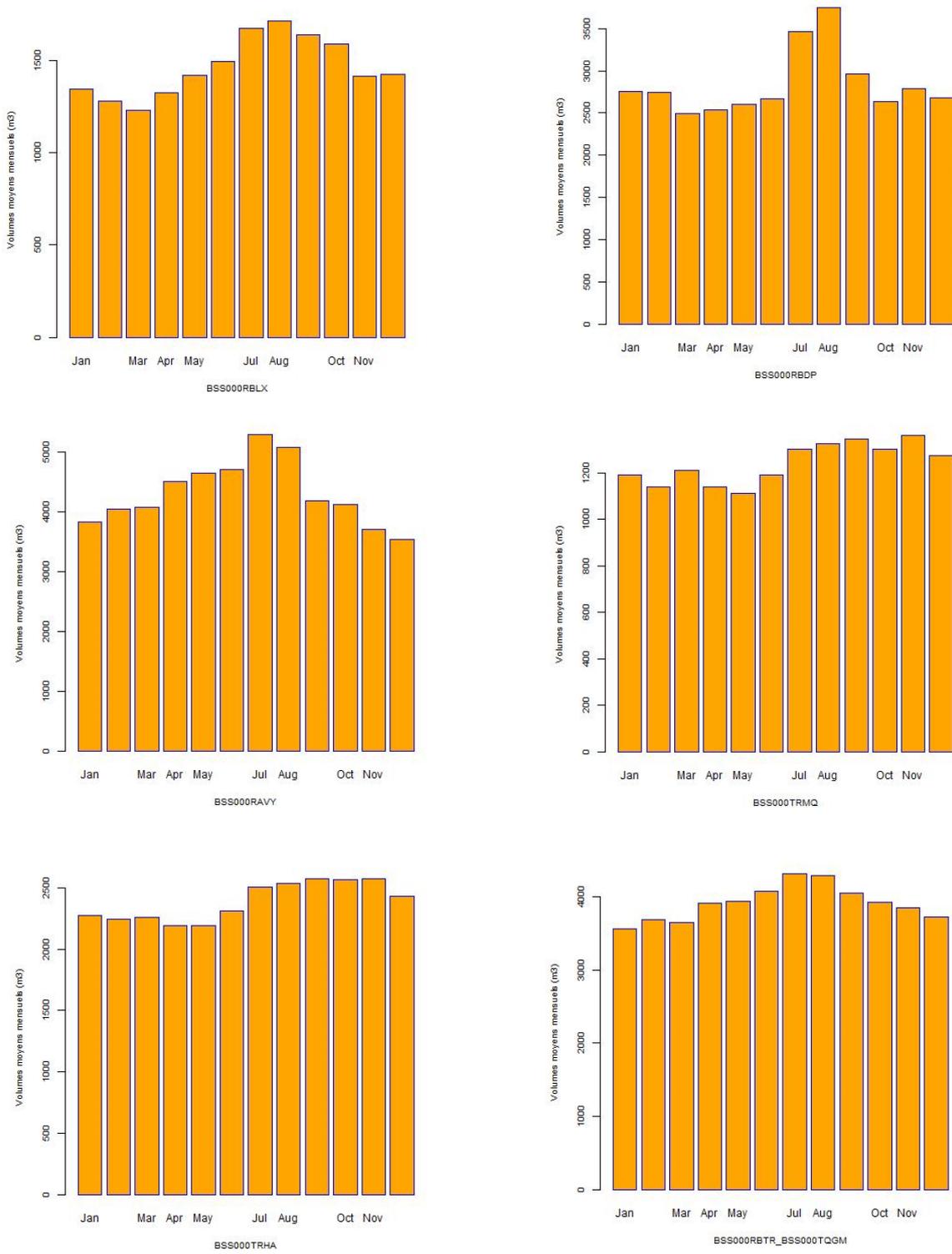


Figure 36 : Exemple de l'étude de la saisonnalité de 6 points de prélèvement en rivière

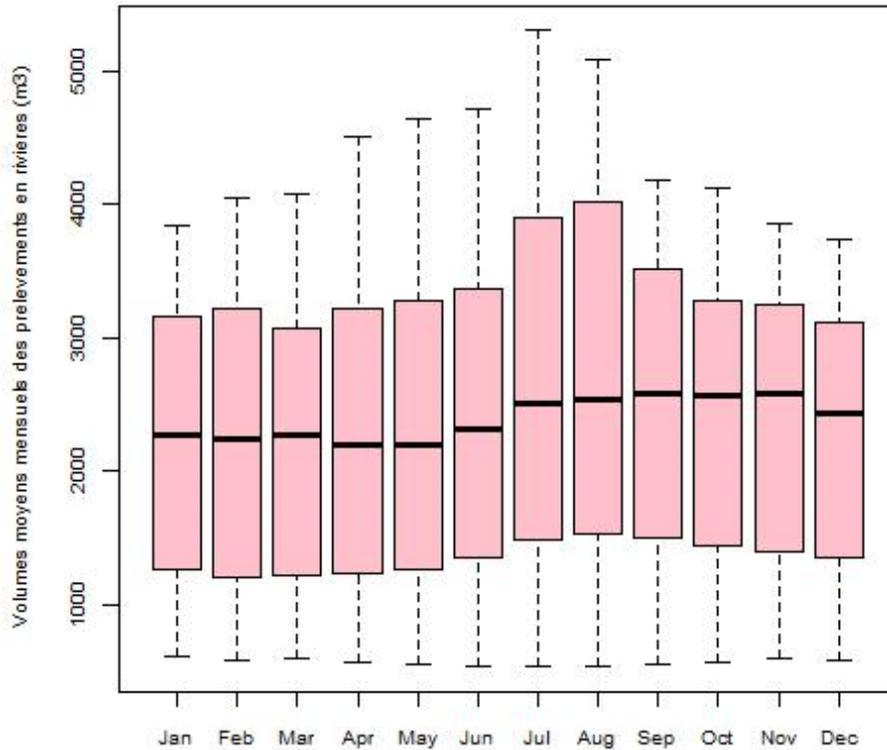


Figure 37 : Volumes moyens mensuels de prélèvements en rivière

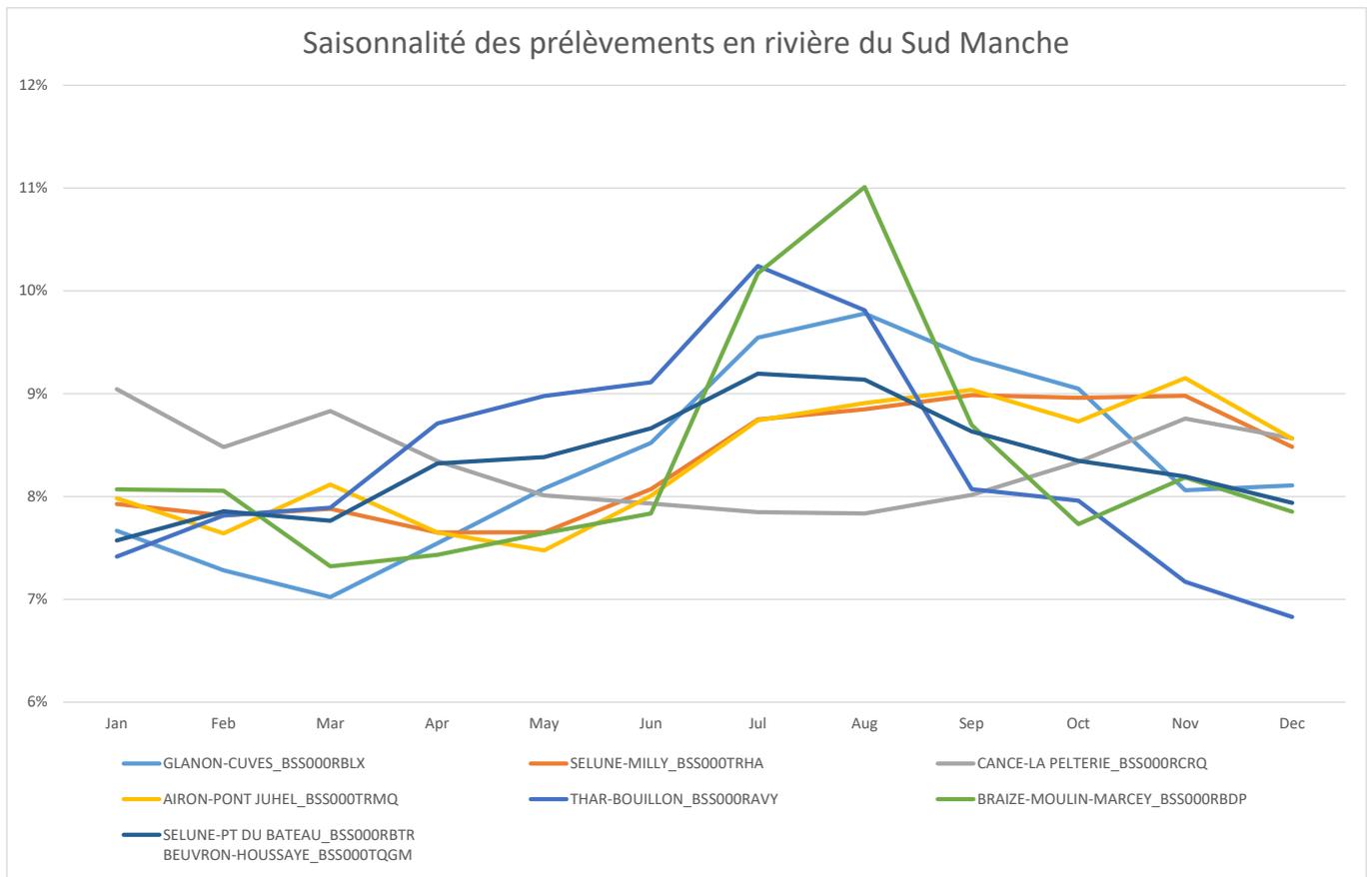


Figure 38 : Courbes de mensualisation de 7 captages AEP en rivière

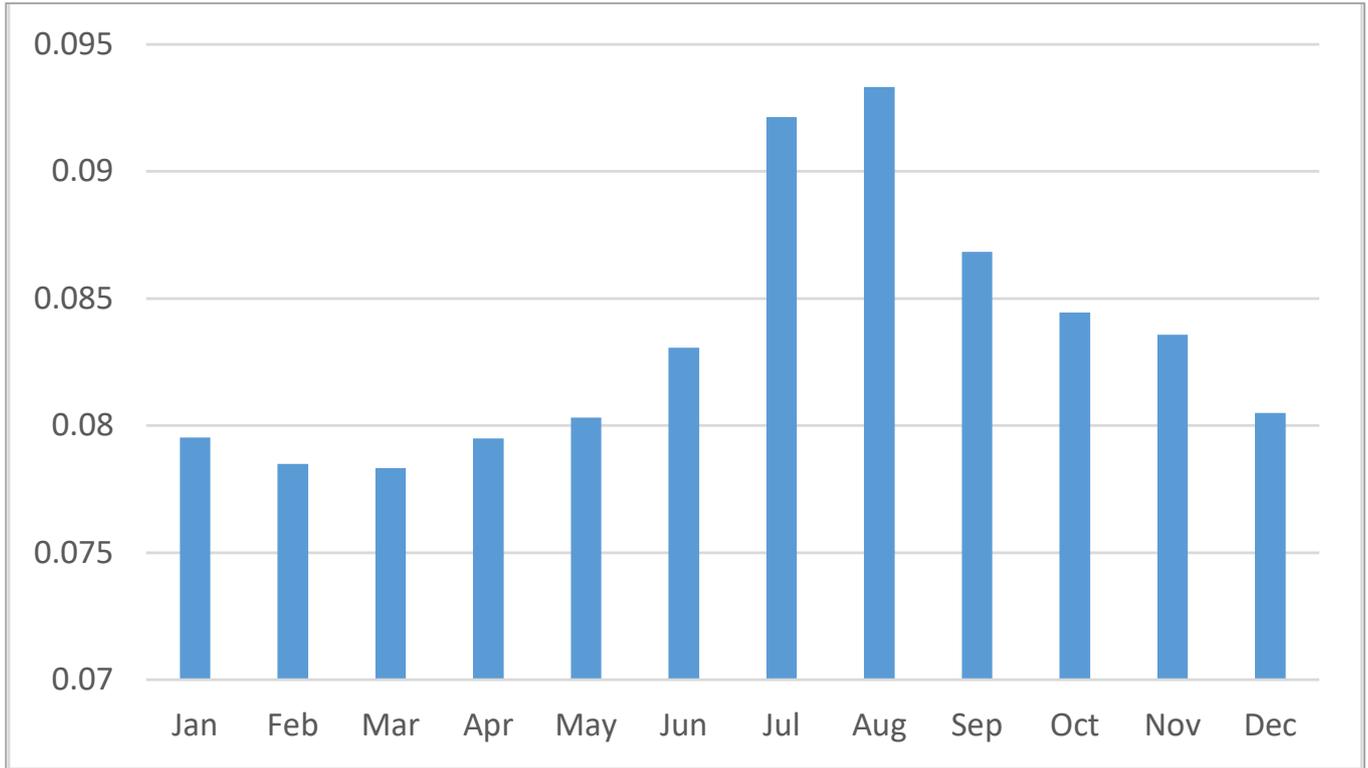


Figure 39 : Moyenne des courbes de mensualisation des captages AEP en rivière

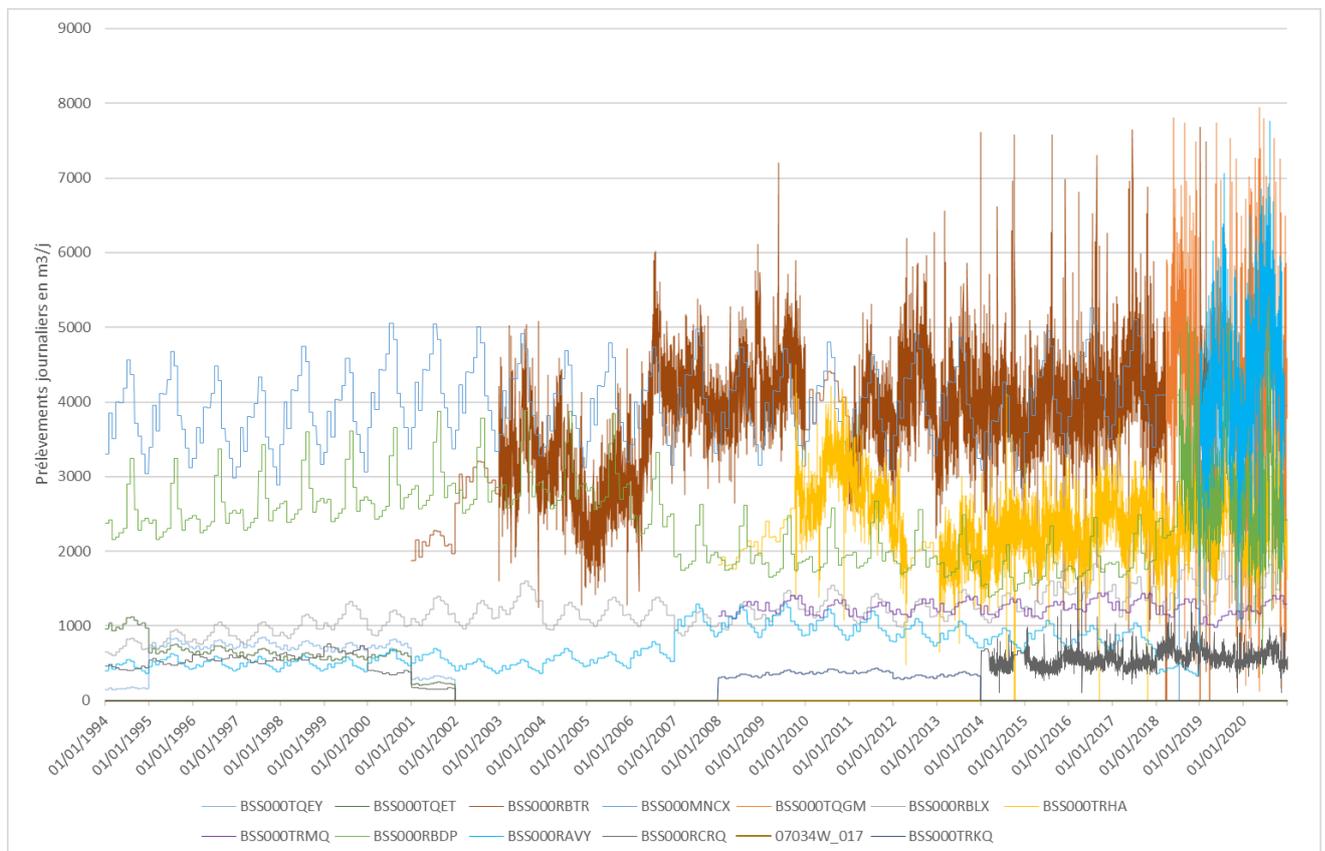


Figure 40 : Chroniques journalières (ou quotidiennées) des 13 prélèvements en rivière de la zone d'étude sur la période 1994 – 2020

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

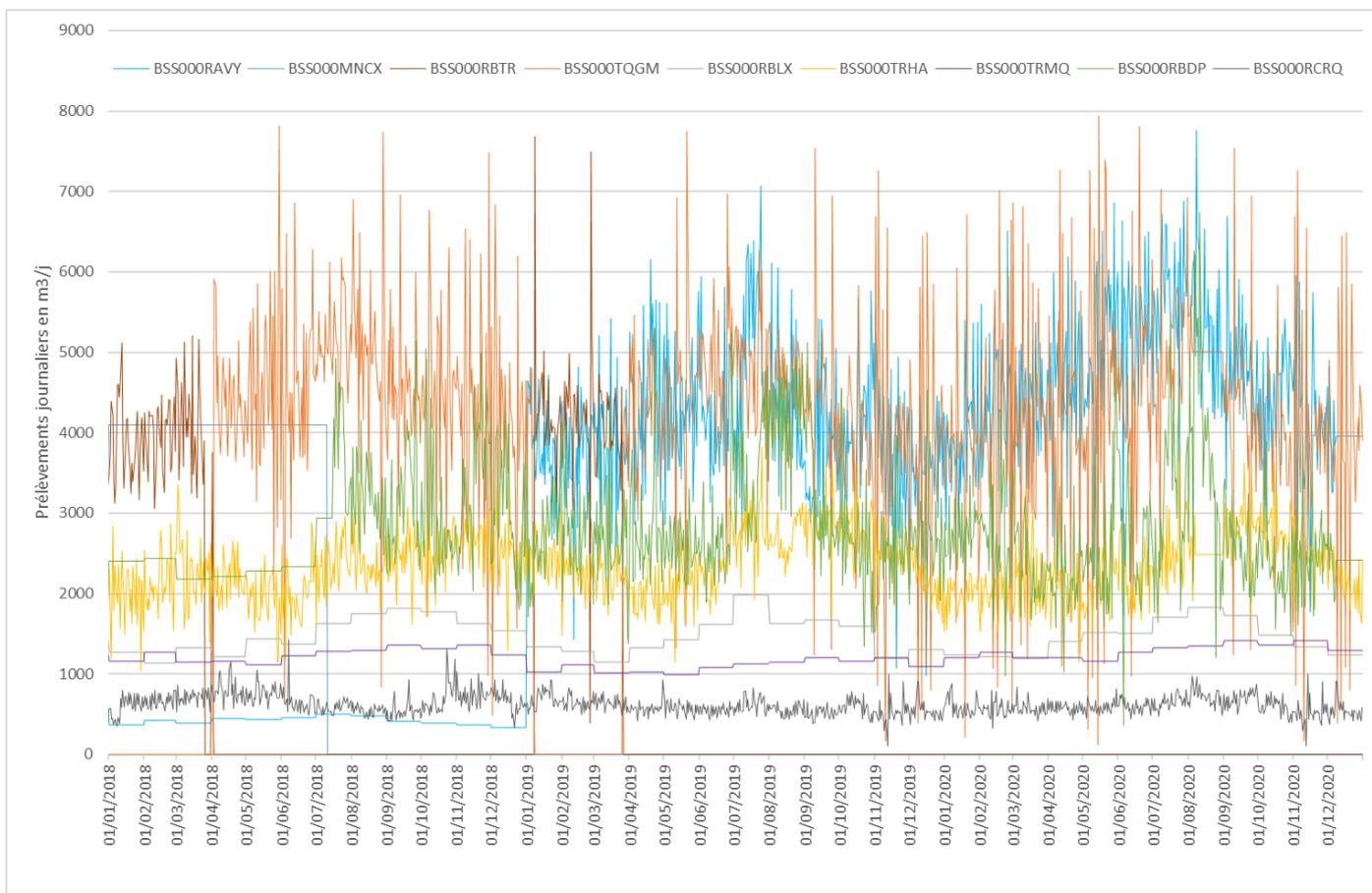


Figure 41 : Chroniques journalières (ou quotidiennées) des prélèvements en rivière de la zone d'étude – zoom sur la période 2018 – 2020 pour les 9 prélèvements les plus importants

4.3.5. Données de rejets

L'inventaire et la collecte des données de rejet des stations de traitement des eaux usées (STEU) est également un travail complexe du fait de certaines incohérences pouvant exister entre les bases de données (AESN, PIAC, SATESE, ...).

La base de données du PIAC (portail d'information sur l'assainissement collectif) librement accessible sur internet, permet un inventaire relativement exhaustif avec 113 champs descriptifs (dont le type de STEU, le milieu récepteur, la capacité en EH) permettant de qualifier ces rejets. 75 STEU étaient recensées dans la zone d'étude. Concernant les volumes rejetés, le PIAC ne fournit que le débit annuel moyen des 4 ou 5 dernières années. Ainsi en complément du PIAC, les SATESE des trois départements concernés ont été contactés afin de collecter les données de rejets au pas de temps journalier dans la mesure du possible, ou à défaut mensuel ou annuel pour l'ensemble des STEU. Toutefois, les logiciels gérant les bases de données des SATESE ne permettent pas de réaliser des exports de masse. Les exports ne se faisant que station par station, seules les données des principales STEU ont pu être collectées par les SATESE.

C'est finalement l'AESN qui a été en mesure de fournir les informations les plus exhaustives en termes de chroniques de rejets. La Base de l'AESN recense 134 STEU dans la zone d'étude.

Après élimination des doublons entre les recensements du PIAC et ceux de l'AESN, 140 points de rejets sont recensés dans la zone d'étude (Figure 42) :

- 70 points présents dans les deux bases ;
- 5 points présents dans le PIAC mais absents de la base AESN ;
- 23 points présents dans la base AESN mais absents du PIAC.

Outre les 5 points complémentaires apportés, le PIAC a permis de qualifier les points de rejet (Type de STEU, capacité en EH, type de milieu récepteur, etc...).

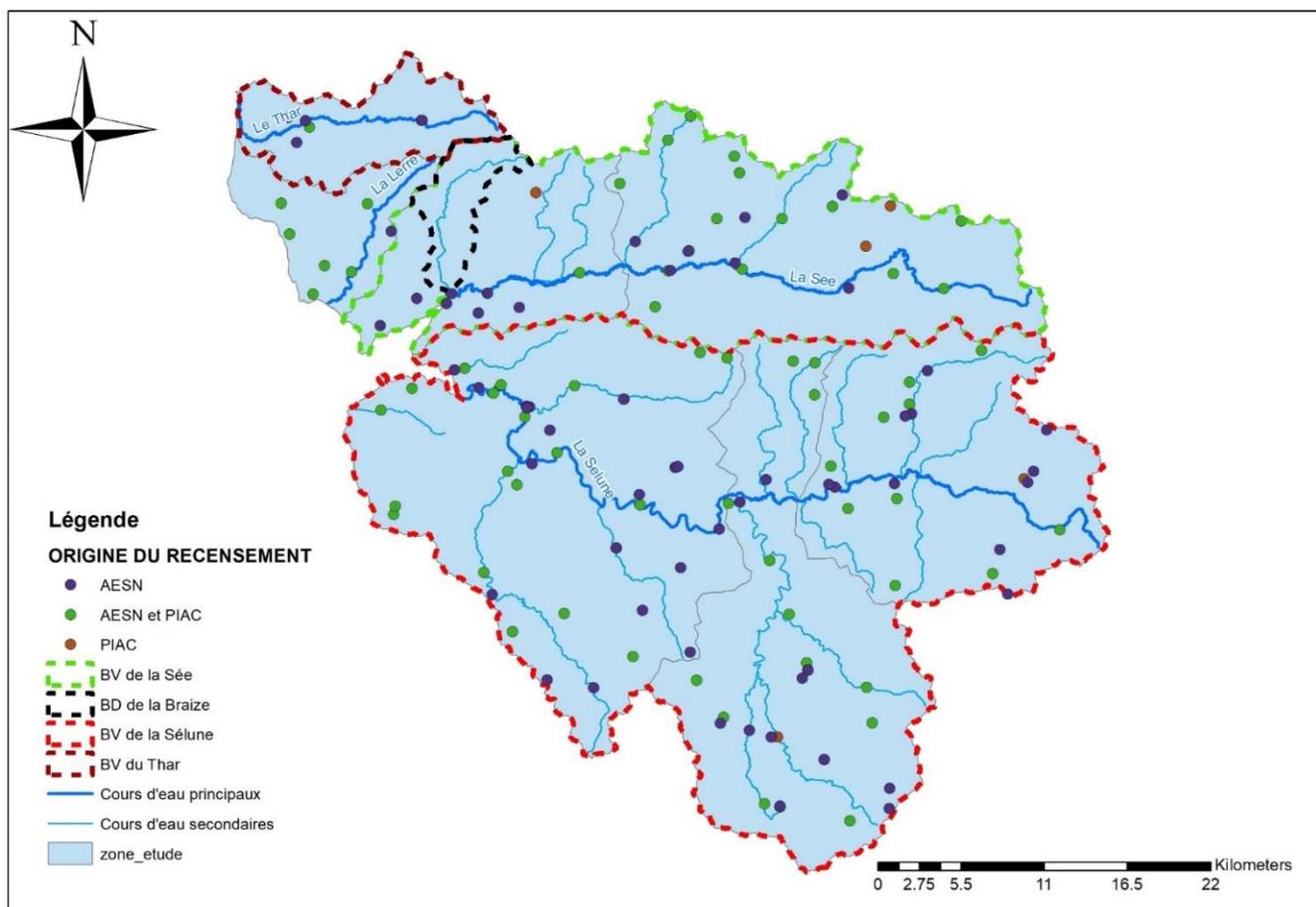


Figure 42 : 140 points de rejets de STEU recensés dans la zone d'étude

La collecte des chroniques journalières des rejets de STEU permet donc de conclure que :

- L'AESN a fourni des données débits pour 50 STEU (sur les 140 recensées). Les chroniques reçues ne sont disponibles au mieux que pour les 4 dernières années (2016-2019). Parmi les 76 STEU dont la capacité en EH est renseignée, et en particuliers parmi les 34 STEU ayant une capacité >500EH : des chroniques ont été collectées pour 29 d'entre elles ;
- Concernant les données de débits collectées auprès des SATESE des départements 50, 35 et 53, les chroniques de débit :
 - d'une STEU a été fournie par le SATESE 35 ;
 - de 7 STEU ont été fournies par le SATESE 50.

Ces chroniques sont généralement courtes (2 à 4 ans seulement).

Afin de compléter ces données sur la période de 1994-2020, plusieurs actions ont été menées. Une étude de la saisonnalité des débits des STEU a été réalisée pour les STEU disposant de chroniques au pas de temps journalier (cf. Annexe 2). Cette analyse a mis en évidence une corrélation (analyse visuelle) des débits avec la pluviométrie (du fait de rejet unitaire ?) pour la quasi-totalité des STEU suivies. Partant de ce constat, un travail de reconstitution des chroniques journalières par modélisation GARDENIA (modèle pluie / débits des STEU) a été tenté pour les STEU disposant de chroniques au pas de temps journalier et a montré des coefficients

d'ajustement satisfaisants compris entre 0.729 et 0.909 (cf. Annexe 3). Ainsi pour ces stations, une chronique de rejet a pu être reconstituée de 1994 à 2020.

Pour les STEU ne disposant que d'un débit de rejet moyen annuel, ce débit moyen a été rendu journalier en utilisant une courbe de rejet moyen normalisée (moyenne annuelle =1) issue de la moyenne des chroniques de STEU ayant fait l'objet d'une modélisation GARDENIA (Figure 43).

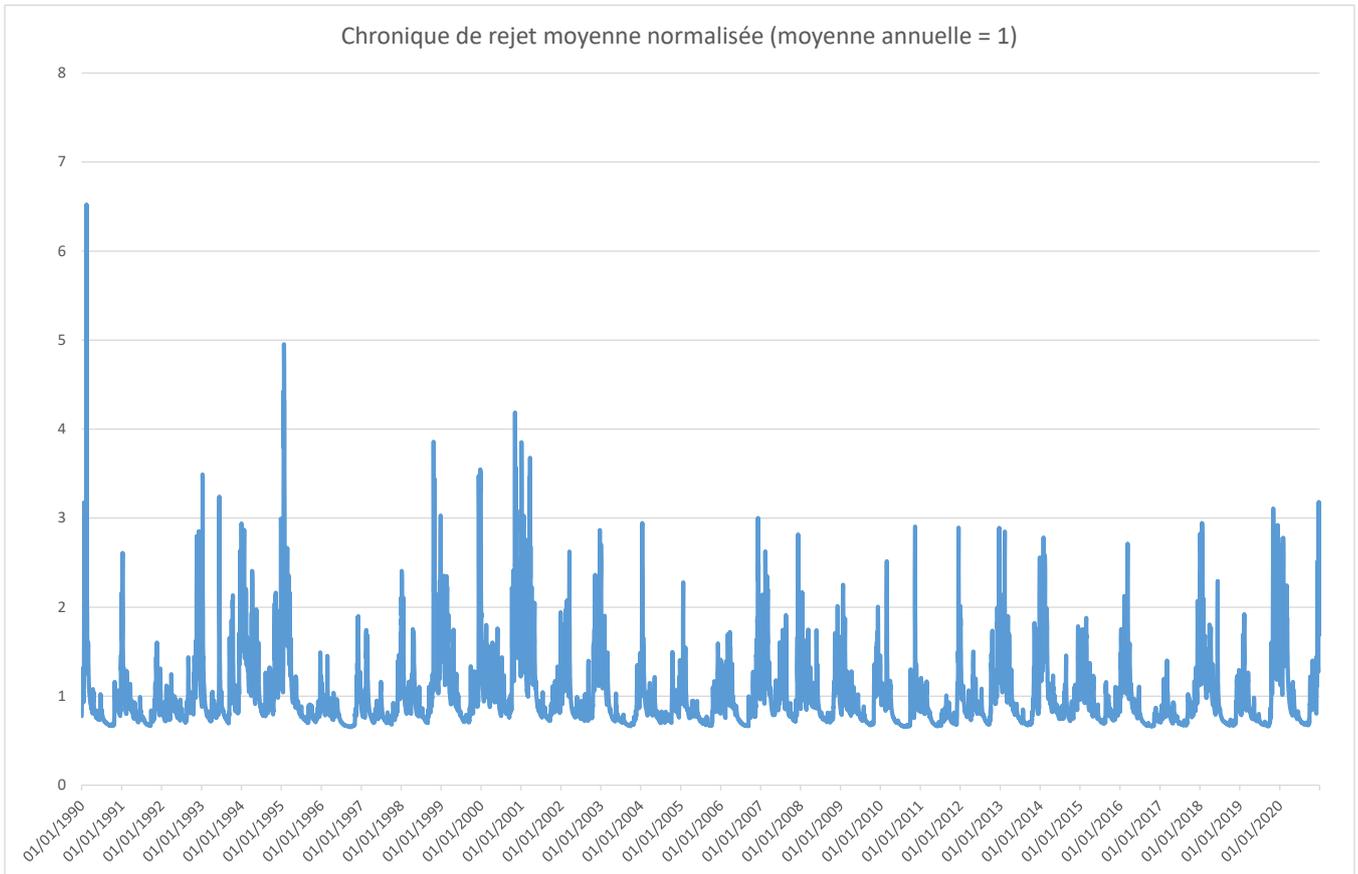


Figure 43 : Courbe de rejet moyenne normalisée (moyenne annuelle égale à 1 m³/jour) issue de la moyenne des chroniques de STEU ayant fait l'objet d'une modélisation GARDENIA

Pour les STEU, ne disposant pas de données de débits mais uniquement d'une capacité en « équivalent habitant » (EH), des débits moyens leur ont été affectés en utilisant la relation établie entre la capacité nominale en EH et le débit moyen (pour les STEU disposant de ces deux informations dans la zone d'étude).

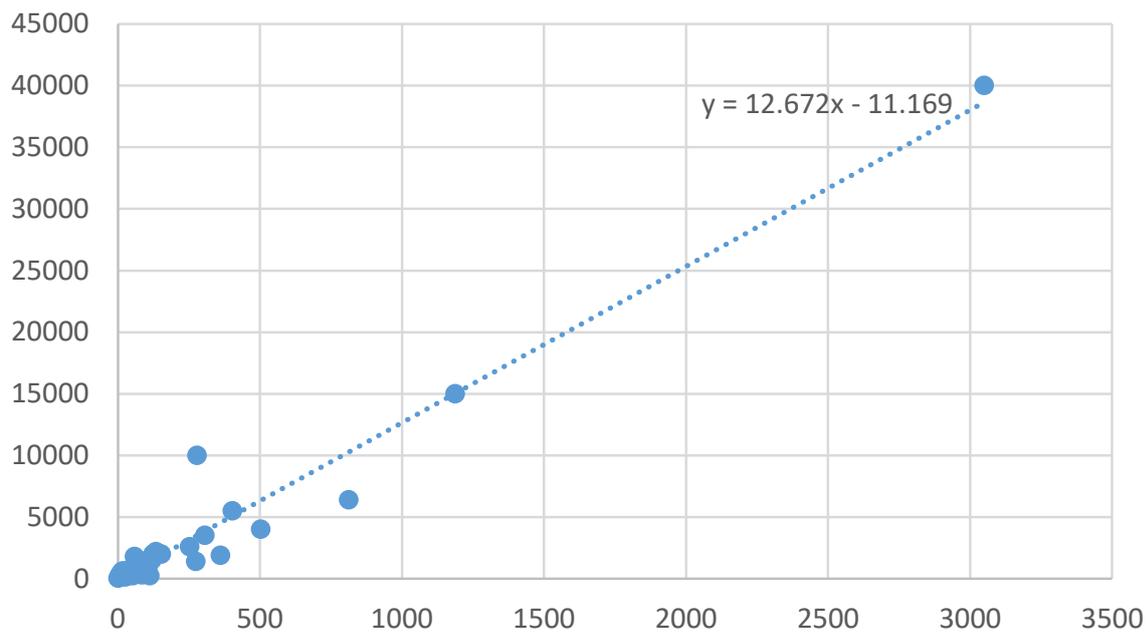


Figure 44 : Relation entre la capacité nominale en EH (en abscisse) et le débit moyen en m³/j (en ordonnées) pour les STEU de la zone d'étude disposant de ces deux informations

In fine, des chroniques journalières des débits rejetés ont pu être reconstituées sur la période 1994-2020 pour l'ensemble des STEU rejetant en rivière (soit 95 chroniques de rejets reconstituées) (Figure 45).

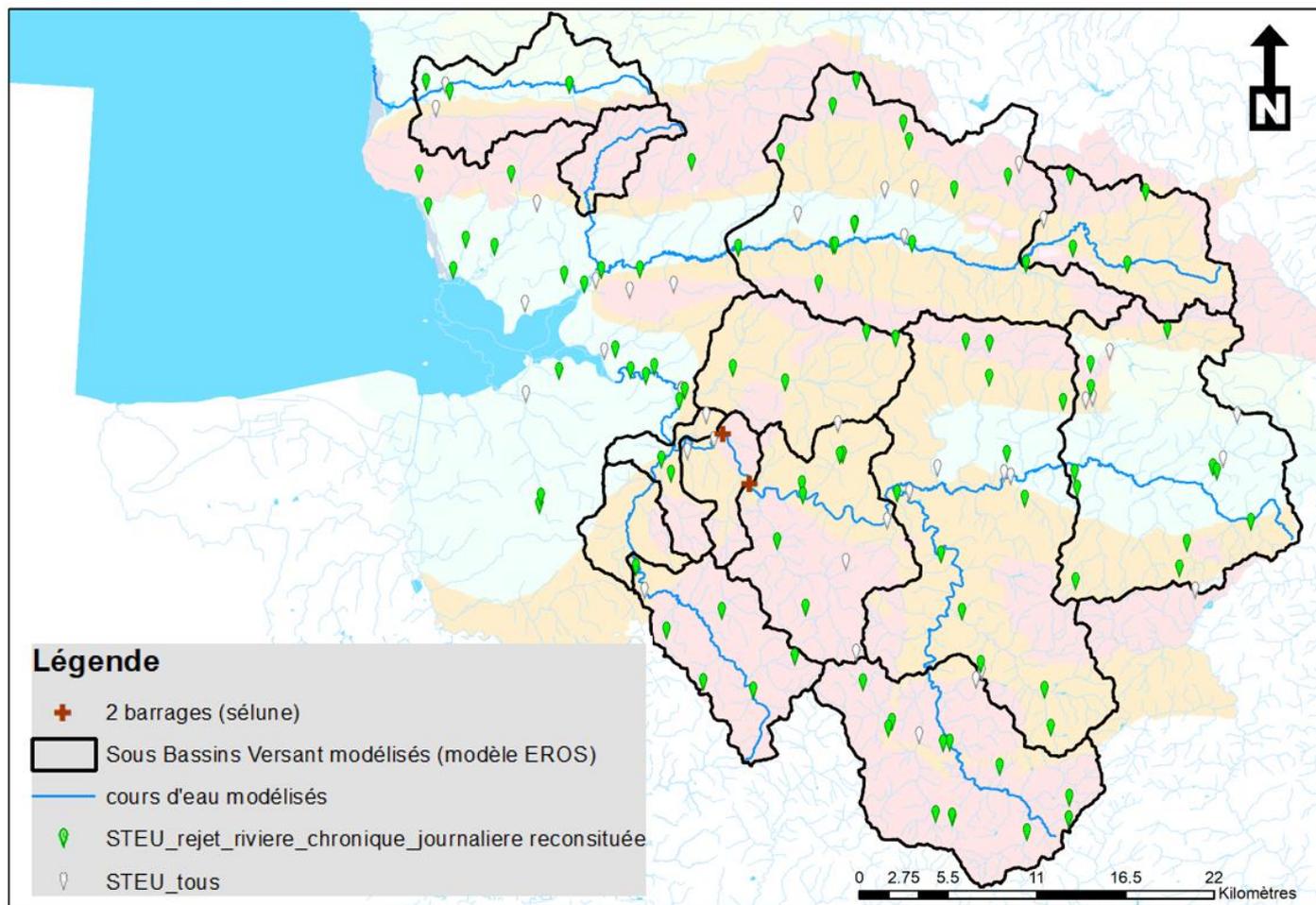


Figure 45 : Localisation des 95 STEU rejetant en rivière ayant fait l'objet d'une reconstitution de leurs chroniques journalières de débits rejetés sur la période 1994-2020

Ce travail a été complété par une collecte et mise en cohérence des données de rejets industriels en rivière issues des bases de données :

- IREP (données disponibles en ligne) ;
- GEREP (extraction réalisée par la DREAL).

5 chroniques de rejets industriels ont pu être collectées (Figure 46).

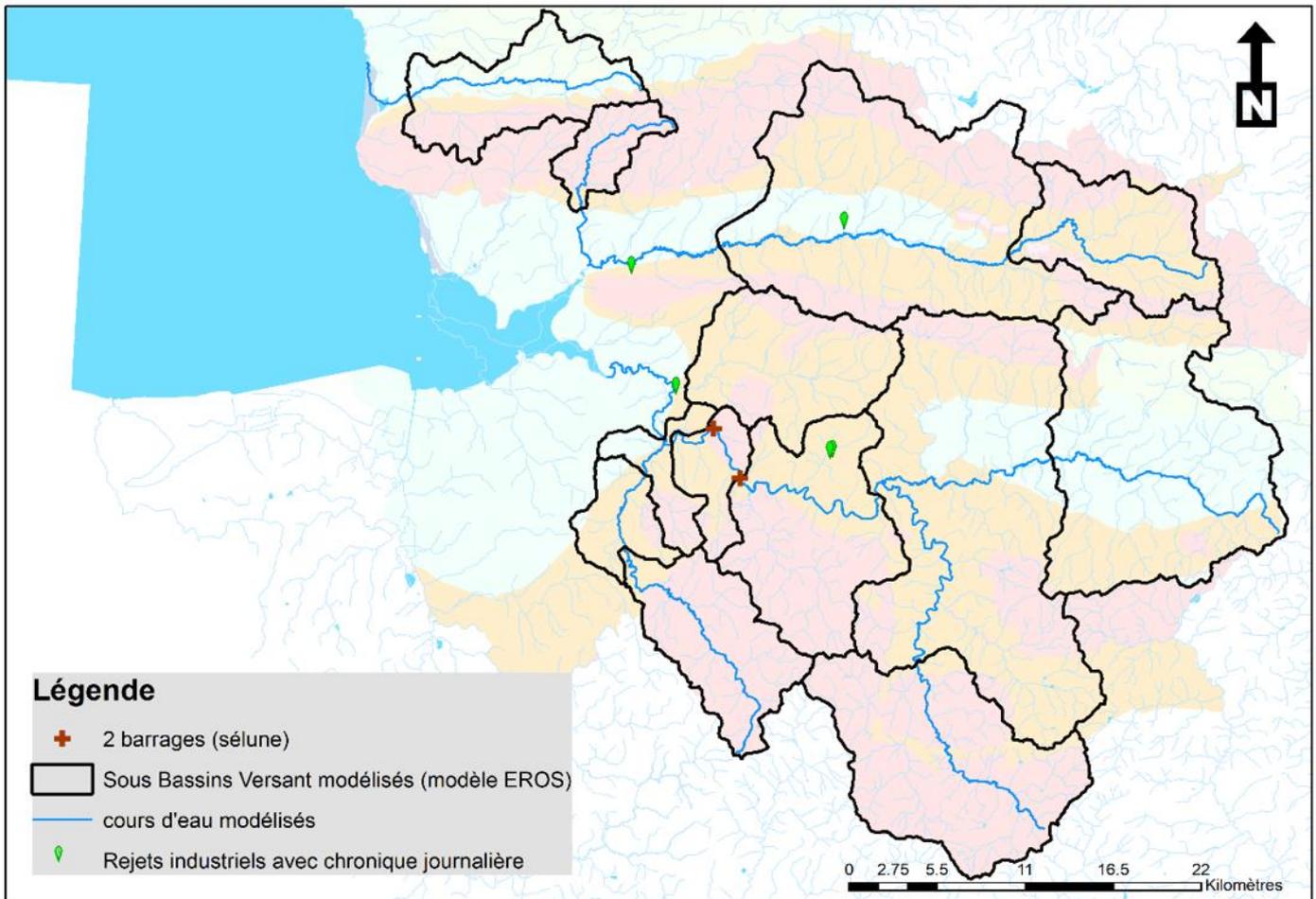


Figure 46 : Localisation des 5 chroniques de rejets industriels collectées

4.4. RECONSTITUTION DE CHRONIQUES DE DEBITS « PSEUDO » NATURELS

Afin de pouvoir s'affranchir de scénarii faisant l'hypothèse de prélèvements et de rejets pour la période future, il a été décidé de caler le modèle EROS sur la période actuelle avec des débits « pseudo-naturels ».

Ces débits pseudo-naturels ont été reconstitués en corrigeant les débits mesurés des rivières, des prélèvements et des rejets.

Ainsi pour chaque station de jaugeage, les prélèvements en sources et rivières situés à l'amont de la station ont été ajoutés et les rejets situés à l'amont également ont été retranchés.

Il apparait que les prélèvements représentent une faible part du débit naturel (autour de 1% ou moins en moyenne annuelle) excepté pour le Thar pour lequel les prélèvements représentent entre 4.5% et 4.75% selon la période (Figure 47).

	Part des prélèvements (en rivière et sources) sur le débit naturel		
	Moyennes 1994-2020	Moyennes 2008-2020	Moyennes 2015-2019
Airon_landivy	0.13%	0.28%	0.35%
Beuvron_St_Senier	0.23%	0.00%	0.00%
Beuvron_St_James	0.30%	0.00%	0.00%
Oir_Ducey	0.28%	0.06%	0.04%
Selune_NDT	0.33%	0.40%	0.44%
Selune_Virey	0.41%	0.73%	0.84%
Selune_Vezins	0.39%	0.70%	0.72%
Selune_Signy	0.75%	1.08%	1.02%
Selune_Ducey_avalBeuvron	0.73%	1.04%	1.04%
See_Cherence	0.08%	0.14%	0.14%
See_Tirepiéd	0.38%	-	-
Braize_Lolif	1.37%	1.15%	1.12%
Thar_Jullouville	4.75%	4.27%	4.50%

Figure 47 : Part des prélèvements sur le débit pseudo-naturel reconstitué

4.5. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE EROS

4.5.1. Principe du calage

Une fois validées, les différentes données d'entrée sont utilisées pour réaliser un calage sur l'ensemble de la période disponible. La Figure 48 montre l'organisation des fichiers nécessaires à une modélisation EROS pour le calage des débits et des niveaux :

- fichiers d'entrée : commande, données d'entrée et paramètres de calage ;
- fichiers et graphiques de sortie : paramètres ajustés et données calculées.

Les données d'entrée doivent être sans lacune d'observation. Les données de sortie peuvent comporter des lacunes d'observation.

Le calage est un ajustement des différents paramètres afin de reproduire au mieux les débits et les niveaux piézométriques observés. La procédure d'optimisation utilisée est non linéaire. Elle est basée sur la méthode de Rosenbrock (Thiéry, 2018). Le critère maximisé est la somme des coefficients de détermination. Ainsi un poids identique est attribué aux différents bassins élémentaires quelle que soit leur taille.

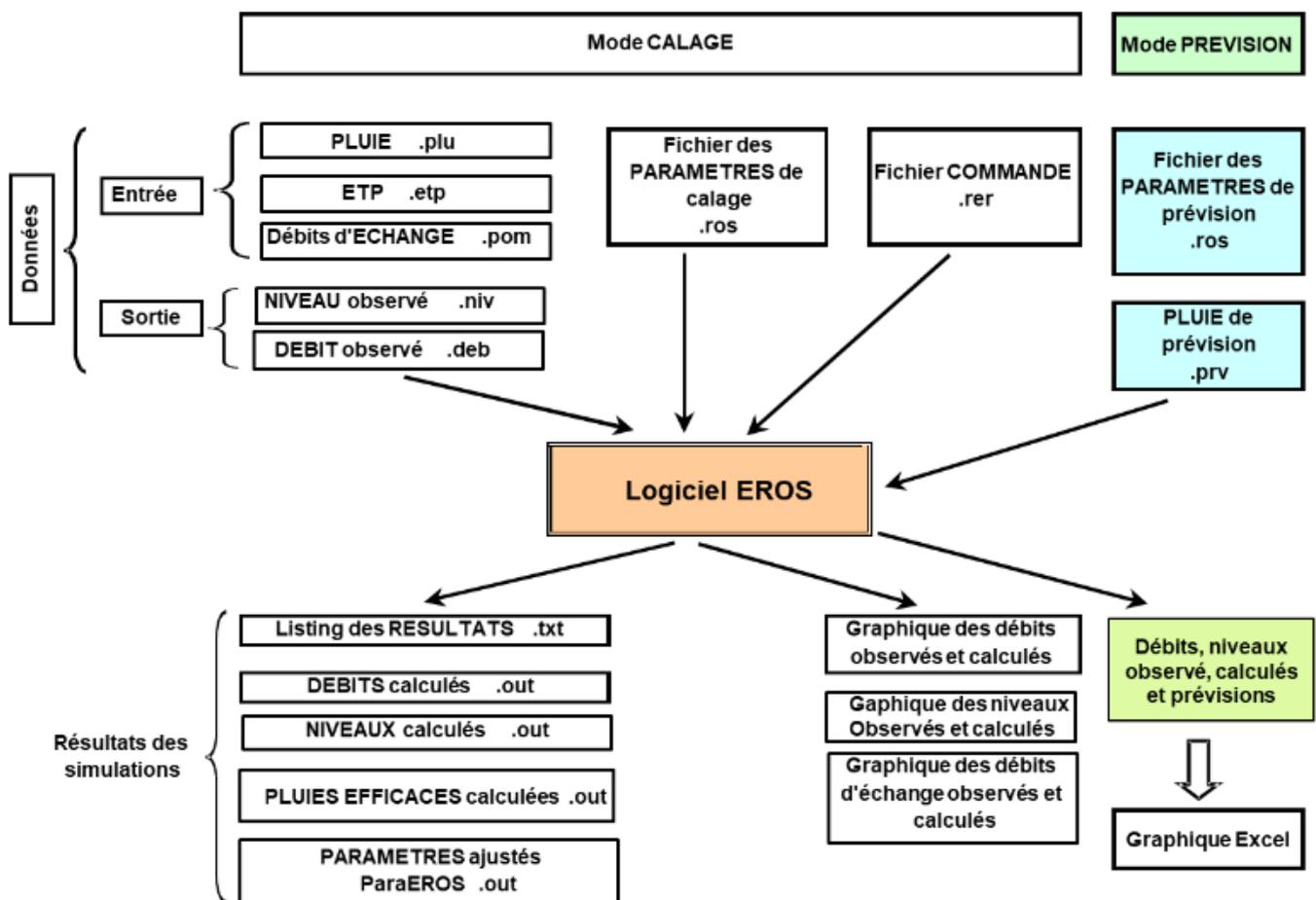


Figure 48 : Principe de fonctionnement du logiciel EROS (d'après rapport BRGM/RP 63922-FR)

4.5.2. Propriétés du modèle : synthèse des données retenues après calage du modèle et schéma conceptuel final

Le modèle conceptuel inclut 12 sous bassins (Figure 49) dont le suivi des débits est issu de 10 stations hydrométriques DREAL et 2 suivis hydrométriques EDF.

Ce modèle intègre également le domaine souterrain ; chaque sous bassin modélisé possède donc une chronique de débits et de niveaux piézométriques (Figure 50).

Le modèle fonctionne au pas de temps journalier. Compte-tenu des diverses données disponibles, la période totale considérée s'étend de 1994 à fin décembre 2020. La période de calage dépend des données d'observation disponibles pour chaque sous bassin (Figure 50).

L'intégration du compartiment souterrain peut être représentée par 1 ou 2 réservoir(s) souterrain(s) ; ce qui implique l'introduction de deux ou quatre paramètres de calage supplémentaires par bassin pour la piézométrie. Toutefois pour l'ensemble des 12 sous bassins versant modélisés, un seul réservoir souterrain a été nécessaire pour obtenir un calage satisfaisant.

Le logiciel EROS permet des pondérations appliquées sur les écarts de débits de rivière pour la calibration :

- 99 = Minimisation des écarts sur la racine carrée des débits. Favorise les débits moyens (et les étiages). Donne moins d'importance aux forts débits.
- 97 = Minimisation des écarts sur le logarithme (décimal) des débits. Favorise fortement les étiages.

Dans le cadre du modèle EROS du Sud Manche, la minimisation des écarts a été réalisée sur la racine carrée des débits (cf. option 97) afin d'améliorer les calages sur les périodes d'étiage.

Chaque bassin élémentaire possède des paramètres, des séries climatiques (pluie et évapotranspiration). Ainsi le modèle permet de prendre en compte l'hétérogénéité du bassin versant en terme climatique (Pluie et ETP), de fonctionnement hydraulique (répartition entre le ruissellement superficiel et l'infiltration, contribution des aquifères aux débits des rivières). Les différents paramètres et toutes les données d'entrée disponibles ont été testées pour chaque bassin élémentaire afin d'obtenir le meilleur calage possible.

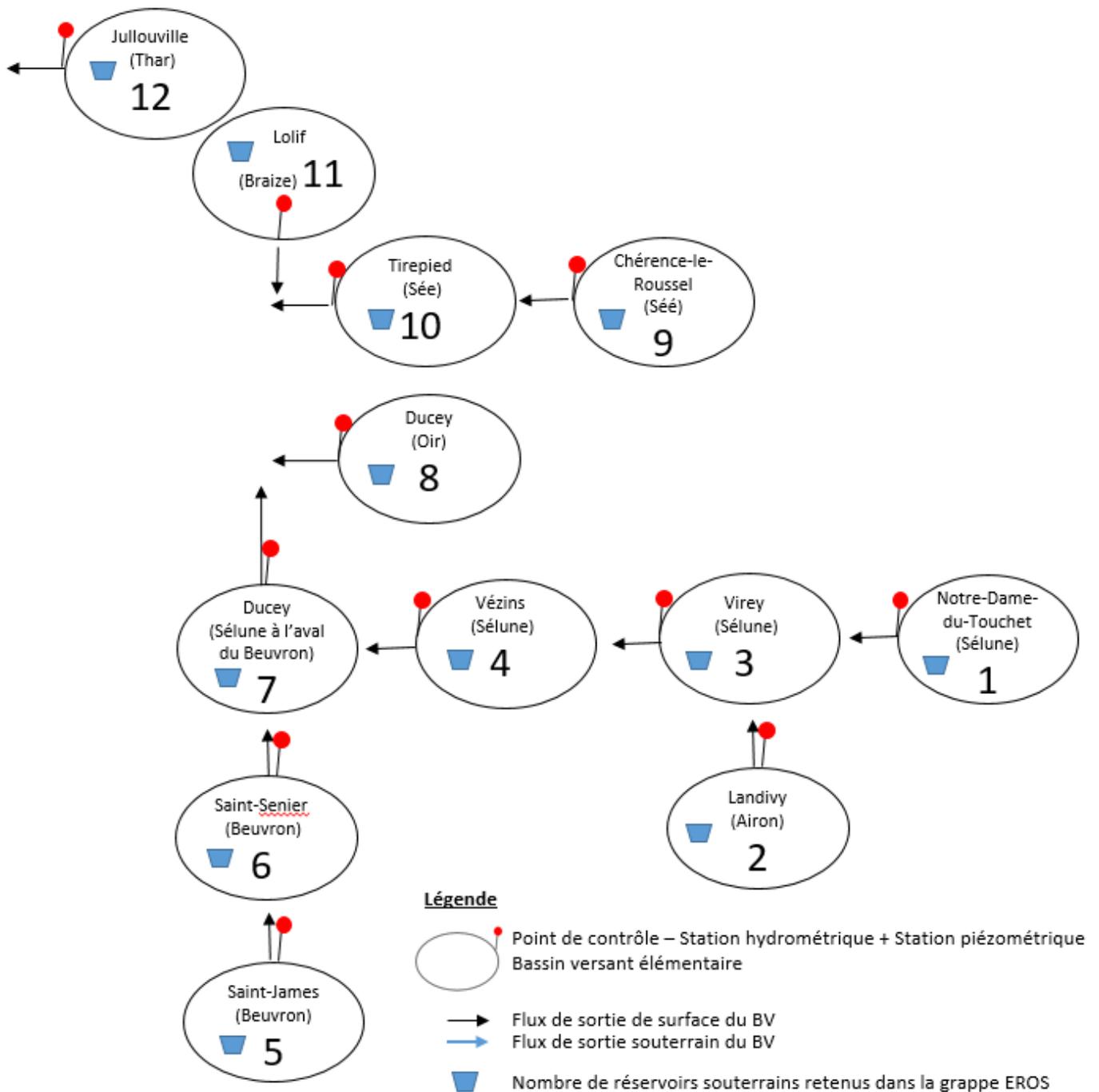


Figure 49 : Schématisation finale du modèle semi-distribué EROS des bassins versants de la Sélune, de la Sée et du Thar (obtenu après le processus du calage du modèle)

Le calages des différents paramètres des réservoirs de chaque sous-BV est présenté sur la Figure 51.

Grappe (=ss-BV) EROS		Station hydrométrique					Station piézométrique		
		Superficie du BV topo (km ²) (d'après la banque hydro pour les stations hydrométriques)	Superficie du BV topo (km ²) d'après MNT 5m pour les stations hydrométriques	Superficie du BV total intégré dans EROS (km ²)	Superficie du sous-BV (grappe) intégré dans EROS (km ²)	code station	période	Code BSS	période
1	Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	203.4	203.93	203.93	203.93	I9031010	1991-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
2	Airon à Landivy	148	148.095	148.095	148.095	I9122020	1998-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
3	Sélune à Virey	-	627.77	627.772	275.747	Q2896_DN1_J1 (EDF)	2014-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
4	Sélune à Vezins	720	743.151	743.176	115.404	I9221010	1933-2016	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
5	Beuvron à St James	75	76.1692	76.169	76.169	I9233040	2009-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
6	Beuvron à St-Senier-de-Beuvron	105.7	105.48	105.48	29.311	I9233010	1994-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
7	Sélune à Ducey (aval du Beuvron)	899	901.134	901.374	52.718	I9241010	1994-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
8	Oir à Ducey	85.4	86.2747	86.275	86.275	I9253010	1986-2020	Louvigné - (BSS000TRGE - 02478X0156)	2004-2020
9	Sée à Chérencé-le-Roussel	72.9	75.3804	75.38	75.38	I8002010	1993-2020	Lingéard (BSS000RCEW - 02101X0044)	2007-2020
10	Sée à Tirepiéd	314	315.522	315.503	240.123	I8032020	1993-2006	Lingéard (BSS000RCEW - 02101X0044)	2007-2020
11	Braize à Lolif	25.3	25.2064	25.206	25.206	I8033810	1991-2020	Lingéard (BSS000RCEW - 02101X0044)	2007-2020
12	Thar à Jullouville	73.1	73.3501	73.35	73.35	I7913610	1970-2020	Lingéard (BSS000RCEW - 02101X0044)	2007-2020

(Utilisation de données de pluie – ETP SAFRAN sur la période 1994-2020)

Figure 50 : Description des différentes grappes du modèle EROS du Sud Manche

Bassin		Niv_Base	Rsup_Progr	Rui_Perco	T1/2_Perco	T1/2_Taris1	T_Réaction	Fact_Échang	T_Propagat	Coef Emmag
N°_Identif	Nom	m NGF	mm	mm	mois	mois	pas_temps	%	pas_temps	(%)
1	NDT	161.653	237.404	1.984	6.264	3.252	0.3855	0	0	0.3
2	Landivy	162.102	178.072	20.272	2.523	2.955	0	0	6.25E-02	1.2
3	Virey	162.082	167.328	38.422	4.206	2.353	0.9996	0	0	1.1
4	Vezins	161.855	297.191	1	0.1756	3.987	0.7736	0	0.7176	1.0
5	StJames	162.392	209.043	51.16	1.004	3.554	0	0	0.9986	2.9
6	StSenier	162.378	315.847	1.345	0.1867	3.111	0.7145	0	6.25E-02	1.0
7	Selune_Aval_Beuvron	162.694	378.875	33.631	3.33	1.259	0.1	0	0.5	0.6
8	Oir	162.106	197.197	25.63	2.438	3.022	0	0	0.5	1.4
9	See_Cherence	208.84	59.614	36.219	4.397	1.116	0	0	0.6664	3.0
10	See_Tirepiéd	208.951	88.709	67.123	0.1875	2.478	0.7039	0	0.5	20.2
11	Braize_Lolif	208.974	86.652	53.581	4.34E-02	2.643	0.6016	0	0.5	23.9
12	Thar_Jullouville	208.967	117.256	25.442	0.4664	1.904	0.3785	0	0.5	9.4

Niv_Base = Niveau de base local de la nappe
 Rsup_Progr = Capacité du réservoir sol progressif
 Rui_Perco = Hauteur d'équi Ruissellement-Percolation du réservoir hypodermique H
 T1/2_Perco = Temps de 1/2 percolation vers la nappe
 T1/2_Taris1 = Temps de 1/2 tarissement souterrain (rapide) [Réservoir G1]
 T_Réaction = Temps de réaction ('retard') du débit de rivière (en 'nombre de pas de temps')
 Fact_Échang = Facteur d'échange souterrain externe (importation si > 0)
 T_Propagat = Temps de propagation du débit => Sous-Bassin aval
 Coef_Emmag = Coefficient d'emménagement de Nappe (%)

Figure 51 : Résultats des calages des paramètres des différents réservoirs du modèle

4.5.3. Comparaison des coefficients d'ajustement du modèle

Les coefficients d'ajustement obtenus pour chaque sous bassin sont présentés à la Figure 52. Les coefficients de calage (période 1990-2020) des débits oscillent entre 0.78 et 0.95 (moyenne de 0.88) et ceux des niveaux entre 0.83 et 0.93 (moyenne de 0.90) ce qui montre une bonne représentation des débits et des niveaux par le modèle.

BASSIN		Coefficient d'ajustement (racine nash)		Nash			Biais (en %)
N°_Identif	Nom	Débits	Niveaux	Débits	Niveaux	Global	Débits
1	NDT	0.9113	0.9032	0.8305	0.8159	0.8457	4.5
2	Landivy	0.872	0.9013	0.7605	0.8124	0.8356	-8.8
3	Virey	0.8754	0.9147	0.7663	0.8367	0.8021	-19
4	Vezins	0.9452	0.9074	0.8935	0.8233	0.8779	-8.6
5	StJames	0.7822	0.8944	0.6119	0.7999	0.7198	0
6	StSenier	0.898	0.826	0.8064	0.6823	0.8018	-1
7	Selune_Aval _Beuvron	0.9282	0.8729	0.8616	0.762	0.8231	1.4
8	Oir	0.8903	0.9065	0.7926	0.8218	0.7962	-3
9	See_Cherence	0.8667	0.9146	0.7512	0.8365	0.841	-15.2
10	See_Tireped	0.9239	0.9225	0.8535	0.851	0.8181	-6.6
11	Braize_Lolif	0.8463	0.9221	0.7163	0.8503	0.7816	-2.1
12	Thar_Jullouville	0.8779	0.9289	0.7707	0.8628	0.8401	-8.4
MOYENNE		0.8848	0.9012	0.7846	0.8129	0.8153	-5.6

Figure 52 : Comparaison des coefficients d'ajustement, des coefficients de nash des débits et des niveaux et des biais des débits (moyenne du débit simulée - moyenne du débit observée) pour les différentes grappes du modèle EROS du Sud Manche

Les chroniques de débits et niveaux mesurés et observés sont présentées au paragraphe suivant (§ 4.5.4). Ces courbes montrent que les tendances sont bien reproduites pour l'ensemble des bassins versants ; en particuliers les débits d'étiages sont particulièrement bien reproduits du fait du choix de la méthode de calibration (minimisation des écarts sur le logarithme (décimal) des débits), qui se focalise sur les étiages. La contrepartie est que les pics de crue sont parfois sous-estimés pour certains ss-BV (Airon à Landivy, Beuvron à St James, Sée à Chérencé ; Braize et Thar).

La bonne reproduction des étiages (objectif recherché étant donné le sujet de l'étude) est confirmée par la comparaison des coefficients de Nash sur les débits, la racine carrée des débits (moins d'influence des forts débits) et le logarithme des débits (plus forte influence des étiages) (Figure 53). Le gain moyen est de 5.5% mais peut atteindre 10% à 15% dans les BV où les crues étaient moins bien reproduites (Airon à Landivy, Beuvron à St James, Sée à Chérencé), indiquant ainsi que les coefficients d'ajustement pour les périodes d'étiages sont bien supérieurs aux coefficients d'ajustements indiqués sur la Figure 52 (qui prennent en compte la totalité de la longueur de la chronique dont les périodes de crues).

BASSIN		Nash Débit	Nash Q_Logar	Nash Q_Racin	Gain en %	
N°_Identif	Nom				Nash_Q_Loga / Nash débit	Nash_Q_Racin / Nash débit
1	NDT	0.8305	0.8568	0.8675	3.2%	4.5%
2	Landivy	0.7605	0.85	0.8383	11.8%	10.2%
3	Virey	0.7663	0.8157	0.7991	6.4%	4.3%
4	Vezins	0.8935	0.8988	0.9077	0.6%	1.6%
5	StJames	0.6119	0.7043	0.7016	15.1%	14.7%
6	StSenier	0.8064	0.8279	0.8346	2.7%	3.5%
7	Selune_Aval_Beuvron	0.8616	0.8372	0.8665	-2.8%	0.6%
8	Oir	0.7926	0.7943	0.8103	0.2%	2.2%
9	See_Cherence	0.7512	0.8587	0.8289	14.3%	10.3%
10	See_Tirepied	0.8535	0.8188	0.8538	-4.1%	0.0%
11	Braize_Lolif	0.7163	0.7704	0.766	7.6%	6.9%
12	Thar_Jullouville	0.7707	0.8449	0.8348	9.6%	8.3%
MOYENNE		0.7846	0.8231	0.8258	5.4%	5.6%

Nash_Débit = Coefficient de Nash sur les débits (naturels)

Nash_Q_Racin = Coefficient de Nash sur la racine carrée du débit (moins d'influence des forts débits)

Nash_Q_Logar = Coefficient de Nash sur le logarithme du débit (plus forte influence des étiages)

Figure 53 : Comparaison des coefficients de Nash sur les débits, la racine carrée des débits et le logarithme des débits

Concernant le calage des étiages (calage en racine carrée des débits), s'ils sont globalement bien reproduits pour l'ensemble des BV modélisés, on peut noter toutefois qu'ils semblent légèrement surestimés pour l'Airon à Landivy et le Beuvron à Saint-Senier (cf. graphiques sur les pages suivantes : Figure 54 à Figure 65).

Autre élément notable pour l'ensemble des sous-BV modélisés, les étiages semblent bien reproduits de 2004 à 2020 mais moins bien reproduits pour la période précédant 2003. Cet écart peut être lié à une moins bonne connaissance des prélèvements et rejets sur la période plus ancienne.

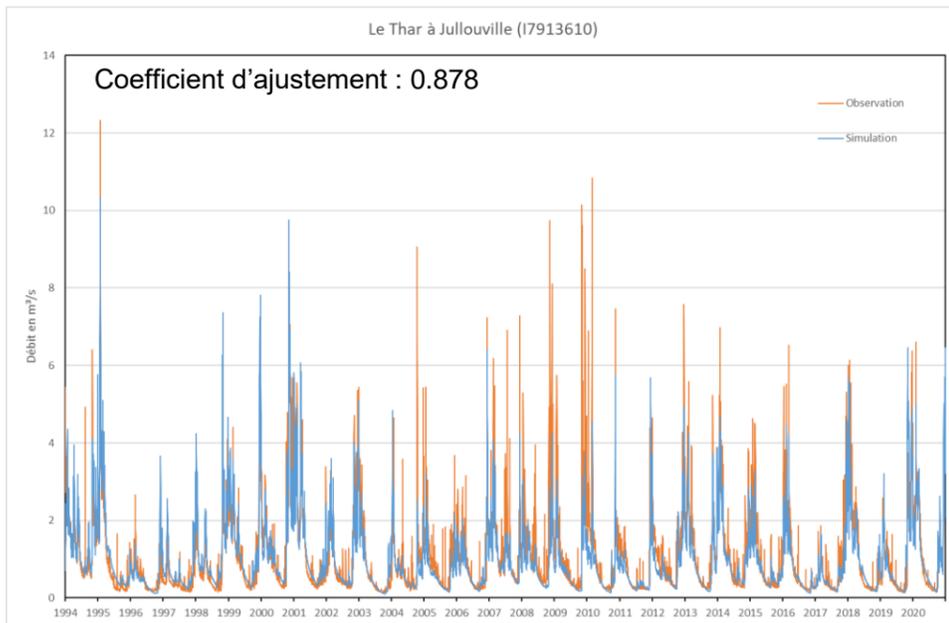
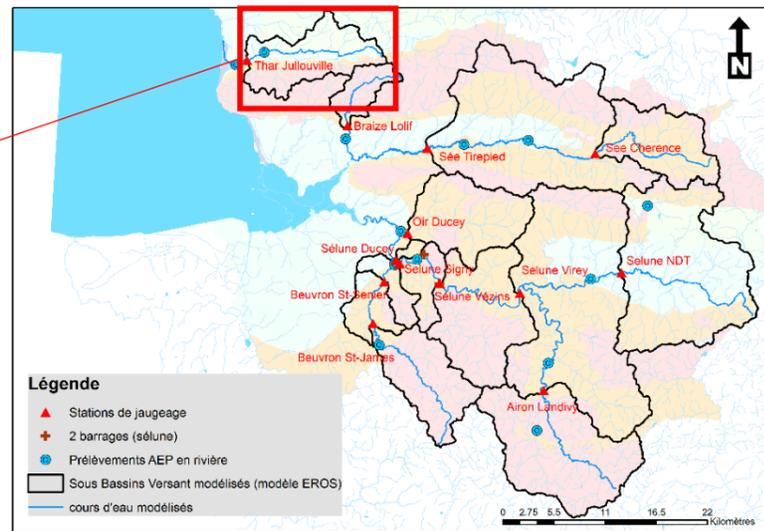
4.5.4. Résultats du calage : comparaison des chroniques observées et simulées

Les résultats du calage sont présentés pour chaque bassin élémentaire de la façon suivante :

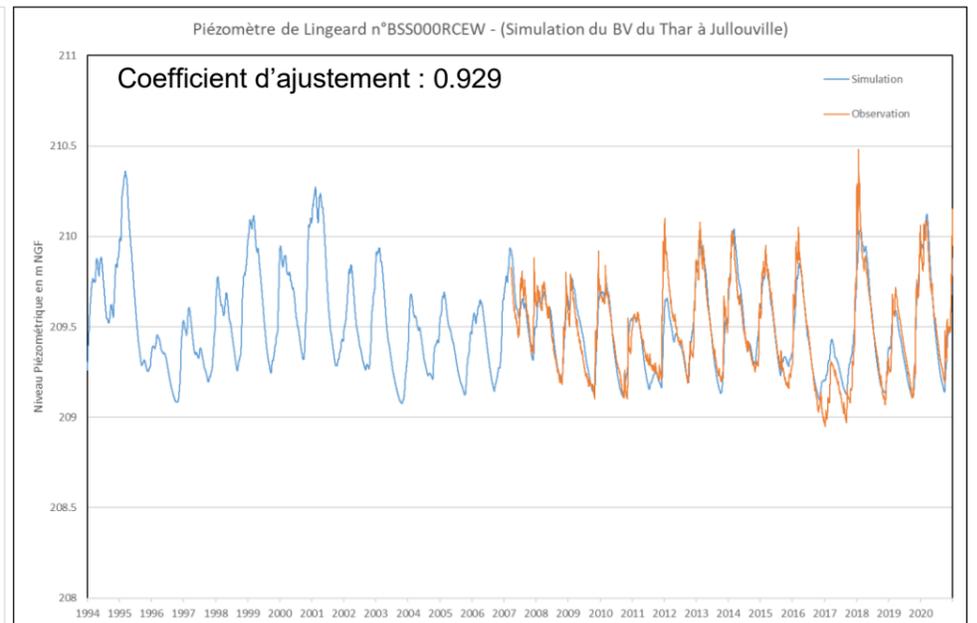
- comparaison des débits observés (en orange) et simulés (en bleu) au pas de temps journalier sur toute la plage des débits et toute la période de simulation,
- comparaison des niveaux piézométriques observés et simulés.

(cf. graphiques sur les pages suivantes : Figure 54 à Figure 65)

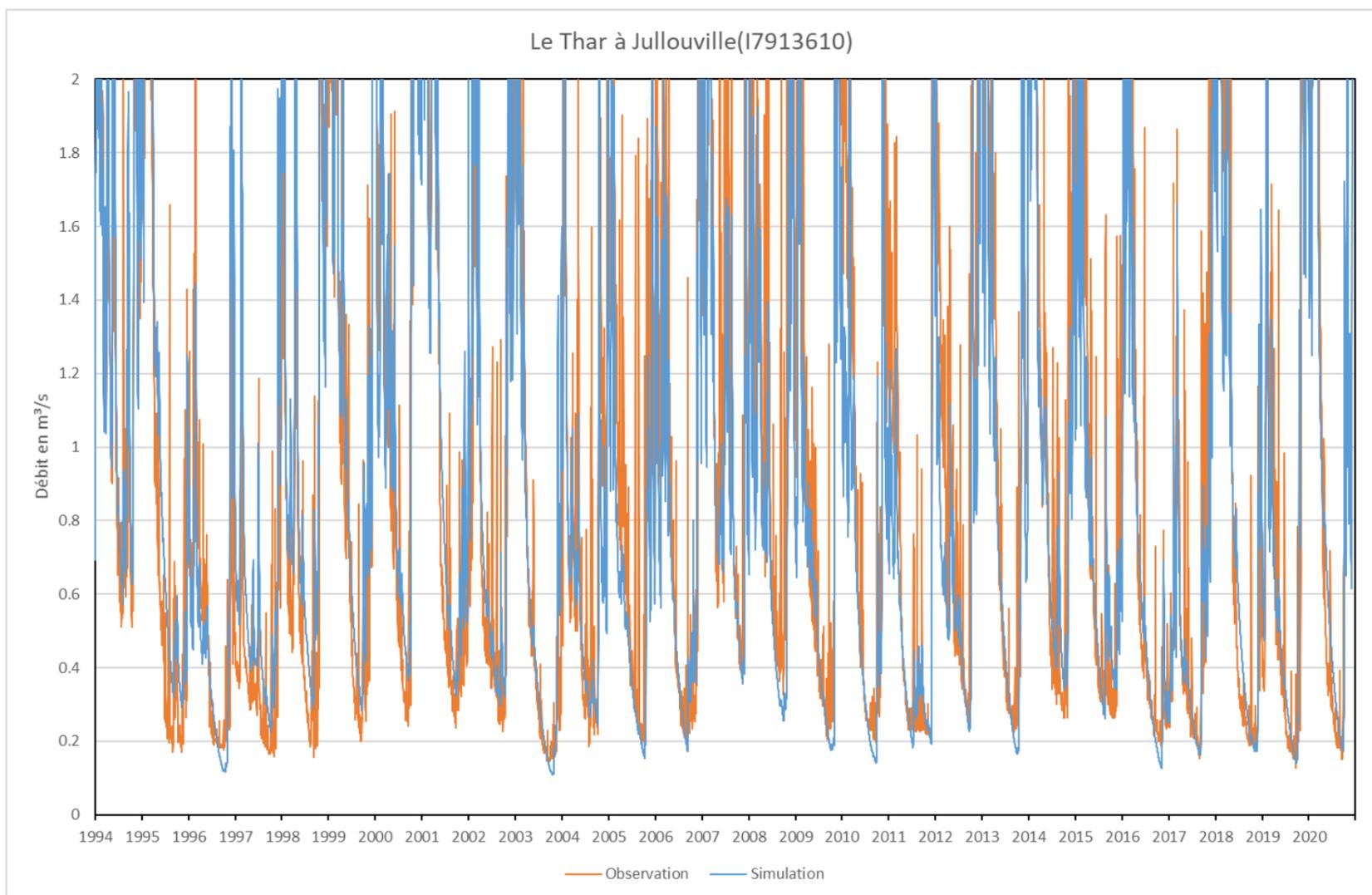
BV du Thar



Débit : Thar à Jullouville



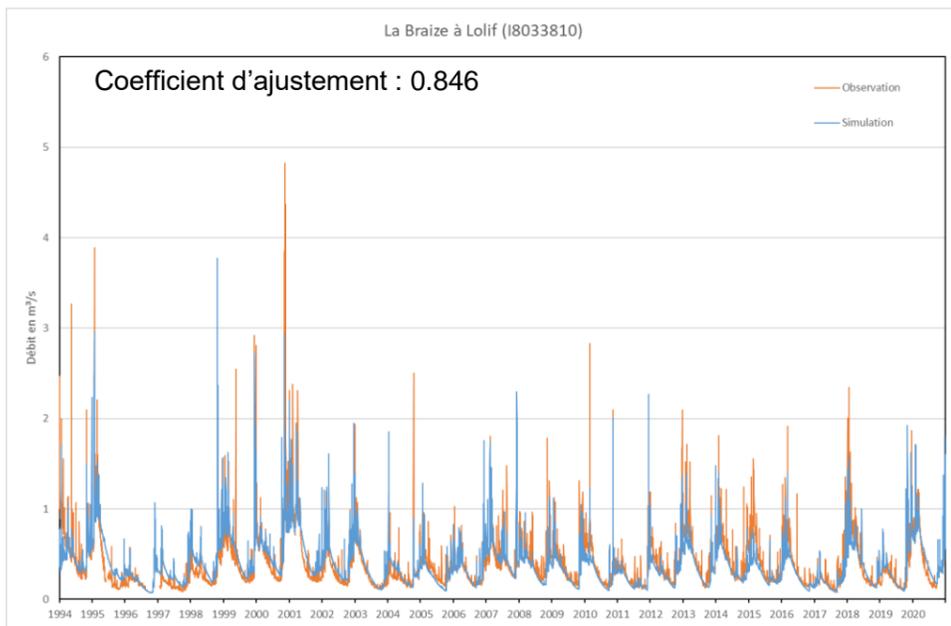
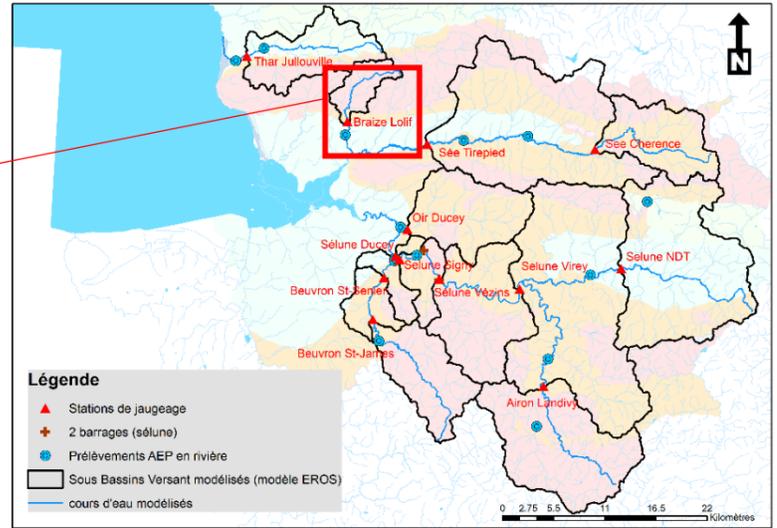
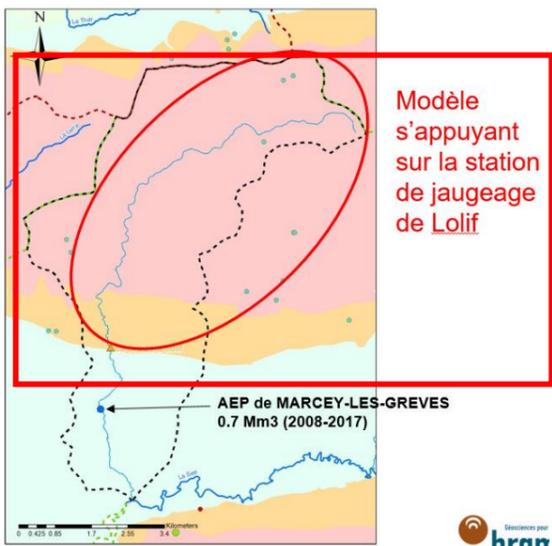
Niveau : Lingeard



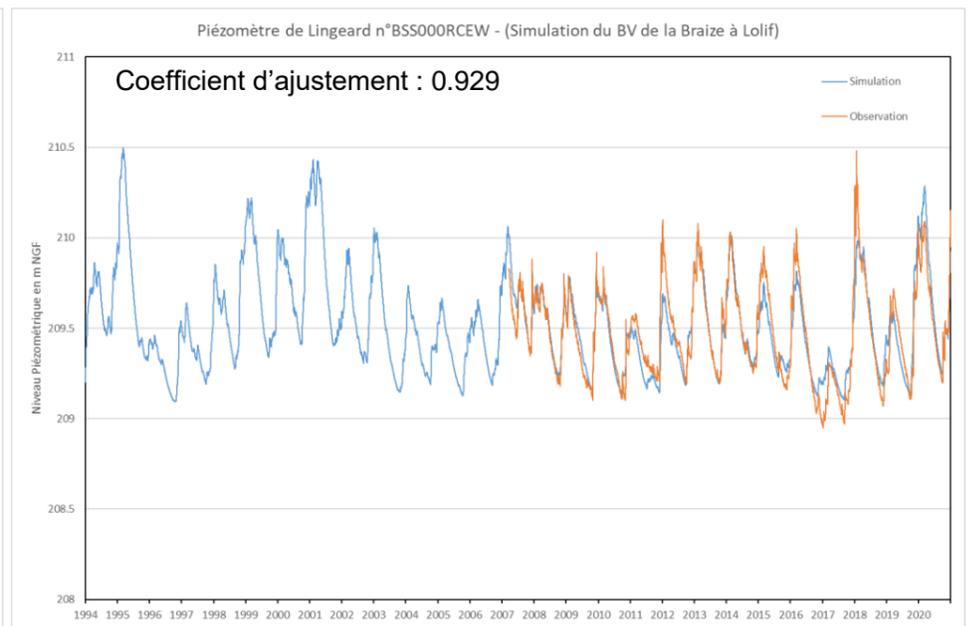
Débit du Thar à Jullouville : zoom sur les débits d'étiage

Figure 54 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Thar à Jullouville

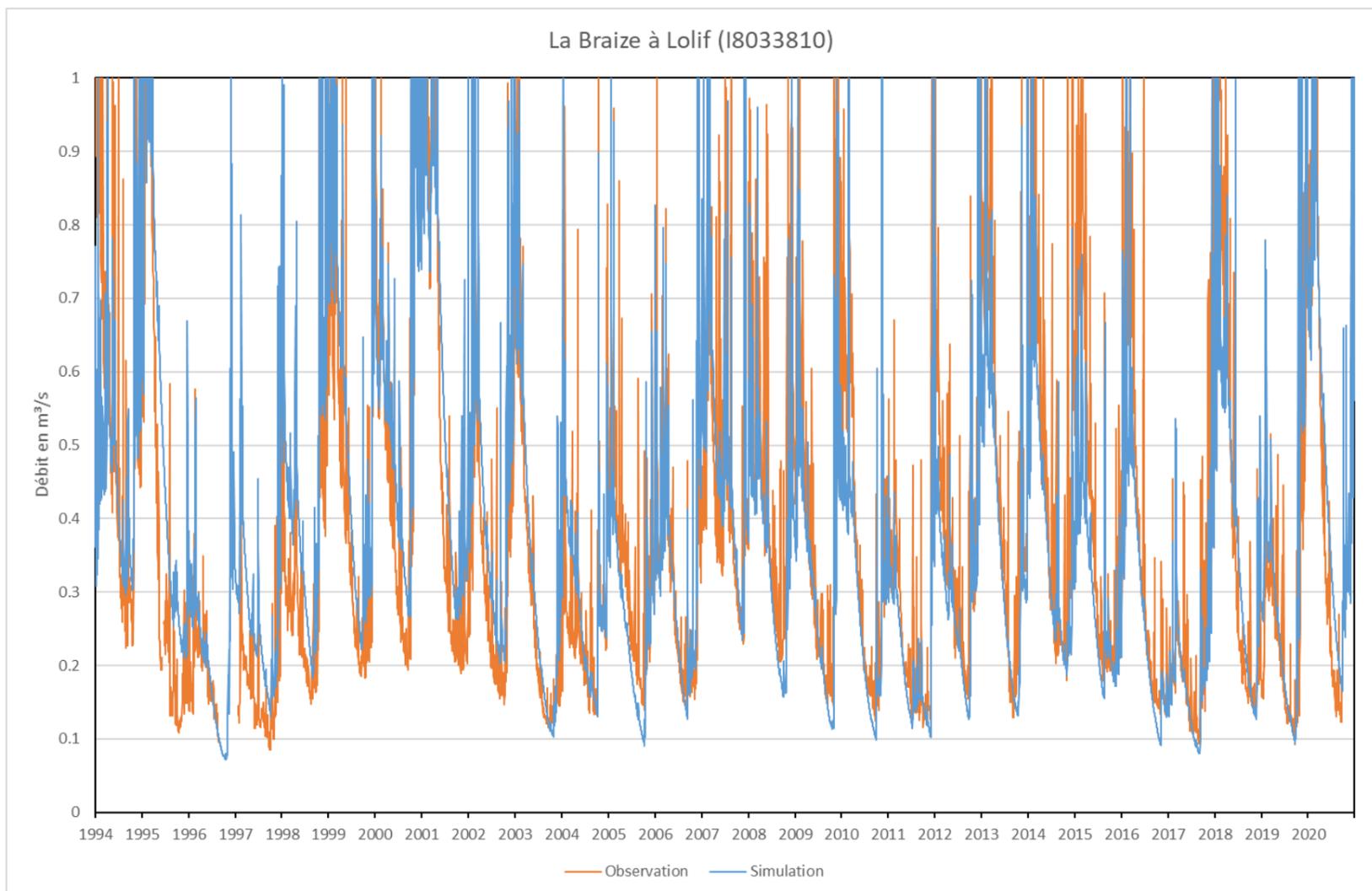
BV de la Braize



Débit : Braize à Lofif



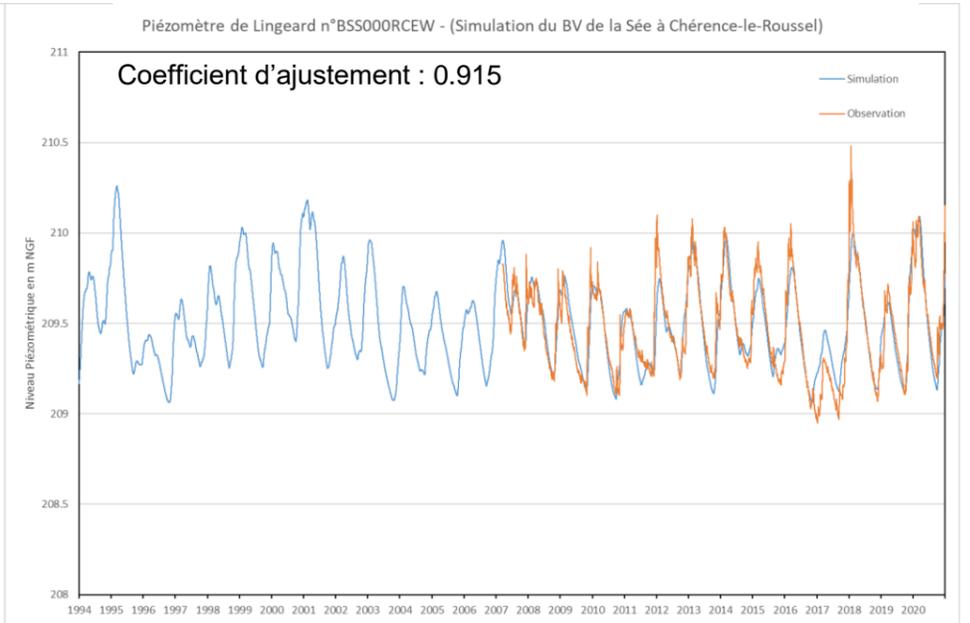
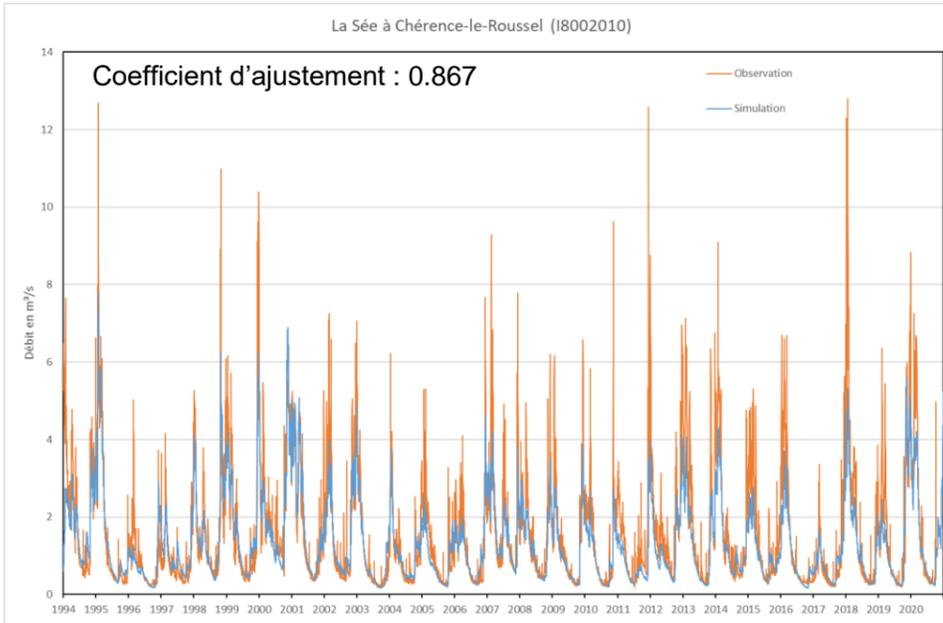
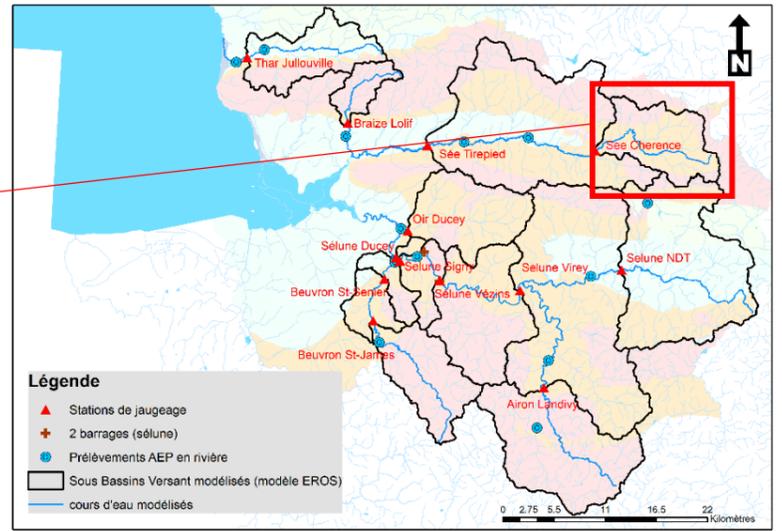
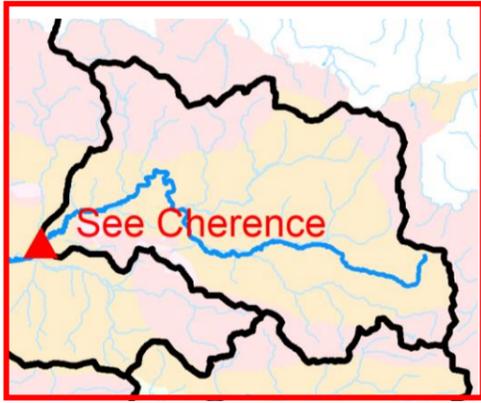
Niveau : Lingéard



Débit de la Braize à Lofif : zoom sur les débits d'étiage

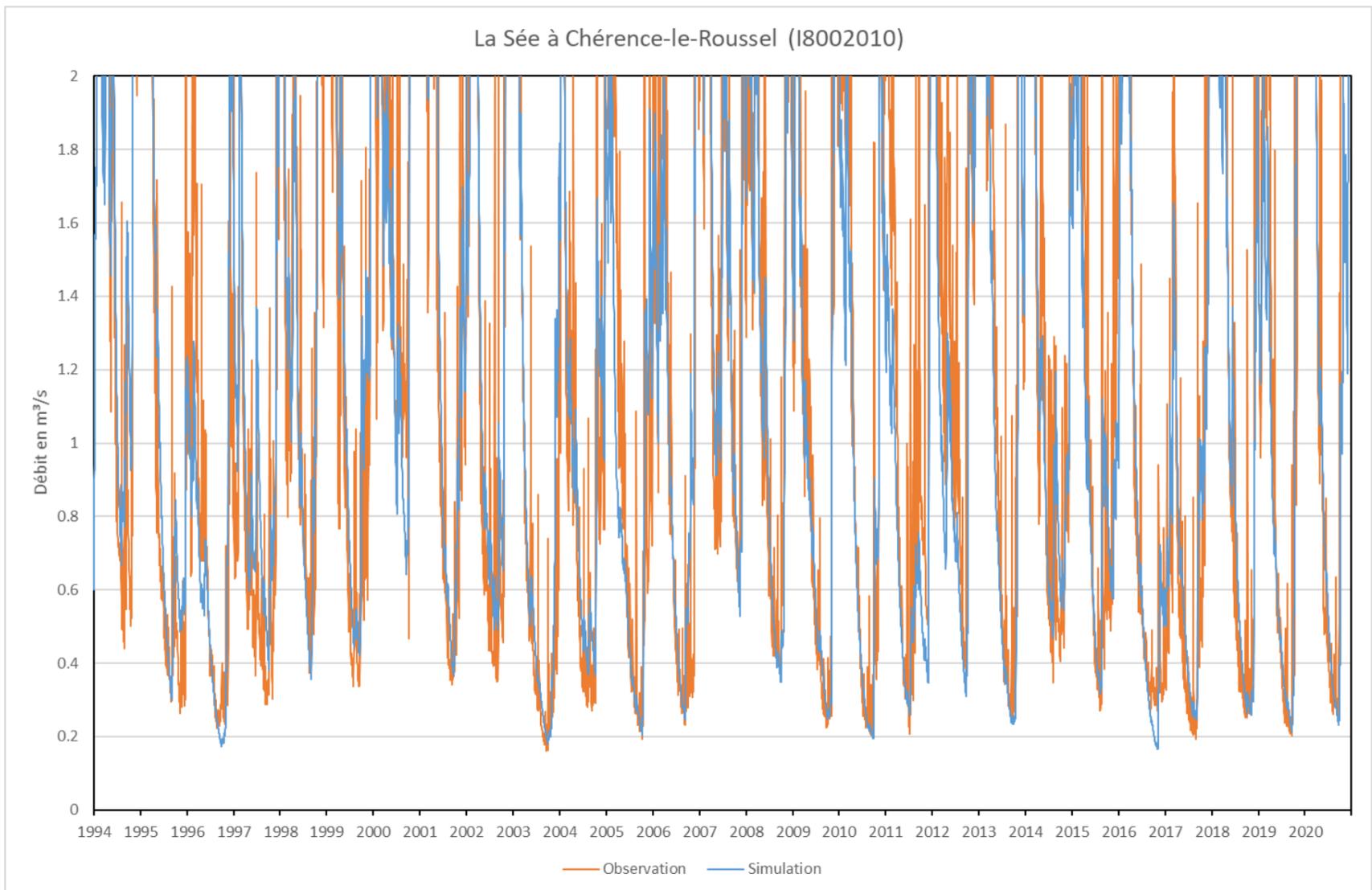
Figure 55 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Braize à Lofif

BV de la SEE à Chérencé-le-roussel



Débit : Sée à Chérencé le roussel

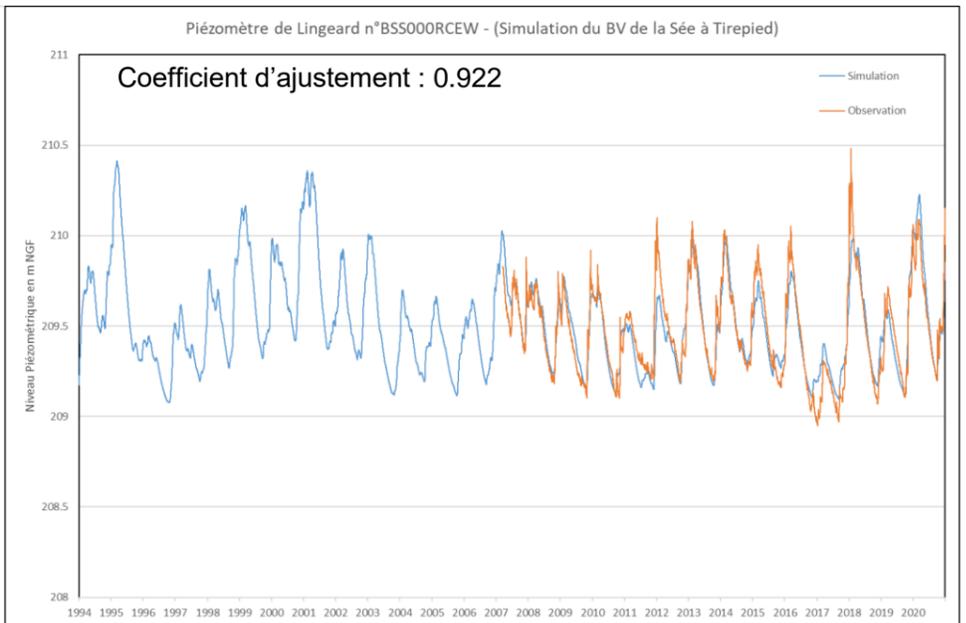
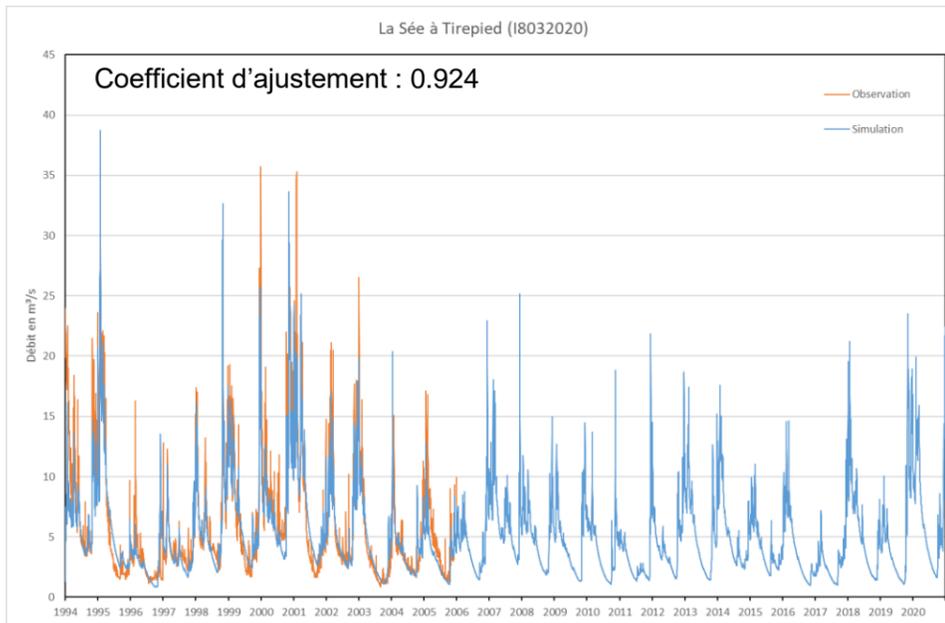
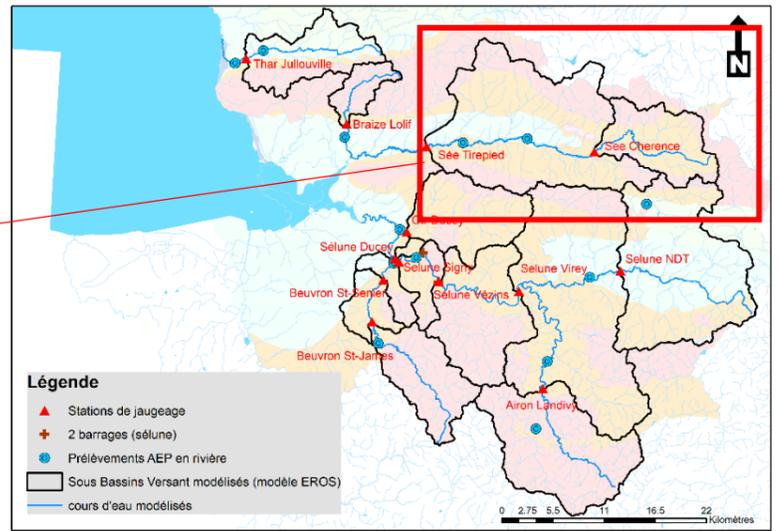
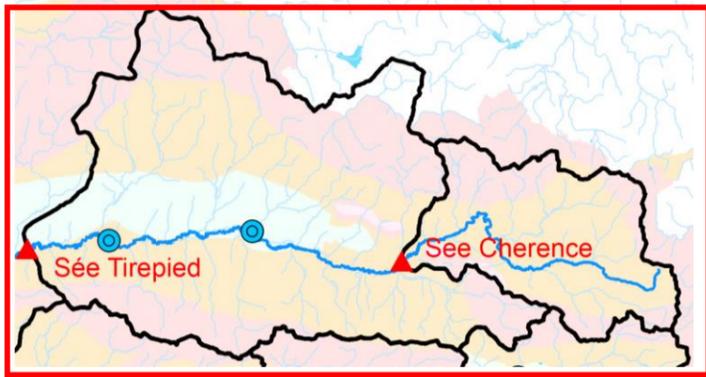
Niveau : Lingeard



Débit de la Sée à Chérencé le roussel : zoom sur les débits d'étiage

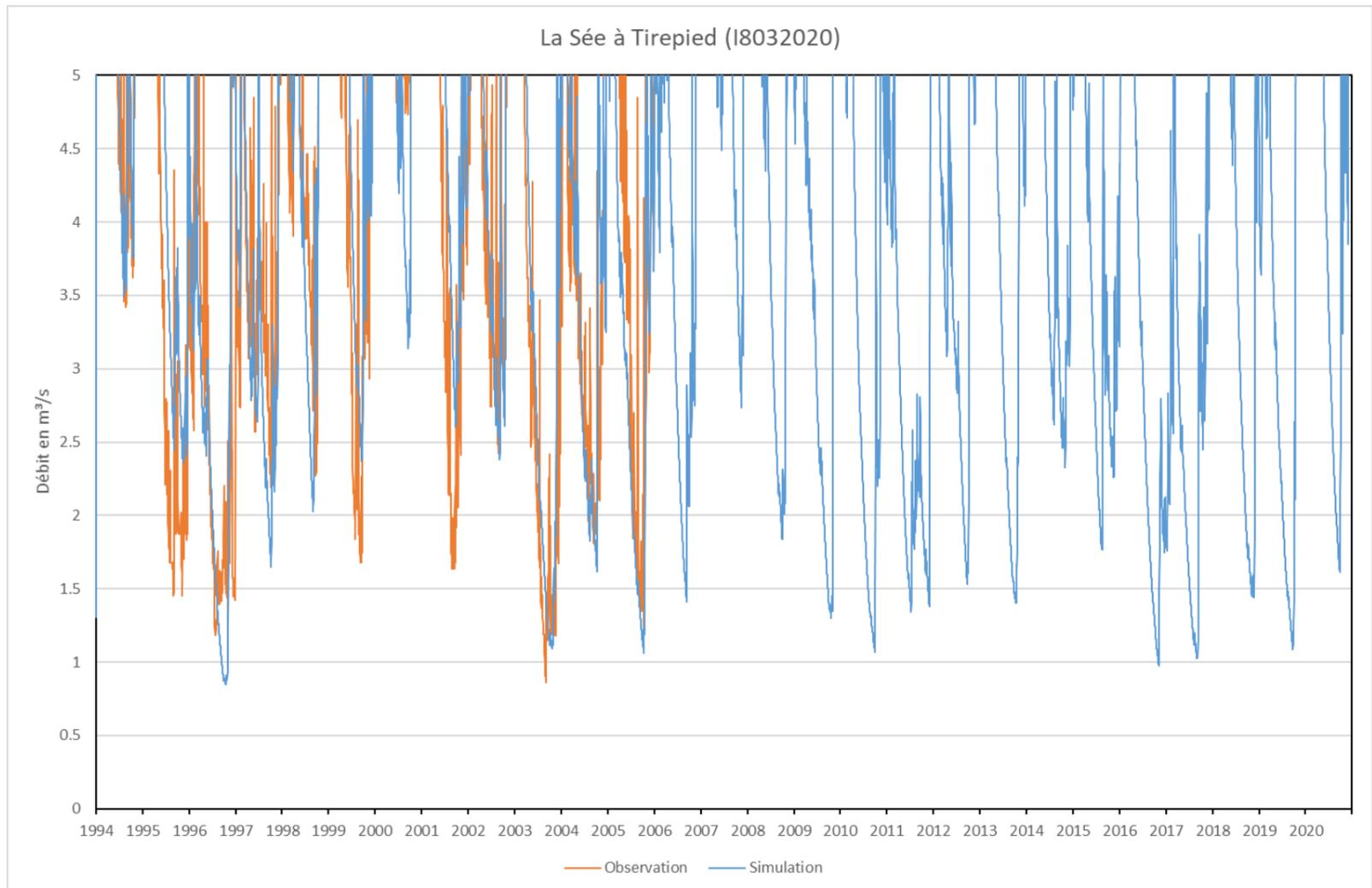
Figure 56 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sée à Chérencé-le-Roussel

BV de la SEE à Tirepied



Débit : Sée à Tirepied

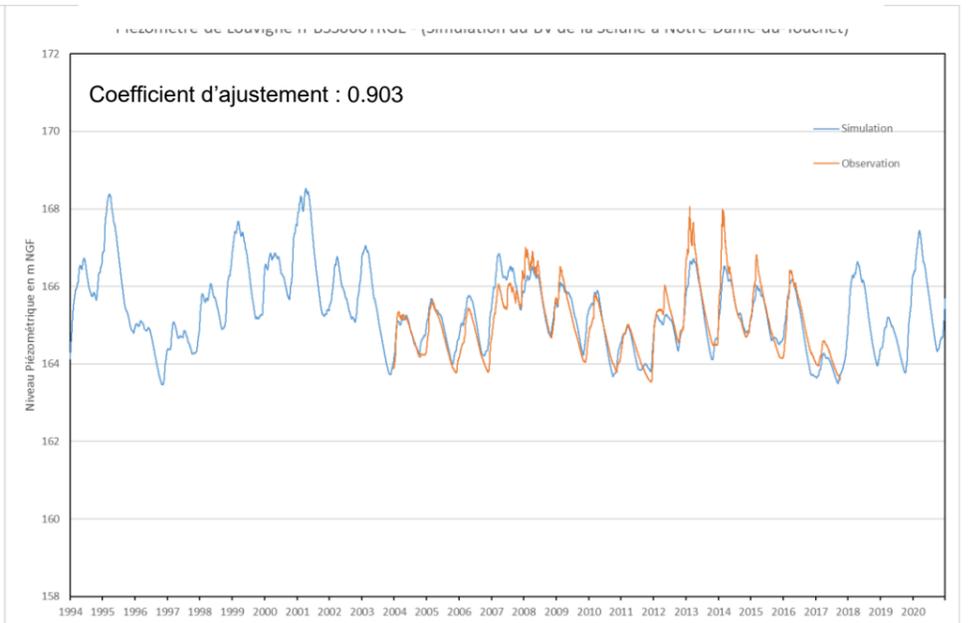
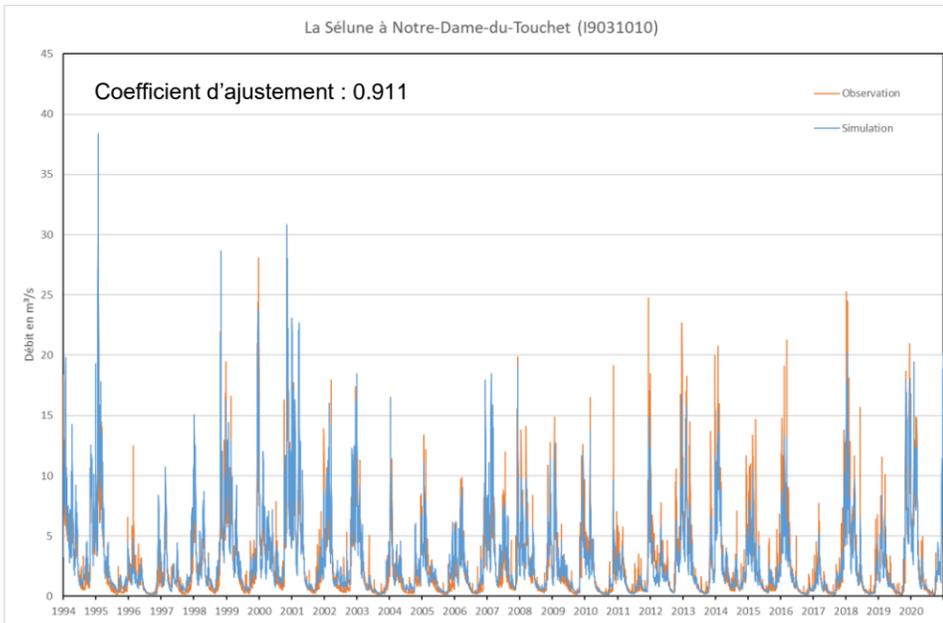
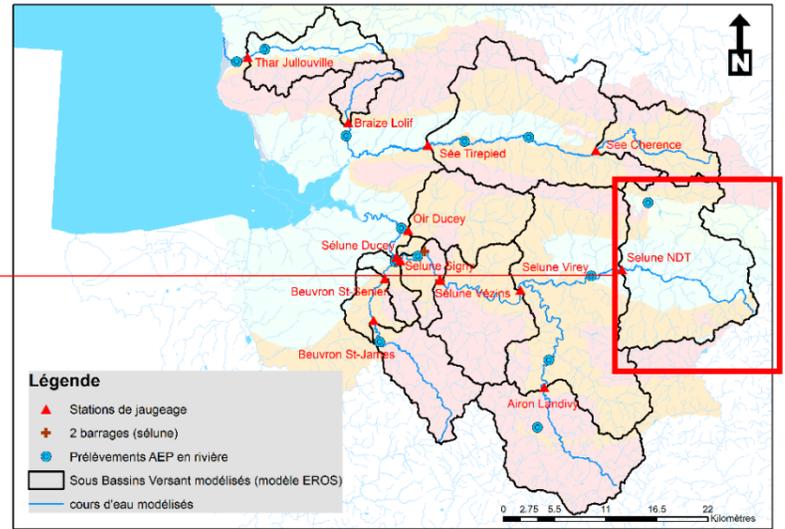
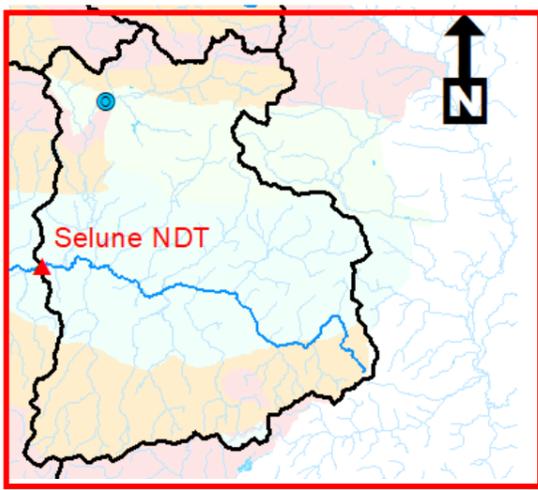
Niveau : Lingard



Débit de la Sée à Tirepied : zoom sur les débits d'été

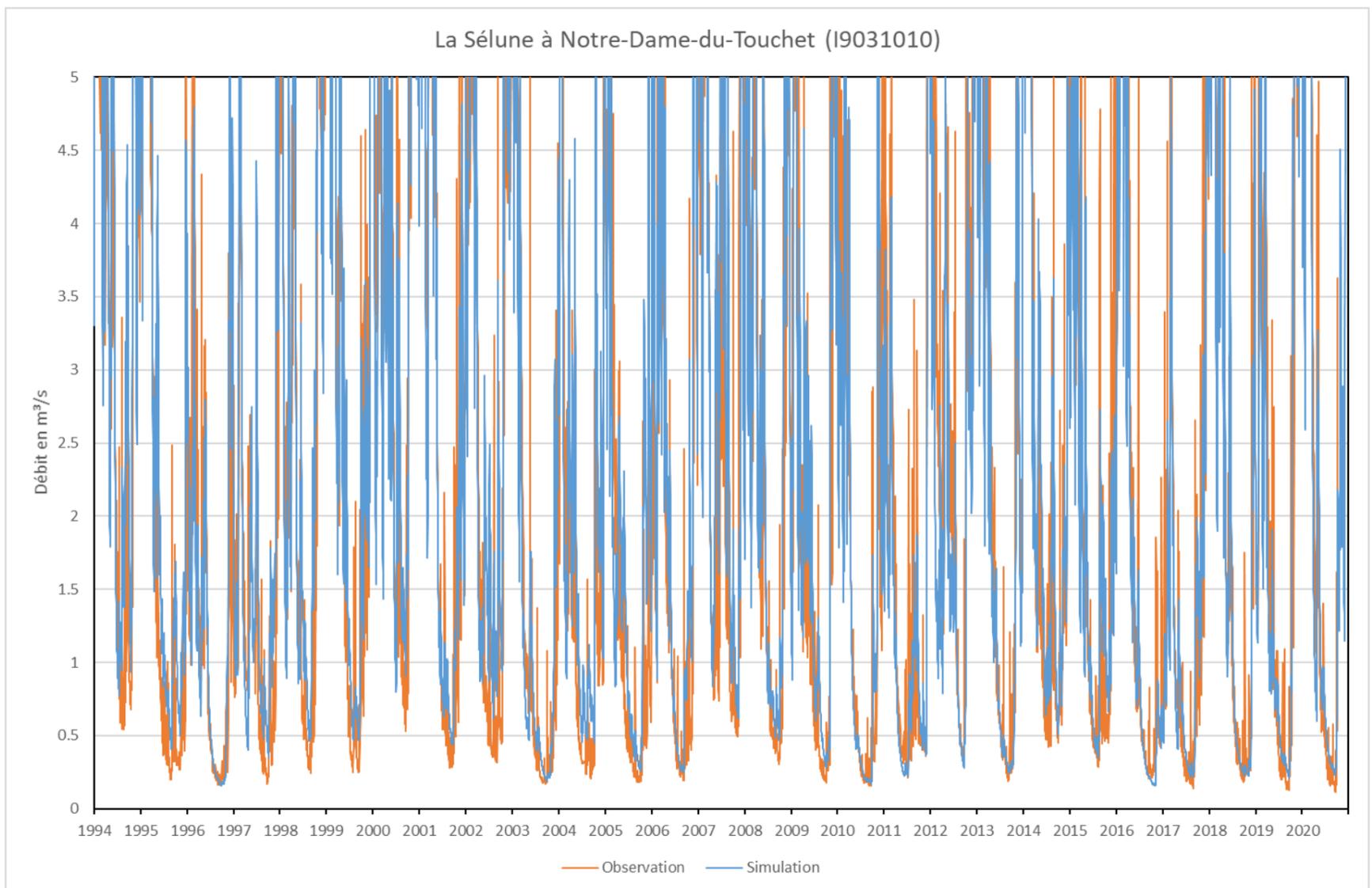
Figure 57 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sée à Tirepied

Sélune à NDT



Débit : Sélune à NDT

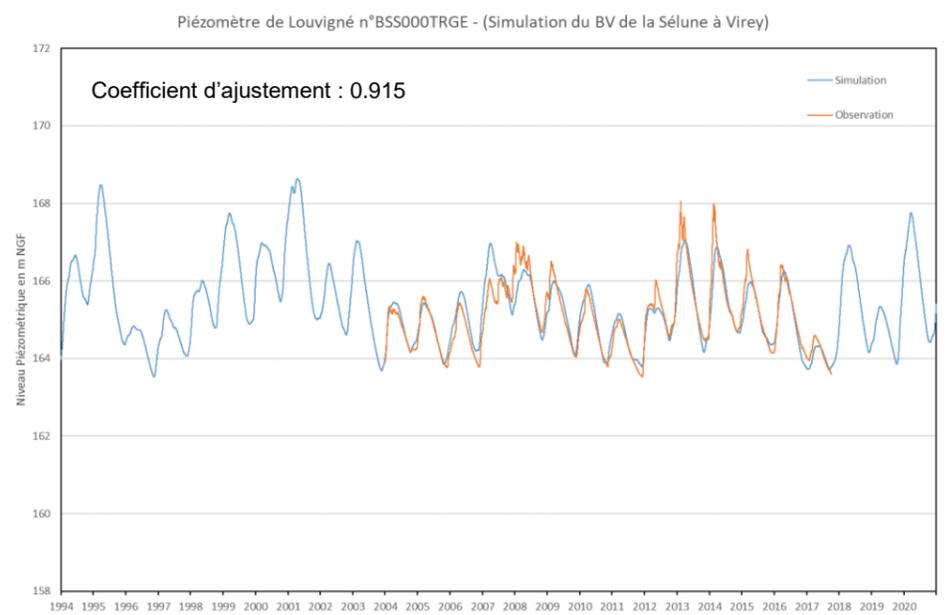
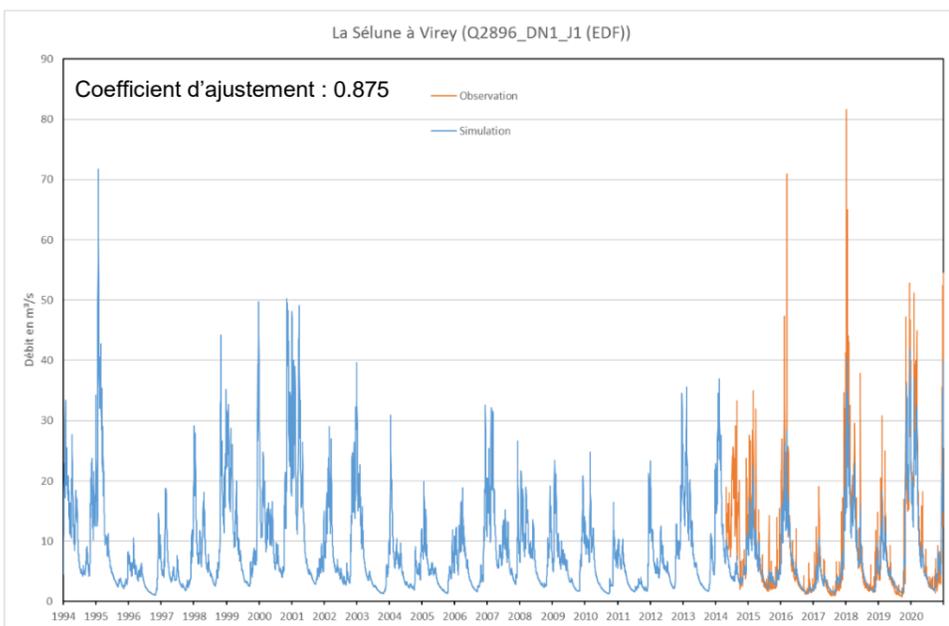
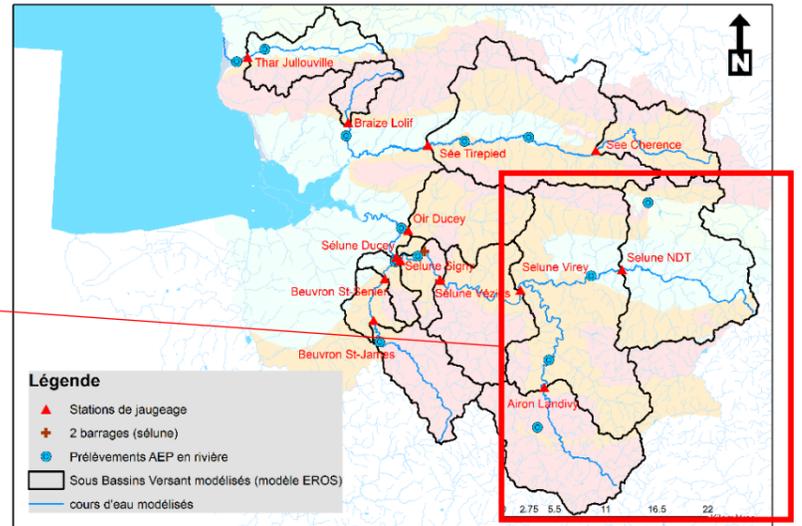
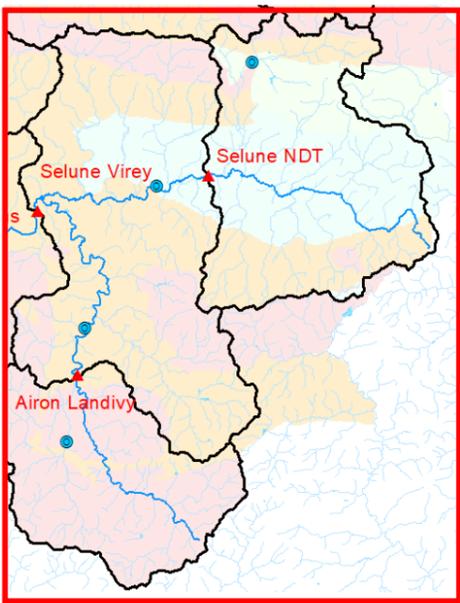
Niveau : Louigné



Débit de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet : zoom sur les débits d'été

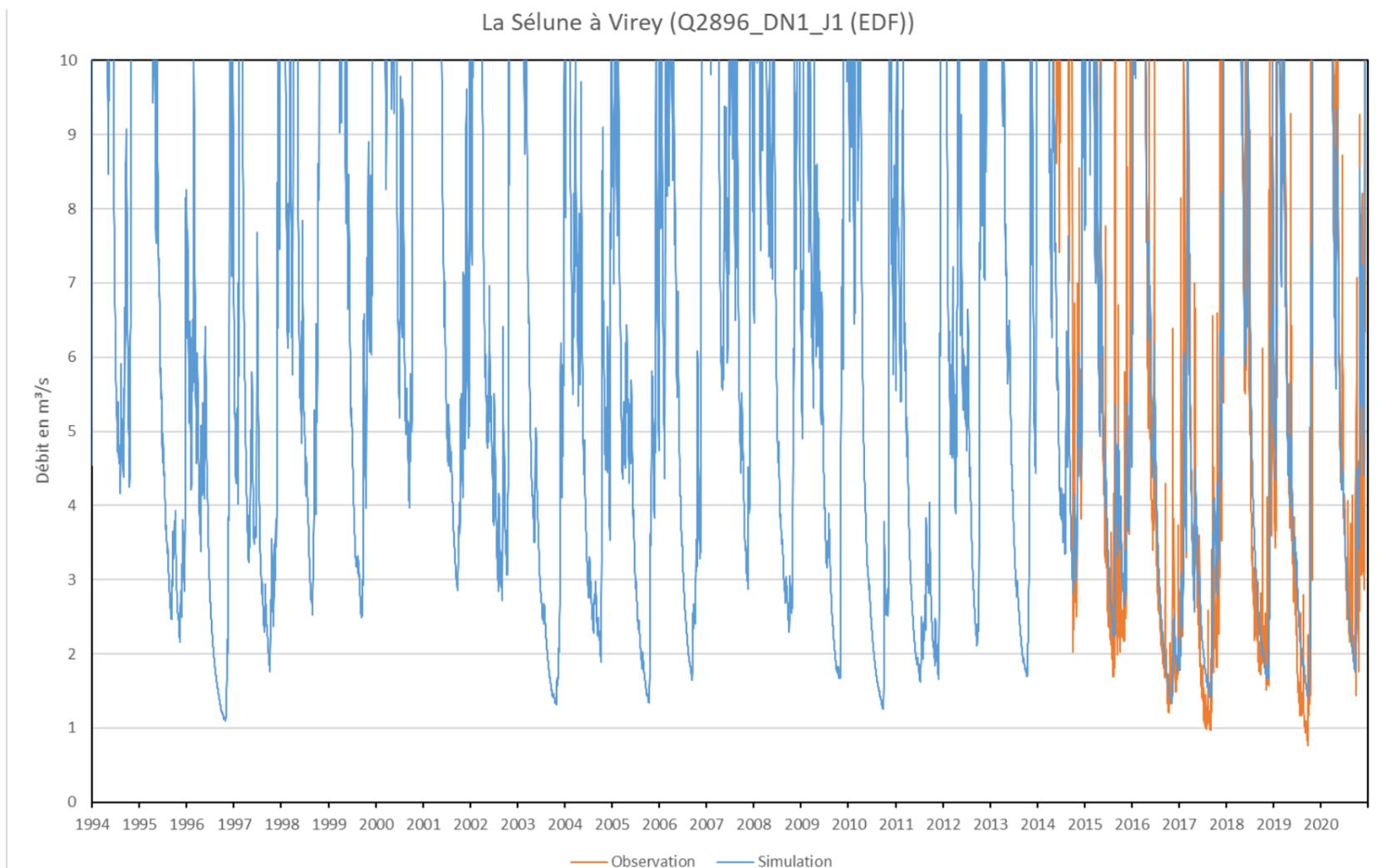
Figure 58 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet

Sélune à Virey



Débit : Sélune à Virey

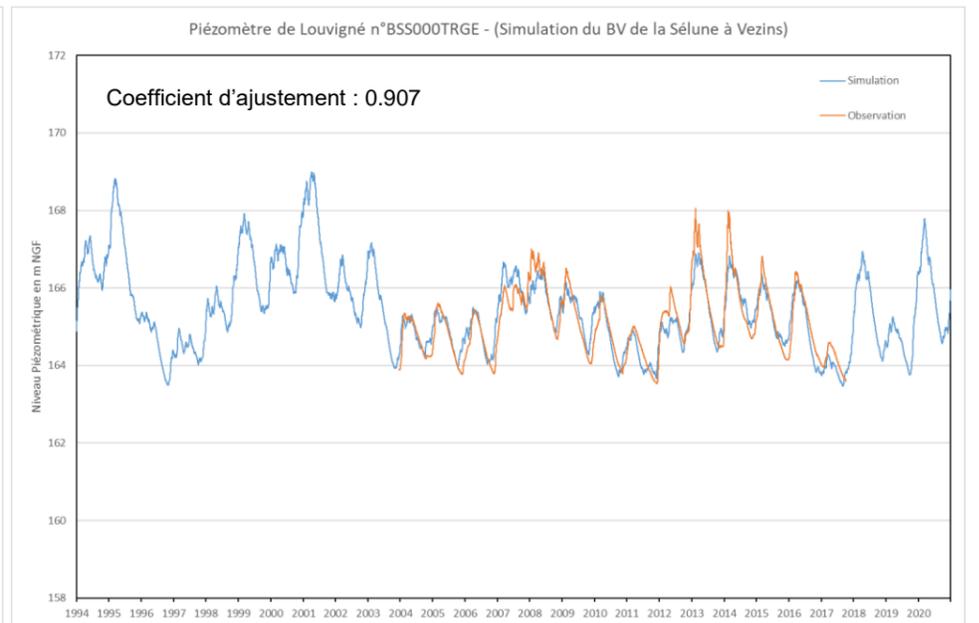
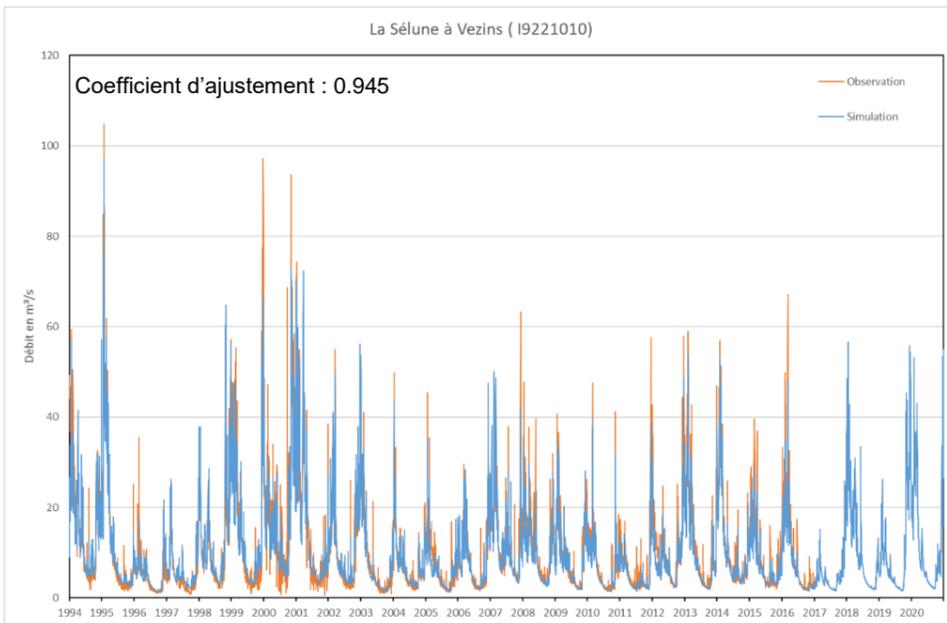
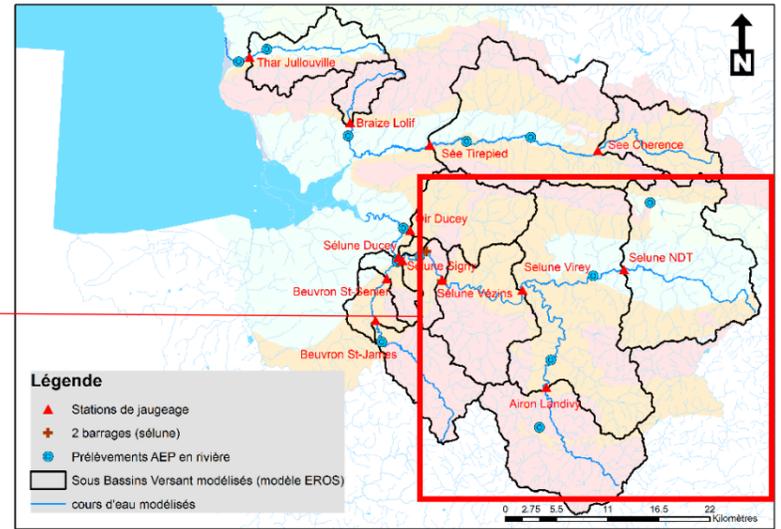
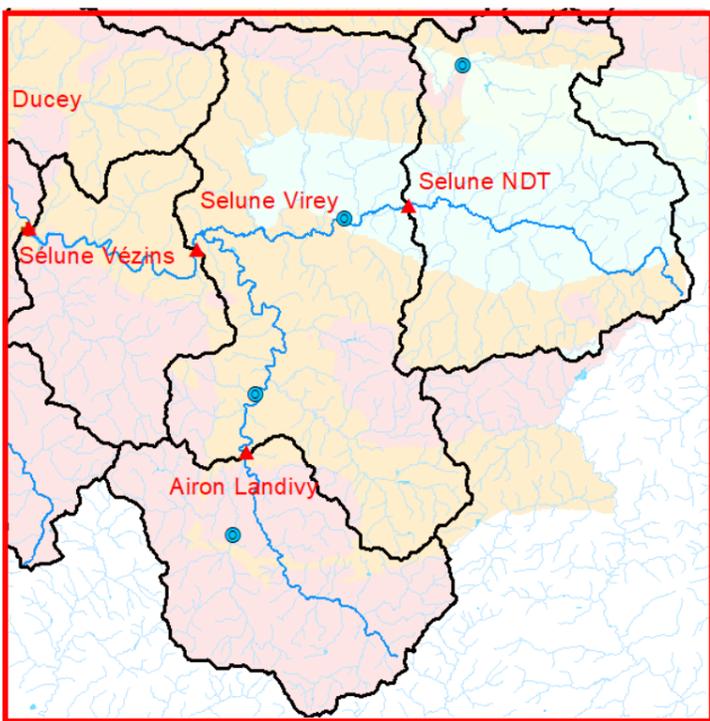
Niveau : Louvigné



Débit de la Sélune à Virey: zoom sur les débits d'été

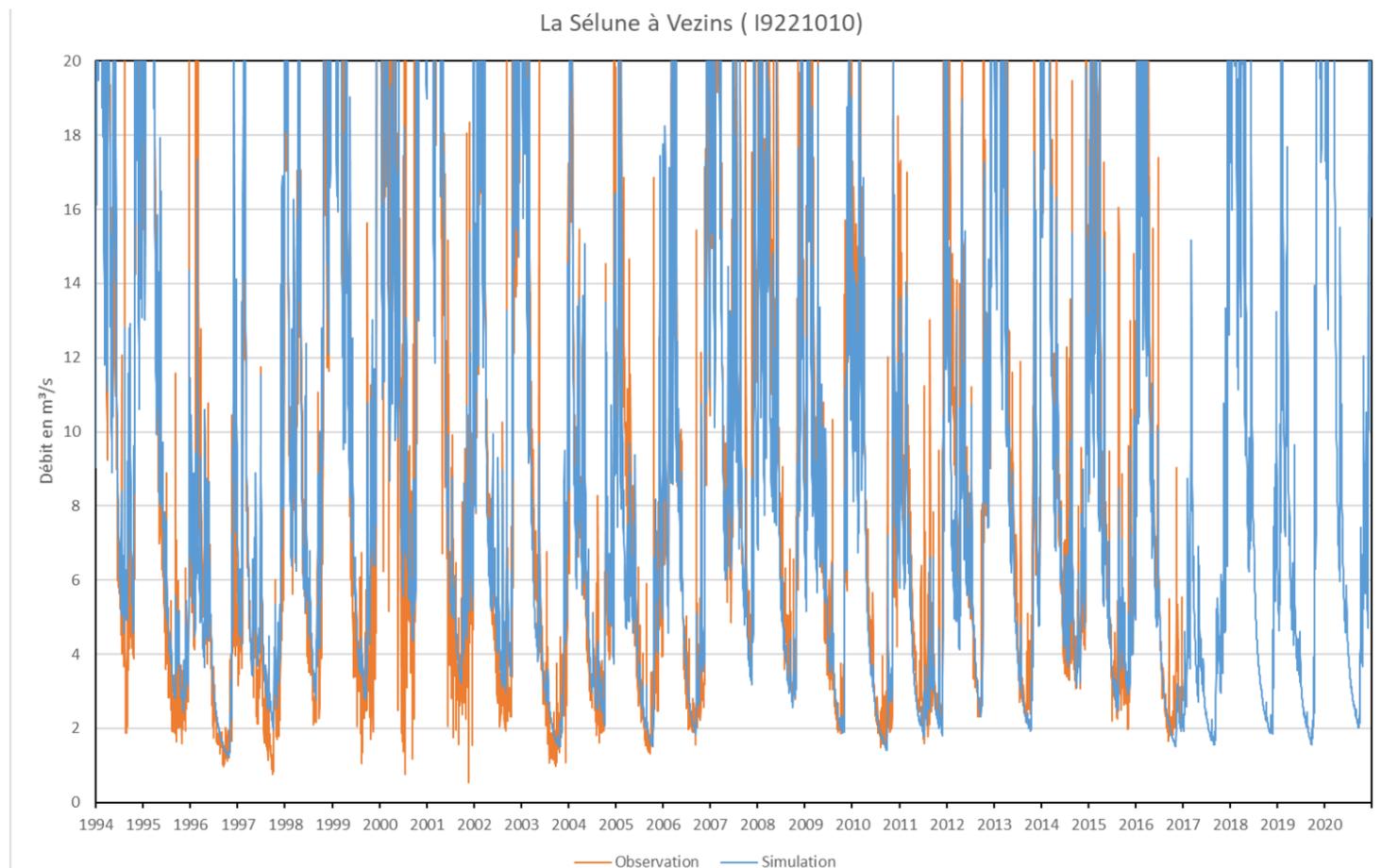
Figure 59 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Virey

Sélune à Vézins



Débit : Sélune à Vézins

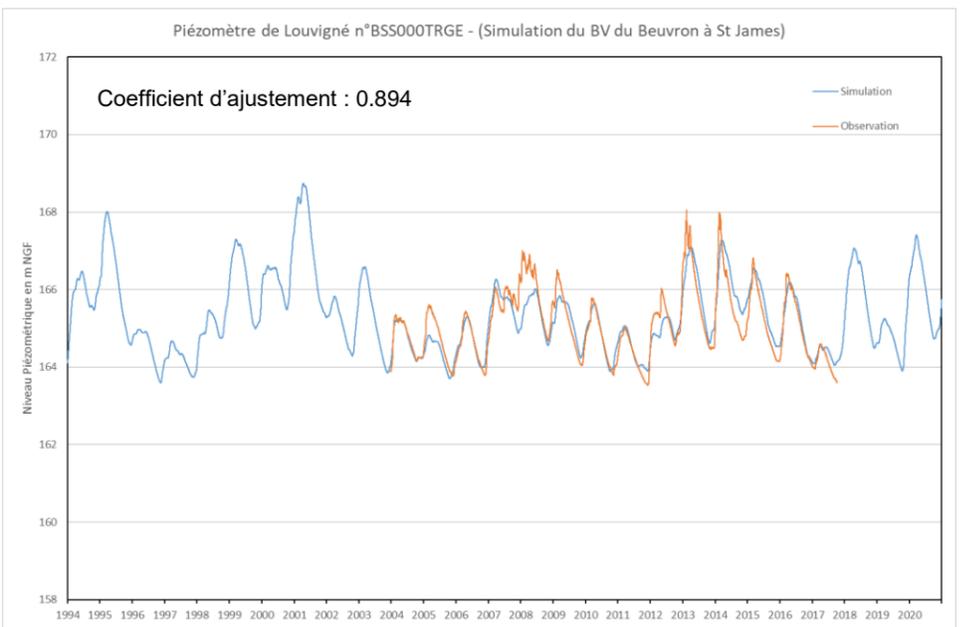
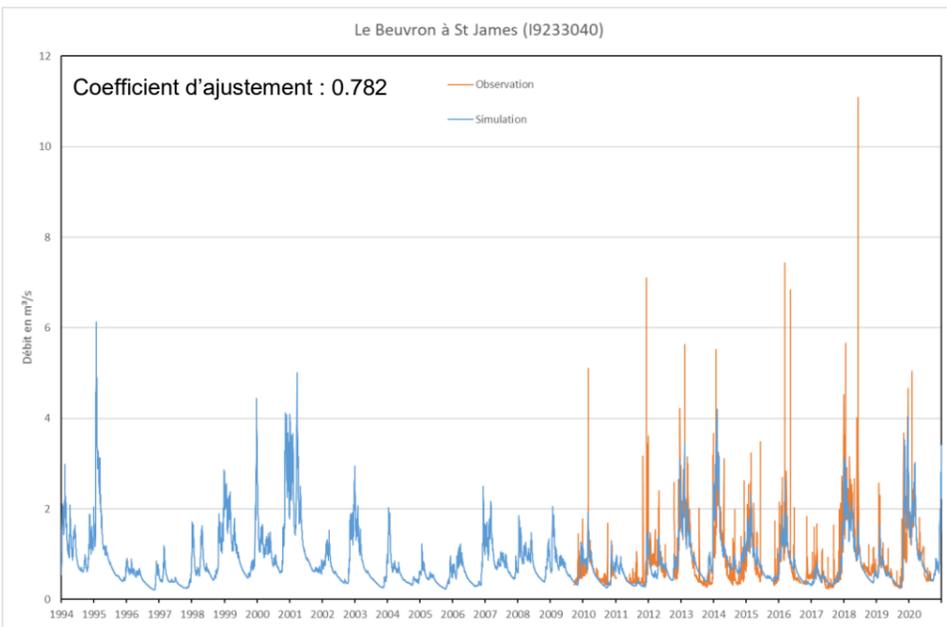
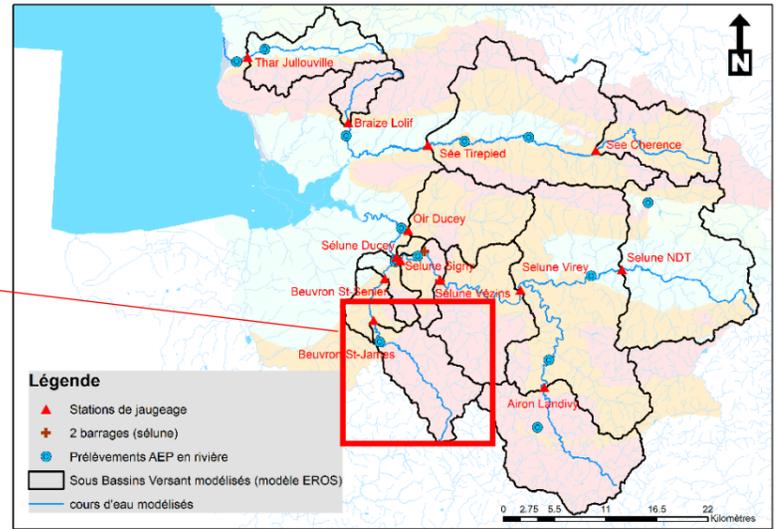
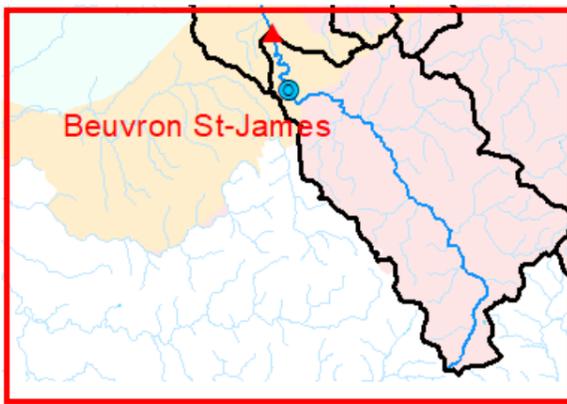
Niveau : Louvigné



Débit de la Sélune à Vézins : zoom sur les débits d'étiage

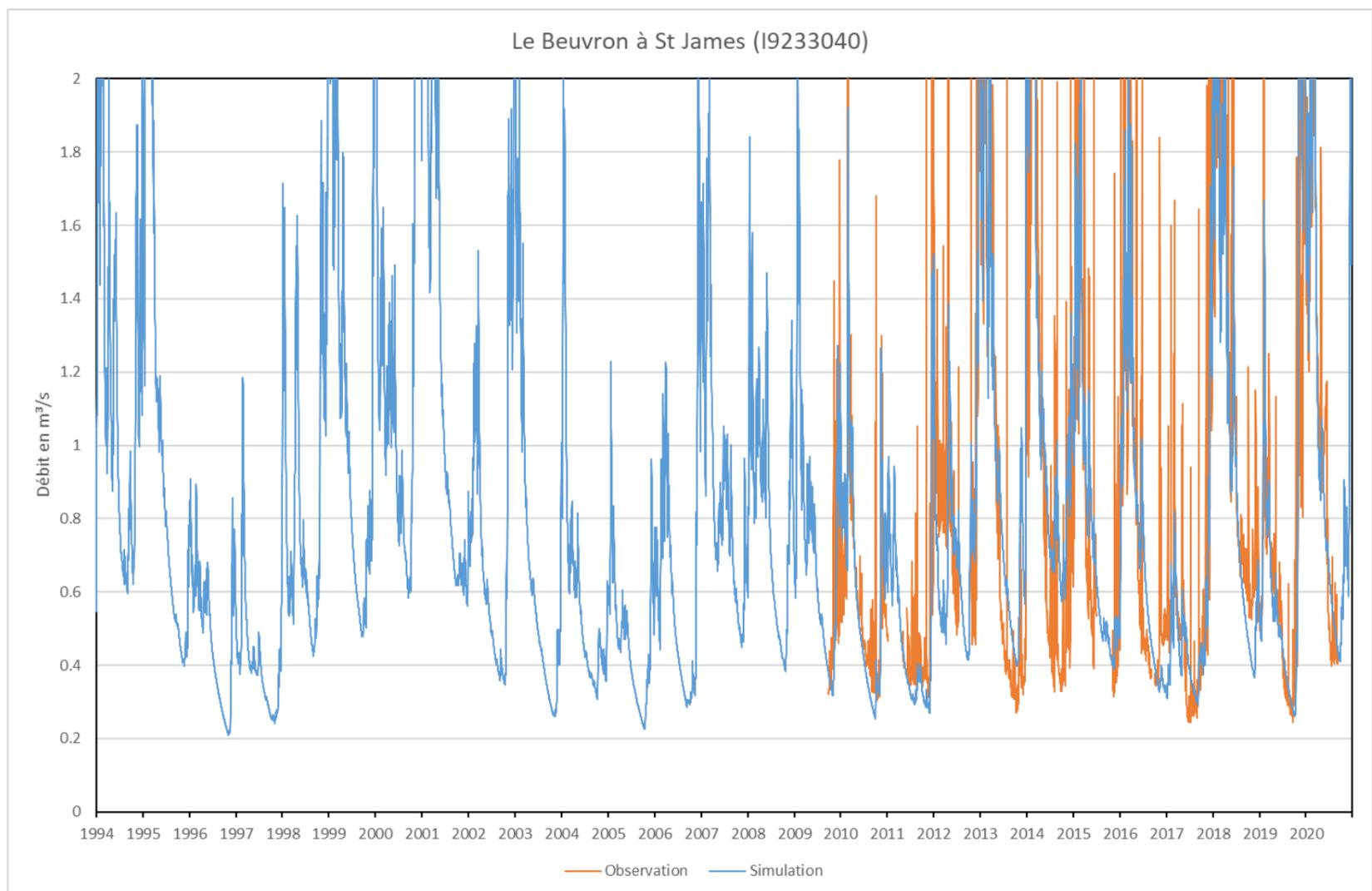
Figure 60 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Vézins

Beuvron à St James



Débit : Beuvron à St James

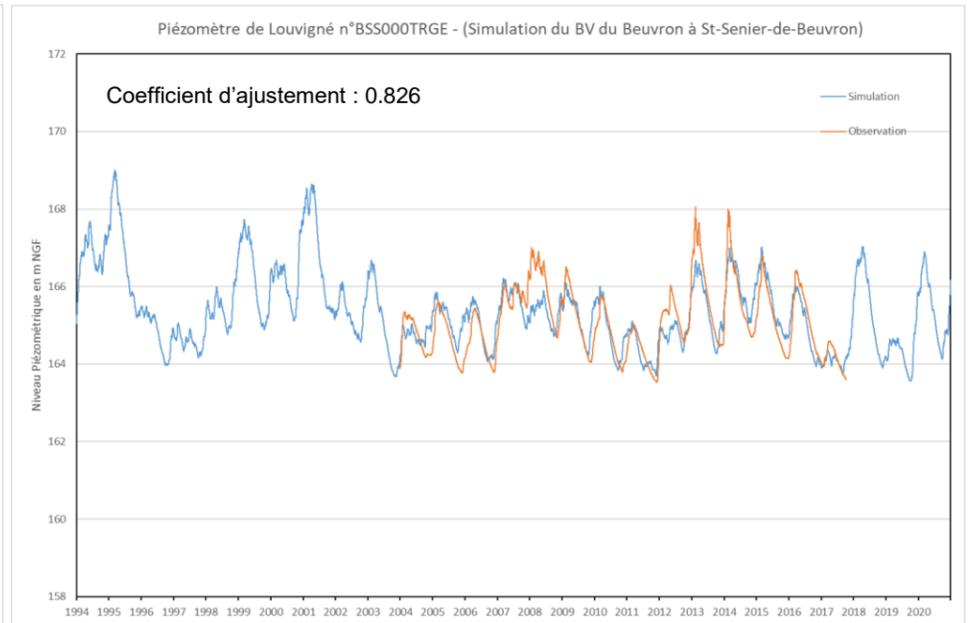
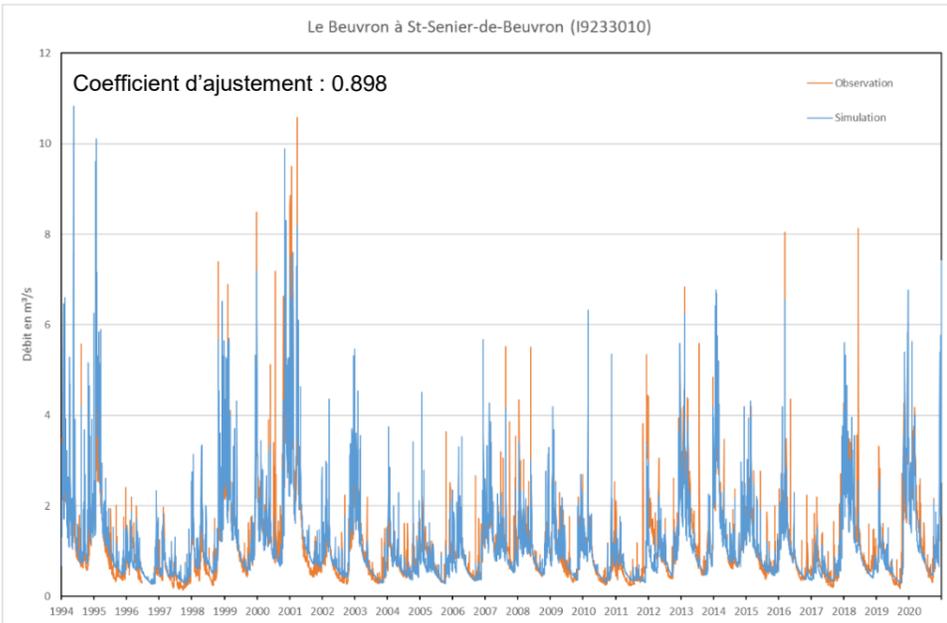
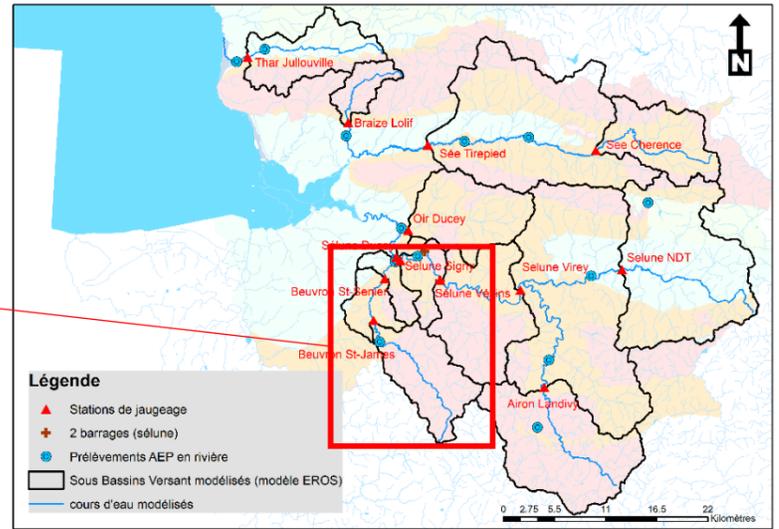
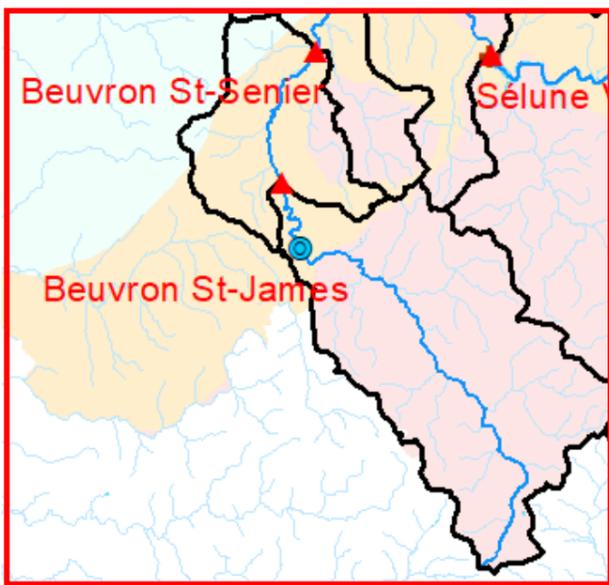
Niveau : Louvigné



Débit du Beuvron à St James : zoom sur les débits d'été

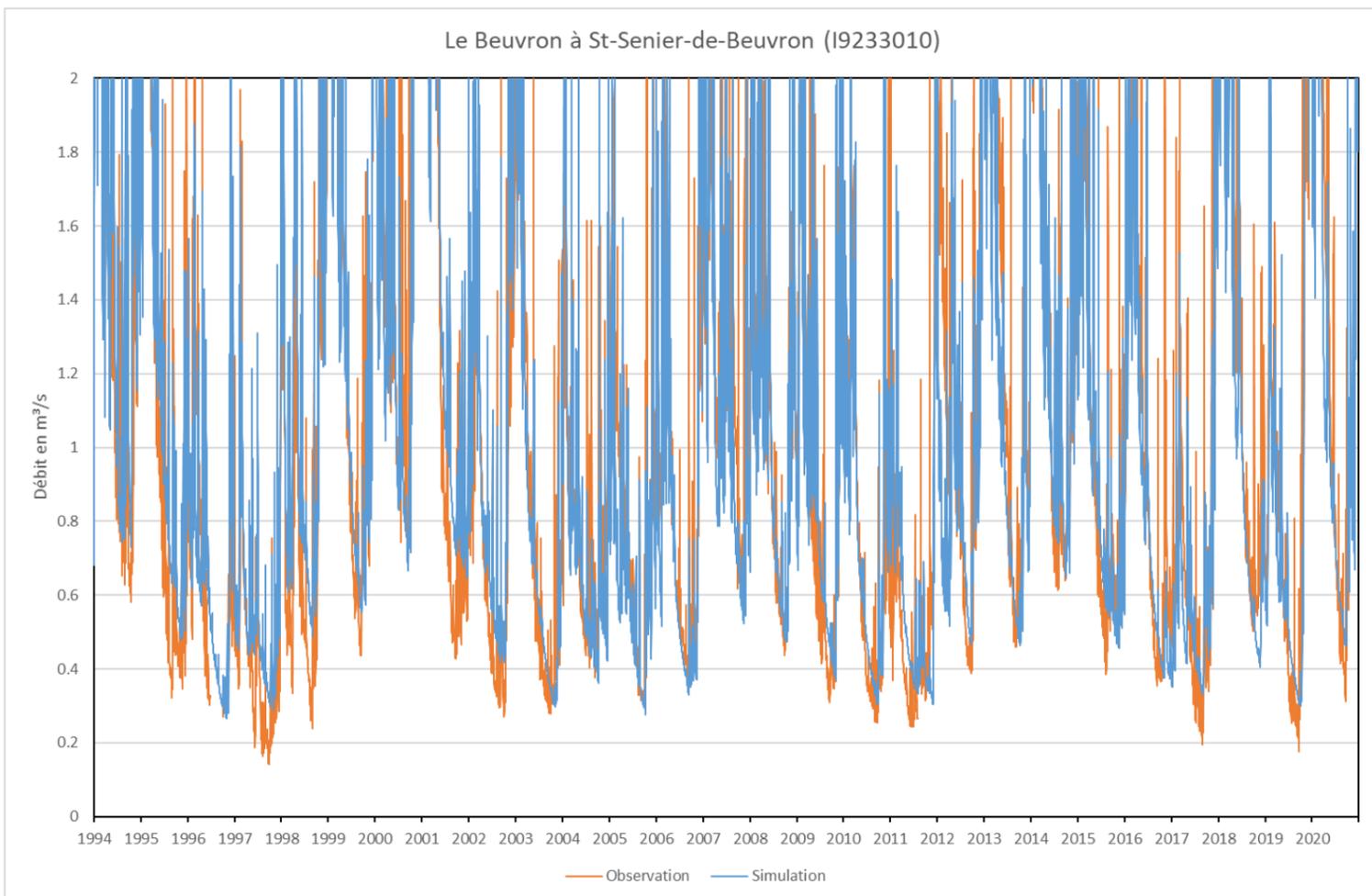
Figure 61 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Beuvron à St James

Beuvron à St Senier



Débit : Beuvron à St Senier

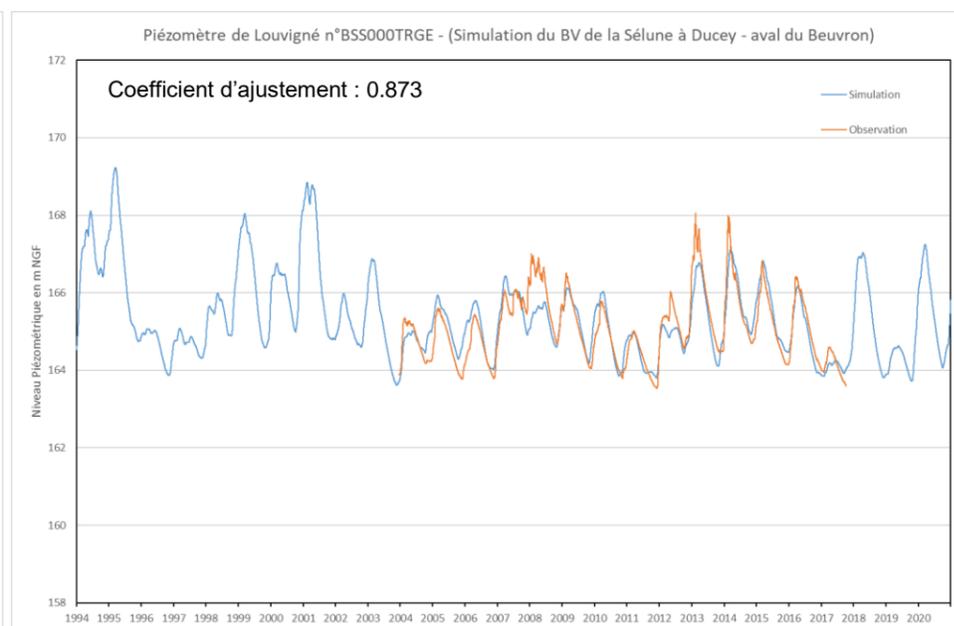
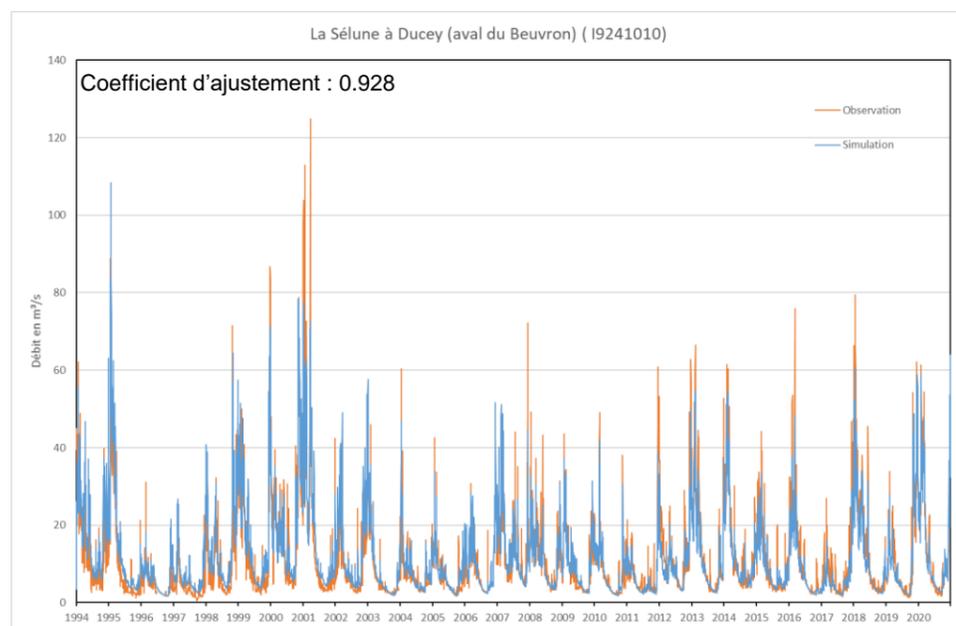
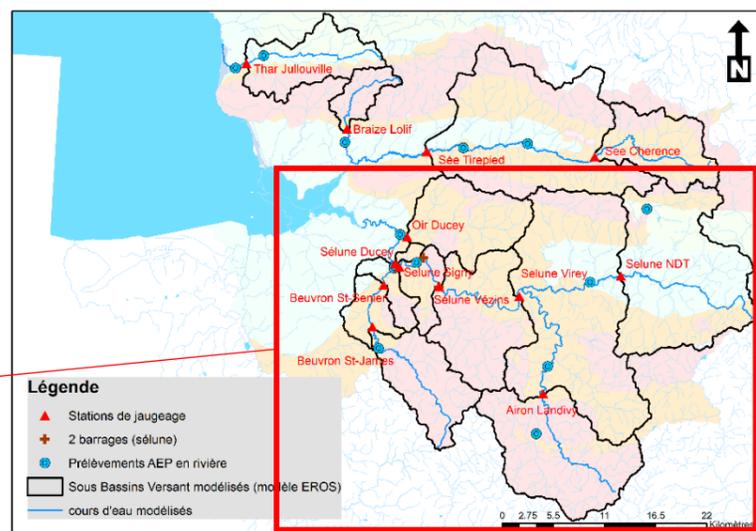
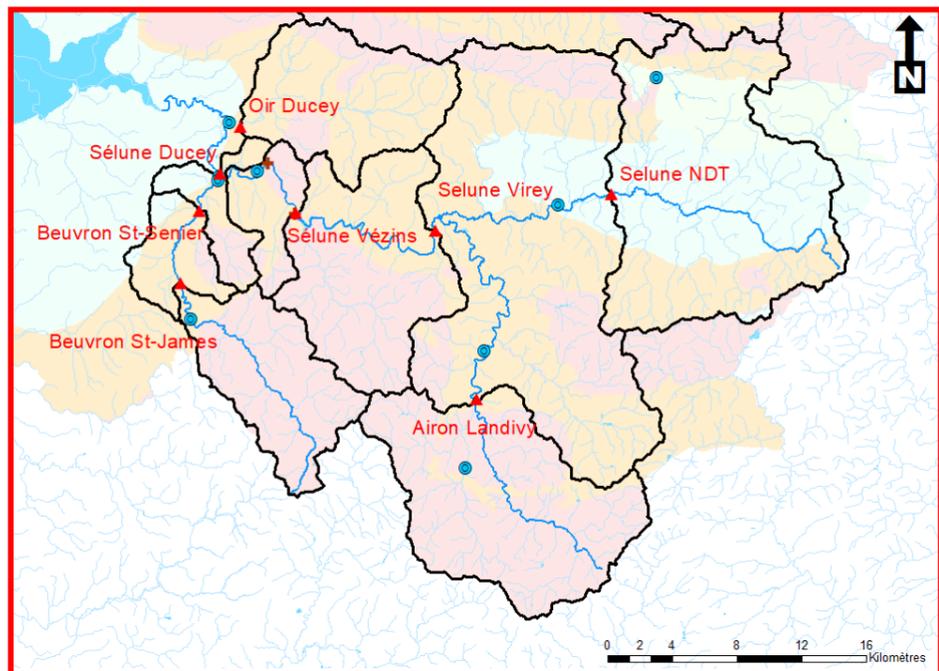
Niveau : Louvigné



Débit du Beuvron à St Senier : zoom sur les débits d'été

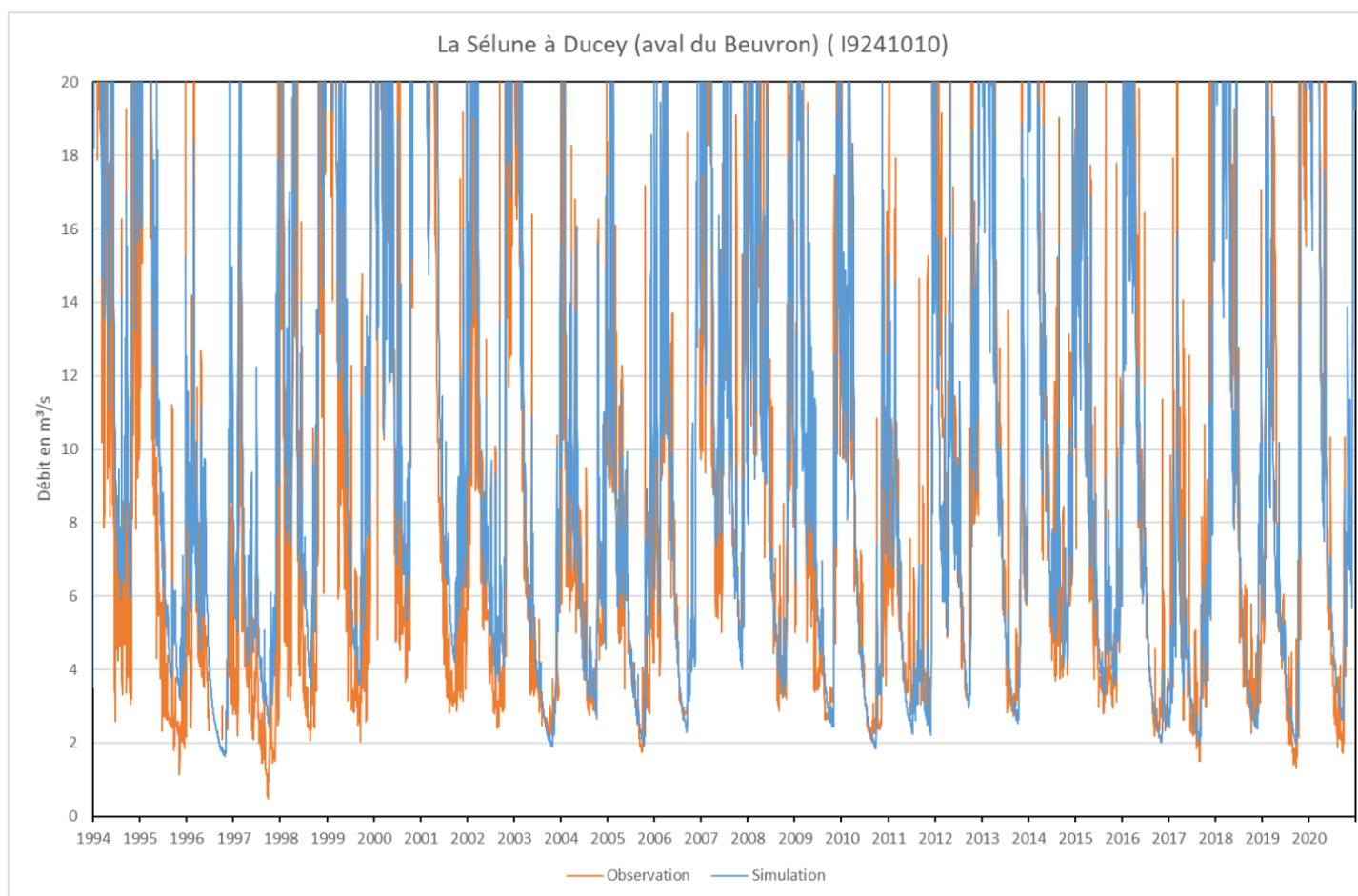
Figure 62 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant du Beuvron à St Senier

Sélune à Ducey (aval du beuvron)



Débit Sélune à Ducey (aval du beuvron)

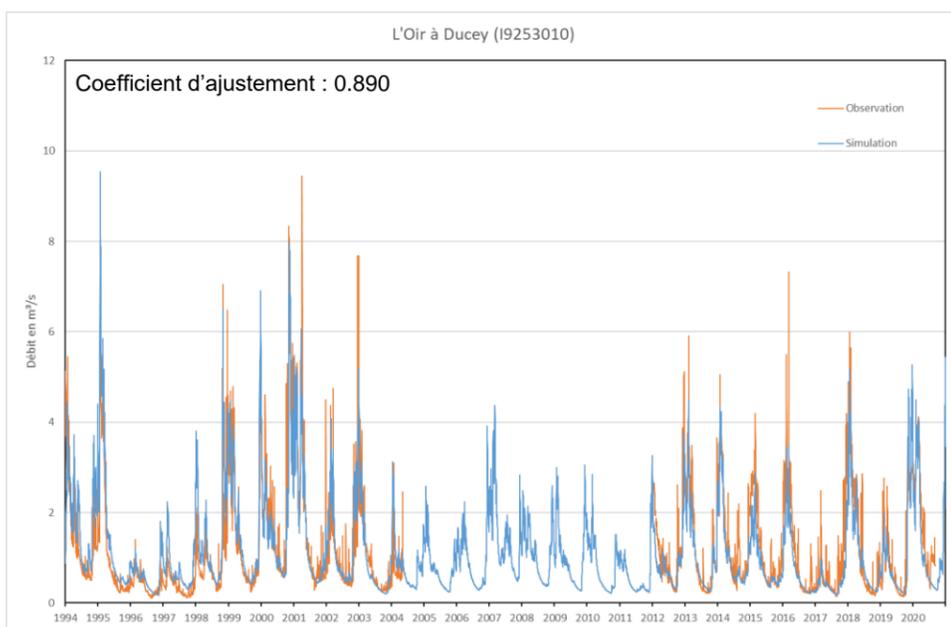
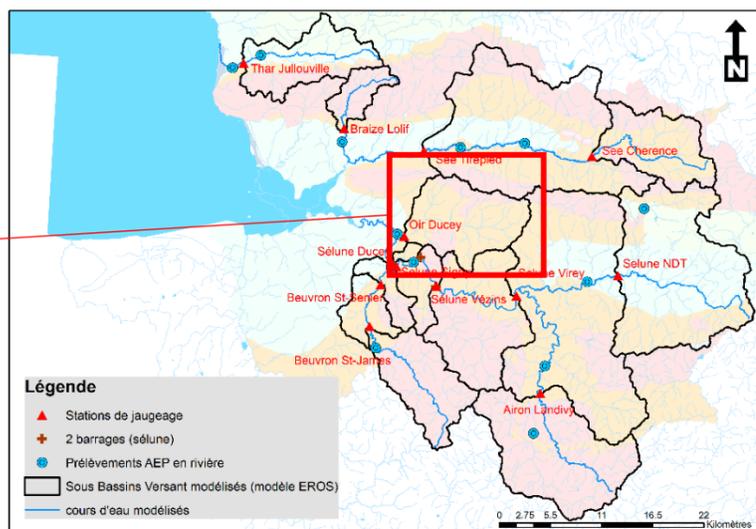
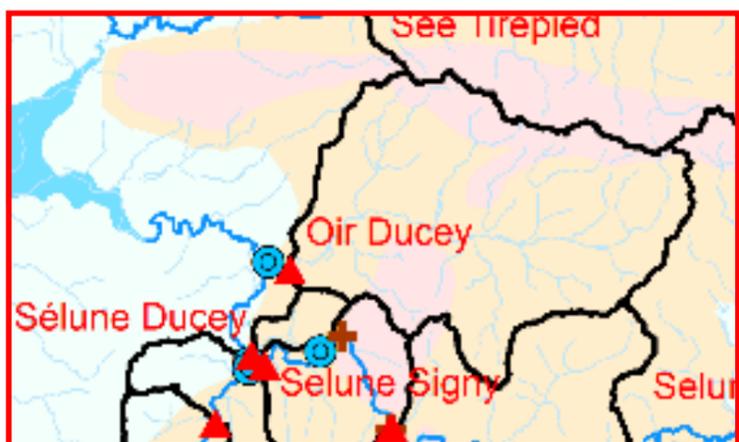
Niveau : Louigné



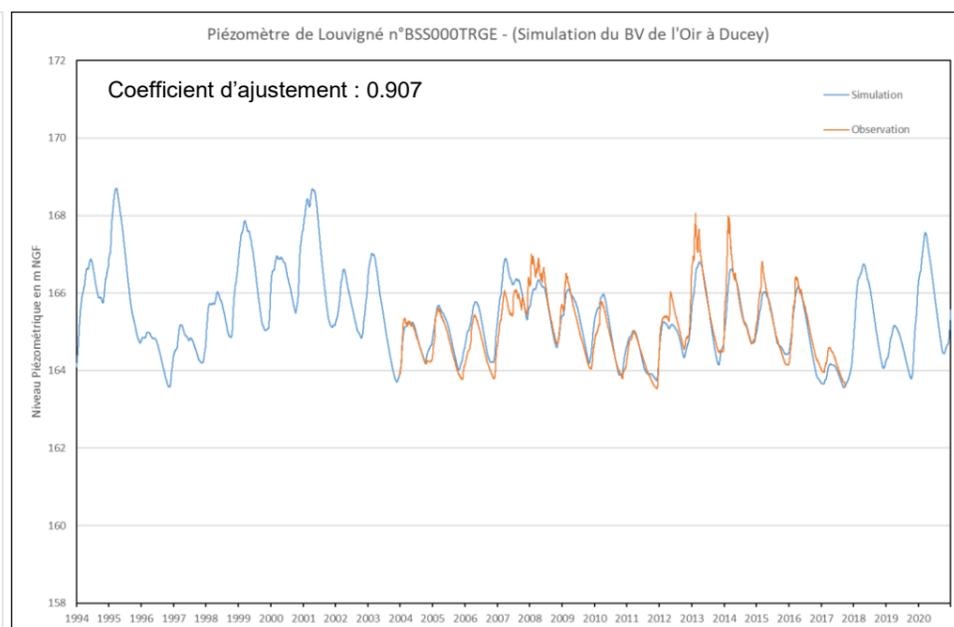
Débit de la Sélune à Ducey (aval du Beuvron): zoom sur les débits d'été

Figure 63 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de la Sélune à Ducey (aval du Beuvron)

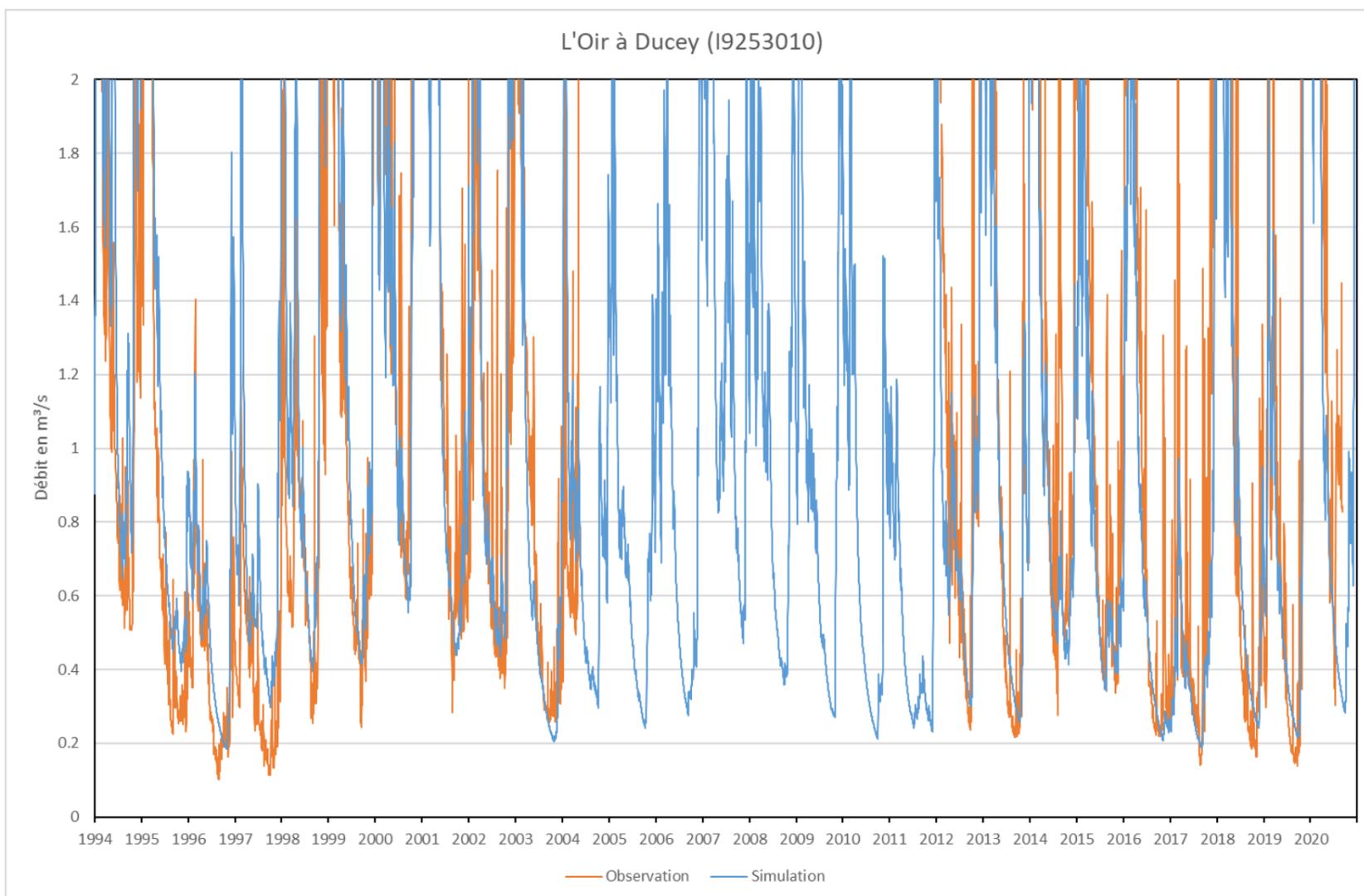
Oir à Ducey



Débit : Oir à Ducey



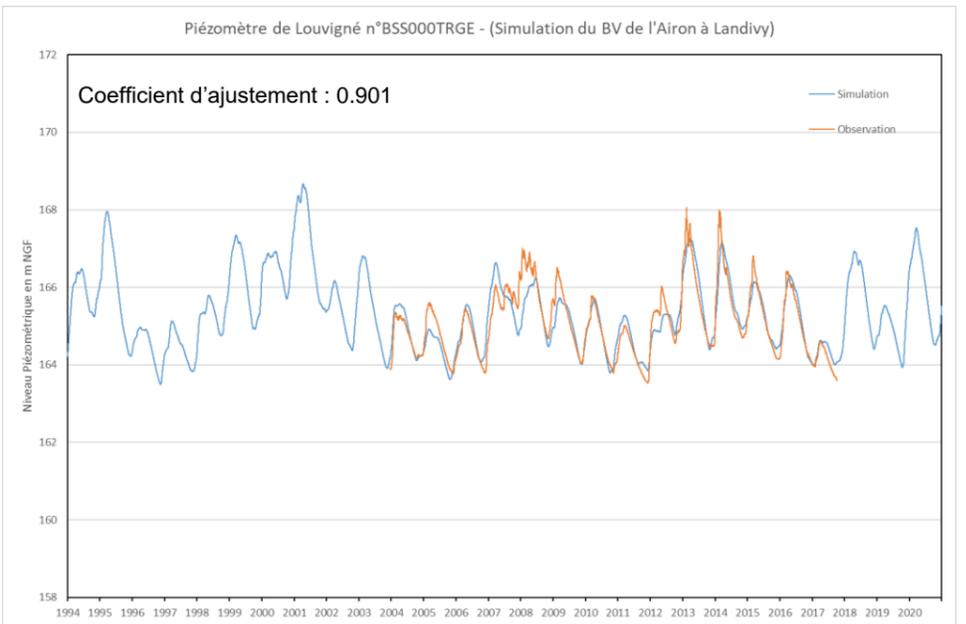
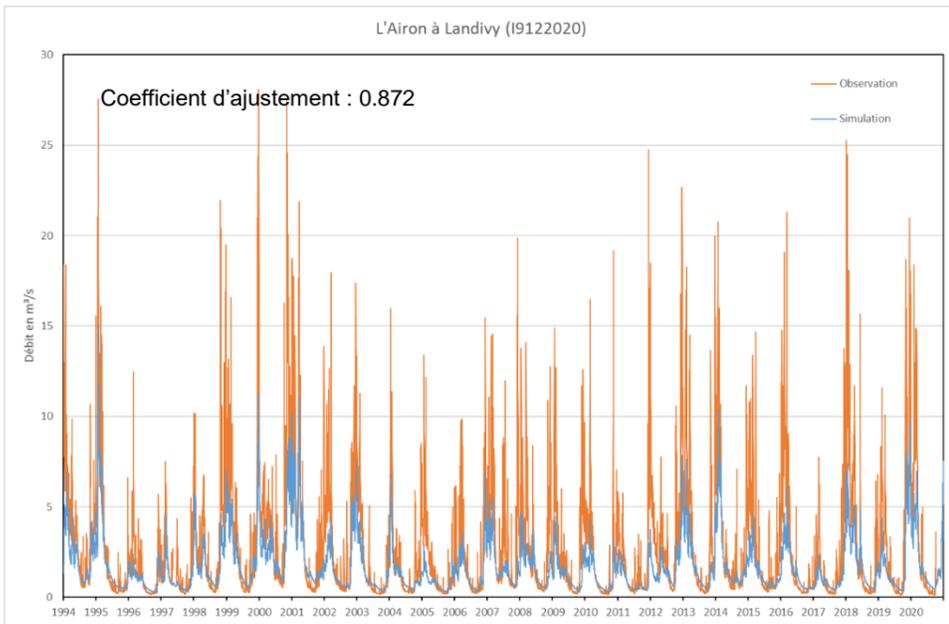
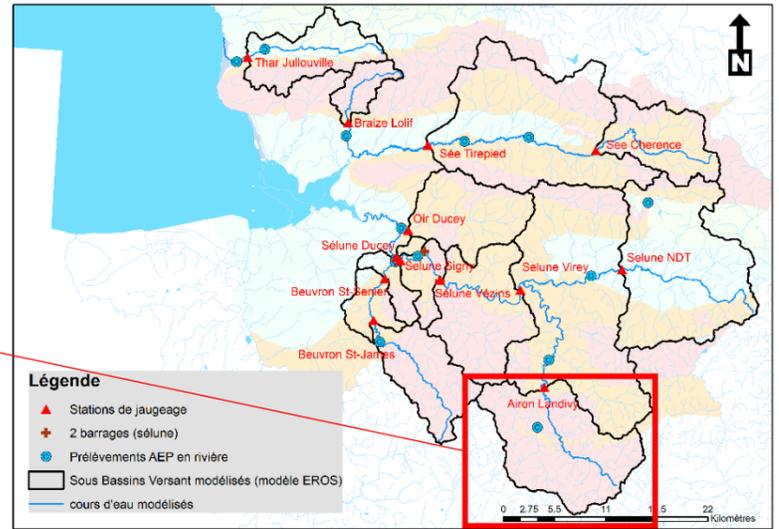
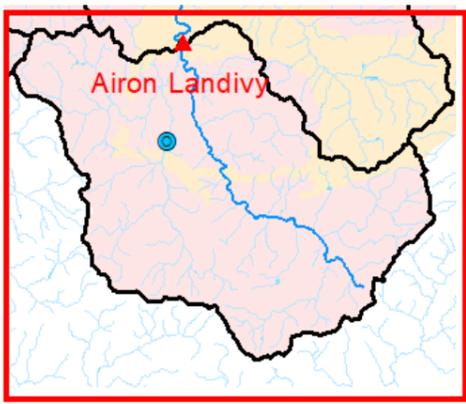
Niveau : Louvigné



Débit de l'Oir à Ducey : zoom sur les débits d'étiage

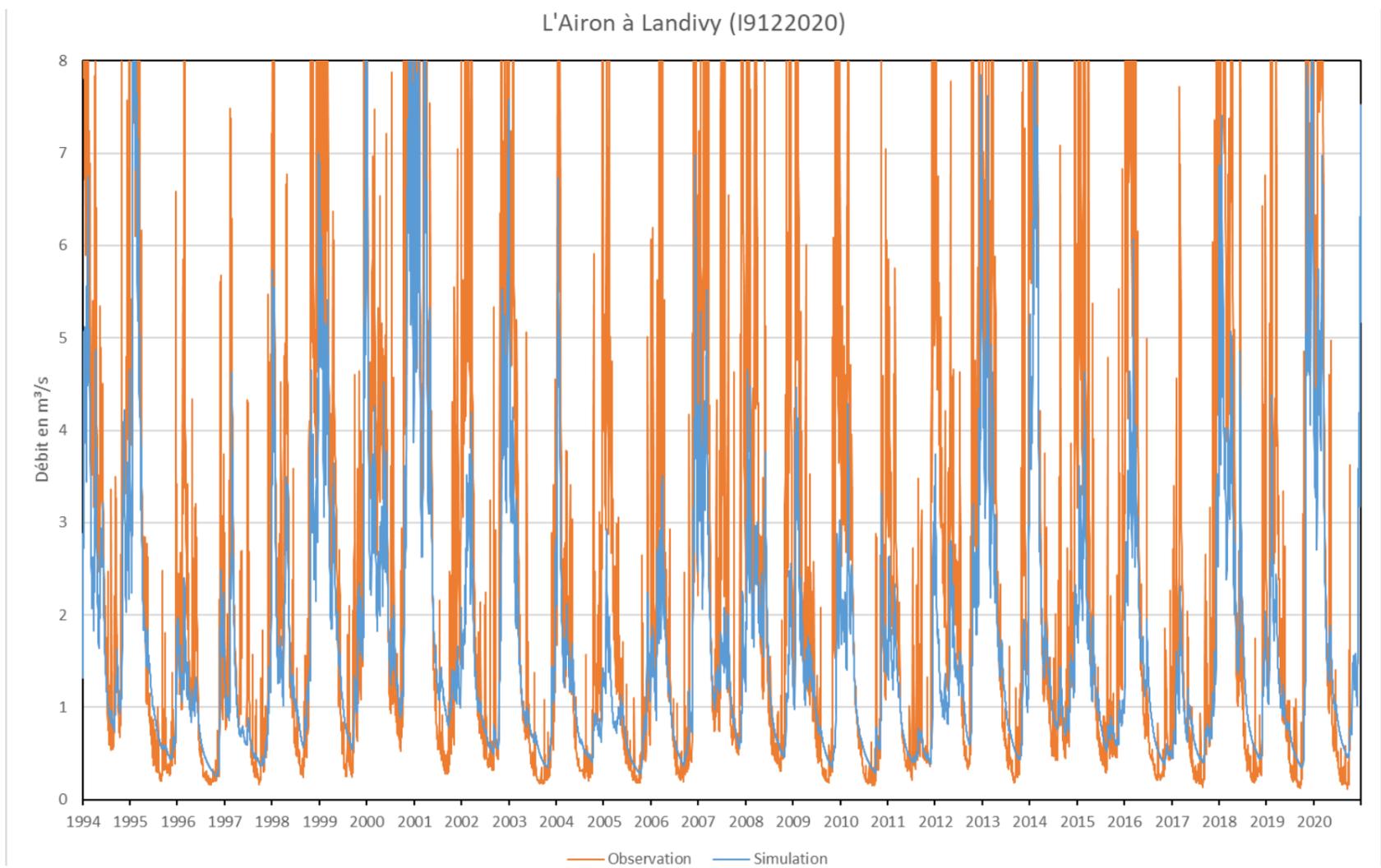
Figure 64 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de l'Oir à Ducey

Airon à Landivy



Débit : Airon à Landivy

Niveau : Louvigné



Débit de l'Airon à Landivy : zoom sur les débits d'été

Figure 65 : Résultat des simulations des débits et des niveaux du bassin versant de l'Airon à Landivy

4.5.5. Comparaison et interprétation des bilans hydrologiques

Les modèles globaux (Gardenia) et semi-globaux (EROS), permettent de mieux comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes et de quantifier leurs évolutions en fonction des pressions qui y sont exercées par les différents compartiments et sous-compartiments du cycle de l'eau.

La force de ces modèles réside dans le fait qu'ils prennent en compte l'ensemble du cycle de l'eau, à savoir les précipitations, les écoulements superficiels et les écoulements souterrains. Par ailleurs, dans le cas d'EROS, ils permettent de prendre en compte également les grandes hétérogénéités de l'hydrosystème considéré (différences de pluviométrie et d'ETP, d'occupation des sols, de taux de ruissellement et donc d'infiltration, de débits d'échanges entre les eaux superficielles et souterraines, ...).

Les Figure 66 et Figure 67 présentent les différents termes du bilan hydrologique moyen (moyenne sur toute la période simulée 1994-2020).

Les pluies et pluies efficaces sont plus importantes au Nord de la zone d'étude (Braize, Thar, et sur les sous-bassins amonts de la Sée et de la Sélune (Figure 7 et Figure 68) et tandis que les pluies efficaces les plus faibles sont observées au Sud et Sud-Ouest de la zone d'étude (Beuvron, Airon, Sélune Aval).

La carte des débits spécifiques calculés pour chaque sous-BV modélisé décrit les mêmes tendances (Figure 69).

Le modèle EROS permet par ailleurs de décomposer le débits des cours d'eaux en deux signaux : rapide (%Q_Rapide sur la Figure 67) (interprété comme représentant la part du débit apporté par le ruissellement notamment) et lent (%Q_Souterr sur la Figure 67) (interprété comme représentant l'apport des eaux souterraines au débit de la rivière). **La carte de la part de la composante « lente » dans les débits de chaque sous-BV est présentée sur la Figure 70. Il apparait que les deux rivières semblent les mieux soutenues par les eaux souterraines sont la Sée aval et la Braize, suivies par les rivières du Thar et du Beuvron amont. A l'inverse, la Sélune amont est le sous-bv où la rivière semble être la moins bien soutenue par les eaux souterraines, ce qui peut la rendre plus vulnérable aux risques de sécheresses météorologiques.**

N°_Ordre	Nom_Bassin	Superficie	Pluie	ETP	ETR	Pluie efficace	Q_Rapide	Q_Souterrain	Dif_Stock	Alim_Sout	%Q_Souterr	%Q_Rapide
1	NDT	204	1053	774	613	439	409.9	27.9	2.8	28.0	6.4	93.4
2	Landivy	148	892	716	530	361	248.7	109.6	3.5	110.2	30.6	69.0
3	Virey	276	992	768	575	416	282.8	129.0	5.1	129.4	31.3	68.0
4	Vézins	115	1009	783	631	375	298.8	76.2	2.7	76.5	20.3	79.6
5	St James	76	907	722	557	348	145.7	199.1	4.6	200.4	57.7	41.9
6	St Senier	29	933	781	627	304	226.2	77.3	2.8	77.6	25.5	74.5
7	Selune_Aval_Beuviron	53	938	790	644	291	178.6	109.5	5.6	109.8	38.0	61.4
8	Oir	86	1011	808	612	398	266.1	128.4	4.6	128.9	32.6	66.9
9	Sée_Chérencé	75	1060	728	507	552	400.7	147.3	4.5	147.8	26.9	72.5
10	Sée_Tirepied	240	1045	777	547	497	116.2	376.8	4.6	380.5	76.4	23.4
11	Braize_Lolif	25	1031	806	555	476	65.8	405.7	5.0	410.4	86.0	13.8
12	Thar_Jullouville	73	992	786	569	422	202.0	217.3	3.7	219.3	51.8	47.8

Figure 66 : Bilan hydrologique moyen annuel (en mm) des différentes grappes composant le modèle EROS du Sud Manche

N°_Ordre	Nom_Bassin	Superficie	Pluie	ETP	ETR	Pluie efficace	Q_Rapide	Q_Souterrain	Dif_Stock	Alim_Sout	%Q_Souterr	%Q_Rapide
1	NDT	204	1053	774	613	439	409.9	27.9	2.8	28.0	6.4	93.4
2	Landivy	148	892	716	530	361	248.7	109.6	3.5	110.2	30.6	69.0
3	Virey	628	988	758	577	410	316.1	91.6	4.0	91.9	22.5	77.0
4	Vézins	743	991	762	585	405	313.4	89.2	3.8	89.5	22.2	77.4
5	St James	76	907	722	557	348	145.7	199.1	4.6	200.4	57.7	41.9
6	St Senier	105	914	738	577	336	168.1	165.3	4.1	166.3	49.6	50.1
7	Selune_Aval_Beuviron	901	979	761	588	390	288.5	99.3	3.9	99.7	25.6	74.0
8	Oir	86	1011	808	612	398	266.1	128.4	4.6	128.9	32.6	66.9
9	Sée_Chérencé	75	1060	728	507	552	400.7	147.3	4.5	147.8	26.9	72.5
10	Sée_Tirepied	316	1048	765	538	510	184.1	322.0	4.6	324.9	63.6	36.1
11	Braize_Lolif	25	1031	806	555	476	65.8	405.7	5.0	410.4	86.0	13.8
12	Thar_Jullouville	73	992	786	569	422	202.0	217.3	3.7	219.3	51.8	47.8

Figure 67 : Bilan hydrologique moyen annuel (en mm) cumulé de l'amont vers l'aval des différents bassins versant composant le modèle EROS du Sud Manche

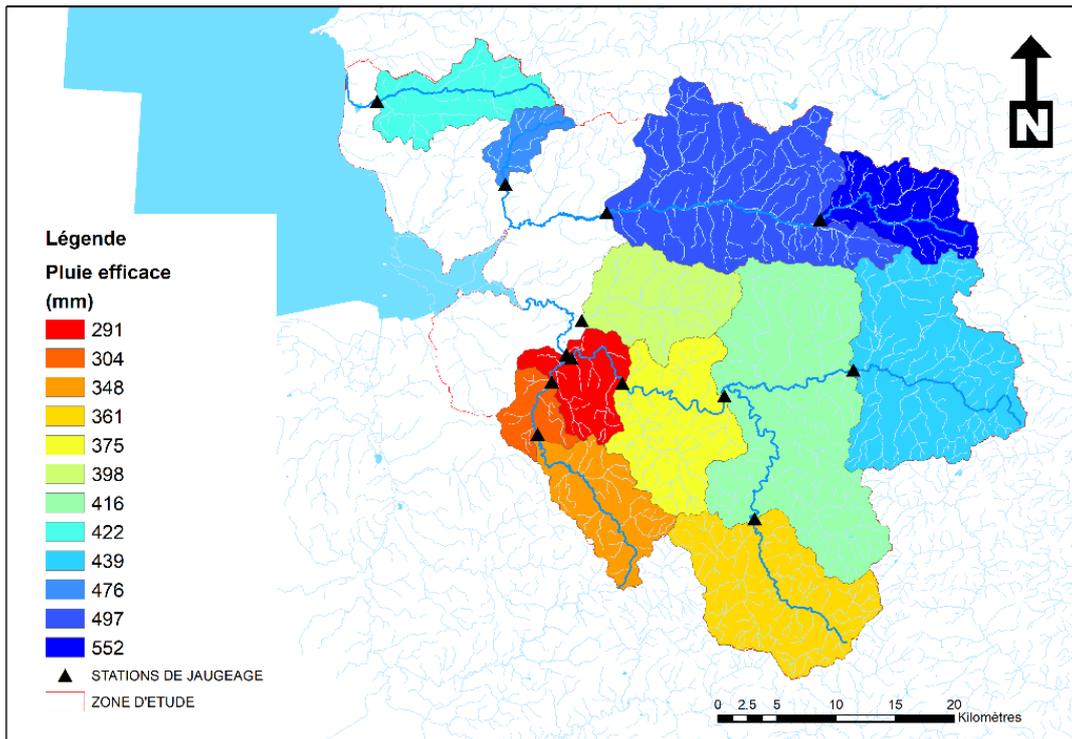


Figure 68 : Pluie efficace moyennée par bassin versant de chaque station hydrométrique (résultat du modèle EROS ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France)

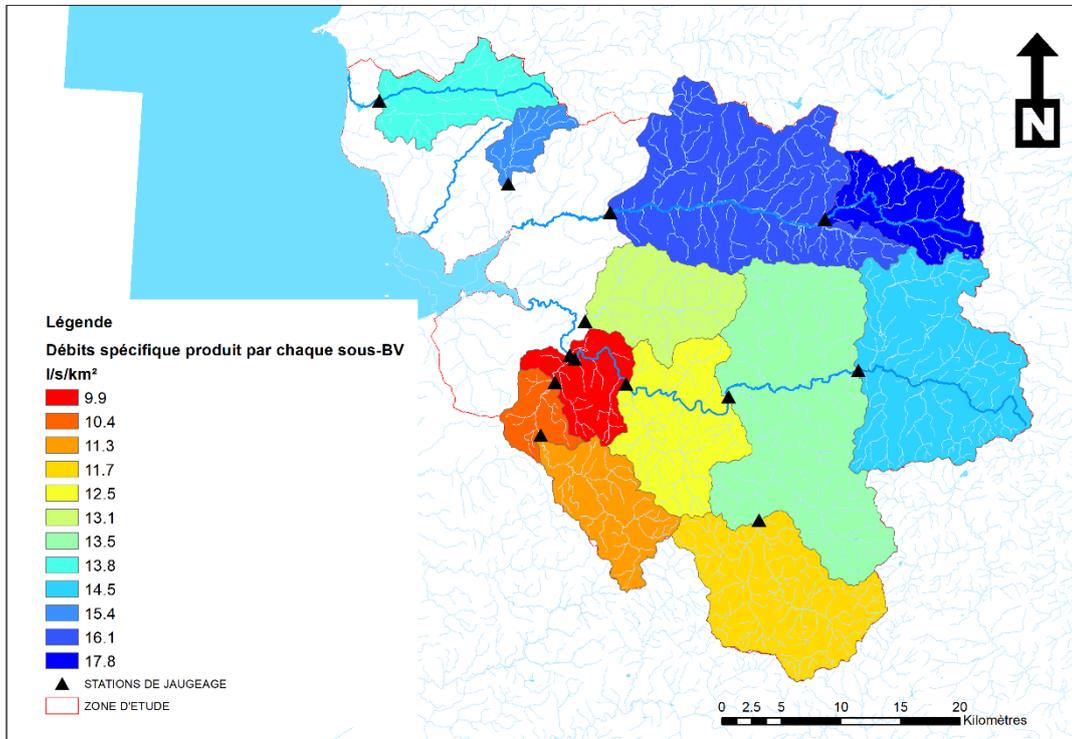


Figure 69 : Débit spécifique moyen (en l/s/km²) de sous bassin versant modélisé (résultat du modèle EROS ayant comme données d'entrée les pluies SAFRAN de Météo France)

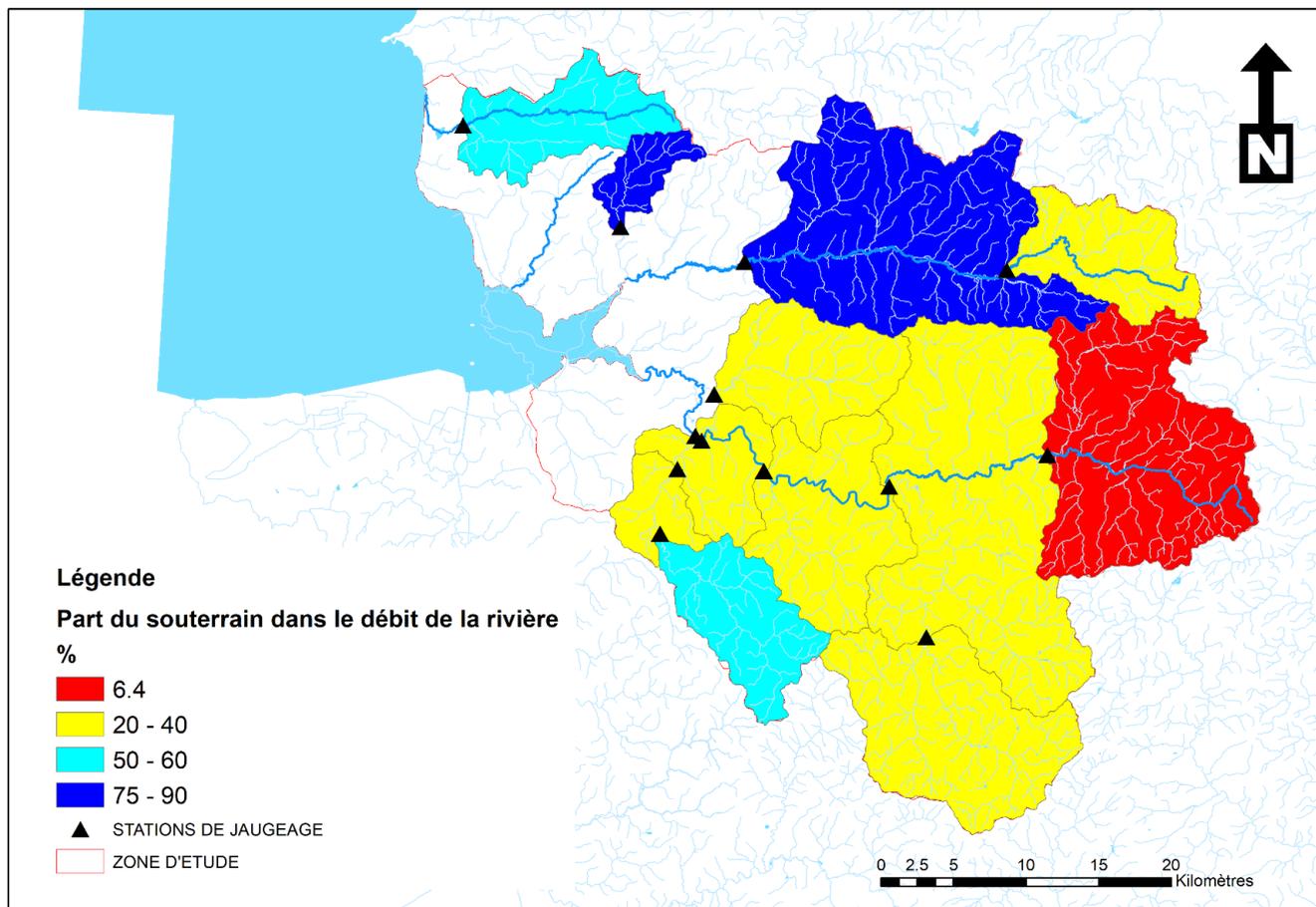


Figure 70 : Part de la composante « lente » (cf. %Q_Souterr de la Figure 67) dans le débit des cours d'eau

4.6. PROJECTION CLIMATIQUES

4.6.1. Choix de deux trajectoires climatiques

Le climat à venir est notamment fonction des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre dues aux activités humaines. Or, les émissions humaines dépendent de la consommation énergétique (chauffage, climatisation, transports, production de biens de consommation, activités agricoles, etc.). Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de la démographie mondiale et des modes de vie à travers la planète.

Dans le 5ème Rapport du GIEC, 4 quatre trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés RCP («Representative Concentration Pathways» ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration ») (Figure 71) ont été établies : RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5, et RCP 2.6.

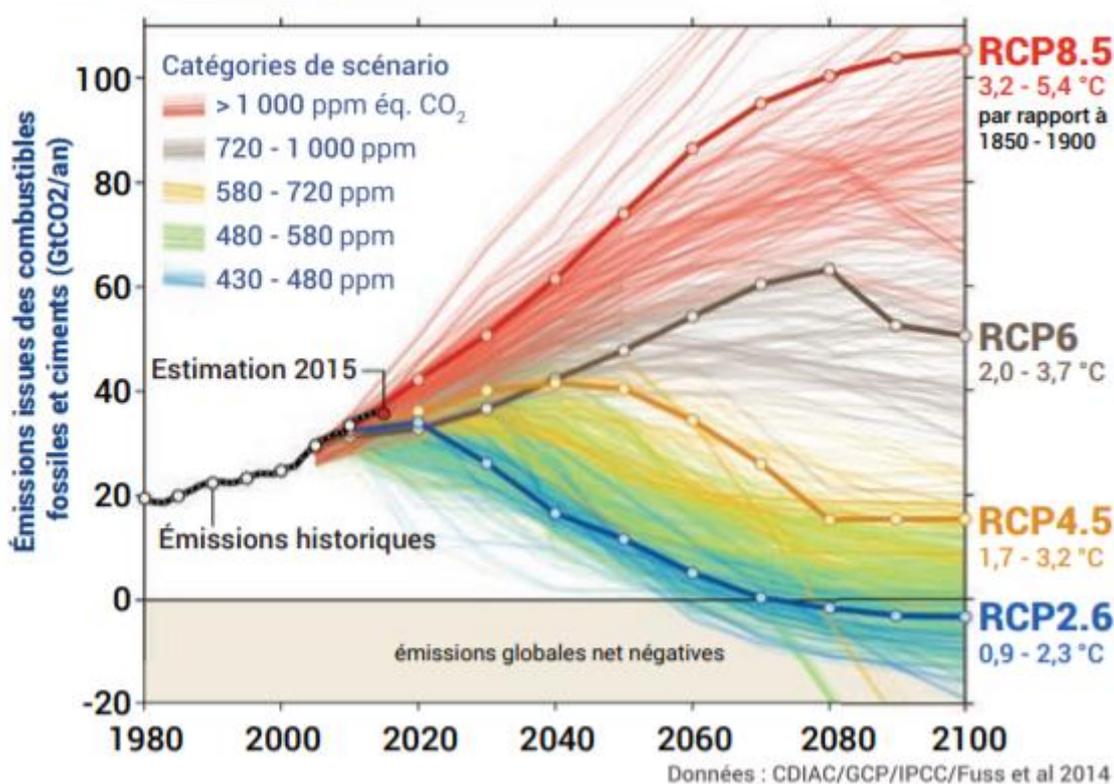


Figure 71 : Évolution des émissions entre 1980 et 2100, selon les différents scénarios disponibles. Les quatre scénarios sélectionnés dans le cadre du 5e rapport du Giec (RCP) sont mis en évidence. Source : Global Carbon Project (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

Le scénario RCP2.6 correspond à une réduction immédiate et forte des émissions (susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C) et le scénario RCP8.5 correspond à la poursuite des émissions au rythme actuel. La RCP2.6 paraît aujourd'hui peu probable comme l'indique le rapport d'information du Sénat « Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050 : urgence déclarée » (<https://www.senat.fr/rap/r18-511/r18-5114.html>) :

« Quel scénario choisir pour prendre dès aujourd'hui les décisions d'adaptation de très long terme ?

Le 2e Plan national d'adaptation au changement climatique est construit sur l'hypothèse d'une hausse de la température moyenne mondiale de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle », hypothèse qui correspond au scénario RCP2.6 du GIEC.

Une telle hypothèse peut être qualifiée de « forte ». Il est en effet désormais peu probable qu'il soit possible de limiter à 2° le réchauffement global. C'est ce qu'indique le dernier rapport du GIEC, même si c'est en termes diplomatiques. Limiter le réchauffement sous le seuil des 2° serait encore possible à condition de renforcer immédiatement et drastiquement les politiques de réduction des émissions de CO₂ au niveau international et de mettre en œuvre massivement des solutions de stockage du carbone qui n'existent pas encore. Or, rien de tel ne s'observe. La dynamique qu'on observe est bien celle de la poursuite des émissions de GES au rythme passé.

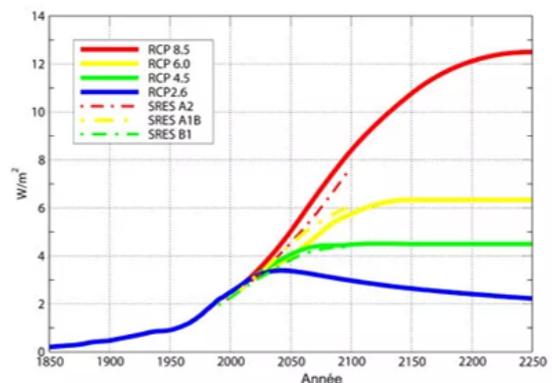
Par ailleurs, lors de son audition par vos rapporteurs, le climatologue Hervé Le Treut a rappelé que, même si les pays signataires respectaient les engagements qu'ils ont pris dans les Accords de Paris, on irait sans doute vers un réchauffement global nettement supérieur à 2° à la fin de ce siècle, de l'ordre de 3°C ou plus, car ces engagements (qui ne sont même pas respectés par les pays signataires) sont notoirement insuffisants par rapport aux objectifs officiellement affichés par la communauté internationale. La courbe des émissions poursuit donc pour l'instant sa hausse tendancielle.

Si l'on veut être réaliste dans la construction de la politique nationale d'adaptation, il ne faut donc pas exclure a priori des scénarios de changement climatique plus pessimistes que celui qui sert de référence aux Accords de Paris et prendre en compte ce qu'on pourrait appeler « une marge de sécurité » lorsqu'il s'agit de prendre des décisions d'adaptation qui nous projettent à un horizon éloigné. Par exemple, si l'on construit aujourd'hui une digue ou une route littorale, il est prudent de postuler une hausse du niveau de la mer proche de la fourchette haute des prévisions pour la fin du siècle - faute de quoi on risque de devoir démolir et reconstruire les ouvrages dans vingt ou trente ans. C'est pourquoi il est important que les pouvoirs publics, avec l'aide des scientifiques, établissent clairement les paramètres climatiques et les marges de sécurité à prendre en compte dans ce type d'adaptation de long terme. »

Ainsi le cahier des charges de l'étude Sud Manche prévoit d'utiliser les trajectoires RCP 8.5 et RCP 4.5 (Figure 72).

- **RCP 8.5** : scénario le plus pessimiste correspondant à une politique du « laisser faire » (élévation de température comprise entre 3.2 et 5.4 °C à l'horizon 2100) ;
- **RCP 4.5** : diminution des émissions de GES à partir de 2040 pour se stabiliser à partir de 2080 (élévation de température comprise entre 1.7 et 3.2 °C à l'horizon 2100).

Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m² sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios



Après 2006, les traits continus correspondent aux nouveaux scénarios dits RCP (Representative Concentration Pathways) et les traits pointillés aux scénarios des rapports 2001 et 2007 du GIEC.

Figure 72 : RCP 8.5 et RCP4.5 retenues pour l'étude du Sud Manche

4.6.2. Choix de cinq modèles climatiques

La prise en compte des incertitudes en climat futur liées aux modèles climatiques impose de travailler avec une approche multi-modèles. Le cahier des charges prévoit de travailler avec des projections climatiques issues de cinq modèles de climat parmi ceux qui sont disponibles au moment de l'étude.

Les modèles climatiques globaux (Global Climate Model, GCM)

Les scénarios d'émission (les RCP), décrits au paragraphe précédent, sont utilisés en entrée de modèles climatiques globaux (Global Climate Model, GCM) dont l'objectif est de simuler l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Pour un scénario d'émission donné, le climat simulé diffère d'un modèle à l'autre - ce qui reflète notre compréhension imparfaite du système climatique. Pour tenir compte de l'incertitude liée aux modèles et mieux représenter la gamme des futurs possibles, il est donc nécessaire de considérer de larges ensembles de projections climatiques. L'ensemble global des jeux de données produits dans le cadre de l'exercice international CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, 5e phase) qui a servi de base au 5e rapport du Giec (IPCC, 2014 : Climate Change 2014 : Synthesis Report) est compilé pour la France et mis en ligne via le site DRIAS (<http://www.drias-climat.fr/>).

Les modèles de climat régionaux (Regional Climate Models - RCM)

La résolution des modèles globaux (GCM), de l'ordre de 150 à 200 km, est insuffisante pour représenter correctement les phénomènes météorologiques locaux, ainsi que certains événements extrêmes. Plusieurs méthodes existent pour élaborer un diagnostic à plus fine échelle, parmi lesquelles la descente d'échelle dynamique. La descente d'échelle dynamique consiste à utiliser des modèles de climat régionaux (Regional Climate Models - RCM). Ces modèles sont très semblables aux modèles globaux dans leur construction, mais ils représentent le système climatique plus finement sur une sous-partie du globe (exemple : l'Europe, voir Figure 73). La coopération internationale entre les centres de modélisation régionale du climat s'inscrit dans le cadre du programme Cordex qui vise entre autres à produire des ensembles de simulations climatiques régionales pour tous les continents, pilotées par les modèles GCM de l'exercice CMIP5, pour différents scénarios et avec un cadre d'analyse commun. Dans le cadre du volet européen, EuroCordex (Jacob et al., 2014, 2020), plus d'une centaine de projections (triplets RCP/GCM/RCM) sont actuellement disponibles à 12 km de résolution sur un domaine qui couvre la France métropolitaine, Corse incluse. La période historique des simulations s'étale à minima de 1971 à 2005 tandis que les projections s'étendent de 2006 à 2100. Dans le cadre d'Euro-Cordex, seuls les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 ont été utilisés pour produire des simulations régionales.

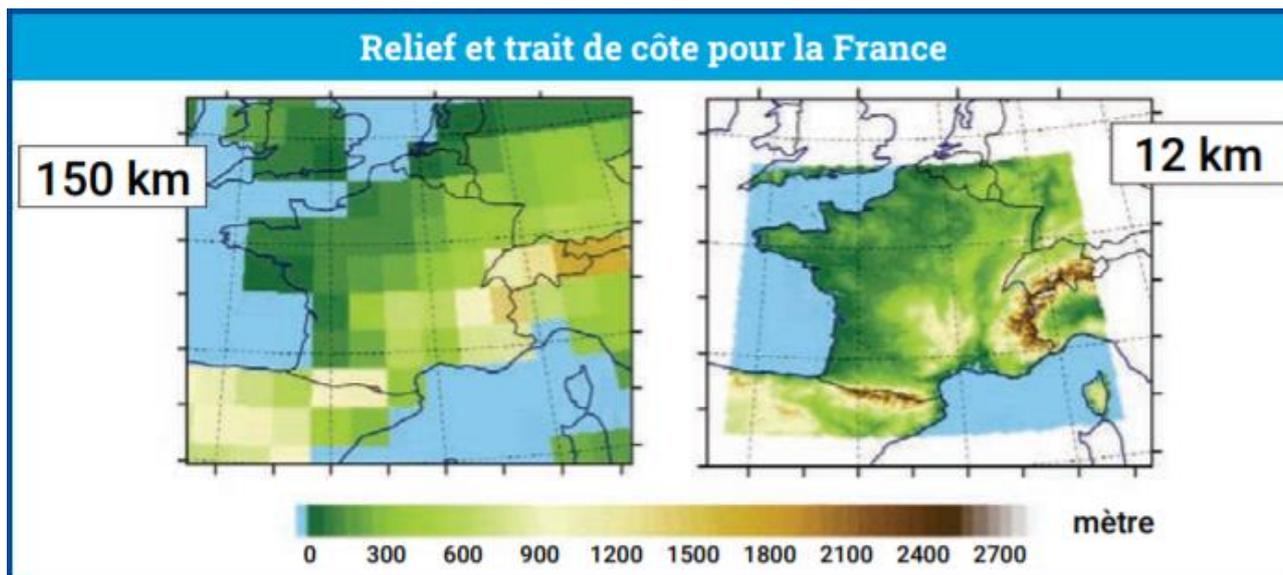


Figure 73 : Illustration de la différence de résolution entre la modélisation climatique globale (150 km de résolution) et la modélisation climatique régionale (12 km) sur le relief et le trait de côte de la France (C. Cassou, Cerfacs). L'échelle de couleur représente l'altitude des mailles des modèles (en mètres) (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

En 2014, le portail DRIAS a intégré un jeu de données fondé sur onze couples GCM/RCM, provenant de l'ensemble Euro-CORDEX. Il s'agissait alors des premières simulations disponibles sur l'Europe à la résolution de 12 km. Depuis 2014, le nombre de simulations disponibles dans l'initiative Euro-CORDEX a beaucoup augmenté et, par ailleurs, des travaux d'évaluation des premières simulations utilisées en 2014 ont montré pour plusieurs d'entre elles contenait des anomalies, documentées dans l'espace d'accompagnement DRIAS.

Pour cette raison, le site DRIAS a mis en ligne en 2021 un nouveau jeu de données climatiques : « DRIAS 2020 ». La production de ce nouveau jeu de données DRIAS 2020 vise à la fois à tirer parti des simulations Euro-CORDEX réalisées ces dernières années et de remettre à jour les simulations de 2014 à partir de versions corrigées afin de mieux couvrir la variabilité attendue des températures et précipitations en climat futur sur la Métropole.

Ce nouveau jeu de données est basé sur douze couples GCM/RCM, provenant de l'ensemble Euro-Cordex disponible sur l'Europe à la résolution de 12 km et au pas de temps quotidien (Figure 74). Les projections climatiques sont disponibles pour 3 scénarios d'émission : RCP8.5, RCP4.5 et RCP2.6.

Les données sont projetées sur la grille SAFRAN de 8 km de résolution et corrigées de leur biais par la méthode ADAMONT étendue sur la France (mise en œuvre par Météo-France) à partir de l'analyse de données d'observation SAFRAN (version > 2016).

Liste des 12 couples GCM-RCM corrigés des biais (BCSD) disponibles

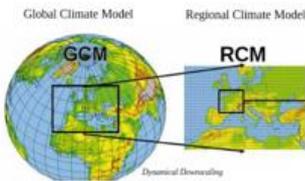


DONNEES MISE A DISPO SUR LE PORTAL DIRAS	Configuration du modèle climatique global (GCM)			Configuration du modèle climatique régional (RCM)			Correction de biais - Descente d'échelle statistique (BCSD)			
	Expérience / Institution / GCM / RCM	Modèle climatique global	Producteur du GCM	Date / version de la simulation	Modèle climatique régional	Producteur du RCM	Date / version de la simulation	Méthode(s) de BCSD	Producteur de la BCSD	Date de la réalisation
1- DRIAS-2020 / CLMcom / MPI-ESM-LR / CCLM4-8-17	MPI-ESM-LR v1	MPI: Max Planck Institute for Meteorology		15/03/2012	CCLM v4-8-17	CLMcom: Climate Limited-area Modelling Community	24/03/2014	ADAMONT France	METEO-FRANCE	18/04/2020
2- DRIAS-2020 / SMHI / EC-EARTH / RCA4	EC-EARTH r12	ICHEC: Irish Centre for High-End Computing		31/05/2012	RCA4	SMHI: Swedish Meteorological and Hydrological Institute	21/06/2013	ADAMONT France	METEO-FRANCE	22/04/2020
3- DRIAS-2020 / KNMI / EC-EARTH / RACMO22E	EC-EARTH r12	MetEir: Met Éireann - The Irish Meteorological Service		08/05/2012	RACMO22E v1	KNMI: Royal Netherlands Meteorological Institute	15/01/2017	ADAMONT France	METEO-FRANCE	22/04/2020
4- DRIAS-2020 / SMHI / IPSL-CM5A-MR / RCA4	IPSL-CM5A-MR v1	IPSL: Institut Pierre-Simon Laplace		23/06/2013	RCA4	SMHI: Swedish Meteorological and Hydrological Institute	23/06/2013	ADAMONT France	METEO-FRANCE	27/04/2020
5- DRIAS-2020 / CNRM / CNRM-CM5-LR / RACMO22E	CNRM-CM5 v1	CNRM: Centre National de Recherches Météorologiques		06/10/2011	RACMO22E v2	KNMI: Royal Netherlands Meteorological Institute	01/11/2018	ADAMONT France	METEO-FRANCE	23/04/2020
6- DRIAS-2020 / GERICs / NorESM1-M / REMO2015	NorESM1-M v1	NCC: Norwegian Climate Centre		12/09/2011	REMO2015 v1	GERIC: Climate Service Center German	15/11/2018	ADAMONT France	METEO-FRANCE	21/04/2020
7- DRIAS-2020 / CNRM / CNRM-CM5-LR / ALADIN63	CNRM-CM5 v1	CNRM: Centre National de Recherches Météorologiques		06/10/2011	ALADIN63 v2	CNRM: Centre National de Recherches Météorologiques	19/04/2019	ADAMONT France	METEO-FRANCE	18/04/2020
8- DRIAS-2020 / DMI / NorESM1-M / HRHAM5	NorESM1-M v1	NCC: Norwegian Climate Centre		12/09/2011	HRHAM5 v3	DMI: Danish Meteorological Institute	01/06/2019	ADAMONT France	METEO-FRANCE	21/04/2020
9- DRIAS-2020 / CLMcom / HadGEM2-ES / CCLM4-8-17	HadGEM2-ES v1	MOHC: Met Office Hadley Centre		01/01/2011	CCLM v4-8-17	CLMcom: Climate Limited-area Modelling Community	20/02/2015	ADAMONT France	METEO-FRANCE	18/04/2020
10- DRIAS-2020 / IPSL / IPSL-CM5A-MR / WRF381P	IPSL-CM5A-MR v1	IPSL: Institut Pierre-Simon Laplace		23/06/2013	WRF381P	IPSL: Institut Pierre Simon Laplace	17/06/2019	ADAMONT France	METEO-FRANCE	18/04/2020
11- DRIAS-2020 / ICTP / HadGEM2-ES / RegCM4-6	HadGEM2-ES v1	MOHC: Met Office Hadley Centre		01/01/2011	RegCM4-6 v1	ICTP: International Centre for Theoretical Physics	10/08/2018	ADAMONT France	METEO-FRANCE	28/04/2020
12- DRIAS-2020 / MPI-CSC / MPI-ESM-LR / REMO2009	MPI-ESM-LR v1	MPI: Max Planck Institute for Meteorology		15/03/2012	REMO 2009	CSC: Climate Service Center	10/05/2016	ADAMONT France	METEO-FRANCE	22/04/2020

Figure 74 : Nouveau jeu de données climatiques « DRIAS 2020 » : couples GCM-RCM

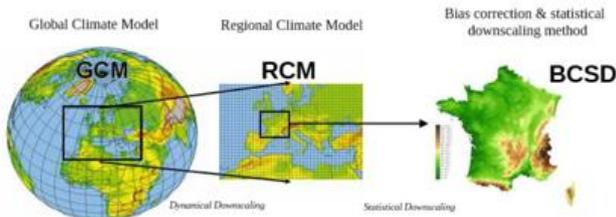
Ainsi ce nouveau jeu de données « DRIAS 2020 » comporte de nombreux avantages (les simulations avec des anomalies constatées sont écartées, prises en comptes des nouveaux RCM sortis entre 2015 et 2019, corrections des Biais,...) (Figure 75).

Ancien jeu de données



- des données régionalisées datant de 2011-2013 ou antérieurs
- Pas de correction des Biais (BVSD)

Nouveau jeu de données DRIAS-2020



- De nouveaux RCM (dont certains sortis entre 2015 et 2019)
- Pour la première fois correction des Biais (BVSD) par rapport aux données historiques
- Meilleure représentation des incertitudes sur le climat futur rendu possible par la disponibilité de nombreuses nouvelles simulations (portail Euro-Cordex)



Figure 75 : Comparaison de l'ancien jeu de données climatiques (2014) et du nouveau jeu « DRIAS 2020 »

Le jeu de données « DRIAS 2020 » comporte 12 couples de modèles climatiques. Le cahier des charges de l'étude Sud Manche prévoit d'en utiliser 5.

Pour réaliser cette sélection, le BRGM s'est appuyé sur la « Short list » proposée et discutée par Météo-France le 18 décembre 2020 (Etchevers et al. , 2020).

Les critères de sélection des 5 couples parmi les 12 disponibles, sont les suivants :

- disposer d'au moins 5 couples, pour garder un minimum de dispersion ;
- représenter la dispersion de l'ensemble des 12 couples du jeu de données DRIAS-2020, en couvrant le plus possible « l'enveloppe maximale » des modèles ;
- conserver des RCM modélisant l'évolution des aérosols (en effet, tous les RCM ne disposent pas de la possibilité de simuler une évolution dans le temps des aérosols présents dans l'atmosphère, ALADIN et RACMO le permettent) ;
- conserver le couple CNRM/ALADIN, pour prioriser l'utilisation du modèle Météo-France.

A l'issue d'une analyse de ces 5 critères, Météo France a sélectionné les 5 couples suivants parmi les 12 couples du jeu de données DRIAS :

- | | | |
|-----------------------------|---|---|
| | GCM | RCM |
| • CNRM-CM5/ALADIN63 |  |  |
| • EC-EARTH/RACMO22E |  |  |
| • HadGEM2/CCLM4-8-17 |  |  |
| • IPSL-CM5A/WRF381P |  |  |
| • MPI-ESM/CCLM4-8-17 |  |  |

Dans les trois paragraphes qui suivent, les tendances des pluies et températures sont présentées pour :

- les 12 couples de modèles climatiques DRIAS 2020 à l'échelle de la Métropole (§ 4.6.3)
- les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la France métropolitaine (§ 4.6.4)
- les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la zone d'étude (§ 4.6.5)

4.6.3. Tendances des pluies et températures pour les 12 couples de modèles climatiques DRIAS 2020 à l'échelle de la Métropole

a) Précipitations

Pour le calcul des anomalies, les périodes futures sont comparées à la période historique simulée : la période de référence prise en compte pour la partie historique est 1976-2005 et les périodes prises pour le calcul des moyennes futures couvrent 30 ans (H1= 2021-2050 ; H2= 2041-2070 et H3 : 2071-2100).

Le cumul des précipitations, moyenné à l'échelle de la France, est annoncé en légère hausse pour les trois scénarios (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5) entre +2 % et +6 % selon les horizons et scénarios. Cette hausse faible est cependant assortie d'une grande incertitude selon les modèles, pouvant inverser le signe de la tendance quel que soit le scénario. Cette incertitude est à mettre en relation avec la position particulière de la France dans une zone de transition climatique à

l'échelle continentale, entre hausse des précipitations au nord et baisse au sud (Figure 76). On note une incertitude plus forte avec la RCP8.5, où l'enveloppe (5 % -95 %) dépasse, en fin de siècle, 20 % du cumul annuel (entre -6 % et +15 %).

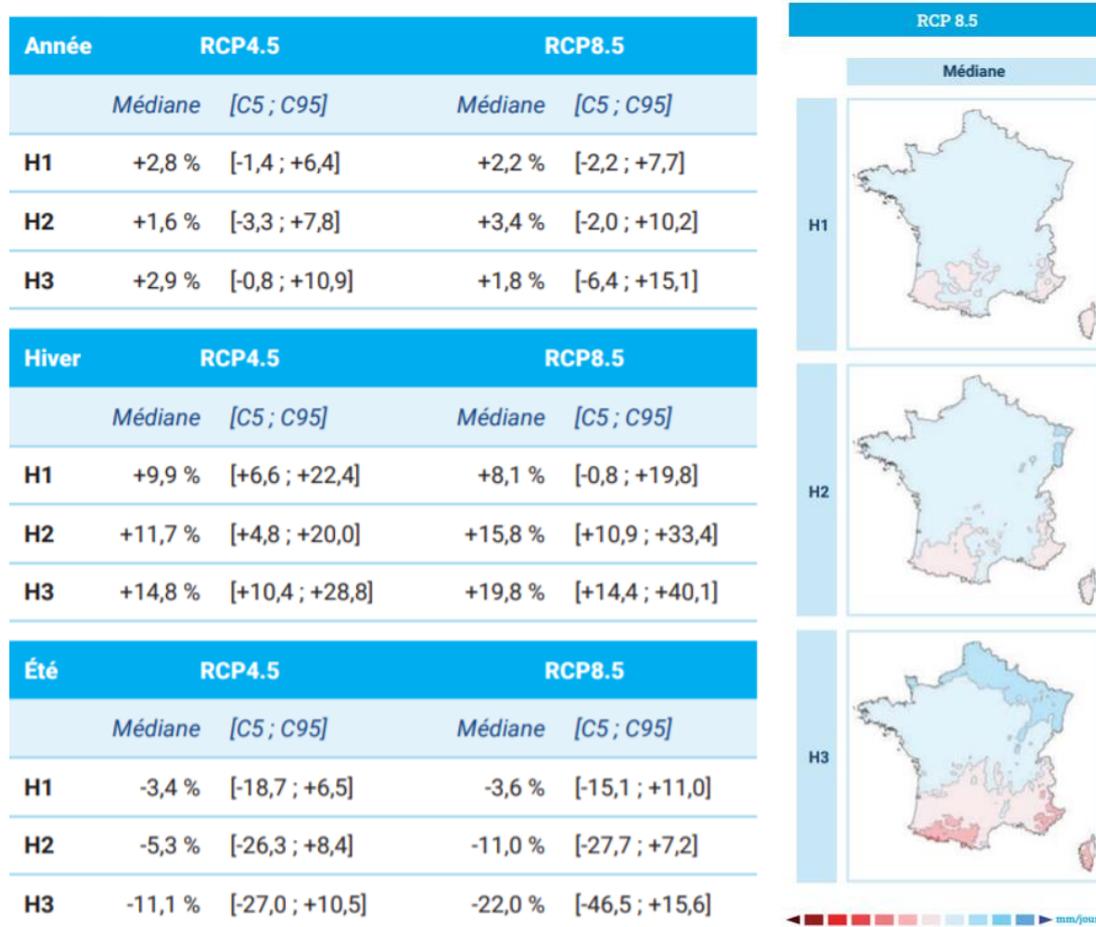


Figure 76 : Graphe de l'évolution des écarts relatifs du cumul des précipitations totales par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

Cette évolution connaît une forte modulation saisonnière avec **une hausse systématique en hiver**, souvent supérieure à +10 % (atteignant même 40 % dans l'enveloppe supérieure du RCP8.5) et à l'inverse, **une baisse quasi systématique en été**, se renforçant au cours des horizons pour atteindre -10 à -20 % en fin de siècle avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 77). À noter que l'enveloppe basse du RCP8.5 prévoit même une baisse d'un facteur 2 du cumul de précipitations en été.

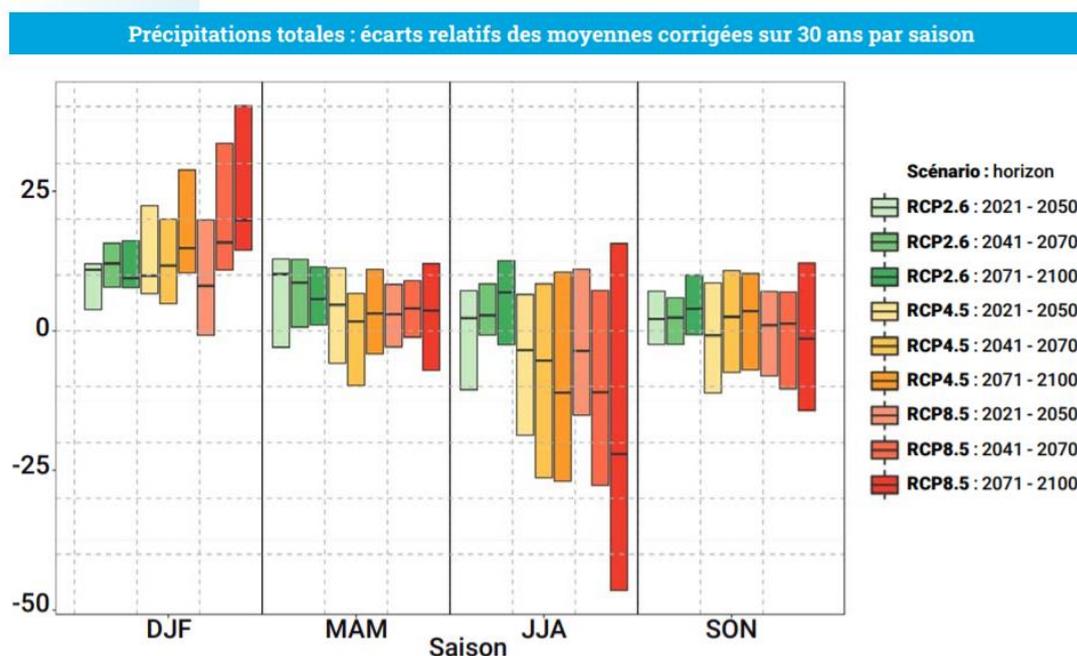


Figure 77 : Graphe de l'évolution saisonnière des écarts relatifs du cumul des précipitations totales par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

Cette évolution des précipitations présente aussi une variabilité géographique sensible au sein de la France avec un gradient nord/sud ou nord-est/sud-ouest se traduisant par une hausse plus marquée sur la moitié nord et une baisse sur certaines régions de la moitié sud.

b) Températures

A l'échelle de la France, la température moyenne est en hausse pour les trois scénarios RCP2.6, 4.5 et 8.5. Le réchauffement est continu jusqu'en fin de siècle pour la RCP4.5 et RCP8.5, avec des valeurs médianes atteignant respectivement +2,1°C et +3,9°C, et jusqu'à +2,7°C et +4,9°C dans l'enveloppe haute de la distribution (Figure 78).

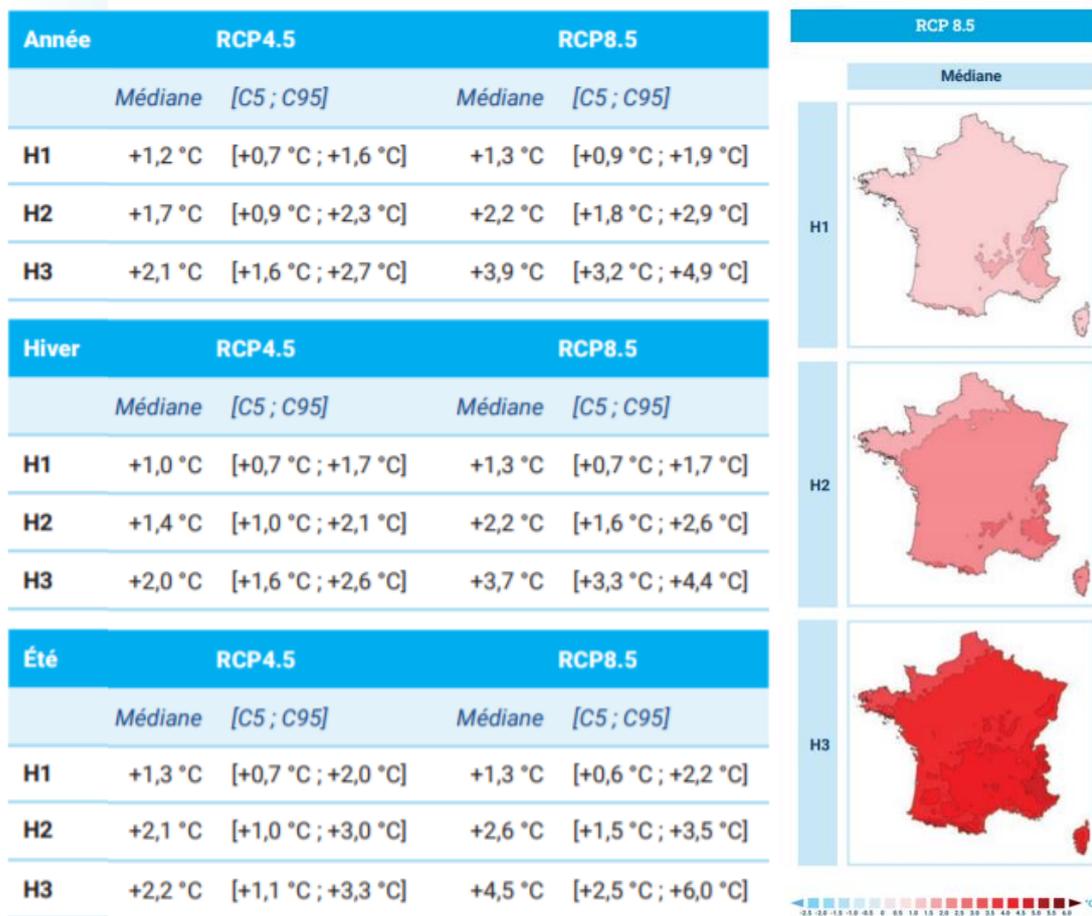


Figure 78 : Graphe de l'évolution des écarts de températures par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

La hausse de température est plus forte l'été dans les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 avec respectivement +2,2 °C et +4,5 °C en valeur médiane et jusqu'à +3,3 °C et +6 °C dans l'enveloppe haute de la distribution (Figure 79).

Le réchauffement présente un gradient sud-est/ nord-ouest sur la métropole avec une différence de 1 °C entre ces deux zones. Le réchauffement est également plus marqué en montagne : Alpes et Pyrénées notamment.

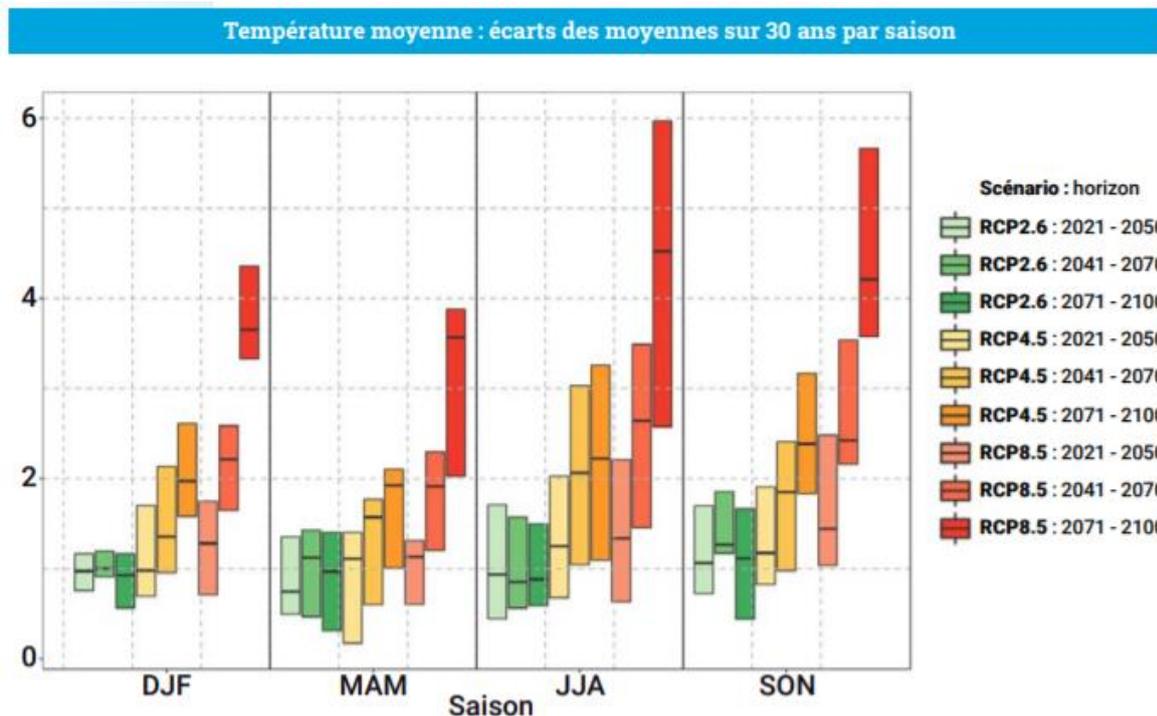


Figure 79 : Graphe de l'évolution saisonnière des écarts de températures par RCP et horizon temporel à l'échelle de la France (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

c) Evolution des sécheresses météorologiques estivales

Les sécheresses météorologiques caractérisent uniquement le déficit de précipitations sur une longue période.

Rappel de la référence 1976-2005 : dans le climat récent, le nombre maximum de jours secs consécutifs en été est assez variable selon les régions, allant de 15 à 20 jours sur le Nord-Ouest de la France et jusqu'à 25 à 30 jours sur le pourtour méditerranéen (Figure 80).

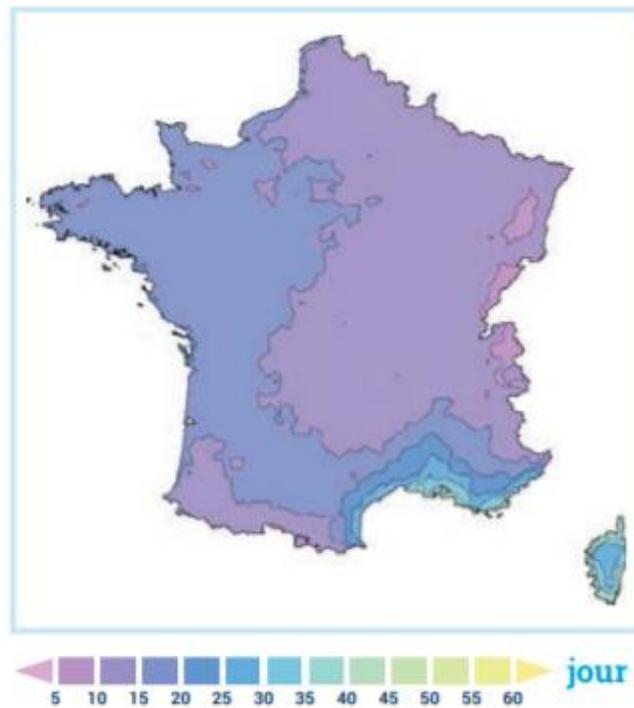


Figure 80 : Sécheresse météorologique - référence 1976-2005 (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

L'évolution attendue de la durée des épisodes des sécheresses météorologiques est fortement dépendante du scénario considéré et de l'horizon temporel considéré. Avec les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, ces épisodes augmentent en fin de siècle respectivement de l'ordre de 5 à 10 jours soit une augmentation de 30 à 50 %. **Les régions les plus concernées** par ces évolutions sont celles de la moitié sud-ouest du pays, et notamment le pourtour méditerranéen, le bassin aquitain et **l'Ouest de la France** (Bretagne et Pays de la Loire) (Figure 81).

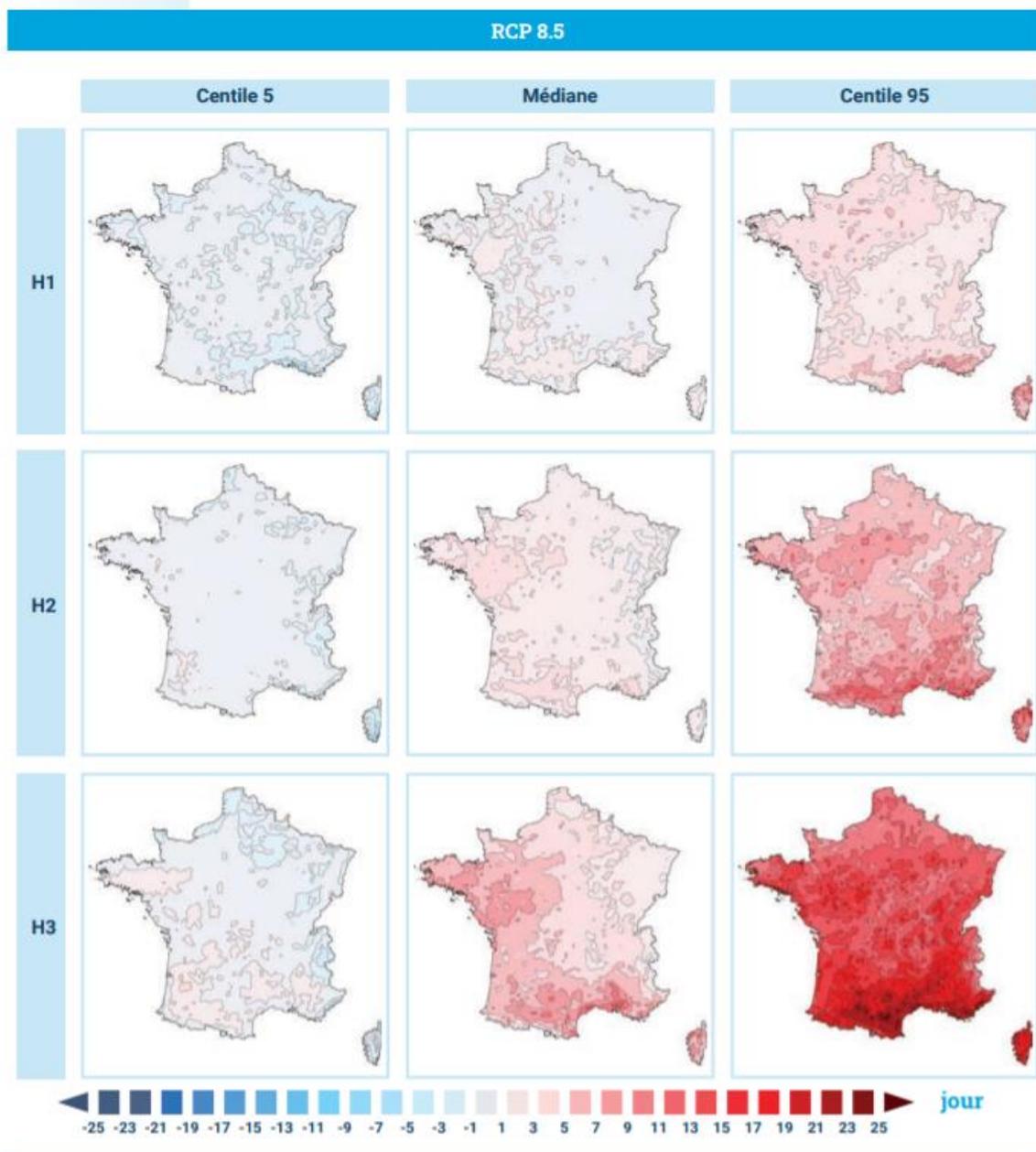


Figure 81 : Cartes des écarts du nombre maximum de jours secs consécutifs en été pour la RCP8.5 et les trois horizons selon les paramètres de la distribution C5, C50 et C95 (figure extraite du rapport DRIAS 2020 <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>)

4.6.4. Tendances des pluies et températures pour les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la France métropolitaine

Pour la RCP8.5, les écarts de pluie et de température moyens sur les 30 dernières années simulées (moyenne sur 2071-2100) par rapport à la période de référence (1976-2005) pour les 5 modèles climatiques sont les suivants (Figure 82) :

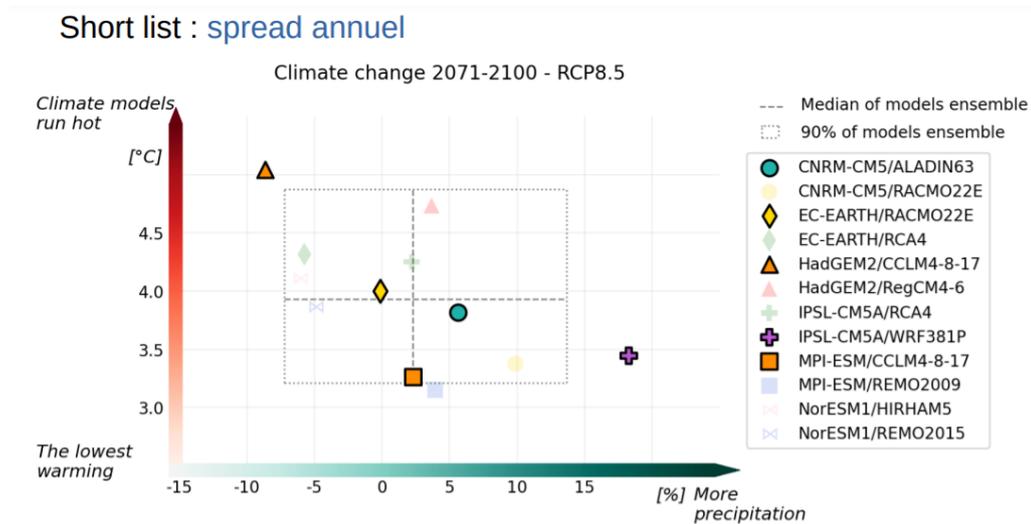


Figure 82 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)

En moyenne annuelle (Figure 82), la « short-list » retenue présente :

- deux modèles extrêmes :
 - o HadGEM/CCLM : chaud et sec,
 - o IPSL/WRF : parmi les moins chauds, et le plus pluvieux
- trois modèles plus médians (température entre +3,3 et +3,8 degrés, et précipitations +2 à +10 % environ) : EC-EARTH/RACMO, CNRM/ALADIN, MPI/CCLM

Dans le détail, en été (Figure 83) :

- un modèle prévoit une augmentation de la pluviométrie (IPSL) et les 4 autres modèles une baisse
- une augmentation des températures de +2,1 à +6,4 degrés selon les modèles
- Un scénario extrême chaud et sec (HadGEM/CCLM)
- Un scénario extrême « froid » (i.e. le moins chaud) et humide (IPSL/WRF)

Dans le détail, en hiver (Figure 84) :

- Augmentation des précipitations prévues par l'ensemble des 5 modèles : +17 à +34 %,
- Concernant les températures :
 - o deux modèles parmi les plus « froids » du jeu DRIAS (CNRM/ALADIN et MPI/CCLM)
 - o deux modèles parmi les plus « chauds » du jeu DRIAS (HadGEM/CCLM et IPSL/WRF),
 - o un modèle médian

Short list : **spread saisonnier / été**

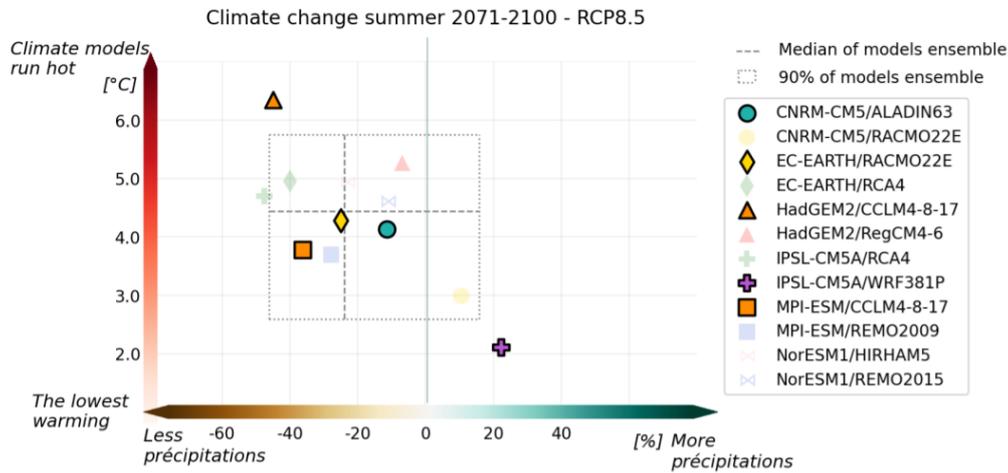


Figure 83 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 pour la saison d'été (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)

Short list : **spread saisonnier / hiver**

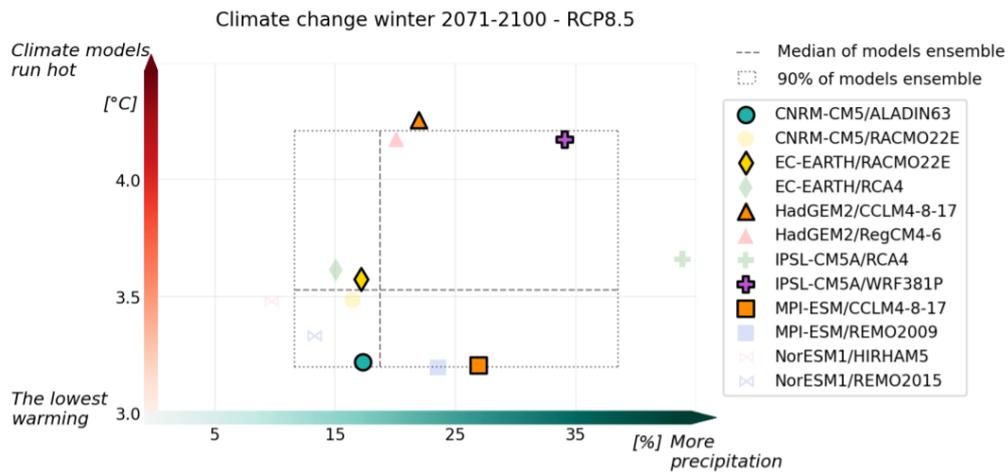


Figure 84 : Anomalie de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 pour la saison d'hiver (par rapport à la période de référence 1976-2005) pour les 5 modèles climatiques de la « short-list » (figure Météo France P. Etchevers et al., 2020)

4.6.5. Tendances des pluies et températures pour les 5 couples de modèles climatiques retenus (« short list ») à l'échelle de la zone d'étude

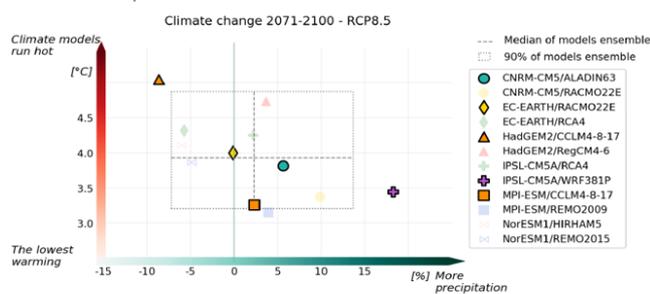
A l'échelle de la zone d'étude, les anomalies de température et de précipitation ont également été calculées et sont comparées à celles calculées à l'échelle de la France métropolitaine (Figure 85).

Pour la RCP8.5 et l'horizon 2071-2100, il apparaît que :

- La tendance de chaque modèle au niveau de la France est conservée au niveau local (Sud Manche)
- Pour tous les modèles, le climat futur sera plus humide et moins chaud dans le Sud-Manche que sur l'ensemble de la France

Dispersion des 5 modèles (à l'échelle de la France) :

Short list : spread annuel



Exemple pour la RCP8.5 à l'horizon 2071-2100

Dispersion des 5 modèles (à l'échelle du Sud Manche) :

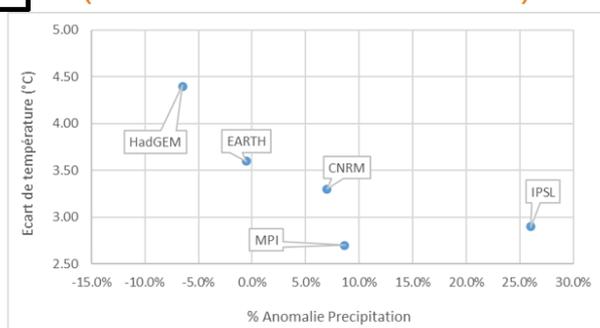


Figure 85 : Anomalies de température et de précipitation à l'horizon 2071-2100 calculées pour les 5 modèles climatiques retenus : comparaison des anomalies moyennes à l'échelle de la France et à l'échelle de la zone d'étude

Les évolutions des moyennes trentenaires des précipitations et des ETP sur la zone d'étude pour les 5 modèles climatiques retenus sont présentées sur la Figure 86. Cette figure permet de visualiser les différentes données d'entrée qui seront injectées dans le modèle EROS pour prédire les débits des rivières du Sud Manche.

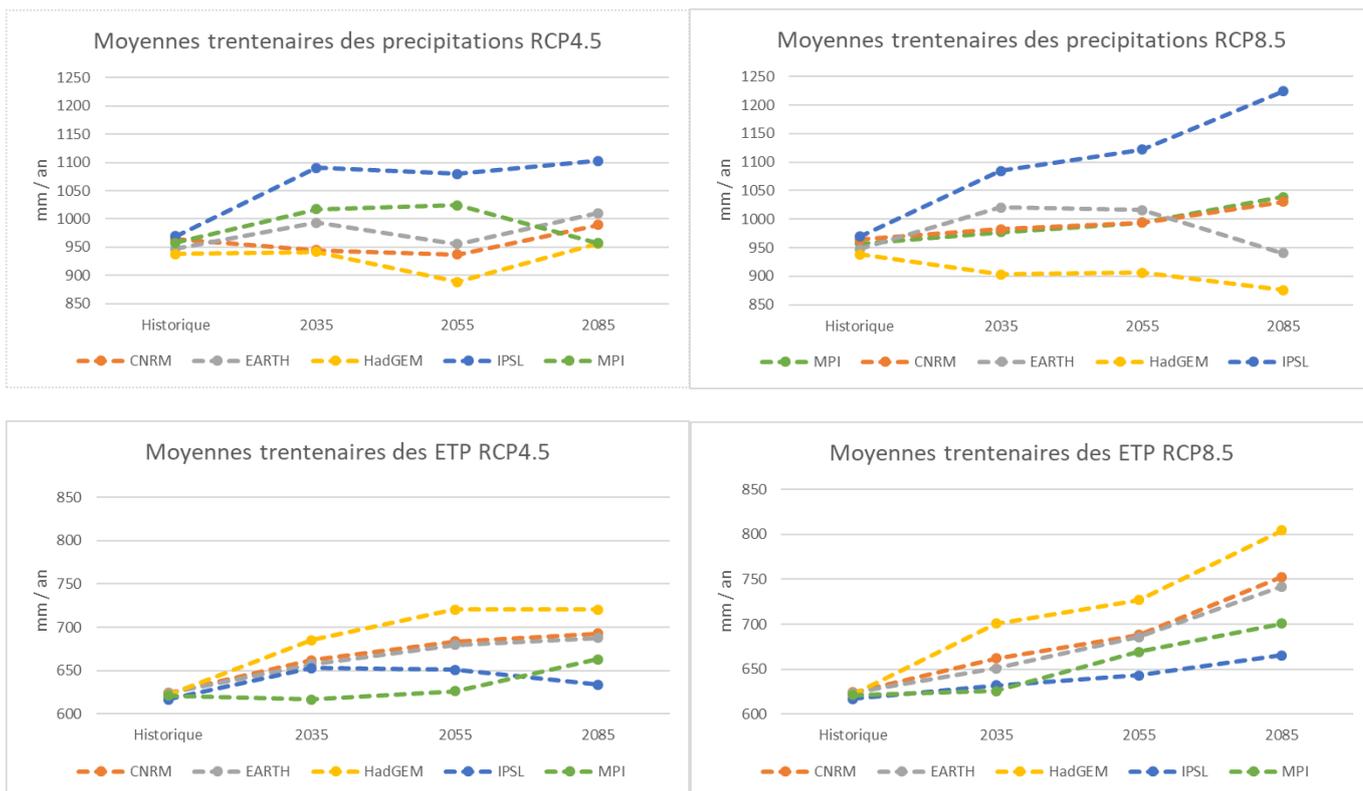


Figure 86 : Evolutions des moyennes trentenaires des précipitations et des ETP sur la zone d'étude pour les 5 modèles climatiques retenus

Les données présentées sur la Figure 86 sont moyennées à l'échelle de la zone d'étude. Toutefois les données qui seront injectées dans le modèle EROS sont des données de pluie et d'ETP spatialisées (mailles de 8km x 8 km). Afin de visualiser ces données d'entrées spatialisées, des cartes des évolutions des anomalies de précipitations, de température et d'évapotranspiration ont été établies à cette échelle locale pour les RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 87 à Figure 89)

Il apparait qu'à l'horizon 2055 (2041-2070), pour la RCP8.5 :

- les précipitations pourraient augmenter (par rapport à la période de référence 1976-2005) d'un ordre de grandeur compris entre 6% et 7% aux extrêmes Nord et Sud de la zone d'étude et entre 4 et 6% ailleurs (Figure 87) ;
- l'évapotranspiration potentielle augmenterait d'un ordre de grandeur compris entre 10% et 12% sur les 2/3 amonts des bassins versants du Sud Manche et entre 7% et 10% sur le littoral (Figure 89).

A l'horizon 2085 (2071-2100), pour la RCP8.5 :

- les précipitations pourraient augmenter (par rapport à la période de référence 1976-2005) d'un ordre de grandeur compris entre 7% et 10% aux extrêmes Nord et Sud de la zone d'étude et de 4% à 6% sur les amonts des BV de la Sée et de la Sélune et entre 6% et 7% ailleurs (Figure 87) ;
- l'évapotranspiration potentielle augmenterait d'un ordre de grandeur compris entre 17% et 20% sur les 2/3 amonts des bassins versants du Sud Manche et entre 15% et 17% sur le littoral (Figure 89).

Carte des anomalies de précipitations en %
(moyenne des 5 modèles climatiques)

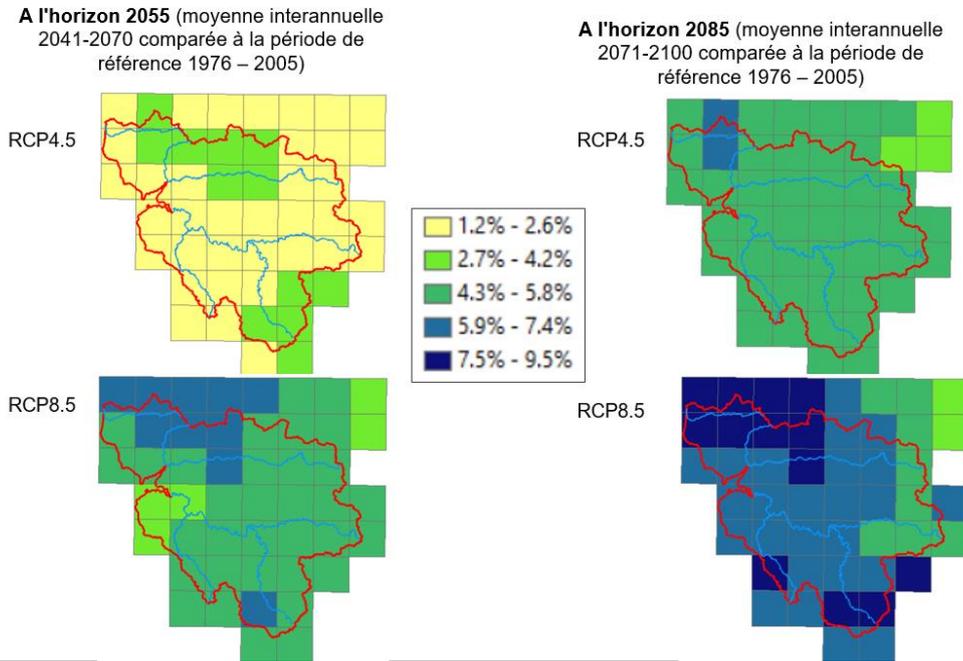


Figure 87 : Carte des anomalies de précipitations (en %) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques)

Carte des anomalies de températures en °C
(moyenne des 5 modèles climatiques)

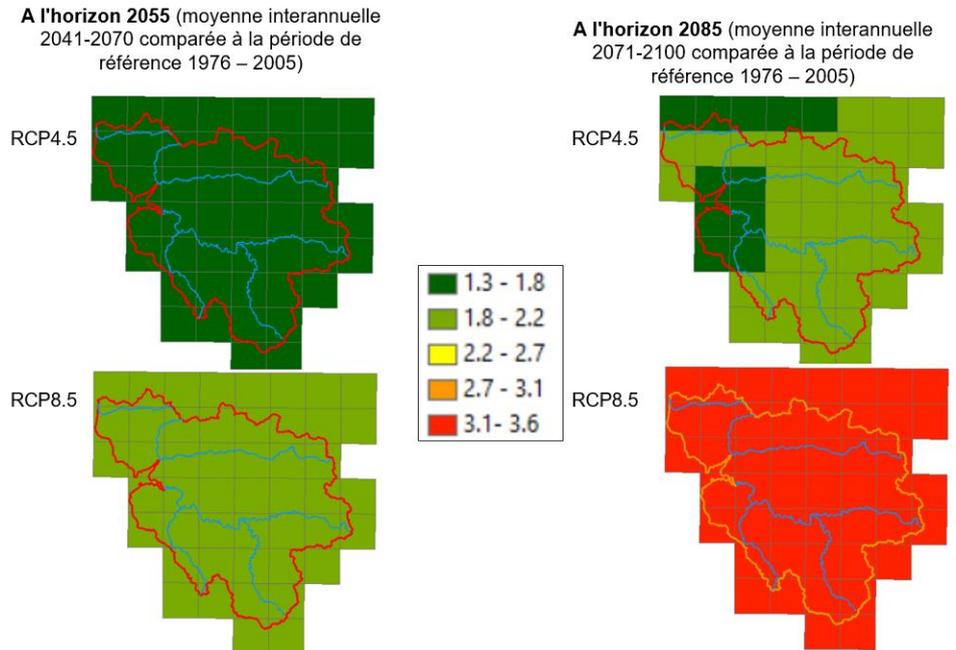


Figure 88 : Carte des anomalies de température (en °C) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques)

Carte des anomalies de l'ETP en % (moyenne des 5 modèles climatiques)

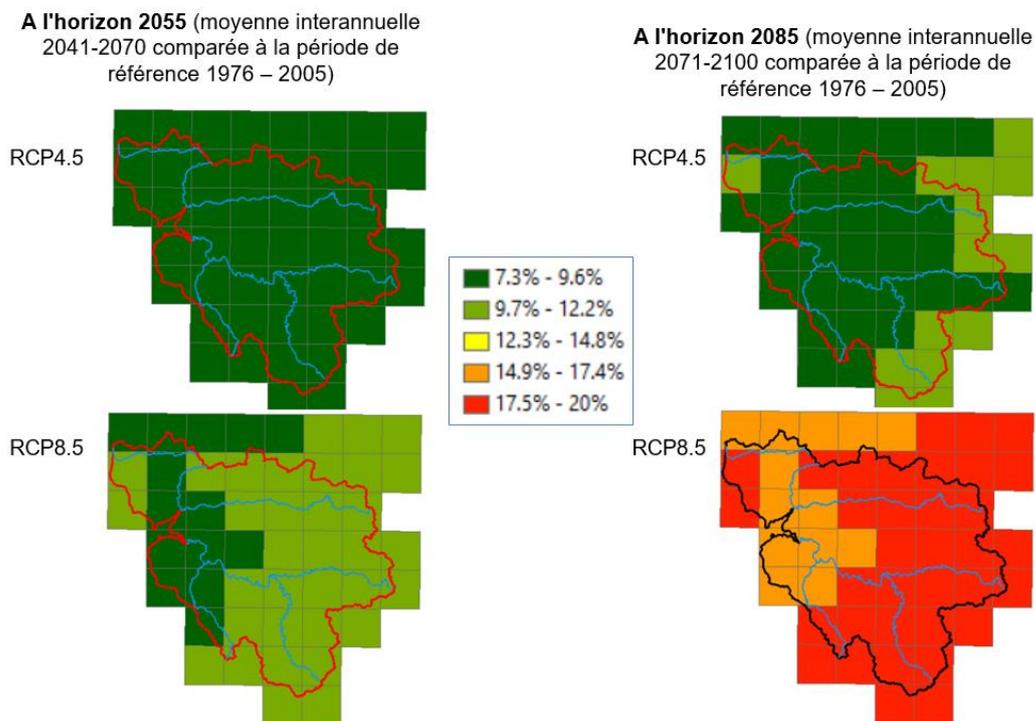


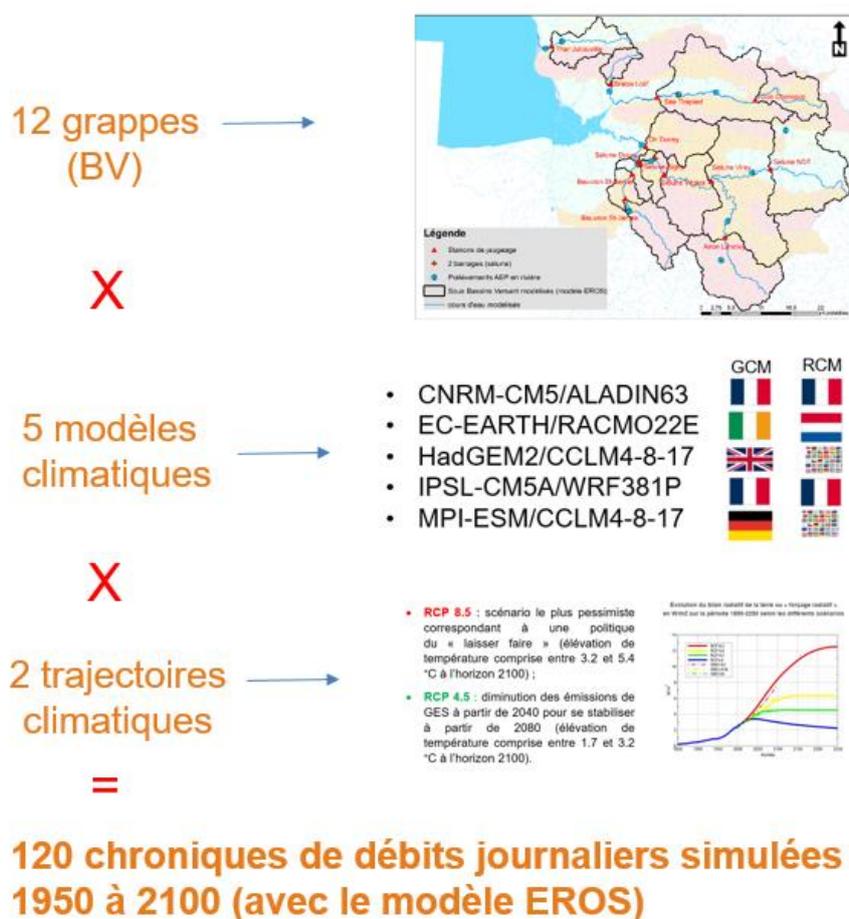
Figure 89 : Carte des anomalies d'évapotranspiration (en %) aux horizons 2041-2070 et 2071-2100 pour les RCP4.5 et RCP8.5 à l'échelle de la zone d'étude (moyenne des 5 modèles climatiques)

4.7. SIMULATION DES DEBITS JUSQU'A L'HORIZON 2050

Le modèle EROS calé (cf. §4.5) a été utilisé pour simuler les débits jusqu'à l'horizon 2100 au pas de temps journalier, incluant ainsi l'horizon cible (2050).

Des chroniques moyennes de pluie et d'ETP ont été calculées pour chaque RCP (4.5 et 8.5), de chacun des 5 modèles climatiques pour chacun des 12 BV simulés. Ces chroniques ont été calculées par moyennes pondérées des points de grilles inclus dans chaque BV simulé.

Les simulations ont ensuite été lancées une à une. 120 chroniques de débits ont ainsi été obtenues à l'issue de ces simulations (Figure 90 et Figure 91).



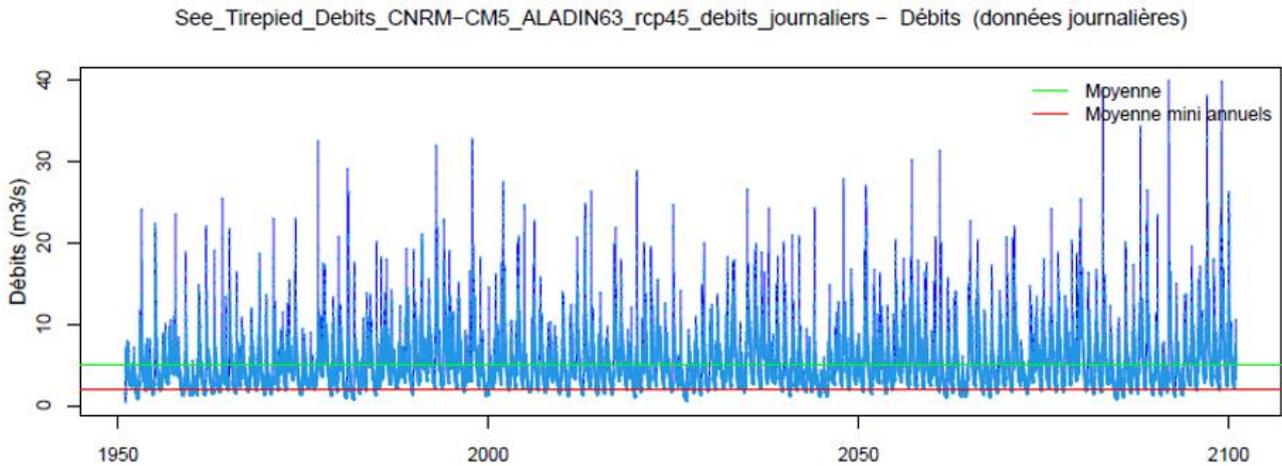


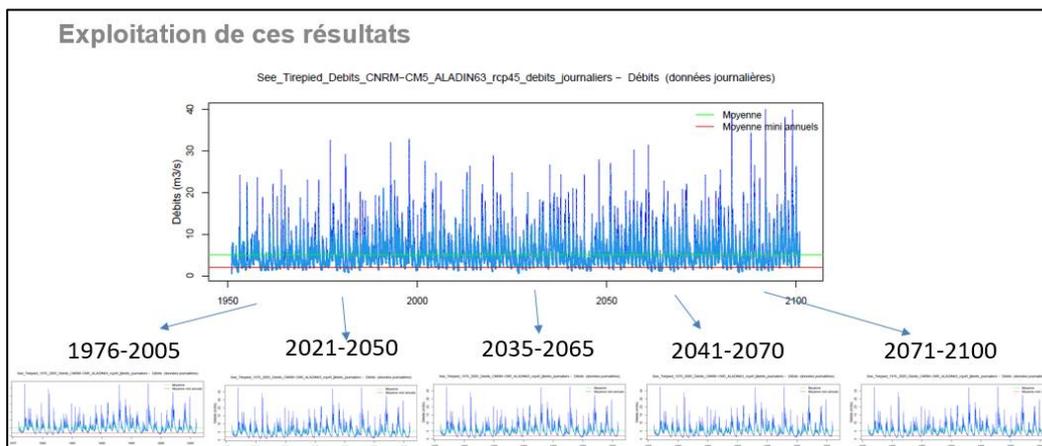
Figure 91 : Exemple d'une des 120 chroniques de débits simulées : la Sée à Tirepied pour le modèle CNRM-CM5_ALADIN63 et la trajectoire RCP 4.5

4.8. ANALYSE GLOBALE DES TENDANCES D'EVOLUTION DES DEBITS NATURELS DU SUD MANCHE A L'HORIZON 2050 (ET AU DELA)

4.8.1. Méthodologie

Afin d'exploiter d'un point de vue statistique les résultats de débits simulés, chacune de ces 120 chroniques (cf. § 4.7) a été découpée en 6 tronçons correspondant à 5 horizons temporels (1 horizon de référence et 4 horizons de prévision) :

- Horizon de référence : 1976-2005
- H₂₀₃₅ = 2021-2050
- H₂₀₅₀ = 2035-2065
- H₂₀₆₅ = 2041-2070
- H₂₀₈₅ = 2071-2100



Il est important de comprendre que les situations météorologiques futures simulées ne sont généralement pas représentatives de la situation observée pour une date donnée. Ainsi, les valeurs simulées pour la période de référence reproduisent généralement assez mal les valeurs observées à une date donnée. En revanche, l'ensemble des simulations pour une période de référence permet de reproduire les caractéristiques générales du climat de la période de

simulation (1950-2000 par exemple). C'est cette capacité qui permet d'attribuer un certain niveau de confiance dans les projections du climat futur.

Ceci explique pourquoi les résultats des projections climatiques sont analysés par tranches de temps de 30 ans afin d'étudier l'évolution du signal climatique et non celle des phénomènes météorologiques ponctuels.

Ainsi, 600 chroniques de débits (= 5 x 120) ont été obtenues à l'issue de cette étape. Pour chacune de ces chroniques, différents paramètres statistiques ont été calculés afin de rendre compte des évolutions des étiages, des crues et des débits moyens (Figure 92).

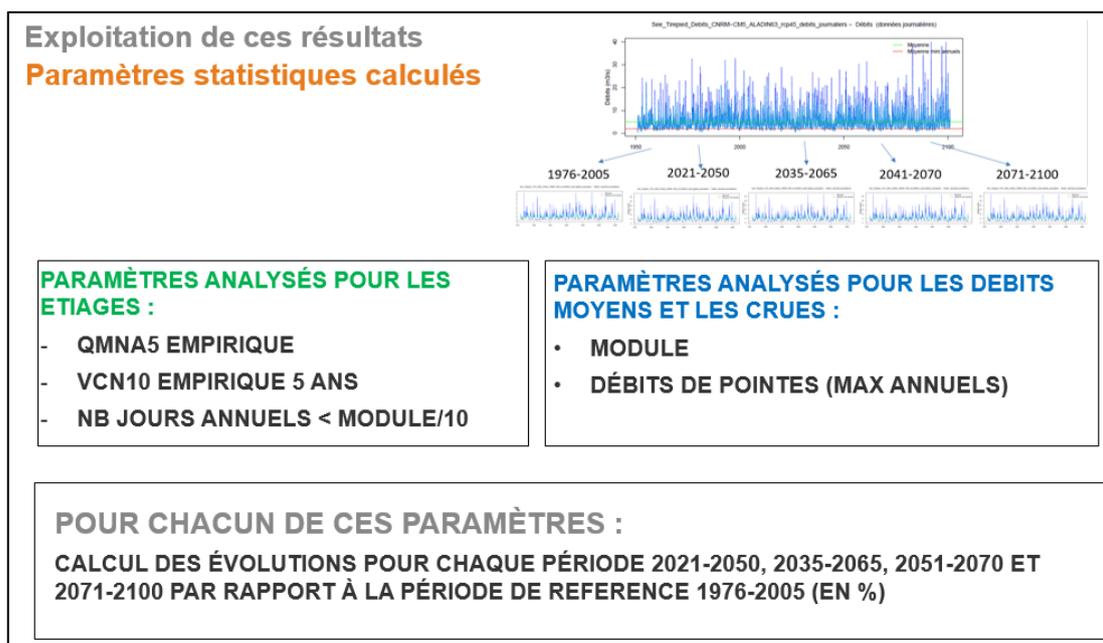


Figure 92 : Paramètres statistiques calculés pour les débits des rivières du Sud Manche simulés jusqu'à l'horizon 2100

Pour rappel :

- Le QMNA, débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A), est la valeur du débit mensuel d'étiage atteint par un cours d'eau pour une année donnée. Calculé pour différentes périodes de retour, il permet d'apprécier statistiquement le plus petit écoulement d'un cours d'eau sur une période donnée. Ainsi le **QMNA5**, exprimé en m³/s, est le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassée une année donnée, c'est donc la valeur du QMNA telle qu'elle ne se produit, en moyenne, qu'une année sur cinq ou vingt années par siècle.
- Le **VCN10** est le débit moyen minimal annuel sur 10 jours consécutifs. Le VCN10 permet de caractériser une situation d'étiage sévère sur une plus courte période que le QMNA (mensuel).

4.8.2. Résultats

Le détail des résultats des calculs des différents paramètres statistiques sont présentés ci-après pour chaque grappe modélisée :

- La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet : page 151
- La Sélune à Virey : page 153
- La Sélune à Vezins : page 155
- Le Beuvron à Saint James : page 157
- Le Beuvron à Saint Senier : page 159
- L'Airon à Landivy : page 161
- La Sée à Chérencé : page 163
- La Sée à Tirepied : page 165
- Le Thar à Jullouville : page 167
- La Braize à Lolif : page 169
- L'Oir à Ducey : page 171
- La Sélune (aval de la confluence du Beuvron) : page 173

Dans les paragraphes a) à g) qui suivent seul un résumé est présenté pour quelques rivières modélisées.

A noter que, d'un point de vue terminologique, dans la partie du rapport qui suit, lorsqu'il est fait mention de :

- « l'horizon 2035 », il s'agit de l'horizon correspondant à la moyenne trentenaire 2021-2050 ;
- « l'horizon 2050 », il s'agit de l'horizon correspondant à la moyenne trentenaire 2035-2065 ;
- « l'horizon 2055 », il s'agit de l'horizon correspondant à la moyenne trentenaire 2041-2070 ;
- « l'horizon 2085 », il s'agit de l'horizon correspondant à la moyenne trentenaire 2071-2100 ;

Concernant le choix de ces horizons, les horizons 2035, 2055 et 2085 correspondent à ceux retenus par Météo-France et sont retenus pour les débits afin de pouvoir comparer les évolutions pluie, ETP, débits aux mêmes horizons. Le 4^{ème} horizon retenu (horizon 2050) correspond à celui ciblé par le SDEAU 50 dans le cadre de cette étude.

a) La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet (détail page 151)

Le débit moyen (module) devrait augmenter (par rapport à la période de référence 1976-2005) de 0.8% à 6% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation serait en moyenne de +3% pour la RCP4.5 et de +6% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (de +2% à +4% à l'horizon 2035 et de +10% à +19% à l'horizon 2085).

Les débits de pointe (débit maximum annuel) s'accroîtraient jusqu'à +29% à l'horizon 2085 (RCP8.5) ; à l'horizon 2050, cette augmentation serait de +15% environ.

Les étiages seraient des plus en plus sévères (entre -14% et -17% du QMNA5 à l'horizon 2050 ; autour de -21% à l'horizon 2055 et entre -20% et -26% à l'horizon 2085).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module s'accroîtrait avec le temps et pourrait atteindre, par exemple, 60 jours à l'horizon 2085 pour la RCP8.5 pour le modèle climatique HadGEM (RCP et modèle climatique le plus pessimiste). L'utilisation d'autres modèles climatiques donnent des résultats moins pessimistes (<10 jours par an à l'horizon 2085).

Il convient de faire attention à l'interprétation des chiffres donnés précédemment ; en effet ceux-ci correspondent à **des moyennes réalisées sur 30 années** pour chaque horizon temporel mentionné. Le fait de moyenniser sur 30 années permet d'estimer la nouvelle « norme » climatique sur la période considérée et de s'affranchir autant que possible des variations météorologiques plus erratiques. Par exemple, pour les 60 jours à l'horizon 2085 où le débit naturel de la Sélune sera inférieur au 10^{ème} du module (d'après le modèle climatique HadGem), il s'agit d'une moyenne sur 30 ans pour la RCP8.5. Au sein de ces 30 années, des pics annuels plus importants pourront être atteints en fonction de la météo. Ainsi, pour cette RCP8.5, pour la période 2071-2100 un pic de 267 jours est simulé pour la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet avec ce modèle climatique HadGEM (le plus pessimiste).

b) La Sée à Tirepied (détail page 165)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de 7% à 12% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050, cette augmentation serait en moyenne de +7% pour la RCP4.5 et de +10% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (+4% à +8% à l'horizon 2035 et de +13% à 25% à l'horizon 2085). A l'horizon 2050, cette variabilité est estimée à +9% pour la RCP4.5 et +10% pour la RCP8.5.

Les débits de pointe s'accroîtraient jusqu'à +48% à l'horizon 2085 (entre 23% et 31% à l'horizon 2050).

Les étiages : pour ce bassin versant, les résultats ont des tendances divergentes selon les modèles climatiques utilisés pour les horizons proches. A l'horizon 2050, pour la RCP8.5, les QMNA5 seraient en baisse lorsqu'on utilise les modèles climatiques EC-EARTH (-2%), MPI (-6%), et HadGEM (-15%), stationnaire avec le modèle CNRM (+0.6%) et en hausse avec le modèle IPSL (+44%).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module serait nul pour les 5 modèles sur la période de référence. Seul le modèle (HadGEM2) prévoit des dépassements moyens de 3 jours /an à l'horizon 2085.

c) Le Thar à Jullouville (détail page 167)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de +7% à +14% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation est en moyenne de +7% pour la RCP4.5 et de +11% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître de +5% à +7% à l'horizon 2035 et +12% à 26% à l'horizon 2085. Cette augmentation est estimée entre +6% et +11% à l'horizon 2050.

Les débits de pointe s'accroîtraient jusqu'à +63% à l'horizon 2085 pour la RCP 8.5 (à l'horizon 2050 : +3% pour la RCP4.5 et +22% pour la RCP8.5).

Les étiages : l'évolution moyenne du QMNA5 à l'horizon 2050 serait à une baisse de 2.5% pour la RCP8.5 et de 2.8% pour la RCP4.5. Cette baisse pourrait atteindre 9.4% à l'horizon 2085 pour la RCP8.5

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module pourrait atteindre au maximum 3 jours par an en moyenne à l'horizon 2085 d'après le modèle le plus pessimiste (HadGEM2).

d) La Braize à Lolif (détail page 169)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de 6% à 14% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation est en moyenne de +7% pour la RCP4.5 et de +11% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (+8% à +10% à l'horizon 2035 et de +16% à 30% à l'horizon 2085). Cette augmentation est estimée entre +11% et +14% à l'horizon 2050.

Les débits de pointe s'accroîtraient jusqu'à +76% à l'horizon 2085 pour la RCP 8.5 (à l'horizon 2050 : +14% pour la RCP4.5 et +32% pour la RCP8.5).

Les étiages : pour ce bassin versant, les résultats ont des tendances divergentes selon les modèles climatiques utilisés. A l'horizon 2050, pour la RCP8.5, les QMNA5 seraient en baisse lorsqu'on utilise les modèles climatiques MPI (-16%), et HadGEM (-13%) et en hausse avec le modèle IPSL (+48%), EC-EARTH (+6%) et CNRM (+3%).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module serait nul pour les 5 modèles sur la période de référence. Seul le modèle le plus pessimiste (HadGEM2) prévoit des dépassements de 3 jours /an en moyenne à l'horizon 2085.

e) La Sélune (aval de la confluence du Beuvron) (détail page 173)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de 3% à 10% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation est en moyenne de +6% pour la RCP4.5 et de +8% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (+7% à +11% à l'horizon 2035 et de +15% à 26% à l'horizon 2085). Cette augmentation est estimée entre +12% et +13% à l'horizon 2050.

Les débits de pointe s'accroîtraient jusqu'à +30% à l'horizon 2085 (à l'horizon 2050 : +19% pour la RCP4.5 et +14% pour la RCP8.5).

Les étiages : pour ce bassin versant, les résultats ont des tendances divergentes selon les modèles climatiques utilisés. A l'horizon 2050, pour la RCP8.5, les QMNA5 seraient en baisse lorsqu'on utilise les modèles climatiques EC-EARTH (-11%), MPI (-20%), et HadGEM (-18%), stationnaires avec le modèle CNRM (-0.1%) et en hausse avec le modèle IPSL (+31%). Les moyennes sont à une baisse de -3.5% environ à l'horizon 2050. Cette baisse pourrait atteindre - 31% à l'horizon 2085 avec le modèle climatique le plus pessimiste (HadGEM).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module serait quasi-nul en moyenne. Seuls deux modèles climatiques prévoient des dépassements en moyenne de 1 à 3 jours par an maximum.

f) Le Beuvron à Saint-Senier (détail page 159)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de 5% à 14% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation est en moyenne de +7% pour la RCP4.5 et de +10% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (+9% à +16% à l'horizon 2035 et de +17% à 29% à l'horizon 2085). Cette augmentation est estimée autour de +15% à l'horizon 2050.

L'augmentation des débits de pointe atteindrait +42% à l'horizon 2085 pour la RCP 8.5. Sur cette rivière l'augmentation serait très forte dès l'horizon 2050 : +48% pour la RCP4.5 et +30% pour la RCP8.5).

Les étiages : pour ce bassin versant, les résultats ont des tendances divergentes selon les modèles climatiques utilisés. A l'horizon 2050, pour la RCP8.5, les QMNA5 seraient en baisse lorsqu'on utilise les modèles climatiques MPI (-13%), et HadGEM (-16%), stationnaires avec le modèle climatique CNRM (-0.5%), et en hausse avec le modèle IPSL (+49%), EC-EARTH (+5%).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module serait nul pour les 5 modèles sur la période de référence. Seul le modèle le plus pessimiste (HadGEM2) prévoit des dépassements de 3 jours /an en moyenne à l'horizon 2085.

g) L'Airon à Landivy (détail page 161)

Le débit moyen (module) devrait augmenter de 9% à 18% selon la RCP et l'horizon temporel considérés. A l'horizon 2050 cette augmentation est en moyenne de +11% pour la RCP4.5 et de +13% pour la RCP8.5.

La variabilité des débits devrait progressivement s'accroître (+15 à +19% à l'horizon 2035 et de +23% à 39% à l'horizon 2085). Cette augmentation est estimée autour de +21% à l'horizon 2050.

L'augmentation des débits de pointe atteindrait +46% à l'horizon 2085 pour la RCP 8.5 (à l'horizon 2050 : +28% pour la RCP4.5 et +25% pour la RCP8.5).

Les étiages : pour ce bassin versant, les résultats ont des tendances divergentes selon les modèles climatiques utilisés. A l'horizon 2050, pour la RCP8.5, les QMNA5 seraient en baisse lorsqu'on utilise les modèles climatiques MPI (-12%), et HadGEM (-12%), et en hausse avec le modèle IPSL (+27%), EC-EARTH (+5%) et CNRM (5%).

Le nombre de jours par an moyen où le débit est naturellement inférieur au 10^{ème} du module est quasi-nul en moyenne. Seuls deux modèles climatiques prévoient des dépassements en moyenne de 1 à 5 jours par an au maximum.

La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	4.4%	3.2%	0.8%	5.5%
	RCP8.5	5.3%	5.8%	6.0%	5.3%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	21.8%	14.7%	14.7%	8.2%
	RCP8.5	-5.0%	15.7%	15.7%	29.0%
Ecart type	RCP4.5	4.2%	6.1%	6.5%	9.7%
	RCP8.5	2.2%	7.3%	8.8%	19.0%
QMNA5 empirique	RCP4.5	-9.2%	-14.1%	-20.9%	-20.3%
	RCP8.5	-6.2%	-16.9%	-21.0%	-26.4%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-1.7%	-4.4%	-15.7%	-14.2%
	RCP8.5	-2.7%	-12.2%	-18.6%	-24.5%

Figure 93 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à la station de Notre-Dame-du-Touchet à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	-28.7%	-13.4%	11.8%	8.7%	-24.2%	-28.7%	-16.8%	-17.1%	29.1%	-37.2%	-30.4%	-25.7%	-18.2%	10.2%	-40.2%	-34.5%	-36.8%	15.9%	-8.4%	-37.5%
	RCP8.5	-24.9%	-18.1%	22.8%	19.9%	-30.5%	-36.6%	-37.2%	31.3%	-9.4%	-32.6%	-42.6%	-41.9%	19.4%	-5.9%	-33.8%	-38.5%	-48.9%	18.4%	-11.2%	-51.7%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-15.5%	-2.5%	30.1%	1.2%	-21.5%	-15.5%	-3.4%	8.4%	21.4%	-32.7%	-23.2%	-17.2%	-3.6%	1.2%	-35.6%	-25.7%	-25.4%	27.8%	-11.6%	-35.9%
	RCP8.5	-11.9%	-6.5%	29.4%	2.3%	-27.1%	-35.0%	-22.9%	45.3%	-14.7%	-33.8%	-35.3%	-35.9%	26.9%	-12.7%	-35.9%	-28.8%	-41.5%	15.9%	-19.7%	-48.6%

Figure 94 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à la station de Notre-Dame-du-Touchet à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

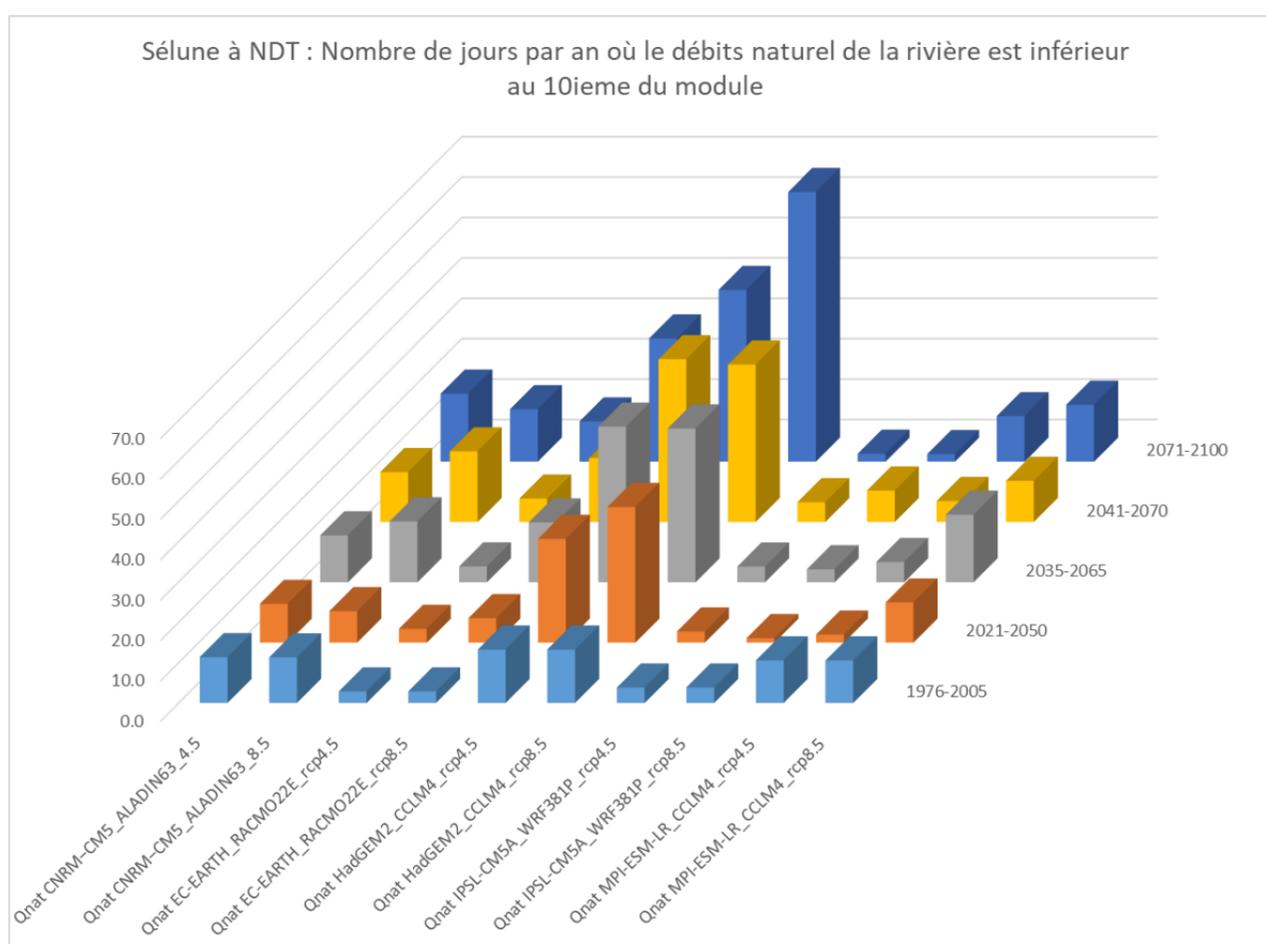


Figure 95 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Sélune à Virey

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	7.4%	6.2%	4.0%	8.9%
	RCP8.5	7.7%	8.8%	9.4%	10.4%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	16.4%	20.0%	20.0%	11.6%
	RCP8.5	3.3%	17.9%	17.9%	31.5%
Ecart type	RCP4.5	10.5%	12.3%	12.7%	15.5%
	RCP8.5	7.4%	12.7%	14.3%	26.7%
QMNA5 empirique	RCP4.5	0.9%	-3.3%	-6.7%	-3.9%
	RCP8.5	4.5%	-4.1%	-8.8%	-14.8%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	2.4%	-2.9%	-5.9%	-8.1%
	RCP8.5	0.8%	-6.4%	-11.6%	-13.0%

Figure 96 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Virey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	9.9%	0.3%	11.8%	0.4%	-18.0%	-4.2%	-4.7%	6.7%	10.7%	-25.1%	-9.6%	-6.7%	2.5%	6.1%	-25.6%	-8.3%	-9.7%	24.8%	-13.5%	-13.0%
	RCP8.5	-0.4%	14.8%	24.4%	3.3%	-19.6%	-5.0%	-12.2%	24.8%	-8.4%	-19.6%	-15.5%	-16.9%	13.3%	-4.4%	-20.5%	-7.5%	-29.2%	8.3%	-14.4%	-31.2%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	11.0%	1.3%	18.1%	1.4%	-19.8%	-7.8%	-4.9%	14.3%	5.4%	-21.7%	-10.8%	-5.6%	10.6%	-1.6%	-22.0%	-14.2%	-12.3%	16.6%	-15.1%	-15.7%
	RCP8.5	-0.6%	8.4%	24.0%	-10.1%	-17.9%	-9.7%	-19.4%	27.4%	-15.5%	-14.7%	-15.7%	-20.2%	10.8%	-10.1%	-23.0%	-7.9%	-27.1%	14.5%	-11.4%	-32.8%

Figure 97 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Virey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

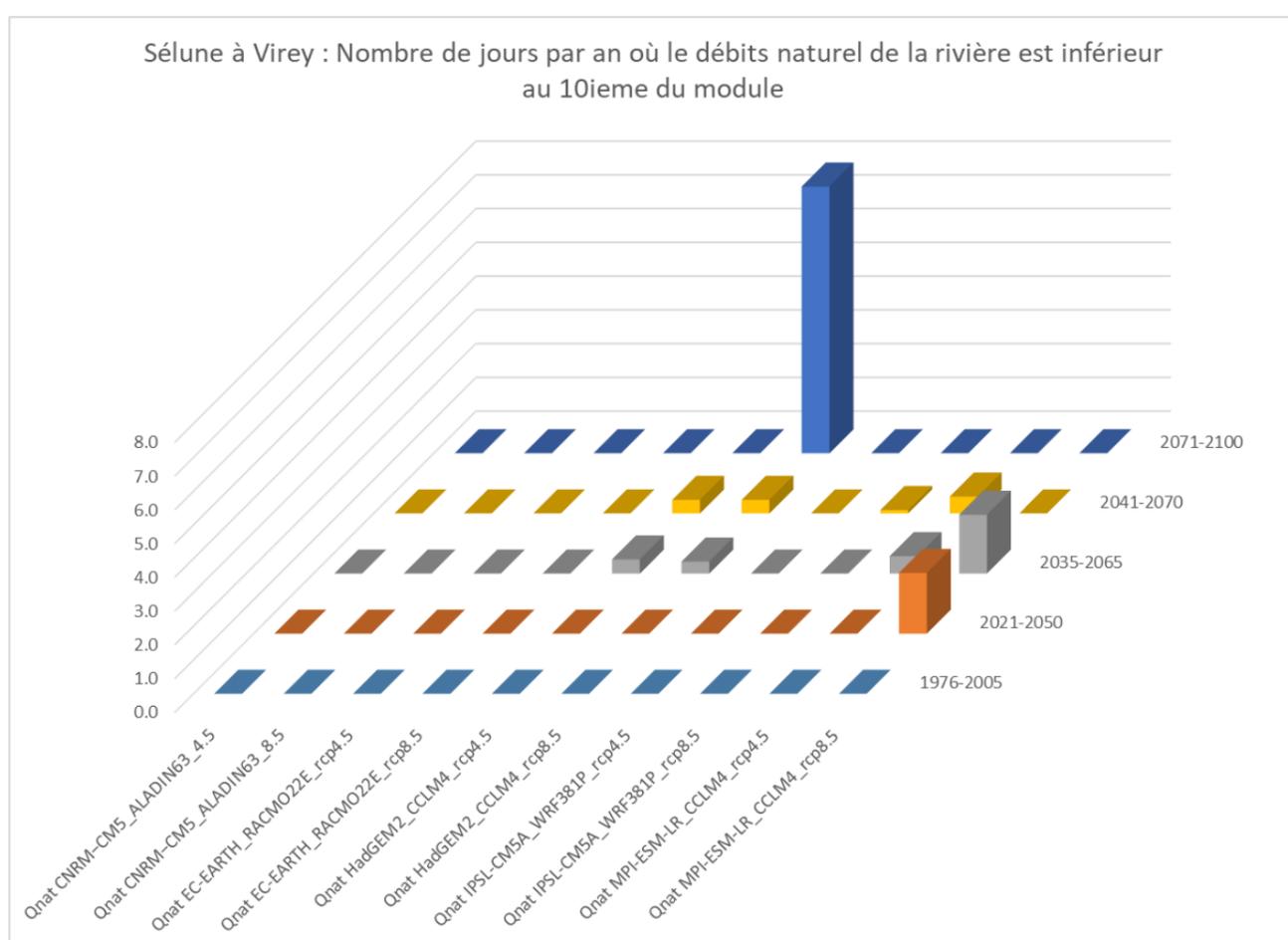


Figure 98 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Virey est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Sélune à Vézins

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	7.2%	5.7%	3.6%	8.4%
	RCP8.5	7.4%	8.5%	9.0%	9.9%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	28.4%	30.0%	30.0%	22.7%
	RCP8.5	12.1%	23.3%	24.9%	32.8%
Ecart type	RCP4.5	10.3%	11.9%	12.3%	15.3%
	RCP8.5	7.4%	12.8%	14.4%	26.3%
QMNA5 empirique	RCP4.5	3.5%	-2.7%	-5.5%	-4.1%
	RCP8.5	4.7%	-3.7%	-10.6%	-13.3%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	4.1%	-1.5%	-5.2%	-6.4%
	RCP8.5	3.0%	-4.8%	-10.8%	-11.8%

Figure 99 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Vézins à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	10.4%	5.7%	22.8%	-2.0%	-19.3%	-3.0%	-1.4%	9.6%	6.3%	-25.2%	-7.2%	-2.0%	7.7%	1.6%	-27.9%	-7.9%	-7.3%	21.8%	-11.7%	-15.2%
	RCP8.5	1.1%	17.4%	24.2%	0.7%	-20.1%	0.2%	-10.0%	26.4%	-15.2%	-20.1%	-15.3%	-13.4%	12.4%	-12.2%	-24.6%	-6.3%	-27.2%	16.1%	-15.9%	-33.0%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	12.0%	4.7%	20.4%	1.1%	-17.7%	-7.2%	-2.2%	16.6%	5.3%	-19.8%	-9.9%	-3.4%	11.2%	-1.9%	-22.0%	-11.2%	-8.0%	18.0%	-15.1%	-15.5%
	RCP8.5	2.3%	12.9%	28.1%	-12.4%	-16.0%	-4.8%	-17.4%	28.6%	-16.2%	-14.1%	-13.2%	-17.9%	11.3%	-11.7%	-22.6%	-6.6%	-24.9%	17.2%	-11.6%	-33.3%

Figure 100 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Vézins à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

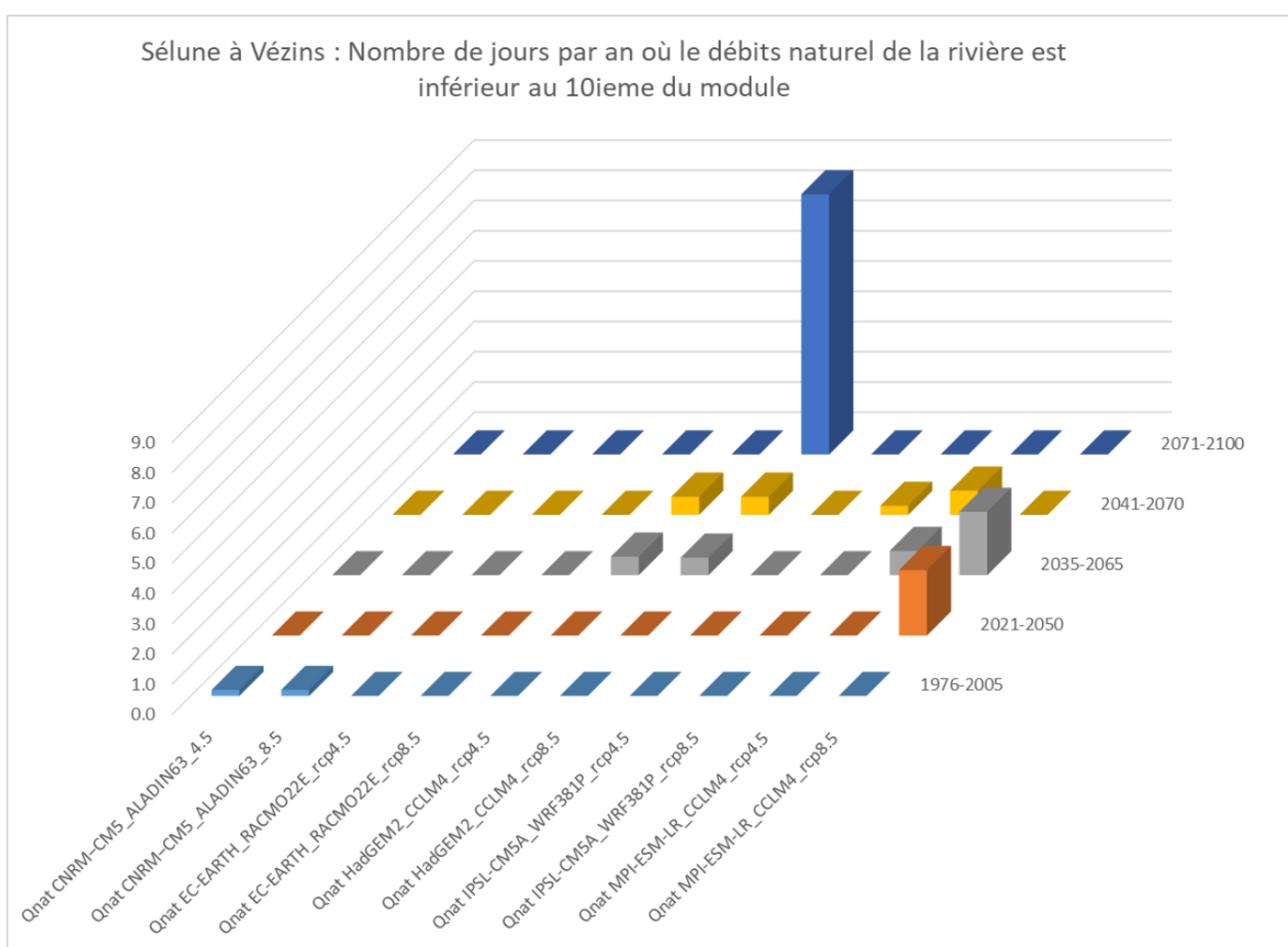


Figure 101 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Vézins est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

Le Beuvron à Saint James

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	10.9%	8.4%	6.6%	12.0%
	RCP8.5	9.9%	11.7%	12.5%	16.0%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	26.2%	32.8%	31.4%	17.7%
	RCP8.5	13.7%	19.5%	23.2%	36.0%
Ecart type	RCP4.5	19.4%	19.8%	20.2%	21.6%
	RCP8.5	12.4%	18.6%	20.3%	35.8%
QMNA5 empirique	RCP4.5	5.6%	6.4%	2.0%	4.3%
	RCP8.5	7.5%	6.0%	1.5%	-1.5%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	2.8%	3.7%	0.7%	0.5%
	RCP8.5	4.2%	2.9%	-3.9%	-3.0%

Figure 102 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint James à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	10.4%	7.1%	14.5%	4.5%	-8.4%	13.0%	7.1%	14.5%	14.5%	-17.2%	10.4%	6.3%	10.0%	0.3%	-17.2%	6.7%	10.0%	20.3%	-11.9%	-3.6%
	RCP8.5	6.7%	24.5%	19.6%	-0.3%	-13.1%	8.6%	8.6%	35.0%	-5.5%	-16.8%	11.2%	6.7%	13.2%	-5.2%	-18.6%	11.9%	-16.4%	23.8%	-2.6%	-24.1%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-1.5%	4.5%	12.4%	3.3%	-4.7%	8.7%	3.4%	10.0%	9.4%	-13.0%	8.3%	3.4%	6.4%	1.3%	-15.8%	0.8%	1.9%	16.7%	-14.7%	-2.0%
	RCP8.5	-1.5%	20.5%	18.1%	-5.0%	-11.1%	-1.5%	6.4%	32.1%	-9.7%	-12.6%	-1.5%	-1.5%	14.4%	-5.7%	-25.3%	8.0%	-18.2%	22.1%	-4.7%	-22.1%

Figure 103 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint James à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

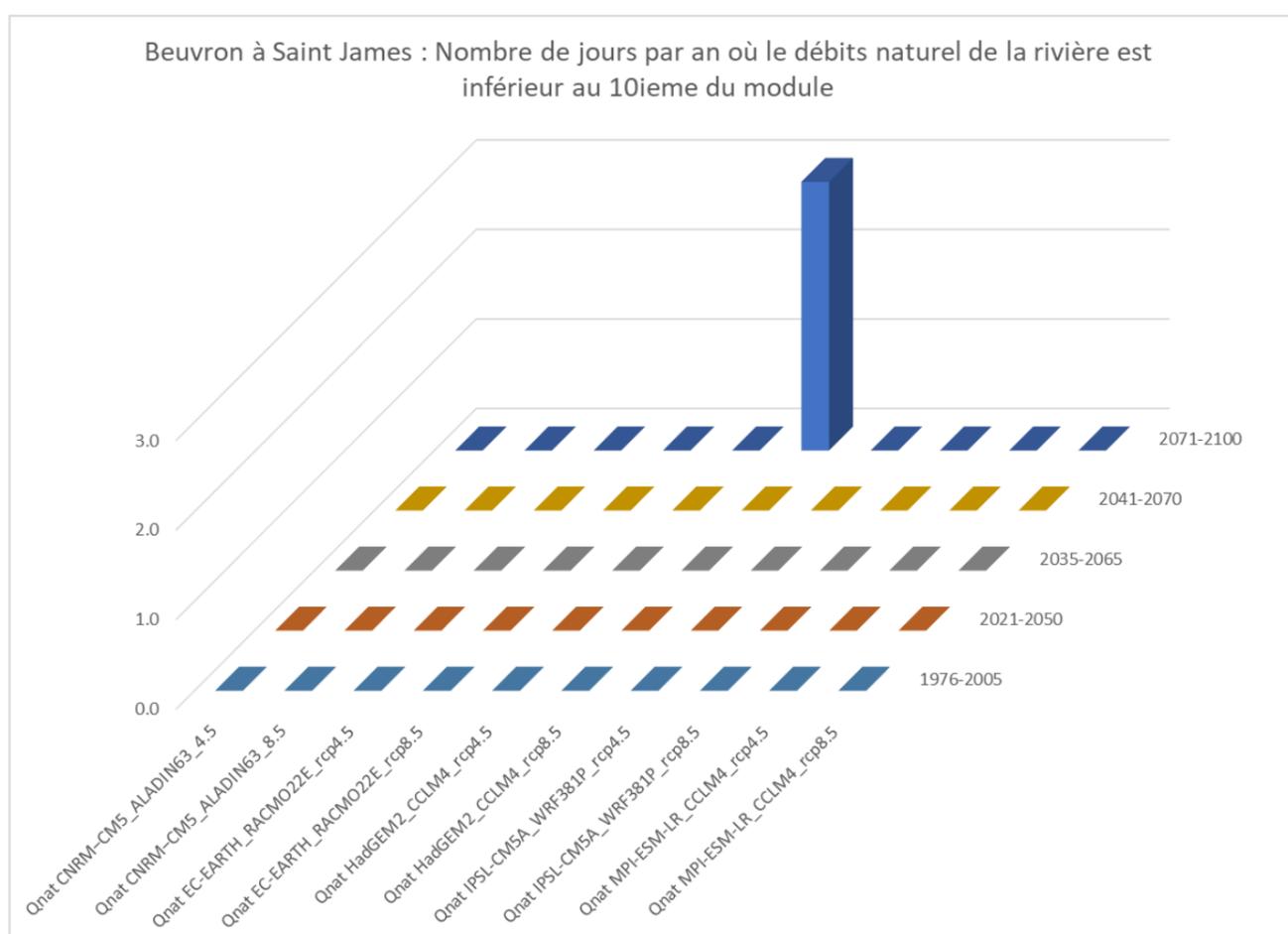


Figure 104 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Beuvron à Saint James est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

Le Beuvron à Saint Senier

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	9.8%	7.2%	5.3%	10.3%
	RCP8.5	8.9%	9.8%	10.1%	13.6%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	39.1%	47.7%	47.7%	38.8%
	RCP8.5	19.6%	30.1%	33.2%	41.9%
Ecart type	RCP4.5	15.5%	15.0%	14.7%	17.4%
	RCP8.5	9.3%	15.2%	16.9%	29.1%
QMNA5 empirique	RCP4.5	4.1%	3.2%	-0.6%	1.9%
	RCP8.5	6.5%	4.7%	-3.6%	-3.6%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	4.0%	5.9%	0.4%	-1.7%
	RCP8.5	5.8%	2.5%	-3.0%	-2.2%

Figure 105 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint Senier à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	9.2%	4.5%	25.7%	-6.4%	-12.4%	10.0%	2.6%	16.0%	2.9%	-15.5%	8.1%	1.3%	13.1%	-7.7%	-18.0%	1.8%	-2.1%	32.6%	-16.4%	-6.4%
	RCP8.5	1.8%	21.5%	24.2%	-2.0%	-13.0%	-0.5%	5.2%	48.6%	-13.1%	-16.6%	-2.4%	-1.0%	18.5%	-12.8%	-20.4%	2.1%	-18.4%	36.8%	-12.4%	-26.0%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	2.1%	6.7%	14.4%	5.1%	-8.1%	11.2%	5.8%	12.0%	11.2%	-10.7%	4.0%	4.6%	7.1%	0.0%	-13.6%	-2.7%	-3.3%	19.6%	-15.7%	-6.1%
	RCP8.5	3.6%	23.7%	18.8%	-8.0%	-9.1%	3.6%	6.7%	28.1%	-13.6%	-12.3%	-3.3%	-3.3%	18.0%	-8.0%	-18.1%	4.9%	-18.2%	32.4%	-4.5%	-25.6%

Figure 106 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Beuvron à Saint Senier à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

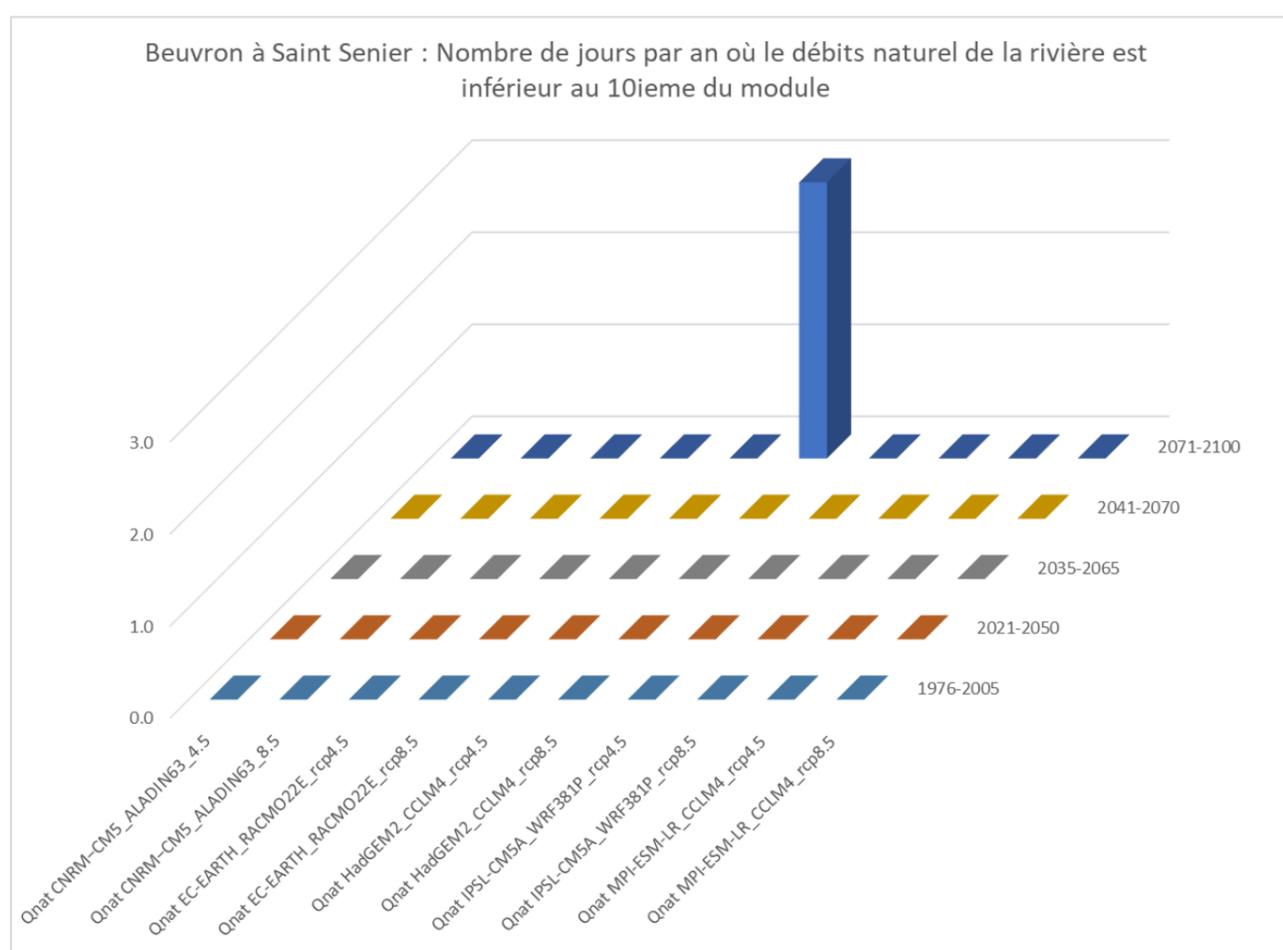


Figure 107 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Beuvron à Saint Senier est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

L'Airon à Landivy

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	12.6%	11.2%	9.0%	14.4%
	RCP8.5	11.4%	13.4%	14.7%	18.3%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	29.8%	27.9%	27.9%	22.3%
	RCP8.5	17.8%	25.3%	29.4%	46.0%
Ecart type	RCP4.5	19.0%	20.6%	20.9%	23.3%
	RCP8.5	15.0%	20.8%	22.5%	38.6%
QMNA5 empirique	RCP4.5	5.7%	4.9%	1.6%	2.8%
	RCP8.5	7.1%	2.5%	-0.9%	-3.7%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	6.8%	3.7%	1.2%	0.5%
	RCP8.5	3.6%	0.6%	-2.6%	-6.7%

Figure 108 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Airon à Landivy à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	15.0%	13.3%	9.3%	0.7%	-9.9%	11.8%	7.2%	13.9%	7.3%	-15.5%	9.5%	5.5%	5.3%	4.3%	-16.7%	11.2%	6.1%	16.2%	-15.1%	-4.5%
	RCP8.5	8.1%	31.7%	16.4%	-8.7%	-12.1%	5.2%	4.6%	27.0%	-12.3%	-12.1%	5.2%	-1.2%	16.4%	-7.1%	-17.8%	12.4%	-13.5%	11.9%	-10.2%	-19.2%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	16.5%	10.5%	12.7%	0.0%	-5.8%	11.1%	2.4%	12.7%	5.3%	-12.9%	7.8%	2.4%	8.9%	0.0%	-12.9%	6.0%	0.6%	16.3%	-13.1%	-7.4%
	RCP8.5	3.0%	24.9%	13.0%	-13.4%	-9.5%	4.2%	-2.7%	24.4%	-13.4%	-9.5%	4.2%	-6.6%	17.9%	-9.3%	-19.4%	5.1%	-16.8%	11.4%	-10.9%	-22.2%

Figure 109 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Airon à Landivy à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

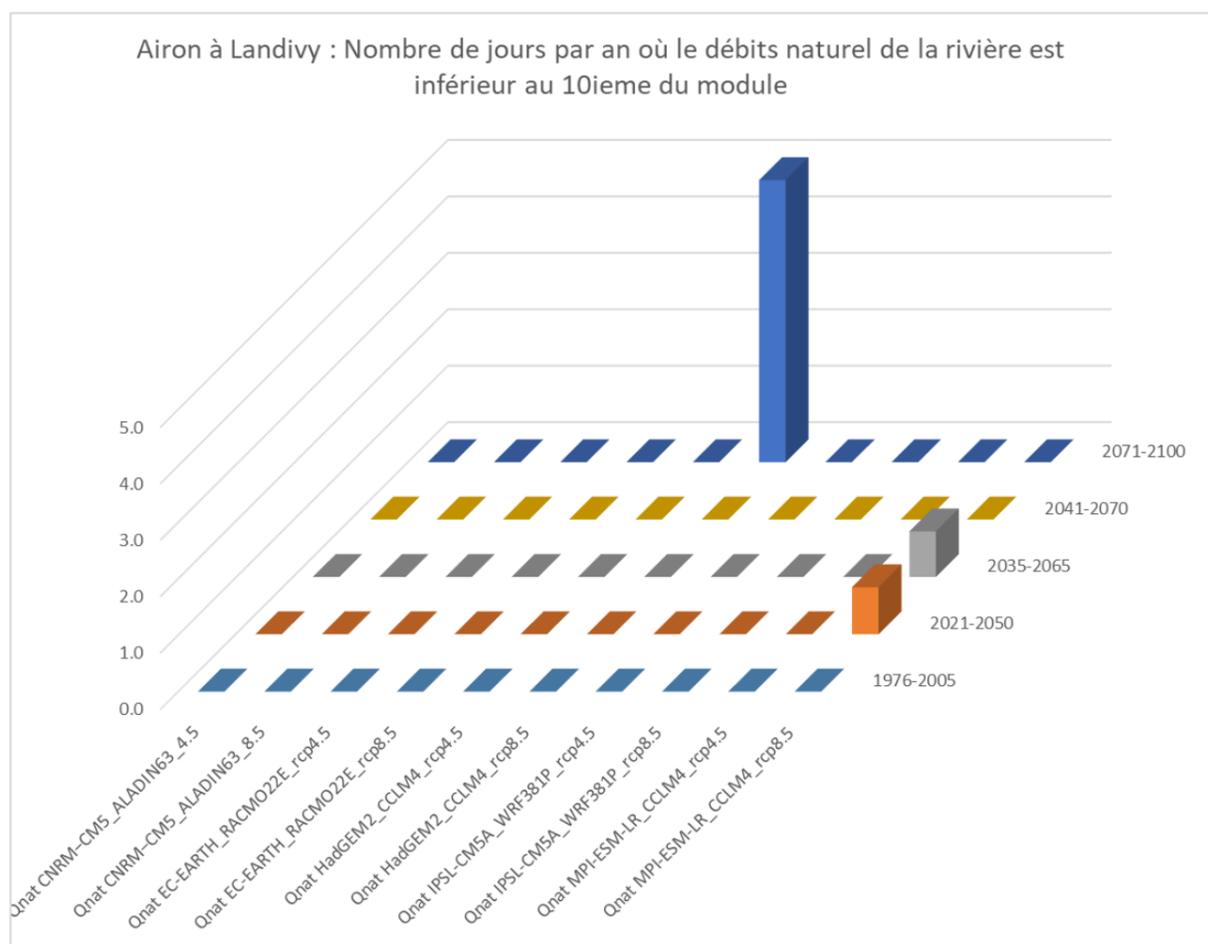


Figure 110 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de l'Airon à Landivy est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Sée à Chérencé

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	5.7%	5.4%	3.8%	7.6%
	RCP8.5	6.6%	8.0%	8.6%	9.5%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	6.4%	7.1%	7.1%	10.6%
	RCP8.5	-0.4%	7.3%	6.3%	23.0%
Ecart type	RCP4.5	8.0%	10.2%	10.8%	13.4%
	RCP8.5	5.1%	10.7%	12.5%	23.9%
QMNA5 empirique	RCP4.5	10.6%	3.1%	-2.7%	6.0%
	RCP8.5	5.9%	1.9%	-1.3%	-4.7%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	6.3%	0.0%	-5.5%	-3.2%
	RCP8.5	5.1%	-3.9%	-6.6%	-9.8%

Figure 111 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Chérencé à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	5.4%	5.7%	19.8%	16.4%	5.6%	-2.7%	3.0%	7.9%	26.7%	-19.3%	-6.0%	-6.4%	1.4%	18.3%	-20.6%	-1.3%	2.7%	28.1%	8.0%	-7.3%
	RCP8.5	-10.4%	5.0%	25.5%	13.7%	-4.3%	-10.4%	-21.8%	34.9%	5.3%	1.7%	-14.4%	-22.5%	22.7%	11.1%	-3.4%	-4.4%	-25.8%	13.3%	13.4%	-20.2%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	7.9%	-1.8%	9.7%	14.0%	1.9%	-4.0%	-5.8%	6.6%	20.4%	-17.4%	-8.6%	-14.0%	-0.4%	17.0%	-21.6%	-10.1%	-8.6%	12.8%	3.0%	-13.1%
	RCP8.5	-11.9%	8.6%	23.6%	14.5%	-9.4%	-16.9%	-21.6%	26.4%	-3.4%	-3.8%	-21.6%	-24.1%	14.3%	7.7%	-9.4%	-14.4%	-32.7%	12.4%	11.1%	-25.4%

Figure 112 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Chérencé à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

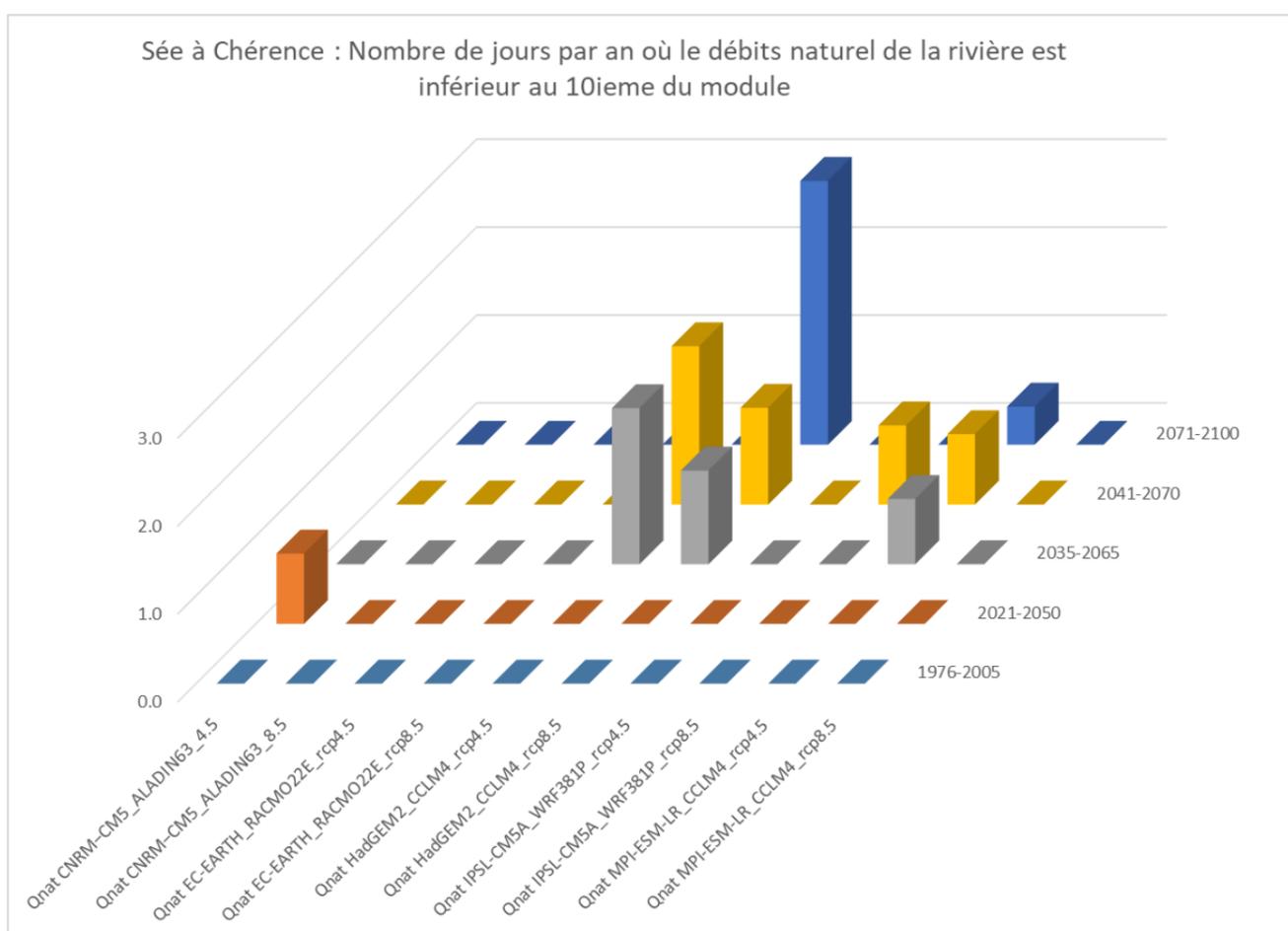


Figure 113 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sée à Chérencé est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Sée à Tirepied

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	8.0%	7.1%	5.5%	9.3%
	RCP8.5	8.5%	10.2%	10.8%	12.0%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	25.3%	22.5%	24.2%	28.7%
	RCP8.5	11.6%	30.7%	29.6%	48.0%
Ecart type	RCP4.5	7.7%	9.3%	10.5%	13.2%
	RCP8.5	4.2%	10.3%	12.4%	24.8%
QMNA5 empirique	RCP4.5	8.5%	5.1%	-1.9%	3.1%
	RCP8.5	9.3%	4.3%	1.7%	-1.6%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	11.7%	4.5%	-2.5%	-0.5%
	RCP8.5	5.5%	4.0%	-1.5%	-3.5%

Figure 114 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Tirepied à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	13.3%	10.2%	26.9%	2.4%	-10.5%	6.4%	0.1%	23.4%	11.6%	-16.2%	-11.5%	-4.2%	20.7%	2.3%	-16.7%	2.9%	9.2%	28.3%	-8.8%	-16.2%
	RCP8.5	0.6%	22.7%	39.4%	-0.8%	-15.2%	0.6%	-2.1%	43.9%	-6.2%	-14.6%	-4.0%	-11.1%	39.8%	-1.3%	-14.6%	3.8%	-17.9%	25.5%	6.5%	-25.9%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	13.3%	8.4%	32.2%	6.0%	-1.5%	3.8%	-3.5%	26.7%	9.8%	-14.2%	-16.0%	-8.4%	21.1%	5.2%	-14.3%	-4.2%	-4.0%	29.4%	-7.9%	-16.0%
	RCP8.5	-1.1%	13.1%	39.4%	-11.2%	-12.8%	-3.8%	-1.5%	46.8%	-12.2%	-9.3%	-9.6%	-14.2%	38.1%	-9.8%	-12.2%	4.5%	-27.3%	34.0%	-2.9%	-26.1%

Figure 115 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sée à Tirepied à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

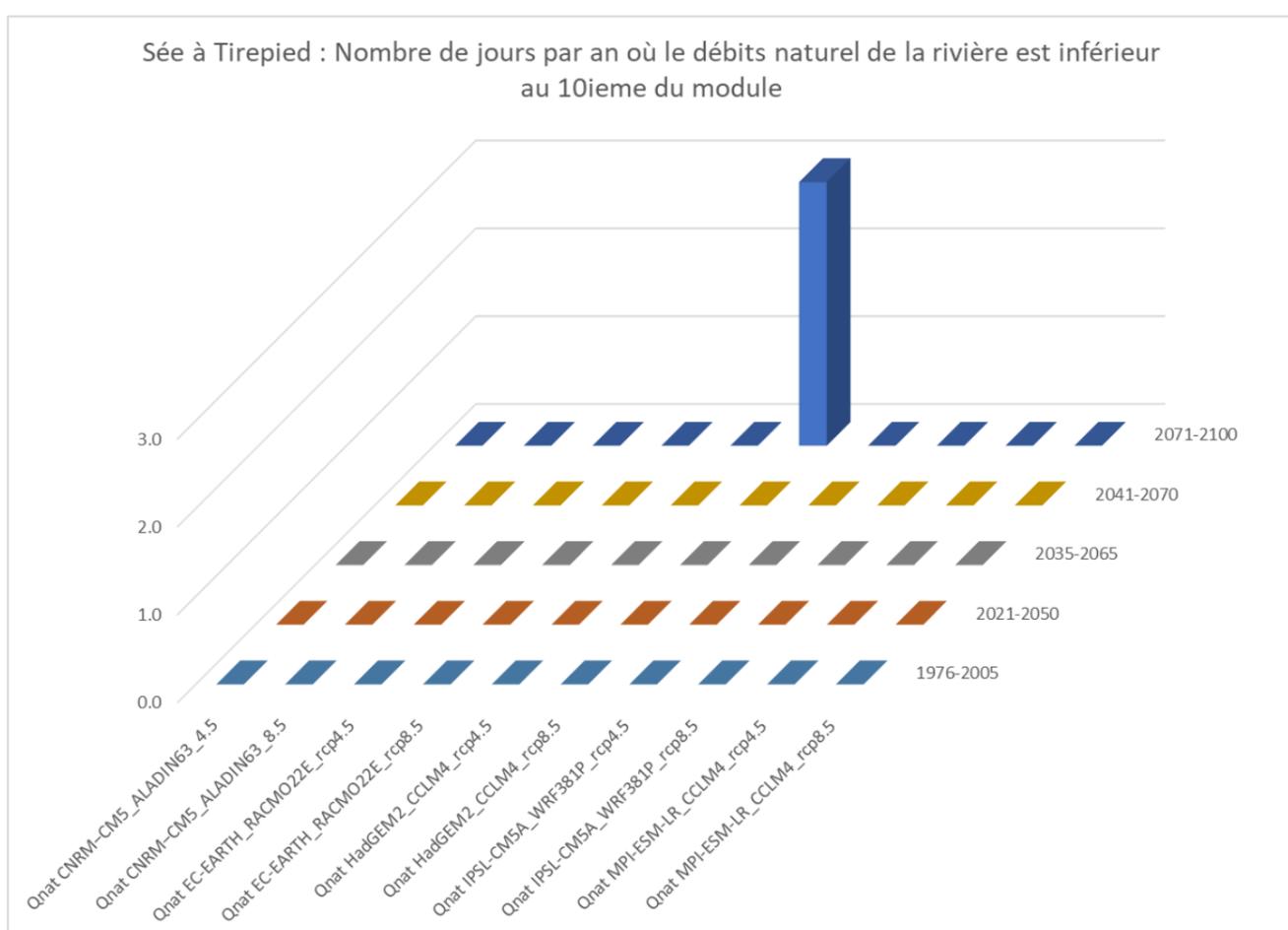


Figure 116 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sée à Tirepied est inférieur au 10ieme du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

Le Thar à Jullouville

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	8.9%	7.0%	5.3%	10.3%
	RCP8.5	8.2%	10.9%	11.6%	14.3%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	8.4%	3.1%	5.3%	20.7%
	RCP8.5	18.7%	22.0%	27.7%	63.4%
Ecart type	RCP4.5	7.0%	5.9%	8.0%	11.6%
	RCP8.5	5.0%	10.5%	13.7%	26.0%
QMNA5 empirique	RCP4.5	-1.8%	-2.8%	-8.4%	-5.7%
	RCP8.5	-1.5%	-2.5%	-9.5%	-9.4%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	0.2%	-3.1%	-7.5%	-7.4%
	RCP8.5	-3.1%	-4.6%	-11.9%	-11.8%

Figure 117 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Thar à Jullouville à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	-14.8%	-4.0%	27.3%	-5.4%	-12.1%	-13.2%	-15.6%	20.7%	8.5%	-14.2%	-13.2%	-21.6%	16.1%	-7.5%	-15.8%	-12.0%	-8.0%	28.5%	-26.8%	-10.0%
	RCP8.5	-10.0%	6.0%	34.7%	-25.8%	-12.6%	-4.8%	-12.4%	43.0%	-26.8%	-11.6%	-13.6%	-25.6%	30.6%	-21.4%	-17.4%	-4.0%	-32.4%	30.6%	-14.6%	-26.8%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-18.3%	-11.9%	22.9%	11.9%	-3.7%	-17.4%	-21.3%	17.3%	18.1%	-12.4%	-20.9%	-26.0%	15.9%	6.6%	-13.0%	-26.4%	-11.9%	22.9%	-12.4%	-9.3%
	RCP8.5	-8.1%	-6.8%	36.4%	-21.7%	-15.5%	-14.5%	-13.6%	37.9%	-23.5%	-9.3%	-21.3%	-28.1%	24.3%	-21.2%	-13.0%	-18.3%	-39.6%	25.7%	-5.3%	-21.7%

Figure 118 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour le Thar à Jullouville à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

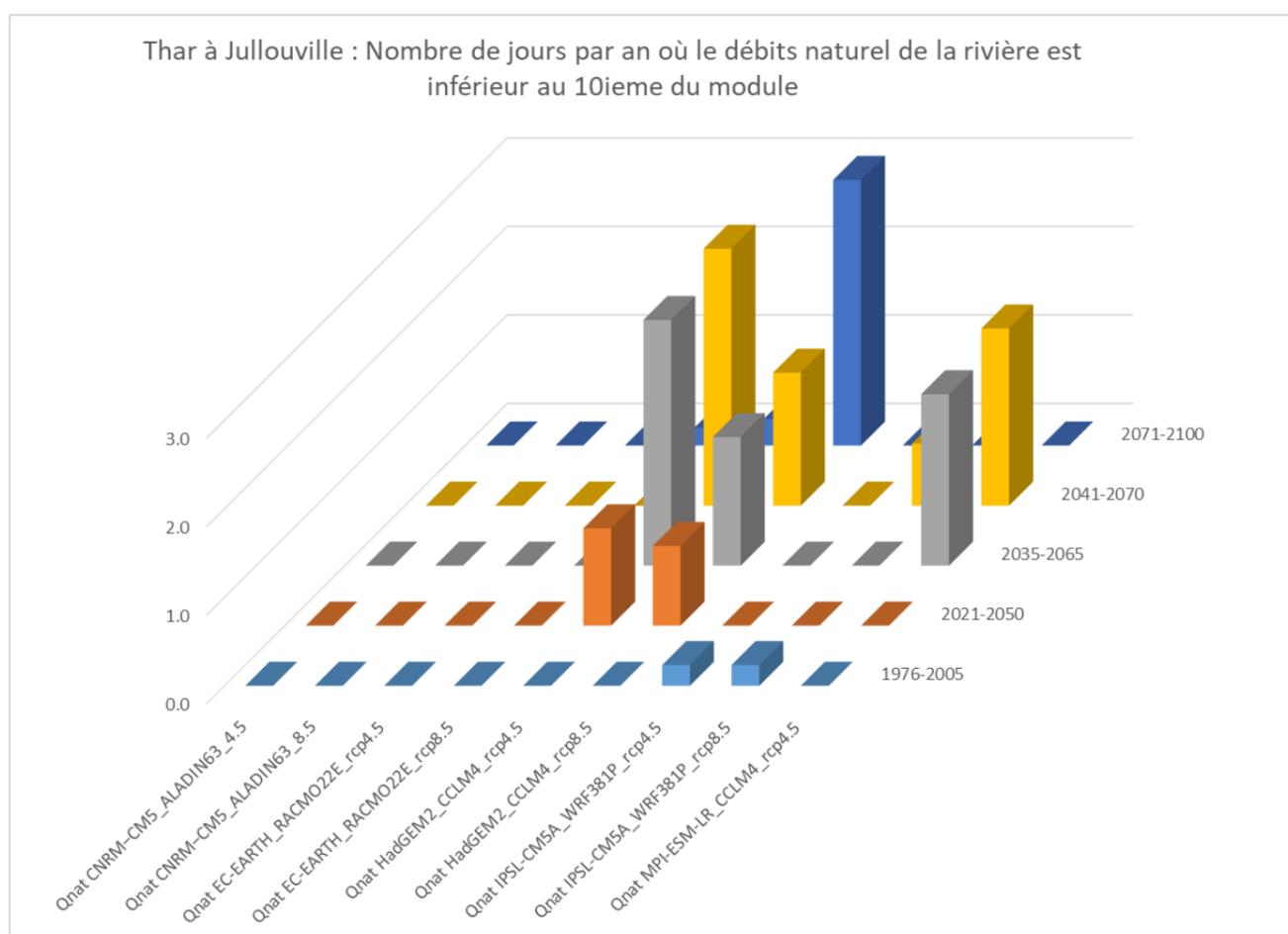


Figure 119 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel du Thar à Jullouville est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Braize à Lolif

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	9.3%	7.3%	6.3%	9.3%
	RCP8.5	8.4%	10.8%	11.3%	14.2%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	24.1%	13.7%	22.4%	29.4%
	RCP8.5	25.6%	31.9%	32.8%	73.4%
Ecart type	RCP4.5	9.6%	10.6%	12.3%	15.7%
	RCP8.5	7.9%	14.1%	16.7%	29.8%
QMNA5 empirique	RCP4.5	6.6%	5.5%	-0.3%	4.8%
	RCP8.5	5.0%	5.7%	3.2%	1.1%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	11.5%	8.0%	5.0%	4.1%
	RCP8.5	5.3%	7.0%	5.4%	1.5%

Figure 120 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Braize à Lolif à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	-3.4%	1.4%	31.4%	3.5%	0.0%	1.4%	-0.7%	24.8%	8.7%	-6.7%	0.0%	-6.2%	23.5%	-1.7%	-17.2%	0.7%	9.7%	28.8%	-11.6%	-3.7%
	RCP8.5	-2.1%	17.2%	37.9%	-15.6%	-12.7%	2.8%	6.2%	47.7%	-15.6%	-12.7%	2.8%	-1.4%	37.9%	-7.5%	-15.7%	9.7%	-25.5%	32.7%	5.2%	-16.4%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-3.1%	8.6%	32.1%	12.1%	7.8%	6.3%	0.0%	23.4%	18.1%	-7.8%	6.3%	-0.8%	19.0%	10.1%	-9.6%	-0.8%	5.5%	32.1%	-12.1%	-4.3%
	RCP8.5	-3.1%	18.8%	37.2%	-20.1%	-6.1%	4.7%	2.3%	54.0%	-20.1%	-6.1%	4.7%	0.8%	36.5%	-4.7%	-10.4%	3.9%	-25.0%	35.0%	4.0%	-10.4%

Figure 121 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Braize à Lolif à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

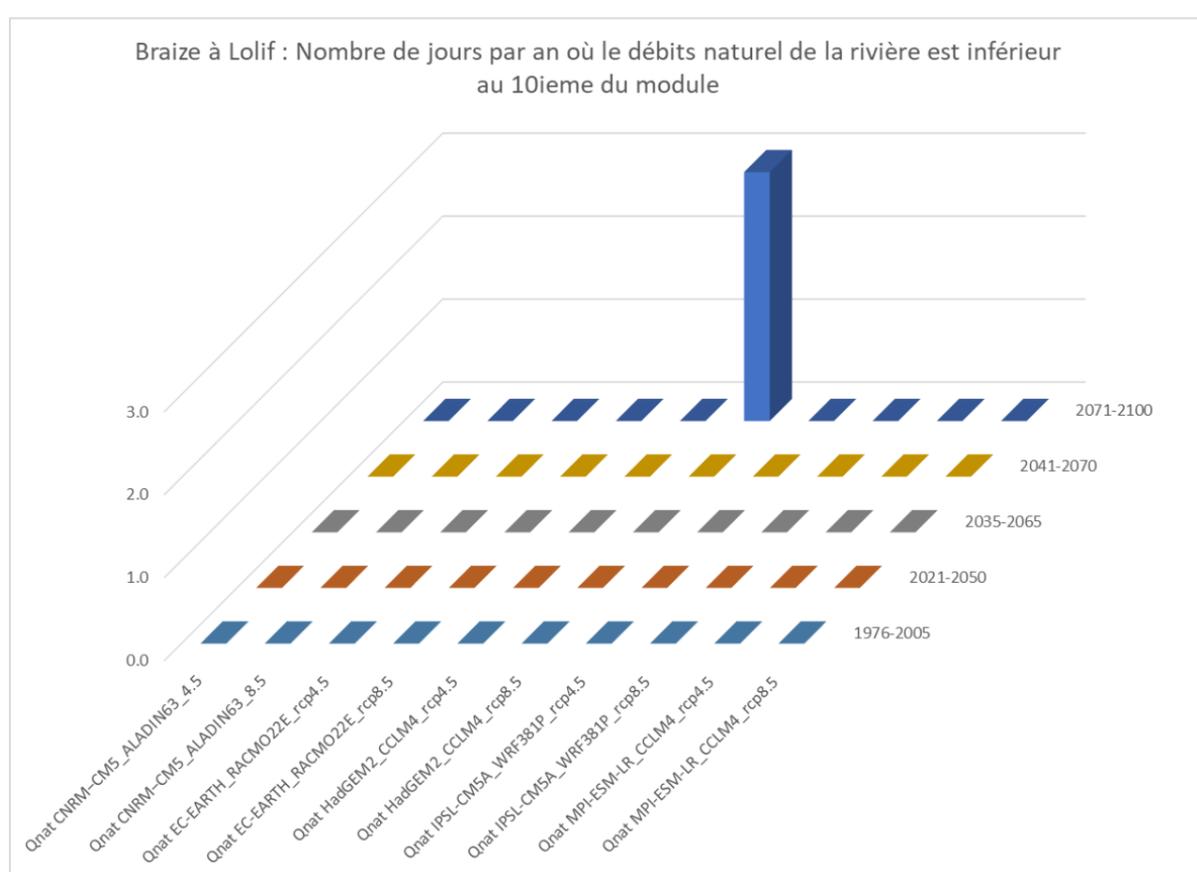


Figure 122 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Braize à Lolif est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

L'Oir à Ducey

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	6.8%	5.0%	2.9%	7.6%
	RCP8.5	7.1%	8.5%	8.8%	10.6%
Débits de pointes (moyenne des max)	RCP4.5	16.8%	15.1%	18.3%	13.4%
	RCP8.5	3.8%	17.7%	19.4%	32.1%
Ecart type	RCP4.5	10.4%	10.3%	11.5%	14.7%
	RCP8.5	6.0%	11.6%	13.4%	26.3%
QMNA5 empirique	RCP4.5	-0.3%	-2.8%	-7.1%	-1.6%
	RCP8.5	2.0%	-3.4%	-9.3%	-12.4%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-0.9%	-2.3%	-7.4%	-4.0%
	RCP8.5	1.2%	-3.5%	-11.0%	-12.4%

Figure 123 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Oir à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	-4.0%	-4.0%	21.9%	-1.9%	-13.6%	-12.7%	-7.8%	18.0%	9.7%	-21.0%	-18.8%	-11.6%	14.5%	3.3%	-23.0%	-10.7%	-7.5%	34.9%	-8.4%	-16.2%
	RCP8.5	-8.7%	9.8%	34.6%	-3.1%	-22.7%	-7.5%	-15.0%	36.4%	-14.2%	-16.5%	-16.8%	-15.3%	20.4%	-7.2%	-27.5%	-15.3%	-27.5%	19.2%	-13.1%	-25.2%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	-4.7%	-3.1%	23.9%	-5.2%	-15.2%	-13.7%	-4.0%	18.4%	5.5%	-17.4%	-19.0%	-10.0%	13.9%	-1.7%	-20.2%	-16.5%	-6.2%	33.5%	-13.5%	-17.0%
	RCP8.5	-5.0%	5.0%	36.5%	-10.1%	-20.6%	-6.2%	-16.2%	38.1%	-22.2%	-11.0%	-16.2%	-19.0%	21.3%	-16.7%	-24.5%	-12.8%	-25.2%	18.7%	-13.8%	-28.7%

Figure 124 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour l'Oir à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

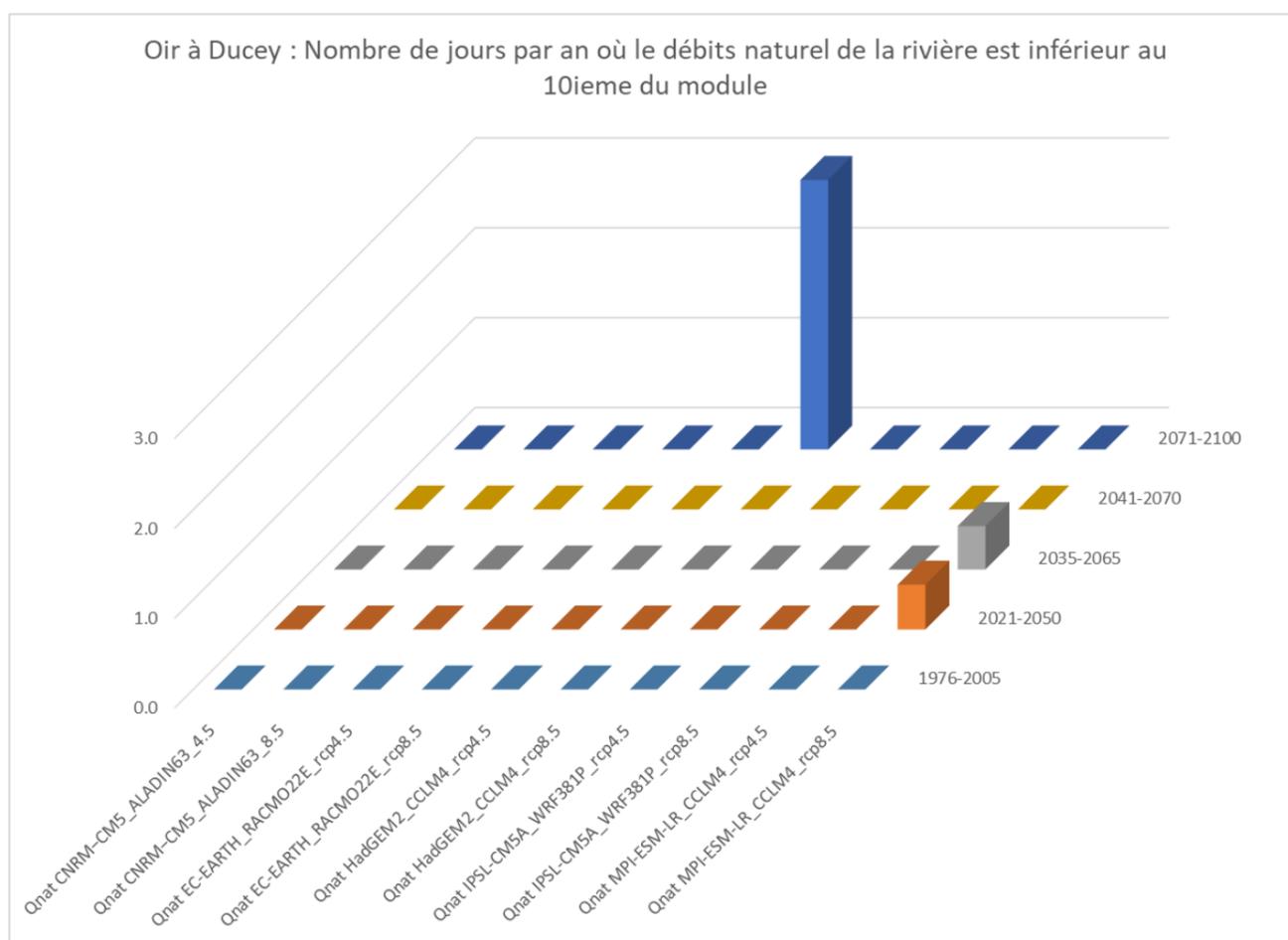


Figure 125 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de l'Oir à Ducey est inférieur au 10ieme du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

La Sélune à Ducey (à l'aval de la confluence du Beuvron)

		2021-2050	2035-2065	2041-2070	2071-2100
Module	RCP4.5	7.3%	5.6%	3.4%	8.3%
	RCP8.5	7.4%	8.4%	8.8%	9.9%
Débits de pointes (moyenne des max annuels)	RCP4.5	17.4%	19.4%	19.4%	10.7%
	RCP8.5	3.4%	13.9%	13.9%	30.3%
Ecart type	RCP4.5	10.6%	11.9%	12.2%	15.3%
	RCP8.5	7.2%	12.6%	14.2%	26.0%
QMNA5 empirique	RCP4.5	0.9%	-3.7%	-5.8%	-2.5%
	RCP8.5	4.7%	-3.5%	-12.3%	-14.7%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	2.4%	-2.4%	-5.8%	-4.7%
	RCP8.5	3.2%	-4.2%	-12.1%	-12.2%

Figure 126 : Evolutions moyennes du Module, du débit maximum, de l'écart type des débits, du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS (moyenne des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée). Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

		2021-2050					2035-2065					2041-2070					2071-2100				
		CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4	CNRM-CM5_ALADIN63	EC-EARTH_RACMO22E	IPSL-CM5A_WRF381P	MPI-ESM-LR_CCLM4	HadGEM2_CCLM4
QMNA5 empirique	RCP4.5	7.2%	3.1%	21.8%	-8.7%	-18.8%	-5.3%	0.2%	10.3%	1.6%	-25.2%	-5.4%	-3.7%	9.2%	-3.4%	-25.7%	-5.9%	-7.8%	34.5%	-17.9%	-15.2%
	RCP8.5	-0.1%	17.1%	29.8%	-5.3%	-18.0%	-0.1%	-11.1%	31.4%	-19.8%	-18.0%	-15.5%	-13.8%	11.6%	-16.9%	-26.9%	-7.5%	-27.6%	14.0%	-21.4%	-30.8%
VCN10 empirique 5 ans	RCP4.5	11.2%	5.2%	17.2%	-3.6%	-18.1%	-7.6%	-1.3%	15.9%	1.1%	-20.2%	-7.8%	-4.5%	8.2%	-3.8%	-21.3%	-8.2%	-7.6%	26.1%	-17.6%	-16.2%
	RCP8.5	2.9%	19.4%	25.3%	-15.5%	-16.1%	-1.3%	-15.7%	29.3%	-20.9%	-12.3%	-11.9%	-16.8%	7.8%	-15.5%	-24.1%	-5.1%	-23.3%	15.7%	-15.2%	-33.3%

Figure 127 : Evolutions du QMNA5 et du VCN10 calculées pour la Sélune à Ducey à partir des débits simulés par le modèle EROS : détail des résultats obtenus avec les 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée. Les cases colorées en rose sont celles dont la tendance est défavorable (diminution de la ressource ou augmentation de sa variabilité)

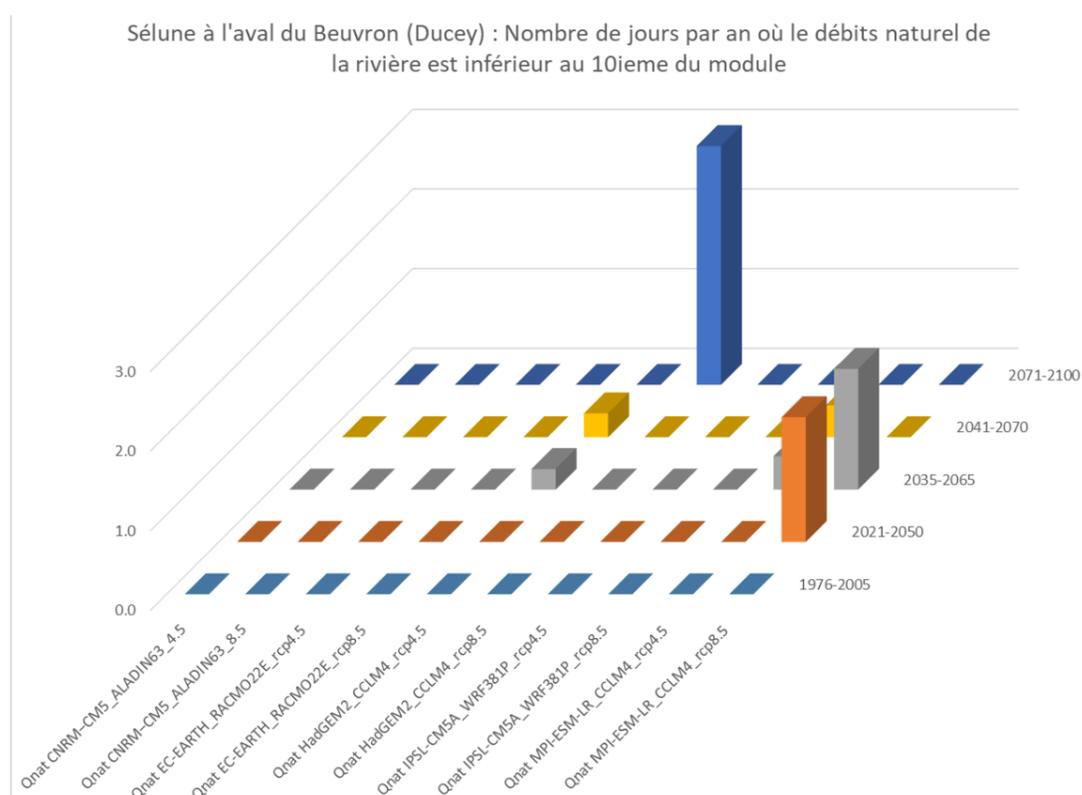


Figure 128 : Evolution du nombre de jours par an où le débit naturel de la Sélune à Ducey est inférieur au 10ième du module : détail des résultats calculés à partir des débits simulés par le modèle EROS avec comme données d'entrée les 5 modèles climatiques

4.9. ANALYSES SPECIFIQUES RELATIVES AUX ETIAGES DES COURS D'EAU

D'un point de vue opérationnel, le principal objectif poursuivi ici est de cibler les sous-bassins versants (et donc les captages AEP) qui seraient rendus vulnérables suite à une baisse future des débits des cours d'eau.

4.9.1. Etudes des évolutions du QMNA5 et comparaison des rivières modélisées

Le §4.8 a présenté les principales tendances d'évolutions des débits des rivières en termes de débit moyens, débit d'étiages, crues...Le présent paragraphe (§4.9.1) détaille les résultats pour les périodes d'étiages.

a) *Préambule nécessaire à la compréhension de la dispersion des prévisions des étiages simulés en fonction du modèle climatique utilisé en entrée du modèle EROS*

Pour rappel, le modèle EROS calé a mis en évidence des variabilités importantes de fonctionnement des différents hydrosystèmes avec des coefficients d'emmagasinement importants pour les BV de la Braize à Lolif, la Sée à Tirepied, la Thar à Jullouville, moyens pour les BV de la Sée à Chérencé et le Beuvron à Saint James et des coefficients plus faibles ailleurs (cf. Figure 51).

Le modèle EROS a également permis d'estimer la part des contributions souterraines aux débits des différentes rivières (cf. Figure 66 et Figure 70). Pour certains cours d'eau, plus de la moitié du débit provient en moyenne d'une contribution souterraine : la Braize à Lolif (86%), la Sée à Tirepied (76%), le Beuvron à Saint James (58%), le Thar à Jullouville (52%). Une majorité de cours d'eau ont une contribution plus faible des eaux souterraines à hauteur de 20% à 30% du débit total : l'Oir à Ducey (33%), la Sélune à Virey (31%), l'Airon à Landivy (31%), la Sée à Chérencé (27%), le Beuvron à Saint-Senier (26%), la Sélune à Vézins (20%). La Sélune à Notre-Dame-du-Touchet se distingue par la très faible contribution des eaux souterraines au débit de la rivière (6% en moyenne).

Or, l'avantage que présente une rivière dont le débit profite d'une forte contribution des eaux souterraines, est qu'en cas de sécheresse météorologique (estivale par exemple), si les nappes sont en niveaux hauts, l'impact de cette sécheresse météorologique serait en principe limitée sur son débit.

Ainsi, par exemple, si dans le cadre du changement climatique à venir, les étés sont plus secs et les hivers plus pluvieux, alors au vu de ce qui a été présenté précédemment les rivières bénéficiant d'un fort soutien des eaux souterraines devraient être moins impactées par l'augmentation de la sévérité des sécheresses estivales.

Or les 5 modèles climatiques, ne prévoient pas les mêmes évolutions en termes d'augmentation de température, d'évolution des précipitations annuelles ni surtout en terme de leur répartition saisonnière. Les différences entre ces modèles ont été présentées au § 4.6.4. Un rappel est présenté ci-dessous pour bien comprendre les dispersions des résultats obtenus en terme de prévision des étiages simulés par le modèle EROS.

La Figure 129 montre qu'à l'échelle annuelle, il existe deux modèles extrêmes :

- Le modèle HadGem qui prévoit une baisse des précipitations et la plus forte hausse de l'ETP,

- Le modèle IPSL qui prévoit les plus fortes hausses des précipitations et la plus faible hausse de l'ETP.

Les trois autres modèles (CNRM, EARTH et MPI) sont en position intermédiaire pour les 2 paramètres précipitations et ETP.

Toutefois, le plus important ce ne sont pas les moyennes annuelles mais les évolutions de la répartition saisonnière des précipitations et de température. La comparaison des tendances saisonnières des 5 modèles est présentée à la Figure 130.

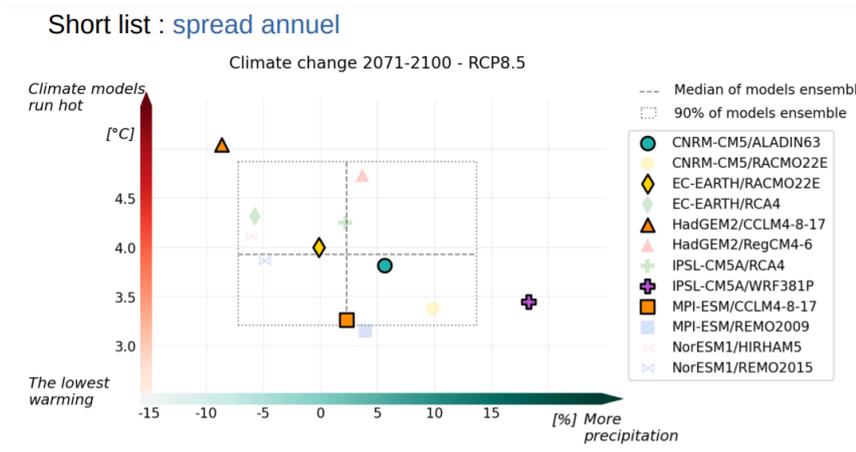
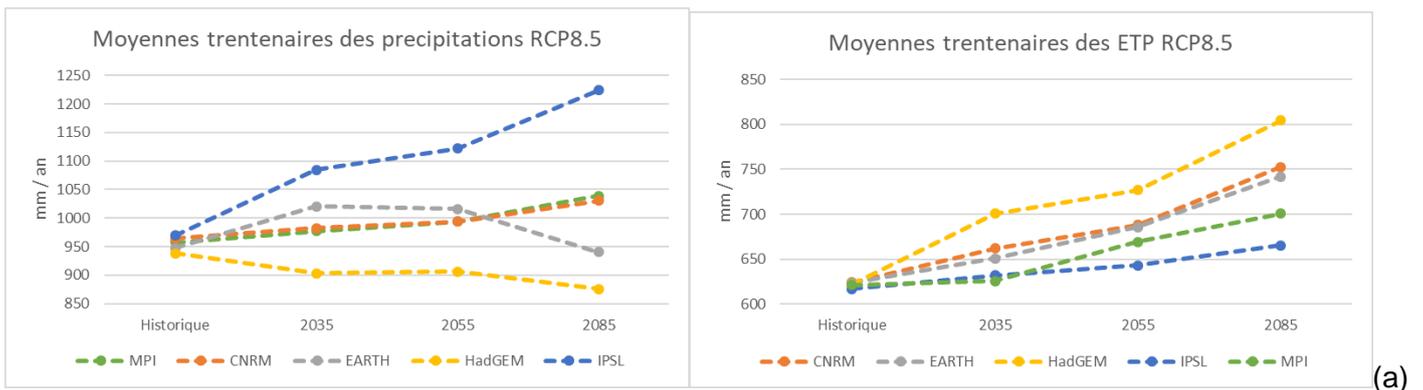


Figure 129 : Comparaison des 5 modèles climatiques pour la RCP8.5 en termes (a) de prévisions des évolutions de précipitations et des ETP et (b) des anomalies de précipitations et de températures pour l'horizon 2085 par rapport à la période actuelle (1976-2005)

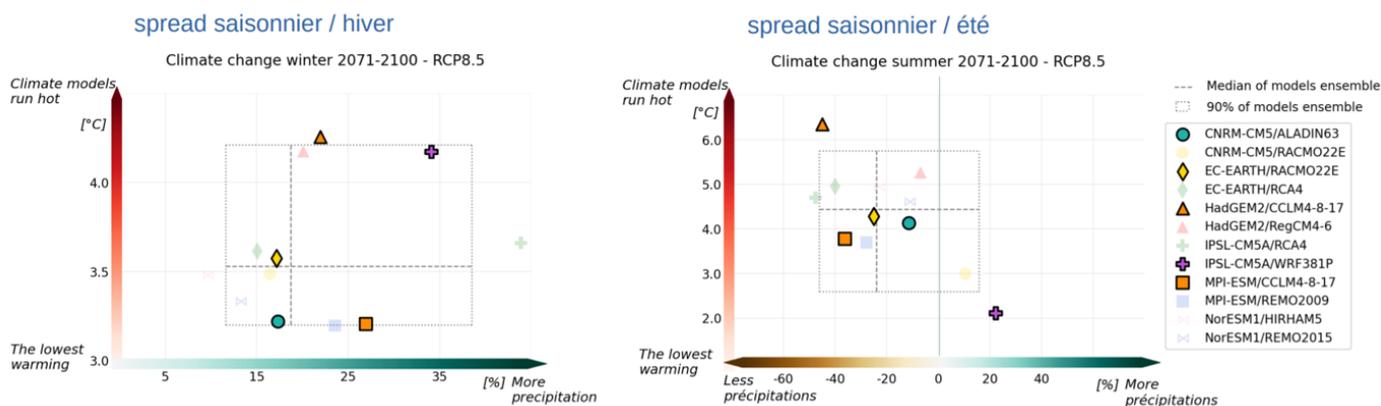


Figure 130 : Comparaison des 5 modèles climatiques pour la RCP8.5 en termes de tendances saisonnières : anomalies de précipitations et de températures pour l'horizon 2085 par rapport à la période actuelle (1976-2005) (figures Météo France P. Etchevers et al., 2020)

La Figure 130 (exemple donné pour la RCP8.5 à l'horizon 2085), montre que les projections futures des différents modèles vont dans le même sens sur la période hivernale (plus de pluie et hivers plus chauds) et pour la période estivale (moins de pluie et étés plus chauds) à l'exception du modèle IPSL qui prévoit des étés plus pluvieux. On retrouve les deux modèles extrêmes : HadGem (le plus chaud et le plus sec) et IPSL (le plus pluvieux – le seul à prévoir une hausse de la pluviométrie en période estivale – et le moins chaud). Les trois autres modèles sont en position intermédiaire.

En revanche, en période hivernale (période de recharge des nappes), les modèles qui prévoient l'augmentation de pluie la moins forte sont les modèles EARTH et CNRM et non pas le HAdGem. Concernant les modèles qui prévoient les augmentations de précipitations les plus fortes, on retrouve certes le modèle ISPL mais suivi de près par le modèle MPI (ce dernier est en été le modèle parmi les plus secs).

Ainsi avec un futur climatique tel que celui proposé par le MPI (renforcement des pluies hivernales et diminution des pluies estivales), on peut supposer que les impacts des sécheresses estivales seront plus limités sur les rivières bénéficiant d'un plus fort soutien des eaux souterraines. Les résultats du modèle EROS en termes de prévisions des étiages semblent le confirmer (cf. Figure 132 d).

b) Courbes d'évolution des QMNA5

Les Figure 131 et Figure 132 présentent l'évolution du QMNA5 des 12 sous-bassins de rivières simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée respectivement les trajectoires RCP4.5 et RCP8.5 (un graphique spécifique est présenté pour chacun des 5 modèles climatiques utilisés).

La comparaison des tendances d'évolution des projections de pluie et d'ETP produites par les différents modèles climatiques (Figure 130) aux réponses du modèle EROS en termes de débits d'étiage simulés (Figure 131 et Figure 132) permettent de mieux comprendre l'origine des divergences d'évolutions selon le modèle climatique utilisé en entrée du modèle EROS.

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

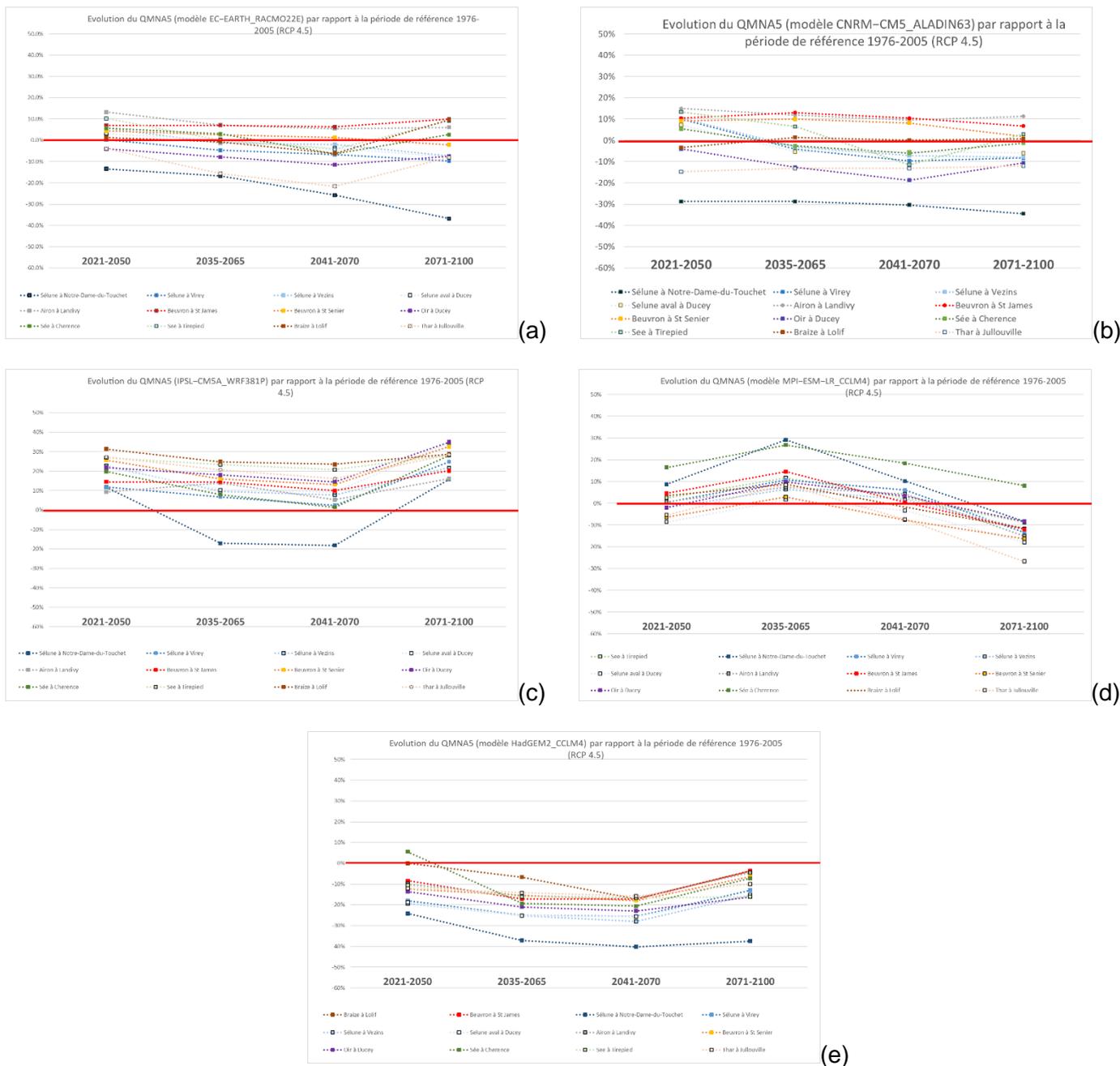


Figure 131 : Evolution du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issue des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée la trajectoire RCP4.5 pour les 5 modèles climatiques

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

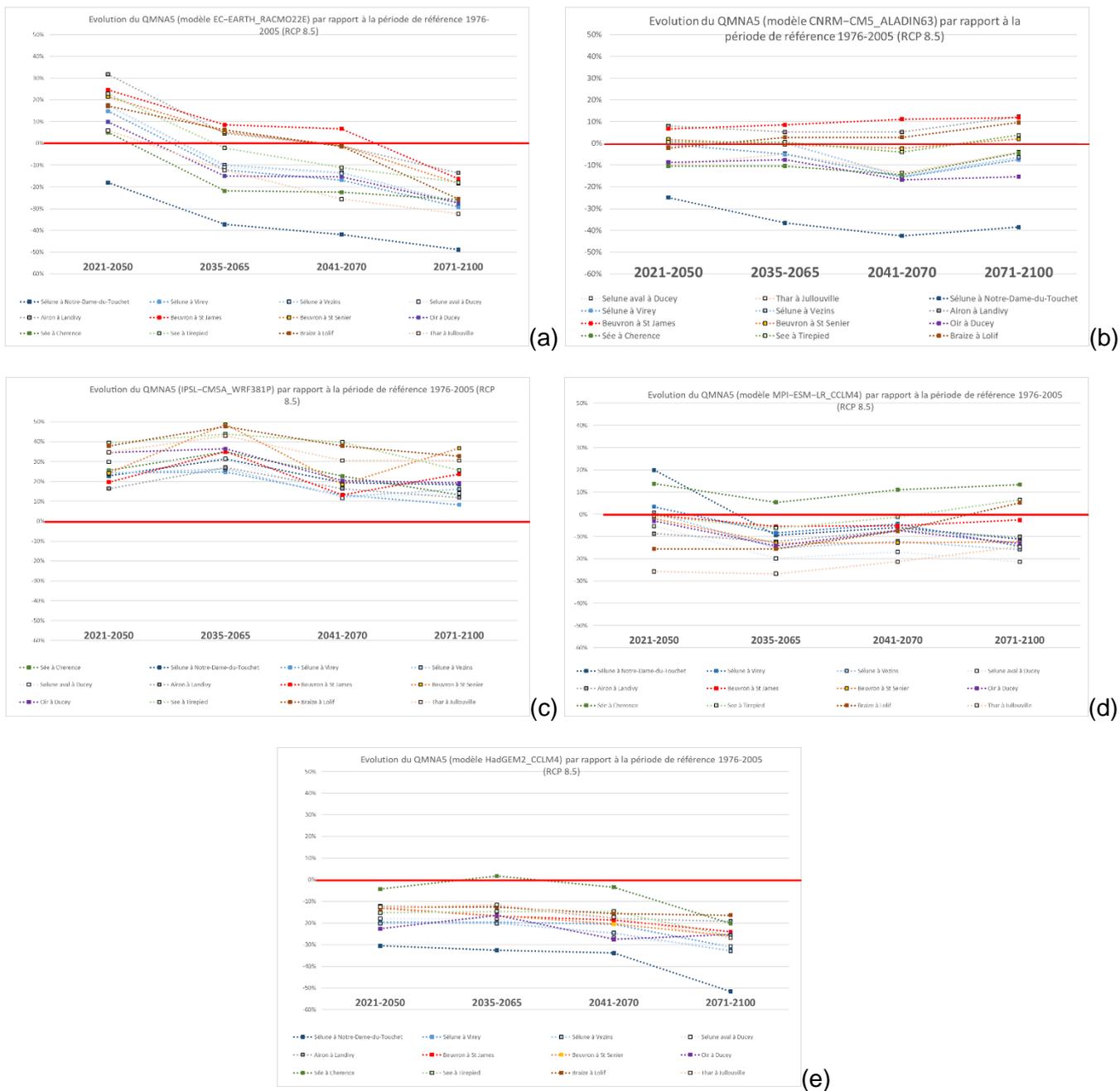


Figure 132 : Evolution du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issue des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée la trajectoire RCP8.5 pour les 5 modèles climatiques

Afin de répondre à la question posée qui est de cibler les sous-bassins versants (et donc les captages AEP) qui seraient rendus vulnérables suite à une baisse future des débits des cours d'eau, la moyenne des sorties du modèle EROS issues des 5 modèles climatiques utilisés en données d'entrée, a été réalisée et est présentée sur la Figure 133.

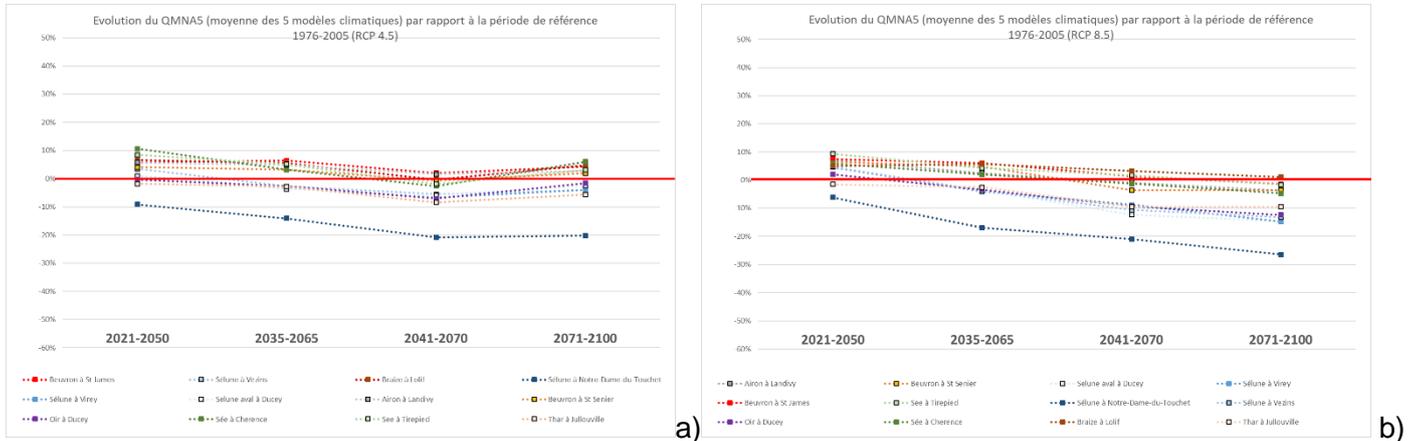


Figure 133 : Moyenne des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issues des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 5 modèles climatiques : (a) moyenne des évolutions pour la RCP4.5 des 5 modèles climatiques ; (b) moyenne des évolutions pour la RCP8.5 des 5 modèles climatiques

Des tableaux détaillant les chiffres présentés sur les graphiques de la Figure 133 sont proposés en Annexe 4.

La Figure 134 donne à titre d'exemple, les éléments chiffrés présentés graphiquement sur la Figure 133, pour les 3 horizons simulés 2050, 2055 et 2085. Pour chaque rivière, sont données la moyenne de l'évolution du QMNA5 issue des 10 scénarios climatiques, l'évolution minimum et l'évolution maximum. Les rivières sont classées de l'évolution la plus défavorable des étiages (en haut du tableau) vers l'évolution la moins défavorable (en bas du tableau).

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2050 (2035-2065)	Moyenne	Min	Max	Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2055 (2041-2070)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-15.5%	-37.2%	31.3%	Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-20.9%	-42.6%	19.4%
Sélune à Virey	-3.7%	-25.1%	24.8%	Selune aval à Ducey	-9.1%	-26.9%	11.6%
Selune aval à Ducey	-3.6%	-25.2%	31.4%	Thar à Jullouville	-8.9%	-25.6%	30.6%
Sélune à Vezins	-3.2%	-25.2%	26.4%	Oir à Ducey	-8.2%	-27.5%	20.4%
Oir à Ducey	-3.1%	-21.0%	36.4%	Sélune à Vezins	-8.1%	-27.9%	12.4%
Thar à Jullouville	-2.6%	-26.8%	43.0%	Sélune à Virey	-7.7%	-25.6%	13.3%
Sée à Charence	2.5%	-21.8%	34.9%	Beuvron à St Senier	-2.1%	-20.4%	18.5%
Airon à Landivy	3.7%	-15.5%	27.0%	Sée à Charence	-2.0%	-22.5%	22.7%
Beuvron à St Senier	4.0%	-16.6%	48.6%	See à Tirepied	-0.1%	-16.7%	39.8%
See à Tirepied	4.7%	-16.2%	43.9%	Airon à Landivy	0.3%	-17.8%	16.4%
Braize à Lolif	5.6%	-15.6%	47.7%	Braize à Lolif	1.5%	-17.2%	37.9%
Beuvron à St James	6.2%	-17.2%	35.0%	Beuvron à St James	1.7%	-18.6%	13.2%

Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2085 (2071-2100)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-23.3%	-51.7%	18.4%
Sélune à Virey	-9.4%	-31.2%	24.8%
Sélune à Vezins	-8.7%	-33.0%	21.8%
Selune aval à Ducey	-8.6%	-30.8%	34.5%
Thar à Jullouville	-7.6%	-32.4%	30.6%
Oir à Ducey	-7.0%	-27.5%	34.9%
Beuvron à St Senier	-0.8%	-26.0%	36.8%
Airon à Landivy	-0.5%	-19.2%	16.2%
Sée à Charence	0.6%	-25.8%	28.1%
See à Tirepied	0.8%	-25.9%	28.3%
Beuvron à St James	1.4%	-24.1%	23.8%
Braize à Lolif	2.9%	-25.5%	32.7%

Figure 134 : Moyenne, Minimum et Maximum des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issues des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 10 scénarios climatiques (5 modèles climatiques x 2 RCP 4.5 et 8.5)

La Figure 135 montre également à titre d'exemple, l'évolution moyenne du QMNA5 (moyenne des 5 modèles climatiques) pour la RCP8.5 à l'horizon 2085 (RCP et horizon le plus critique).

RCP8.5 à l'horizon 2085 (2071-2100)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-26.4%	-51.7%	18.4%
Sélune à Virey	-14.8%	-31.2%	8.3%
Selune aval à Ducey	-14.7%	-30.8%	14.0%
Sélune à Vezins	-13.3%	-33.0%	16.1%
Oir à Ducey	-12.4%	-27.5%	19.2%
Thar à Jullouville	-9.4%	-32.4%	30.6%
Sée à Charence	-4.7%	-25.8%	13.4%
Airon à Landivy	-3.7%	-19.2%	12.4%
Beuvron à St Senier	-3.6%	-26.0%	36.8%
See à Tirepied	-1.6%	-25.9%	25.5%
Beuvron à St James	-1.5%	-24.1%	23.8%
Braize à Lolif	1.1%	-25.5%	32.7%

Figure 135 : Moyenne, Minimum et Maximum des évolutions du QMNA5 pour les 12 stations de jaugeages issus des débits simulés par le modèle EROS avec comme données climatiques d'entrée les 5 modèles climatiques (exemple pris du dernier horizon simulé 2071-2100 pour la RCP8.5)

Les Figure 133 et Figure 135 permettent ainsi d'établir un classement des rivières selon leurs tendances d'évolution des débits d'étiage par rapport à la période actuelle.

4.9.2. Calcul des 10ièmes du module (débits réservés)

Pour rappel, s'il est vrai que ce sont les données météorologiques historiques réellement enregistrées (données SAFRAN) qui ont servi à construire le modèle EROS, une fois le modèle calé, ce sont les données climatiques DRIAS qui ont été utilisées en entrée du modèle EROS.

Chacun des 5 modèles climatiques utilisés fournit des données pour la période allant de 1950 à 2100. Il est important de comprendre que les situations météorologiques simulées par ces 5 modèles climatiques sont virtuelles (y compris sur la période dite historique 1950-2005) et n'ont pas pour objectif, pour une date de données, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée). Les données de la période de référence ne doivent pas être comparées aux valeurs observées à la même date. Il est ainsi important de garder à l'esprit que les simulations climatiques de référence sont des simulations et non des observations. Mais l'ensemble d'une simulation de référence a les caractéristiques du climat de la période de simulation (1950-2000 par exemple). Par ailleurs, les projections climatiques débutent en 2006. Ainsi afin d'estimer la satisfaction des besoins AEP à l'horizon 2050 et les pénuries éventuelles, il est nécessaire de travailler en relatif entre la période future et la période de référence de façon indépendante entre chaque modèle climatique.

Il a ainsi été nécessaire de calculer pour chacune des 10 sorties du modèle EROS pour chacune des 12 rivières, les 10^{ième} de module pour la période de référence 1976-2005. Ces 10^{ième} de module ont été calculés à la fois sur les débits naturels et sur les débits impactés par les pompages et rejets. Ils sont présentés sur la Figure 136 et sont comparés aux 10^{ième} de module issus du modèle EROS ayant tourné avec les données Météo SAFRAN et les 10^{ième} de module issus des données de débits mesurés par la DREAL ainsi qu'aux débits réservés aux prises d'eau transposés aux stations. Il apparaît que les 10^{èmes} de module simulés sont assez cohérents avec les 10^{èmes} de module observés.

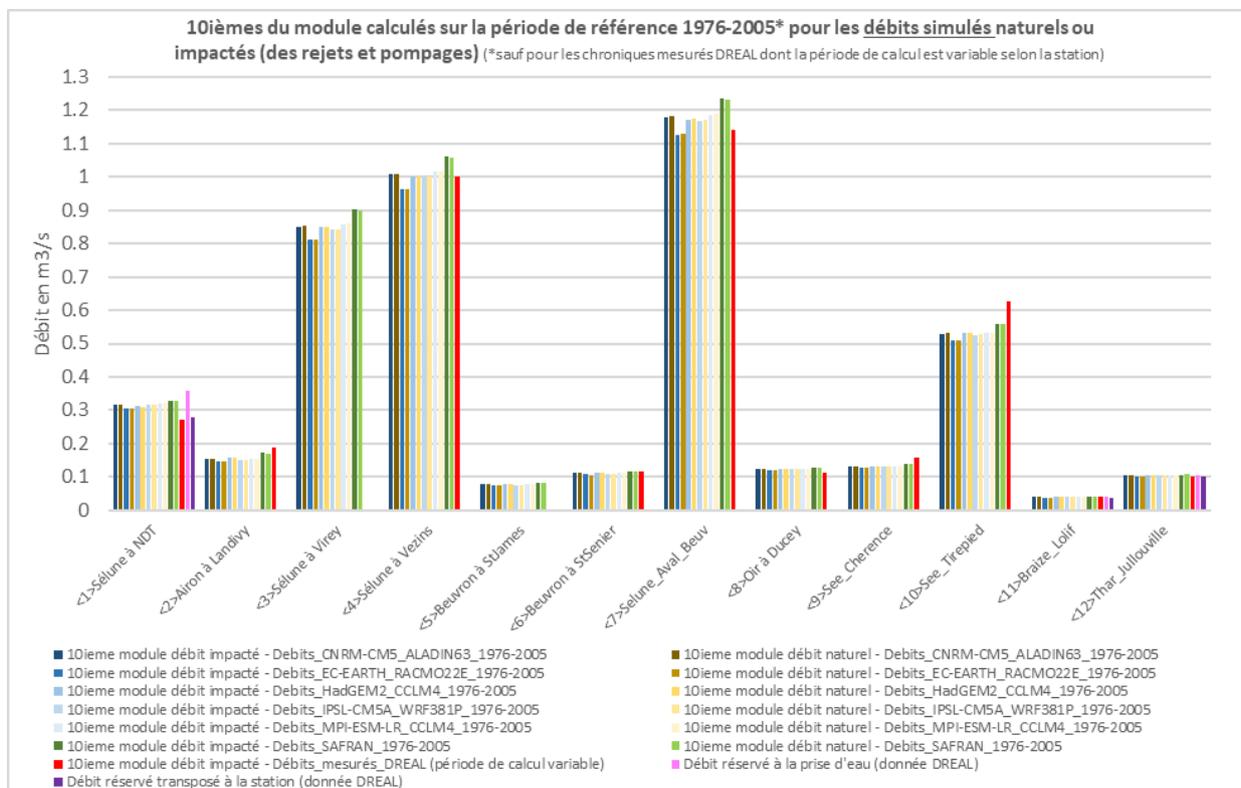


Figure 136 : 10ièmes du module calculés sur la période de référence 1976-2005 pour les débits simulés naturels ou impactés (par les rejets et pompages)

Ce sont ces 10ièmes du module qui ont été utilisés dans le paragraphe qui suit (§4.9.3).

4.9.3. Satisfaction des besoins AEP à l'horizon 2050

Le présent paragraphe a pour objectif d'estimer la satisfaction des besoins en eau potable à l'horizon 2050 et d'estimer les éventuelles pénuries de production en cas de respect des débits réservés.

a) Rappel des hypothèses prises

Scénarios de prélèvements et rejets

Les prévisions des besoins en eau potable, de même que les scénarios de prélèvements et rejets ont été fournies au BRGM par le SDEAU50 et validées lors de la réunion du comité de pilotage du 07/07/2021.

Il a été décidé de conserver les valeurs de prélèvements et rejets actuels afin de pouvoir comparer la situation actuelle et future. Concrètement, il est décidé que le BRGM réalise une moyenne des prélèvements actuels des années 2017-2019 pour les prélèvements en rivière et des années 2017-2018 pour les prélèvements des sources.

Choix des débits réservés

Concernant le choix des débits réservés à prendre en compte pour l'estimation de la satisfaction des besoins AEP à l'horizon 2050, il a été décidé lors de la réunion du comité de pilotage du 07/07/2021, de conserver les règles de calculs actuelles des débits réservés, à savoir le 10^{ième} du module, afin de pouvoir comparer la situation actuelle et future.

b) Méthodologie de calcul et présentation des résultats

Les pénuries potentielles ont été estimées par l'intermédiaire du nombre de jours où le débit de la rivière était inférieur au débit réservé.

Pour chaque captage, des figures sont présentées (Figure 137 à Figure 142), décomposées en deux parties : la première partie de la figure (a) donne l'évolution du nombre de jours par an où les besoins en eau potable ne sont pas satisfaits pour le ou les captages. Ce nombre, fourni année par année sur le graphique, correspond en fait à la moyenne trentenaire mobile centrée sur l'année en question afin de donner une information climatique et non météorologique. Il s'agit également de la moyenne des 5 débits simulés par le modèle EROS en utilisant les 5 modèles climatiques en entrée. Pour 4 de ces dates (2035, 2050, 2055 et 2085), la deuxième partie de la figure (b) fournit le détail des résultats issus de chacun des 5 modèles climatiques.

c) *Captage de LA PELTERIE (La Cance) - BSS000RCRQ et Captage de La LANDE-MILLY (La Sélune) - BSS000TRHA*

Pour ces captages, l'hypothèse a été prise que le débit de la Sélune au niveau de la prise d'eau BSS000TRHA était celui de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant ; qui aurait été de l'ordre de 1,2 à 1.3). Le calcul est donc légèrement pessimiste.

Les résultats (Figure 137) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait 30 jours/an en moyenne pour la RCP8.5 et 20 jours/an pour la RCP4.5 (moyenne des 5 modèles, moyenne sur 30 années). A titre de comparaison ce nombre de jours est de 11 en moyenne sur la période de référence (1976-2005) (Figure 137).

Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 70 jours/an de pénurie à cet horizon de temps (moyenne sur 30 années).

Il convient de garder à l'esprit que ces 70 jours de pénurie estimés à l'horizon 2085 pour la RCP8.5 et avec le modèle climatique HadGEM sont une moyenne sur 30 ans et constituent donc la norme climatique. Au sein de cette période, des pics annuels plus importants pourraient être atteints en fonction des épisodes météorologiques.

Pour mémoire, les pénuries estimées d'après les données mesurées sur la période 1994-2020 étaient de 62 jours en moyenne. En utilisant les données de projections climatiques, les pénuries sont estimées à 11 jours en moyenne sur la période de référence (1976-2005). Pour les horizons futurs, il convient donc de considérer la tendance de l'évolution simulée par rapport à la situation actuelle plutôt que les valeurs absolues de nombre de jours de pénuries.

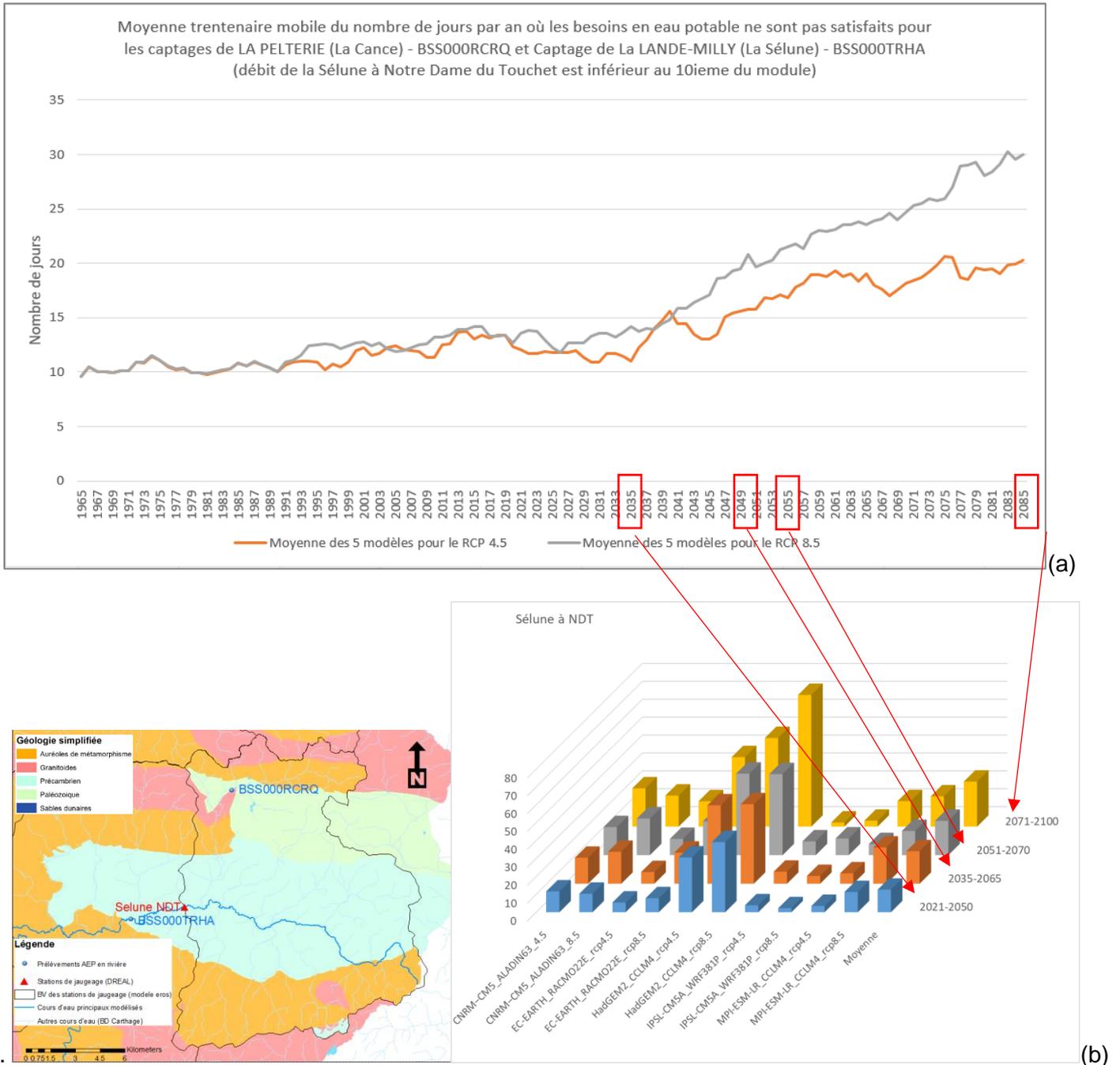


Figure 137 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les Captage de LA PELTERIE (La Cance) - BSS000RCRQ et Captage de La LANDE-MILLY (La Sélune) - BSS000TRHA

d) Captage de PONT JUHEL (L'Airon) - BSS000TRMQ

Pour ce captage, l'hypothèse a été prise que le débit de l'Airon au niveau de la prise d'eau BSS000TRMQ était celui de l'Airon à Landivy (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul est donc légèrement pessimiste. A l'inverse, nous rappelons que le modèle EROS est légèrement optimiste pour la simulation des étiages de l'Airon à Landivy (cf. §4.5.4).

Les résultats (Figure 138) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait au maximum 2 jours/an pour la RCP8.5 (moyenne des 5 modèles, moyenne sur 30 années). Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 7 jours/an de pénurie (moyenne sur 30 années). A titre de comparaison il n'y a aucun jour de pénurie simulée sur la période de référence (1976-2005) (Figure 138).

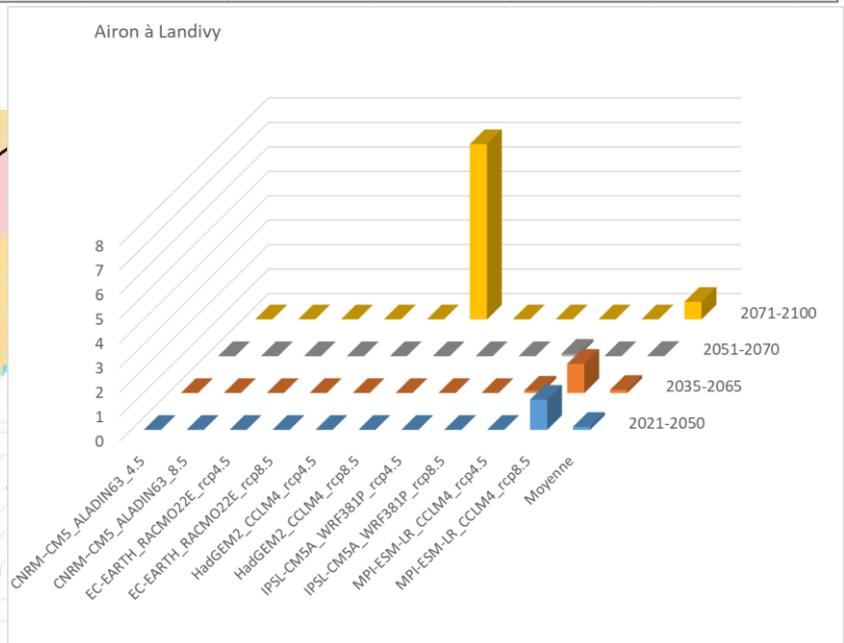
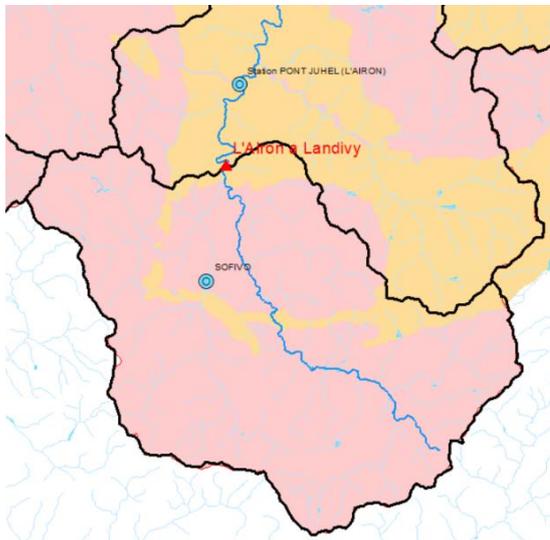
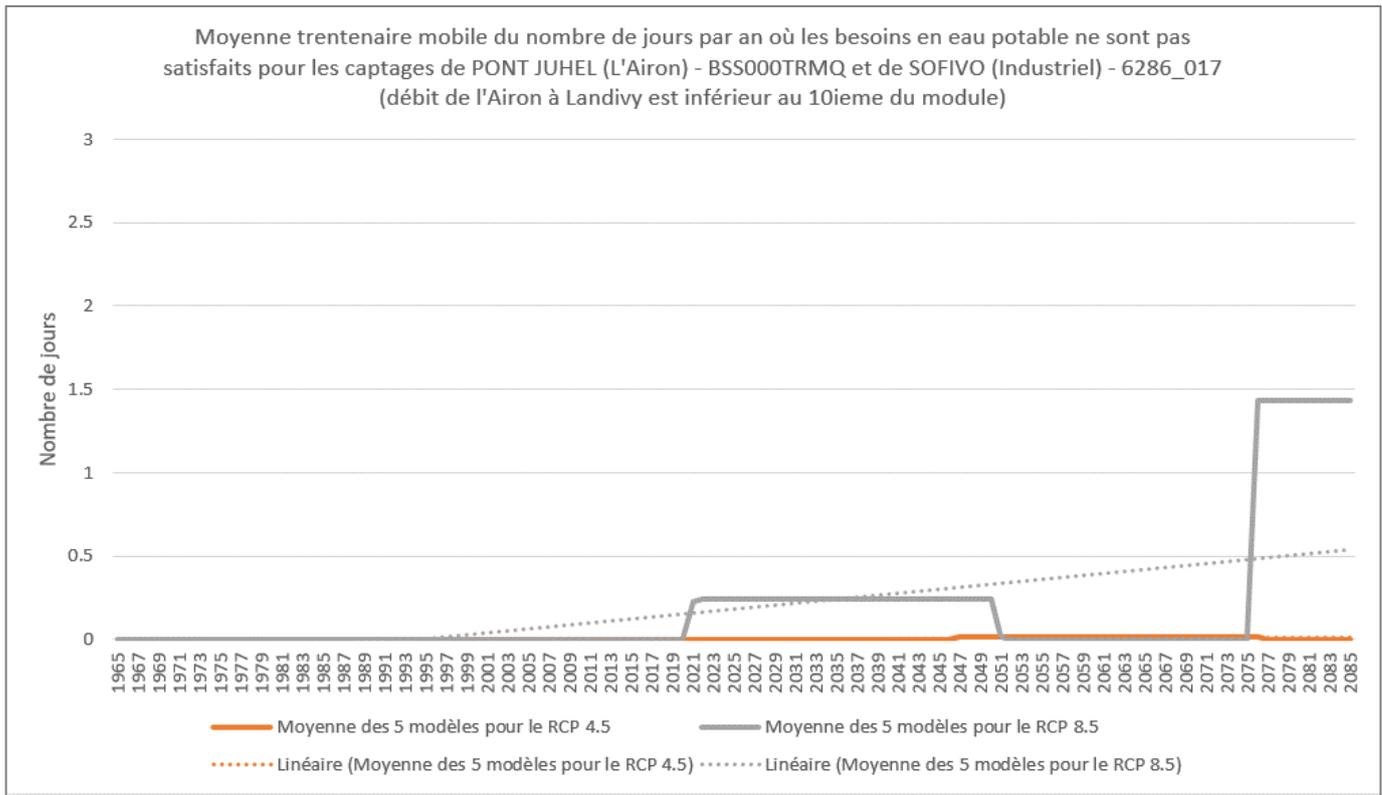


Figure 138 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage de PONT JUHEL (L'Airon) - BSS000TRMQ

e) *Captages de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY*

L'hypothèse est prise que l'ensemble des prélèvements sont réalisés sur le Beuvron au droit de la prise d'eau de la Houssaye.

Les résultats (Figure 139) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait 2 jours/an pour la RCP8.5 (moyenne des 5 modèles, moyenne sur 30 années). Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 8 jours/an de pénurie (moyenne sur 30 années). A titre de comparaison il n'y a aucun jour de pénurie simulée sur la période de référence (1976-2005) (Figure 139).

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

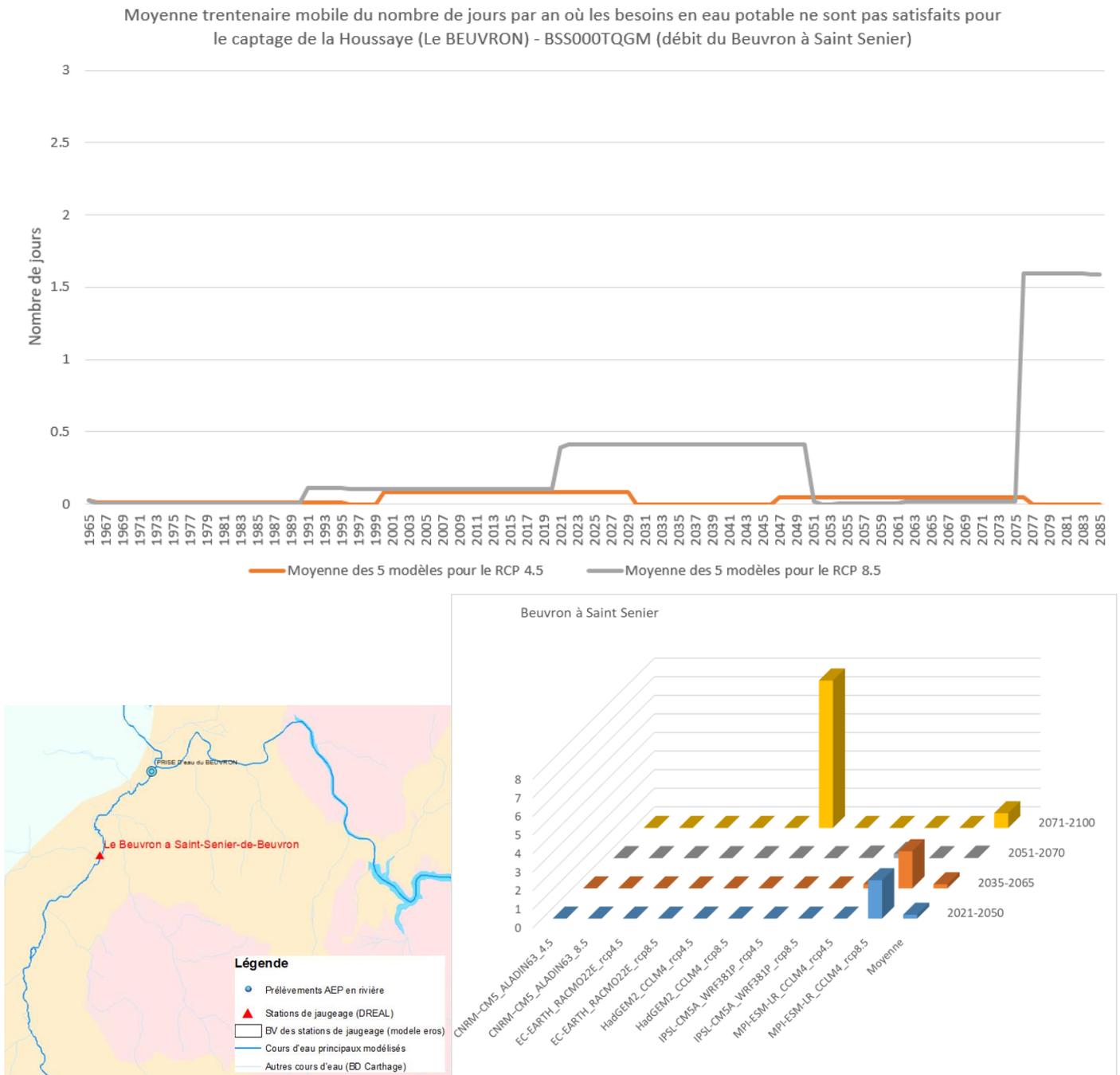


Figure 139 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les captages de Pont de BATEAU (La Sélune) - BSS000RBTR, de la Houssaye (Le Beuvron) - BSS000TQGM et de MONTMOREL (La Sélune) – BSS000TQEY

f) *Captage de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX*

La prise d'eau BSS000RBLX est réalisée sur le Glanon, affluent de la Sée entre Chérencé-le-Roussel et Tirepied. Toutefois, il n'existe pas de suivi des débits en continu au niveau de la prise d'eau ni au niveau du Glanon en général et le débit du Glanon n'a donc pas pu être modélisé par le modèle EROS.

Pour contourner ce problème, un calcul a été fait en prenant en compte le débit de la Sée à Tirepied. Le bassin versant de la Sée à Tirepied englobe en effet le Glanon et donc la prise d'eau.

Les résultats (Figure 140) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait 1 jours/an pour la RCP8.5 (moyenne des 5 modèles et sur 30 années). Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 5 jours/an de pénurie (moyenne sur 30 années). A titre de comparaison il n'y a aucun jour de pénurie simulée sur la période de référence (1976-2005) (Figure 140).

L'augmentation des pénuries semble donc peu significative sur ce bassin versant.

Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

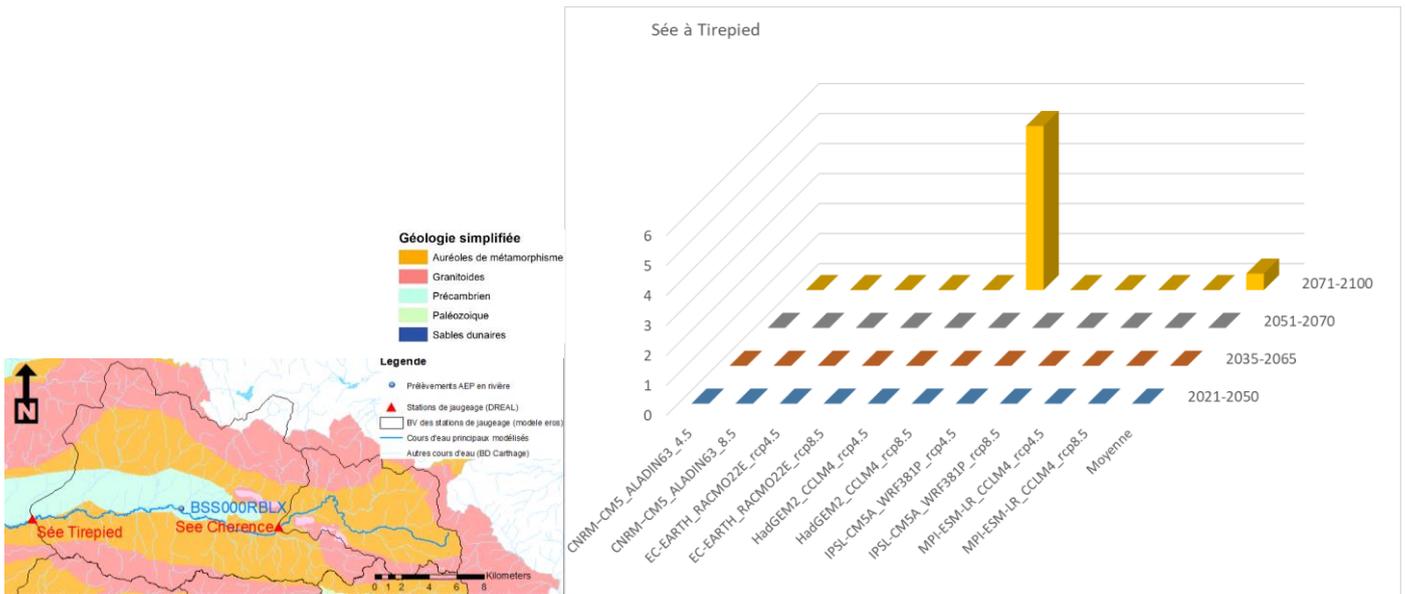
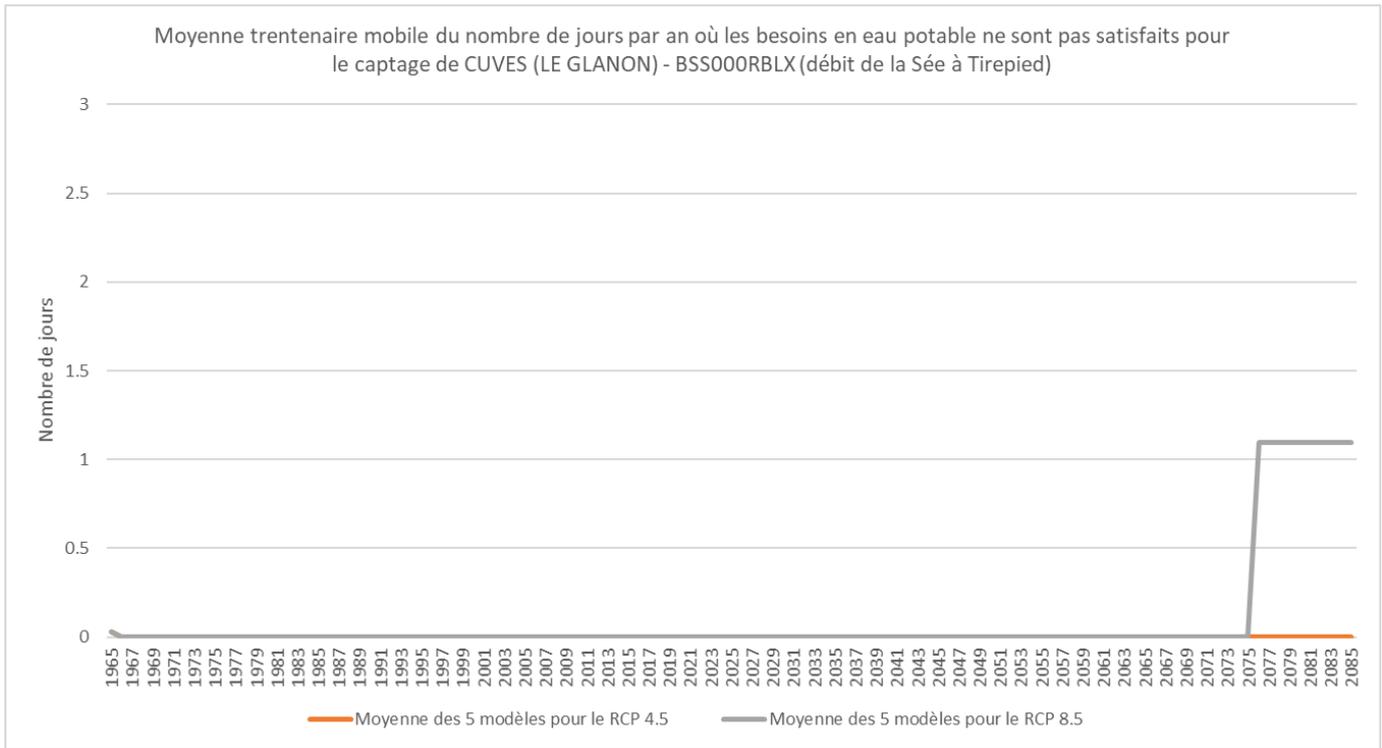


Figure 140 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage de CUVES (LE GLANON) - BSS000RBLX

g) Captage du MOULIN MARCEY (La Braize à Avranches) - BSS000RBDP

Pour le captage de Moulin Marcey, l'hypothèse a été prise que le débit de la Braize au niveau de la prise d'eau était celui de la Braize à Lolif (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul est donc pessimiste.

Les résultats (Figure 141) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait au maximum 2 jours/an pour la RCP8.5 (moyenne des 5 modèles et sur 30 années). Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 8 jours/an de pénurie (moyenne sur 30 années). A titre de comparaison il n'y a quasiment aucun jour de pénurie simulée sur la période de référence (1976-2005) (Figure 141).

L'augmentation des pénuries semble donc peu significative sur ce bassin versant.

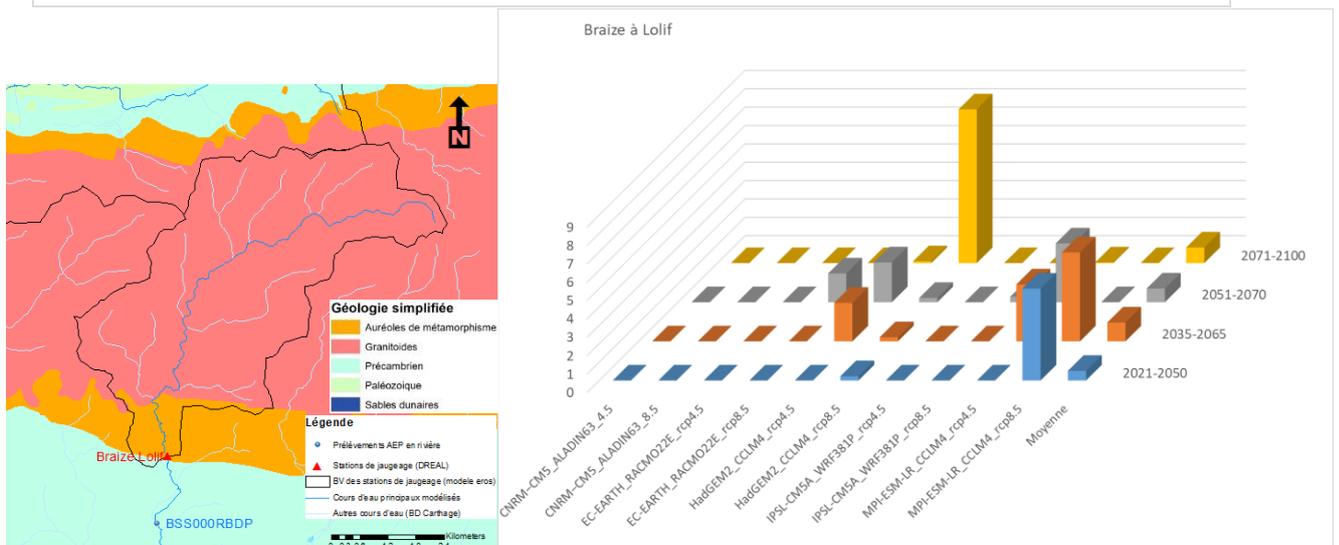
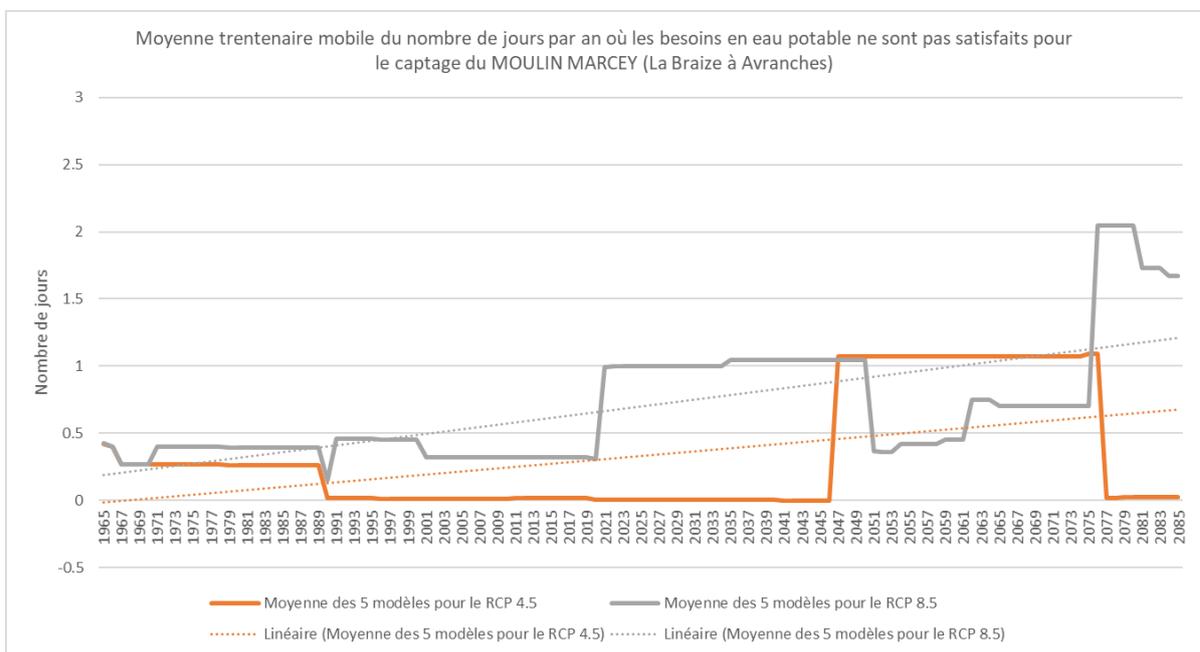


Figure 141 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour le captage du MOULIN MARCEY (La Braize à Avranches) - BSS000RBDP

h) Captage du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et Captage de BOUILLON - BSS000RAVY

Pour ce captage, l'hypothèse a été prise que le débit du Thar au niveau de la prise d'eau BSS000RAVY était celui du Thar à Jullouville (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant). Le calcul est donc légèrement pessimiste.

Les résultats (Figure 142) montrent qu'à l'horizon 2085, le nombre de jours où les besoins en AEP ne sont pas satisfaits atteindrait 7 jours/an en moyenne pour la RCP8.5 (moyenne des 5 modèles et sur 30 années). Les résultats issus du modèle climatique le plus critique (HadGEM) indiquent jusqu'à 20 jours/an de pénurie (moyenne sur 30 années). A titre de comparaison ce nombre de jours est compris entre 3 et 4 en moyenne sur la période de référence (1976-2005).

Il convient de garder à l'esprit que ces 20 jours de pénurie estimés à l'horizon 2085 pour la RCP8.5 et avec le modèle climatique HadGEM sont une moyenne sur 30 ans et constituent donc la norme climatique. Au sein de cette période, des pics annuels plus importants pourraient être atteints en fonction des épisodes météorologiques.

Pour mémoire, les pénuries estimées d'après les données mesurées sur la période 1994-2020 étaient de 2 jours en moyenne. En utilisant les données de projections climatiques, les pénuries sont estimées entre 3 et 4 jours en moyenne sur la période de référence (1976-2005), ce qui est donc cohérent. Quoiqu'il en soit, pour les horizons futurs, il convient de considérer la tendance de l'évolution simulée par rapport à la situation actuelle plutôt que les valeurs absolues de nombres de jours de pénurie.

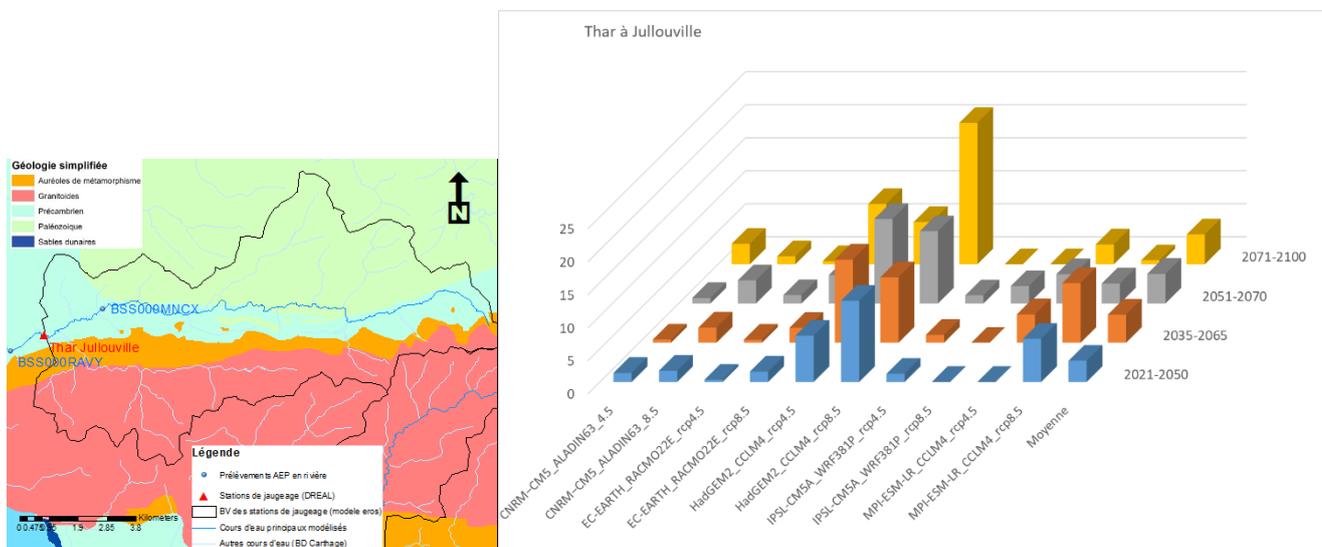
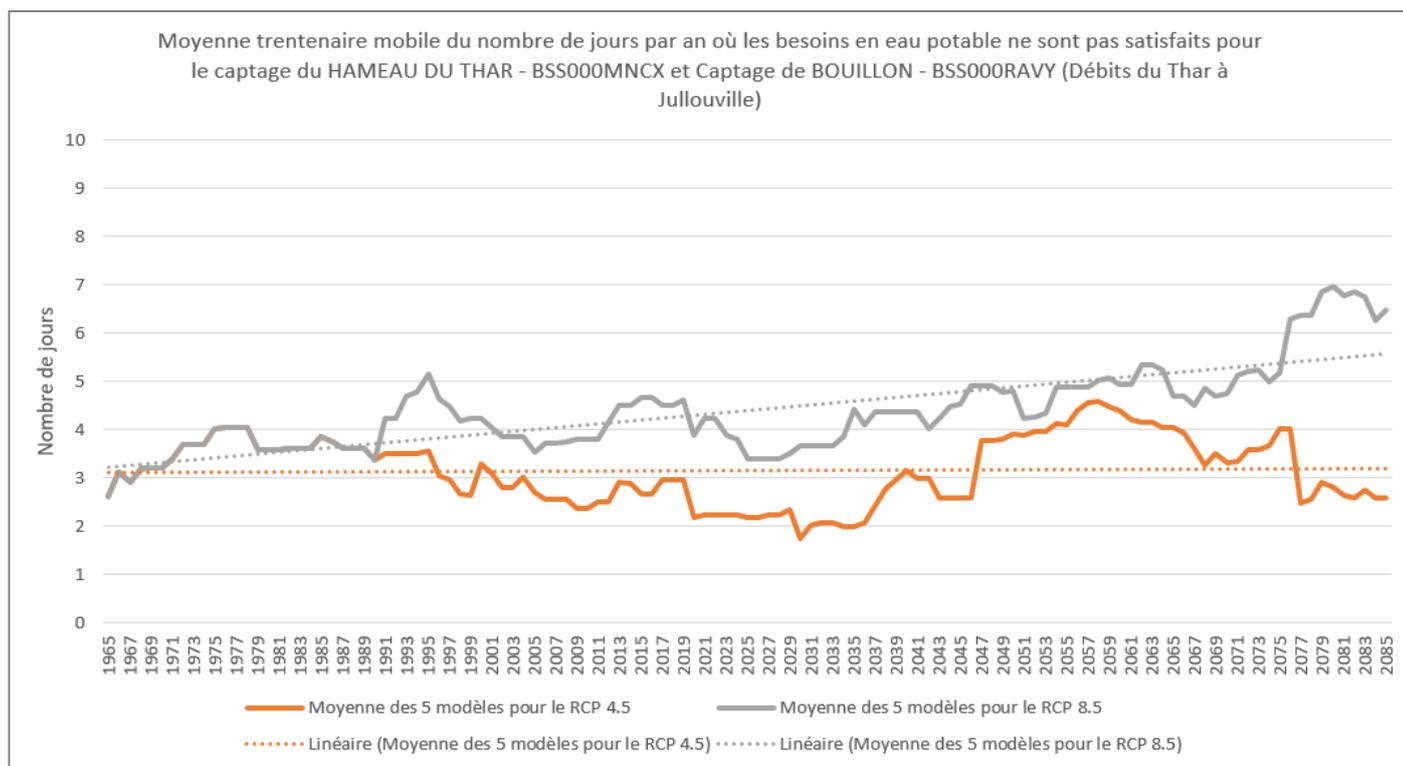


Figure 142 : Estimation du nombre de jours de pénurie de production AEP pour les captages du HAMEAU DU THAR - BSS000MNCX et de BOUILLON - BSS000RAVY

5. Rappels des principales incertitudes associées aux résultats de l'étude

Les résultats présentés dans ce rapport ont été établis sur la base des données et des connaissances disponibles. Pour combler certaines lacunes de données, des hypothèses ont dû être formulées afin de mener à bien la démarche. Ainsi ces résultats donnent les grandes tendances des évolutions à venir et sont valables dans le contexte des connaissances actuelles.

Il convient ci-dessous de rappeler les incertitudes et hypothèses sur lesquelles s'appuient ces résultats.

Incertitudes sur les débits des rivières

Il est apparu que les débits de la Sélune à l'aval des barrages étaient trop influencés pour faire l'objet d'une modélisation hydrogéologique. Deux stations « reconstituées » ont dû être utilisées pour la construction du modèle EROS (I9221010 : La Sélune à Ducey [Vézins] et I9241010 : La Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron]). La station de la Sélune à Ducey [aval confluence Beuvron] est une station fictive de la DREAL dont les données sont mises en ligne sur le portail de la banque hydro. Concernant la station de la Sélune « Vézins » : il s'agit de la station de suivi des débits de sortie du barrage de Vézins (bassin versant de 720 km²), dont les données sont produites par EDF. Cette chronique correspond aux apports naturels reconstitués (ANR) c'est-à-dire au débit qui coulerait si aucun barrage n'existait. EDF précise que, d'une manière générale, les ANR sont calculés de la manière suivante : variation de réserve du lac + débit sortant du barrage (turbiné, réservé, déversé, vanne). Ces données sont issues de mesures faites sur l'exploitation et d'abaques (mesure de la cote du barrage, mesure de la puissance turbinée, mesure de la lame d'eau déversante, etc.). Cet ANR est produit, lissé si besoin et critiqué avec des témoins de débits naturels. EDF conclut que, même si c'est une série calculée, en débit moyen journalier, la série est considérée de bonne qualité.

Un autre élément de vigilance est à retenir pour la station de la Sée à Tirepied dont le suivi a été arrêté début 2006 du fait de la perturbation des débits en période d'étiage. Cette station a toutefois été conservée afin de combler les lacunes de suivi débitmétrique de cette rivière et dans la mesure où la banque hydro considère que cette station a une signification hydrologique.

Incertitudes sur la prise en compte des débits réservés

Les suivis des débits de rivières disponibles sont rarement réalisés au droit des prises d'eau potable. Les 10^{èmes} du module calculés dans le cadre de l'étude ne correspondent ainsi pas exactement au 10^{ème} du module réel au droit de la prise d'eau.

A titre d'exemple, l'hypothèse a été prise que le débit de la Sélune au niveau de la prise d'eau BSS000TRHA (captage de Milly) était celui de la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet (sans coefficient correcteur lié à l'augmentation du bassin versant estimé entre 1.2 et 1.3). Les résultats des calculs présentés sont donc légèrement pessimistes.

Incertitudes sur les niveaux des nappes

Les données piézométriques disponibles sur le secteur d'étude sont uniquement celles issues des piézomètres suivis par le BRGM. Plusieurs de ces piézomètres sont récents et ne disposent pas encore de chroniques suffisantes pour effectuer des statistiques très fiables, ni parfois pour définir l'étendue du compartiment hydrogéologique dans lequel il est implanté. Après des tests

réalisés avec les 3 piézomètres disponibles sur le secteur d'étude et disposant d'une chronique suffisamment longue, il s'avère que les meilleurs coefficients d'ajustement sont obtenus avec le piézomètre 02101X0044 à Lingéard (50) pour les bassins versants Nord (Sée, Braize, Thar) et avec le piézomètre 02478X0156 à Louvigné-du-désert (35) pour les bassins versants de la Sélune et ses affluents. A l'avenir, la mise en place de nouveaux suivis piézométriques dans les différents Bassins versants permettrait de mieux prendre en compte le compartiment souterrain dans les modèles.

Incertitudes sur les prélèvements et rejets

La connaissance des prélèvements et des rejets demeure lacunaire et les données à haute fréquence (mensuelles ou journalières) ne sont que rarement disponibles ou du moins que sur les dernières années de la période étudiée. Ainsi la majorité des données utilisées sur la période 1994 -2020 étaient des données annuelles, qui ont dues être mensualisées, puis rendues quotidiennes.

Malgré un travail important de recoupement des différentes bases de données disponibles, il convient de souligner que le recensement n'est pas exhaustif. Par exemple, la base de données constituée dans le cadre de cette étude n'inclut pas les prélèvements pour l'abreuvement des animaux, données non disponibles au moment de l'étude et faisant l'objet d'un recensement spécifique, en cours, par la chambre d'agriculture de la Manche dans le cadre du PGRE.

Les prélèvements agricoles pour l'abreuvement des animaux pourront être pris en compte à l'issue de l'étude, une fois que ces données seront constituées.

Incertitude sur les projections climatiques

La modélisation climatique étant une science complexe, il existe des incertitudes importantes concernant le devenir du climat, dont les deux principales sont 1) la capacité des modèles climatiques à reproduire le climat présent et 2) l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre. La première source d'incertitude a été prise en compte en utilisant les prévisions du climat issus d'un ensemble de 5 modèles climatiques différents (tous issus du jeu de données DRIAS-2020). La deuxième a pu être approchée en proposant des simulations obtenues en prenant en compte 2 scénarios d'émission (RCP4.5 et 8.5).

Limites d'utilisation des données débits simulées pour le futur

Pour rappel, s'il est vrai que ce sont les données météorologiques historiques réellement enregistrées (données SAFRAN) qui ont servi à construire le modèle EROS, une fois le modèle calé, ce sont les données climatiques DRIAS-2020 qui ont été utilisées en entrée du modèle EROS.

Chacun des 5 modèles climatiques (DRIAS-2020) utilisés fournit des données climatiques pour la période allant de 1950 à 2100. Il est important de garder à l'esprit que les situations météorologiques projetées par ces 5 modèles climatiques sont des simulations (y compris sur la période dite historique 1950-2005) et n'ont pas pour objectif, pour une date donnée, de reproduire la situation qui correspond réellement à celle observée (ou qui le sera dans le futur). Les données de référence simulées ne doivent pas être comparées aux valeurs observées à la même date. Mais l'ensemble d'une simulation de référence a les caractéristiques du climat de la période de simulation (1950-2000 par exemple). Par ailleurs, les projections climatiques débutent en 2006.

Autre point de vigilance, le modèle EROS a été construit afin de simuler les débits naturels des différentes rivières. Les débits des rivières simulés par EROS lorsque les données SAFRAN sont

utilisées en entrée, sont censés être semblables à ceux mesurés sur le terrain pour une date donnée. Toutefois il peut y avoir un écart entre ces 2 valeurs (simulée et observée) qui peut être lié à l'impact des prélèvements et des rejets, d'une part, et, d'autre part, à la qualité du calage du modèle réalisée. En effet, un modèle ne reproduit jamais la réalité à 100%. Les écarts entre les débits réels et les débits simulés sont estimés à travers les coefficients de calage. Ces coefficients sont présentés dans ce rapport.

Ainsi, les résultats présentés dans ce rapport doivent être considérés de manière tendancielle et en terme d'ordre de grandeur.

6. Conclusion

Le premier volet de cette étude a consisté à établir un retour d'expérience de l'incidence sur la production d'eau potable des épisodes de sécheresses récents notamment la sécheresse estivale de 2019 et hivernale de 2016/2017. Il a en particulier permis d'estimer les pénuries d'eau potable (en termes de quantité d'eau manquante et de nombre de jours de pénurie) qui auraient eu lieu si les débits réservés avaient été respectés.

Ces analyses ont montré que pour certaines rivières, la pression des prélèvements qui sont actuellement réalisés ou qui ont pu l'être dans le passé, étaient et sont compatibles avec le respect des débits réservés (ou du 10^{ième} du module de la rivière pour les prises d'eau ne disposant pas de débit réservé défini). C'est le cas par exemple des prélèvements réalisés dans les bassins versants de la Braize et de la Sée.

Dans d'autres cas, le respect des débits réservés aurait provoqué des pénuries de production d'eau potable lors de certains épisodes de sécheresse. C'est le cas du bassin versant du Thar, où des pénuries sont mises en évidence sur 5 des 27 années étudiées (période 1994-2020). Cela correspond pour ces 5 années à une fourchette de 8 à 29 jours par an de pénurie d'eau (représentant un volume allant de 230 à 29 000 m³/an) selon les années.

Enfin, il existe un cas plus critique, où le débit de la rivière est parfois même naturellement en-dessous du débit réservé. Il s'agit du cas de la Sélune amont (à Notre-Dame-du-Touchet). Les prélèvements réalisés en rivière viennent alors augmenter la fréquence de dépassement naturel du débit réservé. Ainsi pour les prises d'eau de la Sélune amont (et ses affluents), le respect du débit réservé fait apparaître des pénuries sur 17 des 27 années étudiées (période 1994-2020), soit 62% des années étudiées. Ces pénuries peuvent atteindre pour les pires années jusqu'à 114 jours de pénurie et 362 000 m³/an.

Attention toutefois, ces conclusions sont à prendre avec précaution car des hypothèses ont dû être formulées afin de combler des lacunes de connaissance (cf. limites de la démarche présentées au §5), dont, l'une d'entre elles, est que les suivis des débits de rivières disponibles sont rarement réalisés au droit de la prise d'eau. Les 10^{èmes} du module calculés ne correspondent alors sans doute pas exactement au 10^{ième} du module réel au droit de la prise d'eau.

Le second volet de l'étude a consisté à analyser l'évolution de la ressource en eau superficielle dans le contexte du changement climatique pour estimer les tensions éventuelles à venir sur la production d'eau potable à l'horizon 2050.

Le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des rivières du Sud Manche a tout d'abord été modélisé à l'aide de modèles dits « globaux » ou « à réservoirs » semi-spatialisés, construits au niveau de stations de jaugeages disponibles dans les différents bassins versants. Ces modèles sont structurés et calés sur la base des chroniques de données existantes, notamment de débits des rivières et de niveaux piézométriques. Ces modèles globaux ont été réalisés avec le logiciel EROS et ont permis de simuler les débits de la Braize (à Lolif), du Thar (à Jullouville), de la Sée (à Chérencé-le-Roussel et à Tirepied), de l'Oir (à Ducey), de la Sélune (à Notre-Dame-du-Touchet, à Virey, à Vezins et à Ducey), de l'Airon (à Landivy) et du Beuvron (à Saint-James et Saint-Senier), soit un total de 12 « grappes » de rivières modélisées.

Avant même de lancer les prévisions futures, la mise en place du modèle EROS calé sur la période actuelle a permis de réaliser un diagnostic du fonctionnement de ces différentes rivières.

Ces modèles ont par exemple permis d'estimer la part des contributions des eaux souterraines aux débits des différentes rivières. Une forte disparité de fonctionnement est apparue. Pour certains cours d'eau, en moyenne, plus de la moitié du débit provient d'une contribution souterraine : il s'agit de la Braize à Lolif (86%), de la Sée à Tirepied (76%), du Beuvron à Saint James (58%) et du Thar à Jullouville (52%). Une majorité de cours d'eau ont une contribution plus faible des eaux souterraines à hauteur de 20% à 30% du débit total : l'Oir à Ducey (33%), la Sélune à Virey (31%), l'Airon à Landivy (31%), la Sée à Chérencé (27%), le Beuvron à Saint-Senier (26%), la Sélune à Vézins (20%). Enfin, la Sélune à Notre-Dame-du-Touchet se distingue par la très faible contribution des eaux souterraines à son débit (6% en moyenne) ce qui peut la rendre plus vulnérable aux risques de sécheresses météorologiques.

Une fois ces modèles EROS calés, des projections climatiques les plus adaptées aux conditions climatiques de la Normandie ont été récupérées depuis les plateformes disponibles (<http://www.drias-climat.fr/>) et utilisées pour forcer les modèles globaux et analyser leurs impacts en termes de débits pour différents horizons futurs (dont l'horizon 2050). La modélisation du climat étant une science complexe, il existe des incertitudes importantes concernant le devenir du climat, dont les deux principales sont 1) la capacité des modèles climatiques à reproduire le climat présent et 2) l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre. La première incertitude a été prise en compte et minimisée en utilisant les prévisions du climat issues d'un ensemble de 5 modèles climatiques différents (tous issus du jeu de données DRIAS-2020). La deuxième a pu être approchée en proposant des simulations obtenues en prenant en compte 2 scénarios d'émission (RCP4.5 et 8.5).

Ces deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP4.5 et 8.5) simulés par 5 modèles climatiques différents (soit un total de 10 scénarios distincts de pluie et d'évapotranspiration) ont été utilisés en tant que données d'entrée du modèle EROS. Cela a permis de simuler 10 scénarios de prévisions de débit pour chacune des 12 grappes de rivières modélisées.

Une première analyse globale des résultats a montré les grandes tendances qui semblent se dessiner sur les différents cours d'eau (avec des intensités variables selon les cours d'eau) à savoir : une augmentation du débit moyen (moyenne annuelle), une augmentation de la variabilité des débits (i.e. des épisodes extrêmes plus fréquents) et une augmentation de l'amplitude des pics de crue. L'augmentation du débit moyen s'explique par le fait que, en moyenne, 4 modèles climatiques sur 5 prévoient plus de précipitations dans le futur (dans le détail, ce nombre est variable selon l'horizon temporel et la RCP considérés).

Concernant l'évolution des débits d'étiage, la situation est très variable d'une rivière à l'autre. Une des raisons de cette variabilité des réponses hydrologiques des différents cours aux variations du climat futur peut être recherchée :

- d'une part, dans le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique distinct des différentes rivières. Par exemple, une rivière comme la Braize, dont le débit profite d'une forte contribution des eaux souterraines, sera moins sensible aux sécheresses météorologiques (estivale par exemple) lorsque les niveaux des nappes sont hauts, qu'une rivière comme la Sélune amont dont le débit est faiblement soutenu par les eaux souterraines ;
- d'autre part, par la dispersion des scénarios climatiques (dispersion des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et dispersion des modèles climatiques eux-mêmes) : dispersion temporelle, mais également dispersion saisonnière. Ainsi, les modèles climatiques prévoyant des étés plus secs mais des hivers plus arrosés, induiront, sur le principe, des débits d'étiage plus favorables pour les rivières bénéficiant d'un fort soutien des eaux souterraines.

Ainsi pour chaque grappe de rivière, l'évolution des débits d'étiage a été présentée via une fourchette de dispersion de l'évolution du QMNA5 par rapport à la période actuelle : évolution maximum (issue du modèle climatique et de la RCP les plus optimistes amenant à des débits les plus favorables), évolution minimum (issue du modèle climatique et de la RCP les plus pessimistes amenant à des débits les moins favorables), et évolution moyenne (issue des 10 combinaisons de modèles climatiques et trajectoires testés).

Si l'on prend l'exemple de l'évolution moyenne du QMNA5 à l'horizon 2085 (comparé à la période de référence 1976-2005) pour la RCP8.5 (RCP et horizon temporels les plus défavorables), on distingue 4 groupes de rivières :

- la Braize (à Lolif) dont le QMNA5 est globalement stable (+1%)
- 3 rivières dont le QMNA5 diminue en moyenne de -1.5% à -5% : le Beuvron (à Saint-James et à Saint-Senier), la Sée (à Chérencé et à Tirepiéd) et l'Airon (à Landivy)
- 3 rivières dont le QMNA5 diminue en moyenne de -9.5 à -15% : le Thar (à Jullouville), l'Oir (à Ducey), la Sélune médiane et aval (à Vezins, à Virey, à Ducey)
- 1 rivière dont le QMNA5 diminue en moyenne de -26% : la Sélune amont (à Notre-Dame-du-Toucher)

RCP8.5 à l'horizon 2071-2100	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-26.4%	-51.7%	18.4%
Sélune à Virey	-14.8%	-31.2%	8.3%
Selune aval à Ducey	-14.7%	-30.8%	14.0%
Sélune à Vezins	-13.3%	-33.0%	16.1%
Oir à Ducey	-12.4%	-27.5%	19.2%
Thar à Jullouville	-9.4%	-32.4%	30.6%
Sée à Cherence	-4.7%	-25.8%	13.4%
Airon à Landivy	-3.7%	-19.2%	12.4%
Beuvron à St Senier	-3.6%	-26.0%	36.8%
See à Tirepiéd	-1.6%	-25.9%	25.5%
Beuvron à St James	-1.5%	-24.1%	23.8%
Braize à Lolif	1.1%	-25.5%	32.7%

Un ensemble de tableaux de résultats de ce type pour les différents horizons temporels testés est présenté en Annexe 4.

Concernant les pénuries de production AEP dans le futur, le nombre de jours de pénuries à l'horizon 2085 (estimé en considérant les 10 combinaisons de modèles climatiques et trajectoires testés) a été estimé. Cette estimation met en évidence une tendance à l'augmentation du nombre de jours de pénuries (par rapport à la période actuelle de référence) pour les captages présentant déjà aujourd'hui des pénuries en cas de respect des débits réservés. Ainsi deux prises d'eau se distinguent du point de vue de leur vulnérabilité au contexte climatique futur : il s'agit des captages de la Sélune Amont et du Thar.

Pour les autres prises d'eau (situées sur les rivières de la Braize, de l'Airon, de la Sée et de la Sélune aval/Beuvron) l'augmentation du nombre de jours de pénurie reste limitée.

7. Bibliographie

Etchevers Pierre, Rousset Fabienne, Soubeyroux Jean-Michel, Tocquer Flore. 18 décembre 2020. « Short list » issue du jeu DRIAS-2020 : proposition et discussion - Météo-France DCSC/AVH. Support de présentation

Jallais N., David P.-Y., Pennequin D. (BRGM), Hamel M. (SDEAU 50) (2019) – Etat des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines du département de la Manche. Rapport final. BRGM/RP-69128-FR, 159 p., 92 ill., 2 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-69128-FR.pdf>

Seguin J.J. (2016) – Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Complément d'étude pour la caractérisation des pressions et impacts sur les eaux souterraines. BRGM/RP-65635-FR, 219 p., 106 ill., 49 tabl., 6 ann.

Soubeyroux Jean-Michel, Bernus Sébastien, Corre Lola, Drouin Agathe, Dubuisson Brigitte, Etchevers Pierre, Gouget Viviane, Josse Patrick, Kerdoncuff Maryvonne, Samacoits Raphaëlle et Tocquer Flore. 2020. les nouvelles projections climatiques de référence drias 2020 pour la métropole. Météo-France, 2020. <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

THIERY D., 2003 - Logiciel GARDENIA version 6.0, Guide d'utilisation, Rap. BRGM/RP-52832-FR.

THIERY D. – 2003 - Logiciel GARDENIA. Modèle global à réservoirs pour la simulation des débits et des niveaux aquifères. Nouvelle version 6.0c du logiciel, BRGM/RP-52832-FR, décembre 2003.

THIERY D., 2004 - Description succincte du modèle GARDENIA, Note technique, NT EAU 2004/03, février 2004.

THIERY D., 2004 - Prévision de débits ou de niveaux avec le modèle hydrologique global GARDÉNIA 8.3, Note technique NT EAU 2004/02 mai 2004 - Mise à jour décembre 2015.

THIERY D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 128 p., 65 fig., 2 ann.

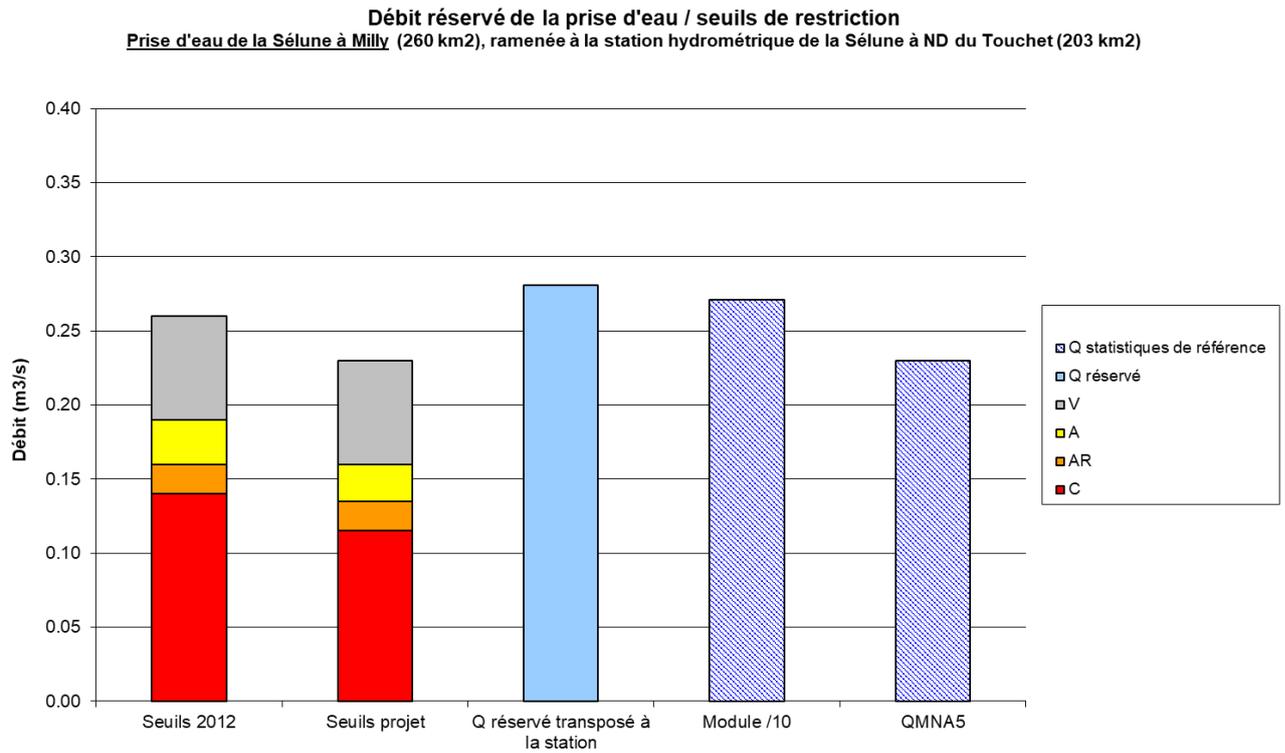
Thiéry, D. (2015) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.

THIERY D. (2018) - Logiciel ÉROS version 7.1. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-67704-FR, 173 p., 82 fig. Pinault J.L. 2007

Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J. M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627–1644. <http://doi.org/10.1002/joc.2003>

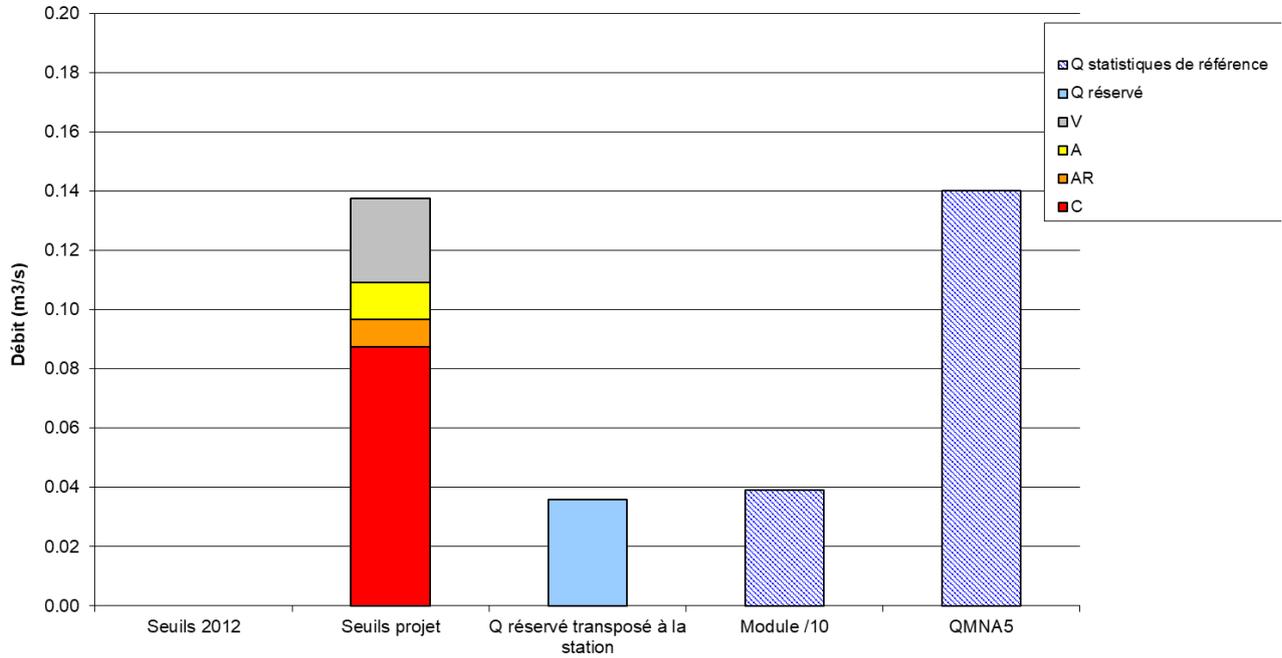
8. Annexes

8.1. ANNEXE 1 : COMPARAISON DES DEBITS RESERVE A LA PRISE D'EAU ET DES SEUILS DE RESTICTION (ARRETE SECHERESSE)



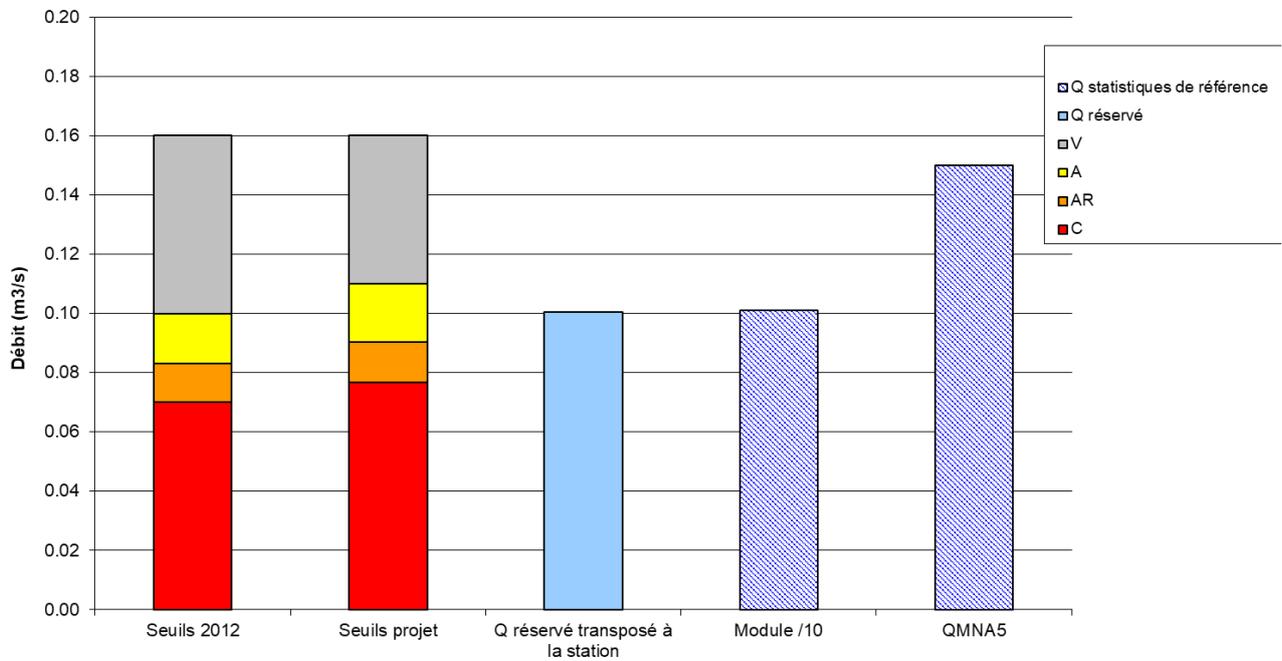
Débit réservé de la prise d'eau / seuils de restriction

Prise d'eau de la Braize à Marcey-les-Grèves (30 km²), ramenée à la station hydrométrique de la Braize à Lolif (25 km²)

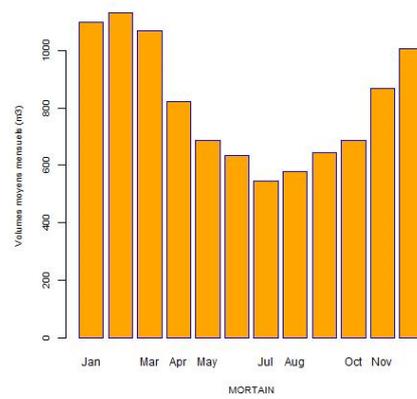
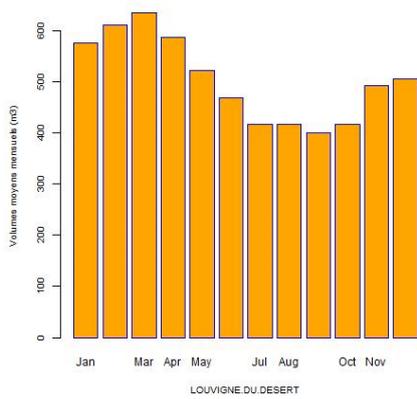
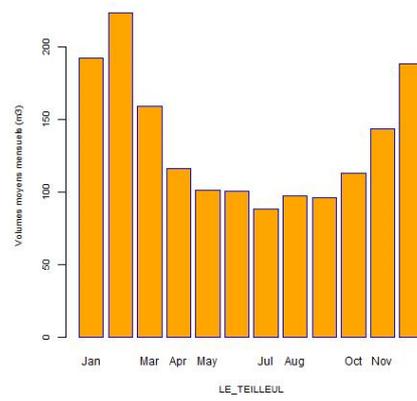
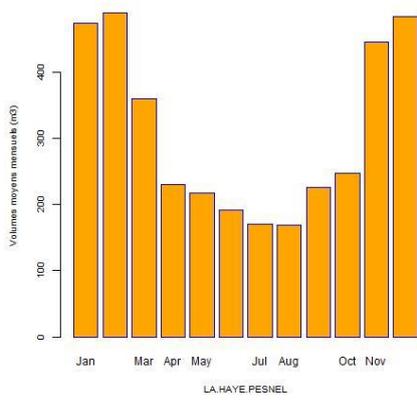
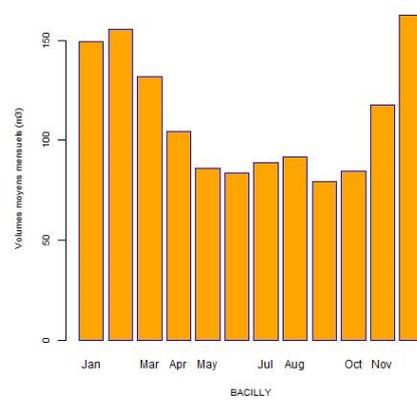
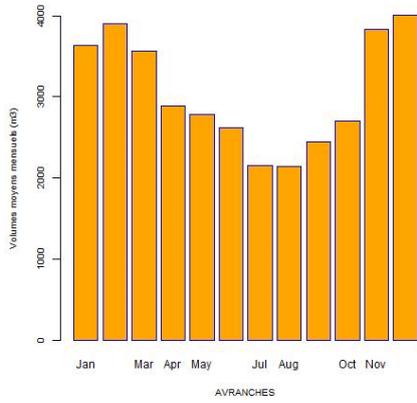


Débit réservé de la prise d'eau / seuils de restriction

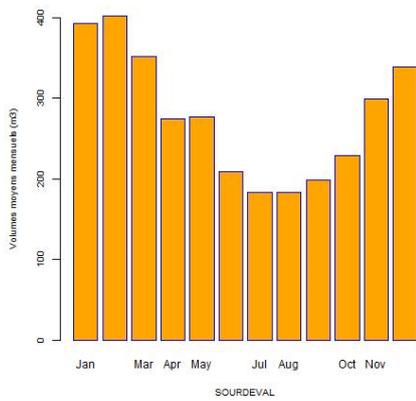
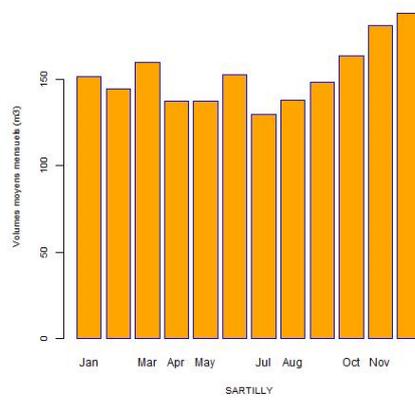
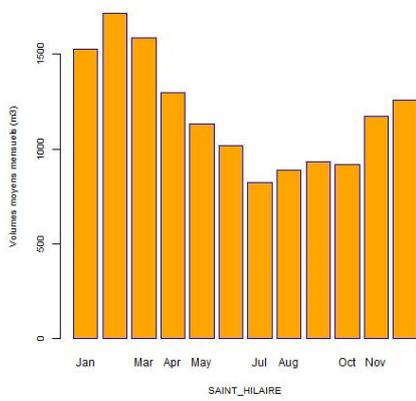
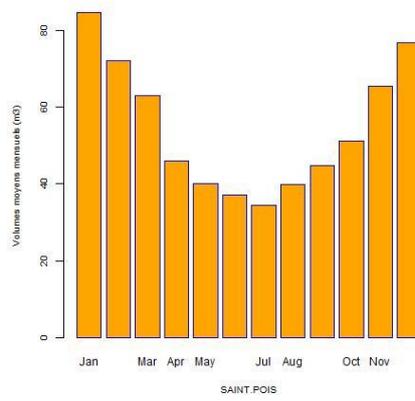
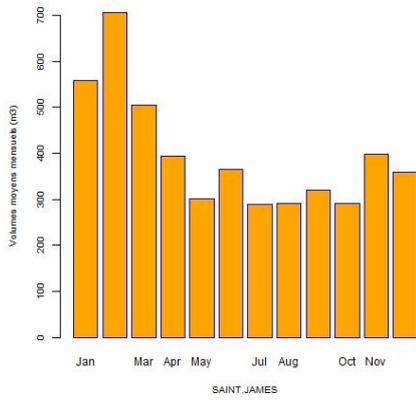
Prise d'eau du Thar à Jullouville (75 km²), ramenée à la station hydrométrique du Thar à Jullouville (73 km²)



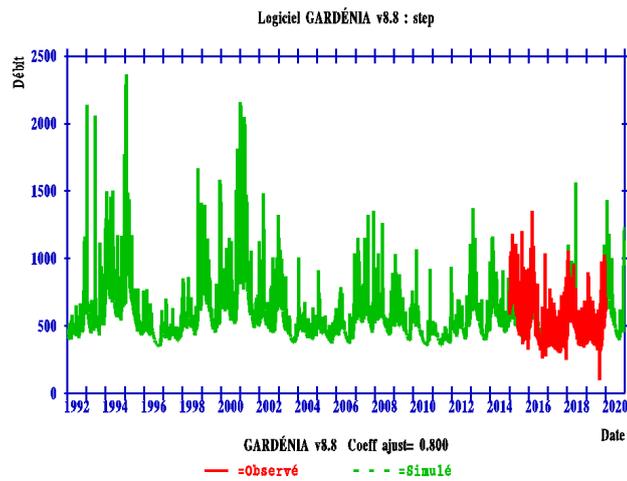
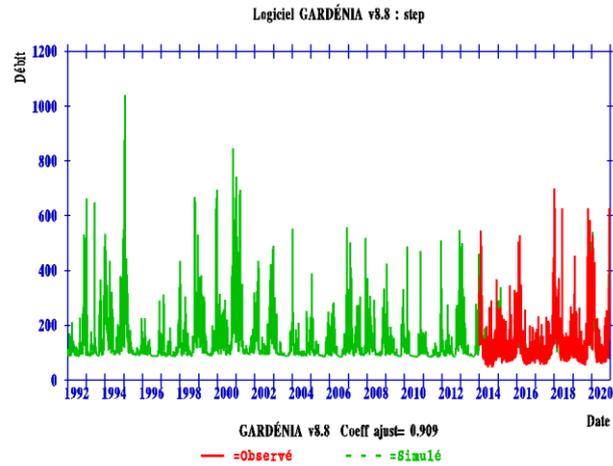
8.2. ANNEXE 2 : SAISONNALITE DES STEU



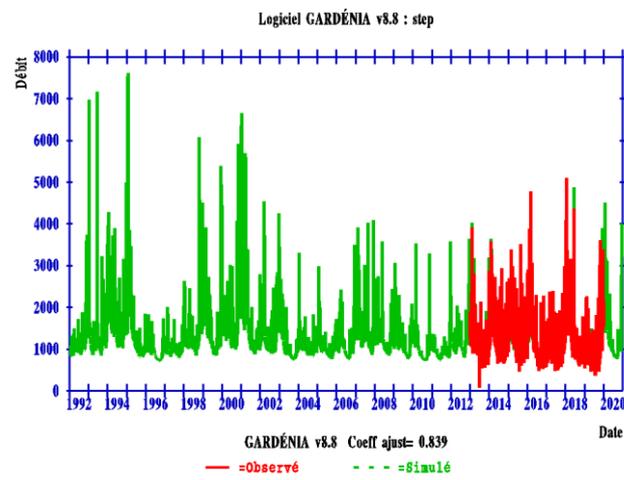
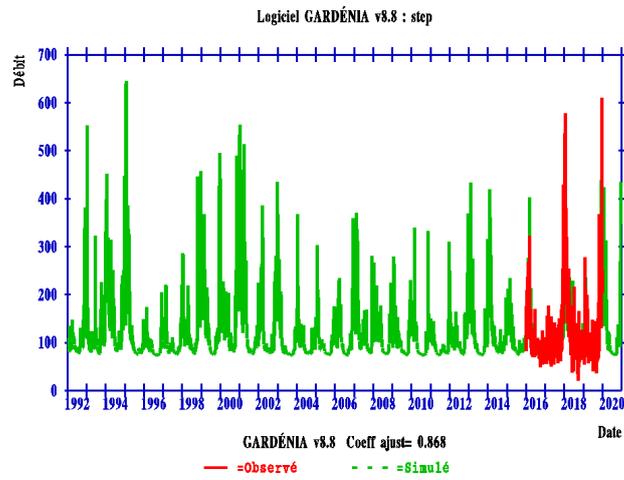
Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050

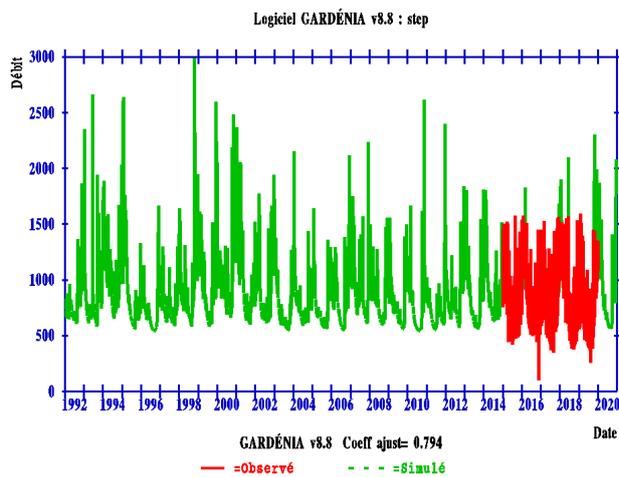
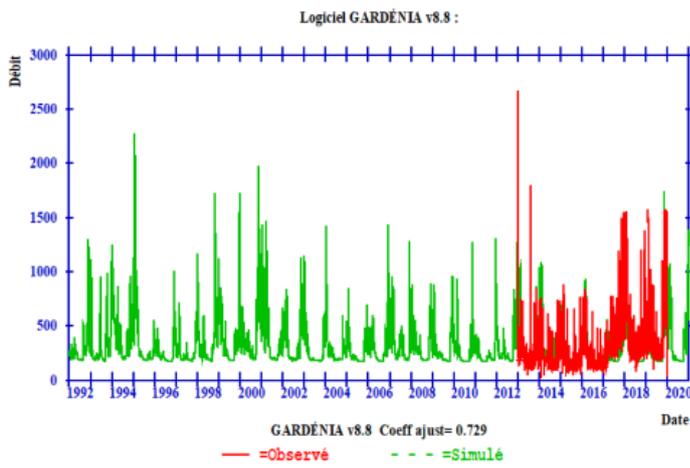
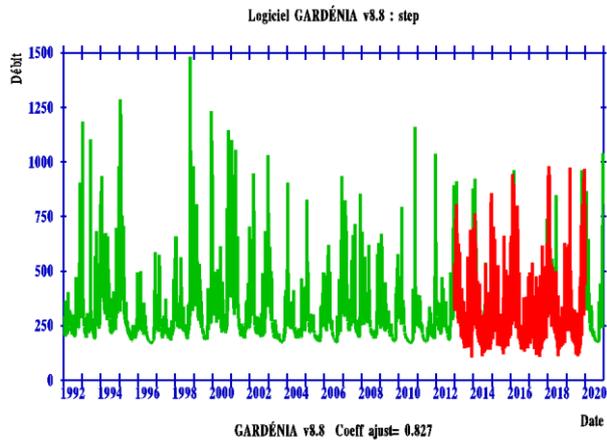


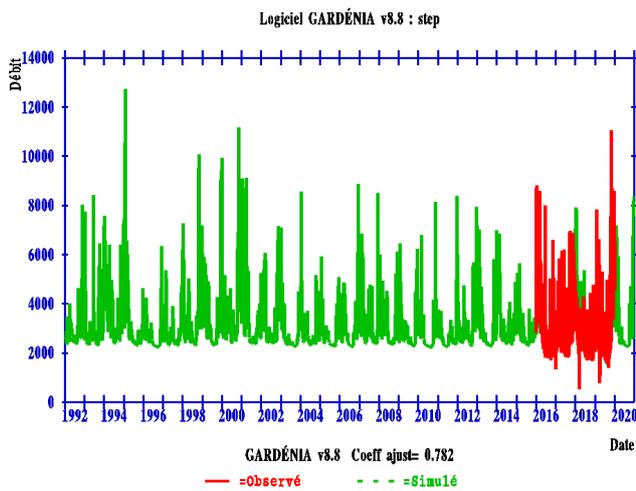
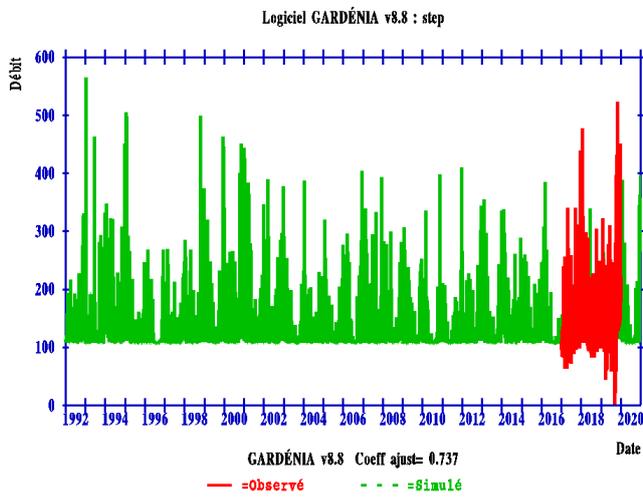
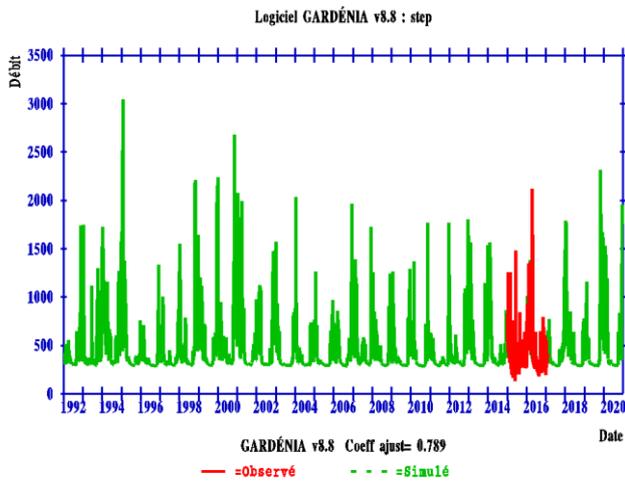
8.3. ANNEXE 3 : RECONSTITUTION DES CHRONIQUES DE REJET DES STEU



Prévision de l'évolution des débits des ressources en eau du Sud Manche à l'horizon 2050







8.4. ANNEXE 4 : EVOLUTION DES QMNA5 DES RIVIERES DU SUD MANCHE PAR RAPPORT A LA PERIODE DE REFERENCE (1976-2005) (RESULTATS POUR LES 5 MODELES CLIMATIQUES UTILISES EN ENTREE DU MODELE EROS DU SUD MANCHE)

RCP4.5 à l'horizon 2085 (2071-2100)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-20.3%	-37.5%	15.9%
Thar à Jullouville	-5.7%	-26.8%	28.5%
Sélune à Vezins	-4.1%	-15.2%	21.8%
Sélune à Virey	-3.9%	-13.5%	24.8%
Selune aval à Ducey	-2.5%	-17.9%	34.5%
Oir à Ducey	-1.6%	-16.2%	34.9%
Beuvron à St Senier	1.9%	-16.4%	32.6%
Airon à Landivy	2.8%	-15.1%	16.2%
See à Tirepiéd	3.1%	-16.2%	28.3%
Beuvron à St James	4.3%	-11.9%	20.3%
Braize à Lolif	4.8%	-11.6%	28.8%
Sée à Charence	6.0%	-7.3%	28.1%

RCP8.5 à l'horizon 2085 (2071-2100)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-26.4%	-51.7%	18.4%
Sélune à Virey	-14.8%	-31.2%	8.3%
Selune aval à Ducey	-14.7%	-30.8%	14.0%
Sélune à Vezins	-13.3%	-33.0%	16.1%
Oir à Ducey	-12.4%	-27.5%	19.2%
Thar à Jullouville	-9.4%	-32.4%	30.6%
Sée à Charence	-4.7%	-25.8%	13.4%
Airon à Landivy	-3.7%	-19.2%	12.4%
Beuvron à St Senier	-3.6%	-26.0%	36.8%
See à Tirepiéd	-1.6%	-25.9%	25.5%
Beuvron à St James	-1.5%	-24.1%	23.8%
Braize à Lolif	1.1%	-25.5%	32.7%

Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2085 (2071-2100)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-23.3%	-51.7%	18.4%
Sélune à Virey	-9.4%	-31.2%	24.8%
Sélune à Vezins	-8.7%	-33.0%	21.8%
Selune aval à Ducey	-8.6%	-30.8%	34.5%
Thar à Jullouville	-7.6%	-32.4%	30.6%
Oir à Ducey	-7.0%	-27.5%	34.9%
Beuvron à St Senier	-0.8%	-26.0%	36.8%
Airon à Landivy	-0.5%	-19.2%	16.2%
Sée à Charence	0.6%	-25.8%	28.1%
See à Tirepiéd	0.8%	-25.9%	28.3%
Beuvron à St James	1.4%	-24.1%	23.8%
Braize à Lolif	2.9%	-25.5%	32.7%

RCP4.5 à l'horizon 2055 (2041-2070)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-20.9%	-40.2%	10.2%
Thar à Jullouville	-8.4%	-21.6%	16.1%
Oir à Ducey	-7.1%	-23.0%	14.5%
Sélune à Virey	-6.7%	-25.6%	6.1%
Selune aval à Ducey	-5.8%	-25.7%	9.2%
Sélune à Vezins	-5.5%	-27.9%	7.7%
Sée à Charence	-2.7%	-20.6%	18.3%
See à Tirepiéd	-1.9%	-16.7%	20.7%
Beuvron à St Senier	-0.6%	-18.0%	13.1%
Braize à Lolif	-0.3%	-17.2%	23.5%
Airon à Landivy	1.6%	-16.7%	9.5%
Beuvron à St James	2.0%	-17.2%	10.4%

RCP8.5 à l'horizon 2055 (2041-2070)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-21.0%	-42.6%	19.4%
Selune aval à Ducey	-12.3%	-26.9%	11.6%
Sélune à Vezins	-10.6%	-24.6%	12.4%
Thar à Jullouville	-9.5%	-25.6%	30.6%
Oir à Ducey	-9.3%	-27.5%	20.4%
Sélune à Virey	-8.8%	-20.5%	13.3%
Beuvron à St Senier	-3.6%	-20.4%	18.5%
Sée à Charence	-1.3%	-22.5%	22.7%
Airon à Landivy	-0.9%	-17.8%	16.4%
Beuvron à St James	1.5%	-18.6%	13.2%
See à Tirepiéd	1.7%	-14.6%	39.8%
Braize à Lolif	3.2%	-15.7%	37.9%

Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2055 (2041-2070)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-20.9%	-42.6%	19.4%
Selune aval à Ducey	-9.1%	-26.9%	11.6%
Thar à Jullouville	-8.9%	-25.6%	30.6%
Oir à Ducey	-8.2%	-27.5%	20.4%
Sélune à Vezins	-8.1%	-27.9%	12.4%
Sélune à Virey	-7.7%	-25.6%	13.3%
Beuvron à St Senier	-2.1%	-20.4%	18.5%
Sée à Charence	-2.0%	-22.5%	22.7%
See à Tirepiéd	-0.1%	-16.7%	39.8%
Airon à Landivy	0.3%	-17.8%	16.4%
Braize à Lolif	1.5%	-17.2%	37.9%
Beuvron à St James	1.7%	-18.6%	13.2%

RCP4.5 à l'horizon 2050 (2035-2065)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-14.1%	-37.2%	29.1%
Selune aval à Ducey	-3.7%	-25.2%	10.3%
Sélune à Virey	-3.3%	-25.1%	10.7%
Thar à Jullouville	-2.8%	-15.6%	20.7%
Oir à Ducey	-2.8%	-21.0%	18.0%
Sélune à Vezins	-2.7%	-25.2%	9.6%
Sée à Charence	3.1%	-19.3%	26.7%
Beuvron à St Senier	3.2%	-15.5%	16.0%
Airon à Landivy	4.9%	-15.5%	13.9%
See à Tirepiéd	5.1%	-16.2%	23.4%
Braize à Lolif	5.5%	-6.7%	24.8%
Beuvron à St James	6.4%	-17.2%	14.5%

RCP8.5 à l'horizon 2050 (2035-2065)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-16.9%	-37.2%	31.3%
Sélune à Virey	-4.1%	-19.6%	24.8%
Sélune à Vezins	-3.7%	-20.1%	26.4%
Selune aval à Ducey	-3.5%	-19.8%	31.4%
Oir à Ducey	-3.4%	-16.5%	36.4%
Thar à Jullouville	-2.5%	-26.8%	43.0%
Sée à Charence	1.9%	-21.8%	34.9%
Airon à Landivy	2.5%	-12.3%	27.0%
See à Tirepiéd	4.3%	-14.6%	43.9%
Beuvron à St Senier	4.7%	-16.6%	48.6%
Braize à Lolif	5.7%	-15.6%	47.7%
Beuvron à St James	6.0%	-16.8%	35.0%

Tous scénarios climatiques confondus à l'horizon 2050 (2035-2065)	Moyenne	Min	Max
Sélune à Notre-Dame-du-Touchet	-15.5%	-37.2%	31.3%
Sélune à Virey	-3.7%	-25.1%	24.8%
Selune aval à Ducey	-3.6%	-25.2%	31.4%
Sélune à Vezins	-3.2%	-25.2%	26.4%
Oir à Ducey	-3.1%	-21.0%	36.4%
Thar à Jullouville	-2.6%	-26.8%	43.0%
Sée à Charence	2.5%	-21.8%	34.9%
Airon à Landivy	3.7%	-15.5%	27.0%
Beuvron à St Senier	4.0%	-16.6%	48.6%
See à Tirepiéd	4.7%	-16.2%	43.9%
Braize à Lolif	5.6%	-15.6%	47.7%
Beuvron à St James	6.2%	-17.2%	35.0%



**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 Normandie

7, rue Andreï Sakharov

76130 – Mont Saint Aignan - France

Tél. : 02 35 60 12 00

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm