

Etude sur la gestion quantitative des ressources en eau du bassin Sarthe amont et élaboration de programmes d'actions dans le cadre de la révision du SAGE

**Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique**



## CONSULTING

SAFEGE  
Parc de L'Île  
15-27, Rue du Port  
92022 NANTERRE cedex

SAFEGE SAS - SIÈGE SOCIAL  
Parc de l'Île - 15/27 rue du Port  
92022 NANTERRE CEDEX  
[www.safege.com](http://www.safege.com)

**Maître d'ouvrage** : Syndicat du bassin de la Sarthe

**Numéro du projet** : 20NHF015

**Intitulé du projet** : Etude sur la gestion quantitative des ressources en eau du bassin Sarthe amont et élaboration de programmes d'actions dans le cadre de la révision du SAGE

**Intitulé du rapport** : Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

Version	Rédacteur	Vérificateur	Date d'envoi	Commentaires
V 1.0	Raphaël ZYLBERMAN	Max MENTHA	23/09/2022	Version initiale

# SOMMAIRE

<b>1.....</b>	<b>PREAMBULE .....</b>	<b>8</b>
1.1	Contexte de l'étude .....	8
1.2	Périmètre de l'étude .....	9
1.3	Objectifs visés.....	10
1.4	Déroulement de la mission.....	11
<b>2.....</b>	<b>DEFINITIONS PREALABLES.....</b>	<b>12</b>
<b>3.....</b>	<b>OBJECTIFS ET METHODES DU VOLET CLIMAT .....</b>	<b>17</b>
<b>4.....</b>	<b>ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES PERSPECTIVES D'EVOLUTION DU CLIMAT ET DE LA RESSOURCE EN EAU .....</b>	<b>18</b>
4.1	Etude Explore 2070 (2010-2012).....	19
4.1.1	Climat et Hydrologie de surface.....	20
4.1.2	Perspectives pour l'hydrogéologie.....	22
4.2	Évolution du cycle hydrologique continental sur la France (thèse de Gildas Dayon, 2015).....	23
4.3	Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne .....	26
4.3.1	Disponibilité en eaux superficielles.....	27
4.3.2	Bilan hydrique des sols en fin d'été .....	28
4.3.3	Biodiversité des milieux aquatiques et niveau trophique .....	29
4.4	Etude ICC-Hydroqual .....	30
4.4.1	Perspectives climatiques .....	30
4.4.2	Perspectives pour l'hydrologie de surface .....	31
4.5	Etude de l'université de Tours sur la température des cours d'eau du bassin de la Loire.....	31
4.6	Ressources à venir .....	32
4.6.1	Explore 2 .....	32

4.6.2	Projet Life Eau&Climat et portail DRIAS-Eau .....	32
<b>4.7</b>	<b>Synthèse .....</b>	<b>33</b>
<b>5.....</b>	<b>ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2050 .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Données climatiques considérées.....</b>	<b>34</b>
5.1.1	Sélection des données climatiques .....	34
5.1.2	Acquisition des données climatiques.....	35
5.1.3	Précautions d'utilisation et d'interprétation .....	36
<b>5.2</b>	<b>Perspectives d'évolution du climat.....</b>	<b>39</b>
5.2.1	Evolution des précipitations.....	39
5.2.2	Evolution de l'ETP .....	42
5.2.3	Evolution des sécheresses agricoles.....	43
<b>5.3</b>	<b>Synthèse sur l'évolution du climat .....</b>	<b>46</b>
<b>6.....</b>	<b>MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU A L'HORIZON 2050 .....</b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>L'Hoëne.....</b>	<b>48</b>
6.1.1	Scénario tendanciel bas .....	48
6.1.1	Scénario tendanciel haut.....	50
<b>6.2</b>	<b>La Sarthe amont .....</b>	<b>52</b>
6.2.1	Scénario tendanciel bas .....	52
6.2.1	Scénario tendanciel haut.....	54
<b>6.3</b>	<b>L'Ornette .....</b>	<b>56</b>
6.3.1	Scénario tendanciel bas .....	56
6.3.1	Scénario tendanciel haut.....	59
<b>6.4</b>	<b>Le Merdereau.....</b>	<b>62</b>
6.4.1	Scénario tendanciel bas .....	62
6.4.1	Scénario tendanciel haut.....	65
<b>6.5</b>	<b>La Vaudelle .....</b>	<b>68</b>
6.5.1	Scénario tendanciel bas .....	68
6.5.1	Scénario tendanciel haut.....	71

<b>6.6 L'Orthe</b>	<b>74</b>
6.6.1 Scénario tendanciel bas	74
6.6.1 Scénario tendanciel haut	77
<b>6.7 La Bienne</b>	<b>80</b>
6.7.1 Scénario tendanciel bas	80
6.7.1 Scénario tendanciel haut	83
<b>6.8 L'Orne Saosnoise</b>	<b>86</b>
6.8.1 Scénario tendanciel bas	87
6.8.1 Scénario tendanciel haut	89
<b>6.9 La Sarthe intermédiaire</b>	<b>91</b>
6.9.1 Scénario tendanciel bas	91
6.9.2 Scénario tendanciel haut	93
<b>6.10 Synthèse de la modélisation de l'évolution de la ressource en eau</b>	<b>95</b>
<b>7.....ANNEXES</b>	<b>98</b>
<b>7.1 Annexe 1 : Scénarios climatiques du GIEC</b>	<b>98</b>
7.1.1 Scénarios SRES (AR4)	98
7.1.2 Scénarios RCP (AR5)	99
7.1.3 Scénarios SSP (AR6)	101
<b>7.2 Annexe 2 : Explore 2070 – Fiches des stations hydrométriques sur le périmètre de l'étude HMUC de la Creuse</b>	<b>102</b>
<b>7.3 Annexe 3 : Analyse des modèles climatiques</b>	<b>106</b>
7.3.1 Eléments introductifs	106
7.3.2 Problématique de la descente d'échelle et de la correction de biais	108
7.3.3 CMIP – Modélisation climatique globale	112
7.3.4 CORDEX – Modélisation climatique régionalisée	112
7.3.5 DRIAS – Modélisation climatique régionalisée pour la France	113
<b>7.4 Annexe 4 : Indice de sécheresse en termes d'humidité du sol</b>	<b>114</b>
<b>7.5 Annexe 5 : Scénarios d'évolution des usages à l'horizon 2050</b>	<b>115</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Périmètre de l'étude HMUC (Source : SbS, IGN, SUEZ Consulting 2019) .....	10
Figure 2 : Exemple de représentation graphique du débit moyen journalier, du débit moyens mensuel et du module d'un cours d'eau sur une année donnée .....	13
Figure 3 : Exemple de représentation graphique du VCN30 et du QMNA d'un cours d'eau donné sur une année donnée .....	16
Figure 4 : Représentation schématique du niveau piézométrique dans un contexte de nappe libre (gauche) et de nappe captive (droite) .....	16
Figure 5 : Evolutions relatives possibles (en %) du Qjxa10 (a), du module (b) et du QMNA5 (c) entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations. (Source : Explore 2070).....	21
Figure 6 : Evolution de la recharge de nappe (source : Explore 2070) .....	22
Figure 7 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015).....	25
Figure 8 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit mensuel minimal d'une période de retour de 5 ans (QMNA5, %) pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit mensuel minimal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égale au QMNA5 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. (Source : Dayon 2015).....	26
Figure 9 : Projections d'évolution du QMNA2 sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) .....	27
Figure 10 : Projections d'évolution du rapport $(1+\Delta ETP) / (1+\Delta PR)$ sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) .....	28
Figure 11 : (a) Méthode de calcul du score d'exposition ; (b) Projections d'évolution du score d'exposition de la biodiversité liée aux cours d'eau et du niveau trophique des eaux sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017) .....	29
Figure 12 Evolution de la (a) température atmosphérique moyenne mensuelle en °C, (b) des précipitations totales moyennes mensuelles (en %), (c) des précipitations solides (neige) moyennes mensuelles (en % - en gris là où aucune neige n'a été simulée) à l'horizon de mi-siècle (MS) et de fin de siècle (FS) par rapport à la période 1971-2000 (Source : Hydroqual 2010) .....	30
Figure 13 : Température moyenne interannuelle des cours d'eau superficiels simulée en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21 <sup>e</sup> siècle (2082-2099) .....	31
Figure 14 : Illustration des principales sources d'incertitudes des projections climatiques selon l'horizon considéré (Source : DRIAS) ...	37
Figure 15 : Evolution (%) des cumuls mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 .....	41
Figure 16 : Evolution (%) du nombre de jours de pluie mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 .....	41
Figure 17 : Evolution de l'ETP mensuelle moyenne entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059), selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 .....	43
Figure 18 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) (Source : DRIAS) pour le scénario RCP 4.5 .....	44
Figure 19 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) (Source : DRIAS) pour le scénario RCP 8.5 .....	45
Figure 20 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne – Scénario tendanciel bas .....	49
Figure 21 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne – Scénario tendanciel haut .....	51
Figure 22 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel bas .....	53
Figure 23 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel haut .....	55
Figure 24 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas .....	57
Figure 25 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas .....	58
Figure 26 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut .....	60
Figure 27 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut .....	61
Figure 28 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas .....	63

Figure 29 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas.....	64
Figure 30 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut .....	66
Figure 31 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut .....	67
Figure 32 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas .....	69
Figure 33 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas.....	70
Figure 34 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut .....	72
Figure 35 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut .....	73
Figure 36 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas .....	75
Figure 37 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas .....	76
Figure 38 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut .....	78
Figure 39 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut .....	79
Figure 40 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas .....	81
Figure 41 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas .....	82
Figure 42 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut .....	84
Figure 43 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut .....	85
Figure 44 : Comparaison des chroniques de débits désinfluencés modélisés à l'aide des données météorologiques DRIAS d'après le scénario d'émission RCP8.5 et observés.....	86
Figure 45 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel bas .....	88
Figure 46 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel haut .....	90
Figure 47 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel bas.....	92
Figure 48 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel haut .....	94
Figure 49 : Scénarios SRES - Principales hypothèses prises pour les différents scénarios (Source : Portail DRIAS) .....	98
Figure 50 : Comparaison des évolutions du forçage radiatif associé aux différents scénarios climatiques .....	100
Figure 51 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (Source : Rapport de synthèse de l'AR5 du GIEC) .....	100
Figure 52 : Émissions de dioxyde de carbone (CO2) selon les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP) (Source : Rapport de synthèse à l'attention des décideurs, AR6 du GIEC).....	101
Figure 53 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton) .....	106
Figure 54 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé, 2014)) .....	108
Figure 55 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé, 2014)) .....	109
Figure 56 : Mise en perspective des résultats par saison des différents modèles climatiques disponibles sur le portail DRIAS (Source : DRIAS - Note d'aide à la sélection des modèles pour le scénario d'émission RCP4.5) .....	114

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation du périmètre SAGE de la Sarthe amont. ....	9
Tableau 2 : Etudes et projets pour l'analyse bibliographique des perspectives d'évolution de la ressource en eau sur le bassin de la Sarthe Amont.....	18
Tableau 3 : Evolution du cumul annuel moyen entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.....	40
Tableau 4 : Evolution du nombre de jours de pluie annuel moyen entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.....	40
Tableau 5 : Evapotranspiration potentielle moyenne pour les périodes de référence et futur. Ecart relatif entre les deux périodes, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. ....	42
Tableau 6 : Synthèse sur l'évolution du climat (Sources : DRIAS, SUEZ Consulting) .....	46
Tableau 7 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne - Scénario tendanciel bas.....	48
Tableau 8 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne - Scénario tendanciel haut .....	50
Tableau 9 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel bas .....	52
Tableau 10 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel haut .....	54
Tableau 11 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas ...	56
Tableau 12 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut ..	59
Tableau 13 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas .....	62
Tableau 14 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut .....	65
Tableau 15 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas .	68
Tableau 16 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut	71
Tableau 17 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas .....	74
Tableau 18 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut .....	77
Tableau 19 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas .....	80
Tableau 20 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut .....	83
Tableau 21 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel bas .....	87
Tableau 22 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel haut .....	89
Tableau 23 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel bas .....	91
Tableau 24 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel haut .....	93
Tableau 25 : Synthèse des évolutions de débit liées au changement climatique et aux usages à l'horizon 2050 selon le scénario tendanciel bas .....	96
Tableau 26 : Synthèse des évolutions de débit liées au changement climatique et aux usages à l'horizon 2050 selon le scénario tendanciel haut .....	97
Tableau 27 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010) .....	110
Tableau 28 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (DRIAS)).....	111
Tableau 29 : Tableau 30 : Scénarios d'évolution d'usages à l'horizon 2050 employés dans le cadre du volet « Usages ».....	115

## 1 PREAMBULE

### 1.1 Contexte de l'étude

Le principal cadre réglementaire de la gestion quantitative est donné par le chapitre 7 du SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021, qui pose la maîtrise des prélèvements en eau comme un élément essentiel à la reconquête du bon état des cours d'eau et à la préservation des écosystèmes qui leur sont liés, dans un contexte de changement climatique.

Ainsi, la gestion de la ressource en période d'étiage repose en grande partie sur la fixation d'objectifs aux points nodaux (disposition 7A-1), que ce soit pour les rivières ou les nappes souterraines, portant d'une part sur l'équilibre entre la ressource et les besoins et d'autre part sur la gestion de crise.

D'autre part, un rôle particulier est donné dans ce chapitre aux SAGE, qui peuvent, sur la base d'une analyse des conditions hydrologiques, des milieux, des usages et du changement climatique (dite analyse « H.M.U.C ») propre à leur territoire, effectuée et validée au sein de la Commission Locale de l'Eau, proposer des ajustements à certaines dispositions du SDAGE, en particulier :

- ▶ Ajuster les débits et/ou les niveaux d'objectifs d'étiage et définir les conditions de prélèvements mieux adaptées à leur territoire (disposition 7A-2),
- ▶ En fonction des caractéristiques hydrologiques de leur territoire, proposer au préfet de retenir une période de référence différente pour l'étiage, période qui sera prise en compte pour la délivrance des autorisations de prélèvements à l'étiage et la mise en place des mesures de gestion de crise (disposition 7B-1).

Le SAGE Sarthe amont est soumis à la disposition 7B-2 qui permet une augmentation limitée des prélèvements à l'étiage sans excéder la lame d'eau du SDAGE fixée à 0.15 mm au point nodal Sr2 (Neuville-Souillé). Le SAGE peut ajuster ce plafond au moyen d'une HMUC.

Dans le cadre de la révision du SAGE Sarthe amont, la Commission Locale de l'Eau a estimé nécessaire d'élargir les connaissances acquises lors d'une première étude de détermination des débits de référence datant de 2015. Aussi cette nouvelle étude a pour objectifs principaux :

- D'étendre les connaissances de l'état quantitatif des eaux superficielles et des eaux souterraines sur la période 2000-2020 ;
- D'estimer le débit écologique au point nodal de la Sarthe amont à Souillé et proposer un débit objectif qui tiendrait compte du débit écologique et des besoins en aval identifiés dans l'étude volume prélevable du SAGE Sarthe aval ;
- De disposer de données factuelles comme des volumes prélevables pour prendre en compte l'enjeu quantitatif ;
- De proposer de nouvelles règles ou dispositions dans le SAGE.

L'étude de détermination des débits de référence de 2015 a identifié des secteurs en tension sur le bassin de la Sarthe amont, notamment la partie ornaise et le sous-bassin de la Bienne. Les tensions identifiées sur la partie ornaise sont générées par les prélèvements en eau potable sur le cours d'eau de la Sarthe. Le sous-bassin versant de la Bienne connaît des périodes difficiles d'un point de vue quantitatif, notamment au mois d'août, où l'irrigation agricole et la sur évaporation des plans d'eau sont importants.

Enfin, l'étude actuelle intègre de nouveaux sous bassins du périmètre SAGE Sarthe amont sur lesquels une analyse de la disponibilité des ressources est réalisée en plus de celle sur les 5 unités de gestion définies en 2015.

Aussi, cette nouvelle étude se doit de répondre aux nouveaux objectifs suivants :

- ▶ Estimer le débit écologique sur le bassin de la Bienne dans le but d'affiner les débits seuils réglementaires et les volumes prélevables proposés dans la précédente étude ;
- ▶ Réaliser un bilan de l'état quantitatif sur 4 nouveaux sous-bassins versant de la Sarthe amont : l'Hoëne, l'Orthe, le Merdereau et l'Ornette.

## 1.2 Périmètre de l'étude

Le périmètre de l'étude est celui du SAGE de la Sarthe Amont, défini par arrêté préfectoral le 28 février 2002. Un descriptif du territoire est présenté dans le Tableau 1.

**Tableau 1: Présentation du périmètre SAGE de la Sarthe amont.**

Carte d'identité du bassin de la Sarthe Amont	
Organisation administrative	Deux régions concernées : Pays de la Loire et Normandie Trois départements concernés : Sarthe, Orne et Mayenne 238 communes
Superficie	2 882 km <sup>2</sup> - de sa source à la confluence avec l'Huisne au Mans
Réseau hydrographique	2 675 km de linéaire cumulé de cours d'eau Principaux affluents de la Sarthe : La Tanche, la Vézone, la Briante, le Sarthon, l'Ornette, le Merdereau, la Vaudelle, l'Orthe, la Longuève, l'Autonnière, l'Hoëne, l'Erine, le Rosay-Nord, la Bienne et l'Orne Saosnoise.

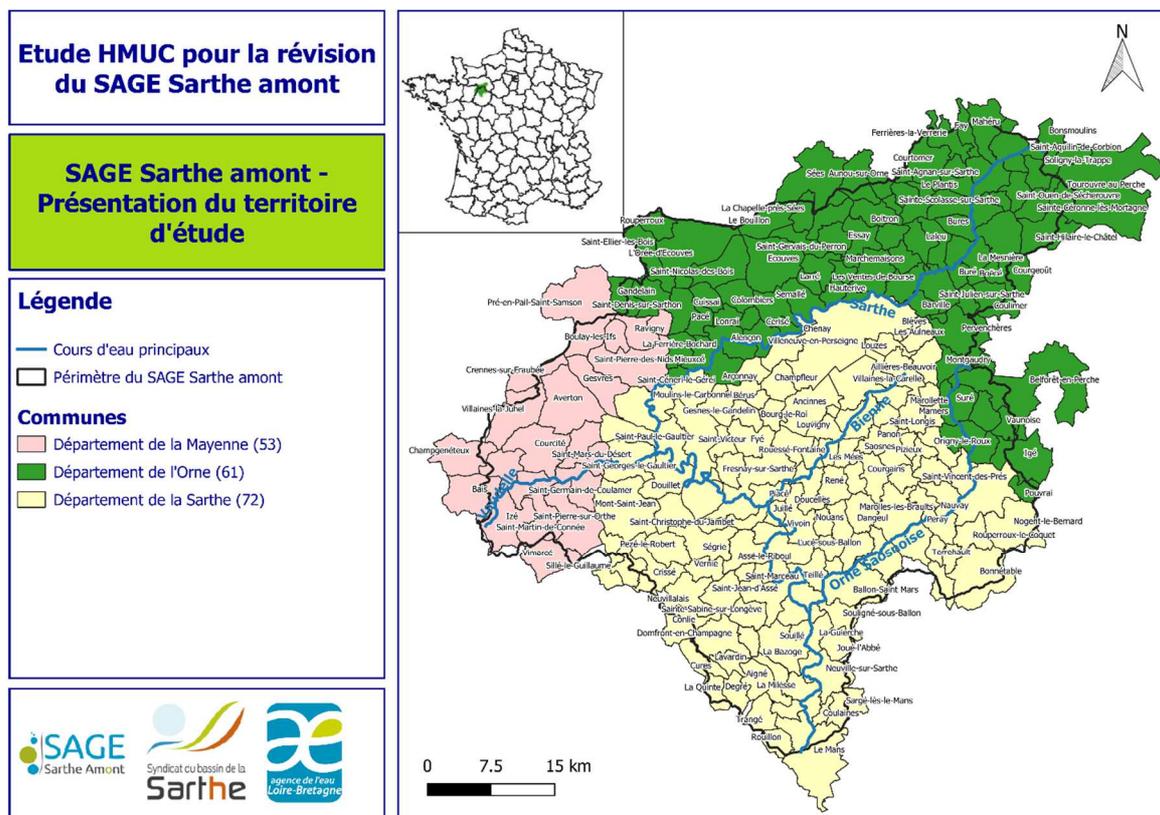


Figure 1 : Périmètre de l'étude HMUC (Source : Sbs, IGN, SUEZ Consulting 2019)

### 1.3 Objectifs visés

L'étude détaille le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin, et s'intéresse particulièrement aux relations nappes-rivières et **aux usages** (plans d'eau, prélèvements, ...). Elle définit des débits biologiques, qui intègrent le débit minimum d'une rivière pour garantir la vie, la circulation et la reproduction des espèces y vivant. Ces débits minimums sont établis en étiage et en période hivernale. Ces débits doivent être comparés aux débits statistiques et notamment au QMNA5.

L'étude devra répondre aux **objectifs suivants** :

- ▶ **Synthétiser, actualiser et compléter les connaissances** et analyses déjà disponibles sur le bassin versant de la Sarthe amont, au regard des 4 volets « H.M.U.C. » ;
- ▶ **Rapprocher et croiser les 4 volets « H.M.U.C. »** afin d'établir un diagnostic hydrologique permettant de caractériser la nature et les causes des assècs relevés sur le bassin ;
- ▶ **Elaborer des propositions d'actions** pour une gestion équilibrée et durable des ressources en eau dans un contexte de changement climatique ;
- ▶ En fonction des résultats, proposer et permettre un choix explicite de la CLE sur les **adaptations possibles à apporter aux dispositions du SDAGE** (suivi hydrologique, conditions estivales de prélèvement, valeurs de DOE/DSA/DCR, etc.).

## **1.4 Déroulement de la mission**

L'étude se décompose en **3 phases** :

### **❖ Phase 1 : Etat des lieux / Synthèse et actualisation des données**

- **Objectif 1** : Appréhender le fonctionnement des différents cours d'eau et nappes souterraines du périmètre du SAGE ;
- **Objectif 2** : Disposer de mesures in situ pour identifier le débit écologique de cours d'eau ;
- **Objectif 3** : Connaître les prélèvements et rejets réalisés sur le périmètre du SAGE, en leur appliquant individuellement un degré d'incertitude ;
- **Objectif 4** : Connaître l'état des ressources sans les prélèvements, et le cas échéant les rejets, afin d'identifier par unités de gestion (superficielles et souterraines) leur fonctionnement sans activités anthropiques, tout en apportant des degrés d'incertitudes ;
- **Objectif 5** : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique ;

### **❖ Phase 2 : Diagnostic**

- **Objectif 6** : Connaître l'état des ressources (souterraines ou superficielles) et caractériser les secteurs sous tension ;
- **Objectif 7** : Affiner les débits seuils superficiels réglementaires proposés dans le cadre de la précédente étude ;
- **Objectif 8** : Définir des volumes d'eaux superficielles (ou souterraines en lien avec ces dernières) prélevables par usage et par période ;

### **❖ Phase 3 : Proposition d'actions**

- **Objectif 9** : Disposer de recommandations pour réaliser des économies d'eau

**Le présent document constitue le rapport du volet « Climat » de la Phase 1 – Objectif 5.**

**L'objectif de ce volet est :**

- ⇒ **D'identifier les perspectives d'évolution du climat et ses conséquences sur la ressource en eau à l'horizon 2050**
- ⇒ **De caractériser l'évolution de la ressource pour différents usages au même horizon**

## 2 DEFINITIONS PREALABLES<sup>1</sup>

- ❖ **Evapotranspiration potentielle (ETP) :** Quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré. Elle s'exprime en hauteur d'eau.
- ❖ **Précipitations nettes théoriques :** Soustraction des précipitations par l'ETP.
- ❖ **Débit :** Volume d'eau qui traverse une section donnée d'un cours d'eau dans un laps de temps déterminé.
- ❖ **Débit spécifique :** Débit divisé par la superficie du bassin versant drainé. Ce type de donnée permet de comparer le comportement hydrologique de cours d'eau de différents ampieurs.
- ❖ **Débit de base :** Part du débit total d'un cours d'eau provenant du compartiment souterrain. L'autre composante du débit total est le débit ruisselé.
- ❖ **Module : Débit moyen interannuel**

Le module est la **moyenne des débits moyens annuels** calculés sur une année hydrologique et sur l'ensemble de la période d'observation de la station. Ce débit donne une indication sur le volume annuel moyen écoulé et donc sur la disponibilité globale de la ressource d'un bassin versant. Il doit être calculé sur une période d'observations suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués.

Il a valeur de référence réglementaire, notamment dans le cadre de l'article L214-18 du code de l'environnement et de sa circulaire d'application du 5 juillet 2011 fixant au dixième du module désinfluencé la valeur plancher du débit à laisser en aval d'un ouvrage dans le lit d'un cours d'eau.

- ❖ **Débit moyen mensuel (QMM) :** Moyenne, pour un mois donné, des débits moyens journaliers mesurés

---

<sup>1</sup> Sources :

- <http://www.glossaire-eau.fr/>
- Claire Lang Delus, « Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires », Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 571, mis en ligne le 30 novembre 2011 ;
- OFB et Ministère chargé de l'environnement
- SDAGE Loire-Bretagne 2016-2021

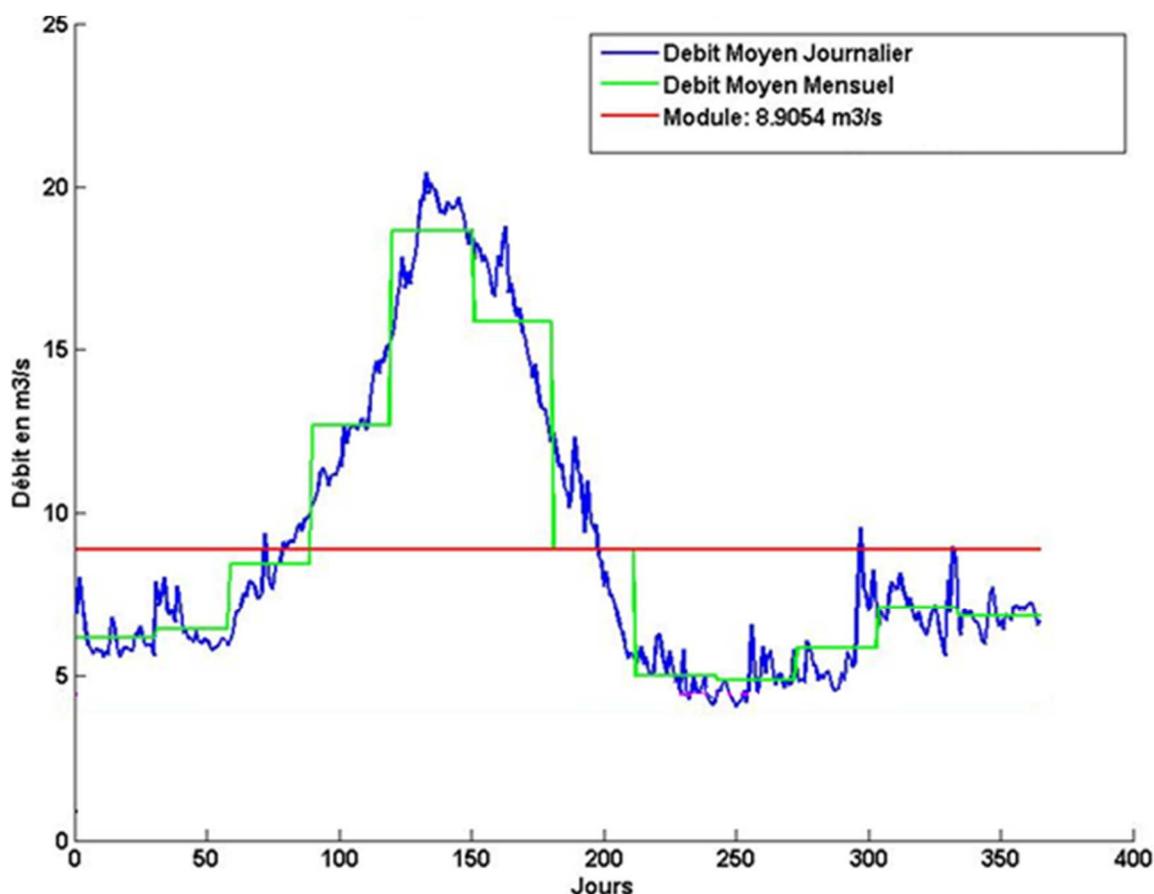


Figure 2 : Exemple de représentation graphique du débit moyen journalier, du débit moyens mensuel et du module d'un cours d'eau sur une année donnée

#### ❖ Basses eaux

Écoulement ou niveau d'eau le plus faible de l'année, mesuré par la hauteur d'eau ou le débit. Durant une période de basses eaux ou d'étiage, le cours d'eau n'occupe que son lit mineur. La période des basses eaux correspond à la période où le débit du cours d'eau est inférieur à son module.

#### ❖ Etiage

Une certaine ambiguïté subsiste quant à la définition du terme « étiage ». Ces dernières convergent toutefois vers les notions suivantes :

- Une période durant laquelle le débit du cours d'eau considéré est non seulement inférieur au module, mais, de plus, particulièrement bas. Cette période peut être identifiée comme étant celle durant laquelle le débit est inférieur à une valeur « seuil » calculée statistiquement selon des modalités choisies en fonction de la situation considérée ;
- Une période durant laquelle le niveau des nappes est également particulièrement bas ;
- Un événement qui n'est pas nécessairement exceptionnel. Ceci dépend de la sévérité de l'étiage, qui doit être caractérisée au moyen d'indicateurs statistiques appropriés ;
- Une période durant laquelle seules les nappes, en voie d'épuisement, contribuent au débit du cours d'eau (quasi-absence de pluie) ;

- Un événement qui se décrit non seulement par la valeur de débit non-dépassée, mais également par sa durée.

Quelle que soit la définition considérée, un étiage s'identifie, se caractérise et se délimite à l'aide d'au moins un indicateur nommé « débit caractéristique d'étiage ». Ce dernier peut se définir à partir de débits journaliers, de débits mensuels, ou encore de moyennes mobiles calculées sur plusieurs jours. Il est également possible de caractériser les étiages à partir d'un débit seuil, en comptabilisant le nombre de jours durant lesquels le débit journalier est inférieur à ce seuil.

Afin de pouvoir bien appréhender la complexité d'un étiage, il est préférable de s'appuyer sur une série de débits caractéristiques d'étiage différents, et non un seul. La définition des principaux types de débits caractéristiques d'étiage est détaillée ci-après.

### ❖ **QMNA : Débit moyen mensuel minimum de l'année**

Il s'agit de la variable usuellement employée par les services gestionnaires pour caractériser les étiages d'un cours d'eau. Il s'agit, pour une année donnée, du débit moyen mensuel (= moyenne des débits journaliers sur un mois) le plus bas de l'année.

### ❖ **QMNA5 : Débit d'étiage quinquennal**

Le QMNA5 correspond au débit moyen mensuel minimum de période de retour 5 ans, c'est-à-dire ayant une chance sur cinq de ne pas être dépassé pour une année donnée.

Le QMNA5 est également mentionné dans la circulaire du 3 août 2010 du ministère en charge de l'écologie (NOR : DEVO1020916C) : « Le débit de l'année quinquennale sèche correspond, en se référant aux débits des périodes de sécheresse constatés les années précédentes, à la valeur la plus faible qui risque d'être atteinte une année sur cinq. La probabilité d'avoir un débit supérieur à cette valeur est donc de quatre années sur cinq ». Le QMNA5, dont on peut considérer qu'il reflète indirectement un potentiel de dilution et un débit d'étiage typiques d'une année sèche, est utilisé dans le traitement des dossiers de rejet et de prélèvement en eau en fonction de la sensibilité des milieux concernés. Le QMNA5 sert en particulier de référence aux débits objectifs d'étiage (DOE - voir ce terme).

Le QMNA5 est une valeur réglementaire qui présente l'inconvénient d'être soumise à l'échelle calendaire. Les débits d'étiage peuvent en effet être observés durant une période chevauchant deux mois, induisant une surestimation du débit d'étiage par le QMNA. Pour cette raison, même si le QMNA5 reste une valeur réglementaire, l'évaluation des niveaux de débit en période d'étiage s'appuie préférentiellement sur des données journalières.

### ❖ **VCNd : Débit minimum de l'année calculé sur d jours consécutifs**

Les VCNd sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée « d ».

- Le **VCN3** permet de caractériser une situation d'étiage sévère sur une courte période (3 jours).
- Les **VCN7** et **VCN10** correspondent à des valeurs réglementaires dans de nombreux pays et sont très utilisés d'une manière générale dans les travaux portant sur les étiages.

Nota : Il est intéressant de comparer le QMNA au VCN30. Le VCN30 correspond à la moyenne mobile la plus faible de l'année calculée sur 30 jours consécutifs, car il se rapproche en termes de durée de l'échelle mensuelle. Ces deux grandeurs devraient être proches, mais dans certains contextes des écarts importants peuvent apparaître, notamment lors d'années pluvieuses et dans le cas de bassins imperméables qui ont une réponse rapide aux impulsions pluviométriques.

❖ **Débit mensuel interannuel quinquennal sec (QMNA5)**

Le débit mensuel interannuel quinquennal sec correspond pour un mois considéré, au débit mensuel qui a une probabilité de 4/5 d'être dépassé chaque année. Il permet de caractériser un mois calendaire de faible hydraulicité.

❖ **Débit d'étiage vs débit caractéristique d'étiage**

Un débit d'étiage consiste en une valeur caractérisant l'étiage d'un cours d'eau sur une période délimitée dans le temps. Exemples :

- Le QMNA de l'année 2010 correspond au débit mensuel (calendaire) le plus bas de l'année 2010 ;
- Le VCN10 de l'année 2011 correspond au plus bas débit calculé sur 10 jours consécutifs de l'année 2011.

Un débit caractéristique d'étiage consiste en une valeur issue d'une série de débits d'étiage et associée à une probabilité d'occurrence (ou fréquence). Exemples :

- Le VCN10 de période de retour 5 ans correspond au VCN 10 ayant une probabilité de 1/5 de ne pas être dépassé sur une année donnée ;
- Le QMNA5 correspond au QMNA ayant une probabilité de 1/5 de ne pas être dépassé sur une année donnée.

Dans le cadre de la présente étude, une gamme de débits caractéristiques d'étiage sera calculée en chaque point de référence :

- QMNA interannuel, QMNA2, QMNA5,
- Débits mensuels interannuels quinquennaux secs,
- VCN10 et VCN3 (annuel, biennal et quinquennal),
- 1/10ème module, 1/20ème module.

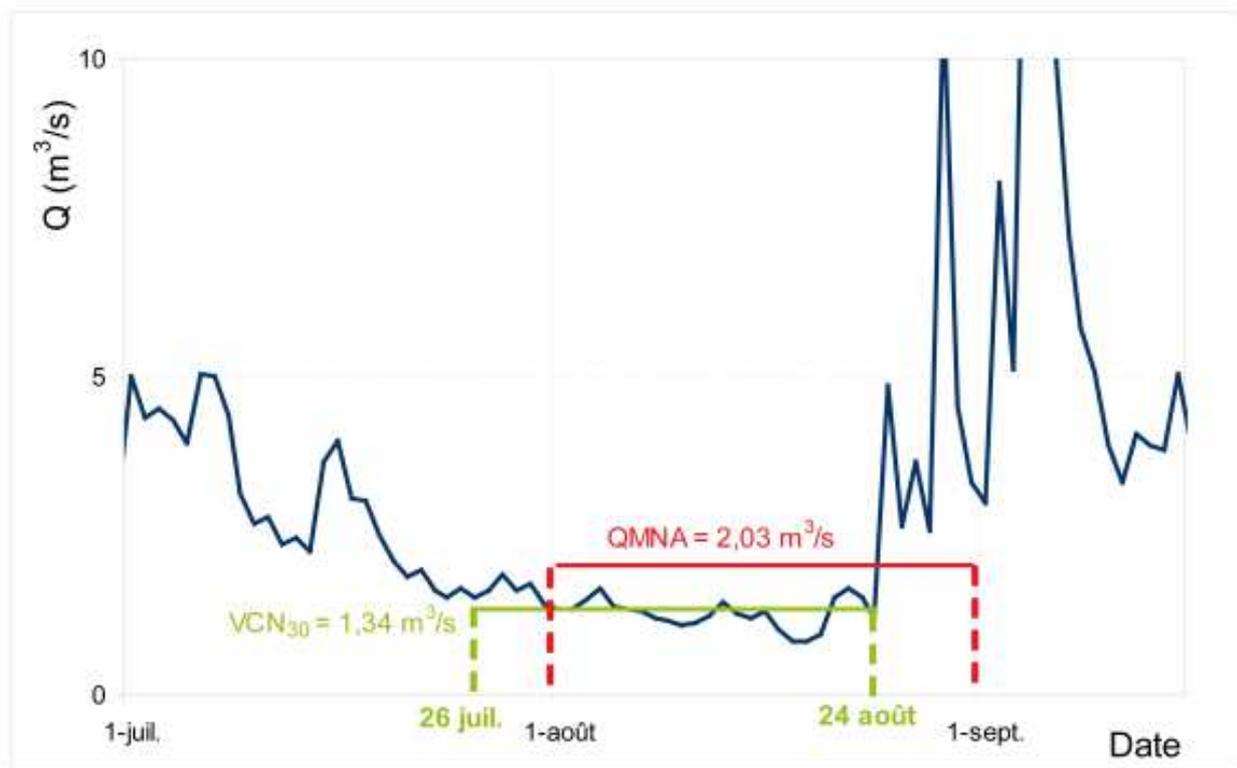


Figure 3 : Exemple de représentation graphique du VCN30 et du QMNA d'un cours d'eau donné sur une année donnée

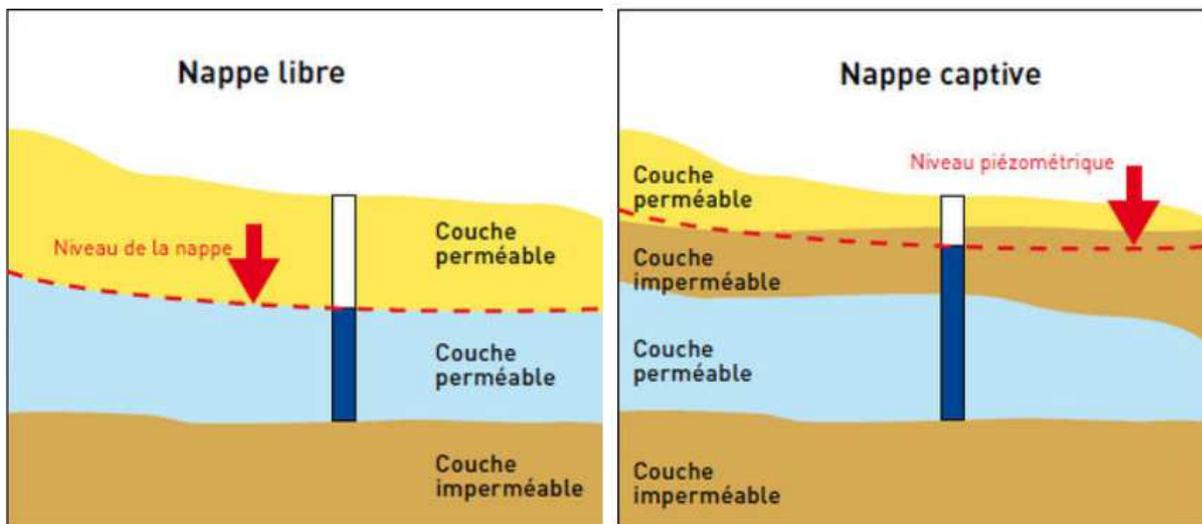


Figure 4 : Représentation schématique du niveau piézométrique dans un contexte de nappe libre (gauche) et de nappe captive (droite)

### **3 OBJECTIFS ET METHODES DU VOLET CLIMAT**

Les objectifs du volet climat sont les suivants :

- ▷ Restituer les perspectives d'évolution du climat et de la ressource en eau à partir des études les plus récentes, à l'échelle du périmètre d'étude ;
- ▷ Analyser l'évolution des paramètres climatiques directement à l'aide des données Météo France (plus précisément, issues du jeu de données de projection DRIAS-2020) à l'horizon 2050 ;
- ▷ Analyser l'évolution de la ressource en eau et des effets sur cette dernière du changement climatique et de l'évolution des usages (voir rapport du volet Usages) à l'horizon 2050, à l'aide du modèle construit et exploité dans le cadre du volet Hydrologie ;
- ▷ Réunir ces pôles d'analyses afin de conclure sur le risque de déficit hydrologique et l'évolution à venir des tensions quantitatives sur le territoire d'étude.

## 4 ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE DES PERSPECTIVES D'EVOLUTION DU CLIMAT ET DE LA RESSOURCE EN EAU

Plusieurs études et projets ont récemment permis de caractériser le changement climatique et ses effets sur l'hydrologie du bassin de la Sarthe Amont. Le Tableau 2 suivant présente les sources valorisées dans le cadre de cette analyse bibliographique.

**Tableau 2 : Etudes et projets pour l'analyse bibliographique des perspectives d'évolution de la ressource en eau sur le bassin de la Sarthe Amont**

Etude/Projet/Document	Porteurs du projet	Dates	Périodes	Périmètre	Paramètres
<b>Explore 2070</b>	Ministère de l'écologie	2010-2012	Référence : 1961-1990 Horizon : 2050 (2046-2065)	France entière	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits, Piézométrie
<b>Thèse Gildas Dayon</b>	Université Toulouse 3	2015	Référence : 1960-1990 Horizon : 2050 (2035-2065)	France entière	Précipitations, ETP, Ruissellement, Débits
<b>Plan d'Adaptation au Changement Climatique</b>	Agence de l'eau Loire-Bretagne	2018	Référence : 1961-1990 Horizon : 2055 (2046-2065)	Bassin Loire-Bretagne	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits (d'après les résultats d'Explore2070)
<b>ICC-Hydroqual</b>	Université de Tours	2010	Référence : 1971-2000 Horizons : 2050 et 2100	Bassin de la Loire en amont de Montjean	Température de l'air, ETP, Précipitations, Débits
<b>Etude sur la température des cours d'eau</b>	Université de Tours, OFB	2015	Référence : 1971-2000 Horizons : 2100	Bassin de la Loire en amont de Montjean	Température de l'eau des cours d'eau

Concernant les études Explore 2070 et ICC-Hydroqual présentées dans le tableau précédent, chacune d'entre elles s'appuie sur le scénario **A1B** de la gamme de scénarios **SRES** utilisée dans l'**AR4** du GIEC<sup>2</sup> (IPCC AR5

<sup>2</sup> Le GIEC est l'organisme qui fait référence en matière d'études sur le changement climatique. Il publie périodiquement (environ tous les 5 ans) des rapports d'évaluation traitant d'un large panel de questions relatives au changement climatique. Ces rapports portent l'acronyme AR (Assessment Report) suivi de leur numéro.

Synthesis Report 2014) : ce scénario privilégiait une réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique basé sur le schéma actuel et un équilibre des sources énergétiques.

Aujourd'hui, avec l'**AR5**, des scénarios climatiques plus récents sont disponibles ; les **scénarios RCP**. Néanmoins, les scénarios SRES restent, à l'échelle de la France, en concordance avec ces derniers, ce qui permet de comparer les anciennes études aux plus récentes. Jusqu'à l'horizon 2050, le scénario **SRES A1B** est très proche des scénarios **RCP 4.5 et 6.0**. Une explication des différents scénarios climatiques existants est fournie en Annexe 1 : Scénarios climatiques du GIEC.

## 4.1 Etude Explore 2070 (2010-2012)

Dans le cadre de l'étude Explore 2070<sup>3</sup> (Stollsteiner 2012), une analyse de l'évolution du climat et des débits du bassin de la Sarthe Amont a été réalisée aux stations suivantes :

- ▶ La Sarthe à Saint-Céneri-le-Gérei (1)
- ▶ L'Orne Saosnoise à Montbizot (2)
- ▶ La Sarthe à Neuville-sur-Sarthe (3)

Cette analyse compare, à l'aide de moyennes mensuelles interannuelles, deux horizons temporels. Elle s'appuie sur une approche multi-modèles (7 modèles climatiques, 1 ou 2 modèles hydrologiques), ce qui permet d'appréhender les incertitudes des projections et d'en évaluer la robustesse.

L'horizon de référence est la période 1961-1990, tandis que l'horizon futur auquel il est comparé est la période 2046-2065. Ces horizons étant distincts de celui considéré dans la présente étude (2050), il ne sera pas possible de réaliser des comparaisons directes avec ces résultats. Néanmoins, une analyse des tendances d'évolution pressenties par chacune des deux approches permettra de confronter ces dernières.

---

<sup>3</sup> Site pour les ressources Explore 2070 : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44> (consulté le 16/03/2022)

### 4.1.1 Climat et Hydrologie de surface

Les tableaux suivants présentent les principaux résultats au niveau des stations du périmètre d'étude.

On remarque une tendance à l'augmentation des contrastes de précipitations (diminution des minimums, augmentation des maximums et évolution nuancée des médianes de précipitations), une tendance à l'augmentation généralisée des températures et de l'ETP avec un accent particulier sur la fin d'été – début d'automne, et une tendance à la diminution des débits mensuels (moyens ou secs de période de retour 5 ans – QMNA5), particulièrement marquées en fin d'année calendaire (de septembre à décembre en moyenne) et légèrement marquée en période estivale. Les fiches détaillées de chaque station sont présentées en annexe 2 (p.102).

**Tableau 4 : Sarthe Amont - Synthèse des tendances d'évolution (valeurs médianes des simulations) des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration potentielle, des débits moyens et des débits moyens minimum quinquennal pour les stations de notre étude pour les 2 modèles hydrologique GR4J et ISBA-MODCOU (évolutions entre la période 1961-1990 et la période 2045-2065). Détails des résultats de modélisation en annexe 2.**

	1	2	3
<b>ΔP (%)</b>	Pour l'ensemble des stations, la moyenne annuelle subit une légère diminution (-3%), on peut remarquer un mois de mars plus humide (de l'ordre de +14%) et une période estivale (mai à septembre) plus sèche (de l'ordre de -20% sur la période)		
<b>ΔT (°C)</b>	Pour l'ensemble des stations, augmentation de +2,2°C à l'année, avec des mois de juillet et août plus marqués (+3°C) et un réchauffement minimal en décembre (+1,6°C)		
<b>ΔETP (%)</b>	Pour l'ensemble des stations, augmentation de +24% à l'année, avec la période septembre-décembre particulièrement marquée (jusqu'à +50% en octobre).		

		9	11	13
<b>ΔModule (%)</b>	GR4J	Pour l'ensemble des stations le modèle décrit une diminution annuelle des débits de l'ordre de -23% on dénote un fort déclin entre mai et novembre		
	ISBA	Pour l'ensemble des stations le modèle décrit une diminution annuelle des débits de l'ordre de -11% on dénote un fort déclin entre mai et novembre		
<b>ΔQMNA5 (%)</b>	GR4J	Pour l'ensemble des stations le modèle décrit une très forte diminution de l'ordre de -56%		
	ISBA	Pour l'ensemble des stations, le modèle décrit une légère diminution de l'ordre de -6%		

# Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

Les résultats d'Explore 2070 concernant les eaux superficielles, présentés sous forme de cartes (Figure 5), prévoient à l'horizon 2046-2065, **une diminution du débit annuel moyen comprise entre 20 et 30%**, une accentuation des étiages avec une baisse du QMNA5 allant de **20 à 40%** et une diminution possible des crues, avec une diminution du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) de **0 à 20%**, par rapport à la période de référence 1961-1990. L'étude montre également une hausse de la température de l'eau de +1,6°C à l'échelle de la France.

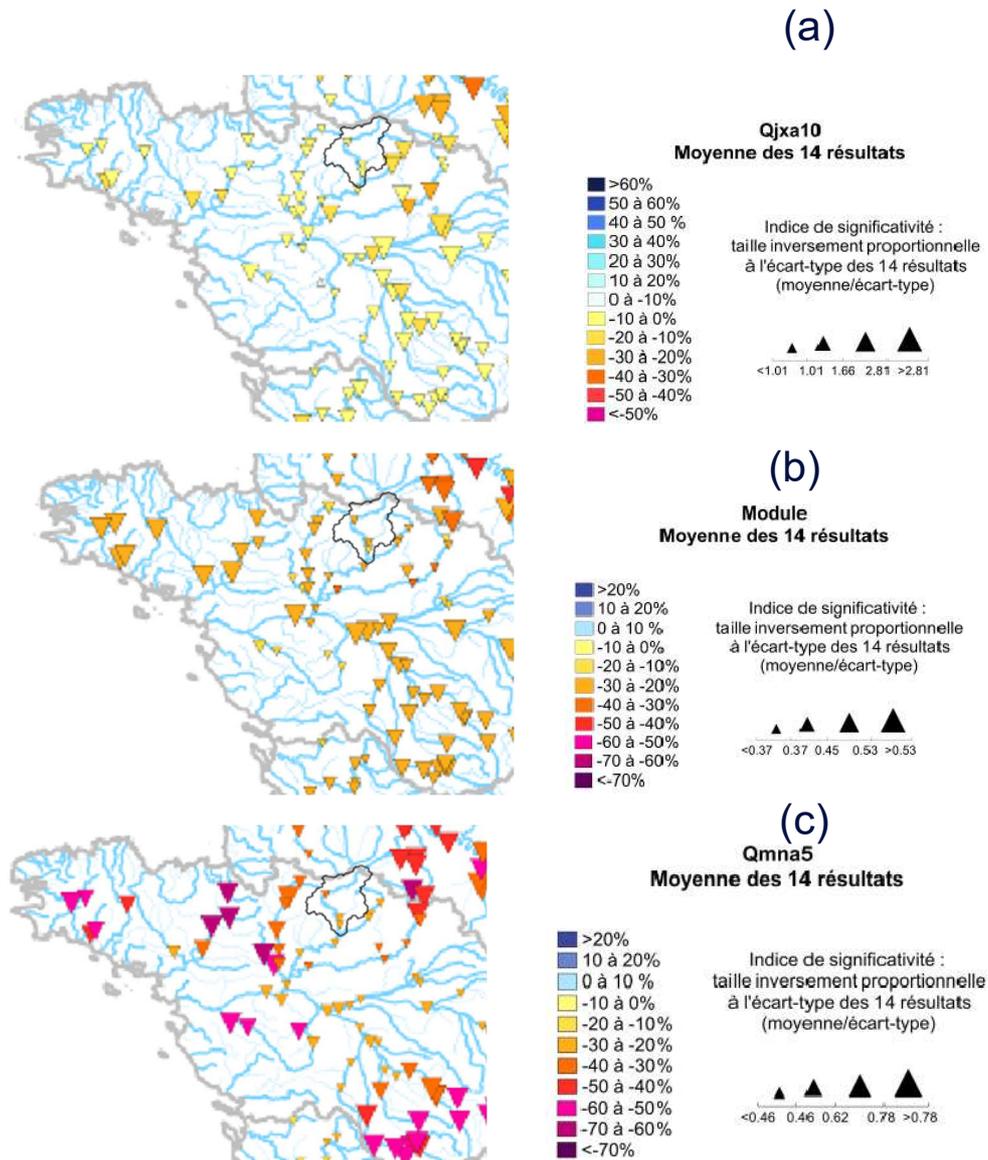


Figure 5 : Evolutions relatives possibles (en %) du Qjxa10 (a), du module (b) et du QMNA5 (c) entre 1961-90 et 2046-65. Résultats moyens établis sur 14 simulations (2 modèles hydrologiques et 7 modèles climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations. (Source : Explore 2070)

### 4.1.2 Perspectives pour l'hydrogéologie

Au cours de l'étude Explore 2070 rédigée en 2012 (Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie 2012b), l'évolution de la recharge des nappes a été évaluée. Afin de préciser les incertitudes dérivant des différents modèles climatiques utilisés dans le cadre de cette étude, il apparaît nécessaire de fournir non seulement la valeur moyenne obtenue par l'intermédiaire des sept modèles climatiques considérés dans l'étude Explore 2070, mais également les valeurs maximales et minimales des écarts évalués entre la recharge future et la recharge actuelle par chacun de ces modèles. Trois cartes sont ainsi proposées, afin de fournir une évaluation moyenne et des évaluations minimales et maximales.

Selon l'étude Explore 2070, la recharge de nappe sur le bassin versant de la Sarthe Amont devrait **diminuer de 20 à 30%** en moyenne entre la période 1961-1990 et la période 2045-2065 (Figure 6).

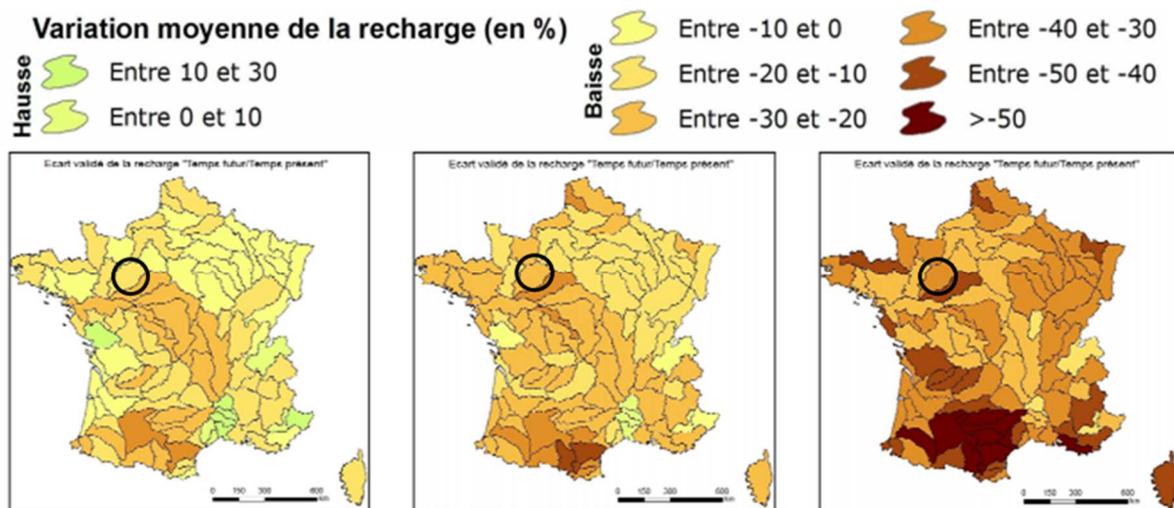
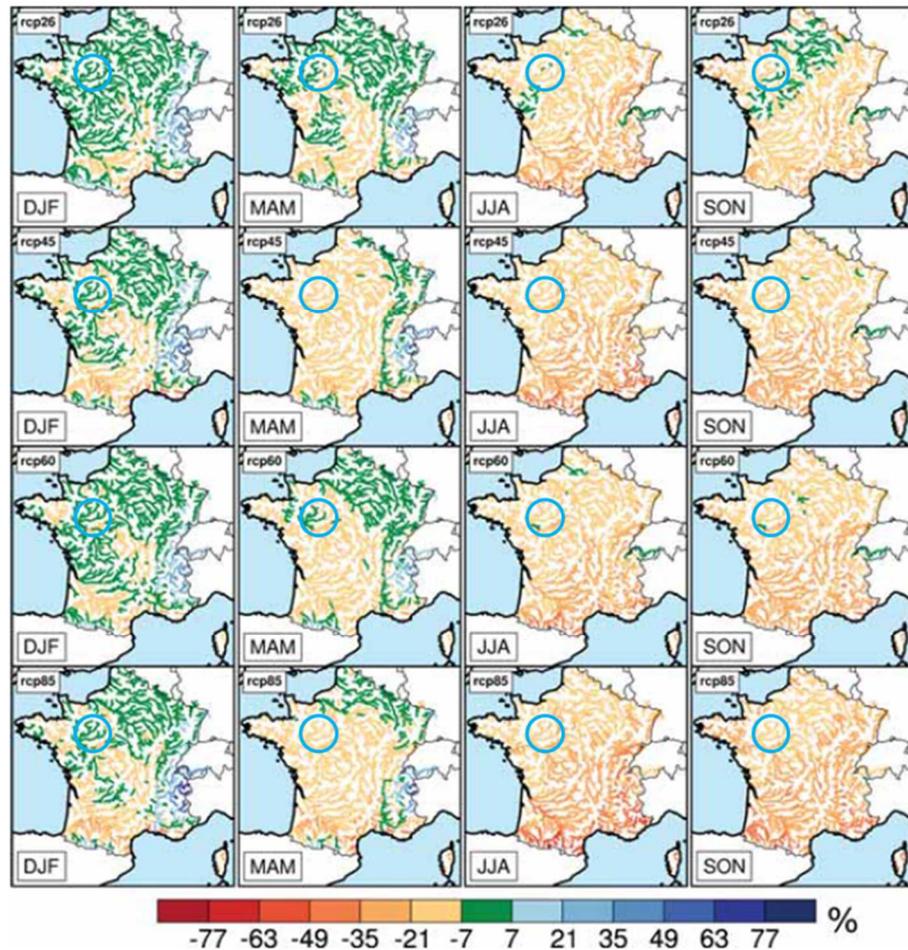


Figure 6 : Evolution de la recharge de nappe (source : Explore 2070)

## 4.2 Évolution du cycle hydrologique continental sur la France (thèse de Gildas Dayon, 2015)

Les travaux de thèse de Gildas Dayon (Dayon 2015) ont permis de modéliser à l'échelle de la France l'évolution probable des ressources en eau superficielles au travers du débit moyen et QMNA5. Selon cette



dernière, à l'horizon 2050 ( Figure 7,

## Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

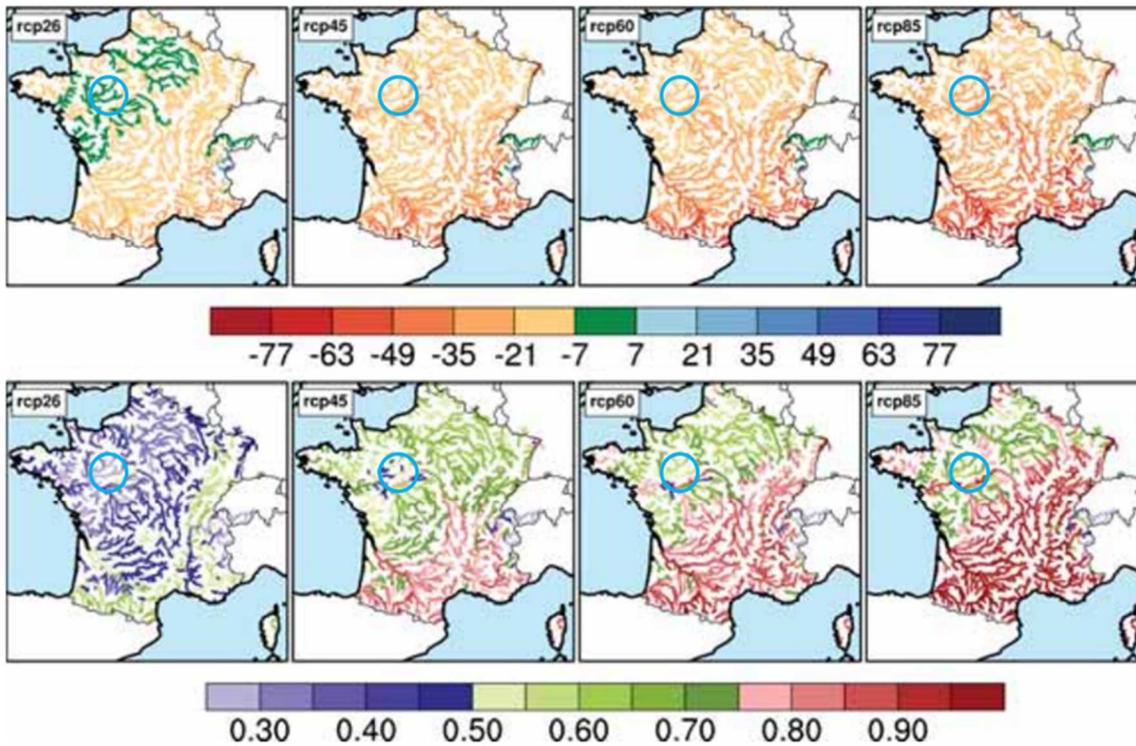


Figure 8) :

- ▶ Les débits hivernaux du bassin de la Sarthe Amont stagneront ou diminueront légèrement ;
- ▶ Les débits printaniers diminueront légèrement (jusqu'à -20%) et stagneront pour les scénarios RCP 2.6 et RCP 6.0;
- ▶ Les débits estivaux et automnaux diminueront plus fortement (jusqu'à -35%) ;
- ▶ Le QMNA5 du bassin de la Sarthe Amont stagne pour le scénario climatique le plus optimiste (RCP 2.6) et diminue pour les autres, jusqu'à -40% environ pour le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5).

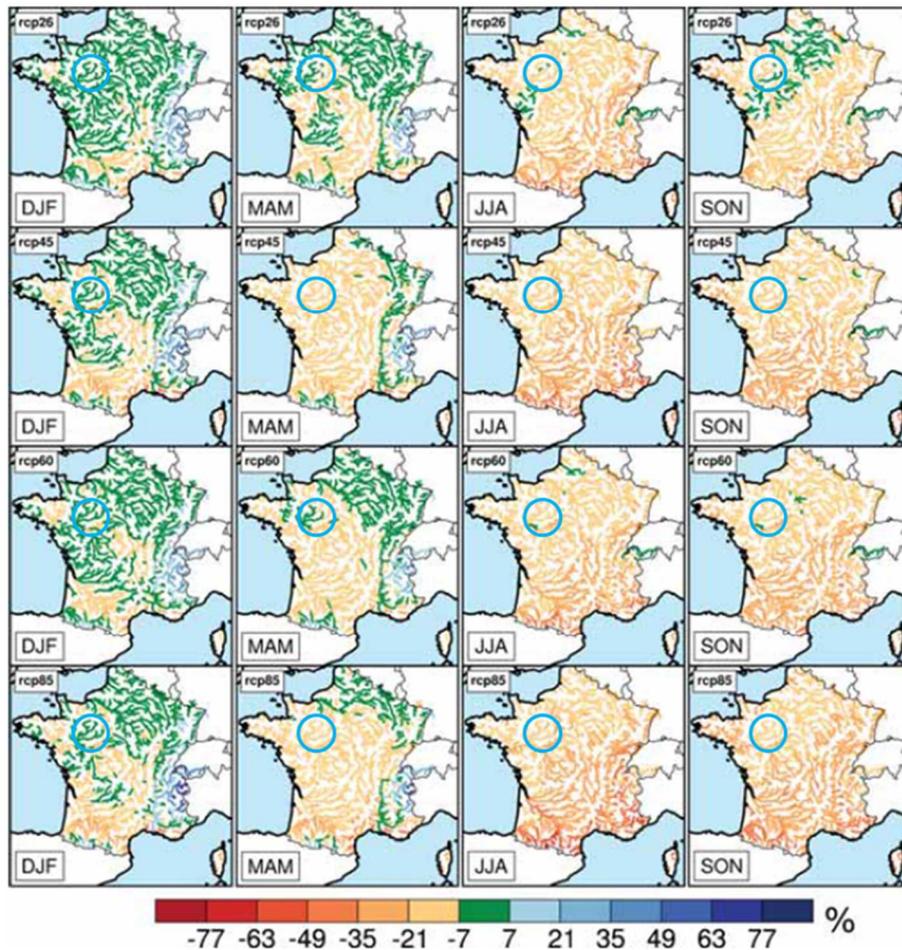


Figure 7 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle (2035-2065) relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet- Août SON : Septembre-Octobre-Novembre. Source : (Dayon, 2015)

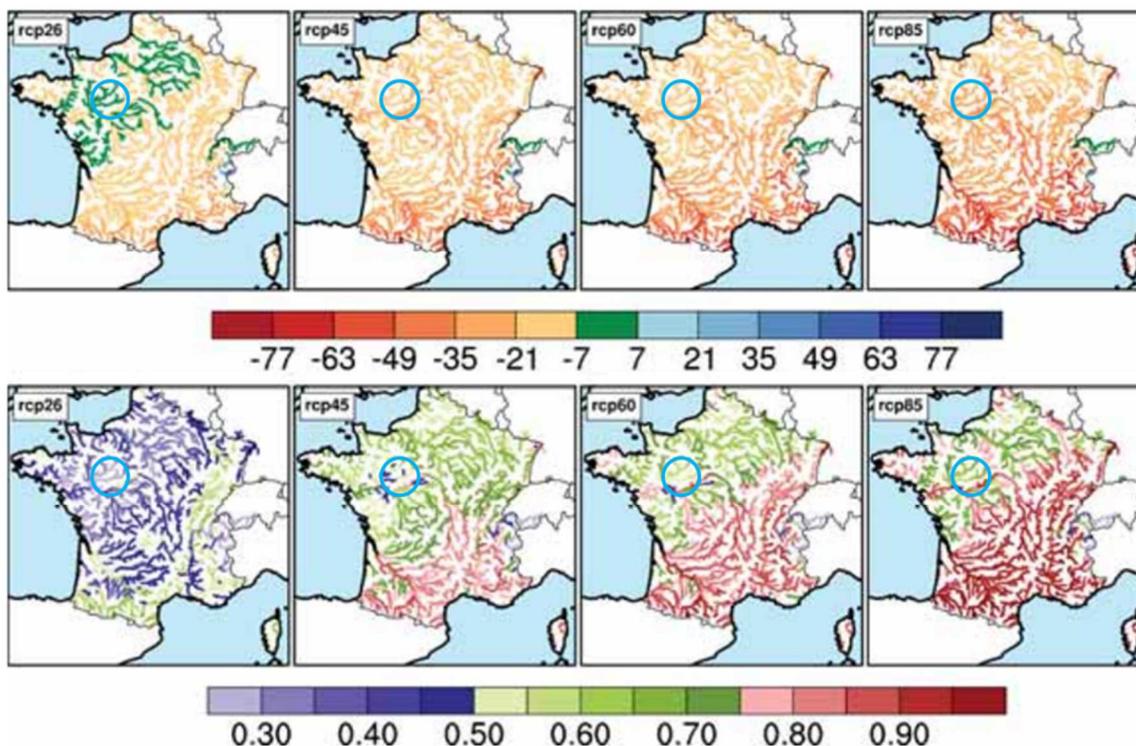


Figure 8 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit mensuel minimal d'une période de retour de 5 ans (QMNA5, %) pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit mensuel minimal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égale au QMNA5 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. (Source : Dayon 2015)

### 4.3 Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne

Le diagnostic climatique du Plan d'adaptation au changement climatique pour le bassin Loire-Bretagne, adopté en avril 2018, s'appuie sur les conclusions de vulnérabilité produites par l'Agence de l'eau Loire-Bretagne en 2017 d'après les résultats d'Explore 2070 (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2018). La vulnérabilité y est définie comme le produit de la sensibilité (situation actuelle des milieux et usages de l'eau à partir des données utilisées pour l'état des lieux du SDAGE Loire-Bretagne 2013) et de l'exposition (caractéristiques futures possibles du climat et de l'hydrologie à partir des résultats d'Explore 2070). Elle caractérise donc les effets attendus du changement climatique sur le territoire.

La vulnérabilité du bassin Loire-Bretagne, face aux évolutions climatiques et hydrologiques, a été évaluée au travers de quatre indicateurs, obtenus par la mise en relation des évolutions des différents paramètres hydro-climatiques (précipitations, ETP, températures, débits etc.) :

- ▷ La disponibilité en eau superficielle, qui dépend de la répartition des pluies dans le temps et l'espace et des débits transitant dans les nappes ;
- ▷ Le bilan hydrique des sols qui reflète le risque de sécheresse des sols en fonction de la température et de la pluviométrie ;
- ▷ La biodiversité des milieux aquatiques (biodiversité de la ripisylve, des zones humides et niveau d'altération de l'hydromorphologie) au travers de la température, des bas débits et de l'ETP ;

- Le niveau trophique des eaux qui évalue l'incidence du changement climatique sur la capacité d'autoépuration des cours d'eau, via la température, l'ETP et la ventilation des cours d'eau (débit).

### 4.3.1 Disponibilité en eaux superficielles

La Figure 9 présente, pour 14 scénarios d'évolution différents<sup>4</sup>, l'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur de la disponibilité en eau, par l'intermédiaire des projections d'évolution du QMNA2. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070 (2046-2065). On constate, d'après les catégories obtenues par les 14 scénarios pour le bassin de la Sarthe Amont, que ce dernier est exposé à une **diminution de 25% du QMNA2 en moyenne, annonciatrice d'étiages sensiblement plus sévères.**

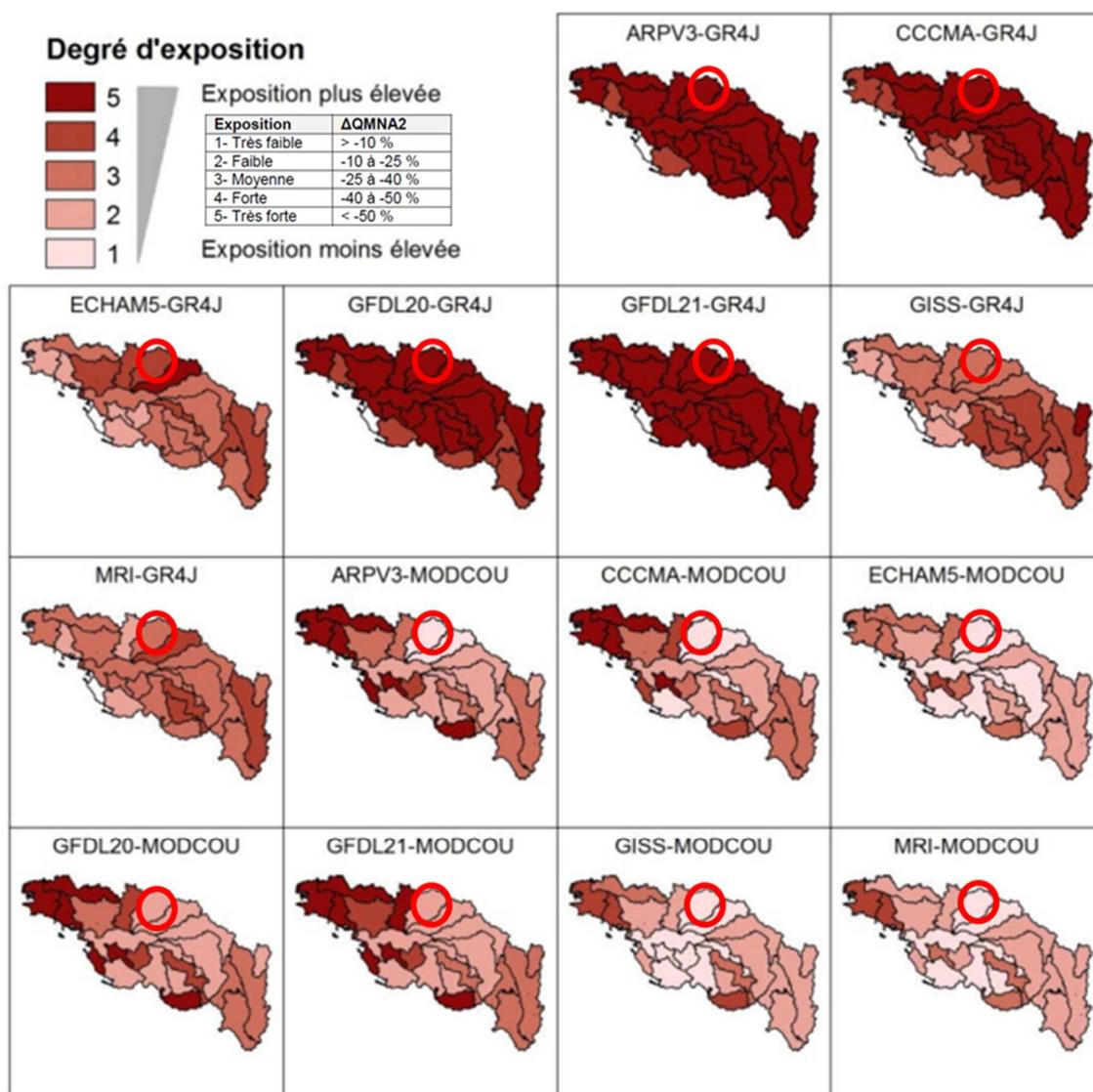


Figure 9 : Projections d'évolution du QMNA2 sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

<sup>4</sup> Les 14 scénarios différents sont obtenus par la modélisation de 7 scénarios climatiques sous 2 modèles hydrologiques différents : GR4J et MODCOU.

### 4.3.2 Bilan hydrique des sols en fin d'été

La figure suivante présente, pour les 7 scénarios climatiques précédents, l'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur du bilan hydrique des sols, par l'intermédiaire du rapport entre la hausse de l'ETP et la baisse des précipitations aux mois de printemps et d'été. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070 (2046-2065).

On constate, en moyenne sur les 7 scénarios, que le bassin de la Sarthe Amont présente un **degré d'exposition faible à moyen face aux sécheresses estivales des sols**.

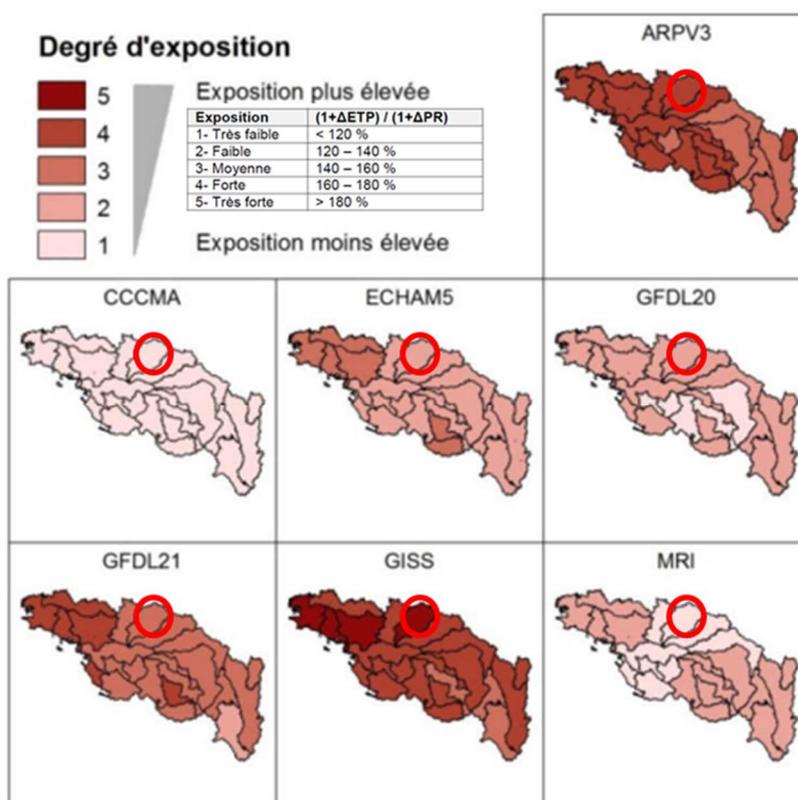


Figure 10 : Projections d'évolution du rapport  $(1+\Delta ETP) / (1+\Delta PR)$  sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

### 4.3.3 Biodiversité des milieux aquatiques et niveau trophique

L'exposition du bassin Loire-Bretagne pour l'indicateur de la biodiversité des milieux aquatiques et du niveau trophique (qui font appel tous deux à la même méthode de calcul de score d'exposition), par l'intermédiaire d'un score est obtenu en croisant les scores associés à l'évolution des températures et à l'évolution des VCN30, selon la méthode présentée dans la Figure 11. Les horizons temporels de référence sont les mêmes que pour l'étude Explore 2070. Les répartitions de ces expositions pour les 14 projections, à travers le bassin Loire-Bretagne, sont présentées Figure 11. On remarque une **nette aggravation** dans la grande majorité des cas ci-dessous, pour la biodiversité des milieux aquatiques. Cette évolution néfaste peut entraîner des conséquences sur la qualité des eaux et sur la ressource.

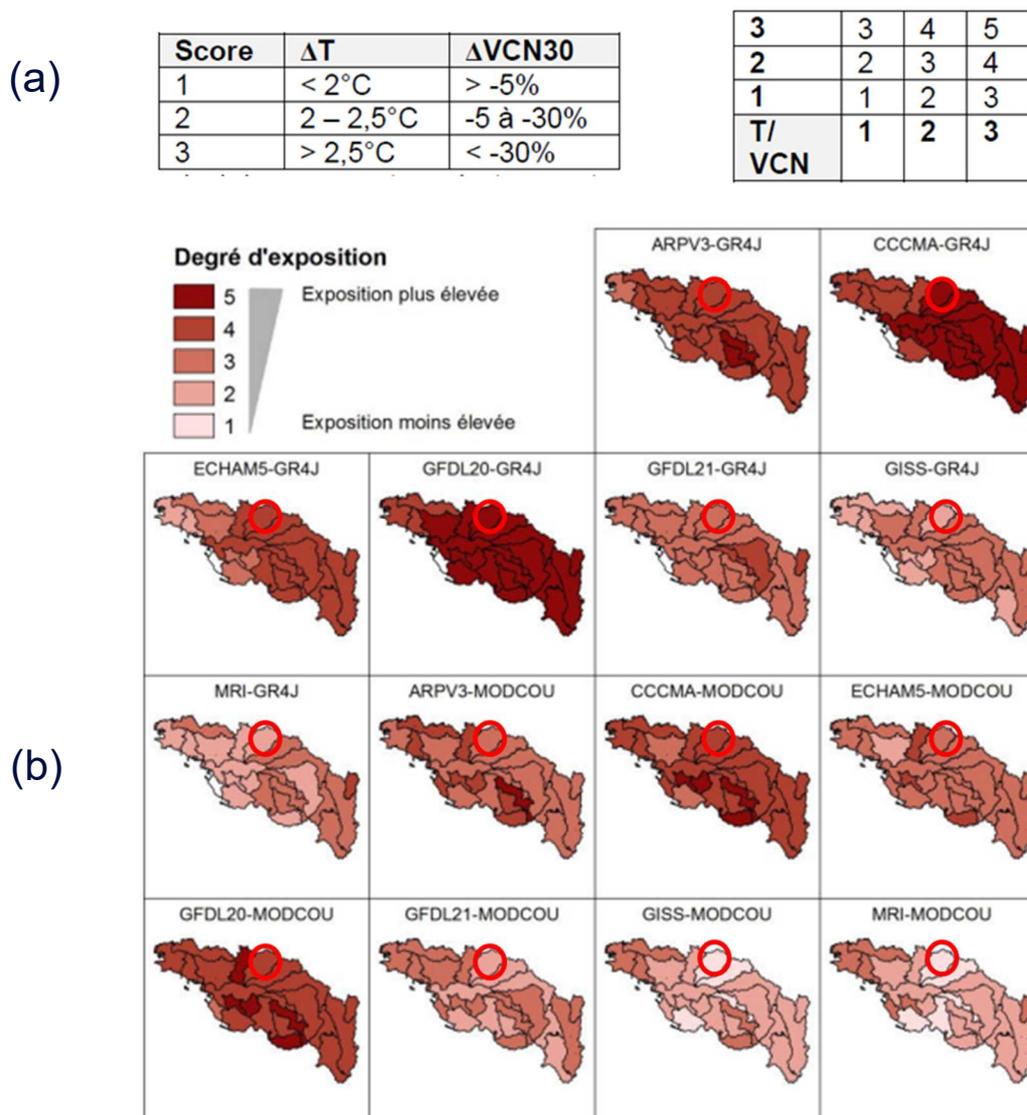


Figure 11 : (a) Méthode de calcul du score d'exposition ; (b) Projections d'évolution du score d'exposition de la biodiversité liée aux cours d'eau et du niveau trophique des eaux sur le bassin Loire-Bretagne (Source : Agence de l'eau Loire-Bretagne 2017)

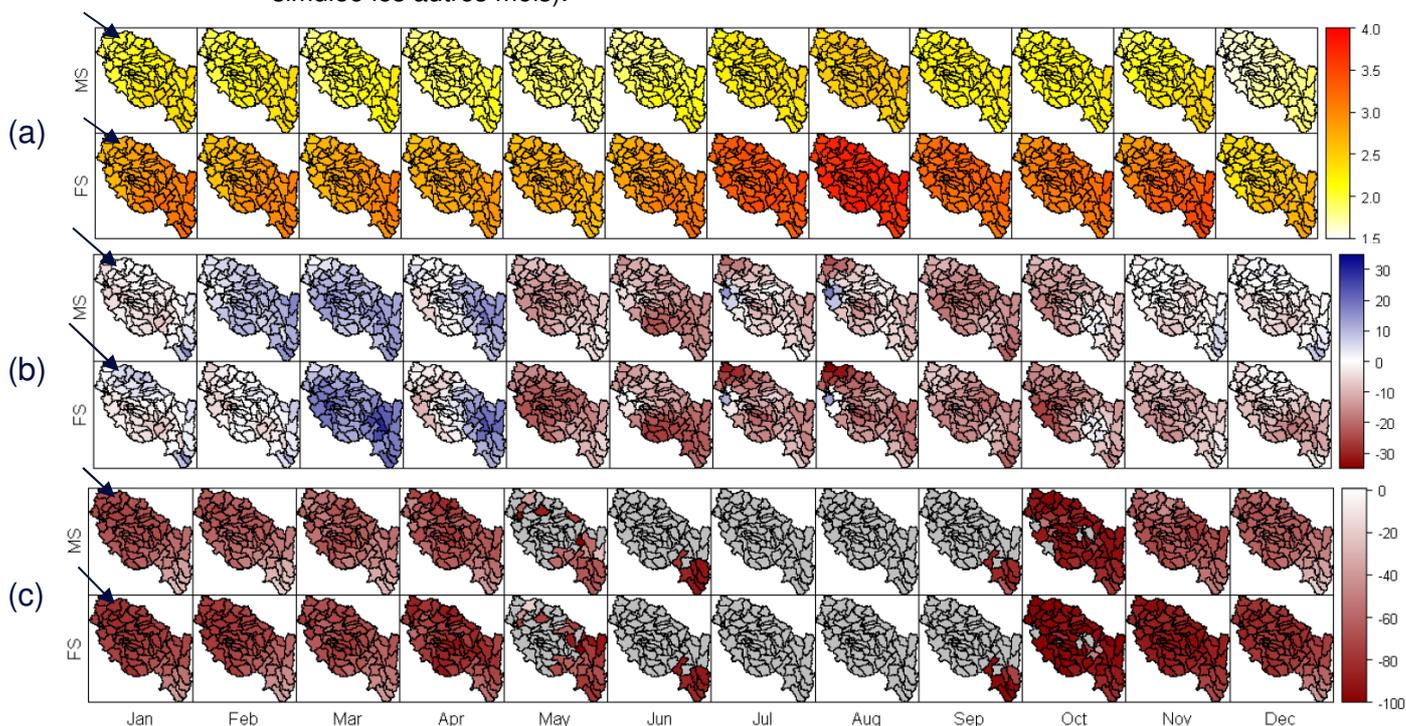
## 4.4 Etude ICC-Hydroqual

Le rapport final de l'étude Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : Hydrologie, Régime thermique, qualité des eaux (ICC-Hydroqual) a été publié en novembre 2010 (Ducharme et al. 2010). Son objectif était de décrire l'évolution des caractéristiques du climat et de l'hydrologie du bassin hydrographique de la Loire en amont de Montjean (Mayenne, 53) à l'horizon 2100.

### 4.4.1 Perspectives climatiques

Le bassin de la Sarthe Amont est indiqué par une flèche sur la Figure 12. On y observe les évolutions suivantes :

- ▷ A l'horizon 2050 :
  - Augmentation de la température d'environ 2°C en moyenne, et jusqu'à 2,5°C en août ;
  - Augmentation faible (+10% environ) des précipitations totales (neige et pluie) en février et mars. Diminution des précipitations de mai à octobre (environ -25%) ;
  - Diminution d'au moins 70% des chutes de neige sur les mois d'octobre à mai (pas de neige simulée le reste de l'année) ;
- ▷ A horizon 2100 :
  - Augmentation de la température de 3°C environ et jusqu'à 4°C en juillet et août ;
  - Augmentation d'environ 10% des précipitations totales au mois de mars et diminution du mois de mai à novembre, marquée en juillet août (-30%) ;
  - Diminution d'au moins 80% des chutes de neige sur les mois d'octobre à mai (pas de neige simulée les autres mois).



**Figure 12 Evolution de la (a) température atmosphérique moyenne mensuelle en °C, (b) des précipitations totales moyennes mensuelles (en %), (c) des précipitations solides (neige) moyennes mensuelles (en % - en gris là où aucune neige n'a été simulée) à l'horizon de mi-siècle (MS) et de fin de siècle (FS) par rapport à la période 1971-2000 (Source : Hydroqual 2010)**

#### 4.4.2 Perspectives pour l'hydrologie de surface

Aucune analyse spécifique au bassin de la Sarthe Amont ou pouvant s'y rapporter n'a été menée dans le cadre de l'étude ICC-Hydroqual. Toutefois, il ressort du rapport les conclusions générales suivantes sur le bassin de la Loire :

- ▷ Tendence à la diminution de la ressource en eau : diminution du module et des volumes disponibles ;
- ▷ Etiages plus sévères et durée de basses eaux plus longues.

### 4.5 Etude de l'université de Tours sur la température des cours d'eau du bassin de la Loire

Cette étude<sup>5</sup> (Beaufort, Moatar, et Curie 2015), finalisée en 2015 et menée par l'université François-Rabelais de Tours et l'Office Français de la Biodiversité (OFB, anciennement ONEMA), a permis de modéliser les températures des cours d'eau du bassin de la Loire à horizon 2100. L'étude s'est appuyée sur 13 projections climatiques issues du 4<sup>ème</sup> rapport du GIEC, sur 15 projections hydrologiques et sur les résultats de l'étude ICC-Hydroqual. Les résultats montrent une augmentation de 2.9°C (+/-0.7°C) à l'horizon 2100 en moyenne sur le bassin de la Loire. Les simulations en période actuelle et à la fin du 21<sup>e</sup> siècle sont représentées sur la Figure 13. On observe une augmentation (+2°C) de la température sur l'ensemble des cours d'eau dans le bassin de la Sarthe Amont.

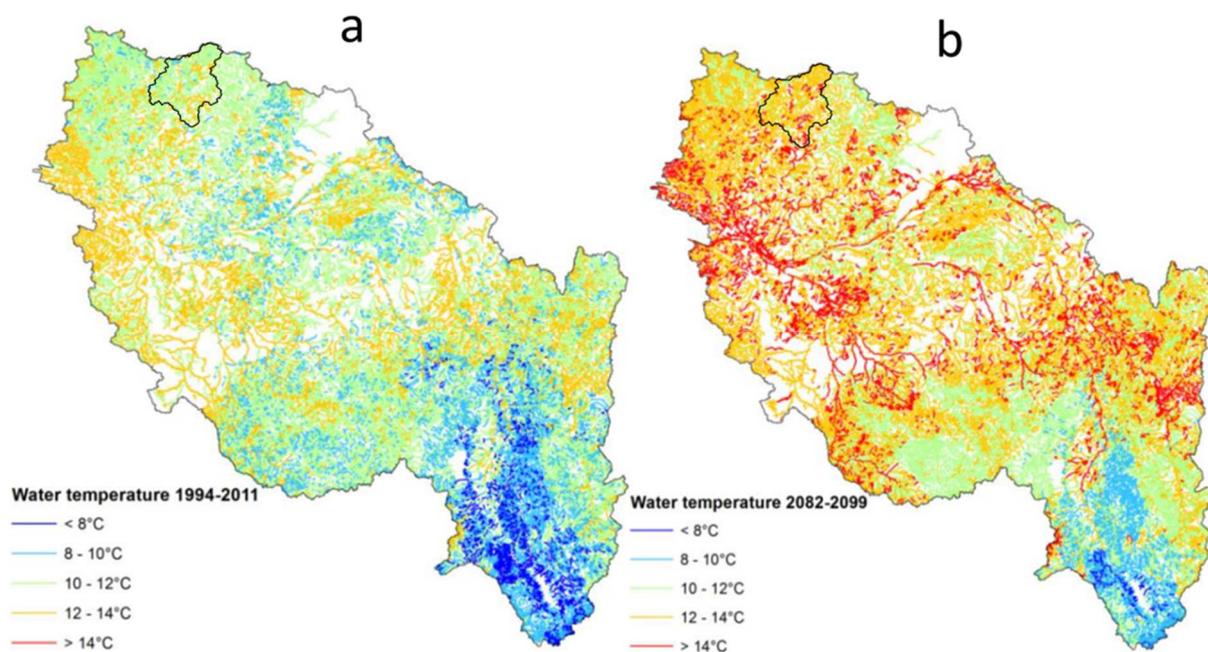


Figure 13 : Température moyenne interannuelle des cours d'eau superficiels simulée en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (2082-2099)

<sup>5</sup> [https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/pdf/Rapport\\_UnivTours\\_Temperature.pdf](https://www.eaufrance.fr/sites/default/files/documents/pdf/Rapport_UnivTours_Temperature.pdf)

## **4.6 Ressources à venir**

Plusieurs projets et études en cours pourront apporter des précisions ou des mises à jour des résultats présentés ci-dessus. Ces initiatives traduisent également l'intérêt croissant porté à la connaissance détaillée des effets du changement climatique sur les hydrosystèmes.

### **4.6.1 Explore 2**

Dans la continuité d'Explore 2070, a été lancé en juillet 2021 le projet Explore 2 (fin prévue en 2024) pour actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie, d'après les dernières publications du GIEC (AR5 ou AR6, voir paragraphe suivant). Ce projet comportera également un volet d'accompagnement des acteurs dans les adaptations au changement climatique.

### **4.6.2 Projet Life Eau&Climat et portail DRIAS-Eau**

Le projet Life Eau&Climat, porté par l'Office Internationale de l'eau et cofinancé par l'Union Européenne est complémentaire au projet Explore 2. Il a pour objectif d'aider les acteurs de la gestion locale des bassins partenaires à évaluer les effets du changement climatique, à les prendre en compte dans la planification et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. La fin de ce projet est prévue pour 2024.

Dans le cadre de ce projet, Météo France développe une extension « Eau » au portail DRIAS, dont les premières simulations hydro-climatiques sont déjà disponibles<sup>6</sup>. Les données disponibles, à l'échelle de la France sur une grille régulière (résolution 8km) et aux points de stations hydrométriques, utilisent le modèle hydrologique SIM2 pour un total de 42 simulations – sur la période historique et sur les scénarios RCP8.5, RCP4.5 et RCP2.6. Enfin les simulations sont réalisées à partir de 12 modèles de climat régionaux.

---

<sup>6</sup> <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/320>

## 4.7 Synthèse

La diversité des méthodologies et modèles employés dans le cadre des différentes études et projets analysés implique une variabilité dans les résultats obtenus concernant les projections aux horizons futurs des paramètres climatiques et hydrologiques. On constate toutefois que pour les scénarios climatiques s'apparentant au scénario RCP 4.5 et que les résultats convergent vers des **tendances d'évolution similaire à l'horizon 2050**.

- **Augmentation des températures de l'air**
  - +2,2°C en moyenne annuelle avec les mois de juillet et août plus marqués (+3°C) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
  - +2°C à l'année, +2.5°C en août entre 1971-2000 et l'horizon 2050 selon l'étude ICC Hydroqual
- **Augmentation de l'évapotranspiration total annuel mais vraiment notable en période estivale et automnale**
  - +24% d'ETP à l'année avec une augmentation particulièrement marquée en automne (+50%) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
- **Augmentation de la variabilité pluviométrique avec une diminution des précipitations estivales, une légère augmentation hivernale et une faible diminution généralisée à l'année**
  - Diminution importante de mai à septembre (-20%) entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070 ;
  - Diminution de l'ordre de -25% de mai à octobre entre 1971-2000 et 2050 selon l'étude ICC Hydroqual ;
- **Diminution généralisée des débits avec une intensification des étiages : plus fréquents, plus sévères et plus longs (prolongation sur la période automnale)**
  - Diminution de l'ordre de -20% des débits moyens à l'année, diminution de -6 à -56% du QMNA5 selon Explore 2070
  - Diminution jusqu'à -20% des débits moyens printaniers, et jusqu'à -35% pour les débits moyens estivaux et automnaux, diminution de l'ordre de -30% pour les QMNA5 selon la thèse Gildas Dayon
- **Diminution des niveaux et de la recharge des nappes**
  - De -20 à -30% entre 1961-1990 et 2045-2065 selon Explore 2070
- **Augmentation de la température de l'eau**
  - En moyenne, +1,6°C à l'échelle de la France selon l'étude Explore 2070
  - Plus localement jusqu'à +2°C sur le bassin de la Sarthe Amont selon l'étude de l'université de tour, et ce pour l'ensemble des cours d'eau du territoire.

Ces observations sont valables pour le bassin de la Sarthe Amont et plus largement à l'échelle du bassin versant de la Loire. Toutefois, des modélisations spécifiques au bassin sont nécessaires afin d'obtenir des analyses chiffrées de l'évolution des ressources en eau à cet horizon.

## 5 ANALYSE DE L'EVOLUTION DES PARAMETRES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2050

### 5.1 Données climatiques considérées

#### 5.1.1 Sélection des données climatiques

L'estimation du climat futur, par l'intermédiaire de simulations numériques, repose sur la définition de **scénarios d'évolution de l'activité anthropique impactant le climat** et de **modèles atmosphériques** permettant, à partir des scénarios précédents, de simuler l'évolution future de paramètres climatiques tels que les précipitations, la température et l'évapotranspiration.

De nombreux laboratoires à travers le monde ont réalisé de telles modélisations, en respectant un cadre de travail établi par le **GIEC**, ce qui a permis d'harmoniser les travaux réalisés et de faciliter l'utilisation conjointe de leurs différents résultats.

Il existe donc **de multiples modèles climatiques** (voir Annexe 3 p.106) décrivant chacun d'une manière différente l'évolution future du climat. Chacun de ces modèles a été exécuté sur un ou plus généralement, sur plusieurs des 4 **scénarios climatiques RCP** (voir Annexe 1 p.98).

La présente étude utilise **un seul modèle exécuté sur deux scénarios climatiques**, il convient de choisir ces derniers :

- ❖ Concernant le **modèle climatique à considérer**, il est choisi de considérer le **modèle du CNRM**, dont les versions antérieures ont déjà été utilisées dans plusieurs études quantitatives menées sur le territoire national. On se servira, plus précisément, de sa version régionalisée dénommée **ALADIN63\_CNRM-CM5**. Les raisons de ce choix sont les suivantes :
  - Ce modèle a été produit par un Laboratoire Français affilié à Météo France ;
  - Les résultats en étant issus sont proches de la médiane de l'ensemble des résultats de modélisations climatiques incluses au portail DRIAS (Figure 56 en annexe) ;
- ❖ Pour ce qui est des **scénarios climatiques**, on retiendra le scénario **RCP 4.5**, le scénario « médian » et le **RCP 8.5** le scénario « pessimiste ».

### 5.1.2 Acquisition des données climatiques

En France, les climatologues ont développé le **portail internet « DRIAS, les futurs du climat »**. Ce portail a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Il permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios climatiques régionalisés sur la France à partir de modélisations issues de laboratoires du monde entier, **et de commander des données ciblées (dont notamment l'évolution des précipitations, des températures et de l'ETP)**.

**Une analyse intégrée des données de projection disponibles sur DRIAS a été réalisée par Météo France<sup>7</sup>.**

Les données climatiques issues de la modélisation des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 réalisée par Météo France (ALADIN63\_CNRM-CM5) ont donc pu être récupérées sur l'ensemble du territoire étudié. Dans les paragraphes suivants, les analyses sont basées sur les données suivantes :

- ❖ Sur la période 2000-2005 : Données de référence issues du modèle climatique
- ❖ Sur la période 2006-2060 : Données de projection issues du modèle climatique exécuté selon les scénarios climatiques.

---

<sup>7</sup> Source : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/296>

### 5.1.3 Précautions d'utilisation et d'interprétation

Les données obtenues grâce au portail DRIAS doivent être manipulées et interprétées en ayant conscience de certaines limites. Des préconisations sont mises en avant sur le portail DRIAS concernant le traitement ainsi que l'interprétation des données futures.

#### 5.1.3.1 Correction des données brutes par rapport aux observations

**Privilégier les jeux de données corrigées (par rapport aux observations) aux données brutes (source : DRIAS)**

Les simulations issues des modèles climatiques comportent des biais plus ou moins importants selon les paramètres et les régions du monde. Il est recommandé de les corriger avant de les utiliser. Le portail DRIAS propose principalement des simulations climatiques corrigées sur la France. Ces jeux de données corrigées sont à privilégier systématiquement par rapport aux données brutes.

Les données ayant été téléchargées sur le portail DRIAS pour l'étude HMUC de la Sarthe Amont sont uniquement des données corrigées.

**Les données de la période de référence ne sont pas des observations (source : DRIAS)**

- ▶ Il est important de garder à l'esprit que les **données de référence** sont des **simulations numériques et non des observations**. Elles conservent toutefois la vocation de représenter correctement le climat passé dans sa globalité. Il convient simplement de ne pas les analyser « jour par jour », et de préférer une analyse différentielle passé-futur, qui constitue une utilisation beaucoup plus pertinente de ces données.

#### 5.1.3.2 Incertitudes sur les données futures

La reconstitution, par simulation, des données climatiques futures ne peut se faire sans introduire des incertitudes. On définit une incertitude comme un degré de connaissance incomplète pouvant découler d'un manque d'information ou d'un désaccord sur ce qui est connu, voire connaissable. L'incertitude peut avoir des origines diverses et résulter ainsi d'une imprécision dans les données ou encore de projections incertaines du comportement humain. L'incertitude peut donc être représentée par des mesures quantitatives ou par des énoncés qualitatifs (reflétant par exemple l'opinion d'une équipe d'experts).

Lorsqu'on cherche à modéliser le climat futur, on est confronté à trois grands types d'incertitudes (graphiquement représentés à la Figure 49) :

- ▶ L'incertitude sur la variabilité interne (naturelle) du climat, surtout impactante à court-terme (10 premières années), liée à l'occurrence irrégulière et imprévisible de phénomènes climatiques (tels qu'El Niño ou événements extrêmes caniculaires par exemple) ;
- ▶ L'incertitude scientifique et technique (ou structurelle de modélisation), surtout impactante pour les simulations de 20 à 50 ans dans le futur. Elle est liée aux simplifications et hypothèses intrinsèques aux modèles et aux mesures réalisées. Elle peut être évaluée en comparant les différents modèles climatiques ;
- ▶ L'incertitude socio-économique (ou liée au scénario utilisé), surtout impactante pour les simulations dès 40 ans dans le futur. En effet, chaque scénario formulé prévoit différentes évolutions des comportements humains et par conséquent différents changements climatiques, dont il ne peut pas être établi que l'un est plus probable que les autres.

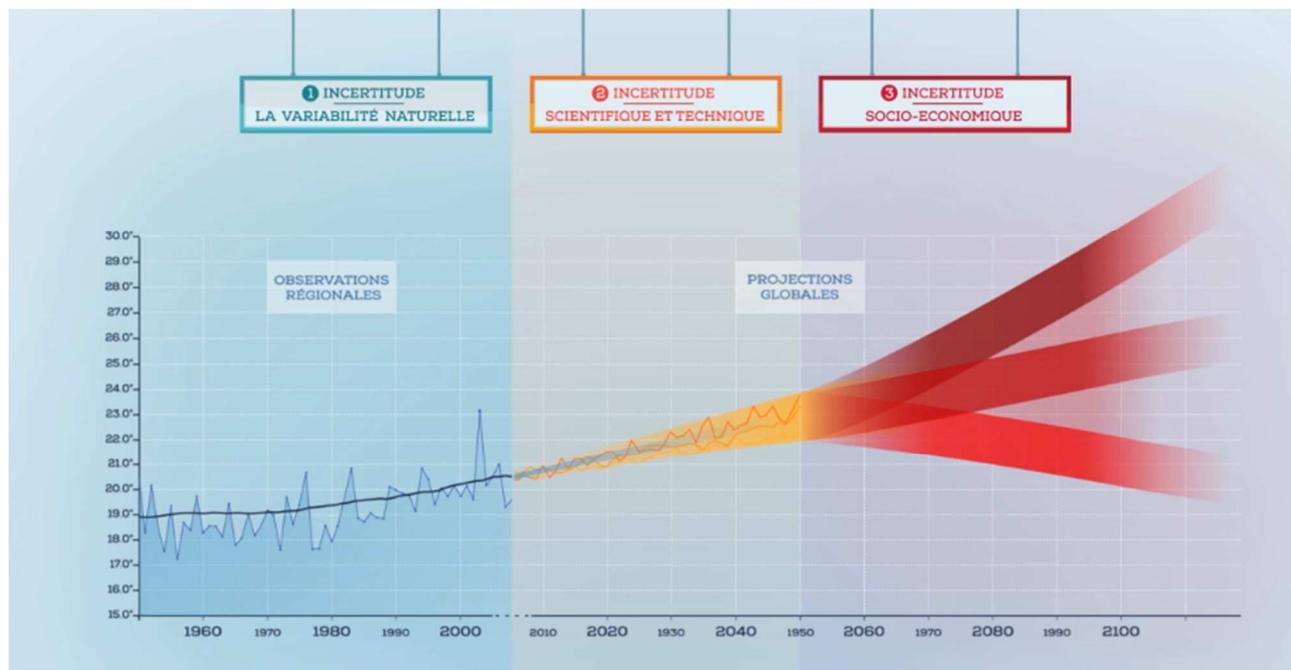


Figure 14 : Illustration des principales sources d'incertitudes des projections climatiques selon l'horizon considéré (Source : DRIAS)

La problématique des incertitudes autour des projections climatiques est encore plus prégnante à une échelle régionalisée ou à l'échelle d'un bassin, compte tenu des limites de précision pouvant être apportées aux résolutions plus élevées.

#### 5.1.3.2.1 *Interprétation des données aux horizons proches*

Dans les projections climatiques à court terme (prochaines décennies), c'est l'incertitude sur la variabilité interne du climat qui est prépondérante. Par la suite, les incertitudes de modélisation et de scénario climatique prennent le dessus.

**Attention à l'interprétation des résultats pour les horizons proches (période 2021-2030) (source : DRIAS) :** En effet, pour cette période, on ne peut distinguer la variabilité climatique naturelle d'un signal qui serait dû au changement climatique.

#### 5.1.3.2.2 *Préconisations pour limiter les incertitudes associées à la modélisation des climats futurs*

**Utiliser systématiquement plusieurs scénarios et des produits de distribution ou plusieurs modèles (source : DRIAS) :** Il existe principalement deux sources d'incertitudes : l'incertitude « modèle » liée à la représentation des processus physiques et l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre. La première incertitude peut être analysée en utilisant des produits de distribution issus d'un ensemble de modèles (par exemple les modèles DRIAS-2020). La deuxième peut être approchée en proposant des simulations obtenues pour plusieurs scénarios d'émission (RCP). On proposera donc systématiquement plusieurs scénarios et des produits de distribution ou plusieurs modèles, de manière à intégrer au moins une source principale d'incertitude. La concentration en gaz carbonique varie en fonction des scénarios de manière sensible à partir de 2040. Pour les études au-delà de cette période, il est donc conseillé d'utiliser plusieurs scénarios pour prendre en compte les incertitudes sur l'évolution de la concentration en gaz carbonique. Les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 constituent un ensemble qui permet de donner une idée de la dispersion des résultats et de représenter la variabilité de manière suffisante. Des calculs statistiques comme des fourchettes de durée de retour peuvent être mis en place.

**Ainsi, la présente étude ne tenant compte que d'un seul modèle, une grande prudence devra être observée lors de l'interprétation des résultats obtenus.**

#### **5.1.3.2.3 Manipulation des données aux horizons futurs**

**Ne pas comparer les données des simulations climatiques à une date particulière (source : DRIAS) ;**

Il est important de comprendre que les situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée). Les données de référence, datées, 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). On proposera donc de préférence des valeurs moyennes sur plusieurs années (classiquement 30 ans) ou des fréquences de phénomènes. Les analyses devront s'attacher à faire ressortir les évolutions entre deux périodes, plutôt que de caractériser les valeurs absolues observées sur une période donnée

**Compte-tenu de la période d'étude et des horizons fixés pour l'étude HMUC du bassin de la Sarthe Amont, les variables hydrologiques simulées à l'aide des données météorologiques DRIAS seront calculées à partir des périodes suivantes :**

- ▶ **Période 2000-2019 pour la situation de référence (conformément à celle employée dans le cadre du livrable hydrologie) ;**
- ▶ **Moyenne sur la période 2040-2059 pour l'horizon 2050<sup>8</sup>.**

---

<sup>8</sup> L'horizon 2030 n'est pas analysé ici, du fait de la prépondérance de la variabilité climatique à cette échéance, qui ne permet pas de déceler un signal propre au changement climatique.

## 5.2 Perspectives d'évolution du climat

Les paragraphes suivants présentent l'évolution de **trois paramètres climatiques** déterminants pour la ressource en eau sur **deux horizons temporels** successifs, selon le **projet ALADIN63\_CNRM-CM5, scénario RCP 4.5, RCP 8.5** : les précipitations, les températures, l'ETP. Les analyses sont réalisées sur l'ensemble des points contenu dans le périmètre d'étude.

Ici seront exploités les résultats moyennés pour les périodes 2000-2019 et 2040-2059 et les changements entre celles-ci.

### 5.2.1 Evolution des précipitations

Les figures suivantes présentent, pour chaque station, **l'évolution des précipitations entre 2000 et 2060** en comparant la période 2000-2019 avec les données DRIAS de référence et l'horizon futur (2040-2059) d'après les projections DRIAS-2020 pour les deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Plus précisément, on s'intéresse aux indicateurs suivants :

- ▶ Evolution des cumuls annuels ;
- ▶ Evolution du nombre de jours de pluie par an, pour appréhender la durée et l'intensité des pluies qui ont des implications directes sur l'hydrologie des cours d'eau ;
- ▶ Evolution des cumuls mensuels ;
- ▶ Evolution du nombre de jour de pluie mensuel.

Les Tableau 3 et Tableau 4 montrent pour chaque scénario, respectivement, l'évolution des cumuls annuels moyens et du nombre de jours de pluie entre les deux périodes d'étude. Les variations infrannuelles de ces évolutions, pour l'ensemble du périmètre d'étude, sont présentées dans les Figure 15 et Figure 16.

Pour l'ensemble des unités de gestion, à l'horizon futur considéré, on observe une faible baisse des précipitations annuelles moyennes et du nombre de jours de pluie moyen annuel (de l'ordre de -3%) pour le scénario RCP 4.5. En ce qui concerne le scénario RCP 8.5, on remarque une hausse des précipitations d'environ 8%, tandis que le nombre de jour de pluie a tendance à stagner.

Malgré des changements peu marqués en moyenne interannuelle pour le scénario RCP 4.5, on constate tout de même une modification de la répartition annuelle des pluies à travers les unités de gestion. En effet, les pluies diminuent au printemps, stagne en début d'été pour fortement diminuer au mois de septembre (-30%) pour finalement augmenter entre décembre et janvier. Hormis le mois de janvier, les pluies se font également plus rares tout au long de l'année, particulièrement en septembre.

Pour le scénario RCP 8.5, les tendances sont toutes autres. En effet, les pluies augmentent sensiblement (+20% environ) au cours de l'année, sauf pour les mois de mai et de septembre et en fin de période automnale. Le nombre de jours de pluie diminue pour le mois d'avril, en fin d'été (-15%) et en décembre, il stagne en octobre. Ce nombre varie à la hausse le reste de l'année.

- RCP 4.5 : les résultats indiquent des périodes de printemps et été plus sèches, avec un mois de septembre particulièrement marqué. Les pluies seront plus rares et d'intensités moindres pour ces périodes. Les variations pour la période hivernale impliquent des épisodes pluvieux de fortes intensités.
- RCP 8.5 : augmentation générale des cumuls, une fin de période hivernale et un début d'été plus humide en moyenne pour l'horizon 2050. Tout comme le scénario précédent, le mois de septembre sera particulièrement sec.

**Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique**



**Tableau 3 : Evolution du cumul annuel moyen entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5**

Unité de gestion	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Cumul annuel moyen (mm)		Evolution	Cumul annuel moyen (mm)		Evolution
	2000-2019	2040-2059		2000-2019	2040-2059	
Bienne	756,1	733,9	-3%	740,9	812,1	10%
Hoene	774,9	755,6	-2%	767,9	825,8	8%
Merdereau	852,2	831,2	-2%	832,0	887,3	7%
Orne Saosnoise	734,4	711,5	-3%	727,2	794,7	9%
Ornette	857,0	838,9	-2%	836,6	898,4	7%
Orthe	821,8	796,2	-3%	800,4	856,2	7%
Sarthe Amont hors Hoene	798,6	781,5	-2%	781,1	846,4	8%
Sarthe Intermédiaire	732,7	713,5	-3%	720,1	778,3	8%
Vaudelle	842,1	819,4	-3%	821,6	876,8	7%

**Tableau 4 : Evolution du nombre de jours de pluie annuel moyen entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5**

Unité de gestion	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Nombre annuel moyen		Evolution	Nombre annuel moyen		Evolution
	2000-2019	2040-2059		2000-2019	2040-2059	
Bienne	203	196	-3%	202	202	0%
Hoene	207	201	-3%	206	202	-2%
Merdereau	223	216	-3%	218	221	1%
Orne Saosnoise	223	218	-2%	221	222	1%
Ornette	216	210	-3%	213	216	2%
Orthe	221	213	-4%	216	218	1%
Sarthe Amont hors Hoene	249	244	-2%	248	247	0%
Sarthe Intermédiaire	230	224	-3%	227	231	2%
Vaudelle	220	211	-4%	214	215	1%



Figure 15 : Evolution (%) des cumuls mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivantes les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

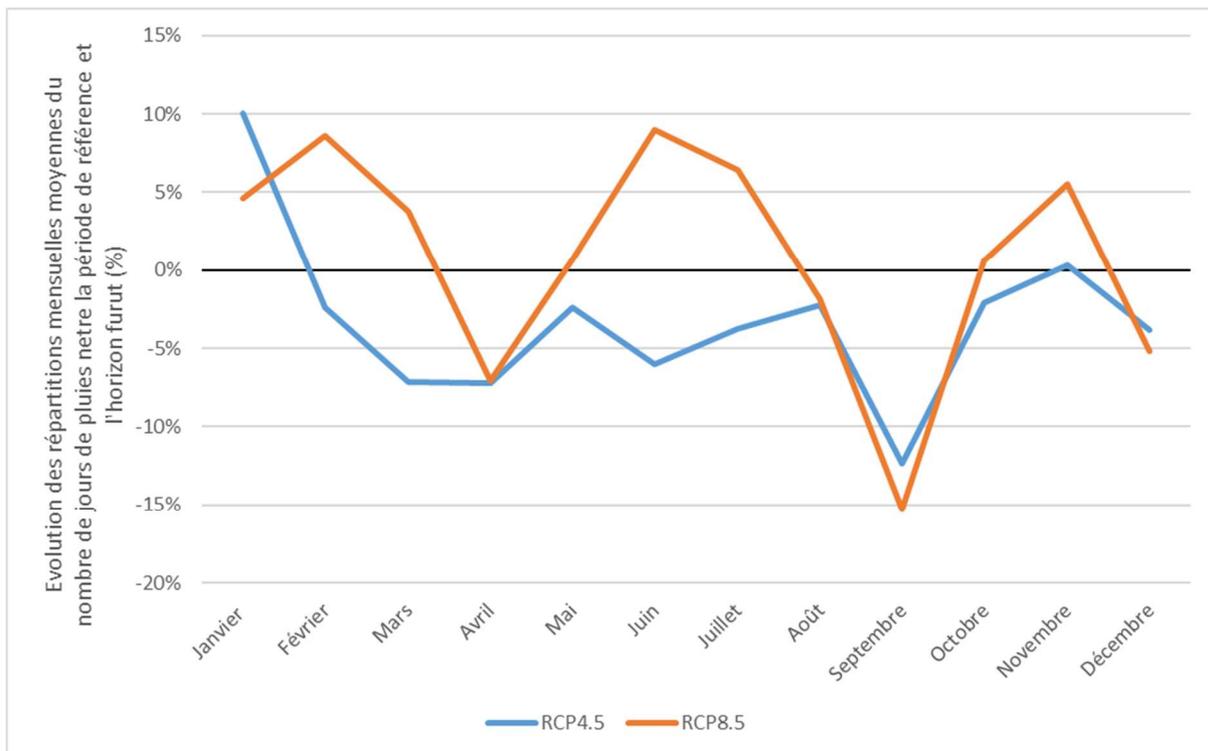


Figure 16 : Evolution (%) du nombre de jours de pluie mensuels moyens, à travers le bassin versant, entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059) pour chaque unité de gestion, selon les simulations suivantes les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

## 5.2.2 Evolution de l'ETP

Les figures suivantes présentent l'évolution de l'ETP entre 2000 et 2060 à chaque station à partir des projections DRIAS 2020. Le Tableau 5 synthétise les résultats des évolutions à chaque sous-unité de gestion de l'évapotranspiration potentielle.

On remarque sur les projections pour le scénario RCP 4.5 et pour chaque sous-unité de gestion, une augmentation annuelle moyenne de 8% de l'ETP. Pour le second scénario, l'augmentation atteint 6% pour la totalité du territoire considéré.

La Figure 17 dépeint les changements mensuels moyens entre la période actuelle et future. Hausse globale pour les deux scénarios avec un mois de septembre particulièrement marqué. Les tendances d'évolution sont similaires d'un scénario à l'autre – une différence notable est que le l'ETP augmente fortement (+13%) en début d'été pour le scénario RCP 4.5 alors qu'il stagne pour l'autre.

Tenant compte de la raréfaction des épisodes pluvieux en fin d'été / début d'automne (septembre notamment), les conditions hydriques seront détériorées sur ces périodes qui pourra impliquer un allongement des périodes d'étiages dans le futur pour les deux scénarios.

**Tableau 5 : Evapotranspiration potentielle moyenne pour les périodes de référence et futur. Ecart relatif entre les deux périodes, selon les simulations suivants les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5.**

Unité de gestion	RCP 4.5			RCP 8.5		
	Cumul annuel moyen (mm)		Evolution	Cumul annuel moyen (mm)		Evolution
	2000-2019	2040-2059		2000-2019	2040-2059	
Bienne	711,2	769,6	8%	718,8	760,9	6%
Hoene	686,5	740,0	8%	689,8	729,6	6%
Merdereau	693,8	749,6	8%	701,3	742,4	6%
Orne Saosnoise	722,5	781,2	8%	729,6	770,7	6%
Ornette	684,1	739,4	8%	691,8	731,8	6%
Orthe	697,1	754,5	8%	705,5	748,0	6%
Sarthe Amont hors Hoene	683,2	738,6	8%	689,1	729,4	6%
Sarthe Intermédiaire	727,6	787,1	8%	736,0	779,5	6%
Vaudelle	695,5	751,8	8%	703,4	744,8	6%

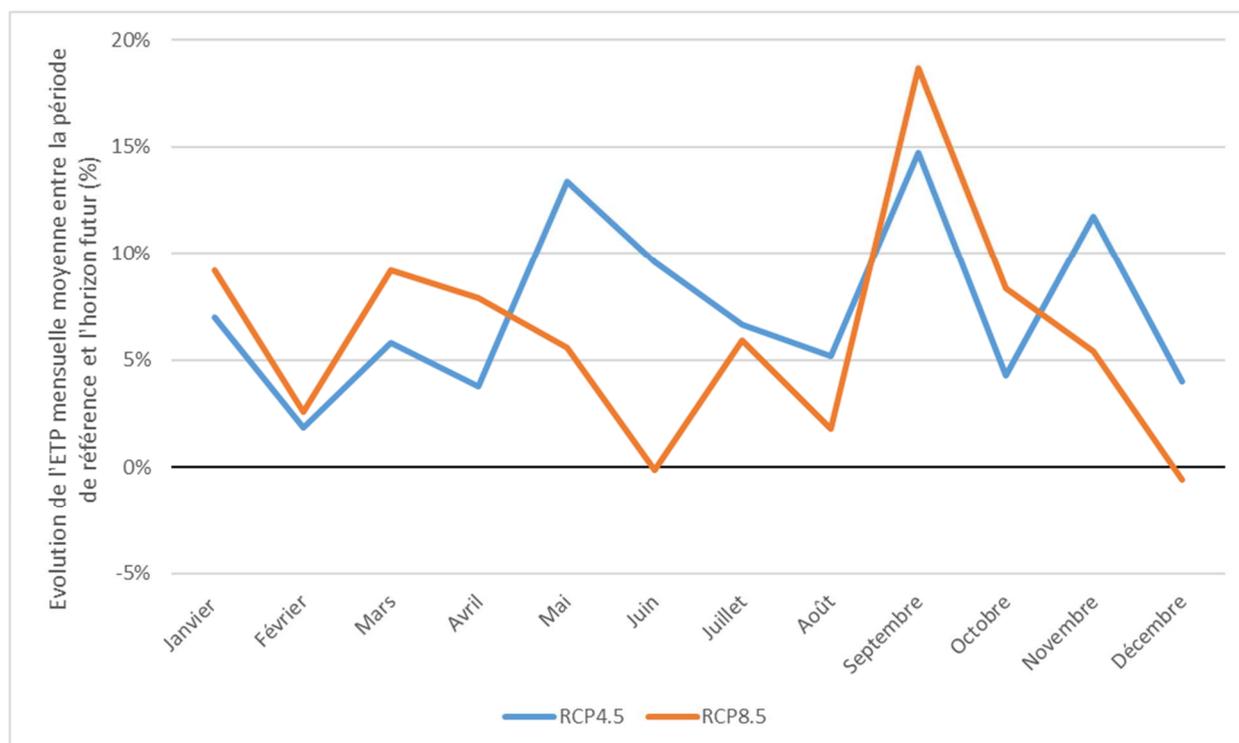


Figure 17 : Evolution de l'ETP mensuelle moyenne entre la période de référence (2000-2019) et l'horizon 2050 (2040-2059), selon les simulations suivant les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

### 5.2.3 Evolution des sécheresses agricoles

Afin d'appréhender l'évolution des sécheresses agricoles aux horizons 2030 et 2050, on utilise les données DRIAS de projection de l'indice sécheresse en termes d'humidité du sol (Standardized Soil Wetness Index, SSWI)<sup>9</sup>.

Le SSWI est normalisé selon une échelle allant d'extrêmement sec (SSWI < -2) à extrêmement humide (SSWI > 2) où un SSWI de 0 indique une quantité de précipitations médiane (situation « normale » de la période de référence).

Pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 :

- On observe sur le bassin de la Sarthe Amont que, en comparaison à la période de référence, **les périodes de sécheresse agricole vont s'intensifier en moyenne annuelle aux horizons 2035 et 2055**. On passe d'une situation de référence en 1970 à une situation très sèche en 2035 et extrêmement sèche en 2055. **A l'échelle de la France, on observe que le bassin de la Sarthe Amont fait partie des bassins les plus touchés par les sécheresses agricoles à l'horizon 2035**. A l'horizon 2050, la quasi-totalité du territoire métropolitain devrait être touchée par des épisodes de sécheresse agricole intenses.

<sup>9</sup> <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/183> et voir annexe 4 (p.92)

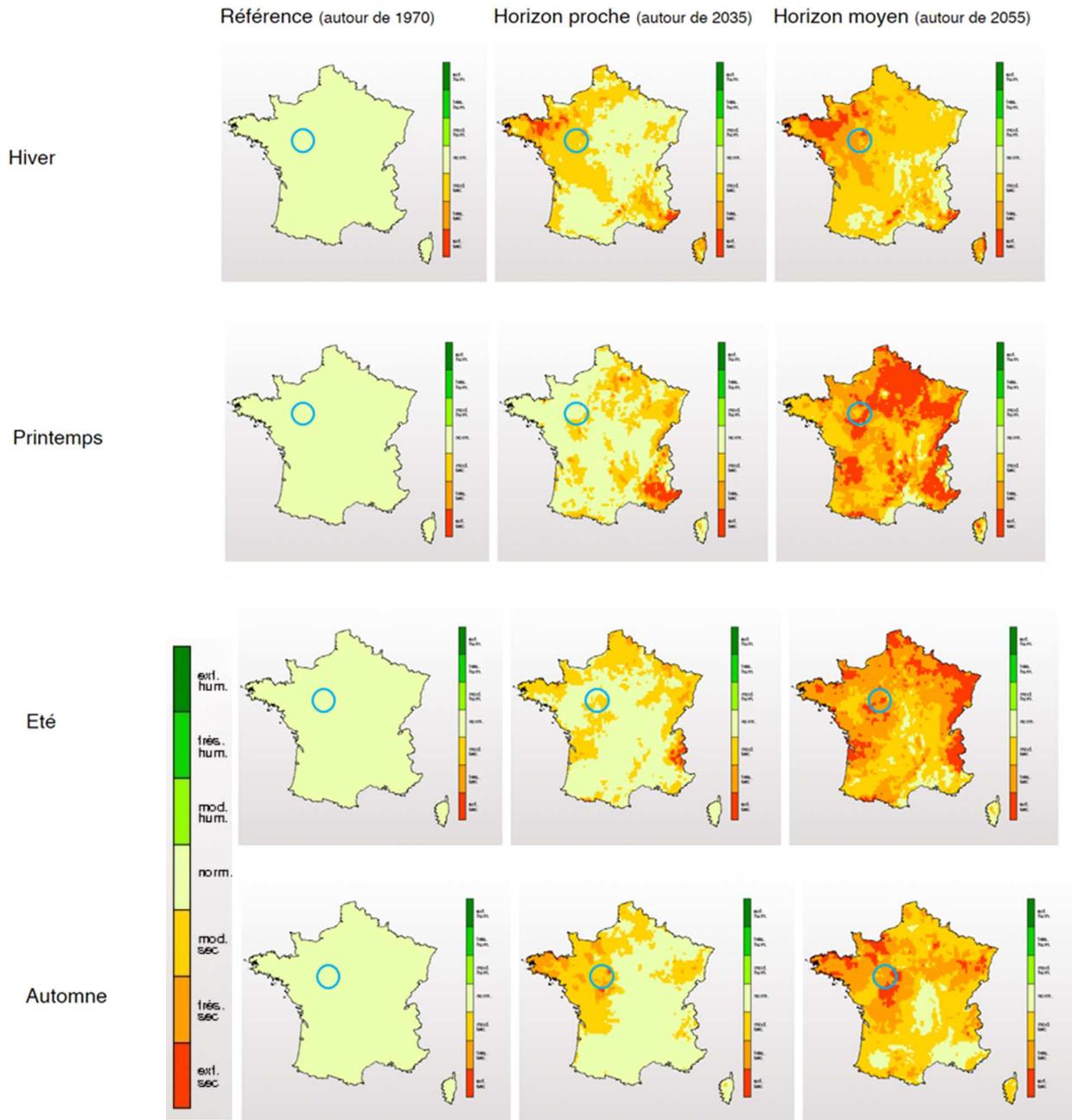


Figure 18 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) (Source : DRIAS) pour le scénario RCP 4.5

# Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

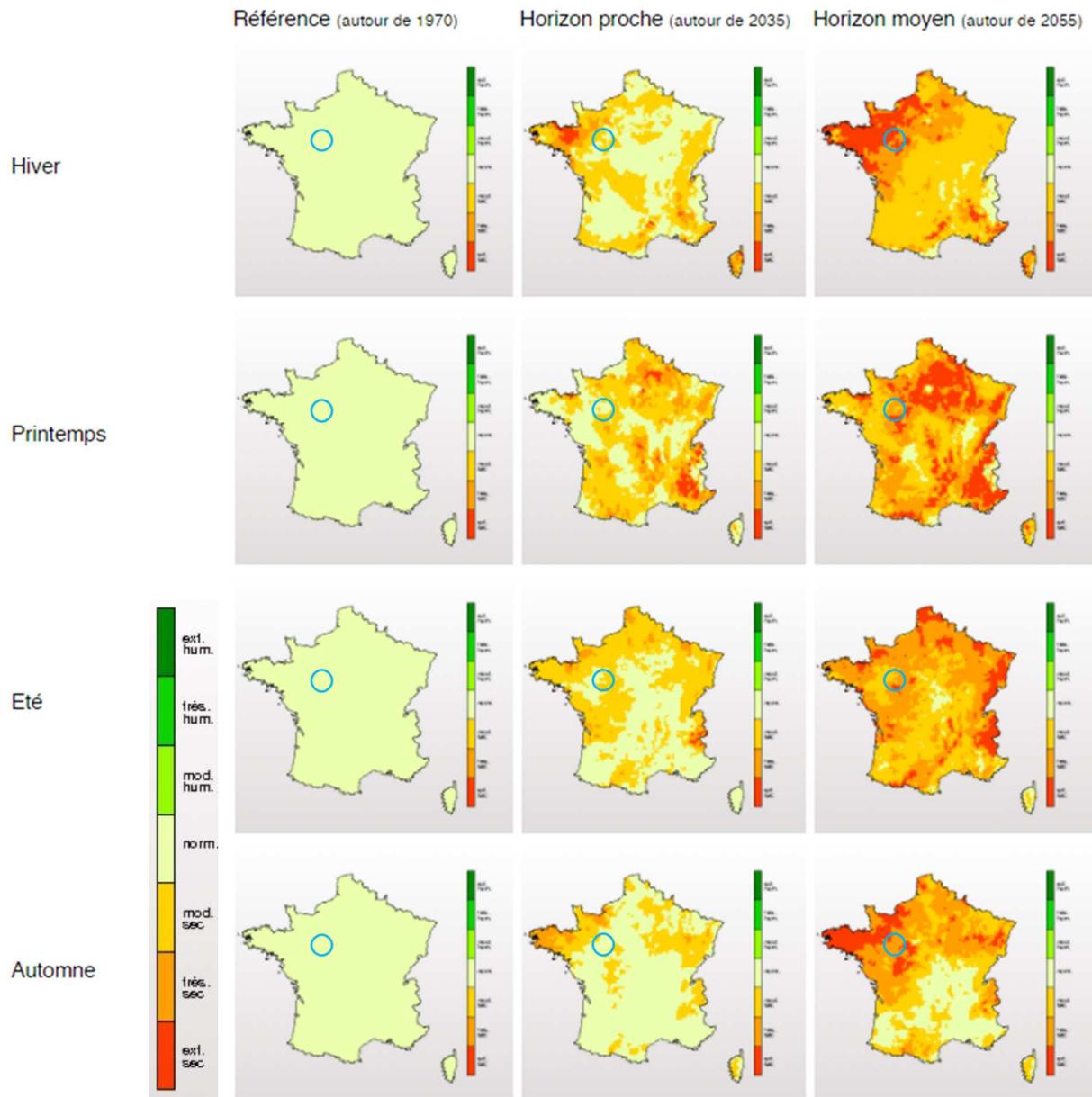


Figure 19 : Indice de sécheresse agricole (SSWI) moyen annuel et saisonnier pour la période de référence et aux horizons futurs (2035 et 2055) (Source : DRIAS) pour le scénario RCP 8.5

### 5.3 Synthèse sur l'évolution du climat

Le tableau suivant synthétise les analyses des paragraphes précédents à l'horizon 2050. Les évolutions à l'horizon 2030 ne sont pas mentionnées ici car elles sont majoritairement dépendantes de la variabilité interne du climat, et ne reflètent pas les effets du changement climatique (voir paragraphe 5.1.3.2)

Les évolutions du climat aux horizons futurs impactent directement la ressource en eau, par l'augmentation de l'évapotranspiration mais également par la modification du cycle hydrologique et du cycle de recharge des nappes souterraines. Ces projections sont à mettre en relation avec les évolutions projetées des usages de l'eau (présentées dans le rapport dédié au volet usages) afin de se faire une idée claire de l'évolution de la disponibilité en eau, en période d'étiage notamment.

Tableau 6 : Synthèse sur l'évolution du climat (Sources : DRIAS, SUEZ Consulting)

		Horizon 2050 – RCP4.5	Horizon 2050 – RCP8.5
<b>ETP</b>	<b>Cumul annuel</b>	+8% par rapport à la moyenne 2000-2019	+6% par rapport à la moyenne 2000-2019
	<b>Cumul mensuel</b>	Augmentation globale ; mois de mai, septembre et novembre marqué (+15%)	Augmentation globale ; mois de septembre marqué (+20%)
<b>Pluviométrie</b>	<b>Cumul annuel</b>	Tendance faiblement marquée à la baisse (-3%)	Tendance à la hausse (+8%)
	<b>Nombre de jours de pluie</b>	Tendance légèrement à la baisse (-3%)	Tendance peu marquée et non significative – maintien du nombre de jours
	<b>Saisonnalité des précipitations</b>	Intensification en hiver (10 à 20%) – pluies plus rares toutes l'année excepté en janvier, mois de septembre particulièrement sec (-30%)	Intensification en hiver et début d'été – pluies plus rares et moins intense aux mois d'avril et septembre (-10%)
<b>Sécheresses</b>	<b>Tendance d'évolution</b>	Augmentation de l'intensité très marquée sur toute l'année	Augmentation de l'intensité très marquée sur toute l'année

Ces résultats sont à mettre en perspective avec les résultats obtenus avec l'analyse bibliographique (p.33). L'ETP analysée avec les données DRIAS-2020, évolue dans une moindre mesure comparée aux résultats de l'analyse bibliographique et ce pour les deux scénarios d'émissions.

Les résultats, pour le scénario RCP 4.5, de l'évolution des cumuls pluviométriques rejoignent les résultats de l'analyse bibliographique avec une légère diminution non significative généralisée à l'année mais avec une période estivale marquée. Pour le scénario RCP 8.5, la hausse des cumuls pluviométriques contredit l'évolution annoncée dans les résultats de l'analyse bibliographique.

## 6 MODELISATION DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU A L'HORIZON 2050

Le chapitre 4 a permis d'appréhender l'effet du changement climatique sur la ressource en eau par l'analyse des études existantes portant sur le sujet. Cependant, ces analyses ne tiennent pas compte des usages de l'eau, et leur résolution spatiale est relativement grossière par rapport au territoire étudié. Ainsi, une analyse complémentaire a été menée dans le cadre de la présente étude, en valorisant le modèle hydrologique construit dans le cadre du volet hydrologie et les données climatiques prospectives analysées dans le chapitre 5. Dans le cadre du présent rapport et à la différence du volet hydrologie, les données d'entrée sont :

- ❖ Les chroniques climatiques issues du portail DRIAS (modèle ALADIN\_CNRM\_CM5 avec le RCP4.5 et RCP8.5) sur la période 2000-2060, présentées et analysées au chapitre précédent. Le fait de s'appuyer sur des simulations et non sur des observations pour la période passée s'inscrit dans une recherche de cohérence avec les analyses menées par les climatologues, qui procèdent selon cette logique afin de ne pas introduire de biais dans leurs analyses ;
- ❖ Les chroniques d'usage de l'eau exploitées dans le cadre du volet hydrologie sur la période 2000-2019 et prolongées jusqu'à 2060 selon les scénarios d'évolution définis dans le cadre du volet usages, rappelés en annexe 5.

Ce travail aboutit, pour chaque unité de gestion considérée, à :

- ❖ Une chronique de débits influencés par l'activité anthropique sur 2000-2060 pour chaque scénario d'évolution considéré ;
- ❖ Une chronique de débits désinfluencés de l'activité anthropique sur la période 2000-2060 pour chaque scénario d'évolution considéré.

Conformément aux analyses du volet hydrologie, des indicateurs d'étiage sont calculés à partir de chacune de ces chroniques, sur la période 2000-2019 (représentant la période d'étude) et sur la période 2040-2059 (représentant l'horizon 2050).

Ce travail permet d'apprécier, concernant la ressource en eau :

- ▶ Les impacts strictement liés aux effets du changement climatique ;
- ▶ Les impacts cumulés du changement climatique et de l'évolution des usages.

L'ensemble des précautions d'interprétation présentées au paragraphe 5.1.3, concernant les paramètres climatiques, s'applique également aux résultats présentés dans le présent paragraphe. Il est également nécessaire d'avoir à l'esprit que le modèle utilisé ayant été calé sur une période de 20 ans, l'occurrence de légères dérives n'est pas à exclure lors de l'interprétation. Ces résultats doivent donc être considérés comme des éléments complémentaires à ceux présentés au chapitre 4, et l'analyse globale doit se baser sur l'ensemble des éléments disponibles. Seules les conclusions consensuelles entre les sources explorées doivent être considérées robustes.

## 6.1 L'Hoëne

### 6.1.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur l'Hoëne :

- ❖ On observe une augmentation généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 26% sur le QMNA5 désinfluencé et influencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée au printemps. En été, les épisodes de sécheresse sur seront ainsi moins intenses (augmentation atteignant 25% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'août et 20% au mois de septembre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour cette période estivale, l'impact seul du changement climatique devrait augmenter les débits mensuels quinquennaux secs de 20 à 25% ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ On remarque qu'à cet horizon les usages anthropiques n'influencent pas les débits – le seul changement climatique devrait ainsi augmenter les débits actuels.

Tableau 7 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne - Scénario tendanciel bas

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1236	0.1239	0.2%	0.156 (25.9%)	0.156 (26.3%)	0.6%
L/s/km2	1.628	1.631	0.2%	2.049 (25.9%)	2.061 (26.3%)	0.6%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1186	0.1195	0.7%	0.15 (26.3%)	0.151 (26.4%)	0.8%
L/s/km2	1.562	1.574	0.7%	1.973 (26.3%)	1.989 (26.4%)	0.8%
	VCN30(2)					
m3/s	0.1861	0.1872	0.6%	0.222 (19.5%)	0.223 (19.3%)	0.4%
L/s/km2	2.451	2.466	0.6%	2.93 (19.5%)	2.943 (19.3%)	0.4%

Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

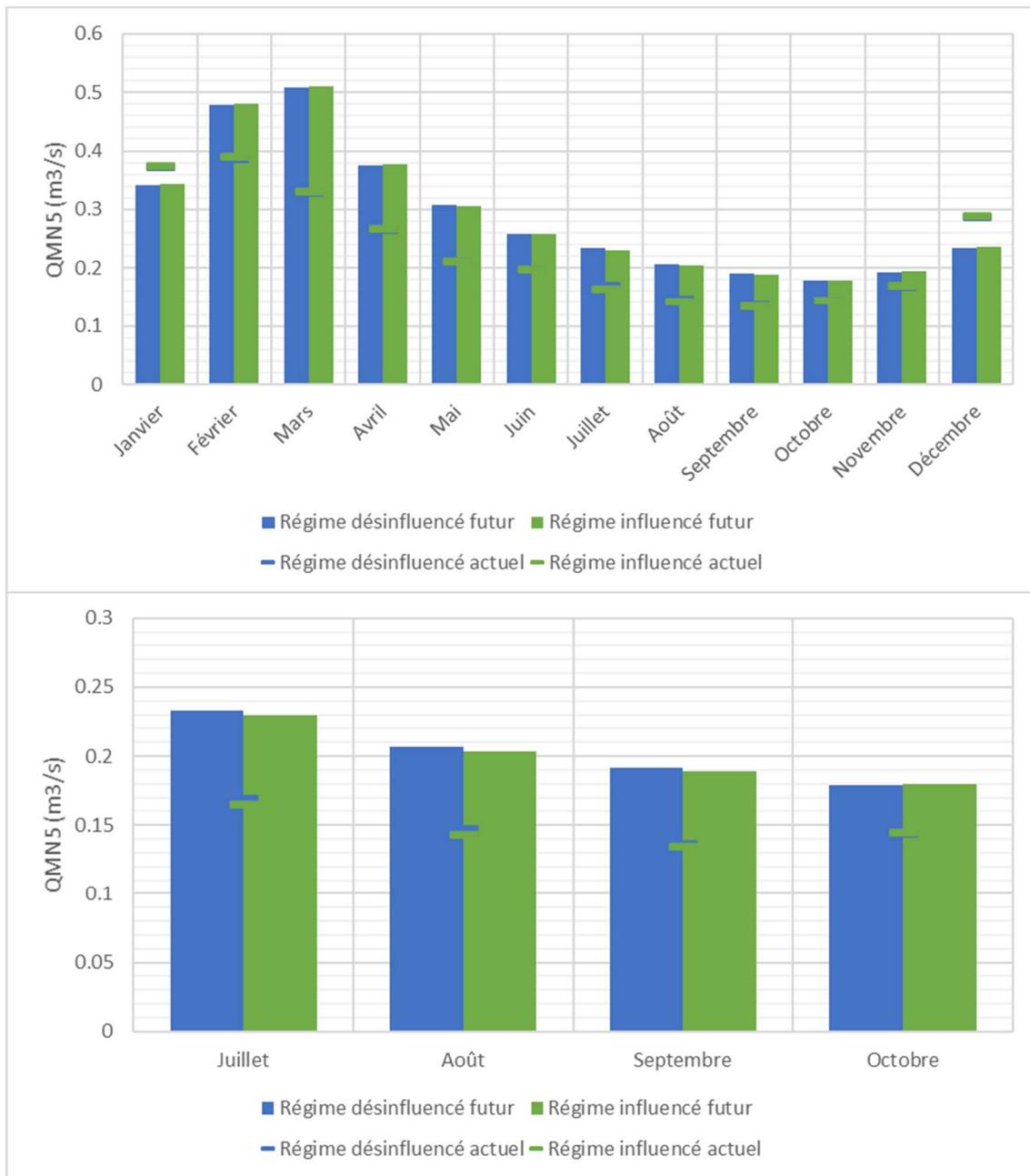


Figure 20 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne – Scénario tendanciel bas

### 6.1.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur l'Hoëne :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 27% sur le QMNA5 désinfluencé et de 27% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est particulièrement marquée en période hivernale (diminution atteignant 50% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois de décembre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ces mêmes mois de septembre et d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs de 20% ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée restera du même ordre, ainsi le seul effet du changement climatique viendrait diminuer fortement les débits sur ce sous-bassin ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul, et une période hivernale bien plus sèche également indiquant une recharge amoindrit des nappes.

**Tableau 8 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1568	0.1585	1.1%	0.114 (-27.2%)	0.115 (-27.2%)	1.2%
L/s/km2	2.066	2.088	1.1%	1.503 (-27.2%)	1.521 (-27.2%)	1.2%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1529	0.1549	1.3%	0.11 (-28%)	0.112 (-27.9%)	1.4%
L/s/km2	2.014	2.040	1.3%	1.45 (-28%)	1.47 (-27.9%)	1.4%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2151	0.2167	0.7%	0.165 (-23.1%)	0.167 (-23%)	0.8%
L/s/km2	2.833	2.854	0.7%	2.179 (-23.1%)	2.197 (-23%)	0.8%

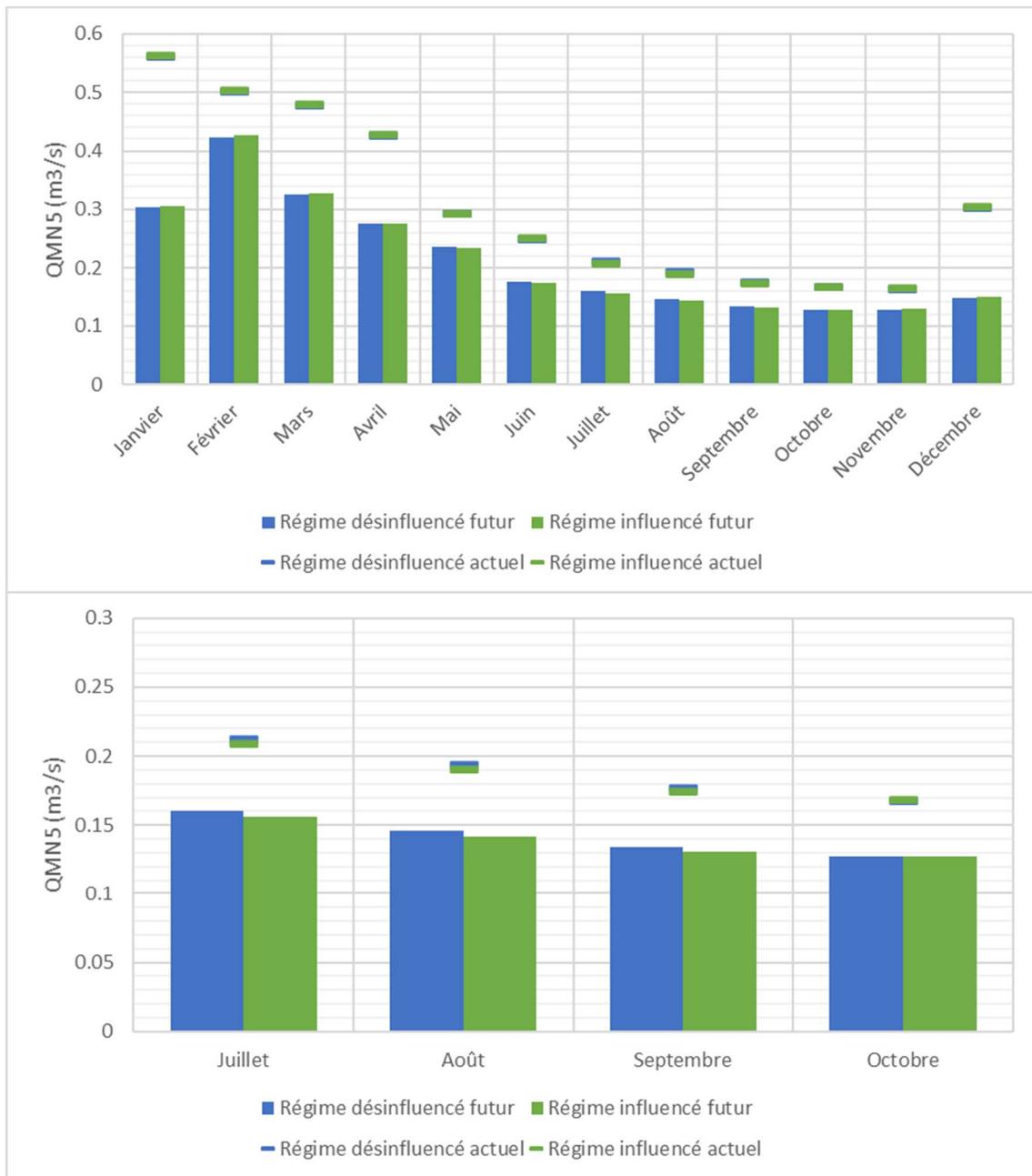


Figure 21 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Hoëne – Scénario tendanciel haut

## 6.2 La Sarthe amont

### 6.2.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur la Sarthe amont :

- ❖ On observe une augmentation généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 22% sur le QMNA5 désinfluencé et hausse de 18% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée en période hivernale. Les épisodes de sécheresse sur l'été seront tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour cette période estivale les débits quinquennaux secs sont très légèrement supérieurs à l'horizon 2050 et ce, en considérant l'influence des usages ou non ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ Malgré tout on peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée se creuse à cet horizon

**Tableau 9 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de Infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	1.2259	1.1720	-4.4%	1.493 (21.8%)	1.384 (18.1%)	-7.3%
L/s/km2	1.190	1.137	-4.4%	1.449 (21.8%)	1.343 (18.1%)	-7.3%
	VCN30(5)					
m3/s	1.1740	1.1289	-3.8%	1.341 (14.2%)	1.245 (10.3%)	-7.1%
L/s/km2	1.139	1.096	-3.8%	1.302 (14.2%)	1.209 (10.3%)	-7.1%
	VCN30(2)					
m3/s	1.7881	1.7287	-3.3%	2.053 (14.8%)	1.942 (12.3%)	-5.4%
L/s/km2	1.735	1.678	-3.3%	1.992 (14.8%)	1.885 (12.3%)	-5.4%

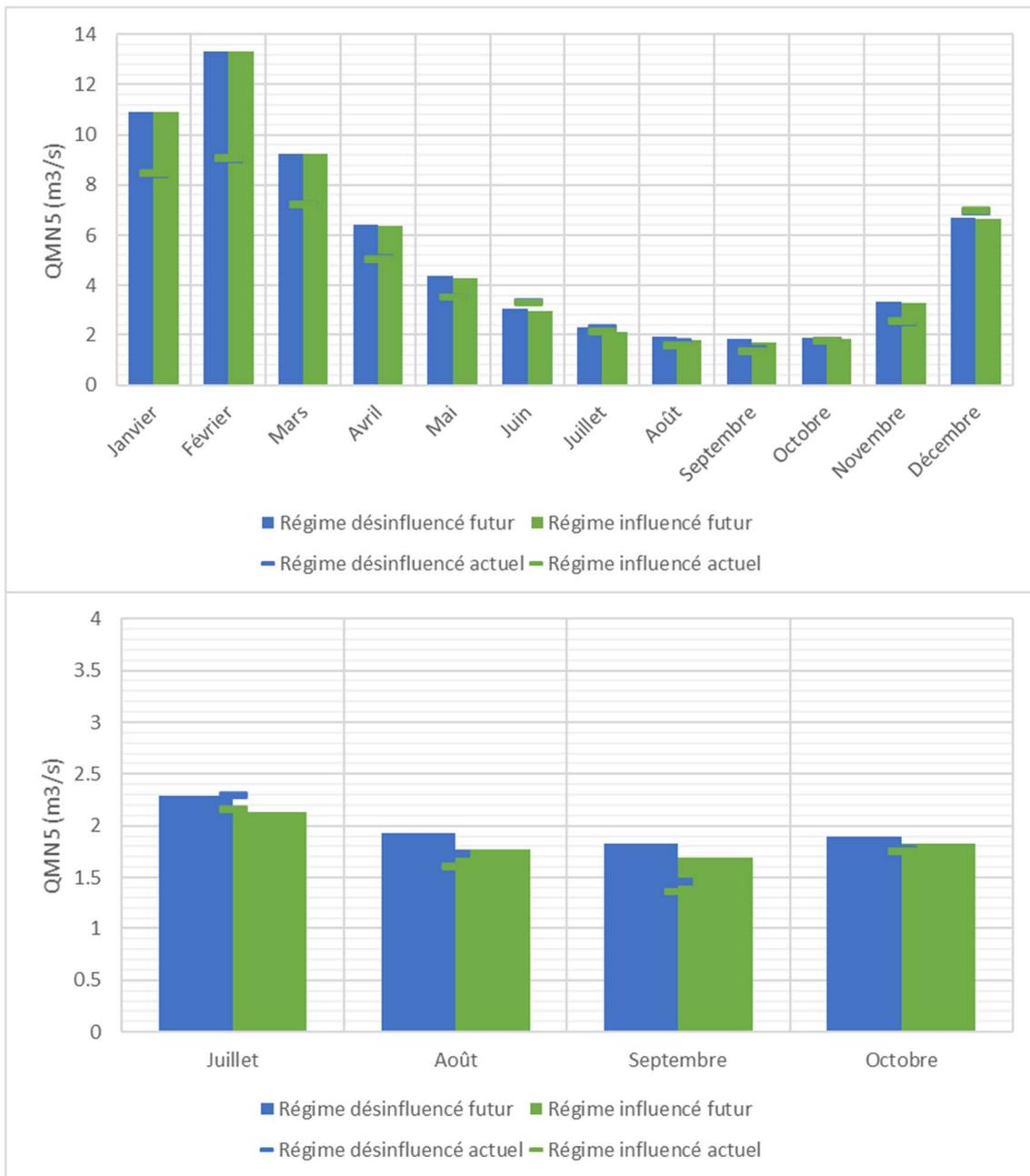


Figure 22 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel bas

## 6.2.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur la Sarthe amont :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 23% sur le QMNA5 désinfluencé et de 25% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est particulièrement marquée en automne / début hiver. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 45% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois de novembre et décembre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée aura tendance à se creuser légèrement plus ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, puis les usages futurs aggraveront la situation.

Tableau 10 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel haut

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	1.5597	1.4851	-4.8%	1.204 (-22.8%)	1.119 (-24.7%)	-7.1%
L/s/km2	1.514	1.441	-4.8%	1.169 (-22.8%)	1.086 (-24.7%)	-7.1%
	VCN30(5)					
m3/s	1.4294	1.3790	-3.5%	1.166 (-18.4%)	1.079 (-21.8%)	-7.5%
L/s/km2	1.387	1.338	-3.5%	1.131 (-18.4%)	1.047 (-21.8%)	-7.5%
	VCN30(2)					
m3/s	2.0941	2.0287	-3.1%	1.644 (-21.5%)	1.54 (-24.1%)	-6.3%
L/s/km2	2.032	1.969	-3.1%	1.595 (-21.5%)	1.495 (-24.1%)	-6.3%

Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

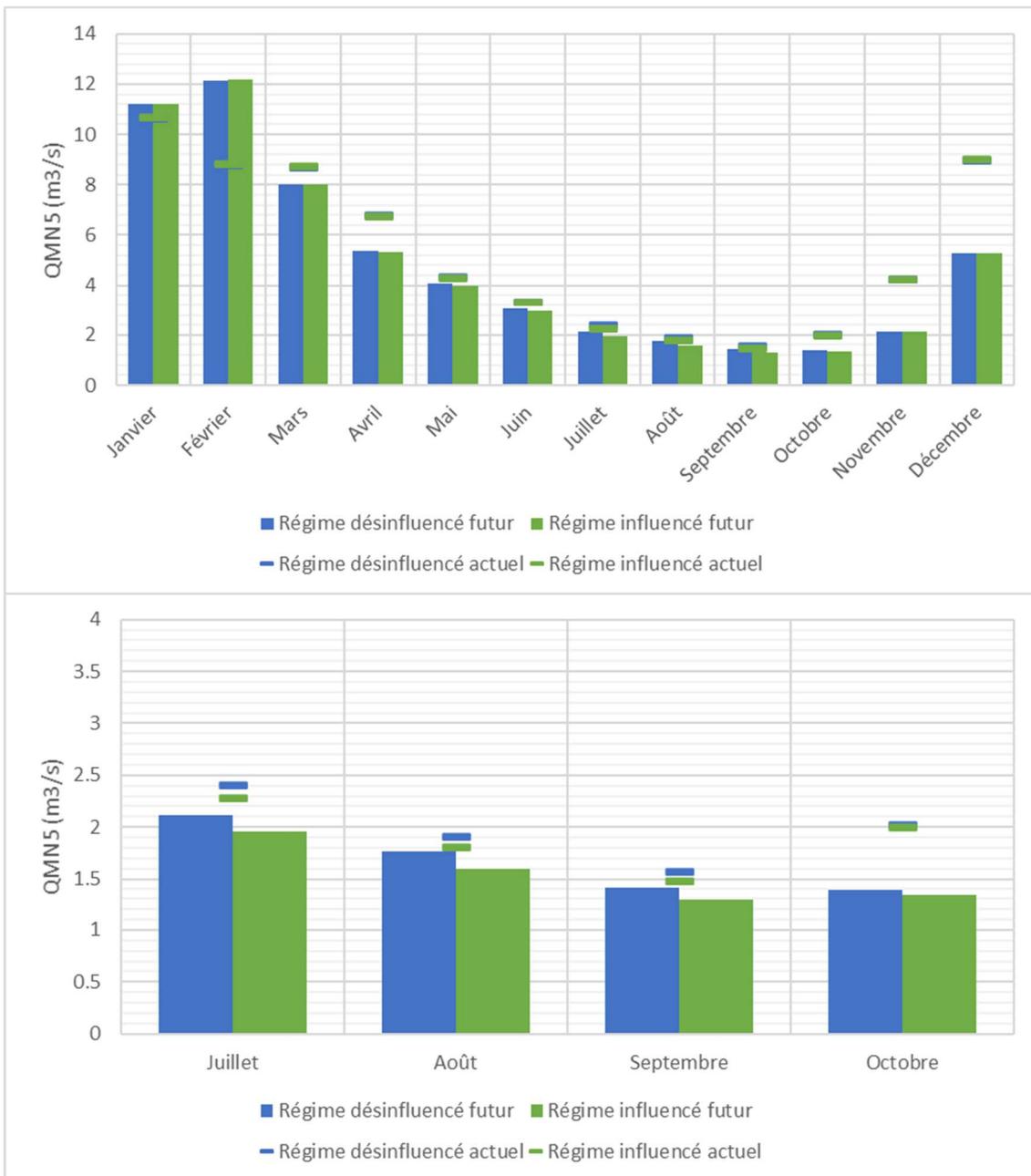


Figure 23 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe amont - Scénario tendanciel haut

## 6.3 L'Ornette

### 6.3.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur l'Ornette :

- ❖ On observe une augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs en situation influencée. Impact à la hausse de 62% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée de janvier à avril. Toutefois les épisodes de sécheresse sur l'été seront tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ Concernant l'hydrologie désinfluencée, les tendances s'inversent. On remarque une diminution des indicateurs d'étiages avec le seul effet du changement climatique. Impact à la baisse de 8% sur le QMNA5 désinfluencé ;
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée s'amointrit à cet horizon. Malgré tout, les usages impacteraient jusque 58% l'hydrologie naturelle du cours d'eau.
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère hausse du niveau moyen des nappes et une recharge hivernale plus prononcée. Les fluctuations devraient être alors plus marquées à cet horizon car les niveaux de nappes estivaux correspondent aux niveaux actuels.

**Tableau 11 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.0339	0.0082	-76.0%	0.031 (-7.5%)	0.013 (62.4%)	-57.8%
L/s/km2	0.379	0.091	-76.0%	0.351 (-7.5%)	0.148 (62.4%)	-57.8%
	VCN30(5)					
m3/s	0.0273	0.0063	-76.8%	0.026 (-3.9%)	0.011 (69.9%)	-59.1%
L/s/km2	0.305	0.071	-76.8%	0.293 (-3.9%)	0.12 (69.9%)	-59.1%
	VCN30(2)					
m3/s	0.0552	0.0289	-47.6%	0.052 (-5.3%)	0.031 (8%)	-40.3%
L/s/km2	0.617	0.323	-47.6%	0.584 (-5.3%)	0.349 (8%)	-40.3%

Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

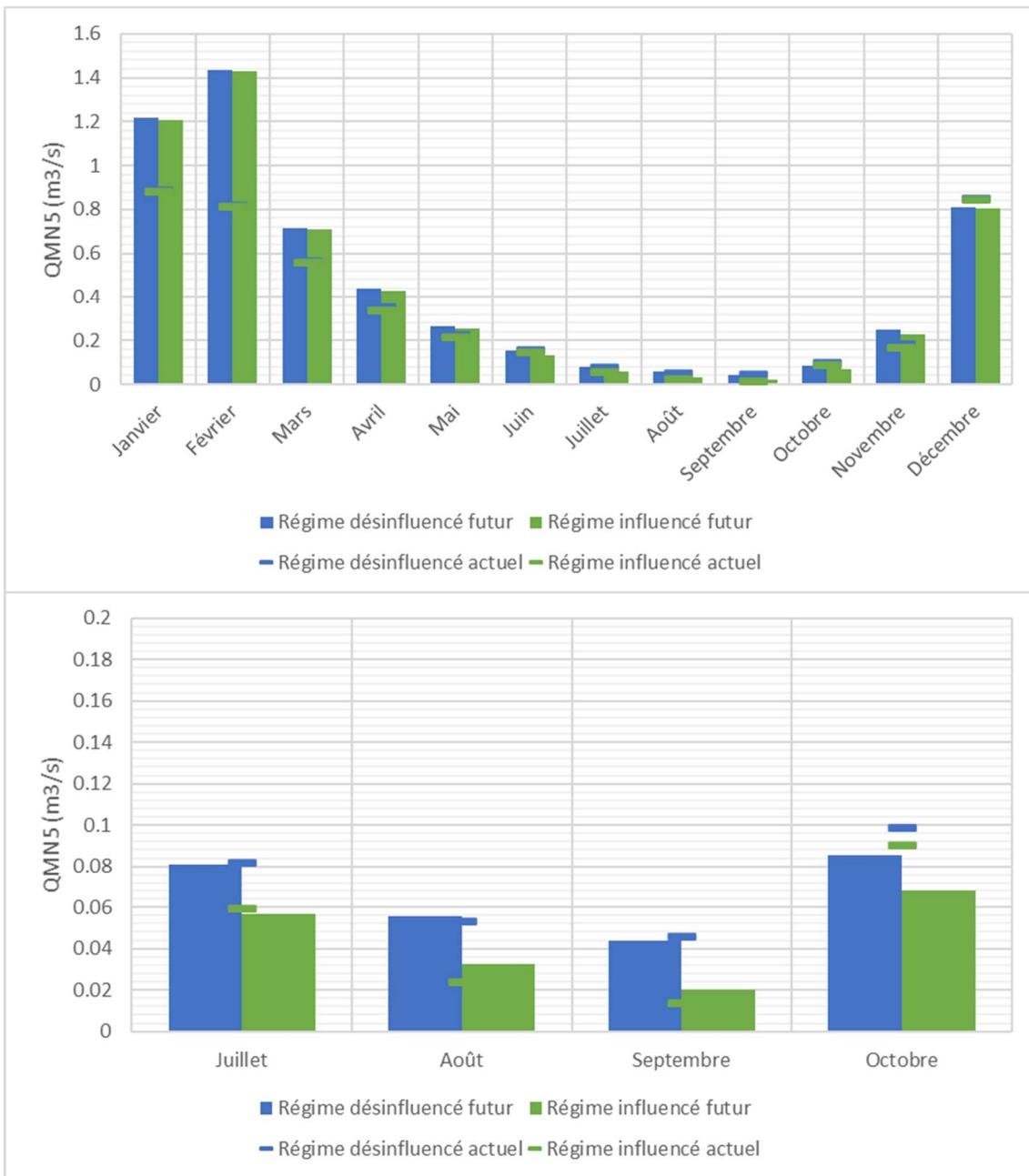


Figure 24 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas

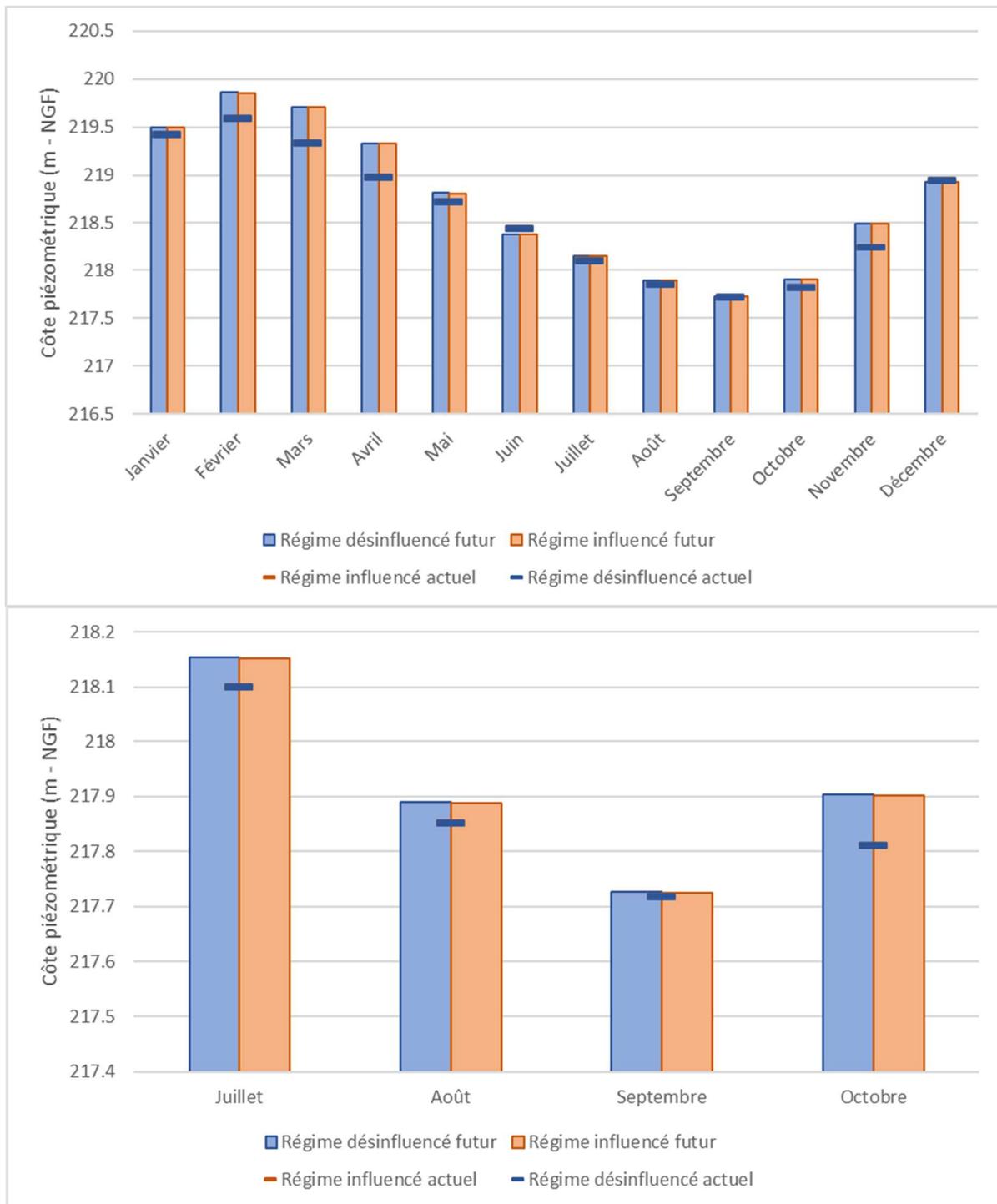


Figure 25 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel bas

### 6.3.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur l'Ornette :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 17% sur le QMNA5 désinfluencé et de 68% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est particulièrement marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 50% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures au mois d'avril, de novembre et de décembre ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée aura tendance à doubler ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, puis les usages futurs aggraveront la situation ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère baisse du niveau moyen des nappes à partir d'avril, une accentuation du processus de vidange automnale. Ainsi, les fluctuations devraient être plus intenses qu'aujourd'hui.

**Tableau 12 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.0399	0.0247	-38.1%	0.033 (-17.2%)	0.008 (-68%)	-76.0%
L/s/km2	0.446	0.276	-38.1%	0.369 (-17.2%)	0.088 (-68%)	-76.0%
	VCN30(5)					
m3/s	0.0317	0.0184	-42.0%	0.028 (-10.3%)	0.005 (-73.6%)	-82.9%
L/s/km2	0.354	0.206	-42.0%	0.318 (-10.3%)	0.054 (-73.6%)	-82.9%
	VCN30(2)					
m3/s	0.0643	0.0460	-28.5%	0.052 (-19.6%)	0.023 (-50.3%)	-55.8%
L/s/km2	0.718	0.513	-28.5%	0.577 (-19.6%)	0.255 (-50.3%)	-55.8%

Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

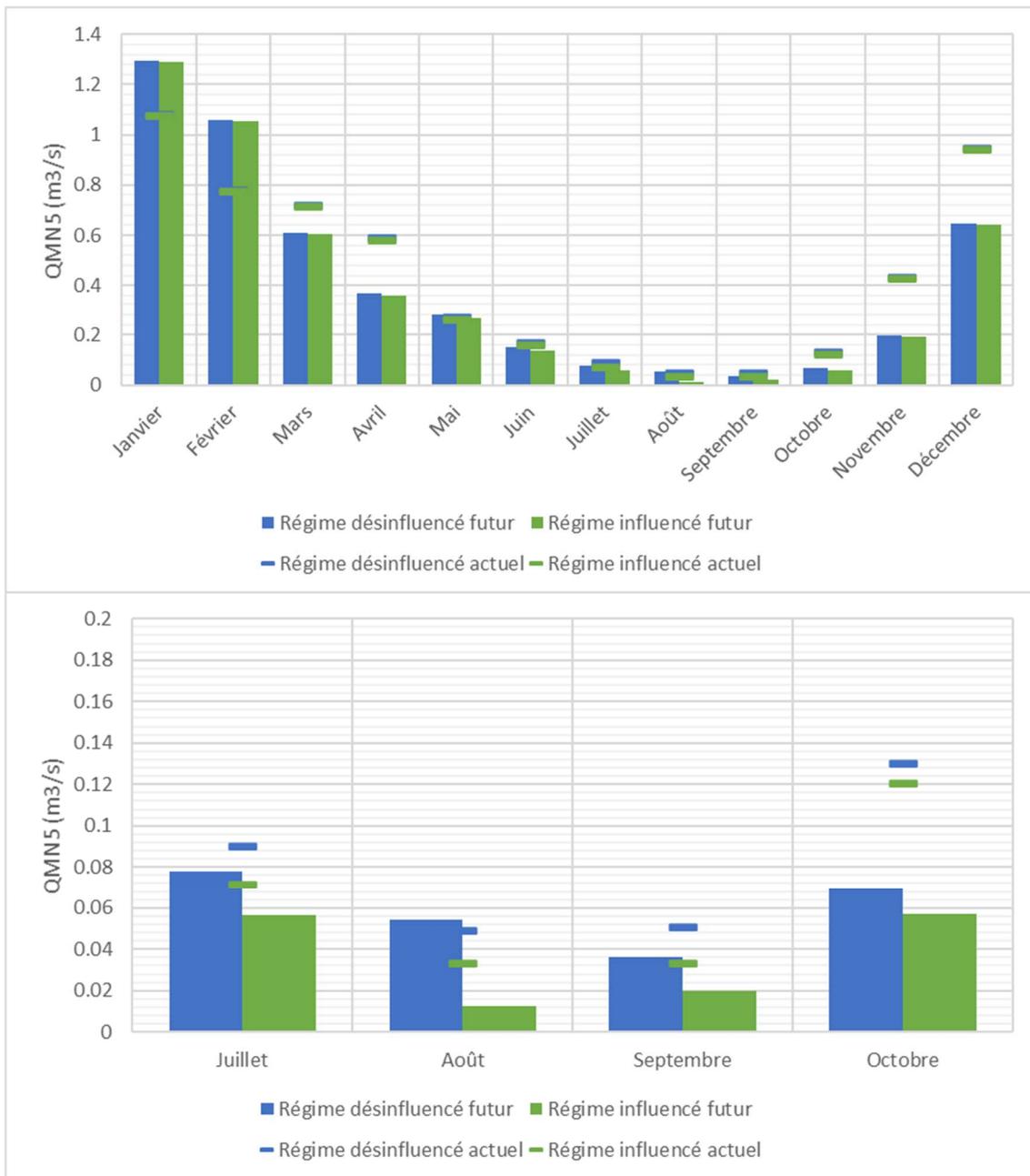


Figure 26 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut

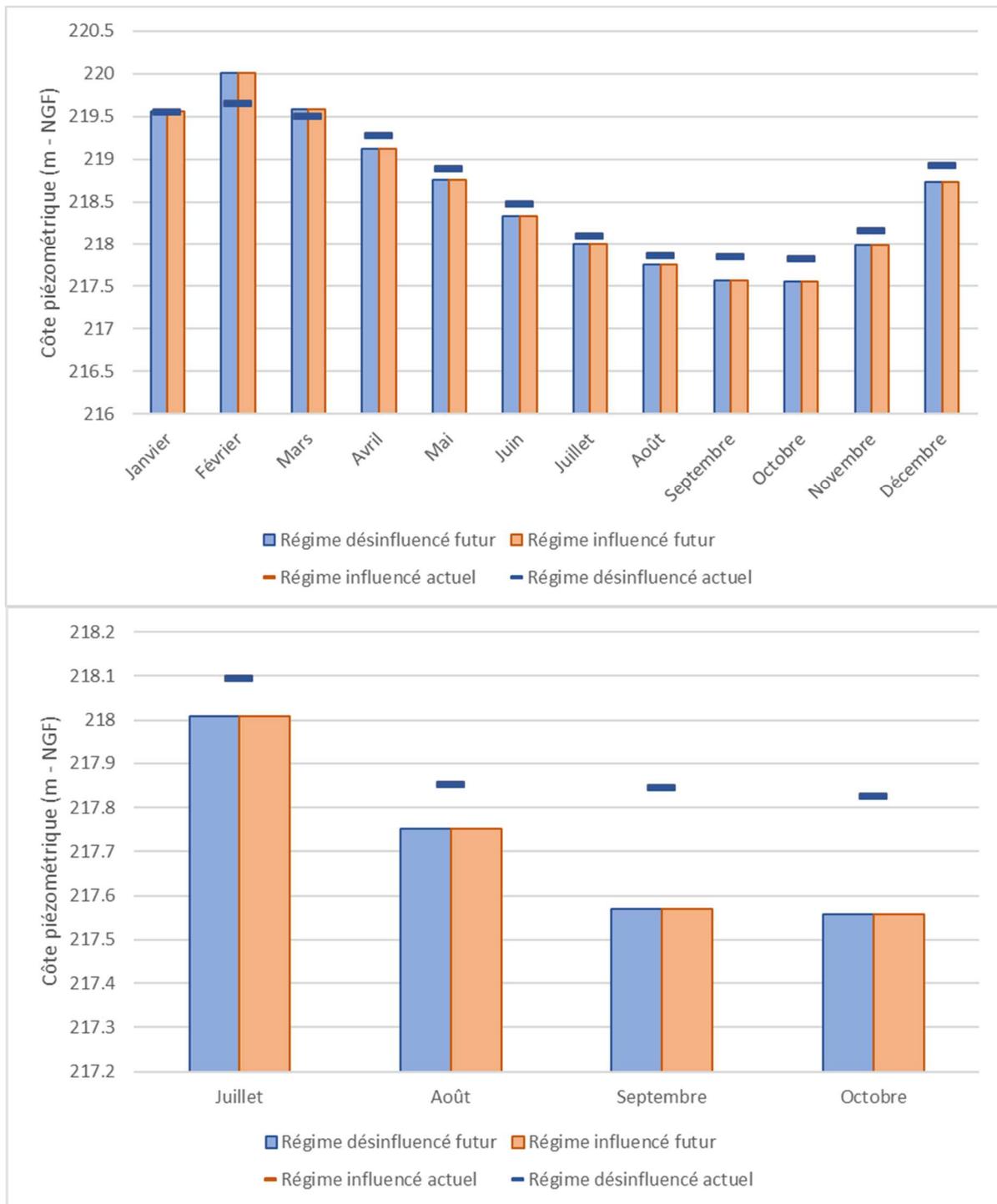


Figure 27 : Cotes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Ornette - Scénario tendanciel haut

## 6.4 Le Merdereau

### 6.4.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur le Merdereau :

- ❖ On observe une très légère augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs en situation influencée. Impact à la hausse de 2% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée en période hivernale. Toutefois les épisodes de sécheresse sur l'été seront tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée reste du même ordre à cet horizon ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère hausse du niveau moyen des nappes et une recharge hivernale plus prononcée. Les fluctuations devraient être alors plus marquées à cet horizon car les niveaux de nappes estivaux correspondent aux niveaux actuels.

**Tableau 13 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1521	0.1511	-0.7%	0.153 (0.4%)	0.154 (1.7%)	0.7%
L/s/km2	1.051	1.044	-0.7%	1.055 (0.4%)	1.062 (1.7%)	0.7%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1314	0.1329	1.1%	0.135 (3.1%)	0.137 (3.1%)	1.2%
L/s/km2	0.908	0.918	1.1%	0.936 (3.1%)	0.947 (3.1%)	1.2%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2134	0.2122	-0.6%	0.222 (4.1%)	0.223 (4.9%)	0.2%
L/s/km2	1.475	1.466	-0.6%	1.535 (4.1%)	1.538 (4.9%)	0.2%

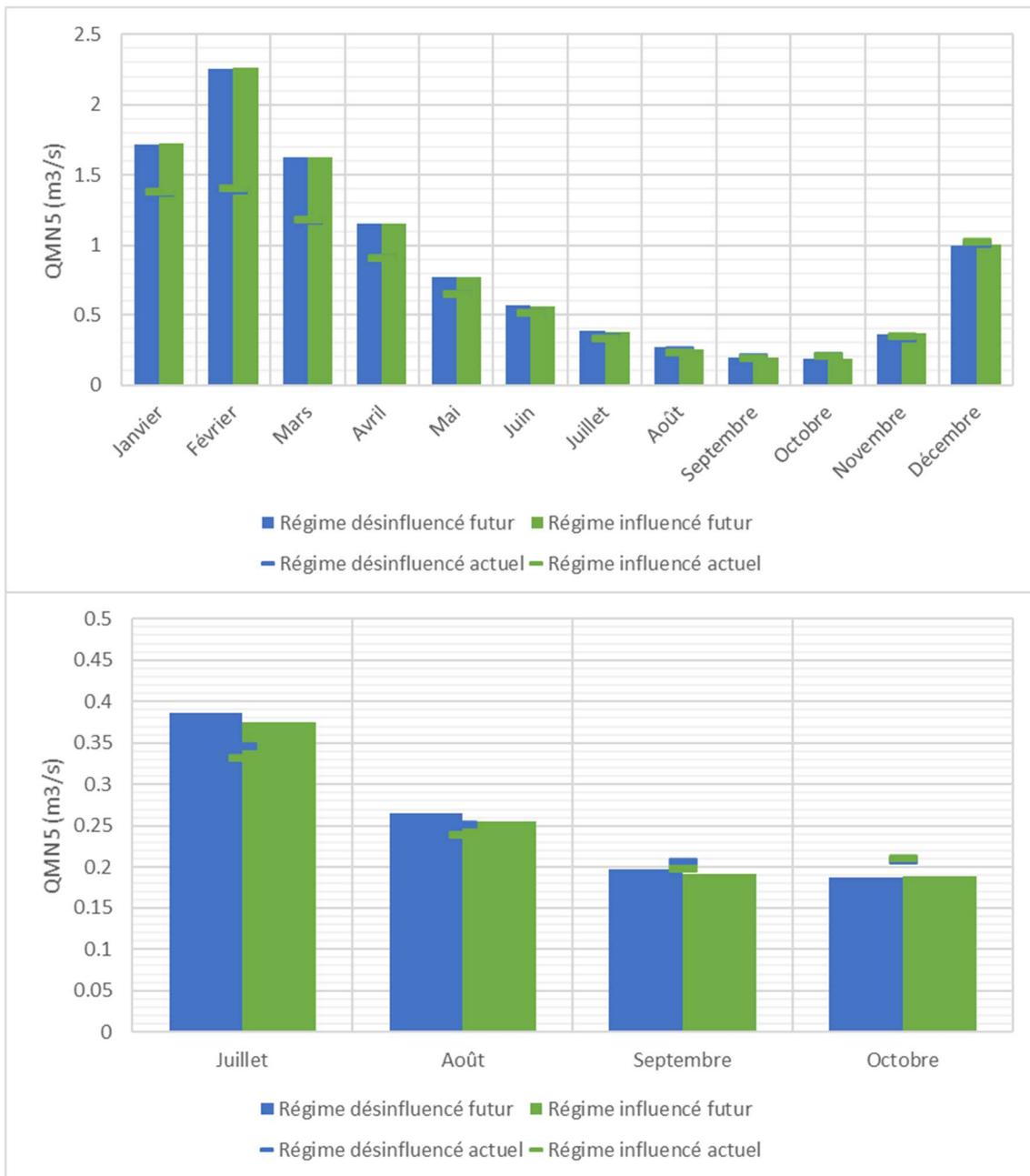


Figure 28 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas

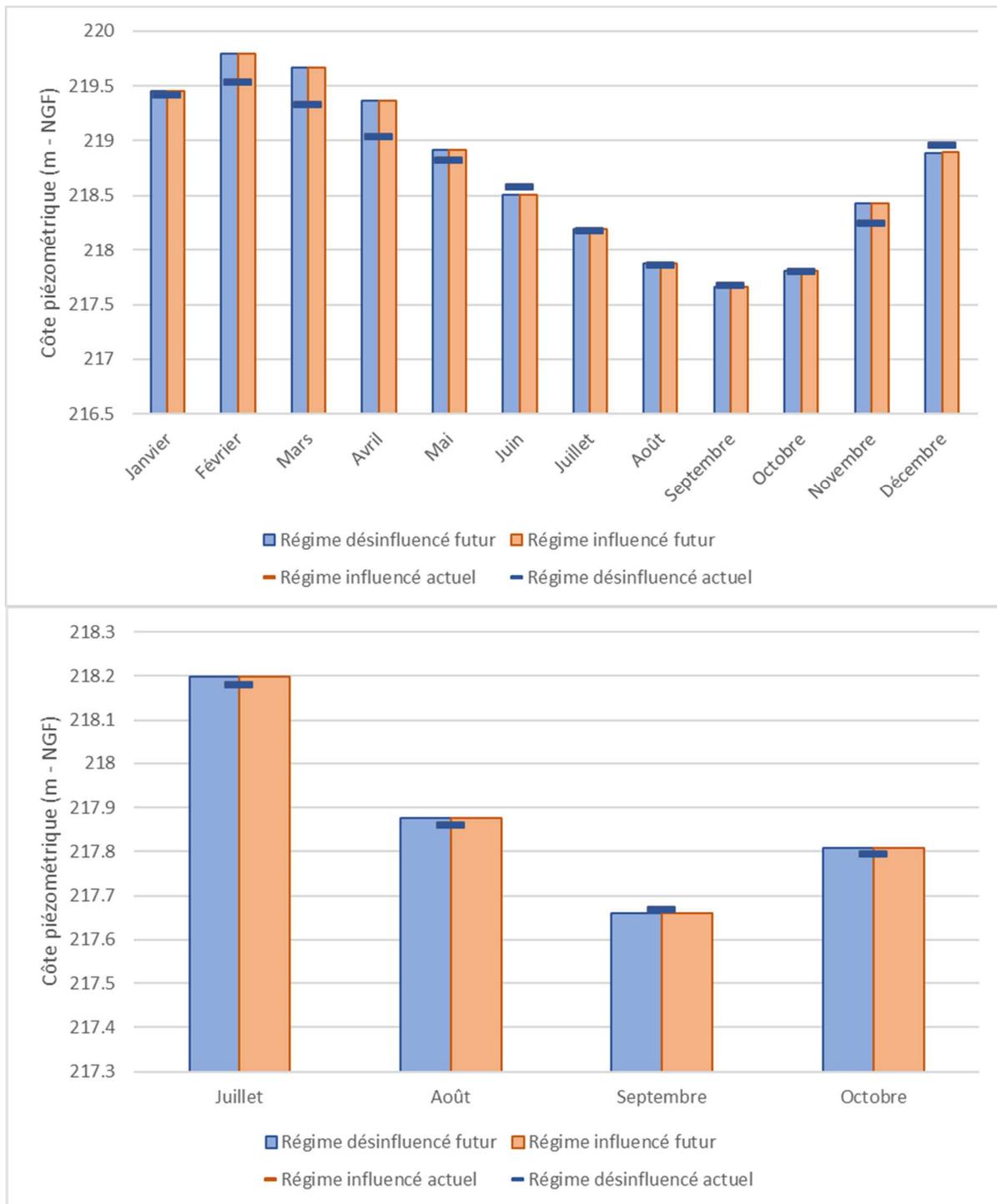


Figure 29 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel bas

### 6.4.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur le Merdereau :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 37% sur le QMNA5 désinfluencé et de 33% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est particulièrement marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 40% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures au mois d'avril, de novembre et de décembre ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée aura tendance à s'inverser et devenir positif ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, les usages amélioreraient la situation ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère baisse du niveau moyen des nappes à partir d'avril, une accentuation du processus de vidange automnale. Ainsi, les fluctuations devraient être plus intenses qu'aujourd'hui.

**Tableau 14 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de Infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1784	0.1767	-1.0%	0.113 (-36.8%)	0.118 (-33.2%)	4.5%
L/s/km2	1.233	1.221	-1.0%	0.78 (-36.8%)	0.815 (-33.2%)	4.5%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1600	0.1587	-0.9%	0.104 (-35%)	0.11 (-30.7%)	5.7%
L/s/km2	1.106	1.096	-0.9%	0.719 (-35%)	0.76 (-30.7%)	5.7%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2698	0.2660	-1.4%	0.179 (-33.5%)	0.185 (-30.6%)	2.9%
L/s/km2	1.864	1.838	-1.4%	1.24 (-33.5%)	1.276 (-30.6%)	2.9%

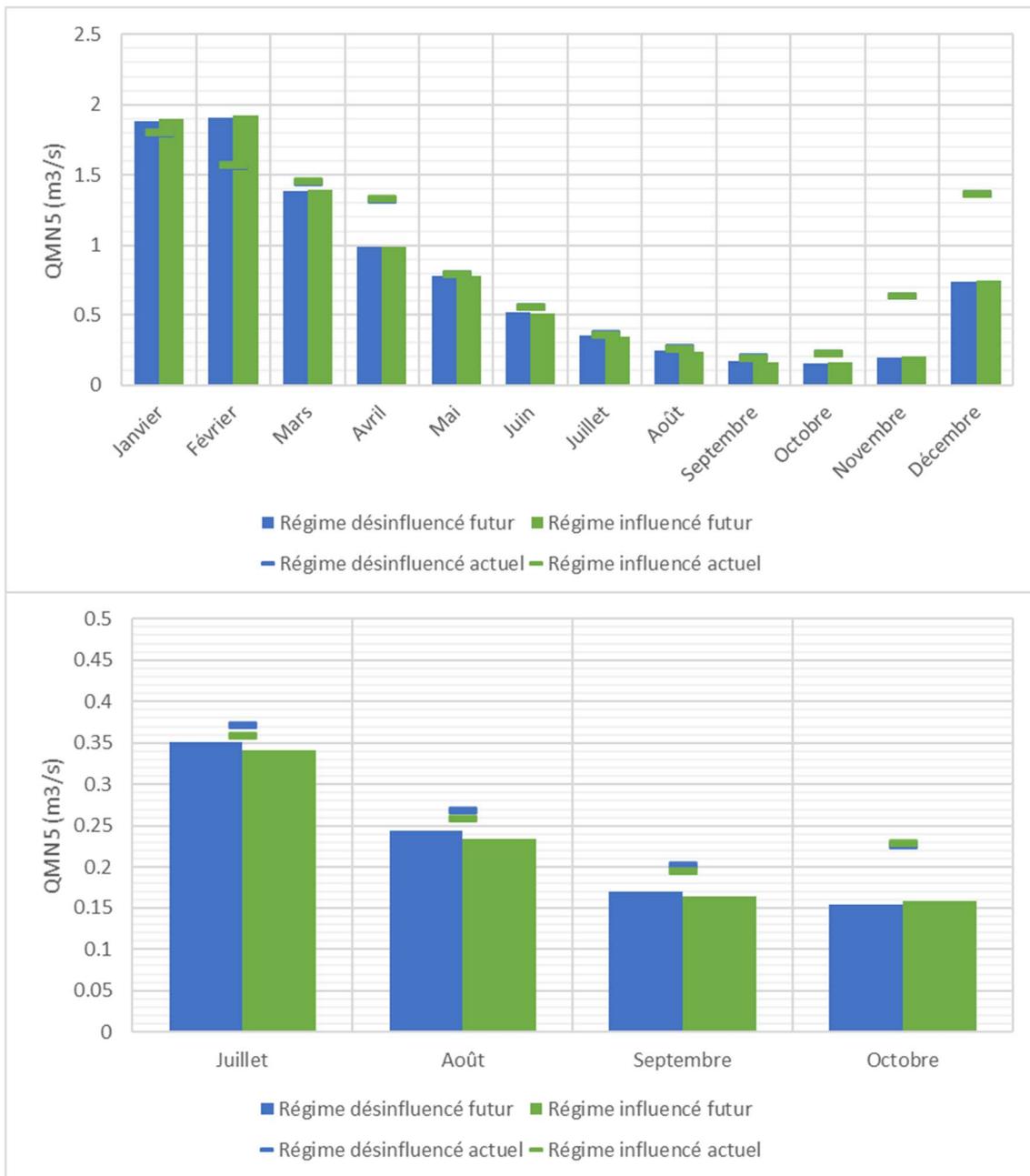


Figure 30 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut

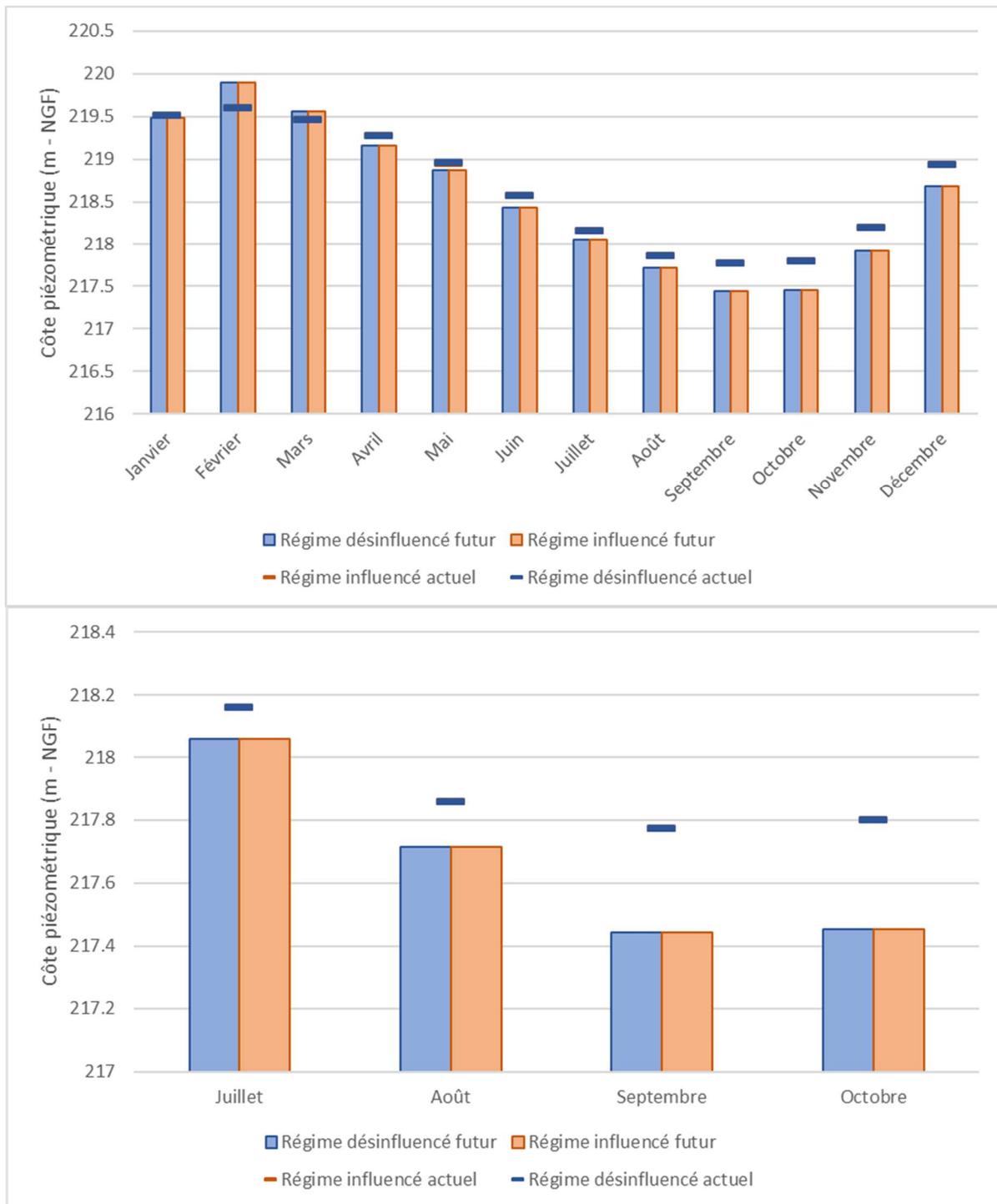


Figure 31 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Merdereau - Scénario tendanciel haut

## 6.5 La Vaudelle

### 6.5.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur la Vaudelle :

- ❖ On observe une légère augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 6% sur le QMNA5 influencé et hausse de 4% sur le QMNA5 désinfluencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée en période hivernale. Toutefois les épisodes de sécheresse sur l'été seront tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5 ;
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée reste du même ordre à cet horizon ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère hausse du niveau moyen des nappes et une recharge hivernale plus prononcée. Les fluctuations devraient être alors plus marquées à cet horizon car les niveaux de nappes estivaux correspondent aux niveaux actuels.

**Tableau 15 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1405	0.1350	-3.9%	0.147 (4.4%)	0.143 (6%)	-2.3%
L/s/km2	1.500	1.442	-3.9%	1.566 (4.4%)	1.529 (6%)	-2.3%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1259	0.1222	-2.9%	0.135 (7.1%)	0.132 (8.1%)	-2.1%
L/s/km2	1.345	1.306	-2.9%	1.441 (7.1%)	1.411 (8.1%)	-2.1%
	VCN30(2)					
m3/s	0.1873	0.1829	-2.3%	0.199 (6.5%)	0.195 (6.9%)	-1.9%
L/s/km2	2.000	1.953	-2.3%	2.13 (6.5%)	2.088 (6.9%)	-1.9%

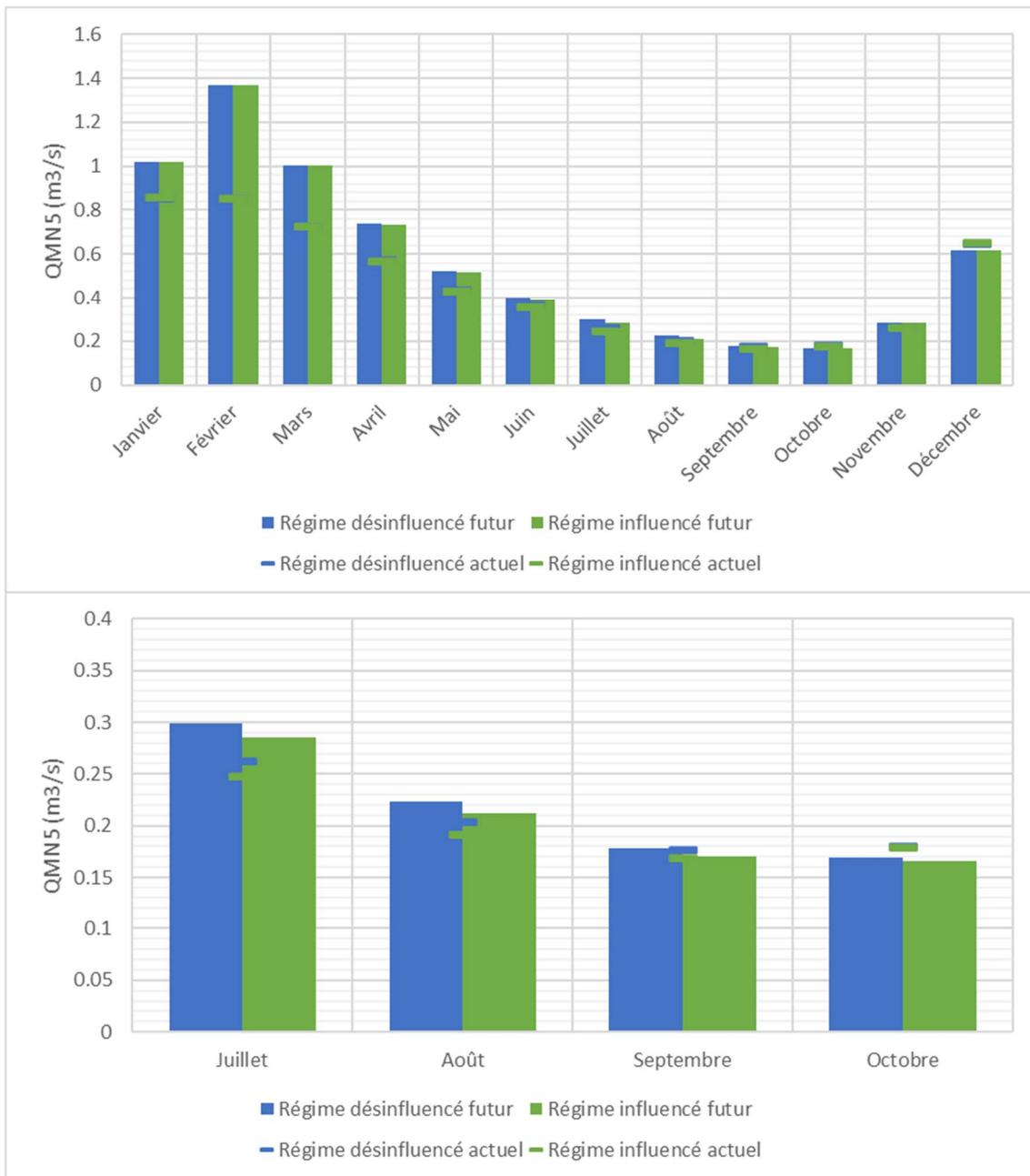


Figure 32 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas

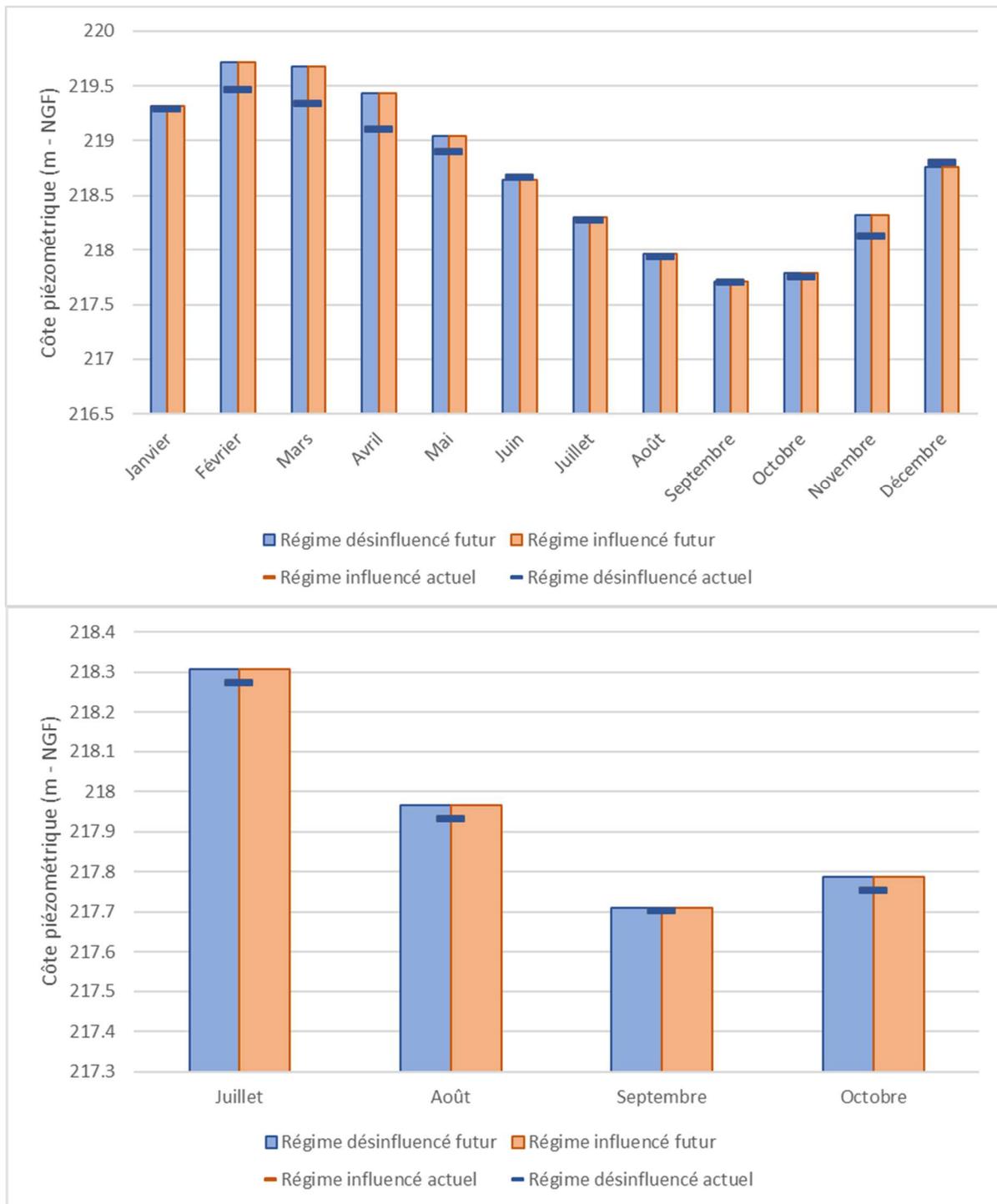


Figure 33 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel bas

### 6.5.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur la Vaudelle :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 33% sur le QMNA5 désinfluencé et de 32% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 25% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures au mois d'avril, de novembre et de décembre ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée restent du même ordre ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une baisse du niveau moyen des nappes à partir d'avril, une accentuation du processus de vidange automnale. Ainsi, les fluctuations devraient être plus intenses qu'aujourd'hui.

**Tableau 16 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1651	0.1601	-3.0%	0.111 (-32.6%)	0.109 (-31.9%)	-2.1%
L/s/km2	1.763	1.710	-3.0%	1.189 (-32.6%)	1.164 (-31.9%)	-2.1%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1524	0.1479	-2.9%	0.105 (-31%)	0.103 (-30.2%)	-1.8%
L/s/km2	1.628	1.580	-2.9%	1.123 (-31%)	1.103 (-30.2%)	-1.8%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2300	0.2247	-2.3%	0.163 (-29.1%)	0.16 (-28.8%)	-1.9%
L/s/km2	2.457	2.400	-2.3%	1.742 (-29.1%)	1.71 (-28.8%)	-1.9%

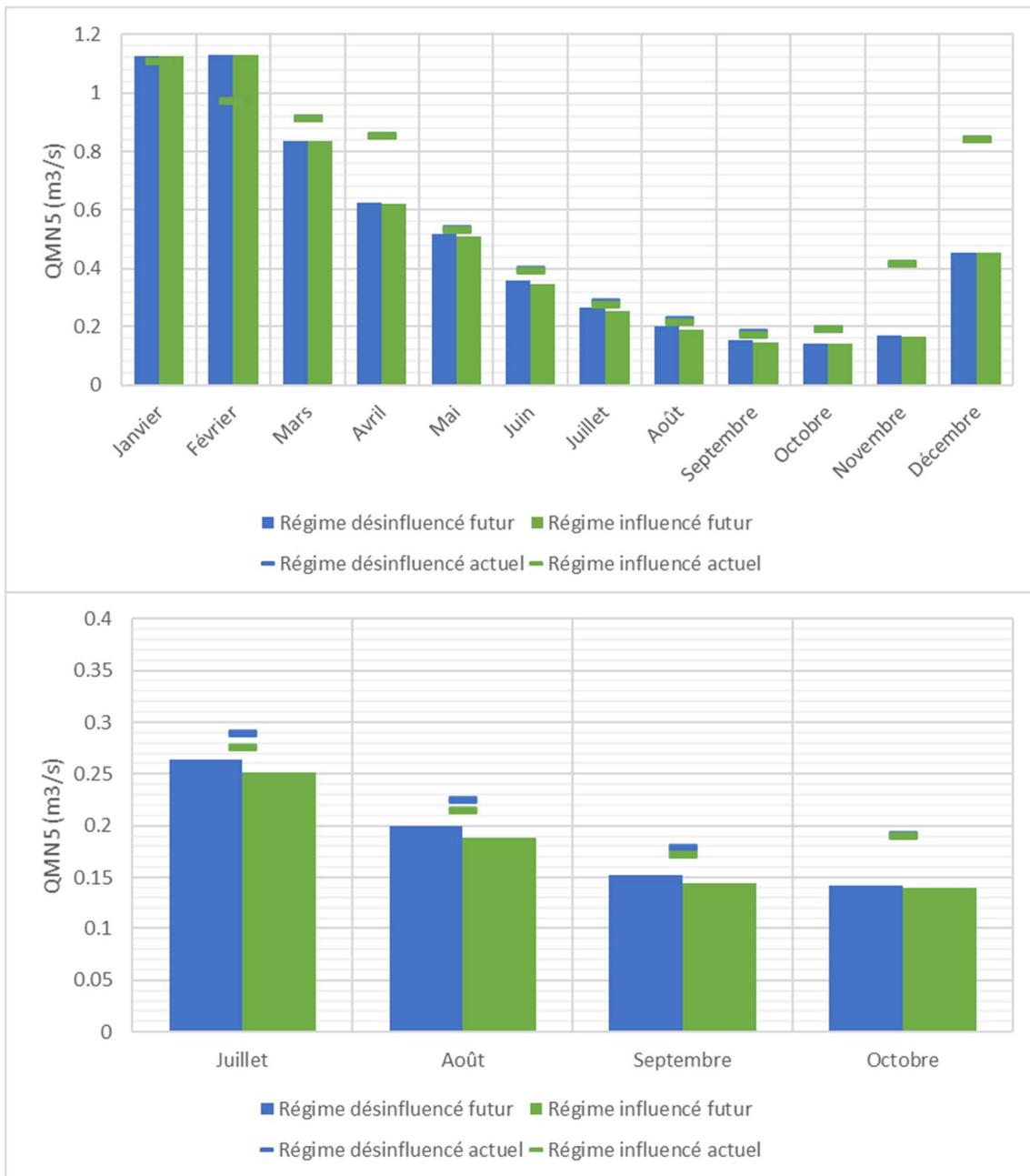


Figure 34 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut

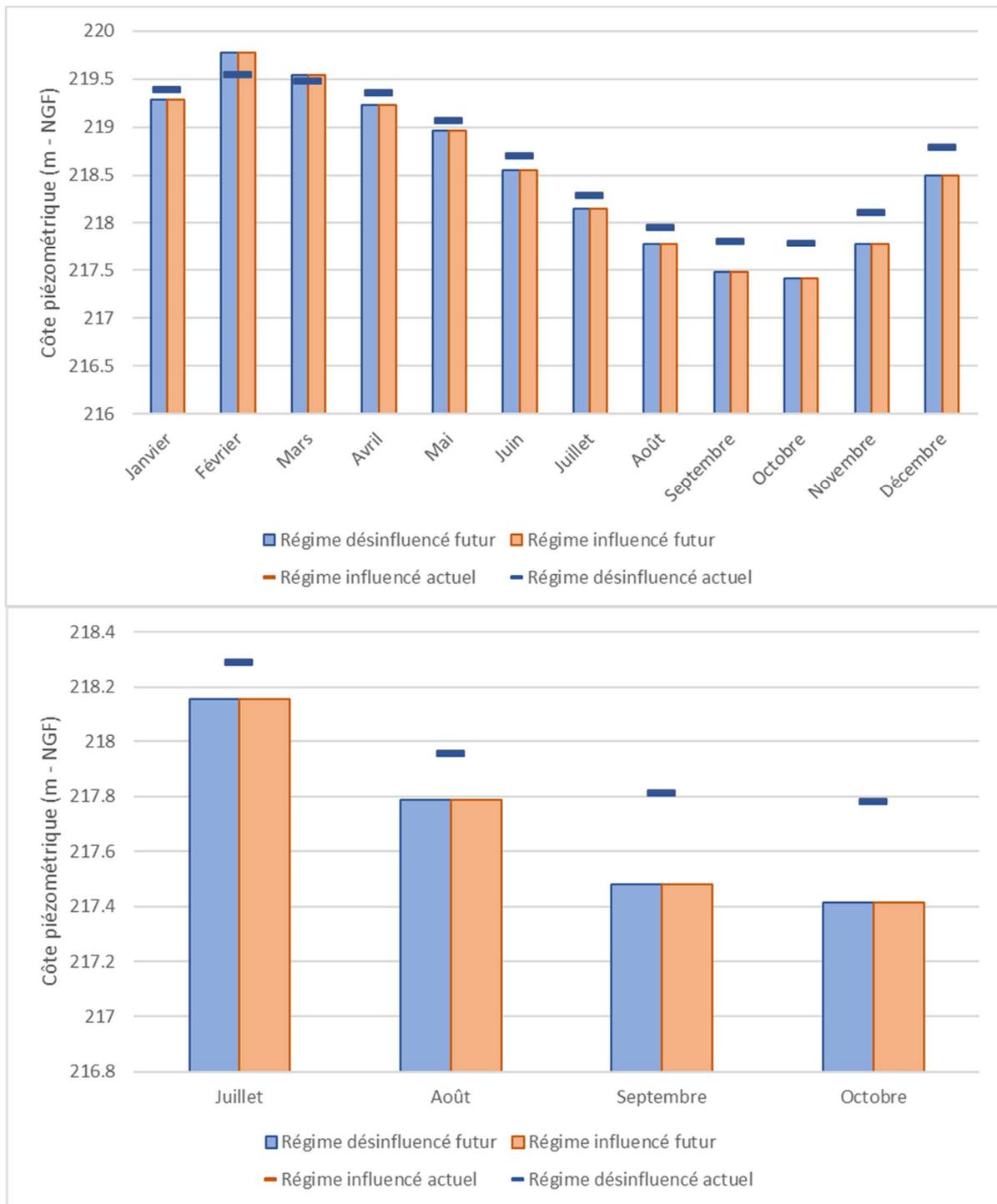


Figure 35 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Vaudelle - Scénario tendanciel haut

## 6.6 L'Orthe

### 6.6.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur l'Orthe :

- ❖ On observe une augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 17% sur le QMNA5 influencé et hausse de 9% sur le QMNA5 désinfluencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée en période hivernale. Toutefois les épisodes de sécheresse sur l'été seront tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5 ;
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée pourraient s'amoinrir tout en restant conséquent ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une légère hausse du niveau moyen des nappes et une recharge hivernale plus prononcée. Les fluctuations devraient être alors plus marquées à cet horizon car les niveaux de nappes estivaux correspondent aux niveaux actuels.

Tableau 17 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.3101	0.2293	-26.1%	0.338 (8.9%)	0.268 (16.9%)	-20.6%
L/s/km2	2.308	1.707	-26.1%	2.513 (8.9%)	1.994 (16.9%)	-20.6%
	VCN30(5)					
m3/s	0.2974	0.2197	-26.1%	0.313 (5.4%)	0.249 (13.3%)	-20.5%
L/s/km2	2.213	1.635	-26.1%	2.332 (5.4%)	1.853 (13.3%)	-20.5%
	VCN30(2)					
m3/s	0.3937	0.3139	-20.3%	0.409 (4%)	0.34 (8.3%)	-16.9%
L/s/km2	2.930	2.337	-20.3%	3.048 (4%)	2.532 (8.3%)	-16.9%

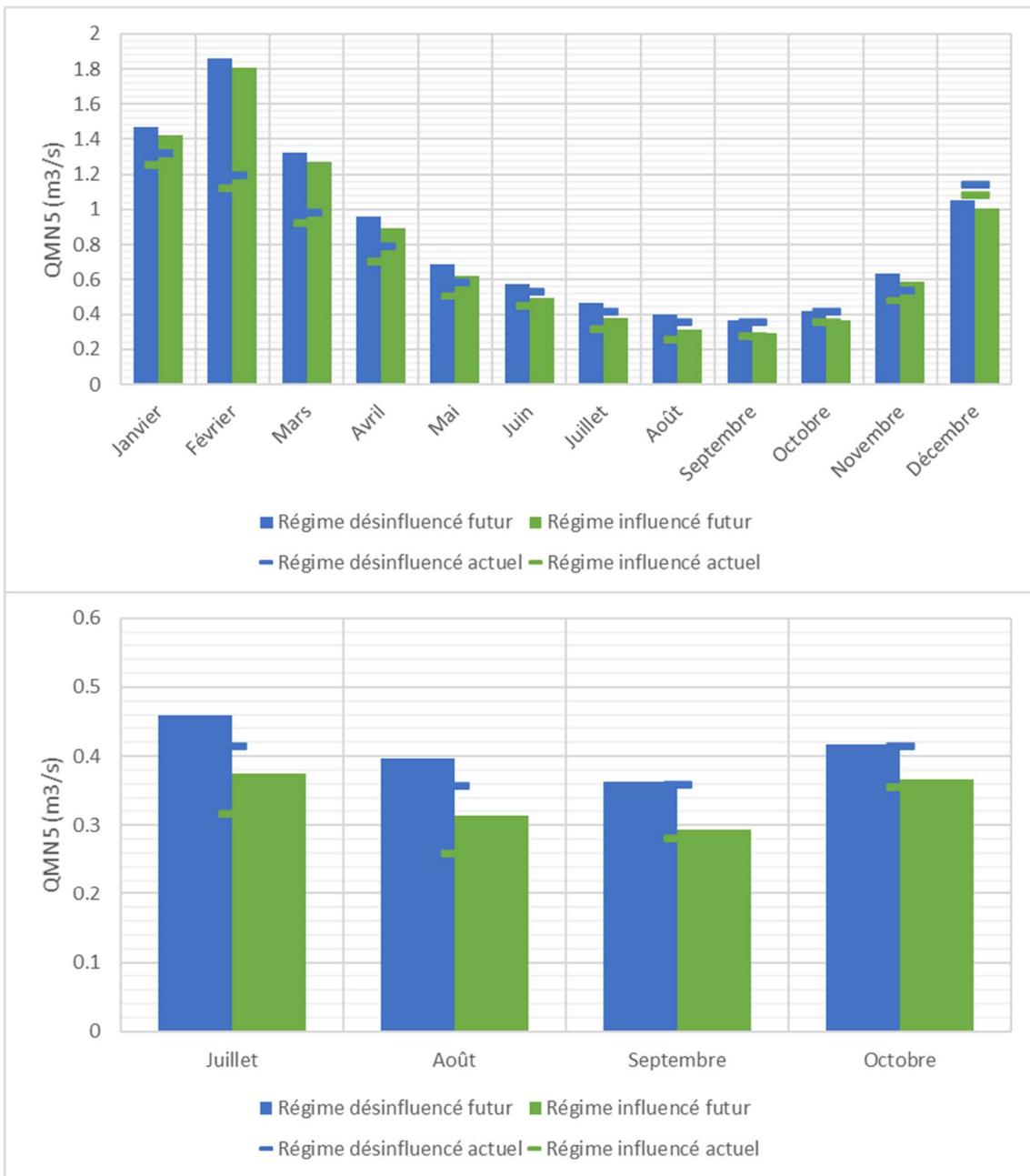


Figure 36 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas

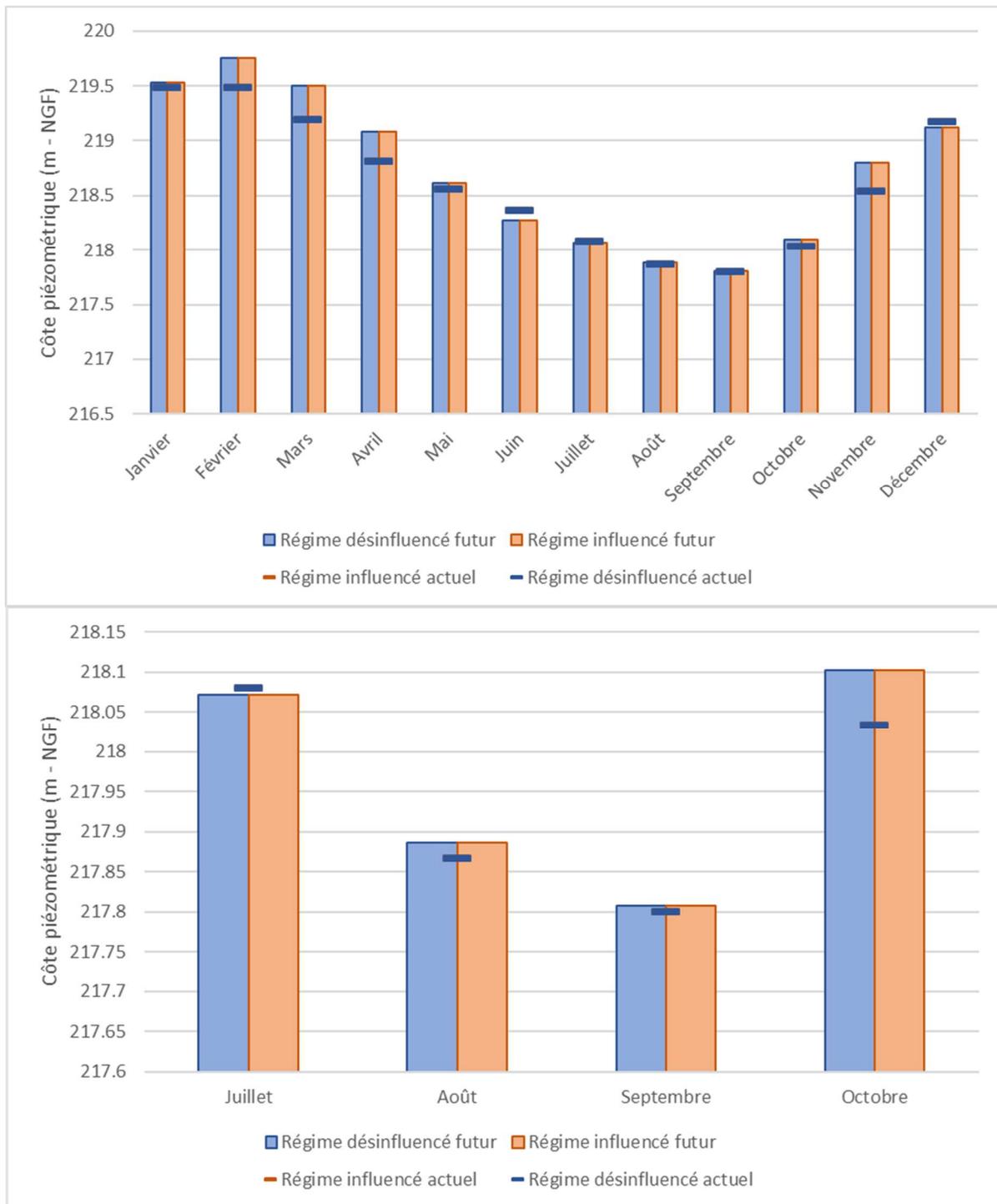


Figure 37 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel bas

### 6.6.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur l'Orthe :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 17% sur le QMNA5 désinfluencé et de 19% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 25% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures de novembre, de décembre et à partir de mars notamment ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée restent du même ordre ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, les usages aggraveront la situation ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une baisse du niveau moyen des nappes à partir d'avril, une accentuation du processus de vidange automnale. Ainsi, les fluctuations devraient être plus intenses qu'aujourd'hui.

**Tableau 18 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.3613	0.2803	-22.4%	0.3 (-17%)	0.228 (-18.8%)	-24.1%
L/s/km2	2.690	2.086	-22.4%	2.234 (-17%)	1.695 (-18.8%)	-24.1%
	VCN30(5)					
m3/s	0.3409	0.2651	-22.2%	0.285 (-16.3%)	0.215 (-19%)	-24.7%
L/s/km2	2.538	1.973	-22.2%	2.124 (-16.3%)	1.599 (-19%)	-24.7%
	VCN30(2)					
m3/s	0.4388	0.3573	-18.6%	0.371 (-15.5%)	0.296 (-17.3%)	-20.3%
L/s/km2	3.266	2.660	-18.6%	2.761 (-15.5%)	2.201 (-17.3%)	-20.3%

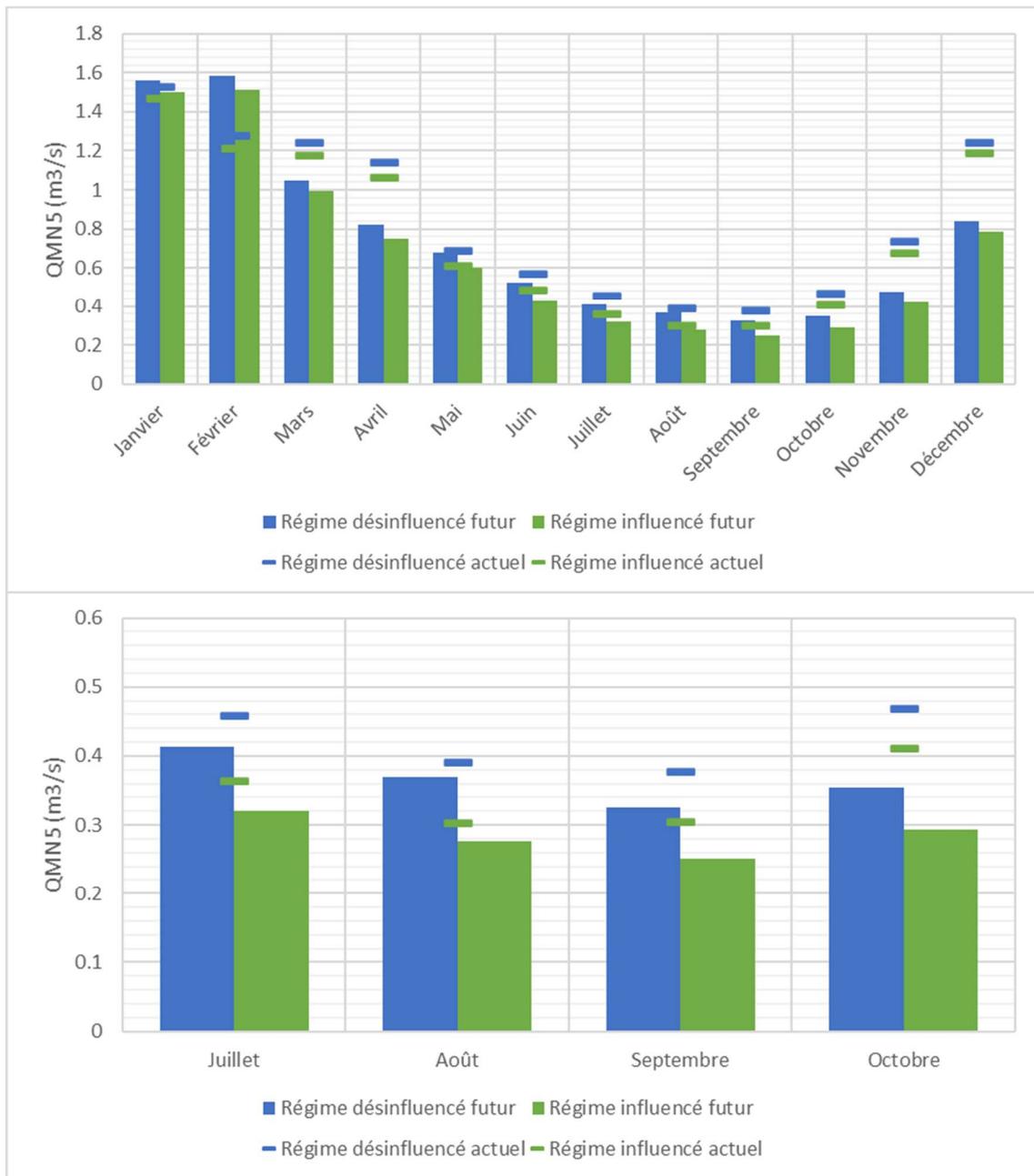


Figure 38 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut

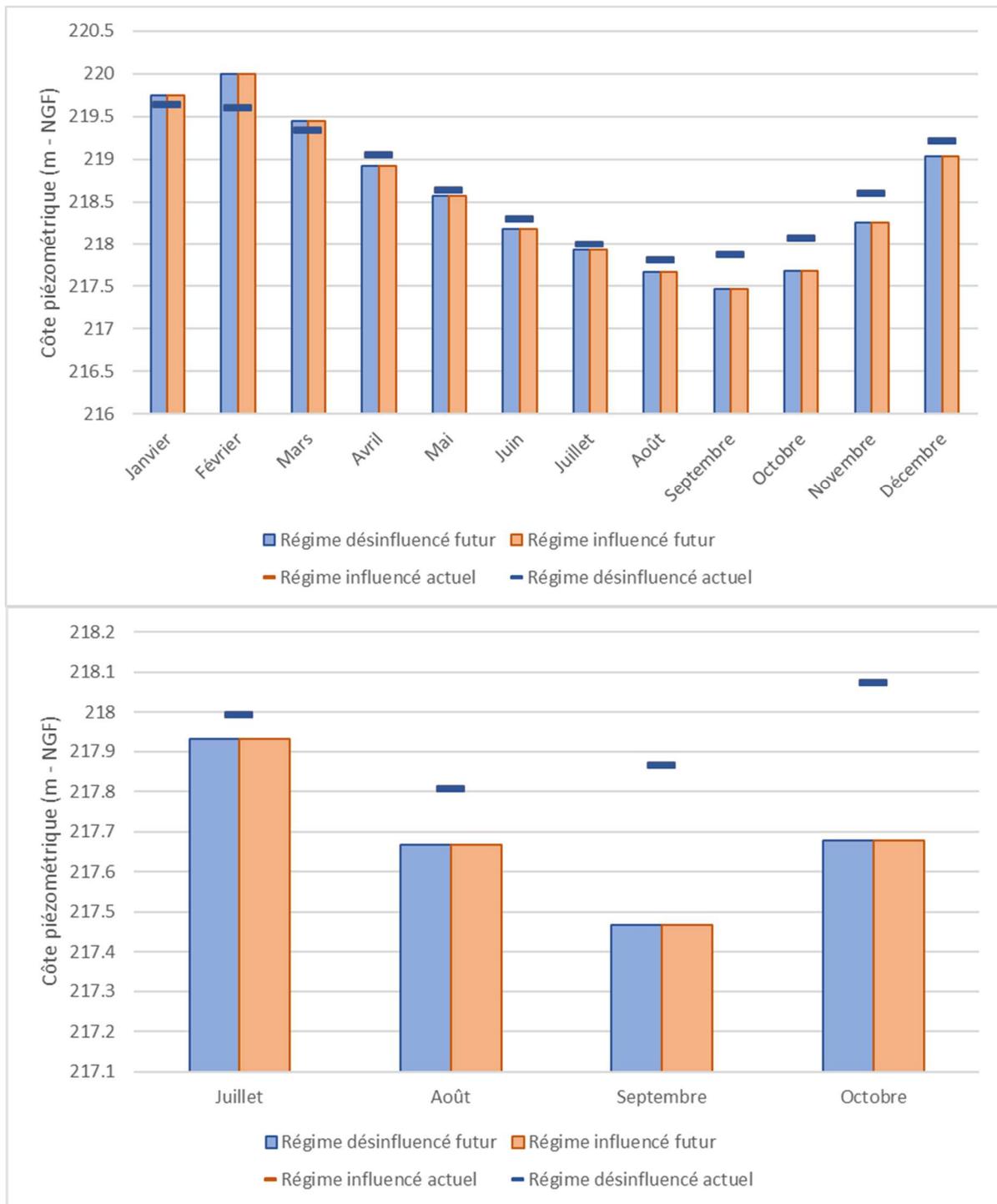


Figure 39 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – SUG Orthe - Scénario tendanciel haut

## 6.7 La Bienne

### 6.7.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur la Bienne :

- ❖ On observe une forte augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 156% sur le QMNA5 influencé et hausse de 37% sur le QMNA5 désinfluencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée en période hivernale. Les épisodes de sécheresse sur l'été seront bien moins intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle. On relève ainsi une hausse des débits tout au long de l'année ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée diminueraient de manière importante ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une hausse du niveau moyen des nappes et une recharge hivernale plus prononcée.

**Tableau 19 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.1724	0.0706	-59.0%	0.237 (37.4%)	0.181 (156.1%)	-23.6%
L/s/km2	1.051	0.431	-59.0%	1.444 (37.4%)	1.103 (156.1%)	-23.6%
	VCN30(5)					
m3/s	0.1642	0.0665	-59.5%	0.226 (37.6%)	0.172 (159%)	-23.8%
L/s/km2	1.001	0.405	-59.5%	1.378 (37.6%)	1.05 (159%)	-23.8%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2346	0.1427	-39.2%	0.304 (29.7%)	0.243 (70.6%)	-20.0%
L/s/km2	1.430	0.870	-39.2%	1.856 (29.7%)	1.484 (70.6%)	-20.0%

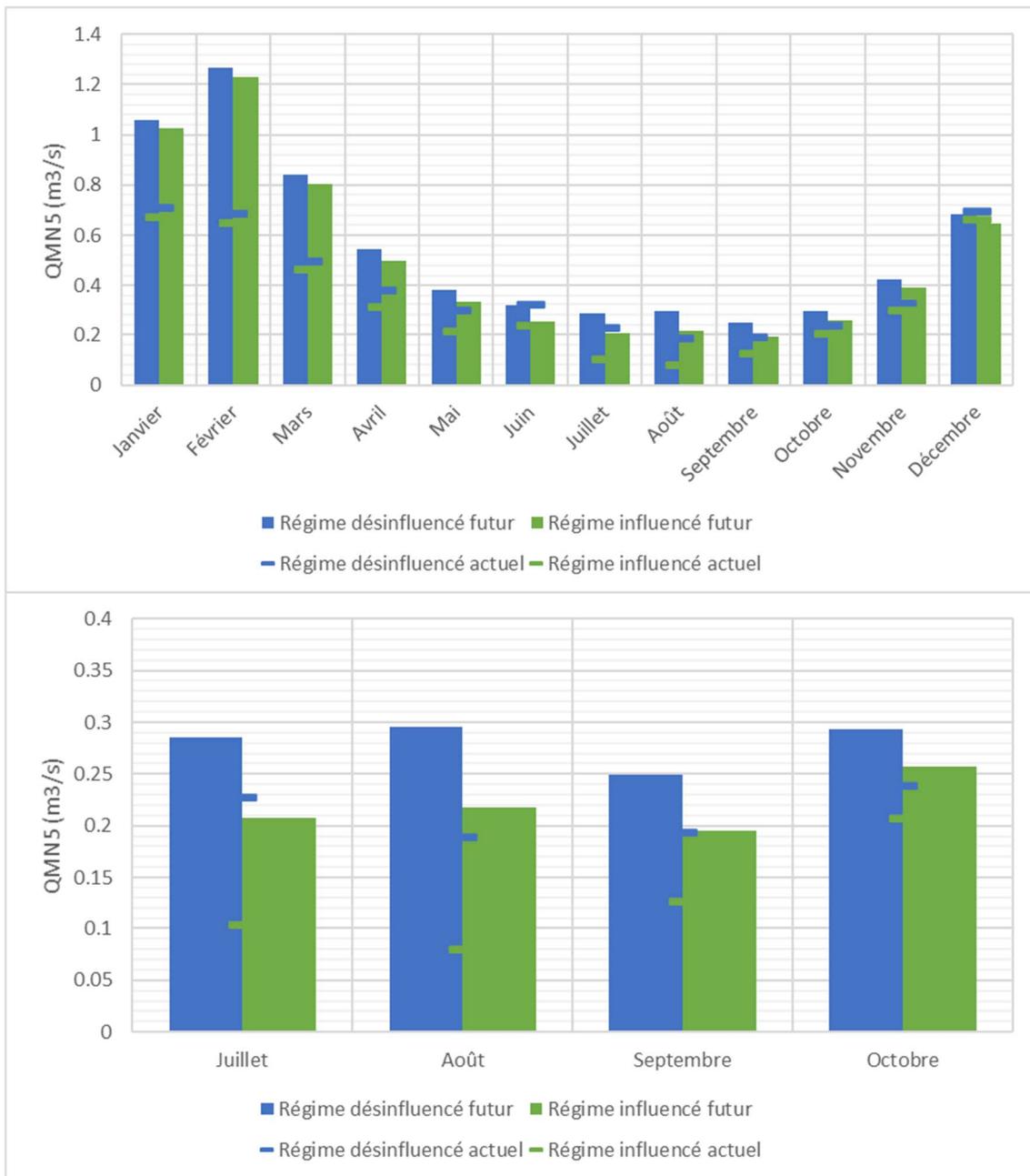


Figure 40 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas

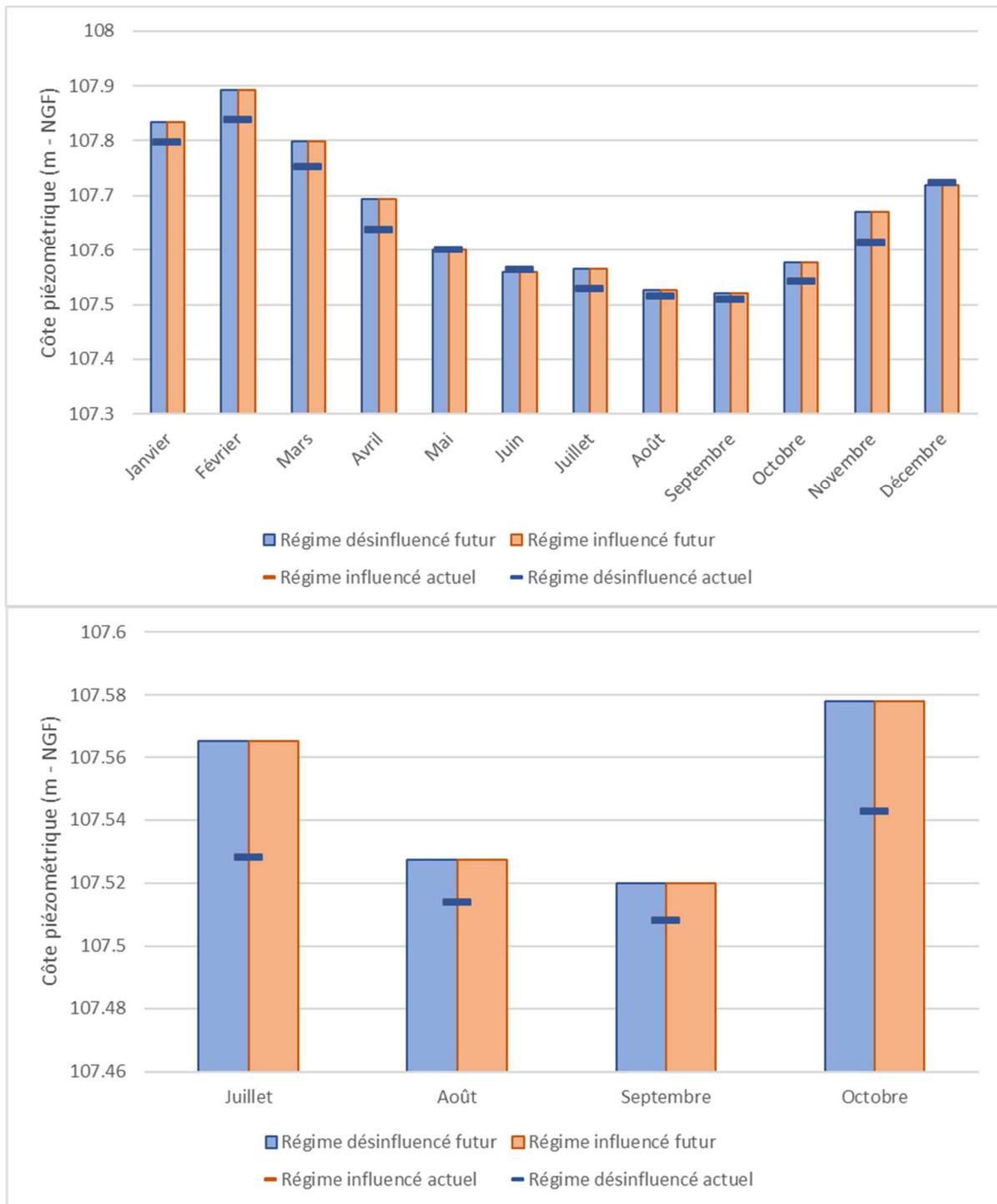


Figure 41 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel bas

### 6.7.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur la Bienne :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 20% sur le QMNA5 désinfluencé et de 10% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 45% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre de grandeur ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures de novembre, de décembre et mars-avril ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée pourraient s'amoinrir légèrement ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, les usages aggraveront la situation ;
- ❖ Concernant la piézométrie, on observe d'après la modélisation une baisse du niveau moyen des nappes, une accentuation du processus de vidange automnale. Et une recharge hivernale plus faible. Ainsi, les fluctuations devraient être plus intenses qu'aujourd'hui.

**Tableau 20 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.2134	0.1044	-51.1%	0.169 (-20.7%)	0.094 (-10.3%)	-44.7%
L/s/km2	1.301	0.636	-51.1%	1.032 (-20.7%)	0.571 (-10.3%)	-44.7%
	VCN30(5)					
m3/s	0.2018	0.0979	-51.5%	0.165 (-18.1%)	0.089 (-8.8%)	-46.0%
L/s/km2	1.230	0.596	-51.5%	1.007 (-18.1%)	0.544 (-8.8%)	-46.0%
	VCN30(2)					
m3/s	0.2766	0.1867	-32.5%	0.218 (-21.3%)	0.144 (-23%)	-33.9%
L/s/km2	1.686	1.138	-32.5%	1.327 (-21.3%)	0.877 (-23%)	-33.9%

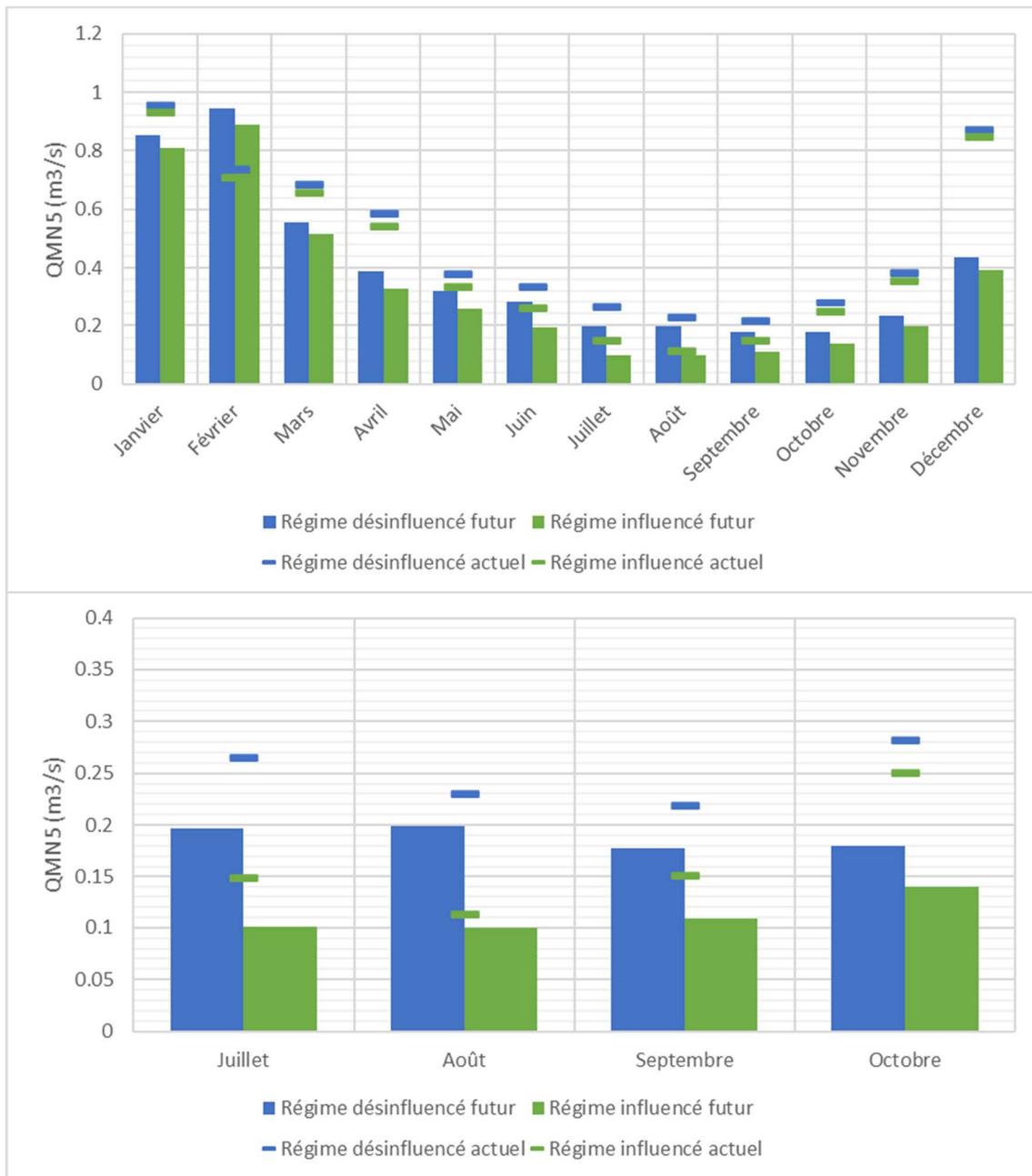
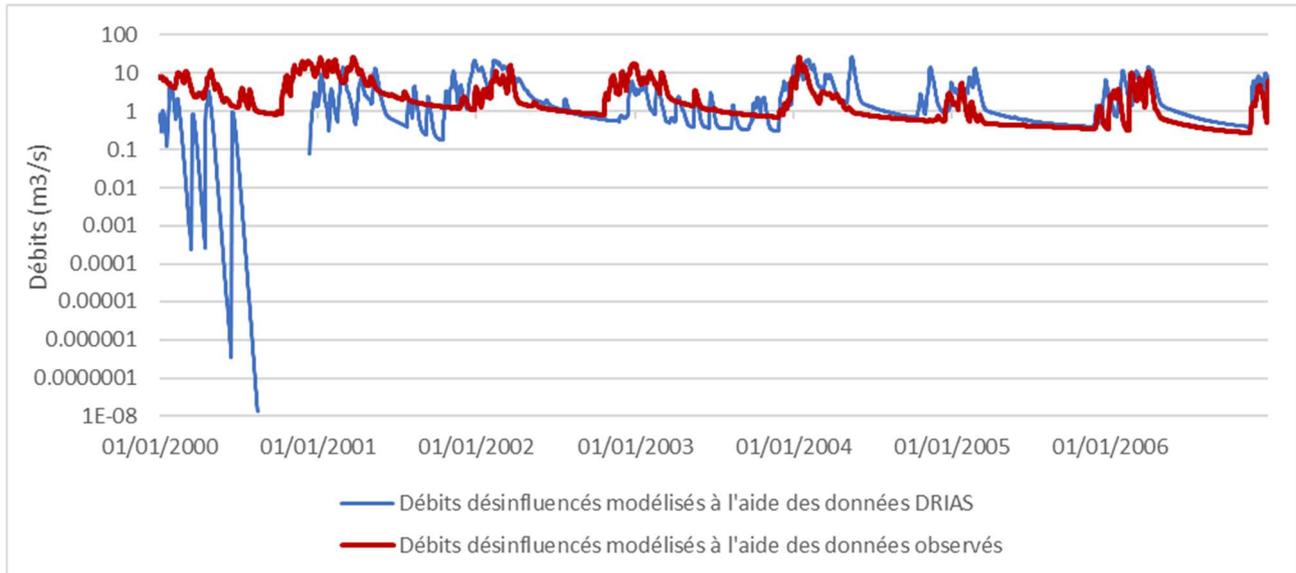


Figure 42 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut



Figure 43 : Côtes piézométriques mensuelles moyennes à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Bienne - Scénario tendanciel haut

## 6.8 L'Orne Saosnoise



**Figure 44 : Comparaison des chroniques de débits désinfluencés modélisés à l'aide des données météorologiques DRIAS d'après le scénario d'émission RCP8.5 et observés**

La figure précédente présente les chroniques de débits modélisés à l'aide des données météorologiques DRIAS et observés.

Le modèle simule ainsi des assecs sur le cours d'eau lors de l'année 2000. On retrouve alors des valeurs aberrantes de débits sur cette même année.

Il est retenu d'exclure de l'analyse qui suit l'année 2000 car celle-ci impacte fortement, à la baisse, les débits caractéristiques d'étiages sur la période d'étude actuelle (2000-2019).

### 6.8.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur l'Orne Saosnoise :

- ❖ On observe une augmentation des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 68% sur le QMNA5 influencé et hausse de 18% sur le QMNA5 désinfluencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement marquée au printemps. Toutefois les épisodes de sécheresse sur l'été seront légèrement moins intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ On peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée pourraient s'amoinrir tout en restant conséquent ;

Tableau 21 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel bas

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.2280	0.1109	-51.4%	0.27 (18.3%)	0.186 (68.1%)	-30.9%
L/s/km2	0.437	0.213	-51.4%	0.517 (18.3%)	0.357 (68.1%)	-30.9%
	VCN30(5)					
m3/s	0.2156	0.0768	-64.4%	0.255 (18.4%)	0.168 (118.1%)	-34.4%
L/s/km2	0.413	0.147	-64.4%	0.489 (18.4%)	0.321 (118.1%)	-34.4%
	VCN30(2)					
m3/s	0.3275	0.2211	-32.5%	0.419 (27.8%)	0.335 (51.5%)	-20.0%
L/s/km2	0.628	0.424	-32.5%	0.802 (27.8%)	0.642 (51.5%)	-20.0%

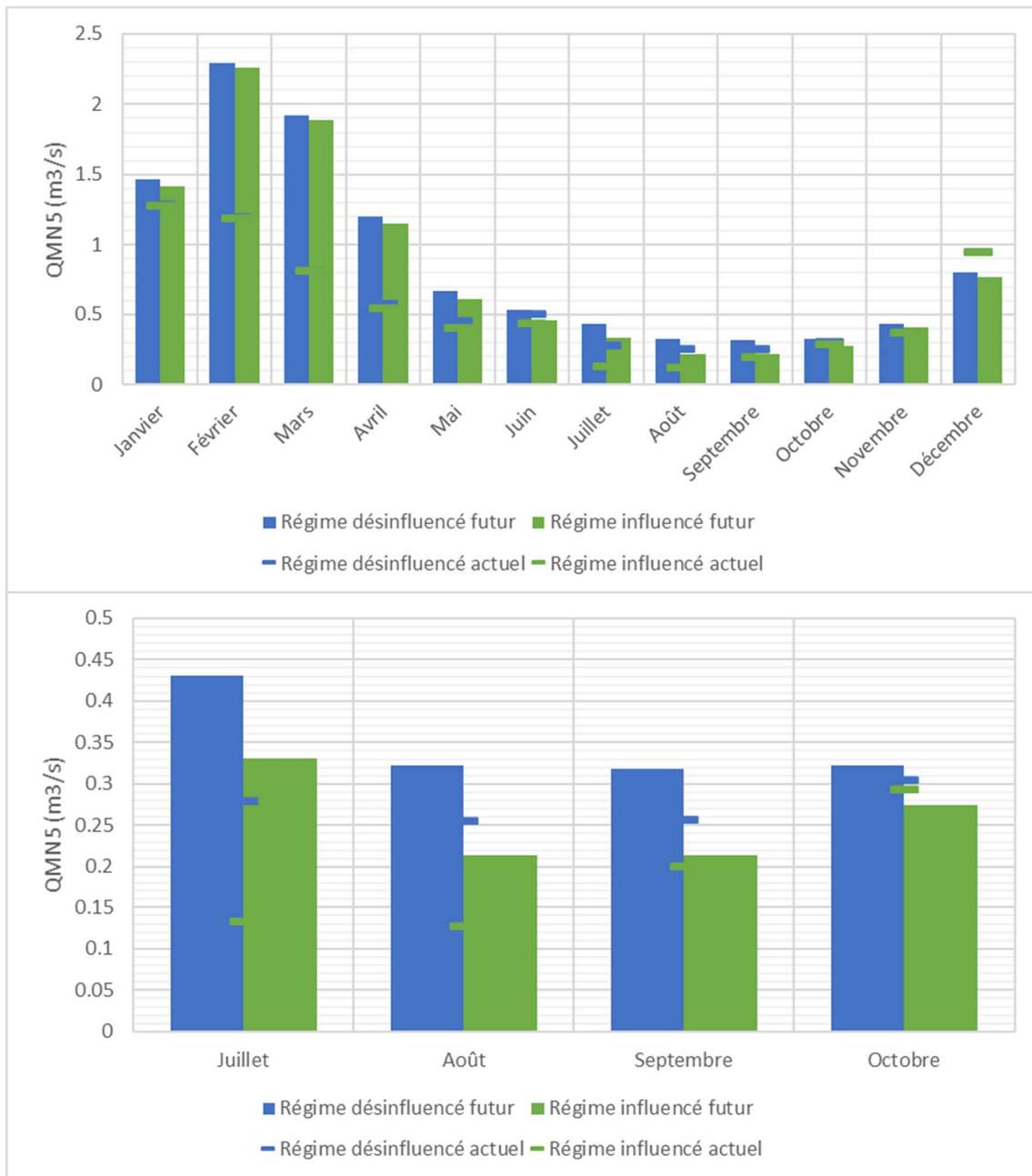


Figure 45 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel bas

### 6.8.1 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur l'Orne Saosnoise :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 44% sur le QMNA5 désinfluencé et de 52% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 40% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre de grandeur ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures sur l'ensemble de l'année à l'exception du mois d'avril ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée aura tendance se creuser ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, les usages aggraveront la situation ;

**Tableau 22 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	0.2837	0.2502	-11.8%	0.16 (-43.8%)	0.12 (-51.9%)	-24.5%
L/s/km2	0.544	0.479	-11.8%	0.306 (-43.8%)	0.231 (-51.9%)	-24.5%
	VCN30(5)					
m3/s	0.2646	0.2281	-13.8%	0.156 (-41.1%)	0.117 (-48.7%)	-24.9%
L/s/km2	0.507	0.437	-13.8%	0.299 (-41.1%)	0.224 (-48.7%)	-24.9%
	VCN30(2)					
m3/s	0.3698	0.3385	-8.5%	0.231 (-37.6%)	0.206 (-39%)	-10.5%
L/s/km2	0.709	0.649	-8.5%	0.442 (-37.6%)	0.396 (-39%)	-10.5%

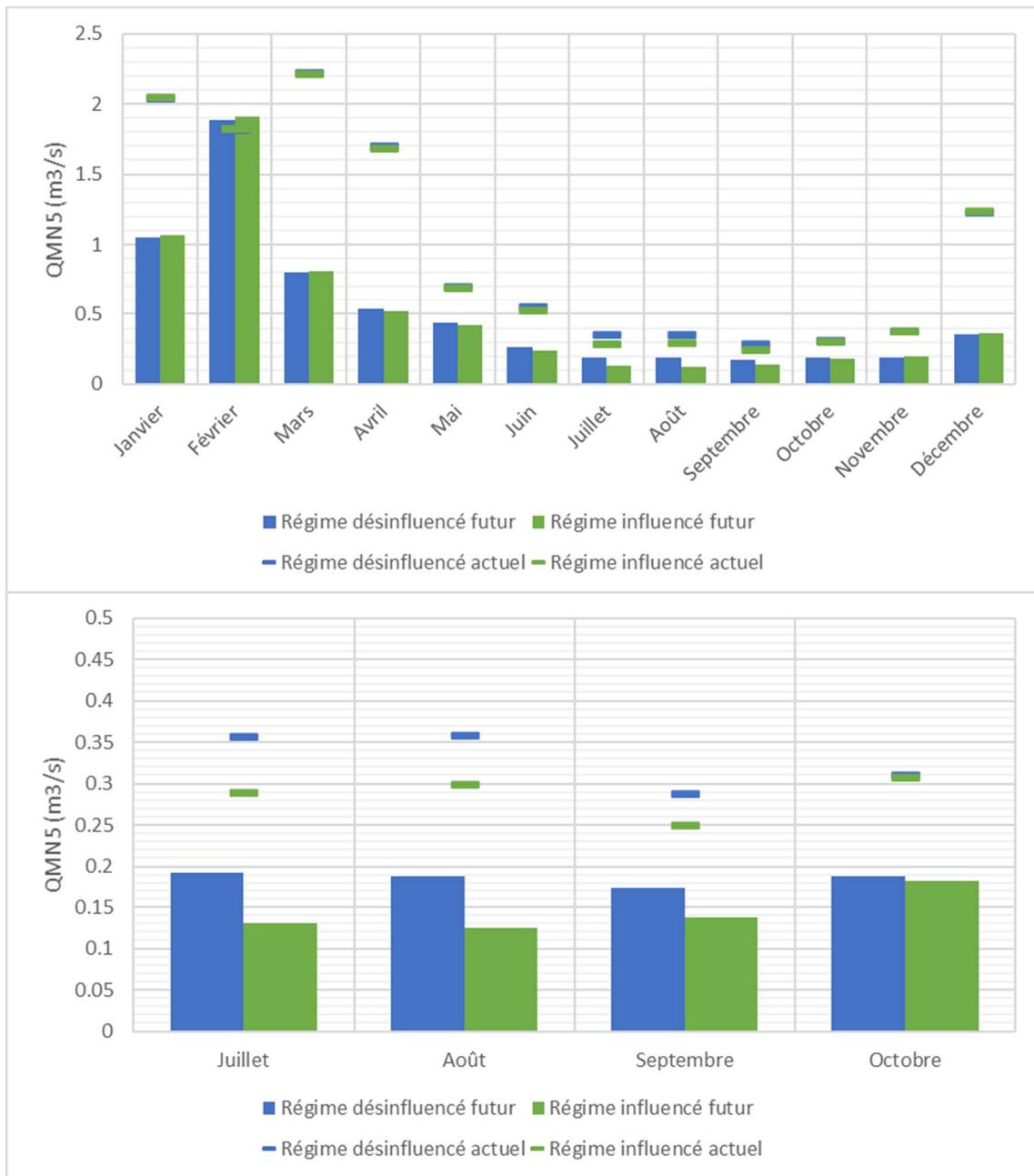


Figure 46 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Orne Saosnoise - Scénario tendanciel haut

## 6.9 La Sarthe intermédiaire

### 6.9.1 Scénario tendanciel bas

Selon le scénario tendanciel bas, à l'horizon 2050 sur la Sarthe intermédiaire :

- ❖ On observe une augmentation généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la hausse de 19% sur le QMNA5 désinfluencé et hausse de 16% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette augmentation est particulièrement mois marqué en période hivernale. Les épisodes de sécheresse sur l'été seront ainsi tout aussi intenses lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour cette période estivale les débits quinquennaux secs sont très légèrement supérieurs à l'horizon 2050 et ce, en considérant l'influence des usages ou non ;
- ❖ Ces constats s'expliquent par l'augmentation des cumuls pluviométriques, établi au paragraphe 5.2.1, lorsque le modèle climatique prend en compte le scénario d'émission RCP 8.5.
- ❖ Malgré tout on peut remarquer que l'écart entre les situations influencée et désinfluencée se creuse légèrement à cet horizon

**Tableau 23 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de Infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	2.6297	2.2511	-14.4%	3.14 (19.4%)	2.606 (15.8%)	-17.0%
L/s/km2	0.887	0.759	-14.4%	1.059 (19.4%)	0.879 (15.8%)	-17.0%
	VCN30(5)					
m3/s	2.4685	2.1544	-12.7%	2.853 (15.6%)	2.374 (10.2%)	-16.8%
L/s/km2	0.833	0.727	-12.7%	0.962 (15.6%)	0.801 (10.2%)	-16.8%
	VCN30(2)					
m3/s	3.5743	3.2093	-10.2%	4.212 (17.8%)	3.654 (13.9%)	-13.2%
L/s/km2	1.206	1.083	-10.2%	1.421 (17.8%)	1.233 (13.9%)	-13.2%

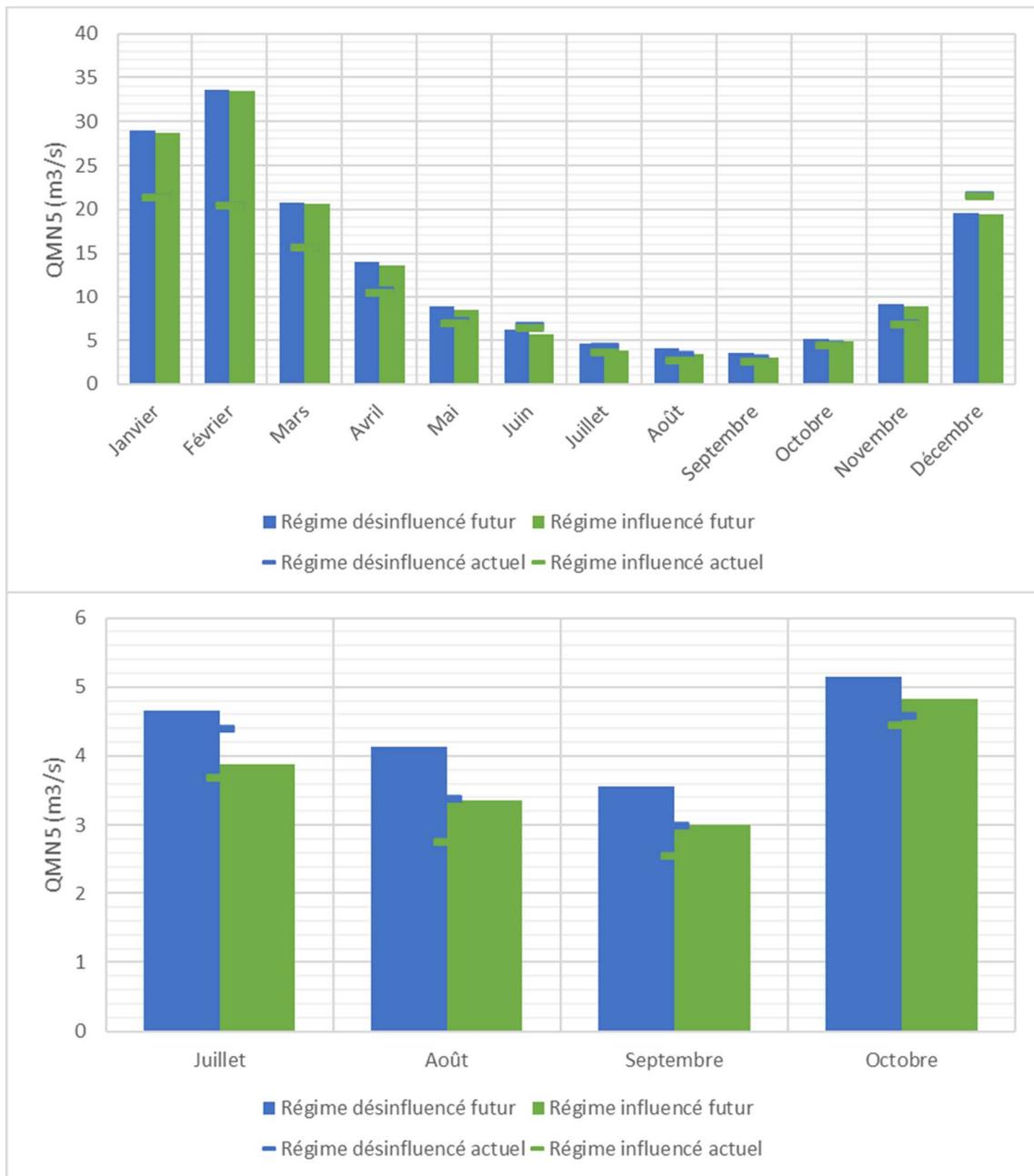


Figure 47 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel bas

## 6.9.2 Scénario tendanciel haut

Selon le scénario tendanciel haut, à l'horizon 2050 sur la Sarthe intermédiaire :

- ❖ On observe une diminution généralisée des indicateurs quinquennaux et biennaux secs, que ce soit en situation influencée ou désinfluencée. Impact à la baisse de 23% sur le QMNA5 désinfluencé et de 24% sur le QMNA5 influencé ;
- ❖ Cette diminution est marquée en fin d'été. Les épisodes de sécheresse sur cette période seront ainsi significativement plus intenses (diminution atteignant 50% pour les débits mensuels quinquennaux secs du mois d'octobre) lorsque l'hydrologie influencée future est comparée à l'hydrologie influencée actuelle ;
- ❖ Pour ce même mois d'octobre, l'impact seul du changement climatique devrait diminuer les débits mensuels quinquennaux secs du même ordre de grandeur ;
- ❖ On remarque également une nette baisse entre les situations actuelles et futures de novembre, de décembre et mars-avril ;
- ❖ L'écart relatif et absolu entre la situation influencée et désinfluencée restent du même ordre. Les usages impacteront les débits à la baisse (-15%) ;
- ❖ Les résultats semblent indiquer un allongement de la période d'étiage à l'avenir, par l'effet du changement climatique seul tout d'abord, les usages aggraveront la situation ;

**Tableau 24 : Indicateurs d'étiage à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel haut**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5					
m3/s	3.1600	2.7492	-13.0%	2.45 (-22.5%)	2.086 (-24.1%)	-14.9%
L/s/km2	1.066	0.927	-13.0%	0.826 (-22.5%)	0.704 (-24.1%)	-14.9%
	VCN30(5)					
m3/s	2.9049	2.5945	-10.7%	2.332 (-19.7%)	1.992 (-23.2%)	-14.6%
L/s/km2	0.980	0.875	-10.7%	0.787 (-19.7%)	0.672 (-23.2%)	-14.6%
	VCN30(2)					
m3/s	4.1868	3.7930	-9.4%	3.23 (-22.9%)	2.817 (-25.7%)	-12.8%
L/s/km2	1.412	1.280	-9.4%	1.09 (-22.9%)	0.95 (-25.7%)	-12.8%

Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique

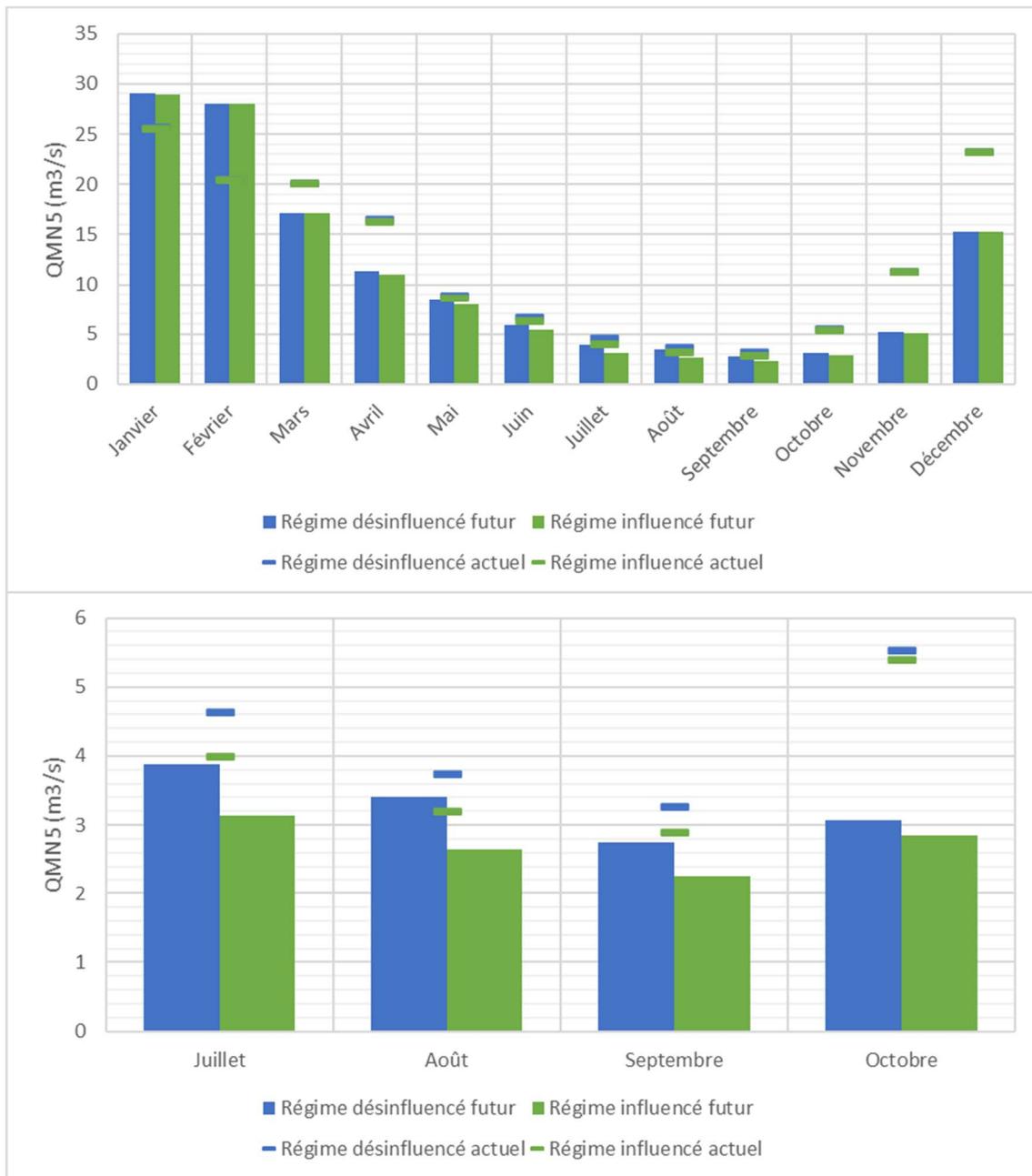


Figure 48 : Débits mensuels quinquennaux secs à l'horizon 2050 et comparaison à la période 2000-2019 – UG Sarthe intermédiaire - Scénario tendanciel haut

## **6.10 Synthèse de la modélisation de l'évolution de la ressource en eau**

D'après le scénario tendanciel bas (Tableau 25), le QMNA5 de chaque sous-bassin augmentera à l'exception de l'Ornette en situation désinfluencée. En régime influencé, cette augmentation varie entre 2% pour le Merdereau et 156% pour la Bienne. L'augmentation s'accroît lorsqu'on tient compte de l'effet des usages cumulé à celui du changement climatique. On observe que l'écart entre l'hydrologie naturelle et influencée devrait légèrement se résorber à l'horizon 2050, sauf pour la Sarthe intermédiaire.

D'après le scénario tendanciel haut (

## Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique



Tableau 26), l'ensemble des cours d'eau sont concernés par une baisse des débits statistiques d'étiage estivaux (QMNA5) en régime désinfluencé avec une diminution allant de 17% (Ornette et Orthe) à 44% (Orne Saosnoise). En régime influencé, l'écart se creuse particulièrement pour l'Ornette (diminution du QMNA5 influencé d'environ 70%) par rapport à la situation actuelle. L'écart entre régime influencé et désinfluencé est similaire sauf pour l'Ornette et l'Orne Saosnoise qui voit cet écart doubler.

**Tableau 25 : Synthèse des évolutions de débit liées au changement climatique et aux usages à l'horizon 2050 selon le scénario tendanciel bas**

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050 (2040 - 2059)		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5 (m3/s)					
Hoëne	0.12	0.12	0%	0.156 (25.9%)	0.156 (26.3%)	1%
Sarthe amont	1.23	1.17	-4%	1.493 (21.8%)	1.384 (18.1%)	-7%
Ornette	0.03	0.01	-76%	0.031 (-7.5%)	0.013 (62.4%)	-58%
Merdereau	0.15	0.15	-1%	0.153 (0.4%)	0.154 (1.7%)	1%
Vaudelle	0.14	0.13	-4%	0.147 (4.4%)	0.143 (6%)	-2%
Orthe	0.31	0.23	-26%	0.338 (8.9%)	0.268 (16.9%)	-21%
Bienne	0.17	0.07	-59%	0.237 (37.4%)	0.181 (156.1%)	-24%
Orne Saosnoise	0.23	0.11	-51%	0.27 (18.3%)	0.186 (68.1%)	-31%
Sarthe intermédiaire	2.63	2.25	-14%	3.14 (19.4%)	2.606 (15.8%)	-17%

Tableau 26 : Synthèse des évolutions de débit liées au changement climatique et aux usages à l'horizon 2050 selon le scénario tendanciel haut

	Période actuelle 2000-2019			Horizon 2050 (2040 - 2059)		
	Désinfluencé	Influencé	Différence de infl. par rapport au désinfl. en %	Désinfluencé futur (différence en % par rapport au désinfl. actuel)	Influencé futur (différence en % par rapport à infl. actuel)	Différence en % par rapport au désinfl. futur
	QMNA5 (m3/s)					
Hoëne	0.16	0.16	1%	0.114 (-27.2%)	0.115 (-27.2%)	1%
Sarthe amont	1.56	1.49	-5%	1.204 (-22.8%)	1.119 (-24.7%)	-7%
Ornette	0.04	0.02	-38%	0.033 (-17.2%)	0.008 (-68%)	-76%
Merdereau	0.18	0.18	-1%	0.113 (-36.8%)	0.118 (-33.2%)	5%
Vaudelle	0.17	0.16	-3%	0.111 (-32.6%)	0.109 (-31.9%)	-2%
Orthe	0.36	0.28	-22%	0.3 (-17%)	0.228 (-18.8%)	-24%
Bienne	0.21	0.10	-51%	0.169 (-20.7%)	0.094 (-10.3%)	-45%
Orne Saosnoise	0.28	0.25	-12%	0.16 (-43.8%)	0.12 (-51.9%)	-25%
Sarthe intermédiaire	3.16	2.75	-13%	2.45 (-22.5%)	2.086 (-24.1%)	-15%

## 7 ANNEXES

### 7.1 Annexe 1 : Scénarios climatiques du GIEC

#### 7.1.1 Scénarios SRES (AR4)

Jusqu'à récemment, les études réalisées sur l'évolution du climat s'appuyaient largement sur l'état de connaissance réalisé en 2007 (désigné par l'acronyme **AR4** pour « **fourth assessment report** »).

Lors de cet état de connaissance, la stratégie suivie était séquentielle. Le point de départ était une synthèse des travaux de modélisation économique qui conduisit à définir un **ensemble de scénarios d'évolution possible de nos sociétés et modes de vie**, prenant en compte des choix en matière d'énergie et de rapports à la mondialisation : développements démographiques et économiques futurs, régionalisation, production et utilisation d'énergie, technologie, agriculture, gestion forestière et occupation du sol. Ces scénarios, appelés **SRES** (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter, **Special Report on Emissions Scenarios**) proposaient plusieurs évolutions (cf. Figure 49) :

- ❖ **Scénario A1** : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel. La famille de scénarios A1 se scinde **en trois groupes** qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique :
  - ▷ Forte intensité de combustibles fossiles (**A1FI**),
  - ▷ Sources d'énergie autres que fossiles (**A1T**),
  - ▷ Equilibre entre les sources (**A1B**)
- ❖ **Scénario B1** : Réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.
- ❖ **Scénario A2** : Développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel.
- ❖ **Scénario B2** : Développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable.

Scénario	Population	Economie	Environ.	Equité	Technologie	Mondial.
A1FI	↘	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↘	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↘	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘

Figure 49 : Scénarios SRES - Principales hypothèses prises pour les différents scénarios (Source : Portail DRIAS)

Ces scénarios se traduisaient ensuite en termes **d'émission de gaz à effet de serre**. Ces évolutions d'émissions de GES étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles de projections climatiques. Enfin, les projections climatiques alimentent les modèles d'impact (sur l'hydrosystème, les écosystèmes, la socio-économie...).

### 7.1.2 Scénarios RCP (AR5)

Depuis l'AR4, les déterminants socio-économiques tels que l'économie, les technologies, les politiques publiques, et la connaissance du système climatique ont évolué.

Le GIEC a décidé de définir des **nouveaux scénarios** pour mieux prendre en compte ce nouveau contexte et permettre aux économistes et aux climatologues de ne plus travailler de manière séquentielle mais parallèle. Il s'agit de **quatre scénarii de trajectoire de forçage radiatif** dits « **RCP** » (Representative Concentration Pathways).

En comparaison avec les SRES, Les scénarios RCP présentent les caractéristiques principales suivantes :

- Ils ne sont pas nécessairement plus capables de représenter les développements futurs que les scénarios SRES (en raison des très fortes incertitudes liées à ces derniers), mais permettent une meilleure prise en compte des informations disponibles à ce jour ;
- Contrairement aux scénarios SRES, ils ne sont pas basés sur des pronostics socio-économiques. Les RCP peuvent ainsi représenter toute une gamme de politiques climatiques pour le XXI<sup>e</sup> siècle ;
- Ils intègrent une meilleure prise en compte des gaz à effet de serre de courte durée de vie et des changements de l'occupation du territoire, des évolutions démographiques, du développement des pays émergents et des politiques climatiques envisageables ;
- Ils n'ont pas été définis par le GIEC lui-même, mais lui ont été soumis par la communauté scientifique internationale. Enfin, contrairement aux scénarios SRES, ces nouveaux scénarios ne sont pas définis par le GIEC lui-même, mais ont été établis par la communauté scientifique pour répondre aux besoins du GIEC.
- Ces scénarii sont détaillés ci-dessous :
  - RCP2.6 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO<sub>2</sub> afin de limiter le réchauffement planétaire à 2°C en 2100. Il exige que l'on investisse dans l'atténuation sans tarder et que l'on adopte des techniques à émissions négatives plus tard au cours du présent siècle (pic puis déclin) ;
  - RCP4.5 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO<sub>2</sub> avant 2100 (stabilisation sans dépassement) ;
  - RCP6.0 : correspond à un scénario avec une politique climatique visant à stabiliser les concentrations en CO<sub>2</sub> après 2100 (stabilisation sans dépassement) ;
  - RCP8.5 : Scénario sans politique climatique (concentration en CO<sub>2</sub> croissante).

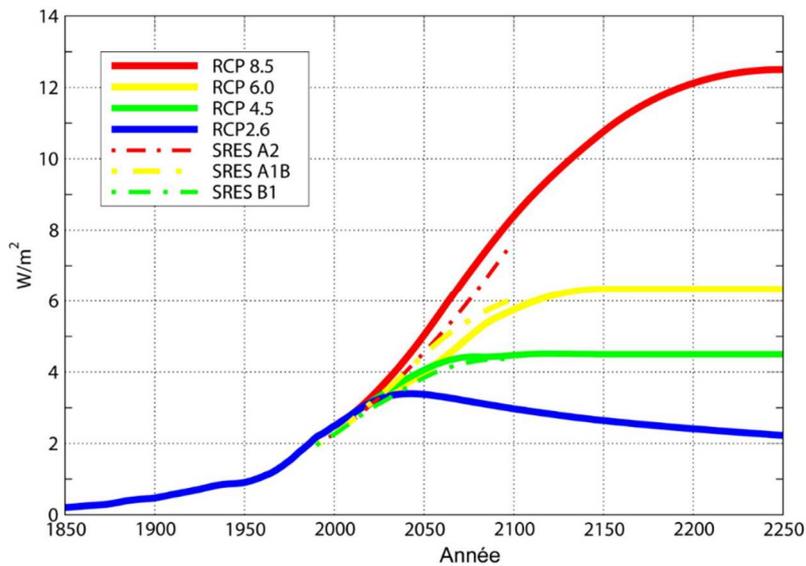


Figure 50 : Comparaison des évolutions du forçage radiatif associé aux différents scénarios climatiques

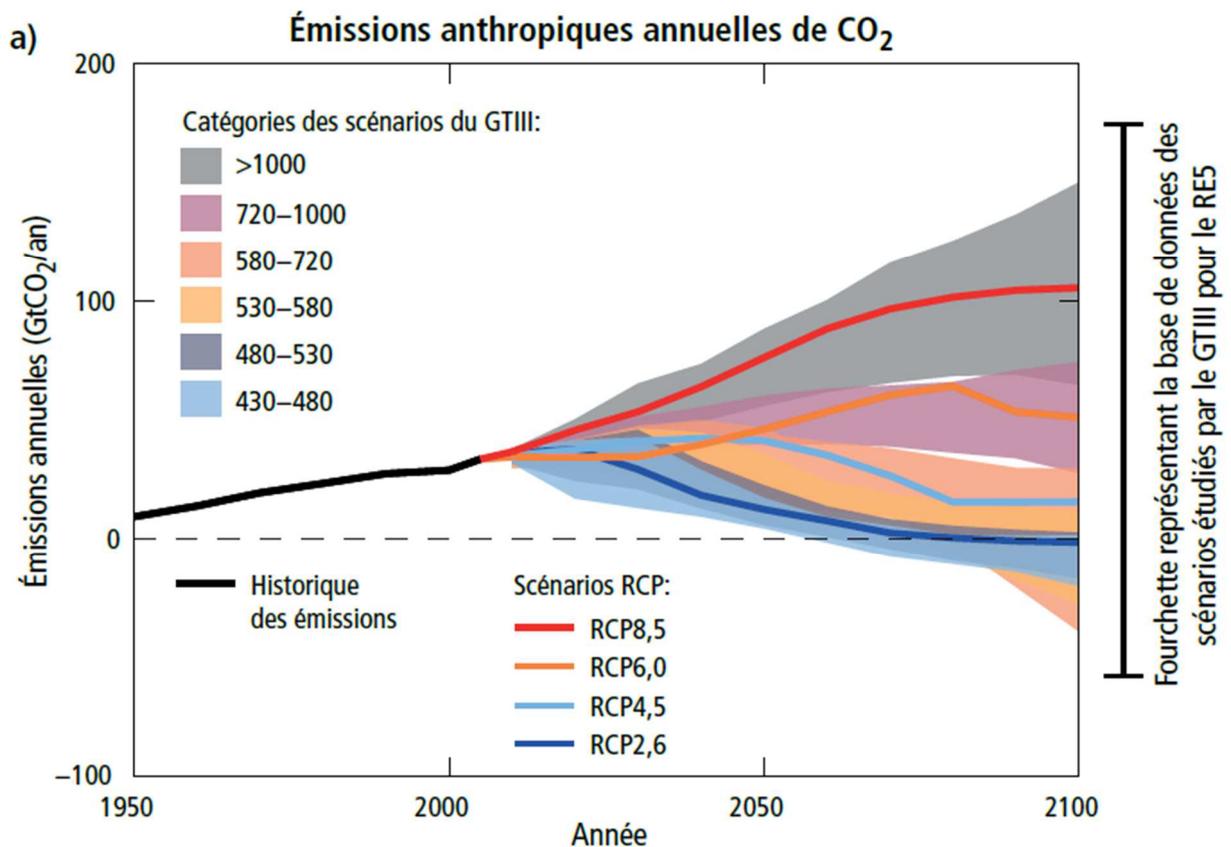


Figure 51 : Émissions de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) selon les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) (Source : Rapport de synthèse de l'AR5 du GIEC)

### 7.1.3 Scénarios SSP (AR6)

Source : 6<sup>ème</sup> édition du rapport du GIEC / Résumé à l'attention des décideurs

Un ensemble de cinq nouveaux scénarios d'émissions illustratifs est pris en compte de manière cohérente dans ce rapport pour explorer la réponse climatique à un éventail plus large d'avenirs en matière de gaz à effet de serre (GES), d'utilisation des terres et de polluants atmosphériques que celui évalué dans l'AR5. Cet ensemble de scénarios conditionne les projections climatiques issues des modèles. Ces projections tiennent compte de l'activité solaire et du forçage de fond des volcans. Les résultats du 21<sup>e</sup> siècle sont fournis pour le court terme (2021-2040), le moyen terme (2041-2060) et le long terme (2081-2100) par rapport à 1850-1900, sauf indication contraire.

Les scénarios commencent en 2015 et incluent des scénarios avec des émissions de GES élevées et très élevées (SSP3-7.0 et SSP5-8.5) et des émissions de CO<sub>2</sub> qui doublent à peu près par rapport aux niveaux actuels d'ici 2100 et 2050, respectivement, des scénarios avec des émissions de GES intermédiaires (SSP2-4.5) et les émissions de CO<sub>2</sub> restant autour des niveaux actuels jusqu'au milieu du siècle, et des scénarios avec des émissions de GES très faibles et faibles et des émissions de CO<sub>2</sub> diminuant à zéro net vers ou après 2050, suivis de niveaux variables d'émissions nettes négatives de CO<sub>2</sub> (SSP1-1.9 et SSP1 -2.6), comme illustré à la figure suivante. Les émissions varient entre les scénarios en fonction des hypothèses socio-économiques, des niveaux d'atténuation du changement climatique et, pour les aérosols et les précurseurs de l'ozone non méthaniques, des contrôles de la pollution atmosphérique. Des hypothèses alternatives peuvent entraîner des émissions et des réponses climatiques similaires, mais les hypothèses socio-économiques et la faisabilité ou la probabilité de scénarios individuels ne font pas partie de l'évaluation.

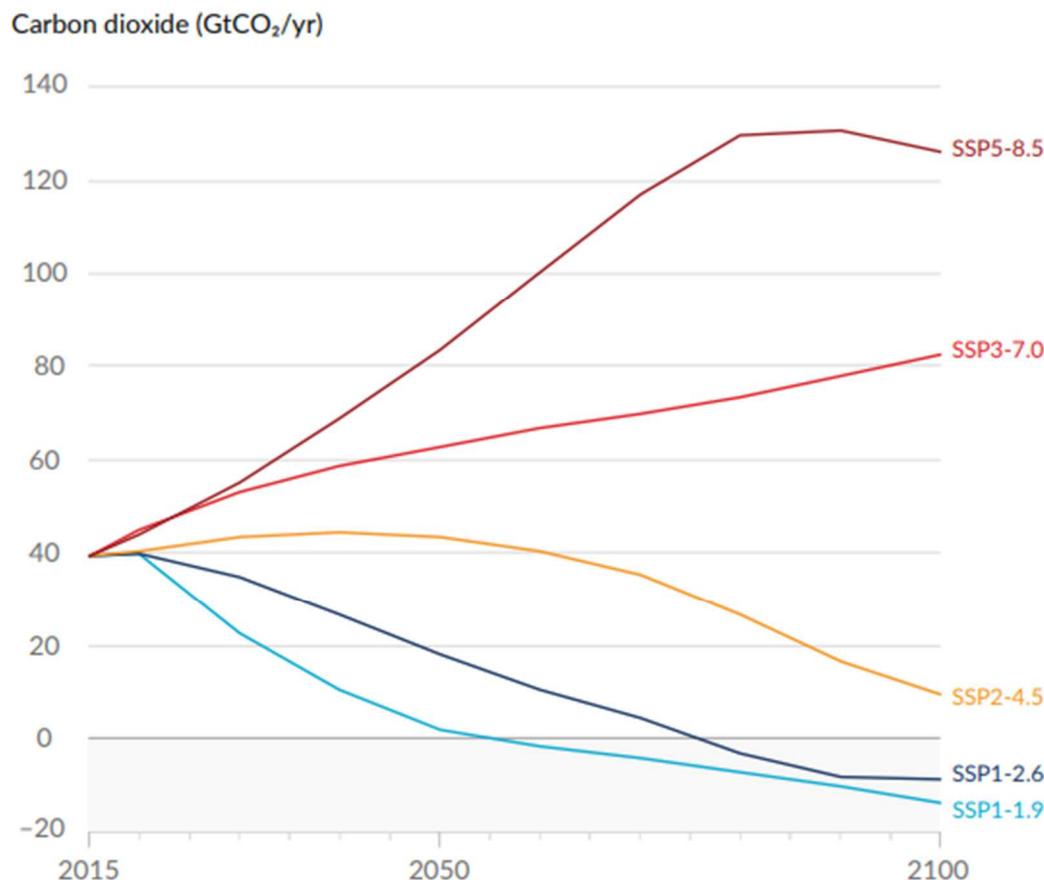


Figure 52 : Émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) selon les trajectoires socioéconomiques partagées (SSP) (Source : Rapport de synthèse à l'attention des décideurs, AR6 du GIEC)

## **7.2 Annexe 2 : Explore 2070 – Fiches des stations hydrométriques sur le périmètre de l'étude HMUC de la Creuse**

Les pages suivantes présentent les résultats de l'étude Explore 2070 aux stations suivantes :

- ▶ La Sarthe à Saint-Céneri-le-Gérei
- ▶ L'Orne Saosnoise à Montbizot
- ▶ La Sarthe à Neuville-sur-Sarthe

# Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique



## ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

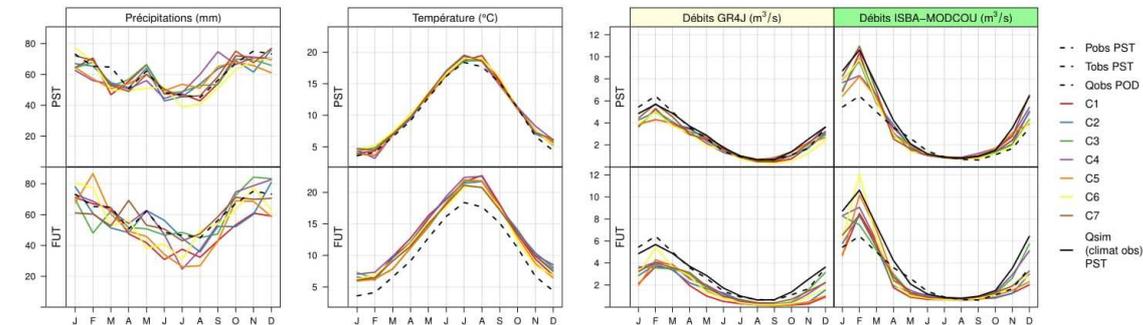
**Nom** L'Orne Saosnoise à Montbizot [Moulin Neuf Cidrieux]  
**Identifiant Explore2070** 847  
**Code Banque Hydro** M0243010  
**Surface du bassin versant** 502 km<sup>2</sup>  
**Période d'observation des débits** **POD : 1967-1991**  
**Période de simulation temps présent** **PST : 1961-1990**  
**Période de simulation temps futur** **FUT : 2046-2065**  
**Modèles hydrologiques utilisés** GR4J ISBA-MODCOU

Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de  $\Delta$  entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q.  $\Delta$  minimum,  $\Delta$  médian et  $\Delta$  maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.



CLIMAT													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Precipitations obs PST (mm)	73	65	65	51	62	48	47	45	56	67	75	73	728
$\Delta$ min (%)	15	29	6	14	37	35	51	48	34	26	14	16	14
$\Delta$ med (%)	+9	-5	+16	-6	-24	-2	-20	-25	-18	-1	+4	-4	-2
$\Delta$ max (%)	+17	+51	+38	+41	+12	+31	-1	+22	+5	+12	+22	+26	+10.5
Température obs PST (°C)	3.6	4.1	6.6	9.1	12.8	16.2	18.4	17.7	15.1	11.2	6.7	4.4	10.5
$\Delta$ min (°C)	+1.4	+1.4	+0.6	+1.1	+1.3	+1.0	+1.6	+1.9	+1.5	+1.2	+0.8	+0.8	+1.6
$\Delta$ med (°C)	+2.1	+2.0	+2.1	+1.8	+1.8	+2.1	+2.9	+3.1	+2.6	+2.2	+1.8	+1.6	+2.2
$\Delta$ max (°C)	+3.0	+4.2	+3.0	+2.8	+2.9	+2.6	+3.2	+4.0	+3.0	+3.0	+3.4	+2.4	+2.8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)	15	21	37	57	75	93	106	89	60	33	17	14	617
$\Delta$ min (%)	-3	+3	+2	+9	+16	+4	+10	+7	+20	+27	+14	+6	+15
$\Delta$ med (%)	+7	+10	+29	+17	+20	+10	+20	+23	+39	+50	+37	+17	+23
$\Delta$ max (%)	+41	+45	+43	+38	+31	+18	+29	+44	+53	+60	+53	+57	+33

DÉBITS																										
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel													
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	5.44	6.44	5	3.58	2.61	1.43	0.915	0.684	0.642	1.11	1.68	3.56	2.75													
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	4.72	8.77	5.93	11.3	4.84	7.24	3.62	4.07	2.97	2.22	1.69	1.19	1.06	0.908	0.615	0.76	0.52	0.9	1.16	1.34	1.74	2.44	3.22	5.63	2.67	3.88
$\Delta$ min (%)	-49	-30	-31	-24	-21	-20	-43	-50	-61	-55	-72	-39	-62	-29	-73	-24	-84	-34	-87	-39	-84	-50	-69	-59	-47	-30
$\Delta$ med (%)	-27	-21	-22	-13	-7	-6	-9	-22	-31	-27	-38	-24	-45	-15	-47	-14	-56	-12	-74	-18	-45	-31	-39	-41	-25	-13
$\Delta$ max (%)	-1	+18	+7	+24	-1	+13	+5	+9	-6	+1	-11	+8	-24	-3	-16	+1	-26	+2	-30	-8	-13	+31	+6	+33	-17	-3
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	2.24	3.21	2.89	1.62	1.11	0.672	0.442	0.31	0.38	0.502	0.743	1.28	1.6													
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	2.25	3.06	3.17	5.08	2.85	3.49	1.69	1.37	1.28	1.01	0.782	0.821	0.48	0.706	0.279	0.643	0.221	0.683	0.247	0.712	0.447	1.04	1.28	1.6	1.67	2.38
$\Delta$ min (%)	-75	-46	-64	-45	-49	-36	-61	-30	-63	-32	-61	-16	-62	-13	-57	-16	-71	-27	-80	-27	-84	-29	-84	-44	-59	-38
$\Delta$ med (%)	-45	-15	-31	-19	-26	-10	-30	-19	-32	-12	-38	-5	-38	-7	-47	-10	-56	-13	-69	-6	-73	-6	-51	-18	-37	-14
$\Delta$ max (%)	-13	+27	+11	+59	+3	+35	-10	+9	-17	-9	-27	+1	-29	+0	-34	-1	-21	+2	-17	+4	-31	+3	-23	+1	-20	-0



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD													
NSEQ	NSEInQ	NSEiQ	R-QA	R-VCN30-2	R-QMNA5	R-QJXA10							
0.83	0.69	0.80	0.71	0.36	0.57	0.97	1.41	0.57	1.42	0.62	2.28	0.63	0.99

ÉTIAGES						
	VCN10	VCN30	QMNA			
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.374	0.447	0.487			
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.217	0.595	0.257	0.634	0.298	0.669
$\Delta$ min (%)	-70	-3	-73	-11	-74	-16
$\Delta$ med (%)	-57	-2	-60	-5	-58	-6
$\Delta$ max (%)	-28	-1	-29	-1	-30	-2
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.201	0.242	0.271			
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.133	0.584	0.151	0.605	0.168	0.618
$\Delta$ min (%)	-64	-3	-67	-3	-68	-6
$\Delta$ med (%)	-55	-2	-57	-2	-58	-5
$\Delta$ max (%)	-29	-1	-31	+0	-34	-1
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.146	0.176	0.199			
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.103	0.579	0.114	0.59	0.125	0.593
$\Delta$ min (%)	-66	-3	-68	-3	-69	-6
$\Delta$ med (%)	-52	-1	-54	-0	-57	-3
$\Delta$ max (%)	-29	+0	-32	+5	-36	+2

FORTES PRECIPITATIONS			
	PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)	25	34	38
$\Delta$ min (%)	-4	+10	+0
$\Delta$ med (%)	+6	+10	+13
$\Delta$ max (%)	+10	+19	+22

CRUES						
	QJXA2	QJXA10	QJXA20			
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	24	43	50			
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	17	28	27	42	31	48
$\Delta$ min (%)	-40	-22	-37	-24	-38	-25
$\Delta$ med (%)	-17	-2	-4	+10	-2	+12
$\Delta$ max (%)	-12	+8	+18	+21	+27	+24

OCCURENCE DES ÉTIAGES		
Qobs POD	sept.	
Qsim (climat obs) POD	oct.	sept.
min (jours)	-2	-10
$\Delta$ med (jours)	+18	+7
max (jours)	+29	+23

DÉBITS CLASSÉS				
	Q95	Q10		
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.326	7		
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.196	0.59	6	12
$\Delta$ min (%)	-67	-3	-38	-36
$\Delta$ med (%)	-55	-2	-22	-13
$\Delta$ max (%)	-31	+0	-13	-3

OCCURENCE DES CRUES		
Qobs POD	févr.	
Qsim (climat obs) POD	févr.	févr.
min (jours)	-12	-10
$\Delta$ med (jours)	+4	+0
max (jours)	+14	+7

# Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique



## ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

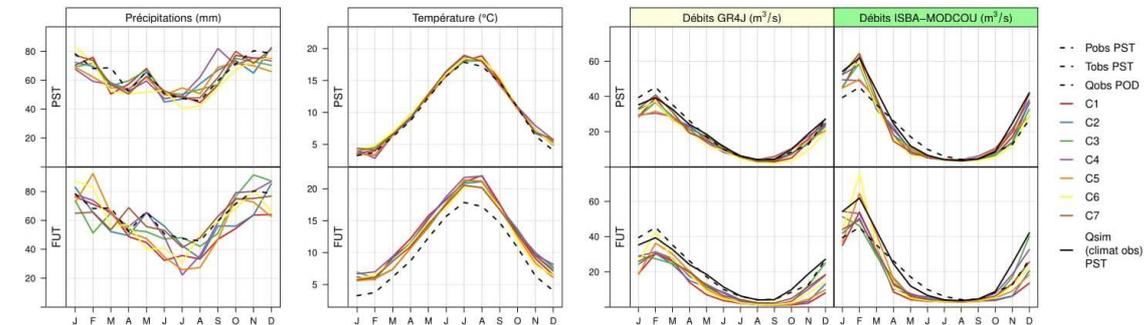
Nom **La Sarthe à Neuville-sur-Sarthe [Montreuil]**  
 Identifiant Explore2070 **848**  
 Code Banque Hydro **M0250610**  
 Surface du bassin versant **2713 km<sup>2</sup>**  
 Période d'observation des débits **POD : 1973-1991**  
 Période de simulation temps présent **PST : 1961-1990**  
 Période de simulation temps futur **FUT : 2046-2065**  
 Modèles hydrologiques utilisés **GR4J ISBA-MODCOU**

Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de  $\Delta$  entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q.  $\Delta$  minimum,  $\Delta$  médian et  $\Delta$  maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.



CLIMAT													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Precipitations obs PST (mm)	78	68	69	52	66	51	47	46	60	71	80	79	768
$\Delta$ min (%)	16	29	10	15	34	35	55	46	32	29	15	15	15
$\Delta$ med (%)	+7	-6	+13	-5	-22	-8	-24	-25	-16	+1	+5	-5	-3
$\Delta$ max (%)	+15	+48	+31	+36	+10	+25	-4	+19	+7	+12	+26	+24	+10
Température obs PST (°C)	3.3	3.8	6.2	8.7	12.4	15.7	17.9	17.2	14.7	10.8	6.3	4.0	10.1
$\Delta$ min (°C)	+1.4	+1.5	+0.6	+1.1	+1.3	+1.0	+1.6	+1.9	+1.5	+1.2	+0.7	+0.8	+1.5
$\Delta$ med (°C)	+2.1	+2.0	+2.1	+1.8	+1.7	+2.1	+2.9	+3.0	+2.6	+2.2	+1.8	+1.6	+2.2
$\Delta$ max (°C)	+3.0	+4.2	+2.9	+2.8	+2.8	+2.6	+3.2	+4.0	+3.0	+2.9	+3.3	+2.4	+2.8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)	14	19	35	54	71	88	100	84	56	31	16	13	580
$\Delta$ min (%)	-3	+0	+2	+9	+17	+4	+11	+8	+21	+27	+14	+7	+15
$\Delta$ med (%)	+8	+9	+31	+18	+20	+10	+22	+23	+40	+52	+37	+18	+24
$\Delta$ max (%)	+43	+47	+44	+38	+33	+17	+30	+45	+54	+62	+53	+60	+34

DÉBITS																											
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel														
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	39.4	45.2	35.3	26.2	17.2	10	6.05	4.26	4.39	8.49	12.8	27	19.6														
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	35.2	55.4	39.3	61.9	33.4	43.3	25.7	27.9	19.8	13.9	11.6	7.07	7.03	4.42	4.13	3.45	3.67	4.56	9.74	9.25	15	19.5	26.5	42.3	19.2	24.4	
$\Delta$ min (%)	-36	-22	-26	-23	-17	-21	-38	-59	-57	-59	-69	-48	-61	-32	-68	-24	-81	-37	-84	-47	-83	-63	-66	-63	-63	-42	-31
$\Delta$ med (%)	-22	-17	-17	-13	-4	-9	-8	-31	-26	-25	-38	-27	-41	-18	-49	-17	-56	-14	-68	-25	-42	-33	-32	-36	-22	-11	
$\Delta$ max (%)	+2	+12	+15	+30	+7	+9	+5	-2	-7	+0	+5	+13	-24	-0	-20	-1	-31	+2	-32	-4	-7	+25	+9	+23	-13	-6	
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	17.5	21.2	20.4	12.2	7.47	4.88	3.17	2.19	2.64	3.71	4.55	10.1	13.2														
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	18.2	25.3	21.5	26.4	20.1	20.5	12.4	8.45	7.8	4.67	4.95	3.84	3.31	3.3	1.92	2.86	1.68	3.24	2	3.72	3.13	5.11	10.7	13.1	13.5	17.4	
$\Delta$ min (%)	-70	-53	-55	-37	-39	-37	-55	-37	-58	-36	-57	-22	-55	-16	-51	-17	-65	-30	-76	-29	-84	-43	-83	-61	-55	-41	
$\Delta$ med (%)	-41	-29	-23	-22	-14	-14	-27	-19	-23	-12	-31	-11	-36	-11	-43	-13	-52	-13	-68	-6	-73	-17	-48	-24	-32	-17	
$\Delta$ max (%)	-8	+24	+20	+65	+18	+41	-4	-3	-12	-9	-23	-3	-28	-1	-33	-2	-22	+3	-21	+7	-31	-6	-29	-9	-16	-4	



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD													
NSEQ	NSElnQ	NSElQ	R-QA	R-VCN30-2	R-QMNA5	R-QJXA10							
0.88	0.40	0.85	0.34	0.15	0.22	0.98	1.24	0.67	0.96	0.71	1.41	0.88	0.98

ÉTIAGES				
	VCN10	VCN30	QMNA	
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	2.5	2.97	3.13	
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	1.69	2.66	1.99	2.84
$\Delta$ min (%)	-65	-4	-68	-12
$\Delta$ med (%)	-55	-3	-58	-7
$\Delta$ max (%)	-26	-1	-26	-2
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	1.54	1.86	1.99	
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	1.09	2.62	1.23	2.71
$\Delta$ min (%)	-59	-4	-62	-4
$\Delta$ med (%)	-50	-3	-52	-2
$\Delta$ max (%)	-29	-1	-31	+0
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	1.19	1.46	1.57	
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.865	2.6	0.96	2.64
$\Delta$ min (%)	-60	-4	-61	-3
$\Delta$ med (%)	-46	-1	-48	-0
$\Delta$ max (%)	-30	+0	-32	+5

FORTES PRECIPITATIONS			
	PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)	26	35	38
$\Delta$ min (%)	-3	+12	-4
$\Delta$ med (%)	+4	+12	+13
$\Delta$ max (%)	+10	+13	+16

CRUES						
	QJXA2	QJXA10	QJXA20			
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	149	215	241			
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	124	150	190	210	215	233
$\Delta$ min (%)	-36	-25	-40	-23	-42	-24
$\Delta$ med (%)	-9	+2	+8	+1	+10	+6
$\Delta$ max (%)	-4	+8	+13	+23	+21	+26

OCCURENCE DES ÉTIAGES		
Qobs POD	sept.	
Qsim (climat obs) POD	oct.	sept.
$\Delta$ min (jours)	-10	-16
$\Delta$ med (jours)	+20	+4
$\Delta$ max (jours)	+30	+27

DÉBITS CLASSÉS				
	Q95	Q10		
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	2.25	48		
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	1.47	2.66	47	75
$\Delta$ min (%)	-61	-5	-29	-31
$\Delta$ med (%)	-52	-3	-13	-9
$\Delta$ max (%)	-29	-2	-6	-1

OCCURENCE DES CRUES			
Qobs POD	févr.		
Qsim (climat obs) POD	févr.	févr.	
$\Delta$ min (jours)	-30	-9	
$\Delta$ med (jours)	+8	+8	
$\Delta$ max (jours)	+21	+13	

# Phase 1 | Objectif 5 : Estimer dans les grandes lignes l'évolution possible des ressources et des usages du fait du changement climatique



## ORDRE DE GRANDEUR DES DÉBITS FUTURS POSSIBLES À L'HORIZON 2050-2070 SOUS SCÉNARIO A1B D'ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Avertissement : ces résultats comportent de très nombreuses incertitudes. Ils sont donnés à titre indicatif. Il ne s'agit pas de prévisions mais d'indications d'évolutions possibles. Une note d'accompagnement contient des indications de lecture et d'interprétation de la fiche. Elle détaille de plus la méthodologie utilisée ainsi que les limites de l'exercice.

**Nom** La Sarthe à Saint-Céneri-le-Gérei [Moulin du Désert]

**Identifiant Explore2070** 846

**Code Banque Hydro** M0050620

**Surface du bassin versant** 909 km<sup>2</sup>

**Période d'observation des débits** **POD : 1979-1991**

**Période de simulation temps présent** **PST : 1961-1990**

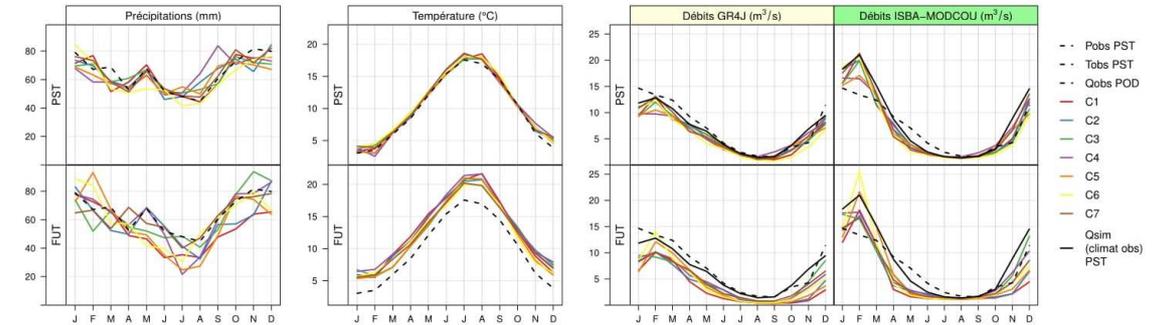
**Période de simulation temps futur** **FUT : 2046-2065**

**Modèles hydrologiques utilisés** GR4J ISBA-MODCOU

Les évolutions climatiques et hydrologiques sont calculées entre des simulations de référence en climat présent (1961-1990) et des simulations en climat futur (2046-2065) à partir de 7 modèles climatiques (C1 à C7). Les résultats sont présentés sous forme de  $\Delta$  entre présent et futur : (FUT-PST) pour T, (FUT-PST)/PST pour P, ETP et Q.  $\Delta$  minimum,  $\Delta$  médian et  $\Delta$  maximum sont calculés sur les 7 modèles climatiques. Selon les stations, un ou deux modèles hydrologiques ont été utilisés.

CLIMAT													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Précipitations obs PST (mm)	79	67	69	53	68	52	48	45	61	73	82	80	775
$\Delta$ min (%)	15	27	11	16	34	35	57	47	30	31	15	14	15
$\Delta$ med (%)	+6	-4	+12	-4	-21	-8	-26	-25	-16	+2	+6	-5	-3
$\Delta$ max (%)	+15	+47	+28	+34	+8	+20	-4	+16	+9	+11	+30	+23	+9
Température obs PST (°C)	3.0	3.5	6.0	8.5	12.1	15.4	17.6	17.0	14.4	10.6	6.1	3.8	9.0
$\Delta$ min (°C)	+1.4	+1.5	+0.6	+1.1	+1.3	+1.0	+1.6	+1.9	+1.5	+1.2	+0.7	+0.8	+1.5
$\Delta$ med (°C)	+2.1	+2.0	+2.1	+1.8	+1.7	+2.0	+2.9	+3.0	+2.6	+2.1	+1.8	+1.6	+2.2
$\Delta$ max (°C)	+3.0	+4.2	+2.9	+2.8	+2.8	+2.6	+3.2	+4.0	+3.0	+2.9	+3.3	+2.4	+2.8
Évapotransp. potentielle obs PST (mm)	12	18	33	51	67	84	95	80	53	28	15	12	548
$\Delta$ min (%)	-4	+0	+1	+9	+17	+3	+12	+9	+22	+28	+15	+8	+16
$\Delta$ med (%)	+11	+10	+32	+18	+21	+12	+23	+23	+41	+53	+37	+20	+25
$\Delta$ max (%)	+46	+52	+45	+37	+34	+18	+31	+47	+56	+65	+55	+64	+36

DÉBITS													
	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	14.7	13.4	12.4	9.23	7.05	4.18	2.4	1.68	1.59	3.44	4.25	11.4	7.13
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	13.2	20.8	12.4	19.4	11.4	15.3	9.3	11.8	7.43	6.22	4.42	3.03	2.74
$\Delta$ min (%)	-33	-23	-23	-22	-18	-20	-41	-61	-61	-59	-70	-48	-64
$\Delta$ med (%)	-22	-16	-16	-15	-5	-10	-7	-29	-29	-28	-38	-26	-51
$\Delta$ max (%)	+2	+11	+15	+27	+6	+9	+6	-3	-9	-1	+0	+14	-31
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	8.97	6.49	8.04	5.18	2.69	2.21	1.41	1.01	1.07	1.31	1.75	4.37	4.9
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	8.6	11.9	6.4	7.6	7.72	8.37	5.19	4.02	2.83	1.8	2.11	1.62	1.32
$\Delta$ min (%)	-69	-55	-53	-39	-43	-38	-57	-36	-60	-35	-61	-24	-59
$\Delta$ med (%)	-41	-26	-26	-26	-11	-14	-27	-20	-24	-12	-33	-11	-45
$\Delta$ max (%)	-6	+25	+19	+51	+15	+36	-4	-7	-16	-6	-23	-2	-29



PERFORMANCE DES MODÈLES HYDROLOGIQUES sur la période POD													
	NSEQ	NSEInQ	NSEQ	R-QA	R-VCN30-2	R-QMNA5	R-QJXA10						
	0.90	0.54	0.80	0.55	-1.09	-0.43	0.98						
					1.26	0.54	0.94						
					0.45	1.20	1.12						
							1.29						

ÉTIAGES					
	VCN10	VCN30	QMNA		
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.933	1.17	1.23		
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.517	1.02	0.628	1.09	0.737
$\Delta$ min (%)	-68	-3	-71	-10	-73
$\Delta$ med (%)	-58	-3	-61	-6	-61
$\Delta$ max (%)	-28	-1	-28	-1	-31
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.68	0.859	0.904		
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.308	1	0.356	1.04	0.406
$\Delta$ min (%)	-63	-3	-66	-4	-67
$\Delta$ med (%)	-58	-3	-61	-2	-59
$\Delta$ max (%)	-35	-1	-37	+0	-39
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.576	0.732	0.769		
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.235	0.992	0.265	1.02	0.298
$\Delta$ min (%)	-64	-4	-66	-3	-68
$\Delta$ med (%)	-56	-1	-59	-1	-58
$\Delta$ max (%)	-35	+0	-38	+6	-41

FORTES PRÉCIPITATIONS			
	PJXA2	PJXA10	PJXA20
P PST (mm)	27	36	40
$\Delta$ min (%)	-3	+6	-7
$\Delta$ med (%)	+1	+6	+8
$\Delta$ max (%)	+10	+11	+14

CRUES				
	QJXA2	QJXA10	QJXA20	
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	44	56	60	
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	46	58	62	72
$\Delta$ min (%)	-37	-25	-44	-22
$\Delta$ med (%)	-10	+3	+3	+2
$\Delta$ max (%)	-1	+8	+15	+22

OCCURENCE DES ÉTIAGES		
Qobs POD	sept.	
Qsim (climat obs) POD	sept.	sept.
min (jours)	-14	-9
$\Delta$ med (jours)	+12	+8
max (jours)	+32	+32

DÉBITS CLASSÉS			
	Q95	Q10	
Qobs POD (m <sup>3</sup> /s)	0.885	19	
Qsim (climat obs) POD (m <sup>3</sup> /s)	0.468	1.02	17
$\Delta$ min (%)	-69	-4	-31
$\Delta$ med (%)	-64	-2	-15
$\Delta$ max (%)	-36	+0	-10

OCCURENCE DES CRUES		
Qobs POD	févr.	
Qsim (climat obs) POD	févr.	janv.
min (jours)	-27	-12
$\Delta$ med (jours)	+9	+6
max (jours)	+29	+18

## 7.3 Annexe 3 : Analyse des modèles climatiques

### 7.3.1 Eléments introductifs

#### 7.3.1.1 Définition des différents types de modèles climatiques

Sources : (DRIAS), (Boé, 2014)

Les différents types de modèles climatiques (par résolution décroissante) sont présentés ci-après :

- Modèles climatiques globaux = (Global Climate Models, GCM) :

Il s'agit de modèles climatiques à large échelle généralement conçus pour être utilisés à l'échelle du globe. Leur résolution horizontale est typiquement de 100 à 300 km ;

- Modèles climatiques régionaux= (Regional Climate Models, RCM) :

Il s'agit de modèles climatiques à résolution horizontale élevée (typiquement 10 – 50 km), obtenus par désagrégation<sup>10</sup> dynamique, statistique ou par une combinaison des deux méthodes, à partir de modèles climatiques globaux. Une correction de biais (s'apparentant à une méthode de désagrégation statistique) peut compléter cette approche. Ces modèles sont généralement appliqués à une région délimitée et les conditions à leurs limites sont déterminées à l'aide de modèles climatiques globaux ;

- Modèles d'impact :

Il peut s'agir de modèles environnementaux de différents types (hydro(géo)logiques, de rendement agricole...) qui ont pour objectif de restituer les effets du changement climatique sur différents types de systèmes.

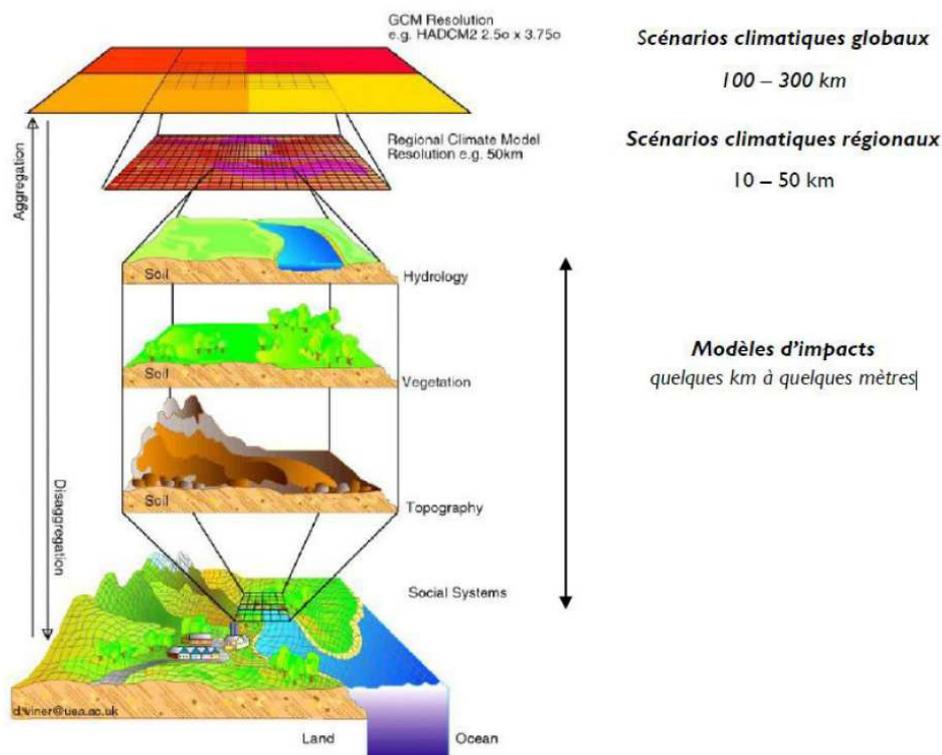


Figure 53 : Echelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton)

<sup>10</sup> Ou encore descente d'échelle ou régionalisation

### 7.3.1.2 Evolutions récentes des modèles climatiques

Sources : (DGEC/SCEE/Onerc, 2013)

Alors que seuls 23 modèles ont été exploités pour le 4e rapport d'évaluation, le GIEC s'appuie sur une cinquantaine de modèles pour le 5e (AR5).

Les modèles utilisés par les scientifiques pour les simulations associées aux RCP, ont été affinés. Ces modèles progressent continuellement en intégrant de manière toujours plus complète les mécanismes qui régissent le climat (connaissance et représentation des phénomènes) et en bénéficiant des progrès des techniques numériques (puissance de calcul, algorithmes, optimisation des calculs).

Par exemple, certaines simulations pour le futur Rapport d'évaluation (AR5) prennent mieux en compte les contributions de la banquise et de la végétation, ou l'impact de la chimie des aérosols. Néanmoins aucun de ces outils n'intègre actuellement les effets de l'augmentation des feux de forêts qui dégagent du CO<sub>2</sub> ou le dégel des pergélisols qui dégagent du méthane (CH<sub>4</sub>), puissant gaz à effet de serre. Au fur et à mesure que de nouveaux processus ou traitements sont ajoutés aux modèles, ces derniers sont évalués et comparés aux observations disponibles.

La résolution spatiale des modèles a, elle aussi, été significativement améliorée. Certains modèles présentent un nombre de niveaux verticaux plus important, mais la plupart progressent surtout en résolution horizontale. Cette évolution est essentielle pour la régionalisation des projections, les modèles globaux ont classiquement une résolution de 100 à 300 km ne permettant pas d'obtenir des projections détaillées pour anticiper localement des impacts.

### 7.3.1.3 Modèles climatiques existants et mise à disposition de leurs résultats

Sources: (DGEC/SCEE/Onerc, 2013), (GICC, 2011)

Pour le rapport GIEC AR5, les simulations climatiques globales sont réalisées dans le cadre d'un projet CMIP5 coordonné au niveau international (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5). Grâce à ce projet, les résultats des simulations du climat passé et futur sont rendus directement accessibles dans une base de données distribuée au niveau international :

<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip5-ipsl/>

Parmi les modèles disponibles, deux sont développés et utilisés par la communauté scientifique française :

- ▶ CNRM-CM5 (MétéoFrance et CERFACS) ;
- ▶ IPSL-CM5 (Institut Pierre Simon Laplace).

Aujourd'hui, la sixième phase du projet est en cours (CMIP6) et des résultats de nouvelles modélisations sont déjà disponibles :

<https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/>

Ces nouvelles modélisations sont basées sur de nouveaux scénarios qui n'ont encore fait l'objet d'aucune publication par le GIEC.

Un programme complémentaire, nommé Cordex (Coordinated Regional Downscaling Experiment), définit le cadre général pour la régionalisation des simulations climatiques et l'inter-comparaison des résultats à petite échelle sur des domaines limités. Il s'appuie sur les modélisations du CMIP5.

En France, une volonté similaire a conduit les climatologues à développer le portail internet « DRIAS, les futurs du climat ». Ce dernier permet aux utilisateurs de visualiser des projections et scénarios

climatiques régionalisés sur la France à partir de modélisations issues notamment de CMIP5 et CORDEX, et de commander des données ciblées.

### 7.3.2 Problématique de la descente d'échelle et de la correction de biais

Sources : (DGEC, 2014)

La descente d'échelle (que l'on nomme également régionalisation ou désagrégation spatiale) est un processus permettant, à partir de simulations climatiques de grande échelle (de l'ordre de 300 à 50 km), de descendre à des échelles fines de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et/ou (cas de la correction de biais) de corriger les résultats des simulations à partir d'observations.

Le présent paragraphe a pour objectif de présenter les principes généraux des méthodes de descente d'échelle. De plus amples détails sur ces dernières sont donnés par (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011).

#### 7.3.2.1 Importance de la descente d'échelle

Sources : (Boé, 2014)

Les modèles climatiques globaux recensés dans la base de données du CMIP fournissent d'importantes informations sur l'évolution du climat à l'échelle mondiale. Cependant leur basse résolution ne permet pas de réaliser des analyses locales, d'où l'importance de la descente d'échelle.

#### Modèle climatique 250km

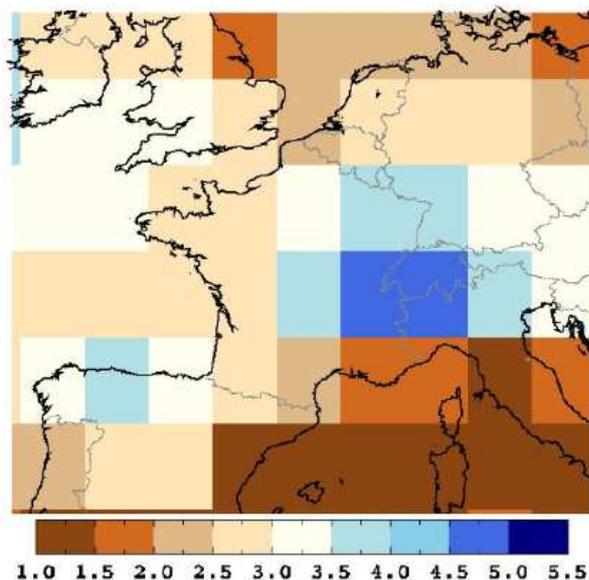


Figure 54 : Exemple de restitution d'un modèle climatique global de 250 km de résolution (source : (Boé, 2014))

#### 7.3.2.2 Approche dynamique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (Boé, 2014)

L'approche dynamique consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional. Elle utilise pour cela des modèles climatiques régionaux, qui sont de même nature que les modèles atmosphériques ou océaniques utilisés pour les simulations du GIEC, mais ils ont

**L'avantage de décrire des phénomènes de plus petites dimensions grâce à leur résolution spatiale plus fine sur la région d'intérêt.**

Cette solution souffre cependant d'un problème pratique important : plus la résolution est fine, plus le temps de calcul et les moyens numériques à mettre en place sont importants. Afin de réduire ces coûts numériques, une solution couramment adoptée est d'augmenter la résolution spatiale sur le domaine d'intérêt uniquement. On utilise pour cela des modèles de climat régionaux (RCM). Ce système impose l'utilisation d'un modèle global qui fournit les conditions aux limites.

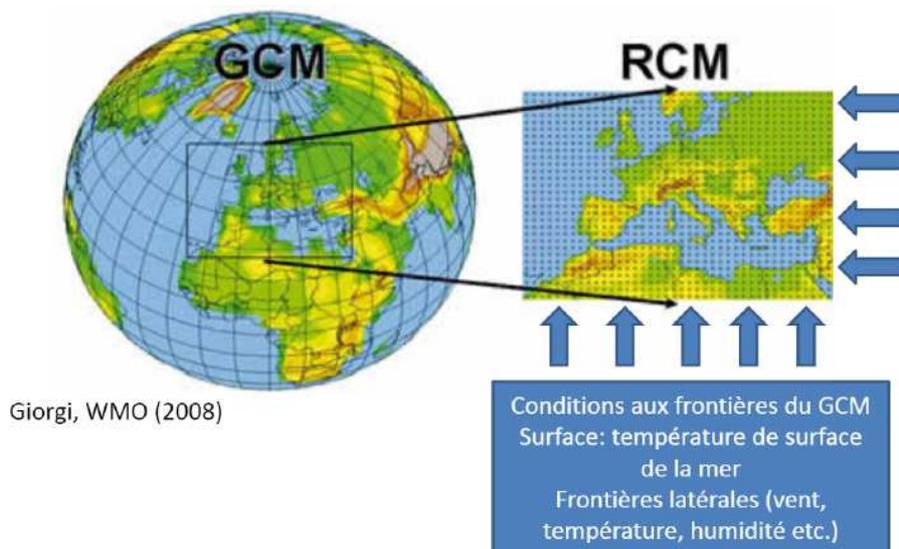


Figure 55 : Schématisation d'un modèle de climat régional (source : (Boé, 2014))

Cette méthode est nommée « méthode dynamique », la solution apportée se basant sur la résolution des équations de la dynamique atmosphérique du modèle régional.

Bien que les modèles de climats régionaux permettent une meilleure représentation des caractéristiques régionales, ils ne sont pas parfaits et souffrent également de certains biais. Ainsi, avant d'utiliser les simulations des modèles de climat régionaux pour les études d'impact, ils doivent subir également une correction de biais qui fait alors partie des désagrégations statistiques que nous allons évoquer ci-dessous.

### 7.3.2.3 Approche statistique

Sources : (DGEC, 2014), (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011), (DRIAS)

**L'approche statistique repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elle se base sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, le type de surface, la couverture de végétation...**

**En mettant en relation les variables de grande échelle issues de simulations et les variables locales de surface, l'approche statistique permet de réaliser deux améliorations :**

- ▶ **La descente d'échelle :** En effet, la résolution des données issues de l'approche statistique est identique à celles des observations sur lesquelles elle se base. Ainsi, dès lors que la résolution de ces observations est plus fine que celle des simulations à grande échelle, une descente d'échelle a lieu ;

- **La correction de biais :** Si l'on compare sur une période donnée, sur un espace donné, pour un paramètre donné, la moyenne de simulations climatiques à celle d'observations, on constate de manière générale un assez bon accord. Cependant l'accord n'est pas parfait. Non seulement il existe des erreurs systématiques sur les moyennes, mais encore certains extrêmes sont assez mal reproduits. Il est donc nécessaire dans certaines applications de corriger à posteriori les variables du modèle pour rendre la distribution statistique des données quotidiennes identique à la distribution observée en chaque point. Il s'agit de la correction de biais réalisée par une approche statistique de descente d'échelle.

Les méthodes statistiques se déroulent en deux phases : une phase d'analyse ou d'apprentissage durant laquelle on va estimer les erreurs du modèle de climat et mettre en place une méthode visant à les corriger, et une phase d'application.

Ainsi, la phase d'apprentissage fait appel à la période de recouvrement entre les simulations climatiques et les observations. On parle alors de « temps présent modèle », afin de préciser qu'il s'agit d'une réalisation d'un modèle de climat sur le temps présent, c'est-à-dire sur le climat présent. La phase d'application peut comporter une période présente et une projection dans le futur.

Trois méthodes principales sont fréquemment rappelées dans la littérature :

- Une méthode relativement simple, appelée méthode des anomalies qui consiste à prendre en compte les variations moyennes simulées par le modèle de climat ;
- Une méthode plus affinée, prenant en compte les variations de la moyenne mais également de la distribution des variables simulées. Cette méthode est appelée quantile-quantile ;
- Une méthode prenant en compte les caractéristiques de grande échelle qui sont bien reproduites par les modèles de climat. Cette méthode est appelée méthode des régimes de temps (ou DSCLim).

Le tableau suivant présente les avantages et inconvénients des trois méthodes statistiques présentées. Ce qu'il faut retenir, c'est que les méthodes des régimes de temps et des quantiles-quantiles permettent d'appréhender l'évolution des phénomènes extrêmes dans le futur alors que la méthode des anomalies n'est pas adaptée pour cela.

**Tableau 27 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (Agence de l'Eau Seine-Normandie, 2011) d'après Terray et al 2010)**

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou AN	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé.
Régime de temps ou RT	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques Utilisable pour la quantification des incertitudes	Les liens grande échelle – échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé. Non prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température).
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps calcul. Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariants entre le futur et le passé.

Il apparaît que la méthode quantile-quantile constitue la meilleure des trois approches présentées, si l'on omet la problématique des temps de calcul (qui pose de moins en moins problème avec l'amélioration continue des capacités computationnelles).

Son inconvénient principal est qu'elle fait l'hypothèse de la stationnarité (entre le présent et le futur) de la relation entre les fonctions de distribution des variables du climat simulées et observées. Pour remédier à cela, des améliorations de la méthode quantile-quantile ont été développées, avec notamment la méthode Adamont et la méthode CDF-t. Leurs particularités principales sont les suivantes :

- ▶ Adamont : Cette méthode applique la correction quantile-quantile de manière personnalisée sur 4 types de temps pour chaque saison de l'année. Ainsi, l'hypothèse de stationnarité ne s'applique plus pour l'ensemble de l'année, mais pour chaque type de temps de chaque saison. On considère alors que le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps ;
- ▶ CDF-t : cette méthode permet de prendre en compte l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique, par la prise en compte des modifications de la fonction de distribution, côté simulations, entre le climat présent et le climat futur.

Un tableau complet des méthodes statistiques recensées sur le site DRIAS est présenté ci-dessous :

**Tableau 28 : Avantages et inconvénients des méthodes statistiques de désagrégation (Source : (DRIAS))**

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<b>DSClim</b> (CERFACS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préserve la cohérence spatiale et inter-paramètres.</li> <li>- Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens.</li> <li>- Élimine les biais efficacement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Problèmes de transférabilité de la méthode du passé au climat futur.</li> <li>- La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles.</li> <li>- Ne tient pas compte des rétro-actions entre le sol (humidité et couverture de neige) et les variables.</li> </ul>
<b>Quantile-Quantile</b> (M. Déqué)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prise en compte des rétroactions et des modifications des extrêmes.</li> <li>- Permet d'éliminer les biais dans les deux premiers moments statistiques. Il peut saisir l'évolution et la variabilité de la moyenne du modèle tout en faisant correspondre tous les moments statistiques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les erreurs du modèle et les paramétrisations physiques sont considérées invariantes entre le futur et le passé.</li> <li>- Aucun ajustement n'est apporté à la structure temporelle des précipitations quotidiennes.</li> <li>- Impossible de capturer les durées des périodes de sécheresse et d'humidité modélisées.</li> <li>- Il n'est pas en mesure de générer une variabilité interannuelle des précipitations.</li> </ul>
<b>CDF-t</b> (IPSL)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prise en compte de l'évolution des propriétés statistiques des données désagrégées avec le changement climatique.</li> <li>- Ajustement de la fréquence des précipitations.</li> <li>- Capable de simuler la durée des périodes d'humidité et de sécheresse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dépendance inter-variables du modèle climatique n'est pas corrigée mais est préservée.</li> <li>- Les données sont désaisonnalisées et la tendance retirée.</li> <li>- N'est pas développée spécifiquement pour les événements extrêmes.</li> </ul>
<b>ADAMONT</b> (Météo-France)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permet d'accéder au pas de temps infra-quotidiens.</li> <li>- L'hypothèse de stationnarité a de meilleures chances d'être vérifiée au sein d'un même types de temps de la même saison. Le changement climatique se traduit par un changement de fréquence des types de temps.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La classification par saison crée des limites artificielles entre les jours analogues possibles.</li> <li>- La consistance entre les variables n'est plus assurée au terme de la chaîne de traitement.</li> </ul>

#### **7.3.2.4 Recommandations sur l'utilisation des méthodes de descente d'échelle**

(Boé, 2014) indique que les approches dynamique et statistiques sont complémentaires et qu'il y a un intérêt à utiliser les deux (en général, désagrégation dynamique d'abord, puis statistique ensuite avec correction de biais).

Il rappelle également que la désagrégation n'est qu'une étape dans la modélisation du climat futur. En raison de la large gamme de résultats obtenus par les modèles climatiques globaux, il est considéré plus judicieux de chercher à appréhender les incertitudes en appliquant une unique méthode de descente d'échelle sur plusieurs modèles climatiques globaux plutôt que d'appliquer plusieurs méthodes de descente d'échelle sur un seul modèle.

### **7.3.3 CMIP – Modélisation climatique globale**

*Sources* : (WCRP), (Hausfather, 2019)

Le CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) est un projet continu démarré en 1995 mené par le WGCM (Working Group on Coupled Modeling) qui est lui-même une entité du WCRP (World Climate Research Program).

L'objectif principal de ce projet est de permettre aux scientifiques de partager et comparer leurs modèles climatiques. Pour ce faire, des standards et des protocoles d'expérimentation sont définis par le projet, avec par exemple les scénarios climatiques RCP. Le respect par les modélisateurs de ces lignes directrices permet d'analyser collectivement les résultats de modélisation, ce qui permet d'obtenir de meilleures projections du climat. Pour concrétiser cela, le projet inclut la création d'une base de données intégrée, dans laquelle les résultats de toutes les modélisations incluses au projet sont stockées selon un standard commun, ce qui améliore leur accessibilité et la possibilité de les comparer.

La 5<sup>ème</sup> phase du projet, CMIP5, a été utilisée par le GIEC pour la rédaction de son 5<sup>ème</sup> état de connaissance.

Actuellement, la 6<sup>ème</sup> phase du projet, CMIP6, est en préparation. Elle inclura les améliorations suivantes :

- ▶ Modèles exécutés avec une résolution plus fine ;
- ▶ Les modèles incluent des processus additionnels non inclus aux simulations précédentes ;
- ▶ De nouveaux outils d'analyse facilitent le traitement des données ;
- ▶ Infrastructure et documentation améliorées ;
- ▶ De nouveaux scénarios climatiques sont inclus pour compléter les RPC existants.

Le CMIP6 constitue un projet beaucoup plus ambitieux que le CMIP5, ce qui a provoqué des retards. Actuellement, le CMIP6 est affecté par un retard d'au moins un an. Alors que l'AR6 du GIEC est en cours de rédaction, seul un ensemble limité de modèles sont disponibles, et il paraît improbable que les simulations du CMIP6 seront exécutées à temps pour la version finale de l'AR6.

### **7.3.4 CORDEX – Modélisation climatique régionalisée**

*Sources* : (EURO-CORDEX), (DRIAS)

L'initiative internationale CORDEX est un programme soutenu par le WCRP pour organiser une structure intégrée internationale ayant pour but de produire des projections régionales de changement climatique améliorées pour toutes les régions du monde. Les résultats de CORDEX ont notamment servi d'intrant aux études d'impact et d'adaptation au changement climatique réalisées dans le contexte du 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation (AR5) du GIEC.

EURO-CORDEX est la branche européenne du programme CORDEX. Dans le cadre du projet européen EUROCORDEX, des projections climatiques ont été réalisées sur toute l'Europe jusqu'à une résolution de 12

km. Ces modèles régionaux sont forcés par différents modèles de circulation générale du projet CMIP5 utilisés pour l'exercice du GIEC (2013). L'ensemble des projections peuvent être acquises sur le site du projet EURO-CORDEX à l'adresse suivante : <https://www.euro-cordex.net/060378/index.php.en>

### 7.3.5 DRIAS – Modélisation climatique régionalisée pour la France

Sources : (DRIAS), (DRIAS), (DRIAS)

Le projet DRIAS a permis de donner un accès privilégié aux simulations climatiques régionalisées disponible à l'échelle du territoire français. Sur le portail internet de DRIAS, on retrouve les résultats des simulations issues du projet EURO-CORDEX, parmi lesquelles figurent celles réalisées par les laboratoires français (CNRM et IPSL).

Pour chacune des simulations, on dispose de données journalières sur une grille spatiale de 8km de côté, pour les périodes 1950-2005 (référence) et 2006-2100 (Projections).

## Hiver

RCP4.5 : ECART DE TEMPÉRATURES

DJF [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	2,8 °C
IPSL-CM5A / WRF381P	2,2 °C
NorESM1 / HIRHAM5	2,0 °C
IPSL-CM5A / RCA4	2,0 °C
EC-EARTH / RCA4	1,9 °C
EC-EARTH / RACMO22E	1,9 °C
CNRM-CM5 / RACMO22E	1,6 °C
CNRM-CM5 / ALADIN63	1,6 °C
MPI-ESM / CCLM4-8-17	1,6 °C
MPI-ESM / REMO2009	1,5 °C
5 <sup>e</sup> centile	1,5 °C
Médiane	1,9 °C
95 <sup>e</sup> centile	2,5 °C

*Modèles qui réchauffent le plus*

*Modèles qui réchauffent le moins*

RCP4.5 : ECART DE PRÉCIPITATIONS

DJF [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
MPI-ESM / REMO2009	9 %
CNRM-CM5 / RACMO22E	11 %
EC-EARTH / RACMO22E	12 %
EC-EARTH / RCA4	12 %
CNRM-CM5 / ALADIN63	13 %
MPI-ESM / CCLM4-8-17	15 %
NorESM1 / HIRHAM5	19 %
HadGEM2 / CCLM4-8-17	25 %
IPSL-CM5A / WRF381P	27 %
IPSL-CM5A / RCA4	28 %
5 <sup>e</sup> centile	10 %
Médiane	14 %
95 <sup>e</sup> centile	28 %

*Plus de précipitations*

*Beaucoup plus de précipitations*

RCP4.5 : ECART DE TEMPÉRATURES

SON [2071-2100] - [1976-2005]

Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	3,3 °C
IPSL-CM5A / RCA4	2,7 °C
EC-EARTH / RCA4	2,4 °C
NorESM1 / HIRHAM5	2,4 °C
EC-EARTH / RACMO22E	2,4 °C
CNRM-CM5 / ALADIN63	2,3 °C
IPSL-CM5A / WRF381P	2,1 °C
CNRM-CM5 / RACMO22E	1,9 °C
MPI-ESM / CCLM4-8-17	1,8 °C
MPI-ESM / REMO2009	1,8 °C
5 <sup>e</sup> centile	1,8 °C
Médiane	2,3 °C
95 <sup>e</sup> centile	3,1 °C

*Modèles qui réchauffent le plus*

*Modèles qui réchauffent le moins*

RCP4.5 : ECART DE PRÉCIPITATIONS

SON [2071-2100] - [1976-2005]

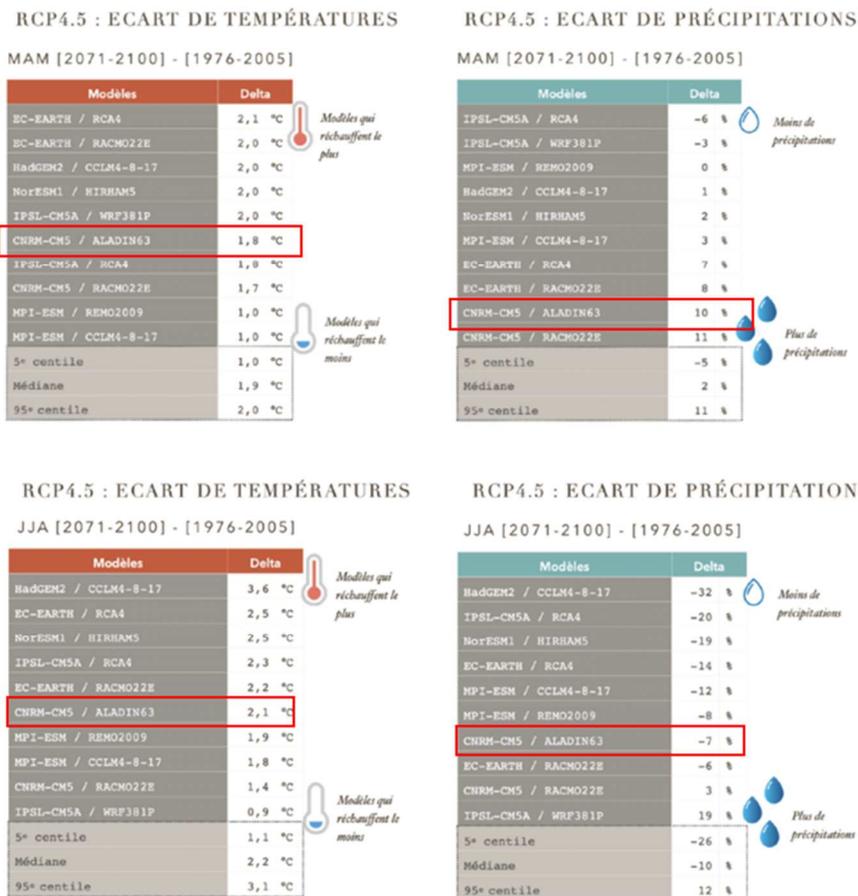
Modèles	Delta
HadGEM2 / CCLM4-8-17	-7 %
IPSL-CM5A / RCA4	-6 %
MPI-ESM / CCLM4-8-17	-3 %
EC-EARTH / RCA4	0 %
MPI-ESM / REMO2009	1 %
NorESM1 / HIRHAM5	2 %
CNRM-CM5 / RACMO22E	6 %
CNRM-CM5 / ALADIN63	7 %
EC-EARTH / RACMO22E	7 %
IPSL-CM5A / WRF381P	11 %
5 <sup>e</sup> centile	-7 %
Médiane	1 %
95 <sup>e</sup> centile	9 %

*Moins de précipitations*

*Plus de précipitations*

## Automne

## Printemps



## Été

Figure 56 : Mise en perspective des résultats par saison des différents modèles climatiques disponibles sur le portail DRIAS (Source : DRIAS - Note d'aide à la sélection des modèles pour le scénario d'émission RCP4.5)

### 7.4 Annexe 4 : Indice de sécheresse en termes d'humidité du sol

L'indice de sécheresse en termes d'humidité du sol, ou SSWI, est un indicateur statistique basé sur la moyenne des SWI (indice d'humidité des sols) sur une période donnée et permet de déterminer la fréquence d'une sécheresse agricole.

Le SWI se définit comme suit :

$$SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$$

Où W est le contenu intégré en eau du sol,  $W_{wilt}$  le contenu en eau au point de flétrissement et  $W_{fc}$  le contenu en eau du sol à la capacité au champ.

## 7.5 Annexe 5 : Scénarios d'évolution des usages à l'horizon 2050

Tableau 29 : Tableau 30 : Scénarios d'évolution d'usages à l'horizon 2050 employés dans le cadre du volet « Usages »

	Prélèvements				
	AEP	Irrigation	Abreuvement	Industrie	Plans d'eau
Scénario tendanciel bas	130 L/jour/hab.	Substitution : 30% maïs fourrage pour du Sorgho et 30% blé tendre pour le Seigle ; Maintien de la SAU 2019	Consommations journalières identique à celle sur la période 2000-2019 ; Diminution continue de l'effectif de bovins sur le territoire d'après la baisse entre 2000 et 2010 ; Maintien des effectifs de caprins et ovins	Diminution (-15%) des volumes prélevés en 2019 sauf la CFR et l'entreprise Roxane	Maintien du nombre et surface des plans d'eau. Calcul de surévaporation basé sur les données du modèle climatique CNRM-CM5-LR / ALADIN63 suivant le scénario d'émission RCP 8.5
Scénario tendanciel médian	145 L/jour/hab.	Maintien des paramètres agricole de 2019	Consommations journalières augmentent de 10% due à la hausse des températures ; Mêmes effectifs que pour le scénario tendanciel bas	= Sc. tendanciel bas	= Sc. tendanciel bas
Scénario tendanciel haut	160 L/jour/hab.	Augmentation de 16,5% des volumes prélevés en 2019 et augmentation de 10% de la surface irriguée en 2019	Maintien des effectifs de 2019 ; Augmentation des besoins en eau journaliers (+10%)	Maintien des volumes prélevés en 2019 sauf la CFR et l'entreprise Roxane	Maintien du nombre et surface des plans d'eau. Calcul de surévaporation basé sur les données du modèle climatique CNRM-CM5-LR / ALADIN63 suivant le scénario d'émission RCP 4.5

	Restitutions			
	Pertes AEP	AC	ANC	Industries
Scénario tendanciel bas	Dotation hydrique suivant les évolutions envisagées pour les prélèvements AEP ; Rendements objectifs à atteindre en 2050 par les syndicats et gestionnaires	Ratio volumes AC / volumes AEP calculé sur la période 2009-2019 appliqué aux volumes AEP projetés		Diminution de 15% des volumes rejetés en 2019 sauf CFR
Scénario tendanciel médian				= Sc. tendanciel bas
Scénario tendanciel haut				Maintien des volumes rejetés en 2019 sauf CFR