



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations

Rapport final

BRGM/RP-72304-FR

Version 2 du 6 novembre 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

BRGM

Ce rapport a été vérifié le 07/10/2024 et approuvé le 21/10/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

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

Contact : qualite@brgm.fr



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



**AGENCE
DE L'EAU
RHIN-MEUSE**

Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

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

Votre avis nous intéresse

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

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



Mots clés : Climat, changement climatique, recharge, niveaux piézométriques, bassin Rhin-Meuse, modélisation, EROS.

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

BRGM 2025. Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations. Rapport final V2. BRGM/RP-72304-FR, 208 p. avec les annexes, 65 fig., 6 tab., 6 ann.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-08/04/2024

Synthèse

Le changement climatique est déjà perceptible dans la région Grand Est et se manifeste par une modification des variables climatiques comme la température, le nombre de jours de gel et les précipitations. L'impact risque de s'accroître dans l'avenir (horizons 2050 et 2100) entraînant de multiples effets sur les ressources en eau, la biodiversité, les activités agricoles, les risques naturels etc...

L'étude de recherche et développement lancée en 2021 en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et la Région Grand-Est est consacrée aux prévisions de l'impact du changement climatique sur la recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Le travail a été mené en concertation avec les équipes du BRGM en charge de la contribution « eaux souterraines » au sein du projet national Explore 2, dont la restitution s'est déroulée en juin 2024.

Courant 2021 et 2022, 22 projections climatiques issues de DRIAS 2020 ont été choisies, testées et utilisées pour dresser la cartographie des variations de recharge à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse entre la période de référence (1976-2005) et 3 périodes futures (2021-2050 pour l'horizon 2050, 2041-2070 pour l'horizon 2070 et 2071-2100 pour l'horizon 2100).

L'impact du changement climatique sur la recharge a été évalué en tenant compte de l'incertitude liée aux choix des scénarios (résultats statistiques des différentes projections climatiques pour 2 RCP, avec calcul de la valeur médiane du 5^{ème} quantile¹ et du 95^{ème} quantile²). L'agrégation des résultats s'est faite à l'échelle de 8745 unités géographiques couvrant le territoire Rhin-Meuse. Ces unités géographiques ont été définies par découpage des entités hydrogéologiques BDLISA version 2 (niveau 3, ordre 1) croisé avec les zones hydrographiques de la BD Carthage, soit 8745 polygones.

Le présent rapport présente les différentes cartes élaborées, en dresse une synthèse sous forme de graphiques statistiques, globalement pour le bassin Rhin-Meuse et pour les principales nappes.

Afin de calibrer les résultats des projections climatiques sur des données de suivi, une phase de modélisation globale a été initiée. Elle porte sur 8 bassins versants hydrogéologiques, sélectionnés selon différents critères, tels que la caractérisation des milieux (en particulier la disponibilité des données pour mettre en œuvre des modélisations), l'usage du sol (pression anthropique), l'usage des eaux et les indices de tension quantitative sur la ressource.

¹ le 5^{ème} quantile : valeur définie telle que 5 % des valeurs de l'échantillon sont en dessous et 95 % au-dessus ;

² le 95^{ème} quantile : valeur définie telle que 95 % des valeurs de l'échantillon sont en dessous et 5 % au-dessus ;

Le présent rapport fait la synthèse des résultats obtenus après la mise en œuvre de la modélisation sur 6 des 8 bassins versants sélectionnés pour leur représentativité de la diversité des nappes libres du bassin Rhin-Meuse et pour la fiabilité de leur calage. L'interprétation des résultats obtenus sur la variation de la recharge et des niveaux de nappe entre les périodes futures (2021-2050, 2041-2070, 2070-2099) et la période de référence (1976-2005) a conduit à identifier de grandes tendances annuelles et saisonnières pour chacun des 6 bassins versants pour chacune des 22 projections climatiques (statistiques) et pour deux narratifs communs avec l'étude nationale (jaune représentatif de « changements futurs relativement peu marqués » et violet représentatif de « fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations »).

L'étude « recherche et développement » consacrée à l'impact du changement climatique sur le bassin Rhin-Meuse se clôture sur une analyse des incertitudes, et des pistes de réflexion concernant les indicateurs de résilience au changement climatique et la prise en compte de l'impact potentiel de l'anthropisation sur la recharge.

SYNTHESE ACTUALISEE – septembre 2025

Le rapport BRGM/RP-72304-FR du 25 octobre 2024 (version 1) a été actualisé à la suite des dernières avancées scientifiques. L'actualisation (version 2) porte sur la rédaction d'une synthèse non technique intégrant les résultats de l'étude nationale Explore 2 (4 narratifs) et rendue accessible au grand public par la définition des éléments de langage utilisés par les spécialistes du changement climatique, une rédaction pertinente sous forme de réponse à des questions simples, une restitution des résultats à différentes échelles géographiques et temporelles et une présentation synthétique sous forme de tableaux. Cf. Annexe 6.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. Contexte.....	11
1.2. Etat de l'art et verrous scientifiques.....	12
1.2.1. <i>Rappel concernant l'estimation de la recharge précédemment réalisée sur le bassin Rhin-Meuse – articulation des volets 1 et 2</i>	12
1.2.2. <i>Choix des projections climatiques et régionalisation (objectifs 1 et 2)</i>	15
1.2.3. <i>Résilience aux changements climatiques et impact potentiel de l'anthropisation (objectif 3)</i>	16
1.3. Méthodes de calcul de la recharge.....	16
1.4. Méthodologie retenue.....	17
1.5. Orientations méthodologiques pour la prise en compte de l'anthropisation	18
2. Choix des projections climatiques.....	19
2.1. Scénarios d'évolution des gaz à effet de serre (RCP)	19
2.1.1. <i>Evaluation du groupe I du GIEC en 2013 (WG1AR5)</i>	20
2.1.2. <i>Evaluation du groupe I du GIEC en 2021 (WG1AR6)</i>	23
2.2. Modélisation du climat et régionalisation	27
2.3. Prise en compte des incertitudes.....	28
2.4. projections climatiques régionalisées utilisées.....	29
3. Bases pour le calcul de la recharge.....	33
3.1. Définitions et hypothèse principale	33
3.2. Calcul de la pluie efficace.....	34
3.3. données utilisées pour le calcul.....	35
3.3.1. <i>Chroniques climatiques</i>	35
3.3.2. <i>Capacité de stockage du sol (CSS)</i>	35
3.3.3. <i>Coefficients cultureux</i>	36
4. Cartographie des variations de recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse	39
4.1. Mise en œuvre des calculs.....	39
4.2. Interprétation des variations de recharge annuelle à l'horizon 2100 à l'échelle du bassin Rhin-Meuse	39
4.3. Interprétation des variations de recharge saisonnière à l'horizon 2100 à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse.....	40
4.3.1. <i>Période hivernale (DJF)</i>	40
4.3.2. <i>Période printanière (MAM)</i>	41
4.3.3. <i>Période estivale (JJA)</i>	41
4.3.4. <i>Période automnale (SON)</i>	42
4.4. Graphiques de synthèse à l'échelle du territoire Rhin-Meuse	43
4.5. Interprétation des variations de recharge annuelle et saisonnière à l'échelle de quelques entités hydrogéologiques.....	61
5. Sélection et caractérisation de bassins versants représentatifs	67
5.1. Critères de selection.....	67
5.2. Caractérisation de l'Usage du sol et du degré d'anthropisation	70
5.3. Disponibilité des chroniques de mesures	72
5.4. Typologie des aquifères	74
5.5. Sélection finale des bassins versants.....	75
6. Modélisations à l'échelle de 8 bassins versants.....	81
6.1. Méthodologie.....	81
6.2. Mise en œuvre de la modélisation.....	82

6.2.1.	<i>Fichiers de données</i>	82
6.2.2.	<i>Options choisies pour la modélisation</i>	83
6.2.3.	<i>Qualité de la calibration obtenue : Coefficient de Nash</i>	84
6.2.4.	<i>Analyse des débits journaliers simulés</i>	87
6.2.5.	<i>Analyse des niveaux journaliers simulés</i>	88
6.2.6.	<i>Bilan moyen par bassin</i>	90
6.3.	Mise en œuvre des projections climatiques	95
6.3.1.	<i>Méthodologie appliquée</i>	95
6.3.2.	<i>Difficultés rencontrées dans le choix des projections, retour d'expérience d'Explore2 et impact sur l'étude</i>	96
6.4.	Interprétation des résultats sur la recharge potentielle	99
6.4.1.	<i>Écarts en moyenne annuelle sur la recharge potentielle</i>	100
6.4.2.	<i>Écarts en moyenne saisonnière sur la recharge potentielle</i>	100
6.5.	Interprétation des résultats sur les niveaux de nappe	111
6.5.1.	<i>Écarts en moyenne annuelle sur le niveau piézométrique</i>	111
6.5.2.	<i>Écarts en moyenne saisonnière sur le niveau piézométrique</i>	113
6.6.	Conclusions concernant la mise en œuvre des projections climatiques sur 6 bassins versants du périmètre Rhin-Meuse	121
6.6.1.	<i>Principaux messages pour la variation de recharge potentielle à l'horizon 2100</i>	121
6.6.2.	<i>Principaux messages pour la variation des niveaux de nappe à l'horizon 2100</i>	121
6.6.3.	<i>Variation de recharge potentielle à l'horizon 2100 : Prise en compte des 2 narratifs communs entre l'étude nationale et l'étude locale</i>	122
6.6.4.	<i>Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans entre les 2 approches « cartographique » et « modélisation » pour les 6 bassins versants</i>	122
7.	Réflexions sur les incertitudes, les indicateurs de résilience au changement climatique et la prise en compte de l'impact potentiel de l'anthropisation sur les évolutions	129
7.1.	Principales incertitudes associées aux résultats de l'étude « recharge » sur le bassin Rhin-Meuse	129
7.2.	Réflexions sur les indicateurs de résilience au changement climatique la prise en compte de l'impact potentiel de l'anthropisation sur la recharge	135
7.2.1.	<i>Quelques définitions</i>	135
7.2.2.	<i>Définition du risque associé à l'évolution de la recharge et des niveaux piézométriques en Rhin-Meuse</i>	137
7.2.3.	<i>Prise en compte de l'anthropisation</i>	139
7.2.4.	<i>Effets induits d'une augmentation de la recharge et des niveaux de nappe</i>	140
7.2.5.	<i>Effets induits d'une diminution de la recharge et des niveaux de nappe</i>	141
7.2.6.	<i>Pistes pour la définition des indicateurs de résilience au changement climatique axé sur la ressource en eau (recharge, niveau d'eau)</i>	142
7.2.7.	<i>Interprétation cartographique croisée des zones à enjeux du point de vue de la pression anthropique et des secteurs potentiellement impactés par le changement climatique</i>	143
8.	Conclusions	145
9.	Bibliographie	149

Liste des figures

Figure 1 – Organigramme de présentation de l'articulation entre les études « RECHARGE » volet 1 et volet 2.....	14
Figure 2 – Chaîne de modélisation pour l'étude d'impact du changement climatique	19
Figure 3 - Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m ² sur la période 2000-2300 selon les différents scénarios. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013).....	22
Figure 4 – Evolution du CO ₂ équivalent d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013).....	22
Figure 5 – Evolution de l'anomalie de température de l'air en surface d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013).....	23
Figure 6 - Extrait de l'atlas interactif du GIEC (2021) sur le secteur Europe occidentale et centrale (https://interactive-atlas.ipcc.ch/)	24
Figure 7 - Anomalie de température de l'air en surface d'ici 2100. Projection climatique selon les cinq principaux scénarios retenus dans le résumé pour décideur du GIEC. D'après IPCC, 2021.....	25
Figure 8 - Comparaison de l'évolution des anomalies prévues d'ici 2100 selon les profils RCP (AR5) et SSP (AR6) : Séries chronologiques avec plages de 5 à 95 % et médianes (a) du forçage radiatif effectif et (b) de la température de l'air à la surface du globe par rapport à 1850-1900. D'après IPCC, 2021 page 619.	26
Figure 9 - Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale. D'après Climatic Research Unit (CRU) University of East Anglia (UEA).....	27
Figure 10 - Cascade des incertitudes pour une étude d'impact du changement climatique (Boé, 2007).....	28
Figure 11 - Dispersion annuelle des écarts de température et anomalies de précipitations à l'horizon 2085 pour le scénario d'émission RCP85, pour l'ensemble des 12 couples GCM/RCM disponibles dans la base de données DRIAS.	31
Figure 12 - Schéma conceptuel pour définir la recharge potentielle directe des aquifères.....	33
Figure 13 - Principe de calcul de la recharge potentielle.....	34
Figure 14 – Carte d'occupation du sol à l'échelle du bassin Rhin-Meuse (CLC 2018)	37
Figure 15 - Cartes des coefficients cultureux saisonniers utilisés dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle	38
Figure 16 - Variations de recharge annuelle (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures.....	45
Figure 17 - Variations de recharge annuelle (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures.....	46
Figure 18 - Variations de recharge hivernale (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures.....	47
Figure 19 - Variations de recharge hivernale (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures.....	48
Figure 20 - Variations de recharge printanière (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures.....	49

Figure 21 - Variations de recharge printanière (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures.....	50
Figure 22 - Variations en été (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures.....	51
Figure 23 - Variations en été (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures.....	52
Figure 24 - Variations en automne (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures	53
Figure 25 - Variations en automne (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures	54
Figure 26 – Graphiques de répartition des surfaces du territoire Rhin-Meuse selon la gamme de variation annuelle ou saisonnière de la recharge pour les RCP4.5 et 8.5	57
Figure 27 - Statistiques sur les variations recharge saisonnière à l'échelle du bassin Rhin-Meuse.....	59
Figure 28 - Statistiques sur les variations recharge annuelle pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 1 : EH NV1 119/123/125/127/131/133.....	63
Figure 29 - Statistiques sur les variations recharge pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 2 : EH NV1 135/137/139/141/143/221.....	64
Figure 30 - Statistiques sur les variations recharge pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 3 : EH NV1 230/231/950/952/954.....	65
Figure 31 – Diagramme de caractérisation et classement des bassins versants avant modélisation.....	69
Figure 32 - Cartographie des bassins versants caractérisés par leur degré d'anthropisation....	71
Figure 33 – Répartition des piézomètres de suivi sur le bassin Rhin-Meuse selon la priorisation effectuée	72
Figure 34 - Cartographie des stations retenues sur le bassin Rhin-Meuse	73
Figure 35 - Cartographie des bassins versants caractérisés par la disponibilité de stations avec des chroniques exploitables	74
Figure 36 - Cartographie des bassins versants caractérisés par la présence majoritaire d'entités hydrogéologiques perméables ou semi-perméables.....	75
Figure 37 – Cartographie des bassins versants sélectionnés pour la modélisation.....	79
Figure 38 – Principales formations aquifères du bassin Rhin-Meuse auxquelles peuvent être rattachés les bassins versants sélectionnés.....	80
Figure 39 – Carte de situation des bassins versants et couverture des mailles SAFRAN pour la modélisation	82
Figure 40 – Liste des paramètres et des options utilisés pour la modélisation.....	83
Figure 41 – Rappels sur la notion de coefficient d'ajustement utilisée en modélisation avec les logiciels GARDENIA et EROS [Extrait Rapport BRGM/RP-62797-FR]	85
Figure 42 – Coefficient de Nash sur la racine carrée des débits et des niveaux pour les 8 bassins versants modélisés.....	86

Figure 43 - Coefficient de Nash sur les débits et les niveaux non transformés pour les 8 bassins versants modélisés.....	86
Figure 44 – Comparaison des débits simulés et observés pour les 8 bassins modélisés.....	88
Figure 45 – Comparaison des niveaux simulés et observés pour les 8 bassins modélisés.....	89
Figure 46 - Module GARDENIA représentant un bassin versant : (a) Schéma le plus simple, un seul réservoir souterrain et (b) Schéma complexe, deux réservoirs souterrains	92
Figure 47 – Histogramme des termes du bilan moyen sur la période de simulation (1965-2023) pour les 8 bassins versants modélisés	93
Figure 48 – Histogramme cumulé des termes du bilan des sorties en pourcentages sur la période de simulation (1965-2023) pour les 8 bassins versants modélisés	94
Figure 49 – Liste des projections climatiques utilisées dans l'étude locale (bassin Rhin-Meuse).....	95
Figure 50 – Narratifs retenus pour l'interprétation des résultats d'Explore2	97
Figure 51 – Comparaison des projections climatiques utilisées dans l'étude nationale (Explore2) et dans l'étude locale (bassin Rhin-Meuse)	98
Figure 52 – Graphiques par RCP et par BV pour chaque projection climatique : Ecart relatif de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle [(recharge période future – recharge période de référence)/recharge période de référence].....	105
Figure 53 - Graphiques par RCP et par horizon pour chaque BV : Ecart relatif de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle [(recharge période future – recharge période de référence)/recharge période de référence]	107
Figure 54 - Ecart relatif de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière [(recharge période future – recharge période de référence)/recharge période de référence] ..	109
Figure 55 – Graphiques des résultats par projections climatiques et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne annuelle (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)	117
Figure 56 – Graphiques des résultats statistiques par RCP et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne annuelle (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)	117
Figure 57 – Graphiques des résultats par projections climatiques et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans à l'horizon 2100 en moyenne saisonnière (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence).....	118
Figure 58 - Graphiques des résultats statistiques par RCP et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne saisonnière (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)	120
Figure 59 – Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse	126
Figure 60 – Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse	127
Figure 61 – Graphique de l'évolution des niveaux piézométriques simulés sur le piézomètre d'Haréville (BV3) pour chacune des 22 projections climatiques.....	133
Figure 62 – Graphique de l'évolution des niveaux piézométriques simulés sur le piézomètre d'Haréville (BV3) pour les projections climatiques contrastées dites « narratif jaune et « narratif violet ».....	134

Figure 63 – Illustration des notions d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. D'après https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/adaptation-france-changement-climatique	136
Figure 64 - Calendrier de production de la cartographie OCSGE occupation des sols à grande échelle. Zoom sur le Grand Est.	140
Figure 65 – Carte de synthèse des zones à enjeux à l'échelle du bassin Rhin-Meuse	144

Liste des tableaux

Tableau 1 - Description des scénarios RCPs. D'après rapport GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013) et Ouzeau et al, 2014).....	21
Tableau 2 - Correspondances entre les scénarios SSP (AR6) et RCP (AR5) retenus par le GIEC. D'après Carbone 4, adapté de l'AR6 WGI, Cross-Chapter Box 1.4, p. 233.....	26
Tableau 3 - Modèles climatiques globaux et régionaux constituant les 12 couples DRIAS-2020 et « short list » proposée par Météo-France (18/12/2020)	31
Tableau 4 - Définition des coefficients cultureux saisonniers	36
Tableau 5 – Synthèse des caractéristiques sur les bassins versants sélectionnés (périmètre amont de la station hydrométrique)	77
Tableau 6 – Tableau comparatif des approches méthodologiques mises en œuvre sur le bassin Rhin-Meuse.....	125

Liste des annexes

Annexe 1 : Graphiques des variations de recharge saisonnière pour les principales entités hydrogéologiques NV1 du bassin Rhin-Meuse	153
Annexe 2 : Tableau de correspondance CLC et Kc (Nistor et al. 2018).....	159
Annexe 3 : Graphiques des chroniques de débits simulés et observés	163
Annexe 4 : Graphiques des chroniques de niveaux simulés et observés	173
Annexe 5 : Graphiques illustrant la dispersion par bassin versant des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière pour 22 projections climatiques	183
Annexe 6 : Synthèse non technique du rapport BRGM/RP-72304-FR	191

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La mise en œuvre de la directive européenne sur la gestion et la protection de la ressource en eau demande une excellente connaissance du milieu. La Directive Cadre sur l'Eau (DCE) impose notamment aux États membres que les masses d'eau souterraines atteignent ou maintiennent leur bon état. Pour cela, trois cycles d'une durée de six ans ont été fixés : 2010-2015, 2016-2021 et 2022-2027. Lors de chaque cycle, l'état chimique et quantitatif doit être évalué et rapporté à l'Europe.

Dans le bassin Rhin-Meuse, les ressources en eau souterraine sont depuis longtemps utilisées pour l'alimentation en eau potable des populations et constituent un des vecteurs du développement économique (agriculture, industrie, etc.). Toutefois, ces ressources sont inégalement réparties et les prélèvements en eau souterraine sont très variables selon l'année et les usages d'un point à un autre du bassin.

Le bilan qui a été fait de l'exercice de l'état des lieux de 2013, sur l'application des tests d'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraines et de l'estimation des pressions et impacts liés aux prélèvements selon les méthodologies nationales, a fait ressortir les limites de ces estimations et les difficultés d'évaluation de certaines de leurs composantes, en particulier l'évaluation de la recharge des nappes. La **connaissance de la recharge** est en effet nécessaire pour le test « Equilibre prélèvements-ressource » et pour l'évaluation de la pression significative.

On constate d'autre part que le changement climatique est déjà perceptible dans le Grand Est et se manifeste par une modification des variables climatiques comme la température, le nombre de jours de gel et les précipitations. L'impact risque de s'accroître à l'avenir (horizons 2050 et 2100) entraînant de multiples effets sur les ressources en eau, la biodiversité, les activités agricoles, les risques naturels etc...

Une première étape dans cette réflexion a été franchie en 2020. En effet, le BRGM a publié en mars 2020 l'étude de l'estimation de la recharge des aquifères du bassin Rhin-Meuse, cofinancée par l'agence de l'eau ([rapport BRGM/RP-69762-FR](#)). Cette étude qui constitue le **premier volet**, a permis de définir pour chaque aquifère la méthode la mieux adaptée pour établir sa recharge et d'en réaliser une première estimation destinée à dresser l'Etat des lieux 2019 Rhin-Meuse.

En 2022, la présente étude de recherche et développement a été lancée en partenariat avec l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et la Région Grand-Est. Elle constitue le **deuxième volet** consacré aux prévisions de l'impact du changement climatique sur la recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Après un travail mené en concertation avec les équipes du BRGM en charge de la contribution « eaux souterraines » au sein du [projet Explore 2](#), les projections climatiques [DRIAS 2020](#) ont été choisies, testées et utilisées pour dresser la cartographie des variations de recharge à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse (cf. § 4).

Afin de calibrer les résultats des projections climatiques sur des observations de terrain, une phase de modélisation globale a été initiée. Elle porte sur un certain nombre de bassins versants hydrogéologiques, sélectionnés selon différents critères, tels que la pression anthropique, la disponibilité des données pour mettre en œuvre des modélisations (cf. § 0 et § 6).

1.2. ETAT DE L'ART ET VEROUS SCIENTIFIQUES

Le programme proposé fait appel à de nombreuses connaissances, données, méthodes et techniques dont certaines sont encore à l'état de développement et qui sont issues de divers champs disciplinaires : géosciences, environnement, climatologie, statistiques, informatique, science des données (data science), modélisation...

Il n'existe à ce jour aucune méthodologie éprouvée combinant ces différentes techniques et ces divers développements et des verrous scientifiques restent à lever pour atteindre les objectifs fixés dans le cadre de ce programme.

Des démarches aux objectifs proches et des solutions techniques devront donc être recherchées dans la bibliographie nationale et internationale afin d'être testées sur les données disponibles sur le bassin Rhin-Meuse.

1.2.1. Rappel concernant l'estimation de la recharge précédemment réalisée sur le bassin Rhin-Meuse – articulation des volets 1 et 2

Le BRGM est parmi les acteurs de premier plan dans l'élaboration de solutions durables pour l'eau, enjeu majeur du 21^{ème} siècle. Grâce à son expertise, le BRGM intervient aussi bien en amont, pour l'acquisition des données sur les aquifères et leur fonctionnement, qu'en aval, pour la valorisation et la diffusion des savoirs sur l'eau souterraine (référentiel hydrogéologique, bases de données, modèles hydrogéologiques régionaux...) avec pour objectif d'aider les acteurs publics et privés à faire face aux conséquences des changements globaux. Au cœur des actions du BRGM dans le domaine de la gestion des ressources en eau, on compte notamment l'estimation de la recharge des nappes et l'impact du changement climatique. Sur les 10 dernières années, le BRGM compte 98 articles dans une revue scientifique et plus de 150 communications à des congrès relevant des thématiques « recharge » et « changement climatique » (<https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/>).

Depuis 2015, le BRGM a renforcé son expertise concernant la recharge des nappes, avec différentes études menées en France (voire à l'échelle internationale, dans le cadre de projets européens notamment), et plus spécifiquement sur le bassin Rhin-Meuse.

A partir des connaissances acquises sur la ressource, et afin de répondre à l'enjeu sociétal posé par l'augmentation des périodes de sécheresse, l'évolution des précipitations moyennes à moyen et long terme et les pics de précipitations ponctuels (événements extrêmes), les différents impacts sur les aquifères captés (entre autre pour l'usage eau potable), sur la capacité de la recharge, l'enjeu de recherche pour le BRGM est de répondre à cette demande sociétale en fournissant des outils d'aide à la décision à différentes échelles, basés sur des approches robustes et pluridisciplinaires, concernant l'état et la prévision de l'état des ressources en eau. Le développement de modèles, de méthodes d'estimation des réserves des aquifères, de leur recharge à l'échelle de bassins à partir de données 2D et 3D géologiques (géométrie, lithologie, faciès) et hydrogéologiques est un défi du programme scientifique du Contrat d'Objectifs et de Performance 2018-2022 « Eaux souterraines et changement global » du BRGM.

L'étude menée par le BRGM sur le bassin Rhin-Meuse en 2018-2019 a permis d'estimer la recharge des nappes sur le bassin Rhin-Meuse à partir de la moyenne annuelle des pluies efficaces (modèle SAFRAN) sur la période de 2012 à 2017 (en accord avec la méthodologie nationale pour l'EDL de 2019). Le calcul de la recharge a ainsi été réalisé avec 3 méthodes différentes, qui ont été appliquées sur des territoires différents du bassin selon leur pertinence et la disponibilité des données nécessaires :

- Calcul de la recharge par la méthode de décomposition d'hydrogramme de Wallingford, sur les têtes de bassins versants hydrologiques du bassin Rhin-Meuse et le socle ;
- Calcul de la recharge à partir des bilans de flux du modèle LOGAR pour la nappe d'Alsace ;
- Calcul de la recharge à partir de l'évaluation d'un ratio d'infiltration de la pluie efficace (RIPE) à partir de l'IDPR sur le reste du bassin.

Les résultats de ces calculs ont été utilisés pour construire un raster de maille 25 m x 25 m, aboutissant à un résultat composite intermédiaire. Pour atténuer les biais dus à l'utilisation de différentes méthodes et appliquées sur des échelles différentes (bassin versant pour Wallingford, maille 500mx500m pour Logar, maille 8 kmx8km pour SAFRAN et maille 25mx25m pour l'IDPR et le RIPE), il est nécessaire d'agréger cette grille composite à une échelle pertinente pour obtenir un résultat exploitable (bassin versant, masse d'eau, entité BDLISA, etc.). Cette grille présente l'intérêt pour les acteurs locaux de disposer de données de base pour une estimation ultérieure de la recharge par agrégation, sans avoir besoin de refaire tous les calculs.

Pour réaliser cette étude sur le bassin Rhin-Meuse, le BRGM s'est notamment appuyé sur son expérience passée à l'échelle d'autres grands bassins hydrographiques tel que Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne, à savoir :

- L'étude réalisée en 2015 pour Agence de L'eau Rhône-Méditerranée-Corse qui a permis d'appliquer certaines méthodes d'évaluation de la recharge à plusieurs aquifères karstiques. Un outil spécifique (ESPERE) a été développé par le BRGM afin d'optimiser les calculs et permettre la comparaison entre les différentes méthodes utilisées. En parallèle, la recharge a été estimée en utilisant un coefficient de partition de la pluie efficace obtenu à partir des valeurs de l'indice IDPR (Mardhel et al., 2005). Cette méthode est intéressante mais reste qualitative du fait que la répartition entre le ruissellement et l'infiltration est constante dans le temps et n'est pas contrainte par des observations (telle que les chroniques de débit à l'exutoire des bassins) ;
- L'étude réalisée en 2016, dans le cadre de la convention AFB /BRGM qui s'est focalisée sur les méthodes susceptibles d'être appliquées pour l'évaluation de l'état quantitatif des eaux souterraines et des pressions et impacts au sens de la DCE. Les méthodes sélectionnées ont été appliquées à différents contextes hydrogéologiques où une évaluation de la recharge avait été faite par modélisation (globale et/ou spatialisée), ce qui a permis d'établir des comparaisons entre méthodes ;

- D'autres travaux sur l'estimation de la recharge qui ont été réalisés dans le cadre de la convention Agence de l'eau Adour Garonne/BRGM (Le Cointe, 2019). La méthodologie appliquée a consisté à calculer dans un premier temps la pluie efficace (ruissellement + recharge) à l'aide d'une méthode de bilan hydrique (Dingman, 2002 ou GARDENIA/GR4) sur les mailles de la grille Safran (Vidal et al., 2010). Il s'agit de grilles de 8 km de côté couvrant la France pour lesquelles on dispose de données climatiques (précipitations liquides et solides, température et évapotranspiration potentielle).

La cartographie de la recharge obtenue sur le bassin Rhin-Meuse en 2019, basée sur les données observées et moyennées sur une période de 6 ans, est parfaitement adaptée pour rendre compte de la situation de la recharge des nappes en lien avec l'échelle temporelle de l'état des lieux sur le Bassin Rhin-Meuse. Néanmoins, elle ne tient pas compte de la variabilité du climat qui s'inscrit dans une durée bien plus longue (a minima une période de 30 ans est imposée dans les travaux de projection de scénarios climatiques) et ne pourra pas être utilisée dans la phase de modélisation envisagée par la suite (cf. méthodologie sur la nécessité de calculer la recharge actuelle sur une période de 30 ans minimum).

Ce premier volet consacré à l'estimation de la recharge sur le bassin Rhin-Meuse a ainsi permis de mettre en évidence la nécessité de poursuivre les travaux concernant l'impact du changement climatique et d'offrir l'opportunité de lever plusieurs verrous scientifiques, tels que le choix des scénarios climatiques (**verrou scientifique n°1**), les incertitudes liées aux calculs de la recharge et aux modélisations (**verrou scientifique n°2**) ou l'analyse des effets de l'anthropisation (**verrou scientifique n°3**). Le travail du BRGM n'a pas vocation à se substituer aux travaux des climatologues qui mettent à disposition des scénarios climatiques mais bien d'adapter les méthodes de travail à partir des données fournies et de visualisation des résultats finaux.

Le graphique suivant (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présente l'articulation entre l'étude consacrée à l'évaluation de la recharge pour l'EDL 2019 (constituant le volet 1) et la présente étude R&D pour la cartographie de l'impact du changement climatique sur la recharge future (constituant le volet 2).

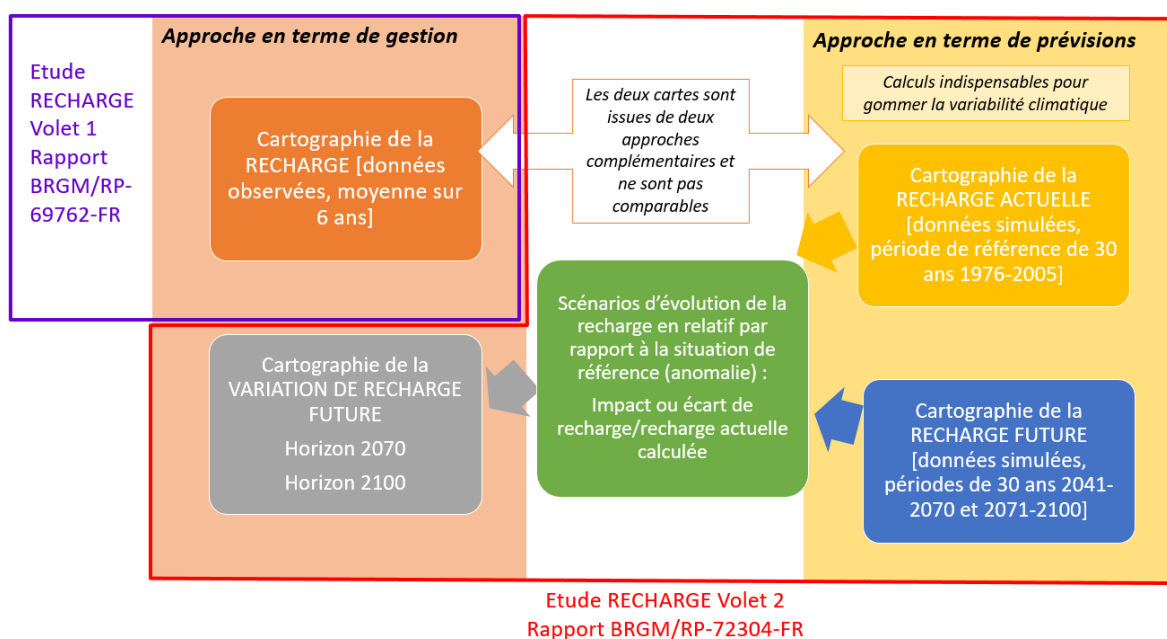


Figure 1 – Organigramme de présentation de l'articulation entre les études « RECHARGE » volet 1 et volet 2

1.2.2. Choix des projections climatiques et régionalisation (objectifs 1 et 2)

La plupart des modèles qui simulent l'évolution du climat à l'échelle du globe découpent la surface de la Terre en mailles d'environ 150 km de large. Cette résolution est limitée par la puissance de calcul disponible.

Les simulations climatiques renseignent ainsi sur l'évolution du climat à une échelle globale pas toujours adaptée à l'étude de phénomènes régionaux voire locaux, notamment pour estimer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et répondre ainsi aux inquiétudes des acteurs socio-économiques concernés.

Le **1^{er} verrou scientifique** identifié consiste donc à disposer de scénarios de projections climatiques à une échelle plus fine (quelques dizaines de km) adaptée pour appréhender l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin Rhin-Meuse. Pour affiner spatialement les scénarios de changement climatique, il faut donc augmenter la résolution du maillage. On parle de régionalisation et on peut utiliser pour cela des modèles régionaux de climat (RCMs) ou des méthodes de régionalisation statistique. Au cours des 20 dernières années, la communauté française a développé plusieurs RCMs et est pionnière dans les modèles régionaux couplés intégrant atmosphère, continent, fleuve et océan.

Les scénarios régionalisés obtenus permettent aujourd'hui de caractériser le changement climatique et ses impacts sur de nombreux écosystèmes naturels et secteurs socio-économiques à l'échelle de la France et de l'Europe. Mais au-delà, il reste encore de nombreux progrès à faire pour améliorer la capacité des modèles à simuler les événements extrêmes régionaux, pour mieux quantifier les incertitudes des projections régionales, pour améliorer la résolution spatiale (1-5 km). Les résultats des projections régionales, qui contiennent des informations utiles à la société et aux décideurs politiques et économiques, doivent, dans l'avenir, être transférés à la société via des « services climatiques ». Le passage du « global » au « local » nécessite de faire la synthèse des modèles disponibles, de sélectionner les scénarios les plus pertinents au regard de la problématique locale et de prendre en compte les incertitudes liées au choix des scénarios retenus.

Il existe de nombreux types de modèles climatiques variant en complexité : le GIEC recense 23 modèles indépendants utilisés par les différents laboratoires de climatologie à travers le monde à la date du 4^{ème} rapport du GIEC en 2007. Depuis cette date, les modèles climatiques ont progressé (IPCC, 2013). Ils reproduisent les structures spatiales et les tendances de température en surface observées à l'échelle des continents sur de nombreuses décennies, y compris le réchauffement relativement rapide observé depuis le milieu du XX^e siècle et le refroidissement suivant immédiatement les éruptions volcaniques majeures (degré de confiance très élevé).

Parmi les modèles détaillés dans le 5^{ème} rapport du GIEC, on trouve (IPCC, 2014) :

- Les modèles couplés océan-atmosphère : Ces modèles représentaient l'essentiel des modèles utilisés et évalués dans le 4^{ème} rapport du GIEC. Ils sont constitués de plusieurs modèles en interaction (couplage) : océan, atmosphère, glace de mer, continents (végétation, ruissellement, etc.). Par exemple, les températures de surface atmosphériques, calculées par le modèle d'atmosphère, servent de données d'entrée au modèle d'océan pour le calcul des températures de surface océanique et vice-versa. Ces modèles sont toujours très utilisés ;

- Les modèles du système Terre : Ces modèles sont le développement des modèles couplés océan-atmosphère, auxquels est ajoutée la simulation des cycles biogéochimiques. Ils constituent aujourd'hui les outils les plus complets pour la réalisation des projections climatiques pour lesquelles les rétroactions liées aux cycles biogéochimiques sont importantes ;
- Les modèles du système Terre de complexité intermédiaire : Ces modèles incluent les composantes des modèles du système Terre, mais souvent de façon idéalisée, ou à faible résolution, afin d'être moins coûteux en puissance de calcul. Ils permettent l'étude de questions spécifiques, par exemple la compréhension de certains processus de rétroactions ;
- Les modèles régionaux : Ils sont similaires aux modèles précédents, mais leur domaine spatial ne couvre qu'une partie du globe terrestre. Leur domaine étant plus petit, il est possible d'avoir une meilleure résolution spatiale (taille de la maille plus petite) et temporelle pour un même coût de calcul par rapport à un modèle global. Les informations aux frontières sont en général fournies par les modèles globaux.

Cette variété et cette complexité dans les modèles climatiques sont sources d'incertitude (Vetter et al 2017) et constituent le **2^{ème} verrou scientifique**.

1.2.3. Résilience aux changements climatiques et impact potentiel de l'anthropisation (objectif 3)

Comme évoqué précédemment (verrou scientifique n°2), il existe de nombreuses sources d'incertitudes concernant les modèles de simulation du climat et les scénarios socio-économiques d'évolution de la planète.

La résilience aux changements climatiques et l'impact potentiel de l'anthropisation et de son évolution sur la recharge sont à ce jour des concepts très difficiles à appréhender sur la base de données elles-mêmes entachées d'incertitudes. L'importance de l'évolution de la pluie efficace, et de la recharge sous l'effet du changement climatique se doit notamment d'être mise en perspective par rapport à la ressource disponible et à la pression anthropique. Il s'agit là du **3^{ème} verrou scientifique**.

1.3. METHODES DE CALCUL DE LA RECHARGE

Le BRGM a réalisé plusieurs études pour améliorer l'estimation de la recharge, avec en particulier la réalisation d'une synthèse des méthodes disponibles pour évaluer la recharge par infiltration de la pluie efficace (Seguin, 2016) et le développement d'un outil de calcul dénommé [ESPERE](#) (Estimation de la Pluie Efficace et de la REcharge selon différentes méthodes) pour estimer la recharge d'une nappe (Lanini et al., 2015 et 2021).

Trois grands types de méthodes sont applicables pour calculer la recharge potentielle par les précipitations sur des nappes libres, applicables à l'échelle d'un hydrosystème :

- Celles qui partent de chroniques météorologiques pour réaliser un **bilan hydrologique** et évaluer la **pluie efficace**, qu'il s'agit ensuite de décomposer en ruissellement et recharge ;

- Celles qui partent de l'analyse de l'**hydrogramme d'un cours d'eau**, pour déterminer la part du débit du cours d'eau (Baseflow) qui provient de la nappe connectée au cours d'eau (**écoulement de base**) et peut être assimilée à la recharge issue de la pluie en l'absence d'autres apports conséquents ;
- Celles qui partent de l'analyse des fluctuations d'une **chronique piézométrique** (Water Table Fluctuation) et de la porosité de drainage pour calculer la **recharge** au sens de Castany et Margat (1977).

Ces méthodes dites « **non contraintes** » utilisent les chroniques disponibles pour évaluer la recharge de l'hydrosystème, sans tenir compte de son fonctionnement.

Une autre approche, dite « **méthode contrainte** », consiste à modéliser l'hydrosystème pour reproduire des chroniques de sortie (débit à l'exutoire et/ou chronique piézométrique) connaissant les flux d'entrée (précipitations et ETP). Dans ce cas, la recharge est fournie par le bilan des flux au pas de temps défini.

1.4. METHODOLOGIE RETENUE

La méthodologie retenue consiste à effectuer les calculs de variations de recharges futures à l'échelle du bassin Rhin-Meuse, selon les deux différentes méthodes « non-contrainte » et « contrainte », d'analyser les résultats en vue d'évaluer les conséquences du changement climatique sur les aquifères et de formuler des hypothèses en termes de résilience au changement climatique.

Méthode « non contrainte » de calcul de la variation de recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse

La **méthode dite « non contrainte »** utilise le bilan hydrologique pour évaluer la recharge globale à l'échelle d'un territoire, sans tenir compte du fonctionnement des hydrosystèmes. Elle présente l'avantage de pouvoir être appliquée à grande échelle, et a donc été utilisée pour évaluer la recharge potentielle ([Rapport BRGM/RP-69762-FR](#)) et l'impact du changement climatique sur cette recharge (cf. §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, §2 et §**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) à l'échelle du bassin Rhin-Meuse.

Dans cette étude, la recharge potentielle due à l'infiltration des précipitations sur le bassin Rhin-Meuse a été estimée à partir d'un bilan hydrologique du sol réalisé à une résolution de 8 km². Pour tenir compte de l'incertitude liée au choix de la méthode, trois méthodes de bilan légèrement différentes ont été appliquées (Thorntwaite, Dingman et Edijatno&Michel), et la moyenne des trois résultats est conservée car considérée comme le meilleur estimateur de la recharge.

Méthode « contrainte » de calcul des variations de recharge et de niveau piézométrique à l'échelle de 6 bassins versants par modélisation semi-globale

La « **méthode contrainte** » consiste à modéliser des hydrosystèmes, sur la base des observations disponibles, pour reproduire des chroniques de sortie (débit à l'exutoire et/ou chronique piézométrique) en connaissant les flux d'entrée (précipitations et ETP). Dans ce cas, la recharge est fournie par le bilan des flux sur chaque bassin versant « type » sélectionné (cf. § 0 et § 6).

Dans cette étude, la sélection de bassins versants représentatifs a été réalisée en accord avec les partenaires, sur la base de critères hydrogéologiques mais également en considérant des bassins versants peu influencés par la pression anthropique et d'autres plus influencés (suppressions d'annexes hydrauliques, drainage, imperméabilisation...).

Les modélisations ont été réalisées à partir du logiciel [EROS](#) (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins) développé par le BRGM. Il sert à la modélisation hydrologique par bilan de bassins versants hétérogènes découpés en sous bassins. A partir de chroniques des variables climatologiques et des débits des cours d'eau et/ou de niveaux piézométriques, il permet d'établir à l'échelle de chaque sous bassin le bilan hydrologique et d'estimer la recharge de la nappe sous-jacente. Une fois calibré, le modèle EROS permet de simuler les niveaux de nappe et les débits des cours d'eau à partir de précipitations effectivement observées, de prolonger par des scénarios climatologiques prévisionnels les termes du bilan et d'appréhender de grandes tendances concernant l'impact du changement climatique sur la ressource en eau souterraine.

Les projections climatiques régionalisées (période future) sont utilisées comme données d'entrée du modèle EROS pour en déduire la situation future des variables simulées (notamment recharge et niveau d'eau) et calculer les variations par rapport à la période de référence.

1.5. ORIENTATIONS METHODOLOGIQUES POUR LA PRISE EN COMPTE DE L'ANTHROPISATION

Au-delà du changement climatique, il a été convenu avec les partenaires d'explorer les perspectives d'évaluation de l'impact potentiel de l'anthropisation sur la recharge et son évolution, à deux échelles différentes :

- D'une part à l'échelle des bassins versants sélectionnés : Il s'agirait de pouvoir comparer les résultats pour des BV dans des contextes (hydro)géologiques similaires mais affectés d'un degré d'anthropisation différent (en fonction des données disponibles cette possibilité pourrait s'avérer non réalisable) ;
- D'autre part à l'échelle plus globale du bassin Rhin-Meuse : Il s'agirait de mener une interprétation cartographique croisée des zones à enjeux du point de vue de la pression anthropique et des secteurs potentiellement impactés par une baisse significative de la recharge.

2. Choix des projections climatiques

Les études d'impact du changement climatique sur la ressource en eau reposent sur une **chaîne de modélisation** dont les étapes sont les suivantes (Figure 2) :

- Le choix des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre (GES) appelés profils représentatifs d'évolution de concentration (*Representative Concentration Pathway*) ou RCP ;
- La modélisation du climat à l'échelle du globe à partir de ces scénarios. On parle de modèle de circulation générale (*General Circulation Model*) ou GCM ;
- La régionalisation des variables climatiques modélisées ou descente d'échelle ;
- La modélisation hydrogéologique à partir des projections climatiques régionalisées.



Figure 2 – Chaîne de modélisation pour l'étude d'impact du changement climatique

2.1. SCENARIOS D'EVOLUTION DES GAZ A EFFET DE SERRE (RCP)

Le Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat ou GIEC prépare régulièrement des rapports d'évaluation complets sur les connaissances concernant le changement climatique, ses causes, ses impacts potentiels et les options de réponse. Le GIEC produit également des rapports spéciaux, qui sont une évaluation sur une question spécifique, des rapports méthodologiques et un rapport de synthèse (SYR), qui fournissent des directives pratiques pour la préparation des inventaires des gaz à effet de serre. Trois groupes d'experts contribuent à l'élaboration des rapports :

- Le groupe I travaille sur les bases physiques du climat et analyse les climats passés, présents et futurs. Il établit différents scénarios possibles en fonction des émissions de gaz à effet de serre émises par l'humanité ;
- Le groupe II travaille sur la vulnérabilité des sociétés humaines, des écosystèmes et des systèmes socio-économiques face à la dérive climatique, les conséquences du changement climatique, et les options d'adaptation ;
- Le groupe III étudie l'atténuation du changement climatique, l'évaluation des méthodes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et l'élimination des gaz à effet de serre de l'atmosphère.

Les modèles du système climatique sont utilisés conjointement avec des études démographiques et économiques par le GIEC pour traiter les problématiques posées par le changement climatique et ses impacts. Les simulations climatiques sont réalisées à partir de modèles numériques à l'échelle du globe appelés modèles de circulations générales (GCM). Dans ces modèles, l'évolution du climat dépend de variables d'entrées naturelles (éruptions volcaniques, activité solaire, ...) ou anthropiques (émission de Gaz à Effet de Serre (GES), aérosols, ...). Ces entrées, appelées forçages, peuvent être déterminées à partir d'observations pour simuler le climat passé. Pour le futur, seuls les forçages d'origine humaine sont déterminés au travers de scénarios d'émissions.

Ces scénarios d'émissions sont déterminés à partir de scénarios socio-économiques postulant diverses hypothèses sur le développement futur et ses conséquences sur l'environnement. Ces scénarios socio-économiques sont fournis par des modèles d'évaluations intégrant l'évolution de l'économie, l'évolution de la population, les développements agricole et industriel, ainsi que la chimie atmosphérique et le changement climatique. Ces modèles d'évaluation intégrée fournissent des scénarios d'évolution des GES et des aérosols introduits comme forçage dans les modèles climatiques.

2.1.1. Evaluation du groupe I du GIEC en 2013 (WG1AR5)

Pour le [5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC](#) (WG1AR5 de 2013), la communauté scientifique a défini un ensemble de **quatre nouveaux scénarios d'évolution des GES appelés profils représentatifs d'évolution de concentration ou Representative Concentration Pathways (RCPs)**.

Comparativement aux scénarios SRES³ utilisés antérieurement pour les rapports GIEC 2001 et 2007, une approche différente a été adoptée pour le 5^{ème} rapport afin d'accélérer le processus d'évaluation, notamment grâce au travail en parallèle de différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes ...). Les climatologues en déduisent des projections climatiques globales ou régionales. Les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques compatibles avec les RCPs.

Les 4 scénarios, sélectionnés par les scientifiques sur la base de plusieurs centaines de scénarios publiés, sont nommés selon leur niveau de forçage radiatif ou modification du **bilan radiatif⁴** de la planète. Les profils RCPs correspondent chacun à une évolution différente de ce forçage à l'horizon 2100 et sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m^2 (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe :

- Le scénario **RCP2.6** ($2.6 W/m^2$) implique de fortes réductions d'émissions de GES par la communauté internationale. Ce scénario intègre les effets d'une politique de réduction des émissions susceptible de limiter le réchauffement planétaire inférieur à $2^{\circ}C$ (plage probable entre 0.3 et $1.7^{\circ}C$) d'ici 2100 (Van Vuuren et al., 2011) ;

³ Second Report on Emission Scenario

⁴ Le bilan radiatif représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, comme par exemple la concentration en gaz à effet de serre, ce bilan se modifie : on parle de forçage radiatif.

- Le scénario **RCP4.5** (4.5 W/m²) décrit une voie intermédiaire, dans laquelle les émissions continuent de croître pendant quelques décennies, se stabilisent puis dé-croissent avant 2100. Ce scénario intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles qui permettent de limiter le réchauffement planétaire à une fourchette comprise entre 1.1 et 2.6 °C d'ici 2100 ;
- Le scénario **RCP6.0** (6.0 W/m²) décrit une voie intermédiaire, dans laquelle les émissions continuent de croître pendant quelques décennies, se stabilisent après 2100 puis décroissent. Ce scénario intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à une fourchette comprise entre 1.4 et 3.1 °C d'ici 2100 ;
- Le scénario **RCP8.5** (8.5 W/m²), correspond à la prolongation des émissions actuelles sans politique de réduction aucune et table sur un réchauffement continu de 2.6 à 4.8 °C d'ici 2100. Ces fourchettes de probabilité peuvent être attribuées aux incertitudes des projections climatiques.

Le Tableau 1 dresse la synthèse des principales caractéristiques des 4 scénarios, du plus optimiste (RCP2.6) au plus pessimiste (RCP8.5), notamment :

- forçage radiatif (cf. évolution jusqu'en 2300 - Figure 3) ;
- concentration en CO₂ éq-CO₂ (cf. évolution jusqu'en 2300 - Figure 4) ;
- anomalie de température de l'air en surface (cf. évolution jusqu'en 2300 - Figure 5).

Scénarios	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
Politique climatique de réduction des émissions de GES	Forte	Moyenne	Faible	Aucune
Profil d'évolution / trajectoire	Pic avant 2050 puis déclin	Stabilisation avant 2100	Stabilisation après 2100	Croissance jusqu'en 2250
Forçage radiatif vers 2100 (W/m ²)	2.6	4.5	6.0	8.5
Concentration en CO ₂ éq-CO ₂ vers 2100 (ppm)	475	630	800	1313
Anomalie de température moyenne annuelle de l'air en surface				
ΔT en °C				
2046-2065	1±0.3 [0.4 à 1.6]	1.4±0.3 [0.9 à 2]	1.3±0.3 [0.8 à 1.8]	2±0.4 [1.4 à 2.6]
2081-2100	1±0.4 [0.3 à 1.7]	1.8±0.5 [1.1 à 2.6]	2.2±0.5 [1.4 à 3.1]	3.7±0.7 [2.6 à 4.8]
2181-2200	0.7±0.4 [0.1 à 1.3]	2.3±0.5 [1.4 à 3.1]	3.7±0.7 [...]	6.5±2.0 [3.3 à 9.8]
2281-2300	0.6±0.3 [0 à 1.2]	2.5±0.6 [1.5 à 3.5]	4.2±1 [...]	7.8±2.9 [3.0 à 12.6]

Tableau 1 - Description des scénarios RCPs.
D'après rapport GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013) et Ouzeau et al, 2014)

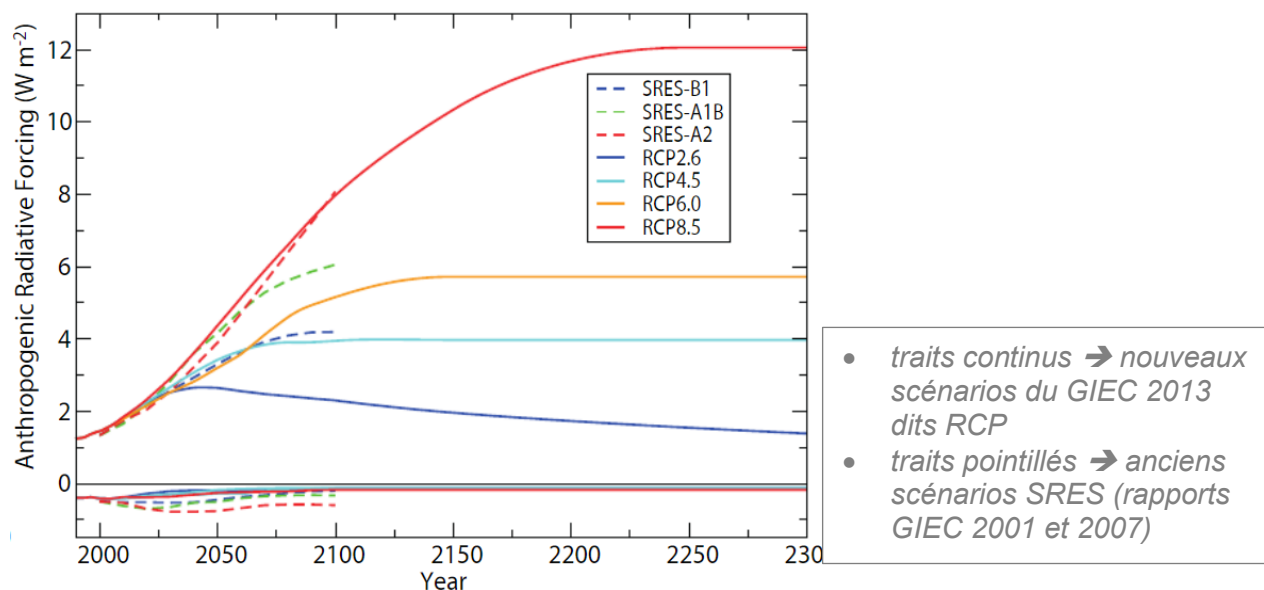


Figure 3 - Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m² sur la période 2000-2300 selon les différents scénarios. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

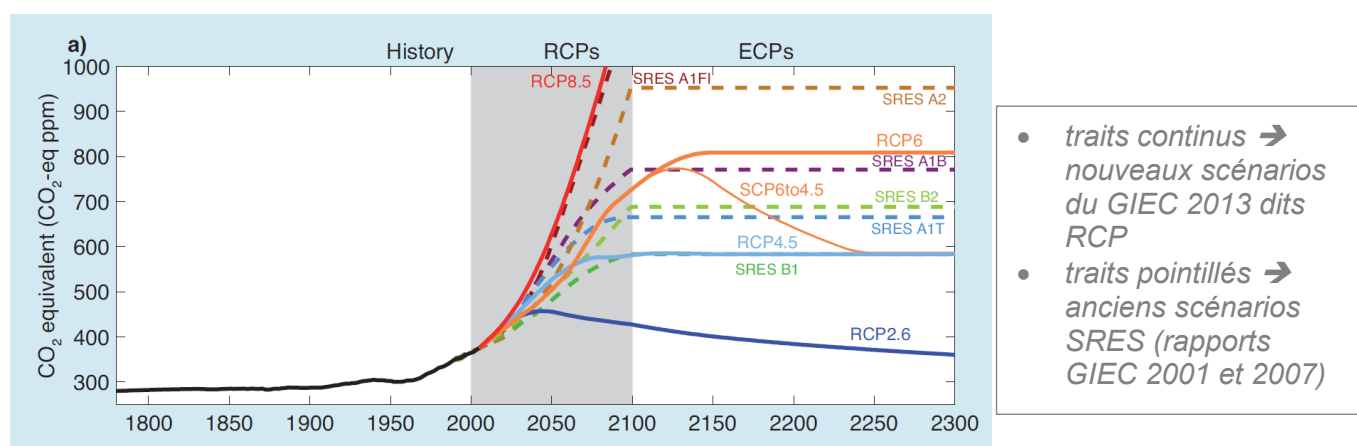


Figure 4 – Evolution du CO₂ équivalent d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

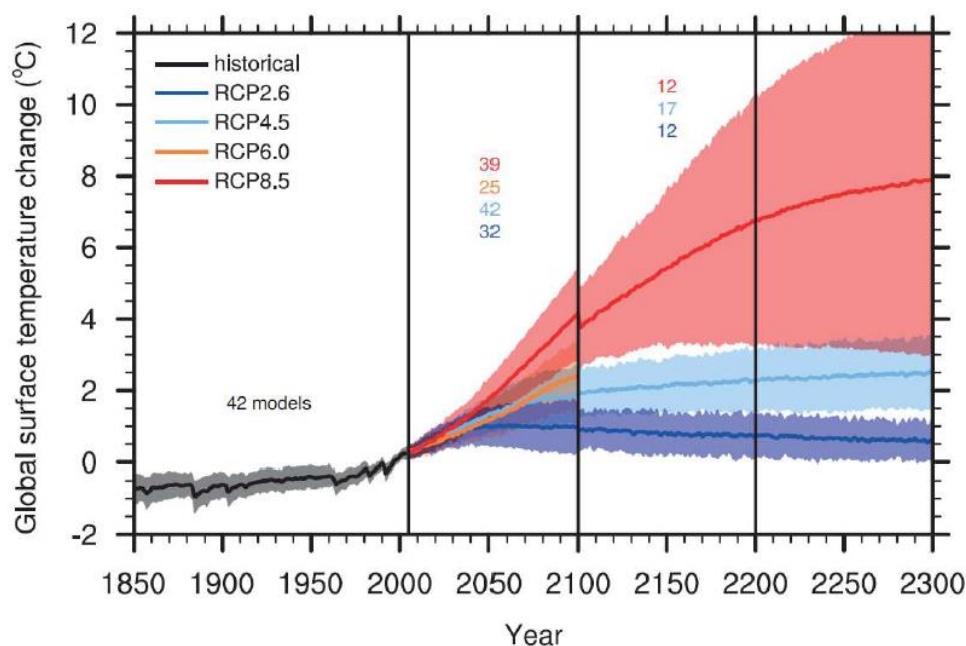


Figure 5 – Evolution de l'anomalie de température de l'air en surface d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

2.1.2. Evaluation du groupe I du GIEC en 2021 (WG1AR6)

Le GIEC est actuellement dans son sixième cycle d'évaluation, avec la production des rapports d'évaluation dont la première partie « *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* »⁵ est parue le 6 août 2021.

Cette version se trouve enrichie des derniers travaux scientifiques et des progrès méthodologiques par rapport à la version précédente. Le rapport établit un diagnostic, plus précis, plus fiable, et plus inquiétant, de l'évolution passée du climat, et de meilleures estimations du climat futur. Il innove avec une approche par région, complétée par un Atlas Interactif (Figure 6).

⁵ <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

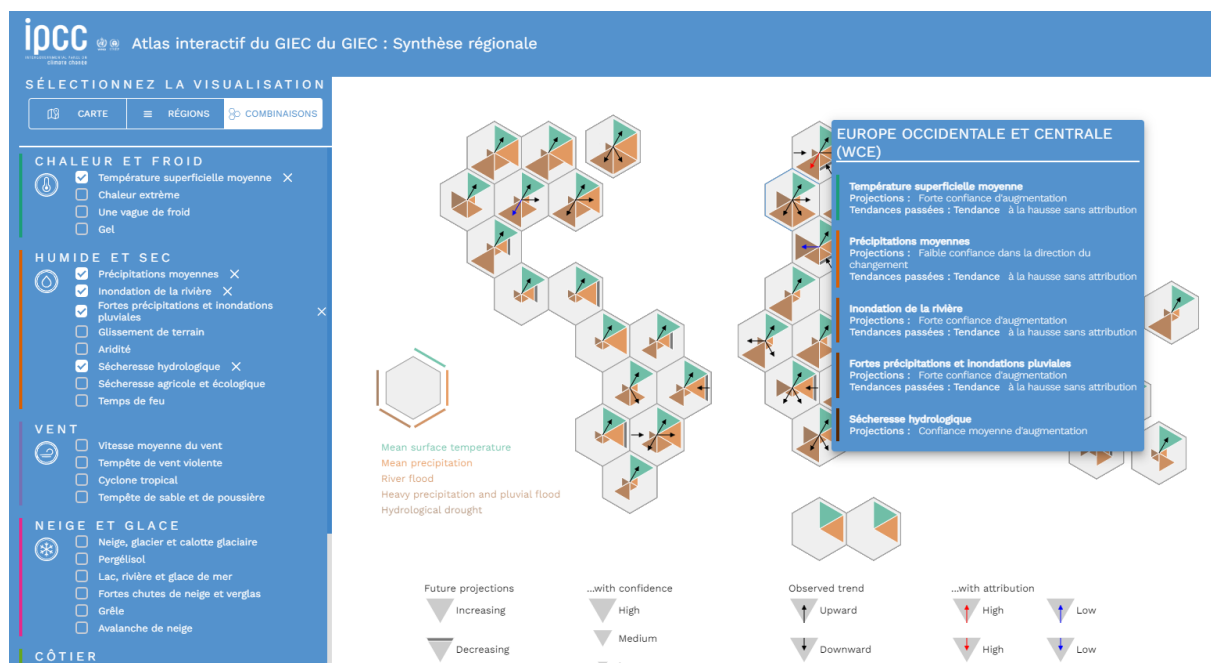


Figure 6 - Extrait de l'atlas interactif du GIEC (2021) sur le secteur Europe occidentale et centrale (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>)

Dans le 6^{ème} rapport du GIEC, les scénarios RCP font place aux scénarios SSP. Les SSP, pour « Shared Socio-economic Pathways » ou trajectoires communes d'évolution socio-économique, décrivent des tendances possibles pour l'évolution des sociétés au cours du siècle, selon différents modes de développement et de relations entre les Etats.

On en compte cinq, centrées sur un développement soutenable et la coopération entre les Etats (SSP1), un développement ordinaire (SSP2), des rivalités régionales qui entravent la prise en compte des questions environnementales (SSP3), un développement fortement inégalitaire (SSP4) et un développement fondé sur les énergies fossiles (SSP5). Les SSP1 et SSP5 envisagent des tendances relativement optimistes pour le développement humain, avec des investissements substantiels dans l'éducation et la santé, une croissance économique rapide et des institutions qui fonctionnent bien. Les SSP3 et SSP4 envisagent des tendances de développement plus pessimistes, avec peu d'investissements dans l'éducation ou la santé, une croissance démographique rapide et des inégalités croissantes. Le scénario SSP2 envisage une trajectoire intermédiaire dans laquelle les tendances se poursuivent sans déviations substantielles.

A partir de ces narratifs, des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été élaborés, dont le nom comprend la SSP associée (par exemple SSP1) et le forçage radiatif prévu en 2100 (par exemple 1.9). Le GIEC se concentre dans son évaluation sur cinq scénarios principaux pour assurer un certain recoupement avec les niveaux de forçage radiatif des RCP à l'horizon 2100 (Figure 7) :

- SSP1-1.9 : scénario très faiblement émetteur, qui atteint le net-zéro d'ici 2060 avant de réaliser des émissions négatives ;
- SSP1-2.6 : scénario faiblement émetteur, qui atteint le net-zéro d'ici 2080 avant de réaliser des émissions négatives ;

- SSP2-4.5 : scénario intermédiaire, avec des niveaux d'émissions équivalents à aujourd'hui vers 2050 puis divisés par deux avant la fin du siècle ;
- SSP3-7.0 : scénario fortement émetteur, avec une augmentation continue des émissions de CO₂ qui sont doublées d'ici 2100 ;
- SSP5-8.5 : scénario très fortement émetteur, où les émissions de CO₂ sont doublées d'ici à 2050 avec un pic autour de 2090.

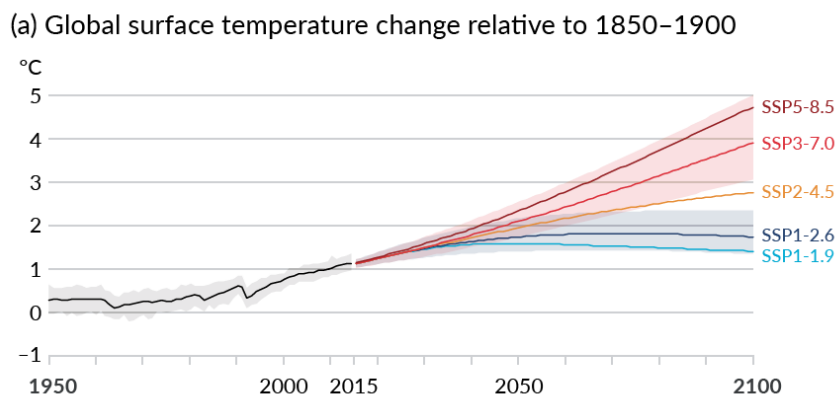


Figure 7 - Anomalie de température de l'air en surface d'ici 2100. Projection climatique selon les cinq principaux scénarios retenus dans le résumé pour décideur du GIEC. D'après IPCC, 2021.

Si l'on compare RCP et SSP, les scénarios SSP sont davantage représentatifs des trajectoires socio-économiques potentielles : quantification des paramètres économiques futurs (utilisation de l'énergie, utilisation des terres, population, etc.) et des émissions futures de GES.

A chaque RCP peut donc être associés 1 ou plusieurs SSP (Tableau 2), car à un niveau d'émission de gaz à effet de serre donné peut correspondre plusieurs types de développement socio-économiques. Le nouveau jeu de scénarios SSP (Figure 8) apporte néanmoins 2 éléments complémentaires par rapport au RCP :

- Deux nouveaux scénarios de réchauffement :
 - le SSP3-7.0 (sans politique climatique supplémentaire) ;
 - le SSP1-1.9 (conforme à l'objectif de 1,5°C de l'accord de Paris) ;
- Une information sur la « vraisemblance » des scénarios de réchauffement à travers les trajectoires socio-économiques associées supposées.

Scénario SSP	Scénario RCP le plus proche	Précision
SSP1-1.9	Pas de scénario RCP équivalent	
SSP1-2.6	RCP2.6	Le RCP2.6 induit un réchauffement légèrement plus faible.
SSP2-4.5	RCP4.5	Le scénario RCP6.0 est lui aussi proche du SSP2-4.5, jusqu'à 2050.
SSP3-7.0	Entre le RCP6.0 et le RCP8.5	Dans SSP3-7.0, les émissions d'autres GES que le CO ₂ et d'aérosols sont plus élevées que dans n'importe lequel des RCP.
SSP5-8.5	RCP8.5	Le scénario SSP5 est le seul narratif SSP dont les émissions sont suffisamment élevées pour produire un forçage radiatif de 8,5 W.m ⁻² en 2100.

Tableau 2 - Correspondances entre les scénarios SSP (AR6) et RCP (AR5) retenus par le GIEC. D'après Carbone 4, adapté de l'AR6 WGI, Cross-Chapter Box 1.4, p. 233.

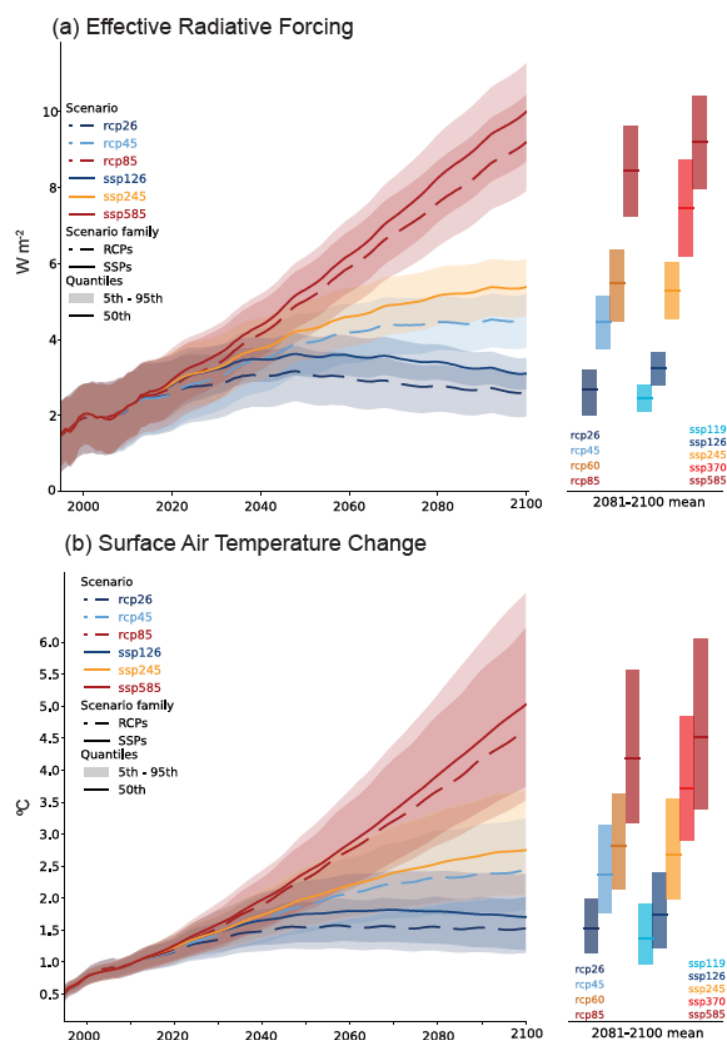


Figure 8 - Comparaison de l'évolution des anomalies prévues d'ici 2100 selon les profils RCP (AR5) et SSP (AR6) : Séries chronologiques avec plages de 5 à 95 % et médianes (a) du forçage radiatif effectif et (b) de la température de l'air à la surface du globe par rapport à 1850-1900. D'après IPPC, 2021 page 619.

2.2. MODELISATION DU CLIMAT ET REGIONALISATION

Les différents scénarios décrits précédemment (§ 2.1) sont utilisés par les **modèles de climat** afin de simuler l'évolution du système climatique à l'échelle du globe. La résolution spatiale des modèles climatiques est comprise entre 150 et 250 km. Elle ne permet pas une représentation réaliste des caractéristiques physiographiques locales, telles que la topographie, qui jouent pourtant un rôle crucial sur la dynamique de l'évolution du climat local. L'exploitation des variables climatiques issues des modèles de climat nécessitent donc l'emploi de techniques de **descentes d'échelle spatiale**, autrement appelée **régionalisation**, afin de proposer des projections climatiques exploitables dans les modèles d'impact hydrologique/hydrogéologique.

Il existe deux techniques de régionalisation (<http://www.drias-climat.fr/>) :

- La **régionalisation statistique** qui s'appuie sur des relations physiquement interprétables bâties entre les variables de grande échelle (précipitations, températures) à des variables locales telles que la topographie, le type de surface, la couverture du sol, etc... ;
- La **régionalisation dynamique** qui consiste à utiliser un modèle atmosphérique à fine échelle sur un territoire donné dont les limites sont forcées par un modèle grande échelle (Figure 9).

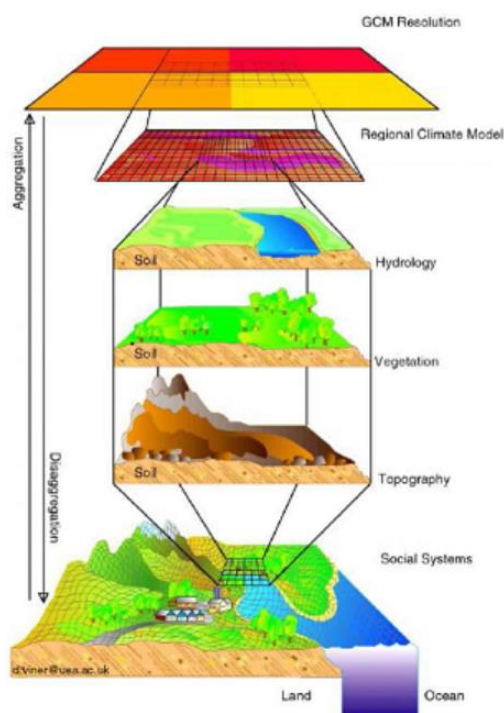


Figure 9 - Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale.
D'après Climatic Research Unit (CRU) University of East Anglia (UEA)

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (méthodes statistico-dynamiques). L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine, ...) et de disposer de données historiques sur une période suffisamment longue (10-20 ans). Mettre en œuvre deux méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'**incertitude**.

Grâce à différentes techniques, les chercheurs de Météo-France produisent des projections fines à l'échelle de la France (résolutions allant de 8 à 50 km). Les résultats les plus récents sont mis à disposition du public et de la communauté scientifique sur le portail « [DRIAS, les futurs du climat](#) ». Ce dernier offre un accès à une trentaine de paramètres et indicateurs climatiques, sur une grille de 8 km de résolution (maillage SAFRAN), simulés par **plusieurs modèles** et pour **différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre**.

2.3. PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES

La chaîne de modélisation aboutissant à la production des projections hydrologiques régionalisées s'appuie sur des simulations de modèles climatiques à l'échelle du globe, eux-mêmes conditionnés par des hypothèses de développement socio-économique, ainsi que sur une méthode de régionalisation (Boé, 2007).

L'enchaînement des mailles de cette chaîne introduit à chaque étape une source d'incertitude de sorte que cette dernière augmente au fur et à mesure que l'on descend la chaîne de modélisation (Figure 10).

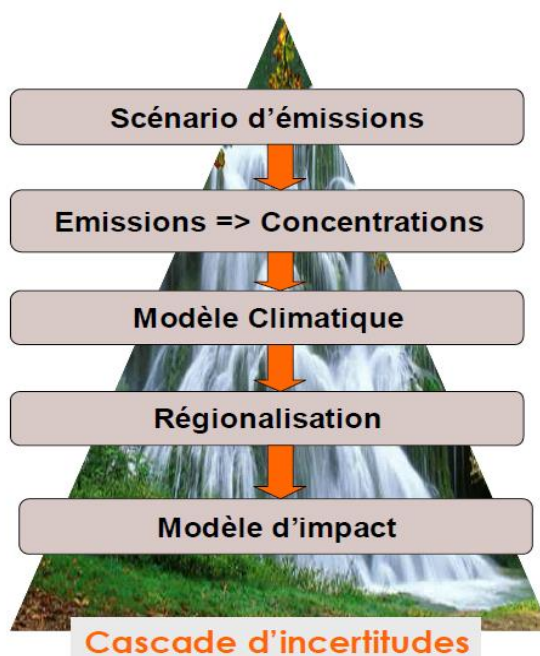


Figure 10 - Cascade des incertitudes pour une étude d'impact du changement climatique (Boé, 2007)

Ces incertitudes sont liées à plusieurs facteurs dont l'incertitude liée à la variabilité interne du climat et à sa nature chaotique, l'incertitude liée à une connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation dans les modèles (incertitudes des modèles), et l'incertitude liée à la méthode de régionalisation utilisée.

Une part de cette incertitude peut être quantifiée en utilisant des simulations d'ensemble de modèles climatiques à partir des scénarios RCP. Ces simulations d'ensemble permettent ensuite d'apprécier la dispersion des modèles autour de la moyenne d'ensemble.

2.4. PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES UTILISEES

Dans le cadre de la présente étude, le choix des projections climatiques régionalisées s'est porté sur une sélection mise à disposition par Météo France sur le **portail DRIAS2020**⁶. Il s'agit de 12 jeux de projections climatiques (Tableau 3 et Figure 11) issues de la combinaison de :

- 2 scénarios d'émission **RCP 4.5** et **RCP 8.5** ;
- 1 méthode de régionalisation statistique « **ADAMONT** » :
 - « *La méthode ADAMONT (Verfaillie et al., 2017) représente la consolidation de la méthode d'ajustement statistique dite « quantile-quantile » développée par Michel Déqué depuis le début des années 2000, et utilisée en particulier pour les projets SCAMPEI et ADAMONT. Cette approche de descente d'échelle et d'ajustement de biais de scénarios climatiques régionaux, utilise une méthode de correction quantile-quantile par rapport à un jeu d'observations (réanalyse SAFRAN), et prend en compte les types de temps. À la correction quantile-quantile au pas de temps quotidien s'ajoute une désagrégation horaire des données par une technique de recherche de journée analogue. Elle permet d'obtenir des scénarios dé-biaisés continus au pas de temps horaire pour les variables : température, humidité, vitesse du vent, rayonnement solaire (direct et diffus) et infrarouge, pluie et neige. Elle est une des rares méthodes qui permettent de générer des séries chronologiques horaires, résolution temporelle indispensable pour les études d'impact comme dans le domaine de l'hydrologie ou de la nivologie* » D'après DRIAS2020 (<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/218>).
- 6 GCM (modèle climatique global)
 - le « **Norwegian Earth System Model** » ou **NorESM1-M**⁷ est la version principale du modèle du système terrestre du Centre climatique norvégien. Elle se distingue en particulier, par un modèle océanique isopycnique coordonné et une chimie avancée – aérosol – nuage – rayonnement schémas d'interaction ;

⁶ <http://www.drias-climat.fr/>

⁷ <https://www.noresm.org/>

- le « **Institut Pierre Simon Laplace Climate Model** » ou **IPSL-CM5A-MR**⁸ est un modèle de circulation générale globale développé pour étudier la réponse à long terme du système climatique aux forçages naturels et anthropiques dans le cadre de la 5ème phase du projet d'intercomparaison de modèles couplés (CMIP5). Ce modèle comprend un cycle interactif du carbone, une représentation de la chimie troposphérique et stratosphérique et une représentation complète des aérosols.
- **CNRM-CM5** développé par **Centre National de Recherches Météorologiques Climate Modelling** (Fr) en collaboration avec l'équipe GLOBEC du CERFACS est un modèle du « système-Terre » dédié principalement à la réalisation de scénarios climatiques et constitué de plusieurs modèles développés indépendamment les uns des autres et couplés via le coupleur OASIS3.
- **EC-Earth** a été développé dans le cadre d'un consortium à l'échelle européenne, avec pour objectif principal de développer et d'appliquer un modèle du système terrestre (MES) pour fournir des informations climatiques fiables aux services climatiques et pour faire progresser les connaissances scientifiques sur le système Terrestre, sa variabilité, sa prévisibilité et les changements à long terme résultant du forçage externe.
- Le **Hadley Center Global Environment Model version 2** ou HadGEM2 est un modèle de prévision climatique du Met Office Hadley Center (UK) utilisé dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, qui comprend une configuration couplée atmosphère-océan, avec ou sans extension verticale dans l'atmosphère pour inclure une stratosphère bien résolue, et une configuration du système Terrestre qui comprend la végétation dynamique, la biologie océanique et la chimie atmosphérique.
- Le **Max Planck Institute for Meteorology Earth System Model** ou **MPI-ESM** a été conçu par l'Institut Max Planck de Météorologie (DE) et couple l'atmosphère, l'océan et la surface terrestre grâce à l'échange d'énergie, de momentum, d'eau et de dioxyde de carbone.

8

<http://cmc.ipsl.fr/international-projects/cmip5/>

- 9 RCM (modèle climatique régional) :

MCR (modèle climatique régional)	MCG (modèle climatique global)						Méthode de correction et de descente d'échelle	Périodes disponibles	
	CNRM-CM5	EC-EARTH	HadGEM2	IPSL-CM5A	MPI-ESM	NorESM1		actuelle	future
ALADIN63 (CNRM) France	RCP 4.5 et 8.5						ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	RCP 4.5 et 8.5	RCP 4.5 et 8.5					ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RCA4 (SMHI) Suède		RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe			RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RegCM4-6 (ICTS/ESP) International			RCP 8.5				ADAMONT	1981-2010	2041-2100
WRF381P (NCAR) USA				RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
HIRHAM5 (DMI) Danemark						RCP 4.5 et 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2009 (CSC) Allemagne					RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2015 (CSC) Allemagne						RCP 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100

12 couples MCG/MCR au total / RCP = Representative Concentration Pathway

5 couples MCG/MCR de la short list issue du jeu DRIAS-2020

Tableau 3 - Modèles climatiques globaux et régionaux constituant les 12 couples DRIAS-2020 et « short list » proposée par Météo-France (18/12/2020)

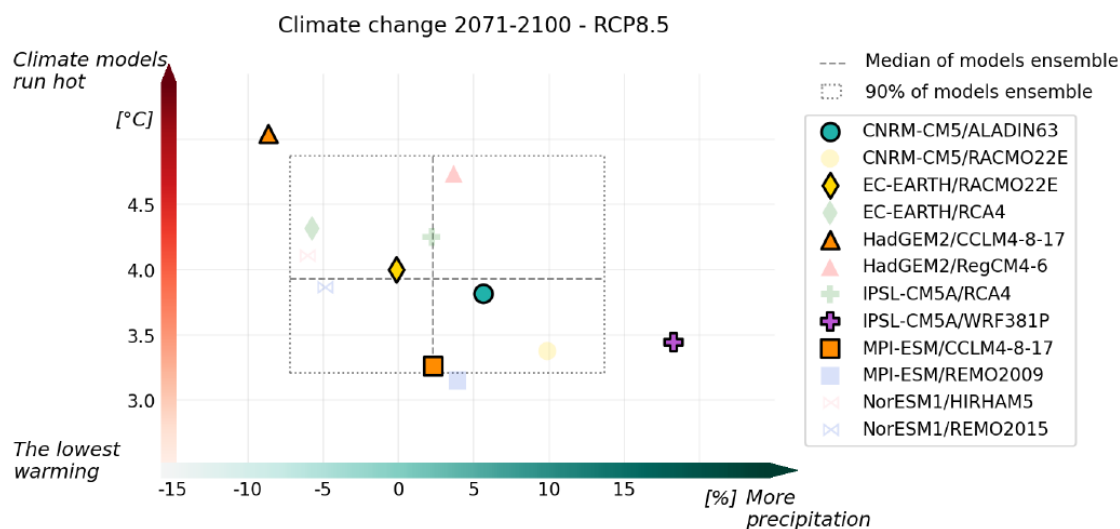


Figure 11 - Dispersion annuelle des écarts de température et anomalies de précipitations à l'horizon 2085 pour le scénario d'émission RCP85, pour l'ensemble des 12 couples GCM/RCM disponibles dans la base de données DRIAS.

Chacune des projections climatiques régionalisées retenues contient l'évolution journalière des précipitations liquides, de la neige, de l'Évapotranspiration Potentielle (ETP) et de la température de l'air sur la période 1951-2100. La période historique pour laquelle les modèles de climat utilisent des forçages radiatifs observés s'étale de 1951 à 2005. A partir de 2006, les modèles sont forcés par les scénarios RCP prospectifs jusqu'en 2100. Ces projections sont disponibles sur une grille de résolution 8 km à l'échelle de la zone d'étude (maillage SAFRAN sur le bassin Rhin-Meuse – 604 mailles numérotées entre 249 et 3859).

Les premiers travaux engagés au premier semestre 2022 ont portés sur l'utilisation de scénarios particuliers issus d'une short liste censée être représentative de l'ensemble DRIAS2020 et constituée par Météo France (Tableau 3). Les résultats préliminaires n'ayant pas donné satisfaction, la méthodologie s'est réorientée vers l'utilisation des 12 couples GCM/RCM disponibles dans la base DRIAS.

3. Bases pour le calcul de la recharge

3.1. DEFINITIONS ET HYPOTHESE PRINCIPALE

La **recharge potentielle directe** des aquifères correspond à la part de la pluie efficace qui s'infiltre, l'autre partie alimentant le réseau hydrographique de surface, par ruissellement ou écoulements de sub-surface (Figure 12).

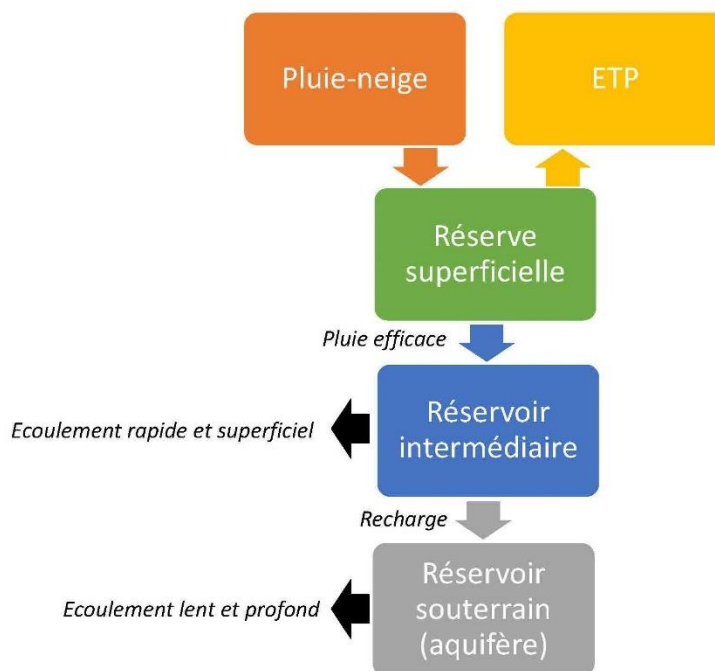


Figure 12 - Schéma conceptuel pour définir la recharge potentielle directe des aquifères

La méthodologie d'évaluation de la recharge utilisée dans le volet 1 (BUSCARLET et al, 2020) repose sur l'hypothèse suivante : la répartition de la pluie efficace entre ruissellement et infiltration est contrôlée par les propriétés locales du sol et du sous-sol et est indépendante des conditions climatiques (Lanini et al., 2019 ; Caballero et al., 2021).

Ainsi, si on peut estimer le **Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (RIPE)** pour chaque unité géographique sur laquelle on calcule la pluie efficace, on peut en déduire facilement la recharge potentielle (Figure 13). L'échelle de définition du RIPE, qui a été retenue est l'entité hydrogéologique BDLISA de niveau 3 et d'ordre 1.

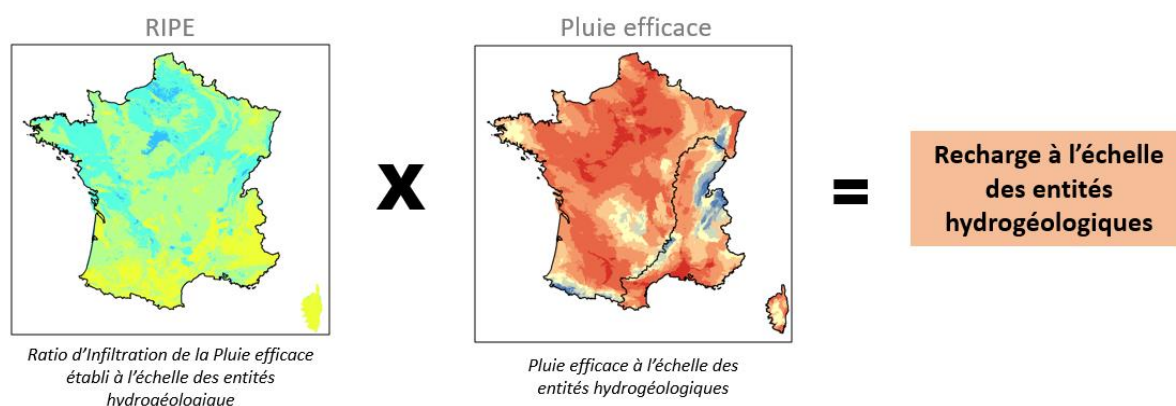


Figure 13 - Principe de calcul de la recharge potentielle

Le volet 2 de l'étude consacré à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur le bassin Rhin-Meuse s'intéresse aux anomalies ou variations de recharge c'est-à-dire aux écarts de recharge entre la période future (données simulées sur 3 périodes de 30 ans : 2021-2050, 2041-2070 et 2071-2100) et la période actuelle (données simulées sur la période de référence de 30 ans : 1976-2005). **Les variations de pluie efficace étant jugées équivalentes aux variations de recharge, les calculs ont porté sur la pluie efficace pour construire les cartes de variation future.**

3.2. CALCUL DE LA PLUIE EFFICACE

Dans l'optique d'estimer l'incertitude liée au choix du modèle de bilan hydrique, la pluie efficace est calculée selon trois formules différentes : Thornthwaite (1948), Edijatno & Michel (1989) et Dingman (2002). Les trois modèles de bilan hydrique utilisent les mêmes données météorologiques d'entrée (précipitations, température et évapotranspiration potentielle) au pas de temps journalier et le même unique paramètre (la capacité de stockage du sol -CSS).

A chaque pas de temps, le bilan calcule la différence entre l'apport par les précipitations (pluie et fonte de la neige) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Si l'écart est négatif, la pluie efficace est fixée à zéro, et toute l'eau disponible dans le système est mobilisée pour l'évapotranspiration. La différence (ETP – Précipitations) est prélevée sur le stock d'eau du sol :

- jusqu'à épuisement de celui-ci si nécessaire (Thornthwaite),
- selon une loi exponentielle décroissante (Dingman),
- selon une loi quadratique (Edijatno).

Si l'écart est positif, la différence (Précipitations – ETP) :

- remplit d'abord le stock d'eau du sol. Quand celui-ci atteint sa valeur maximale, le surplus génère de la pluie efficace (Thornthwaite et Dingman) ;
- se répartit entre pluie efficace et stockage dans le réservoir sol suivant une loi quadratique (Edijatno).

Les données de température sont utilisées pour estimer d'une part la répartition des précipitations totales entre pluie et neige, et d'autre la fonte du stock de neige à chaque pas de temps.

Le calcul est mis en œuvre via l'application PeffDayGRID développée sous Matlab par le BRGM. La pluie efficace est calculée au pas de temps journalier pour chacune des mailles SAFRAN (résolution spatiale des données météorologiques d'entrée) de la zone d'étude. La moyenne des trois méthodes de bilan est retenue comme résultat final.

On peut ensuite moyenniser spatialement les résultats par entité hydrogéologique pour fournir une chronique de pluie efficace par unité de calcul. Si on dispose du Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (défini à cette échelle), on peut ainsi calculer facilement la recharge potentielle sur l'EH.

L'unité de calcul retenue, après discussion en comité technique est l'entité hydrogéologique BDLISA version 2 (niveau 3, ordre 1) découpée par les zones hydrographiques de la BD Carthage, soit 8745 unités couvrant le territoire Rhin-Meuse.

3.3. DONNEES UTILISEES POUR LE CALCUL

L'ensemble des données utilisées pour le calcul de la pluie efficace sont rapportées à l'échelle de la grille SAFRAN (Vidal et al., 2010) constituée de mailles carrées de 8 km de côté couvrant l'ensemble de la zone d'étude (604 mailles carrées de 64 km² chacune) et référencées par un numéro unique (N°249 à 3859).

3.3.1. Chroniques climatiques

Les 22 jeux de projections climatiques utilisés dans cette étude sont issus du portail DRIAS2020 (<http://www.drias-climat.fr/>). Les données sont fournies à l'échelle spatiale des mailles SAFRAN, et au pas de temps journalier. Les variables nécessaires au calcul de la pluie efficace sont les chroniques de précipitations totales (solides et liquides) journalières, les températures moyennes journalières, et l'évapotranspiration potentielle journalière de référence. Cette dernière est calculée par MétéoFrance selon la formule de Penman-Monteith avec les coefficients fournis par la FAO (<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e06.htm>). Cependant, le rayonnement net nécessaire au calcul n'étant pas disponible pour toutes les projections climatiques, MétéoFrance a choisi de l'estimer à partir de la formule de Hargreaves avec un coefficient de 0.175 (pour plus de détail, voir <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/310>).

3.3.2. Capacité de stockage du sol (CSS)

Le Centre européen des données sur le sol ([ESDAC](http://www.esdac.eu)) met à disposition de nombreuses ressources à l'échelle du continent. Plusieurs couches cartographiques ont ainsi été produites ([Hiederer, 2013](#)) pour évaluer la capacité totale de stockage des sols (Total Available Water Capacity, TAWC). Concrètement, celle-ci est calculée pour deux horizons du sol (surface et sub-surface) à partir de deux propriétés des sols (proportion d'éléments grossiers et profondeur) et de la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent (selon l'équation de Van Genuchten, 1980).

La capacité de stockage du sol (CSS) est estimée pour chaque maille de la grille SAFRAN à partir de la moyenne des valeurs de TAWC (carte européenne des sols produite avec une résolution de l'unité de sol) pour les deux horizons de sol surface et sub-surface.

3.3.3. Coefficients cultureux

L'évapotranspiration potentielle des projections climatiques issue du portail DRIAS est une ETP de référence (notée ETP_0), calculée uniquement à partir de variables météorologiques. Elle ne tient pas compte du couvert végétal et correspond à la quantité d'eau maximale qui peut être évaporée par un sol recouvert d'une végétation de référence (gazon). Pour tenir compte de l'occupation réelle du sol, on adopte la méthodologie proposée par la FAO (Allen 1998) en appliquant un **coefficient culturel** (K_c) qui varie au cours de l'année selon les phases de développement des végétaux (Tableau 4).

Coefficient culturel saisonnier en France	Phénologie	Mois (en France)
K_{c_ini}	Développement	Mars à mai
K_{c_mid}	De la floraison à la maturité	Juin à août
K_{c_end}	De la maturité à la récolte ou sénescence	Septembre à octobre
K_{c_cold}	Absence de croissance	Novembre à février

Tableau 4 - Définition des coefficients cultureux saisonniers

Ainsi, le calcul de l'évapotranspiration potentielle prend la forme suivante :

$$ETP = K_c * ETP_0$$

L'occupation des sols (Figure 14) est fournie par la carte Corine Land Cover (CLC) version 2018, dont la résolution minimale est de 25 ha (carte disponible au 1/100 000). On distingue plusieurs milieux répartis en 44 catégories associées à un code unique et regroupés selon 5 grands types de territoires :

- Territoires artificialisés ;
- Territoires agricoles ;
- Forêts et milieux semi-naturels ;
- Zones humides ;
- Surfaces en eau.

L'élaboration des 4 cartes des coefficients cultureux saisonniers (Figure 15) a nécessité la conversion des codes CLC en valeurs de K_c selon le tableau de correspondance proposé par Nistor et al. (2018) (Annexe 2). Il est à noter que l'utilisation de ce tableau induit pour la plupart des couverts une évapotranspiration nulle en période froide, ce qui maximise la pluie efficace.

La projection des valeurs de K_c a été effectuée sur la grille SAFRAN (calcul d'une valeur moyenne par maille) dans le système de coordonnées initial de CLC (EPSG 3035 / ETRS89-LAEA), puis converties en Lambert 93 pour affichage. La couche « vecteur » a ensuite été exportée en « raster » pour être lue par le code de calcul de la pluie efficace utilisé au BRGM.

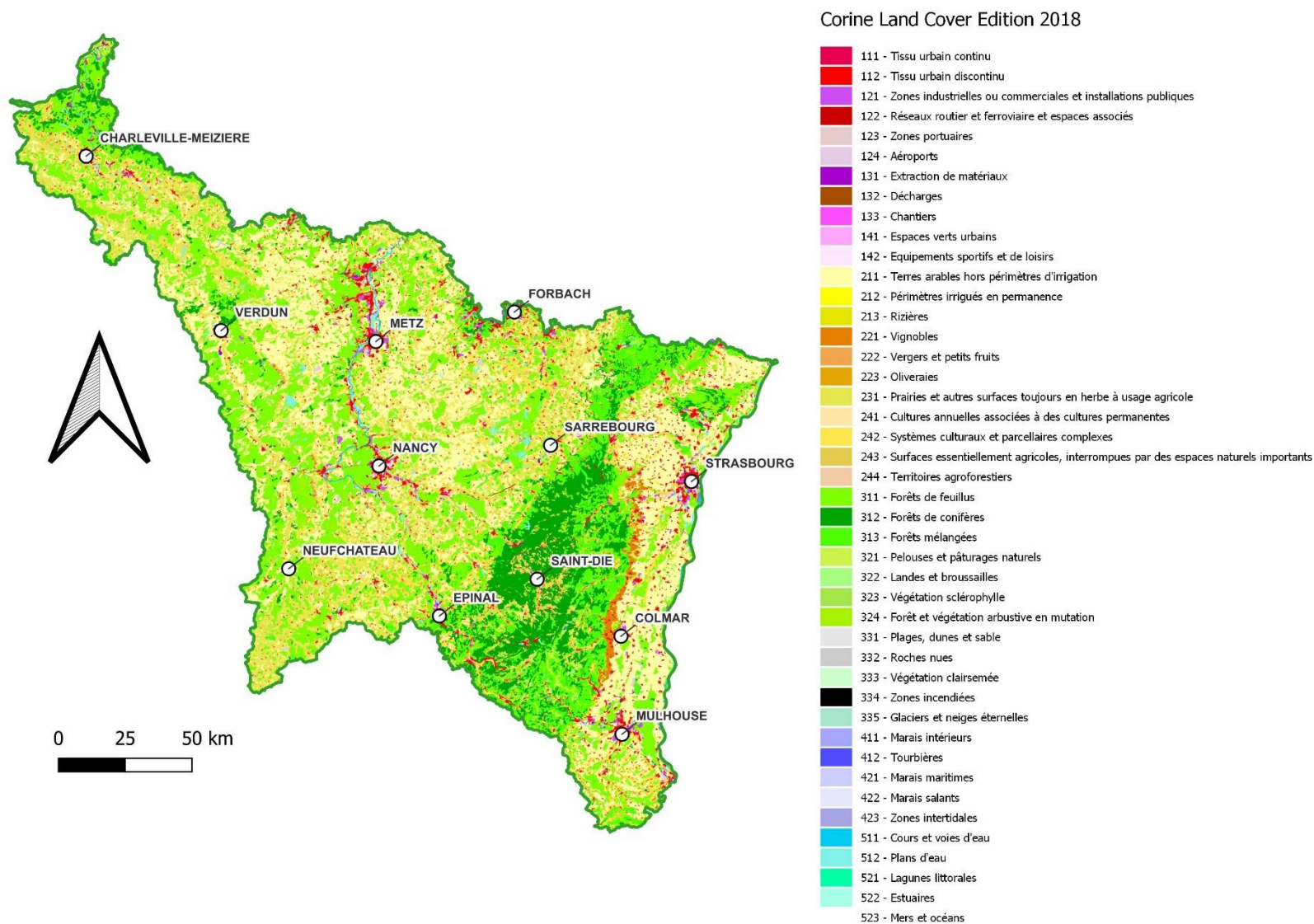


Figure 14 – Carte d'occupation du sol à l'échelle du bassin Rhin-Meuse (CLC 2018)

Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations

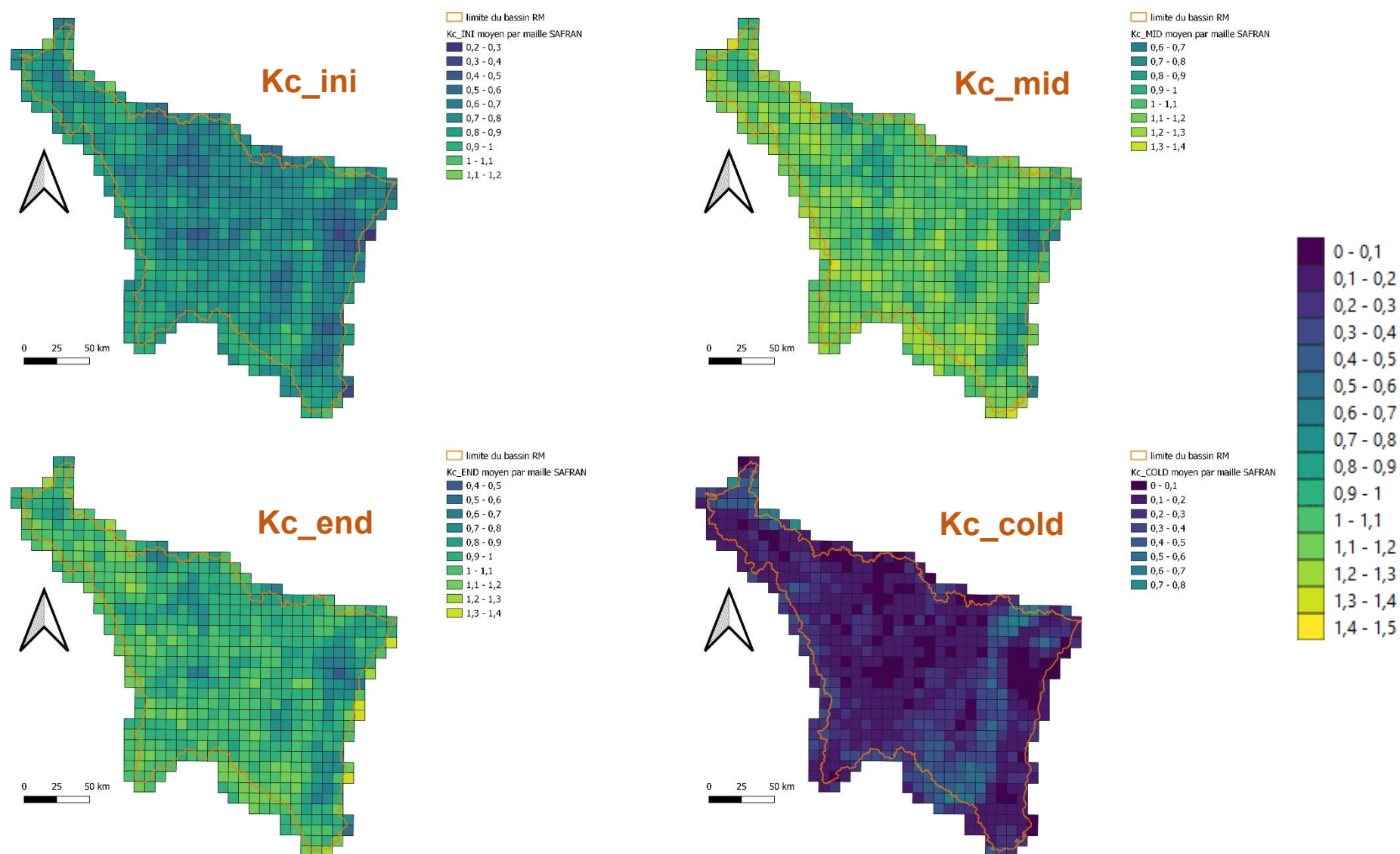


Figure 15 - Cartes des coefficients culturels saisonniers utilisés dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle

4. Cartographie des variations de recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse

4.1. MISE EN ŒUVRE DES CALCULS

Les variations de pluie efficace entre la période future (trois périodes considérées de 30 ans chacune) et la période actuelle (1976-2005) sont illustrées dans les figures suivantes pour chaque RCP 4.5 (Figure 16, Figure 18, Figure 20, Figure 22, Figure 24) et RCP 8.5 (Figure 17, Figure 19, Figure 21, Figure 23, Figure 25) :

- Selon les résultats statistiques des 10⁹ ou 12¹⁰ simulations réalisées, avec la valeur médiane ainsi que le 5^{ème} quantile¹¹ et le 95^{ème} quantile¹², pour illustrer les valeurs extrêmes et la variabilité des résultats des simulations ;
- Selon les trois périodes futures prises en compte 2021-2050 (horizon 2050), 2041-2070 (horizon 2070) et 2071-2100 (horizon 2100) ;
- Il s'agit selon le cas de variations annuelles (Figure 16 et Figure 17) ou saisonnières : hiver ou printemps pour les hautes eaux (Figure 18 à Figure 21) ; été ou automne pour les basses eaux (Figure 22 à Figure 25). Si on suppose que le ratio d'infiltration sera le même dans le futur, la variation relative de recharge est égale à la variation relative de pluie efficace. Les cartes peuvent donc être interprétées en termes de variation relative de recharge ;
- L'agrégation des résultats s'est faite à l'échelle de 8745 unités géographiques couvrant le territoire Rhin-Meuse et définies par découpage des entités hydrogéologiques BDLISA version 2 (niveau 3, ordre 1) par les zones hydrographiques de la BD Carthage, soit 8745 polygones.

4.2. INTERPRETATION DES VARIATIONS DE RECHARGE ANNUELLE A L'HORIZON 2100 A L'ECHELLE DU BASSIN RHIN-MEUSE

En **valeur médiane annuelle du RCP4.5 (horizon 2100)**, on observe globalement un excédent de recharge annuelle de l'ordre de + 5 % à + 45 % ; 57 % de la superficie du territoire montre une variation de + 10 % à + 20 %. Localement, on distingue un excédent plus important sur la plaine d'Alsace, notamment pour les alluvions rhénanes récentes actuelles et les alluvions vosgiennes récentes de la Doller, de la Thur et de la Lauch (> + 35 %) et peu ou pas de variations sur le socle vosgien (de l'ordre de 5 %), notamment sur les bassins versants de la Moselotte, de la Cleurie ou de la Vologne.

⁹ Pour le RCP4.5

¹⁰ Pour le RCP8.5

¹¹ le 5^{ème} quantile : valeur définie telle que 5% des valeurs de l'échantillon sont en dessous et 95 % au-dessus ;

¹² le 95^{ème} quantile : valeur définie telle que 95% des valeurs de l'échantillon sont en dessous et 5 % au-dessus ;

Les **extrêmes du RCP 4.5 (horizon 2100)** montrent par rapport à la médiane : pour le 5^{ème} quantile (- 6 % à + 23 %) des zones à faibles variations plus importantes sur le bassin Rhin-Meuse notamment au nord-ouest (secteur Ardennes/ Meuse Nord) et autour du socle vosgien (98 % du territoire entre 0 et + 20 % dont 53 entre + 10 % et 20 %) ; pour le 95^{ème} quantile (+ 14 % à + 100 %), les excédents globalement plus accentués en plaine d'Alsace (alluvions rhénanes récentes actuelles) avec 74 % du territoire entre + 20 % et + 40 %.

En **valeur médiane du RCP8.5 (horizon 2100)**, les valeurs sont également excédentaires entre 0 % et + 57 %. Les variations les plus importantes (> 50 %) concernent la plaine d'Alsace : alluvions rhénanes récentes actuelles et les alluvions vosgiennes récentes du Giessen et de la Fecht. Les variations les plus faibles (< 5 %) sont moins marquées que pour le RCP 45 et dispersées au sein du bassin. Sur le socle vosgien la variation de recharge est d'environ + 24 %. 54 % du territoire est concerné par des variations entre + 20 % et + 30 %.

Les **extrêmes du RCP 8.5 (horizon 2100)** sont plus marqués que pour la médiane : pour le 5^{ème} quantile (- 18 % à + 24 %) les zones à faibles variations sont plus importantes notamment sur le socle vosgien (environ + 6 %) ; 64 % du territoire est concerné par des variations de 0 à + 10 %. Pour le 95^{ème} quantile (0 % à + 100 %), les excédents sont globalement plus étendus et accentués en plaine d'Alsace et bordures (alluvions rhénanes récentes actuelles, champ de fracture de Saverne, formations du Pliocène...). 70 % du territoire est concerné par des variations entre + 40 % et + 70 %.

4.3. INTERPRETATION DES VARIATIONS DE RECHARGE SAISONNIERE A L'HORIZON 2100 A L'ECHELLE DU BASSIN RHIN-MEUSE

4.3.1. Période hivernale (DJF)

En **valeur médiane hivernale du RCP4.5 (horizon 2100)** (mois de décembre/janvier/février), les variations de recharge sont excédentaires sur l'ensemble du territoire entre + 13 % à l'ouest du bassin et + 53 % à l'est (alluvions rhénanes en plaine d'Alsace). 61 % du territoire est concerné par des variations entre + 20 % et + 30 %.

Les **extrêmes du RCP4.5 (horizon 2100) en période hivernale** se distinguent par une gamme de valeurs excédentaires plus faible pour le 5^{ème} quantile (jusqu'à + 3 % à + 34 %) et plus importante pour le 95^{ème} quantile (entre + 29 % et plus de 100 %), avec une extension des zones touchées par les excédents en plaine d'Alsace et bordures plus importante (alluvions rhénanes et vosgiennes, champ de fracture...). Pour le 5^{ème} quantile 72 % du territoire est concerné par des variations entre + 10 et + 20 %. Pour le 95^{ème} quantile, 88 % du territoire est concerné par des variations entre + 30 % et + 50 %.

En **valeur médiane hivernale du RCP8.5 (horizon 2100)** (mois de décembre/janvier/février), les variations de recharge sont excédentaires sur l'ensemble du territoire entre + 24 % et + 77 %, avec des valeurs maximales à l'est > 70 % (alluvions rhénanes de la plaine d'Alsace). 57 % du territoire est concerné par des variations entre + 30 % et + 40 %.

Les **extrêmes du RCP8.5 (horizon 2100) en période hivernale**, sont également excédentaires plus faiblement pour le 5^{ème} quantile (0 à 40 %) et plus fortement pour le 95^{ème} quantile (+ 46 % à plus de 100 %). Comme précédemment, les secteurs les plus impactés sont situés à l'est (plaine d'Alsace avec alluvions rhénanes et vosgiennes, champs de fracture et versant alsacien du socle). Pour le 5^{ème} quantile, 55 % du territoire est concerné par des variations entre + 20 % et + 30 %. Pour le 95^{ème} quantile, 76 % du territoire est concerné par des variations entre + 50 % et + 70 %.

4.3.2. Période printanière (MAM)

En **valeur médiane printanière du RCP4.5 (horizon 2100)** (mois de mars, avril, mai), les variations de recharge sont comprises entre – 4 % à + 33 % : la recharge est déficitaire au droit du socle vosgien versants lorrain ou alsacien (tous les bassins versants) et globalement excédentaire ailleurs. 66 % du territoire est concerné par une variation de + 10 % à + 20 %.

La cartographie des valeurs **extrêmes du RCP4.5 (horizon 2100) en période printanière**, témoigne d'une accentuation du déficit pour le 5^{ème} quantile (- 20 % à + 19 %) et de l'excédent pour le 95^{ème} quantile (- 7 % à + 67 %). Pour le 5^{ème} quantile, la proportion de territoire en déficit ou en excédent est équivalente (50/50) ; pour le 95^{ème} quantile, la majorité du territoire (85 %) est concerné par un excédent entre + 20 % et + 50 %. Les secteurs plus particulièrement touchés par le déficit sont le socle vosgien et le nord-ouest du territoire (nord ardennais et meusien). Les excédents touchent plus particulièrement la partie est du territoire (la plaine d'Alsace avec les alluvions rhénanes et vosgiennes, l'Alsace bossue et les Vosges du Nord).

En **valeur médiane printanière du RCP8.5 (horizon 2100)** (mois de mars, avril, mai), les variations de recharge sont pour partie déficitaire entre – 18 % et 0 % notamment au droit du socle vosgien (< - 10 %) et pour partie excédentaire entre 0 % et 35 %, notamment à l'est (> + 30 % pour les alluvions rhénanes). 50 % du territoire se caractérise par des variations entre + 10 % et + 20 %.

Les **extrêmes du RCP8.5 (horizon 2100) en période printanière**, sont plus prononcées dans les déficits pour le 5^{ème} quantile (entre – 32 % et + 5 %) et dans les excédents pour le 95^{ème} quantile (+ 7 % à plus de 100 %). Pour le 5^{ème} quantile, 53 % du territoire montre un déficit entre – 20 % et – 10 % ; pour le 95^{ème} quantile, 65 % du territoire montre un excédent de + 30 % à + 50 %. Les secteurs les plus impactés sont comme précédemment le socle vosgien (déficit < - 20 % pour 5^{ème} quantile) et la plaine d'Alsace (excédent à plus de 100 % sur les alluvions rhénanes).

4.3.3. Période estivale (JJA)

NB : La recharge des nappes d'eau souterraines étant prépondérante en hiver et au printemps, on parlera plus justement de variations de pluie efficace sur la période estivale (juin/juillet/août).

En **valeur médiane estivale du RCP4.5 (horizon 2100)** (mois de juin, juillet, août), les variations sont plus accentuées que pour les autres saisons comprises entre – 34 % et + 77 %. 81 % du territoire se trouve entre - 20 et + 20 %. Les cartes réalisées mettent en évidence un déficit accru au droit du socle vosgien (notamment versant lorrain) et au nord-ouest du territoire (Ardennes et nord meusien). La plaine d'Alsace (alluvions rhénanes et vosgiennes Doller, Thur, Lauch) présente un excédent > + 40 %.

Pour les **extrêmes du RCP4.5 (horizon 2100) en période estival**, l'impact est significativement à la baisse par rapport aux valeurs médianes au nord-ouest du territoire (nord ardennais et meusien) pour le 5^{ème} quantile (entre – 75 % et – 12 %) et significativement à la hausse sur différents sous-bassins versants du territoire (Meuse et Meurthe) et notamment en Alsace (alluvions rhénanes et vosgiennes et Pliocène) pour le 95^{ème} quantile (de + 17 % à plus de 100 %). Pour le 5^{ème} quantile, 61 % du territoire montre une variation déficitaire entre – 50 % et – 30 %, tandis que pour le 95^{ème} quantile, les variations excédentaires sont plus homogènes par classe.

En **valeur médiane estivale du RCP8.5 (horizon 2100)** (mois de juin, juillet, août), les variations sont comprises entre – 49 % et + 64 %. 58 % du territoire affiche un déficit de – 30 % à – 10 %. Les déficits sont plus importants notamment au centre du territoire et au nord-ouest (Ardenne) et les excédents restent limités à la plaine d'Alsace (alluvions rhénanes et vosgiennes).

Les **extrêmes du RCP8.5 (horizon 2100) en période estival**, illustre des valeurs encore plus marquées que précédemment avec la généralisation à l'échelle de tout le bassin Rhin-Meuse des déficits entre – 82 % et – 23 % pour le 5^{ème} quantile (86 % du territoire à – 60 % de déficit) et des excédents > + 30 % pour le 95^{ème} quantile (50 % à plus de 100 % d'excédent).

4.3.4. Période automnale (SON)

En **valeur médiane automnale du RCP4.5 (horizon 2100)** (mois de septembre, octobre, novembre), les variations de recharge sont comprises entre – 12 % et + 29 %. Le déficit est localisé plutôt sur le nord ardennais (bassin versant de la Meuse) et sur le socle vosgien (tous les bassins versants). 82 % du territoire est concerné par des variations entre 0 et 20 %.

Pour les **extrêmes du RCP4.5 (horizon 2100) en période automnale**, on observe l'accentuation des variations avec la généralisation des déficits pour le 5^{ème} quantile (- 51 % à – 4 %) et des excédents pour le 95^{ème} quantile (+ 15 % à plus de 100 %). Pour le 5^{ème} quantile, 79 % du territoire se caractérise par un déficit de – 30 % à – 10 % ; pour le 95^{ème} quantile, les variations excédentaires sont plus homogènes par classe. Les secteurs les plus touchés sont principalement l'est du territoire (alluvions rhénanes et vosgiennes).

En **valeur médiane automnale du RCP8.5 (horizon 2100)** (mois de septembre, octobre, novembre), les variations de recharge sont comprises entre – 23 % et + 26 %. La majorité du territoire est peu ou pas excédentaire (57 % de la superficie entre 0 et + 10 %). Les zones déficitaires sont dispersées mais touchent plus particulièrement le nord-ouest (nord ardennais et meusien) et le sud-est (socle et plaine d'Alsace).

Les **extrêmes du RCP8.5 (horizon 2100) en période automnale**, montrent pour le 5^{ème} quantile des déficits entre – 65 % et - 12 % (69 % du territoire entre – 40 % et – 20 %) plus marqués à l'est (plaine d'Alsace et Sundgau) et pour le 95^{ème} quantile des excédents > + 22 % (56 % du territoire > 90 %) moins marqués sur le socle vosgien.

4.4. GRAPHIQUES DE SYNTHÈSE A L'ECHELLE DU TERRITOIRE RHIN-MEUSE

Pour conclure, l'élaboration de graphiques de synthèse, permet de mettre en évidence

- la proportion de territoire affecté par les variations de recharge annuelle et saisonnière à l'horizon 2100 [statistiques des résultats des projections climatiques utilisant respectivement le RCP 4.5 et le RCP 8.5 – médiane, centile 5 % et centile 95 %] → Figure 26 ;
- l'évolution et la gamme des variations de recharge saisonnière à l'échelle du bassin Rhin-Meuse pour chacun des 3 horizons [statistiques des résultats des projections climatiques utilisant respectivement le RCP 4.5 et le RCP 8.5 pour chaque période future 2021-2050 (H1), 2041-2070 (H2), 2071-2100 (H3) – médiane, centile 5 % et centile 95 %] → Figure 27.

Figure 26	RCP 4.5	En valeur médiane annuelle, à l'horizon 2100 la plus grande partie du territoire Rhin-Meuse est affecté par une augmentation de recharge de 10 % à 20 %. Cette gamme de variation est également caractéristique de la saison printanière. En hiver, l'augmentation de recharge est plus importante de 20 % à 30 % sur une grande partie du territoire. En été, une plus large gamme de variations s'applique à l'ensemble du territoire (- 20 % à + 20 %) traduisant l'importante variabilité spatiale, la dispersion des résultats et le contraste entre les différentes projections climatiques. En fonction des secteurs géographiques la recharge est soit à la baisse soit à la hausse. En automne, l'augmentation de la recharge couvre la gamme de 0 à 20 % sur une grande partie du territoire, avec également une importante dispersion comme pour la saison estivale.
	RCP 8.5	En valeur médiane annuelle, à l'horizon 2100 la plus grande partie du territoire Rhin-Meuse est affecté par une augmentation de recharge de 20 % à 30 %. La répartition saisonnière, comme précédemment pour le RCP 4.5, est plus contrastée : En hiver, l'augmentation de recharge est plus importante de 30 % à 40 % sur une grande partie du territoire. Au printemps, l'augmentation de recharge est moins importante de 10% à 20% sur une grande partie du territoire. En été, la recharge est en baisse sur une grande partie du territoire de - 30 % à - 10 %. On notera comme pour le RCP 4.5, une importante dispersion des résultats. En automne, l'augmentation de la recharge couvre la gamme de 0 à 10 % sur une grande partie du territoire, avec également une importante dispersion comme pour la saison estivale.

Figure 27	DJF	En valeur médiane, la recharge est en augmentation en hiver de 0 à + 40 % pour les 3 horizons et pour les 2 RCP. On note une évolution à la hausse entre H1 et H3 pour chacun des 2 RCP.
	MAM	En valeur médiane, la recharge est également en augmentation au printemps sur une gamme plus réduite de 0 à + 20 % pour les 3 horizons et pour les 2 RCP. Pour le RCP 4.5, on note une baisse des valeurs entre H1 et H2 puis une augmentation entre H2 et H3. A l'inverse, pour le RCP 8.5, on note une augmentation entre H1 et H2 et une baisse entre H2 et H3.
	JJA	La dispersion des résultats (écarts entre C5-med-C95) est très importante. Pour le RCP 4.5, la recharge est en baisse dans la gamme – 20 % et 0 (baisse entre H1 et H2 puis augmentation entre H2 et H3). Pour le RCP 8.5, la recharge est en baisse entre H1 et H3 de + 20 % à - 20 %.
	SON	La dispersion des résultats (écarts entre C5-med-C95) est importante. Pour le RCP 4.5, la recharge est plus importante dans le future dans la gamme 0 à + 20 % (d'abord en hausse entre H1 et H2 puis en baisse entre H2 et HM). Pour le RCP 8.5, la recharge est également plus importante dans le future dans la gamme + 20 % à 0 (évolution en baisse entre H1 et H3).

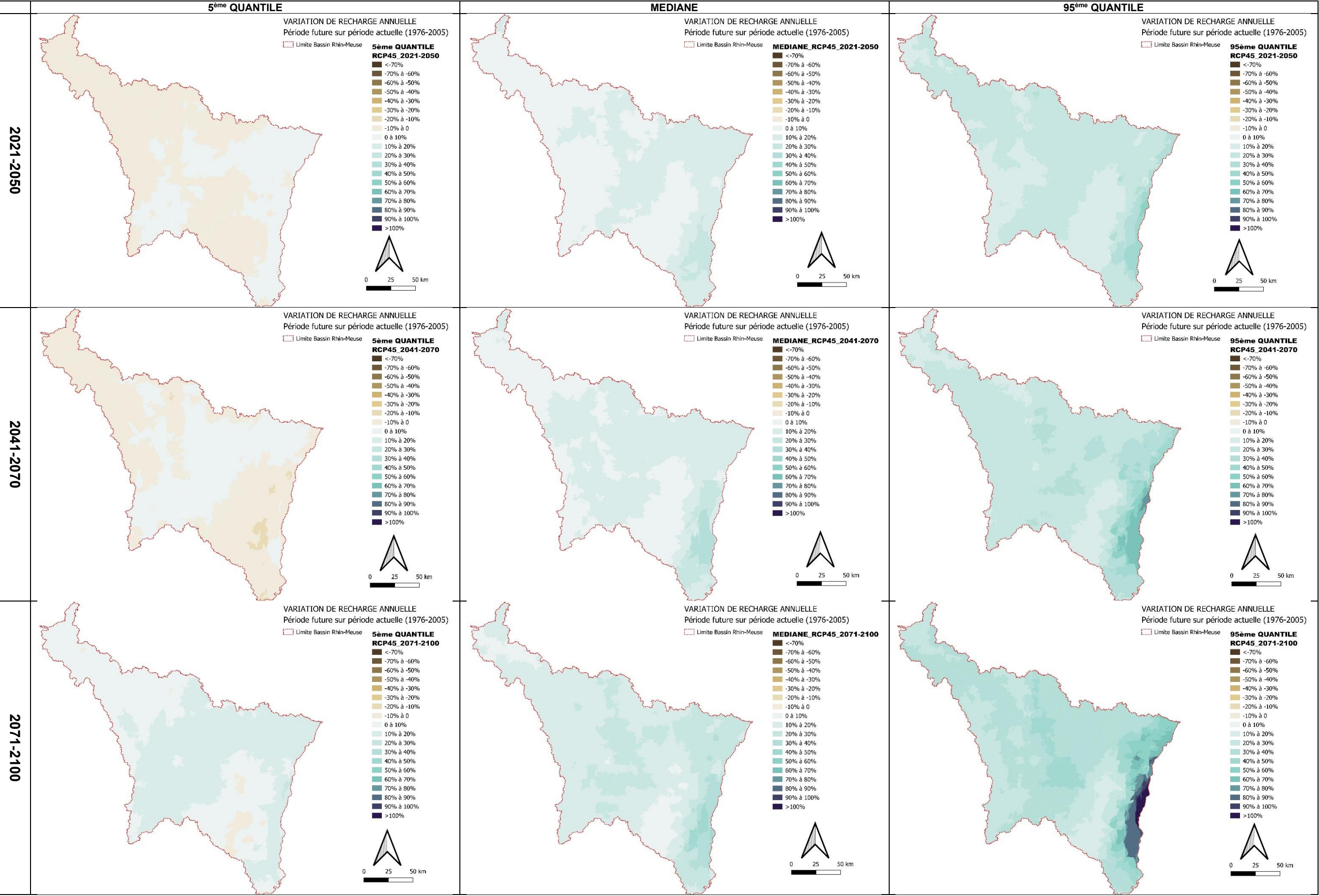


Figure 16 - Variations de recharge annuelle (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures

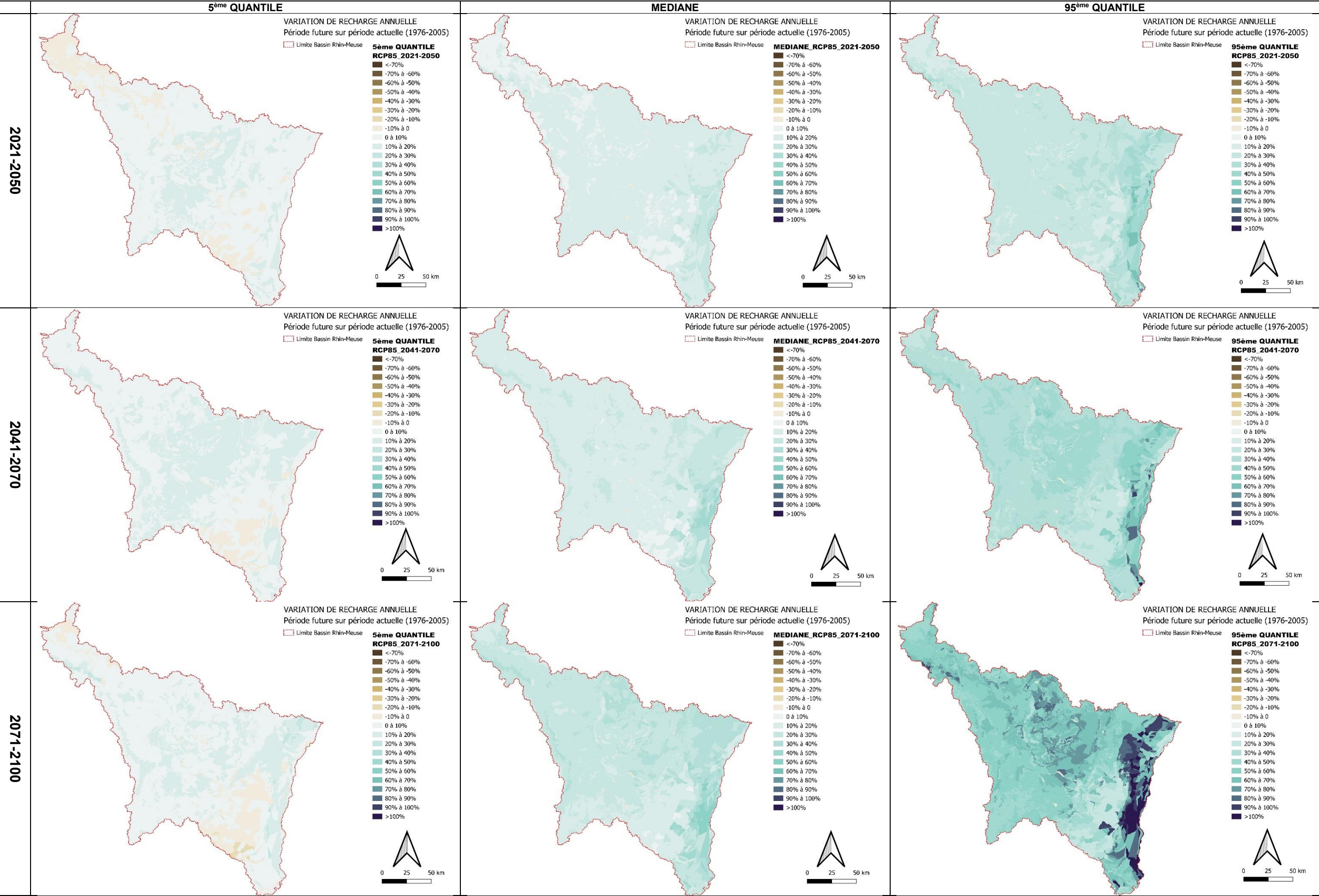


Figure 17 - Variations de recharge annuelle (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures

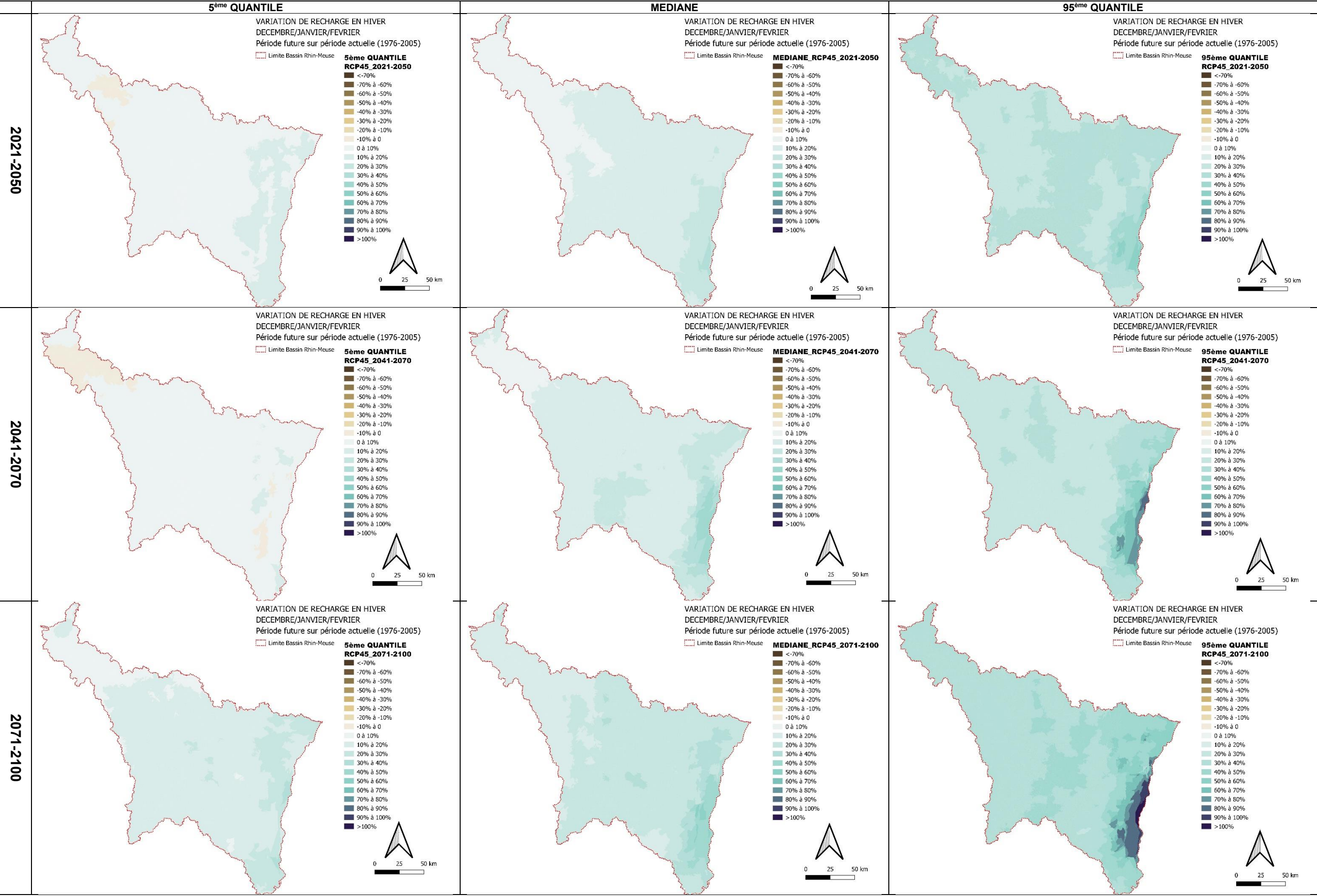


Figure 18 - Variations de recharge hivernale (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures

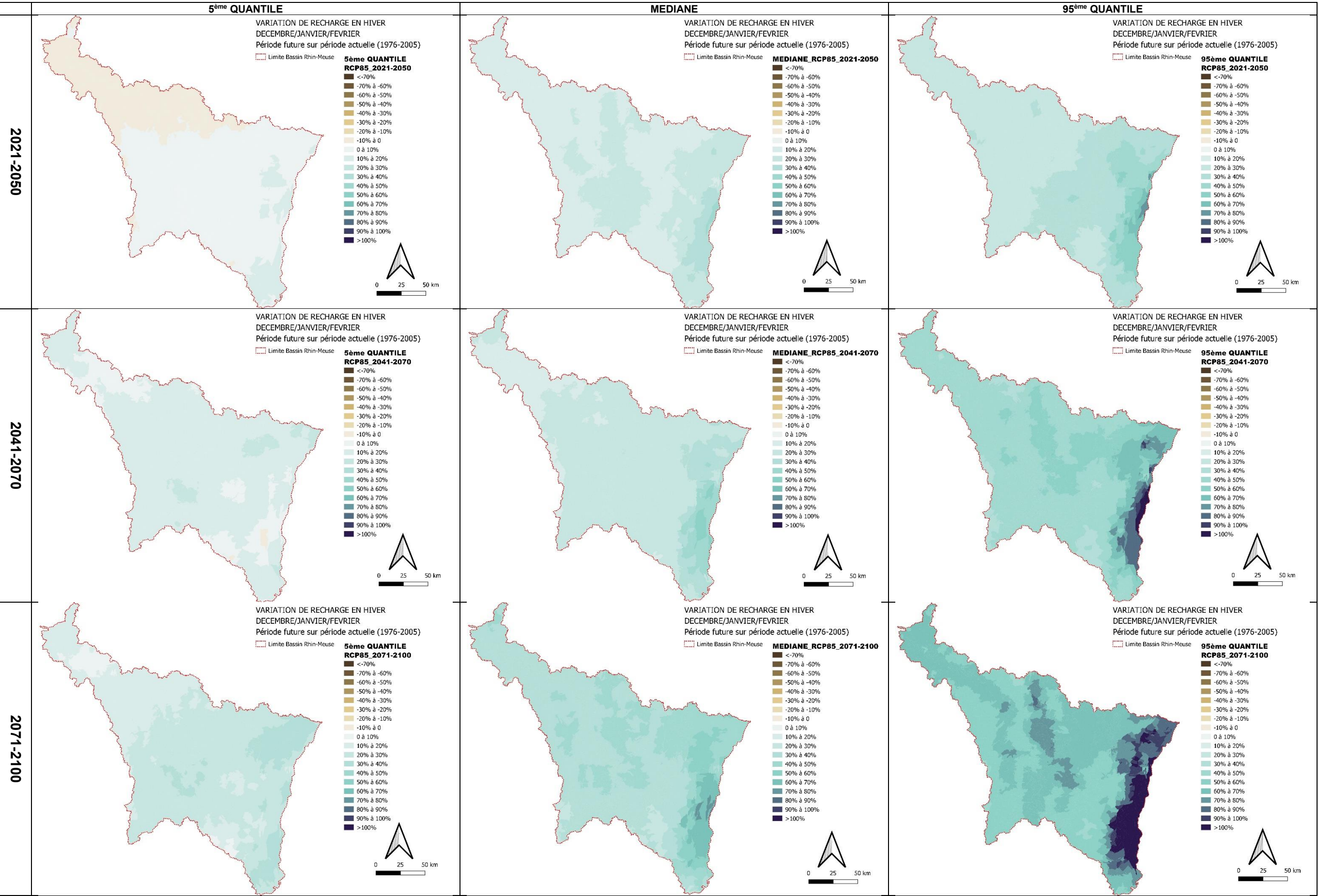


Figure 19 - Variations de recharge hivernale (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures

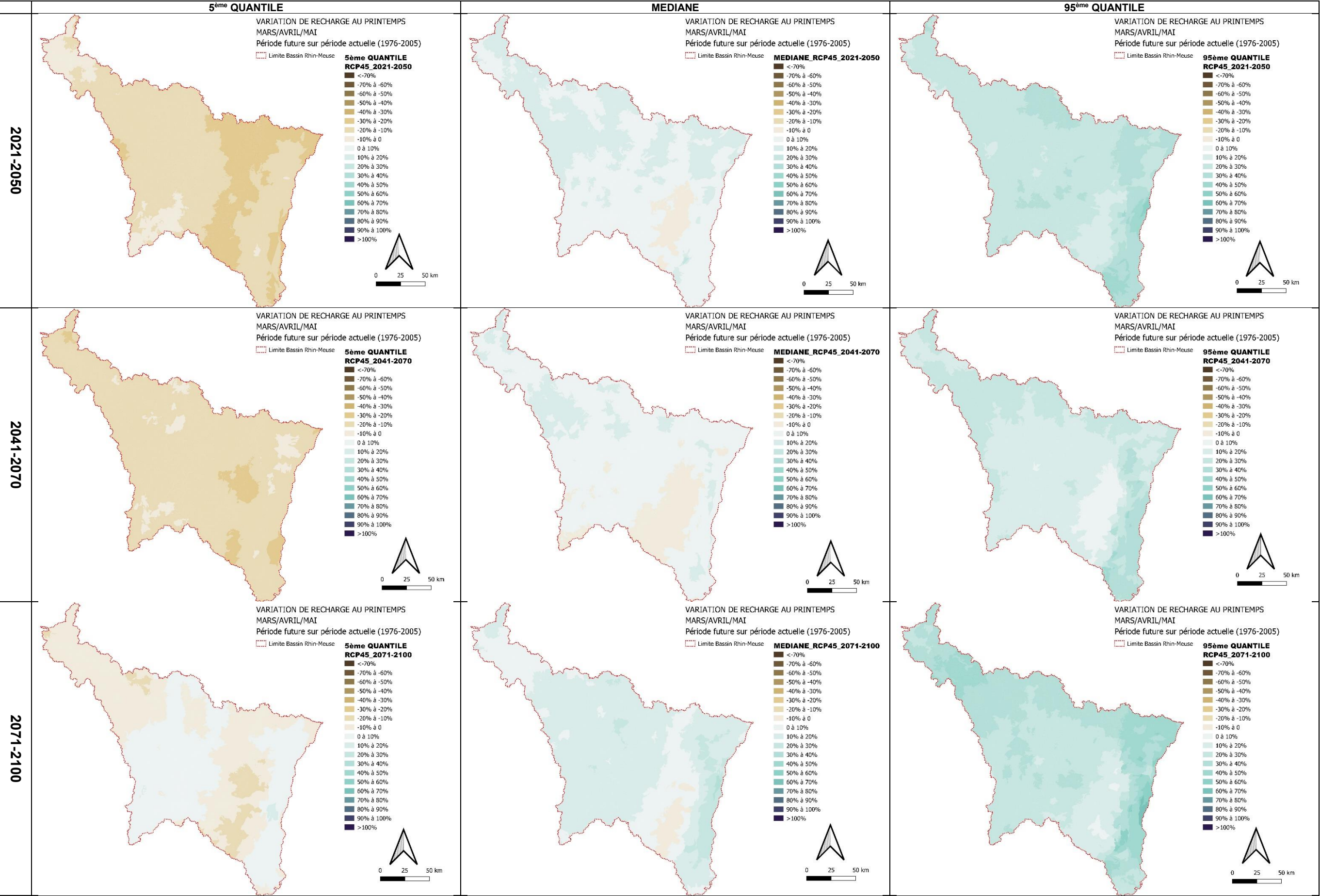


Figure 20 - Variations de recharge printanière (future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures

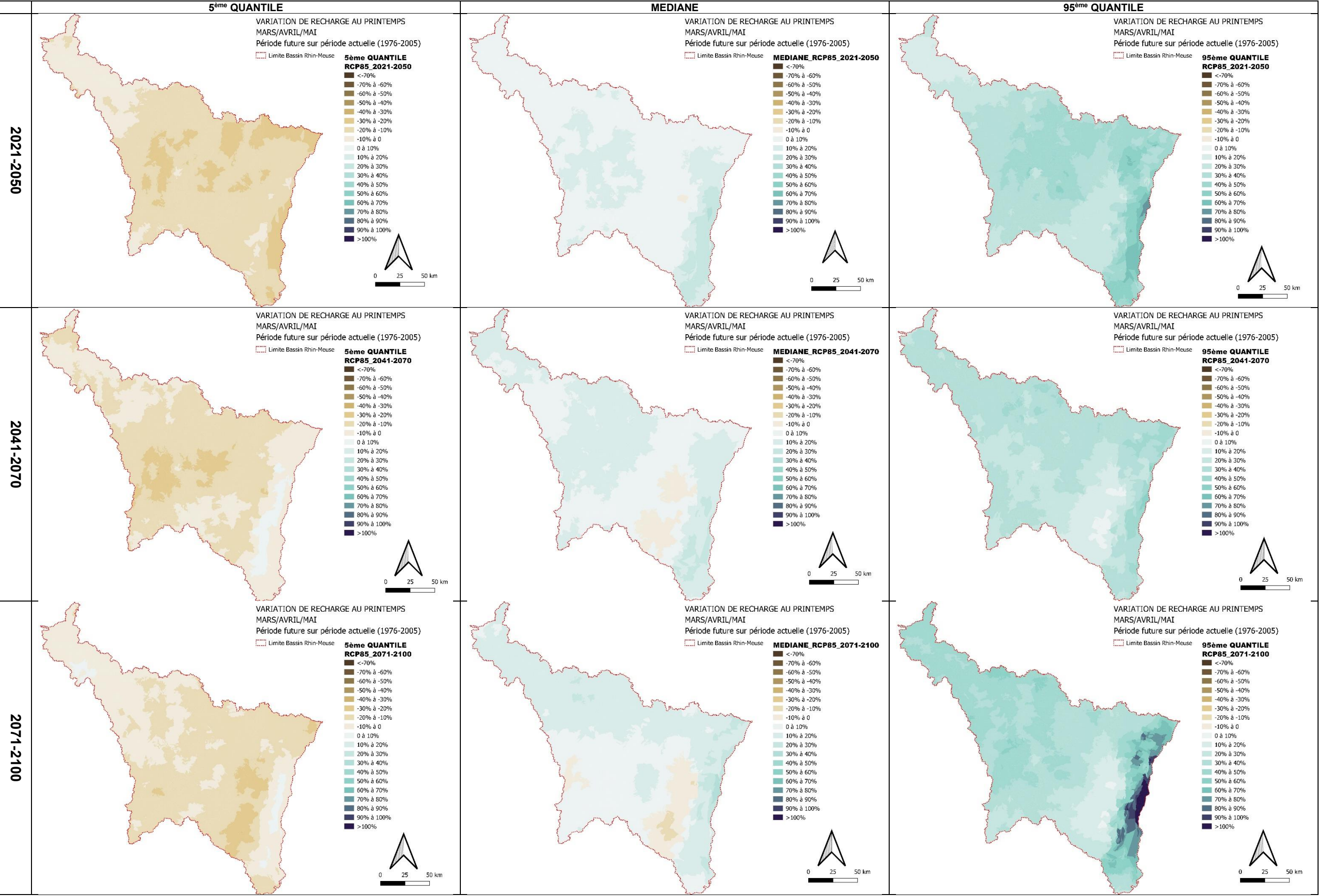


Figure 21 - Variations de recharge printanière (future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures

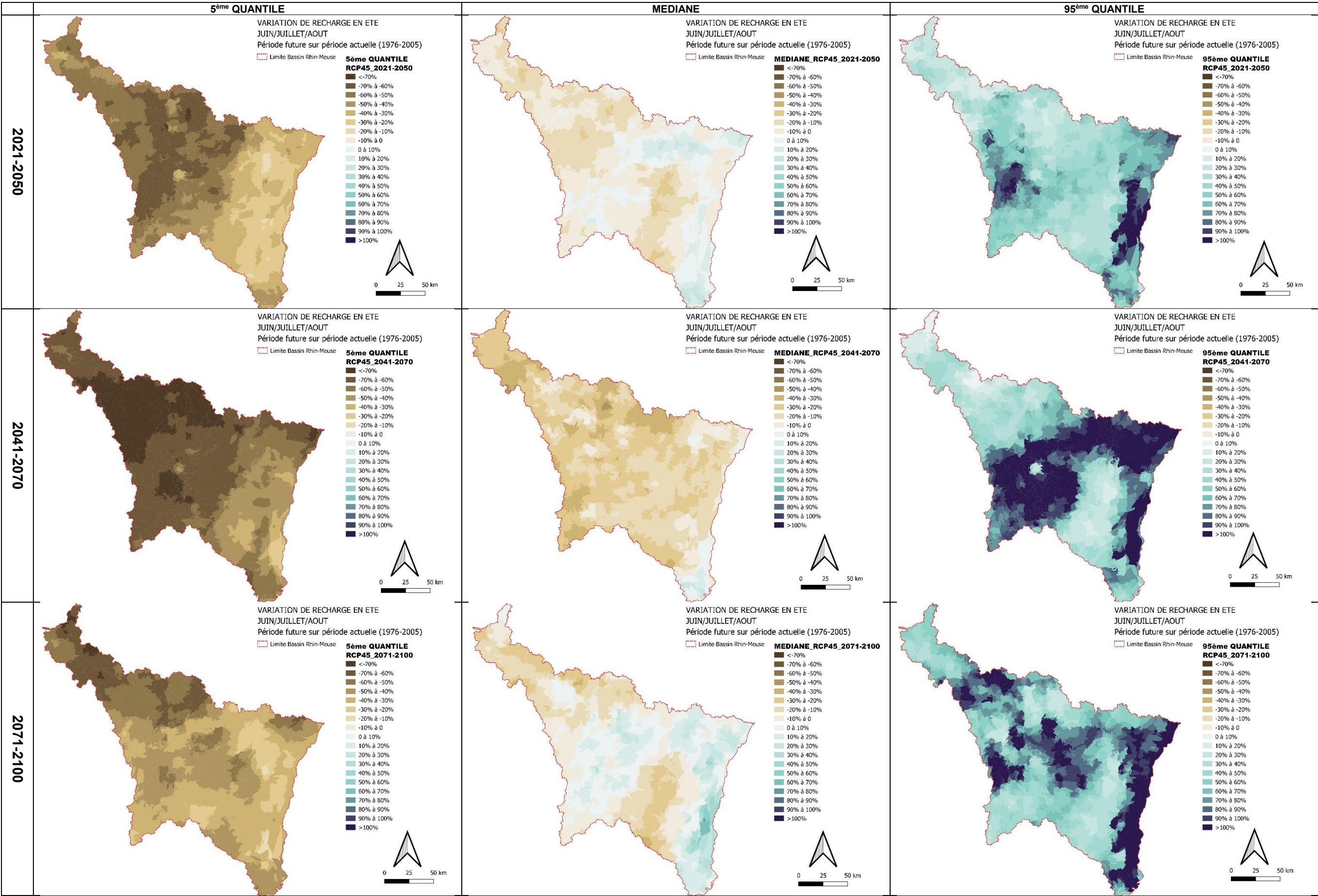


Figure 22 - Variations en été (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures

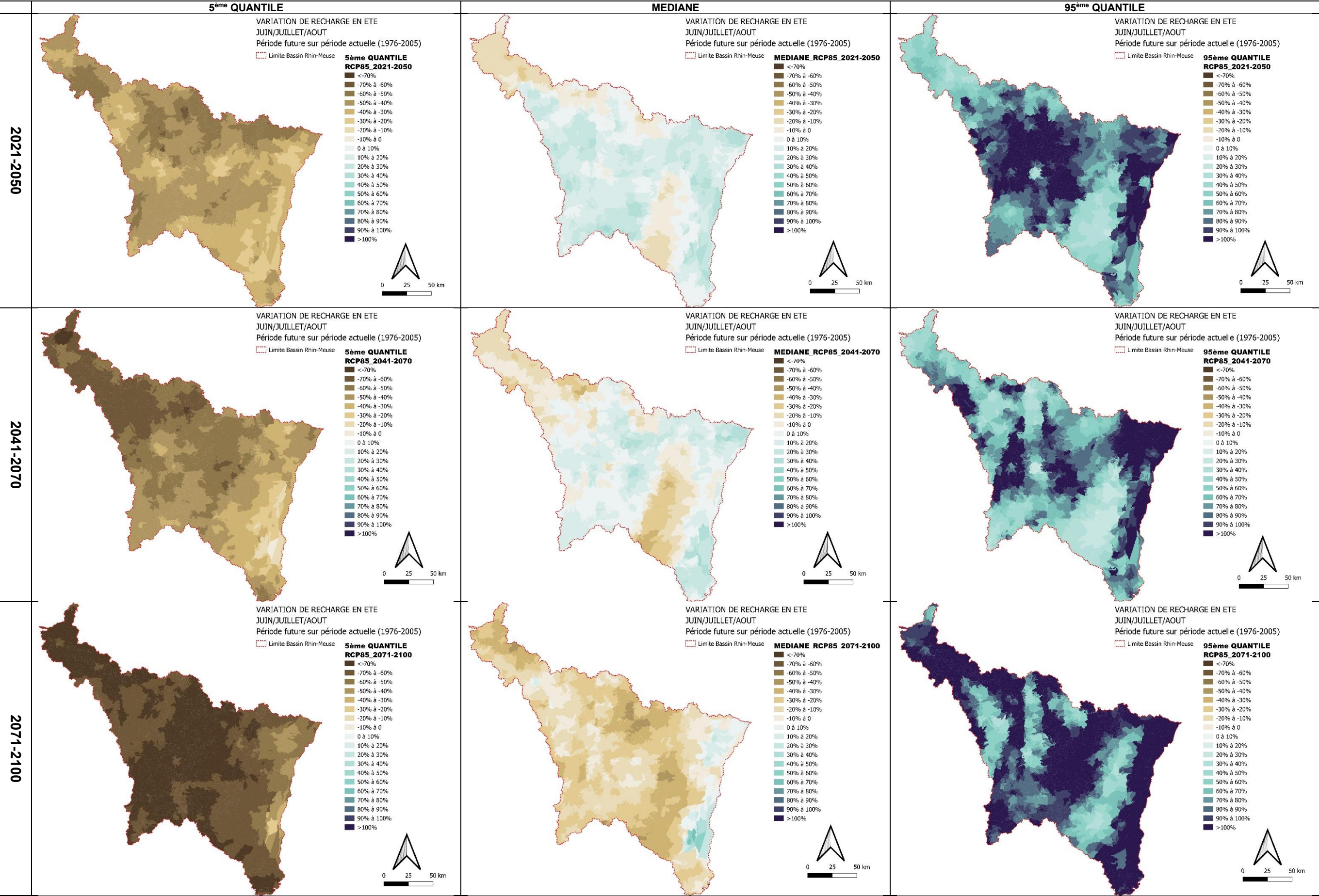


Figure 23 - Variations en été (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures

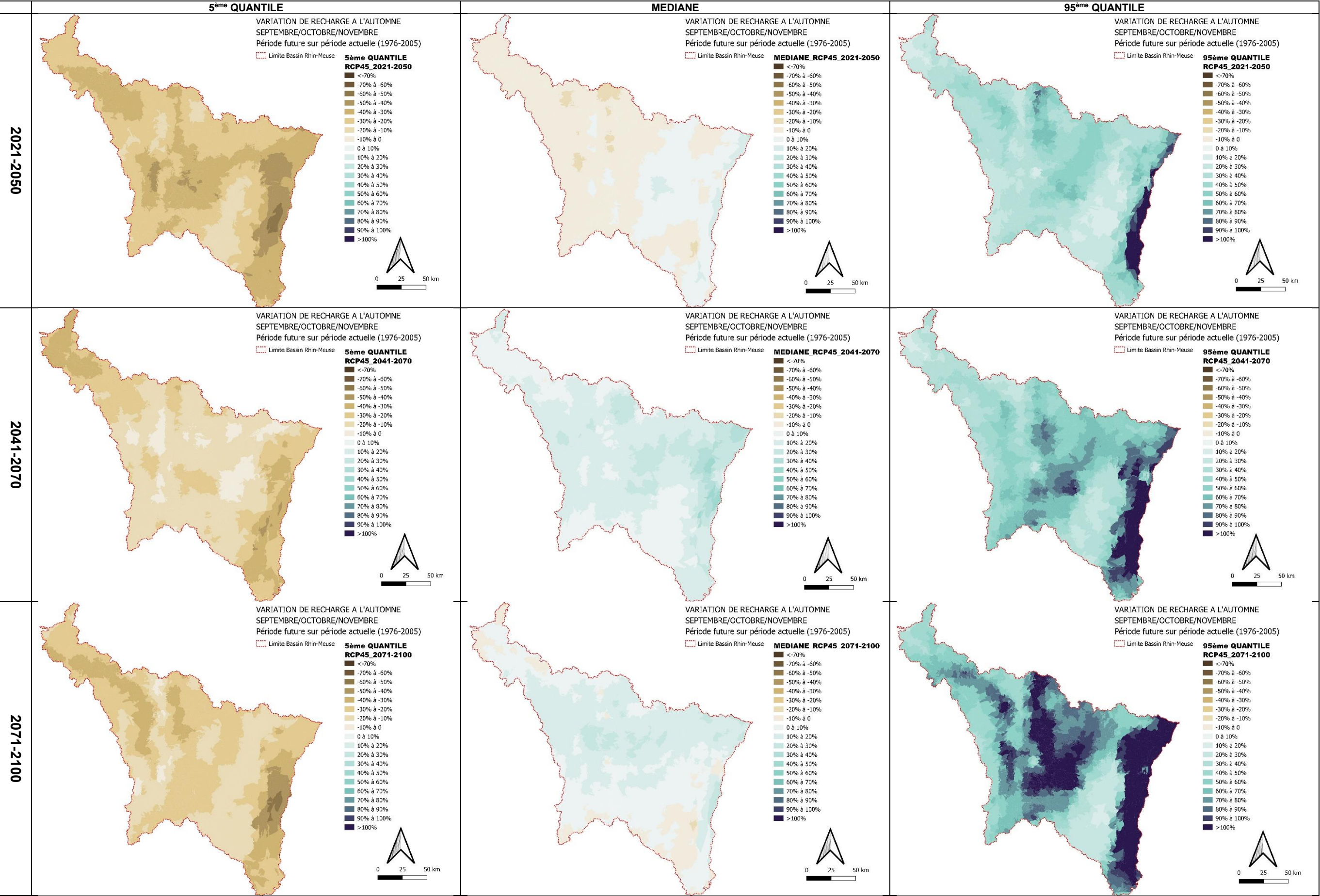


Figure 24 - Variations en automne (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 4.5 et les trois périodes futures

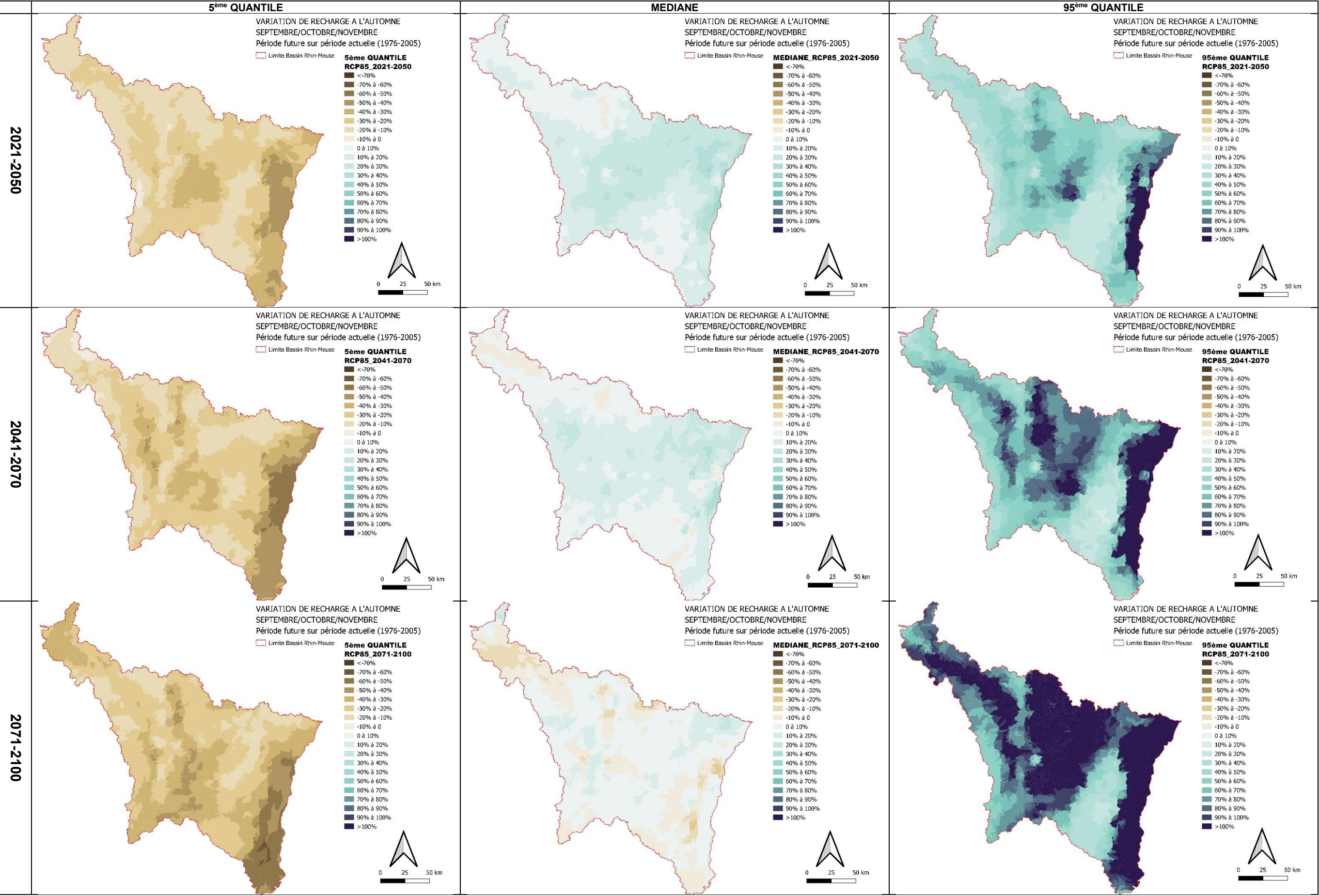
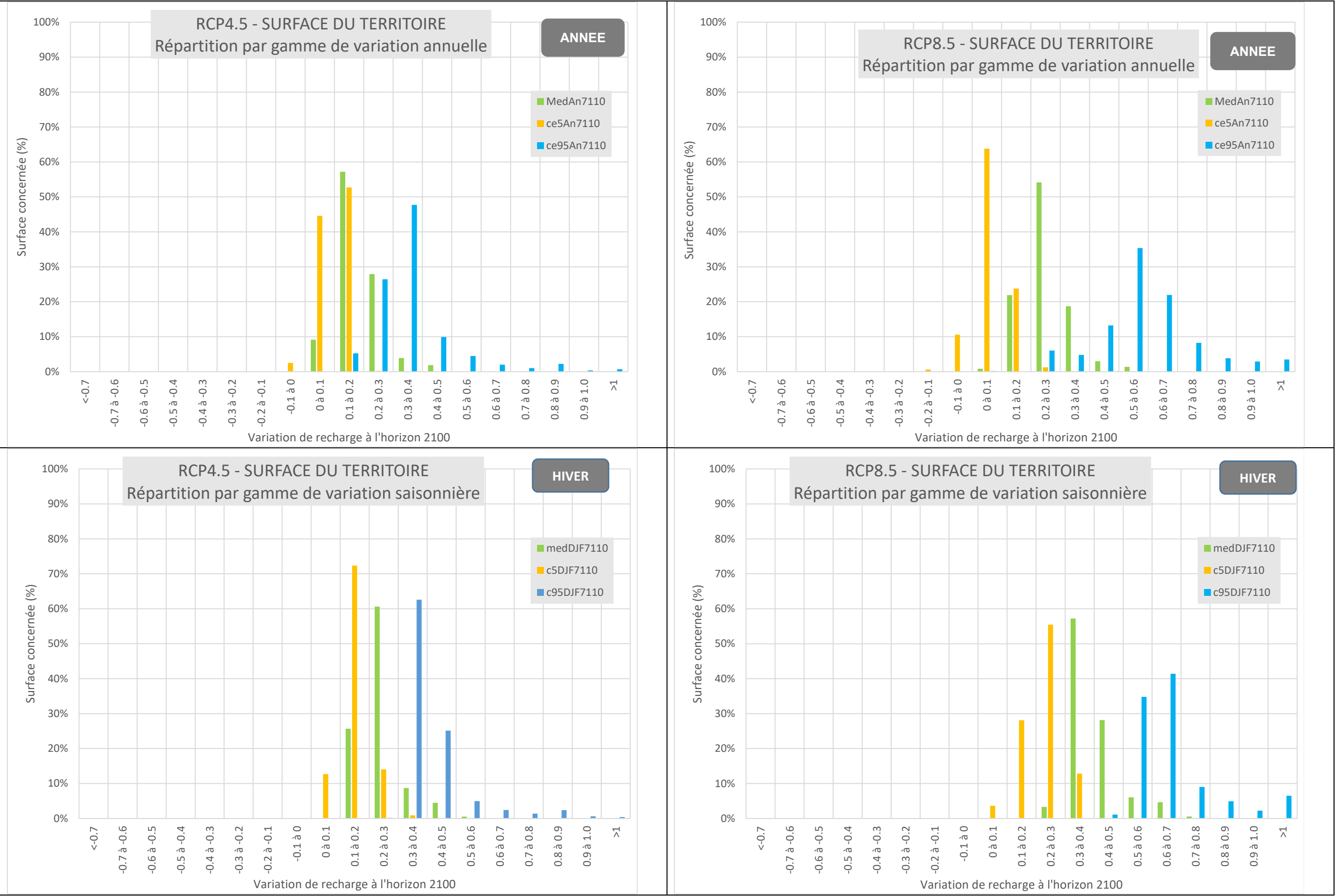
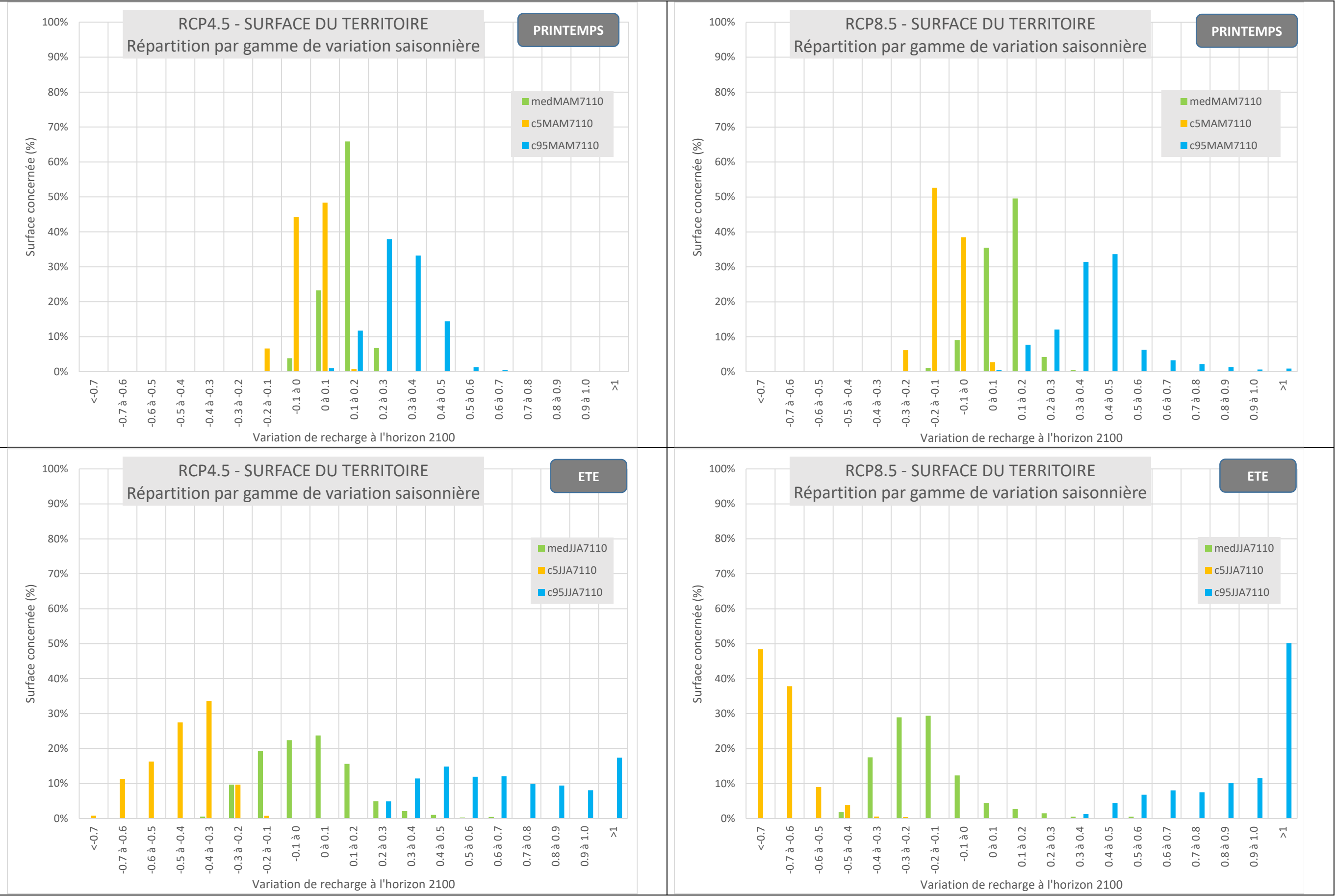


Figure 25 - Variations en automne (pluie efficace future/actuelle) pour les scénarios RCP 8.5 et les trois périodes futures





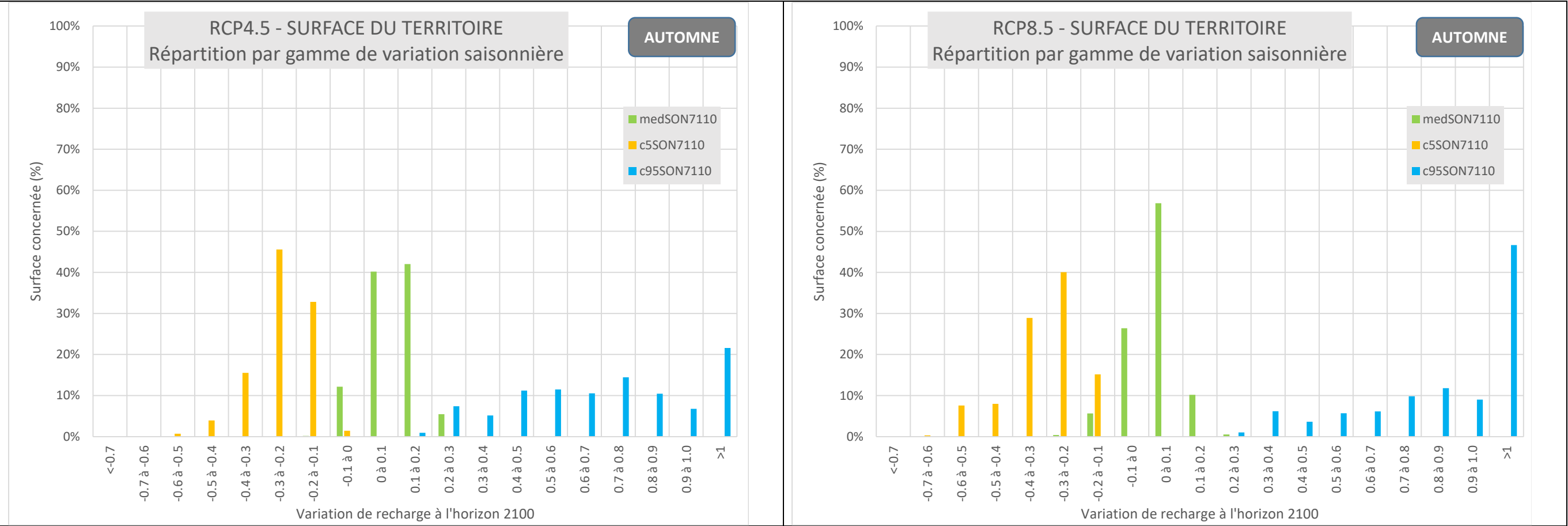


Figure 26 – Graphiques de répartition des surfaces du territoire Rhin-Meuse selon la gamme de variation annuelle ou saisonnière de la recharge pour les RCP4.5 et 8.5

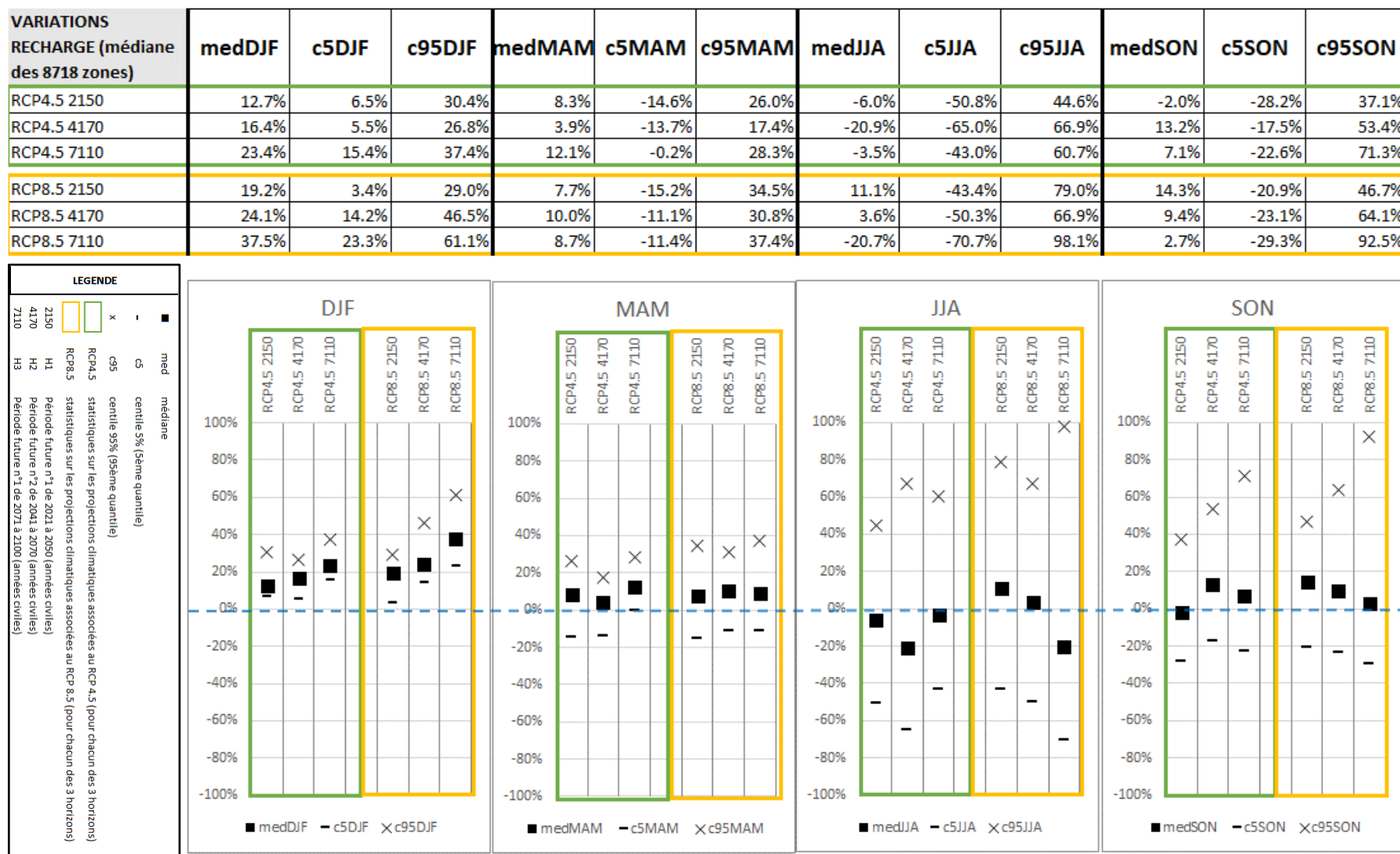


Figure 27 - Statistiques sur les variations recharge saisonnière à l'échelle du bassin Rhin-Meuse

4.5. INTERPRETATION DES VARIATIONS DE RECHARGE ANNUELLE ET SAISONNIERE A L'ECHELLE DE QUELQUES ENTITES HYDROGEOLOGIQUES

Afin de mener des réflexions sur l'évolution globale de la recharge future à l'échelle des différentes nappes du bassin Rhin-Meuse, les calculs statistiques ont été réalisés pour chacune des entités hydrogéologiques (EH) de niveau national NV1 (Figure 28, Figure 29, Figure 30 - et Annexe 1).

Résultats statistiques annuels

Les graphiques (Figure 28, Figure 29, Figure 30) présentent, pour chaque nappe (entité hydrogéologique principale représentant plus de 3 % de la surface du bassin Rhin-Meuse), les **résultats statistiques annuels** (médiane, centile 5 % et centile 95 %) pour chaque RCP (RCP 4.5 encadré vert et RCP 8.5 encadré orange) et chacun des trois horizons (2050, 2070 et 2100).

On note globalement une dispersion des résultats (écart entre les points C5-med-C95) différente en fonction des scénarios à effet de serre considéré (plus faible pour RCP 4.5 et plus importante pour RCP 8.5) et croissante entre 2050 et 2100. Les écarts les plus importants concernent la Nappe d'Alsace (EH 221) et le Champ de fracture (EH 230).

La tendance d'évolution des médianes annuelles pour chacune des nappes est globalement à l'augmentation de la recharge dans la gamme 0 à +20 %, sauf pour la Nappe d'Alsace (EH 221) et le Champ de fracture (EH 230), où les variations de recharge concernent plutôt la gamme 20 % à 40 %.

Résultats statistiques saisonniers

Les graphiques de l'Annexe 1 présentent, pour chaque nappe (entité hydrogéologique principale représentant plus de 3 % de la surface du bassin Rhin-Meuse), les **résultats statistiques saisonniers** pour chaque saison, pour chaque RCP et chacun des trois horizons.

On note globalement une dispersion des résultats (écart entre les points C5-med-C95) beaucoup plus importante pour le RCP 8.5 (comparé au RCP 4.5), pour l'horizon 2100 (comparé à 2050 et 2070) et pour l'été et l'automne (par rapport à l'hiver et au printemps).

Pour l'hiver (décembre à février), les variations sont à l'augmentation dans la gamme 0 à 40 %, sauf pour la Nappe d'Alsace (EH 221) et le Champ de fracture (EH 230) où elle est plus importante dans la gamme + 20 % à + 60 %. Les variations sont progressivement plus importantes de 2050 à 2100, pour RCP 4.5 aussi bien que pour RCP 8.5.

Pour le printemps (mars à mai), les variations sont à l'augmentation dans la gamme 0 à + 20 %, sauf pour le Socle Vosgien (EH 231) qui présente de faibles variations proches de ± 0 %. Entre 2050 et 2100, les variations sont relativement stables, pour RCP 4.5 aussi bien que pour RCP 8.5, sauf le Socle Vosgien (EH 231) qui présente une légère baisse.

Pour l'été (juin à août), les variations de recharge sont différentes pour les 2 RCP : Pour le RCP 4.5, les variations sont négatives dans la gamme – 20 % à 0 (baisse de 2050 à 2070 et augmentation de 2070 à 2100). Pour le RCP 8.5, les variations sont positives dans la gamme de + 20 % à – 20 % et en baisse entre 2050 et 2100. Pour le Socle Vosgien, la gamme de variations est plus basse de 0 à – 40 %.

Pour l'automne (septembre à novembre), les variations sont positives dans la gamme 0 à + 20 %, sauf pour le Socle Vosgien (EH 231) qui présente de faibles variations proches de ± 0 %. Comme précédemment, on distingue RCP 4.5 avec augmentation de 2050 à 2070 et baisse de 2070 à 2100 et RCP 8.5 avec baisse de 2050 à 2100.

Ces résultats graphiques comme les résultats cartographiques mettent en évidence une forte variabilité spatiale de l'impact du changement climatique sur la recharge :

- La nappe la plus impactée par l'augmentation de la recharge en hiver étant la Nappe d'Alsace et celles du Champ de Fracture ;
- La nappe la plus impactée par la diminution de la recharge en été étant le Socle Vosgien.

Particularité de la Nappe d'Alsace

Concernant la nappe d'Alsace, des études antérieures (SCHOMBURGK S., PINAULT, J.L., LONGUEVERGNE.L., 2005 et LOGAR, 2012) ont montré que **la recharge par les pluies efficaces ne correspondrait qu'à 20 à 30% de la recharge totale de la nappe d'Alsace**, la contribution principale s'effectuant par les rivières vosgiennes et le Rhin. L'interprétation est cependant à relativiser notamment du fait de l'ancienneté des études et des hypothèses respectivement considérées. D'une part, les résultats ne reflètent pas les gains de connaissances obtenus par les développements techniques récents du traitement des données et d'autre part il s'agit d'ordres de grandeur des flux intégrés sur la totalité de l'étendue spatiale du modèle, alors que cet aquifère se caractérise par des contributions relatives non uniformes spatialement.

Les premiers résultats des modélisations menées dans le cadre du **projet Interreg GRETA**¹³ sont en cours de consolidation et apporteront d'ici 2025 des connaissances supplémentaires et plus récentes. L'analyse préliminaire indique une piézométrie à proximité du Rhin très influencée par le fleuve. A l'opposé, certains secteurs, notamment en bordure, peuvent être caractérisés par un signal prédominant de la pluie efficace. D'autre part il est important de considérer que l'estimation de la recharge à grande échelle devra tenir compte du caractère extrêmement aménagés des cours d'eaux en plaine d'Alsace. Pour rappel la rivière principale, l'Ill, qui recharge l'aquifère rhénan sur une grande partie de la plaine, est elle-même soutenue par le Rhin. Or les dispositifs de soutien d'étiage ont fortement augmenté ces dernières années et leurs impacts sont peu connus. Ils pourraient notamment abaisser la part de la recharge actuelle via les pluies efficaces de l'aquifère rhénan.

¹³ <https://www.interreg-rhin-sup.eu/projet/greta-groundwater-evolutions-and-resilience-of-associated-biodiversity-upper-rhine/>

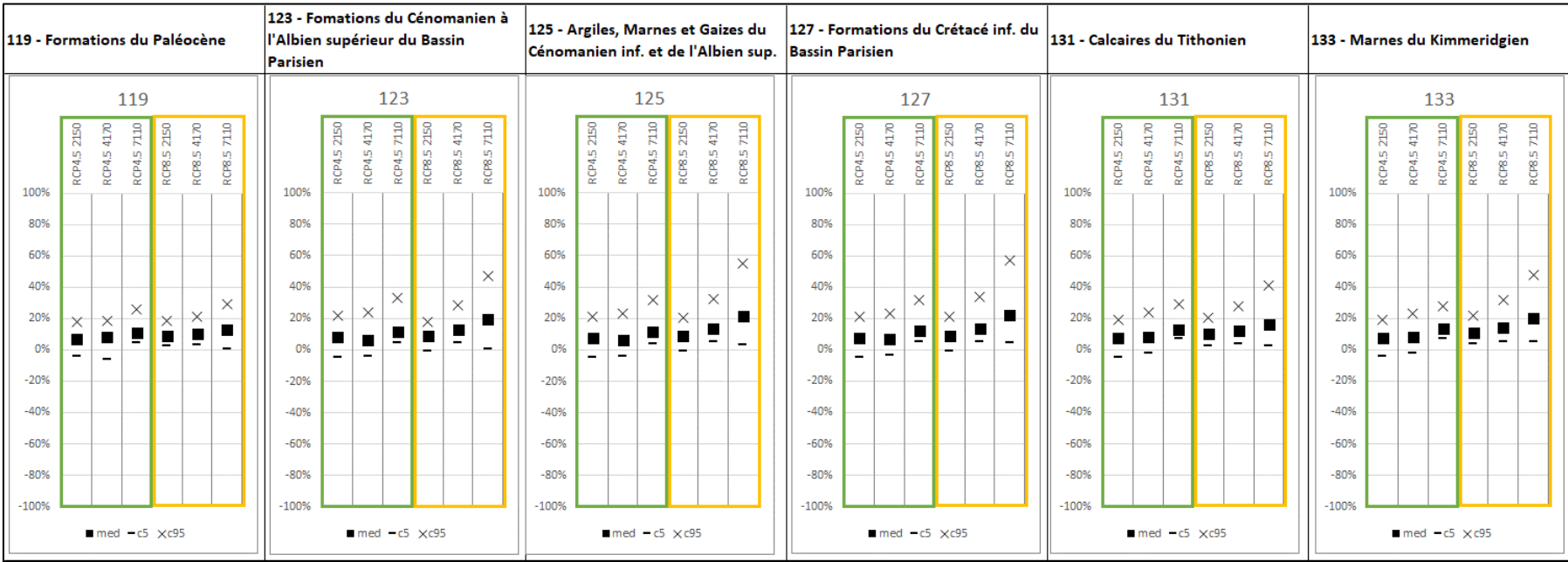


Figure 28 - Statistiques sur les variations recharge annuelle pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 1 : EH NV1 119/123/125/127/131/133

LEGENDE	■	med	médiane
	-	c5	centile 5% (5ème quantile)
	x	c95	centile 95% (95ème quantile)
	■	RCP4.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 4.5 (pour chacun des 3 horizons)
	■	RCP8.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 8.5 (pour chacun des 3 horizons)
	2150	H1	Période future n°1 de 2021 à 2050 (années civiles)
	4170	H2	Période future n°2 de 2041 à 2070 (années civiles)
	7110	H3	Période future n°1 de 2071 à 2100 (années civiles)

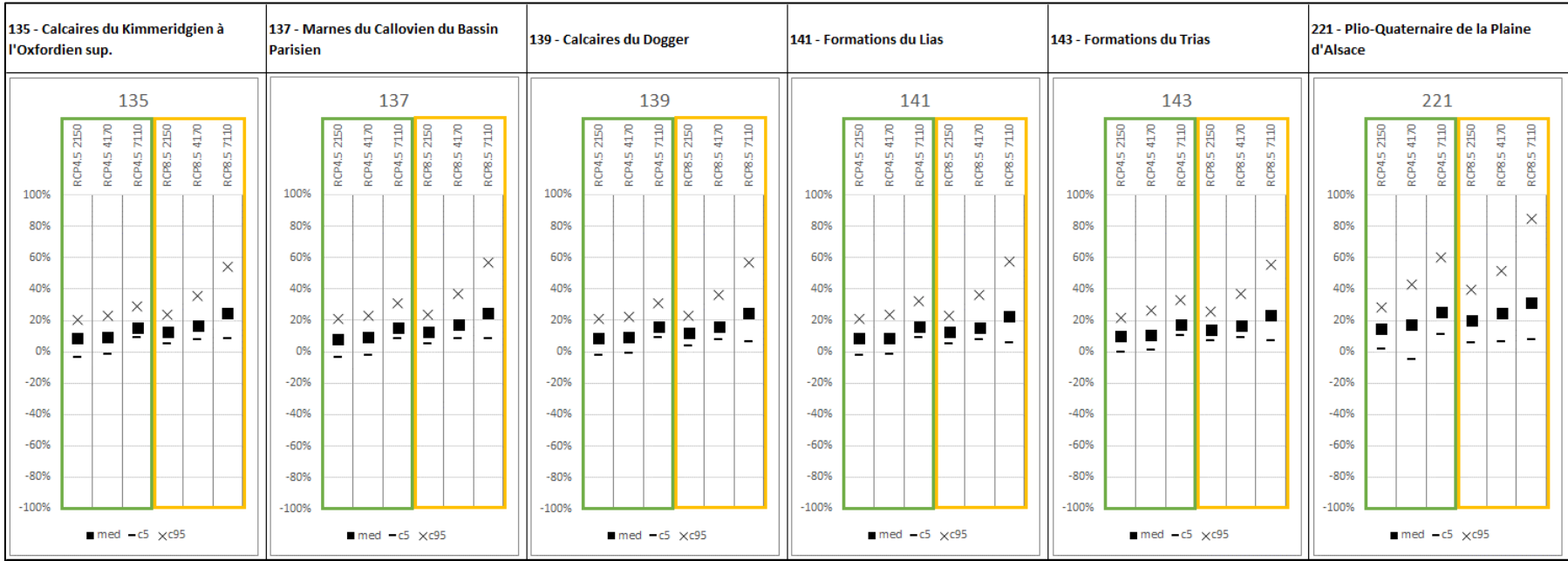


Figure 29 - Statistiques sur les variations recharge pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 2 : EH NV1 135/137/139/141/143/221

LEGENDE	■	med	médiane
	-	c5	centile 5% (5ème quantile)
	x	c95	centile 95% (95ème quantile)
	■	RCP4.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 4.5 (pour chacun des 3 horizons)
	■	RCP8.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 8.5 (pour chacun des 3 horizons)
	2150	H1	Période future n°1 de 2021 à 2050 (années civiles)
	4170	H2	Période future n°2 de 2041 à 2070 (années civiles)
	7110	H3	Période future n°1 de 2071 à 2100 (années civiles)

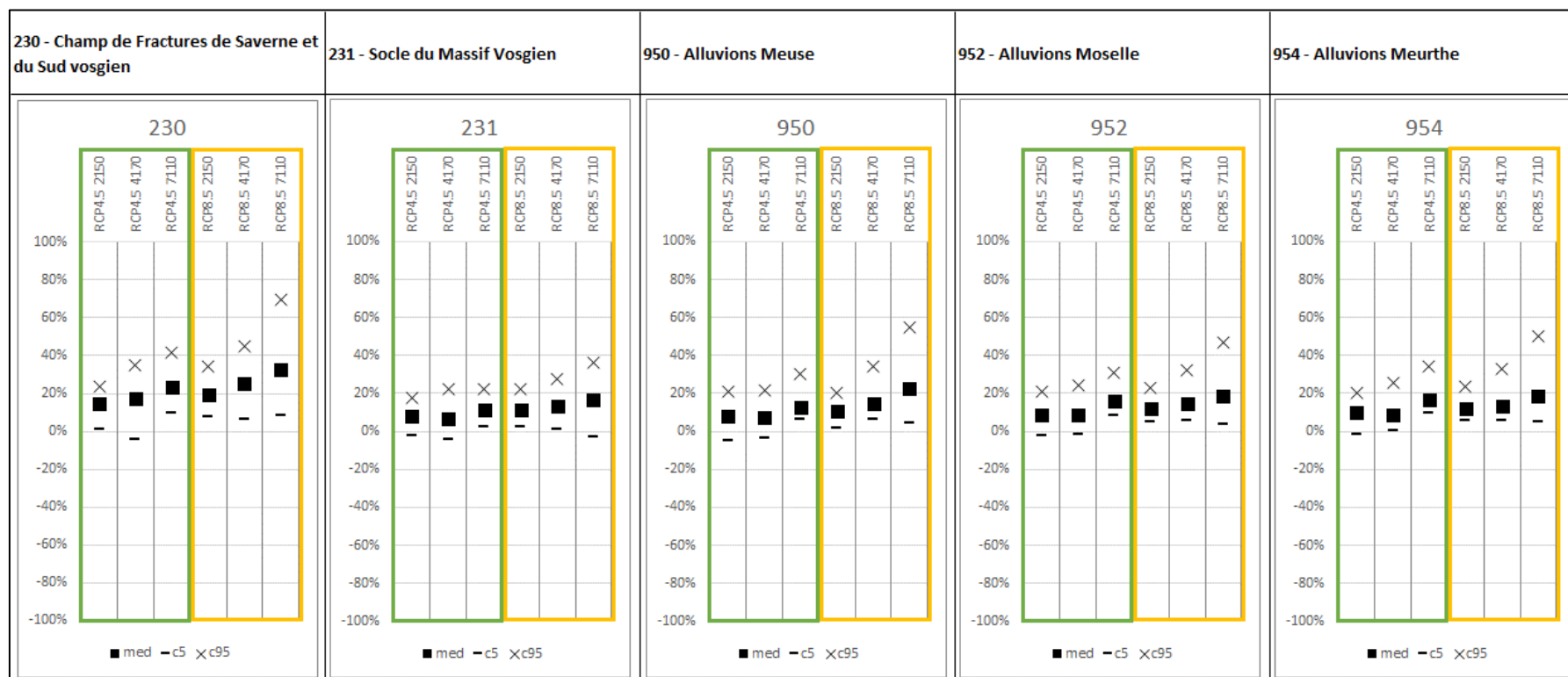


Figure 30 - Statistiques sur les variations recharge pour les principales entités hydrogéologiques du bassin Rhin-Meuse (emprise > 3 % surface totale du bassin) – partie 3 : EH NV1 230/231/950/952/954

LEGENDE	■	med	médiane
	-	c5	centile 5% (5ème quantile)
	x	c95	centile 95% (95ème quantile)
	■	RCP4.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 4.5 (pour chacun des 3 horizons)
	■	RCP8.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 8.5 (pour chacun des 3 horizons)
	2150	H1	Période future n°1 de 2021 à 2050 (années civiles)
	4170	H2	Période future n°2 de 2041 à 2070 (années civiles)
	7110	H3	Période future n°1 de 2071 à 2100 (années civiles)

5. Sélection et caractérisation de bassins versants représentatifs

5.1. CRITERES DE SELECTION

La sélection des bassins versants s'est effectuée sur la base d'une analyse des critères d'anthropisation (Figure 31). L'objectif de cette étape est d'analyser les différents critères en fonction de l'échelle de travail, de sélectionner les critères les plus pertinents pour caractériser les bassins versants et de combiner ces critères afin de classer les différents bassins selon leur degré d'anthropisation, leur représentativité du contexte hydrogéologique et la faisabilité de mise en œuvre d'une modélisation. On distingue 4 catégories de critères :

L'usage du sol

- Surface en culture et type de culture ;
- Surface artificialisée ;
- Surface boisée.

La principale source de donnée est issue de Corine Land Cover version 2018, comme pour le calcul de la pluie efficace.

La tension quantitative

- La liste des communes en tension quantitative lors des épisodes de sécheresse ;
- La situation quantitative sur le bassin Rhin-Meuse (état des lieux 2019) et les risques associés.

L'usage de l'eau

- La densité de population et sa répartition ;
- La consommation par type d'usage.

La caractérisation des milieux

- La recharge actuelle : il s'agit du flux rentrant dans les nappes, défini lors de la l'étude précédente (BUSCARLET et al. 2020) ;
- L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) : c'est la capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface (MARDHEL, 2010 ; MARDHEL et al., 2021) ;
- La cartographie des nappes libres à l'affleurement, en distinguant les nappes captives dont le mécanisme de recharge est spécifique (BDLISA) ;
- Le tracé des cours d'eau et les modifications historiques, tels que les travaux, ouvrages, dérivations [barrages, endiguements, extraction de matériaux (gravières)] ;

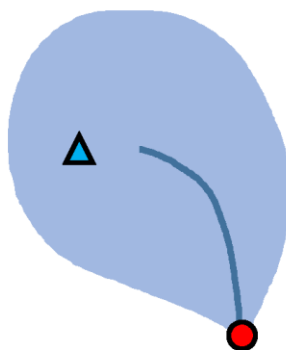
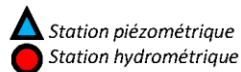
- L'inventaire des zones humides et leur évolution au cours du temps (dégradation, suppression) ;
- L'existence d'un suivi quantitatif sur les eaux souterraines et sur les eaux superficielles : on dressera la liste des ouvrages représentatifs tels que les piézomètres (ADES) et les stations hydrométriques (HYDROPORTAIL).

Impact du CC sur la recharge – bassin Rhin-Meuse

Méthodologie

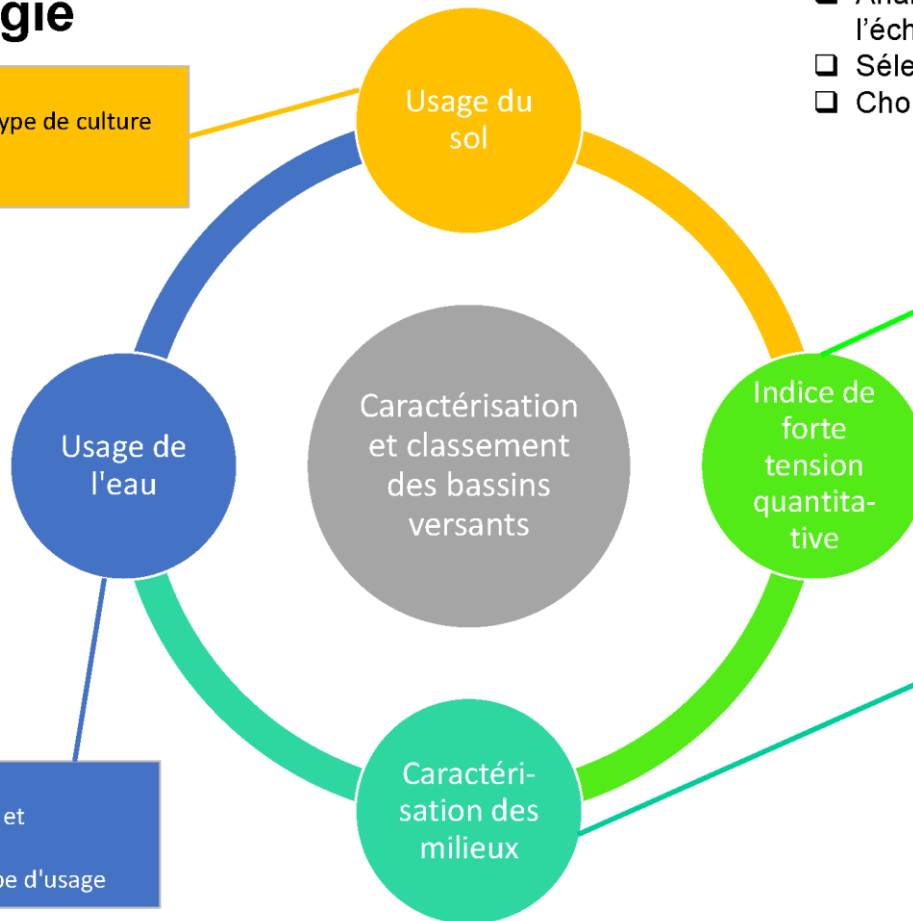
Usage du sol (CLC 2018)

- surface en culture et type de culture
- surface artificialisée
- Surface boisée



Usage de l'eau

- densité de population et répartition
- consommation par type d'usage



Critères d'anthropisation

- ☐ Analyse de la pertinence en fonction de l'échelle de travail
- ☐ Sélection et combinaison des critères
- ☐ Choix des BV

⇒ **Modélisation**

Tension quantitative

- liste des communes en tension quantitative lors des épisodes de sécheresse
- situation quantitative sur le bassin RM (état des lieux) et risques associés

Caractérisation des milieux

- Recharge actuelle ==> flux rentrant de la nappe
- Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) ==> capacité intrinsèque du sol à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface
- Nappe à l'affleurement libre/captive (BDLISA)
- Modification des cours d'eau ==> travaux, ouvrages, dérivations [barrages, endiguement, extraction de matériaux (gravières)]
- Zones humides ==> dégradation, suppression
- Suivi quantitatif → piézomètres (ADES) et station hydrométrique (HYDROPORTAIL)

Figure 31 – Diagramme de caractérisation et classement des bassins versants avant modélisation

5.2. CARACTERISATION DE L'USAGE DU SOL ET DU DEGRE D'ANTHROPISATION

La caractérisation des 125 bassins versants sélectionnés (sous-secteurs de BD Carthage dans le bassin Rhin-Meuse) s'est effectué dans un premier temps à partir du critère « usage du sol », en combinant les couches cartographiques Corine Land Cover (version 2018) et le coefficient cultural K_c (cf. correspondance en Annexe 2).

Chaque bassin versant est ensuite affecté d'un coefficient cultural K_{cb} au prorata des superficies concernées qui équivaut à la somme des K_{ci} définis ainsi :

$$K_{ci} = \frac{K_c \times S_i}{S_T} \quad \text{avec}$$

K_c = coefficient cultural (Nistor et al., 2018)

S_T : surface totale du bassin versant

S_i surface de l'unité de surface CLC à l'échelle du bassin versant

Les valeurs de K_{cb} obtenues sont comprises entre 0.53 à 1.22. Les faibles valeurs de K_{cb} correspondent à des bassins où le ruissellement domine l'infiltration et inversement les bassins versants ayant des valeurs de K_{cb} proche de 1 sont des zones où l'infiltration domine le ruissellement. En partant de l'hypothèse que l'anthropisation affecte directement l'infiltration, on distingue notamment 2 catégories de bassins versants, qui s'avèreront déterminante dans le reste de l'étude :

- Les bassins versants considérés comme très anthropisés (30 sous-secteurs) avec un K_{cb} compris entre 0.54 et 0.70 ($\leq$) ;
- Les bassins versants considérés comme moyennement anthropisés (42 sous-secteurs) avec un K_{cb} compris entre 0.71 et 0.90 ($\leq$) ;
- Les bassins versants considérés comme peu anthropisés (53 sous-secteurs) avec un K_{cb} compris entre 0.90 et 1.22.

On trouve une majorité de sous-secteurs peu anthropisés au sud (socle vosgien) et à l'ouest (Meuse) du bassin Rhin-Meuse. Les sous-secteurs les plus anthropisés (Figure 32) sont sans surprise localisés dans le périmètre des principales agglomérations et zone d'activité économique du bassin Rhin-Meuse (Charleville-Mézières, axe Metz-Nancy-Neufchâteau-Epinal, Forbach, Strasbourg ou Mulhouse).

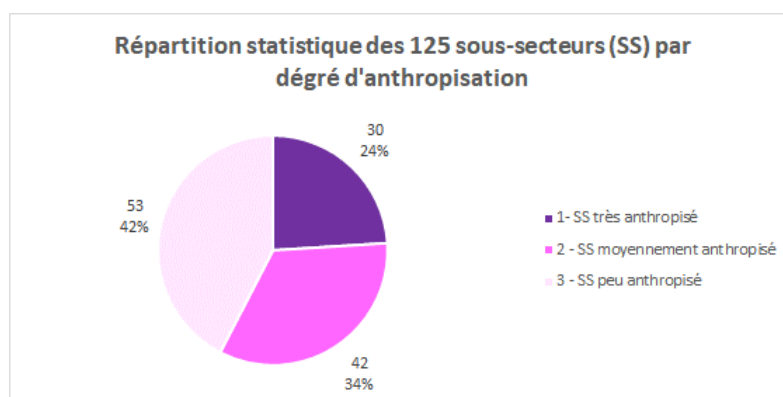
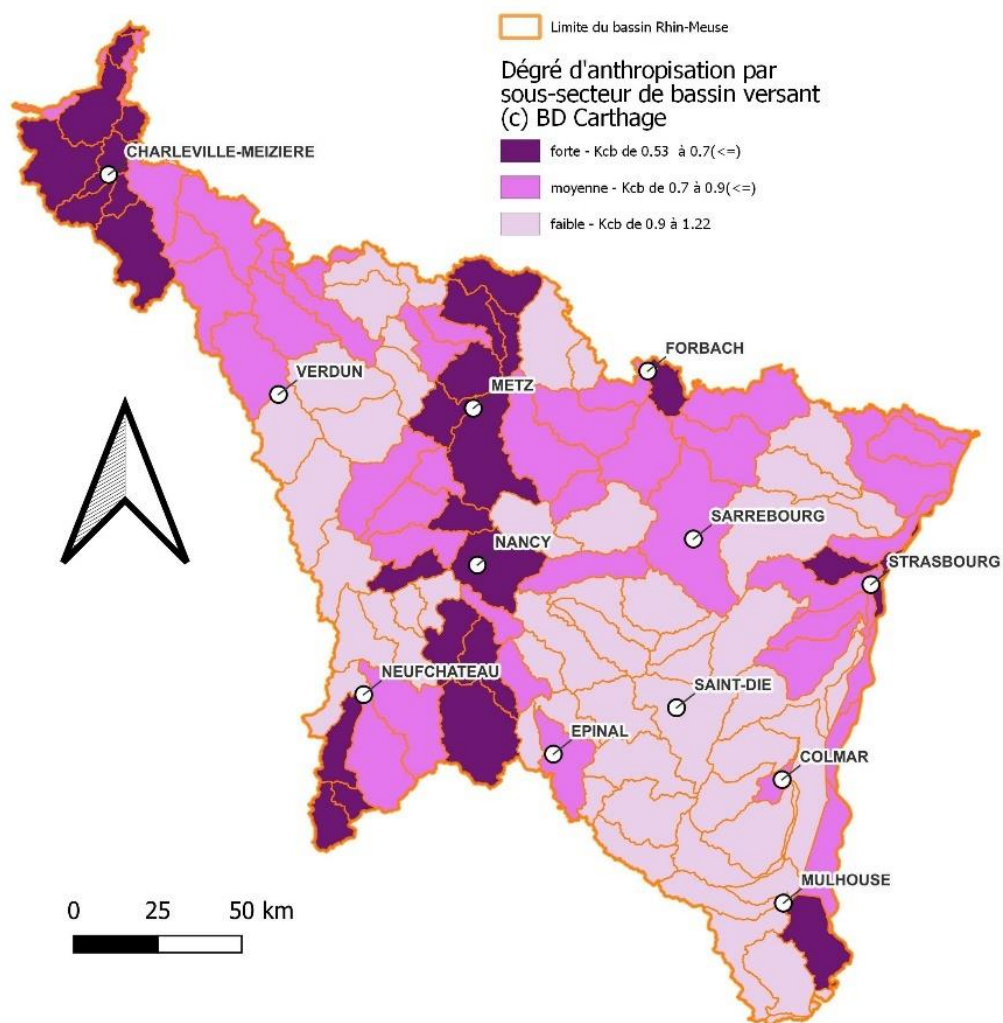


Figure 32 - Cartographie des bassins versants caractérisés par leur degré d'anthropisation

5.3. DISPONIBILITE DES CHRONIQUES DE MESURES

La disponibilité des chroniques de mesures (niveau de nappe et débit de cours d'eau) est un critère indispensable à la mise en œuvre de la modélisation et est de ce fait retenue en priorité.

Les piézomètres de suivi des eaux souterraines au sein du bassin Rhin-Meuse (source : [ADES](#)) sont sélectionnés en fonction des caractéristiques suivantes :

- Disponibilité d'une chronique de mesure des niveaux d'eau d'au moins 10 ans ;
- Piézomètre toujours actif à ce jour ;
- Localisation du piézomètre dans le bassin Rhin-Meuse ;
- Piézomètre considéré comme prioritaire dans le cadre des études précédentes (MANCEAU et al., 2020 – étude sur les indicateurs Grand Est) ;
- Piézomètre captant une nappe libre.

Sur l'ensemble des 1309 piézomètres de suivis dans le bassin Rhin-Meuse, seuls 4 % sont susceptibles d'être retenus dans le cadre de l'étude puisqu'ils respectent les critères précédents. La priorisation effectuée a permis de distinguer trois classes (Figure 33 et Figure 34) :

- **Priorité P1** – 15 ouvrages présélectionnés sur les critères « nappe libre » et durée suffisante de la chronique et disposant d'une classification très favorable au terme de l'étude sur les indicateurs ;
- **Priorité P2** - 14 ouvrages présélectionnés sur les critères « nappe libre » et durée suffisante de la chronique et disposant d'une classification moyennement favorable au terme de l'étude sur les indicateurs ;
- **Priorité P3** - 20 ouvrages présélectionnés sur les critères « nappe libre » et durée suffisante de la chronique mais non analysés dans le cadre de l'étude sur les indicateurs.

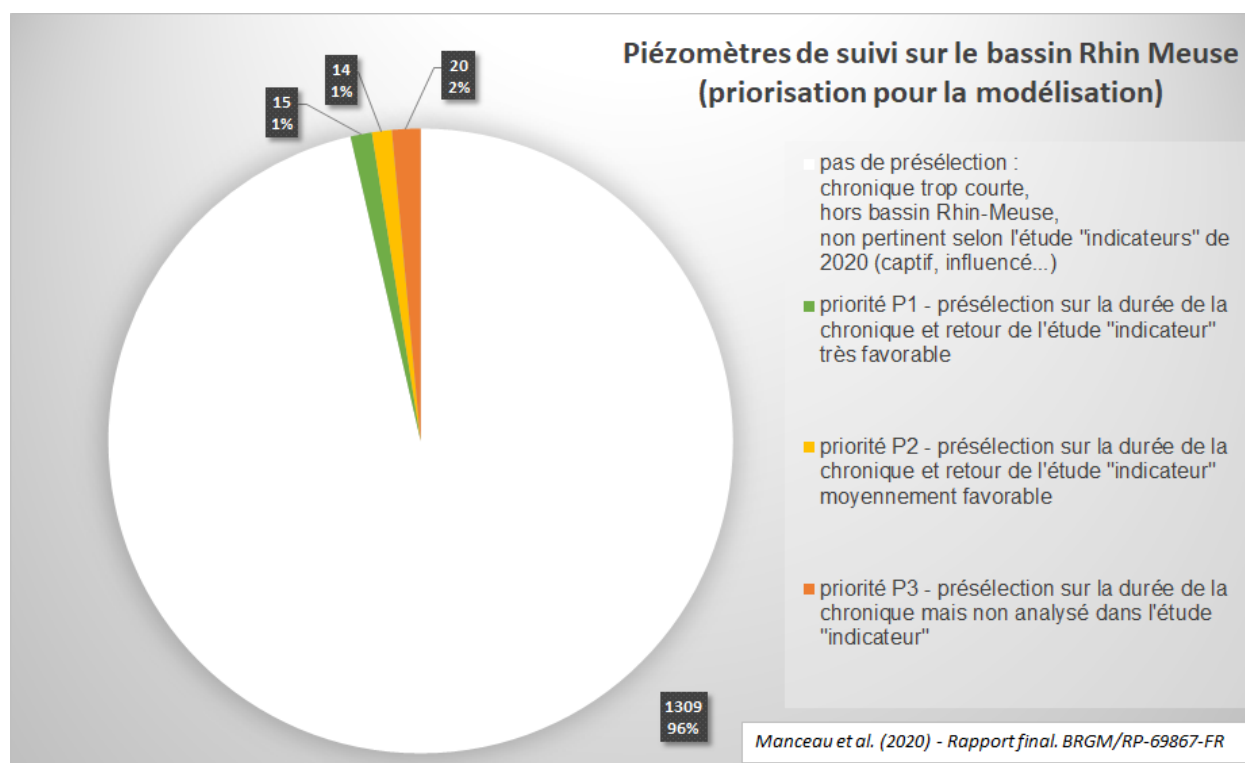


Figure 33 – Répartition des piézomètres de suivi sur le bassin Rhin-Meuse selon la priorisation effectuée

Les stations hydrométriques sur le bassin Rhin-Meuse (source : [HydroPortail](#)) avaient précédemment été sélectionnées et traitées au cours du volet 1 de l'étude sur la recharge actuelle (BUSCARLET. E et al, 2020) et durant l'étude concernant l'Impact du changement climatique sur la ressource en eau du socle Vosgien (CHABART et al., 2021). On compte à ce stade 114 stations hydrométriques avec des données potentiellement utilisables pour les modélisations (Figure 34).

Parmi les 125 bassins versants sélectionnés (sous-secteurs de BD Carthage dans le bassin Rhin-Meuse), on en compte 20 disposants à la fois de stations de mesures sur les eaux souterraines et les eaux superficielles, 50 disposants uniquement de stations hydrométriques et 17 disposant uniquement de stations piézométriques (Figure 35).

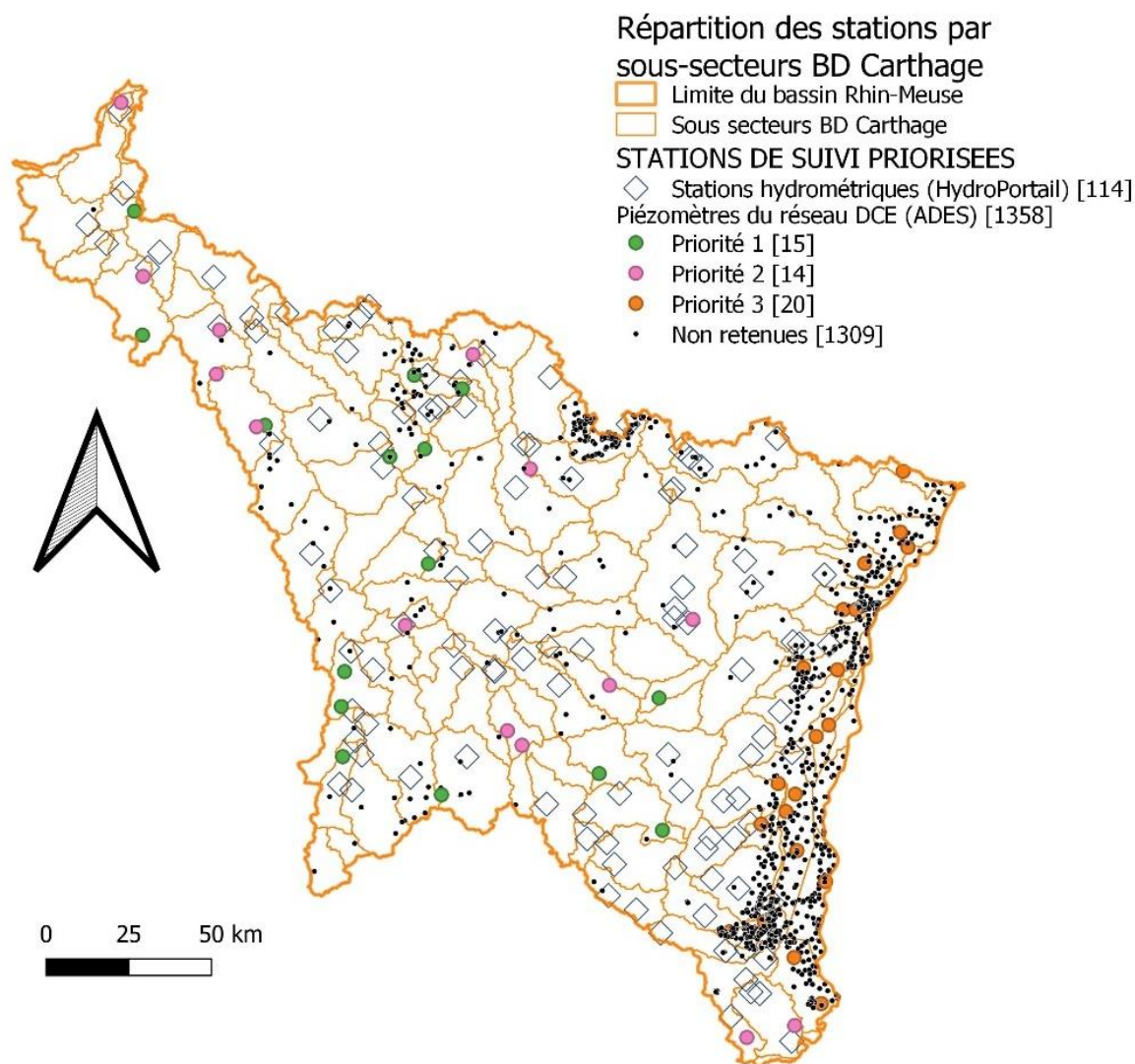


Figure 34 - Cartographie des stations retenues sur le bassin Rhin-Meuse

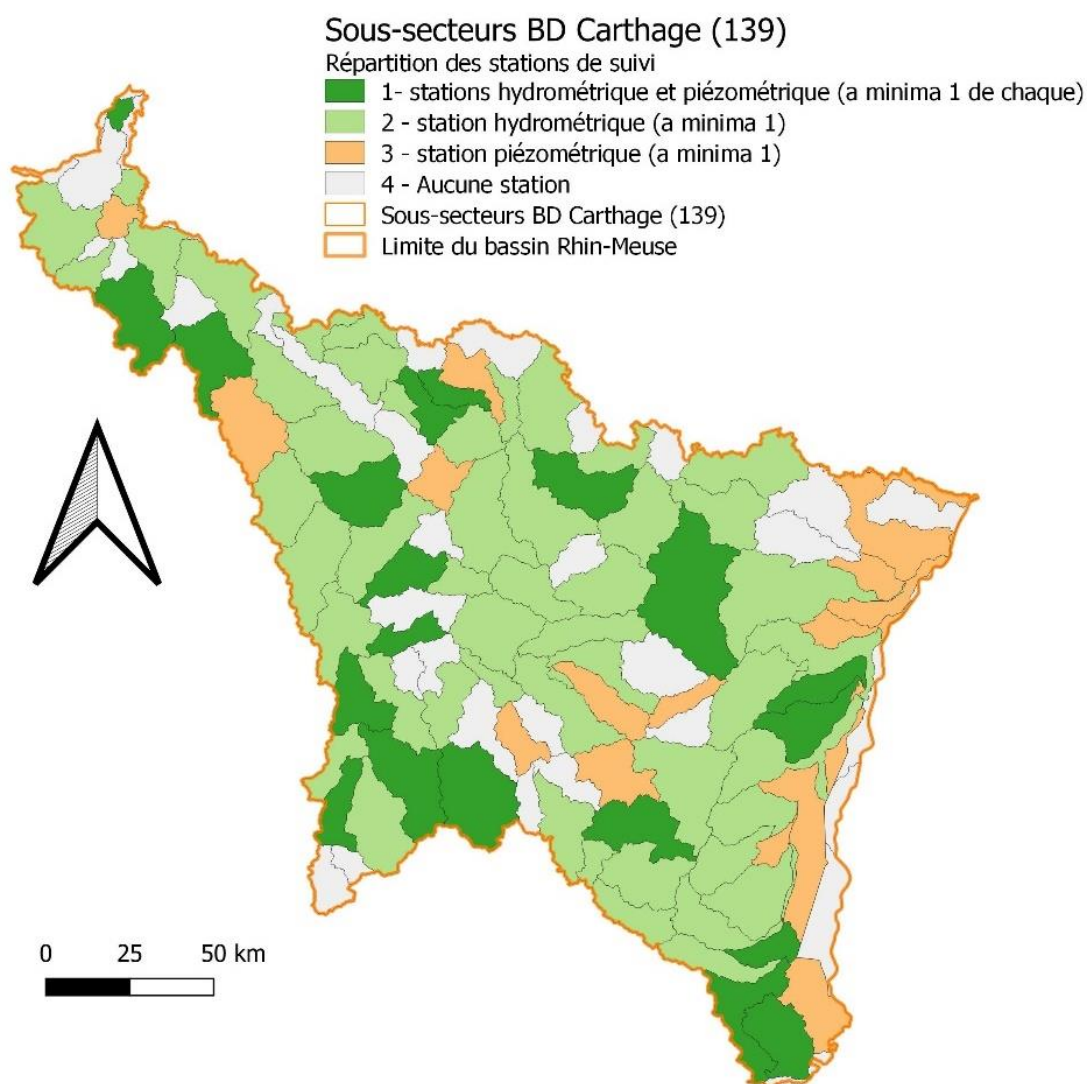


Figure 35 - Cartographie des bassins versants caractérisés par la disponibilité de stations avec des chroniques exploitables

5.4. TYPOLOGIE DES AQUIFERES

Concernant la typologie des aquifères, c'est l'attribut « NATURE », associé à l'entité hydrogéologique de [BDLISA](#) de niveau 3 et ordre 1, qui est utilisé.

Niveau d'utilisation local (NV3) Ex : 141AB03	Unité aquifère [5]	Unité semi-perméable [6]	Unité imperméable [7]
---	--------------------	--------------------------	-----------------------

On retiendra comme prioritaire les bassins versants (Figure 36) ayant une superficie d'entités perméables ou semi-perméables supérieure à 75 % (66 BV) ou à 50 % (37 BV).

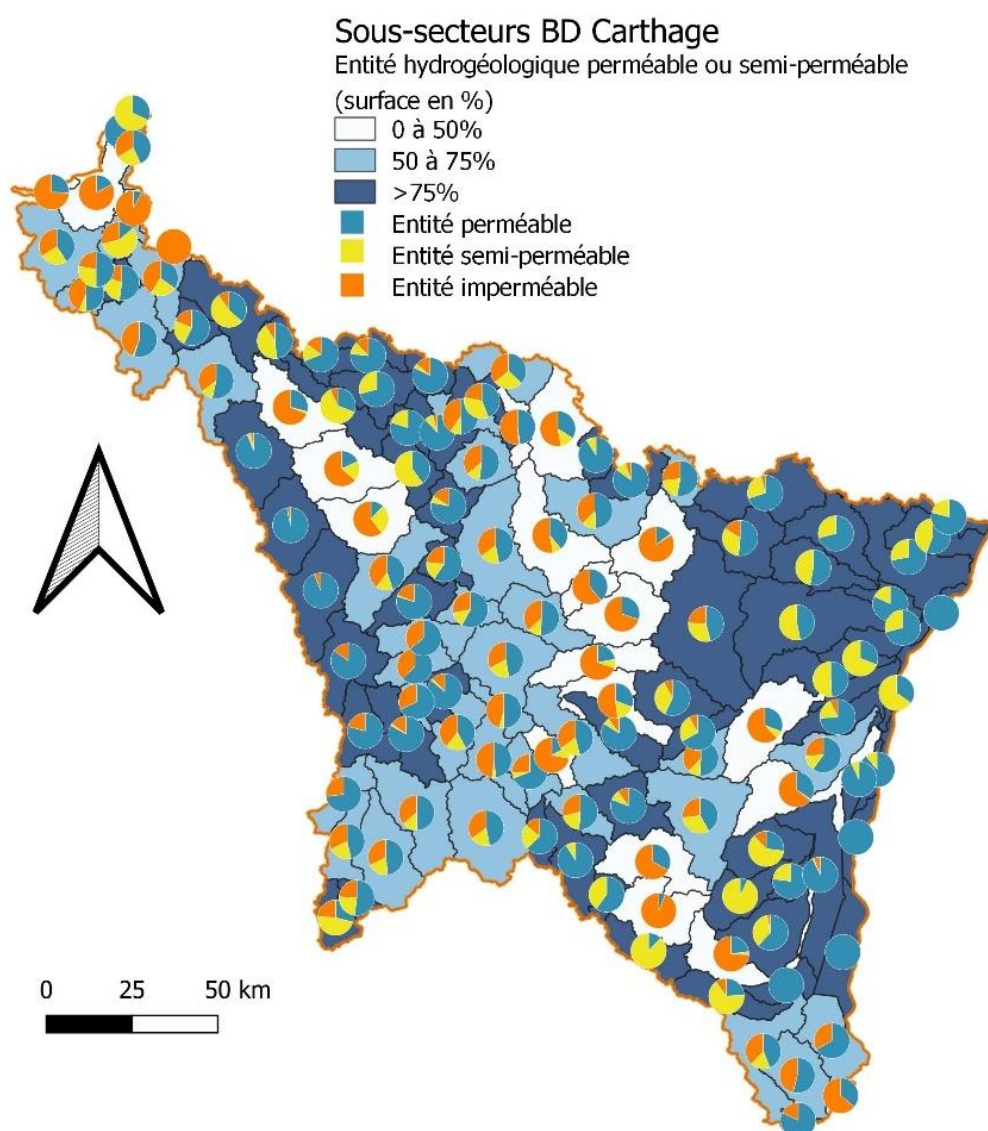


Figure 36 - Cartographie des bassins versants caractérisés par la présence majoritaire d'entités hydrogéologiques perméables ou semi-perméables

5.5. SELECTION FINALE DES BASSINS VERSANTS

Pour finir, on aboutit à une sélection (Tableau 5 et Figure 37) de 8 bassins versants dont 4 moyennement anthropisés et 4 faiblement anthropisés sur lesquels la modélisation devrait pouvoir s'opérer. La sélection ne porte pas sur des bassins très anthropisés tels que la Meuse à Charleville, la Meurthe ou la Moselle dans l'axe Nancy-Metz. En effet les bassins hydrologiques définis en amont des stations hydrologiques sont généralement trop grands, la variabilité hydrogéologique trop forte et les suivis pas forcément adaptés au traitement par modélisation.

Le choix s'est donc porté sur des bassins versants de taille raisonnable disposant des chroniques « Pluie/Débits » nécessaires à la modélisation et représentatifs des principales formations aquifères du bassin Rhin-Meuse (Figure 38) [à l'exception des formations alluviales, des zones de socle et des nappes captives] :

- Calcaires du Muschelkalk ;
- Calcaires de l'Oxfordien ;
- Calcaires du Dogger ;
- Grès du Trias à l'affleurement ;
- Cailloutis pliocènes du Sundgau.

Pour deux bassins versants (La Meuse à Chalaines et la Bar à Cheveuges), il a été retenu plusieurs piézomètres (respectivement 3 et 2). Les modélisations mises en œuvre s'attacheront à choisir le plus pertinent en termes de résultat (meilleur calage pluie-niveau-débit).

Numéro BV	Sous Secteur	Surface BV initial (source HydroPortail)	Surface BV resultat modélisation (EROS)	Surface entité perméable [5] %	Surface entité semi-perméable [6] %	Surface entité imperméable [7] %	Kcb_moy	Anthropisation	Station hydrométrique		Station piézométrique	
BV1	A10	229	202,363	62%	0 %	38 %	0,968	faible	A1050310	L'III a Altkirch	04457X0046/S	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH
BV2	A11	245	227,293	54%	15 %	31 %	0,934	faible	A1150200	La Lague a Spechbach-le-Bas	04761X0021/F1	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE
BV3	A52	382	379,529	48%	23 %	29 %	0,842	moyenne	A5261020	Le Madon a Mirecourt [crues]	03384X0037/PZ	Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE
BV4	A71	228	182,4	81%	0 %	19 %	0,980	faible	A7122010	L'Esch a Jezainville	01937X0054/F	Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE
BV7	B13	1711	1533,968	53%	16 %	31 %	0,836	moyenne	B1340010	La Meuse a Chalaines	02667X0014/FE2	Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES
BV8	B51	392	470,4	55%	0 %	45 %	0,849	moyenne	B5172010	La Bar a Cheveuges	01102X0025/S1	Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

Tableau 5 – Synthèse des caractéristiques sur les bassins versants sélectionnés (périmètre amont de la station hydrométrique)

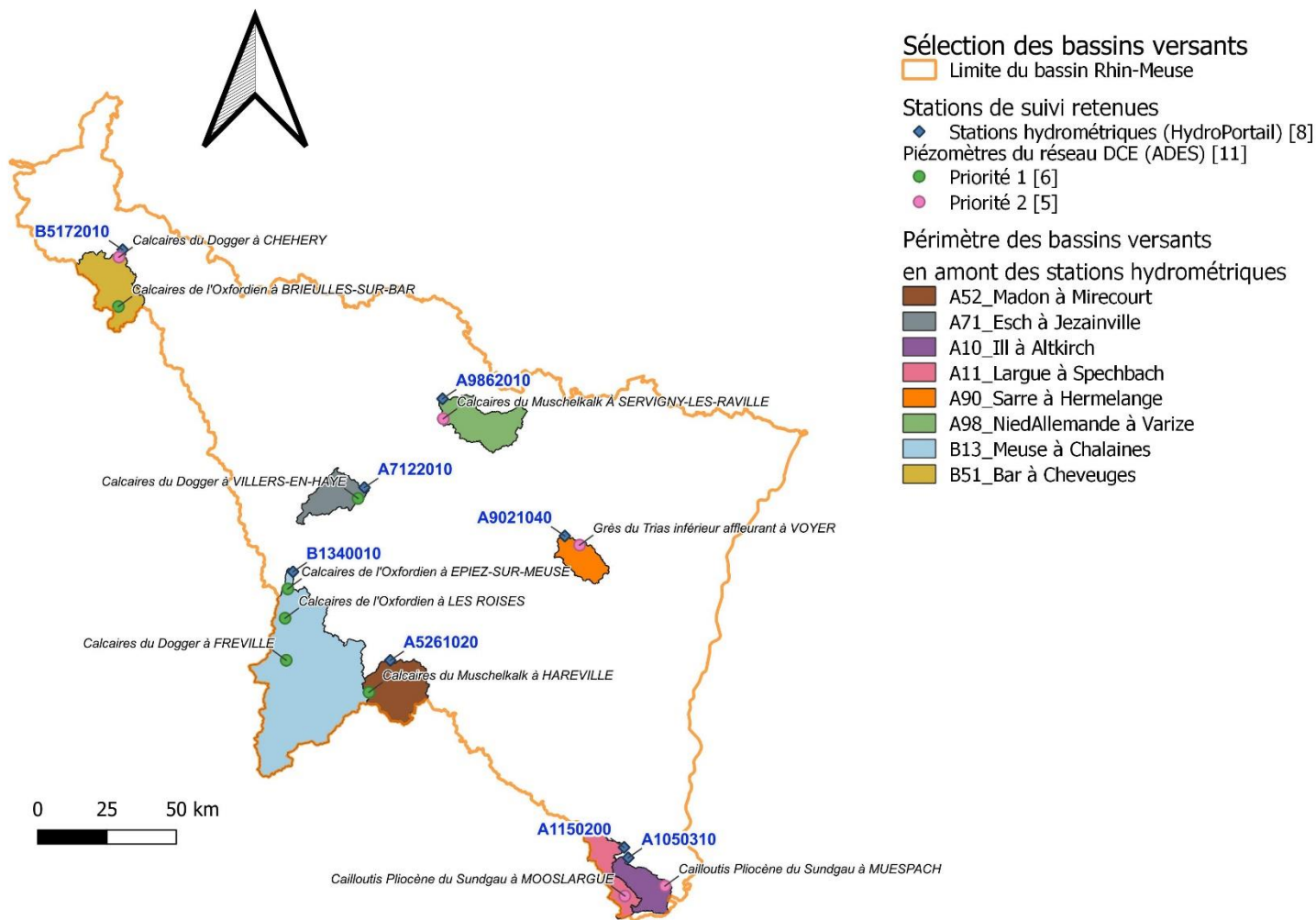


Figure 37 – Cartographie des bassins versants sélectionnés pour la modélisation

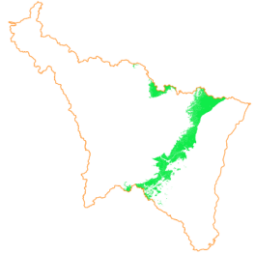
Aquifères du bassin RM	Potentiel aquifère	Surface à l'affleurement EH (km2)	EH Ordre 1	Carte
Calcaires de l'Oxfordien <i>Bassins : La Meuse a Chalaines La Bar a Cheveuges</i>	intéressant	1951	135AA	
Calcaires du Dogger <i>Bassins : La Meuse a Chalaines La Bar a Cheveuges L'Esch a Jezainville</i>	important	4052	139AM 139AN 139AP	
Calcaires du Muschelkalk <i>Bassins : Le Madon a Mirecourt La Nied Allemande a Varize</i>	hétérogène	1796	143AE	
Grès du Trias à l'affleurement <i>Bassins : La Sarre a Hermelange</i>	important	2516	143AK	
Cailloutis pliocènes du Sundgau <i>Bassins : L'Ill a Altkirch La Lague a Spechbach-le-Bas</i>	faible	311	225AC	

Figure 38 – Principales formations aquifères du bassin Rhin-Meuse auxquelles peuvent être rattachés les bassins versants sélectionnés

6. Modélisations à l'échelle de 8 bassins versants

6.1. METHODOLOGIE

Le logiciel [ÉROS](#) (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins), développé par le BRGM, sert à la modélisation hydrologique par bilan [Pluie - Débit de rivière - Niveau de nappe] d'un bassin versant hétérogène découpé en sous-bassins. Il est en fait constitué d'une grappe de modèles hydrologiques globaux à réservoirs (type [GARDENIA](#) développé par le BRGM).

A partir de la séquence des données météorologiques (précipitations solides et liquides, évapotranspiration potentielle ou ETP, température de l'air), il permet de calculer :

- Le débit dans les cours d'eau à l'exutoire de tout ou partie des sous bassins ;
- Le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente dans tout ou partie des sous bassins.

Il offre de plus les fonctionnalités suivantes :

- Prise en compte des effets de pompages ou d'injections en rivière ;
- Prise en compte de la fonte des neiges ;
- Établissement à l'échelle des sous bassins d'un bilan Pluie - Évapotranspiration réelle - Ruissellement - Infiltration à la nappe sous-jacente ;
- Génération, dans les bassins et sous bassins, de longues séries de débits ou de niveaux piézométriques à partir d'historiques de pluies, après calibration préalable sur une période plus courte ;
- Analyse de l'influence du changement climatique sur les débits et les niveaux piézométriques ;
- Analyse de cohérence entre observations climatiques et observations des débits ou des niveaux piézométriques.

Le modèle, une fois calibré, est en mesure :

- De reconstituer, pour un bassin versant donné, les débits des rivières, et les niveaux piézométriques en un point des nappes sous-jacentes, durant une période pendant laquelle on ne possède pas de mesures (combler des lacunes) ;
- De simuler des débits résultant de périodes de sécheresse (débits d'étiage ou dimensionnement de barrage) ou de séquences de précipitations exceptionnelles (risques d'inondations) ;
- De simuler des niveaux piézométriques ponctuels de nappe à partir de précipitations effectivement observées, prolongées par des scénarios de précipitations prévisionnels (sécheresses, périodes de hautes eaux) ;
- De prévoir l'influence du changement climatique sur un grand bassin à partir de scénarios de pluie et d'évapotranspiration potentielle.

ÉROS est principalement utilisé pour modéliser des bassins versants en connexion hydraulique sous forme de grappe. Bien que les bassins versants soient indépendants les uns des autres (pas de connexion ou de hiérarchisation possible des écoulements), le modèle ÉROS a été choisi dans le cadre de l'étude pour faciliter et optimiser les phases de calage et de simulation des différentes projections climatiques.

6.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION

6.2.1. Fichiers de données

La période de modélisation est constituée de 58 années complètes entre le 01/01/1965 et le 31/12/2022. Sur cette période, on dispose donc :

- De chroniques de débits journaliers des 8 stations hydrométriques retenues, téléchargées sur [HydroPortail](#) ;
- Des chroniques de niveaux d'eau des 11 stations piézométriques, extraites du portail [ADES](#) ;
- Des données journalières de pluie, neige, température de l'air et d'évapotranspiration potentielle (ETP) provenant de la [base SAFRAN de Météo-France](#) et disponibles selon un maillage de 8 km de côté. Les 8 bassins versants sélectionnés sont couverts par 121 mailles SAFRAN (Figure 39).

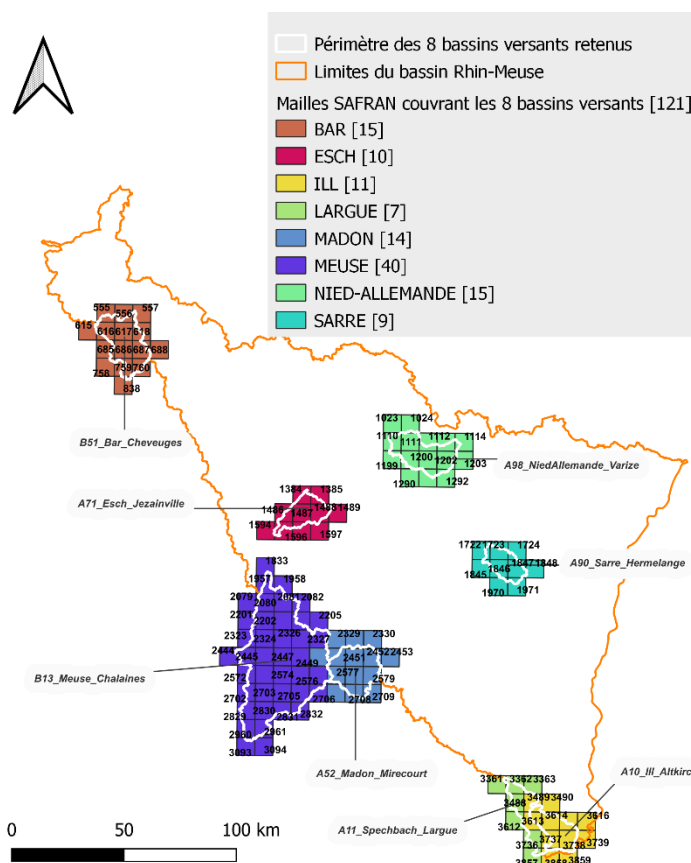


Figure 39 – Carte de situation des bassins versants et couverture des mailles SAFRAN pour la modélisation

On dispose de 6 fichiers de données pour lancer les modélisations :

- Le fichier « Arbre de branchement » des 8 bassins versants tous indépendants ;
- Le fichier des débits journaliers pour les 8 stations hydrométriques ;
- Le fichier des niveaux d'eau pour les 11 stations piézométriques ;
- Le fichier des mailles météorologiques et des pondérations au prorata de la surface de couverture des 8 bassins versants concernés ;
- Les 2 fichiers des données journalières d'ETP et de pluie par maille (la neige n'est pas prise en compte).

6.2.2. Options choisies pour la modélisation

Le fichier (unique) des paramètres et des options d'extension [.parero], définit les options générales et les paramètres hydroclimatiques (capacité des réservoirs sol, temps de tarissement, coefficient de correction de la lame d'eau...) de chaque sous bassin. Les options ont été choisies pour rendre compte d'un meilleur **calage sur les basses eaux (étiages)** plus que sur les hautes eaux (crues) pour respecter la problématique relative à la vulnérabilité des formations à la sécheresse (Figure 40).

Principales options générales voire spécifique à chaque bassin versant	Nombre d'années des séries temporelles : 58
	Données et résultats fournis par années hydrologiques au pas de temps journalier
	Date de la première année des données : 1965
	Nombre d'années de démarrage : 10
	Observations de Débits de rivière : Importance (2/10)
	Observations de Niveaux de nappe : Importance (1/10)
	Pas de prise en compte de la Neige
	Sauvegarde de la Pluie efficace, des Débits et des Niveaux [Simulés-Observés]
	Pondération pour la calibration : Racine_Débit
	c'est à dire la minimisation des écarts sur le logarithme des débits plus adapté pour rendre compte des étiages
	Minimisation du biais sur les Débits de Rivière : minimisation du biais à 10%
	Nombre de réservoirs souterrains : tests réalisés sur 1 et 2 réservoirs
	Méthode de calcul du coefficient d'Emmagasinement : par corrélation
	La superficie du bassin versant (valeur différente pour chaque bassin)
Paramètres hydroclimatiques à calibrer/optimiser pour chaque BV	La pluie efficace moyenne annuelle (pour initialisation = 150 mm/an)
	Niveau de base local (m NGF)
	Correction globale de l'ETP (%)
	Capacité du réservoir sol progressif (mm)
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (mm)
	Temps de ½ percolation vers la nappe (mois)
	Temps de ½ tarissement du réservoir souterrain n°1 (mois)
	Temps de ½ transfert vers la nappe profonde (mois)
	Temps de ½ tarissement du réservoir souterrain n°2 (mois)
	Temps de réaction (« retard ») du débit (pas de temps)
	Facteur d'échange souterrain externe (%)
	Temps de propagation du débit => Bassin aval.
	Temps de 1/2 ruissellement par débordement (pas de temps)
	Temps de 1/2 décroissance maximal du ruissellement (mois)
	Facteur de correction de la superficie du bassin (-)
	Coefficient d'emmagasinement de nappe (%)

Figure 40 – Liste des paramètres et des options utilisés pour la modélisation

6.2.3. Qualité de la calibration obtenue : Coefficient de Nash

La qualité de la simulation, similitude entre les valeurs observées et simulées, est appréciée à partir d'un coefficient d'ajustement dit « **coefficient de Nash** », dont la définition est rappelée en ci-dessous (Figure 41, Figure 42 et Figure 43).

Pour les débits, on note pour les 8 bassins versants étudiés :

- Un coefficient de Nash moyen de 0.91 calculé sur la racine carrée des débits ;
- Un coefficient de Nash moyen de 0.83 calculé sur le débit non-transformé.

Pour les niveaux, on note pour les 8 bassins versants étudiés :

- Un coefficient de Nash moyen de 0.84 calculé sur la racine carrée des niveaux ;
- Un coefficient de Nash moyen de 0.73 calculé sur le niveau non-transformé.

Pour 8 des bassins versants simulés, les débits sont donc globalement très bien simulés : coefficient de Nash supérieur à 0.88 (racine carrée des débits) et 0.77 (débits non-transformés).

Les niveaux sont globalement très bien simulés pour seulement 6 des 8 bassins versants : coefficient de Nash supérieur à 0.89 (racine carrée des niveaux) et 0.79 (niveaux non-transformés). Le calage des niveaux pour les bassins versants n°5 (Sarre à Hermelange - GTI affleurant à VOYER) et 6 (Nied-Allemande à Varize – Calcaires du Muschelkalk à SERVIGNY-LES-RAVILLE) s'avère en revanche non satisfaisant avec les coefficients de Nash inférieur à 0.67 (racine carrée des niveaux) et 0.45 (niveaux non-transformés). Il s'avère en effet que les chroniques piézométriques sont influencées par des pompages sans possibilité à ce stade de tenir compte des prélèvements pour la modélisation.

• Coefficient d'ajustement

Calibration sur une série d'observation unique : observations de débits ou bien observations de niveaux de nappe

Dans le code de calcul GARDÉNIA, le coefficient d'ajustement **F** est défini de la manière suivante :

On note **F2** la grandeur suivante, appelée « critère de Nash » (Nash, 1970) :

$$F2 = 1 - \frac{se^2}{\sigma_o^2}$$

où : se^2 = Moyenne des carrés des écarts de simulation = $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\text{Écart})^2]$

Écart = Écart de simulation = Valeur observée - Valeur calculée

n = Nombre d'écarts

σ_o^2 = Variance des observations (carré de l'écart-type)

(1 - F2) est donc l'erreur quadratique moyenne, normée par la variance des observations.

D'après cette définition :

- F2 varie de $-\infty$ à +1
- F2 = +1 correspond à un ajustement parfait sans aucun écart de simulation.

Dans le cas d'une régression linéaire, F2 serait égal au carré du coefficient de corrélation.

Pour se ramener à un critère de même dimension qu'un coefficient de corrélation, le critère d'ajustement **F** de GARDÉNIA est défini de la manière suivante :

$F = \sqrt[3]{F2}$	si $F2 \geq 0$	=> F positif.
$F = -\sqrt[3]{(-F2)}$	si $F2 < 0$	=> F négatif.

Le coefficient **F** est donc la racine carrée du coefficient de Nash (sauf si ce coefficient de Nash est négatif)

Avec cette définition :

- F varie aussi de $-\infty$ à +1
- F = +1 correspond à un ajustement parfait.

Remarque :

On a un coefficient d'ajustement **F = 0** en particulier dans les cas suivants :

- Si : Valeur calculée(i) = Moy(Valeurs observées) (Simulation constante = moyenne)
- Si : Valeur calculée(i) = Valeur observée(i) + σ_o (Simulation décalée de σ_o).
- Si : Valeur calculée(i) = Valeur observée(i) - σ_o (Simulation décalée de σ_o).

On a un coefficient d'ajustement **F = -1.732** dans les cas suivants :

- Si : Valeur calculée(i) = Valeur observée(i) + $2\sigma_o$ ou Valeur observée(i) - $2\sigma_o$ (Simulation décalée de $2\sigma_o$).

Figure 41 – Rappels sur la notion de coefficient d'ajustement utilisée en modélisation avec les logiciels GARDÉNIA et EROS [Extrait Rapport BRGM/RP-62797-FR]

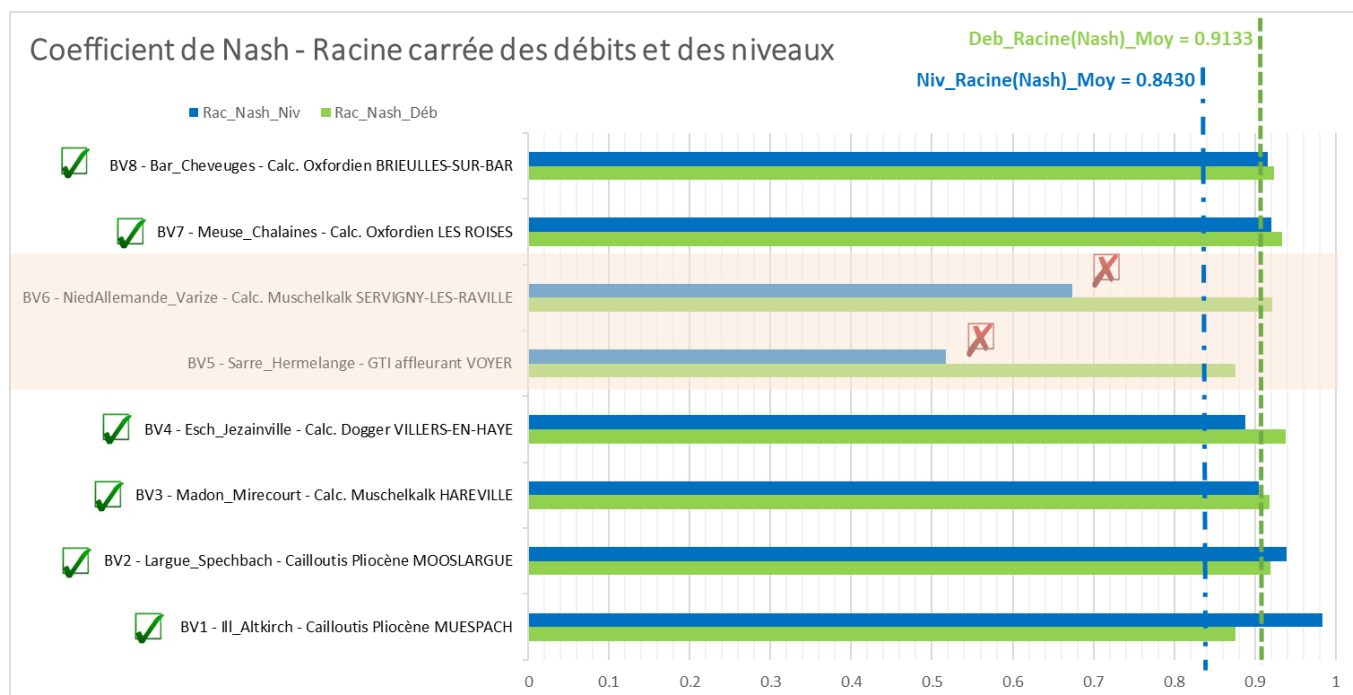


Figure 42 – Coefficient de Nash sur la racine carrée des débits et des niveaux pour les 8 bassins versants modélisés

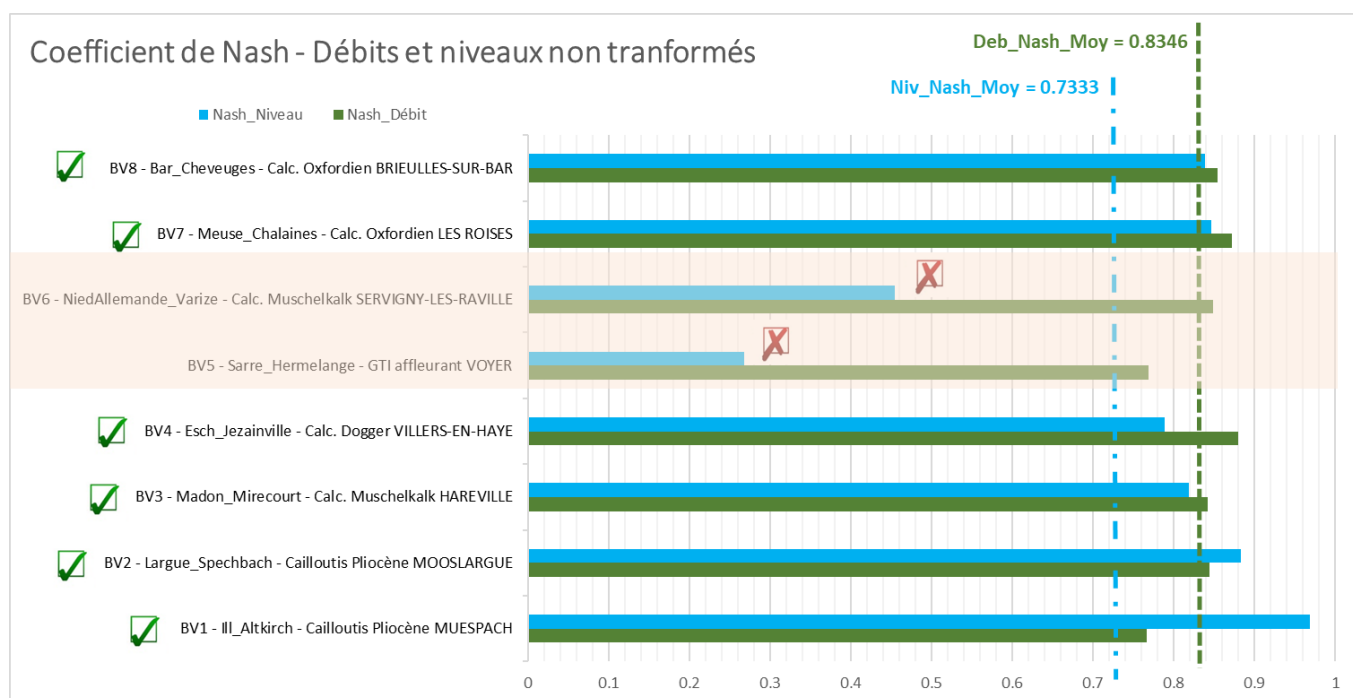
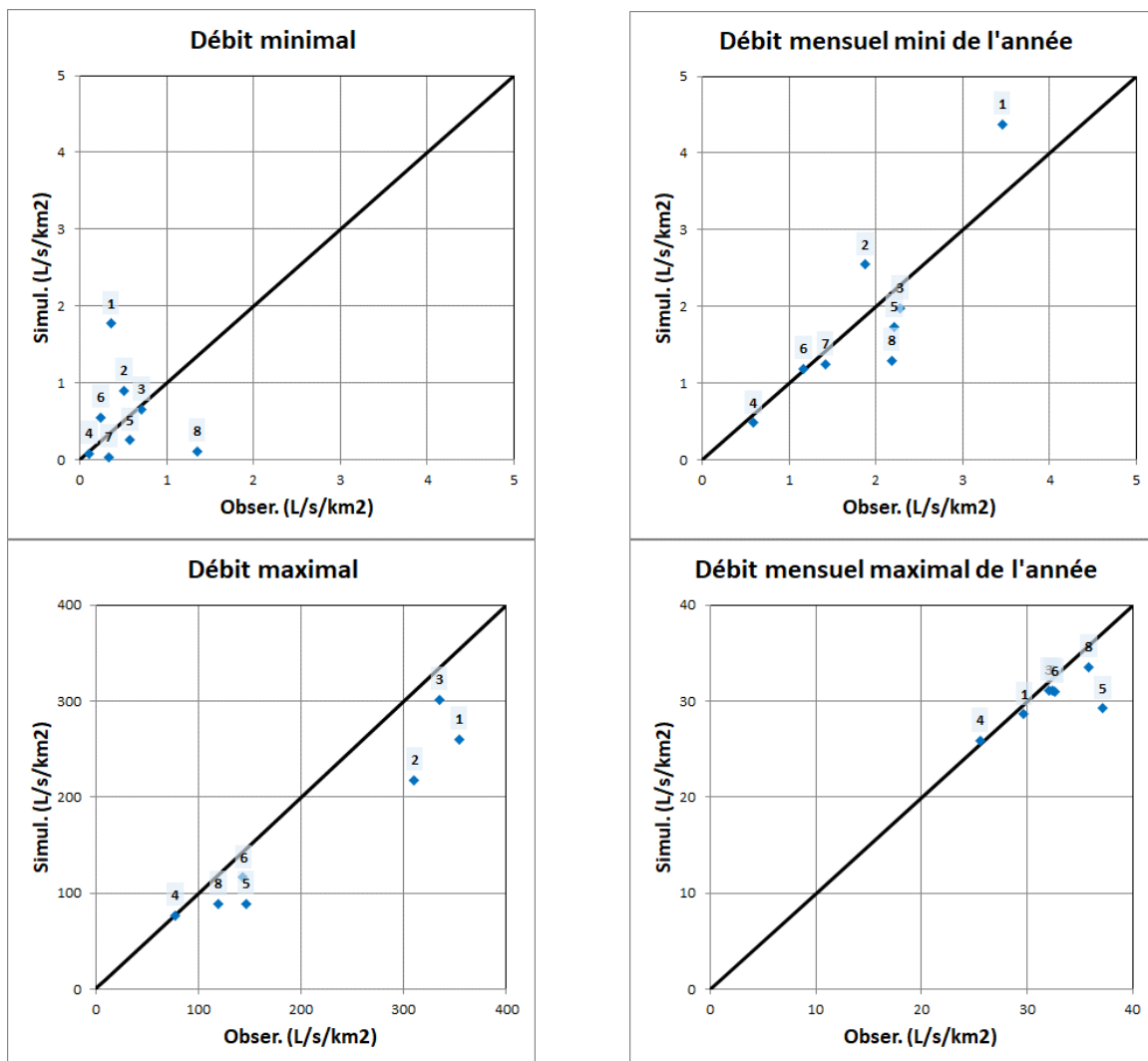


Figure 43 - Coefficient de Nash sur les débits et les niveaux non transformés pour les 8 bassins versants modélisés

6.2.4. Analyse des débits journaliers simulés

La comparaison des débits simulés et observés (en L/s/km² pour s'affranchir de l'effet de la taille des bassins) montre de bons résultats de simulation pour les débits moyen (Figure 44). La tendance globale qui se dessine (qui s'explique par le choix des options détaillé ci-dessus), est que le modèle sous-estime le débit maximal. Pour le débit maximal les valeurs sont globalement sous la bissectrice et pour la moyenne interannuelle du débit mensuel maximal de l'année, la corrélation est plutôt satisfaisante avec quelques valeurs sous la bissectrice (notamment bassins 5 et 8). Concernant le débit minimal, la situation est plus contrastée avec une surestimation pour certains bassins (notamment 1) et une sous-estimation pour d'autres (notamment 8).



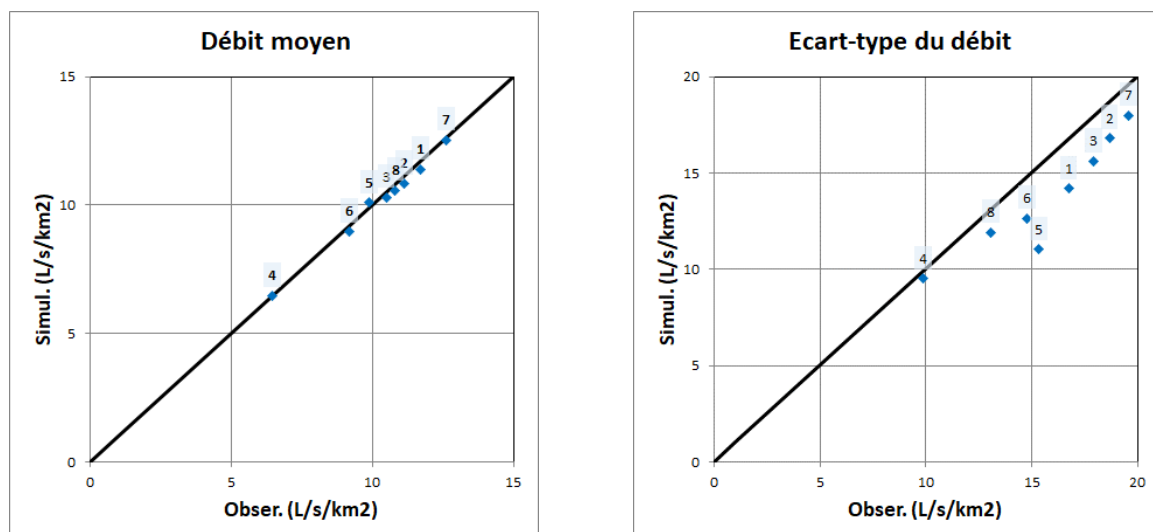
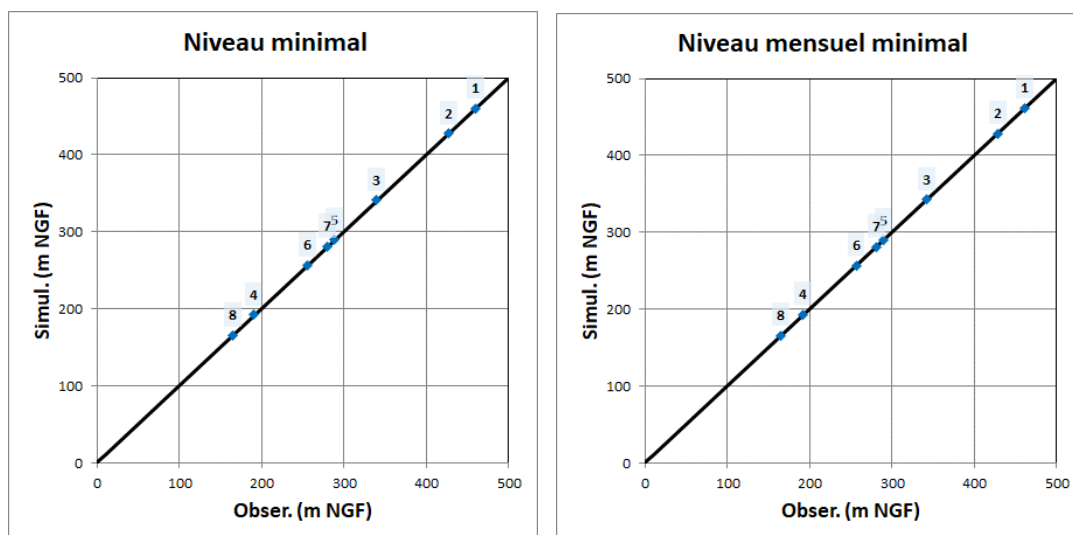


Figure 44 – Comparaison des débits simulés et observés pour les 8 bassins modélisés

L'Annexe 3 présente les graphiques des chroniques de débits journaliers observés et simulés avec EROS sur la période complète (1965-2023) et un zoom sur la période récente 2020-2023 qui permet d'apprécier plus précisément le calage (bonne reproduction des débits simulés par rapport aux débits observés).

6.2.5. Analyse des niveaux journaliers simulés

La comparaison des niveaux simulés et observés (en m NGF) en valeur minimale, maximale moyenne montre de bons résultats de simulation (Figure 45).



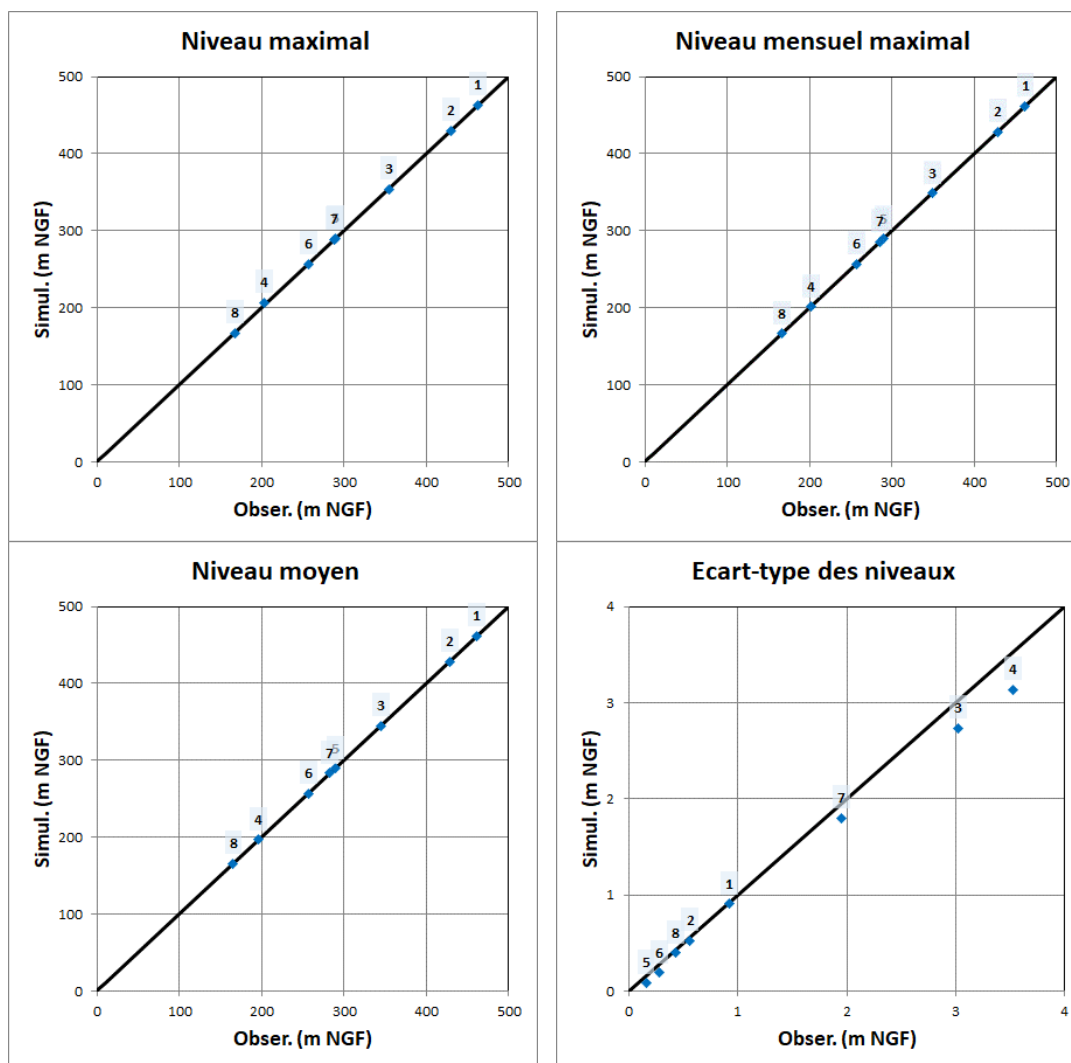


Figure 45 – Comparaison des niveaux simulés et observés pour les 8 bassins modélisés

L'Annexe 4 présente les graphiques des chroniques de niveaux piézométriques journaliers observés et simulés avec EROS sur la période complète (1965-2023) et un zoom sur la période récente 2003-2023 qui permet d'apprécier plus précisément le calage (bonne reproduction des niveaux simulés par rapport aux niveaux observés).

6.2.6. Bilan moyen par bassin

Le module GARDÉNIA fait intervenir, dans sa configuration la plus simple (Figure 46), trois réservoirs (superficiel U, intermédiaire H et souterrain G1) et réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) à chaque pas de calcul. Le calcul comporte deux parties :

- La fonction « production » qui détermine quelle quantité d'eau sera apportée au sous bassin et quelle quantité sera évaporée ou s'infiltrera dans les horizons inférieurs pour ressortir « plus tard » à l'exutoire du sous bassin ;
- La fonction « transfert » détermine à quel moment l'eau qui n'a pas été évapotranspirée ressortira à l'exutoire du bassin ou arrivera à la nappe. Le transfert s'effectue par passage à travers les deux réservoirs inférieurs du module (H et G1).

Dans sa configuration la plus complexe (Figure 46), quatre réservoirs sont utilisés : un superficiel U, un intermédiaire H et deux souterrains G1 et G2. Les simulations réalisées ont conduit à tester les deux modes de fonctionnement avec une amélioration du calage dans la configuration complexe à deux réservoirs.

Le **réservoir sol U** représente les premières dizaines de centimètres du sol soumis à l'action des racines de la végétation et à l'évaporation. Le schéma utilisé est celui d'un « réservoir sol progressif » avec des lois quadratiques, fonction de l'état de remplissage de ce réservoir. C'est le schéma conseillé par les utilisateurs de GARDENIA au détriment du type « réserve utile » qui donne généralement de moins bons résultats de calibration.

Le **réservoir intermédiaire H**, servant uniquement au transfert, se vidange par deux exutoires : la percolation dans le réservoir souterrain G1 et l'écoulement rapide (Q_{rapid} = écoulement superficiel) composante du débit à la station jaugée d'origine superficielle.

Le **réservoir souterrain G1**, représentant l'aquifère, produit l'écoulement lent (Q_{sout} = écoulement de base) composante du débit à la station jaugée d'origine souterraine.

Le **réservoir souterrain G2**, représentant un aquifère profond ou une partie inférieure de l'aquifère est alimenté en eau par le réservoir souterrain G1 et est vidangé uniquement par un débit très lent (ou « écoulement souterrain lent »).

Le bilan hydrologique sur les bassins versants est équilibré lorsque :

$\text{Pluie} + \text{Neige} + \text{Pompage_Napp} + Q_{\text{Éch_Sout}} - \text{ETR} - Q_{\text{Rapide}} - Q_{\text{Souter_1}} - Q_{\text{Souter_2}} - \text{Dif_Stock} = 0$
--

Les simulations ont été faites à ce stade sans la prise en compte de la neige et des chroniques de prélèvements ou de rejets en nappe ou en rivière sur chacun des bassins versants, l'influence du terme *Pompage* sur le bilan n'a pas donc pu être prise en compte.

Les graphiques suivants (Figure 47 et Figure 48) permettent de comparer pour chaque bassin versant modélisé la part de chacun des termes du bilan.

Le **débit d'échange souterrain externe** ($Q_{\text{Éch_Sout}}$) est un des critères du calage qui permet de prendre en compte :

- Les gains de débits (échange souterrain > 0) correspondant aux écoulements souterrains provenant d'un bassin versant voisin → 7 et 14 mm pour les BV respectifs n°8 et 7, soit 2 à 4 % de la pluie efficace ;
- Les pertes de débits (échange souterrain < 0) correspondant aux écoulements non comptabilisés (non mesurés) à l'exutoire (station). Cette partie de l'écoulement peut être transféré à l'extérieur du bassin et réapparaître dans un bassin versant voisin latéral ou en aval de la station de mesure → entre -18 et -61 mm pour les BV n°1 à 6, soit 5 à 14 % de la pluie efficace.

La **variation de stock en eau dans le sol** (Dif_stock) se calcule par différence entre la pluie en entrée et l'évapotranspiration réelle + la percolation vers le réservoir souterrain en sortie. Elle est comprise entre - 4.8 mm pour BV n°5 et -1.4 mm pour BV n°6. La différence de stock est négligeable au regard des quantités écoulés (< 1 %).

En termes d'écoulement, on retiendra également les éléments suivants :

- L'**écoulement souterrain** représente entre 7 % (BV n°4, BV n°6) et 20% (BV n°3, BV n°8) de l'écoulement total ($Q_{\text{rapid}} + Q_{\text{souter_1}} + Q_{\text{souter_2}}$) ;
- L'**écoulement souterrain pour le réservoir 2** est faible (< 1 %) sauf pour le BV n°3 (11 %) ;
- L'**écoulement rapide** représente entre 17 % et 31 % du bilan, soit entre 46 et 76 % de la pluie efficace.

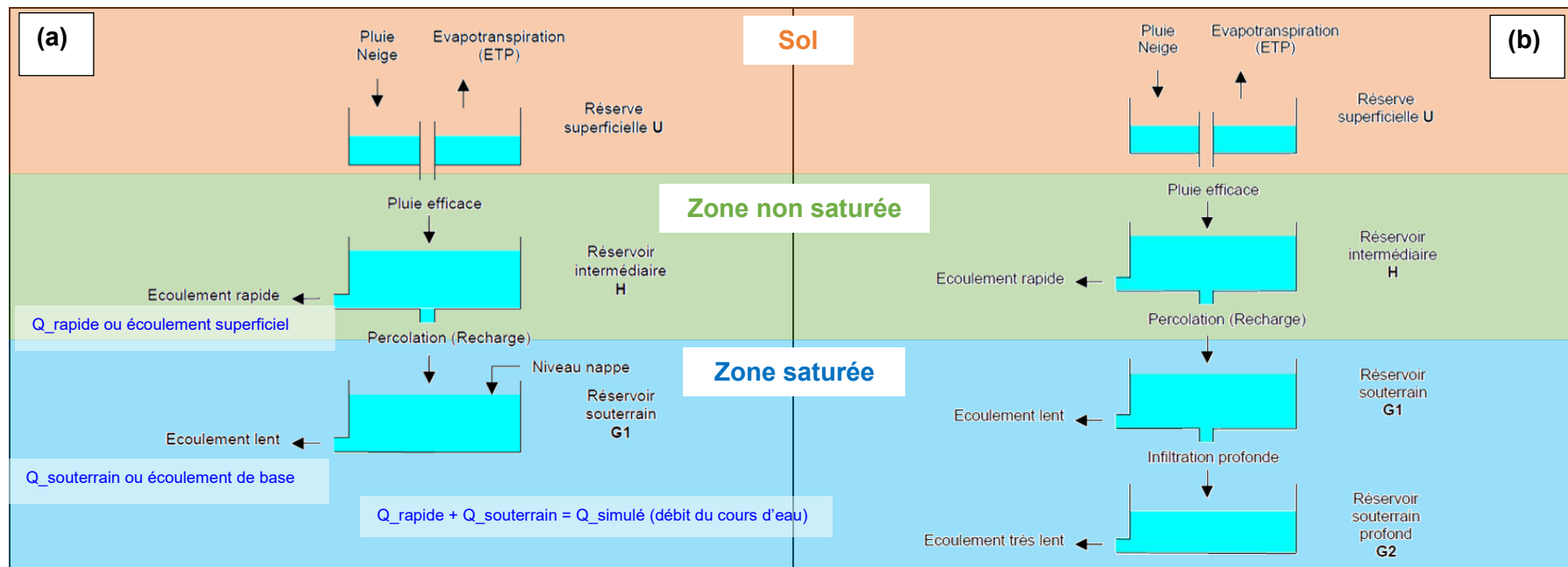


Figure 46 - Module GARDENIA représentant un bassin versant : (a) Schéma le plus simple, un seul réservoir souterrain et (b) Schéma complexe, deux réservoirs souterrains

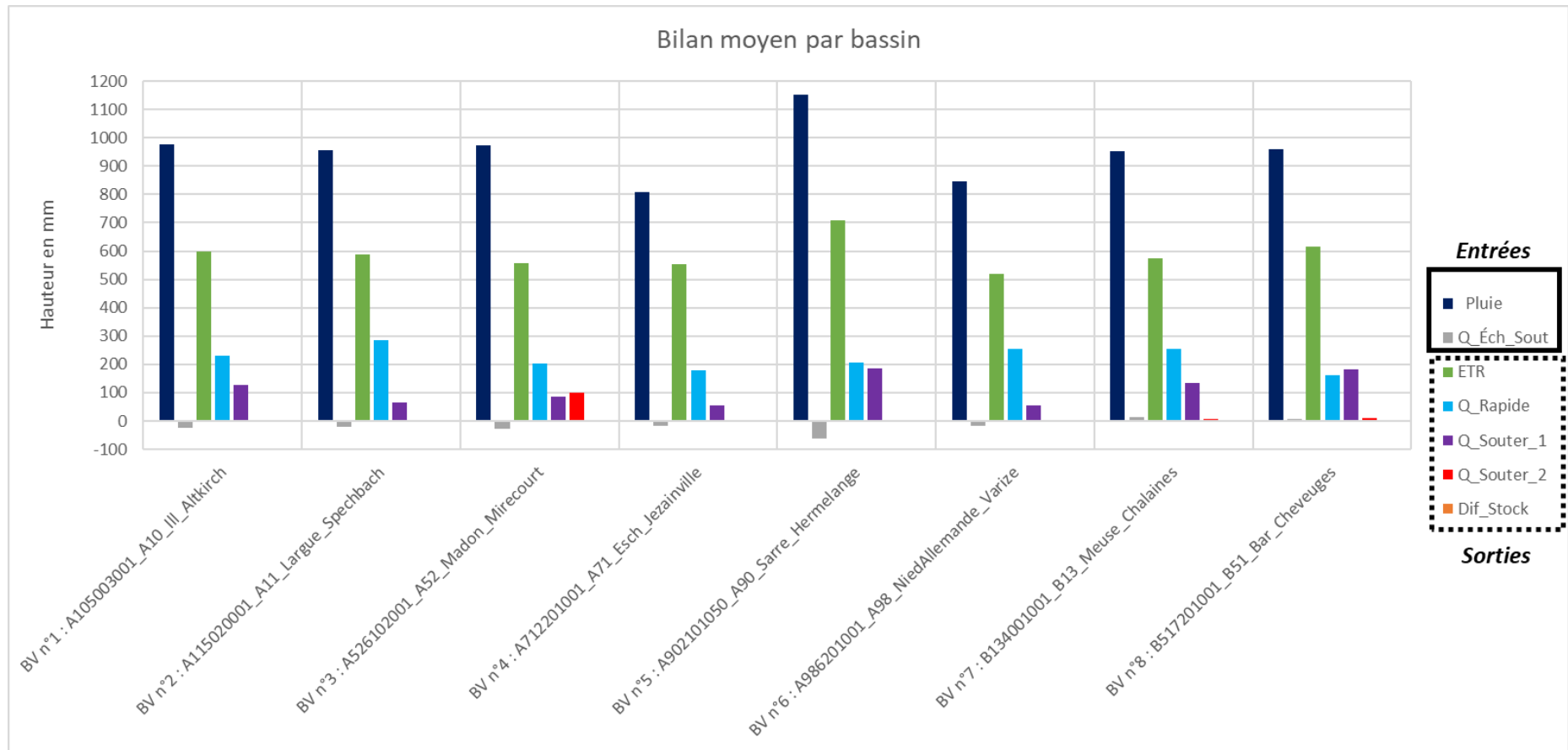


Figure 47 – Histogramme des termes du bilan moyen sur la période de simulation (1965-2023) pour les 8 bassins versants modélisés

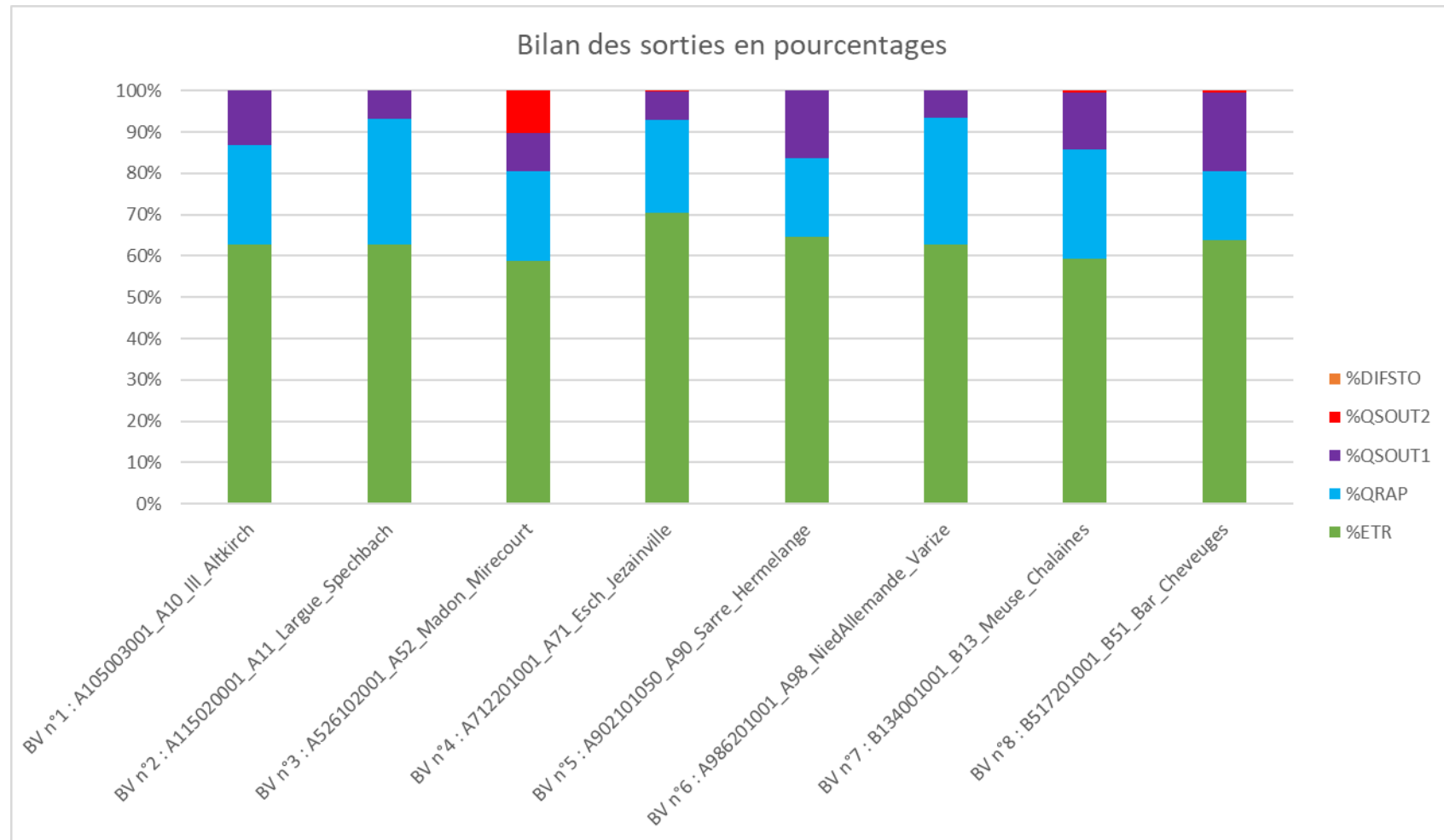


Figure 48 – Histogramme cumulé des termes du bilan des sorties en pourcentages sur la période de simulation (1965-2023) pour les 8 bassins versants modélisés

6.3. MISE EN ŒUVRE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES

6.3.1. Méthodologie appliquée

Une fois la calibration du modèle effectuée, les simulations prospectives ont été effectuées sur la base des projections climatiques retenues lors de la première phase de l'étude, soit 12 couples MCG (modèle climatique global) et MCR (modèle climatique régional) pour une seule méthode de correction et de descente d'échelle (ADAMONT). Cela correspond au total à 34 simulations (Figure 49) : 12 simulations sur la période historique, 10 simulations pour le RCP 4.5 et 12 simulations pour le RCP 8.5.

MCR (modèle climatique régional)	MCG (modèle climatique global)						Méthode de correction et de descente d'échelle	Périodes disponibles	
	CNRM-CM5	EC-EARTH	HadGEM2	IPSL-CM5A	MPI-ESM	NorESM1		historique	future
ALADIN63 (CNRM) France	RCP 4.5 et 8.5						ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	RCP 4.5 et 8.5	RCP 4.5 et 8.5					ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RCA4 (SMHI) Suède		RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe			RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RegCM4-6 (ICTS/ESP) International			RCP 8.5				ADAMONT	1981-2010	2041-2100
WRF381P (NCAR) USA				RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
HIRHAM5 (DMI) Danemark						RCP 4.5 et 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2009 (CSC) Allemagne					RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2015 (CSC) Allemagne						RCP 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100

12 couples MCG/MCR au total / RCP = Representative Concentration Pathway

Projection climatique retenus pour l'étude locale	MCG modèle climatique global	MCR modèle climatique régional	
SC01	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	ALADIN63 (CNRM) France	Narratif jaune : Changements futurs relativement peu marqués
SC02	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	
SC03	ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	
SC04	ICHEC-EC-EARTH	RCA4 (SMHI) Suède	
SC05	IPSL-CM5A-MR	WRF381P (NCAR) USA	
SC06	IPSL-CM5A-MR	RCA4 (SMHI) Suède	
SC07	MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe	Narratif violet : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations
SC08	MOHC-HadGEM2-ES	RegCM4-6 (ICTS/ESP) International	
SC09	MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe	
SC10	MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009 (CSC) Allemagne	
SC11	NCC-NorESM1-M	HIRHAM5 (DMI) Danemark	
SC12	NCC-NorESM1-M	REMO2015 (CSC) Allemagne	

Figure 49 – Liste des projections climatiques utilisées dans l'étude locale (bassin Rhin-Meuse)

6.3.2. Difficultés rencontrées dans le choix des projections, retour d'expérience d'Explore2 et impact sur l'étude

La première difficulté rencontrée au démarrage de l'étude locale sur le Bassin Rhin-Meuse en 2021 fut le choix concernant les projections climatiques et la mise à disposition des données.

L'étude locale pour ne pas être rapidement obsolète devrait s'inscrire dans le contexte national, qui offrait des perspectives importantes de connaissance par le biais des projets LIFE Eau & Climat (2020-2024) et le projet Explore2 (2021-2024). La réunion de restitution de ces deux projets s'est tenue conjointement le 28 juin 2024 (<https://www.seminaire-explore2-lifeeauclimat.oieau.fr/programme.html>).



Les délais et les circonstances ont conduit à mener le projet local sur le Bassin Rhin-Meuse en parallèle avec les projets nationaux, sans toutefois y être intégré.

Ainsi le choix des projections climatiques pour le projet local s'est fait courant 2022 conjointement avec les équipes du BRGM en charge des projections hydrologiques souterraines d'Explore2. Le retour d'expérience d'Explore2 a conduit notamment à l'abandon du choix initial de ne retenir que 5 couples MCG/MCR de la *short list* issue du jeu DRIAS-2020.

Lors de la restitution du 28 juin 2024, il a été précisé que le projet Explore 2 avait testé trois scénarios de gaz à effet de serre [RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5], 17 couples MCG/MCR et 2 méthodes de correction et de descente d'échelle ([CDF-t](#) et [ADAMONT](#)). Deux choix s'offraient pour la synthèse des résultats : la méthode probabiliste (produit de distribution statistique) ou l'approche narrative (sélection de quelques projections contrastées). C'est cette dernière approche « narrative » qui a finalement été présentée pour le volet « climat » lors de la restitution (Figure 50). Pour le volet « souterrain », l'approche locale reste cohérente avec l'approche nationale (2 RCP 4.5 et 8.5, médianes de l'ensemble des projections pour trois horizons 2021-2050, 2041-2070, 2071-2100, déclinaisons saisonnières).

Il subsiste néanmoins des différences entre l'approche locale (basées sur les données de 2022) et l'approche nationale qui a fait évoluer le choix des projections climatiques entre 2022 et 2024. On notera que l'étude locale utilise 22 projections climatiques (dont 2 particulièrement humides qui n'ont finalement pas été reprises dans l'étude nationale) contre 17 pour l'étude nationale (Figure 51). De plus l'étude locale ne peut faire référence qu'à deux des 4 narratifs de l'étude nationale (narratifs jaune et violet) car les 2 projections climatiques concernées par les narratifs orange et vert n'ont pas été traitées dans l'étude locale. Ces différences seront prises en compte dans l'interprétation des résultats de l'étude locale pour notamment mettre en perspectives d'éventuels biais.

4 narratifs	Narratif vert (MOHC-HadGEM2-ES/CNRM-ALADIN63) « Réchauffement marqué et augmentation des précipitations »,	<i>uniquement étude nationale (EXPLORE 2)</i>
	Narratif jaune (CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/CNRM-ALADIN63) « Changements futurs relativement peu marqués »,	<i>commun études nationale et locale</i>
	Narratif orange (ICHEC-EC-EARTH/MOHC-HadREM3-GA7-05) « Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) »,	<i>uniquement étude nationale (EXPLORE 2)</i>
	Narratif violet (MOHC-HadGEM2-ES/CLMcom-CCLM4-8-17) « Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations ».	<i>commun études nationale et locale</i>

Figure 50 – Narratifs retenus pour l'interprétation des résultats d'Explore2

Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations

MCR (modèle climatique régional)	MCG (modèle climatique global)						Méthode de correction et de descente d'échelle	Périodes disponibles	
	CNRM-CM5	EC-EARTH	HadGEM2	IPSL-CM5A	MPI-ESM	NorESM1		historique	future
ALADIN63 (CNRM) France	RCP 4.5 et 8.5		RCP 8.5				ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	RCP 4.5 et 8.5	RCP 4.5 et 8.5					ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RCA4 (SMHI) Suède		RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe			RCP 4.5 et 8.5		RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
RegCM4-6 (ICTS/ESP) International			RCP 8.5		RCP 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
WRF381P (NCAR) USA				RCP 4.5 et 8.5			ADAMONT	1981-2010	2041-2100
HIRHAM5 (DMI) Danemark				RCP 8.5		RCP 4.5 et 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2009 (CSC) Allemagne					RCP 4.5 et 8.5		ADAMONT	1981-2010	2041-2100
REMO2015 (CSC) Allemagne						RCP 8.5	ADAMONT	1981-2010	2041-2100
MOHC-Had-REM3-GA7-05	RCP 8.5	RCP 8.5	RCP 8.5						
IPSL-WRF381P						RCP 8.5			

LEGENDE

12 couples MCG/MCR au total / RCP = Representative Concentration Pathway

17 couples MCG/MCR au total / RCP = Representative Concentration Pathway

ETUDE NATIONALE (EXPLORE 2)

ETUDE LOCALE

ETUDE NATIONALE (EXPLORE 2) ET LOCALE

Figure 51 – Comparaison des projections climatiques utilisées dans l'étude nationale (Explore2) et dans l'étude locale (bassin Rhin-Meuse)

6.4. INTERPRETATION DES RESULTATS SUR LA RECHARGE POTENTIELLE

La modélisation a permis de produire pour chaque bassin versant (BV), chaque projection climatique (SC01 à SC12)¹⁴ et chaque RCP (RCP 4.5 et RCP 8.5), un bilan hydrologique au pas de temps journalier comprenant la recharge (terme « Alim_sout » = Alimentation du réservoir souterrain) sur 4 périodes de 30 ans :

- La période de référence ou historique (01/08/1976 au 31/07/2005) ;
- La période future dite horizon 1 ou H1 (01/08/2021 au 31/07/2050) ;
- La période future dite horizon 2 ou H2 (01/08/2041 au 31/07/2070) ;
- La période future dite horizon 3 ou H3 (01/08/2070 au 31/07/2099).

A partir de ces chroniques journalières (468 fichiers), on a procédé aux calculs du cumul des écarts relatifs au pas de temps mensuel et annuel pour tous les bassins versants, toutes les projections climatiques et les 3 périodes considérées (H1, H2, H3). A titre d'exemple, pour la projection climatique SC01, le bassin versant n°1 et la période future H1 (2021-2050), on a la formule suivante :

$$(RSC01BV1H1 - RSC01BV1REF) / RSC01BV1REF$$

Avec

RSC01BV1H1 = Recharge pour la projection climatique n°1, le BV1, sur la période future H1

RSC01BV1REF = Recharge pour la projection climatique n°1, le BV1, sur la période de référence

Les résultats annuels et mensuels obtenus pour l'ensemble des projections ont été traités statistiquement pour obtenir les valeurs minimales et maximales, les moyennes, les médianes ainsi que les quantiles 5 % et 95 % sur chaque période future de 30 ans (H1, H2, H3). On dispose ainsi les écarts du cumul annuel et saisonnier de recharge potentielle.

Avertissement : L'interprétation des variations entre la période future et la période de référence est basée sur trois types d'approches afin de tenir compte notamment des incertitudes :

- *L'approche globale/tendancielle ou l'estimation des variations en termes d'ordre de grandeur : on évoque ainsi des valeurs statistiques établies par RCP à partir des résultats issus des différentes modélisations prenant en compte les 22 projections climatiques. Etant donné le choix des projections effectué (notamment la prise en compte de 2 scénarios particulièrement humides), l'interprétation peut être entachée de biais ;*
- *L'approche multiple qui rend compte du champ des possibles : on compare entre eux les résultats des différentes projections climatiques. Dans ce cas, on fait l'hypothèse d'une équiprobabilité des différentes projections climatiques pour un même RCP ;*
- *L'approche narrative : on s'intéresse à deux 2 projections climatiques particulières (2 des 4 narratifs d'Explore2) retenues par leur représentativité contrastée :*
 - *Changements futurs relativement peu marqués ;*
 - *Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations.*

¹⁴

Couples MCG (modèle climatique global) et MCR (modèle climatique régional)

6.4.1. Écarts en moyenne annuelle sur la recharge potentielle

➤ Comparaison des résultats des différentes projections climatiques par bassin versant

Les 12 graphiques (2 RCP X 6 BV) de la Figure 52 permettent de comparer les écarts relatifs de **recharge moyenne annuelle** entre la période future et la période de référence pour chacune des projections climatiques. On retiendra la grande dispersion des résultats et les tendances suivantes :

Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation de la recharge aussi bien pour le RCP 4.5 que pour le RCP 8.5 entre respectivement 9 % (BV7) et 18 % (BV1).

Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à la diminution de l'ordre de – 17 % à – 20 % pour les BV1 et BV2 (Sundgau), tandis que pour les autres bassins l'évolution est plus modérée (- 3 % à + 4 %) voire nulle.

➤ Comparaison des résultats statistiques par bassin versant et RCP

Les 6 graphiques (2 RCP X 3 horizons) de la Figure 53 permettent de comparer les écarts relatifs de **recharge moyenne annuelle** entre la période future et la période de référence pour chacun des 6 bassins versants. Pour tous les bassins et les 2 RCP, les écarts entre les valeurs minimales et maximales sont très importants et traduisent la dispersion des résultats des différentes projections qui augmentent généralement au fil du temps ($H1 > H2 > H3$). En valeur médiane, l'évolution de la recharge est toujours positive donc à la hausse à l'horizon 2100 de l'ordre de + 9 % à 12 % pour le RCP 4.5 et + 5 % à + 11 % pour le RCP 8.5.

6.4.2. Écarts en moyenne saisonnière sur la recharge potentielle

➤ Comparaison des résultats statistiques par bassin versant et RCP

Les 6 graphiques (2 RCP X 3 horizons) de la Figure 54 permettent de comparer les écarts relatifs de **recharge moyenne saisonnière** entre la période future et la période de référence pour les 6 bassins versants étudiés.

Les évolutions sur les 6 BV sont toutes à la hausse pour les 2 RCP et les 3 horizons pour l'hiver (DJF) et le printemps (MAM), avec des évolutions plus marquées pour l'hiver sur le RCP 8.5/H3 (+ 20 à + 27 %).

A contrario les évolutions sont à la baisse notamment pour le RCP 4.5/H1 pour l'été (- 4 à – 8 %) et l'automne (jusqu'à – 7 %). Pour le RCP 4.5/H2 la baisse est très marquée pour l'été (- 7 à – 10 %) et tantôt en hausse (pour les BV3 à BV8) tantôt en baisse pour l'automne (pour les BV1 et BV2 du Sundgau). Pour le RCP 4.5/H3, les baisses se maintiennent en automne et en été pour les 2 BV du Sundgau mais sont plus faibles ; les hausses en automne sur les autres bassins sont plus importantes (+ 7 à + 14 %).

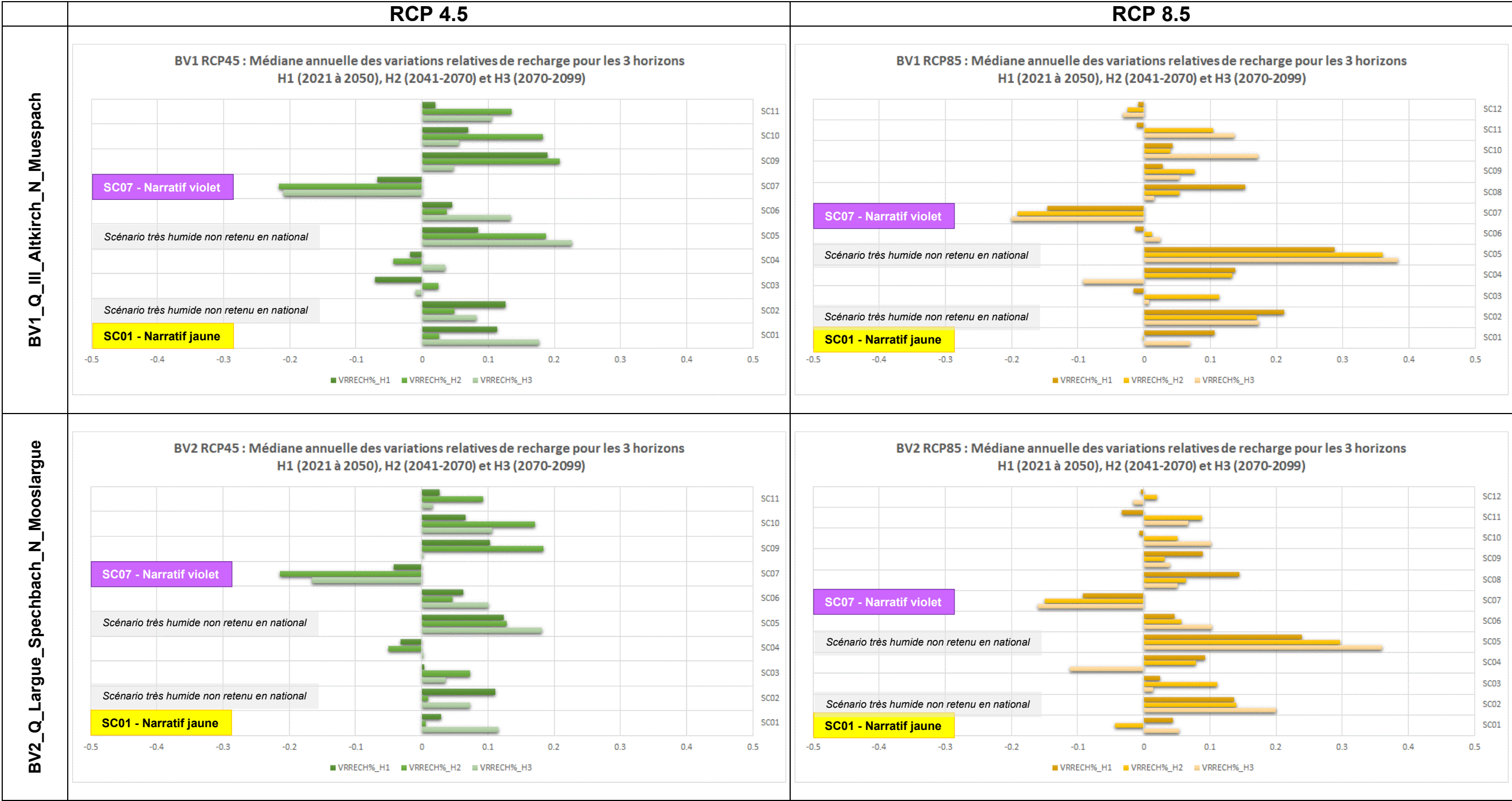
Pour le RCP 8.5, les horizons se distinguent par l'ampleur croissante des variations au fil du temps globalement à la hausse pour l'ensemble des bassins et des saisons hiver, printemps, automne. L'été se distingue toujours par des baisses sur quasi tous les bassins à l'horizon 2 et 3. L'évolution spécifique des BV du Sundgau est toujours visible avec une baisse de la recharge à l'automne de - 7 à – 8 %.

➤ **Comparaison des résultats des différentes projections climatiques par bassin versant**

Le détail des variations par projection climatique (SC01 à SC12) est donné en Annexe 5 avec 6 graphiques par bassin versant pour les 2 RCP et les 3 horizons.

Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à la hausse de la recharge en hiver (10 % à 21 % en fonction des bassins versants considérés). L'évolution pour les autres saisons est plus contrastée pour chacun des BV et entre RCP 4.5 et RCP 8.5. Le plus impacté par la baisse de la recharge en été (- 16 %) et en automne (- 5 %) est le BV7 pour RCP 8.5.

Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à la hausse de la recharge en hiver pour les 2 RCP et tous les BV (1 % pour le BV1 à 21 % pour le BV3). Pour les BV3, BV4, BV7, BV8, le printemps est impacté par une hausse de la recharge de 11 à 17 % ; pour les BV1 et BV2, le RCP 4.5 conduit à une augmentation de 2 à 3 % tandis que le RCP 8.5 conduit à une baisse de - 2 % à - 3 %. Les saisons estivale et automnale présentent une baisse de la recharge de - 3 % (BV1 RCP 4.5) à - 60 % (BV2 RCP 8.5).





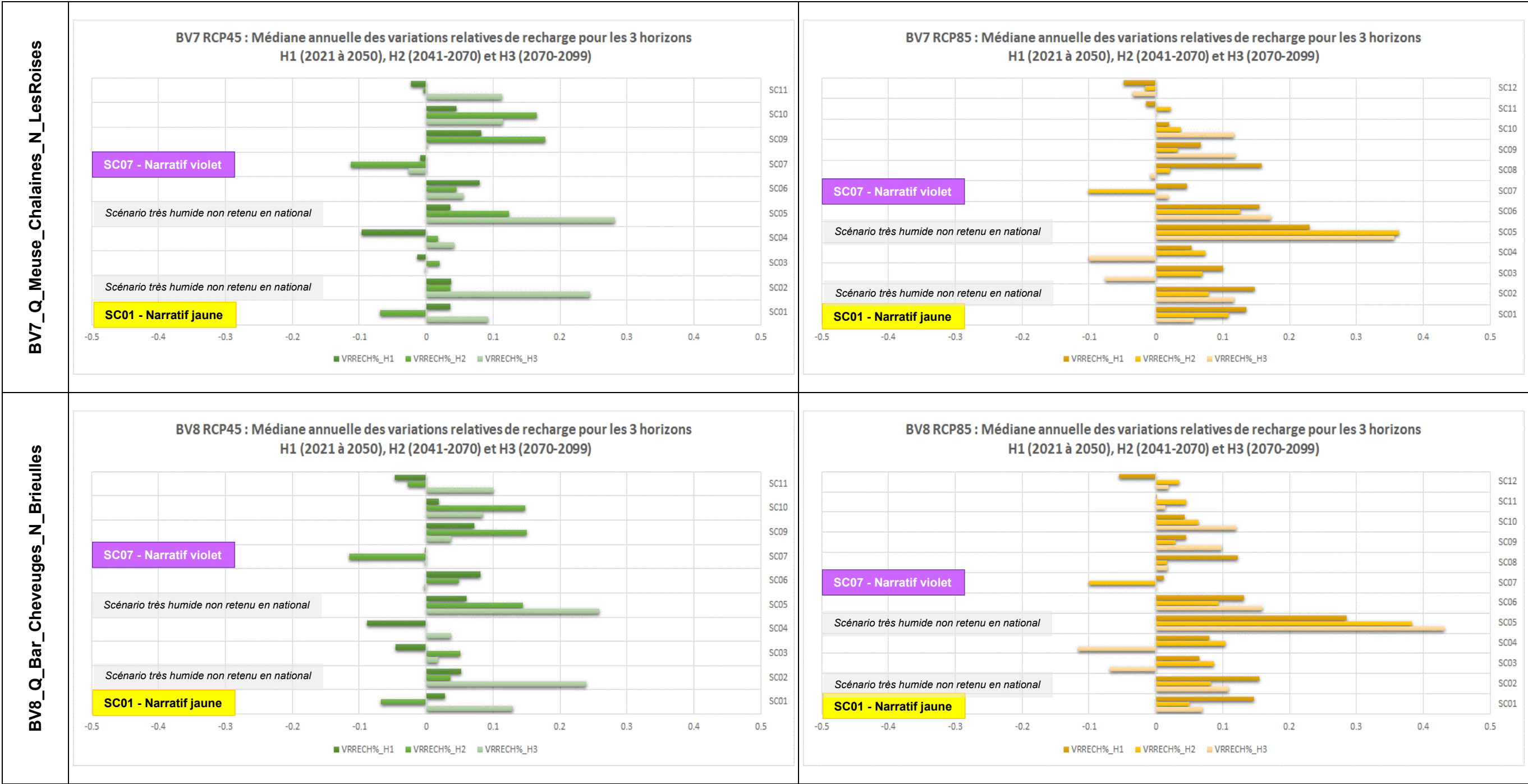
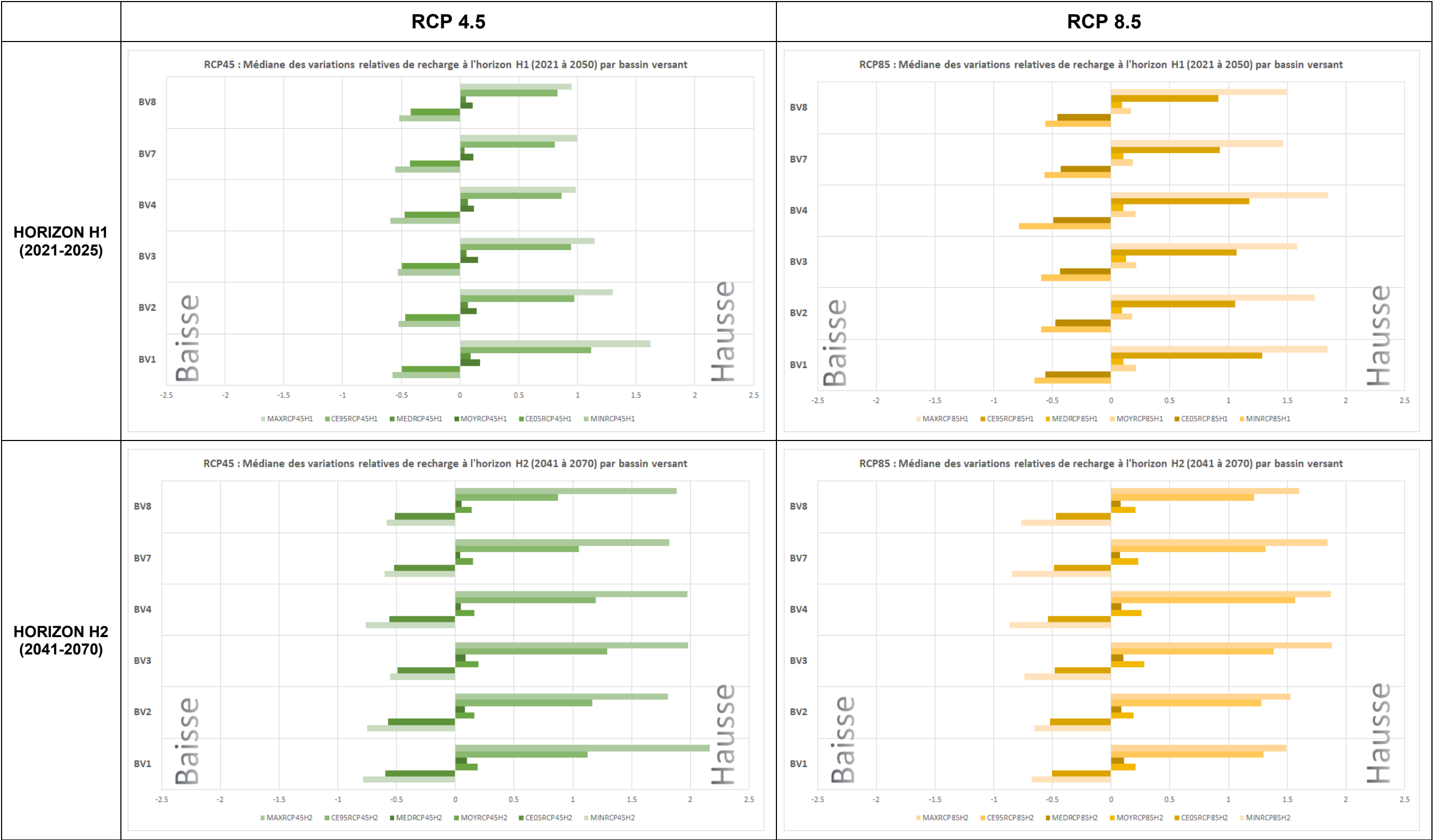


Figure 52 – Graphiques par RCP et par BV pour chaque projection climatique : Ecarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle [(recharge période future – recharge période de référence)/recharge période de référence]



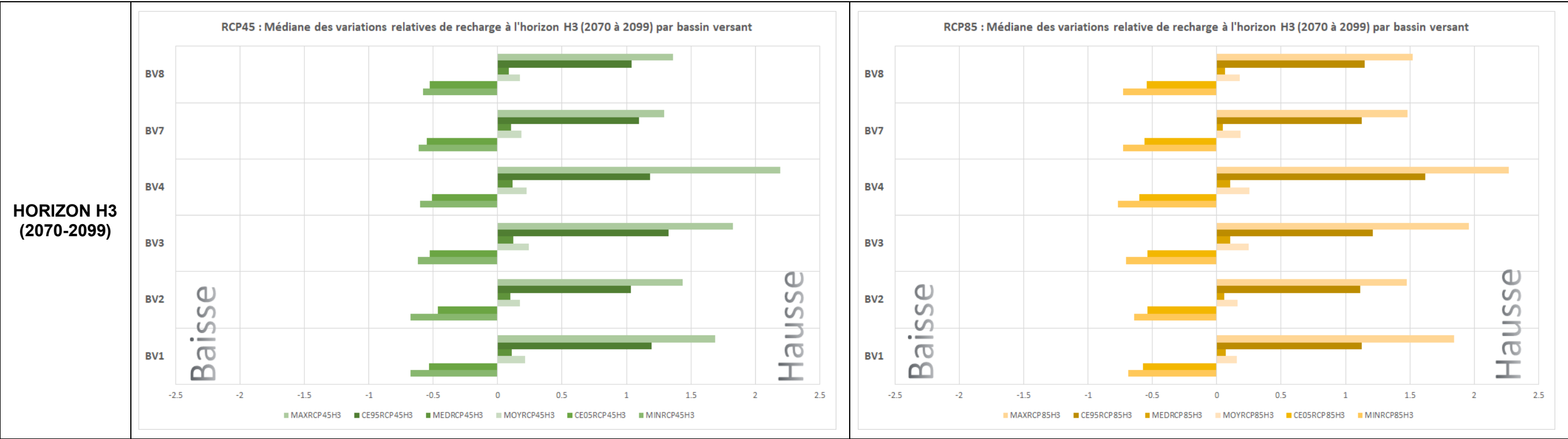
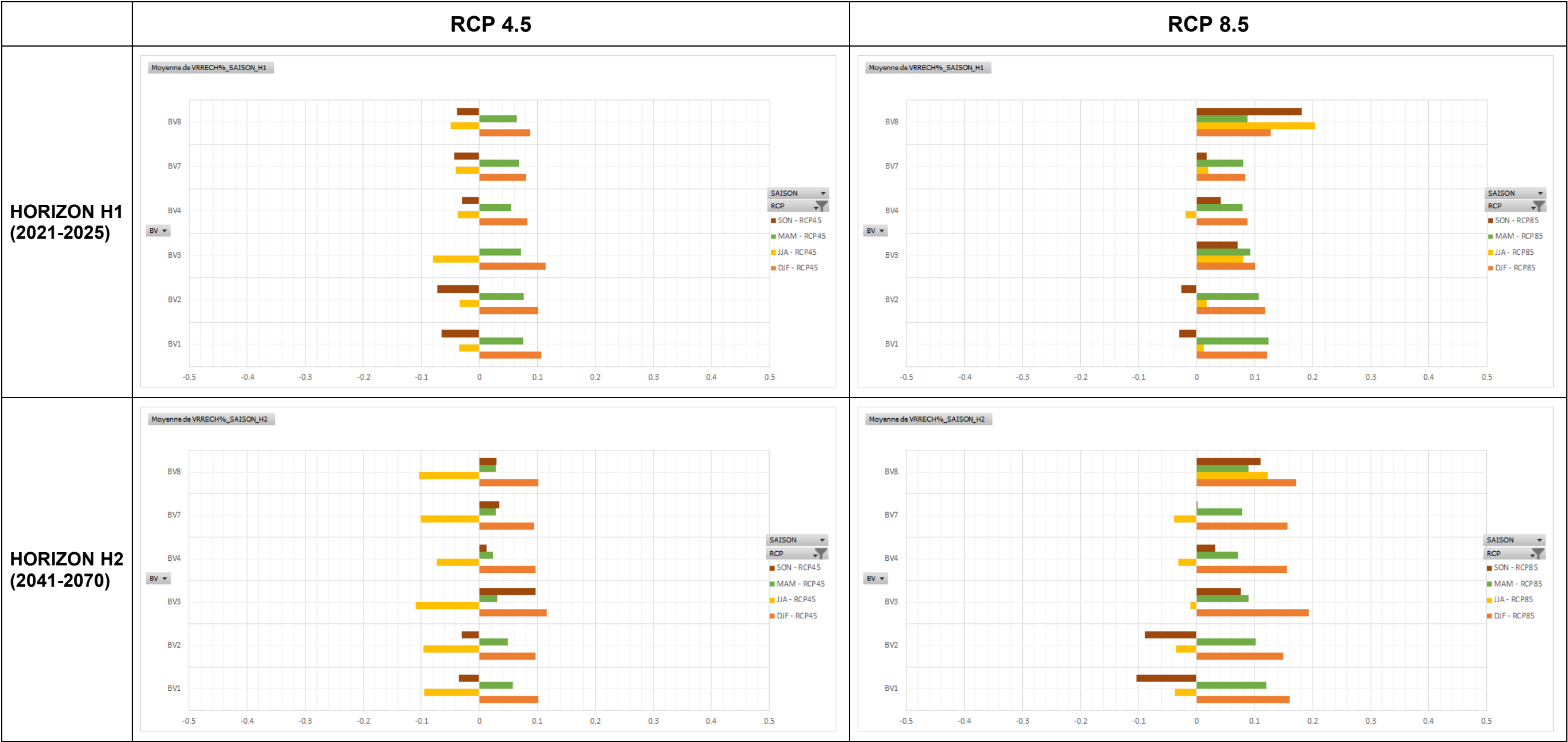


Figure 53 - Graphiques par RCP et par horizon pour chaque BV : Ecarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle $[(\text{recharge période future} - \text{recharge période de référence}) / \text{recharge période de référence}]$



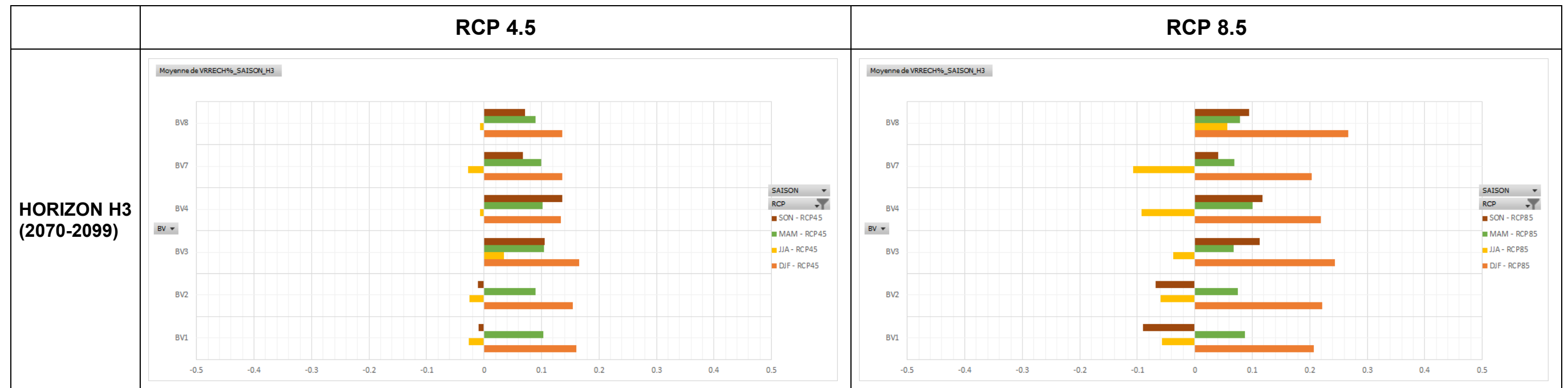


Figure 54 - Ecarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière [(recharge période future – recharge période de référence)/recharge période de référence]

6.5. INTERPRETATION DES RESULTATS SUR LES NIVEAUX DE NAPPE

La modélisation a permis de produire pour chaque bassin versant (BV), chaque projection climatique (SC01 à SC12) et chaque RCP (RCP 4.5 et RCP 8.5), une chronique piézométrique « simulée » au pas de temps journalier sur 4 périodes de 30 ans :

- La période de référence ou historique (01/08/1976 au 31/07/2005) ;
- La période future dite horizon 1 ou H1 (01/08/2021 au 31/07/2050) ;
- La période future dite horizon 2 ou H2 (01/08/2041 au 31/07/2070) ;
- La période future dite horizon 3 ou H3 (01/08/2070 au 31/07/2099).

À partir de ces chroniques journalières (78 fichiers), on a procédé aux calculs des écarts de niveau de nappe en mètres au pas de temps journalier pour tous les bassins versants, toutes les projections et les 3 périodes considérées.

Les résultats obtenus ont été traités statistiquement pour obtenir au pas de temps annuel et mensuel les valeurs minimales, moyennes et maximales, sur chaque période future de 30 ans pour chaque RCP et chaque BV. On obtient ainsi les écarts des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne annuelle et en moyenne saisonnière.

Avertissement : *L'interprétation des variations entre la période future et la période de référence est basée sur trois types d'approches afin de tenir compte notamment des incertitudes :*

- *L'approche globale/tendancielle ou l'estimation des variations en termes d'ordre de grandeur : on évoque ainsi des valeurs statistiques établies par RCP à partir des résultats issus des différentes modélisations prenant en compte les 22 projections climatiques. Etant donné le choix des projections effectué (notamment la prise en compte de 2 scénarios particulièrement humides), l'interprétation peut être entachée de biais ;*
- *L'approche multiple qui rend compte du champ des possibles : on compare entre eux les résultats des différentes projections climatiques. Dans ce cas, on fait l'hypothèse d'une équiprobabilité des différentes projections climatiques pour un même RCP ;*
- *L'approche narrative : on s'intéresse à deux 2 projections climatiques particulières (2 des 4 narratifs d'Explore2) retenues par leur représentativité contrastée :*
 - *Changements futurs relativement peu marqués ;*
 - *Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations.*

6.5.1. Ecart en moyenne annuelle sur le niveau piézométrique

➤ Comparaison des résultats des différentes projections climatiques par bassin versant

Les graphiques de la Figure 55 sont réalisés à partir des résultats de calcul pour chaque projection climatique, en distinguant les 2 narratifs jaune (SC01 - carré jaune pour RCP 4.5 et rond jaune pour RCP 8.5) et violet (SC07 - carré violet pour RCP 4.5 et rond violet pour RCP 8.5) ainsi que les projections utilisées en local mais non reprise en nationale pour leurs caractéristiques particulièrement humides (SC02 avec carré évidé rouge pour RCP 4.5 et rond évidé rouge pour RCP 8.5 et SC05 avec carré évidé bleu pour RCP 4.5 et rond évidé bleu pour RCP 8.5).

On notera pour tous les horizons une grande dispersion des résultats (Figure 55) entre les différentes projections notamment pour le BV1 situé dans le Sundgau (entre une augmentation des niveaux piézométriques de plus de 3 m et une diminution au-delà de 1.5 m). Pour le BV8, situé dans les Ardennes, la dispersion est plus faible (entre une augmentation d'environ 40 cm et une diminution d'environ 10 cm à l'horizon 2100). Cette dispersion fait écho à l'importante variabilité spatiale mise en évidence à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse au cours de l'étape 1 concernant les variations de recharge.

On identifie bien sur les graphiques de la Figure 55, au sommet de la pile pour chaque BV, les projections non retenues dans l'étude nationale (SC02 et SC05) qui conduisent aux plus fortes augmentations de niveau de nappe.

Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation plutôt dans la moyenne des différentes projections utilisées entre + 0.02 m sur BV8 et + 0.89 m sur BV1 pour RCP 4.5 et entre + 0.03 m sur BV8 et + 0.71 m sur BV1 pour RCP 8.5.

Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est tantôt à la baisse pour les BV1 et BV2 tantôt à la hausse pour les autres bassins. L'ordre de grandeur des variations est compris entre - 1.6 m pour BV1 RCP 8.5 et + 0.38 pour BV3 RCP 4.5.

➤ **Comparaison des résultats statistiques par bassin versant et RCP**

Les graphiques de la Figure 56 illustrent la synthèse des statistiques des différentes projections climatiques (minimum, moyenne, maximum) réalisés pour chaque BV et chaque RCP. On notera pour tous les horizons une grande dispersion des résultats.

Les écarts de niveaux piézométriques en moyenne annuelle (Figure 56) sont tous positifs (RCP 4.5 aussi bien que RCP 8.5) et se situent à l'horizon 2100 entre + 0.03 m (RCP 4.5) pour le BV8 et + 0.70 m (RCP 4.5) pour le BV1.

BV1 Couple III a Altkirch et Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH

Ce bassin versant de 229 km², faiblement anthropisé, présente la plus forte dispersion entre les différentes projections climatiques et les plus fortes variations (augmentation jusqu'à plus de 3 m et diminution jusqu'à plus de 1.5 m pour RCP 8.5). Les écarts moyens à l'horizon 2050, 2070 ou 2100 sont de l'ordre de + 0.60 m à la hausse.

BV2 Couple Largue à Spechbach-le-Bas et Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE

Ce bassin de 245 km² faiblement anthropisé, présente des écarts de variations pouvant atteindre au maximum + 1.5 m dans le cas du RCP 8.5 à l'horizon 2100. En moyenne, les écarts sont de l'ordre de + 0.20 à + 0.30 m à la hausse.

BV3 Couple Le Madon à Mirecourt et Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE

Ce bassin de 382 km² moyennement anthropisé se situe au sein du périmètre du SAGE GTI, où la ressource en eau constitue un enjeu majeur. La dispersion des écarts selon les différentes projections climatiques est relativement importante (- 0.4 à + 2.6 m). En moyenne, les écarts de variations sont de l'ordre de + 0.40 à + 0.60 m à la hausse.

BV4 Couple Esch a Jezainville et Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE

Ce bassin de 228 km², faiblement anthropisé, présente des écarts selon les différentes projections climatiques entre - 0.25 et de + 1.70 m pour le RCP 8.5. En moyenne, les écarts sont de l'ordre de + 0.20 à + 0.30 m d'ici 2070 et + 0.40 m à la hausse d'ici 2100.

BV7 Couple Meuse à Chalaines et Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES

Ce bassin de 1711 km², moyennement anthropisé, présente des écarts maximaux selon les différentes projections climatiques entre + 0.4 à l'horizon 2050 (RCP 4.5) à +1 m à l'horizon 2100 (RCP 8.5). En moyenne, les écarts sont de l'ordre de + 0.1 à + 0.2 m.

BV8 Couple Bar à Cheveuges et Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

Ce bassin de 392 km², moyennement anthropisé, présente des écarts maximaux selon les différentes projections climatiques entre + 0.1 et + 0.4 m. En moyenne, les écarts sont de l'ordre de quelques cm à la hausse (+ 0.05 à la hausse à l'horizon 2100).

6.5.2. Ecart en moyenne saisonnière sur le niveau piézométrique

➤ Comparaison des résultats des différentes projections climatiques par bassin versant

Comme précédemment pour les variations annuelles, les graphiques de la Figure 57 sont réalisés à partir des résultats de calcul pour chaque projection climatique à l'horizon 2100, en distinguant les 2 narratifs jaune (**SC01** - carré jaune pour RCP 4.5 et rond jaune pour RCP 8.5) et violet (**SC07** - carré violet pour RCP 4.5 et rond violet pour RCP 8.5) ainsi que les projections utilisées en local mais non reprises en nationale pour leurs caractéristiques particulièrement humides (**SC02** avec carré plein rouge pour RCP 4.5 et rond plein rouge pour RCP 8.5 et **SC05** avec carré plein bleu pour RCP 4.5 et rond plein bleu pour RCP 8.5).

On identifie bien sur les graphiques de la Figure 57, les projections non retenues dans l'étude nationale (**SC02** et **SC05**) qui conduisent aux plus fortes augmentations de niveau de nappe quelle que soit la saison.

Les amplitudes totales des variations de niveau de nappe sont comprises entre 0.8 m (BV8 situé dans les Ardennes au nord-ouest du bassin Rhin-Meuse présente la plus faible amplitude de valeurs) et 5 m (BV1 et BV3 au sud-est du bassin Rhin-Meuse présentent les plus fortes amplitudes de valeurs).

La tendance globale est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver et au printemps et à la baisse en été et en automne, sauf pour le Sundgau (BV1 et BV2), qui présentent une relative homogénéité d'une saison à l'autre.

BV1 Couple Ill a Altkirch et Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe de + 0.7 à + 0.95 m.
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à la baisse des niveaux de nappe de - 1.7 m à - 1 m.

BV2 Couple Largue à Spechbach-le-Bas et Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe de + 0.2 m à + 0.35 m.
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à la baisse des niveaux de nappe de - 0.8 m à - 0.4 m.

BV3 Couple Le Madon à Mirecourt et Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe quelle que soit la saison avec des valeurs comprises entre + 0.03 m et + 1.1 m.
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation au printemps (+ 1.42 m) et à la diminution en automne (- 1.1 m).

BV4 Couple Esch a Jezainville et Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à la baisse uniquement en été (- 0.25 m) et à la hausse pour les autres saisons (+ 0.02 à + 1.5 m).
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à la hausse au printemps et en hiver (jusqu'à + 1.3 m) et à la baisse en automne et en été (jusqu'à - 1 m).

BV7 Couple Meuse à Chalaines et Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver (jusqu'à + 0.7 m) et au printemps et à la baisse en été (jusqu'à - 0.2 m) et en automne.
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver et au printemps (jusqu'à + 0.7 m) et à la baisse en été et en automne (jusqu'à -1 m).

BV8 Couple Bar à Cheveuges et Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

- Pour le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver (jusqu'à + 0.11 m) et au printemps et à la baisse en été et en automne (jusqu'à - 0.08 m).
- Pour le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), la tendance à l'horizon 2100 est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver et au printemps (jusqu'à + 0.21 m) et à la baisse en été et en automne (jusqu'à - 0.14 m).

➤ **Comparaison des résultats statistiques par bassin versant et RCP**

Les graphiques de la Figure 58 illustrent la synthèse statistique des différentes projections climatiques (minimum, moyenne, maximum) réalisés pour chaque RCP, chaque BV et chaque horizon. On notera la grande dispersion des résultats entre les valeurs minimales et les valeurs maximales notamment pour les BV1 et BV2, pour les saisons hivers, printemps et automne.

Si on s'intéresse à l'horizon 2100, on remarquera les tendances globales suivantes (moyennes des différentes projections climatiques) pour les niveaux piézométriques :

- Pour BV4 et BV7, les moyennes RCP 4.5 et RCP 8.5 sont positives (augmentation des niveaux de nappe) en hiver et au printemps et négatives en été et en automne (baisse des niveaux de nappe).
- Pour BV3 et BV8, les moyennes RCP 4.5 et RCP 8.5 sont positives pour les 3 saisons hiver, printemps et été et négatives en automne.
- Pour BV1 et BV2 (Sundgau), les moyennes RCP 4.5 et RCP 8.5 sont positives en hiver, au printemps, en été et en automne, traduisant ainsi une augmentation des niveaux piézométrique pour les 4 saisons.

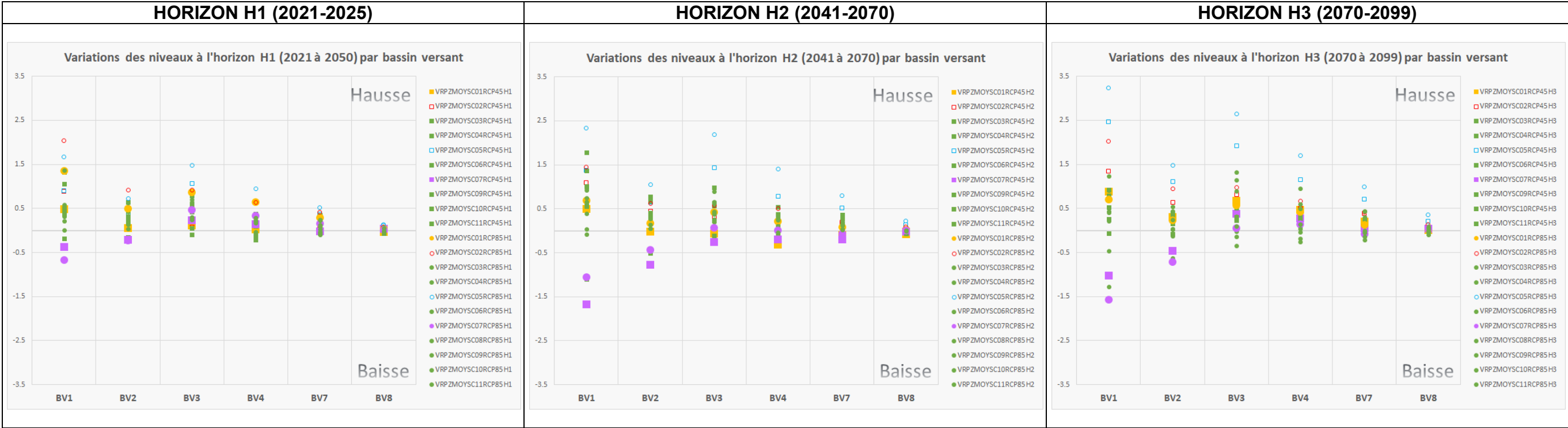


Figure 55 – Graphiques des résultats par projections climatiques et BV. Ecarts des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne annuelle (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)

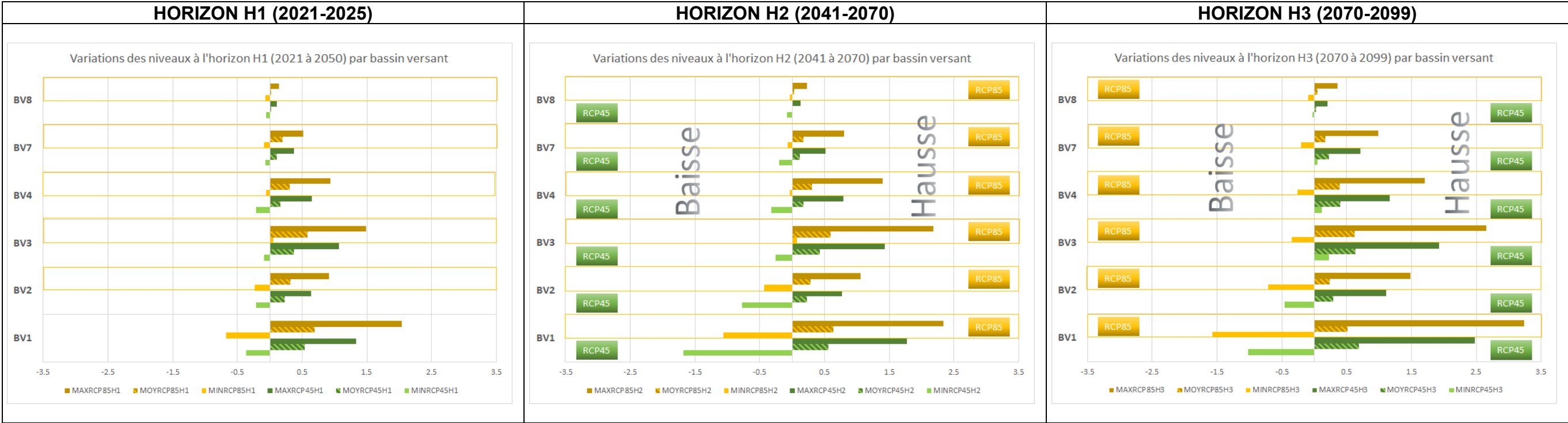


Figure 56 – Graphiques des résultats statistiques par RCP et BV. Ecarts des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne annuelle (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)

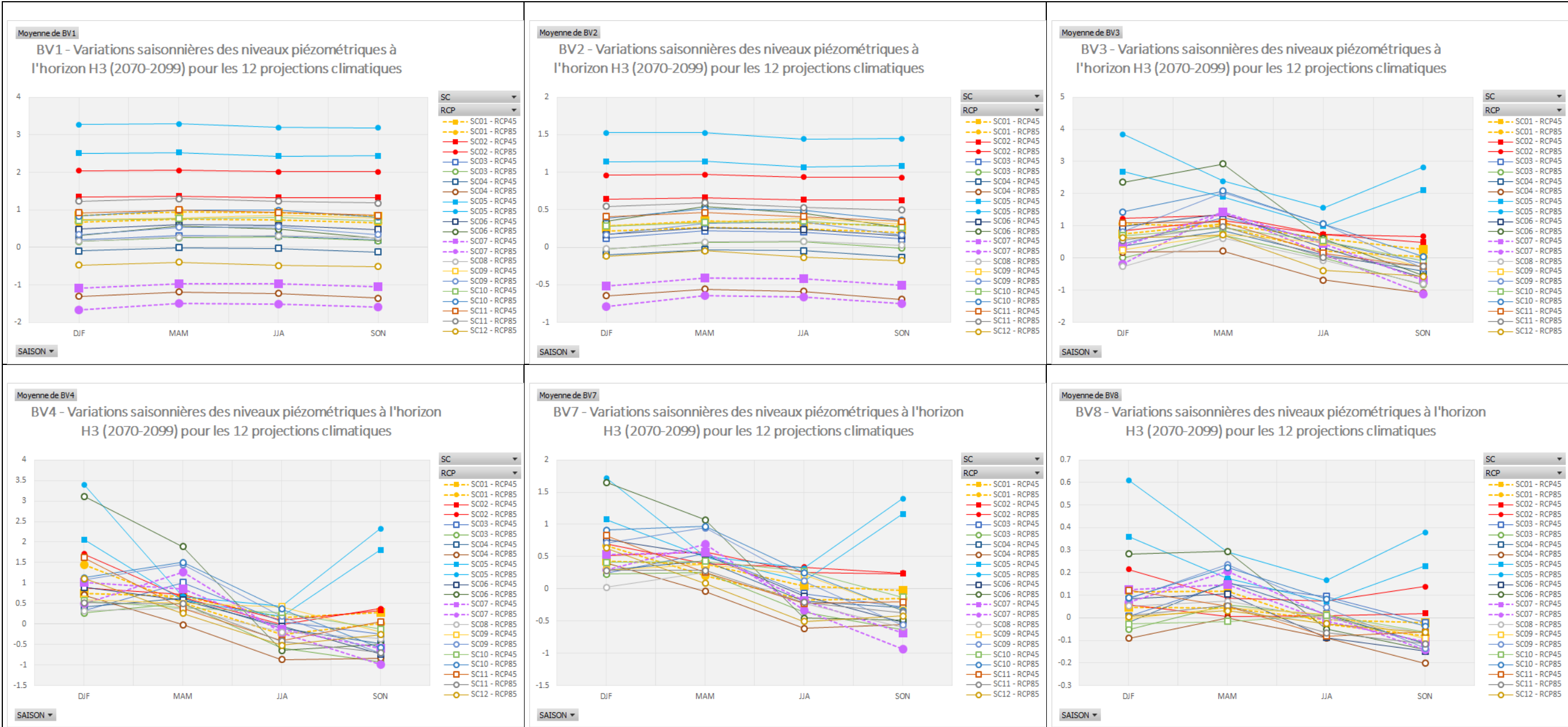
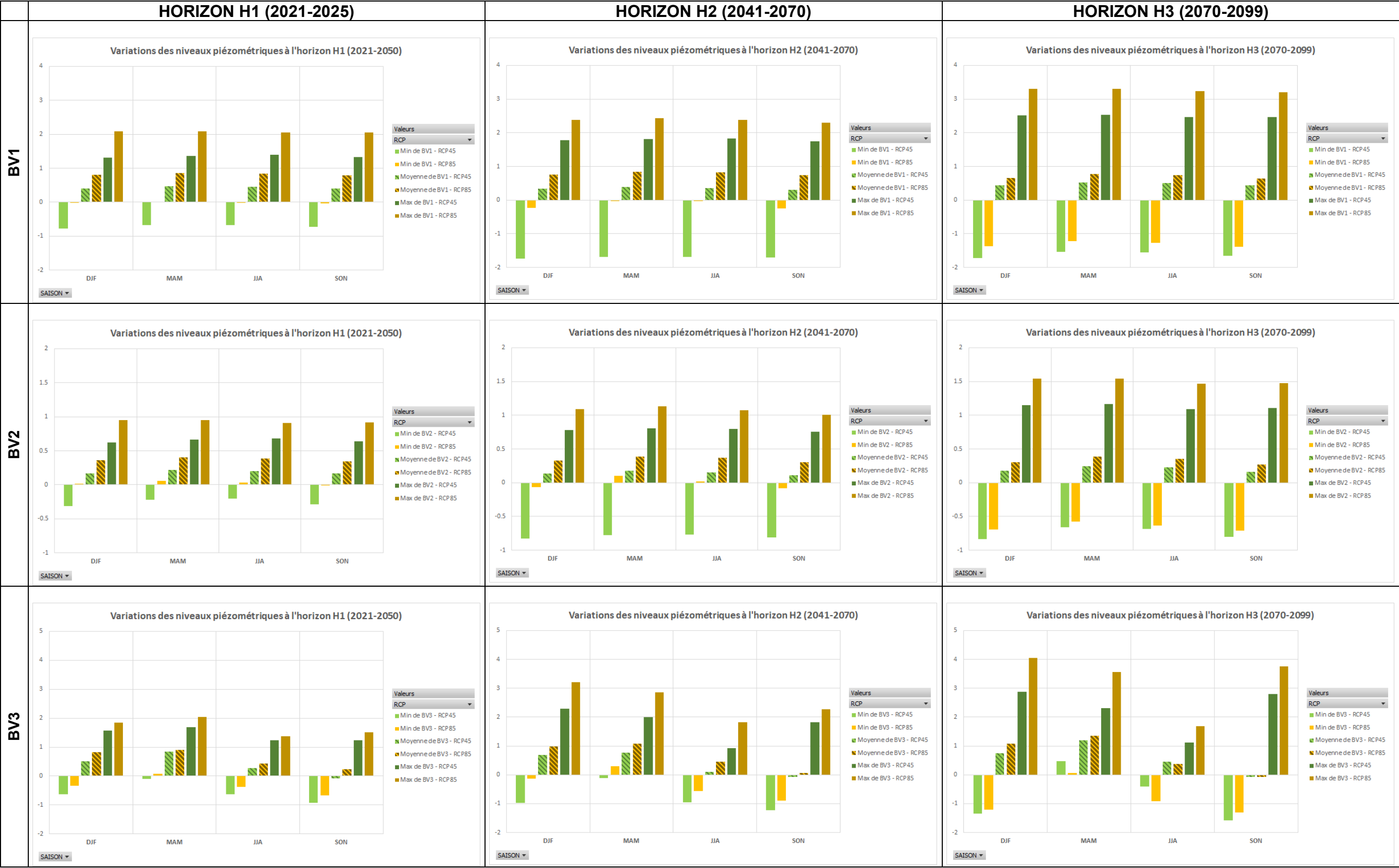


Figure 57 – Graphiques des résultats par projections climatiques et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans à l'horizon 2100 en moyenne saisonnière (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)



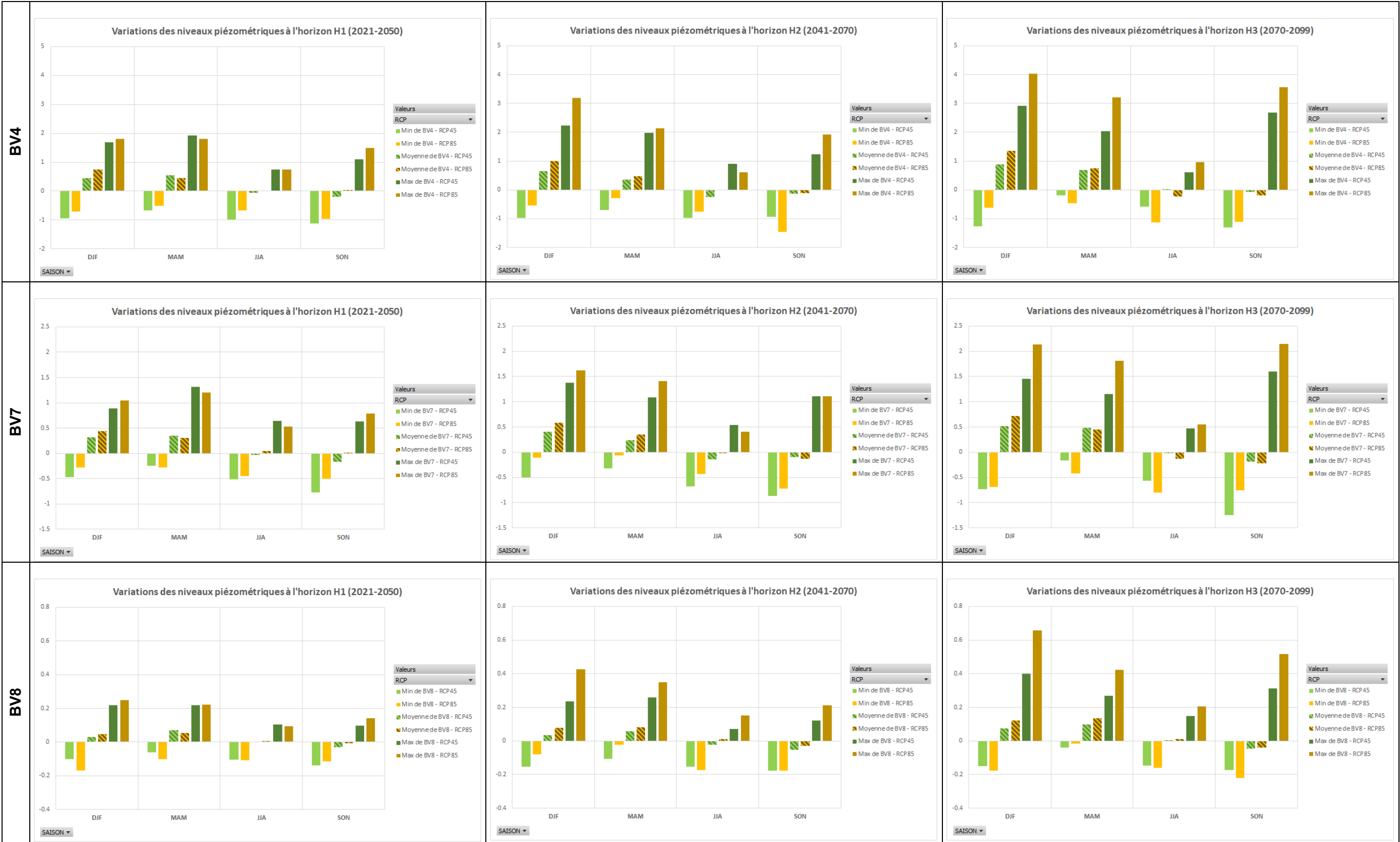


Figure 58 - Graphiques des résultats statistiques par RCP et BV. Ecart des niveaux de nappes sur 30 ans en moyenne saisonnière (niveau en m NGF sur la période future - niveau en m NGF sur la période de référence)

6.6. CONCLUSIONS CONCERNANT LA MISE EN ŒUVRE DES PROJECTIONS CLIMATIQUES SUR 6 BASSINS VERSANTS DU PERIMETRE RHIN-MEUSE

Avertissement : Les résultats, notamment pour le Sundgau, peuvent sembler contradictoire en fonction de l'approche utilisée (cf. avertissement § 6.4 et § 6.5) : On parle de moyennes de variations de recharge ou de niveau piézométrique pour les différentes projections dans un cas et dans l'autre de variations de recharge ou de niveau piézométrique pour un narratif particulier. Le territoire considéré sera d'autant plus vulnérable que l'analyse démontre cette grande variabilité des résultats.

6.6.1. Principaux messages pour la variation de recharge potentielle à l'horizon 2100

Les principaux messages délivrés à l'issue du traitement statistique des résultats à partir des 22 projections climatiques retenues dans l'étude locale sont les suivants :

- L'ampleur croissante des variations entre 2050 et 2100 ($H1 < H2 < H3$) ;
- En moyenne annuelle, une augmentation de la recharge de l'ordre de 5 à 12 % sur les 6 bassins versants étudiés, en cohérence avec l'analyse cartographique établie dans la première partie de l'étude locale (§ 4) et l'étude nationale qui prévoit une augmentation dans le nord de la France et la stabilité pour le reste du pays ;
- En moyenne saisonnière, pour tous les bassins versants, une recharge plus marquée en hiver de l'ordre de + 13 % à + 27 % et au printemps de l'ordre de + 7 à + 10 % ; et une baisse de la recharge en automne pour le Sundgau (BV1 et BV2).

Pour rappel, l'étape 1 de l'étude a consisté à calculer et cartographier sur l'ensemble du territoire Rhin-Meuse les variations de recharge annuelle ou saisonnière entre périodes futures (horizons 1 à 3) et période historique en tenant compte de l'incertitude liée aux choix des scénarios (résultats statistiques des 22 projections climatiques retenues, selon la valeur médiane, le 5ème quantile et le 95ème quantile). L'agrégation de ces résultats a été faite à l'échelle de 8745 unités géographiques définies par découpage des entités hydrogéologiques BDLISA version 2 (niveau 3, ordre 1) croisé avec les zones hydrographiques de la BD Carthage, soit 8745 polygones. Les résultats obtenus, selon cette approche dite « cartographique », peuvent être comparés aux résultats de la modélisation (qui utilise le même jeu de données pour les projections climatiques) à l'échelle des 6 bassins versants étudiés. Cf. § 6.6.4.

6.6.2. Principaux messages pour la variation des niveaux de nappe à l'horizon 2100

Les principaux messages délivrés à l'issue du traitement statistique des résultats à partir des 22 projections climatiques retenues dans l'étude locale sont les suivants :

- L'ampleur croissante des variations entre 2050 et 2100 ($H1 < H2 < H3$) ;
- En moyenne annuelle, une augmentation du niveau des nappes sur les 6 bassins versant de l'ordre de + 3 cm à + 70 cm (le BV8 dans les Ardennes étant le moins impacté et le BV1 dans le Sundgau étant le plus impacté), en cohérence avec l'étude nationale qui prévoit une tendance à l'augmentation dans le nord de la France ;

- En moyenne saisonnière, une tendance globale à la hausse du niveau des nappes en hiver et au printemps et une diminution en été et en automne, sauf pour le Sundgau (BV1 et BV2) qui présente une augmentation des niveaux pour les 4 saisons.

Pour rappel, l'étude nationale a traité l'évolution des niveaux de nappes à partir de la Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale [AquiFR¹⁵](#), basé sur une série de modèles préexistants. Ce projet de recherche vise à permettre un suivi et une prévision de la ressource en eau souterraine en France ainsi qu'à faciliter les études d'impact du changement climatique. Sur le secteur Grand-Est et plus particulièrement le bassin Rhin-Meuse, il n'existe pas dans AquiFR de modèles permettant d'effectuer les simulations nécessaires à Explore2. La petite portion concernée en plaine d'Alsace dans le secteur de Mulhouse est jugée non représentative par les experts du BRGM, en charge du volet eaux souterraines d'Explore2, et ne sera donc pas exploité dans le cadre de l'étude locale pour effectuer des comparaisons.

6.6.3. Variation de recharge potentielle à l'horizon 2100 : Prise en compte des 2 narratifs communs entre l'étude nationale et l'étude locale

Si l'on examine plus précisément les résultats de chacune des projections climatiques à l'horizon 2100 et notamment les narratifs jaune ([SC01](#)) et violet ([SC07](#)) ainsi que les projections non retenues par l'étude nationale ([SC02](#) et [SC05](#)), les conclusions sont les suivantes :

- Le **narratif jaune** (changements futurs relativement peu marqués), est systématiquement associé à une augmentation de la recharge potentielle annuelle, plus particulièrement en hiver (+ 10 à + 21 % en fonction des BV considérés), et des niveaux piézométriques (entre 2 cm et 89 cm en fonction des BV considérés). Ce narratif jaune, parmi les 22 projections climatiques simulées, semble plutôt représentatif d'une situation moyenne sans grande disparité spatiale et saisonnière.
- Le **narratif violet** (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations), se caractérise par une tendance à la diminution de la recharge sur le secteur du Sundgau (- 17 % à - 20 %) tandis que pour les autres bassins l'évolution est plus modérée (- 3 % à + 4 %) voire nulle. L'approche saisonnière est plus contrastée entre les 2 RCP et les différents bassins avec une augmentation de la recharge hivernale entre 1 % et 21 % pour les 6 BV, une augmentation de la recharge printanière entre 11 et 17 % pour 4 BV (les 2 autres BV présentent soit une baisse soit une hausse de l'ordre de 2 à 3 %) et des baisses de la recharge en été et à l'automne entre - 3 % et - 60 % pour 6 BV. Pour les niveaux piézométriques, les évolutions sont tantôt à la hausse tantôt à la baisse en fonction des bassins versants considérés (variations entre - 1.6 m et + 0.38 m). Ce narratif violet, parmi les 22 projections climatiques simulées, illustre à l'inverse du précédent une variabilité spatiale et saisonnière importante, et met en évidence la vulnérabilité du secteur Sud Alsace (Sundgau) plus marqué par la diminution de la recharge.

6.6.4. Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans entre les 2 approches « cartographique » et « modélisation » pour les 6 bassins versants

L'étude sur l'impact du changement climatique menée sur le bassin Rhin-Meuse a conduit à la mise en œuvre de 2 approches méthodologiques complémentaires (Tableau 6) dont nous souhaitons à ce stade comparer les résultats.

15

<https://www.geosciences.ens.fr/recherche/projets/aqui-fr>

La comparaison entre les résultats (en valeurs moyenne et médiane) de la modélisation sur les 6 bassins versants et de la cartographie à l'étape1 calculés au prorata des surfaces unitaires concernées sur le même périmètre donne des résultats assez voisins mais pas totalement équivalents (Figure 59 et Figure 60).

Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse (Figure 59)

- Les valeurs moyennes sont toujours supérieures aux valeurs médianes.
 - Pour rappel, la médiane divise une série statistique en deux parts égales, alors que la moyenne est la somme des valeurs de la série, divisée par le nombre de valeurs de cette même série. Concrètement, la médiane permet d'éliminer les valeurs extrêmes et d'exprimer la valeur du milieu (50 % des valeurs de la série sont en dessous et 50 % des autres valeurs sont au-dessus) ;
 - Cette définition explique la différence observée entre moyenne (qui intègre les valeurs extrêmes) et médiane (qui élimine les valeurs extrêmes) ;
- Les valeurs médianes et les moyennes résultant du traitement des données cartographiques sont assez proches l'une de l'autre pour tous les bassins, avec un écart inférieur à 5 % ;
- Les valeurs médianes et les moyennes résultant du traitement des données de la modélisation sont beaucoup plus dissemblables entre 5 et 18 % d'écart ;
- Les valeurs médianes et moyennes issues de la cartographie sont quasi systématiquement comprises entre la valeur moyenne issues du modèle (maximum) et la valeur médiane issue du modèle (minimum) ;
- Si on s'intéresse uniquement aux médianes (tout bassin, tout horizon et tout RCP confondus), l'écart entre la cartographie de l'étape 1 et le modèle est de l'ordre de 1 % à 23 %. Les écarts les plus importants s'observent pour l'horizon 3 et pour le RCP 8.5 (dont on a mis en évidence plusieurs fois dans ce rapport la grande dispersion des résultats des différentes projections climatiques). Si l'on regarde individuellement les 6 bassins versants, le maximum d'écart (tout horizon et tout RCP confondus) est compris entre 9 % (BV3) et 23 % (BV2).

Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse (Figure 60)

- Les variations de recharge les plus importantes sont observées en hiver aussi bien pour les résultats de la modélisation que pour la cartographie ;
- Les variations de recharge les moins importantes sont observées en été pour les résultats de la modélisation, beaucoup moins précisément pour les résultats cartographiques qui présentent d'un bassin versant à l'autre d'importantes différences (cf. BV4) ;

- A saison équivalente les variations moyennes de recharge potentielles des résultats de la cartographie sont généralement supérieures aux résultats de la modélisation (tout bassin, tout horizon et tout RCP confondus). L'écart est plus important en été, saison qui présente en effet globalement la plus forte incertitude (jusqu'à 54 % d'écart). L'écart est le moins important au printemps (jusqu'à 11 %). Les écarts entre les résultats des 2 méthodes (cartographie et modélisation) en hiver et en automne sont respectivement de 25 % et 29 % au maximum ;
- Au printemps, saison sur laquelle la convergence des résultats est la meilleure, les écarts maximaux calculés pour chaque bassin sont compris entre 4 % (BV3) et 11 % (BV8).

En conclusion, la comparaison des résultats des deux approches « cartographique » et « modélisation », met en évidence des différences qui peuvent s'expliquer par leurs caractéristiques respectives (Tableau 6). Si l'une des deux approches, applicable à grande échelle, donne une vision globale de l'impact du changement climatique sur la recharge des nappes du bassin Rhin-Meuse, la seconde fournit des résultats précis et complets en termes d'évolutions futures de la recharge et des niveaux d'eau sur des bassins versants instrumentés.

	Approche cartographique	Approche modélisation semi-globale (logiciel EROS)
Méthode de calcul de la recharge	non contrainte	contrainte (ajustement pour minimiser les écarts entre valeurs simulées et observées)
	bilan hydrologique (réservoir sol)	bilan hydrologique (réservoirs sol, zone non saturée, zone saturée)
Echelle de restitution	bassin Rhin-Meuse	6 bassins versants représentatifs
Prise en compte des incertitudes méthodologiques	3 méthodes de bilan (Thornthwaite, Dingman et Edijatno&Michel) ==> moyennes des résultats x 22 projections climatiques (12 couples MCG/MCR et 2 RCP)	1 méthode de bilan x 22 projections climatiques (12 couples MCG/MCR et 2 RCP)
Résolution des données climato	8 km ²	8 km ²
Echelle d'aggrégation des résultats	BDLISA x sous-secteur BD Carthage	bassin versant
Fichiers d'entrée	projections climatiques DRIAS 2020 (pluie, ETP, température)	projections climatiques de DRIAS 2020 (précipitations, ETP, température)
		chroniques de débits observés
Fichiers de sortie	cartographie des statistiques (médiane, centiles 5%, centile 95%) de variations de recharge à 3 horizons [shp]	chroniques de niveau piézométriques observés
		chroniques des termes du bilan hydrologique simulés, chroniques de débits simulés, chroniques des niveaux piézométriques simulés
		calculs des variations de recharge et statistiques (médiane, moyenne, min, max, centile 5%, centile 95%)
	application à grande échelle (vision globale Rhin-Meuse)	calculs des variations de niveau piézométrique et statistiques (médiane, moyenne, min, max, centile 5%, centile 95%)
		application à petite échelle (vision locale pour un bassin versant instrumenté) prise en compte des réservoirs souterrains calibration sur les valeurs de débits et piézo simulés résultats intégrateurs pour la recharge, les débits et les niveaux piézométriques (chroniques)
	pas de prise en compte des réservoirs souterrains	pas de vision globale

Tableau 6 – Tableau comparatif des approches méthodologiques mises en œuvre sur le bassin Rhin-Meuse

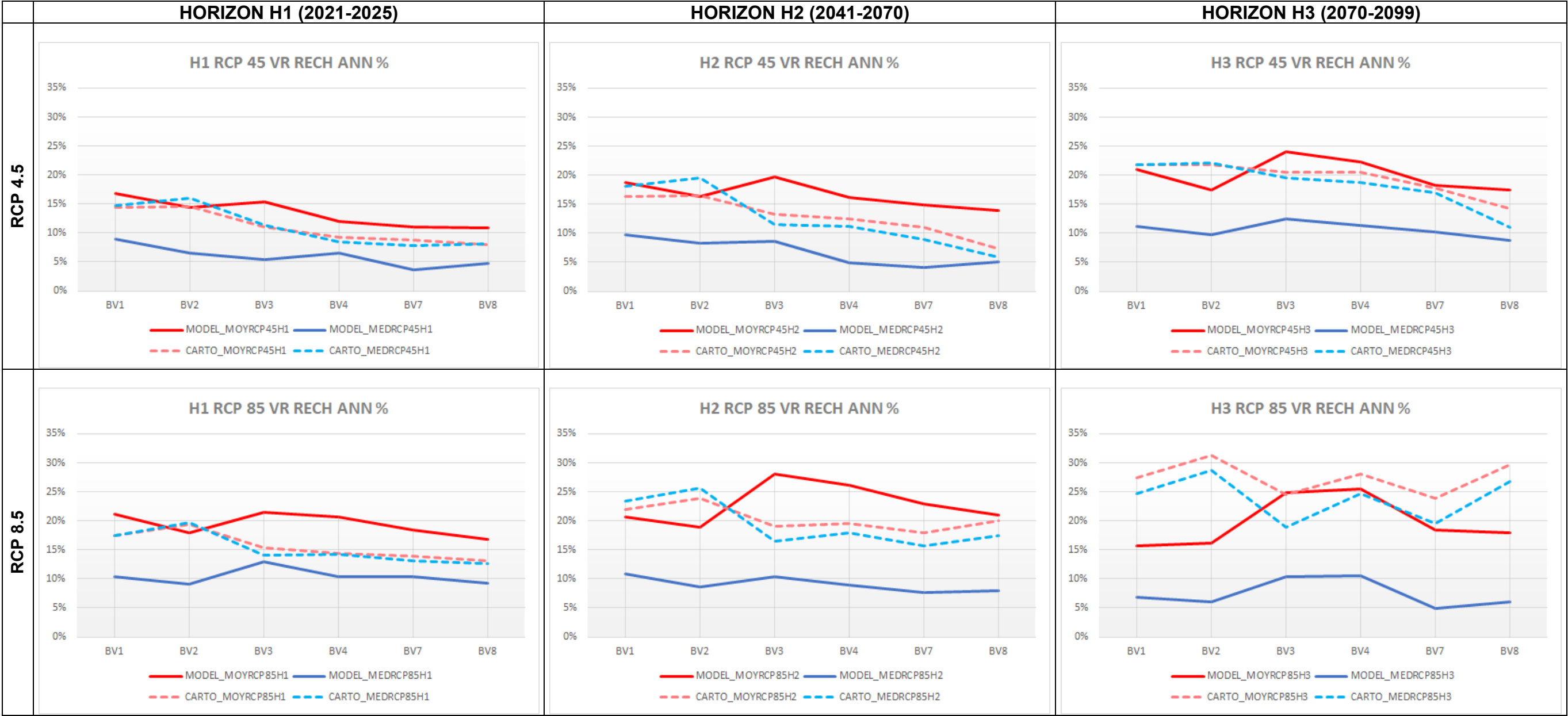


Figure 59 – Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne annuelle entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse

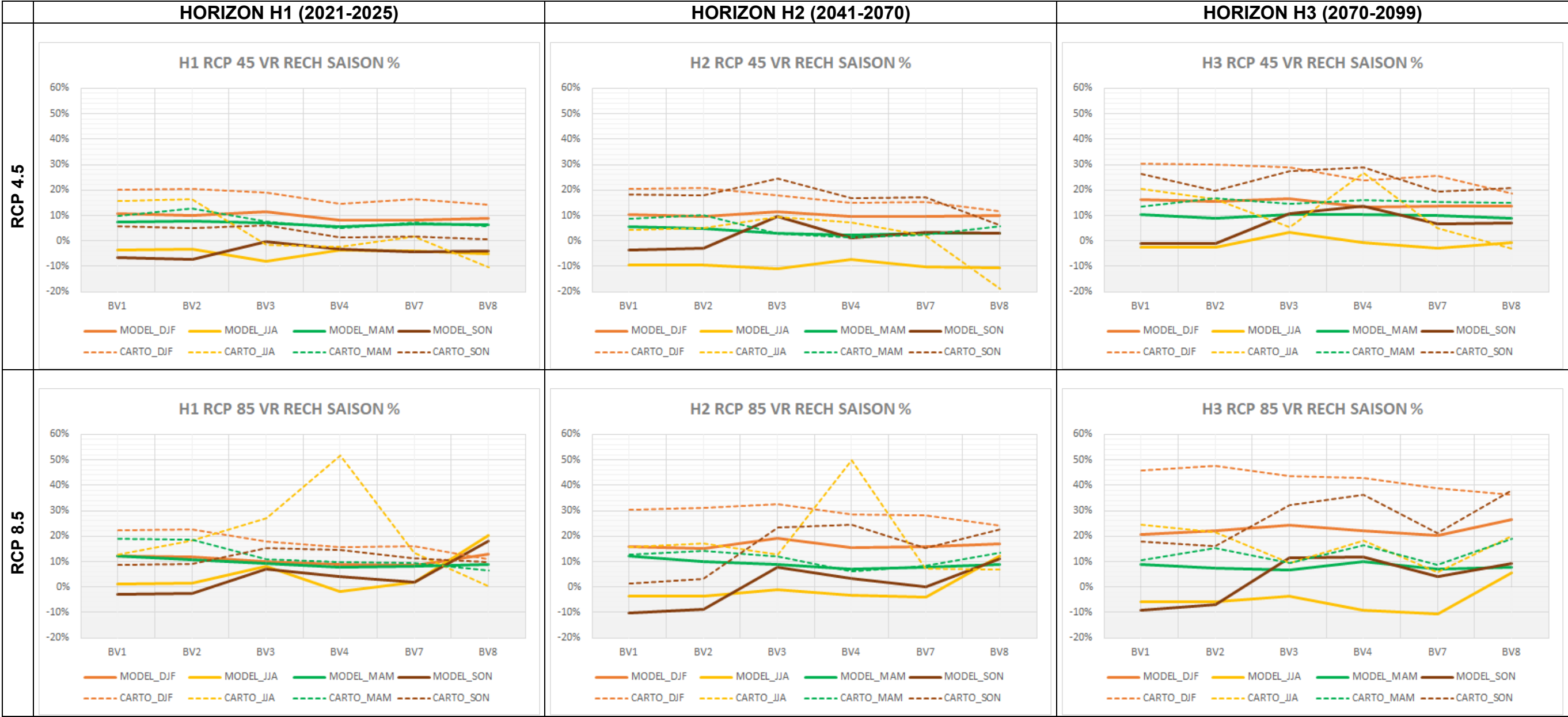


Figure 60 – Comparaison des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière entre les résultats de la modélisation et la cartographie Rhin-Meuse

7. Réflexions sur les incertitudes, les indicateurs de résilience au changement climatique et la prise en compte de l'impact potentiel de l'anthropisation sur les évolutions

7.1. PRINCIPALES INCERTITUDES ASSOCIEES AUX RESULTATS DE L'ETUDE « RECHARGE » SUR LE BASSIN RHIN-MEUSE

Les résultats présentés dans ce rapport ont été établis sur la base des données climatiques, hydrauliques et hydrogéologiques disponibles sur la période 2020-2022. Ils donnent ainsi les grandes tendances des évolutions à venir et sont valables dans le contexte des connaissances actuelles. Les paragraphes ci-dessous ont pour objectif de rappeler les incertitudes associées aux résultats obtenus. Les différentes incertitudes listées ci-dessous, ne sont pas hiérarchisées mais la principale est clairement liée aux projections climatiques. C'est la seule qui ait été réellement prise en compte dans le projet et les résultats (représentations graphiques restituant le champ des possibles en fonction des différentes projections climatiques retenues).

Incertitudes sur les débits des rivières

Les données hydrométriques historiques utilisées pour simuler les 8 bassins versants étudiés sont issues de la base de données accessible sur l'[HydroPortail](#). L'administration de cette base de données est assurée par le SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) dans le cadre du Système d'Information sur l'Eau (SIE).

Les incertitudes des débits produits à partir des stations hydrométriques varient très fortement en fonction du type de cours d'eau, des possibilités d'aménagement du contrôle hydraulique, de la fréquence des jaugeages et de la gamme de débit. Pour proposer une incertitude sur la donnée de débit, il faut donc composer à partir de l'ensemble des sources d'incertitude. Les paramètres associés aux mesures (statut, qualification, méthode ou continuité), permettent d'appréhender cette incertitude et ont permis de sélectionner les chroniques les plus pertinentes au regard de l'étude (cf. § sur le choix des bassins versants).

STATUT	4= <i>brute</i>	8= <i>corrigée</i>	12= <i>pré-validées</i>	16= <i>validées</i>	
QUALIFICATION	12= <i>douteuse</i>	16= <i>non qualifiée</i>	20= <i>valeur bonne</i>		
METHODE	0= <i>mesurée</i>	4= <i>reconstituée</i>	8= <i>calculée</i>	10= <i>expertisée</i>	14= <i>estimée</i>
CONTINUITE	0= <i>continue</i>	1= <i>discontinue</i>	4= <i>discontinue faible</i>	8= <i>discontinue forte</i>	6= <i>discontinue neutre</i>

Incertitudes sur les niveaux des nappes

La mesure du niveau d'eau est forcément entachée d'une incertitude. Cette dernière dépend de la précision du capteur et de sa dérive éventuelle mais aussi des conditions d'utilisation et d'installation. Compte tenu des tests effectués par les producteurs et utilisateurs ainsi que des retours d'expérience, l'incertitude absolue de la mesure de niveau reste comprise entre 0,5 et 1 cm quel que soit le type de capteur utilisé.

Les données piézométriques disponibles sur le secteur d'étude sont uniquement celles issues des piézomètres suivis par le BRGM. Sur certains bassins des tests ont été réalisés avec différents piézomètres disponibles et disposant d'une chronique suffisamment longue. Le piézomètre finalement retenu présentait les meilleurs coefficients d'ajustement au regard de la modélisation effectuée.

On ne dispose d'aucun piézomètre en secteur urbain ou représentatif d'un bassin versant fortement anthropisé. A l'avenir, la mise en place de nouveaux suivis piézométriques et/ou hydrologiques dans des secteurs à enjeux permettrait de mieux prendre en compte le critère d'anthropisation et son impact sur la recharge.

Incertitudes sur les prélèvements

Les données de prélèvements utilisés pour sélectionner et caractériser les bassins versants sont issues de la BNPE.

La BNPE constitue aujourd'hui la principale source nationale de données sur les prélèvements quantitatifs sur la ressource en eau, dont le périmètre est le suivant :

- *Les données présentes actuellement dans la banque sont des volumes prélevés mesurés ou estimés puis déclarés par les usagers soumis à la redevance pour prélèvement auprès des agences et offices de l'eau ;*
- *Cela comprend les volumes supérieurs à 10 000 m³ (ou 7 000 m³ en ZRE). Les petits volumes ne sont donc pas dans le périmètre des redevances mais ils sont néanmoins alimentés par les producteurs quand disponibles ;*
- *Certains usages sont exonérés de redevance : les exhaures d'eaux de mines, les travaux souterrains, le drainage pour le maintien à sec des bâtiments et ouvrages, l'aquaculture, la géothermie, la lutte antigel des cultures pérennes, les prélèvements effectués dans le cadre d'une prescription administrative (préservation d'écosystèmes aquatiques, réalimentation des milieux naturels, etc.). Ces informations ne figurent donc pas actuellement dans la banque ;*
- *Les informations sur la restitution de l'eau prélevée au milieu après usage ne sont pas stockées dans la banque. La BNPE ne s'intéresse en effet qu'à l'eau prélevée, et non à l'eau consommée ;*
- *Compte-tenu des modalités de perception de la redevance pour prélèvement et du délai nécessaire à la consolidation des données à l'échelle nationale, les données de l'année N ne sont disponibles qu'à la fin de l'année N+2 ;*
- *Les volumes déclarés peuvent par ailleurs être modifiés jusqu'à 5 ans après l'année du prélèvement.*

De ce fait la connaissance des prélèvements demeure non exhaustive et lacunaire, tout comme celle des rejets dans les cours d'eau ou les fuites sur les réseaux d'eau qui peuvent être relativement significatives en milieu anthropisé. Les chroniques au pas de temps mensuel ou journalier ne sont pas facilement accessibles (données disponibles sur les dernières années sur demande au cas par cas auprès des différents acteurs et généralement non harmonisées, non qualifiées).

Parmi les 8 bassins versants traités, seuls 6 s'avèrent pertinents pour l'analyse des projections climatiques à l'horizon 2100. Les deux autres bassins versants (BV5 : La Sarre à Hermelange et BV6 : La Nied Allemande à Varize) disposent de piézomètres qui sont des forages exploités et pour lesquels les chroniques de prélèvement ne sont actuellement pas disponibles (Grès du Trias inférieur affleurant à VOYER pour BV5 et Calcaires du Muschelkalk à SERVIGNY-LES-RAVILLE pour BV6). La perspective de récupérer les chroniques de prélèvement sur ces ouvrages et de les prendre en compte dans une modélisation actualisée est envisageable sans pour autant être assuré de parvenir à améliorer la calibration.

Incertitude sur les projections climatiques

La modélisation climatique est une science complexe présentant d'importantes incertitudes dont les deux principales sont (1) la capacité des modèles climatiques à reproduire le climat présent et (2) l'incertitude associée aux scénarios d'émission des gaz à effet de serre.

La première source d'incertitude a été prise en compte en utilisant les prévisions du climat issus d'un ensemble de 22 projections climatiques différentes (toutes issues du jeu de données DRIAS-2020) au lieu de 5 initialement prévu. La deuxième a pu être approchée en proposant des simulations obtenues en prenant en compte 2 scénarios d'émission (RCP 4.5 et RCP 8.5).

Pour tenir compte de la dispersion des résultats, les traitements statistiques ont pris en compte les valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales et les quantiles 5 et 95 %.

Limites d'utilisation des données de recharge et de niveau piézométrique pour le futur

Pour rappel, les données météorologiques historiques réellement enregistrées (données SAFRAN) ont servi à construire le modèle EROS. Une fois le modèle calé, ce sont les données climatiques issues des prévisions DRIAS-2020 qui ont été utilisées en entrée du modèle EROS.

Chacun des 12 couples MCG (modèle climatique global) et MCR (modèle climatique régional) utilisés fournit des données climatiques pour la période allant de 1950 à 2100. Il est important de garder à l'esprit que les situations météorologiques projetées par ces 22 projections climatiques sont des simulations (y compris sur la période dite historique ou de référence 1950-2005) et n'ont pas pour objectif, pour une date donnée, de reproduire la situation qui correspond réellement à celle observée (ou qui le sera dans le futur). Les données de référence simulées ne doivent pas être comparées aux valeurs observées à la même date. Ainsi la valorisation des résultats est effectuée en comparant les données simulées sur les 3 périodes futures considérées (2021-2050 horizon n°1 ; 2041-2070 horizon n°2 ; 2070-2099 horizon n°3) aux données simulées sur la période de référence (en m pour les niveaux piézométriques et en % pour la recharge).

Autre point de vigilance, le modèle EROS a été calibré afin de simuler les niveaux piézométriques et les débits naturels des différentes rivières. Les données simulées par EROS lorsque les données SAFRAN sont utilisées en entrée, sont censés être semblables à celles mesurées sur le terrain pour une date donnée. Toutefois il peut y avoir un écart entre ces 2 valeurs (simulée et observée) qui peut être liée à l'impact des prélèvements et des rejets, d'une part, et, d'autre part, à la qualité du calage du modèle réalisé. En effet, un modèle ne reproduit jamais la réalité à 100 %. Les écarts entre les débits réels et les débits simulés sont estimés à travers les coefficients de calage ou coefficient de Nash.

En conclusion, concernant la prise en compte des incertitudes dans l'exploitation des données, il est nécessaire de considérer que les résultats présentés dans ce rapport doivent être pris en compte :

- **De manière tendancielle ou en termes d'ordre de grandeur quand on évoque les valeurs statistiques établies à partir des résultats issus des différentes modélisations prenant en compte les 22 projections climatiques ;**
- **Ou comme le champ des possibles, notamment quand on compare entre eux les résultats des différentes projections climatiques (Figure 61). Dans ce cas, on fait l'hypothèse d'une équiprobabilité des différentes projections climatiques pour un même RCP ;**
- **Ou comme la restitution de 4 projections climatiques particulières (les 4 narratifs d'Explore2) retenues par leur représentativité contrastée :**
 - **Changements futurs relativement peu marqués ;**
 - **Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations ;**
 - *2 narratifs disponibles pour le projet nationale Explore2 et pour l'étude locale (Figure 62).*
 - **Réchauffement marqué et augmentation des précipitations ;**
 - **Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) ;**
 - *2 narratifs disponibles uniquement pour le projet nationale Explore2 et pas pour l'étude locale (pas retenus pour les modélisations en 2022).*

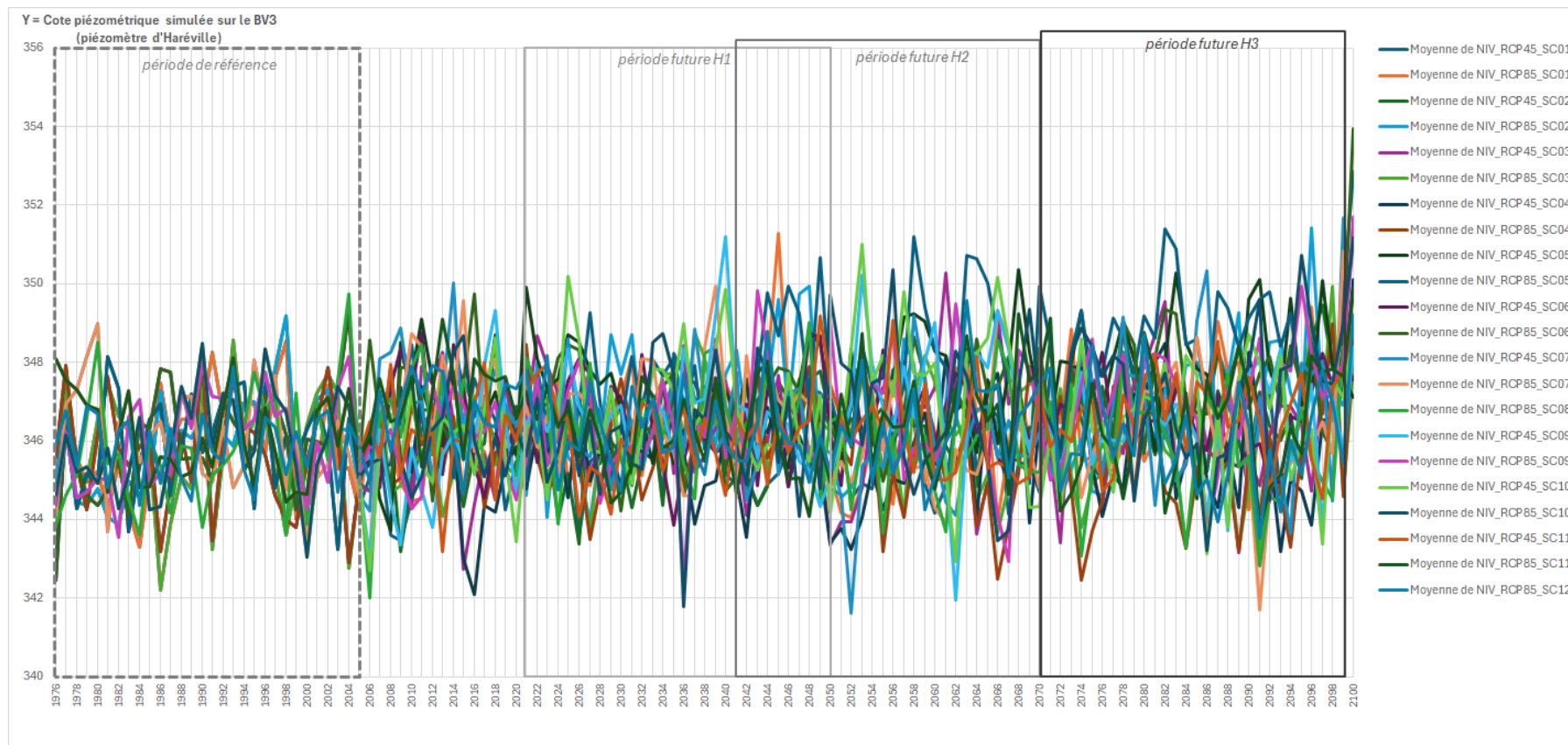


Figure 61 – Graphique de l'évolution des niveaux piézométriques simulés sur le piézomètre d'Haréville (BV3) pour chacune des 22 projections climatiques

Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations

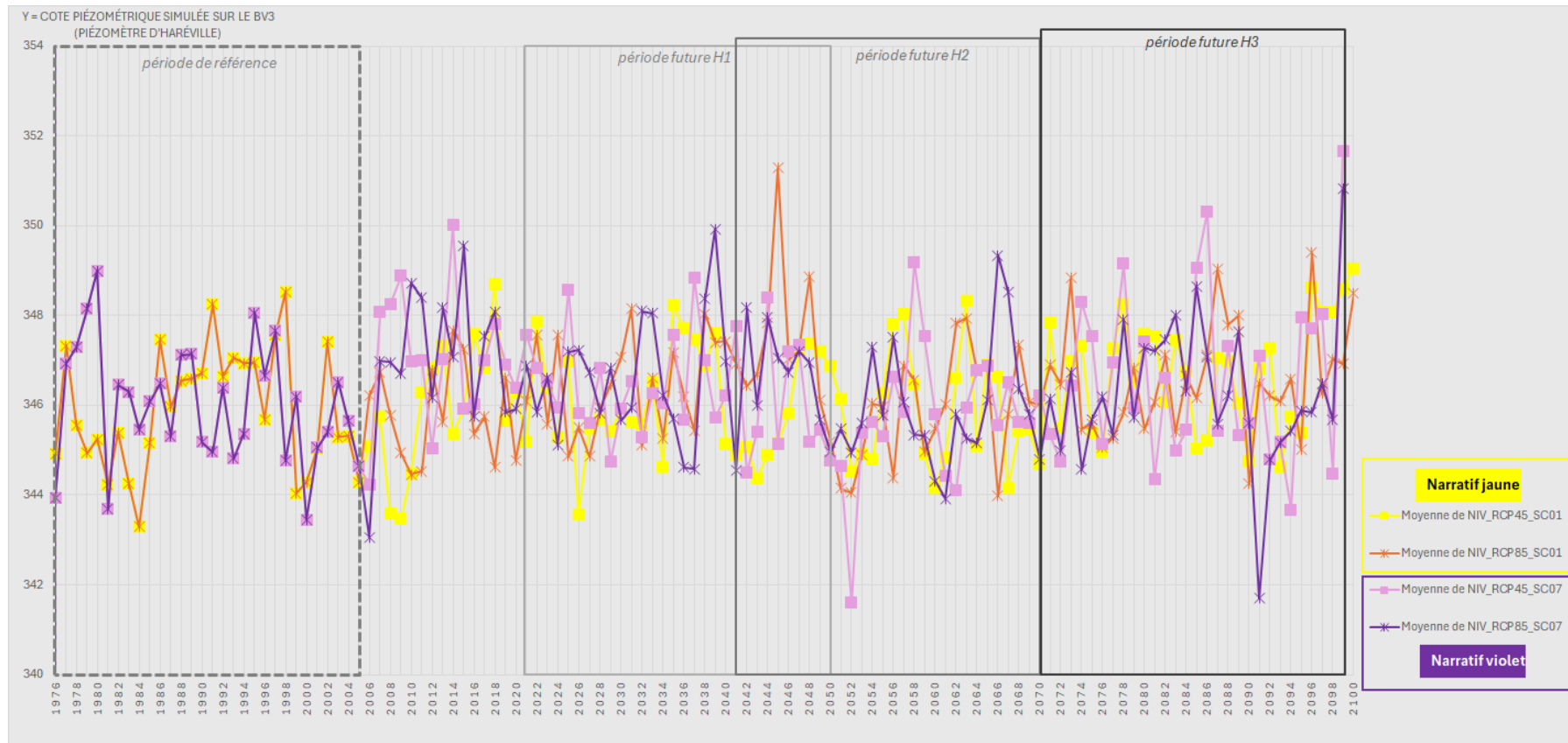


Figure 62 – Graphique de l'évolution des niveaux piézométriques simulés sur le piézomètre d'Haréville (BV3) pour les projections climatiques contrastées dites « narratif jaune et « narratif violet »

7.2. REFLEXIONS SUR LES INDICATEURS DE RESILIENCE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE LA PRISE EN COMPTE DE L'IMPACT POTENTIEL DE L'ANTHROPISATION SUR LA RECHARGE

7.2.1. Quelques définitions

Pour lutter contre le changement climatique et ses impacts, les acteurs locaux peuvent agir sur deux volets : **l'atténuation du changement climatique et l'adaptation au changement climatique.**

Le GIEC – Groupe d'experts Intergouvernementale sur l'évolution du Climat, donne les définitions suivantes (Figure 63) :

L'adaptation au changement climatique : *c'est la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu ainsi qu'à ses conséquences.*

L'atténuation du changement climatique : *c'est l'intervention humaine visant à réduire les sources ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre. A titre d'exemple, les sols sont à la fois une source et un puits de gaz à effet de serre¹⁶ :*

- Les activités humaines associées à l'utilisation du sol (agriculture, foresterie et autres usages des sols) contribuent aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre à hauteur de 23 % ;
- En réponse à l'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, les écosystèmes naturels absorbent une partie des émissions anthropiques (29 % des émissions totales de CO₂).

La résilience est la *capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation dangereuse, en répondant ou en se réorganisant de manière à maintenir la capacité d'adaptation, d'apprentissage, et de transformation.*

Pour résumer si les actions d'atténuation portent sur les causes du changement climatique, les actions d'adaptation vont plutôt consister à gérer les effets du changement climatique et à limiter les impacts négatifs. En termes de ressource en eau, la résilience d'un territoire sera mesurée par sa capacité à anticiper, agir, s'adapter et se transformer pour réduire sa vulnérabilité face aux aléas climatiques et notamment à l'évolution de la recharge ou des niveaux de nappe.

¹⁶ Cf. Rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres de 2020. <https://www.ipcc.ch/srccl/download/>

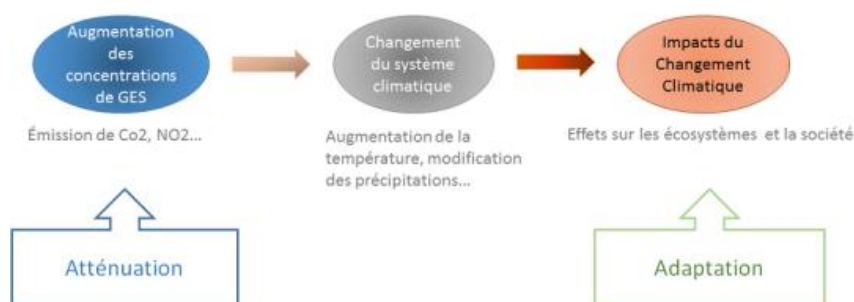


Figure 63 – Illustration des notions d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.
D'après <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/adaptation-france-changement-climatique>

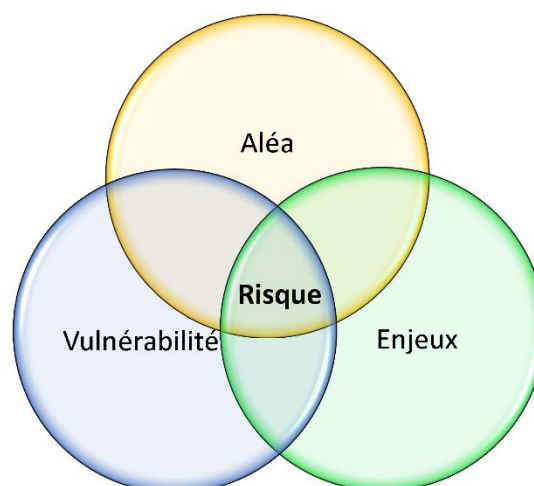
Les mesures d'atténuation et d'adaptation sont souvent les mêmes. Par exemple, encourager la pratique de l'agroécologie permet à la fois d'améliorer la résilience au changement climatique (les cultures étant moins sensibles aux manques de précipitation) et contribue également à faire baisser l'émission des gaz à effet de serre.

Pour éviter ce que les experts appellent la « **mal-adaptation** », c'est à dire des politiques qui aggravent le changement climatique à long terme et protègent certaines personnes aux dépens d'autres, les mesures doivent être pensées de manière systémique, en tenant compte d'un climat qui évolue, en anticipant les interactions et les effets sur les populations ainsi qu'en généralisant les espaces de dialogue. L'exemple de « mal-adaptation » le plus couramment cité est celui de la digue créée pour réduire le risque d'inondation, qui va réduire le sentiment d'insécurité pour les populations, voire conduire à une densification de l'espace urbanisé. L'évolution du climat et l'augmentation des événements extrêmes peuvent conduire à juger finalement le dimensionnement de la digue insuffisant et le risque de rupture plus important. Le territoire s'avère plus vulnérable et la population plus exposée au risque d'inondation contrairement à l'objectif initial.

7.2.2. Définition du risque associé à l'évolution de la recharge et des niveaux piézométriques en Rhin-Meuse

Le risque, lié à l'évolution de la recharge et des niveaux de nappe à la suite de l'impact du changement climatique, est défini par trois composantes, qui conditionnent son importance :

- L'aléa : quelle probabilité ont les phénomènes de se produire ?
- La vulnérabilité : quelle est la sensibilité du milieu (réservoirs aquifères) ?
- Les enjeux : quelles peuvent être les conséquences sociétales, financières et environnementales de l'évolution ?



Concernant l'aléa climatique, la maîtrise des risques passe par la mise en œuvre de mesures d'atténuation adaptées qui ne relèvent pas directement du champ de compétence des acteurs en matière de ressource en eau. En termes de connaissance de l'aléa, on dispose de la présente étude qui a permis d'analyser l'impact du changement climatique selon 22 projections climatiques à deux échelles différentes : celles du bassin Rhin-Meuse [unités géographiques adaptées à la gestion locale basées sur le croisement entre les entités hydrogéologiques à l'affleurement et les sous-secteurs hydrologiques] et celles de 6 bassins versants.

Concernant la vulnérabilité des milieux (nappes), deux axes d'évaluation sont à disposition : (1) la qualification de l'aptitude des formations aquifères à l'affleurement à se laisser traverser par les eaux précipitées (répartition entre infiltration et ruissellement) ; (2) la capacité de stockage du réservoir aquifère nécessaire pour absorber les trop pleins de recharge hivernaux et continuer à assurer l'alimentation en eau en période d'étiage ; (3) la faculté de la nappe à donner naissance à des inondations par remontée de nappe.

- (1) La vulnérabilité des nappes d'eau souterraine est liée à la **capacité (plus ou moins élevée) d'infiltration dans le sous-sol**. Elle dépend de différents facteurs, notamment de la nature du sol (pédologie), de la pente du terrain, de la nature et de l'épaisseur de la zone non-saturée (ZNS). Elle repose notamment sur l'estimation de l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR), qui qualifie l'aptitude des terrains à laisser infiltrer ou ruisseler les eaux de surface. Il est calculé en tenant compte du réseau hydrologique naturel (état et type d'écoulements, nature des axes hydrographiques) et du MNT pour définir le réseau théorique des écoulements par l'analyse des talwegs. Sur le principe que l'organisation du réseau hydrographique est dépendant des formations géologiques (lithologie, structure) qui le supportent, la densité de drainage est révélatrice des formations et permet la substitution des données liées à la perméabilité des sols et sous-sol. La cartographie IDPR est accessible sur l'Espace cartographique, à l'échelle 1/50 000 sur le site du SIGES bassin Rhin-Meuse (<https://sigesrm.brgm.fr/Carte-de-vulnerabilite-des-nappes>).

- (2) La **capacité de stockage d'un aquifère** est définie comme le volume maximal d'eau pouvant être stocké dans un aquifère et est estimée à l'aide d'une approche de bilan hydrique. La réduction du risque consisterait à maintenir à l'équilibre la capacité de stockage nécessaire pour absorber les trop pleins de recharge hivernaux et continuer à assurer l'alimentation en eau en période d'étiage. Cette gestion du stock passe par une connaissance et une maîtrise des prélèvements sur des périmètres cohérents à l'échelle du territoire (exemple des SAGE) et avec les enjeux associés (usage AEP, industriels ou agricoles) et par une diversification des ressources en eau (eau superficielles, eaux souterraines en nappe libre, eaux souterraines en nappe profonde). L'instrumentation (suivis des niveaux et des prélèvements) et la modélisation des nappes ou systèmes aquifères les plus vulnérables offriront la possibilité de développer des outils de gestion adaptés à l'évaluation du risque et à la définition d'indicateurs de résilience au changement climatique (CC).
- (3) On peut également considérer un autre type de vulnérabilité, qui correspond au **risque de remontée de nappe**. On parle d'inondation par remontée de nappes lorsque l'inondation est provoquée par la montée du niveau de la nappe phréatique jusqu'à la surface du sol à la suite d'évènements pluvieux exceptionnels qui engendrent une recharge exceptionnelle. Une cartographie nationale des zones sensibles aux inondations par remontée de nappe existe¹⁷ mais la généralisation d'études locales¹⁸ conduirait également à disposer de données beaucoup plus précises dans les secteurs à risque élevé ou à enjeux. Les restrictions d'utilisation liés à ce type de cartographie sont associées à des contextes particuliers tels que les zones karstiques (manifestant un comportement particulier et relativement mal connu sur certains secteurs), les zones urbaines (dont les aménagements modifient les écoulements souterrains) et les secteurs après mine (subissant des modifications des écoulements souterrains dues aux pompages des eaux d'exhaure ou à l'arrêt des pompages).

Concernant les enjeux, il semble indispensable de réfléchir, sur un périmètre donné et disposant d'outils de gestion adaptés (indicateurs de résilience au CC), à la mise en œuvre d'actions permettant l'optimisation des usages au regard de la ressource disponible globalement à l'année ou plus spécifiquement en fonction de la saison. En contexte de changement climatique et pour répondre au risque d'évolution de la recharge et des niveaux piézométriques, certaines contraintes sont importantes à prendre en compte telles que :

- Le partage équitable de la ressource en eau entre les différents usagés en cohérence avec la ressource disponible actuellement et dans l'avenir (variabilité climatique) ;

¹⁷ <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/inondations/les-inondations-par-remontee-de-nappe>

¹⁸ <https://www.brgm.fr/fr/reference-projet-acheve/cartographie-sensibilite-aux-remontees-nappe-echelle-locale-guide>

- La répartition spatiale optimale des activités et des habitations au regard des zones naturelles permettant la rétention des eaux superficielles et/ou favorisant l'infiltration diffuse → attention à l'imperméabilisation des sols, au défrichement des parcelles boisées, au retournement de prairie, à l'arrachage des haies, ... toutes ces actions qui peuvent limiter la recharge ou avoir des conséquences sur l'équilibre infiltration/ruissellement à l'aplomb des zones de recharge des nappes (formations aquifères à l'affleurement) mais tout particulièrement sur les aires d'alimentation des captages (AAC) ou les périmètres de protection des captages (PPC) ;
- La réalisation de nouveaux forages d'eau réalisés parfois sans déclaration/autorisation (code minier ou loi sur l'eau) et aux conséquences de ces nouveaux ouvrages pour la ressource en eau, pour les collectivités gestionnaires et pour les autres exploitations à proximité,
- Le croisement de l'évolution de la recharge et des niveaux des nappes souterraines avec les projections de densité de population afin de tenir compte des possibles impacts liés aux prélèvements d'eau par les activités humaines...

7.2.3. Prise en compte de l'anthropisation

Le choix des bassins versants (§0) s'est basé pour partie sur le traitement des critères d'anthropisation tels que l'usage du sol, l'usage de l'eau, les indices de tension quantitative et la caractérisation des milieux. Parmi ces données l'une paraît primordiale pour définir des scénarii prospectifs d'évolution de l'anthropisation du territoire et fait l'objet de travaux récents qui ont donné naissance à un portail spécialisé.

Dans cette étude, le critère « usage du sol » a été pris en compte à partir de la base de données géographique CORINE Land Cover (CLC) correspondant à l'inventaire biophysique de l'occupation des terres et produit dans le cadre du programme européen d'observation de la terre Copernicus (cf. portail <https://artificialisation.developpement-durable.gouv.fr/>). Les sols naturels apportent en effet de nombreux bénéfices en termes de biodiversité, de rafraîchissement de la ville, d'infiltration des eaux de pluie et donc de recharge.

CORINE Land Cover est issue de l'interprétation visuelle d'images satellitaires et est disponible pour les années suivantes : 1990, 2000, 2006 et 2012. Ces bases d'état sont accompagnées par les bases des changements 1990-2000, 2000-2006 et 2006-2012 (données sur les portions du territoire ayant changé d'occupation des sols).

De nouvelles pistes de réflexion et perspectives de développement relatives à l'artificialisation des sols sont offertes avec l'Observatoire national « Portail de l'artificialisation des sols » qui met à disposition les données CLC ainsi que les ressources nécessaires pour la mise en œuvre des mesures visant à réduire la consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers, et l'artificialisation des sols ([Article R. 101-2 du code de l'urbanisme](#)). La France s'est en effet fixée comme objectif d'atteindre le ZAN « zéro artificialisation nette des sols » en 2050, avec un objectif intermédiaire de réduction de moitié de la consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers sur la décennie 2021-2031, par rapport à la décennie précédente 2011-2021. Deux notions sont présentées sur l'Observatoire national :

- La **consommation d'espaces naturels, agricoles et forestiers (ENAF)**, qui correspond à « la création ou l'extension effective d'espaces urbanisés sur le territoire concerné » (article 194 de la loi Climat et résilience). Au niveau national, elle est mesurée par les fichiers fonciers, retraités par le Cerema ;

- **L'artificialisation nette**, qui est définie comme « le solde de l'artificialisation et de la renaturation des sols constatées sur un périmètre et sur une période donnée. ». Au niveau national, elle est mesurée par l'occupation des sols à grande échelle (OCSGE), référentiel en cours d'élaboration (Figure 64), dont la production est engagée depuis 2024. Il s'agit d'une base de données vectorielle de description de (1) l'occupation et de (2) l'usage du sol. En Grand Est, la photo interprétation est toujours en cours pour la plupart des départements à l'exception de l'Alsace. La cartographie OCSGE nouvelle génération produite par des processus automatisés reposant sur l'intelligence artificielle, et des traitements de généralisation, intégrant la zone construite et le différentiel entre millésimes est finalisée et diffusée sur le site <https://geoservices.ign.fr/ocsge#telechargement>.

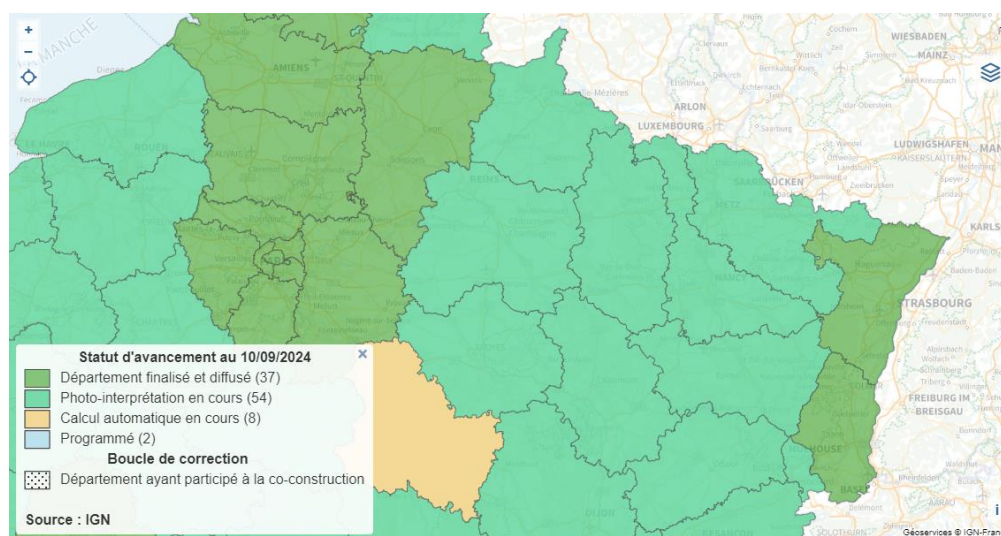


Figure 64 - Calendrier de production de la cartographie OCSGE occupation des sols à grande échelle. Zoom sur le Grand Est.

7.2.4. Effets induits d'une augmentation de la recharge et des niveaux de nappe

La conséquence principale d'une augmentation de la recharge et des niveaux de nappe peut conduire notamment au phénomène d'inondation par remontée de nappes qui se matérialise sous différentes formes :

- L'inondation généralisée dans les vallées majeures, par contribution exceptionnelle de la nappe ;
- La réactivation par des cours d'eau temporaires de certaines vallées sèches, où habituellement les cours d'eau ne coulent plus en surface mais uniquement dans les fissures souterraines de la roche ou dans le réseau karstique sous-jacent ;
- L'apparition d'étangs et de mares temporaires sur certains plateaux dans des zones de dépressions (dolines de décalcification ou anciennes carrières) ;
- L'apparition de lignes de sources dans les thalwegs, bien en amont des sources habituelles ;

- Des inondations par des causes secondaires : cas des ouvrages de génie-civil sous-dimensionnés, exécutés pour permettre le passage de voies d'accès pour le franchissement de vallées sèches ou de vallons qui ne coulent habituellement pas, qui peuvent constituer des obstacles à l'écoulement en période de remontée de nappe et provoquer des inondations des terrains situés en amont ;
- Des mouvements de terrains notamment sur des sites à pente importante : La remontée de l'eau peut déstabiliser la couche la plus meuble du sol et de la zone altérée de la roche. Cependant la distinction avec des mouvements de terrain dus à une saturation excessive et directe des sols par la pluie est difficile à faire.

Les dégâts provoqués soient par l'inondation elle-même, soient par la décrue qui suit la remontée de nappe sont les suivants :

- L'inondation de jardins, de parcelles agricoles, de bâtiments, de sous-sols, de garages semi-enterrés, de caves... ;
- La fissuration d'immeubles ;
- La remontée, sous la poussée de l'eau, de cuves enterrées ou semi-enterrées, de piscines voire de canalisations ;
- La détérioration des réseaux routiers, des réseaux ferrés, des ouvrages de génie civil, menant parfois à des désordres importants ;
- La dispersion de déchets et de polluants entraîné par l'eau ;
- L'effondrement d'ouvrages souterrains anthropiques ou de cavités naturelles...

La plupart des actions préventives relève soit de la modification des règles de construction (imposer des contraintes pour les nouvelles constructions sur la nature des sous-sols, le type de fondations...), soit de l'évolution des règles d'urbanisme (réduction des dommages en éloignant les personnes et les biens des zones à risque). Les outils pertinents à mettre en œuvre à l'échelle locale sont des cartographies de sensibilité au risque d'inondation par remontées de nappe associée à la cotation d'indices de fiabilité.

7.2.5. Effets induits d'une diminution de la recharge et des niveaux de nappe

La principale conséquence d'une diminution de la recharge et des niveaux de nappe s'apparente aux épisodes de sécheresse rencontrés ces dernières années et qui semblent devenir relativement récurrent en période estivale.

La ressource en eau exploitée par les gestionnaires des réseaux de production et de distribution n'est pas suffisante. Des restrictions sont imposées aux usagés pour limiter la consommation et des solutions de substitution sont mises en œuvre (mobilisation d'une ressource secondaire ou de secours, interconnexion avec des collectivités voisines, recours à des approvisionnements par camions citerne...). Si certaines collectivités sont déjà fréquemment confrontées à cette problématique, la généralisation à l'ensemble du territoire semble inéluctable en fonction de la vulnérabilité des nappes exploitées.

Si les effets sont durables dans le temps des solutions à long terme devront être trouvées pour palier à des déficits chroniques : renforcement des mesures de réduction des consommations et des fuites sur les réseaux, diversification des approvisionnements, systématisation des interconnexions...

Il demeure important de bien connaître la ressource exploitée, son fonctionnement et sa vulnérabilité face à l'aléa climatique pour éviter de tomber dans les pièges de la surexploitation. En effet l'exploitation excessive des eaux souterraines peut provoquer l'assèchement du captage, la dégradation du tubage, des investissements toujours plus importants pour adapter les installations de captages ou réaliser de nouveaux ouvrages toujours plus profonds, l'instauration d'un déséquilibre du bilan hydrologique de l'aquifère (prélèvements > recharge) parfois irrémédiable, l'assèchement des cours d'eau associés, l'affaissement des terrains en surface...

Les perspectives envisagées concernent le soutien à apporter aux gestionnaires pour la mise en œuvre des actions préventives et la possibilité de fédérer certaines actions et la mise à disposition d'indicateurs diversifiés et adaptés aux perspectives de changement notamment sur le suivi de l'état de la ressource (exemple : [MétéEau Nappes](#)).

7.2.6. Pistes pour la définition des indicateurs de résilience au changement climatique axé sur la ressource en eau (recharge, niveau d'eau)

A ce stade et compte tenu de la forte variabilité des résultats obtenus, il semble délicat d'établir des recommandations ou des perspectives concrètes pour tenir compte du changement climatique à destination des acteurs locaux, notamment des gestionnaires des réseaux d'eau, qui devront s'adapter au cas par cas en fonction de la ressource exploitée et de sa vulnérabilité.

En revanche, les mesures d'adaptation les plus pertinentes relèvent du renforcement des connaissances, du suivi et de la mise en place d'indicateurs de résilience au changement climatiques en lien avec les critères « usage du sol », « usage de l'eau », « indice de tension quantitative » et « caractérisation des milieux », soit a minima les actions suivantes :

- Définir les zones d'intérêt ou les zones à risque et les plans d'actions associés ;
- Systématiser le suivi et la traçabilité de l'évolution des usages du sol, notamment dans les aires d'alimentation des captages ;
- Systématiser sur les ouvrages exploités les suivis de prélèvements et de niveaux de nappe et bancariser les données ;
- Systématiser le suivi des cours d'eau à l'échelle locale pour les zones à risque et bancariser les données ;
- Faciliter l'accès aux bases de données pour la saisie de données en lien avec l'état de la ressource ou les difficultés de gestion et ouvrir la consultation aux acteurs de l'eau ;
- Adapter la réglementation en matière de construction, d'aménagement du territoire, de réalisation d'ouvrages souterrains (forages), de protection des captages et renforcer les contrôles ;
- Favoriser la mise en œuvre de modèles à l'échelle de secteurs à enjeux ou de zones à risque.

7.2.7. Interprétation cartographique croisée des zones à enjeux du point de vue de la pression anthropique et des secteurs potentiellement impactés par le changement climatique

La Figure 65 donne une première approche de la cartographie des zones à enjeux sur la base des conclusions de l'étude SAFEGE de 2022¹⁹, concernant *l'État quantitatif des ressources en eau du Grand Est : prospective à milieu et fin de siècle et propositions d'actions* et de la présente étude.

L'étude SAFEGE de 2022 a défini les niveaux de pression sur la ressource en eau sur 35 zones homogènes à l'échelle de la région Grand Est (classement établi entre un niveau faible en vert et un niveau très fort en rouge sur la Figure 65). À la suite d'une concertation conduite par la Région Grand Est auprès des différents acteurs, le choix s'est porté sur 13 de ces 35 zones homogènes pour la mise en œuvre d'études locales approfondies de l'état quantitatif des ressources en eau. Les secteurs sur lesquels des études de la gestion quantitative de la ressource (volumes prélevables, SAGE...) sont déjà engagées ont été écartés, de manière à orienter la réflexion vers des zones homogènes pour lesquelles aucune étude n'était en cours. Le territoire Rhin-Meuse est concerné par 8 de ces 13 zones :

- Ill amont ;
- Ill aval, Rhin et Plaine d'Alsace ;
- Bruche, Ehn, Andlau, Giessen et Liepvrette ;
- Meurthe ;
- Moselle amont ;
- Moselle aval ;
- Haute Meuse ;
- Meuse aval.

Les bassins versants modélisés dans le cadre de la présente étude sont inscrits pour au moins 5 d'entre eux [BV1, BV2, BV3, BV7, BV8] dans ces zones à enjeux.

On notera que les secteurs **Socle Vosgien** et **Plaine d'Alsace** ne sont que partiellement couverts par les 8 zones à enjeux définies précédemment et mériterait également une attention toute particulière.

¹⁹ <https://biodiversite.grandest.fr/le-grand-est-en-mouvement/des-enjeux-biodiversite/lacs-et-rivieres/etude-prospective-eau-consultez-la-docutheque/>

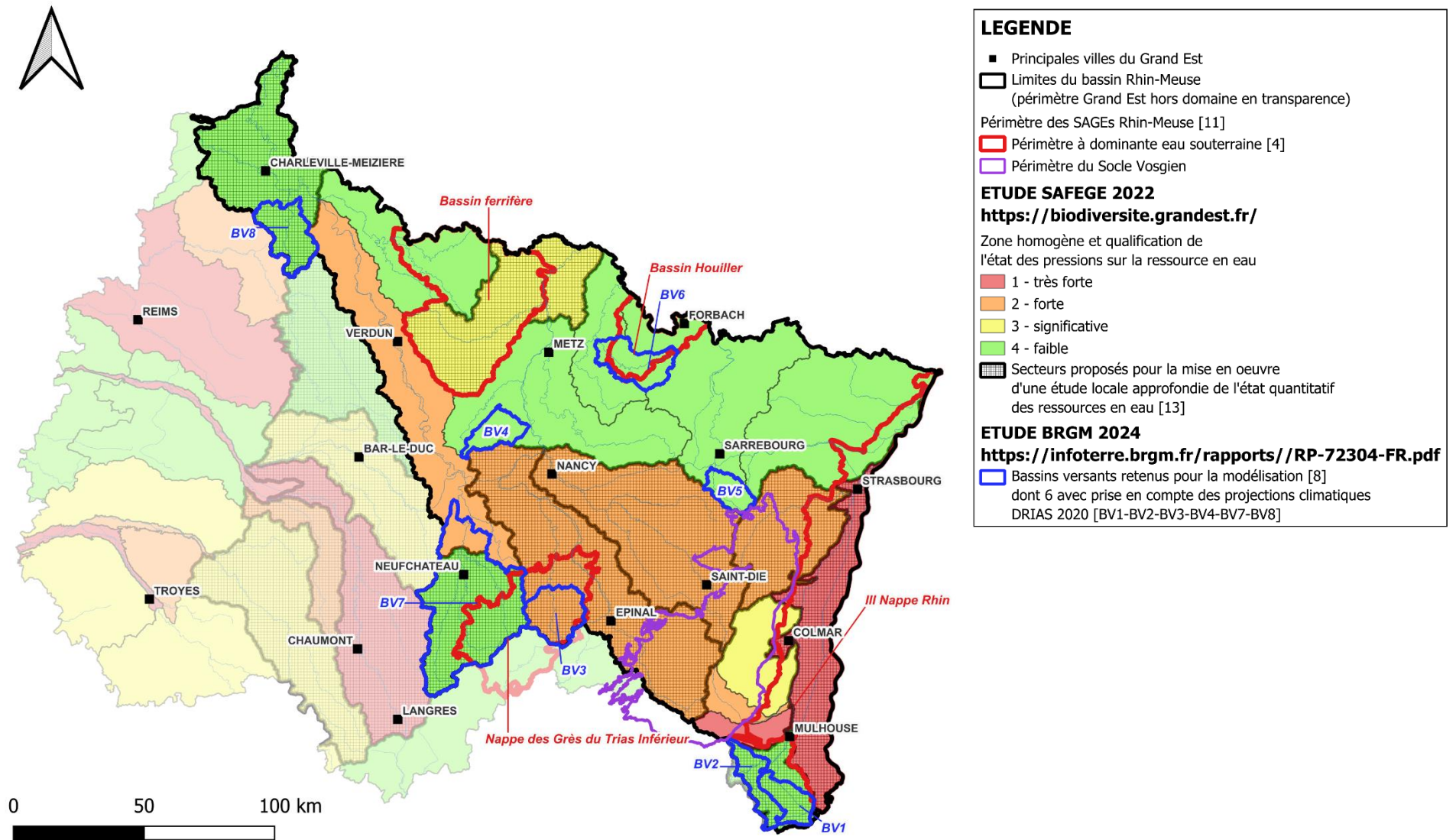


Figure 65 – Carte de synthèse des zones à enjeux à l'échelle du bassin Rhin-Meuse

8. Conclusions

L'évaluation de l'état quantitatif des ressources en eau souterraine est un enjeu important. En contexte de changement climatique, une incertitude forte pèse sur l'évolution de la recharge et celle des niveaux piézométriques, qui conditionnent à l'échelle de Rhin-Meuse l'approvisionnement de 4.4 millions d'habitants, 3 230 communes et 1 265 services de distribution d'eau potable.

Entre 2018 et 2020, le BRGM a travaillé en partenariat avec l'Agence de l'eau Rhin-Meuse sur l'estimation de la recharge des aquifères en vue d'établir l'état des lieux DCE 2019 et en sélectionnant la ou les méthodes les plus appropriées pour établir la cartographie à l'échelle du territoire. L'étude a conduit à dresser une cartographie « composite » de la recharge adaptée à la diversité des aquifères et à leur niveau de connaissance (Rapport BRGM/ RP-69762-FR de 2020).

A partir de 2021, le partenariat entre le BRGM, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et la Région Grand Est s'est attaché à définir l'impact du changement climatique sur la recharge et l'évolution des niveaux piézométriques. Les travaux ont porté sur deux actions complémentaires :

Action n°1 La mise en œuvre de calculs permettant d'estimer et de cartographier les variations de recharge à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse à l'horizon 2050, 2070 et 2100 ;

Action n°2 La réalisation de modélisations hydrologiques globales sur 8 bassins versants (choisis sur des critères précis définissant leurs représentativités en termes d'anthropisation, d'usage et de caractérisation des milieux) et l'analyse de l'évolutions d'indicateurs statistiques tels que les variations de recharge et de niveaux piézométriques dans un contexte de changement climatique.

La principale difficulté a résidé dans le choix des projections climatiques en cohérence avec les études menées à l'échelon national (DRIAS 2020, Explore2). Finalement, les résultats portent sur le traitement statistique de 22 projections climatiques (dont 2 particulièrement pluvieuses qui n'ont finalement pas été prises en compte dans Explore2). La synthèse des données s'est faite :

Action n°1 D'une part à l'échelle d'unités géographiques compatibles avec la nécessité de gestion opérationnelle (entités hydrogéologiques BDLISA croisés avec les zones hydrologiques de BD Carthage) pour les variations de recharge selon des valeurs médianes et les quantiles 5 et 95% définis pour chaque RCP (2 scénarios d'émission contrasté RCP 4.5 et RCP 8.5) et 3 périodes de 30 ans (horizon H1 : 2021-2050 ; H2 : 2041-2070 ; H3 : 2070-2099) ;

Action n°2 D'autre part en comparant les résultats (variations de recharge et de niveau piézométriques) des 22 projections climatiques, de 2 narratifs (sur les 4 projections climatiques contrastées retenus dans Explore2), des valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales et des quantiles 5 et 95 % définis pour chaque RCP, chaque horizon et chaque bassin versant sélectionné.

Globalement, on notera l'importance de la dispersion spatiale et temporelle des résultats aussi bien en moyenne annuelle qu'en moyenne saisonnière. Trois secteurs se distinguent par leurs évolutions contrastées : **la Nappe d'Alsace** (plus impactée par l'augmentation de la recharge²⁰), le **Socle Vosgien** (plus impactée par la diminution de la recharge en été) et le **Sundgau** (forte dispersion selon les projections climatiques, évolution spécifique différente des autres bassins versants étudiés).

Bilan de l'action n°1

L'ensemble du bassin Rhin-Meuse est marqué en valeur médiane (RCP4.5 et RCP8.5) par un excédent de recharge annuelle, avec des minimas sur le **socle vosgien** et des maximas sur la **plaine d'Alsace**. La répartition saisonnière est très contrastée avec une constante : accentuation des excédents en hiver et des déficits au printemps, été et automne.

L'ensemble des projections climatiques prises en compte donne des résultats très différents d'un extrême à l'autre : le 5^{ème} quantile marqué par une baisse généralisée de la recharge et 95^{ème} quantile caractérisé par un excédent sur tout le périmètre mais très contrastée géographiquement.

L'observation récurrente qui est faite en comparant les résultats statistiques définis par RCP met en lumière la vulnérabilité des territoires à l'est du bassin Rhin-Meuse, notamment en Alsace et sur le massif vosgien.

La mise en perspective des travaux réalisés dans le cadre de cette étude à l'échelle du bassin Rhin-Meuse avec les précédents travaux, notamment ceux d'**Explore 2070**²¹ ou du **Socle Vosgien**²², montrent de profondes différences liées à l'évolution des méthodologies employées :

- Explore 2070 montrait une baisse significative de la recharge en valeur médiane annuelle sur l'ensemble du territoire, ce qui n'est pas le cas des dernières simulations réalisées à partir des scénarios DRIAS 2020 sur le bassin Rhin-Meuse ;
- Du point de vue méthodologique, Explore 2070 se basait sur le 4^{ème} rapport du GIEC, avec un seul scénario d'émission GES, 7 GCM, une méthode de descente d'échelle statistique, alors que DRIAS 2020 se base sur le 5^{ème} rapport du GIEC, 2 scénarios d'émission GES, 6 GCM, une descente d'échelle dynamique avec des RCMs, correction des biais par rapport aux observations avec ADAMONT ;

²⁰ Les études antérieures ont montré que la recharge par les pluies efficaces ne correspondrait qu'à 20 à 30% de la recharge totale de la nappe d'Alsace (cf. §0)

²¹ STOLLSTEINER Ph. (2012) - Projet EXPLORE 2070 - Evaluation de l'impact du changement climatique. Rapport final Lot 4 "Expertise Hydrogéologie - Ressources souterraines et aquifères". BRGM/RP-61483-FR, 7 volumes (pas de volume 2 et 6), [pag. mult.]

²² CHABART M., VERGNES J.P. (2021) – Impact du changement climatique sur la ressource en eau du socle Vosgien. Rapport final. BRGM/RP-70595-FR, 146 p., 47 fig., 5 tabl., 3 ann

La littérature scientifique (TARANU et al. ; 2023) montre qu'il existe **un biais introduit** par le choix de la méthode de régionalisation utilisée dans DRIAS 2020. Cette méthode de régionalisation utilise des modèles climatiques régionaux pour régionaliser à des résolutions plus fines (notamment sur la France) les résultats des modèles climatiques globaux, et diffère des méthodes de régionalisation statistiques employées dans les précédentes études. Taranu et al. (2023) montre que ces RCMs ont une tendance à atténuer le réchauffement par rapport aux GCMs et sont plus humides, notamment sur la partie nord de la France. Ces résultats peuvent expliquer les divergences de signes que l'on observe entre la présente étude et les précédentes (Explore 2070, socle vosgien). Ces résultats doivent donc être mis en perspective de la **forte incertitude qui réside dans le choix de la méthode de régionalisation** réalisé par la communauté des climatologues.

Bilan de l'action n°2

Les études menées à l'échelle nationale (Explore2) et locale (la présent étude) ont montré que la principale source d'incertitude est liée au choix des projections climatiques. Même si la prise en compte de différentes projections climatiques illustre la dispersion des résultats dans le cadre de l'étude locale, elle peut être à l'origine de biais notamment quant à l'utilisation de 2 projections climatiques particulièrement humides (non retenues dans Explore2) et de l'absence des 2 narratifs suivants (retenus dans Explore2) :

- Narratif vert : Réchauffement marqué et augmentation des précipitations ;
- Narratif orange : Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel).

Compte tenu de ces limites, les paragraphes suivants dressent la synthèse des résultats de variations de recharge et de niveau piézométrique à l'horizon 2100 en moyenne annuelle, en moyenne saisonnière et pour les 2 narratifs suivants :

- Narratif jaune : Changements futurs relativement peu marqués ;
- Narratif violet : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations.

Si l'on s'attache aux résultats de variation de recharge à l'horizon 2100 en moyenne annuelle ou saisonnière :

- En valeur médiane annuelle, les variations de recharge sont toujours positives : augmentation de l'ordre de + 5 à + 12 % ;
- Augmentation plus marquée en hiver de l'ordre de + 13 % à + 27 % et au printemps de l'ordre de + 7 à + 10 % ;
- Baisse de la recharge en automne et en été pour le Sundgau (BV1 et BV2).

Si l'on s'attache aux résultats de variation de niveau piézométrique à l'horizon 2100 en moyenne annuelle ou saisonnière :

- En valeur moyenne annuelle, tous les écarts sont tous positifs (RCP 4.5 aussi bien que RCP 8.5) entre + 0.03 m (RCP 4.5) pour le BV8 et + 0.70 m (RCP 4.5) pour le BV1 ;
- Les amplitudes totales des variations de niveau de nappe sont comprises entre 0.8 m (BV8 situé dans les Ardennes au nord-ouest du bassin Rhin-Meuse présente la plus faible amplitude de valeurs) et 5 m (BV1 et BV3 au sud-est du bassin Rhin-Meuse présentent les plus fortes amplitudes de valeurs) ;
- La tendance globale est à l'augmentation des niveaux de nappe en hiver et au printemps et à la baisse en été et en automne, sauf pour le Sundgau (BV1 et BV2), qui présentent une relative homogénéité d'une saison à l'autre.

Si l'on s'attache aux deux narratifs commun avec l'étude nationale (Explore 2), les tendances sont les suivantes :

- Ecart relatif en moyenne annuelle sur la recharge potentielle
 - Pour le narratif jaune (changements futurs relativement peu marqués) : tendance pour l'horizon 2100 à l'augmentation de la recharge aussi bien pour le RCP 4.5 que pour le RCP 8.5 entre respectivement 9 % (BV7) et 18 % (BV1) ;
 - Pour le narratif violet (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations) : tendance pour l'horizon 2100 à la diminution de l'ordre de - 17 % à - 20 % pour les BV1 et BV2 (Sundgau), tandis que pour les autres bassins l'évolution est plus modérée (- 3 % à + 4 %) voire nulle.
- Ecart en moyenne annuelle sur le niveau piézométrique
 - Pour le narratif jaune (changements futurs relativement peu marqués) : augmentation plutôt dans la moyenne des différentes projections entre + 0.02 m sur BV8 et + 0.89 m sur BV1 pour RCP 4.5 et entre + 0.03 m sur BV8 et +0.71 m sur BV1 pour RCP 8.5 ;
 - Pour le narratif violet (fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations) : baisse pour les BV1 et BV2 et hausse pour les autres bassins (variations comprises entre - 1.6 m pour BV1 RCP 8.5 et + 0.38 pour BV3 RCP 4.5).

Concernant la prise en compte des incertitudes dans l'exploitation des données, il est nécessaire de considérer que les résultats présentés dans ce rapport doivent être pris en compte :

- De manière tendancielle ou en termes d'ordre de grandeur quand on évoque les valeurs statistiques établies à partir des résultats issus des différentes modélisations prenant en compte les 22 projections climatiques ;
- Ou comme le champ des possibles, notamment quand on compare entre eux les résultats des différentes projections climatiques. Dans ce cas, on fait l'hypothèse d'une équiprobabilité des différentes projections climatiques pour un même RCP ;
- Ou comme la restitution de 2 projections climatiques particulières (2 des 4 narratifs d'Explore2) retenues par leur représentativité contrastée :
 - Changements futurs relativement peu marqués ;
 - Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations.

Concernant les indicateurs de résilience au changement climatique et la prise en compte de l'impact potentiel de l'anthropisation sur les évolutions de recharge et de niveaux de nappe, une série de constats et de perspectives sont mises en évidence pour réduire les risques liés à l'impact du changement climatique et disposer le plus tôt possible des outils d'aide à la décision nécessaire à la gestion collective de la ressource dans un souci d'anticipation.

9. Bibliographie

ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. and SMITH M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

BUSCARLET E., CHABART M., GUIGNAT S. (2020) – Estimation de la recharge des aquifères sur le bassin Rhin-Meuse – volet 1. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69762-FR, 29 p., 12 fig., 1 tabl.

CABALLERO Y., LANINI S., LECHEVALIER J., MARECHAL J.-C. (2021), Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique - Application au bassin Rhône Méditerranée Corse - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-69217-FR, 155 p., 92 ill., 10 ann.

CABALLERO Y., LANINI S., SEGUIN JJ., CHARLIER JB., OLLIVIER C. (2015) - Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône-Méditerranée et Corse. Rapport de fin de 1ère année. BRGM/RP-64779-FR. 159 p.

CABALLERO Y., LANINI S., ZEROUALI L., BAILLY-COMTE V. (2016) - Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport final. BRGM/RP-65807.

CHABART M., VERGNES J.P. (2021) – Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Socle Vosgien. Rapport final. BRGM/RP-70595-FR, 146 p., 47 fig., 5 tabl., 3 ann

DEZSI Ş., MINDRESCU M., PET-REA D., RAI PK., HAMANN A., NISTOR M-M. (2018) - High-resolution projections of evapotranspiration and water availability for Europe under climate change. Int J Climatol. 2018 ; 38:3832–3841. <https://doi.org/10.1002/joc.5537>.

DINGMAN S L. (2002) - Physical Hydrology (2nd Edition). Éditeur : Prentice Hall. ISBN 10 : 0130996955 / ISBN 13 : 9780130996954. 646 p.

EDIJATNO et MICHEL C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2, pp 113-122, doi:10.1051/lhb/1989007.

GIEC : Publications de The Intergovernmental Panel on Climate Change disponible en ligne <https://www.ipcc.ch/report> notamment 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC.

GIEC (2014) Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p. [Lien](#).

HAIDU I, NISTOR M-M. (2019) - Long-term effect of climate change on groundwater recharge in the Grand Est region of France. Meteorol Appl. 2019;1–17. <https://doi.org/10.1002/met.1796>.

HARGREAVES G.H. and SAMANI Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration From Temperature. Applied Engrg. in Agric. 1(2):96-99.

HIEDERER R. (2013) - Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes. Luxembourg: Publications Office of the European Union – 2013 – 47pp. – EUR26082EN Scientific and Technical Research series, ISSN 1831-9424, doi:10.2788/94128

IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

KLINKA T., SEGUIN J.J., FOURNIGUET G. (2017) - Les indicateurs sécheresse en région Grand Est (Champagne Ardenne, Lorraine, Alsace) : analyse et propositions. Rapport final. BRGM/RP-67043-FR.

LANINI S. and CABALLERO Y. (2021), ESPERE, a Tool for Multimethod Aquifer Recharge Estimation: What's New with Version 2. Groundwater, 59: 5-6. doi :10.1111/gwat.13049

LANINI S., CABALLERO Y., HEVIN G., LE COINTE P., PINSON S., DESPRATS JF (2021) Groundwater Recharge Indicators at the European scale. EGU Gather on-line 19-30 April 2021

LANINI S., CABALLERO Y., LE COINTE P., BERANGER S., ARNAUD L., PINSON S. (2019) Recharge des aquifères à l'échelle de la France : estimation, évolution et incertitudes associées. Colloque UNESCO-SHF : « Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019 »

LANINI S., CABALLERO Y., SEGUIN J.-J., AND MARECHAL J.-C. (2015), ESPERE - A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge, Groundwater 54, no. 2: 155-15)

LE COINTE P., ARNAUD L., BERANGER S., CABALLERO Y., LANINI S., BERTIN C., PINSON S., THINON LARMINACH M., TILLOLOY F. (2019) - Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin AdouR-GaronnE (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 155 p., 7 ann. dont 6 pl. HT.

LOGAR (2012) - Rapport final du projet «InterReg IV – Liaison Opérationnelle pour la Gestion de l'Aquifère Rhénan / LOGAR». [Lien](#).

MANCEAU JC, ALLIER D., BUSCARLET E. (2020) – Analyse de la sécheresse hydrogéologique dans la région Grand Est – Phase 2 : amélioration des indicateurs de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69867-FR, 336 p., 29 ill., 3 tabl., 5 ann., 1 CD.

MARDHEL V. (2010) – Carte de vulnérabilité intrinsèque simplifiée des eaux souterraines du bassin Rhin Meuse et de la Région Lorraine, BRGM/RP-56539-FR, 67 p, 34 figures, 1 ann., 1 Cd-Rom.

MARDHEL V., PINSON S., ALLIER D. (2021), Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory, *Journal of Hydrology*, Volume 592, 125609, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125609>.

NASH J.E. and SUTCLIFFE J.V. (1970) River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1—A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

National Institute for Economic Research “Costin C. Kiritescu” of the Romanian Academy, Centre for Mountain Economy (CE-MONT), Vatra Dornei, Romania. Department of Hydrogeology, Earthresearch Company, Cluj-Napoca, Romania

NISTOR M.M, Man T.C., BENZAGHTA M.A., NEDUMPALLILE VASU N., DEZSI S., KIZZA R. (2018). Land cover and temperature implications for the seasonal evapotranspiration in Europe. *Geographica Technica*, Vol. 13, Issue 1, pp. 85-108. DOI: 10.21163/GT_2018.131.09.

NISTOR M.M, PORUMB G.C.G. (2015). How to to compute the land cover evapotranspiration at regional scale? A spatial approach of Emilia-Romagna region. *Georeview* 25, pp. 38-53. doi: 10.4316/GEOREVIEW.2015.25.1.268.

NISTOR M.M. (2018) - Projection of annual crop coefficients in Italy based on climate models and land cover data. *Geographia Technica*, 13(2), 97–113.

NISTOR, M.M. and MINDRESCU, M. (2019) Climate change effect on groundwater resources in Emilia-Romagna region: an improved assessment through NISTOR-CEGW method. *Quaternary International*, 504(2019), 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.11.018>.

SCANLON Bridget R., HEALY Richard W, COOK Peter G. (2002) - Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. in *Hydrogeology Journal* 10(1) : 18-39 February 2002. DOI: 10.1007/s10040-001-0176-2. [Lien](#).

SCHOMBURGK S., PINAULT JL., LONGUEVERGNE L. (2005) - Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport final. BRGM/RP-53579-FR, 84 p. 61 fig. [Lien](#).

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

SOUBEYROUX JM., BERNUS S., CORRE L., DROUIN A., DUBUISSON B., ETCHEVERS P., GOUGET V., JOSSE P., KERDONCUFF M., SAMACOITS R. et TOCQUER F. (2020) - Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole. Rapport METEO-France. [Lien](#). [Video](#).

STOLLSTEINER Ph. (2012) - Projet EXPLORE 2070 - Evaluation de l'impact du changement climatique. Rapport final Lot 4 "Expertise Hydrogéologie - Ressources souterraines et aquifères". BRGM/RP-61483-FR, 7 volumes (pas de volume 2 et 6), [pag. mult.]

TARANU I. S., SOMOT S., ALIAS A., BOÉ J. AND DELIRE C. (2023) Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe, *Climate Dynamics*, 60 (11-12), pp. 3813-3838, doi:10.1007/s00382-022-06540-6. [Lien](#).

THIERY D. (2015) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. BRGM/RP-64500-FR, 48 p. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64500-FR.pdf>

THIERY D. (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1 - Vos premières modélisations. Rapport final. BRGM/RP-61720-FR, 127 p. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-61720-FR.pdf>

THIERY D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport final. BRGM/RP-62797-FR, 116 p., 2 ann. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62797-FR.pdf>

THIERY D. (2018) - Logiciel ÉROS version 7.1 - Guide d'utilisation. Rapport final. BRGM/RP-67704-FR, 171 p., 2 ann. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-67704-FR.pdf>

THORNTHWAITE C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38:55 – 94.

VETTER, T., REINHARDT, J., FLÖRKE, M. et al. (2017) - Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. Climatic Change (2017) 141: 419. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y>

VIDAL J.P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY F., BAILLON M., SOUBEYROUX JM. (2010) - A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, Wiley, 2010, 30 (11), pp.P. 1627-1644. DOI: 10.1002/joc.2003. meteo-00420845. [Lien](#).

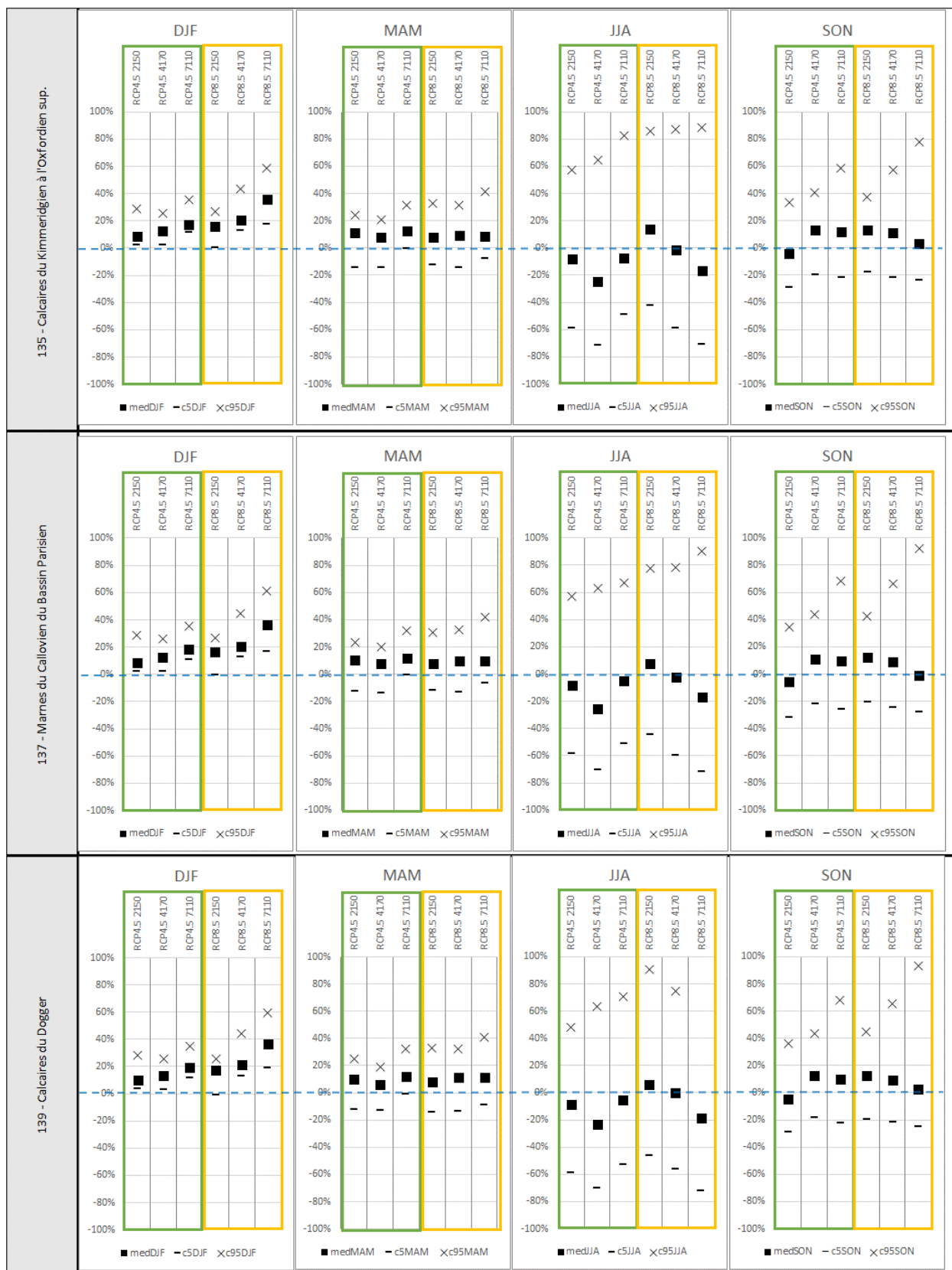
WIGLEY TML (2005) - The climate change commitment. Science 307(5716):1766-1769.

WILBY RL, HARRIS I. (2006) - A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resour Res 42 W02419 doi:10.1029/2005WR004065.

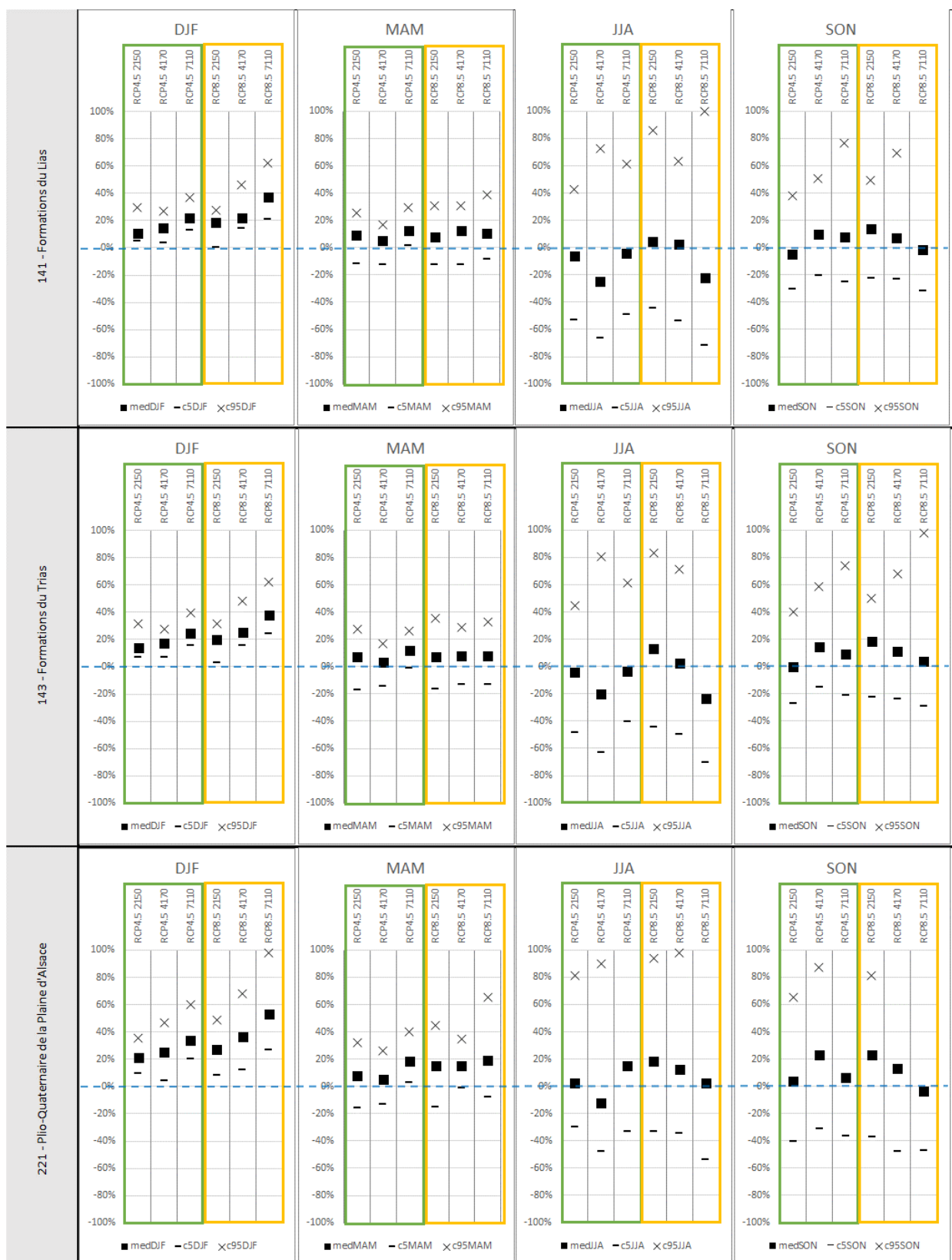
Annexe 1 : Graphiques des variations de recharge saisonnière pour les principales entités hydrogéologiques NV1 du bassin Rhin-Meuse

LEGENDE	■	med	médiane
	-	c5	centile 5% (5ème quantile)
	x	c95	centile 95% (95ème quantile)
		RCP4.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 4.5 (pour chacun des 3 horizons)
		RCP8.5	statistiques sur les projections climatiques associées au RCP 8.5 (pour chacun des 3 horizons)
	2150	H1	Période future n°1 de 2021 à 2050 (années civiles)
	4170	H2	Période future n°2 de 2041 à 2070 (années civiles)
	7110	H3	Période future n°1 de 2071 à 2100 (années civiles)
	DJF	hiver	décembre, janvier, février
	MAM	printemps	mars, avril, mai
	JJA	été	juin, juillet, août
	SON	automne	septembre, octobre, novembre

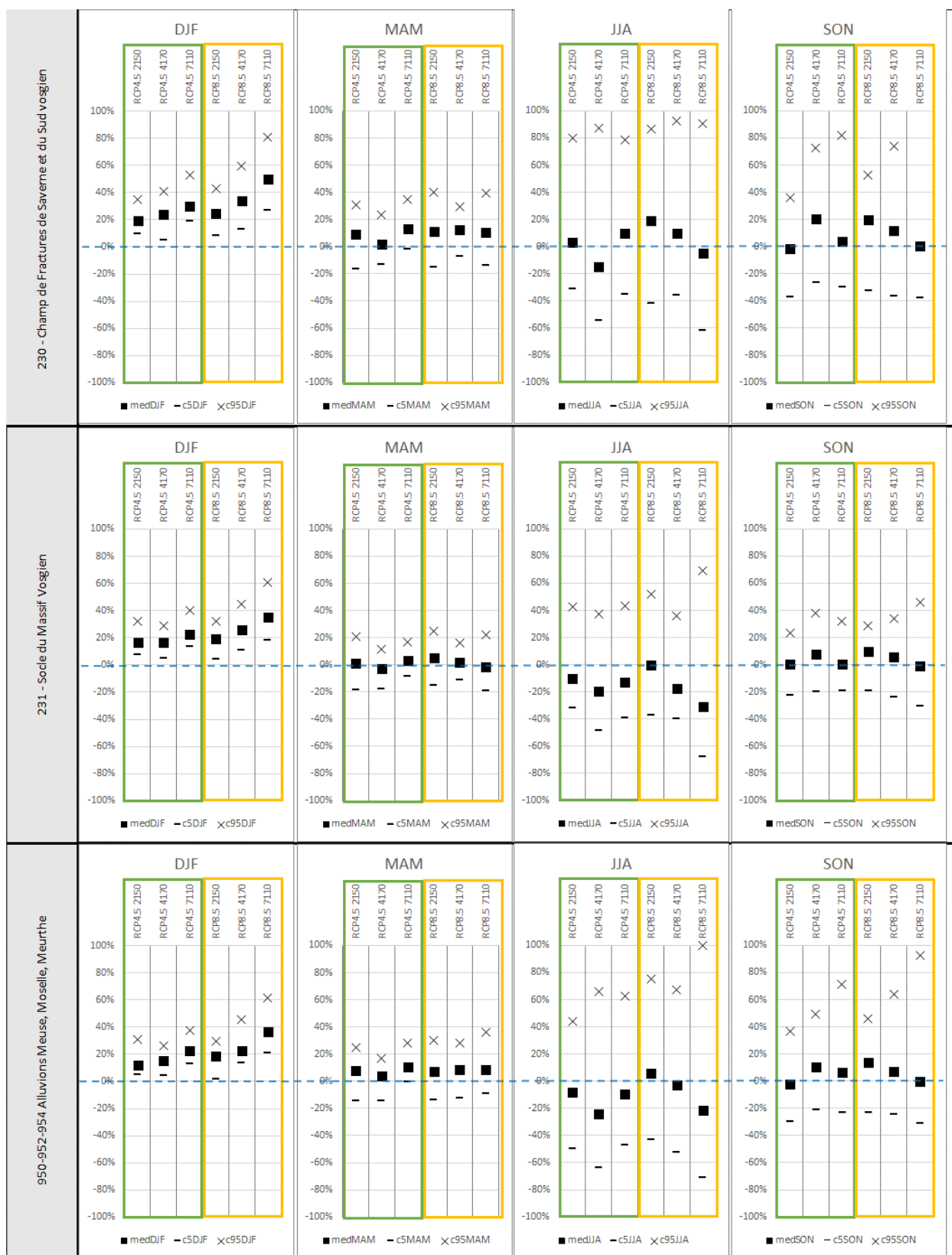
Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations



Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations



Évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge potentielle future des nappes à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations



Annexe 2 : Tableau de correspondance CLC et Kc (Nistor et al. 2018)

Code CLC	Kc_ini	Kc_mid	Kc_end	Kc_cold
111	0.2	0.4	0.25	0
112	0.1	0.3	0.2	0
121	0.2	0.4	0.3	0
122	0.15	0.35	0.25	0
123	0.3	0.5	0.4	0
124	0.2	0.4	0.3	0
131	0.16	0.36	0.26	0
132	0.16	0.36	0.26	0
133	0.16	0.36	0.26	0
141	0.12	0.32	0.22	0
142	0.1	0.3	0.2	0
211	1.1	1.35	1.25	0
212	1.2	1.45	1.35	0
213	1.05	1.2	0.6	0
221	0.3	0.7	0.45	0
222	0.3	1.05	0.5	0
223	0.65	0.7	0.65	0.5
231	0.4	0.9	0.8	0
241	0.5	0.8	0.7	0
242	1.1	1.35	1.25	0
243	0.7	1.15	1	0
244	0.9	1.1	1.05	0.3
311	1.3	1.6	1.5	0.6
312	1	1	1	1
313	1.2	1.5	1.3	0.8

Code CLC	Kc_ini	Kc_mid	Kc_end	Kc_cold
321	0.3	1.15	1.1	0
322	0.8	1	0.95	0
323	0.25	0.9	0.8	0
324	0.8	1	0.95	0
331	0.2	0.3	0.25	0
332	0.15	0.2	0.05	0
333	0.4	0.6	0.5	0
334	0.1	0.15	0.05	0
335	0.48	0.52	0.52	0.48
411	0.15	0.45	0.8	0
412	0.1	0.4	0.75	0
421	0.1	0.3	0.7	0
422	0.1	0.15	0.05	0
423	0.3	0.7	1.3	0
511	0.25	0.65	1.25	0
512	0.25	0.65	1.25	0
521	0.3	0.7	1.3	0
522	0.25	0.65	1.25	0
523	0.4	0.8	1.4	0

Avec :

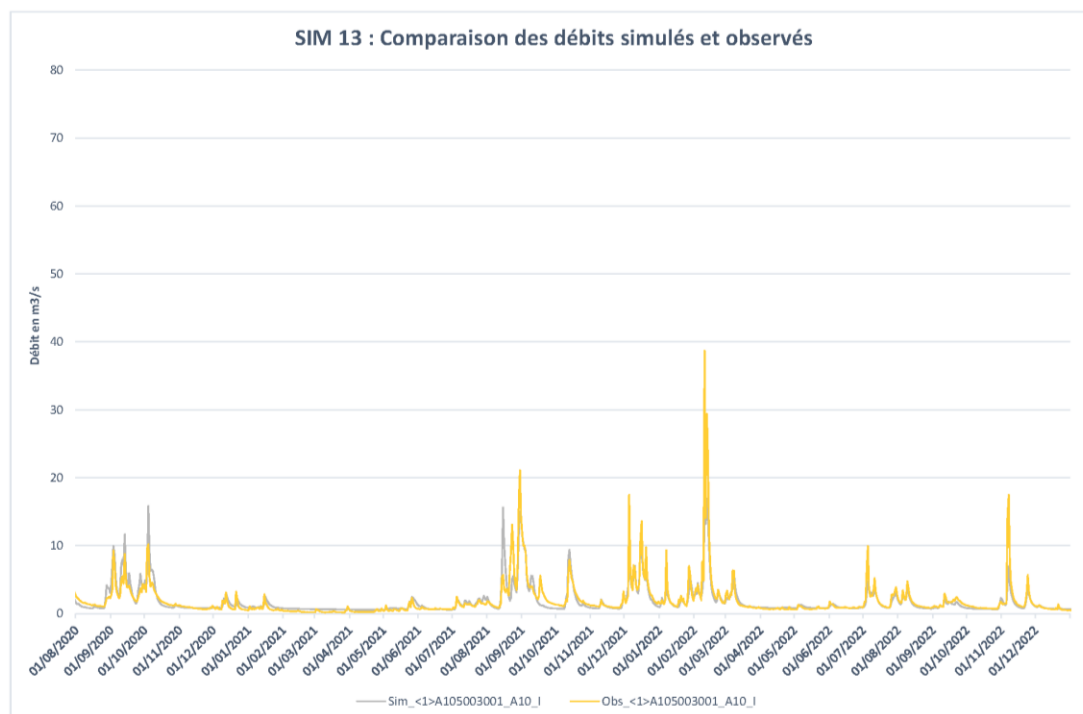
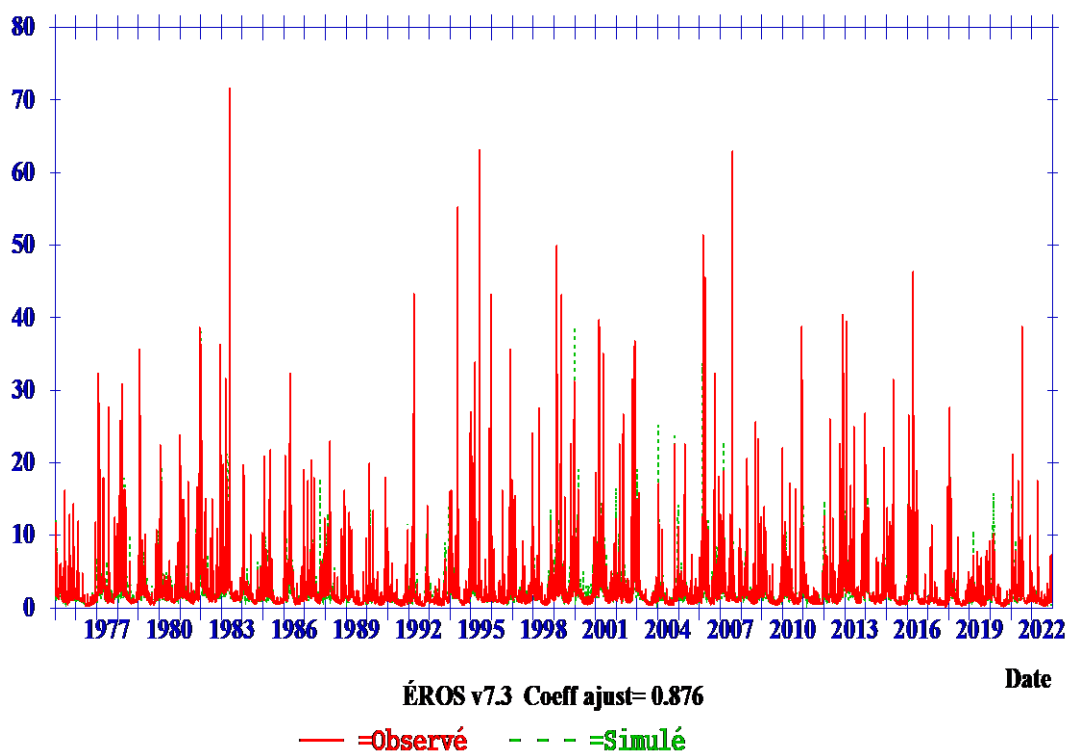
- Code CLC = code Corine Land Cover (version 2018)
- Kc_ini = coefficient cultural pour la phase de développement végétal (mars à mai)
- Kc_mid = coefficient cultural pour la phase de floraison jusqu'à la maturité (juin à août)
- Kc_end = coefficient cultural pour la phase de maturité jusqu'à la récolte (septembre à octobre)
- Kc_cold = coefficient cultural pour la phase « froide » en l'absence de croissance (novembre à février)

Annexe 3 : Graphiques des chroniques de débits simulés et observés

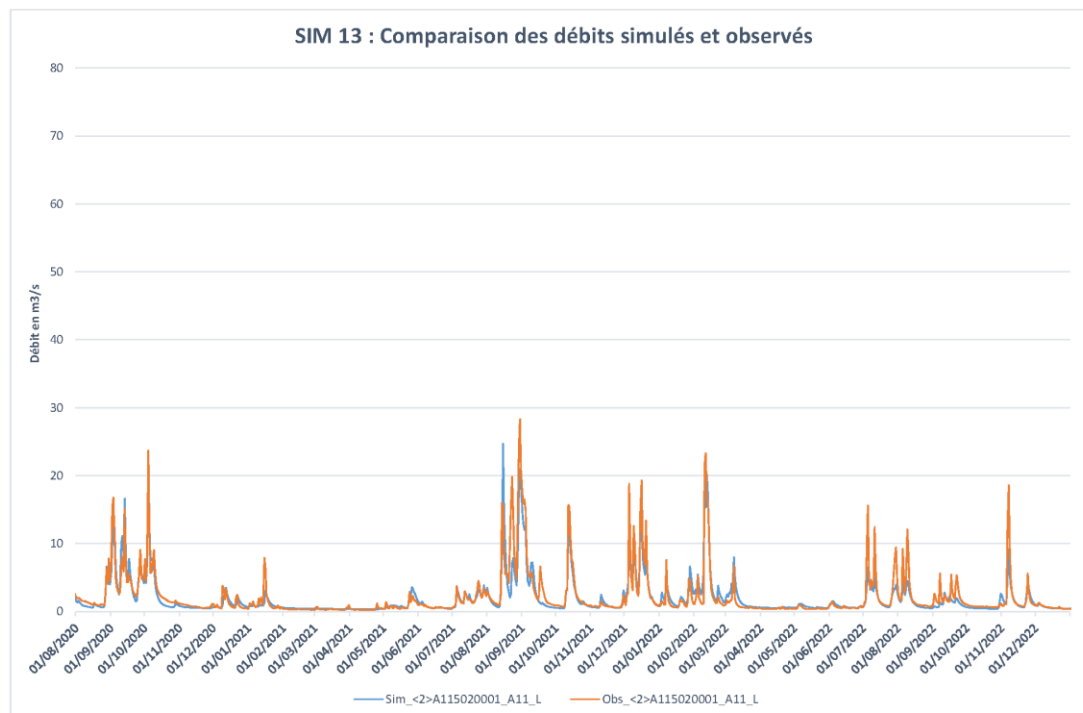
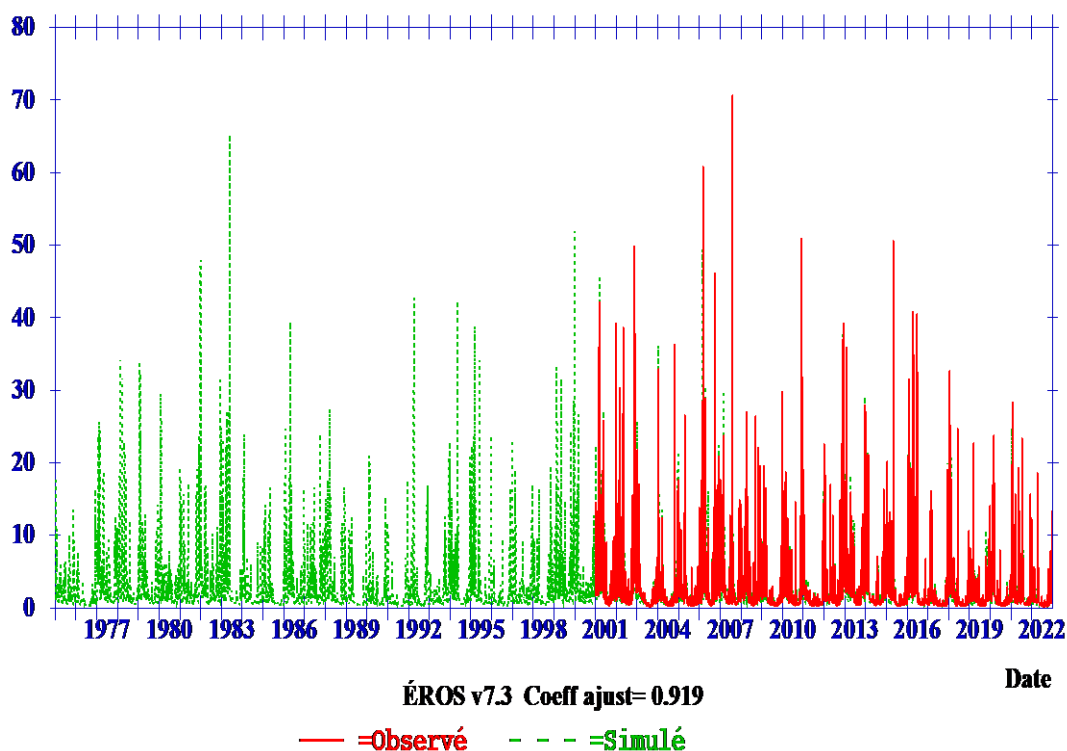
Pour chaque bassin versant, présentation du graphique des chroniques de débit simulés et observés ainsi que du graphique zoomé sur la période 01/08/2020 au 31/07/2023.

Numéro bassin	Sous Secteur	Anthropisation	Station hydrométrique		Station piézométrique	
1	A10	faible	A1050310	L'Ill a Altkirch	04457X0046/S	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH
2	A11	faible	A1150200	La Lague a Spechbach-le-Bas	04761X0021/F1	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE
3	A52	moyenne	A5261020	Le Madon a Mirecourt [crues]	03384X0037/PZ	Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE
4	A71	faible	A7122010	L'Esch a Jezainville	01937X0054/F	Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE
5	A90	faible	A9021040	La Sarre a Hermelange	02327X0032/F	Grès du Trias inférieur affleurant à VOYER
6	A98	moyenne	A9862010	La Nied Allemande a Varize	01644X0013/F	Calcaires du Muschelkalk à SERVIGNY-LES-RAVILLE
7	B13	moyenne	B1340010	La Meuse a Chalaines	02667X0014/FE2	Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES
8	B51	moyenne	B5172010	La Bar a Cheveuges	01102X0025/S1	Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

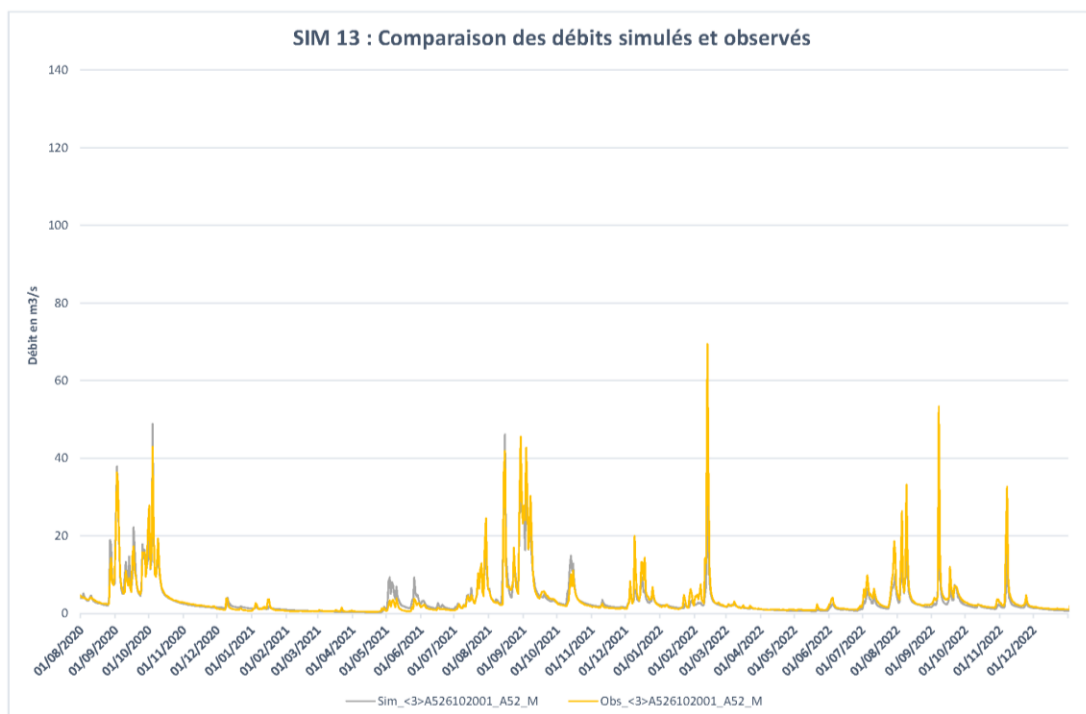
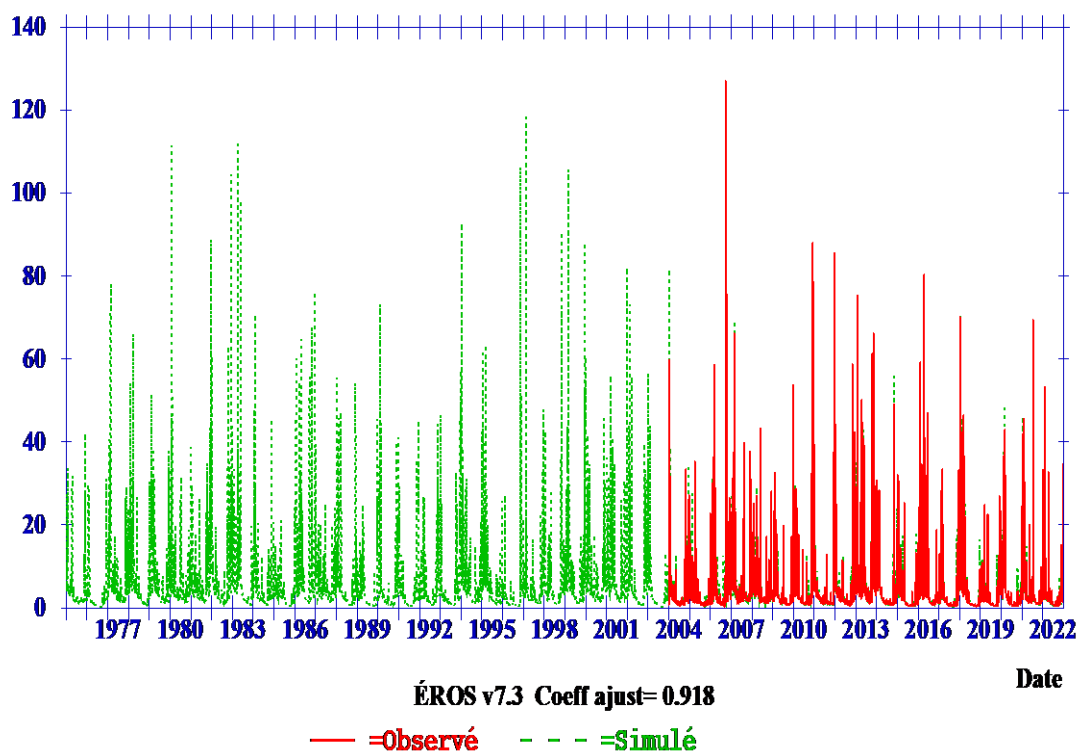
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°1 : A105003001_A10_Ill_Altkirch



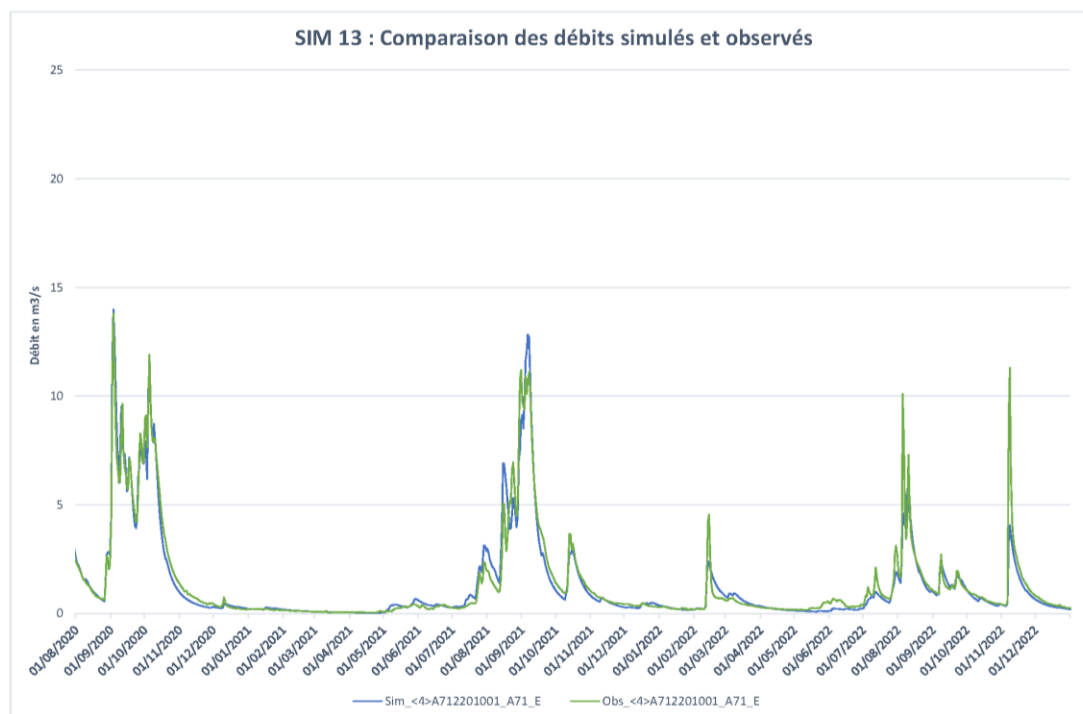
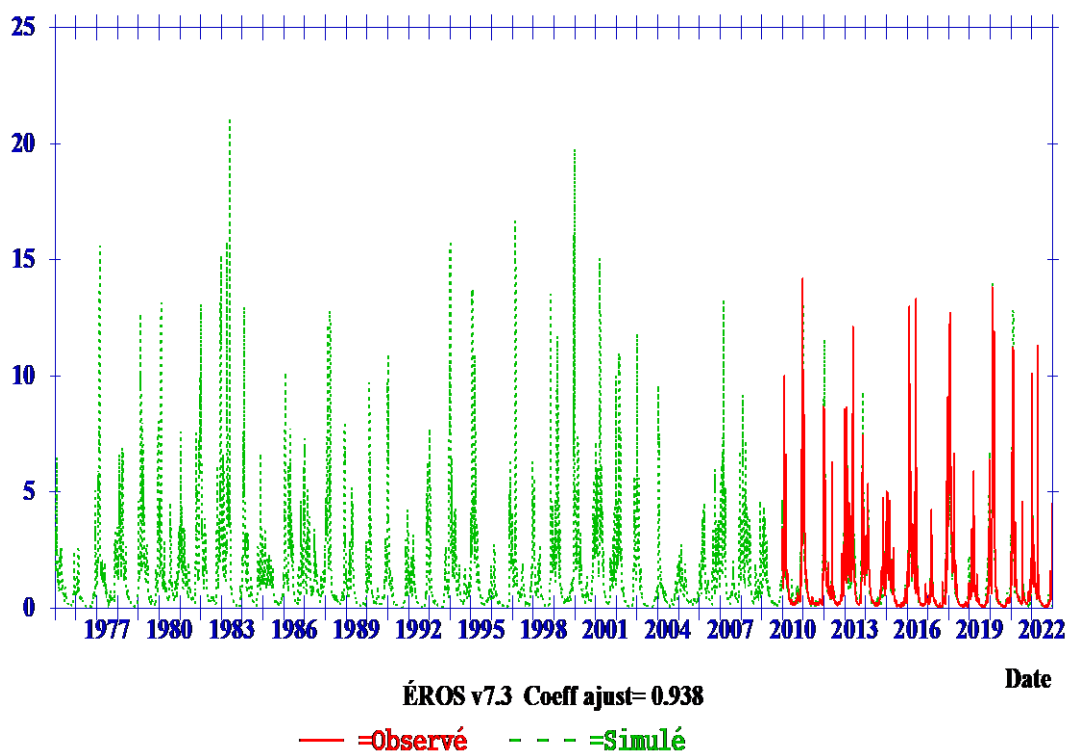
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°2 : A115020001_A11_Largue_Spechbach



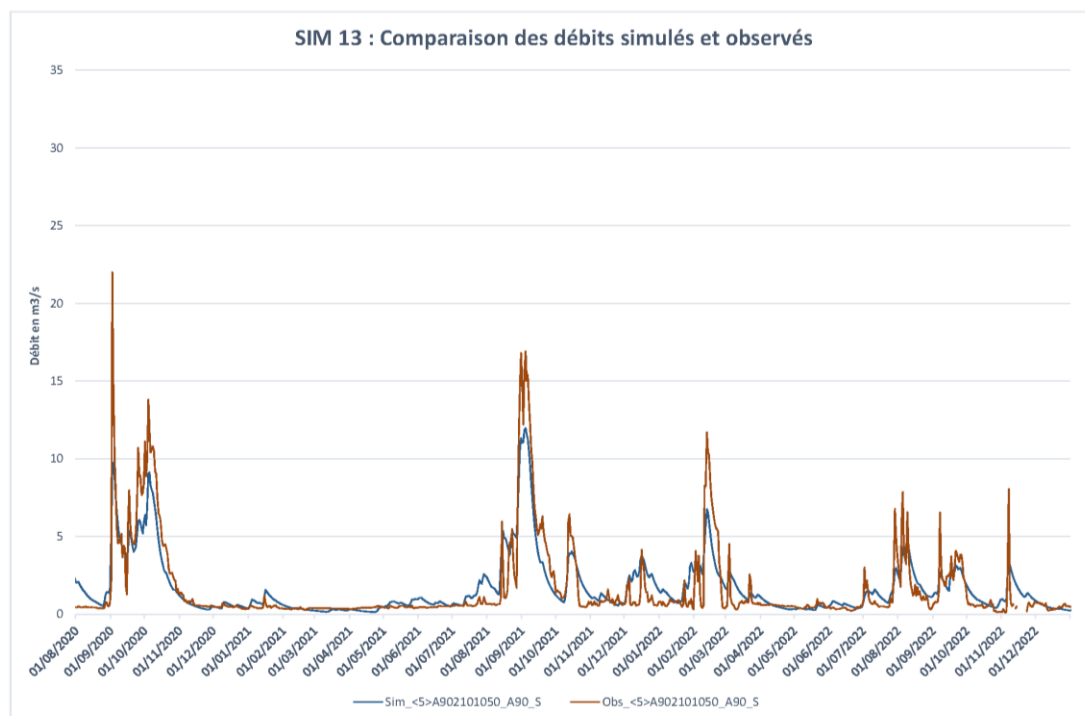
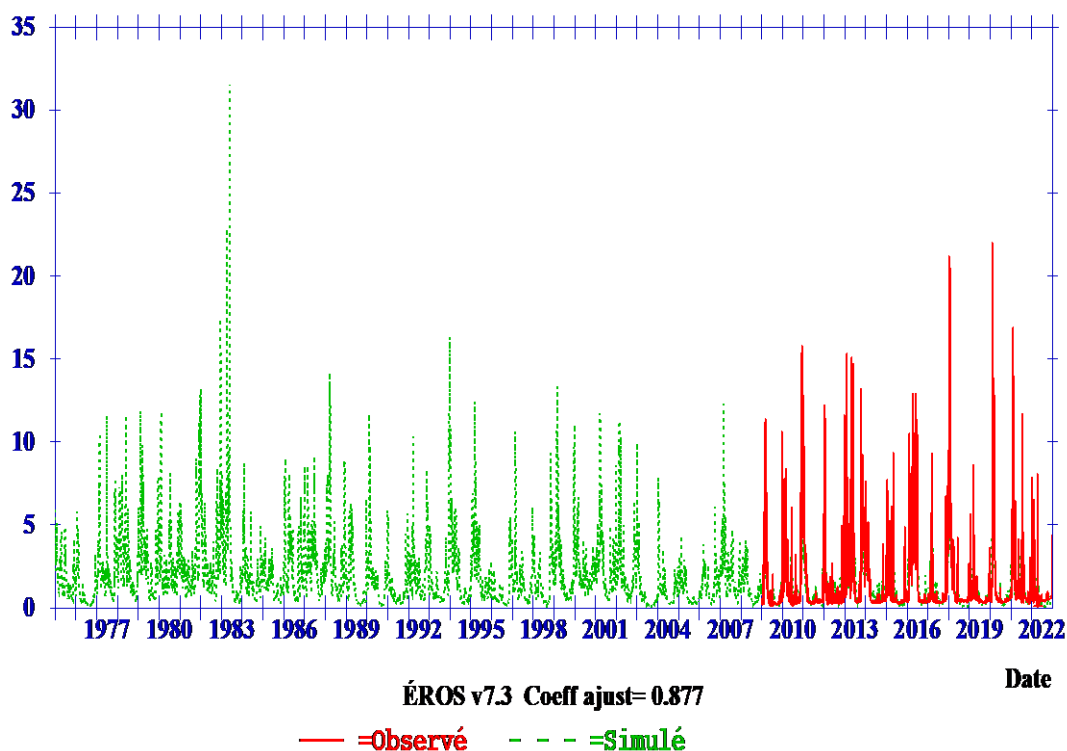
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°3 : A526102001_A52_Madon_Mirecourt



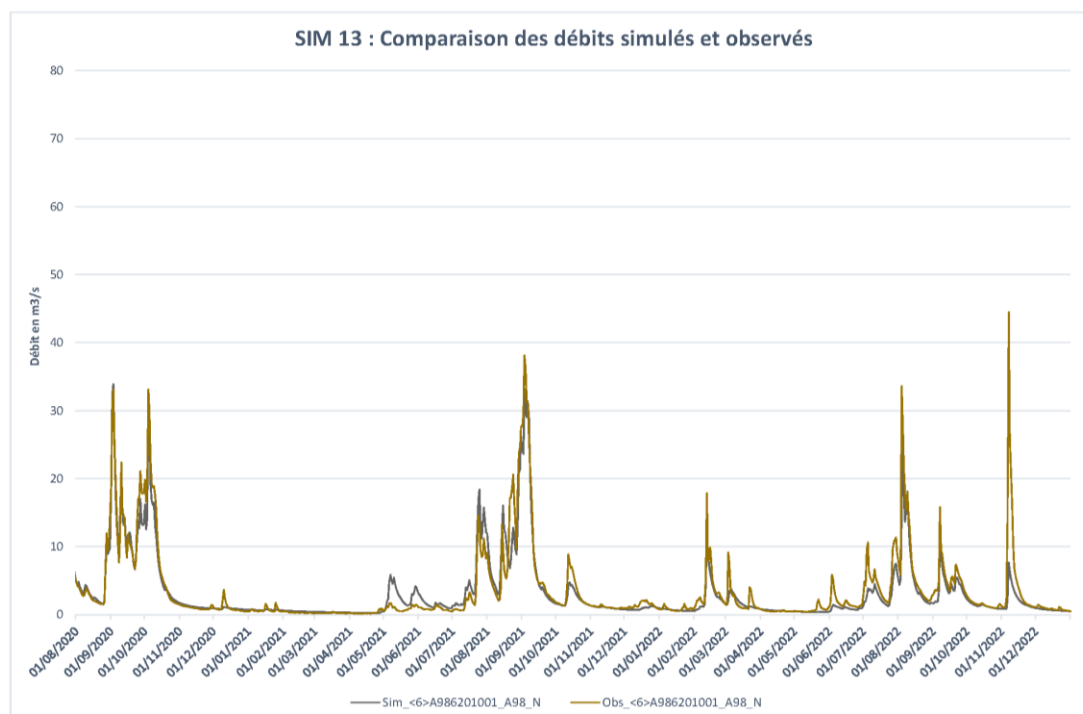
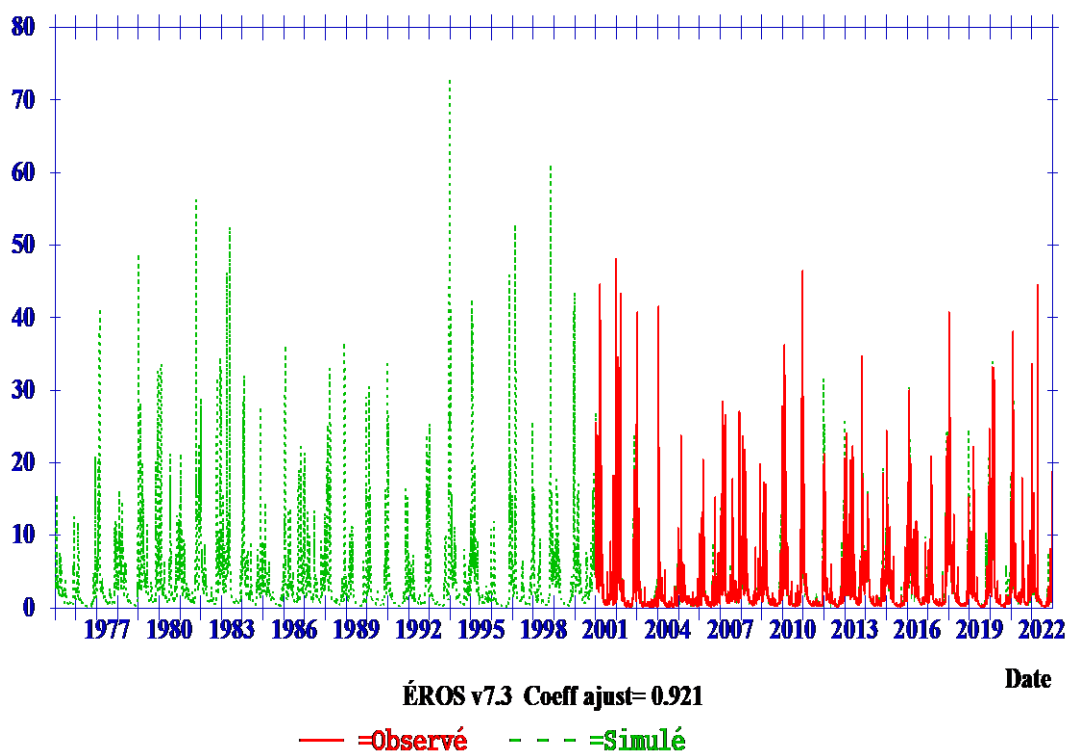
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°4 : A712201001_A71_Esch_Jezainville



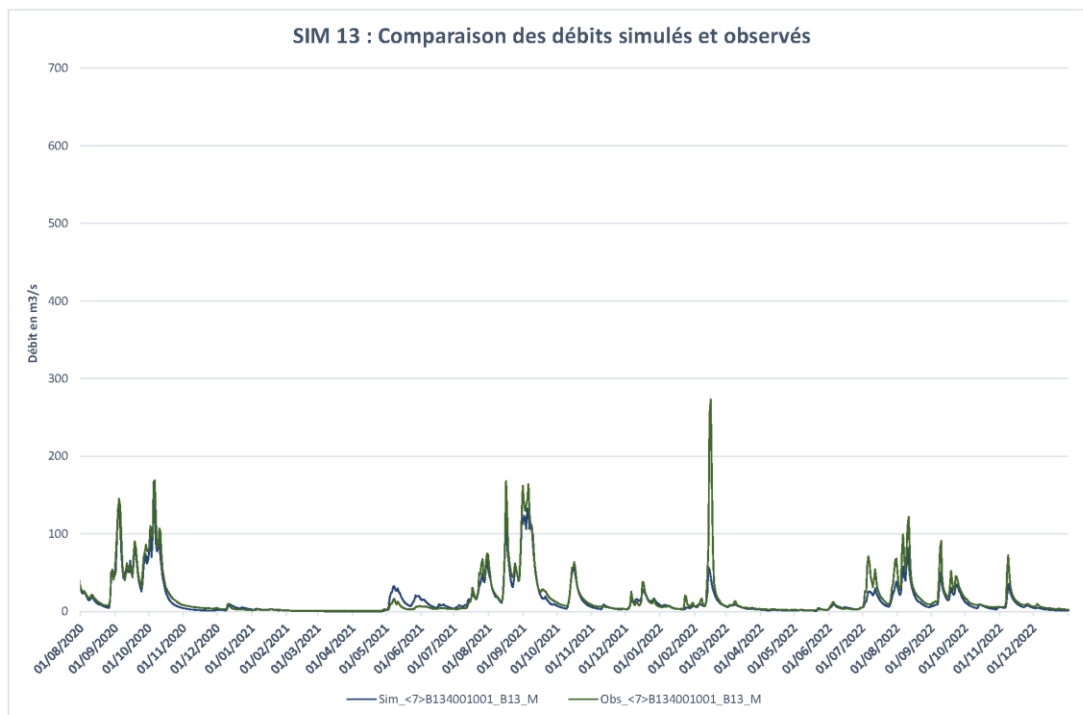
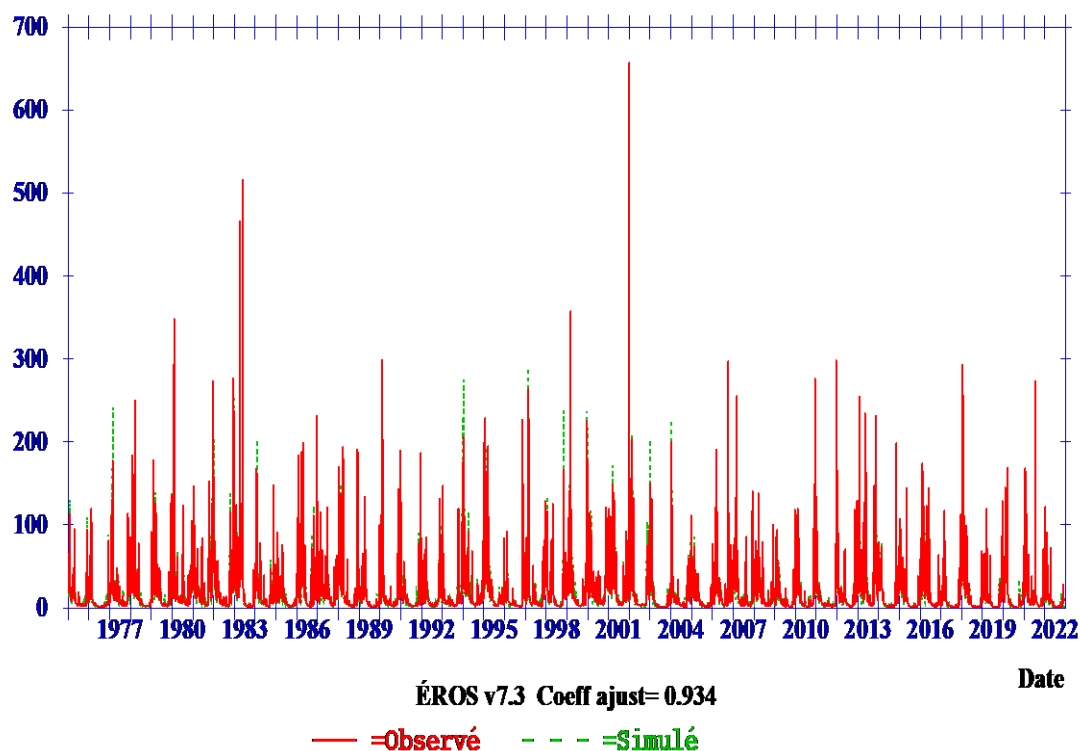
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°5 : A902101050_A90_Sarre_Hermelange



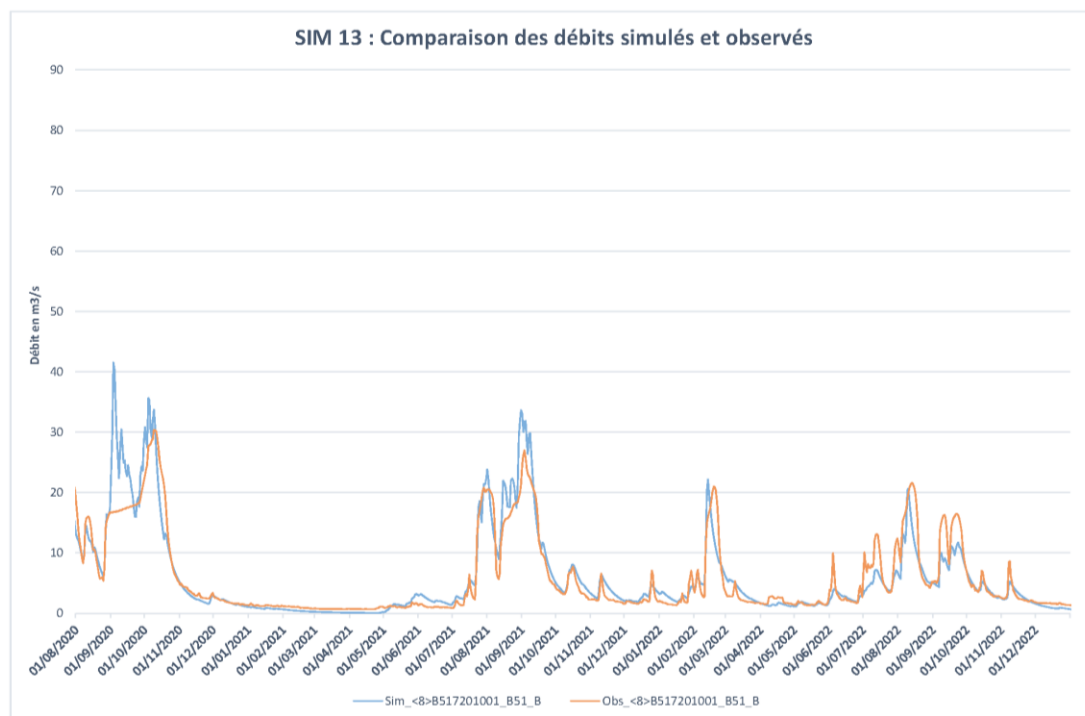
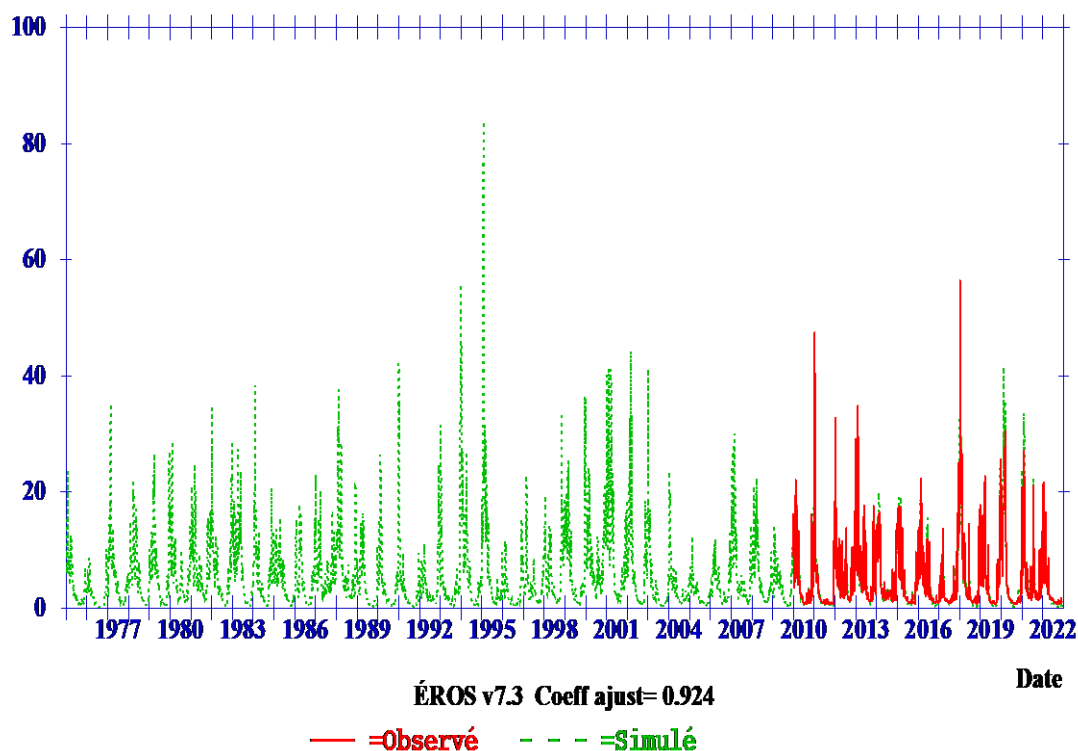
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°6 : A986201001_A98_NiedAllemande_Varize



Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n°7 : B134001001_B13_Meuse_Chalaines



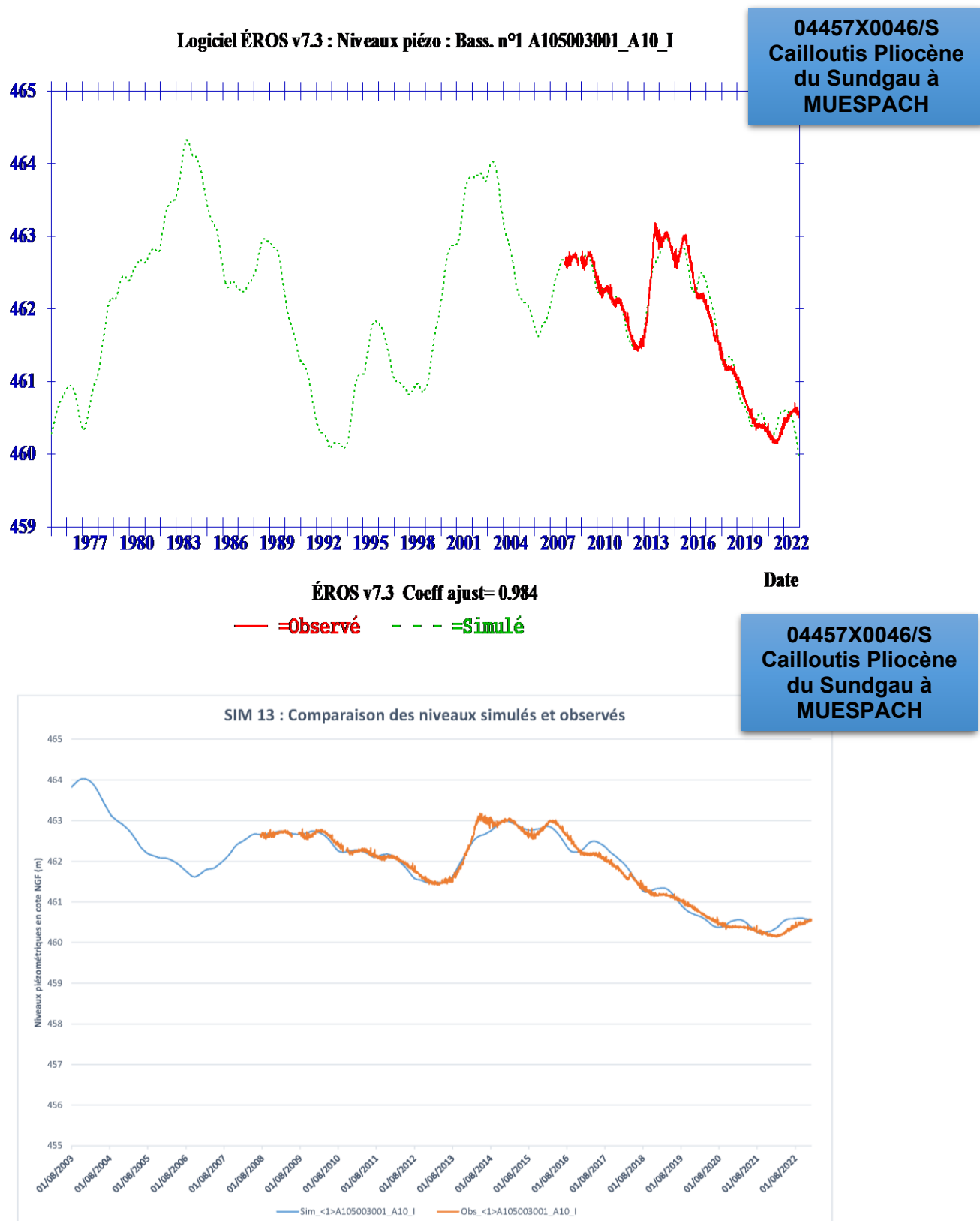
Logiciel ÉROS v7.3 : Bass n° : B517201001_B51_Bar_Cheveuges

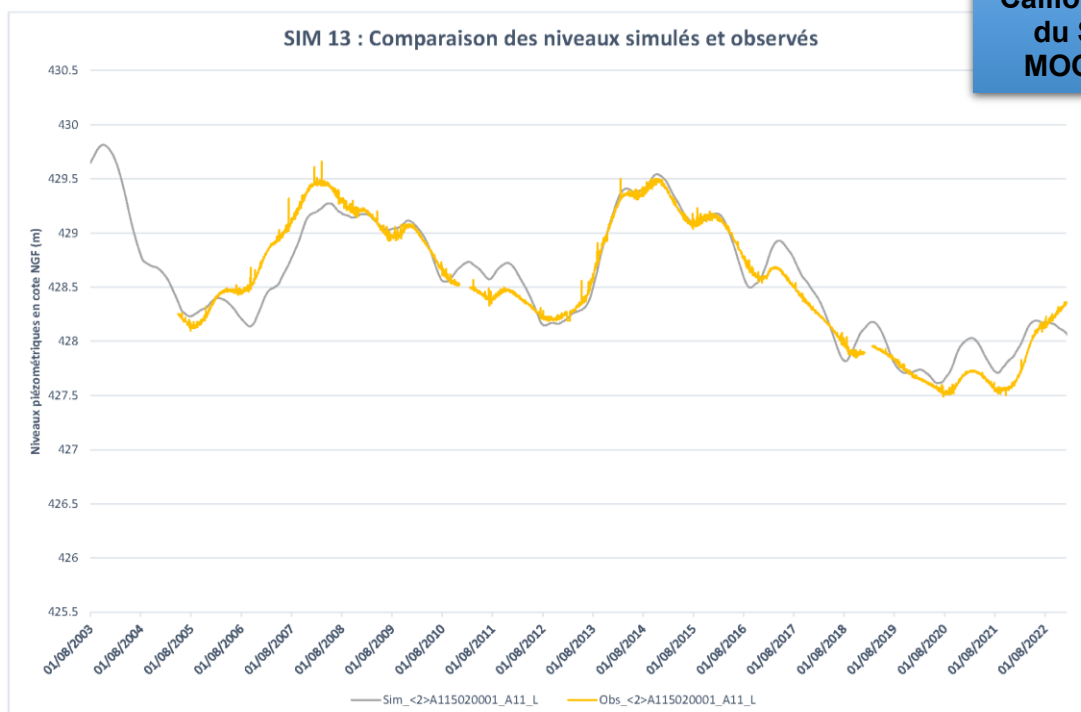
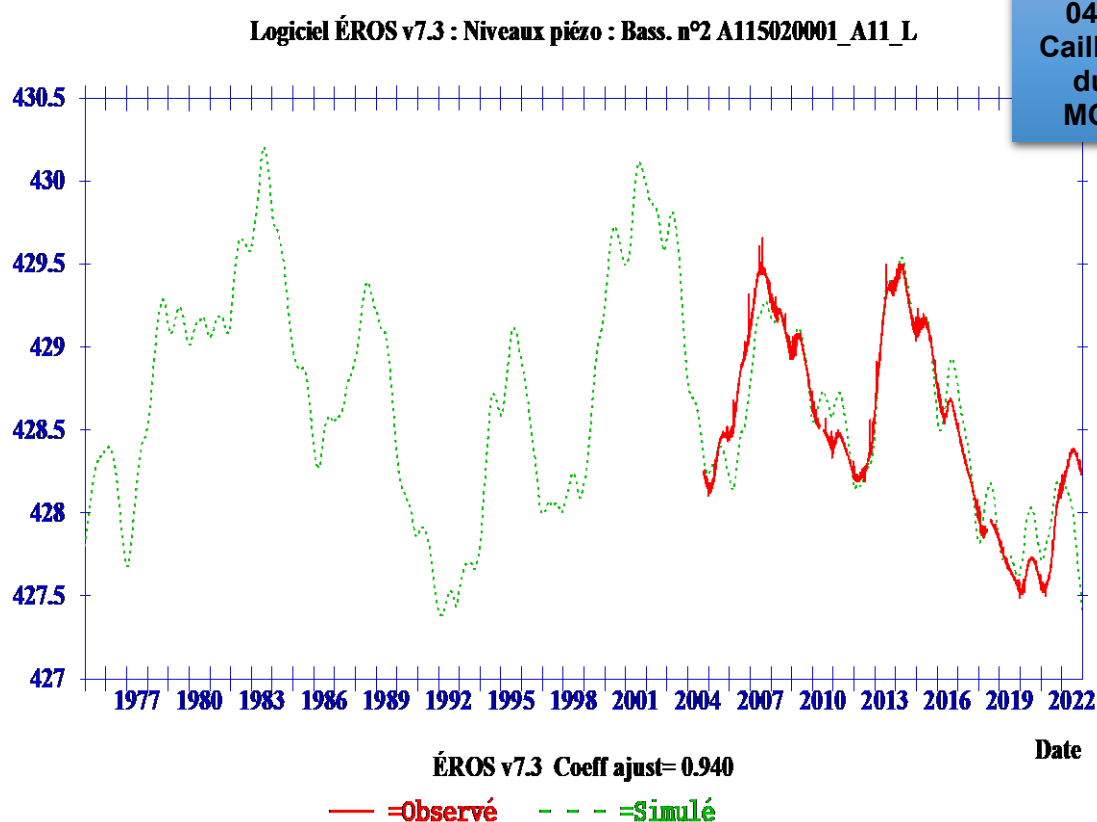


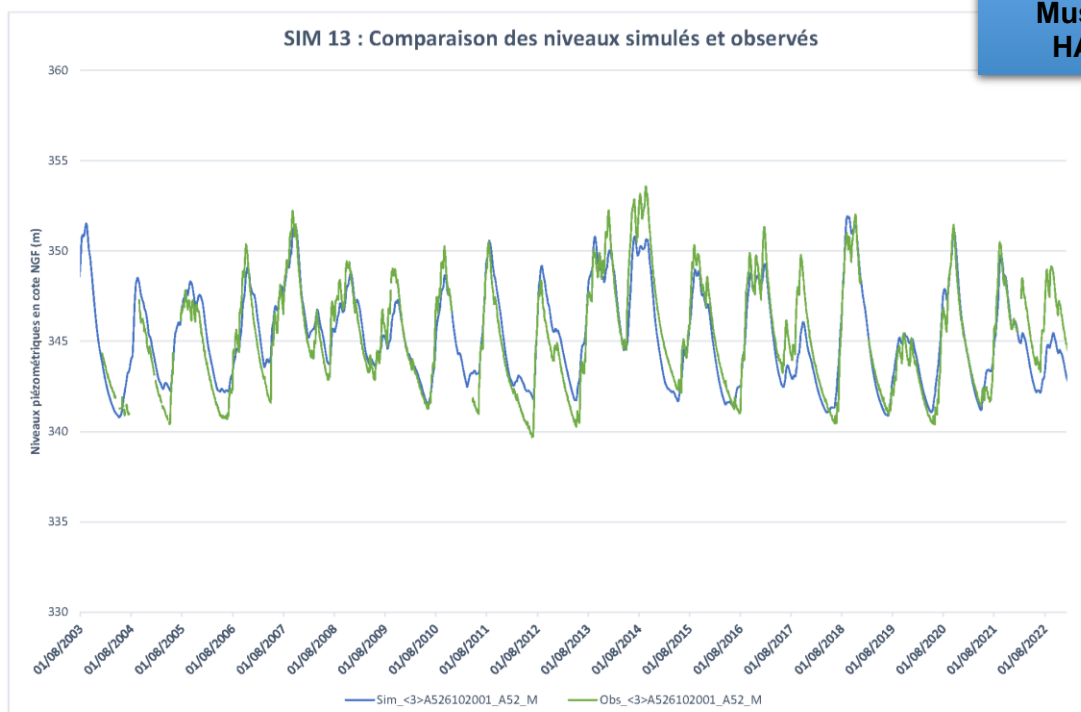
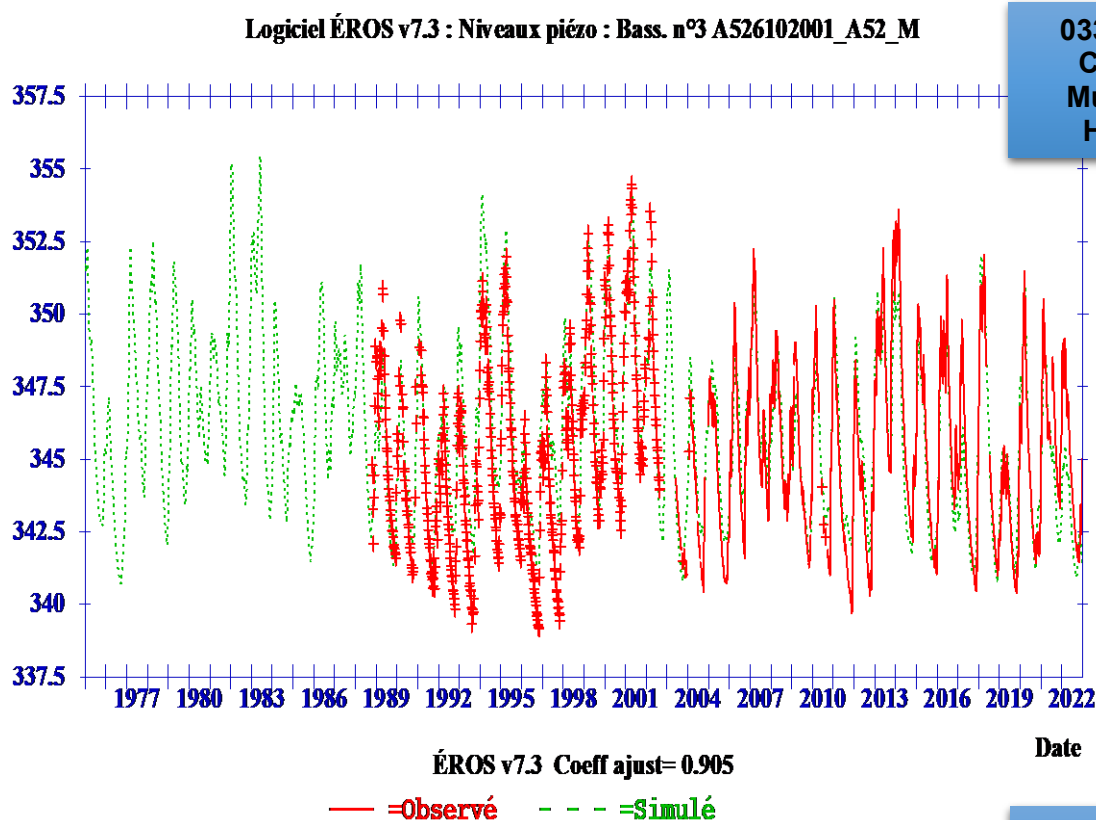
Annexe 4 : Graphiques des chroniques de niveaux simulés et observés

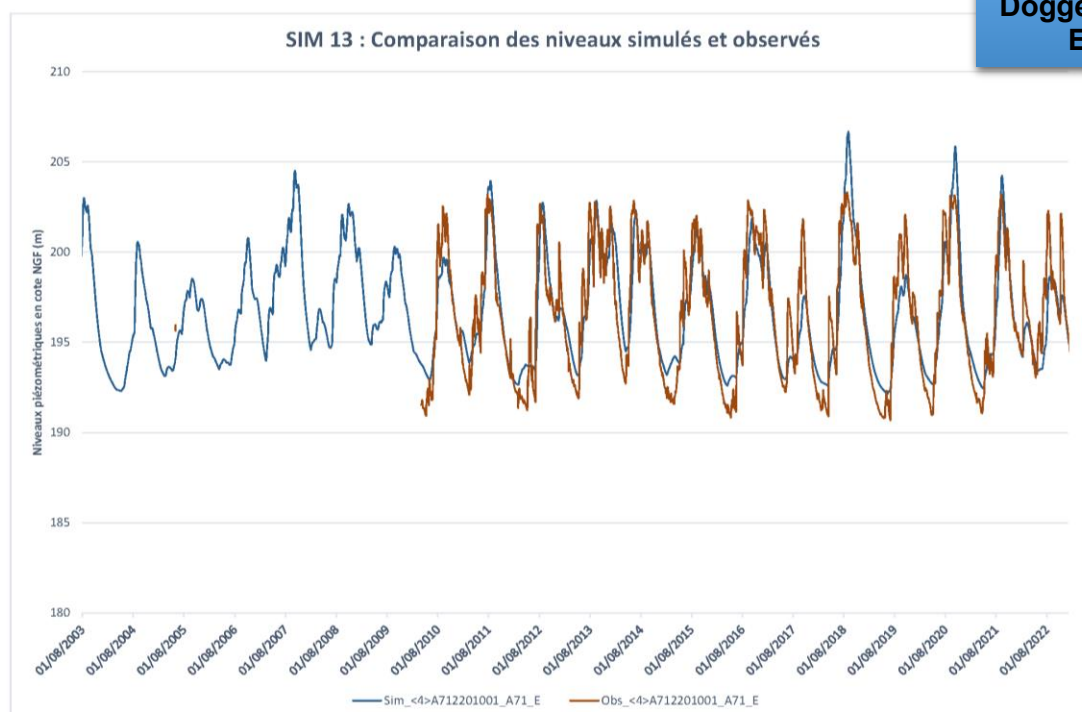
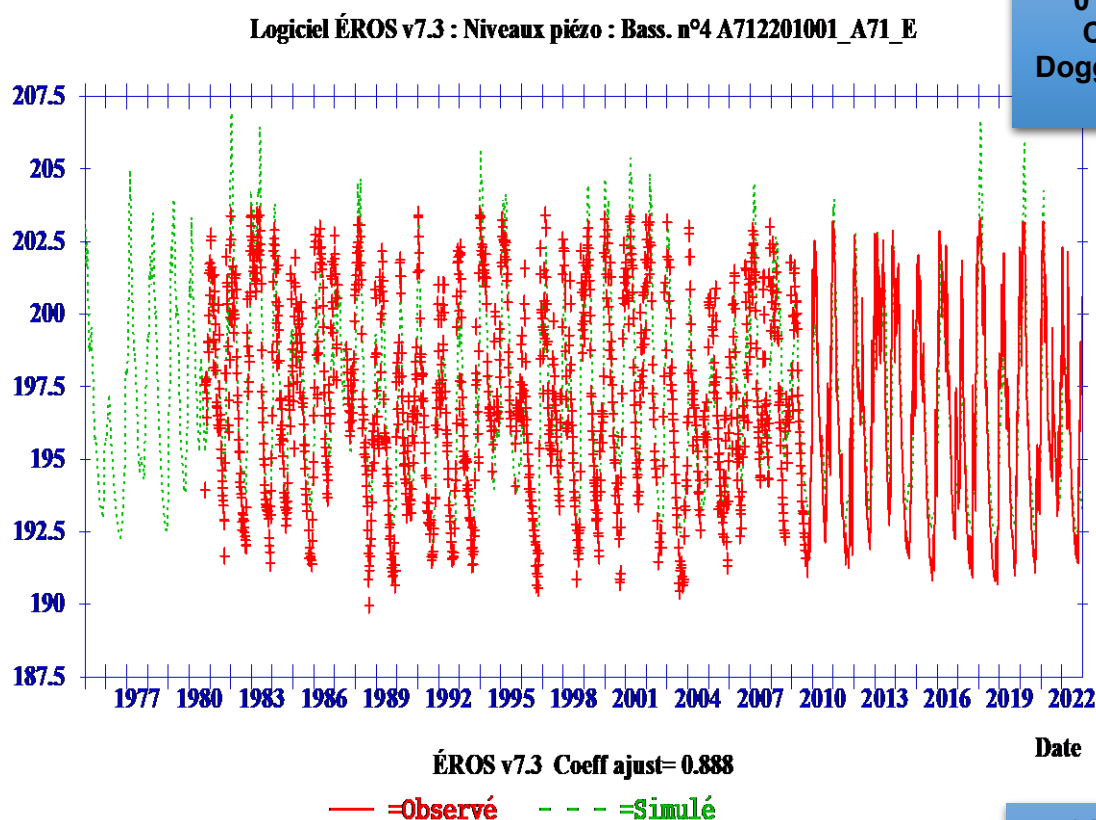
Pour chaque bassin versant, présentation du graphique des chroniques de niveaux piézométriques simulés et observés ainsi que du graphique zoomé sur la période 01/08/2003 au 31/07/2023.

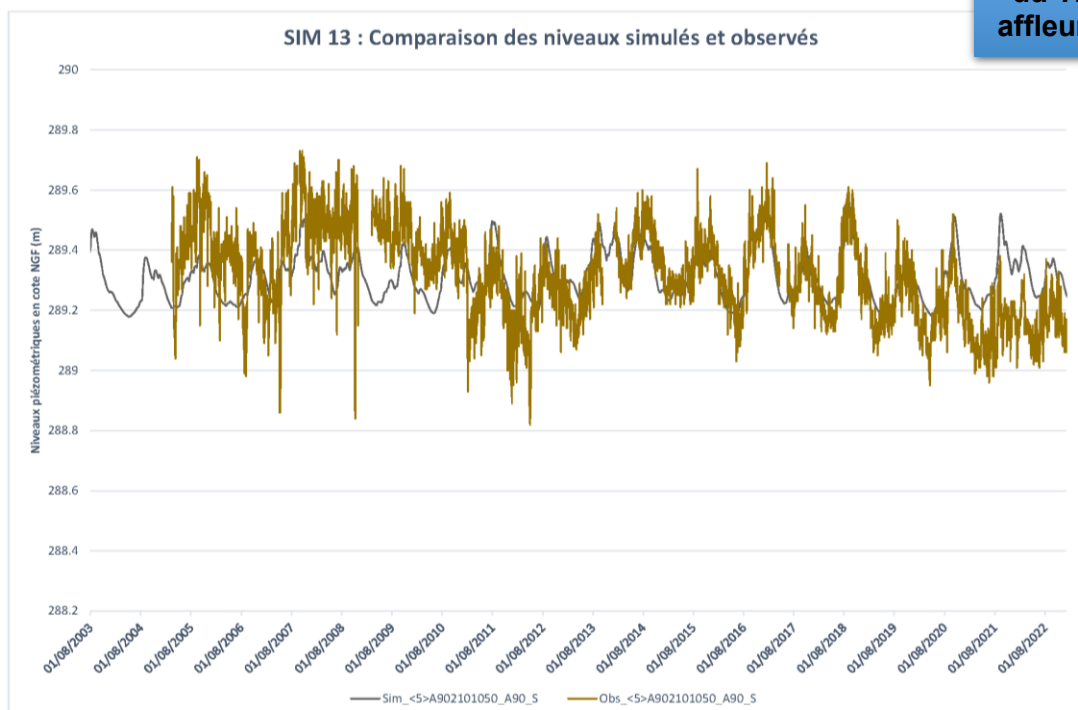
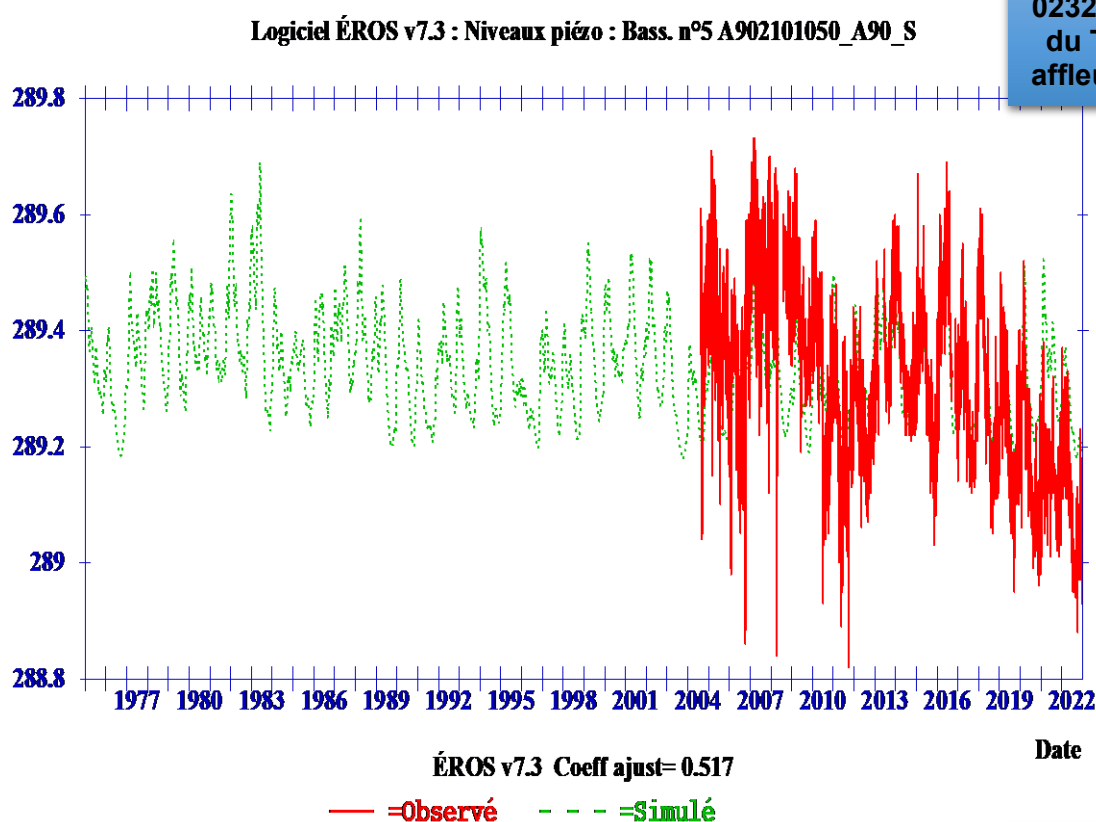
Numéro bassin	Sous Secteur	Anthropisation	Station hydrométrique		Station piézométrique	
1	A10	faible	A1050310	L'Ille a Altkirch	04457X0046/S	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH
2	A11	faible	A1150200	La Lague a Spechbach-le-Bas	04761X0021/F1	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE
3	A52	moyenne	A5261020	Le Madon a Mirecourt [crués]	03384X0037/PZ	Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE
4	A71	faible	A7122010	L'Esch a Jezainville	01937X0054/F	Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE
5	A90	faible	A9021040	La Sarre a Hermelange	02327X0032/F	Grès du Trias inférieur affleurant à VOYER
6	A98	moyenne	A9862010	La Nied Allemande a Varize	01644X0013/F	Calcaires du Muschelkalk à SERVIGNY-LES-RAVILLE
7	B13	moyenne	B1340010	La Meuse a Chalaines	02667X0014/FE2	Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES
8	B51	moyenne	B5172010	La Bar a Cheveuges	01102X0025/S1	Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

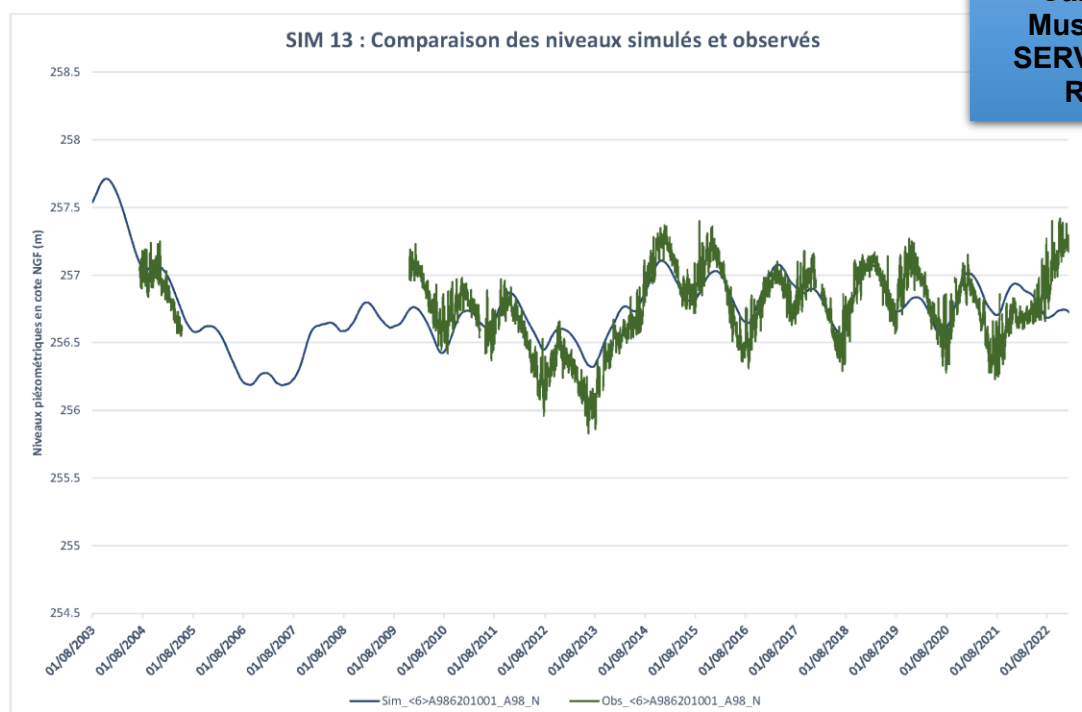
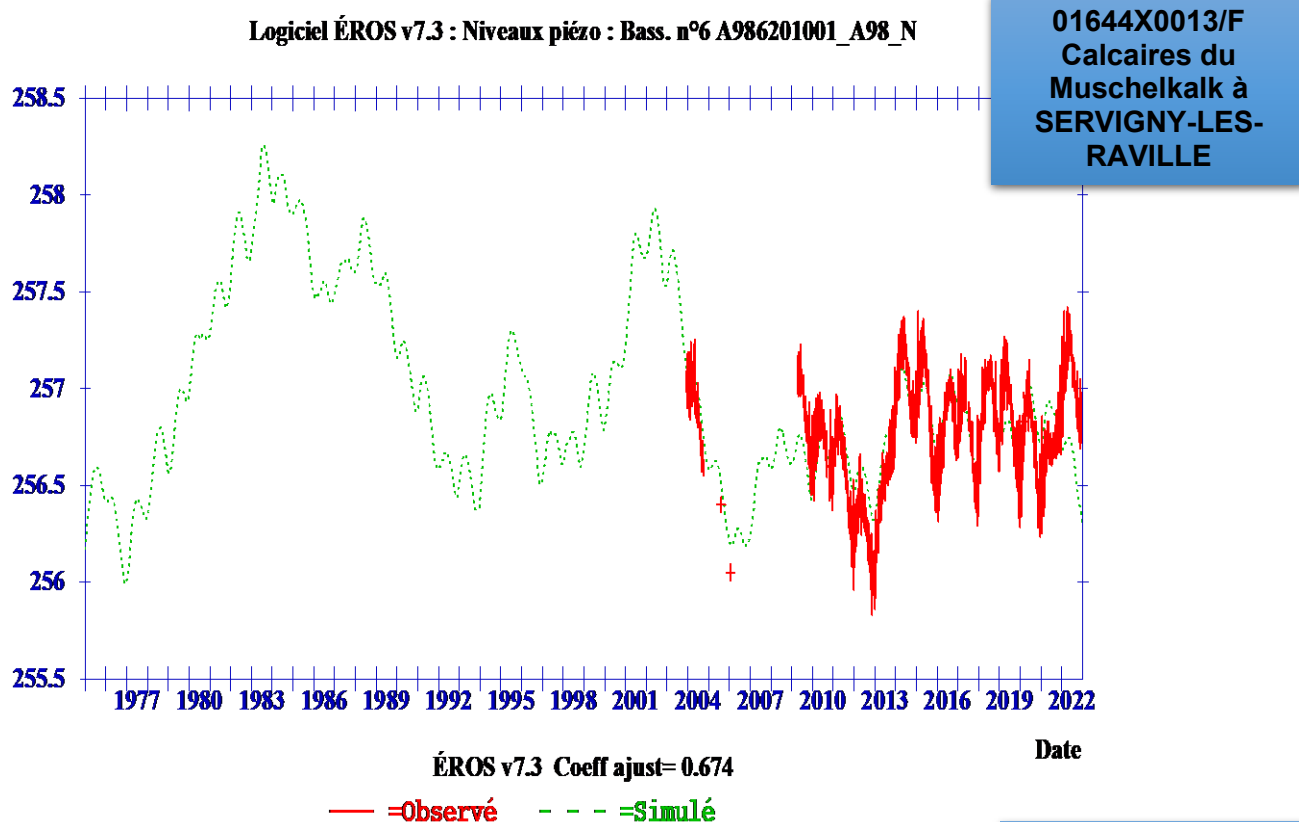


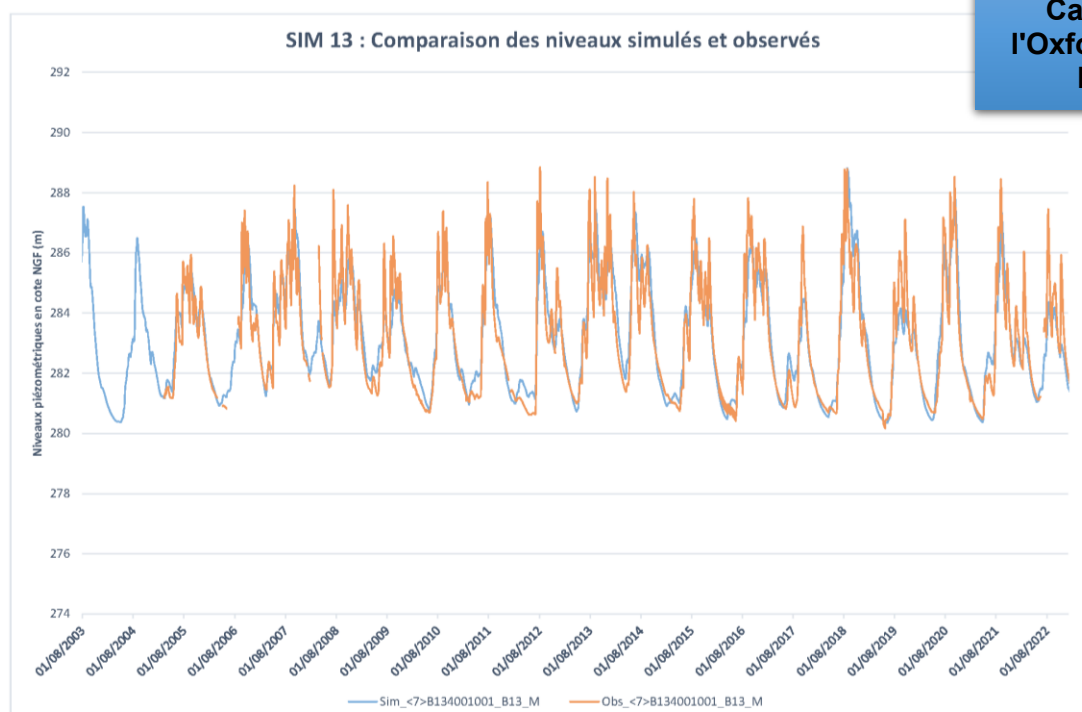
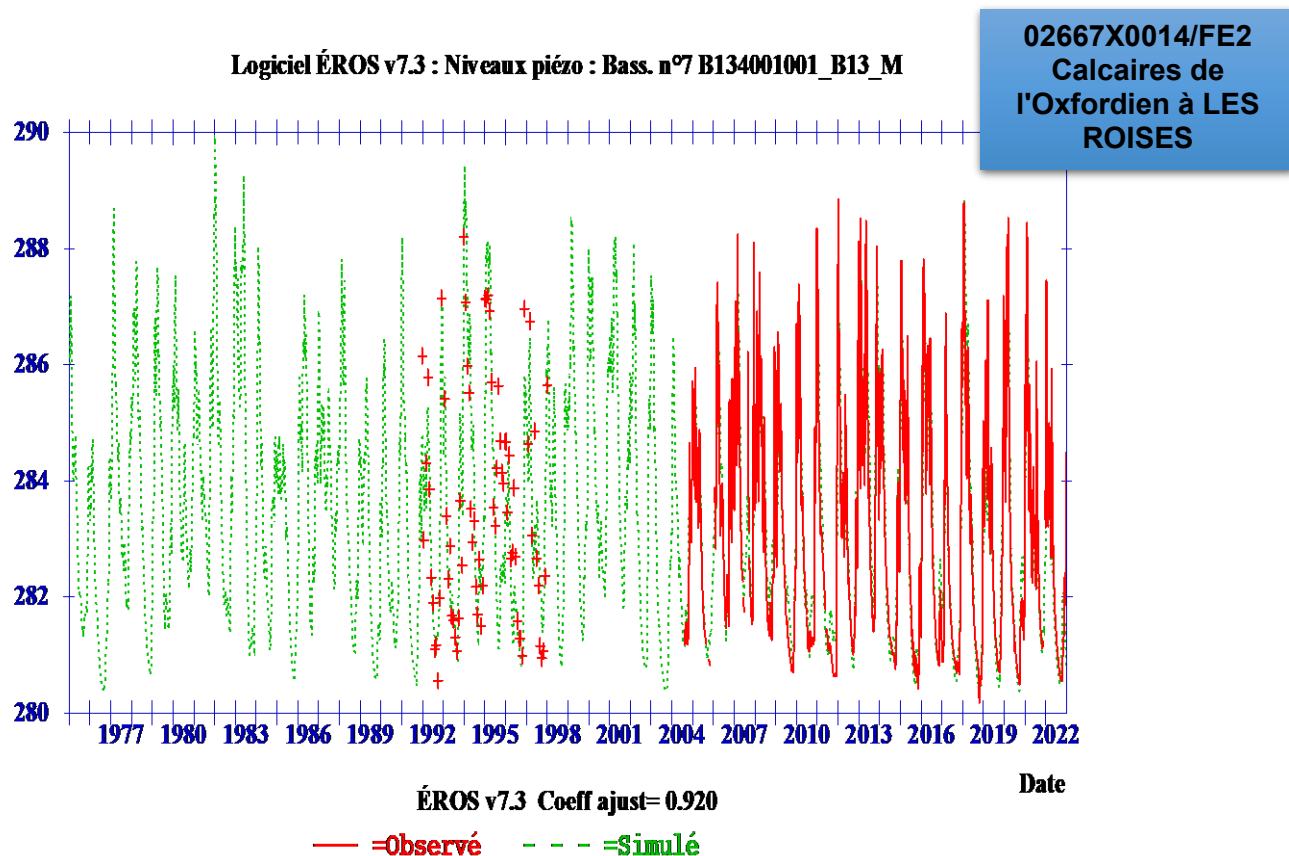


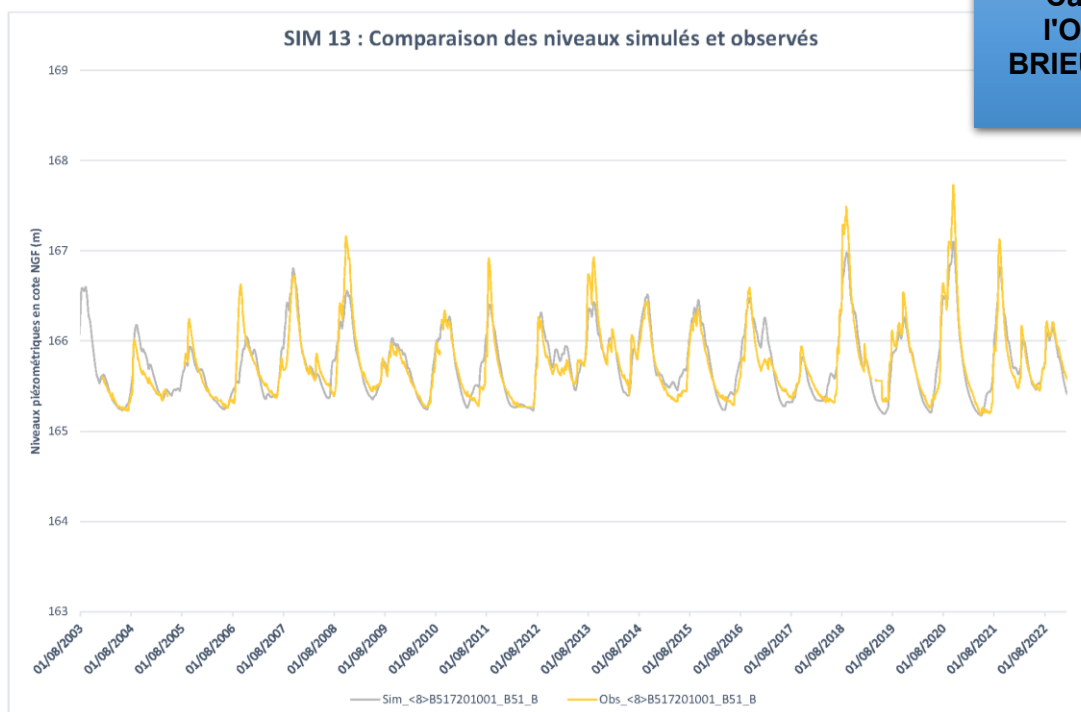
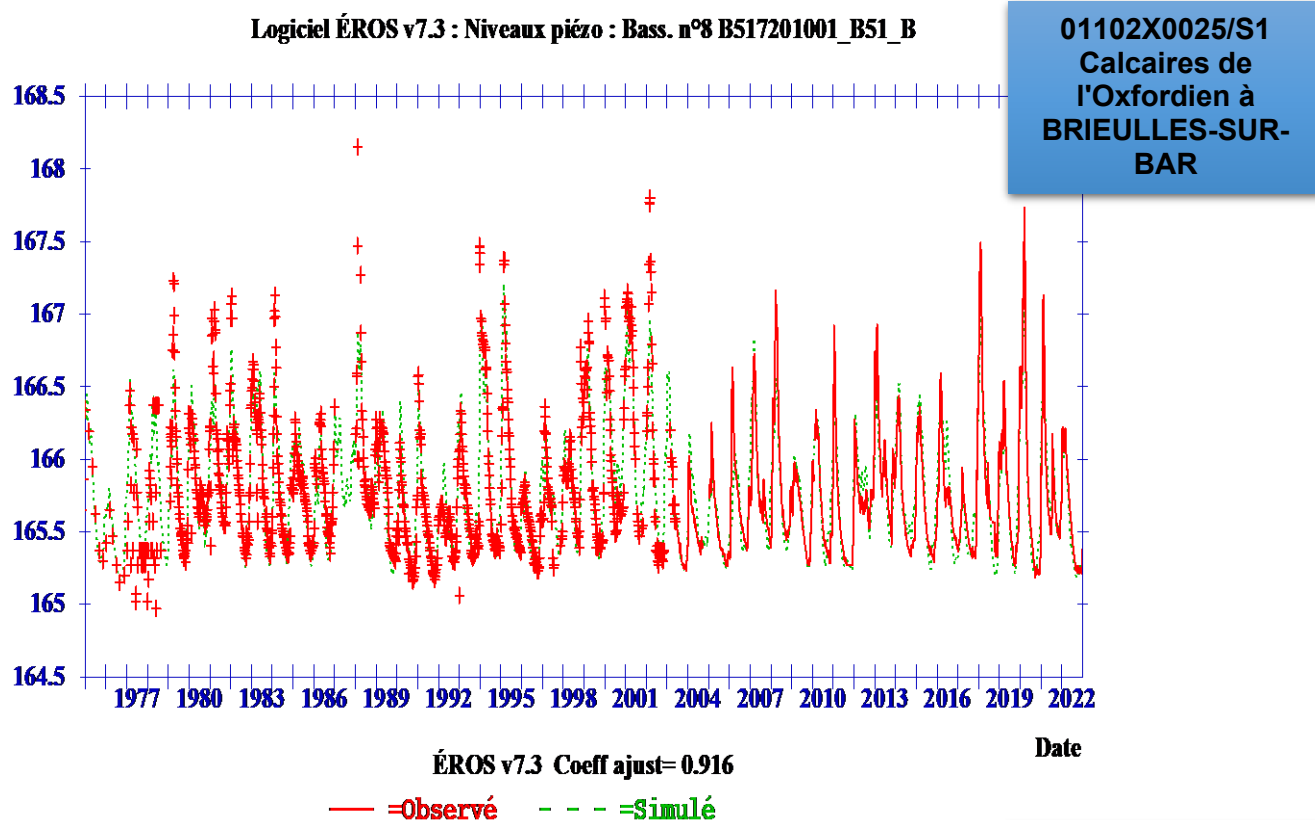








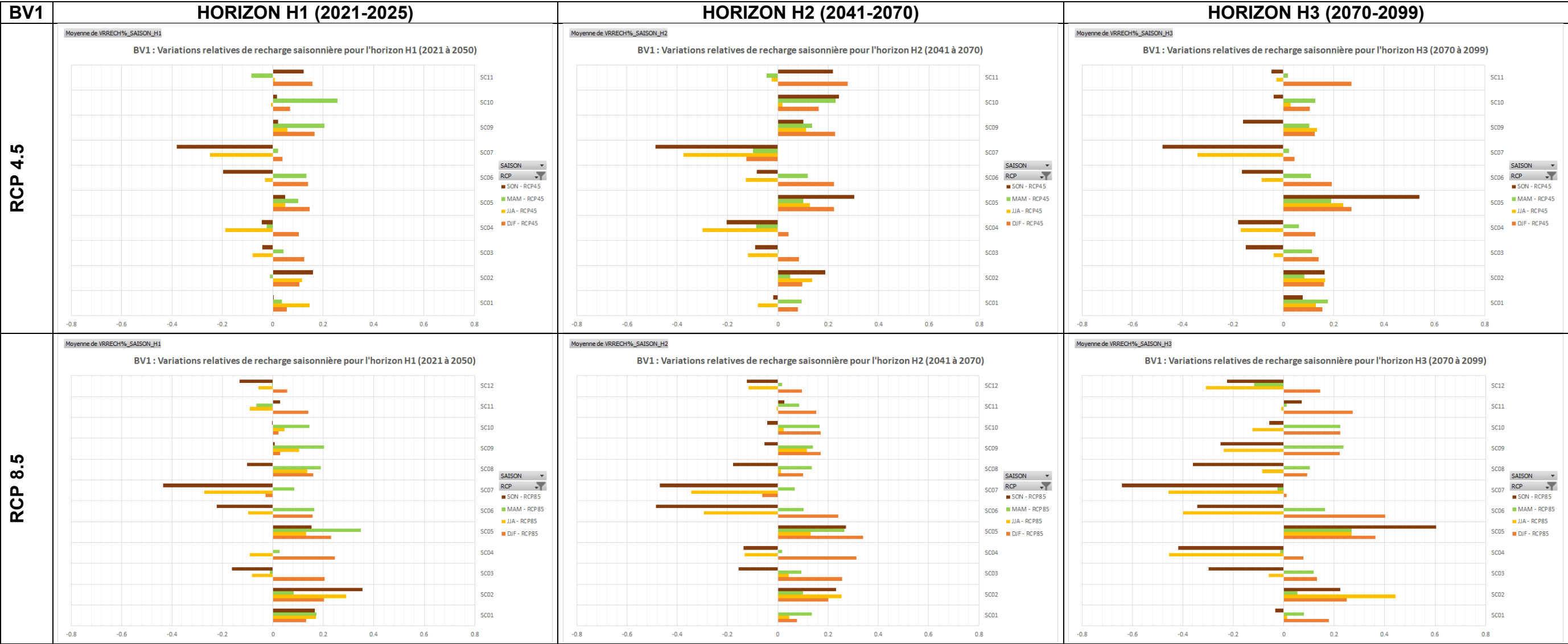


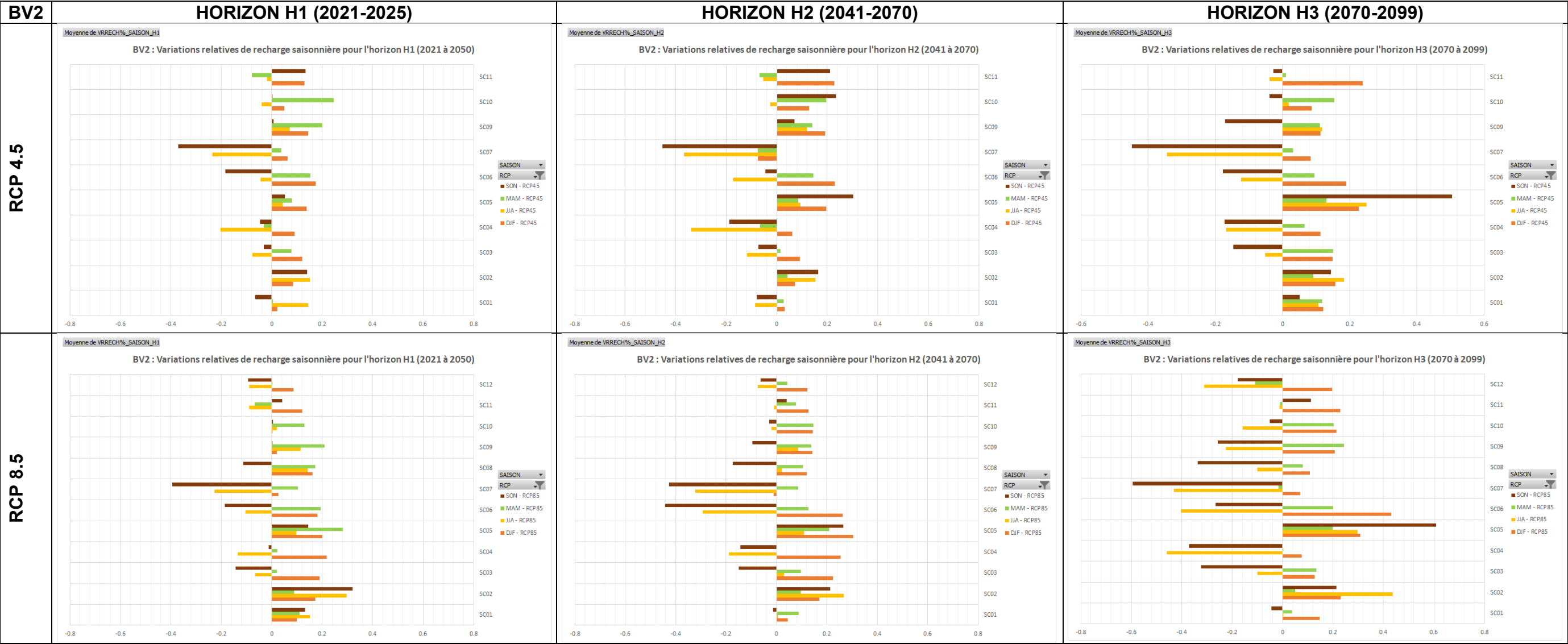


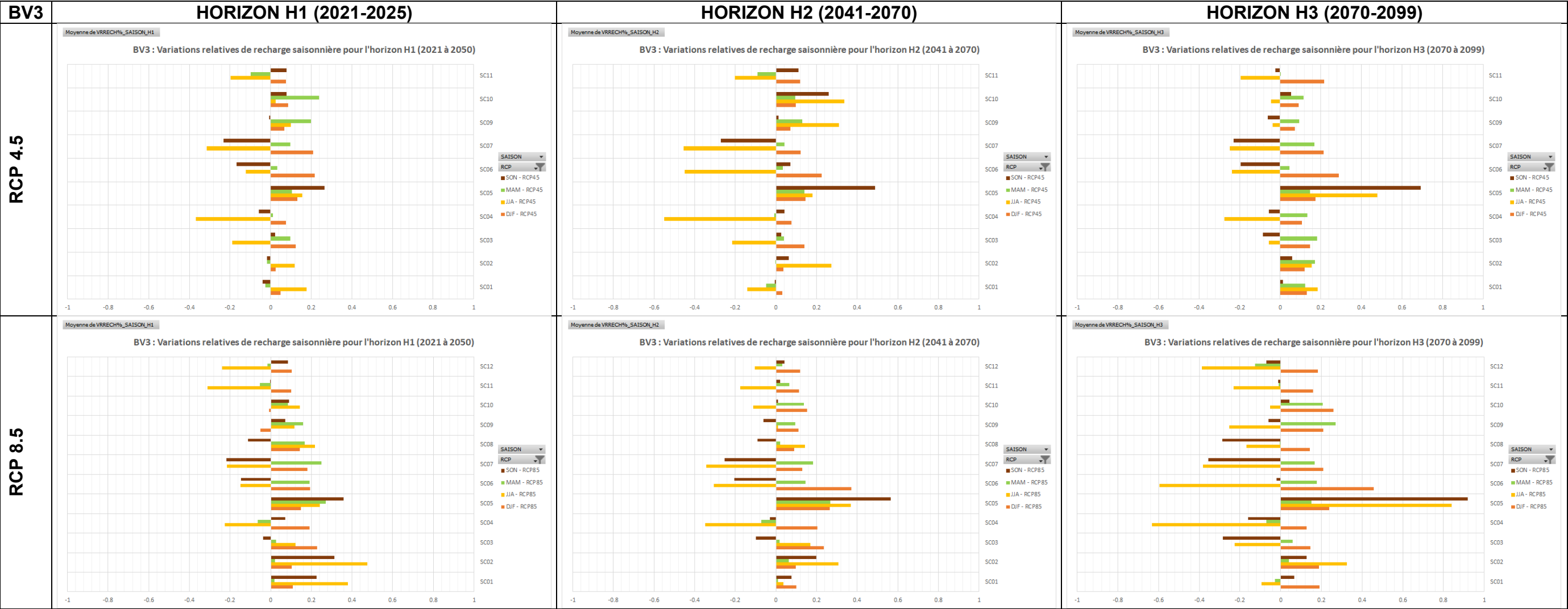
Annexe 5 : Graphiques illustrant la dispersion par bassin versant des écarts relatifs de la recharge potentielle sur 30 ans en moyenne saisonnière pour 22 projections climatiques

Numéro BV	Station hydrométrique		Station piézométrique	
BV1	A1050310	L'III a Altkirch	04457X0046/S	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MUESPACH
BV2	A1150200	La Lague a Spechbach-le-Bas	04761X0021/F1	Cailloutis Pliocène du Sundgau à MOOSLARGUE
BV3	A5261020	Le Madon a Mirecourt [crues]	03384X0037/PZ	Calcaires du Muschelkalk à HAREVILLE
BV4	A7122010	L'Esch a Jezainville	01937X0054/F	Calcaires du Dogger à VILLERS-EN-HAYE
BV7	B1340010	La Meuse a Chalaines	02667X0014/FE2	Calcaires de l'Oxfordien à LES ROISES
BV8	B5172010	La Bar a Cheveuges	01102X0025/S1	Calcaires de l'Oxfordien à BRIEULLES-SUR-BAR

	Projection climatique retenus pour l'étude locale	MCG modèle climatique global	MCR modèle climatique régional	
Scénario très humide non retenu en national	SC01	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	ALADIN63 (CNRM) France	Narratif jaune : Changements futurs relativement
	SC02	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	
	SC03	ICHEC-EC-EARTH	RACMO22E (KNMI) Pays-Bas	
	SC04	ICHEC-EC-EARTH	RCA4 (SMHI)Suède	
	SC05	IPSL-CM5A-MR	WRF381P (NCAR) USA	
	SC06	IPSL-CM5A-MR	RCA4 (SMHI)Suède	
	SC07	MOHC-HadGEM2-ES	CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe	Narratif violet : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en
	SC08	MOHC-HadGEM2-ES	RegCM4-6 (ICTS/ESP)International	
	SC09	MPI-M-MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17 (CLMcom) Europe	
	SC10	MPI-M-MPI-ESM-LR	REMO2009 (CSC)Allemagne	
	SC11	NCC-NorESM1-M	HIRHAM5 (DMI)Danemark	
	SC12	NCC-NorESM1-M	REMO2015 (CSC)Allemagne	







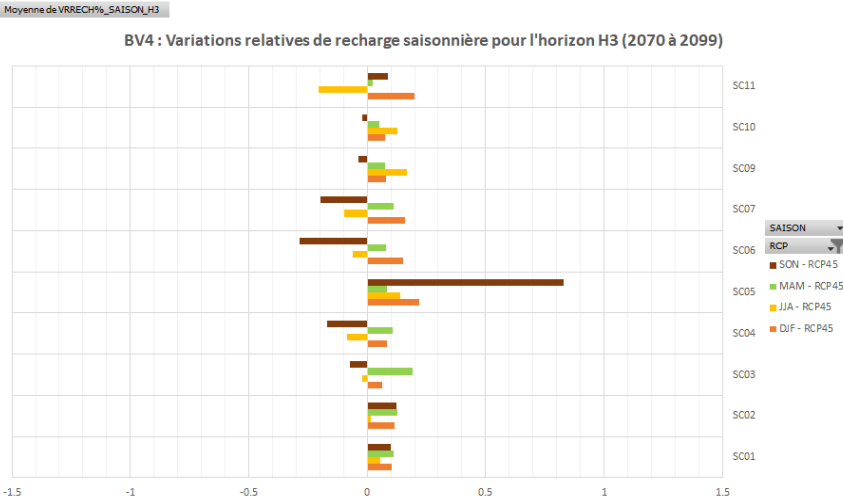
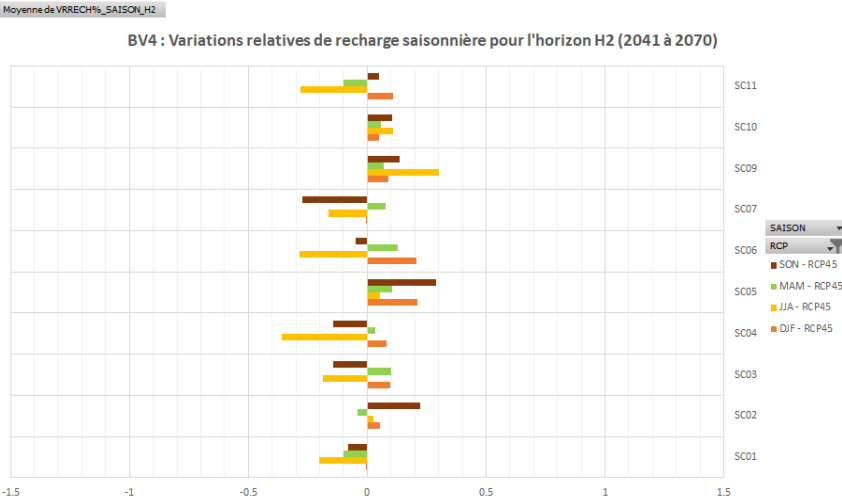
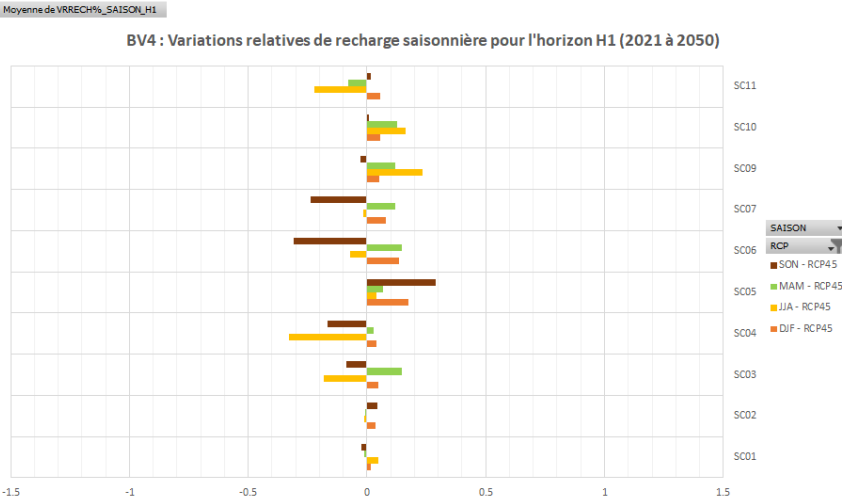
BV4

HORIZON H1 (2021-2025)

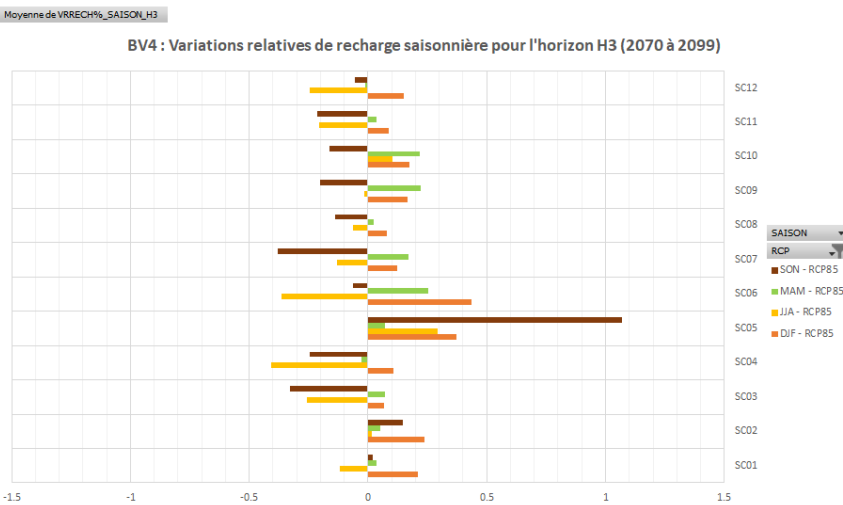
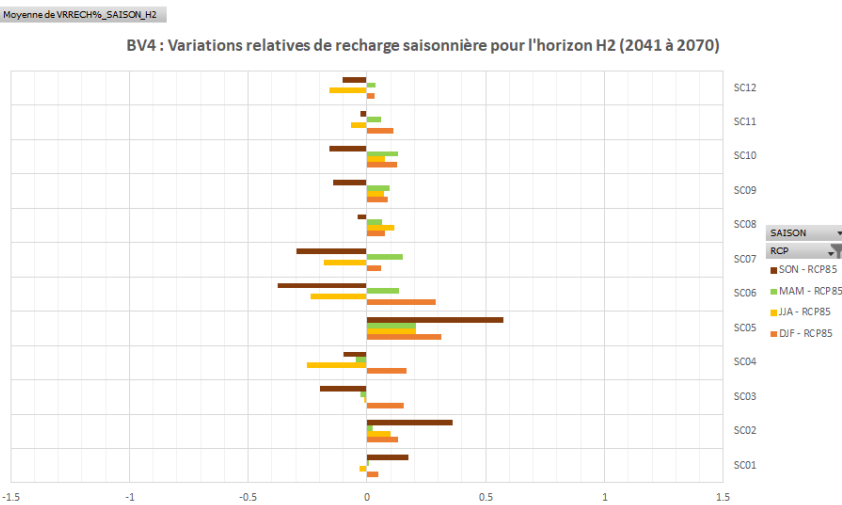
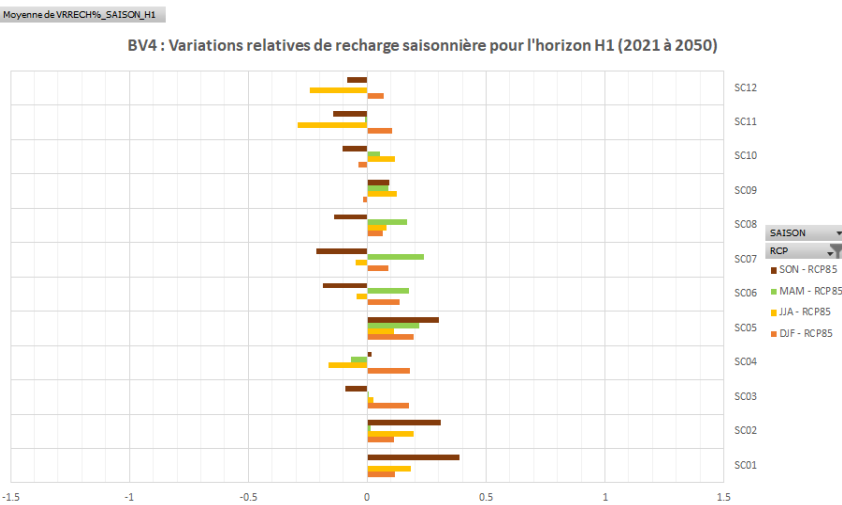
HORIZON H2 (2041-2070)

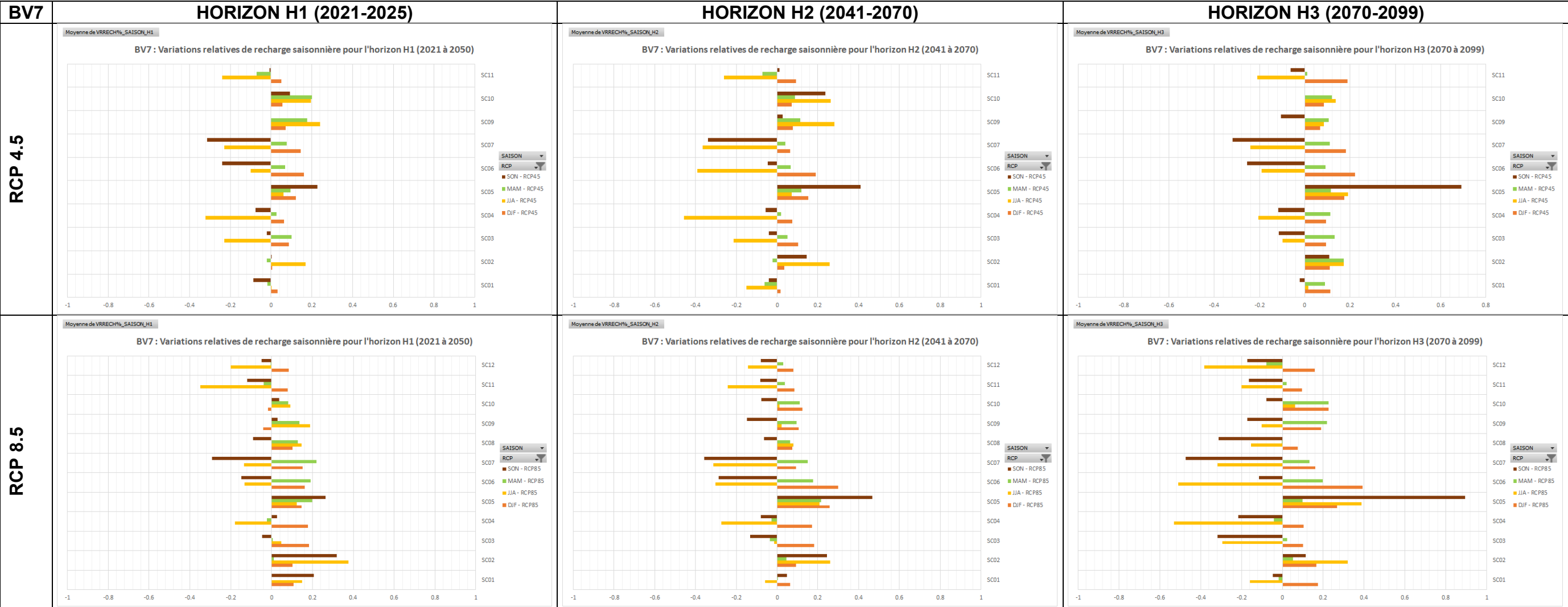
HORIZON H3 (2070-2099)

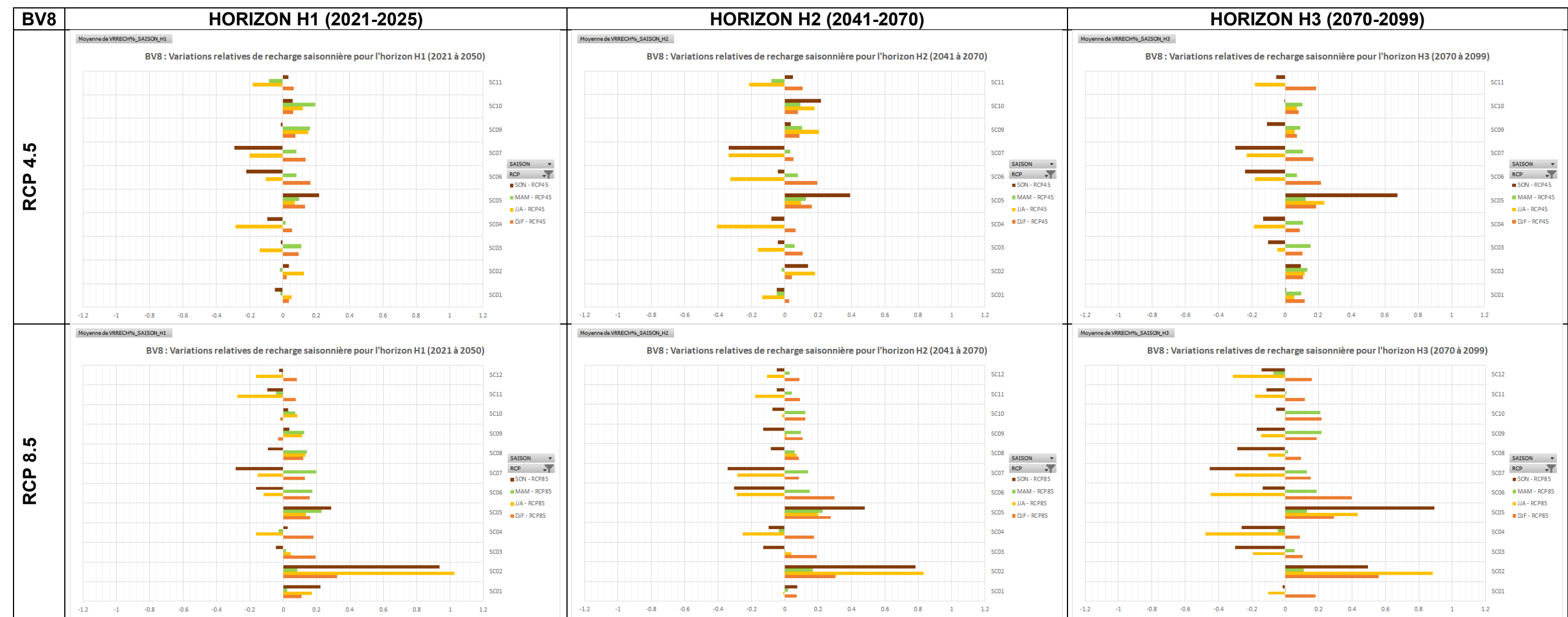
RCP 4.5



RCP 8.5







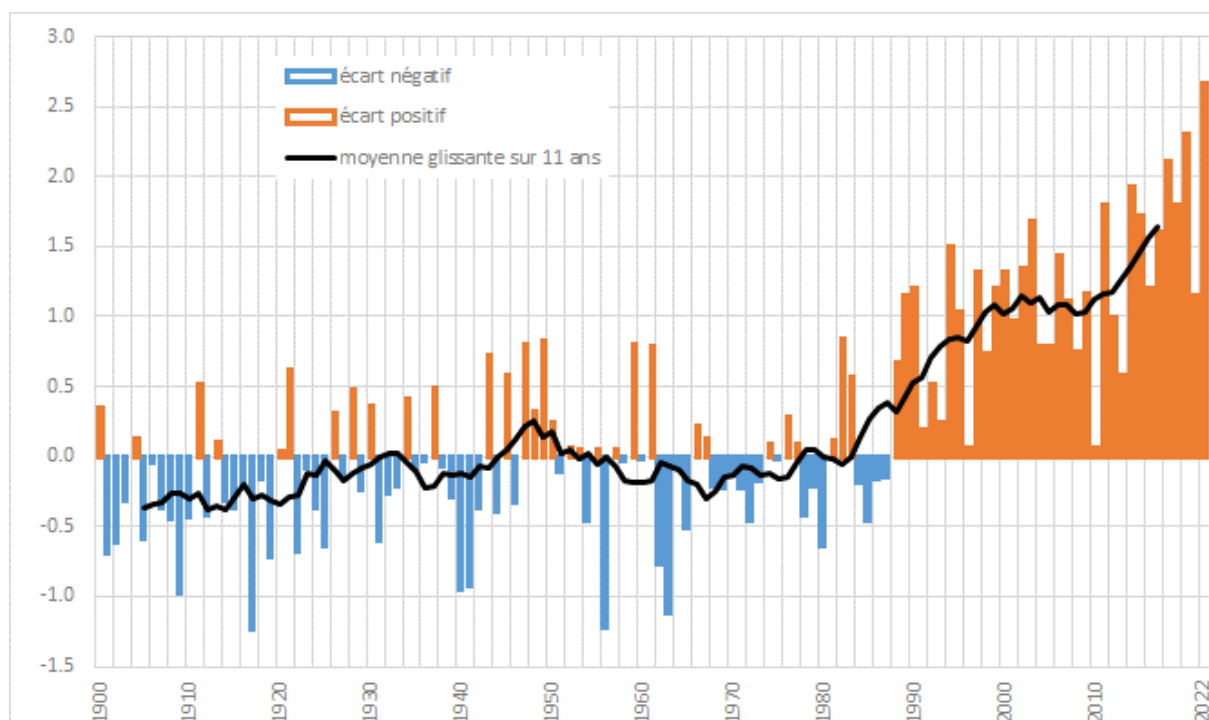
Annexe 6 : Synthèse non technique du rapport BRGM/RP-72304-FR

« IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RECHARGE DES AQUIFERES DU BASSIN RHIN-MEUSE ». Synthèse non technique du rapport [BRGM/RP-72304-FR](#)

M. CHABART et C. BOUVIER le 30/09/2025

Comment se manifeste aujourd'hui le changement climatique ?

Les scientifiques s'accordent à dire que la hausse des températures en France a atteint 1,7 °C depuis 1900, soit une valeur plus forte que celle observée en moyenne mondiale (+ 1,2 °C), et qui s'est accélérée ces dernières décennies.



Evolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine depuis 1900 (en °C). D'après <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2023?rubrique=26&dossier=1263>

Note : l'évolution de la température moyenne annuelle est représentée sous forme d'écart de cette dernière à la moyenne observée sur la période 1961-1990 (11,8 °C).

Champ : France métropolitaine.

Source : Météo-France

L'augmentation des températures n'est pas le seul indicateur du changement climatique. On compte, par exemple, à différentes échelles (mondiale ou nationale) l'élévation du niveau moyen des océans, la fonte des glaciers ou le nombre de départements français touchés par des arrêtés de restriction des usages de l'eau...

Comment expliquer le changement climatique ?

Les conclusions de la communauté scientifique, notamment synthétisées par le **GIEC** (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), font désormais consensus sur le rôle des activités humaines dans ce changement : l'équilibre climatique est perturbé essentiellement par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES). En effet, l'augmentation de la concentration atmosphérique de GES par les émissions anthropiques accroît l'émission d'énergie vers le sol, entraînant un déséquilibre du bilan énergétique de la Terre et provoquant l'élévation de sa température en surface.

À chaque publication, le GIEC communique des **projections climatiques** fondées sur des hypothèses de concentration de GES ou de **scénarios d'émission**. Le 6^{ème} rapport d'évaluation du GIEC datant de 2022, fait référence à un nouvel ensemble de cinq scénarios fondés sur les **trajectoires socioéconomiques partagées** (SSP).

A quoi correspondent les projections climatiques et les scénarios d'émission ?

Les scientifiques ont défini quatre scénarios de référence de l'évolution du **forçage radiatif** sur la période 2006-2300 : les **RCP** pour *Representative Concentration Pathway*.

Exprimé en W/m^2 , un forçage radiatif est un changement du bilan radiatif (différence entre le rayonnement entrant et le rayonnement sortant) au sommet de la troposphère (situé entre 10 et 16 km d'altitude), dû à un changement d'un des facteurs d'évolution du climat – comme la concentration des gaz à effet de serre.

A partir de ces scénarios de référence, les équipes scientifiques travaillent simultanément : les climatologues produisent des **projections climatiques utilisant les RCP** comme entrée, tandis que les socio-économistes élaborent des **scénarios de développement des sociétés humaines dans le futur** (SSP ou Shared Socio-economic Paths) qu'ils comparent aux scénarios RCP.

Dans le cadre du cinquième rapport du GIEC, trois scénarios d'émissions de gaz à effet de serre représentatifs ont été sélectionnés à partir de leurs impacts potentiels sur le climat. Ces RCP se répartissent entre deux scénarios extrêmes (RCP2.6 et RCP8.5) et un scénario intermédiaire (RCP4.5).

- RCP8.5 : c'est le scénario le plus pessimiste, qui décrit un futur sans régulation des émissions. La trajectoire d'évolution du forçage radiatif et d'émission de GES est croissante ;

- RCP4.5 : c'est un scénario intermédiaire dont la trajectoire prévoit une stabilisation du forçage radiatif et des émissions de GES après 2100 ;
- RCP2.6 : c'est le scénario de plus favorable qui décrit un monde très sobre en émissions de gaz à effet de serre. La trajectoire du forçage radiatif et des émissions de GES présente un pic avant 2100 puis un déclin.

Les **projections climatiques** rendent compte de la réponse du système climatique à certains nombres de contraintes futures fondées sur les scénarios d'émissions des gaz à effet de serre (RCP), des modèles climatiques globaux (GCM) plus ou moins complexes et des modèles régionaux (RCM).

- Le **modèle climatique global** (GCM) est une représentation numérique du système climatique basée sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ses composants, leurs processus d'interaction et de rétroaction, et représentant la totalité ou une partie de ses propriétés connues. La résolution de l'ordre de 150 à 200 km est pertinente à l'échelle planétaire, mais insuffisante pour représenter finement les phénomènes météorologiques d'intérêt pour les acteurs socio-économiques. Les climatologues produisent donc des simulations complémentaires s'appuyant sur des modèles de climat de plus fine échelle (modèles climatiques régionaux) ;
- Le **modèle climatique régional** (RCM) est un modèle atmosphérique à haute résolution portant sur une zone géographiquement restreinte, forcé à ses extrémités par les sorties d'un Modèle de Circulation Générale Océan-Atmosphère.

Quels enseignements tirer en termes d'évolution des températures en France selon les 3 principaux scénarios de gaz à effet de serre ?

Les principales conclusions considèrent que :

- Si les mesures de lutte contre le réchauffement climatiques ne sont pas prises maintenant (c'est le scénario RCP 8.5), l'élévation de la température atteindrait 3,9 °C par rapport au climat actuel ;
- En limitant dès maintenant nos émissions au niveau mondial, il est possible de contenir cette hausse de la température en France à environ 2,2°C avec le scénario RCP4.5 et inférieure à 1,5 °C avec le scénario RCP2.6 (seul conforme aux objectifs de l'accord de Paris).

Une étude nationale « Explore 2 » pour actualiser et partager les nouvelles connaissances sur le changement climatique

Le projet Explore2 [2021-2024], porté par Inrae et l'Office International de l'eau (OiEau), est cofinancé par les partenaires du projet, le ministère de la Transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB).

Il s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce auquel les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'Ecologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France.

Les objectifs visés sont l'actualisation des connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des dernières publications du GIEC et l'accompagnement des acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

DRIAS 2020 par Météo France et l'approche narrative pour décrire les futurs du climat

Le jeu de données DRIAS 2020 a été constitué par Météo France à partir de l'ensemble de simulations globales utilisé pour le 5^e rapport du GIEC. Il se compose de 30 simulations, couvrant les trois scénarios RCP2.6, RCP4.5, et RCP8.5, sélectionnées pour représenter les différentes évolutions climatiques sur la France. DRIAS propose un jeu étendu de variables et d'indicateurs climatiques et offre aux utilisateurs la possibilité de considérer différents modèles climatiques selon sa stratégie d'adaptation ou de s'appuyer sur des valeurs moyennes de l'ensemble des modèles.

L'utilisation de ces jeux de donnéesⁱ dans l'étude Explore 2 notamment fait l'objet d'une **approche « probabiliste »** pour décrire les variations futures de recharge à l'aide de statistiques (moyenne ou médiane des simulations, quantiles, etc.). Faire la synthèse des résultats sur l'évolution possible de la recharge à l'échelle d'un territoire tel que la France implique de traiter des données contrastées, voire contradictoires en fonction des différentes projections climatiques utilisées.

Pour faciliter l'utilisation des projections climatiques et l'appropriation des résultats dans le cadre d'études plus locales, une alternative dite **approche « narrative »** a été proposée par Météo France. Un narratif est défini comme un déroulement physiquement cohérent d'événements passés ou futurs. Cette approche cherche à développer des « récits » descriptifs de climats futurs possibles (Shepherd et al. 2018).

Dans le cadre d'**Explore2** (échelle du territoire métropolitain), **quatre narratifs** ont été sélectionnés par Météo France en co-construction avec des hydrologues (RCP 8.5 pour l'horizon 2100) afin d'illustrer des situations d'évolution climatique contrastées. Le critère de sélection porte sur les changements moyens de température et précipitations futurs :

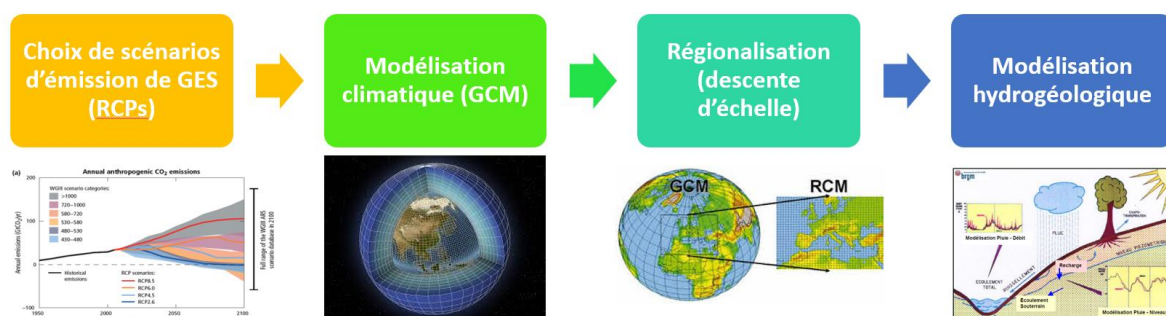
les quatre narratifs doivent correspondre à des changements contrastés, pour rendre compte de la dispersion de l'ensemble Explore2-Climat tout en restant cohérent avec l'intervalle de confiance des projections. Ils sont identifiés par des couleurs particulières :

- **Le narratif orange (EC-EARTH rcp85 HadREM3-GA7 ADAMONT) : fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) ;**
- **Le narratif jaune (CNRM-CM5 rcp85 ALADIN63 ADAMONT) : changements futurs relativement peu marqués ;**
- **Le narratif violet (HadGEM2-ES rcp85 CCLM4-8-17 ADAMONT) : fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations ;**
- **Le narratif vert (HadGEM2-ES rcp85 ALADIN63 ADAMONT) : réchauffement marqué et augmentation des précipitations.**

Une étude régionale concernant l'impact du changement climatique sur recharge des aquifère du bassin Rhin-Meuse

Le partenariat BRGM, Agence de l'Eau et Région Grand-Est a conduit à la mise en œuvre courant 2021 d'une étude de recherche et développement qui s'est achevée en 2024 (rapport BRGM/RP-72304-FR de 2024). Elle vise à définir l'impact du changement climatique sur la recharge et l'évolution des niveaux piézométriques à l'échelle du bassin Rhin-Meuse. Les travaux ont porté sur deux actions complémentaires :

- La mise en œuvre de calculs permettant d'estimer et de cartographier les variations de recharge à l'échelle du Bassin Rhin-Meuse à l'horizon 2050, 2070 et 2100 ;
- La réalisation de modélisations hydrologiques globales sur 8 bassins versants (choisis sur des critères précis définissant leurs représentativités en termes d'anthropisation, d'usage et de caractérisation des milieux) et l'analyse de l'évolutions d'indicateurs statistiques tels que les variations de recharge et de niveaux piézométriques dans un contexte de changement climatique.



Quelles données ont été utilisées pour l'étude du Bassin Rhin-Meuse ?

Dans un premier temps l'étude se concentre sur l'évaluation de la recharge. Elle repose sur l'hypothèse que la répartition de la pluie efficace entre le ruissellement et l'infiltration est contrôlée par les propriétés locales du sol et du sous-sol, indépendamment des conditions climatiques. La recharge correspond donc à la part de la pluie efficace qui s'infiltre à travers le sol jusqu'à la nappe.

Les données utilisées sont :

- Données météorologiques : précipitations (P), température (T) et évaporation potentielle (ETP)
- Données pédologiques : capacité de stockage du sol (CSS), coefficient cultural (Kc)

L'ensemble des données utilisées pour le calcul de la pluie efficace sont rapportées à l'échelle de la grille SAFRAN (Vidal et al., 2010) constituée de mailles carrées de 8 km de côté couvrant l'ensemble de la zone d'étude.

Dans un second temps l'étude se focalise sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la recharge du bassin Rhin-Meuse. Les projections climatiques utilisées sont issues du portail DRIAS2020 en cohérence, dans la mesure du possible, avec l'étude Explore2 (déroulement simultané).

Concrètement il est question d'interpréter les écarts entre les simulations (1) de la pluie efficace sur la période actuelle (1976-2005) et (2) de la pluie efficace sur les périodes futures (2021-2050 ; 2041-2070 ; 2071-2100). Les variations de recharge sont jugées équivalentes aux écarts de pluie efficace permettant ainsi la construction de cartes de variation future.

Comment a-t-on exploité les données à l'échelle de Rhin-Meuse et avec quelle difficulté ?

La principale difficulté a résidé dans le choix des projections climatiques en cohérence avec les études menées à l'échelon national (DRIAS 2020, Explore2). Finalement, les résultats portent sur le traitement statistique de 22 projections climatiques (dont 2 particulièrement pluvieuses qui n'ont finalement pas été prises en compte dans Explore2). L'exploitation des données s'est faite :

- D'une part à l'échelle d'unités géographiques compatibles avec la nécessité de gestion opérationnelle (entités hydrogéologiques BDLISA croisés avec les zones

hydrologiques de BD Carthage) pour les variations de recharge selon des valeurs médianes et les quantiles 5 et 95% définis pour chaque RCP (2 scénarios d'émission contrasté RCP 4.5 et RCP 8.5) et 3 périodes de 30 ans (horizon H1 : 2021-2050 ; H2 : 2041-2070 ; H3 : 2070-2099) ;

- D'autre part en comparant les résultats (variations de recharge et de niveau piézométrique) des 22 projections climatiques, de 2 narratifs jaune et violet (sur les 4 narratifs retenus dans Explore2 – choix effectué en fonction des projections disponibles au moment de l'étude), des valeurs moyennes, médianes, minimales, maximales et des quantiles 5 et 95 % définis pour chaque RCP, chaque horizon et chaque bassin versant sélectionné.

Quels sont les principales conclusions en termes d'évolution de la recharge à l'échelle du Bassin Rhin Meuse ?

L'interprétation des variations de recharge annuelle et saisonnière à l'échelle du bassin Rhin-Meuse est réalisé pour les valeurs médianes et pour les extrêmes avec pour objectif d'illustrer les valeurs extrêmes et la variabilité des résultats des simulations.

Les simulations à l'échelle du bassin Rhin-Meuse pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 prévoient à l'horizon 2100 un excédent de recharge moyenne variant de 0 à +40 % pour les saisons hors estivales. Pour la période estivale, les simulations prévoient une recharge géographiquement variable allant d'un déficit de -20 % à un excédent de +20 % pour le RCP 4.5. Les simulations utilisant le RCP 8.5 mettent en évidence un déficit de la recharge estivale de -10 à -30 %.

Que peut-on dire sur l'évolution de la recharge pour les principales nappes libres du Bassin Rhin Meuse ?

Afin de mener des réflexions sur l'évolution globale de la recharge future à l'échelle des différentes nappes phréatiques du bassin Rhin-Meuse, les calculs statistiques ont été réalisés pour chacune d'entre elles.

Les tendances d'évolution des recharges annuelles, simulées pour chaque nappe phréatique du bassin Rhin Meuse, sont comprises dans la gamme de 0 à +20 %. Les recharges simulées pour la nappe d'Alsace et du Champ de fracture de Saverne font exception avec des valeurs plus importantes de l'ordre de +20 à +40 %.

Les tendances d'évolution de la recharge saisonnière, simulée pour chaque nappe phréatique du bassin Rhin Meuse sont positives pour la saison hivernale (de 0 à +60 %) avec un maximal pour la nappe d'Alsace et celle du Champs de fracture de Saverne.

Pour les saisons printanières et automnales, les recharges simulées tendent à la hausse (de 0 à +20 %) sauf celles du Socle vosgien qui restent stables (± 0 %).

En période estivale les recharges simulées tendent à la baisse pour le Socle vosgien (de 0 à -40 %) et oscillent sur une gamme comprise entre -20 et +20 % pour les autres nappes phréatiques. Les nappes les plus impactées par l'augmentation de la recharge en hiver sont la Nappe d'Alsace et celles du Champ de Fracture de Saverne. La nappe la plus impactée par la diminution de la recharge en été est le Socle Vosgien.

Quels sont les principales conclusions en termes d'évolution de la recharge et des niveaux piézométriques à l'échelle de bassins versants instrumentés ?

Les bassins versants instrumentés (BV avec suivi en temps réel des niveaux d'eau et des débits du cours d'eau à l'exutoire) ont été sélectionnés pour la disponibilité des données en vue de leur modélisation et pour leur représentativité des principaux aquifères du bassin Rhin-Meuse : les calcaires du Muschelkalk (2 BV), les calcaires de l'Oxfordien (2 BV), les calcaires du Dogger (3 BV), les Grès du Trias inférieur à l'affleurement (1 BV) et les Cailloutis pliocènes du Sundgau (2 BV).

Pour une projection climatique avec des changements futurs relativement peu marqués (narratif jaune), la tendance de la recharge moyenne annuelle à l'horizon 2100 sur les BV modélisés est à l'augmentation, entre + 9% et + 18 %.

Pour une projection climatique avec de forts réchauffements et de forts contrastes saisonniers en précipitation (narratif violet), la tendance de la recharge moyenne annuelle à l'horizon 2100 sur les BV modélisés est à la diminution. Elle est comprise entre - 17% et - 20 % pour les BV du Sundgau et plus modérée pour les autres (entre - 3% et + 4 %).

La valeur médiane des recharges moyennes annuelles simulées à l'horizon 2100 met en évidence une évolution qui est toujours positive pour l'ensemble des BV modélisés (de +5% à + 12%).

Pour les trois horizons étudiés, l'évolution saisonnière de la recharge moyenne pour les bassins versants modélisés est positive en hiver et au printemps. Les recharges moyennes saisonnières ont une tendance à la baisse en été et en automne (quelques BV à la hausse en automne).

Quelles sont les incertitudes à prendre en compte dans l'exploitation des données ?

Concernant la prise en compte des incertitudes dans l'exploitation des données, il est nécessaire de considérer que les résultats exposés ci-dessus sont :

- A considérer de manière tendancielle ou en termes d'ordre de grandeur quand on évoque les valeurs statistiques établies à partir des résultats issus des différentes modélisations prenant en compte les 22 projections climatiques ;
- A envisager comme le champ des possibles, notamment quand on compare entre eux les résultats des différentes projections climatiques. Dans ce cas, on fait l'hypothèse d'une équiprobabilité des différentes projections climatiques pour un même RCP ;
- A apprécier sous l'angle de 4 projections climatiques particulières (les 4 narratifs d'Explore2) retenues par leur représentativité contrastée :
 - Narratif jaune : Changements futurs relativement peu marqués ;
 - Narratif violet : Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations ;
 - *Ces 2 narratifs sont disponibles pour le projet national Explore2 et pour l'étude locale du bassin Rhin-Meuse.*
 - Narratif vert : Réchauffement marqué et augmentation des précipitations ;
 - Narratif orange : Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel) ;
 - *Ces 2 narratifs sont disponibles uniquement pour le projet national Explore2 et pas pour l'étude locale du bassin Rhin-Meuse (projections non retenues pour les modélisations en 2022).*

La littérature scientifique montre qu'il existe un biais introduit par le choix de la méthode de régionalisation utilisée dans DRIAS 2020. Il a en effet été démontré (TARANU et al., 2023) que l'utilisation de la méthode de régionalisation ADAMONT conduit à des modèles climatiques régionaux qui ont tendance à atténuer le réchauffement par rapport aux modèles climatique globaux et qui sont plus humides, notamment sur la partie nord de la France.

Ces résultats peuvent expliquer les divergences de signes que l'on observe entre la présente étude et les précédentes ([Explore 2070](#), [Socle vosgien](#)). Ils doivent donc être mis en perspective de la forte incertitude qui réside dans le choix de la méthode de régionalisation réalisé par la communauté des climatologues.

Pour en savoir plus

BRGM (2024) - Evaluation des conséquences du changement climatique sur la recharge des aquifères du bassin Rhin-Meuse. Cartographie des variations et modélisations. Rapport final version 2. BRGM/RP-72304-FR, 208 p. 65 fig., 6 tab., 5 ann. [Lien](#).

Buscarlet, Etienne ; Chabart, Murielle ; Guignat, Stéphanie (2020) - Estimation de la recharge des aquifères sur le bassin Rhin-Meuse - Volet 1 - Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69762-FR, 29 p. [Lien](#).

CHABART M. ; VERGNES J.P. (2021) - Impact du changement climatique sur la ressource en eau du socle Vosgien. Rapport final – version 2. BRGM/RP-70595-FR 146 p. 3 ann. [Lien](#).

DRIAS 2020 :

- <https://www.drias-climat.fr/>
- L'approche narrative : <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/426>

Explore 2 :

- <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/explore2-impacts-du-changement-climatique-ressource-eau-horizon-2100>
- <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

Shepherd, T.G., Boyd, E., Calel, R.A. et al. Storylines. 2018: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. Climatic Change 151, 555–571 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2317-9>

TARANU, I.S., SOMOT, S., ALIAS, A. et al. (2023) - Mechanisms behind large-scale inconsistencies between regional and global climate model-based projections over Europe. Clim Dyn 60, 3813–3838 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06540-6>

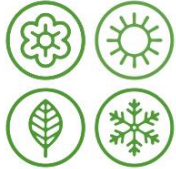
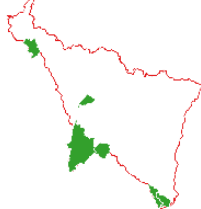
VIDAL J.P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY L., HABETS F., SOUBEYROUX J.M., et al. (2010) - Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14 (3), pp.459-478. [ff10.5194/hess-14-459-2010](https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010)ff. [ffhal-00506547](https://doi.org/10.5194/hess-14-459-2010)

Documents de synthèse

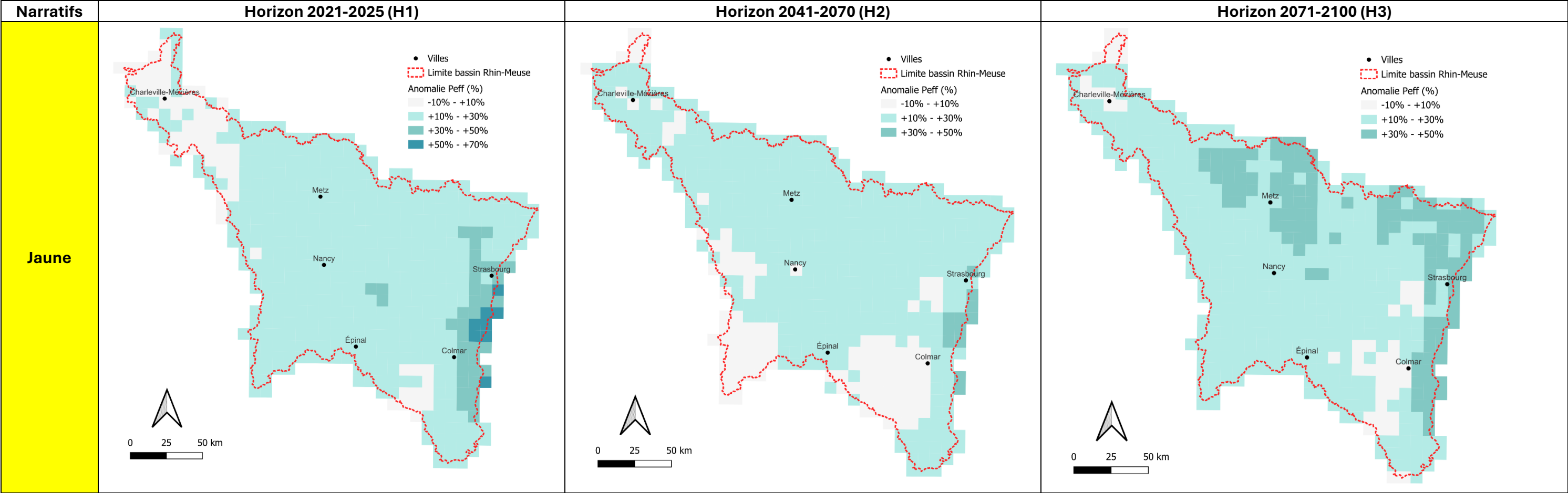
Les trois documents ci-dessous dressent la synthèse :

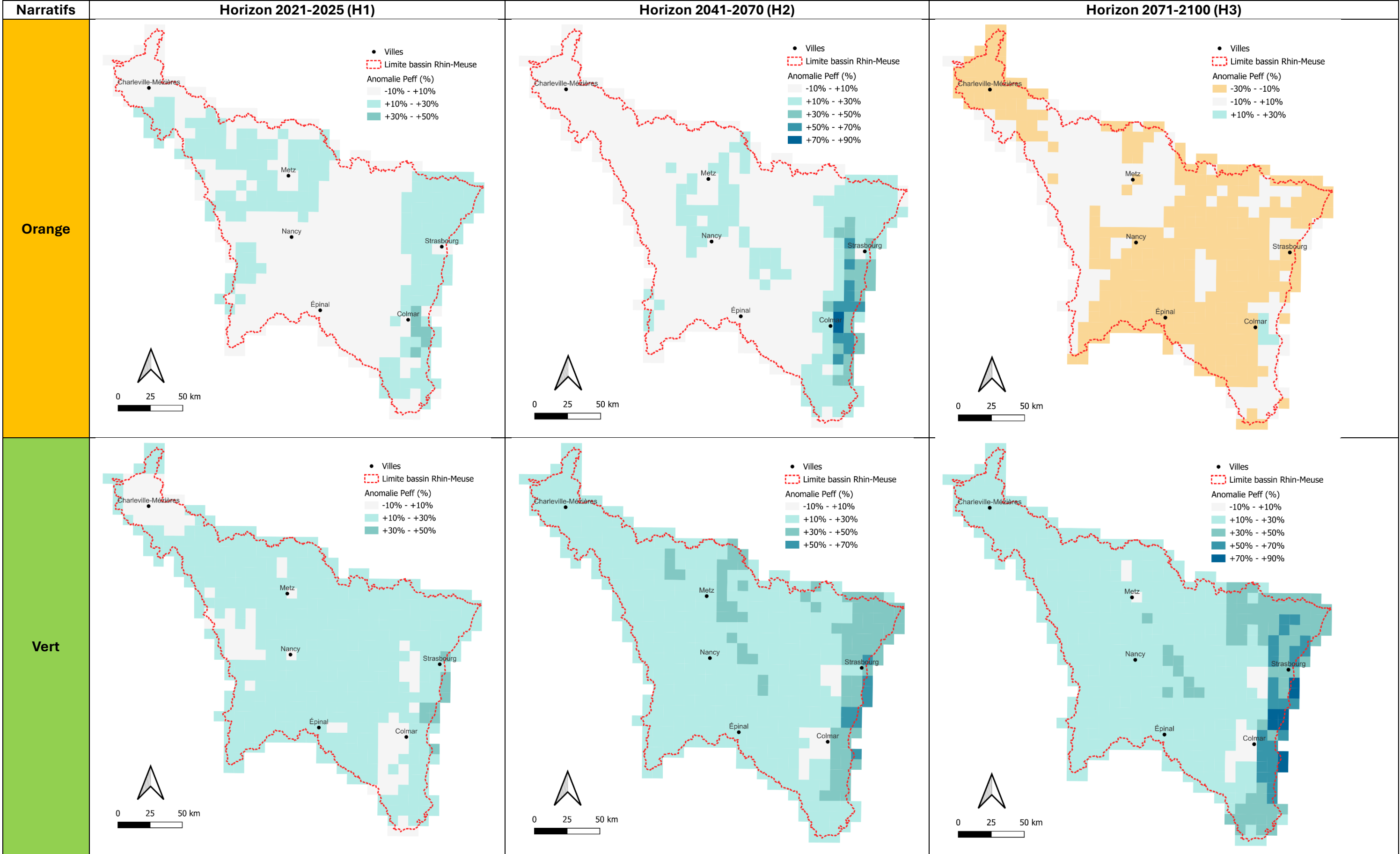
- Des chiffres clés de l'impact du changement climatiques en Rhin-Meuse d'ici 2100 (résultats tirés du rapport BRGM/RP-72304-FR) sous forme de tableau ;
- Des variations de recharge (anomalie des pluies efficaces) pour les 4 narratifs selon le scénario RCP 8.5 (dressés sur le Bassin Rhin-Meuse à partir des résultats d'Explore 2) sous forme de carte et de tableau.

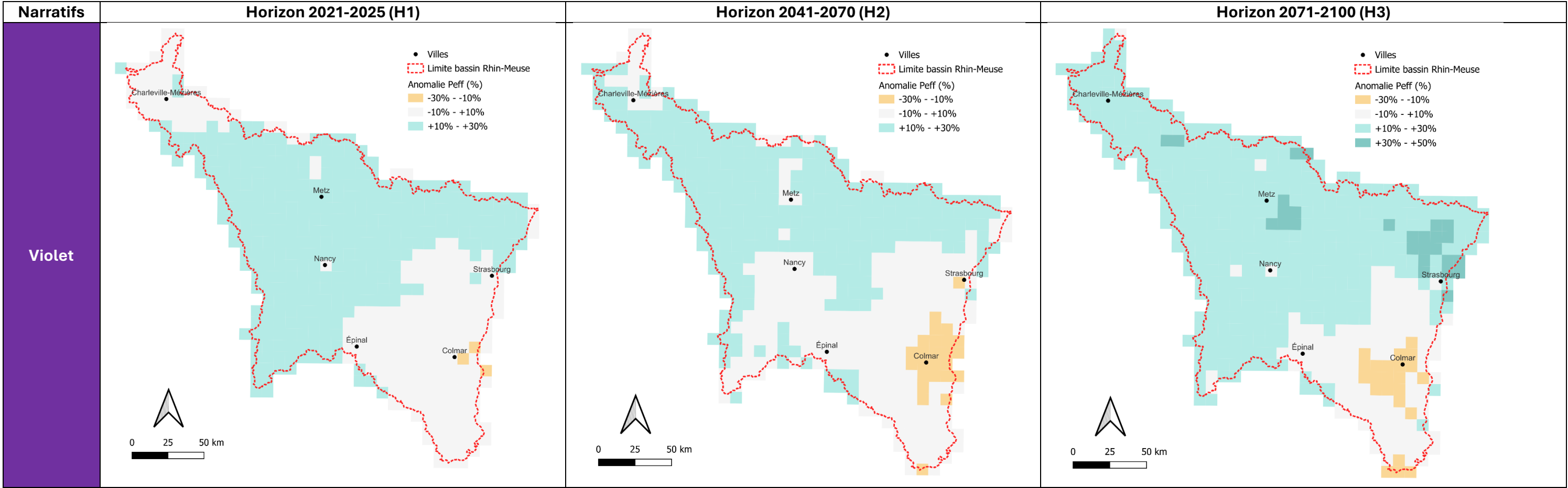
Chiffres clés de l'impact du changement climatique en Rhin-Meuse d'ici 2100

						
Le bassin Rhin-Meuse (global) 	Annuelle		RCP4.5	De +5 à +45% (57% de la superficie du bassin de +10 à +20%)	Evolution positive de la recharge médiane annuelle	
			RCP8.5	De 0 à +57% (53% de la superficie du bassin de +20 à +30% et des variations >50% sur la plaine d'Alsace)	Evolution positive de la recharge médiane annuelle	
	Saisonnière	Automne, hiver, printemps	RCP4.5 et 8.5	0 à + 40 %	Evolution positive de la recharge moyenne en automne, hiver et printemps	
			RCP4.5	- 20 à + 20 %	Evolution négative en période estivale , plus accentuée pour le RCP8.5.	
		Eté	RCP8.5	- 30 à - 10 %		
Les nappes du Bassin Rhin-Meuse 	Annuelle		RCP4.5 et 8.5	De + 20 à + 40 % (Nappe Alsace et Champ de fracture Saverne). De 0 à + 20 % (autres nappes)	Evolution positive de la recharge moyenne annuelle	
	Saisonnière	Hiver	RCP4.5 et 8.5	De 0 à + 60 % (max pour la Nappe d'Alsace et Champs de fracture de Saverne)	Evolution positive de la recharge moyenne hivernale	
				De - 20 à + 20 % (autres nappes) De - 40 à 0 % (Socle Vosgien)	Evolution stable à négative de la recharge moyenne hivernale	
		Printemps et automne		De 0 à + 20 % (autres nappes) De + - 0 % (Socle Vosgien)	Evolution positive à stable de la recharge moyenne printanière et automnale	
		Eté	RCP4.5	De - 20 à 0 %	Dans la gamme -20 à 0%, évolution négative de 2050 à 2070 et positive de 2070 à 2100 en période estivale	
			RCP8.5	De -20 à +20% (autres nappes) -40 à 0% (Socle vosgien)	Evolution positive et évolution négative pour l'horizon 2050 à 2100	
	Les bassins versants instrumentés et modélisés 	Annuelle		<u>Narratif Jaune : Changements futurs relativement peu marqués</u>	De + 9 à + 18 %	Evolution positive de la recharge moyenne
				<u>Narratif violet : Forts réchauffements et forts contrastes saisonniers en précipitations</u>	- 3 à + 4 %	Evolution stable de la recharge moyenne (autres)
- 17 à - 20 %					Evolution négative de la recharge moyenne (Cailloutis du Sundgau)	
RCP4.5 et 8.5				+ 5 à + 12 %	Evolution positive de la recharge moyenne annuelle	
Saisonnière		Hiver et printemps	RCP4.5 et 8.5	Max + 27 %	Evolution positive en période hivernale et printanière	
		Automne et été	RCP4.5 et 8.5	De - 4 à - 10 %	Evolution négative en période automnale et estivale	
		Automne	RCP4.5	De + 7 à + 14 %	Quelques exceptions positives en période automnale pour aquifère autre que Sundgau	

Cartes des variations de recharge (anomalie des pluies efficaces) pour les 4 narratifs selon le scénario RCP 8.5







Synthèse des variations de recharge (anomalie des pluies efficaces) pour les 4 narratifs selon le scénario RCP 8.5

				
Jaune Changements futurs relativement peu marqués	2021-2050 (H1)	-10 à +10%	12%	Stable dans les Ardennes, le nord de la Meuse ainsi que dans le sud du Socle vosgien
		+10 à +30%	80%	Légèrement positive dans le reste du bassin (Lorraine, Alsace nord et sud)
		+30 à +70%	8%	Fortement positive entre Strasbourg et Mulhouse dans le Ried alsacien
	2041-2070 (H2)	-10 à +10%	20%	Stable dans le sud du bassin dans la région de Vittel et à l'ouest de Colmar
		+10 à +30%	77%	Légèrement positive dans le reste du bassin (Lorraine, Alsace nord et sud)
		+30 à +50%	3%	Positive au sud de Strasbourg dans le Ried alsacien
	2071-2100 (H3)	-10 à +10%	8%	Stable à l'ouest et au sud de Colmar et dans les nord des Ardennes
		+10 à +30%	72%	Légèrement positive dans le reste du bassin
		+30 à +50%	10%	Positive dans la région de Metz, en Alsace du nord et dans le Ried alsacien
Orange Fort réchauffement et fort assèchement en été (et en annuel)	2021-2050 (H1)	-10 à +10%	63%	Stable dans les départements des Vosges, le sud de la Meurthe-et-Moselle, l'est de la Moselle et le nord des Ardennes
		+10 à +30%	37%	Légèrement positive dans le nord-est du bassin dans la région de Metz et sur la plaine d'Alsace
	2041-2070 (H2)	-10 à +10%	72%	Stable en Lorraine
		+10 à +30%	22%	Légèrement positive entre Nancy et Metz ainsi qu'en Alsace du nord et du sud
		+30 à +90%	6%	Fortement positive entre Strasbourg et Mulhouse dans le Ried alsacien et la forêt de la Hardt
	2071-2100 (H3)	-30 à -10%	60%	Légèrement négative dans le centre du bassin entre Nancy et Colmar, dans le nord des Ardennes et en Alsace du centre et du nord
		-10 à +10%	39%	Stable à l'ouest du bassin, dans la région de Metz et dans le sud Alsace
		+10 à +30%	1%	Légèrement positive autour de Colmar

    				
Vert Réchauffement marqué et augmentation des précipitations	2021-2050 (H1)	-10 à +10%	15%	Stable dans la région de Charleville-Mézières, de Commercy et au sud-ouest de Colmar
		+10 à +30%	84%	Légèrement positive dans tout le bassin
		+30 à +50%	1%	Positive dans le Ried alsacien entre Strasbourg et Sélestat
	2041-2070 (H2)	-10 à +10%	3%	Stable autour de Colmar
		+10 à +30%	81%	Légèrement positive dans tout le bassin
		+30 à +90%	16%	Positive dans la région de Metz, en Alsace au nord de Strasbourg et au sud de Colmar à fortement positive entre Strasbourg et Colmar
	2071-2100 (H3)	-10 à +10%	3%	Stable autour de Colmar
		+10 à +30%	77%	Légèrement positive dans tout le bassin
		+30 à +90%	20%	Positive dans le pays de bitche et au nord de l'Alsace à fortement positive entre Strasbourg et le sud de l'Alsace
Violet Fort réchauffement et forts contrastes saisonniers en précipitations	2021-2050 (H1)	-30 à -10%	0.5%	Légèrement négative à l'est de Colmar
		-10 à +10%	38%	Stable en Alsace au sud de Strasbourg, dans le massif et à l'est du département des Vosges ainsi que dans le nord des Ardennes
		+10 à +30%	61.5%	Légèrement positive dans le reste du bassin et dans le nord de l'Alsace
	2041-2070 (H2)	-30 à -10%	4%	Légèrement négative dans la région de Colmar
		-10 à +10%	43%	Stable en Alsace au sud de Strasbourg, dans le massif et les Vosges, dans la région de Nancy ainsi que dans le nord des Ardennes
		+10 à +30%	53%	Légèrement positive à l'ouest, au centre et au nord du bassin
	2071-2100 (H3)	-30 à -10%	4%	Légèrement négative dans la région de Colmar et du Sundgau
		-10 à +10%	20%	Stable en Alsace au sud de Strasbourg, dans le massif et à l'est du département des Vosges
		+10 à +30%	71%	Légèrement positive en Lorraine et au nord de l'Alsace
		+30 à +50%	5%	Positive au nord de Strasbourg et au sud-est de Metz

i ETP formulation « FAO Heargraves », précipitations liquides (recalculées), précipitations solides neige, précipitations totales, température de l'air à 2 m



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction Régionale Grand Est – Site de Nancy

1 rue Jean Zay

54500 Vandœuvre-lès-Nancy - France

Tél. : 03 83 44 81 49

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm