

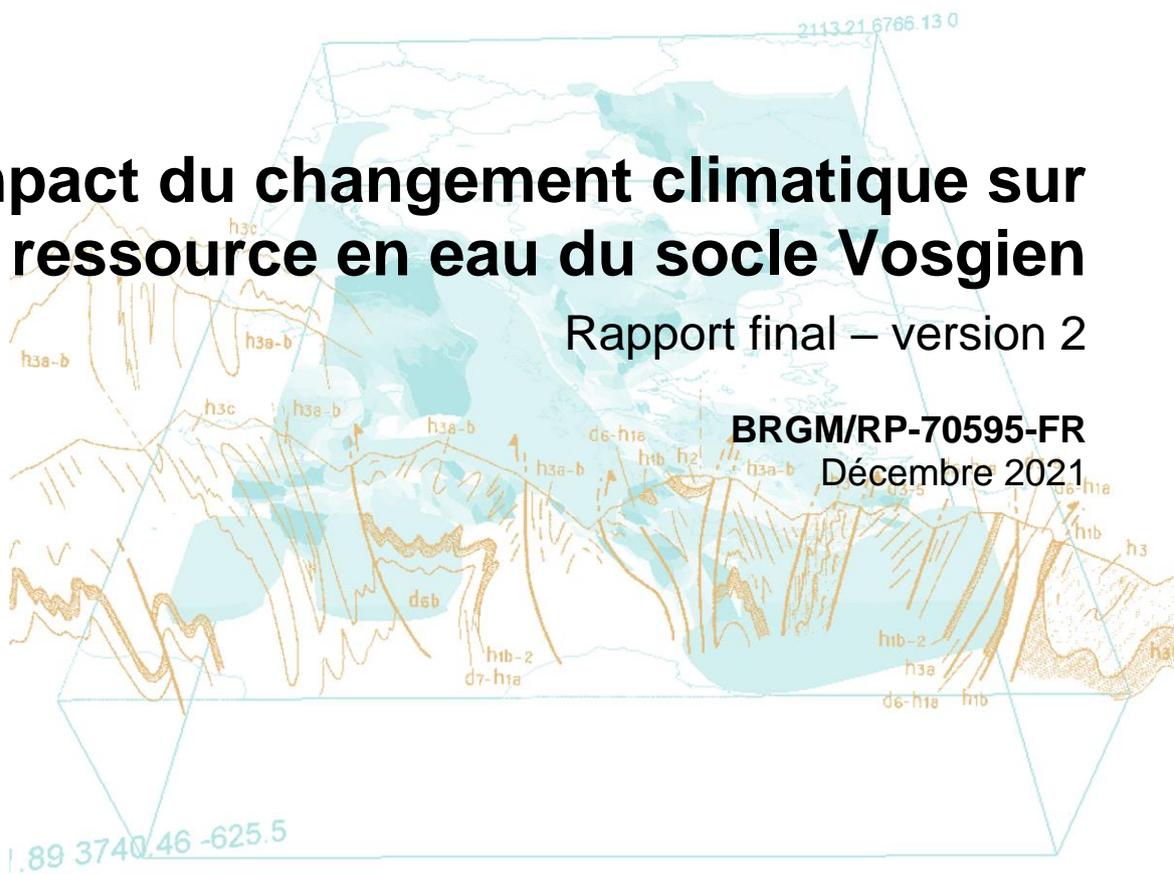
Document public



Impact du changement climatique sur la ressource en eau du socle Vosgien

Rapport final – version 2

BRGM/RP-70595-FR
Décembre 2021



Opération soutenue par l'État
FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Vosges

Place Foch
88000 EPINAL

Liberté
Égalité
Fraternité

Direction régionale
de l'environnement,
de l'aménagement
et du logement

ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE
EN CHARGE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

brgm

Impact du changement climatique sur la ressource en eau du socle Vosgien

Rapport final – version 2

BRGM/RP-70595-FR

Décembre 2021

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2017-RSE-13

M. CHABART, J.P. VERGNES



Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

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

Contact : qualite@brgm.fr



ÉTABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTÈRE EN CHARGE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE



Vérificateur :

Nom : H. BESSIERE

Fonction : Hydrogéologue

Date : 29/04/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : D. MIDOT

Fonction : Directeur Régional Grand Est :

Date : 29/04/2021

Signature :

Nature des modifications pour la version 2 : actualisation de quelques figures (Figure 27 à Figure 43) afin d'en améliorer la lisibilité et d'introduire la notion de « Moyenne multi-scénarios pour RCP 4.5 » et « Moyenne multi-scénarios pour RCP 8.5 ».

Mots-clés : Modélisation, EROS, GARDENIA, socle vosgien, recharge, changement climatique

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

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.

Synthèse

Les Plans d'Adaptation au Changement Climatique sont une des réponses envisagées suite aux engagements de 2015 du **Pacte de Paris sur l'eau et l'adaptation au changement climatique**. Les mesures à mettre en œuvre passent par le partage de connaissances et de prévisions communes et définies à l'échelle d'un territoire donné.

Ainsi le **socle vosgien**, déjà affecté depuis plusieurs années par des sécheresses récurrentes, des étiages de cours d'eau plus importants, plus fréquents et plus longs, a pu bénéficier depuis 2018 de financements spécifiques pour la réalisation d'une étude collaborative sur les ressources en eau fédérant plusieurs acteurs tels que le BRGM, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, la DREAL Grand-Est, la Région Grand-Est, le Commissariat à l'aménagement du Massif des Vosges (Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire - FNADT) et l'Université de Lorraine (Centre de recherche en géographie LOTERR).

Si le volet 1 de l'étude était consacré à la caractérisation des ressources en eau ([Rapport BRGM/RP-69482-FR](#)), le volet 2 s'intéresse plus spécifiquement à l'impact du changement climatique sur la ressource en eau.

D'un point de vue général, la communauté scientifique s'accorde à dire que les changements climatiques vont affecter les processus hydrologiques, notamment la recharge des nappes d'eau souterraine (diminution du flux de recharge). Cela pourrait affecter de manière négative la ressource disponible, les usages anthropiques et l'alimentation des milieux aquatiques superficielles (cours d'eau, zones humides...). La connaissance de l'importance de ce déficit futur est cruciale pour anticiper les éventuels déséquilibres et difficultés à venir.

La mise en œuvre de modélisations sur 37 sous bassins versants délimités au sein du socle vosgien à partir du logiciel [ÉROS](#) (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins), développé par le BRGM, a permis d'évaluer l'impact du changement climatique sur la base de scénarios climatiques mis à disposition par Météo France (DRIAS).

14 projections climatiques déterminées par la combinaison de deux scénarios d'émission RCP 4.5 et RCP 8.5 (le plus pessimiste), de deux méthodes de régionalisation statistiques « DAYON » et « DSCLIM » et 4 modèles climatiques, ont été testées.

Les principales évolutions issues des modélisations sont les suivantes :

- Une baisse de la recharge future comprise entre -1 % et -21 %, avec en moyenne multi-scénarios - 6 % à l'horizon 2060 et - 9 % à l'horizon 2100 ;
- Une diminution des débits annuels (moyenne sur tous les sous bassins versants) pour la plupart des scénarios jusqu'à - 15 % en 2060 et -20% en 2100 pour le plus pessimiste ;
- Une variation des débits moyens mensuels futurs en moyenne multi-scénarios de - 8 % à l'horizon 2060 et - 12 % à l'horizon 2100 ;
- Des disparités mensuelles importante avec notamment en moyenne multi-scénarios à l'horizon 2100 une baisse des débits sur la période printemps-été (jusqu'à - 40 % de déficit en juillet) et une augmentation des débits sur la période automne-hiver (jusqu'à + 16 % d'excédent en janvier).

Ainsi selon les projections étudiées, des tensions croissantes sur les usages de la ressource en eau dans le futur pourraient par conséquent être observées sous l'effet du changement climatique notamment en période de basses eaux.

Ces résultats en valeur moyenne ne doivent pas masquer le fait que l'incertitude associée au modèle de climat s'accroît pour les simulations de la période future par rapport à celle de la période présente et que l'incertitude est plus importante en hiver et en été qu'au printemps et en automne.

Enfin de fortes disparités peuvent apparaître sur certains sous bassins notamment du fait de la variabilité spatiale et temporelle des événements pluviométriques extrêmes mais aussi à cause des différences de comportement entre les sous bassins amont et aval.

En conclusion, l'ensemble de ces résultats doit être manipulé avec précaution dans la mesure où la démarche adoptée pour les obtenir intègre beaucoup de sources d'incertitude, certaines liées directement aux projections climatiques comme la difficulté des modèles de climat à simuler la situation présente et d'autres qui sont inhérentes aux hypothèses de travail et aux approches adoptées pour le calcul de la recharge.

Les perspectives doivent répondre en priorité à la nécessité de disposer de données plus précises concernant l'évolution de la ressource sur le long terme, les usages notamment en période d'étiage et l'impact de l'anthropisation sur les écoulements pour approfondir les travaux de modélisations à l'échelle de bassin spécifique à enjeux.

A terme, la mise à disposition d'outils de gestion intégrant la modélisation prédictive à l'échelle de quelques bassins versants est une piste prometteuse.

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| 1. Contexte et objectifs | 11 |
| 1.1. EVOLUTION DE LA RECHARGE EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE | 11 |
| 1.2. CARACTERISATION DE LA RECHARGE | 11 |
| 1.3. MODELISATION SEMI-GLOBALE..... | 13 |
| 2. Choix des scénarios climatiques | 15 |
| 2.1. SCENARIOS D'EVOLUTION DES GAZ A EFFET DE SERRE OU PROFILS RCP (« REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS »)..... | 15 |
| 2.2. MODELISATION DU CLIMAT ET REGIONALISATION | 18 |
| 2.3. PRISE EN COMPTE DES INCERTITUDES..... | 20 |
| 2.4. PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES UTILISEES POUR LE SOCLE VOSGIEN | 21 |
| 3. Mise en oeuvre des modélisations semi-globales avec EROS | 23 |
| 3.1. METHODOLOGIE..... | 23 |
| 3.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION SUR LE SOCLE VOSGIEN | 24 |
| 3.3. LES FICHIERS DE DONNEES | 29 |
| 3.3.1. Le fichier « Arbre de branchement » des 37 sous bassins : | 29 |
| 3.3.2. Le fichier des débits journaliers..... | 30 |
| 3.3.3. Le fichier des mailles météorologiques et des pondérations | 30 |
| 3.3.4. Le fichier des données météorologiques..... | 31 |
| 3.4. LES OPTIONS CHOISIES POUR LA MODELISATION | 33 |
| 3.4.1. Options générales..... | 33 |
| 3.4.2. Paramètres hydroclimatiques à calibrer | 33 |
| 3.5. LA QUALITE DE LA CALIBRATION OBTENUE | 34 |
| 3.5.1. Coefficient de Nash..... | 34 |
| 3.5.2. Analyse des débits journaliers simulés..... | 34 |
| 3.5.3. Bilan moyen par sous bassin et classification | 38 |
| 4. Mise en œuvre des prévisions sur le socle vosgien..... | 43 |
| 4.1. METHODOLOGIE DES CALCULS | 43 |
| 4.2. ANALYSE DES RESULTATS SUR LA RECHARGE FUTURE | 45 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.1. Recharge annuelle calculée selon les 14 projections climatiques régionalisées sur la période future et la période de référence | 45 |
| 4.2.2. Variation entre la recharge moyenne annuelle sur la période future et la recharge moyenne interannuelle sur la période de référence | 47 |
| 4.2.3. Impact à l'échelle des sous bassins versants | 47 |
| 4.2.4. Répartition spatiale de la variation de recharge | 54 |
| 4.3. ANALYSE DES RESULTATS SUR LES DEBITS FUTURS..... | 57 |
| 4.3.1. Ecoulement total annuel calculé selon 14 projections climatiques régionalisées sur la période future et la période de référence | 57 |
| 4.3.2. Variation entre l'écoulement total moyen annuel sur la période future et l'écoulement total moyen annuel sur la période de référence | 57 |
| 4.3.3. Impact à l'échelle des sous bassins versants | 60 |
| 4.3.4. Répartition spatiale de la variation d'écoulement total | 65 |
| 4.3.5. Impact sur la répartition mensuelle des débits | 68 |
| 5. Conclusions et perspectives..... | 75 |
| 6. Bibliographie..... | 79 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 – Chaîne de modélisation pour l'étude d'impact du changement climatique..... | 15 |
| Figure 2 - 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) | 17 |
| Figure 3 – Evolution du CO ₂ équivalent d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)..... | 18 |
| Figure 4 – 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) | 18 |
| Figure 5 - Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale. D'après Climatic Research Unit (CRU) University of East Anglia (UEA) | 19 |
| Figure 6 - Cascade des incertitudes pour une étude d'impact du changement climatique (Boé, 2007) 20 | |
| Figure 7 – Schéma de construction des 14 projections climatiques régionalisées retenues pour l'étude Ressource en eau des Vosges | 22 |
| Figure 8 - Socle vosgien, sous bassins versants associés et maillage SAFRAN sur la zone d'étude .. | 24 |
| Figure 9 – Précipitations moyennes interannuelles 1965-2019 en mm selon le maillage SAFRAN sur la zone d'étude..... | 27 |
| Figure 10 – Evapotranspiration potentielle moyenne interannuelle 1965-2019 en mm selon le maillage SAFRAN sur la zone d'étude | 27 |
| Figure 11 – Graphique de pourcentage de non dépassement pour les superficies des bassins versants modélisés | 28 |
| Figure 12 – Graphique de pourcentage de non dépassement pour les superficies des sous bassins versants modélisés | 28 |
| Figure 13 - Graphique de pourcentage de non dépassement pour le nombre d'années d'observations des sous bassins versants modélisés..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Figure 14 – Emprise du bassin versant de la Doller à Sewen (Lerchenmatt) sur le maillage SAFRAN.... | 31 |
| Figure 15 – Emprise du bassin versant de La Vologne à Cheniménil sur le maillage SAFRAN | 32 |
| Figure 16 - Coefficient de Nash sur les débits journaliers des sous bassins modélisés [sur la racine carrée du débit et sur le débit non transformé] | 34 |
| Figure 17 - Coefficient de Nash sur les débits journaliers des sous bassins modélisés [sur la racine carrée du débit, et sur le logarithme du débit] | 34 |
| Figure 18 – Comparaison des débits simulés et observés : débit moyen, débit mensuel minimal de l'année et débit mensuel maximal de l'année (1 point = 1 bassin modélisé) | 35 |
| Figure 19 - Biais de simulation (écart entre la moyenne simulée et la moyenne observée) pour les sous bassins modélisés..... | 35 |
| Figure 20 – Graphiques comparatifs des débits observés et simulés (échelle normale en haut et logarithmique en bas) [résultat des simulations avec le code de calcul ÉROS] pour la station hydrologique de la Fecht à Wihr-au-Val | 36 |
| Figure 21 – Graphiques comparatifs des débits observés et simulés (échelle normale en haut et logarithmique en bas) [résultat des simulations avec le code de calcul ÉROS] pour la station hydrologique du Giessen à Thanvillé..... | 37 |
| Figure 22 – Comparaison des coefficients de Nash pour les 37 bassins versants simulés | 38 |
| Figure 23 - Schéma de principe du module GARDENIA représentant un sous bassin versant | 39 |
| Figure 24 – Histogramme cumulé du bilan hydrologique sur les 37 bassins versants du socle vosgien .. | 41 |
| Figure 25 – Modélisation EROS sur le socle vosgien : Carte de localisation des sous bassins versants et des centroides utilisés pour l'interpolation | 43 |
| Figure 26 – Recharge annuelle en mm par sous bassin calculée sur la période de référence 1965-2019 | 44 |
| Figure 27 – Histogramme de la recharge annuelle simulée selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues. Comparaison des valeurs sur les périodes futures (horizon 2060 et 2100) et de référence..... | 46 |
| Figure 28 – Histogramme des variations entre la recharge future et la recharge sur la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues (en %) | 48 |
| Figure 29 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent ($VR > 0$) ou un déficit ($VR \leq 0$) de recharge. Comparaison par période et scénarios (graphiques) | 50 |
| Figure 30 – Histogramme des variations entre la recharge future à l'horizon 2060 et la recharge sur la période de référence selon 2 projections climatiques régionalisées extrêmes et pour chaque sous bassin versant | 52 |
| Figure 31 – Histogramme des variations entre la recharge future à l'horizon 2100 et la recharge sur la période de référence selon 2 projections climatiques régionalisées extrêmes et pour chaque sous bassin versant | 53 |
| Figure 32 - HORIZON 2060 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5..... | 55 |
| Figure 33 - HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5..... | 56 |
| Figure 34 – Histogramme de l'écoulement total annuel simulé selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues. Comparaison des valeurs sur les périodes futures (2021-2060 et 2061-2100) et la période de référence | 58 |
| Figure 35 - Histogramme des variations entre l'écoulement total futur et l'écoulement total sur la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues (en %) | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure 36 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent ($VET > 0$) ou un déficit ($VET \leq 0$) d'écoulement total. Comparaison par période et scénarios (graphiques) | 62 |
| Figure 37 – Histogramme des variations entre l'écoulement total sur la période future (2021-2060) et l'écoulement total sur la période de référence pour chaque sous bassin versant (2 projections extrêmes et moyennes des RCP 4.5 et 8.5) | 63 |
| Figure 38 – Histogramme des variations entre la l'écoulement total sur la période future (2061-2100) et l'écoulement total sur la période de référence pour chaque sous bassin versant (2 projections extrêmes et moyennes des RCP 4.5 et 8.5) | 64 |
| Figure 39 - HORIZON 2060 - Différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5..... | 66 |
| Figure 40 - HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5..... | 67 |
| Figure 41 - Répartition mensuelle des débits et des variations pour deux scénarios excédentaires [SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon et SC08_rcp85_CanESM2_dayon pour 37 BV du socle]..... | 69 |
| Figure 42 - Répartition mensuelle des débits et des variations pour deux scénarios déficitaires [SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon et SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim pour 37 BV du socle]..... | 70 |
| Figure 43 – Répartition mensuelle des débits et des variations [moyenne multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5 et tout bassins confondus] | 71 |
| Figure 44 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le mois de janvier pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios..... | 72 |
| Figure 45 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le mois de janvier pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios..... | 72 |
| Figure 46 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le mois de juillet pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios..... | 73 |
| Figure 47 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le mois de juillet pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios..... | 73 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 - Description des scénarios RCPs. D'après rapport GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013) et Ouzeau et al, 2014) | 17 |
| Tableau 2 – Liste des 37 stations hydrométriques retenues et principales caractéristiques (BDHYDRO) 26 | |
| Tableau 3 – Arbre de branchement simplifié des 37 sous bassins versants du socle | 30 |
| Tableau 4 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent ($VR > 0$) ou un déficit ($VR \leq 0$) de recharge. Comparaison par période et scénarios (tableau) | 49 |
| Tableau 5 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent ($VET > 0$) ou un déficit ($VET \leq 0$) d'écoulement total. Comparaison par période et scénarios (tableau) | 61 |

Liste des annexes

| | |
|--|-----|
| Annexe 1 : Cartographie de la différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 et 2061-2100 par rapport à la période de référence sur le socle vosgien..... | 83 |
| Annexe 2 : Cartographie de la différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2021-2060 et 2061-2100 par rapport à la période de référence sur le socle vosgien..... | 99 |
| Annexe 3 : Graphiques de répartition des débits mensuels simulés pour la période de référence et les périodes futures 2021-2060 et 2061-2100 pour chacun des 37 bassins versants du socle vosgien..... | 115 |

1. Contexte et objectifs

1.1. EVOLUTION DE LA RECHARGE EN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

En réponse aux engagements du Pacte de Paris sur l'eau et l'adaptation au changement climatique, des mesures vont devoir être prises à travers, par exemple, des Plans d'Adaptation au Changement Climatique.

Pour le dimensionnement de ces actions, il est nécessaire de partager des prévisions communes et définies à l'échelle d'un territoire qui peut être par exemple une masse d'eau souterraine ou un bassin versant.

La communauté scientifique s'accorde à dire que les changements climatiques vont affecter les processus hydrologiques dans tous les compartiments du cycle de l'eau. Concernant les eaux souterraines, c'est principalement les flux de recharge vers les nappes qui seront modifiés par l'évolution future du climat. L'augmentation de la température et donc de la demande évaporatoire de l'atmosphère couplées au maintien et à la diminution de la pluviométrie sont des variables projetées par les scénarios climatiques actuellement disponibles qui risquent de provoquer une diminution des flux de recharge vers les nappes.

Cela pourrait affecter de manière négative la ressource en eau disponible, à la fois pour les usages anthropiques et pour la contribution naturelle des eaux souterraines à l'alimentation des milieux aquatiques superficielles (cours d'eau, zones humides...). La connaissance de l'importance de ce déficit futur est cruciale pour anticiper les éventuels déséquilibres et difficultés à venir.

1.2. CARACTERISATION DE LA RECHARGE

La caractérisation de la recharge est un problème complexe dépendant de nombreux facteurs tels que les composantes climatiques (pluie, évapotranspiration, température, neige), les caractéristiques des sols (type, épaisseur, capacité de stockage en eau), la couverture végétale, les caractéristiques géomorphologiques (pente, rugosité) et les propriétés hydrodynamiques des formations souterraines aquifères.

Différentes méthodes existent pour caractériser la recharge. Cependant toutes n'ont pas la même efficacité en fonction du type d'aquifères considéré. De plus les données nécessaires pour pouvoir mettre en œuvre ces méthodes ne sont pas toujours disponibles sur l'ensemble du territoire ce qui peut limiter l'intérêt de leur utilisation ou rendre incertain les résultats obtenus.

Ainsi pour obtenir une vision cohérente des flux de recharge à l'échelle d'un bassin versant assorti d'une illustration de l'incertitude associée au choix des méthodes il est utile de tester le plus grand nombre possible de méthodes et de comparer leurs performances.

Le BRGM a mené récemment des travaux afin de recenser et d'évaluer les différentes méthodes d'évaluation de la recharge :

- 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 (ESPERE¹) 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 & 2021). 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).

Les trois grandes méthodes d'évaluation de la recharge dans ESPERE sont les suivantes :

- la méthode 1 qui analyse l'hydrogramme d'un cours d'eau pour déterminer la part de débit du cours d'eau qui provient de la nappe connectée au cours d'eau. Cette part que l'on appelle l'écoulement de base (base flow) peut être assimilée sous certaines conditions à la recharge (absence de prélèvements significatifs et d'écoulements différés non imputables aux eaux souterraines tels que fonte des neiges ou soutien d'étiage par un barrage) ;
- la méthode 2 qui s'appuie sur les chroniques météorologiques pour réaliser un bilan hydrologique et évaluer la pluie efficace qu'il s'agit ensuite de décomposer en ruissellement et infiltration, cette dernière composante correspondant à la recharge des nappes libres par les précipitations atmosphériques ;
- la méthode 3 qui analyse les fluctuations d'une chronique piézométrique (water table fluctuation WTF). Le cumul des élévations de niveau d'eau est proportionnel à la recharge et le coefficient de proportionnalité est donné par la porosité de drainage. Ce calcul intègre les apports latéraux ou sous-jacents (drainance d'une nappe profonde) et ne pourra donc être comparé à la recharge par les précipitations atmosphériques que dans les cas où ces apports sont négligeables devant la recharge pluviale.

¹ **ES**timati**o**n de la **Pl**uie **E**fficace et de la **RE**charge selon différentes méthodes (LANINI, et al., 2015) <https://www.brgm.fr/fr/logiciel/espere-estimation-pluie-efficace-recharge-selon-differentes-methodes>

Chacune de ces méthodes a été testée et appliquée dans le cadre de l'étude des ressources en eau (volet 1) des aquifères de socle du massif vosgien (Chabart et al., 2020), notamment via l'utilisation de l'outil ESPERE. La méthode 3 appliquée aux piézomètres de suivis localisés sur GERARDMER et XONRUPT n'a pas donné de résultats intéressants et a été écartée.

1.3. MODELISATION SEMI-GLOBALE

Le logiciel ÉROS (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins), développé par le BRGM, sert à la modélisation hydrologique par bilan de bassins versants hétérogènes découpés en sous bassins. A partir de chroniques des paramètres 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 va permettre de simuler 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.

2. Choix des scénarios 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 1) :

- le choix des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre (GES) appelés profils représentatifs d'évolution de concentration ou RCPs ;
- la modélisation du climat à l'échelle du globe à partir de ces scénarios ;
- la régionalisation des variables climatiques modélisées ou descente d'échelle ;
- la modélisation hydrogéologique à partir des projections climatiques régionalisées.

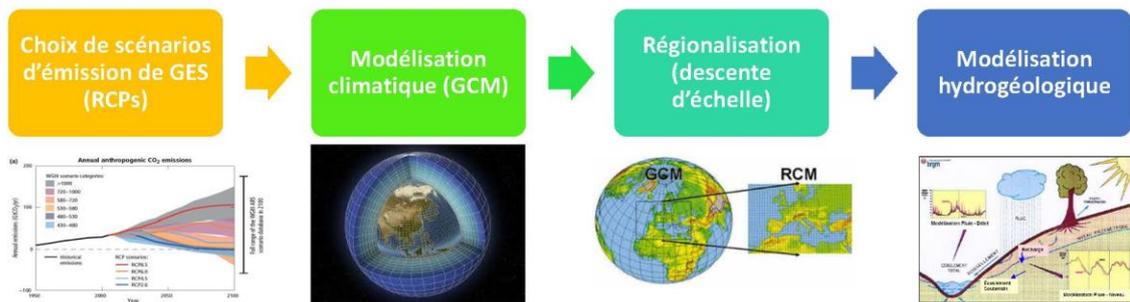


Figure 1 – Chaîne de modélisation pour l'étude d'impact du changement climatique

2.1. SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DES GAZ A EFFET DE SERRE OU PROFILS RCP (« REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS »)

Les modèles du système climatique sont utilisés conjointement avec des études démographiques et économiques par le Groupe Intergouvernemental des Experts sur le Climat (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. 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.

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 SRES² 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 radiatif**³ 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/m² (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/m²) 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°C (plage probable entre 0.3 et 1.7°C) d'ici 2100 (Van Vuuren et al., 2011) ;
- 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 décroissent avant 2100. Ce scénario intègre les effets de politiques de réduction des émissions susceptibles 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 2) ;
- concentration en CO₂ éq-CO₂ (cf. évolution jusqu'en 2300 - Figure 3) ;
- anomalie de température de l'air en surface (cf. évolution jusqu'en 2300 - Figure 4).

² Second Report on Emission Scenario

³ 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.

| 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 CO2 éq-CO2 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)

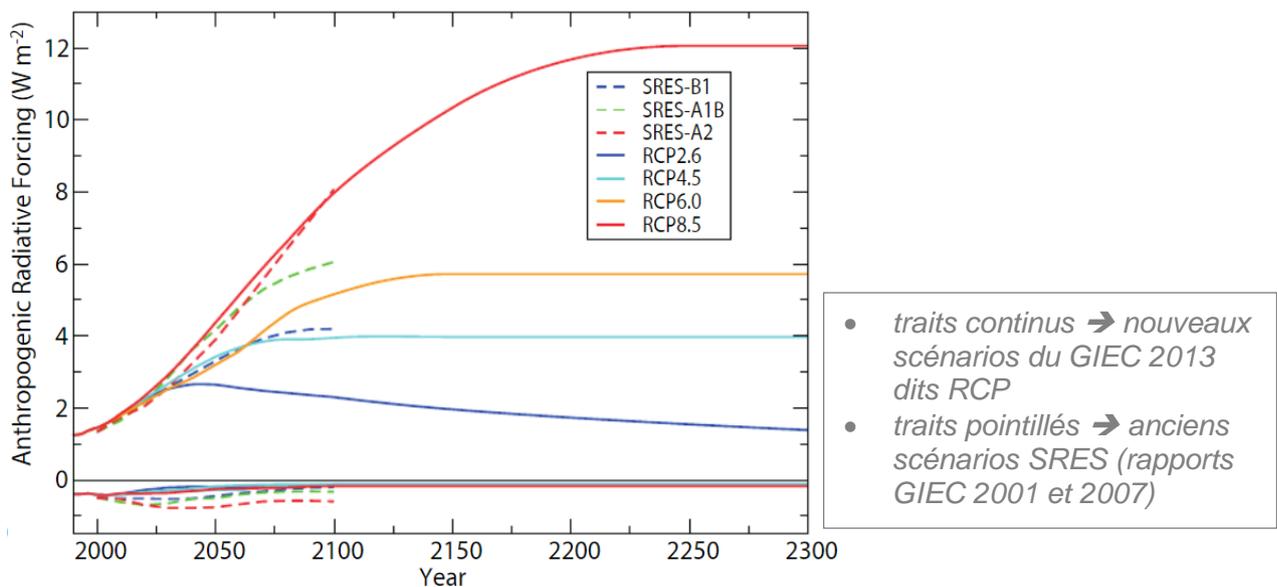


Figure 2 - Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m² sur la période 2000-2300 selon les différents scénarios. D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

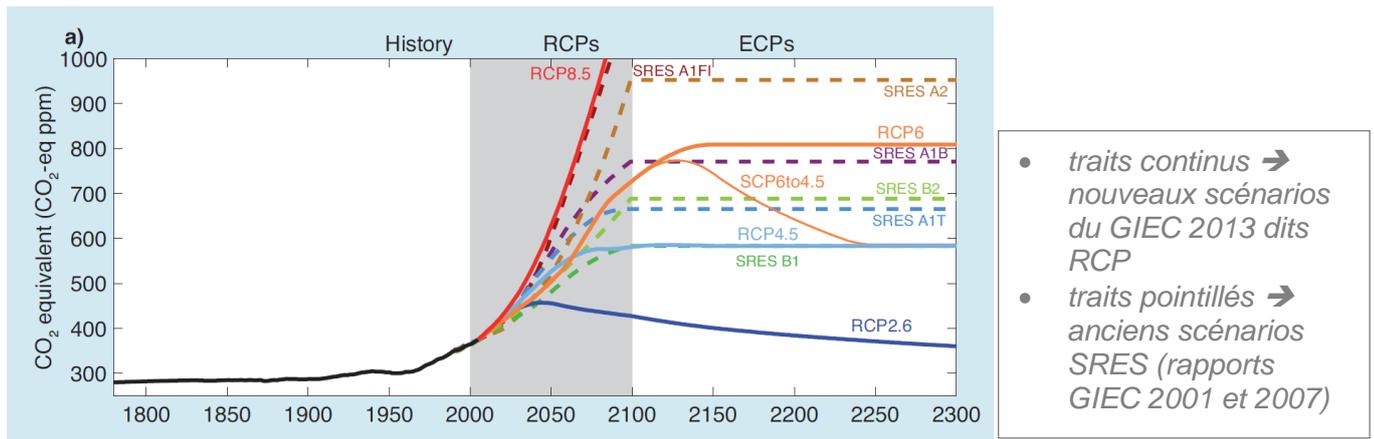


Figure 3 – Evolution du CO₂ équivalent d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs.
D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

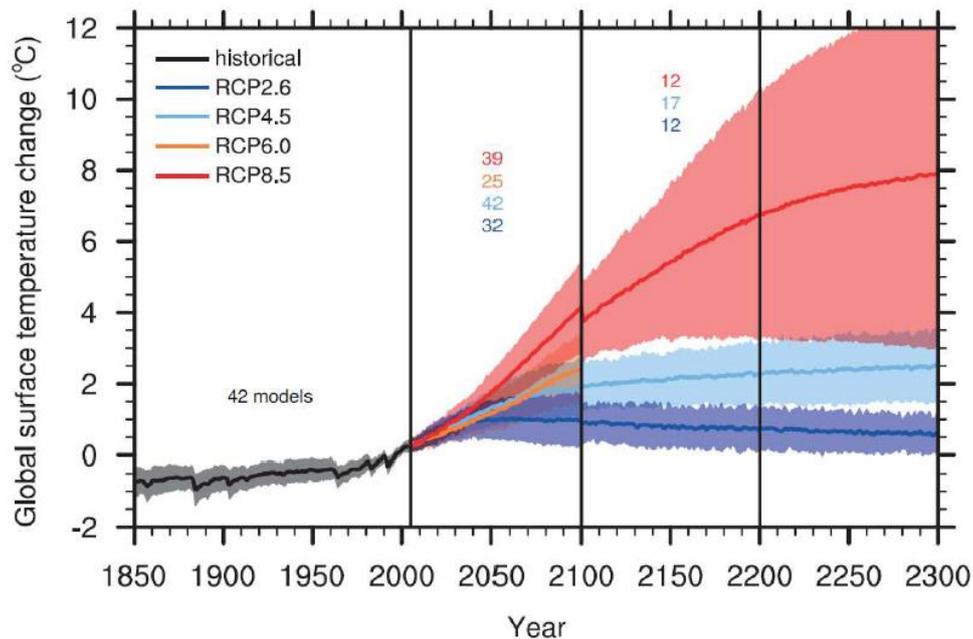


Figure 4 – Evolution de l'anomalie de température de l'air en surface d'ici 2300 selon les 4 profils RCPs.
D'après GIEC, WG1AR5 (IPPC, 2013)

2.2. 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 5).

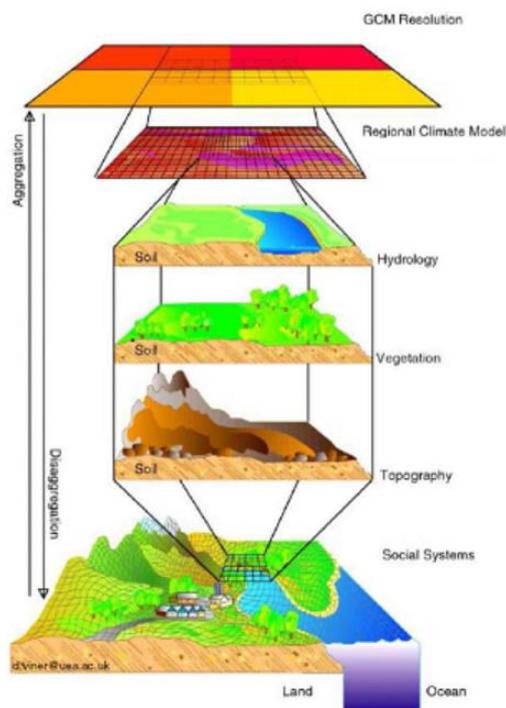


Figure 5 - Représentation conceptuelle de la désagrégation spatiale.
D'après Climatic Research Unit (CRU) University of East Anglia (UEA)

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, simulés par **plusieurs modèles** et pour **différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre**, dont les 4 scénarios RCP issus 5^{ème} rapport du GIEC.

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 6).

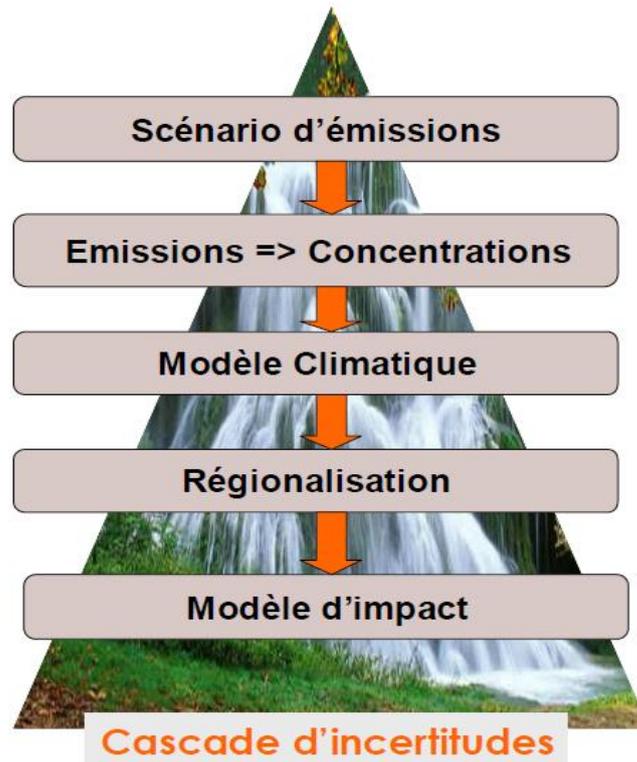


Figure 6 - Cascade des incertitudes pour une étude d'impact du changement climatique (Boé, 2007)

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 RCPs. Ces simulations d'ensemble permettent ensuite d'apprécier la dispersion des modèles autour de la moyenne d'ensemble.

2.4. PROJECTIONS CLIMATIQUES REGIONALISEES UTILISEES POUR LE SOCLE VOSGIEN

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 (<http://www.drias-climat.fr/>).

14 projections climatiques régionalisées ont été retenues, dont la construction repose sur la combinaison (Figure 7) de :

- 2 scénarios d'émission **RCP 4.5** et **RCP 8.5** (cf. § 2.1) ;
- 2 méthodes de régionalisation statistiques « **DAYON** » et « **DSCLIM** » :
 - la première est issue de Dayon et al. (2015) et se base sur la méthode des analogues (Zorita et al., 1995). La méthode des analogues consiste à associer une situation météorologique prévue à des situations passées sensiblement similaires dont la variabilité spatiale est connue ;
 - la deuxième méthode nommée « DSCLim » est une combinaison d'approche par types de temps et de méthode des analogues (Boé et al., 2008 ; Boé et al., 2009 ; Pagé et al., 2009). L'approche en types de temps permet d'identifier les liens statistiques entre la circulation atmosphérique de grande échelle et la précipitation observée sur le territoire d'intérêt.
- 4 modèles climatiques :
 - le « **Beijing Climate Center Climate System Model** » ou **BCC_CSM1.1**⁴ est développé au Beijing Climate Center (BCC), China Meteorological Administration (CMA). Il s'agit d'un modèle global climat-carbone entièrement couplé comprenant la végétation interactive et le cycle mondial du carbone, dans lequel la composante atmosphérique, la composante océanique, la composante terrestre et la composante glace de mer sont entièrement couplés et interagissent les uns avec les autres par le biais de flux d'élan, d'énergie, d'eau et de carbone à leurs interfaces ;
 - le « **Canadian Earth System Model** » ou système terrestre canadien de deuxième génération **CanESM2**⁵ se compose du modèle physique couplé atmosphère-océan couplé à un modèle de carbone terrestre et à un modèle de carbone océanique ;
 - le « **Norwegian Earth System Model** » ou **NorESM1-M**⁶ 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 ;

⁴ <http://forecast.bcccsn.ncc-cma.net/web/channel-43.htm>

⁵ <https://www.ec.gc.ca/ccmac-ccma/default.asp?lang=En&n=1A3B7DF1-1&wbdisable=true>

⁶ <https://www.noresm.org/>

- le « **Institut Pierre Simon Laplace Climate Model** » ou **IPSL-CM5A-MR**⁷ 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.

Les projections climatiques régionalisées pour le scénario RCP 4.5 sont disponibles pour 3 modèles climatiques : BCC-CSM1.1, CanESM2 et NorESM1-M.

Les projections climatiques régionalisées pour le scénario RCP 8.5 sont disponibles pour 4 modèles climatiques : BCC-CSM1.1, CanESM2, NorESM1-M et IPSL-CM5A-MR (Institut Pierre Simon Laplace Climate Model).

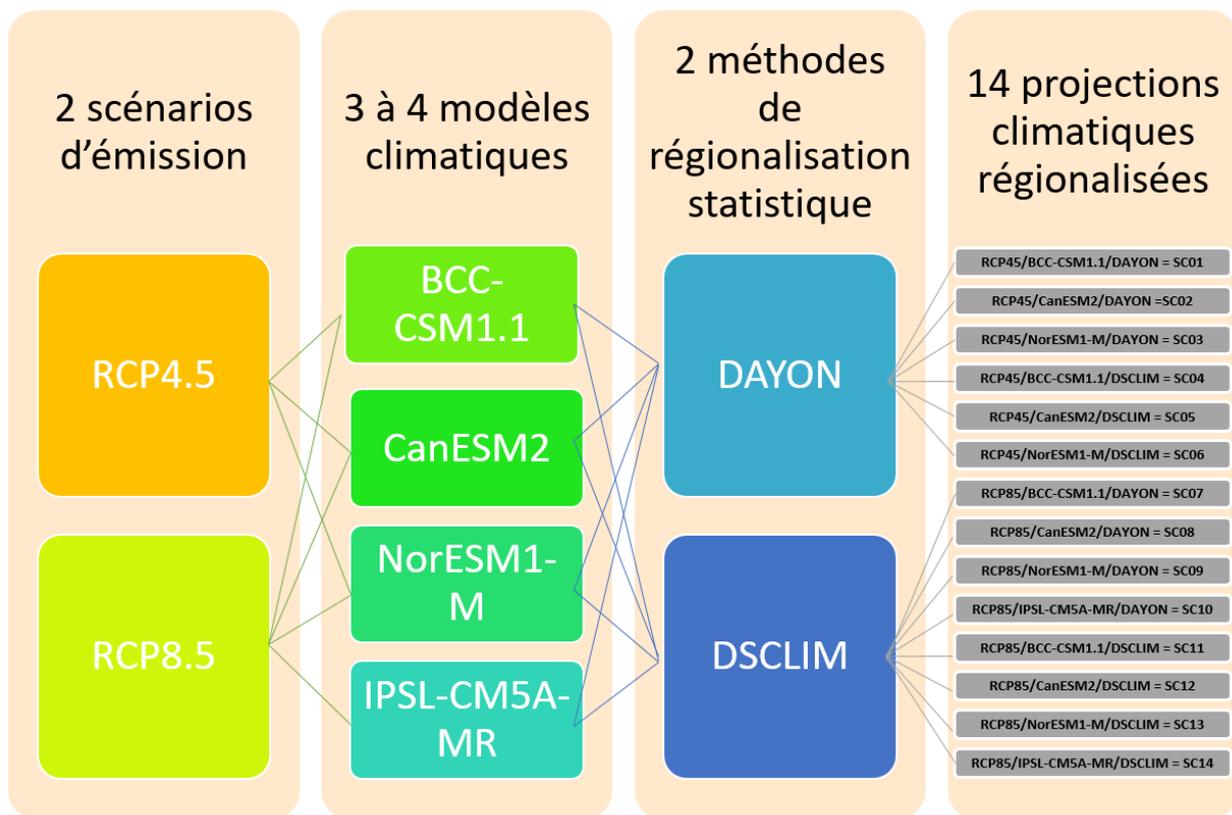


Figure 7 – Schéma de construction des 14 projections climatiques régionalisées retenues pour l'étude Ressource en eau des Vosges

Chacune de 14 projections climatiques régionalisées retenues contient l'évolution journalière des précipitations liquides, de la neige, de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) et de la température de l'air sur la période du 01/01/1979 au 31/12/2100. La période historique pour laquelle les modèles de climat utilisent des forçages radiatifs observés s'étale de 1979 à 2005. Les modèles sont ensuite forcés par les scénarios RCPs prospectifs jusqu'en 2100. Ces projections sont disponibles sur une grille de résolution 8 km à l'échelle de la zone d'étude.

⁷ <http://cmc.ipsl.fr/international-projects/cmip5/>

3. Mise en oeuvre des modélisations semi-globales avec EROS

3.1. 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 (comblement 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.

3.2. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION SUR LE SOCLE VOSGIEN

Le socle vosgien (superficie de 3 525 km²) a été découpé en 37 sous bassins disposant tous en aval d'une station hydrométrique avec chronique de débits exploitable de préférence sans lacune⁸ (Figure 8). La période de modélisation est formée de 55 années entre le 01/01/1965 et le 31/12/2019. L'année 2020 est incomplète en ce qui concerne les données climatiques et ne peut, à ce stade, être retenue pour la modélisation.

Sur cette période, on dispose donc (Tableau 2, Figure 8, Figure 9, Figure 10) :

- des débits journaliers des 37 stations hydrométriques provenant de la [banque HYDRO](#) ;
- 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. L'acquisition des données climatiques par le BRGM a fait l'objet de conventions de mise à disposition à titre gratuit⁹ en 2018 et 2021.

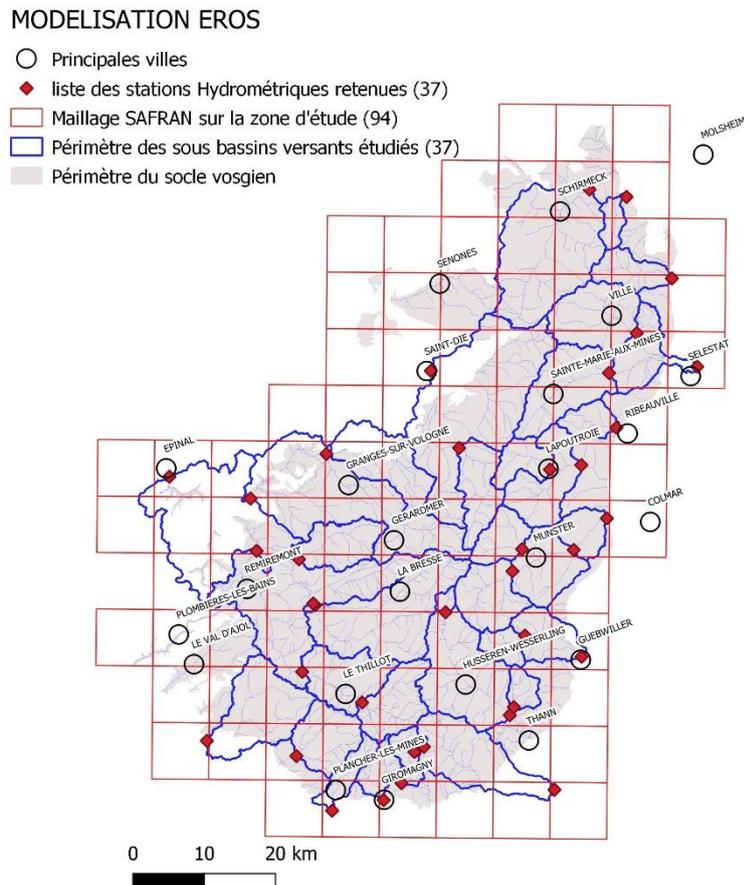


Figure 8 - Socle vosgien, sous bassins versants associés et maillage SAFRAN sur la zone d'étude

⁸ Les lacunes, qui doivent néanmoins restées exceptionnelles, peuvent être prise en compte par l'association d'un code spécifique indiquant l'absence de valeur et permettant la mise en œuvre des simulations.

⁹ Demande ponctuelle d'informations météorologiques dans le cadre de travaux pour l'enseignement ou la recherche.

| CODE STATION | LIBELLE STATION | XL93 | YL93 | DEPT | PERIODE | SURFACE BV KM2 | CONSTANTE DE RECESSION (POSAVEC) | DEBIT MOY M3/S | DEBIT SPECIFIQUE MOY L/S/KM2 | QMNA5 M3/S | VCN3 M3/S |
|--------------|---|---------|---------|------|---|----------------|----------------------------------|----------------|------------------------------|------------|-----------|
| A1202030 | La Doller à Sewen [Village] | 992358 | 6752380 | 68 | 1959-1999 (avec lacunes) | 21.2 | 0.8033 | 1.05 | 49.7 | 0,100 | 0,057 |
| A1202050 | La Doller à Sewen [Lerchenmatt] | 991035 | 6751648 | 68 | 1991-2020 (avec lacunes) 2008-2020 (sans lacune) | 8.5 | 0.8637 | 0.423 | 49.8 | 0,027 | 0,014 |
| A1242010 | La Doller a Burnhaupt-le-Haut [Pont d'Aspach] | 1010693 | 6746306 | 68 | 2007-2020 (sans lacune) | 143 | 0.8786 | 4.18 | 29.2 | 0.19 | 0.12 |
| A1402020 | La Thur à Wildenstein | 995398 | 6771431 | 68 | 1992-2020 (avec lacunes) 2004-2020 (sans lacune) | 7.6 | 0.7466 | 0.365 | 48.1 | 0,040 | 0,021 |
| A1432010 | La Thur à Willer-sur-Thur | 1004411 | 6756861 | 68 | 1998-2020 (sans lacune) | 159 | 0.8991 | 5.11 | 32.1 | 1,000 | 0,700 |
| A1436910 | Le Wissbach à Willer-sur-Thur | 1004986 | 6758006 | 68 | 1979-2001 (avec lacunes) | 21 | 0.8796 | 0.377 | 18 | 0,025 | 0,010 |
| A1502040 | La Lauch à Linthal [Saegmatten 2] | 1006556 | 6768117 | 68 | 1992-2020 (avec lacunes) 2006-2020 (sans lacune) | 28.3 | 0.8671 | 0.86 | 30.4 | 0,180 | 0,140 |
| A1522020 | La Lauch à Guebwiller | 1014510 | 6765133 | 68 | 1992-2020 (avec lacunes) 1998-2020 (sans lacune) | 68 | 0.9141 | 1.6 | 23.5 | 0,190 | 0,120 |
| A2012020 | La Fecht à Muhlbach-sur-Munster | 1004799 | 6777234 | 68 | 1986-2020 (avec lacunes) 2008-2020 (sans lacune) | 74 | 0.9112 | 2.7 | 36.5 | 0,350 | 0,240 |
| A2023030 | La Petite Fecht à Stosswihr [Village] | 1006144 | 6780352 | 68 | 1986-2020 (sans lacune) | 45.8 | 0.9019 | 1.36 | 29.8 | 0,250 | 0,180 |
| A2030100 | La Fecht a Wihr-au-Val [rue de la Fecht] | 1013397 | 6780260 | 68 | 2007-2020 (sans lacune) | 195 | 0.9403 | 4.17 | 21.4 | 0.29 | 0.15 |
| A2040100 | La Fecht à Turckheim | 1018059 | 6784718 | 68 | 1993-2020 (avec lacunes) 2003-2020 (sans lacune) | 231 | 0.9301 | 4.3 | 18.6 | 0,370 | 0,200 |
| A2073010 | Le Strengbach à Ribeauvillé | 1019404 | 6797553 | 68 | 1971-2003 (avec lacune) | 31.7 | 0.8887 | 0.371 | 11.7 | 0,071 | 0,050 |
| A2113010 | La Béhine à Lapoutroie | 1010058 | 6791616 | 68 | 1983-2018 (avec lacunes) 1997-2020 (sans lacune) | 38.4 | 0.8741 | 0.973 | 25.3 | 0,190 | 0,130 |
| A2120200 | La Weiss à Kaysersberg [rue de la Râperie] | 1014467 | 6792265 | 68 | 2007-2020 (sans lacune) | 120 | 0.8758 | 2.15 | 17.9 | 0,490 | 0,350 |
| A2312020 | Le Giessen à Thanvillé | 1022248 | 6810938 | 67 | 1984-2020 (sans lacune) | 99 | 0.8856 | 1.43 | 14.4 | 0,110 | 0,038 |
| A2332110 | La Lièpvrette à Lièpvre | 1018353 | 6805297 | 68 | 1977-2020 (sans lacune) | 108 | 0.8903 | 1.81 | 16.8 | 0,240 | 0,140 |
| A2352021 | Le Giessen a Selestat [annonce des crues] | 1030740 | 6806198 | 67 | 2007-2020 (sans lacune) | 260 | 0.8785 | 3.26 | 12.5 | 0.13 | 0.012 |

Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges

| CODE STATION | LIBELLE STATION | XL93 | YL93 | DEPT | PERIODE | SURFACE BV KM2 | CONSTANTE DE RECESSION (POSAVEC) | DEBIT MOY M3/S | DEBIT SPECIFIQUE MOY L/S/KM2 | QMNA5 M3/S | VCN3 M3/S |
|--------------|--|---------|---------|------|---|----------------|----------------------------------|----------------|------------------------------|------------|-----------|
| A2512010 | L'Andlau à Andlau | 1027187 | 6818681 | 67 | 1974-2020 (sans lacune) | 41.8 | 0.8716 | 0.777 | 18.6 | 0,180 | 0,110 |
| A2732010 | La Bruche à Russ [Wisches] | 1015610 | 6831268 | 67 | 1971-2017 (avec lacunes) 1972-2015 (sans lacune) | 228 | 0.8855 | 5.91 | 25.8 | 1,300 | 0,960 |
| A2750710 | Le ruisseau de Baschney à Grendelbruch | 1020816 | 6830211 | 67 | 1976-1983 (sans lacune) | 2.7 | 0.9047 | | | | |
| A4020610 | La Moselle à Fresse-sur-Moselle | 983676 | 6758655 | 88 | 1972-2018 (avec lacunes) 2012-2020 (sans lacune) | 71 | 0.8892 | 3.24 | 45.7 | 0,240 | 0,160 |
| A4050620 | La Moselle à Rupt-sur-Moselle | 975264 | 6762992 | 88 | 1968-2020 (avec lacune) 2009-2020 (sans lacune) | 152 | 0.9187 | 6.68 | 43.9 | 0,570 | 0,370 |
| A4140202 | La Moselotte à Vagney [zainvillers] | 977065 | 6772410 | 88 | 2006-2020 (sans lacune) | 184 | 0.9236 | 8.24 | 44.8 | 0,900 | 0,440 |
| A4142010 | La Moselotte à Vagney [ancienne] | 976815 | 6772661 | 88 | 1967-2006 (avec lacunes) | 187 | 0.9295 | 8.54 | 45.7 | 1,100 | 0,460 |
| A4173010 | La Cleurie à Cleurie | 974817 | 6778924 | 88 | 1970-2020 (avec lacunes) 2008-2020 (sans lacune) | 63 | 0.8251 | 2.32 | 36.7 | 0,450 | 0,320 |
| A4200630 | La Moselle à Saint-Nabord [Noirgueux] | 968855 | 6780117 | 88 | 1962-2020 (sans lacune) | 626 | 0.9326 | 24 | 38.4 | 2,100 | 1,100 |
| A4250640 | La Moselle à Épinal | 956614 | 6790628 | 88 | 1968-2020 (sans lacune) | 1217 | 0.9109 | 37.8 | 31.1 | 5,500 | 3,700 |
| A4333010 | Le Neuné à Laveline-devant-Bruyères | 978657 | 6793834 | 88 | 1986-2020 (avec lacunes) 2009-2020 (sans lacune) | 96 | 0.8632 | 2.08 | 21.7 | 0,380 | 0,240 |
| A4362030 | La Vologne à Cheniménil | 968003 | 6787526 | 88 | 1989-2020 (sans lacune) | 355 | 0.9177 | 9.45 | 26.6 | 1,600 | 1,100 |
| A6001010 | La Meurthe à Fraize | 997303 | 6794683 | 88 | 1971-2020 (avec lacunes) 2009-2020 (sans lacune) | 67 | 0.9158 | 1.97 | 29.3 | 0,500 | 0,330 |
| A6051020 | La Meurthe à Saint-Dié | 993340 | 6805597 | 88 | 1968-2020 (sans lacune) | 374 | 0.9147 | 7.68 | 20.5 | 1,500 | 1,100 |
| U0415010 | Le Breuchin à la Proiselière-et-Langle | 961876 | 6753242 | 70 | 1967-2018 (avec lacunes) 2013-2020 (sans lacune) | 123 | 0.8929 | 4.34 | 35.3 | 0,530 | 0,340 |
| U1004010 | L'Ognon à Servance [Fourguenons] | 974449 | 6751079 | 70 | 1968-2018 (avec lacunes) 1986-2020 (sans lacune) | 73.5 | 0.9048 | 3.1 | 42.2 | 0,230 | 0,150 |
| U1025010 | Le Rahin à Plancher-Bas | 979469 | 6743359 | 70 | 1968-2018 (sans lacune) | 33 | 0.8933 | 1.64 | 49.7 | 0,100 | 0,039 |
| U2345020 | La Savoureuse à Giromagny | 986707 | 6744850 | 90 | 1981-2020 (sans lacune) | 30.5 | 0.9126 | 1.44 | 47.1 | 0,073 | 0,034 |
| U2345810 | La Rosemontoise à Rievrescémont [Rosemont] | 989211 | 6747243 | 90 | 1968-1994 (avec lacunes) | 7.5 | 0.8782 | 0.343 | 45.8 | 0,020 | 0,009 |

Tableau 2 – Liste des 37 stations hydrométriques retenues et principales caractéristiques ([BDHYDRO](#))

PRECIPITATIONS

SAFRAN_PLUIE_1965-2019 en mm

- 644 - 800
- 800 - 1000
- 1000 - 1200
- 1200 - 1400
- 1400 - 1600
- 1600 - 1800
- 1800 - 1865
- Périmètre du socle vosgien
- Principales villes

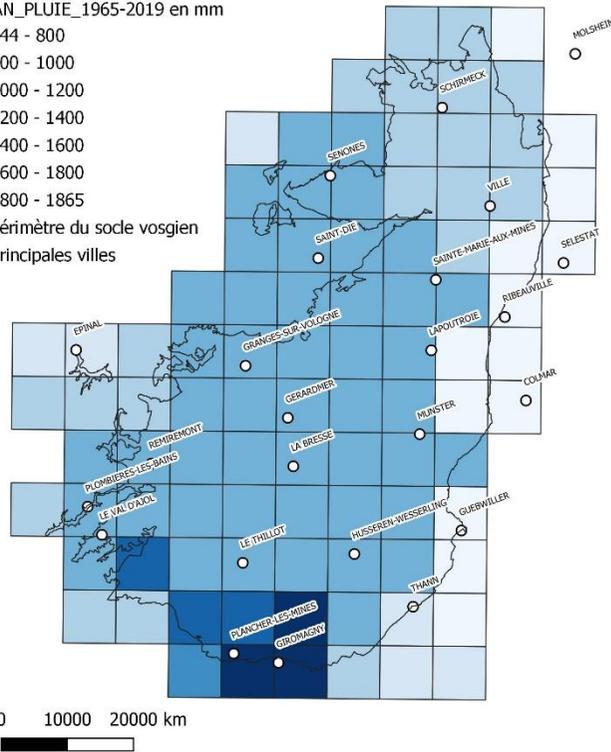


Figure 9 – Précipitations moyennes interannuelles 1965-2019 en mm selon le maillage SAFRAN sur la zone d'étude

ETP

SAFRAN_ETP_1965-2019 en mm

- 612,6 - 620,0
- 620,0 - 640,0
- 640,0 - 660,0
- 660,0 - 680,0
- 680,0 - 700,0
- 700,0 - 712,2
- Périmètre du socle vosgien
- Principales villes

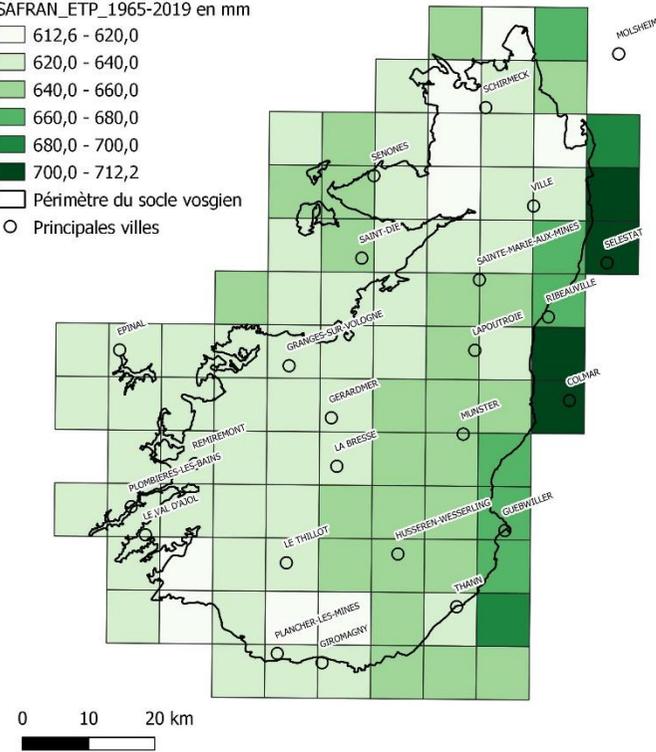


Figure 10 – Evapotranspiration potentielle moyenne interannuelle 1965-2019 en mm selon le maillage SAFRAN sur la zone d'étude

On notera sur les figures précédentes (Figure 9, Figure 10), le gradient qui existe sur le massif vosgien du nord-est au sud-ouest et qui permet de distinguer :

- un versant Alsacien au nord-est avec des précipitations plus faibles et une évapotranspiration importante ;
- un versant lorrain et franc-comtois avec des précipitations plus importantes et une évapotranspiration plus faible.

Les superficies cumulées, relatives aux données de débits aux stations de mesure varient de 2.7 km² à 1217 km² avec une valeur médiane de 74 km² (Figure 11).

Les superficies des sous bassins correspondant varient de 2.7 km² à 307 km². La superficie médiane est égale à 67 km². Le graphique de pourcentage de non-dépassement (Figure 12) montre que 75 % des bassins ne dépassent pas la superficie de 100 km².

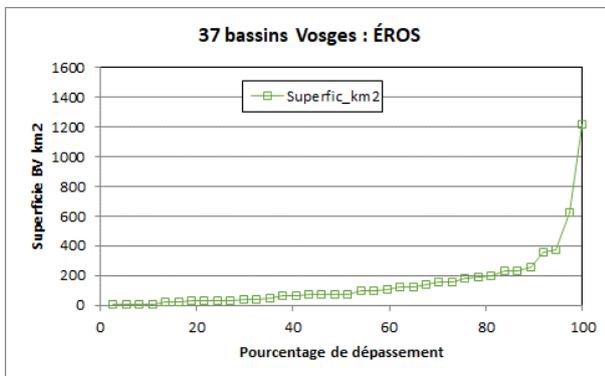


Figure 11 – Graphique de pourcentage de non dépassement pour les superficies des bassins versants modélisés

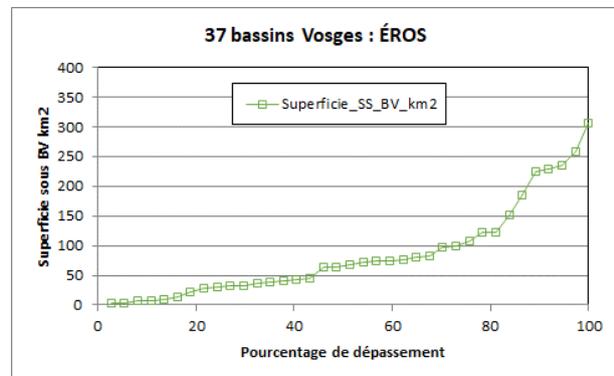


Figure 12 – Graphique de pourcentage de non dépassement pour les superficies des sous bassins versants modélisés

L'**initialisation** du modèle EROS est effectuée sur les 8 premières années (1965-1973) et la **calibration** sur les 47 années de la période suivant l'initialisation, soit de 1973 à fin 2019.

La médiane du nombre d'années d'observations sur les stations hydrométriques est de 30 ans. 80 % des bassins versants ont une période d'observation supérieure à 20 ans (Figure 13).

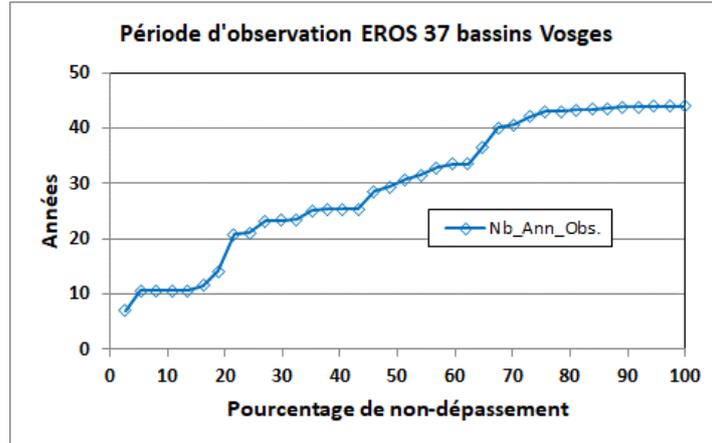


Figure 13 - Graphique de pourcentage de non dépassement pour le nombre d'années d'observations des sous bassins versants modélisés

3.3. LES FICHIERS DE DONNEES

3.3.1. Le fichier « Arbre de branchement » des 37 sous bassins :

Ce fichier, unique pour l'ensemble des sous bassins, d'extension de fichier [.arbros], décrit les interactions entre les sous bassins et les séries de données disponibles.

Les 37 sous bassins, de numéro d'ordre 1 à 37 (Tableau 3) ont un numéro d'identificateur identique de 1 à 37. Pour chaque bassin on a indiqué le numéro identificateur du sous bassin aval. Il y a des observations de débit (indice « 1 ») pour les 37 bassins, et pas d'observations de niveaux piézométriques (indice « 0 ») ni de débits d'Injection/Prélèvement (indice « 0 » pour tous les bassins).

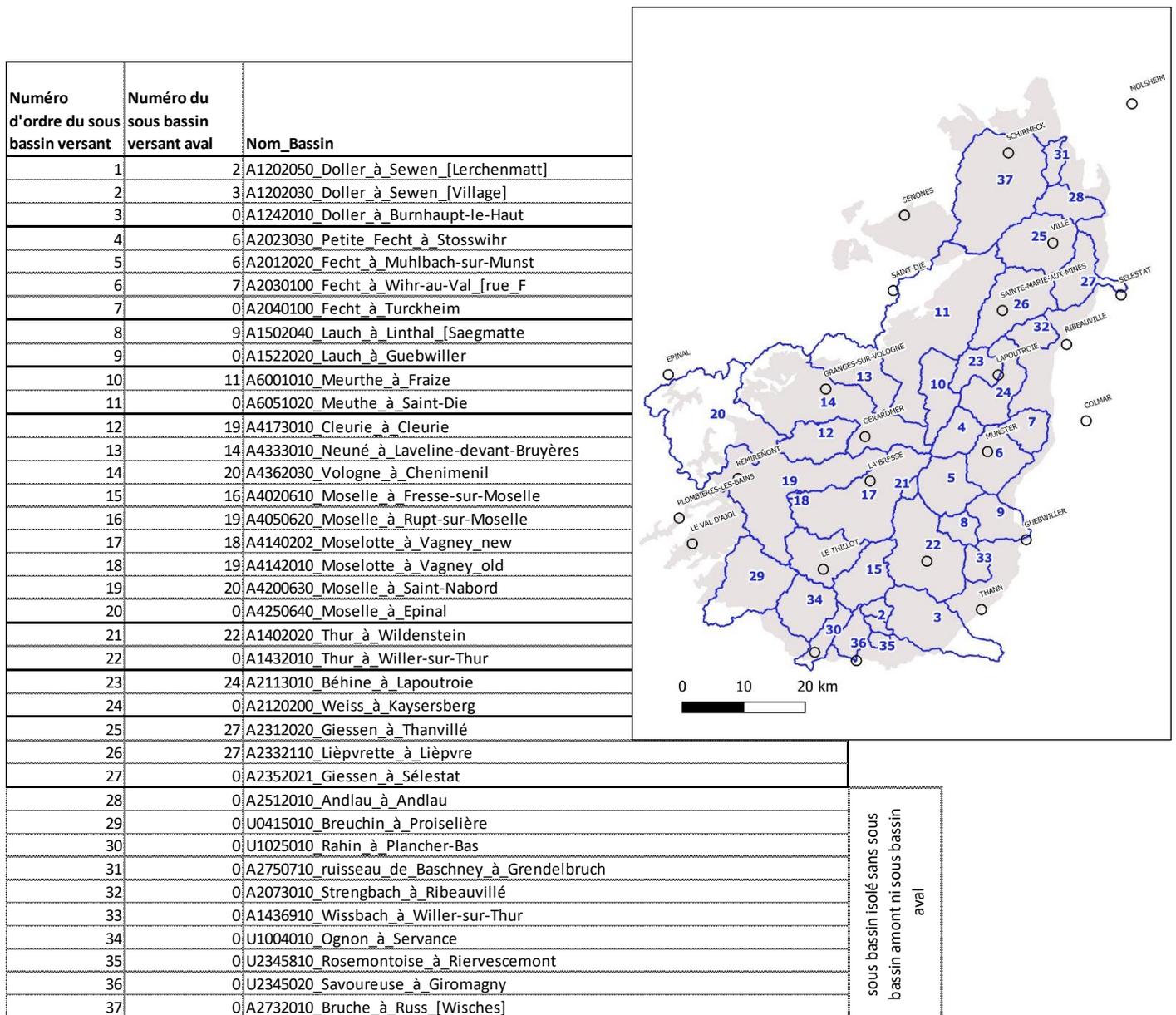


Tableau 3 – Arbre de branchement simplifié des 37 sous bassins versants du socle

3.3.2. Le fichier des débits journaliers

La période de simulation du 01/01/1965 au 31/12/2019 comprend 20088 jours. Le fichier contient donc : une ligne titre (avec les noms des exutoires des sous bassins) suivie de 20088 lignes de 38 colonnes. Les 38 valeurs de chaque ligne sont : la date au format jj/mm/aaaa dans la colonne n°1, et les valeurs de débits (en m³/s) des 37 bassins pour cette date dans les colonnes n°2 à n°38. Les valeurs des débits absents (lacunes de données) ont la valeur « -2 ».

3.3.3. Le fichier des mailles météorologiques et des pondérations

Ce fichier unique indique, pour chacun des 37 sous bassins, les pondérations à affecter aux différentes mailles SAFRAN couvrant le sous bassin (94 mailles au total) au prorata de la superficie.

Les mailles ont été déterminées à partir des contours des sous bassins versants. Par exemple, le sous bassin de la Doller à Sewen-Lerchenmatt n°1 (8.5 km²) est concerné par 1 seule maille SAFRAN (Figure 14). En revanche, le sous bassin de la Vologne à Cheniménil n°14 (355 km²) est concerné par 15 mailles SAFRAN (Figure 15). Les numéros des mailles SAFRAN correspondent aux fichiers communiqués par météo-France.

3.3.4. Le fichier des données météorologiques

On dispose des données météorologiques journalières SAFRAN de Météo-France, sous la forme de 4 fichiers (1 par paramètre : Pluie, Précipitations neigeuses, ETP et Température de l'air). Chaque fichier contient une ligne titre (avec le nom des colonnes) suivie de 2088 lignes de 95 colonnes. Les 95 valeurs de chaque ligne sont : dans la colonne n°1 la date au format jj/mm/aaaa et dans les colonnes n°2 à 95, la valeur du paramètre climatique (en mm/jour) des 94 mailles de 8 km de côté couvrant le socle vosgien.

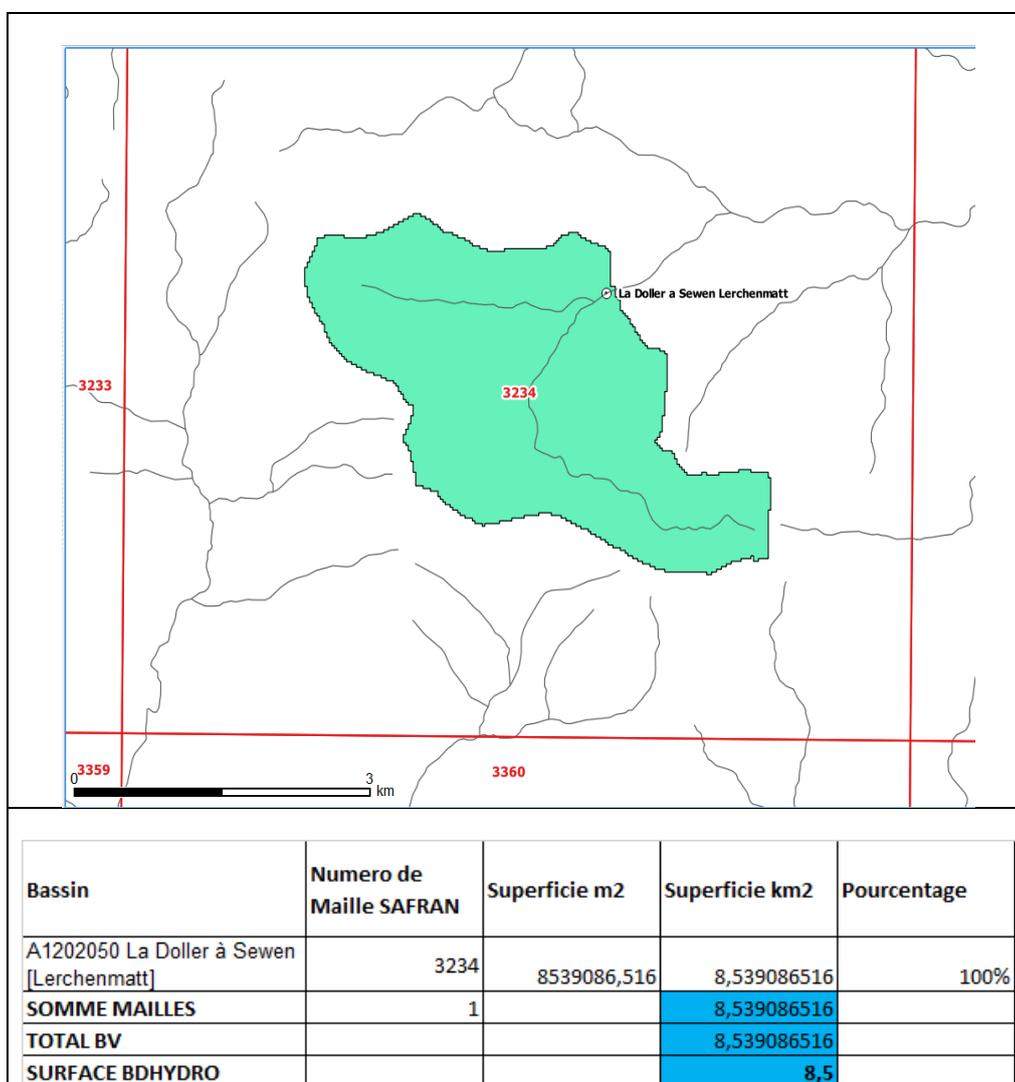


Figure 14 – Emprise du bassin versant de la Doller à Sewen (Lerchenmatt) sur le maillage SAFRAN

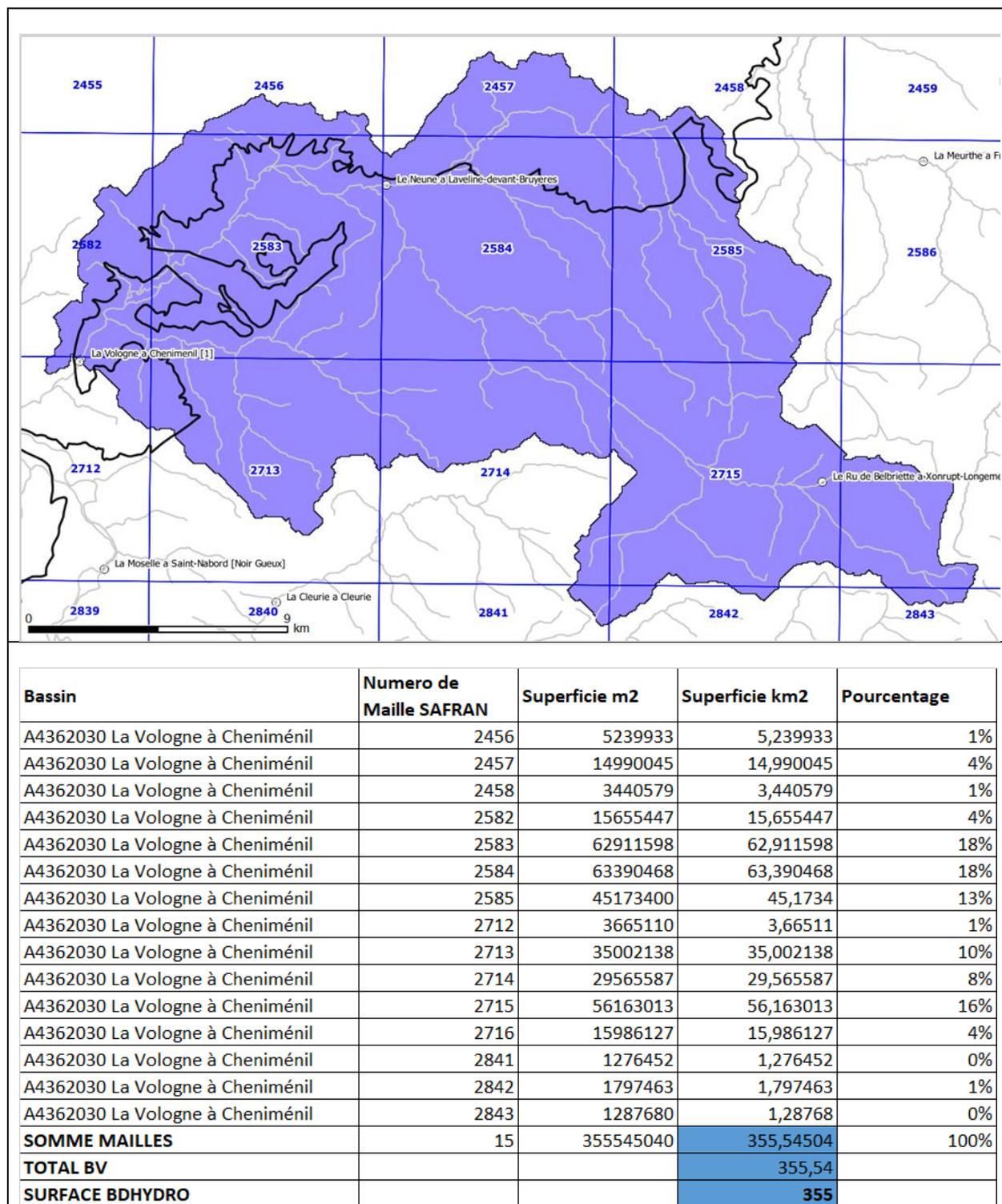


Figure 15 – Emprise du bassin versant de La Vologne à Cheniménil sur le maillage SAFRAN

3.4. LES OPTIONS CHOISIES POUR LA MODELISATION

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 initiale, relative à la vulnérabilité des formations de socle à la sécheresse (cf. résultats de l'étude volet 1 – Chabart et al., 2020).

3.4.1. Options générales

Les principales **options générales** sont les suivantes (les autres sont les valeurs par défaut, c'est-à-dire « 0 ») :

- 55=Nombre d'années des séries temporelles
- 0 = Données par années hydrologiques (0=années civiles)
- 1965=Date de la première année des données (par ex. 2015)
- 8 = Nombre d'années de démarrage
- 1 = Observations de Débits de rivière : (1 = Oui, Importance = 1)
- 0 = Pas de temps des données temporelles (0 = Journalier)
- 1 = Prise en compte de la Neige (1 = Oui)
- 1 = Précipitations neigeuses dans un fichier propre (1 = Neige dans un fichier séparée)
- 1 = Sauvegarde des Débits/Niveaux Simulés-Observés (1=Oui, pour graphiques ultérieurs)
- 1 = Génération d'un listing (1 = oui)
- 97 = Pondération pour la calibration (c'est à dire la minimisation des écarts sur le logarithme des débits plus adapté pour rendre compte des étiages en domaine de socle)
- 0 = Minimisation du biais sur les Débits de Rivière (0 = Pas de minimisation du biais)
- 4000 = Nombre total de simulations (itérations) pour la calibration des paramètres
- 0 = Méthode de calcul : (0 = Méthode par défaut par ordre de Strahler)
- 2 = Météo (Pluie, ETP, ...) pondérée à chaque pas [2 = oui ; chaque colonne correspond à une maille météo]

Option hydroclimatique pour chaque sous bassin :

- 0 = Nombre de réservoirs souterrains (0 => Par défaut : un seul réservoir souterrain)

3.4.2. Paramètres hydroclimatiques à calibrer

Les paramètres dont la valeur a été fixée sont les suivants :

- superficie du sous bassin versant (valeur différente pour chaque sous bassin) ;
- pluie efficace moyenne annuelle pour initialisation = 250 mm/an ;
- taux de rétention de la neige = 5 %.

Les paramètres hydroclimatiques qui ont été calibrés pour chaque sous bassin sont les suivants :

- correction globale de l'ETP (même valeur pour tous les sous bassins) ;
- capacité du réservoir sol progressif (même valeur pour tous les sous bassins) ;
- hauteur de répartition Ruissellement-Percolation ;
- temps de ½ percolation vers la nappe ;
- temps de ½ tarissement du réservoir souterrain (n°1) ;
- temps de réaction (« retard ») du débit ;

- facteur d'échange souterrain externe ;
- temps de propagation du débit => Bassin aval.

Pour la fonte de la neige :

- constante de fonte par la température (« Degré-Jour ») ;
- fonte de la neige au contact du sol.

3.5. LA QUALITE DE LA CALIBRATION OBTENUE

3.5.1. Coefficient de Nash

La qualité de la simulation (similitude entre les valeurs observées et simulées) est appréciée à partir du **coefficient de Nash**. Pour 80 % des sous bassins, on note les résultats suivants (Figure 16) :

- un **coefficient de Nash** supérieur à 0,82, calculé sur la **racine carrée des débits** ;
- un **coefficient de Nash** supérieur à 0,77, calculé sur le **débit non-transformé**.

Les débits sont donc globalement très bien simulés, tout comme les faibles débits [représentatif de la contribution des eaux souterraines aux débits des cours d'eau], avec également 80 % des sous bassins ayant (Figure 17) :

- un **coefficient de Nash** supérieur à 0,77, calculé sur le **logarithme du débit**.

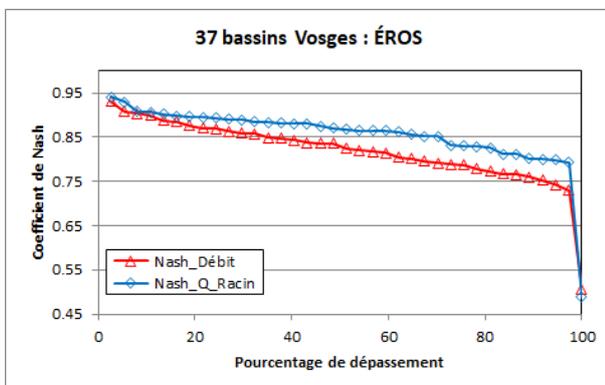


Figure 16 - Coefficient de Nash sur les débits journaliers des sous bassins modélisés [sur la racine carrée du débit et sur le débit non transformé]

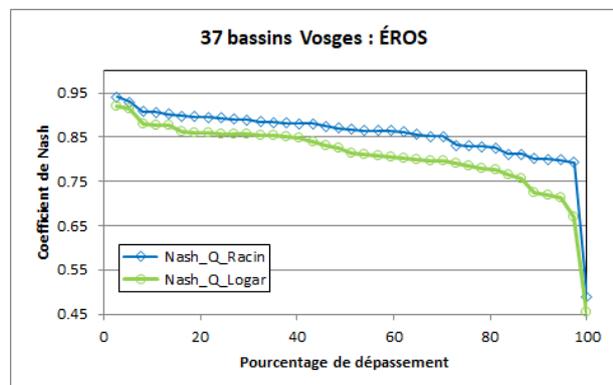


Figure 17 - Coefficient de Nash sur les débits journaliers des sous bassins modélisés [sur la racine carrée du débit, et sur le logarithme du débit]

3.5.2. 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 également de bons résultats de simulation (Figure 18), y compris pour les forts débits (moyenne interannuelle du débit mensuel maximal de l'année). La tendance globale qui se dessine (qui s'explique par le choix des options détaillé ci-dessus § 3.4), est que le modèle surestime le débit minimal et sous-estime débit maximal.

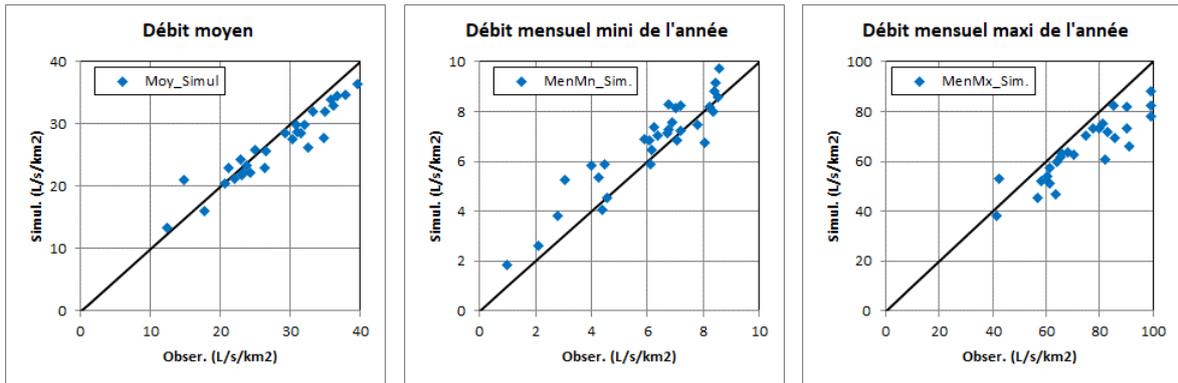


Figure 18 – Comparaison des débits simulés et observés : débit moyen, débit mensuel minimal de l'année et débit mensuel maximal de l'année (1 point = 1 bassin modélisé)

Pour 80 % des bassins, le biais de simulation (c'est-à-dire l'écart entre la moyenne simulée et la moyenne observée) est compris entre -2 L/s/km² et +2 L/s/km², ce qui est faible (Figure 19).

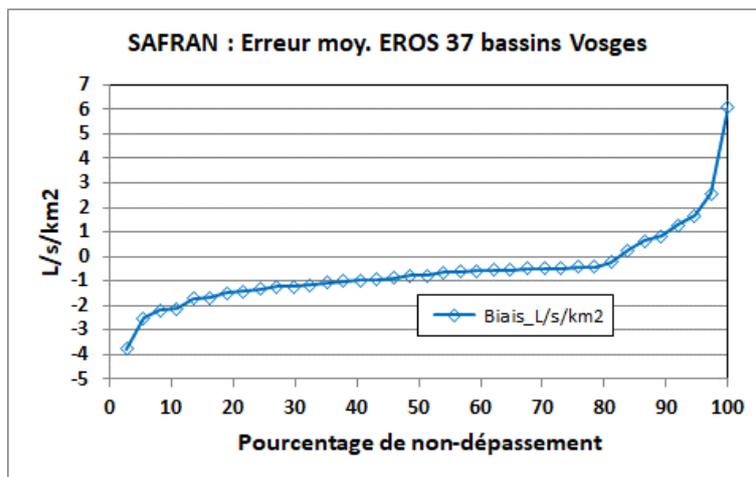


Figure 19 - Biais de simulation (écart entre la moyenne simulée et la moyenne observée) pour les sous bassins modélisés

Les graphiques suivants (Figure 20 et Figure 21) présentent à titre d'exemple des séries de débits journaliers observés (en rouge) et simulés avec EROS (en bleu) sur la période récente 2012-2019. L'échelle logarithmique permet de mieux visualiser les faibles débits. Si la calibration est satisfaisante (bonne reproduction des débits simulés par rapport aux débits observés, on constate néanmoins que sur certains bassins tel que le Giessen à Thanvillé le modèle sous-estime quand même les étiages 2015 et 2018.

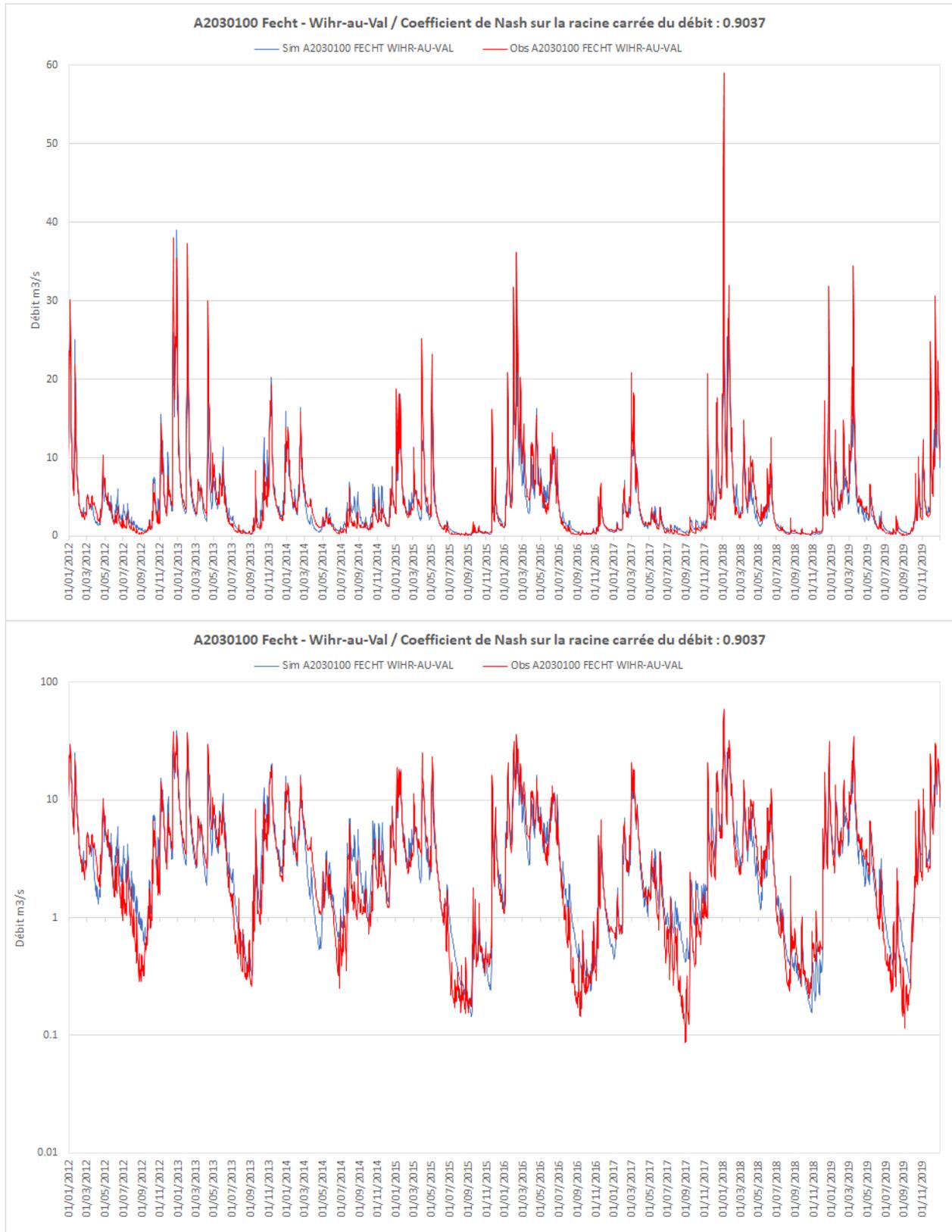


Figure 20 – Graphiques comparatifs des débits observés et simulés (échelle normale en haut et logarithmique en bas) [résultat des simulations avec le code de calcul ÉROS] pour la station hydrologique de la Fecht à Wihr-au-Val

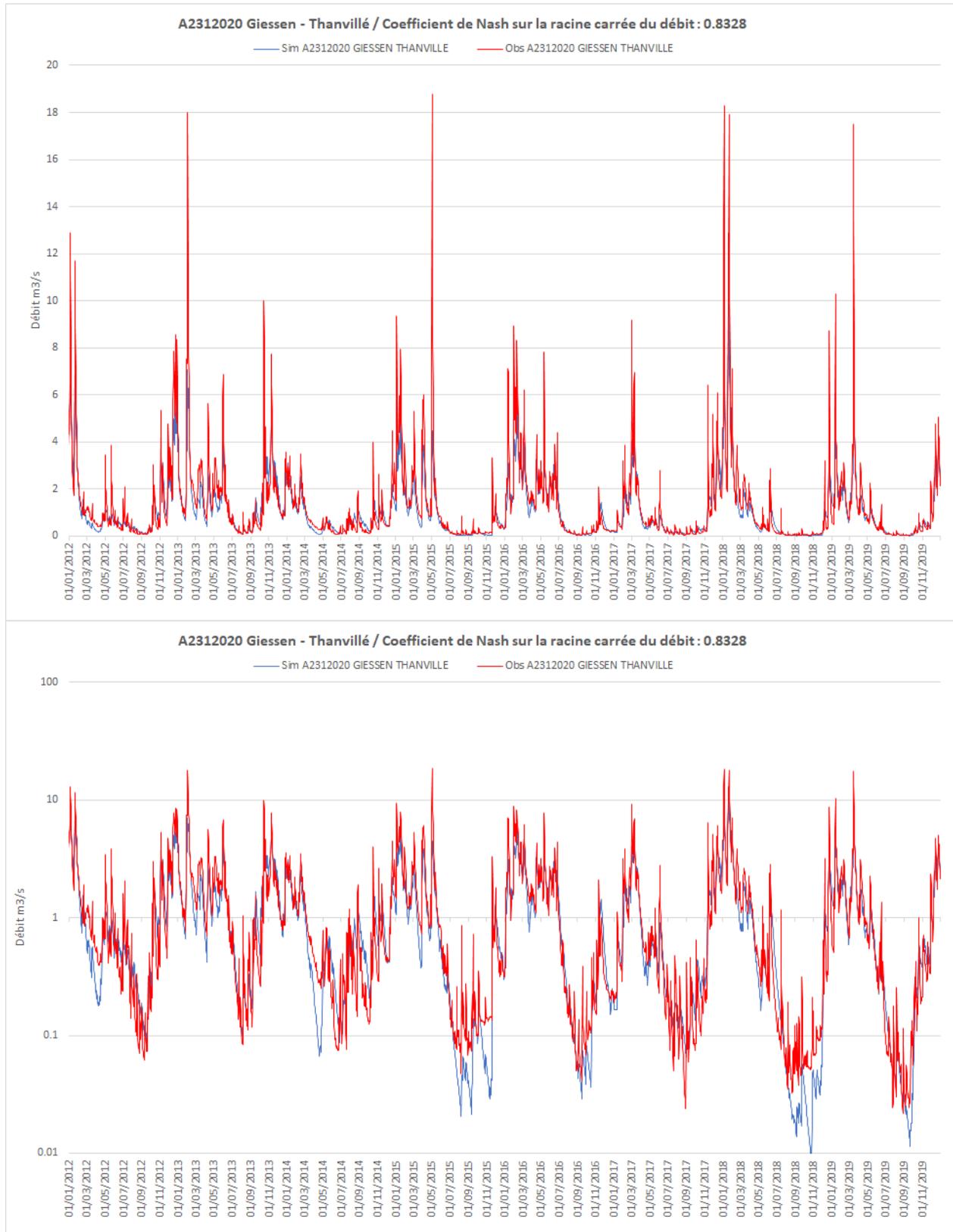


Figure 21 – Graphiques comparatifs des débits observés et simulés (échelle normale en haut et logarithmique en bas) [résultat des simulations avec le code de calcul ÉROS] pour la station hydrologique du Giessen à Thanvillé

Les débits journaliers sont en général bien simulés pour la plupart des bassins versants étudiés (Figure 22) avec un coefficient de Nash > 75 %, à l'exception du bassin versant du Strengbach à Ribeauvillé (n°32).

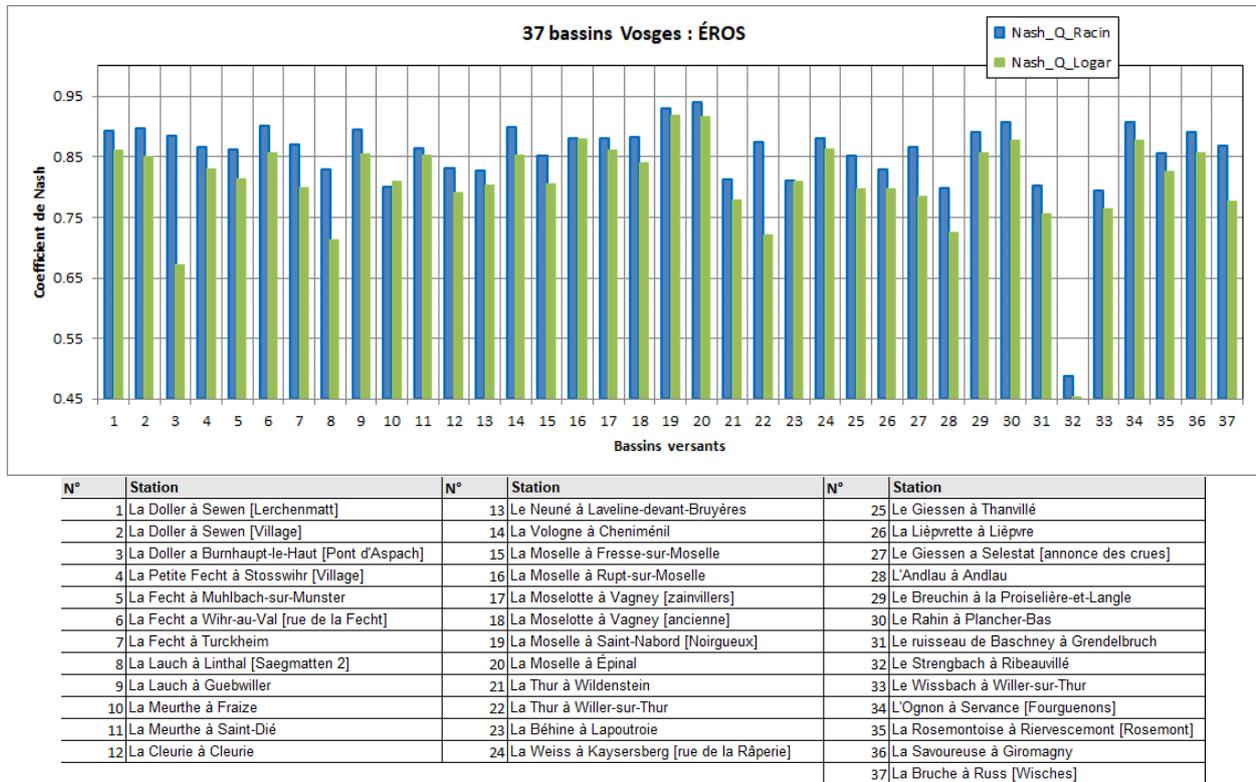


Figure 22 – Comparaison des coefficients de Nash pour les 37 bassins versants simulés

3.5.3. Bilan moyen par sous bassin et classification

Le module GARDÉNIA (Figure 23) fait intervenir, dans sa configuration la plus simple (adaptée au contexte de socle), trois réservoirs (superficiel, intermédiaire et souterrain) 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).

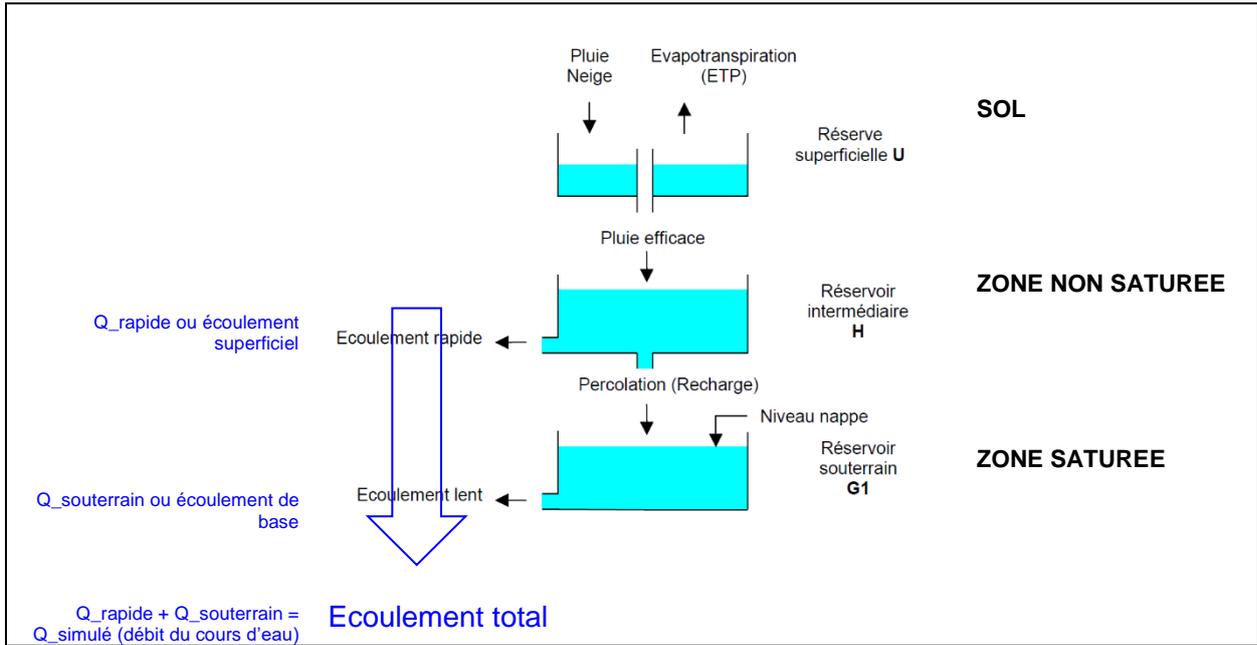


Figure 23 - Schéma de principe du module GARDENIA représentant un sous bassin versant

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_{rapide} = écoulement superficiel) composante du débit à la station jaugeée 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 jaugeée d'origine souterraine.

Le bilan hydrologique, sur les bassins versants du socle vosgien, est équilibré lorsque :

$$\boxed{\text{Pluie efficace} + \text{Pompage} + Q_{\text{Éch_Sout}} - Q_{\text{Rapide}} - Q_{\text{Souter_1}} - \text{Dif_Stock} = 0}$$

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 ;
- 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.

Dif_stock correspond à la variation de stock en eau dans le sol.

En l'absence de 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 pu être prise en compte.

Le graphique suivant (Figure 24) permet de comparer pour chaque bassin versant modélisé la part de chacun des termes du bilan.

On retiendra les éléments suivants :

- l'écoulement souterrain représente en moyenne environ 45 % de l'écoulement total ($Q_{\text{rapid}} + Q_{\text{sout}}$) ;
- l'écoulement rapide représente en moyenne 53 % de la pluie efficace ;
- la différence de stock est négligeable au regard des quantités écoulées (<1 %)
- un certain nombre de bassin versant présente des gains de débits (de 0.2 à 8 % de la pluie efficace) :
 - sur le versant Lorrain : Meurthe, Moselle et affluents Cleurie, Vologne, Moselotte ;
 - sur le versant Alsacien : Thur, Béhine.
- un certain nombre de bassin versant présente des pertes de débits (de 1 à 25 % de la pluie efficace) :
 - notamment à plus de 20 % sur le versant Alsacien : Fecht, Giessen, Strengbach, Wissbach ;
 - sur ces bassins, la proportion en eaux souterraines est anormalement haute entre 59 et 75 %.
- les bassins versants montrent une disparité importante entre amont et aval et se distinguent en deux groupes :
 - les bassins versants dont l'écoulement souterrain est plus important en amont et plus faible en aval : cela est significatif d'une perte de productivité de l'aquifère¹⁰ entre l'amont et l'aval et/ou l'impact de l'anthropisation (prélèvements en aval...). Il s'agit de la Doller (n°1-2-3), de la Lauch (n°8-9), de la Thur (n°21-22) et de la Cleurie (n°12-19) ;
 - les bassins versants dont l'écoulement souterrain est moins important en amont et augmente en aval : cela est significatif d'un gain de productivité de l'aquifère entre l'amont et l'aval et/ou l'impact de l'anthropisation (rejets en aval...). Il s'agit de la Fecht (n°4-5-6-7), de la Meurthe (n°10-11), de la Moselle amont (n°15-16), de la Weiss (n°23-24) et du Giessen (n°25-26-27).

¹⁰ qui s'évalue en fonction à la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du cours d'eau

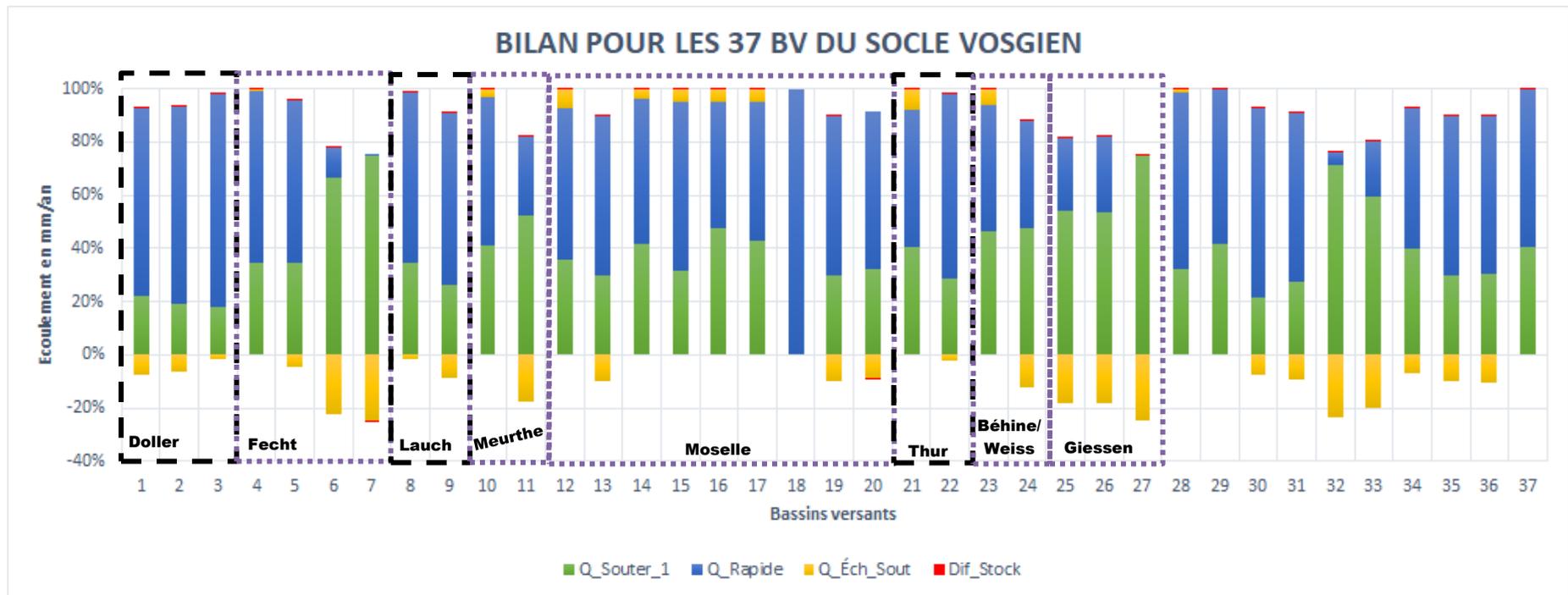
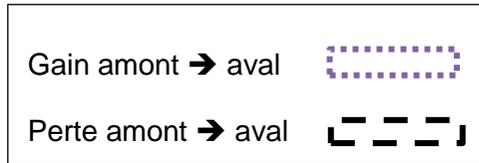


Figure 24 – Histogramme cumulé du bilan hydrologique sur les 37 bassins versants du socle vosgien

4. Mise en œuvre des prévisions sur le socle vosgien

4.1. METHODOLOGIE DES CALCULS

Dans un premier temps, la modélisation semi-globale EROS a été utilisée pour calculer la recharge des nappes du socle vosgien par les précipitations atmosphériques (système SAFRAN) sur la période de référence 1965-2019 (chapitre 3) et pour chaque sous bassin versant de la zone d'étude (Figure 25, Figure 26).

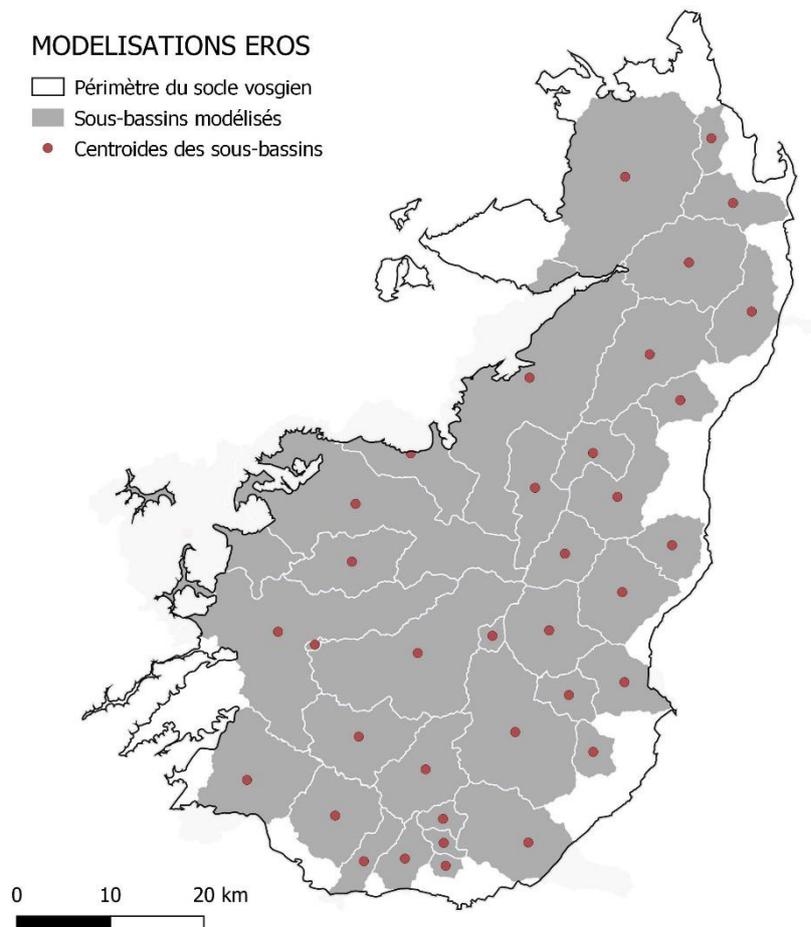


Figure 25 – Modélisation EROS sur le socle vosgien : Carte de localisation des sous bassins versants et des centroides utilisés pour l'interpolation

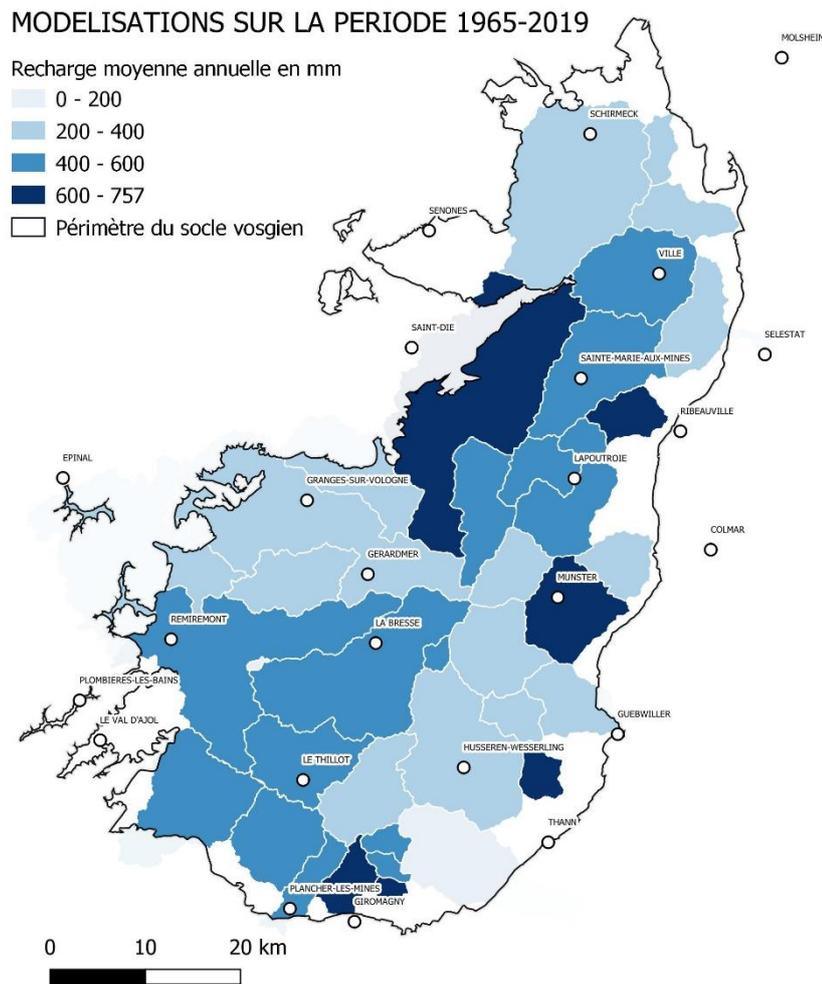


Figure 26 – Recharge annuelle en mm par sous bassin calculée sur la période de référence 1965-2019

Dans un second temps, les 14 projections climatiques régionalisées retenues (cf. chapitre 2) et contenant l'évolution journalière des précipitations liquides, de la neige, de l'Evapotranspiration Potentielle (ETP) et de la température de l'air sur la période du 01/01/1979 au 31/12/2100 (méthode de régionalisation DAYON) ou du 01/01/1951 au 31/12/2100 (méthode de régionalisation DSCLIM), ont été simulées à partir du modèle EROS.

Ensuite pour chaque simulation correspondant aux 14 projections climatiques régionalisées et pour trois périodes distinctes, un pourcentage de variation entre la recharge moyenne interannuelle future et la recharge moyenne interannuelle sur la période de référence (1979-2019 pour la méthode de régionalisation DAYON ou 1951-2019 pour la méthode de régionalisation DSCLIM) a été calculé. Le résultat exprime le déficit ou l'excédent relatif de recharge sur la période future par rapport à la période de référence.

Cette méthodologie respecte celle classiquement adoptée pour évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau et qui permet de comparer les simulations liées au climat futur à la simulation issue du « run » historique et non à la simulation faite à partir des données climatiques observés. De cette manière on s'assure de proposer une analyse de l'impact du changement climatique en s'affranchissant autant que possible de la difficulté du modèle de climat utilisé à reproduire les observations. Cette analyse se fait en comparant les valeurs d'indicateurs statistiques comme les moyennes annuelles et mensuelles calculées sur la période de référence et les périodes futures 2021-2060 et 2061-2100.

Il faut noter que sur la période future, on suppose que les prélèvements en eau ou encore l'occupation du sol restent identiques à ceux considérés sur la période de référence. Cette hypothèse est probablement fautive mais elle est retenue dans la plupart des études d'impact des changements climatiques faute de prévisions fiables sur ces paramètres (cf. rapport [explorer 2070](#) → BRL, IRSTEA, Météo France, 2011).

4.2. ANALYSE DES RESULTATS SUR LA RECHARGE FUTURE

4.2.1. Recharge annuelle calculée selon les 14 projections climatiques régionalisées sur la période future et la période de référence

Les résultats des simulations pour les 14 projections climatiques régionalisées (recharge annuelle future - Figure 27) ont été comparés afin d'apprécier la variabilité de l'impact en fonction de la projection, selon trois périodes distinctes :

- la période de référence 1979-2019 (DAYON) ou 1951-2019 (DSCLIM) ;
- la période 2021-2060 ;
- la période 2060-2100.

| |
|--------------------------------|
| SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC02_rcp45_CanESM2_dayon |
| SC03_rcp45_NorESM1-M_dayon |
| SC04_rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC05_rcp45_CanESM2_dsclim |
| SC06_rcp45_NorESM1-M_dsclim |
| SC07_rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC08_rcp85_CanESM2_dayon |
| SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon |
| SC10_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon |
| SC11_rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC12_rcp85_CanESM2_dsclim |
| SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim |
| SC14_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim |

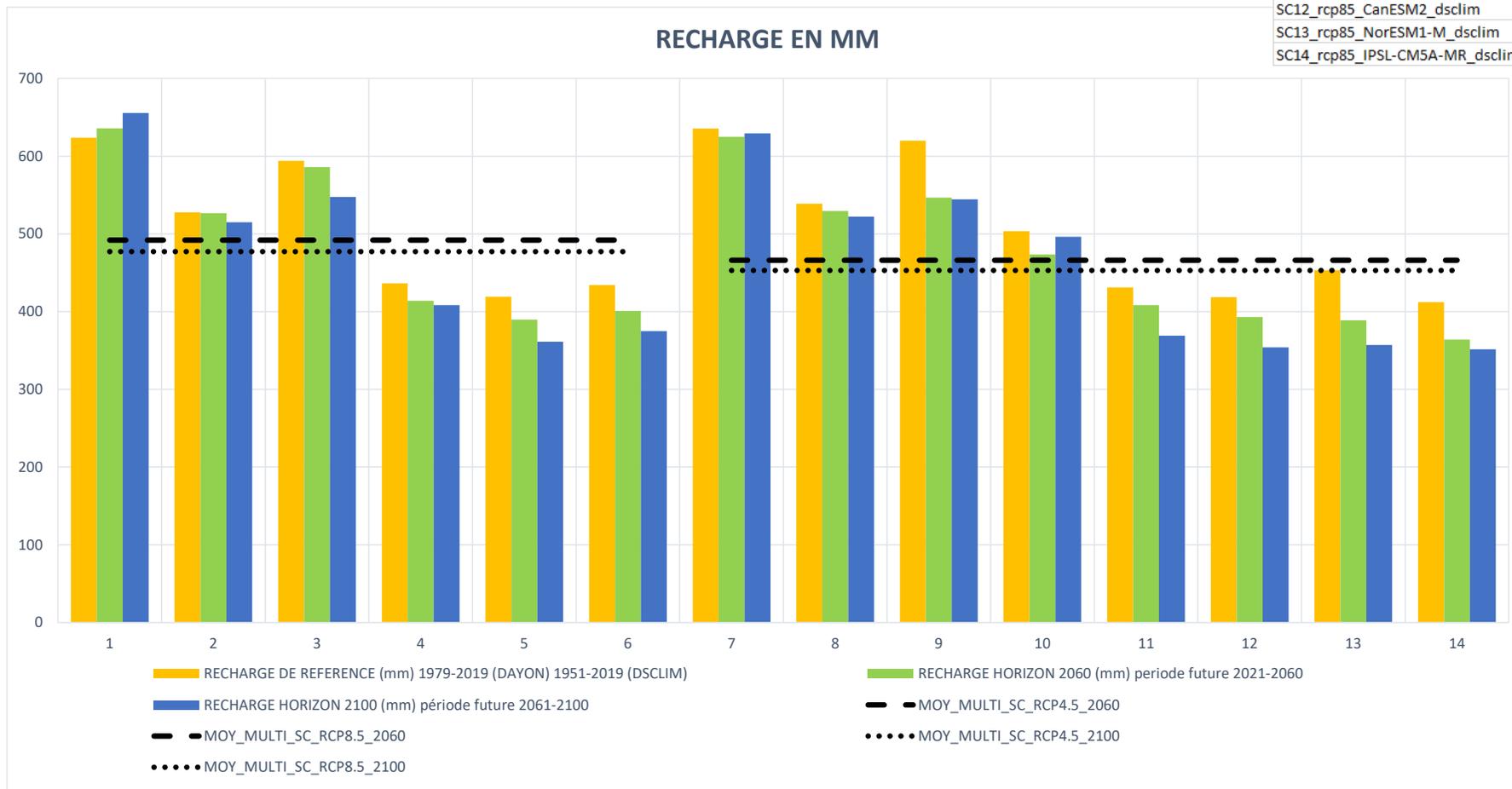


Figure 27 – Histogramme de la recharge annuelle simulée selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues. Comparaison des valeurs sur les périodes futures (horizon 2060 et 2100) et de référence

Les recharges les plus importantes (>600 mm/an) sont fournies par la méthode de régionalisation DAYON (modèle BCC) ; il s'agit des scénarios n°1 (RCP4.5) et n°7 (RCP8.5). Les recharges les plus faibles (<400 mm) sont fournies par la méthode de régionalisation DSCLIM (modèles CAN, NOR et IPSL) ; il s'agit des scénarios n°5 et 6 (RCP4.5) ainsi que ,12,13 et 14 (RCP8.5). Aucune recharge n'est simulée à moins de 350 mm par an. Les moyennes multi-scénarios sont respectivement de 477 mm/an à l'horizon 2060 et de 463 mm/an à l'horizon 2100 contre 503 mm sur la période de référence.

La grande variabilité observée dans les résultats en fonction des projections climatiques s'explique notamment par la complexité à pouvoir modéliser les précipitations et leur forte variabilité temporelle.

4.2.2. Variation entre la recharge moyenne annuelle sur la période future et la recharge moyenne interannuelle sur la période de référence

Le graphique ci-dessous (Figure 28) permet d'apprécier plus facilement la variabilité d'évolution de la recharge par rapport à la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées.

Un seul scénario conduit à un excédent de recharge annuelle à l'horizon 2060 (+ 2 %) et à l'horizon 2100 (+ 5 %). Pour tous les autres scénarios, les modélisations conduisent à un déficit de recharge annuelle de - 6 % à l'horizon 2060 et - 9 % à l'horizon 2100 ; il s'agit là de moyennes multi-scénarios.

On note l'aggravation de la situation (évolution à la baisse) entre 2060 et 2100 pour la plupart des scénarios avec des baisses de plus en plus significatives :

- pour le RCP4.5, la gamme de variation des différents scénarios passe de [0 à - 8 %] à [- 2 % à - 14 %] ;
- pour le RCP8.5, la gamme de variation des différents scénarios passe de [- 2 % à - 14 %] à [- 1 % à - 21 %].

Les deux exceptions sont les scénarios n°7 et 10 (méthode de régionalisation DAYON / modèle BCC et IPLS) qui conduisent à une évolution de la recharge à la hausse (amélioration) entre 2060 et 2100 (gain de 1 à 5 %).

Les scénarios les moins pénalisants sont ceux de la méthode de régionalisation DAYON (modèle BCC) n°1 et 7 et n°2 et 8 (modèle CAN) → variations entre + 5 % et - 3 %.

Le scénario le plus pénalisant est celui de la méthode de régionalisation DSCLIM n°13 (modèle NOR) → baisse de - 14 % à -21 %.

4.2.3. Impact à l'échelle des sous bassins versants

Comme précisé dans le paragraphe précédent, on constate une dégradation entre 2060 et 2100, qui se traduit par une relative hétérogénéité à l'échelle de chaque bassin versant. Ainsi on constate que (Tableau 4 et Figure 29) :

- à l'horizon 2060, 18 % des bassins versants ont un déficit de recharge inférieur à - 10 % ;
- à l'horizon 2100, cette proportion augmente avec 47 % des bassins versants qui ont un déficit de recharge inférieur à - 10 %.

| |
|--------------------------------|
| SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC02_rcp45_CanESM2_dayon |
| SC03_rcp45_NorESM1-M_dayon |
| SC04_rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC05_rcp45_CanESM2_dsclim |
| SC06_rcp45_NorESM1-M_dsclim |
| SC07_rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC08_rcp85_CanESM2_dayon |
| SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon |
| SC10_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon |
| SC11_rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC12_rcp85_CanESM2_dsclim |
| SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim |
| SC14_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim |

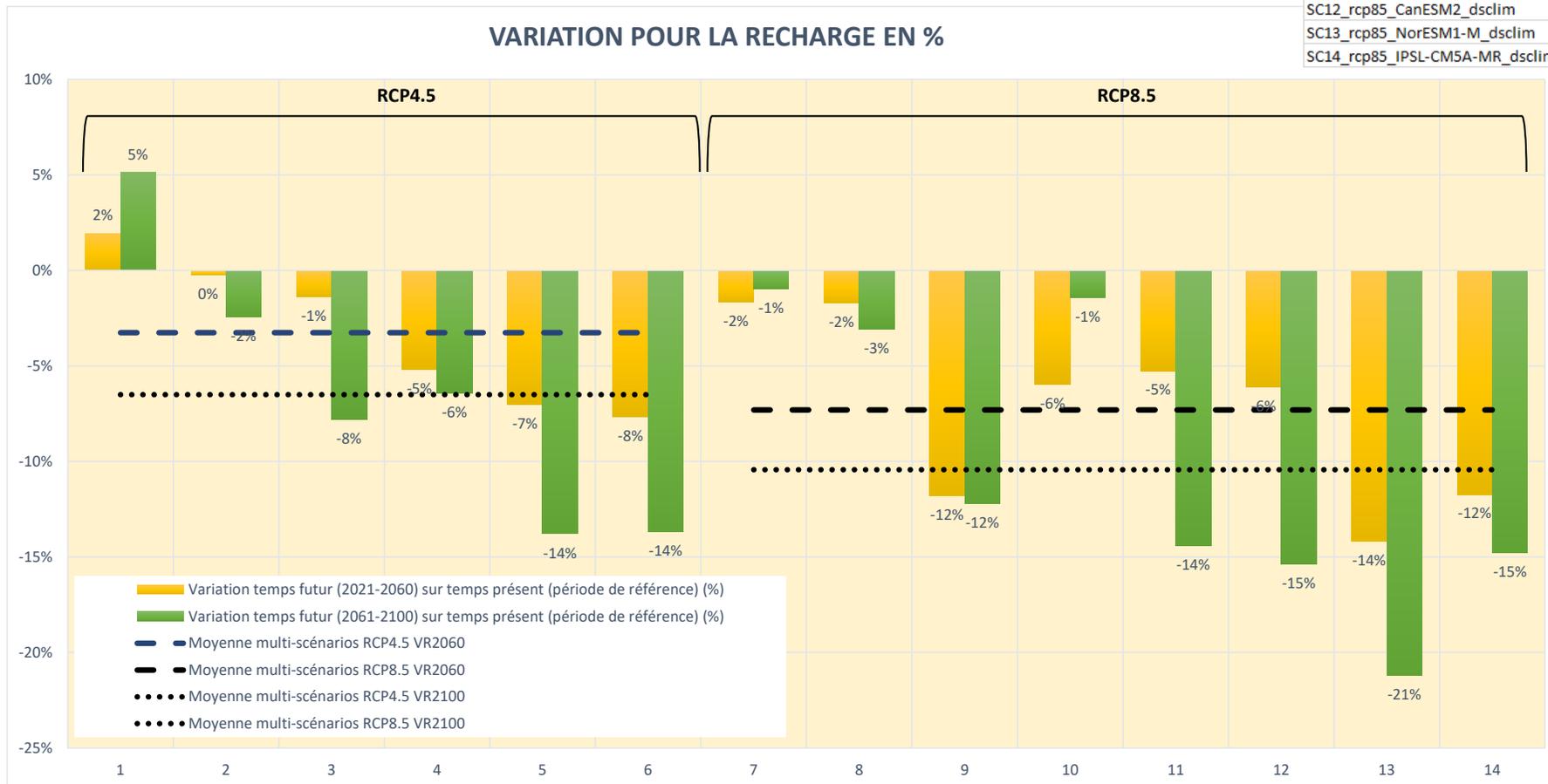


Figure 28 – Histogramme des variations entre la recharge future et la recharge sur la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues (en %)

| POURCENTAGE DE BV CONCERNES SUR LES 37 ETUDIES | | EXCEDENT DE RECHARGE | Moyenne multi-scénarios VR>0 | DEFICIT DE RECHARGE ENTRE 0 ET -10% | Moyenne multi-scénarios -10%<VR≤0 | DEFICIT DE RECHARGE ENTRE -10 ET -20% | Moyenne multi-scénarios -20%<VR≤-10% | DEFICIT DE RECHARGE ENTRE -20 ET -30% | Moyenne multi-scénarios -30%<VR≤-20% | DEFICIT DE RECHARGE ≤ -30% | Moyenne multi-scénarios VR ≤ -30% | somme | |
|--|------|----------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------|----|
| 2021-2060 | SC01 | RCP 4.5 | 21% | 8% | 75% | 0% | 4% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | |
| | SC02 | | | 25% | | 75% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC03 | | | 11% | | 89% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC04 | | | 0% | | 94% | | 6% | | 0% | | | 0% |
| | SC05 | | | 0% | | 92% | | 8% | | 0% | | | 0% |
| | SC06 | | | 0% | | 92% | | 8% | | 0% | | | 0% |
| | SC07 | RCP 8.5 | 3% | 92% | 68% | 0% | 26% | 0% | 2% | 0% | 0% | | |
| | SC08 | | | 11% | | 89% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC09 | | | 0% | | 50% | | 44% | | 6% | | | 0% |
| | SC10 | | | 6% | | 92% | | 3% | | 0% | | | 0% |
| | SC11 | | | 0% | | 97% | | 3% | | 0% | | | 0% |
| | SC12 | | | 0% | | 100% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC13 | | | 0% | | 0% | | 94% | | 6% | | | 0% |
| | SC14 | | | 0% | | 28% | | 67% | | 6% | | | 0% |
| 2061-2100 | SC01 | RCP 4.5 | 18% | 0% | 48% | 0% | 31% | 0% | 3% | 0% | 0% | 100% | |
| | SC02 | | | 8% | | 92% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC03 | | | 0% | | 83% | | 11% | | 6% | | | 0% |
| | SC04 | | | 0% | | 97% | | 3% | | 0% | | | 0% |
| | SC05 | | | 0% | | 11% | | 83% | | 6% | | | 0% |
| | SC06 | | | 0% | | 3% | | 92% | | 6% | | | 0% |
| | SC07 | RCP 8.5 | 8% | 78% | 36% | 0% | 45% | 0% | 9% | 0% | 1% | | |
| | SC08 | | | 17% | | 83% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC09 | | | 0% | | 50% | | 44% | | 3% | | | 3% |
| | SC10 | | | 28% | | 72% | | 0% | | 0% | | | 0% |
| | SC11 | | | 0% | | 6% | | 89% | | 6% | | | 0% |
| | SC12 | | | 0% | | 0% | | 92% | | 8% | | | 0% |
| | SC13 | | | 0% | | 0% | | 47% | | 47% | | | 6% |
| | SC14 | | | 0% | | 3% | | 86% | | 11% | | | 0% |

Tableau 4 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent (VR>0) ou un déficit (VR≤0) de recharge. Comparaison par période et scénarios (tableau)

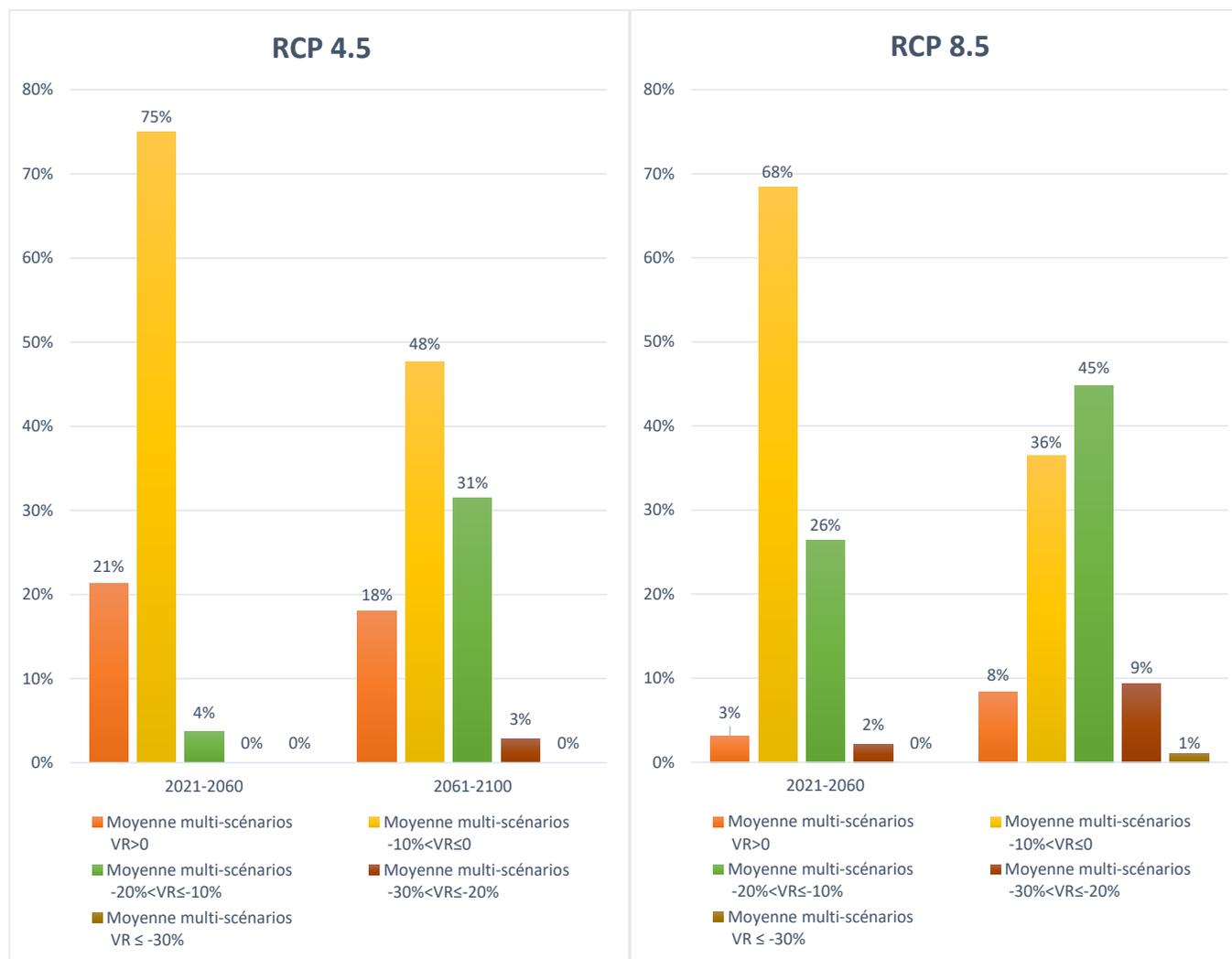


Figure 29 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent (VR>0) ou un déficit (VR≤0) de recharge. Comparaison par période et scénarios (graphiques)

L'analyse des variations (Figure 30 pour l'horizons 2060 et Figure 31 pour l'horizon 2100) à l'échelle de chacun des sous bassins versants étudiés pour deux scénarios extrêmes, scénario n°1 (rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon) hausse de la recharge pour 92 % des BV et scénario n°13 (rcp85_NorESM1-M_dsclim) baisse de la recharge < -10 % pour 100 % des BV, montre que les bassins versants de la Fecht aval et le Giessen aval sont les plus impactés. On fera abstraction des bassins versants du Strengbach (BV n°32) et du ruisseau de Baschney (BV n°31) dont la modélisation était peu concluante.

Le bassin le moins impacté est celui de la Moselle à Epinal (BV n°20), mais les résultats doivent être relativisés sachant qu'une partie importante de ce bassin versant se trouve hors domaine du socle (Tableau 3).

Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|-------------|--------------------|------------|
| 13 | NEUNE | LAVELINE | A4333010 |
| 14 | VOLOGNE | CHEMIMENIL | A4362030 |
| 15 | MOSELLE | FRESSE-SUR-MOSELLE | A4020610 |
| 16 | MOSELLE | RUPT | A4050620 |
| 17 | MOSELOTTE | VAGNEY_NEW | A4140202 |
| 18 | MOSELOTTE | VAGNEY_OLD | A4142010 |
| 19 | MOSELLE | SAINT-NABORD | A4200630 |
| 20 | MOSELLE | EPINAL | A4250640 |
| 21 | THUR | WILDENSTEIN | A1402020 |
| 22 | THUR | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 23 | BEHINE | LAPOUTROIE | A2113010 |
| 24 | WEISS | KAYSERSBERG | A2120200 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|---------------------|------------|
| 1 | DOLLER | SEWEN_LERCHENMATT | A1202050 |
| 2 | DOLLER | SEWEN_VILLAGE | A1202030 |
| 3 | DOLLER | BURNHAUPT | A1242010 |
| 4 | PETITE-FECHT | STOSSWIHR_VILLAGE | A2023030 |
| 5 | FECHT | MUHLBACH | A2012020 |
| 6 | FECHT | WIHR-AU-VAL | A2030100 |
| 7 | FECHT | TURCKHEIM | A2040100 |
| 8 | LAUCH | LINTHAL_SAEGMATTEN2 | A1502040 |
| 9 | LAUCH | GUEBWILLER | A1522020 |
| 10 | MEURTHE | FRAIZE | A6001010 |
| 11 | MEURTHE | SAINT-DIE | A6051020 |
| 12 | CLEURIE | CLEURIE | A4173010 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|-----------------|------------|
| 25 | GIESSEN | THANVILLE | A2312020 |
| 26 | LIEPVRETTE | LIEPVRE | A2332110 |
| 27 | GIESSEN | SELESTAT | A2352021 |
| 28 | ANDLAU | ANDLAU | A2512010 |
| 29 | BREUCHIN | PROISELIERE | U0415010 |
| 30 | RAHIN | PLANCHER-BAS | U1025010 |
| 31 | BASCHNEY | GRENDELBRUCH | A2750710 |
| 32 | STRENGBACH | RIBEAUVILLE | A2073010 |
| 33 | WISSBACH | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 34 | OGNON | SERVANCE | U1004010 |
| 35 | ROSEMONTAISE | RIERVESCEMONT | U2345810 |
| 36 | SAVOUREUSE | GIROMAGNY | U2345020 |
| 37 | BRUCHE | RUSS_WISCHES | A2732010 |

VARIATION DE LA RECHARGE HORIZON 2060 (%)

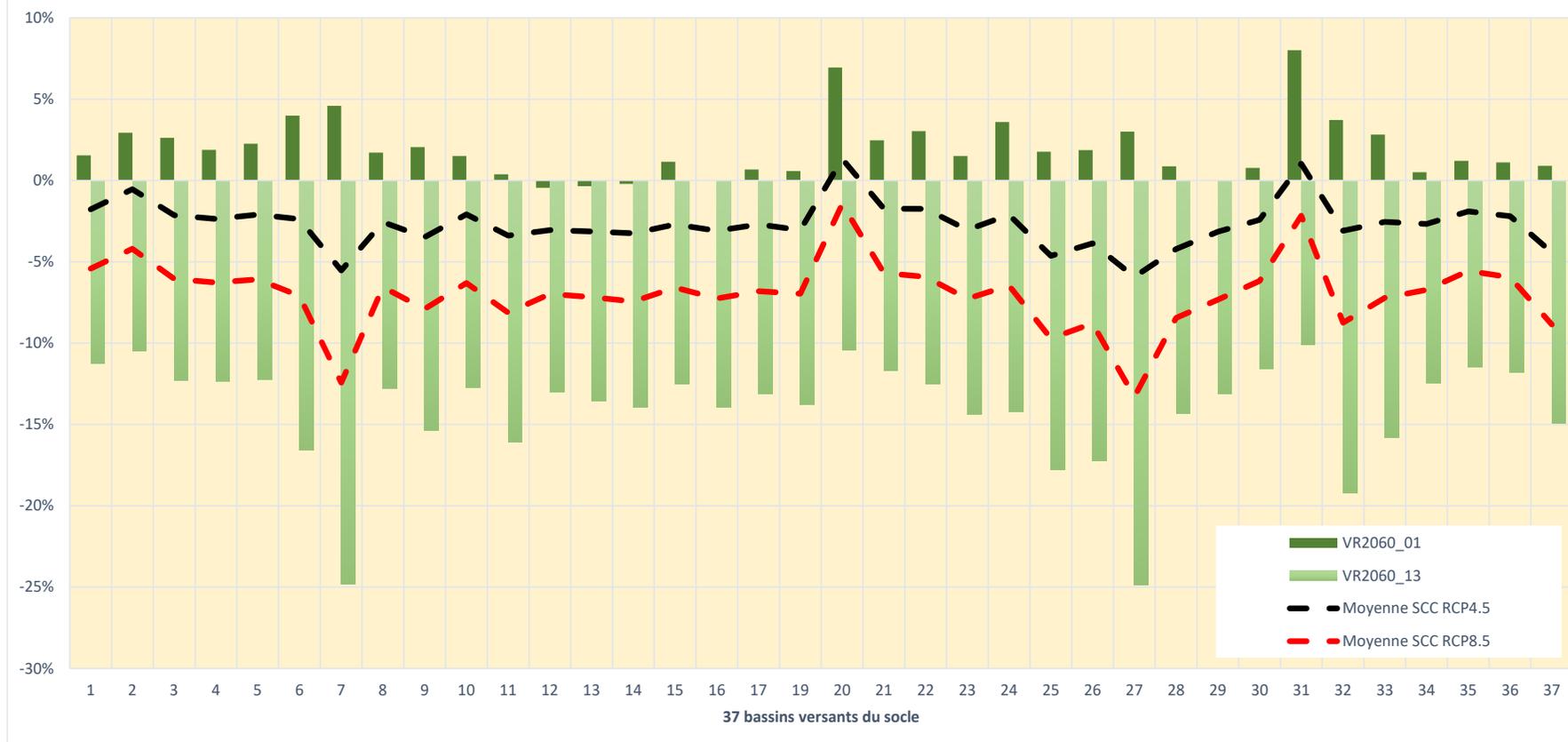


Figure 30 – Histogramme des variations entre la recharge future à l'horizon 2060 et la recharge sur la période de référence selon 2 projections climatiques régionalisées extrêmes et pour chaque sous bassin versant

Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|-------------|--------------------|------------|
| 13 | NEUNE | LAVELINE | A4333010 |
| 14 | VOLOGNE | CHENIMENIL | A4362030 |
| 15 | MOSELLE | FRESSE-SUR-MOSELLE | A4020610 |
| 16 | MOSELLE | RUPT | A4050620 |
| 17 | MOSELOTTE | VAGNEY_NEW | A4140202 |
| 18 | MOSELOTTE | VAGNEY_OLD | A4142010 |
| 19 | MOSELLE | SAINT-NABORD | A4200630 |
| 20 | MOSELLE | EPINAL | A4250640 |
| 21 | THUR | WILDENSTEIN | A1402020 |
| 22 | THUR | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 23 | BEHINE | LAPOUTROIE | A2113010 |
| 24 | WEISS | KAYSERSBERG | A2120200 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|---------------------|------------|
| 1 | DOLLER | SEWEN_LERCHENMATT | A1202050 |
| 2 | DOLLER | SEWEN_VILLAGE | A1202030 |
| 3 | DOLLER | BURNHAUPT | A1242010 |
| 4 | PETITE-FECHT | STOSSWIHR_VILLAGE | A2023030 |
| 5 | FECHT | MUHLBACH | A2012020 |
| 6 | FECHT | WIHR-AU-VAL | A2030100 |
| 7 | FECHT | TURCKHEIM | A2040100 |
| 8 | LAUCH | LINTHAL_SAEGMATTEN2 | A1502040 |
| 9 | LAUCH | GUEBWILLER | A1522020 |
| 10 | MEURTHE | FRAIZE | A6001010 |
| 11 | MEURTHE | SAINT-DIE | A6051020 |
| 12 | CLEURIE | CLEURIE | A4173010 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|-----------------|------------|
| 25 | GIESSEN | THANVILLE | A2312020 |
| 26 | LIEPVRETTE | LIEPVRE | A2332110 |
| 27 | GIESSEN | SELESTAT | A2352021 |
| 28 | ANDLAU | ANDLAU | A2512010 |
| 29 | BREUCHIN | PROISELIERE | U0415010 |
| 30 | RAHIN | PLANCHER-BAS | U1025010 |
| 31 | BASCHNEY | GRENDDELBRUCH | A2750710 |
| 32 | STRENGBACH | RIBEAUVILLE | A2073010 |
| 33 | WISSBACH | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 34 | OGNON | SERVANCE | U1004010 |
| 35 | ROSEMONTOISE | RIERVESCEMONT | U2345810 |
| 36 | SAVOUREUSE | GIROMAGNY | U2345020 |
| 37 | BRUCHE | RUSS_WISCHES | A2732010 |

VARIATION DE LA RECHARGE HORIZON 2100 (%)

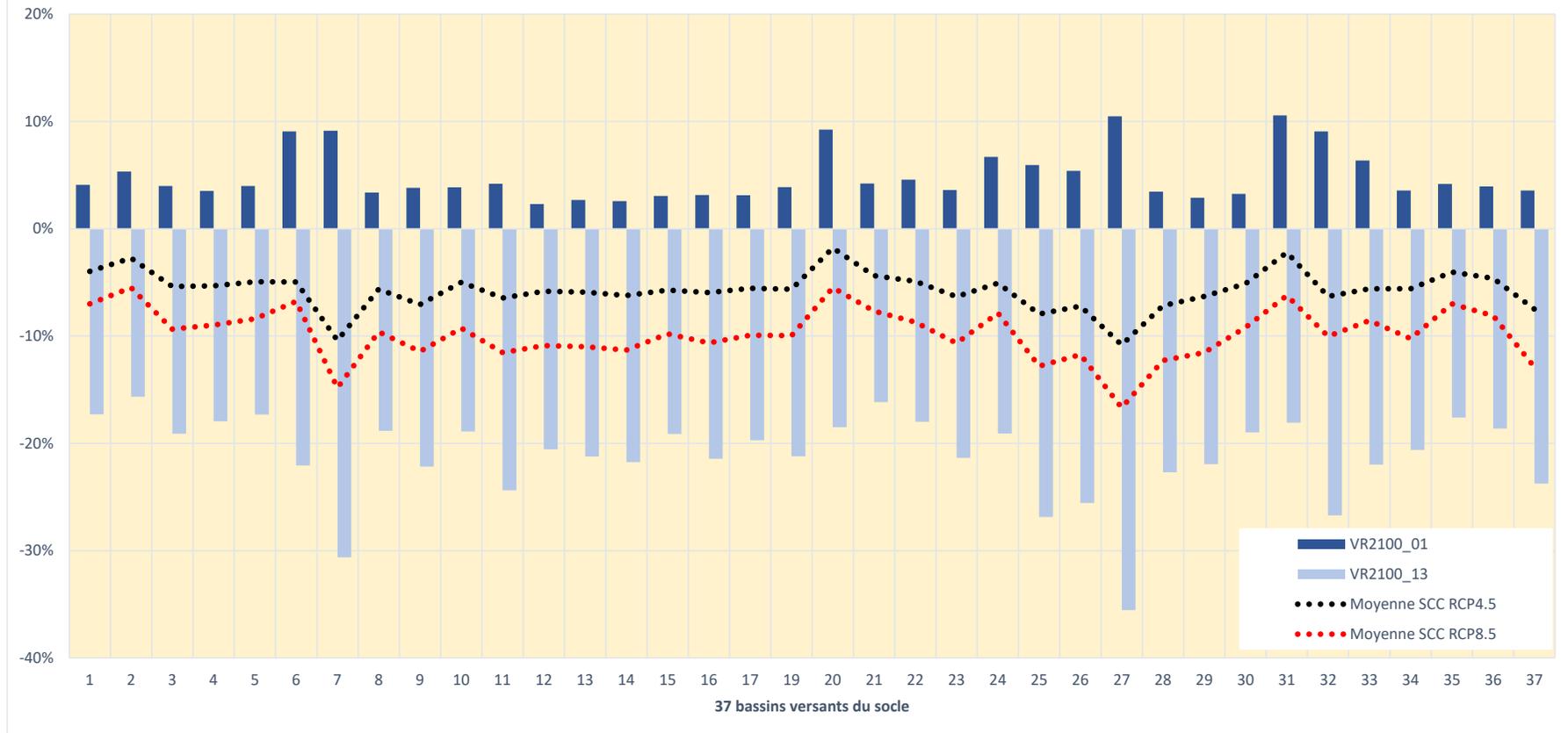


Figure 31 – Histogramme des variations entre la recharge future à l'horizon 2100 et la recharge sur la période de référence selon 2 projections climatiques régionalisées extrêmes et pour chaque sous bassin versant

4.2.4. Répartition spatiale de la variation de recharge

Les chroniques de recharge journalière obtenues par modélisation EROS sur les 37 bassins versants du socle vosgien disposant de chroniques de débit exploitables ont été traitées afin d'obtenir pour les trois périodes considérées (période de référence 1979-2019 ou 1951-2019 et périodes futures 2021-2060, 2061-2100), la recharge moyenne interannuelle puis la différence relative entre la période prospective et la période de référence.

Les cartes des Figure 32 et Figure 33 montrent la variation moyenne de la recharge à l'horizon 2060 et 2100 pour chacun des sous bassins versants et pour l'ensemble des scénarios ; il s'agit d'une moyenne multi-scénarios pour RCP 4.5 (6 scénarios) et RCP 8.5 (8 scénarios). Les cartes présentées en annexe 1 ont été réalisées par interpolation des valeurs obtenues pour les 37 sous bassins versants considérés, en affectant les valeurs au centroïde des sous bassins versants.

La répartition spatiale des variations de recharge attendues à l'horizon 2060 et 2100, indique les plus fortes variations :

- sur le versant alsacien entre Villé (67) au nord et Munster (68) au sud au droit des bassins versants du Giessen et de la Fecht ;
- et plus généralement au nord du massif vosgien, au droit des bassins versants de la Bruche ou de la Meurthe amont.

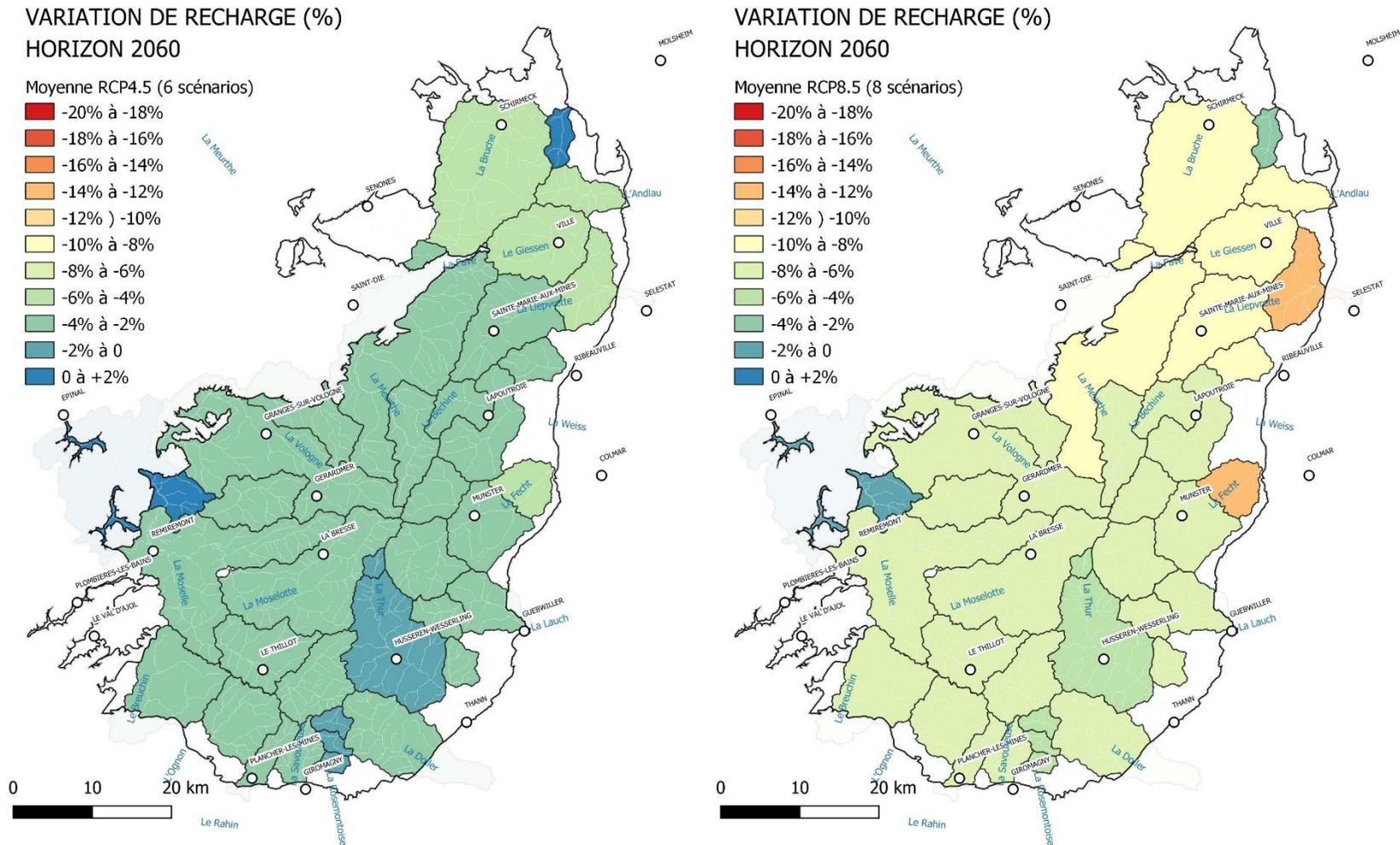
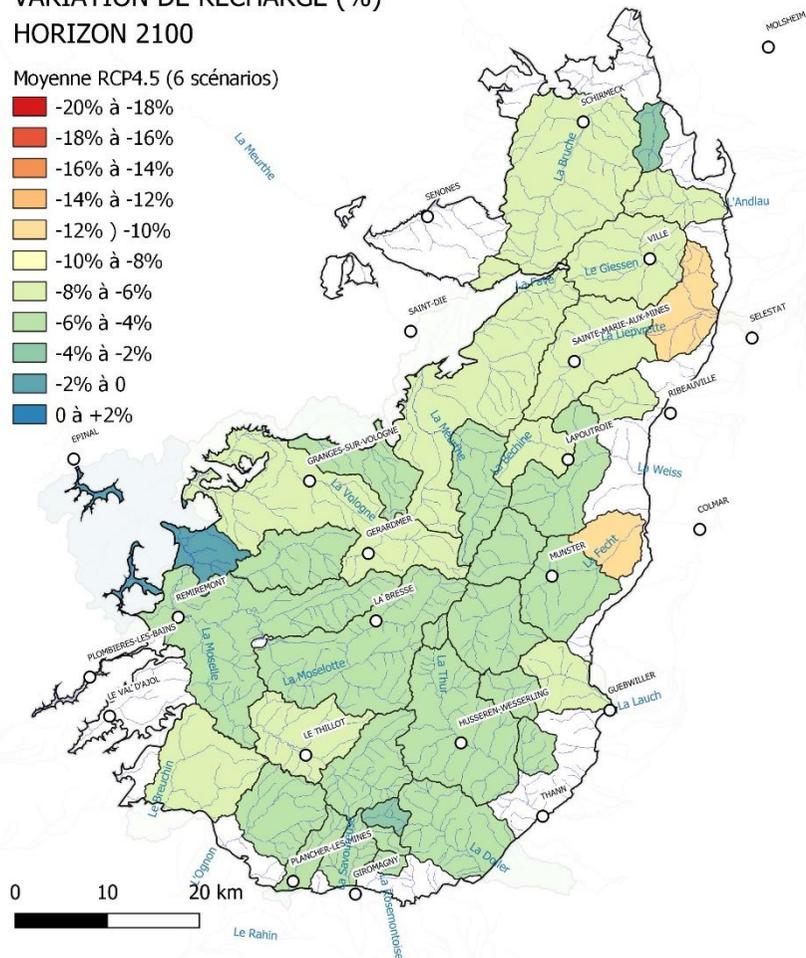
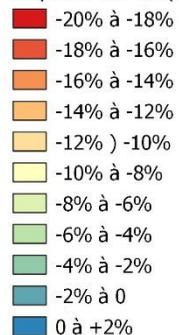


Figure 32 - HORIZON 2060 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5

VARIATION DE RECHARGE (%)
HORIZON 2100

Moyenne RCP4.5 (6 scénarios)



VARIATION DE RECHARGE (%)
HORIZON 2100

Moyenne RCP8.5 (8 scénarios)

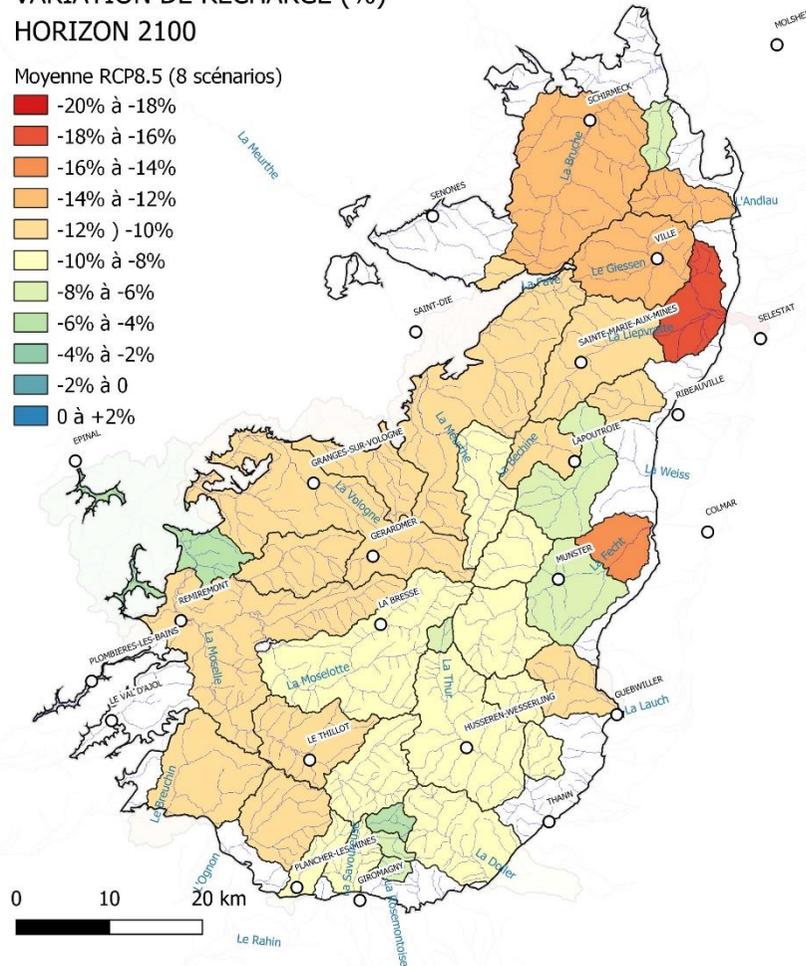
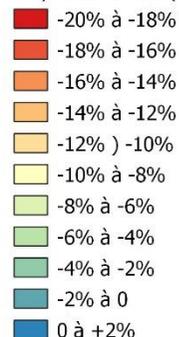


Figure 33 - HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5

4.3. ANALYSE DES RESULTATS SUR LES DEBITS FUTURS

4.3.1. Ecoulement total annuel calculé selon 14 projections climatiques régionalisées sur la période future et la période de référence

Le bilan hydrologique établi en fin de simulation avec le modèle « EROS socle vosgien » fourni en outre les valeurs d'écoulement souterrain ou lent (Q_Souter_1) et superficiel ou rapide (Q_Rapide) dont la somme représente l'écoulement total ou débit (en mm) avant retard jusqu'à l'exutoire du sous bassin ; s'il y a du retard, ce débit est différent du débit dans la rivière Q_rivière (transformé en mm).

Le graphique suivant (Figure 34) permet de comparer pour chacun des 14 scénarios traités les valeurs de l'écoulement total simulé sur la période future (2021-2060 et 2061-2100) et sur la période de référence. Les valeurs les plus importantes (>4000 mm/an) sont fournies pour la méthode de régionalisation DAYON ; il s'agit des scénarios n°1, 2 et 3 (RCP4.5 respectivement modèles BCC, CAN et NOR) ainsi que n°7, 8 et 9 (RCP8.5 respectivement modèles BCC, CAN et NOR). Aucun écoulement total n'est simulé à moins de 2600 mm par an. Les moyennes multi-scénarios à l'horizon 2060 et à l'horizon 2100 sont voisines de l'ordre de 3860 mm/an contre 4036 mm/an sur la période de référence, soit une baisse d'environ -5 %.

4.3.2. Variation entre l'écoulement total moyen annuel sur la période future et l'écoulement total moyen annuel sur la période de référence

Le graphique ci-dessous (Figure 35) permet d'apprécier plus facilement la variabilité d'évolution de l'écoulement total futur par rapport à la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées.

Quatre scénarios de la méthode de régionalisation DAYON (n°1, 2, 7 et 8) conduisent à un excédent d'écoulement à l'horizon 2060 (0 à + 3 %) et à l'horizon 2100 (+ 1 % à + 10 %).

Pour tous les autres scénarios, les modélisations conduisent à un déficit d'écoulement total annuel entre - 2 % et - 15 % à l'horizon 2060 et entre - 3 % et - 20 % à l'horizon 2100. Les scénarios les plus pessimistes sont les n°13 (DSCLIM, RCP8.5, modèle NOR) et n°9 (DAYON, RCP8.5, modèle NOR).

On note généralement l'aggravation de la situation entre 2060 et 2100 pour la plupart des scénarios avec des baisses de plus en plus significatives. Le scénario n°10 se distingue par un déficit à l'horizon 2060 (- 5 %) et un excédent à l'horizon 2100 (+ 6 %). Deux autres scénarios montrent une réduction des déficits entre 2060 et 2100 (n°4, 14).

| |
|--------------------------------|
| SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC02_rcp45_CanESM2_dayon |
| SC03_rcp45_NorESM1-M_dayon |
| SC04_rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC05_rcp45_CanESM2_dsclim |
| SC06_rcp45_NorESM1-M_dsclim |
| SC07_rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC08_rcp85_CanESM2_dayon |
| SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon |
| SC10_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon |
| SC11_rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC12_rcp85_CanESM2_dsclim |
| SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim |
| SC14_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim |

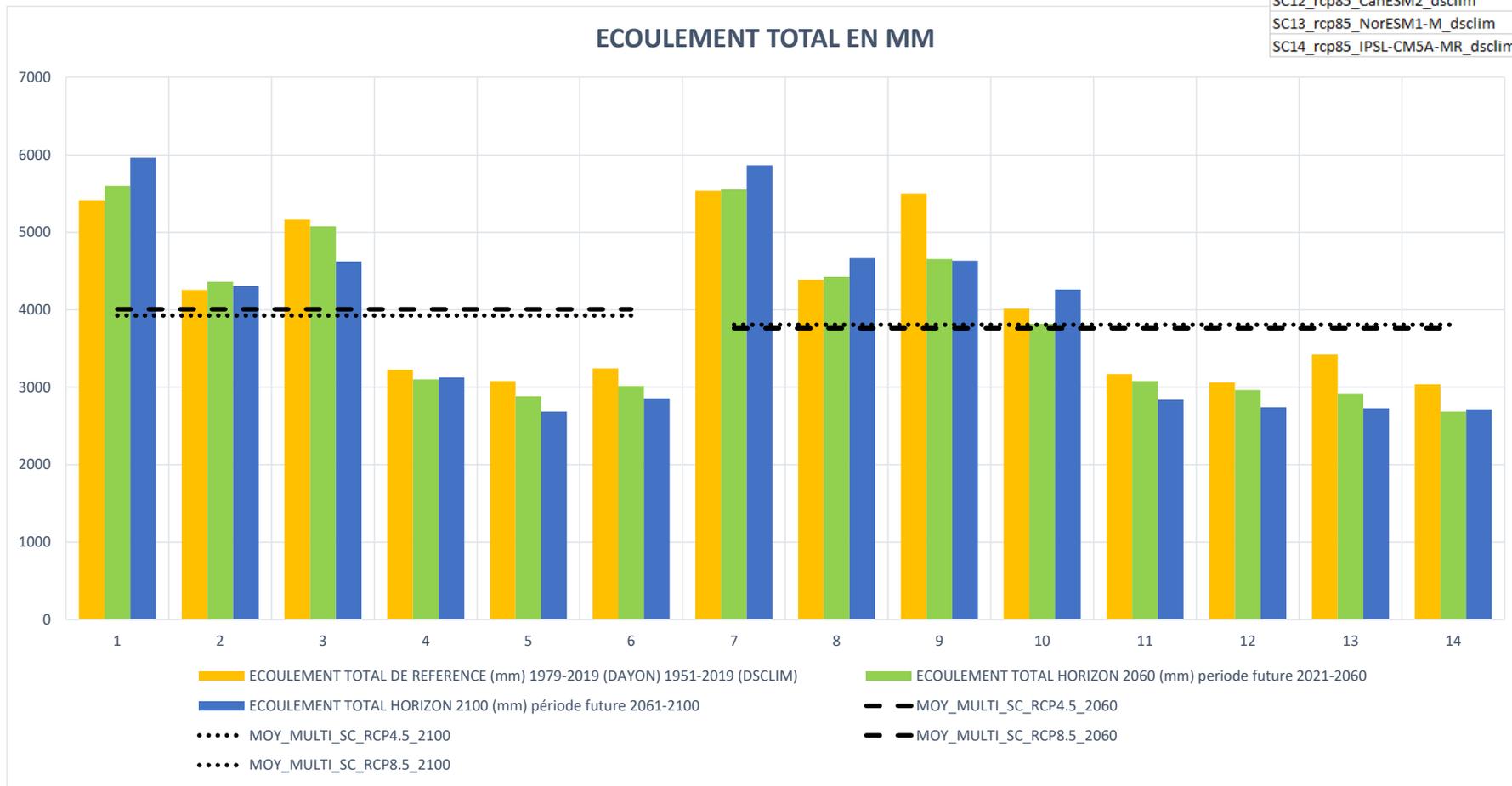


Figure 34 – Histogramme de l'écoulement total annuel simulé selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues. Comparaison des valeurs sur les périodes futures (2021-2060 et 2061-2100) et la période de référence

| |
|--------------------------------|
| SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC02_rcp45_CanESM2_dayon |
| SC03_rcp45_NorESM1-M_dayon |
| SC04_rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC05_rcp45_CanESM2_dsclim |
| SC06_rcp45_NorESM1-M_dsclim |
| SC07_rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon |
| SC08_rcp85_CanESM2_dayon |
| SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon |
| SC10_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon |
| SC11_rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim |
| SC12_rcp85_CanESM2_dsclim |
| SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim |
| SC14_rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim |

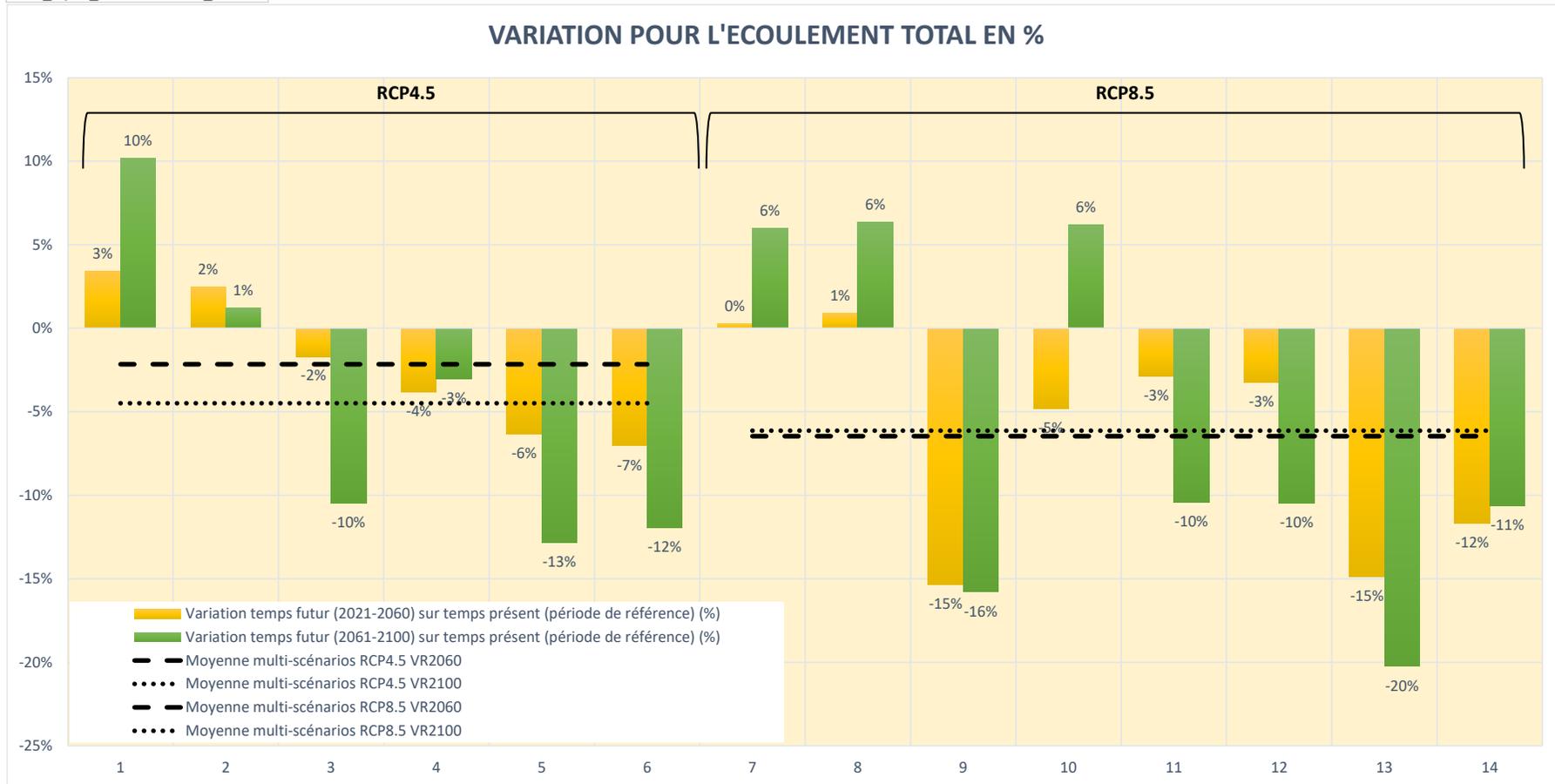


Figure 35 - Histogramme des variations entre l'écoulement total futur et l'écoulement total sur la période de référence selon les 14 projections climatiques régionalisées retenues (en %)

4.3.3. Impact à l'échelle des sous bassins versants

Comme précisé dans le paragraphe précédent, on constate généralement une dégradation entre les périodes futures 2021-2060 et 2061-2100, qui se traduit par une relative hétérogénéité à l'échelle de chaque bassin versant. Ainsi on constate que (Tableau 5 et Figure 36) :

- à l'horizon 2060, 23 % des bassins versants ont un déficit d'écoulement total inférieur à - 10 % ;
- à l'horizon 2100, cette proportion augmente avec 45 % des bassins versants qui ont un déficit d'écoulement total inférieur à - 10 %.

Les variations à l'échelle de chacun des sous bassins versants sont illustrées sur la Figure 37 pour l'horizon 2060 et sur la Figure 38 pour l'horizon 2100. La comparaison porte sur la moyenne multi-scénarios (RCP4.5 et RCP 8.5) des variations d'écoulement total et deux scénarios extrêmes :

- le scénario n°1 (rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon) avec augmentation de l'écoulement total pour tous les BV ;
- le scénario n°13 (rcp85_NorESM1-M_dsclim) avec diminution de l'écoulement total pour tous les BV.

L'analyse montre que les bassins versants les plus impactés par une baisse des écoulements sont sur le Giessen et son affluent la Liepvrette (BV n°25 à 27), l'Andlau (BV n°28) et la Bruche (BV n°37), ainsi que la Meurthe (BV n°11), la Cleurie (BV n°12), la Neuné (BV n°13), la Vologne (BV n°14) et le Breuchin (BV n°29).

On fera abstraction des bassins versants du Strengbach (BV n°32) et du ruisseau de Baschney (BV n°31) dont la modélisation était concluante.

| POURCENTAGE DE BV CONCERNES SUR LES 37 ETUDIES | EXCEDENT ECOULEMENT TOTAL | Moyenne multi-scénarios VET>0 | Moyenne multi-scénarios VET>0 | DEFICIT ECOULEMENT TOTAL ENTRE 0 ET -10% | Moyenne multi-scénarios -10%<VET≤0 | Moyenne multi-scénarios -10%<VET≤0 | DEFICIT ECOULEMENT TOTAL ENTRE -10 ET -20% | Moyenne multi-scénarios -20%<VET≤-10% | Moyenne multi-scénarios -20%<VET≤-10% | DEFICIT ECOULEMENT TOTAL ENTRE -20 ET -30% | Moyenne multi-scénarios -30%<VET≤-20% | Moyenne multi-scénarios -30%<VET≤-20% | somme | |
|--|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---------------------------------------|-------|----|
| 2021-2060 | SC01 | 100% | 32% | 26% | 63% | 51% | 0% | 5% | 22% | 0% | 0% | 1% | 100% | |
| | SC02 | 94% | | | | | 0% | | | 0% | | | | |
| | SC03 | 0% | | | | | 100% | | | 0% | | | | 0% |
| | SC04 | 0% | | | | | 100% | | | 0% | | | | 0% |
| | SC05 | 0% | | | | | 86% | | | 14% | | | | 0% |
| | SC06 | 0% | | | | | 86% | | | 14% | | | | 0% |
| | SC07 | 67% | 21% | 42% | 51% | 34% | 0% | 22% | 0% | 2% | 0% | | | |
| | SC08 | 83% | | | | | 17% | | 0% | | 0% | | | |
| | SC09 | 0% | | | | | 0% | | 86% | | 14% | | | |
| | SC10 | 0% | | | | | 100% | | 0% | | 0% | | | |
| | SC11 | 11% | | | | | 86% | | 3% | | 0% | | | |
| | SC12 | 8% | | | | | 92% | | 0% | | 0% | | | |
| | SC13 | 0% | | | | | 0% | | 97% | | 3% | | | |
| | SC14 | 0% | | | | | 11% | | 89% | | 0% | | | |
| 2061-2100 | SC01 | 100% | 32% | 35% | 28% | 20% | 0% | 38% | 37% | 0% | 1% | 100% | | |
| | SC02 | 81% | | | | | 19% | | | 0% | | | | |
| | SC03 | 0% | | | | | 36% | | | 64% | | | 0% | |
| | SC04 | 14% | | | | | 86% | | | 0% | | | 0% | |
| | SC05 | 0% | | | | | 14% | | | 78% | | | 8% | |
| | SC06 | 0% | | | | | 11% | | | 89% | | | 0% | |
| | SC07 | 100% | 0% | 0% | 0% | 36% | 0% | 37% | 0% | 13% | 0% | | | |
| | SC08 | 100% | 0% | 0% | 86% | | 14% | | | | | | | |
| | SC09 | 0% | 0% | 0% | 0% | | | | | | | | | |
| | SC10 | 100% | 0% | 0% | 0% | | | | | | | | | |
| | SC11 | 0% | 36% | 58% | 6% | | | | | | | | | |
| | SC12 | 0% | 36% | 58% | 6% | | | | | | | | | |
| | SC13 | 0% | 0% | 39% | 61% | | | | | | | | | |
| | SC14 | 0% | 36% | 50% | 14% | | | | | | | | | |

Tableau 5 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent (VET>0) ou un déficit (VET≤0) d'écoulement total. Comparaison par période et scénarios (tableau)



Figure 36 – Pourcentage des bassins versants ayant un excédent (VET>0) ou un déficit (VET≤0) d’écoulement total. Comparaison par période et scénarios (graphiques)

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|-------------|--------------------|------------|
| 13 | NEUNE | LAVELINE | A4333010 |
| 14 | VOLOGNE | CHENIMENIL | A4362030 |
| 15 | MOSELLE | FRESSE-SUR-MOSELLE | A4020610 |
| 16 | MOSELLE | RUPT | A4050620 |
| 17 | MOSELOTTE | VAGNEY_NEW | A4140202 |
| 18 | MOSELOTTE | VAGNEY_OLD | A4142010 |
| 19 | MOSELLE | SAINT-NABORD | A4200630 |
| 20 | MOSELLE | EPINAL | A4250640 |
| 21 | THUR | WILDENSTEIN | A1402020 |
| 22 | THUR | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 23 | BEHINE | LAPOUTROIE | A2113010 |
| 24 | WEISS | KAYSERSBERG | A2120200 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|---------------------|------------|
| 1 | DOLLER | SEWEN_LERCHENMATT | A1202050 |
| 2 | DOLLER | SEWEN_VILLAGE | A1202030 |
| 3 | DOLLER | BURNHAUPT | A1242010 |
| 4 | PETITE-FECHT | STOSSWIHR_VILLAGE | A2023030 |
| 5 | FECHT | MUHLBACH | A2012020 |
| 6 | FECHT | WIHR-AU-VAL | A2030100 |
| 7 | FECHT | TURCKHEIM | A2040100 |
| 8 | LAUCH | LINTHAL_SAEGMATTEN2 | A1502040 |
| 9 | LAUCH | GUEBWILLER | A1522020 |
| 10 | MEURTHE | FRAIZE | A6001010 |
| 11 | MEURTHE | SAINT-DIE | A6051020 |
| 12 | CLEURIE | CLEURIE | A4173010 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|-----------------|------------|
| 25 | GIESSEN | THANVILLE | A2312020 |
| 26 | LIEPVRETTE | LIEPVRE | A2332110 |
| 27 | GIESSEN | SELESTAT | A2352021 |
| 28 | ANDLAU | ANDLAU | A2512010 |
| 29 | BREUCHIN | PROISELIERE | U0415010 |
| 30 | RAHIN | PLANCHER-BAS | U1025010 |
| 31 | BASCHNEY | GRENDELBRUCH | A2750710 |
| 32 | STRENGBACH | RIBEAUVILLE | A2073010 |
| 33 | WISSBACH | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 34 | OGNON | SERVANCE | U1004010 |
| 35 | ROSEMontoise | RIERVESCEMONT | U2345810 |
| 36 | SAVOUREUSE | GIROMAGNY | U2345020 |
| 37 | BRUCHE | RUSS_WISCHES | A2732010 |

VARIATION DE L'ECOULEMENT TOTAL HORIZON 2060 (%)

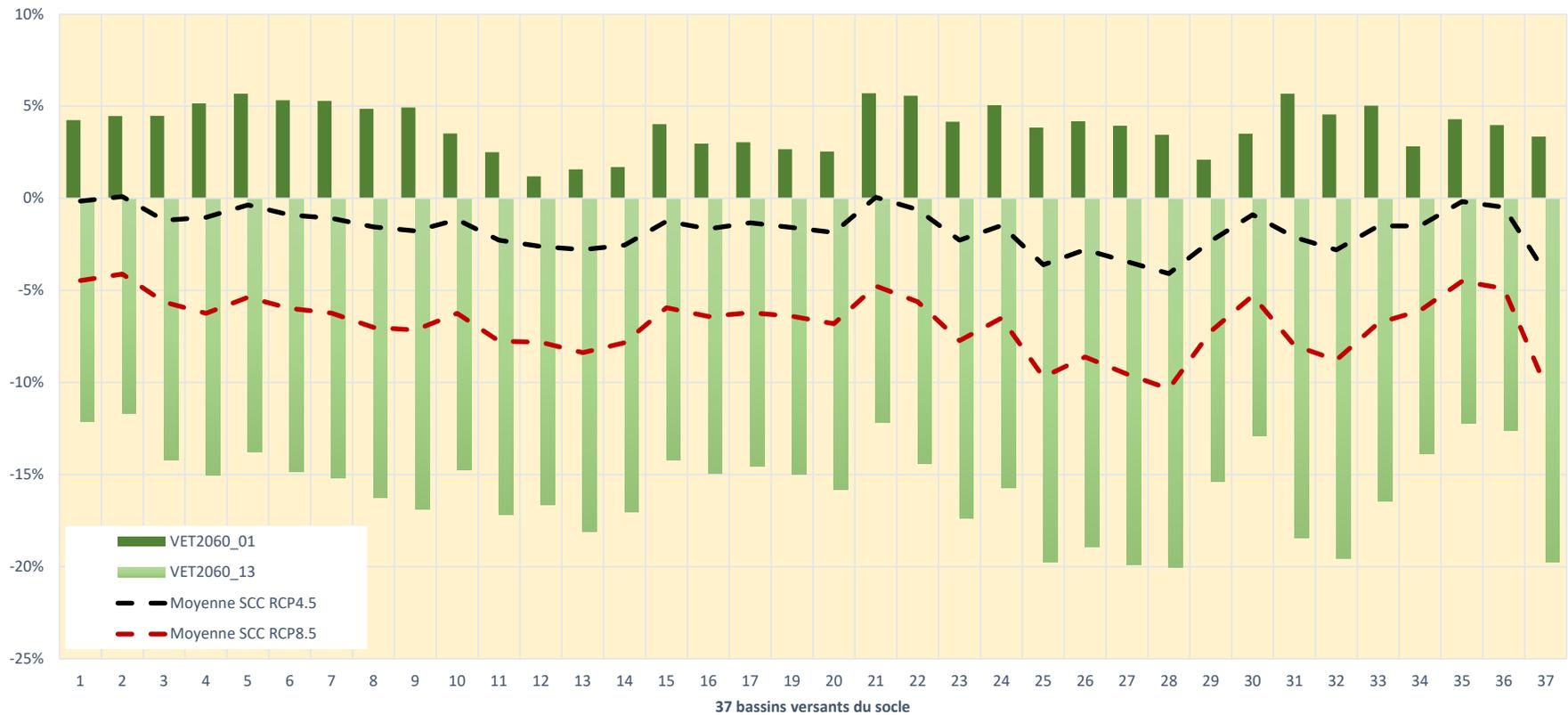


Figure 37 – Histogramme des variations entre l'écoulement total sur la période future (2021-2060) et l'écoulement total sur la période de référence pour chaque sous bassin versant (2 projections extrêmes et moyennes des RCP 4.5 et 8.5)

Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|-------------|--------------------|------------|
| 13 | NEUNE | LAVELINE | A4333010 |
| 14 | VOLOGNE | CHENIMENIL | A4362030 |
| 15 | MOSELLE | FRESSE-SUR-MOSELLE | A4020610 |
| 16 | MOSELLE | RUPT | A4050620 |
| 17 | MOSELOTTE | VAGNEY_NEW | A4140202 |
| 18 | MOSELOTTE | VAGNEY_OLD | A4142010 |
| 19 | MOSELLE | SAINT-NABORD | A4200630 |
| 20 | MOSELLE | EPINAL | A4250640 |
| 21 | THUR | WILDENSTEIN | A1402020 |
| 22 | THUR | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 23 | BEHINE | LAPOUTROIE | A2113010 |
| 24 | WEISS | KAYSERSBERG | A2120200 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|--------------|---------------------|------------|
| 1 | DOLLER | SEWEN_LERCHENMATT | A1202050 |
| 2 | DOLLER | SEWEN_VILLAGE | A1202030 |
| 3 | DOLLER | BURNHAUPT | A1242010 |
| 4 | PETITE-FECHT | STOSSWIHR_VILLAGE | A2023030 |
| 5 | FECHT | MUHLBACH | A2012020 |
| 6 | FECHT | WIHR-AU-VAL | A2030100 |
| 7 | FECHT | TURCKHEIM | A2040100 |
| 8 | LAUCH | LINTHAL_SAEGMATTEN2 | A1502040 |
| 9 | LAUCH | GUEBWILLER | A1522020 |
| 10 | MEURTHE | FRAIZE | A6001010 |
| 11 | MEURTHE | SAINT-DIE | A6051020 |
| 12 | CLEURIE | CLEURIE | A4173010 |

| NUMERO | COURS D'EAU | COMMUNE_LDT | CODSTATION |
|--------|---------------|-----------------|------------|
| 25 | GIESSEN | THANVILLE | A2312020 |
| 26 | LIEPVRETTE | LIEPVRE | A2332110 |
| 27 | GIESSEN | SELESTAT | A2352021 |
| 28 | ANDLAU | ANDLAU | A2512010 |
| 29 | BREUCHIN | PROISELIERE | U0415010 |
| 30 | RAHIN | PLANCHER-BAS | U1025010 |
| 31 | BASCHNEY | GRENDELBRUCH | A2750710 |
| 32 | STRENGBACH | RIBEAUVILLE | A2073010 |
| 33 | WISSBACH | WILLER-SUR-THUR | A1436910 |
| 34 | OGNON | SERVANCE | U1004010 |
| 35 | ROSEMONTTOISE | RIERVESCEMONT | U2345810 |
| 36 | SAVOUREUSE | GIROMAGNY | U2345020 |
| 37 | BRUCHE | RUSS_WISCHES | A2732010 |

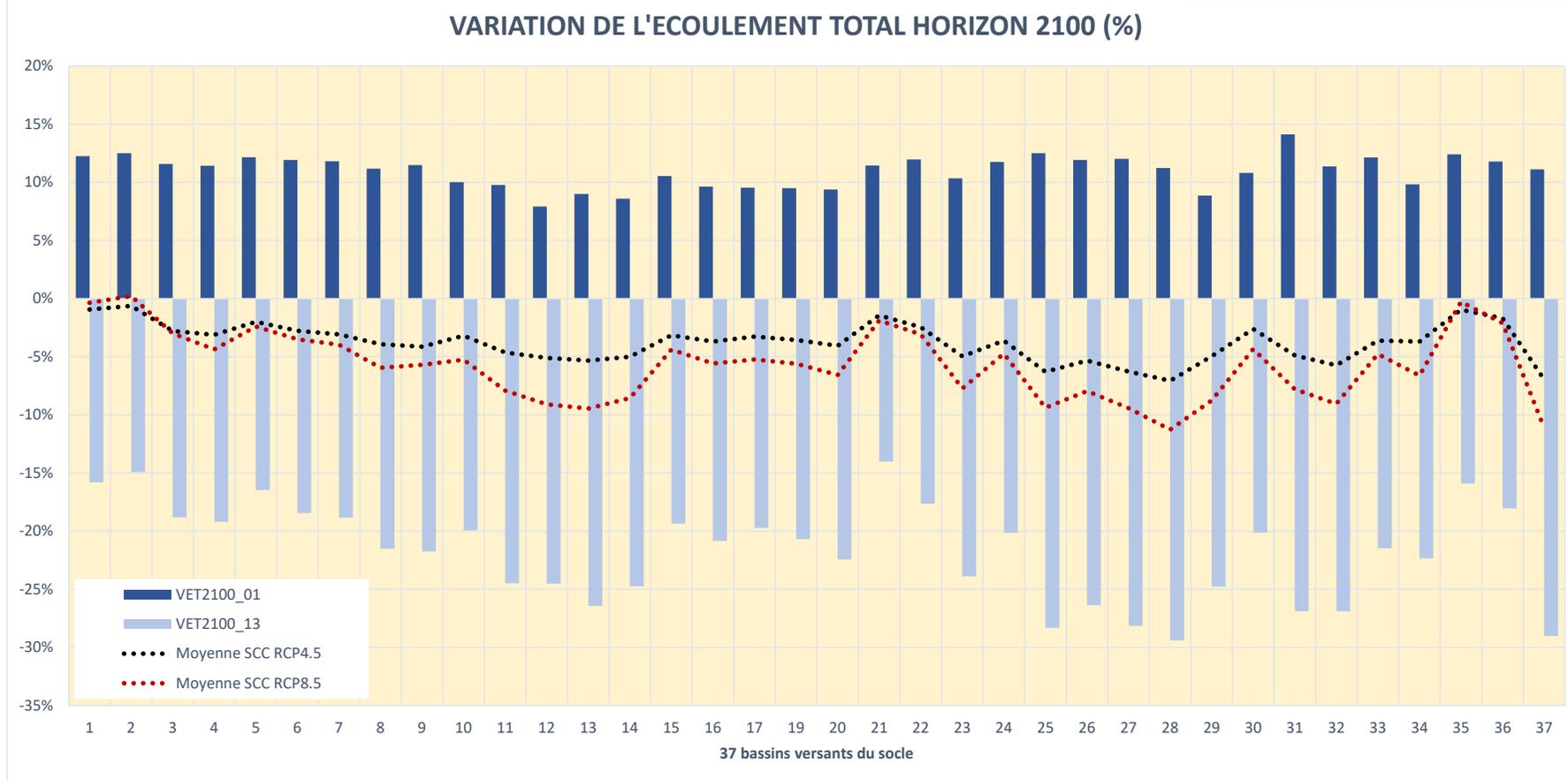


Figure 38 – Histogramme des variations entre la l'écoulement total sur la période future (2061-2100) et l'écoulement total sur la période de référence pour chaque sous bassin versant (2 projections extrêmes et moyennes des RCP 4.5 et 8.5)

4.3.4. Répartition spatiale de la variation d'écoulement total

Les cartes des Figure 39 et Figure 40 montrent la variation moyenne de l'écoulement total à l'horizon 2060 et 2100 pour chacun des bassins versants et pour l'ensemble des scénarios ; il s'agit d'une moyenne multi-scénarios pour RCP 4.5 (6 scénarios) et RCP 8.5 (8 scénarios). Les cartes présentées en annexe 2 ont été réalisées par interpolation des valeurs obtenues pour les 37 sous bassins versants considérés, en affectant les valeurs au centroïde des sous bassins versants.

La répartition spatiale des variations d'écoulement total attendues à l'horizon 2060 et 2100, indique les plus fortes variations :

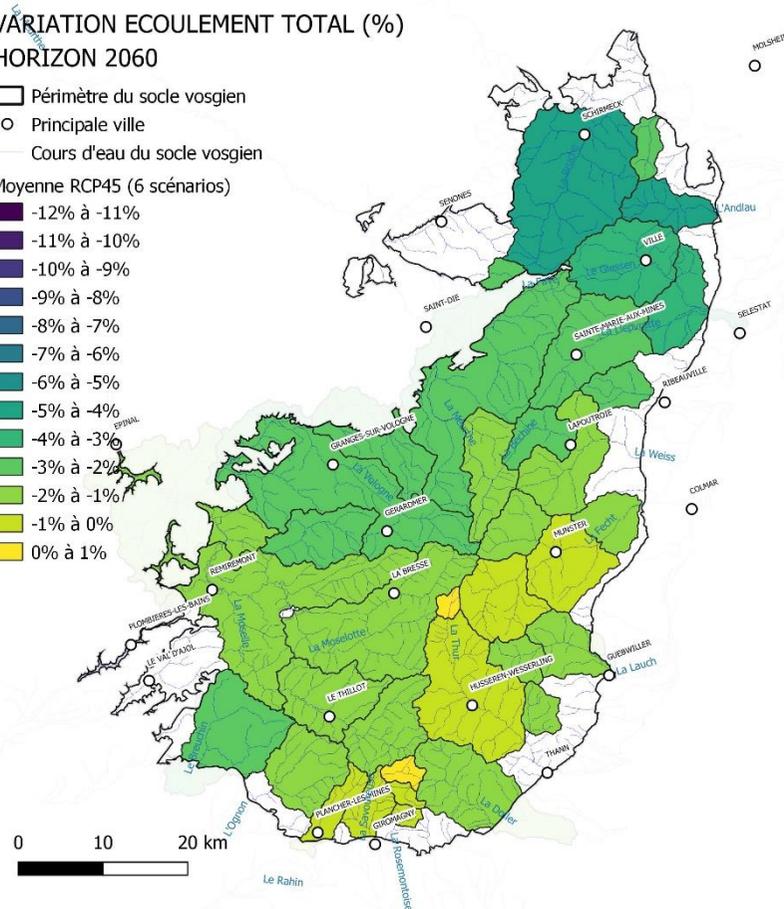
- sur le nord du massif vosgien, versant alsacien , les bassins versants du Giessen, de l'Andlau et la Bruche ;
- au centre ouest du massif vosgien, versant lorrain, la Meurthe amont, la Cleurie, la Neuné, la Vologne
- au sud-ouest du massif vosgien, versant franc-comtois, le Breuchin.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
HORIZON 2060

- Périmètre du socle vosgien
- Principale ville
- Cours d'eau du socle vosgien

Moyenne RCP45 (6 scénarios)

- 12% à -11%
- 11% à -10%
- 10% à -9%
- 9% à -8%
- 8% à -7%
- 7% à -6%
- 6% à -5%
- 5% à -4%
- 4% à -3%
- 3% à -2%
- 2% à -1%
- 1% à 0%
- 0% à 1%



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
HORIZON 2060

- Périmètre du socle vosgien
- Principale ville
- Cours d'eau du socle vosgien

Moyenne RCP85 (8 scénarios)

- 12% à -11%
- 11% à -10%
- 10% à -9%
- 9% à -8%
- 8% à -7%
- 7% à -6%
- 6% à -5%
- 5% à -4%
- 4% à -3%
- 3% à -2%
- 2% à -1%
- 1% à 0%
- 0% à 1%

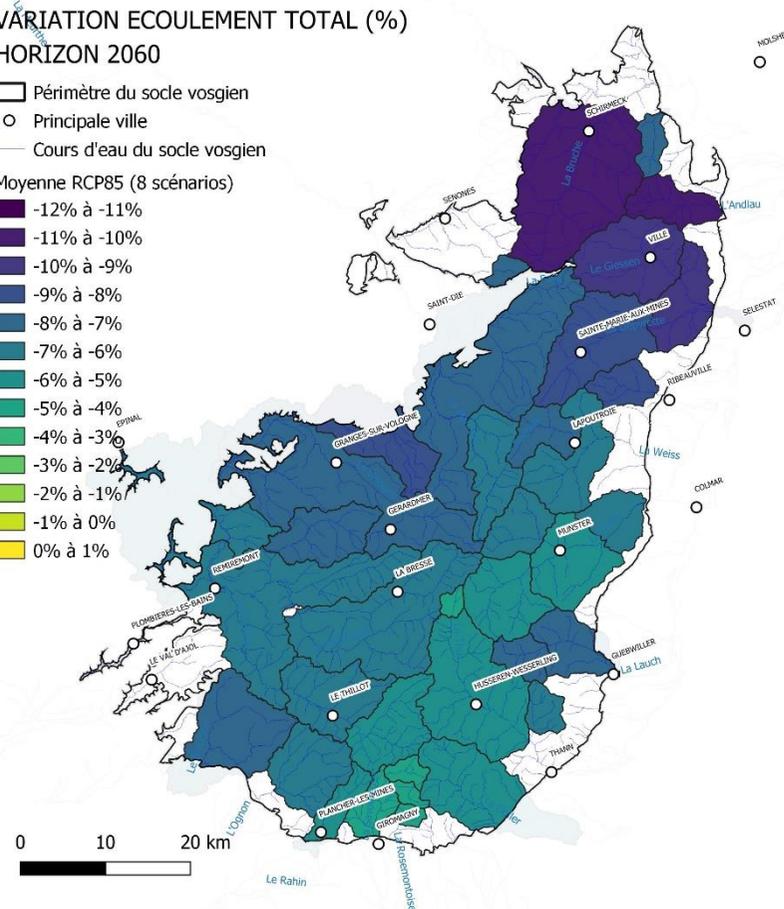


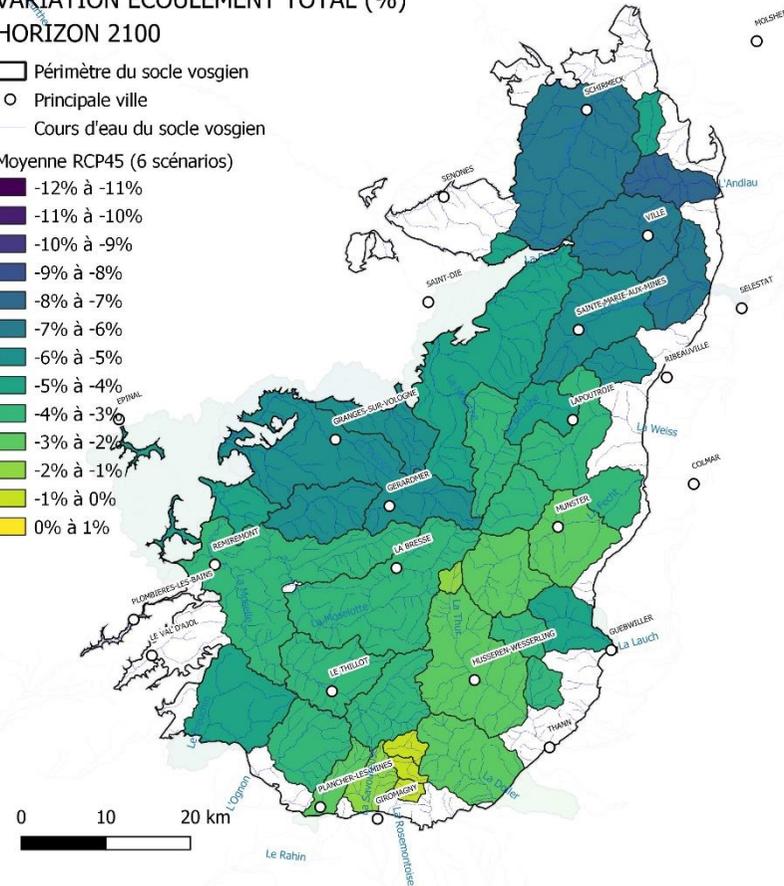
Figure 39 - HORIZON 2060 - Différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
HORIZON 2100

- Périmètre du socle vosgien
- Principale ville
- Cours d'eau du socle vosgien

Moyenne RCP45 (6 scénarios)

- -12% à -11%
- -11% à -10%
- -10% à -9%
- -9% à -8%
- -8% à -7%
- -7% à -6%
- -6% à -5%
- -5% à -4%
- -4% à -3%
- -3% à -2%
- -2% à -1%
- -1% à 0%
- 0% à 1%



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
HORIZON 2100

- Périmètre du socle vosgien
- Principale ville
- Cours d'eau du socle vosgien

Moyenne RCP85 (8 scénarios)

- -12% à -11%
- -11% à -10%
- -10% à -9%
- -9% à -8%
- -8% à -7%
- -7% à -6%
- -6% à -5%
- -5% à -4%
- -4% à -3%
- -3% à -2%
- -2% à -1%
- -1% à 0%
- 0% à 1%

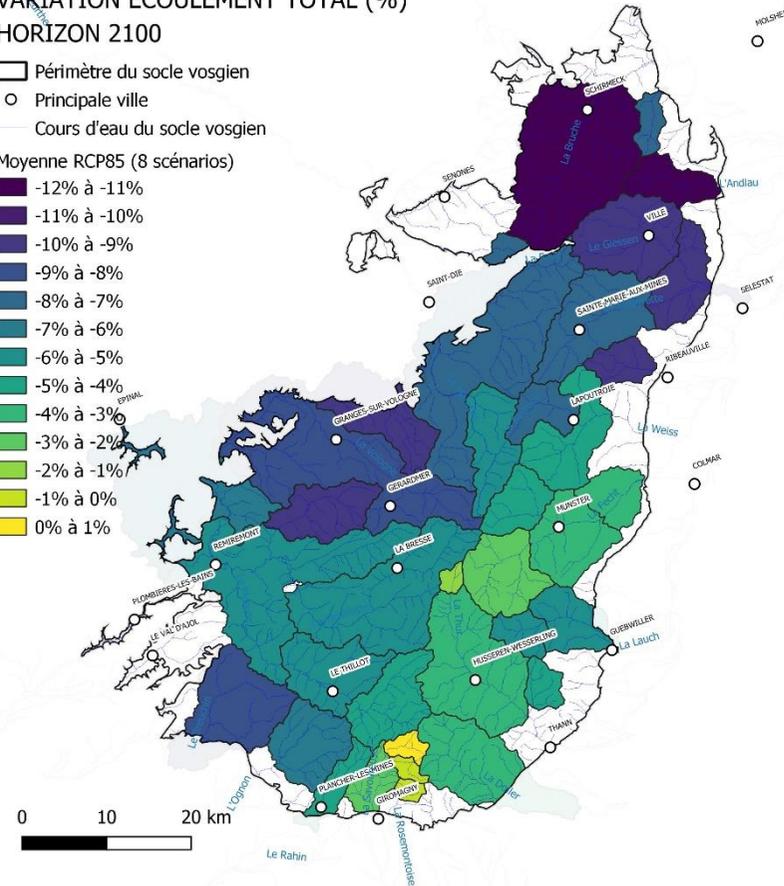


Figure 40 - HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyennes multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5

4.3.5. Impact sur la répartition mensuelle des débits

Sur la base des modélisations EROS réalisées selon les 14 projections climatiques retenues, on a procédé à une analyse statistique qui vise à déterminer les débits moyens mensuels pour chaque bassin versant, chaque projection climatique (ainsi que la moyenne multi-scénarios), chacune des trois périodes (période de référence, périodes futures 2021-2060 et 2061 et 2100). L'annexe 3 présente les graphiques comparatifs pour les 37 bassins versants étudiés. D'un bassin versant à l'autre les débits moyens mensuels modélisés peuvent être très différents en fonctions des différents scénarios. Pour la moyenne tout bassins confondus, les variations sont également très différentes d'un scénario à un autre.

Pour les scénarios qui présentent des excédents (scénarios n°1 et 8 - Figure 41), la répartition mensuelle des débits de cours d'eau se voit impactée notamment sur la période printemps-été par une baisse des débits (augurant des assecs bien plus fréquents et sévères) et sur la période automne-hiver par une augmentation des débits (risques d'inondation vraisemblablement accrus). Les maxima de déficit sont atteints en juillet pour le SC01 et en août pour le SC08. Les maxima d'excédent sont atteints en septembre pour le SC01 et en novembre pour le SC08.

Pour les scénarios qui présentent les déficits les plus importants (scénarios n°13 et 9 - Figure 43), la répartition mensuelle des débits de cours d'eau présente des différences notables qui illustre toute la complexité des études prospectives :

- pour le scénario n°9, l'impact est plus important fin d'hiver début de printemps en période de hautes eaux (max de février à avril) ;
- pour le scénario n°13, l'impact est plus important à l'automne en période d'étiage (max en septembre à octobre) avec un décalage de 1 à 2 mois sur la période des basses eaux (septembre-octobre au lieu de juillet-août actuellement).

Les débits futurs en moyenne multi-scénarios (Figure 43) seraient, par rapport à la période de référence, globalement moins importants de mars à octobre et plus importants en hiver (décembre à février). La variation moyenne entre la période future et la période de référence seraient de l'ordre de :

- - 5 % à l'horizon 2060 et - 9 % à l'horizon 2100 → pour la moyenne des 6 scénarios RCP 4.5 ;
- - 12 % à l'horizon 2060 et - 17 % à l'horizon 2100 → pour la moyenne des 8 scénarios RCP 8.5 ;

La répartition mensuelle de ces variations est comprise entre :

- + 7 % à + 12 % d'excédent en janvier et - 17 % et - 30 % de déficit en juillet → pour la moyenne des 6 scénarios RCP 4.5 ;
- + 4 % à + 20 % d'excédent en janvier et - 27 % et - 48 % de déficit en juillet → pour la moyenne des 8 scénarios RCP 8.5 ;

Les figures suivantes illustrent la répartition spatiale des variations de débit par sous bassin versant pour deux mois de l'année les plus impactés janvier (le plus excédentaire en moyenne multi-scénarios - Figure 44 et Figure 45) et juillet (le plus déficitaire en moyenne multi scénarios - Figure 46 et Figure 47). On observe que les ressources superficielles sur la moitié sud du massif vosgien sont plus impactées par des augmentations en janvier. En juillet, l'impact par les diminutions de débits sont plus importantes au nord du massif vosgien (bassin du Giessen) et sur la moitié sud du bassin.

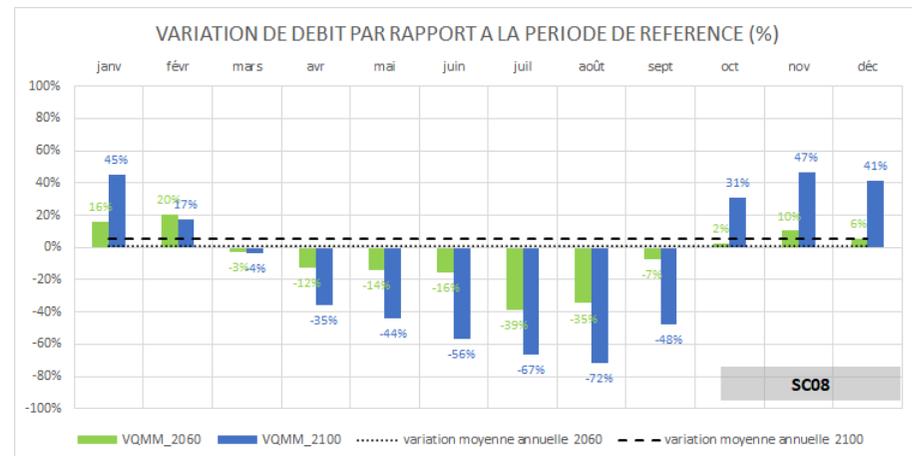
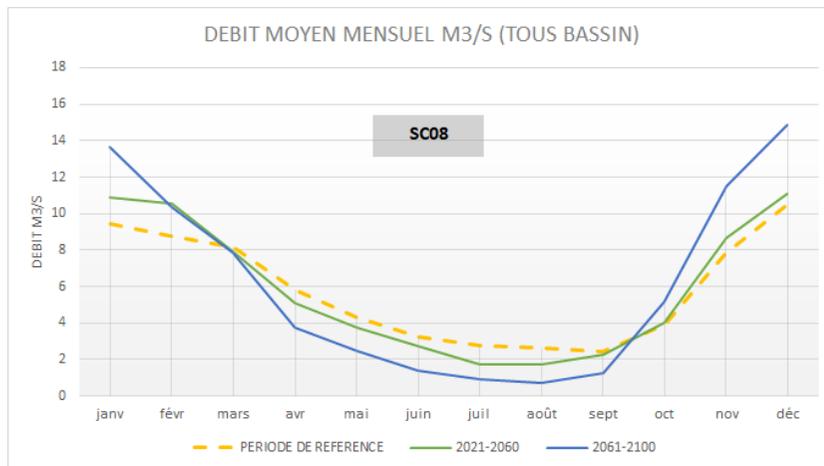
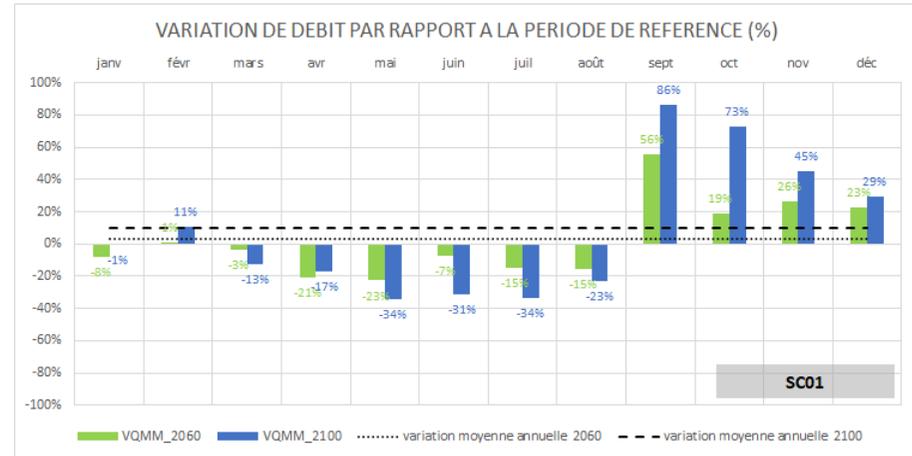
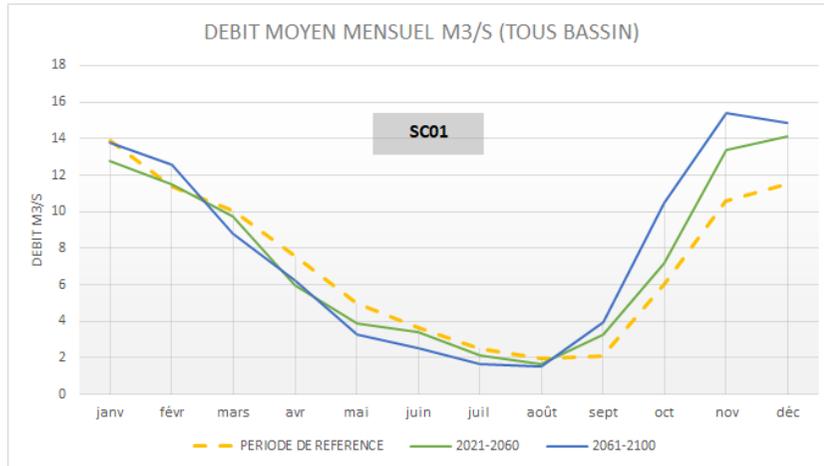


Figure 41 - Répartition mensuelle des débits et des variations pour deux scénarios excédentaires [SC01_rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon et SC08_rcp85_CanESM2_dayon pour 37 BV du socle]

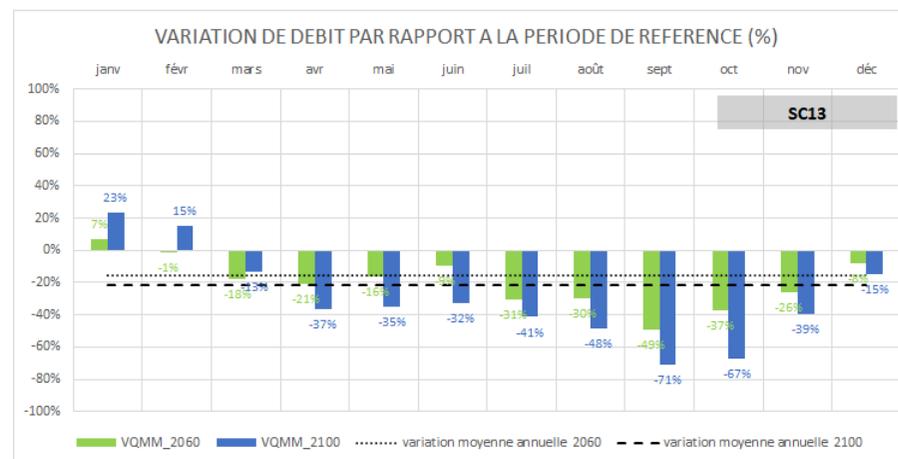
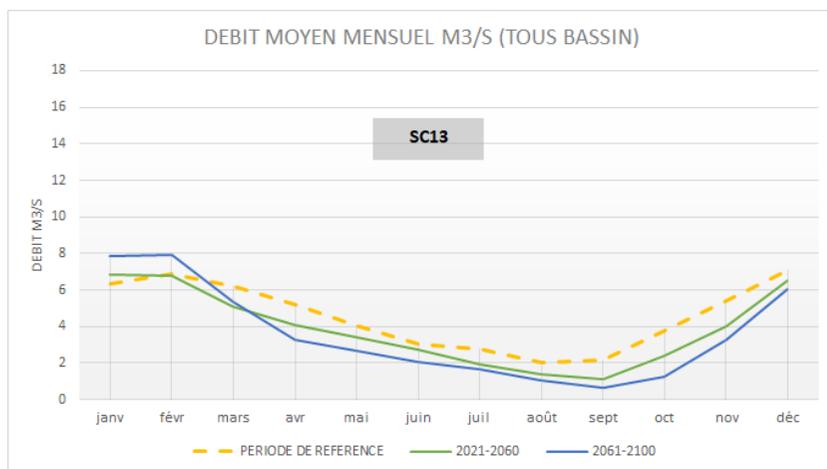
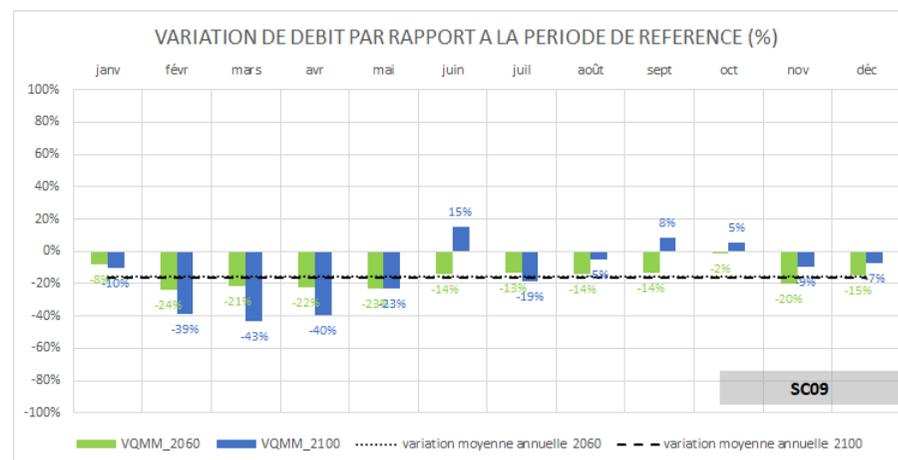
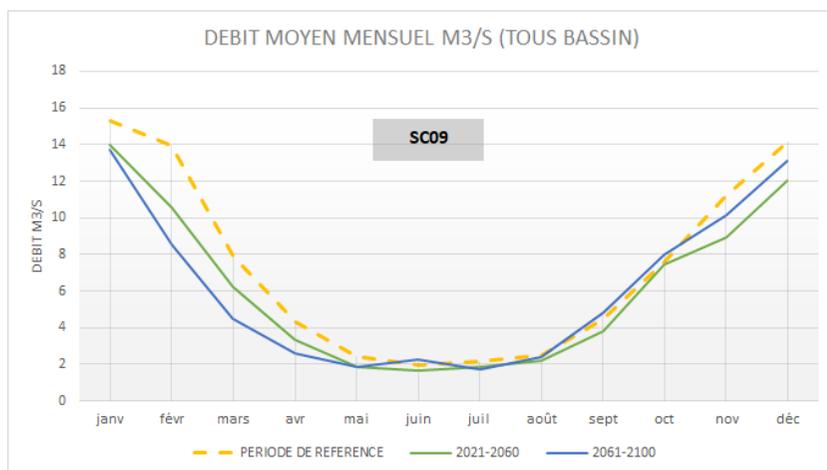


Figure 42 - Répartition mensuelle des débits et des variations pour deux scénarios déficitaires [SC09_rcp85_NorESM1-M_dayon et SC13_rcp85_NorESM1-M_dsclim pour 37 BV du socle]

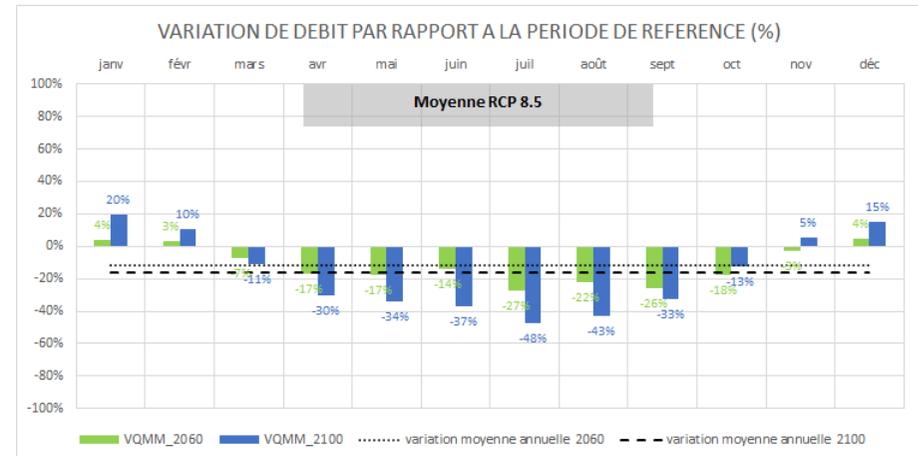
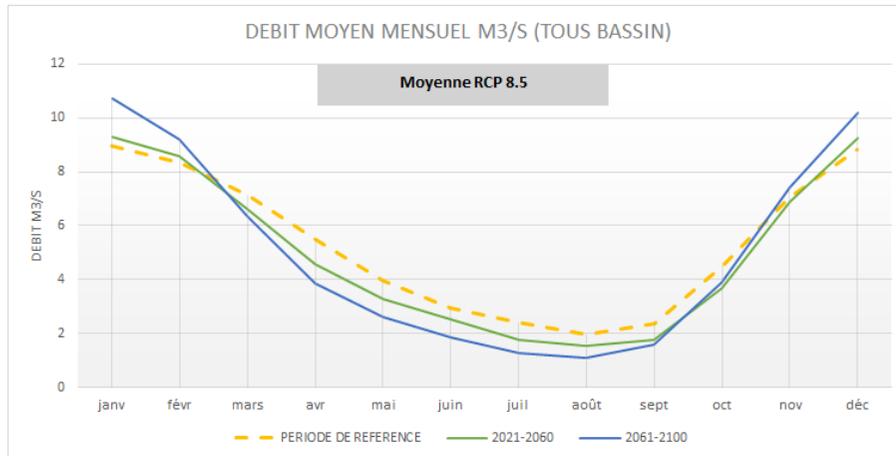
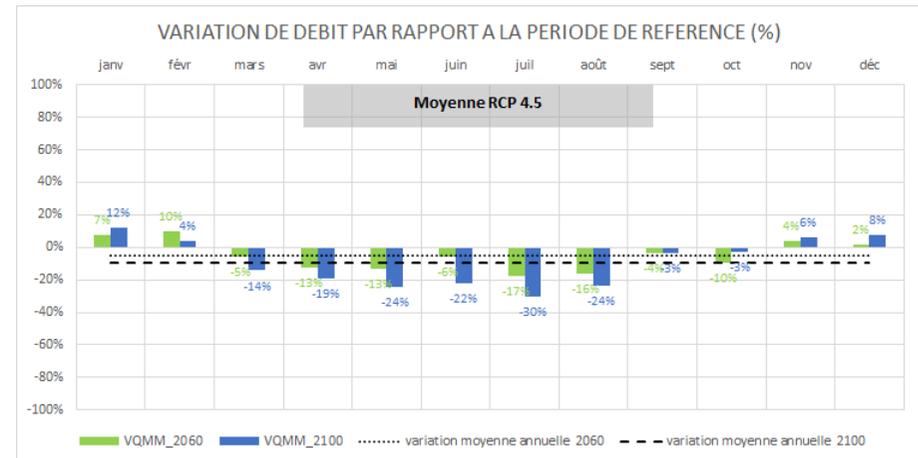
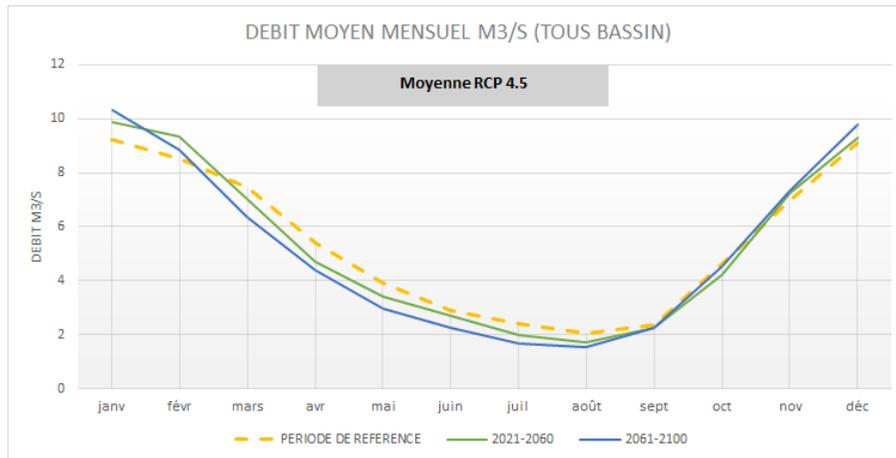


Figure 43 – Répartition mensuelle des débits et des variations [moyenne multi-scénarios pour RCP 4.5 et 8.5 et tout bassins confondus]

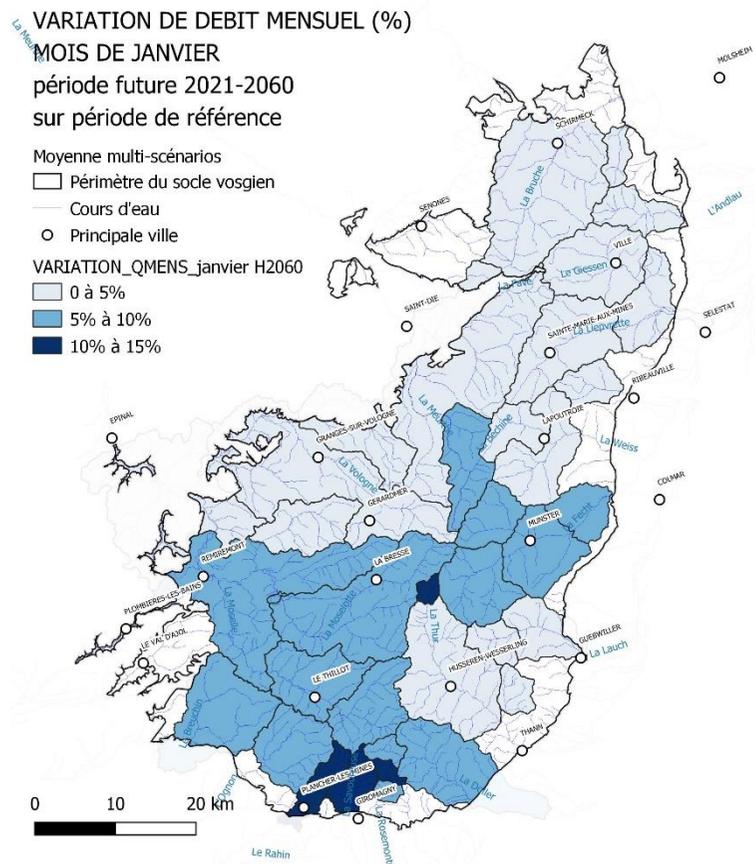


Figure 44 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le **mois de janvier** pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios

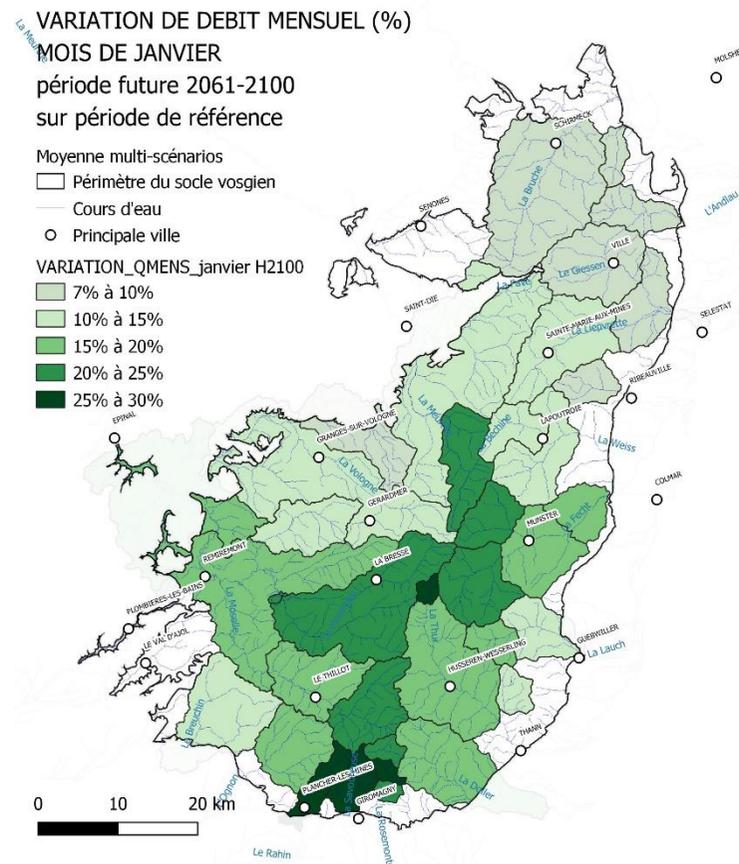


Figure 45 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le **mois de janvier** pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios

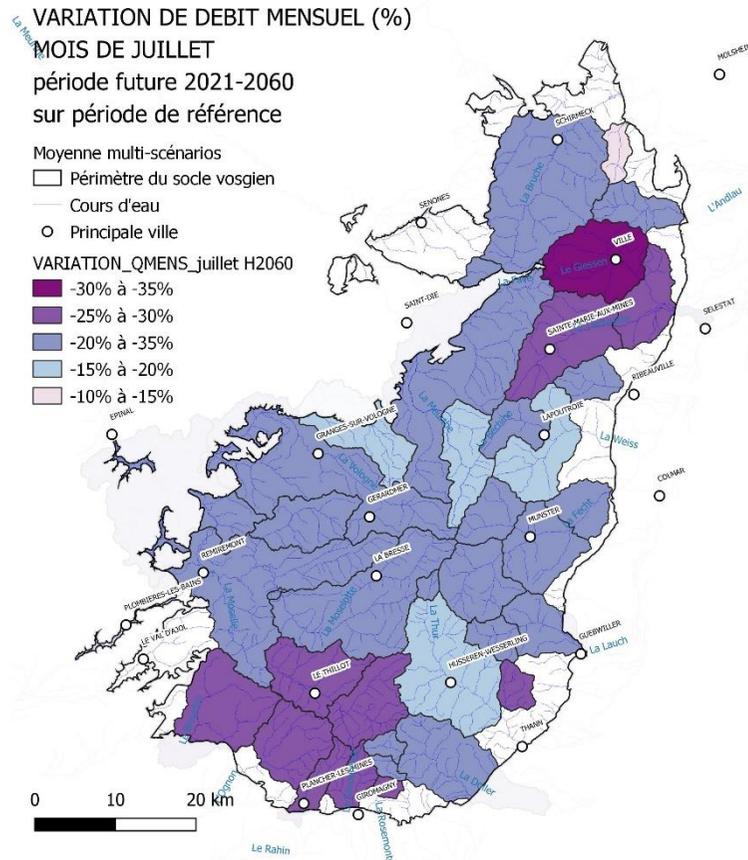


Figure 46 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le **mois de juillet** pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios

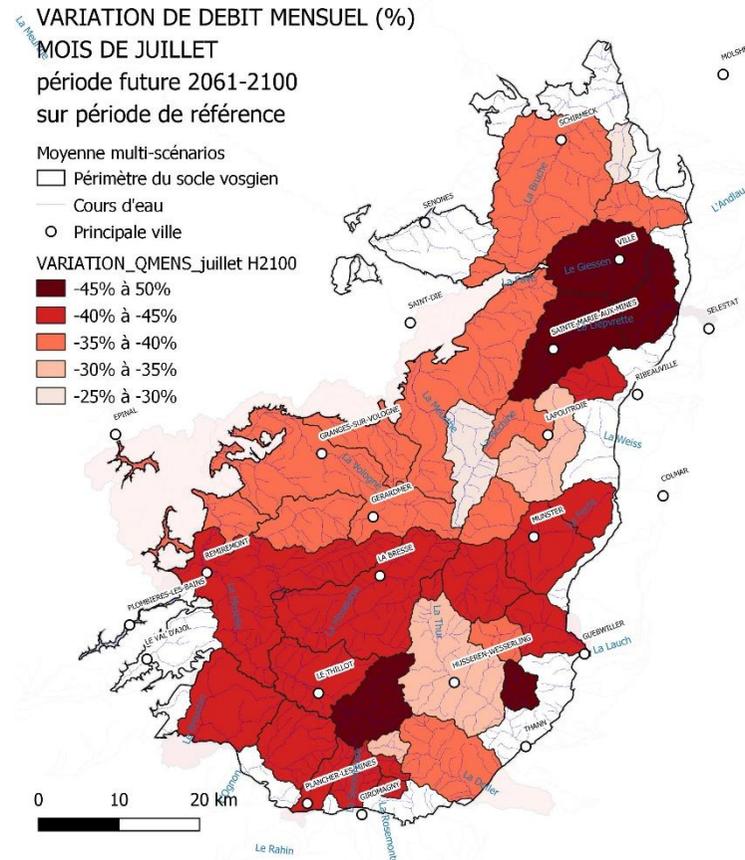


Figure 47 - Différence relative de la moyenne interannuelle de débit pour le **mois de juillet** pour la période 2061-2100 par rapport à la période de référence. Moyenne multi-scénarios

5. Conclusions et perspectives

Ce rapport présente une évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif Vosgien. Cet impact est évalué à l'aide de scénarios climatiques appliqués sur des modélisations hydrologiques mises en œuvre sur 37 sous bassins versants délimités au sein du socle vosgien.

Le calage et la validation du modèle hydrologique semi-global [EROS](#), utilisé dans le cadre de cette étude sur le socle vosgien, permet de simuler les différents termes du bilan sur la période actuelle (1965-2019) et notamment les débits au pas de temps journalier sur chacun des sous bassins définis. La qualité variable des simulations obtenues suivant les sous bassins tient à la fois à la qualité des chroniques de débits disponibles et au fait que le modèle semi-global « **EROS socle vosgien** » ne prend pas en compte certains processus tels que les variations des niveaux de nappe (exploitation des chroniques disponibles non concluante), l'impact des prélèvements et des rejets (chroniques non disponibles à ce jour) ou l'anthropisation des cours d'eau.

Les bilans hydrologiques déterminés par la modélisation EROS ont mis en évidence que les écoulements souterrains annuels représentent de l'ordre de 45 % de l'écoulement total et 41 % de la pluie efficace annuelle. Il a été observé une disparité importante entre les sous bassins versants notamment concernant l'évolution des écoulements souterrains entre la partie amont et la partie aval des bassins versants. Pour certains sous bassins versants, la productivité des aquifères (qui s'évalue en contexte de socle en fonction de la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du cours d'eau) apparaît très faible pour les sous bassins situés en aval en comparaison de celle estimée pour les sous bassins situés en amont (Doller, Lauche, Cleurie, Thur) et a contrario la productivité devient plus importante vers l'aval pour d'autres bassins (Fecht, Meurthe, Moselle, Weiss, Giessen).

Les projections climatiques retenues dans le cadre du projet « Ressource en eau des Vosges » correspondent à une sélection mise à disposition par Météo France (DRIAS) et dont la construction repose sur la combinaison 2 scénarios d'émission RCP 4.5 et RCP 8.5 (le plus pessimiste), 2 méthodes de régionalisation statistiques « DAYON » et « DSCLIM » et 4 modèles climatiques (Beijing Climate Center Climate System Model, Canadian Earth System Model, Norwegian Earth System Model, Institut Pierre Simon Laplace Climate Model).

L'impact du changement climatique, tel que simulé avec le modèle « **EROS socle vosgien** » selon les 14 scénarios climatiques retenus, pourrait se traduire (en dehors du scénario le plus optimiste SC01 qui prévoit un excédent de recharge de + 5 %) par :

- une baisse de la recharge future comprise entre - 1 % et - 21 % avec en moyenne multi-scénarios - 6 % à l'horizon 2060 et - 9 % à l'horizon 2100 ;
- une dégradation entre 2060 et 2100, mise en évidence par l'augmentation du nombre de sous bassins versants concernés par un déficit de recharge inférieur à - 10 % (on passe de 18 % en 2060 à 47 % en 2100) ;
- des sous bassins avaux plus particulièrement impactés par la baisse de recharge tels que le Giessen et la Fecht sur le versant alsacien et plus généralement le nord du massif vosgien (y compris sous bassins de la Bruche et de la Meurthe amont).

Les résultats de l'analyse concernant l'impact du changement climatique sur le débit des cours d'eau à l'échelle annuelle (ou écoulement total selon les termes du bilan hydrologique EROS) montrent :

- une diminution des débits annuels (moyenne sur tous les sous bassins versants) pour la plupart des scénarios jusqu'à - 15 % en 2060 et - 20 % en 2100 pour le plus pessimiste ;
- une augmentation des débits annuels (moyenne sur tous les sous bassins versants) pour 4 scénarios en particulier jusqu'à + 3 % en 2060 et + 10 % en 2100 pour le plus extrême ;
- une dégradation entre 2060 et 2100, qui se traduit dans l'augmentation du nombre de sous bassins versants concernés par un déficit de débit annuel inférieur à - 10 % (on passe de 23 % en 2060 à 45 % en 2100) ;
- un impact plus important à l'horizon 2100 sur les cours d'eau situés au nord du socle vosgien (versant alsacien avec le Giessen, l'Andlau et la Bruche), au centre ouest du massif (versant lorrain avec la Meurthe amont, la Cleurie, la Neuné et la Vologne) et au sud-ouest du massif (versant franc-comtois avec le Breuchin).

La répartition mensuelle des débits de cours d'eau se trouveraient également impactée par le changement climatique avec :

- une variation des débits moyens mensuels futurs en moyenne multi-scénarios de - 8 % à l'horizon 2060 et - 12 % à l'horizon 2100 ;
- des disparités mensuelles avec notamment une baisse des débits sur la période printemps-été (augurant en période d'étiage des assecs bien plus fréquents et sévères) et une augmentation des débits sur la période automne-hiver (risques d'inondation vraisemblablement accrus) ;
- des variations en moyenne multi-scénarios, respectivement à l'horizon 2060 et 2100, comprises entre +5 % à +16 % d'excédent en janvier et - 23 % et - 40 % de déficit en juillet.

Ainsi selon les projections étudiées, des tensions croissantes sur les usages de la ressource en eau dans le futur pourraient par conséquent être observées sous l'effet du changement climatique notamment en période de basses eaux.

Ces résultats en valeur moyenne ne doivent pas masquer le fait que l'incertitude associée au modèle de climat s'accroît pour les simulations de la période future par rapport à celle de la période de référence et que l'incertitude est plus importante en hiver et en été qu'au printemps et en automne.

Enfin de fortes disparités peuvent apparaître sur certains sous bassins notamment du fait de la variabilité spatiale et temporelle des événements pluviométriques extrêmes mais aussi à cause des différences de comportement entre les sous bassins amont et aval.

En conclusion, l'ensemble de ces résultats doit être manipulé avec précaution dans la mesure où la démarche adoptée pour les obtenir intègre beaucoup de sources d'incertitude, certaines liées directement aux projections climatiques comme la difficulté des modèles de climat à simuler la situation présente et d'autres qui sont inhérentes aux hypothèses de travail et aux approches adoptées pour le calcul de la recharge.

Ce travail présente cependant l'avantage de fournir une première vision de l'évolution de la recharge future et de la vulnérabilité des aquifères de socle vis-à-vis du changement climatique. Cette vulnérabilité est probablement plus importante pour les nappes du socle cristallin ou métamorphique dont la recharge dépend essentiellement des précipitations que pour celles qui sont en relation hydraulique avec les formations alluviales, fluvio-glaciaires ou morainiques.

La connaissance des ressources en eau à l'échelle du socle vosgien telle que décrite dans le volet 1 de l'étude (Rapport BRGM/RP-69482-FR, Chabart et al., 2020) et l'appréciation de la vulnérabilité vis-à-vis du changement climatique réalisé dans le volet 2 de l'étude (présent rapport) revêt une grande importance pour les gestionnaires de la ressource en eau du territoire car elle pourrait leur permettre d'anticiper d'éventuelles situations de futurs déficits.

Ce travail mérite d'être approfondi à l'avenir en particulier pour (1) prendre en compte les fluctuations piézométriques et leur utilisation en tant qu'outil de diagnostic de la dynamique saisonnière et (2) pour tester l'intérêt d'intégrer à l'analyse l'influence des prélèvements et leur évolution sur chacun des bassins.

Le recours à la modélisation semi-globale semble être une perspective intéressante pour suivre l'évolution des ressources sur le long terme, notamment des phénomènes extrêmes (hautes eaux / basses eaux) et assurer une gestion adaptée à la problématique du socle vosgien. Elle nécessite néanmoins de disposer :

- de nouvelles chroniques piézométriques sur des ouvrages représentatifs des formations de socle → pour rappels les modélisations effectuées en tenant compte des piézomètres actuellement suivis à GERARDMER et XONRUPT n'ont pas permis d'obtenir des résultats satisfaisant ;
- des chroniques sur des débits de sources représentatives des formations de socle → les chroniques actuellement disponibles sont encore trop courtes pour mettre en œuvre une modélisation satisfaisante ;
- des chroniques de prélèvements géoréférencés sur les cours d'eau et les nappes → les valeurs actuellement disponibles via la [BNPE](#) (Banque nationale des prélèvements quantitatifs en eau) sont annuelles et affectées à une commune (pas de géoréférencement).

La prise en compte de l'anthropisation reste un élément déterminant mais actuellement très complexe à modéliser notamment en ce qui concerne la période future. L'étude actuellement en cours sur la recharge à l'échelle du bassin Rhin-Meuse devrait permettre d'avancer sur le sujet.

Moyennant la mobilisation des acteurs du territoire autour de cette problématique des ressources en eau du Massif Vosgien, la volonté d'organiser sur le long terme l'acquisition et la bancarisation des données nécessaires à l'amélioration du modèle semi-global « **EROS socle vosgien** », il est ainsi envisageable de créer un outil d'aide à la décision à l'échelle des certains bassins versants à enjeux (citons par exemple la Fecht ou le Giessen, dont on a déterminé que l'impact y serait plus important) et à terme à l'échelle plus globale du socle vosgien. Le projet d'observatoire des eaux superficielles envisagé par le Parc Naturel des Ballons des Vosges pourrait être un catalyseur important.

6. Bibliographie

Bibliographie scientifique de référence pour les projections climatiques et la régionalisation

BOE J. (2007) - Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France, phd, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 23 November. [online] Available from: <http://thesesups.ups-tlse.fr/227/> (Accessed 18 January 2021), 2007.

BOE J., TERRAY L. (2008) - Régimes de temps et désagrégation d'échelle. La Houille Blanche, 2, doi:10.1051/lhb:2008016L05702.

BOÉ J., TERRAY L., HABETS F., MARTIN E. (2009) - Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. Water Resour. Res., 45, W08426.Boé, J., Terray, L., Habets, F.

BRL, IRSTEA, Météo-France (2011) – Explore 2070 – Eau et changement climatique. Rapport d'étape n°2 : hydrologie de surface.

DAYON G., BOÉ J. AND MARTIN E. (2015) - Transferability in the future climate of a statistical downscaling method for precipitation in France, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(3), 1023–1043, doi :10. 1002/2014JD022236, 2015.

DAYON G., BOÉ J., MARTIN É. AND GAILHARD J. (2018) - Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties, Comptes Rendus Geoscience, 350(4), 141–153, doi:10.1016/j.crte.2018.03.001, 2018.

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](#). Publications de The Intergovernmental Panel on Climate Change disponible en ligne <https://www.ipcc.ch/report>

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. Publications de The Intergovernmental Panel on Climate Change disponible en ligne <https://www.ipcc.ch/report>

OUZEAU G., DEQUE M., JOUINI M., PLANTON S. AND VAUTARD R. (2014) - Le climat de la France au XXIème siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer, Direction générale de l'Energie et du Climat, 2014.

PAGÉ C., TERRAY L. ET BOÉ J. (2009) :- dsclim : A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, CERFACS, Toulouse, France.

VAN VUUREN D., STEHFEST E., DEN ELZEN M.G.J., KRAM T., VAN VLIET J., DEETMAN S., VAN RUIJVEN B. (2011) – RCP2.6 : exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. Climatic Change, 109(1), 95. Doi: 10.1007/s10584-011-0152-3

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 JP., 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

ZORITA E., HUGHES J. P., LETTEMAIER D. P. AND STORCH H. VON (1995) - Stochastic Characterization of Regional Circulation Patterns for Climate Model Diagnosis and Estimation of Local Precipitation, *Journal of Climate*, 8(5), 1023–1042, doi:10.1175/1520-0442(1995)008<1023:SCORCP>2.0.CO;2, 1995.

Autres références bibliographiques

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 et al. (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., L. ZEROUALI V. BAILLY-COMTE (2016) - Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport final. BRGMIRP-65807 ;

CHABART M., FRANÇOIS D., WYNS R., BRAIBANT G., FAUCHER J., LAFONT A., LAMBERT B., THIERY D. (2020) – Caractérisation de la ressource en eau du socle vosgien. Rapport final. BRGM/RP-69482-FR, 301 p., 189 fig., 11 tabl., 6 ann.

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)

LANINI S., CABALLERO Y. (2015) - Manuel utilisateur ESPERE, version 1.5. Rapport BRGM/RP-65164-FR. 31 p.

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

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.

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. (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>.

DEZSI Ș, 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>.

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>.

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

MARDHEL V., GRAVIER A. (2005) - Carte de vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du bassin Seine-Normandie. BRGM/RP-54148-FR, 82 p., 3 ann. [Lien](#).

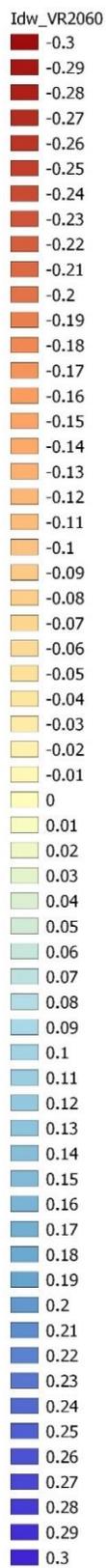
MARDHEL V., PINSON S., ALLIER D. (2021) Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the french territory. *Journal of Hydrology*, 592:125609, 2021.

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](#).

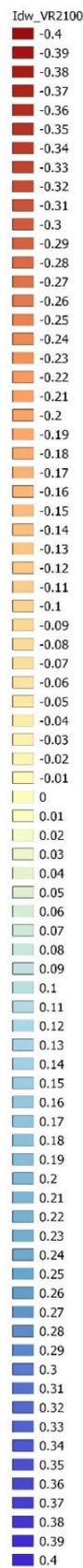
Annexe 1 :**Cartographie de la différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 et 2061-2100 par rapport à la période de référence sur le socle vosgien**

| Annexe | Numéro attribué à la projection climatique | Scénario d'émission | Modèle climatique | Méthode de régionalisation statistique |
|---------------|---|----------------------------|--------------------------|---|
| Annexe 1-1 | SC01 | rcp45 | bcc-csm1-1-m | DAYON |
| Annexe 1-2 | SC02 | rcp45 | CanESM2 | DAYON |
| Annexe 1-3 | SC03 | rcp45 | NorESM1-M | DAYON |
| Annexe 1-4 | SC04 | rcp45 | bcc-csm1-1-m | DSCLIM |
| Annexe 1-5 | SC05 | rcp45 | CanESM2 | DSCLIM |
| Annexe 1-6 | SC06 | rcp45 | NorESM1-M | DSCLIM |
| Annexe 1-7 | SC07 | rcp85 | bcc-csm1-1-m | DAYON |
| Annexe 1-8 | SC08 | rcp85 | CanESM2 | DAYON |
| Annexe 1-9 | SC09 | rcp85 | NorESM1-M | DAYON |
| Annexe 1-10 | SC10 | rcp85 | IPSL-CM5A-MR | DAYON |
| Annexe 1-11 | SC11 | rcp85 | bcc-csm1-1-m | DSCLIM |
| Annexe 1-12 | SC12 | rcp85 | CanESM2 | DSCLIM |
| Annexe 1-13 | SC13 | rcp85 | NorESM1-M | DSCLIM |
| Annexe 1-14 | SC14 | rcp85 | IPSL-CM5A-MR | DSCLIM |

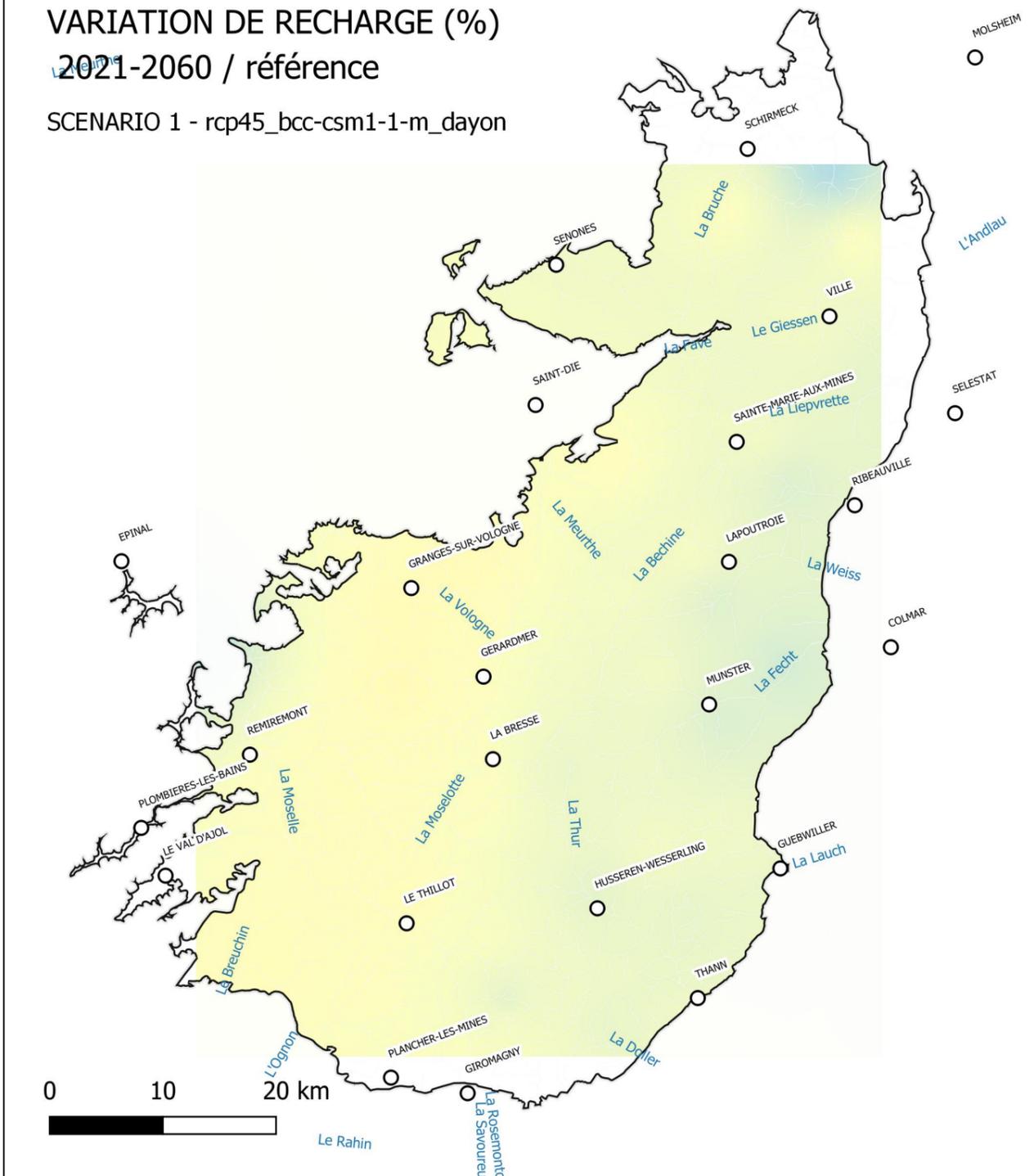
LEGENDE VARIATION DE RECHARGE HORIZON 2060



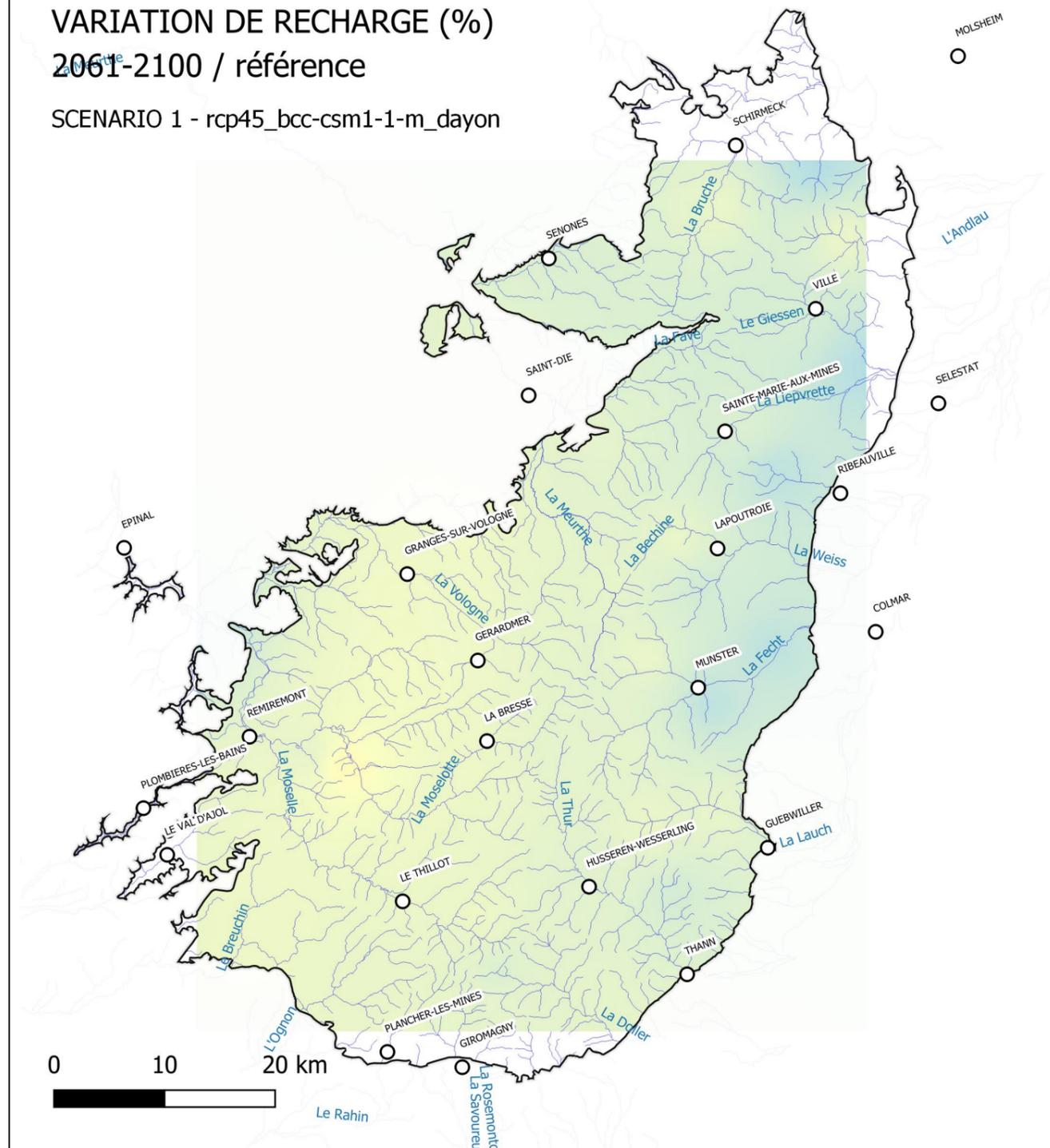
LEGENDE VARIATION DE RECHARGE HORIZON 2100



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.



HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

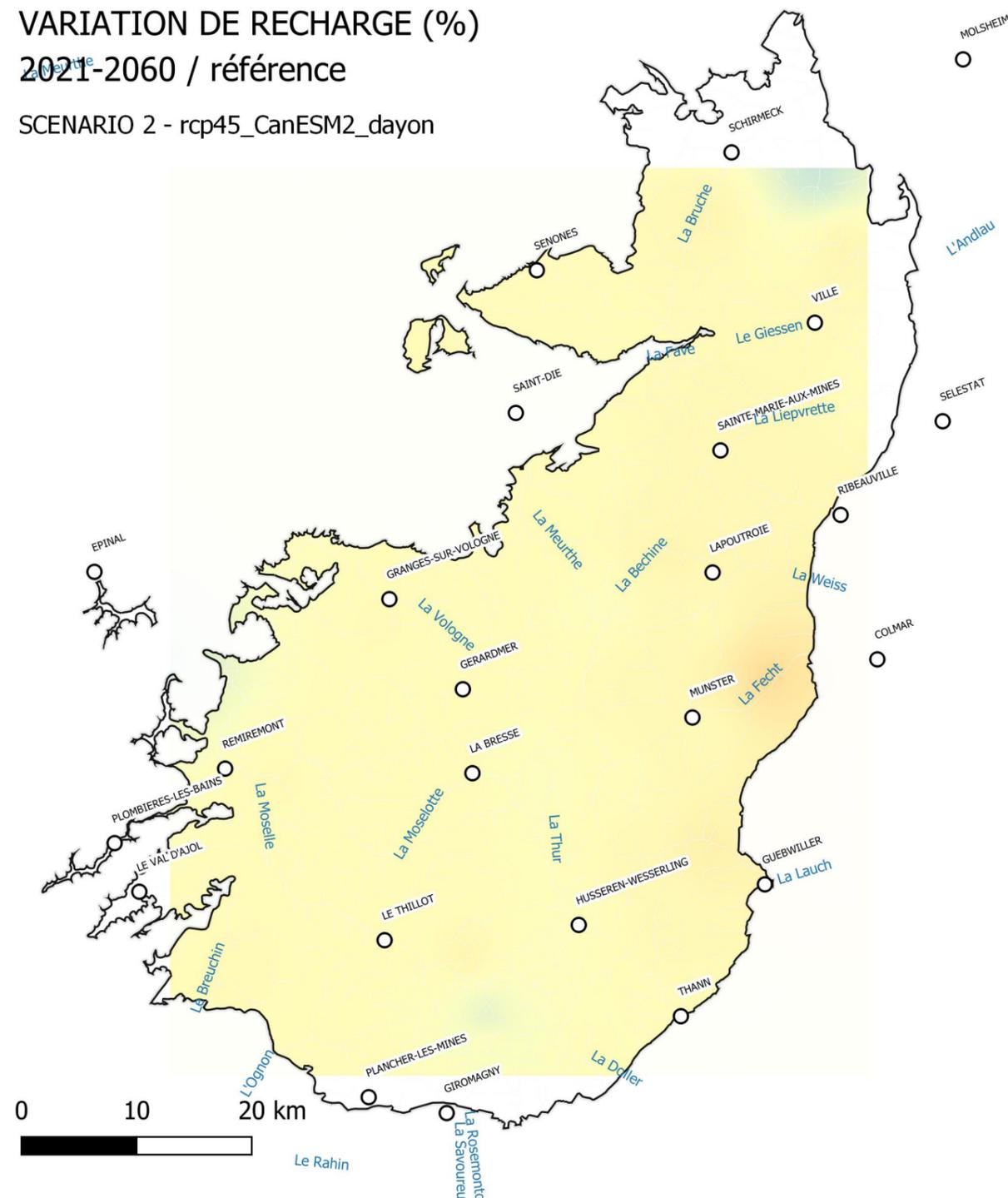


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

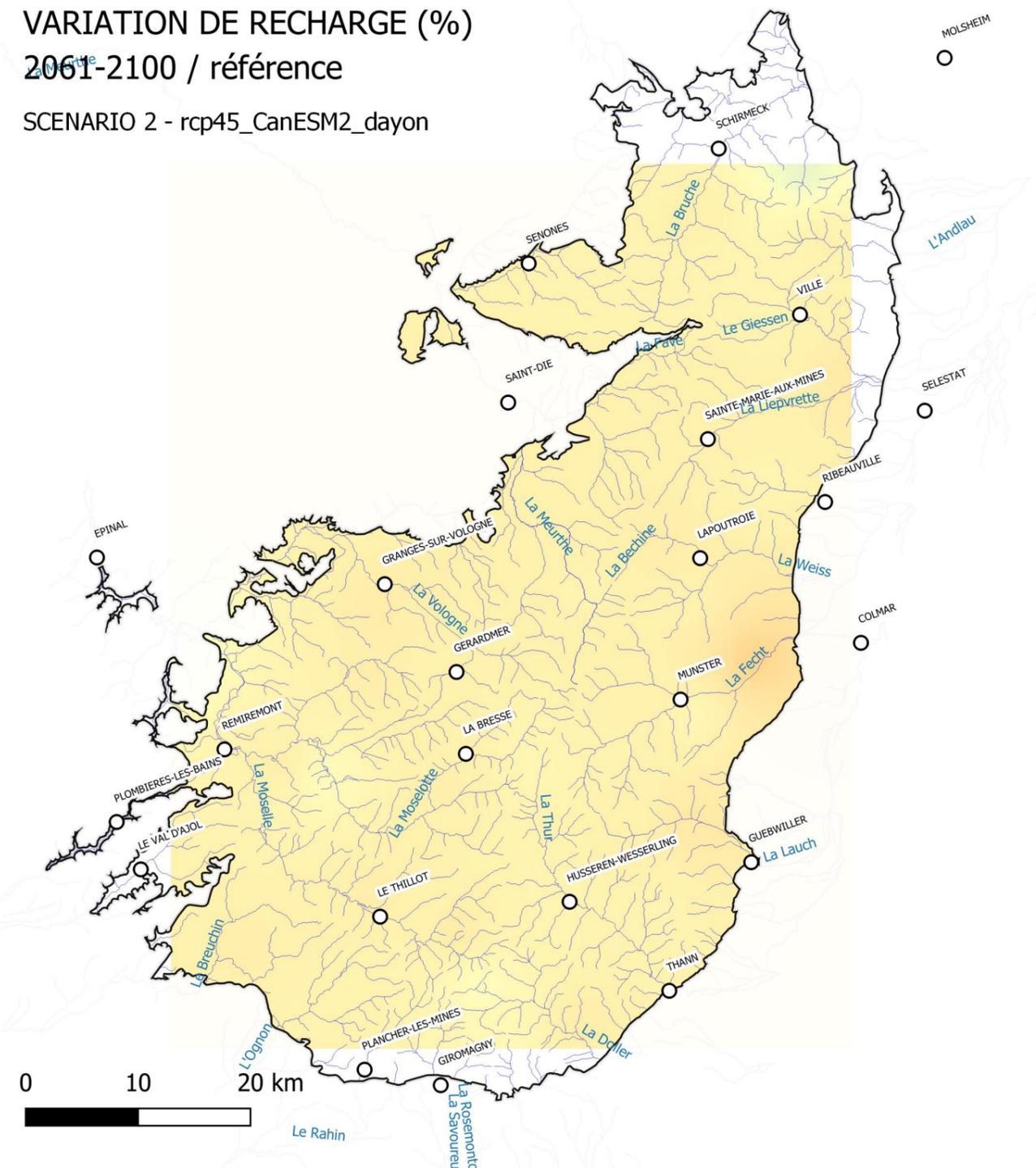
VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 2 - rcp45_CanESM2_dayon



VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 2 - rcp45_CanESM2_dayon

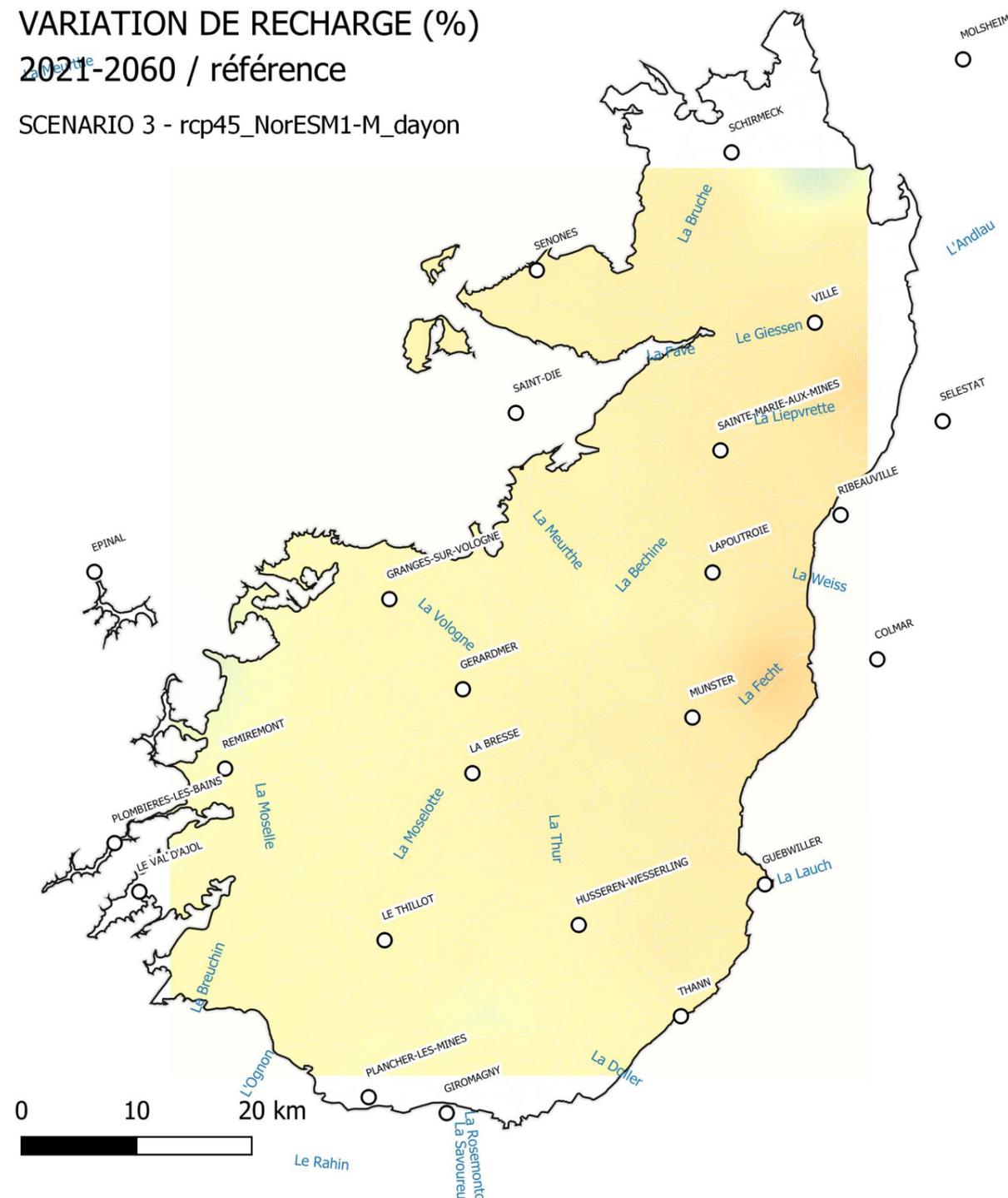


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

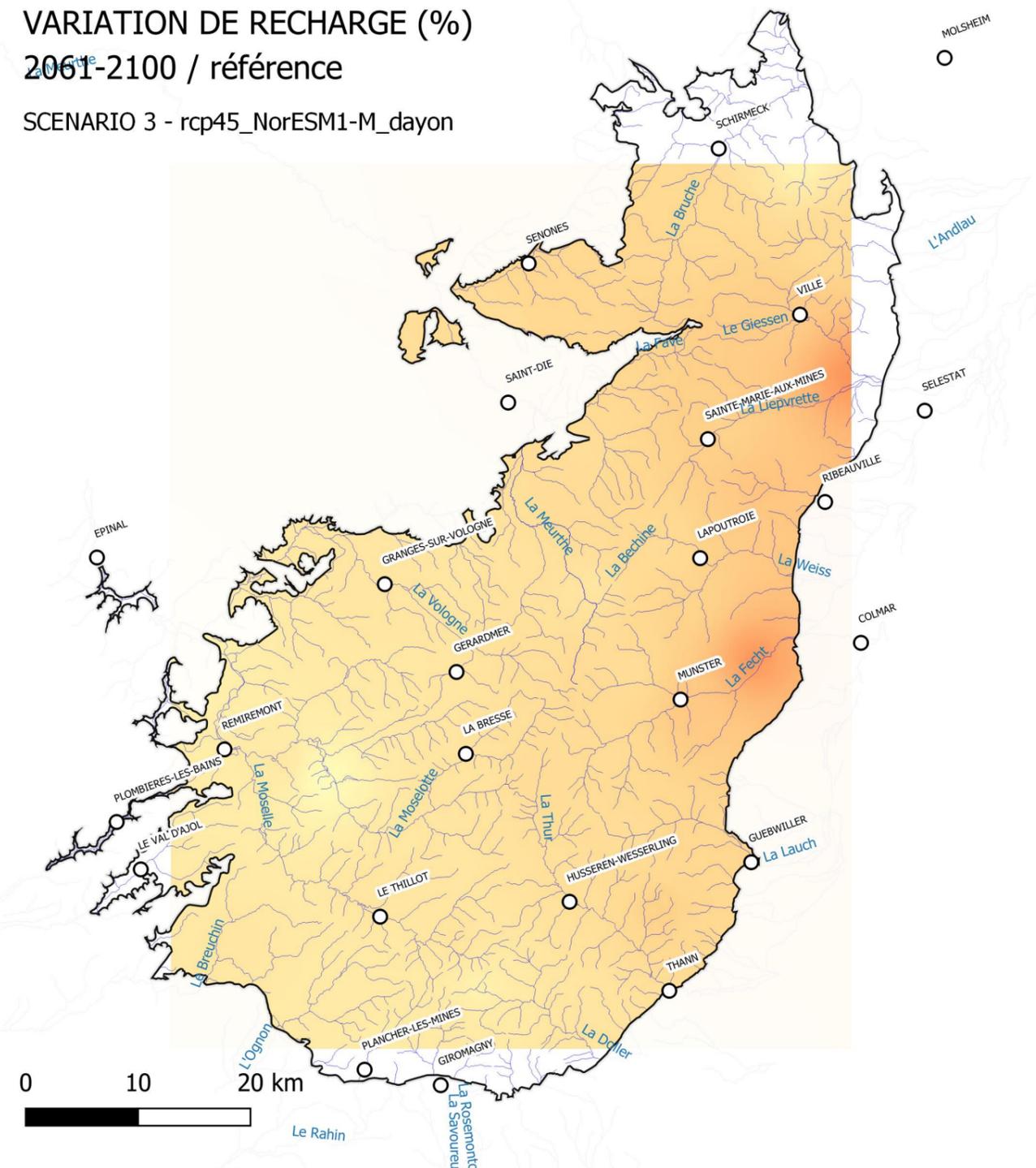
VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 3 - rcp45_NorESM1-M_dayon



VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 3 - rcp45_NorESM1-M_dayon



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

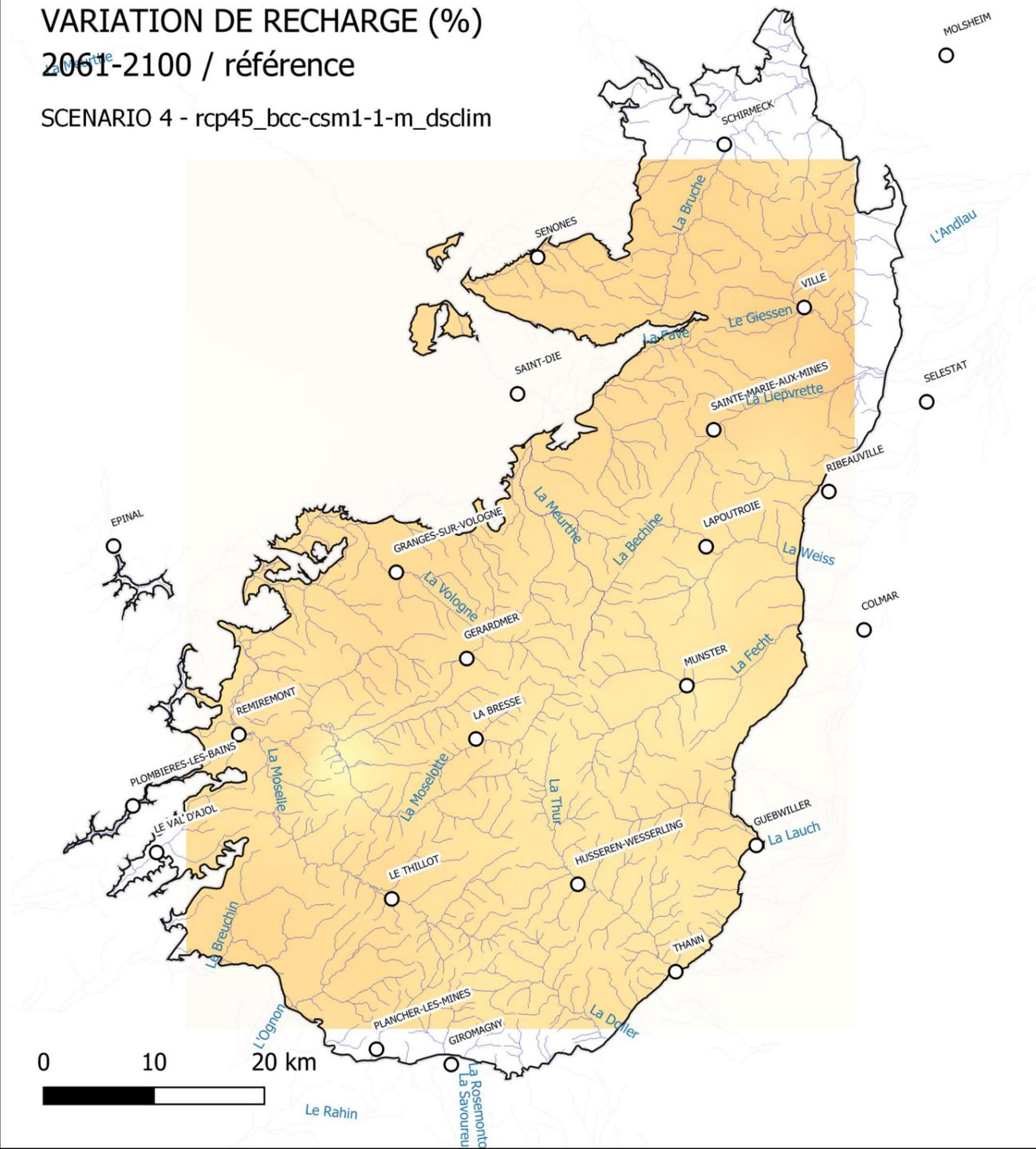
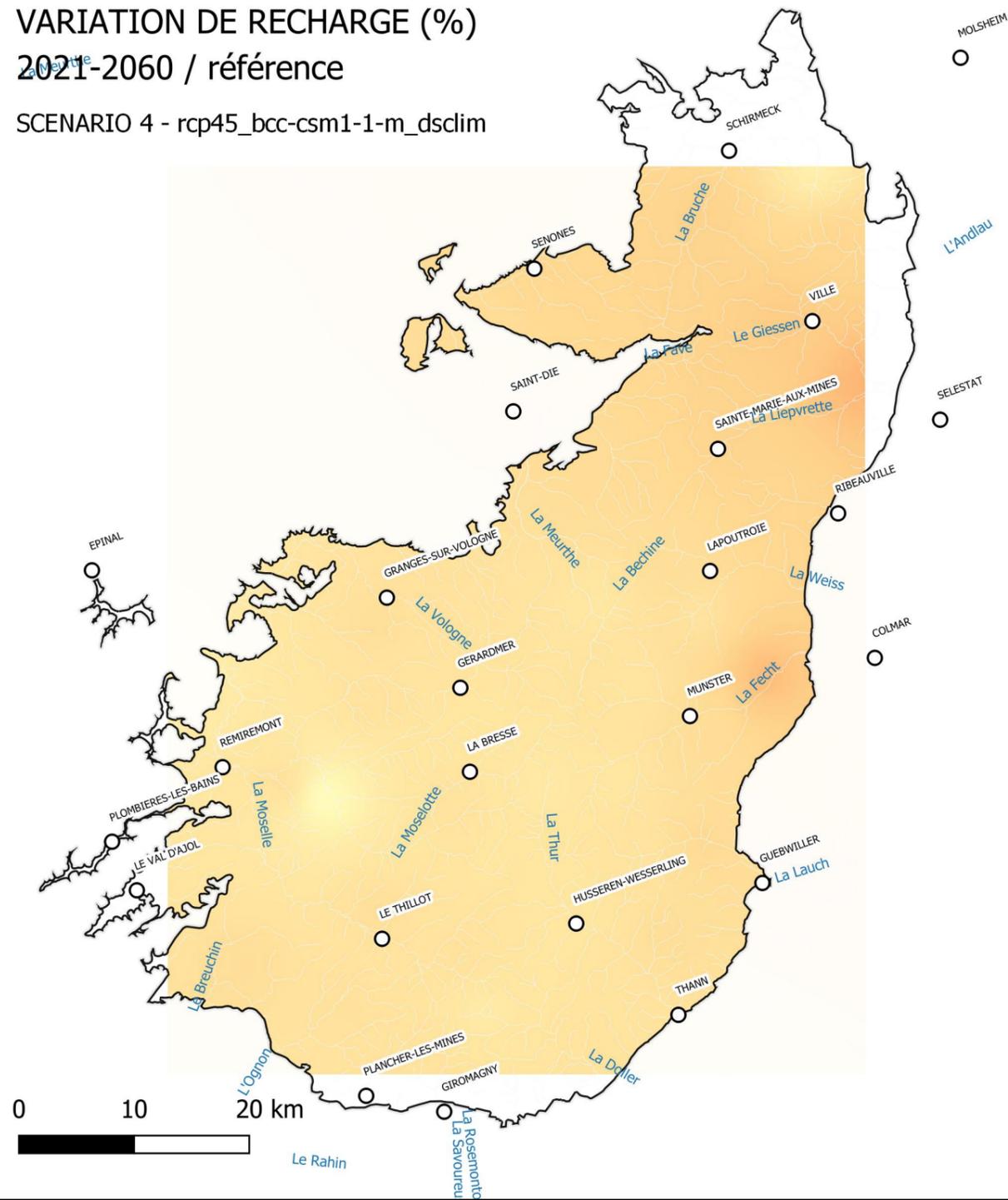
HORIZON 2100 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%) 2021-2060 / référence

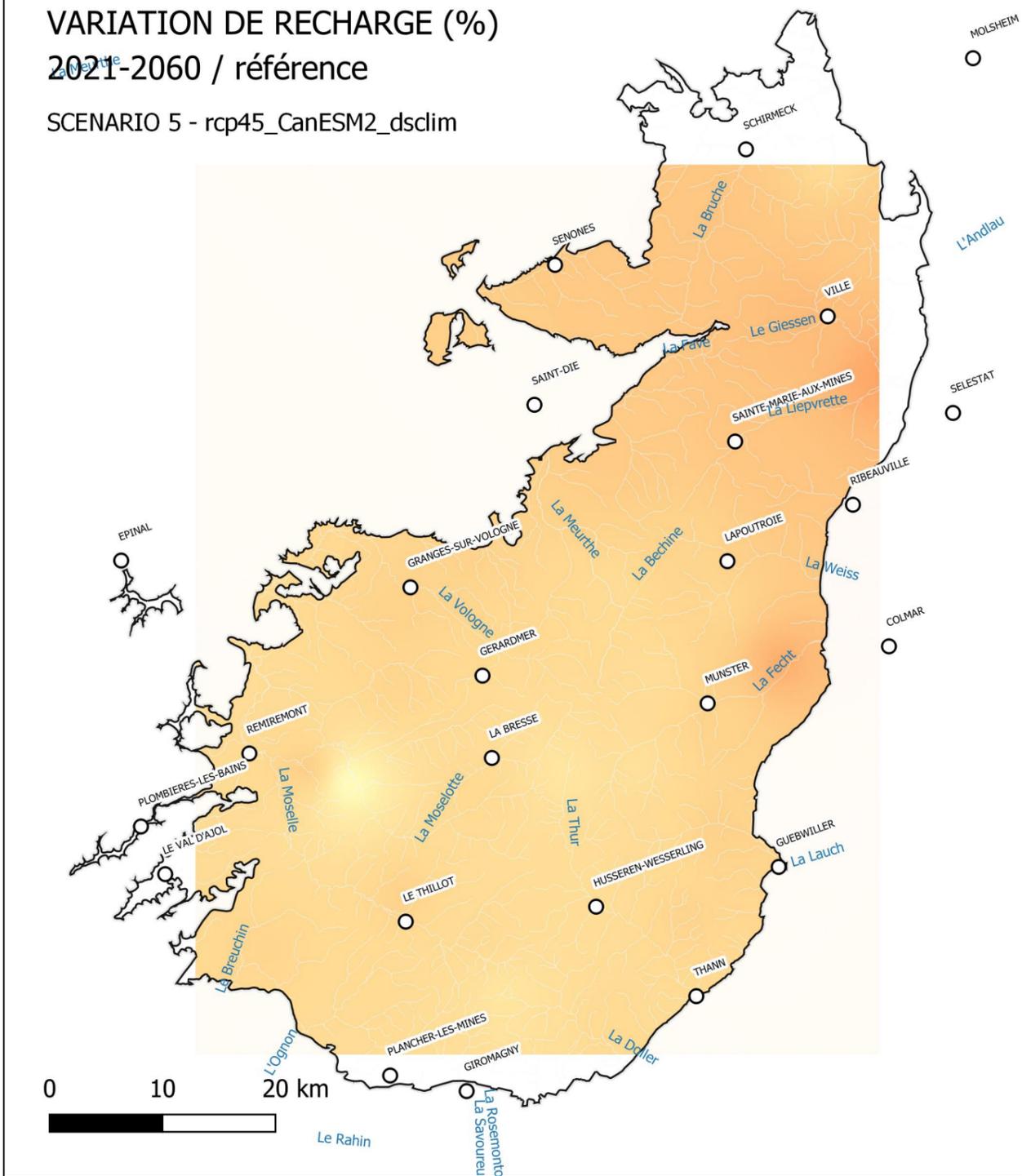
SCENARIO 4 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim

VARIATION DE RECHARGE (%) 2061-2100 / référence

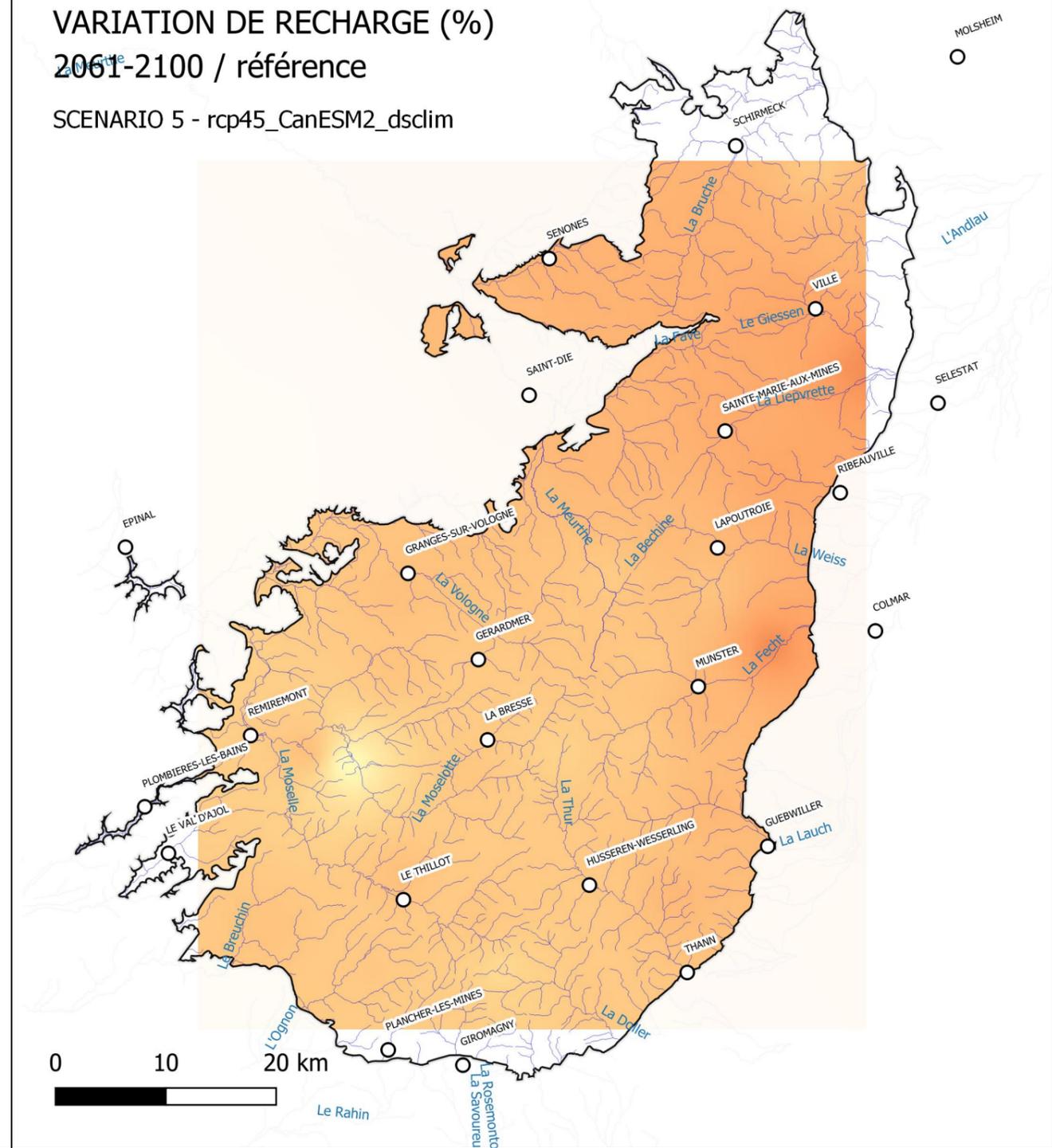
SCENARIO 4 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.



HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

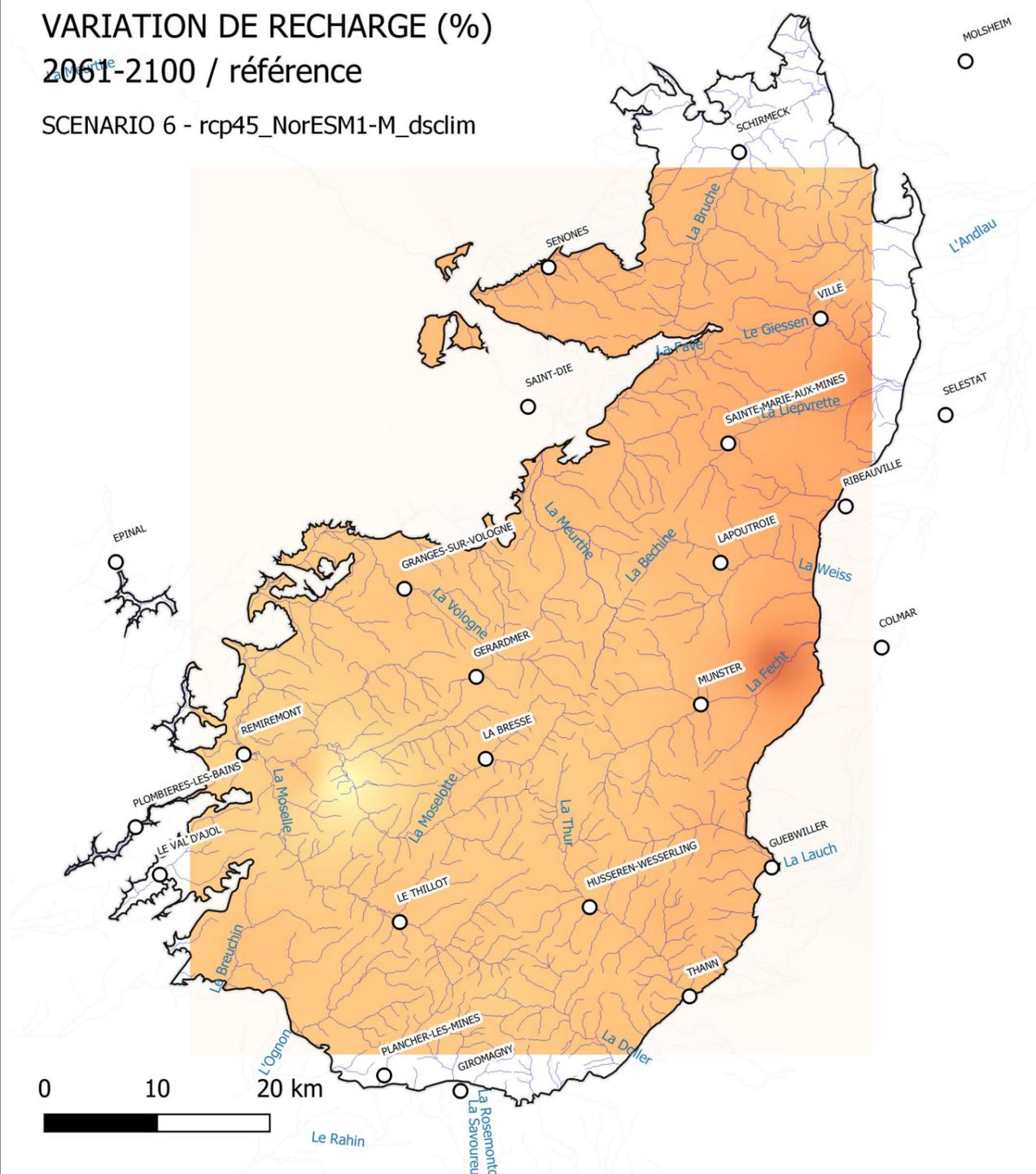
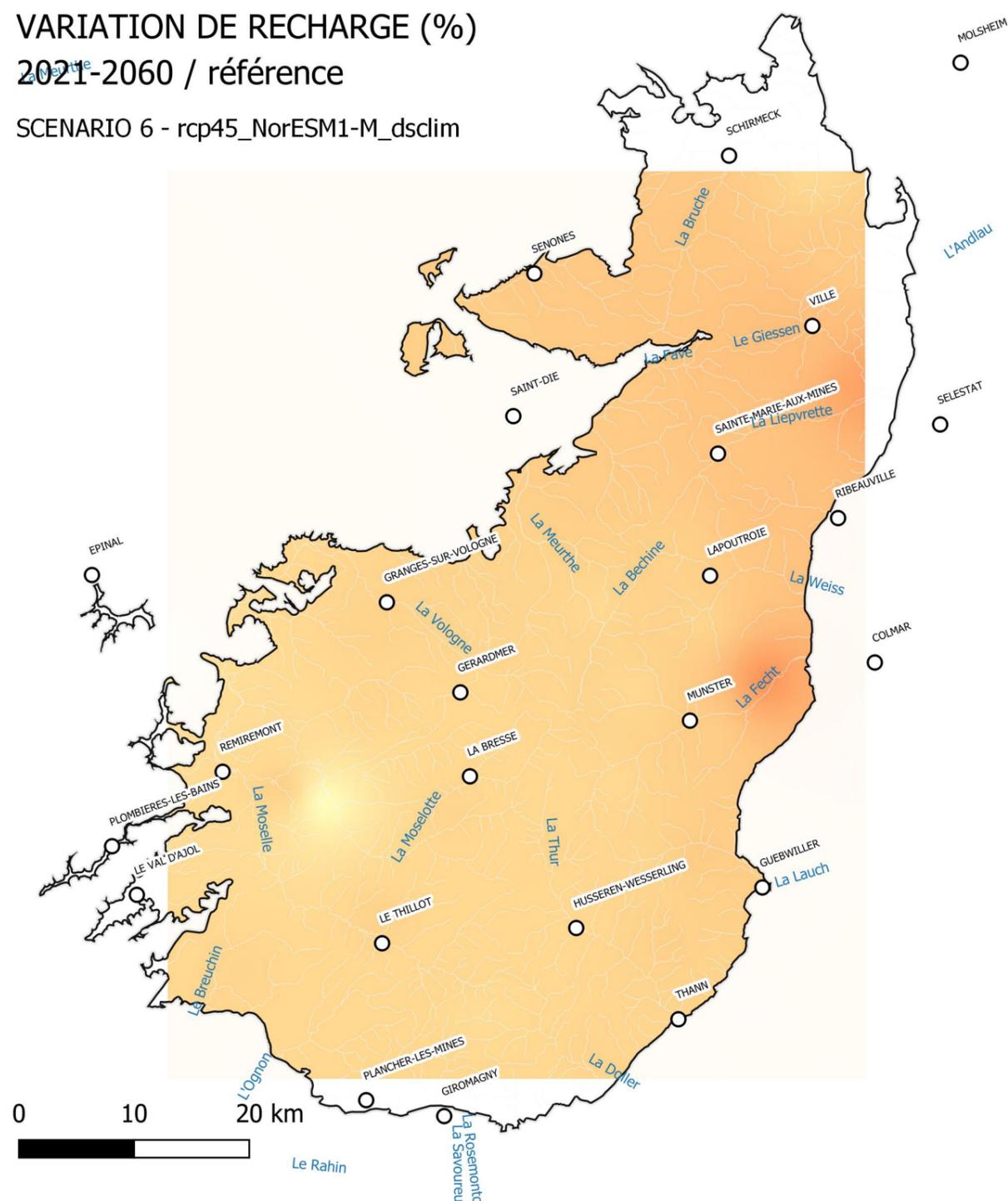
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 6 - rcp45_NorESM1-M_dsclim

VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 6 - rcp45_NorESM1-M_dsclim

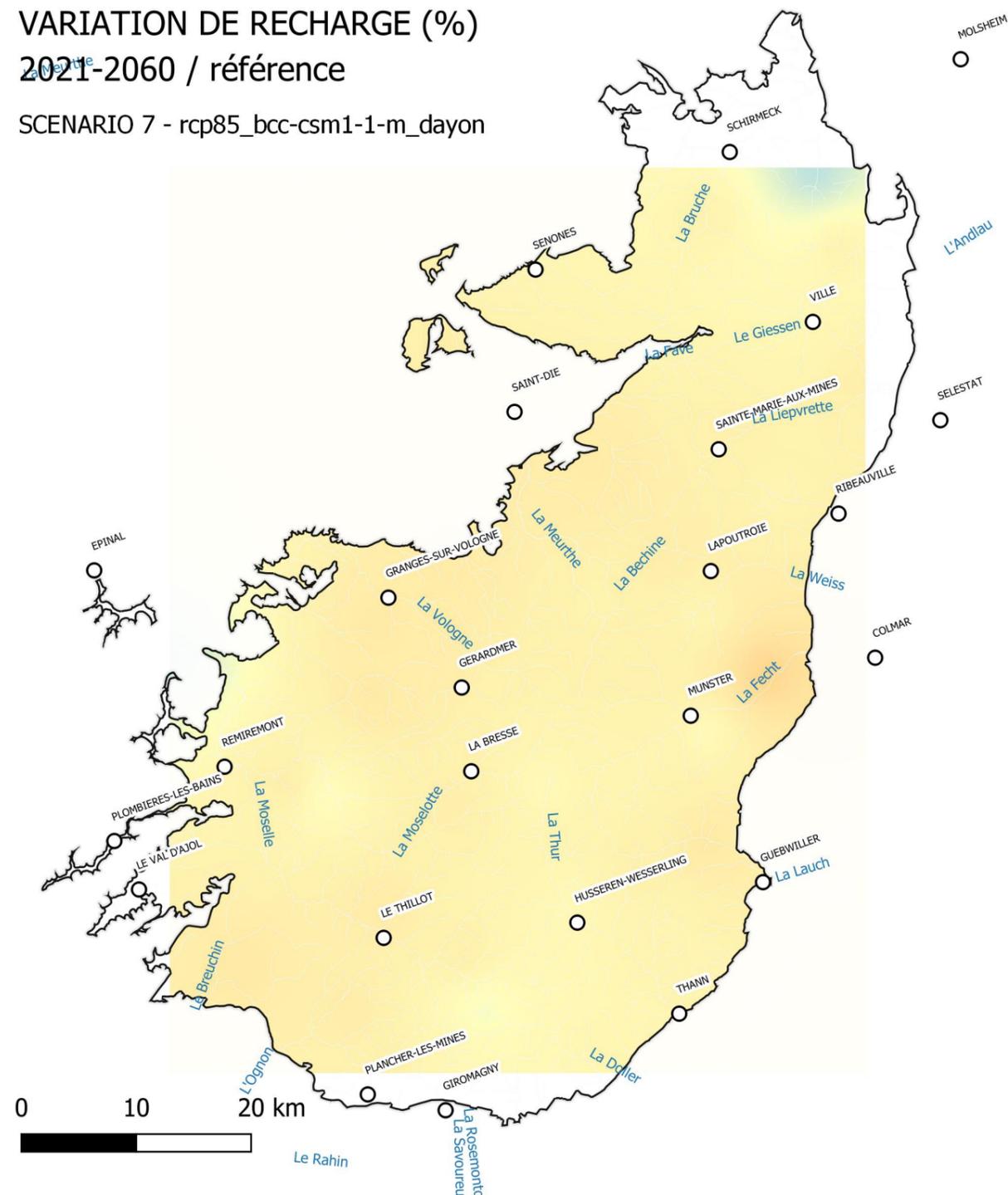


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

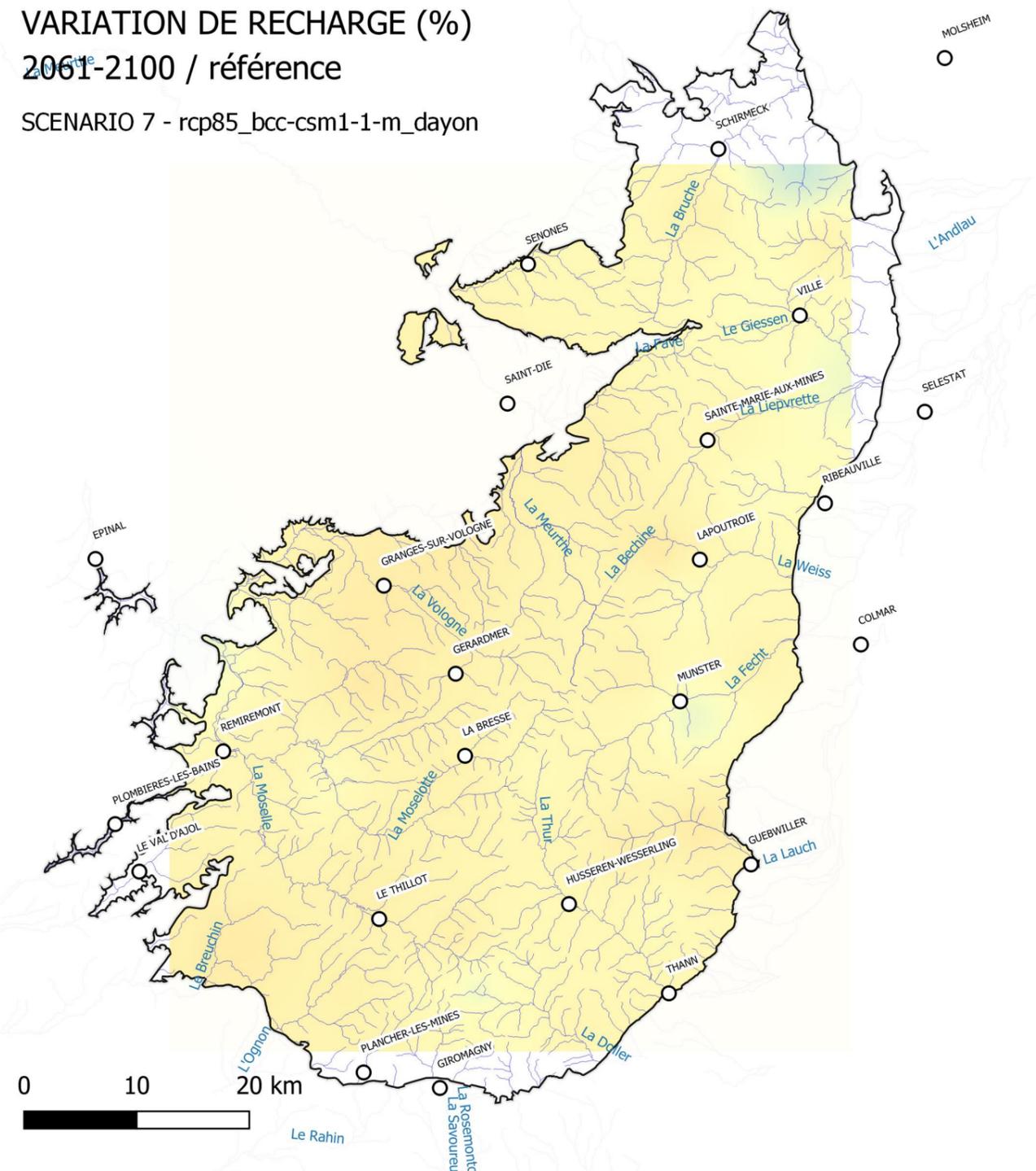
VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 7 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon

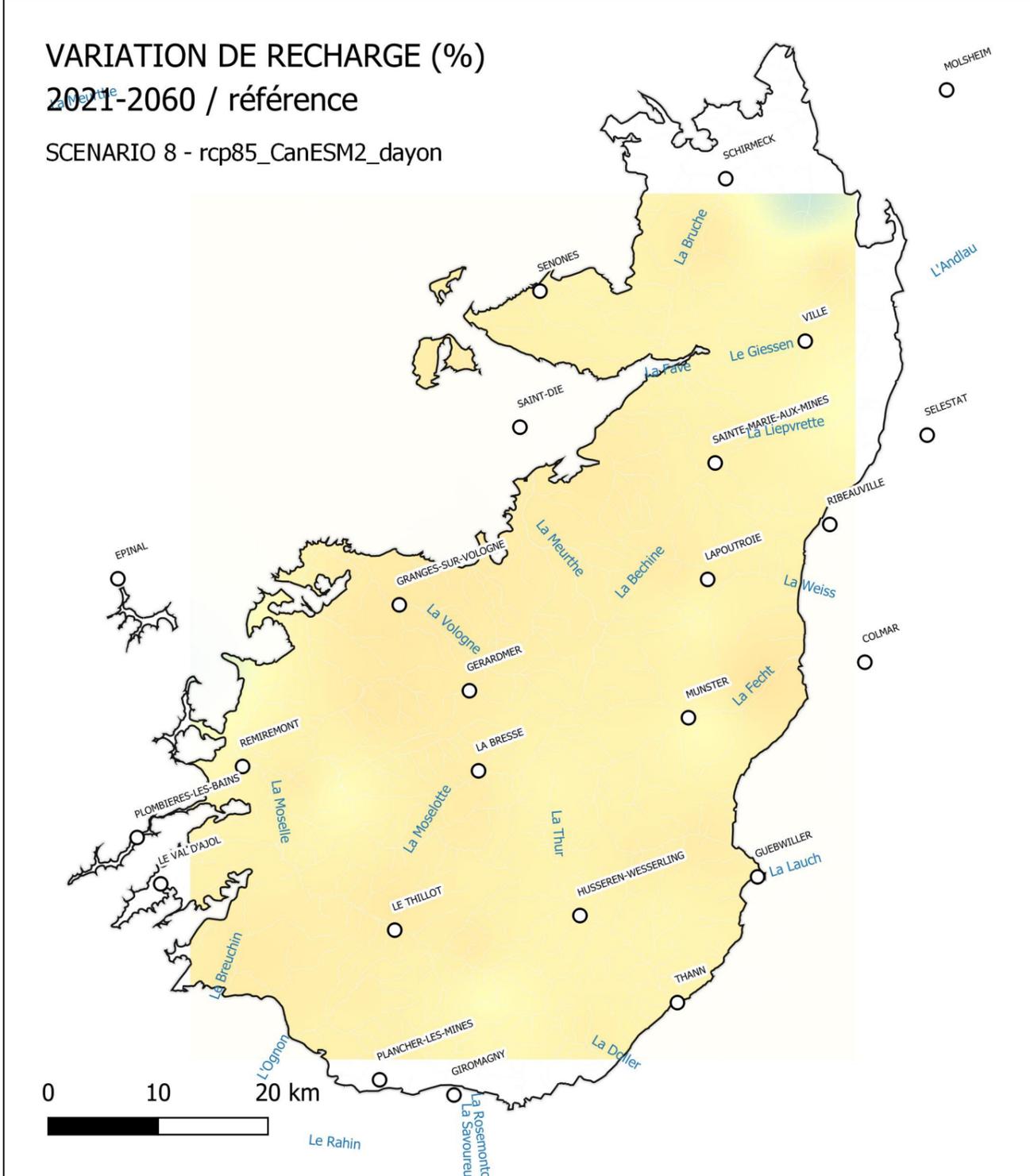


VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

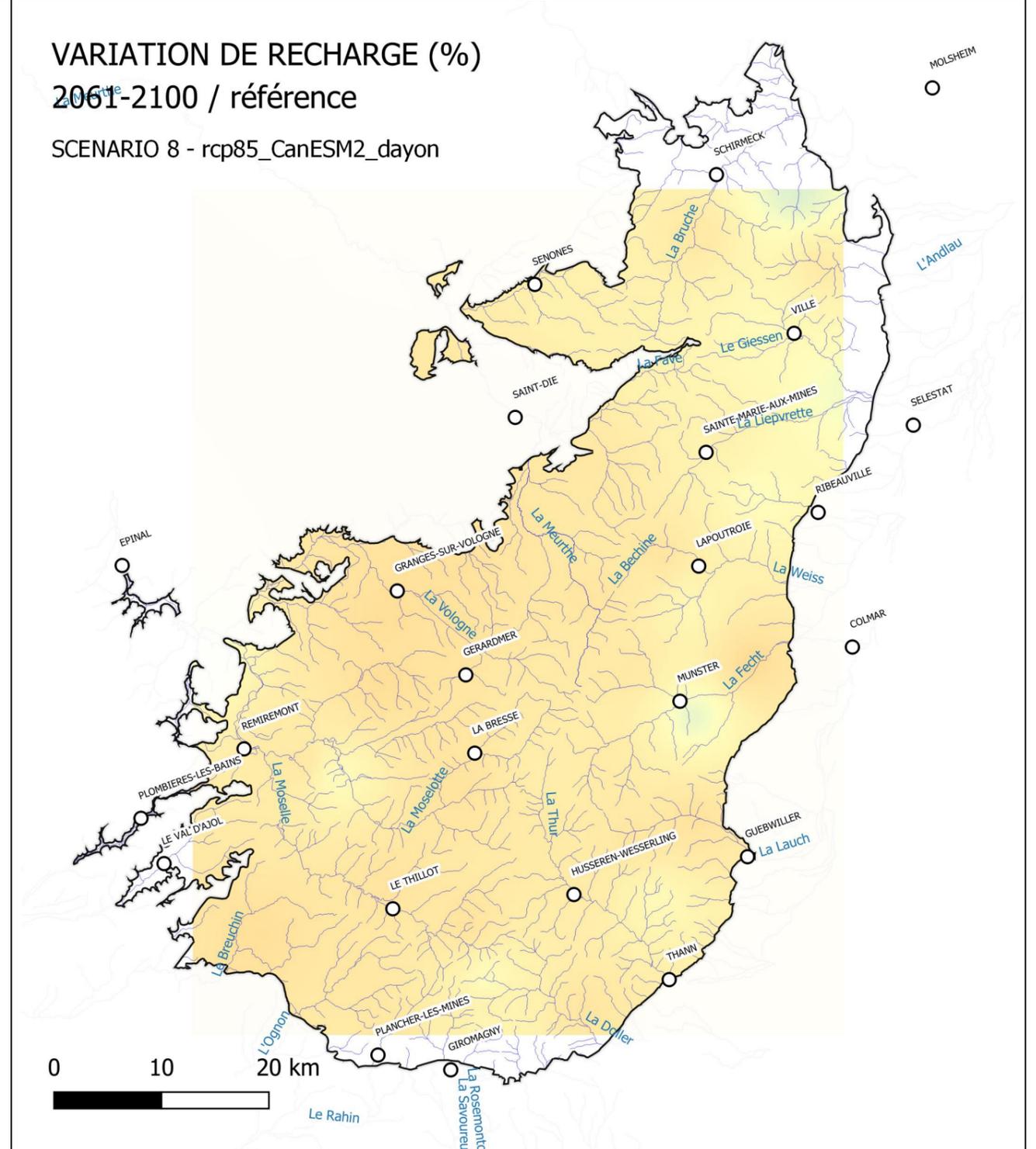
SCENARIO 7 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

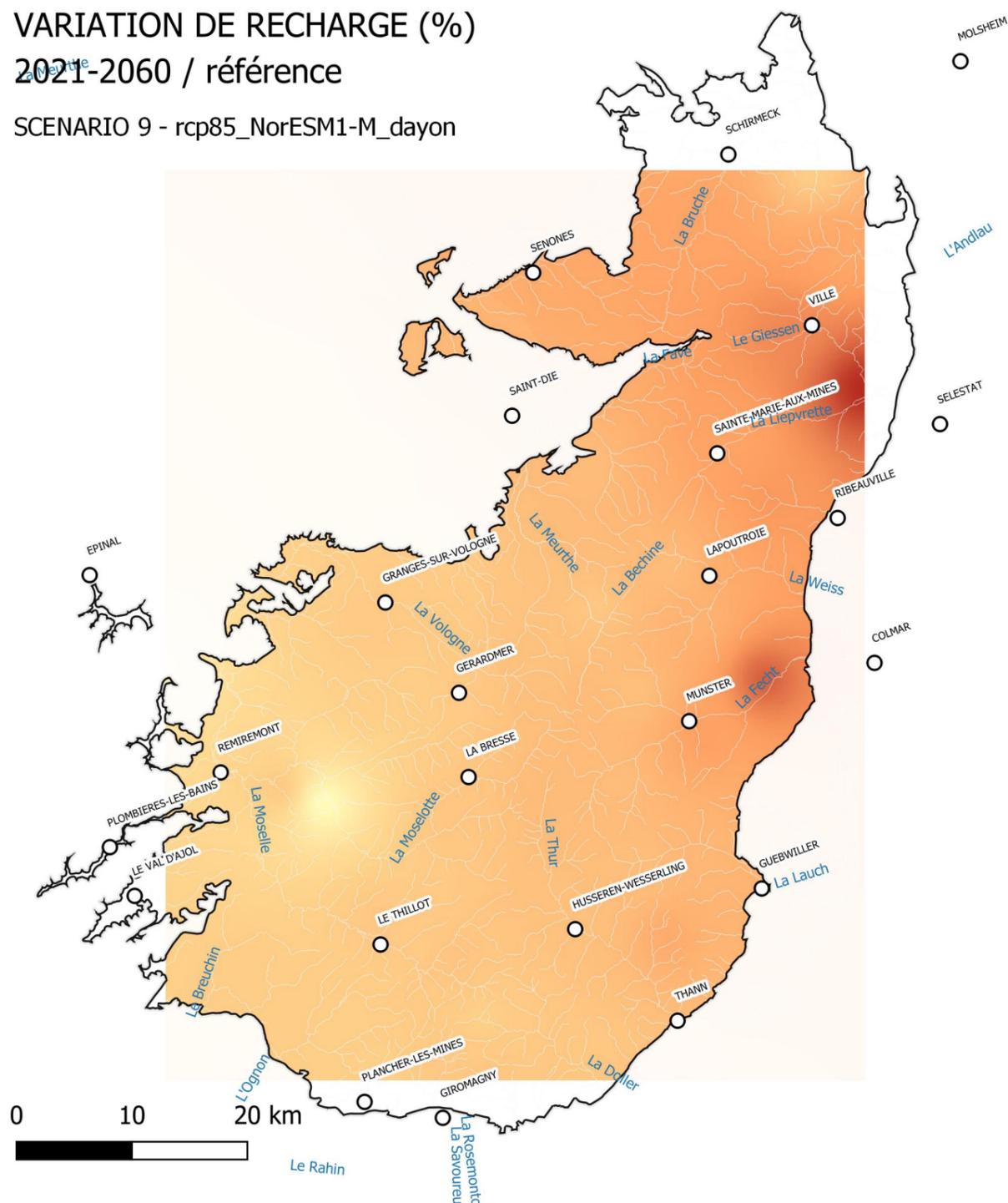


HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.



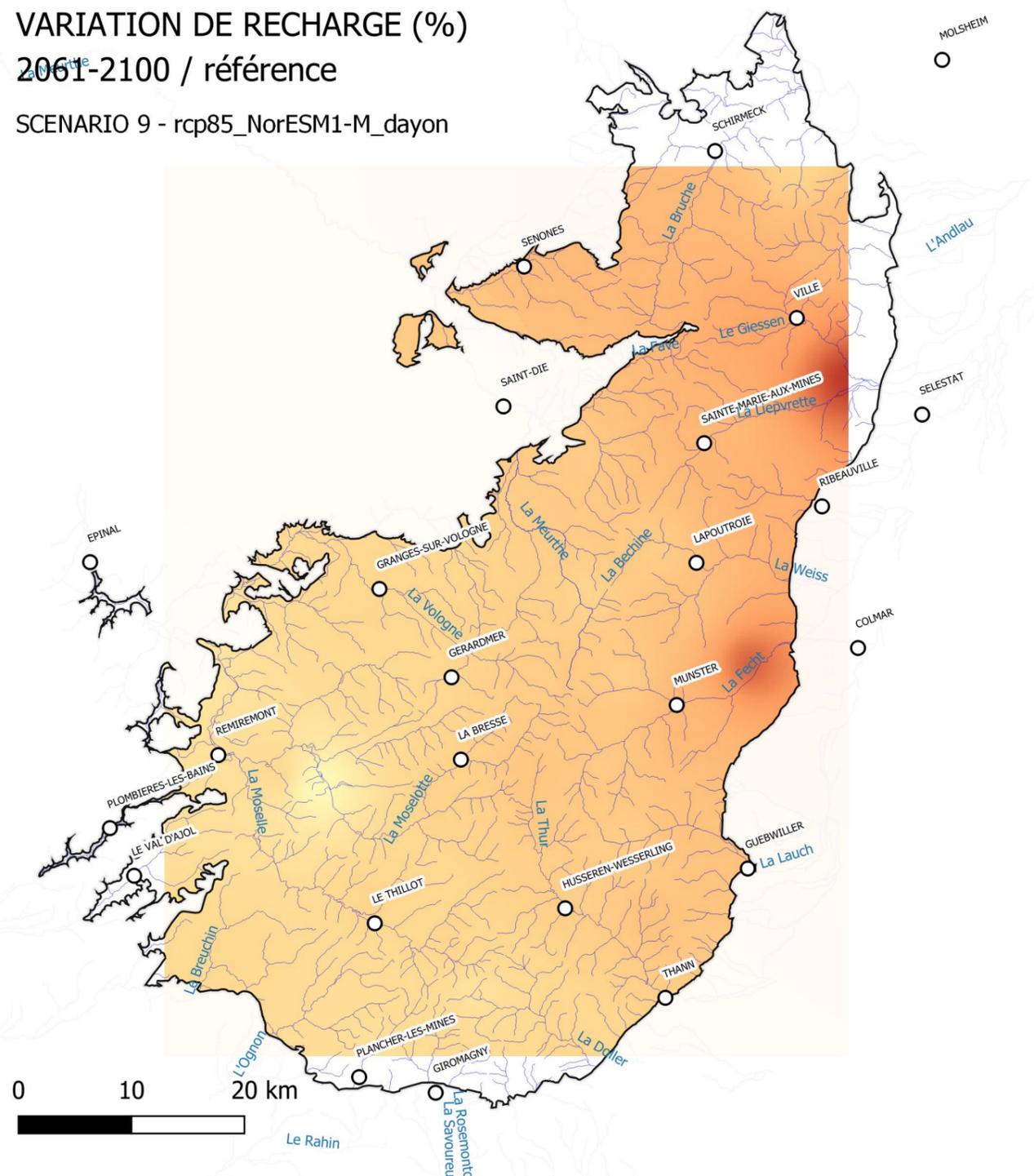
HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence
SCENARIO 9 - rcp85_NorESM1-M_dayon



HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence
SCENARIO 9 - rcp85_NorESM1-M_dayon



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

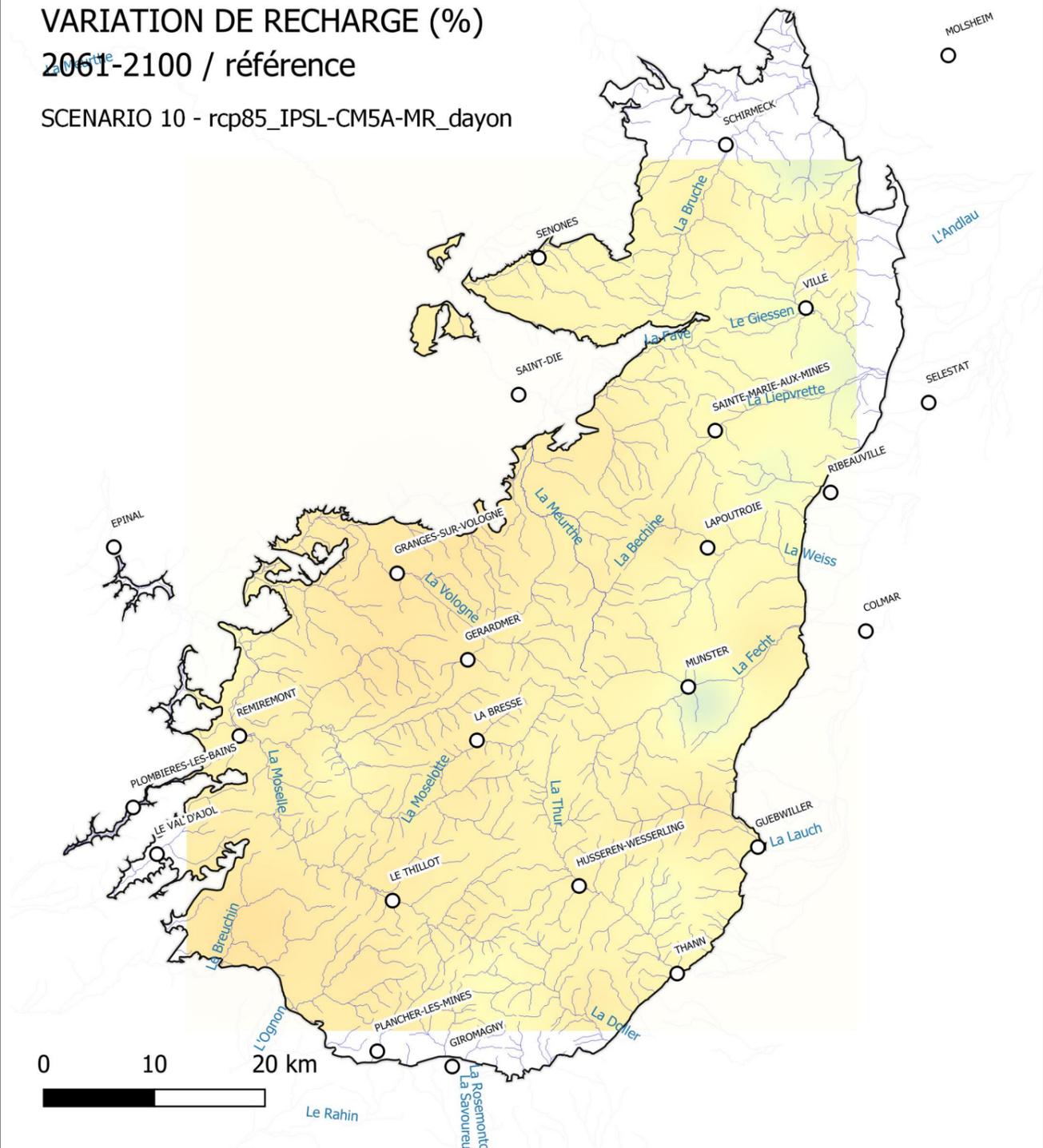
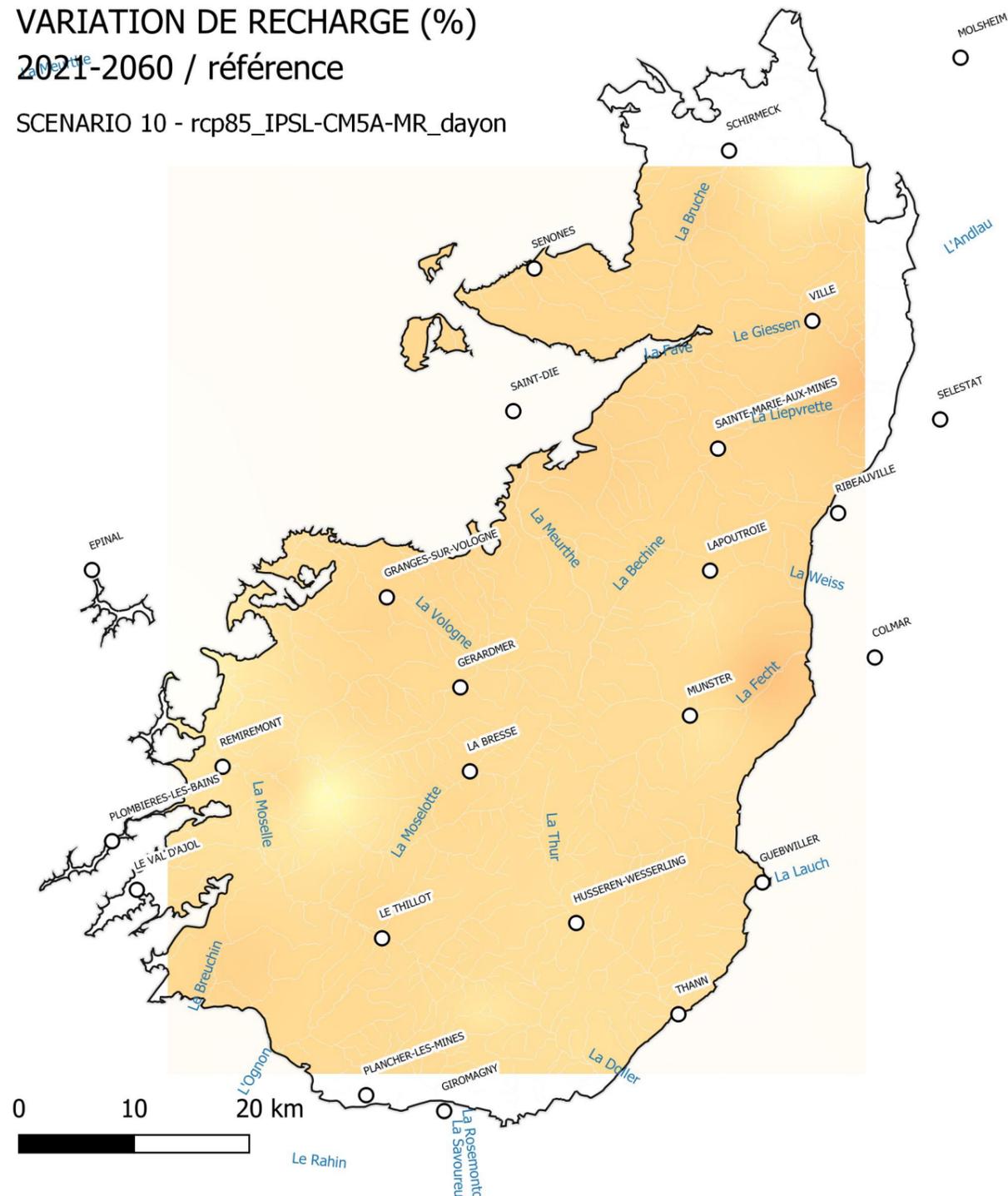
HORIZON 2100 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 10 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon

VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 10 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

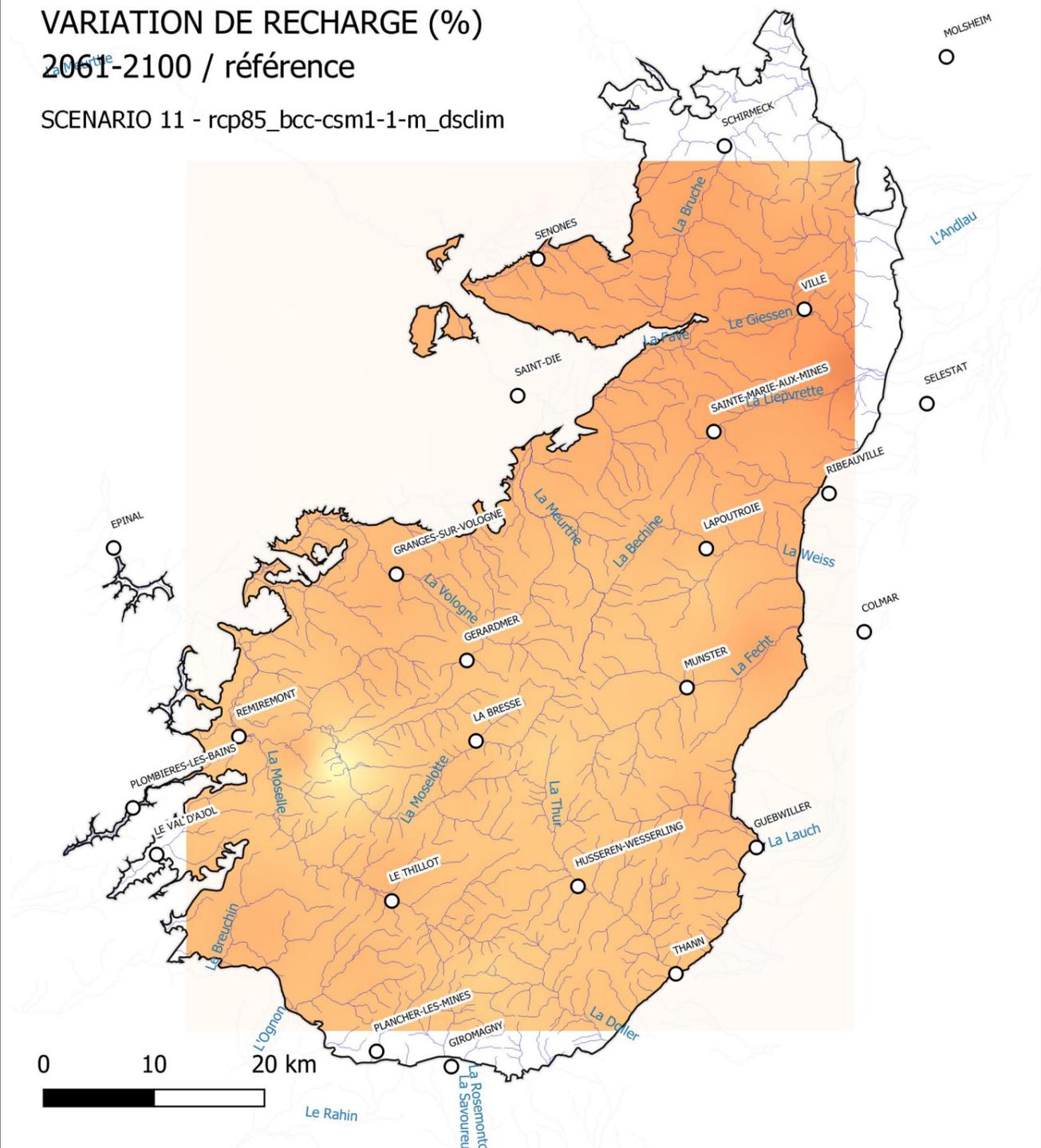
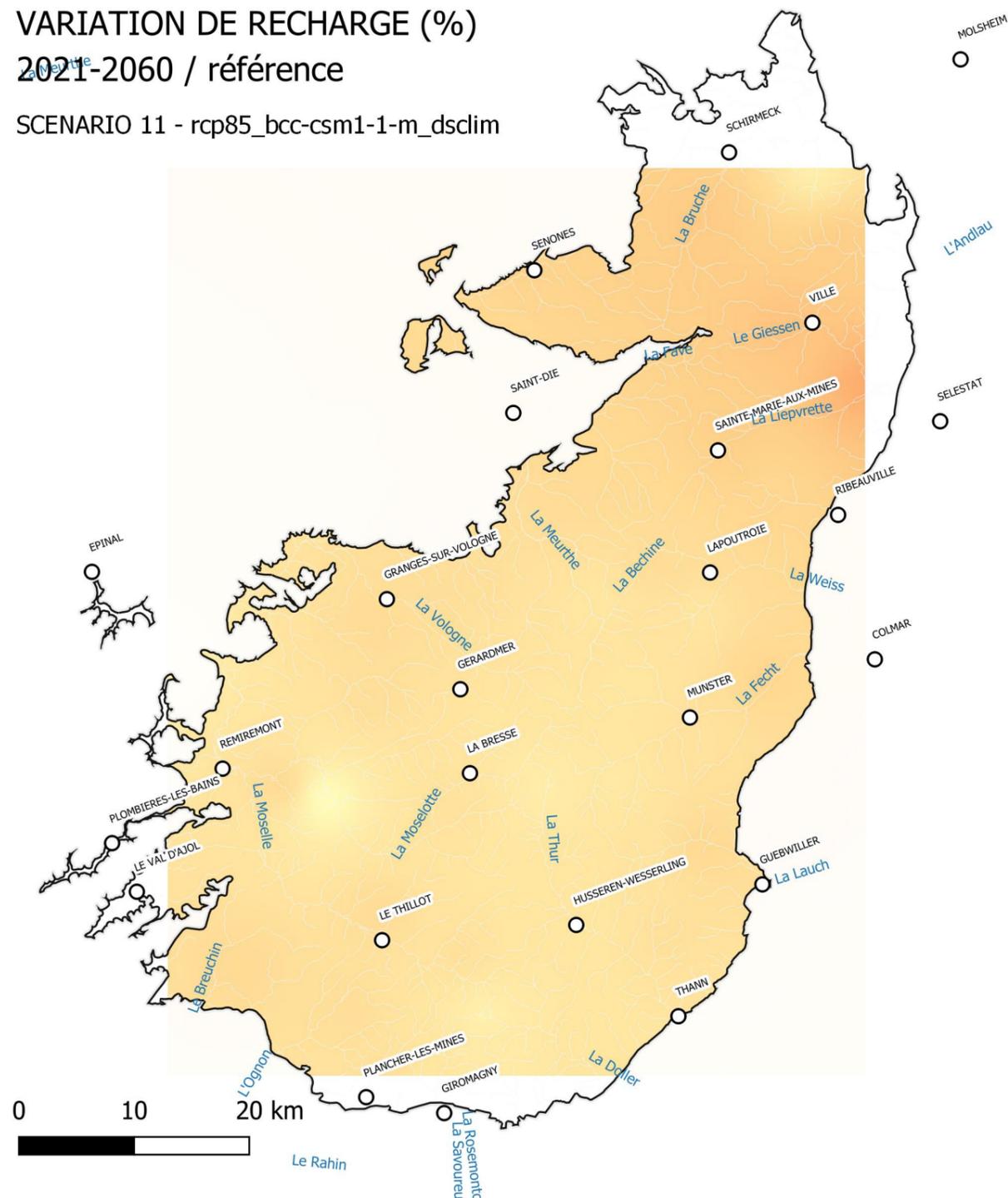
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 11 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim

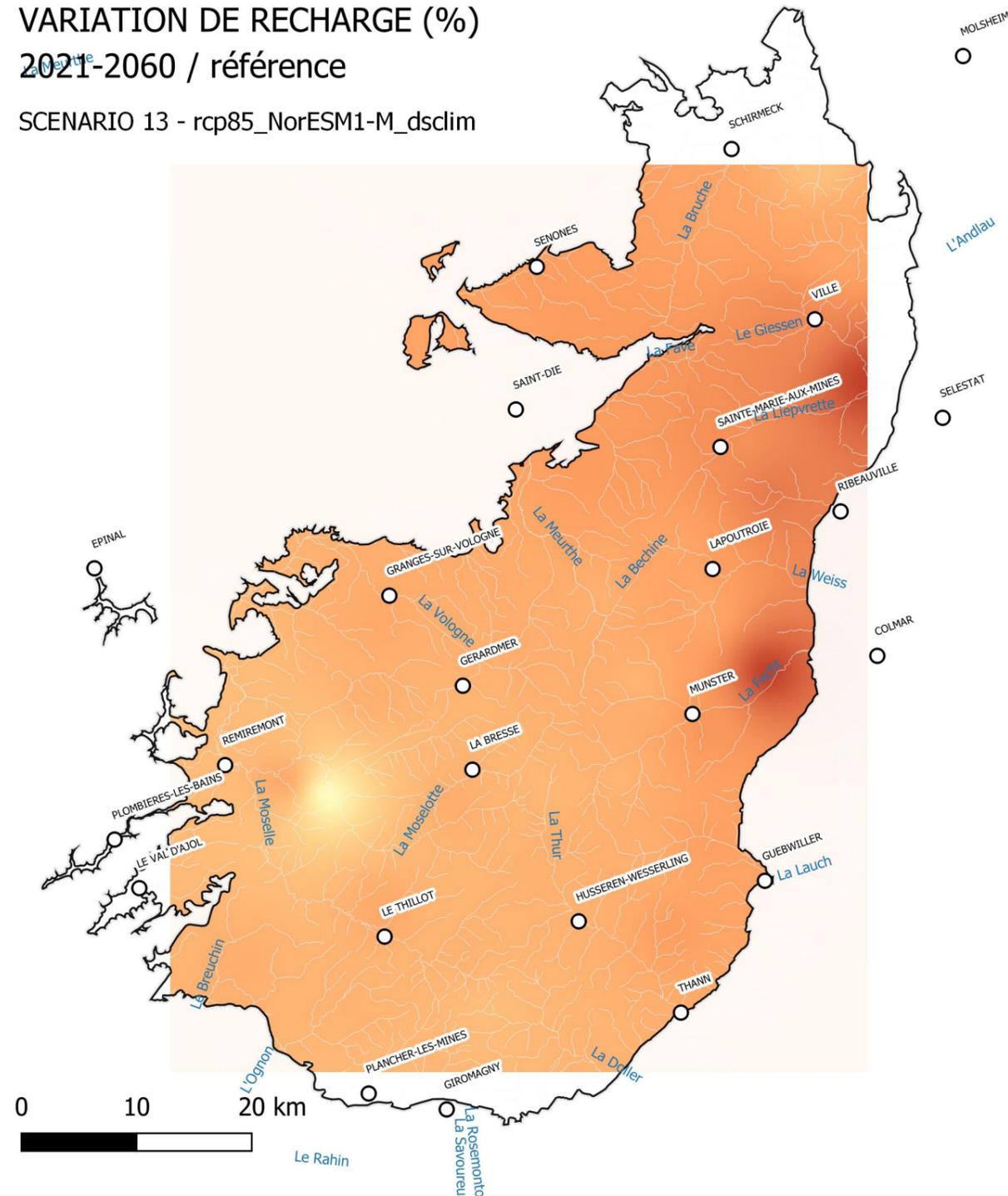
VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 11 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim



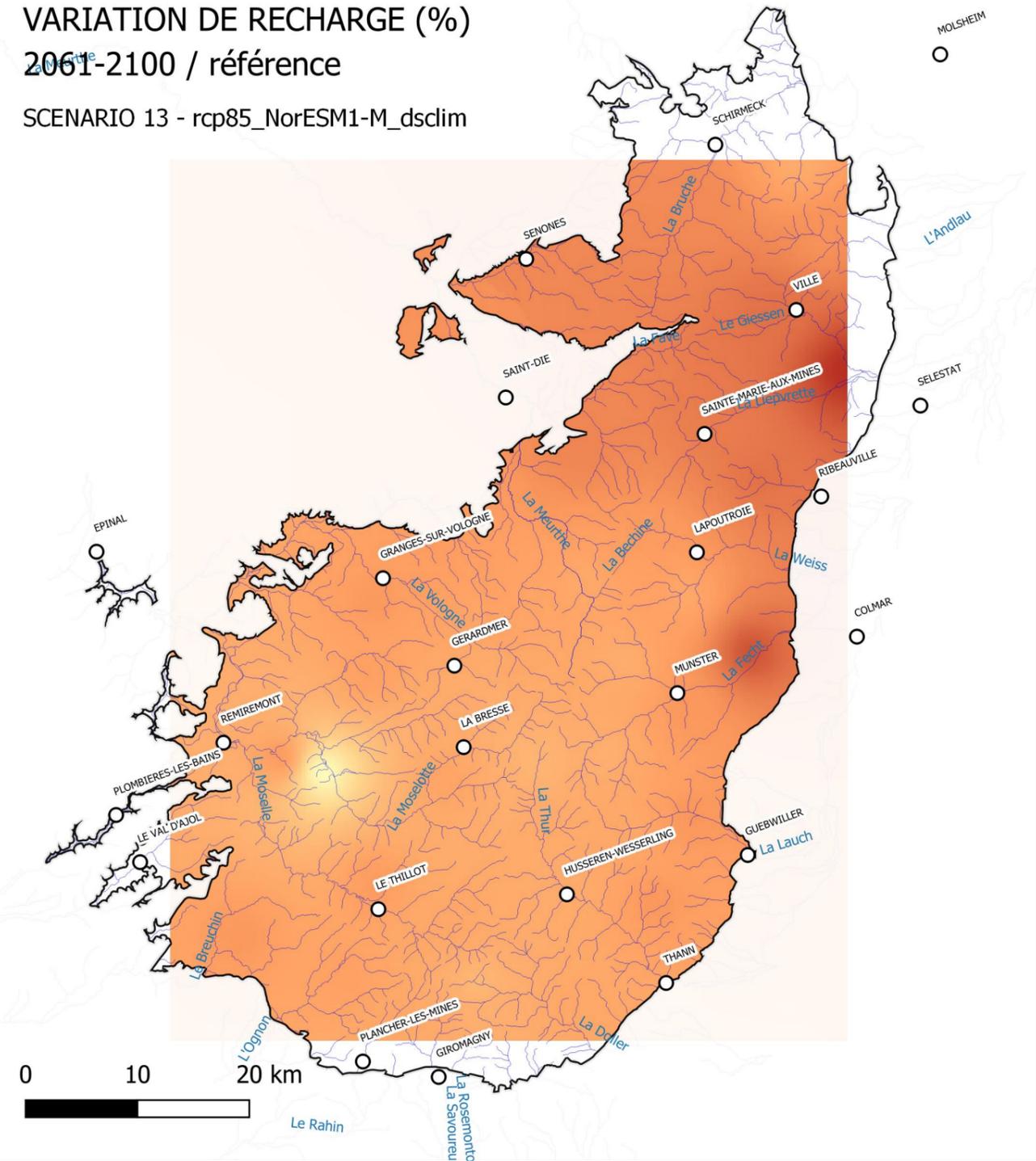
HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2021-2060 / référence
 SCENARIO 13 - rcp85_NorESM1-M_dsclim



HORIZON 2100 - Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION DE RECHARGE (%)
2061-2100 / référence
 SCENARIO 13 - rcp85_NorESM1-M_dsclim

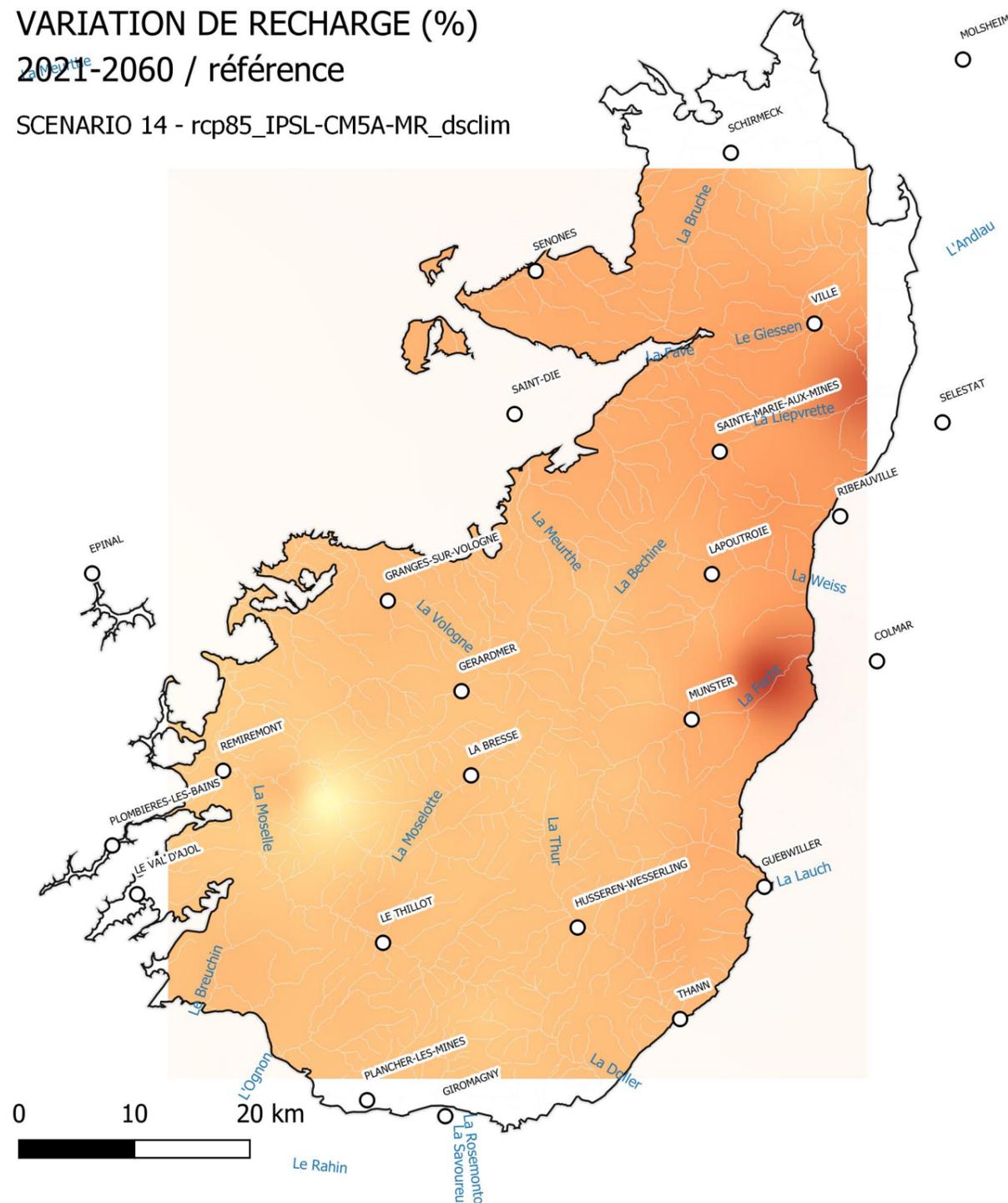


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle de recharge pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

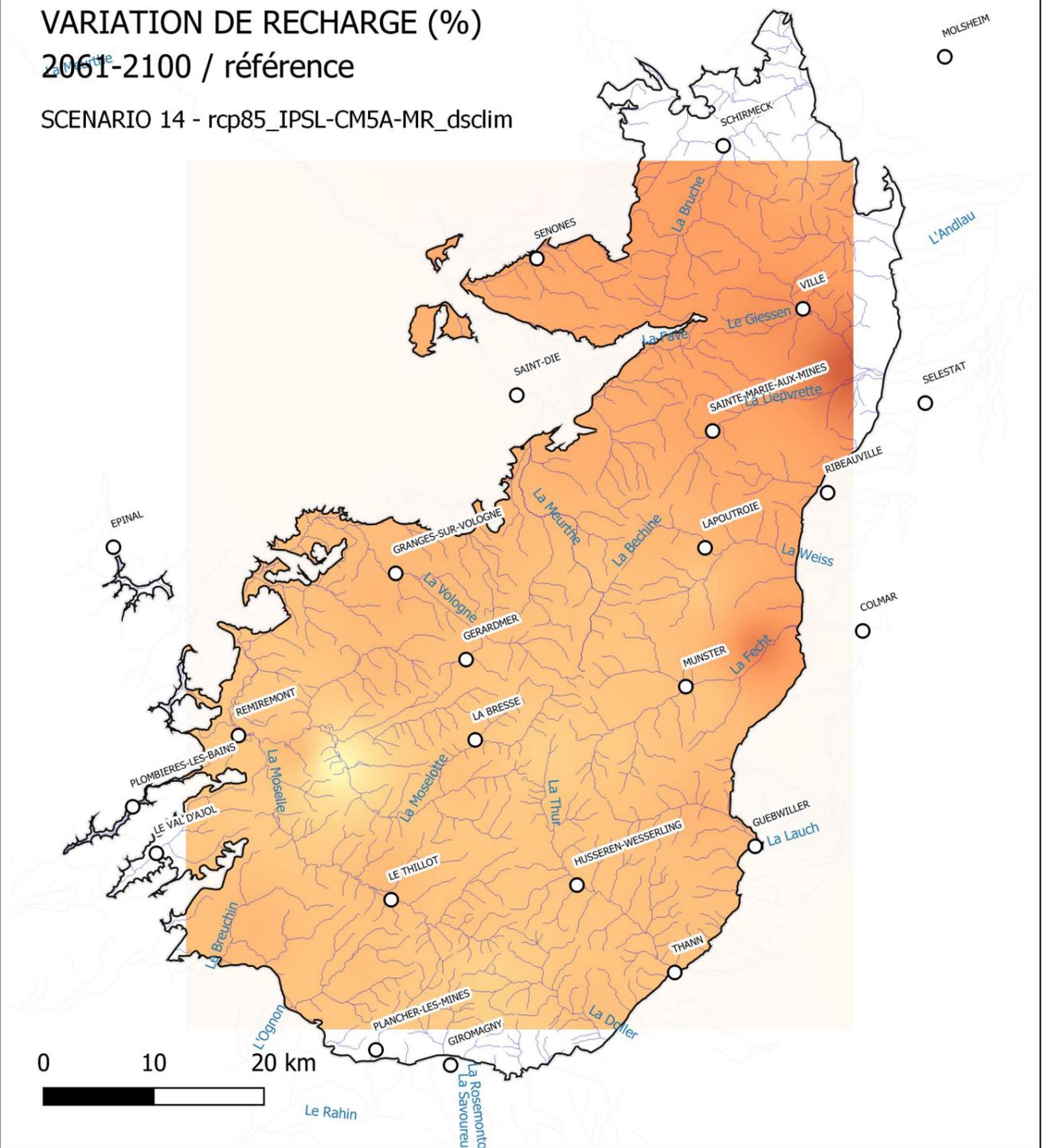
VARIATION DE RECHARGE (%) 2021-2060 / référence

SCENARIO 14 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim



VARIATION DE RECHARGE (%) 2061-2100 / référence

SCENARIO 14 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim



Annexe 2 :**Cartographie de la différence relative de la moyenne interannuelle de l'écoulement total pour la période 2021-2060 et 2061-2100 par rapport à la période de référence sur le socle vosgien**

| Annexe | Numéro attribué à la projection climatique | Scénario d'émission | Modèle climatique | Méthode de régionalisation statistique |
|---------------|---|----------------------------|--------------------------|---|
| Annexe 2-1 | SC01 | rcp45 | bcc-csm1-1-m | DAYON |
| Annexe 2-2 | SC02 | rcp45 | CanESM2 | DAYON |
| Annexe 2-3 | SC03 | rcp45 | NorESM1-M | DAYON |
| Annexe 2-4 | SC04 | rcp45 | bcc-csm1-1-m | DSCLIM |
| Annexe 2-5 | SC05 | rcp45 | CanESM2 | DSCLIM |
| Annexe 2-6 | SC06 | rcp45 | NorESM1-M | DSCLIM |
| Annexe 2-7 | SC07 | rcp85 | bcc-csm1-1-m | DAYON |
| Annexe 2-8 | SC08 | rcp85 | CanESM2 | DAYON |
| Annexe 2-9 | SC09 | rcp85 | NorESM1-M | DAYON |
| Annexe 2-10 | SC10 | rcp85 | IPSL-CM5A-MR | DAYON |
| Annexe 2-11 | SC11 | rcp85 | bcc-csm1-1-m | DSCLIM |
| Annexe 2-12 | SC12 | rcp85 | CanESM2 | DSCLIM |
| Annexe 2-13 | SC13 | rcp85 | NorESM1-M | DSCLIM |
| Annexe 2-14 | SC14 | rcp85 | IPSL-CM5A-MR | DSCLIM |

**LEGENDE VARIATION ECOULEMENT TOTAL
HORIZON 2060**

Idw_VET2060

- -0.3
- -0.29
- -0.28
- -0.27
- -0.26
- -0.25
- -0.24
- -0.23
- -0.22
- -0.21
- -0.2
- -0.19
- -0.18
- -0.17
- -0.16
- -0.15
- -0.14
- -0.13
- -0.12
- -0.11
- -0.1
- -0.09
- -0.08
- -0.07
- -0.06
- -0.05
- -0.04
- -0.03
- -0.02
- -0.01
- 0
- 0.01
- 0.02
- 0.03
- 0.04
- 0.05
- 0.06
- 0.07
- 0.08
- 0.09
- 0.1
- 0.11
- 0.12
- 0.13
- 0.14
- 0.15
- 0.16
- 0.17
- 0.18
- 0.19
- 0.2
- 0.21
- 0.22
- 0.23
- 0.24
- 0.25
- 0.26
- 0.27
- 0.28
- 0.29
- 0.3

**LEGENDE VARIATION ECOULEMENT TOTAL
HORIZON 2100**

Idw_VET2100

- -0.3
- -0.29
- -0.28
- -0.27
- -0.26
- -0.25
- -0.24
- -0.23
- -0.22
- -0.21
- -0.2
- -0.19
- -0.18
- -0.17
- -0.16
- -0.15
- -0.14
- -0.13
- -0.12
- -0.11
- -0.1
- -0.09
- -0.08
- -0.07
- -0.06
- -0.05
- -0.04
- -0.03
- -0.02
- -0.01
- 0
- 0.01
- 0.02
- 0.03
- 0.04
- 0.05
- 0.06
- 0.07
- 0.08
- 0.09
- 0.1
- 0.11
- 0.12
- 0.13
- 0.14
- 0.15
- 0.16
- 0.17
- 0.18
- 0.19
- 0.2
- 0.21
- 0.22
- 0.23
- 0.24
- 0.25
- 0.26
- 0.27
- 0.28
- 0.29
- 0.3

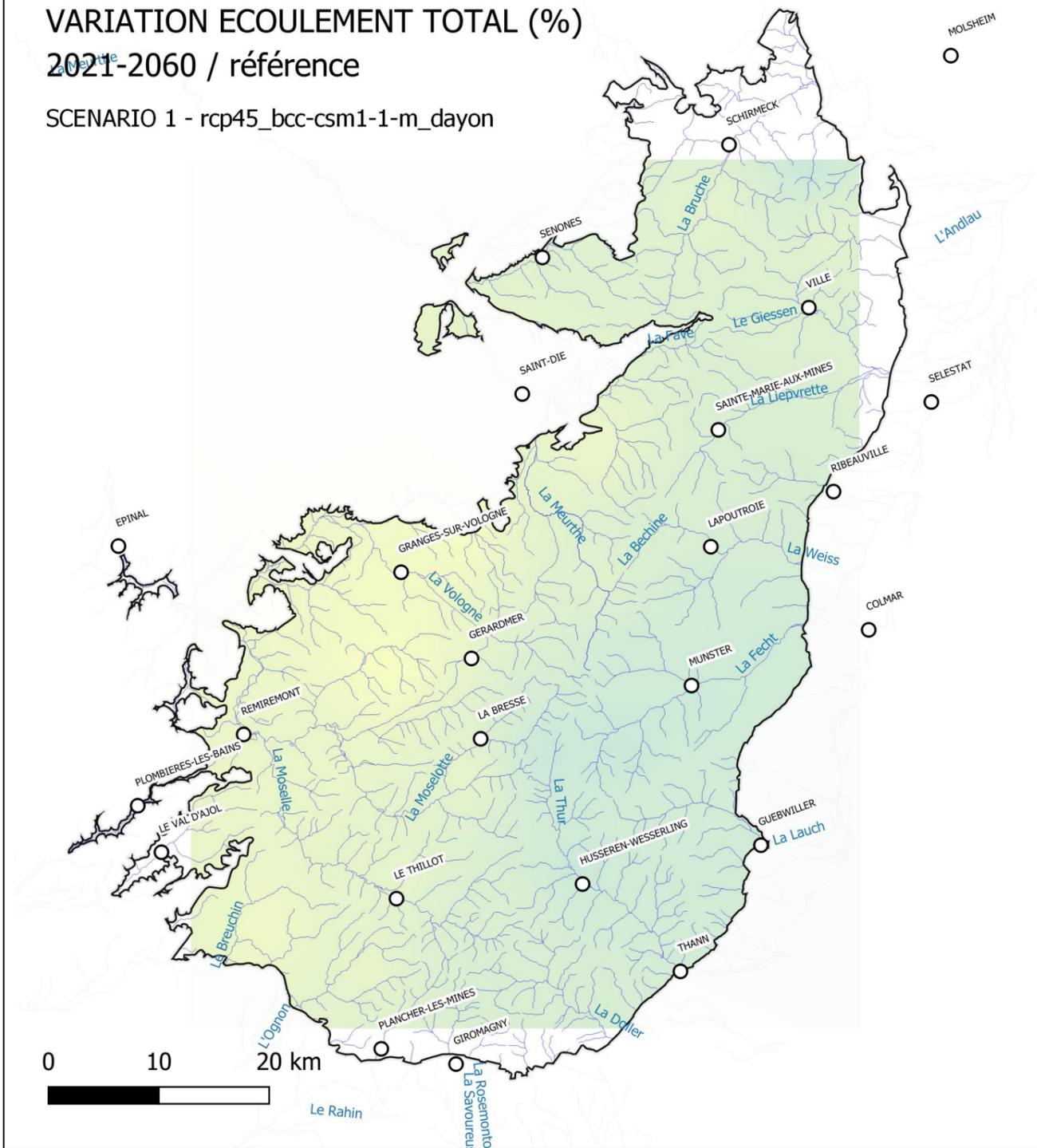
HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)

2021-2060 / référence

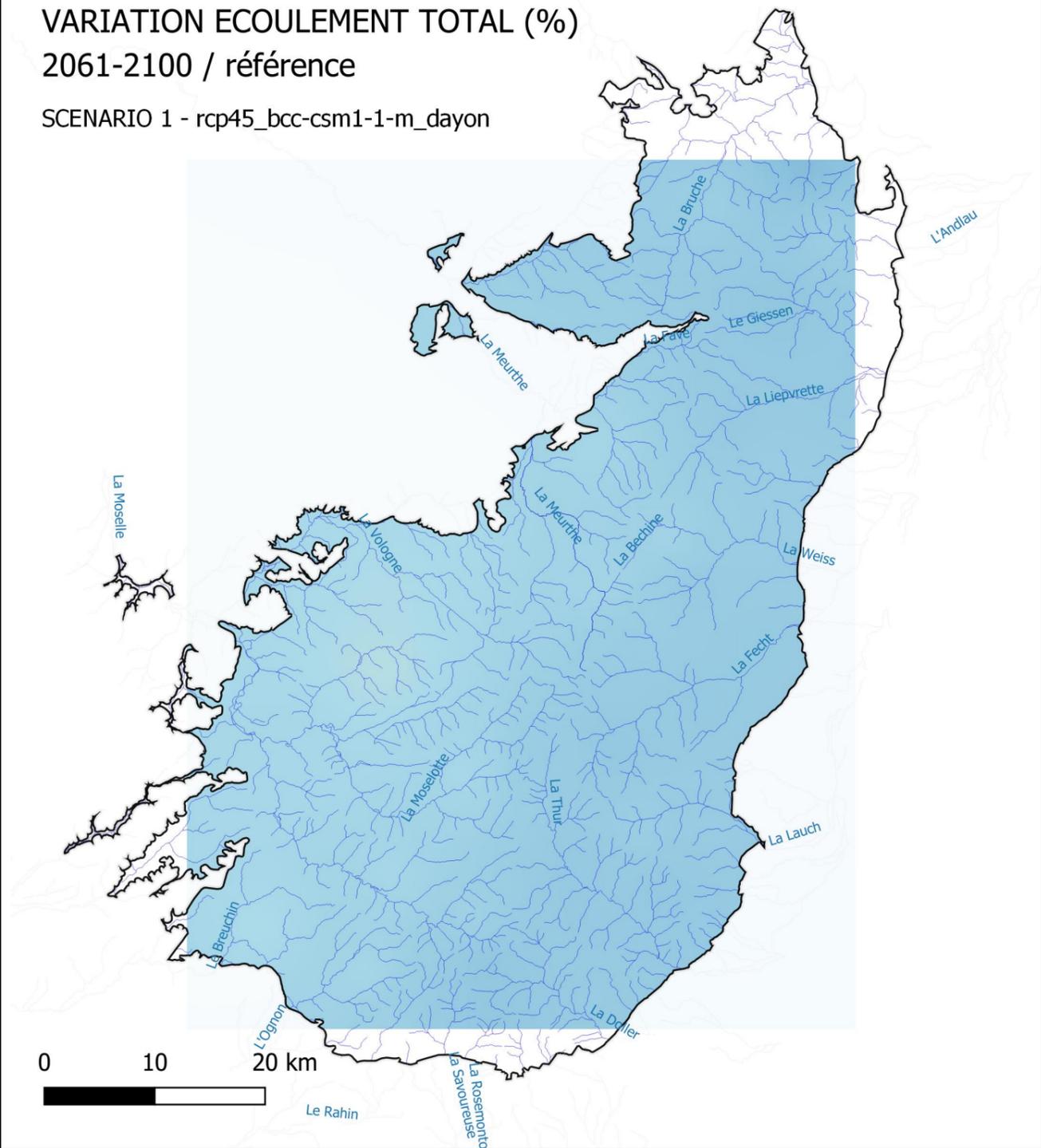
SCENARIO 1 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)

2061-2100 / référence

SCENARIO 1 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dayon

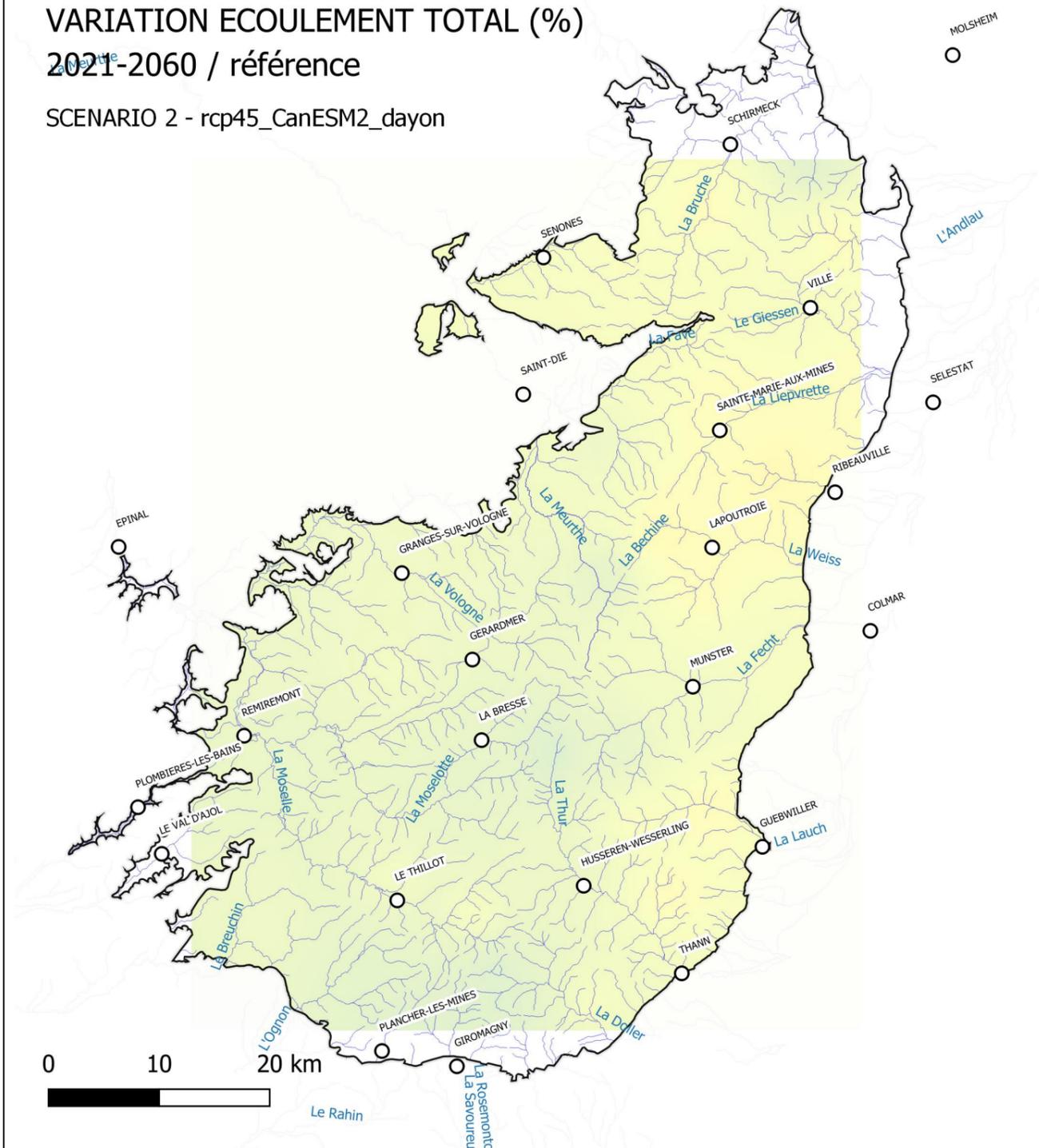


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

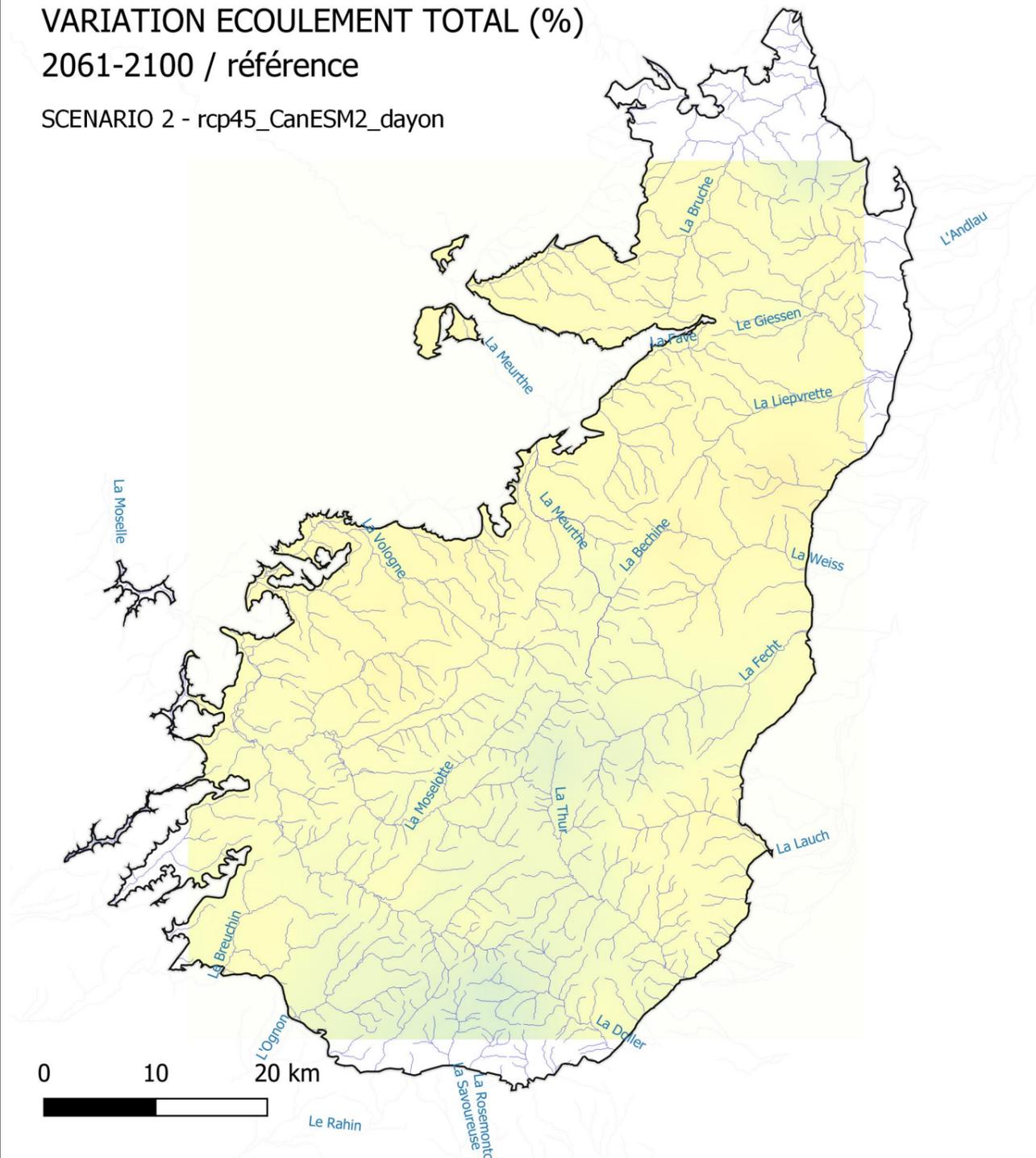
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 2 - rcp45_CanESM2_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 2 - rcp45_CanESM2_dayon

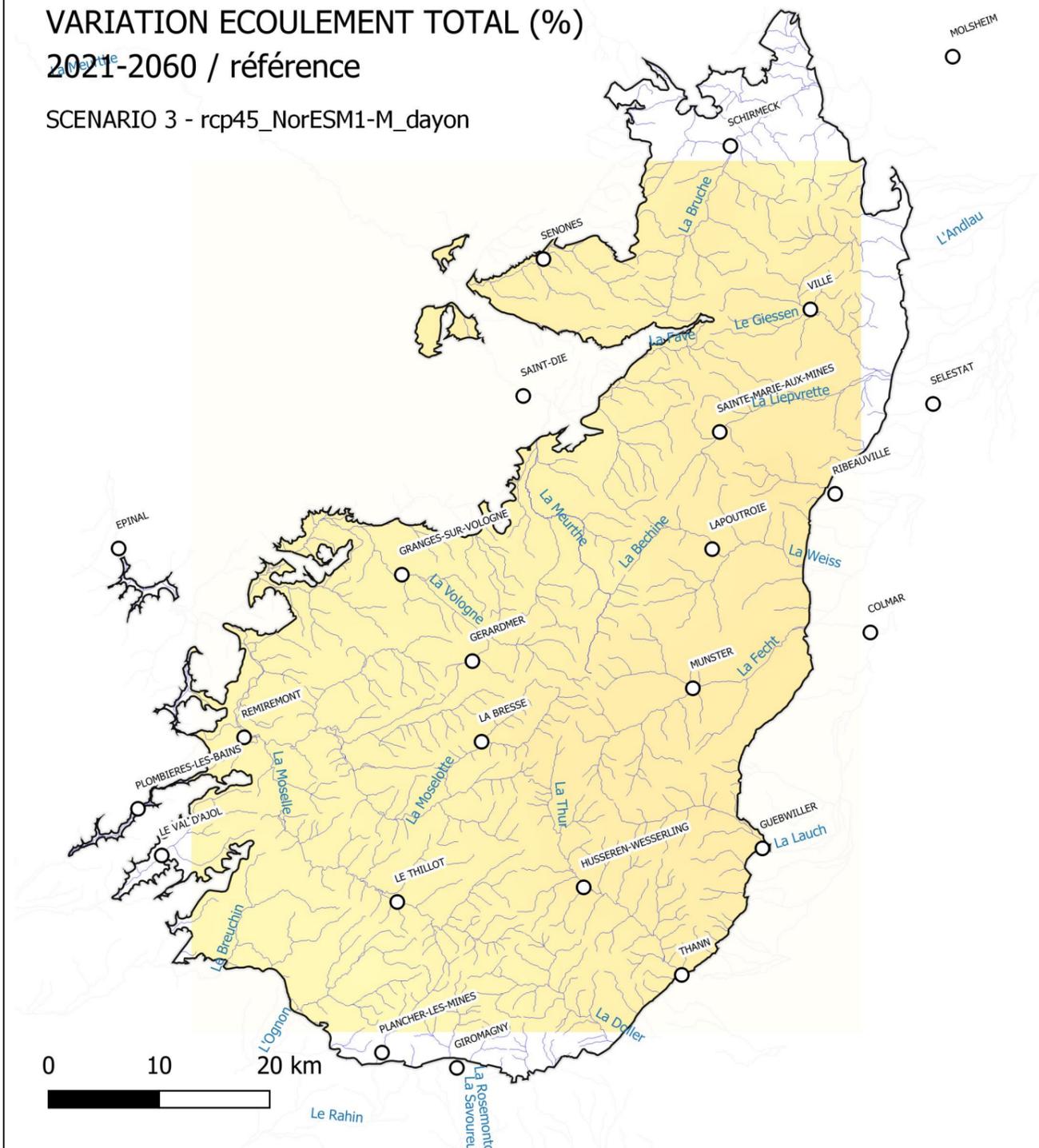


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

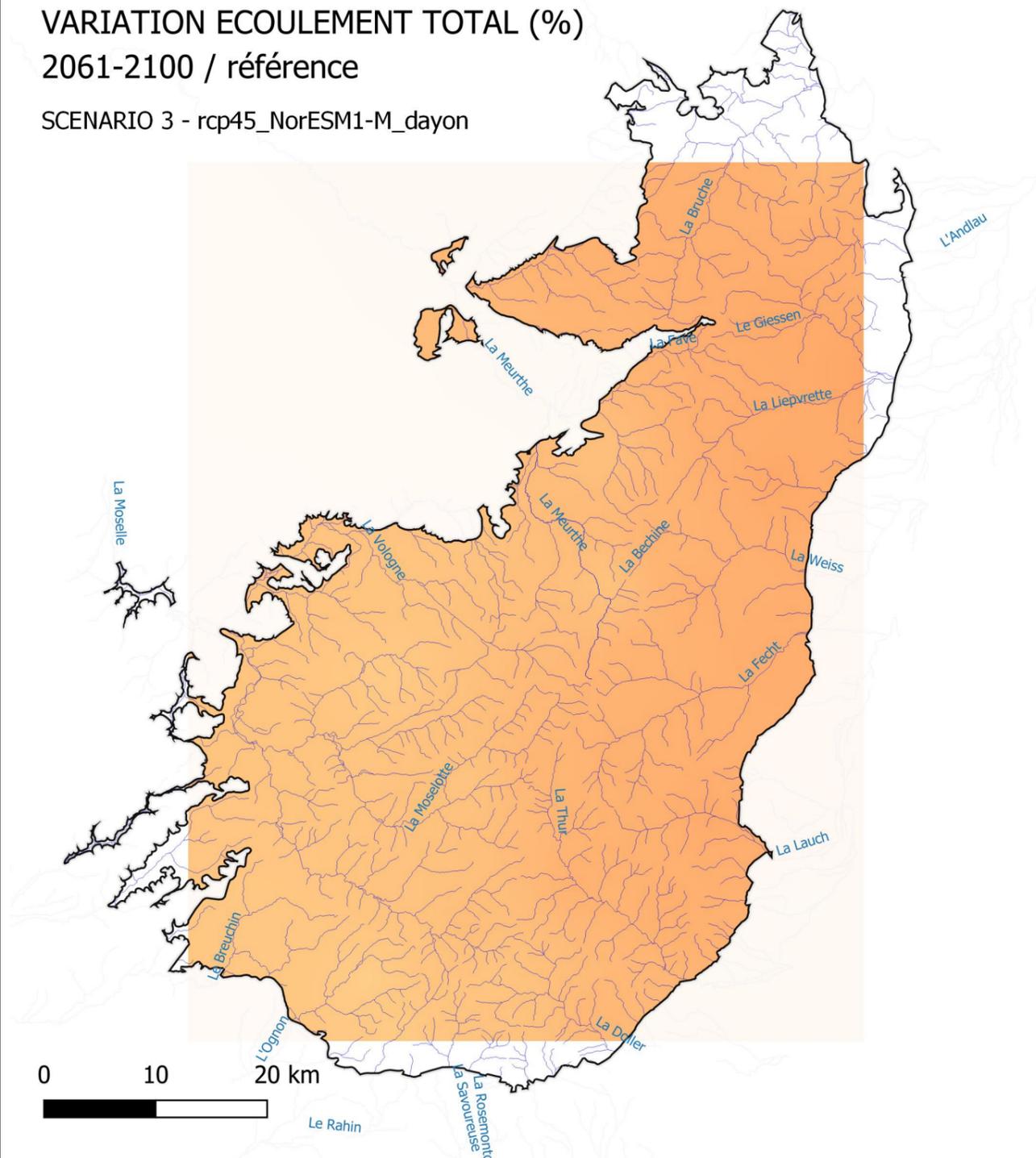
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 3 - rcp45_NorESM1-M_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 3 - rcp45_NorESM1-M_dayon



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

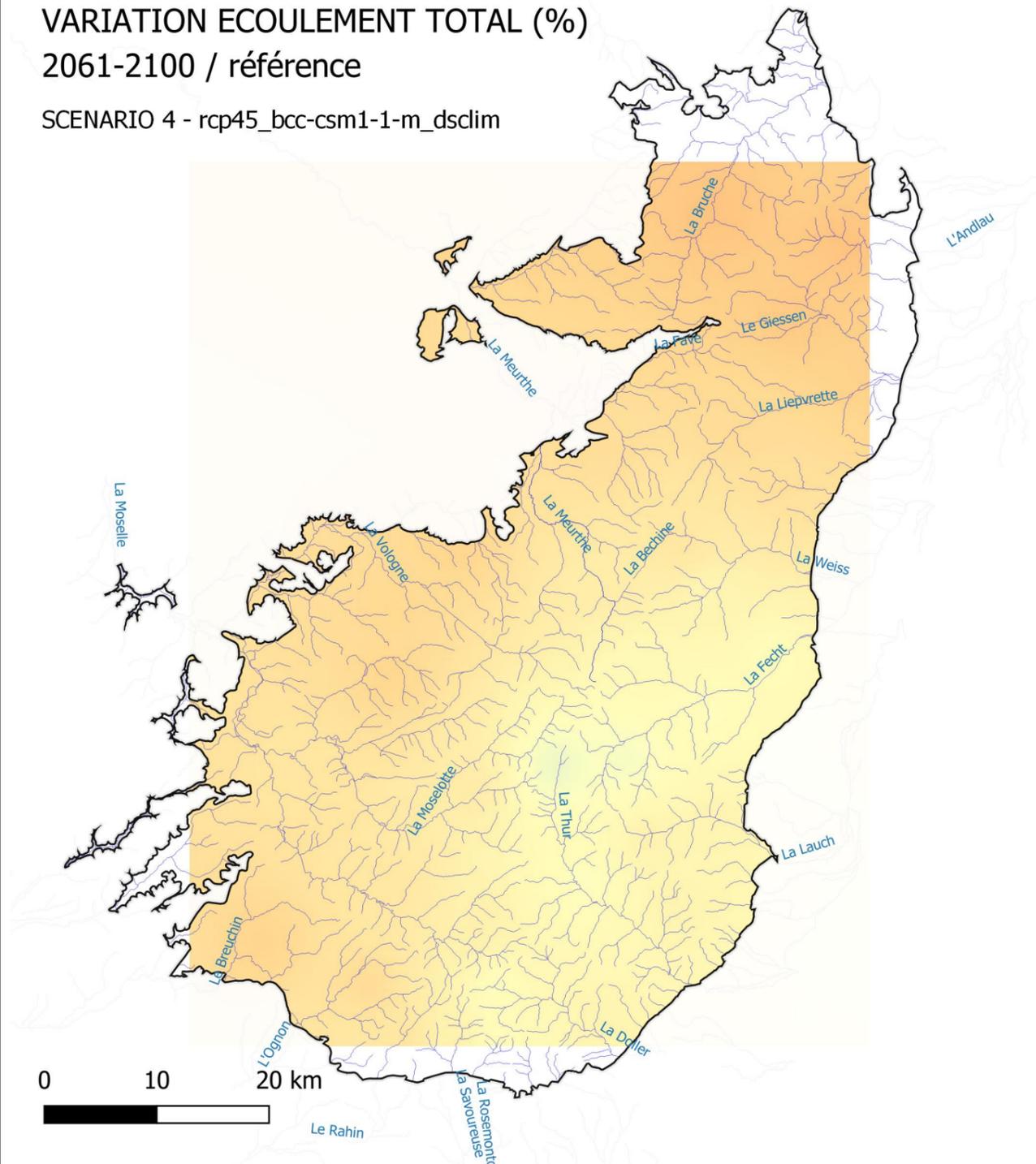
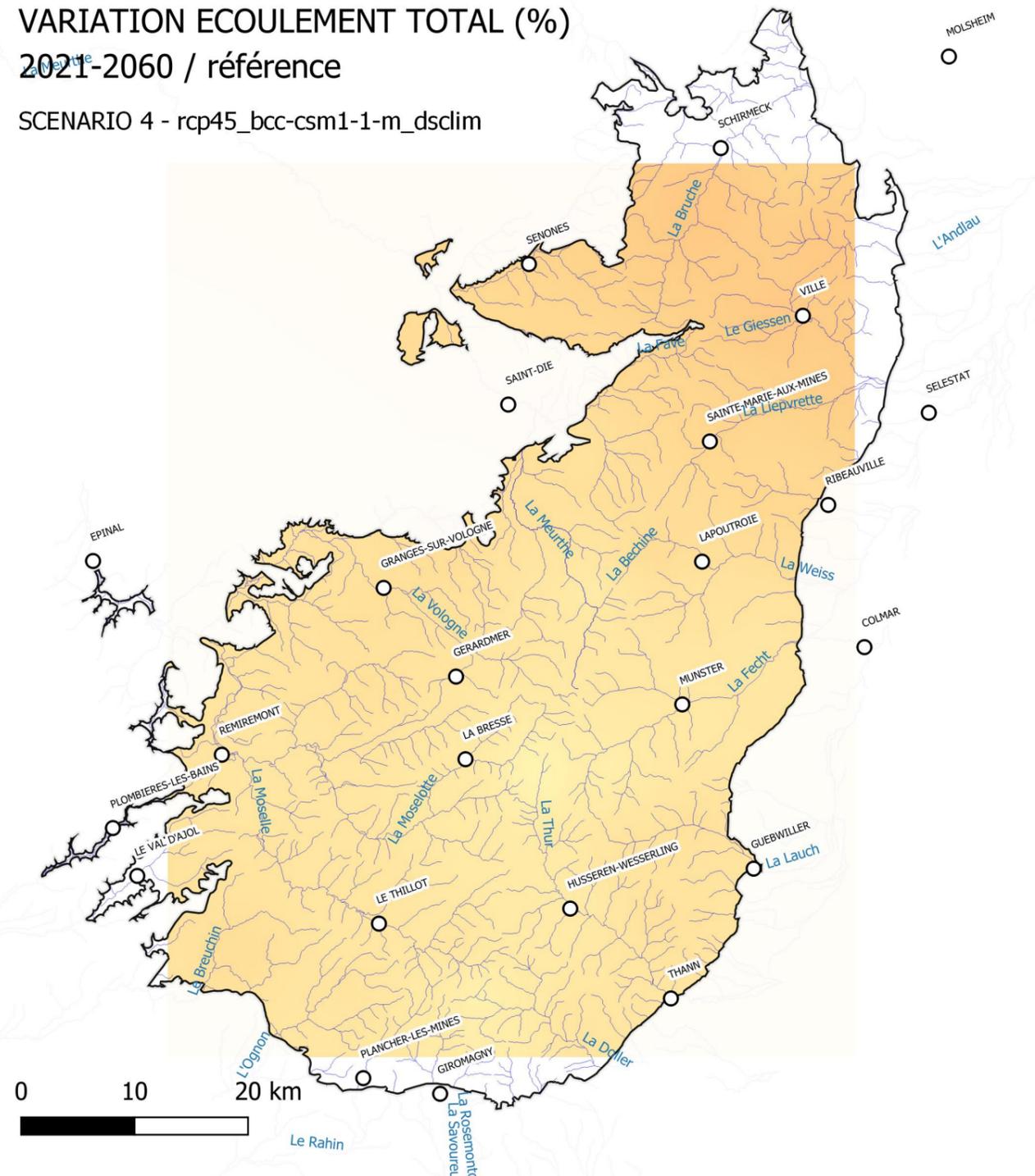
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 4 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 4 - rcp45_bcc-csm1-1-m_dsclim



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

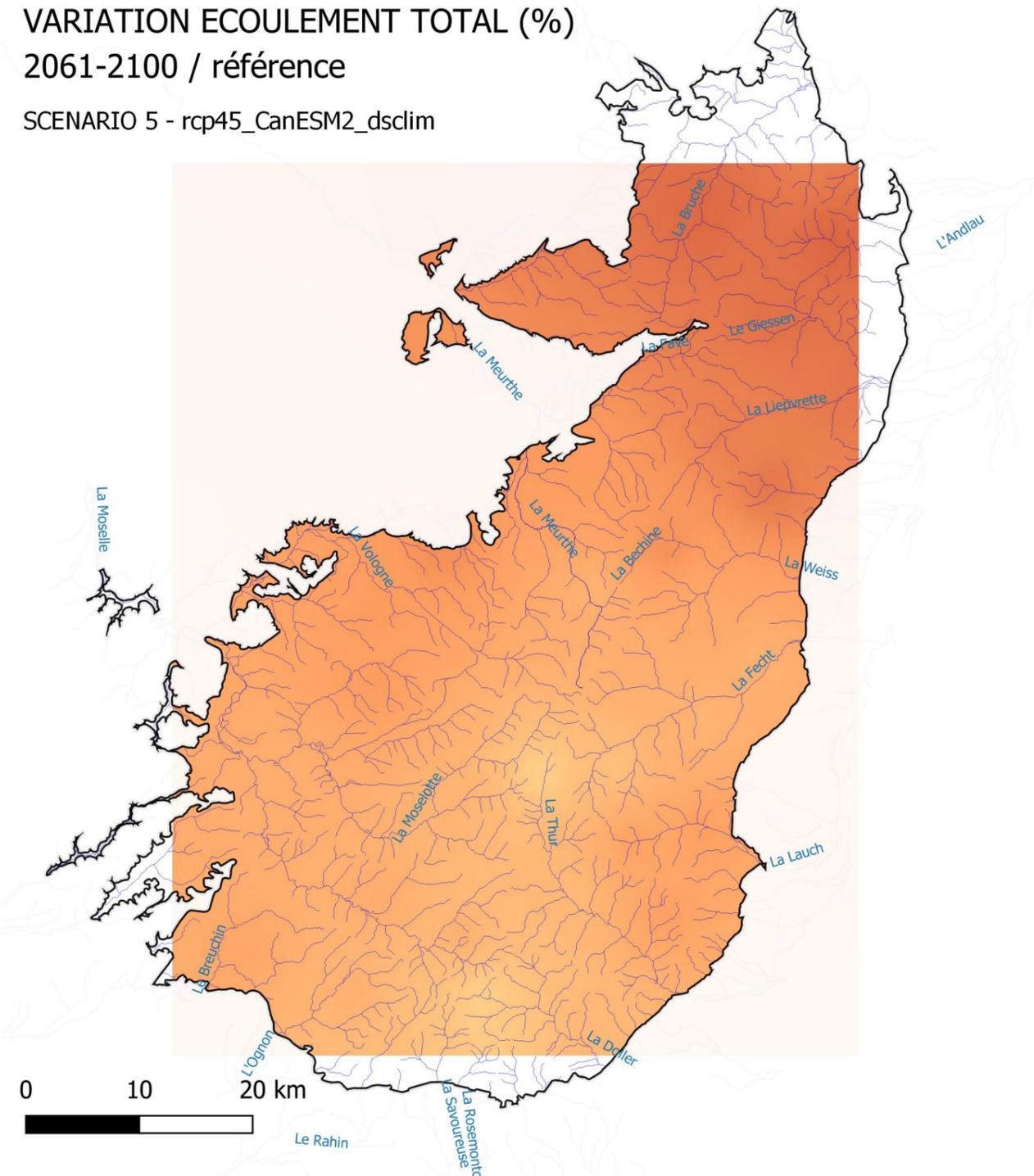
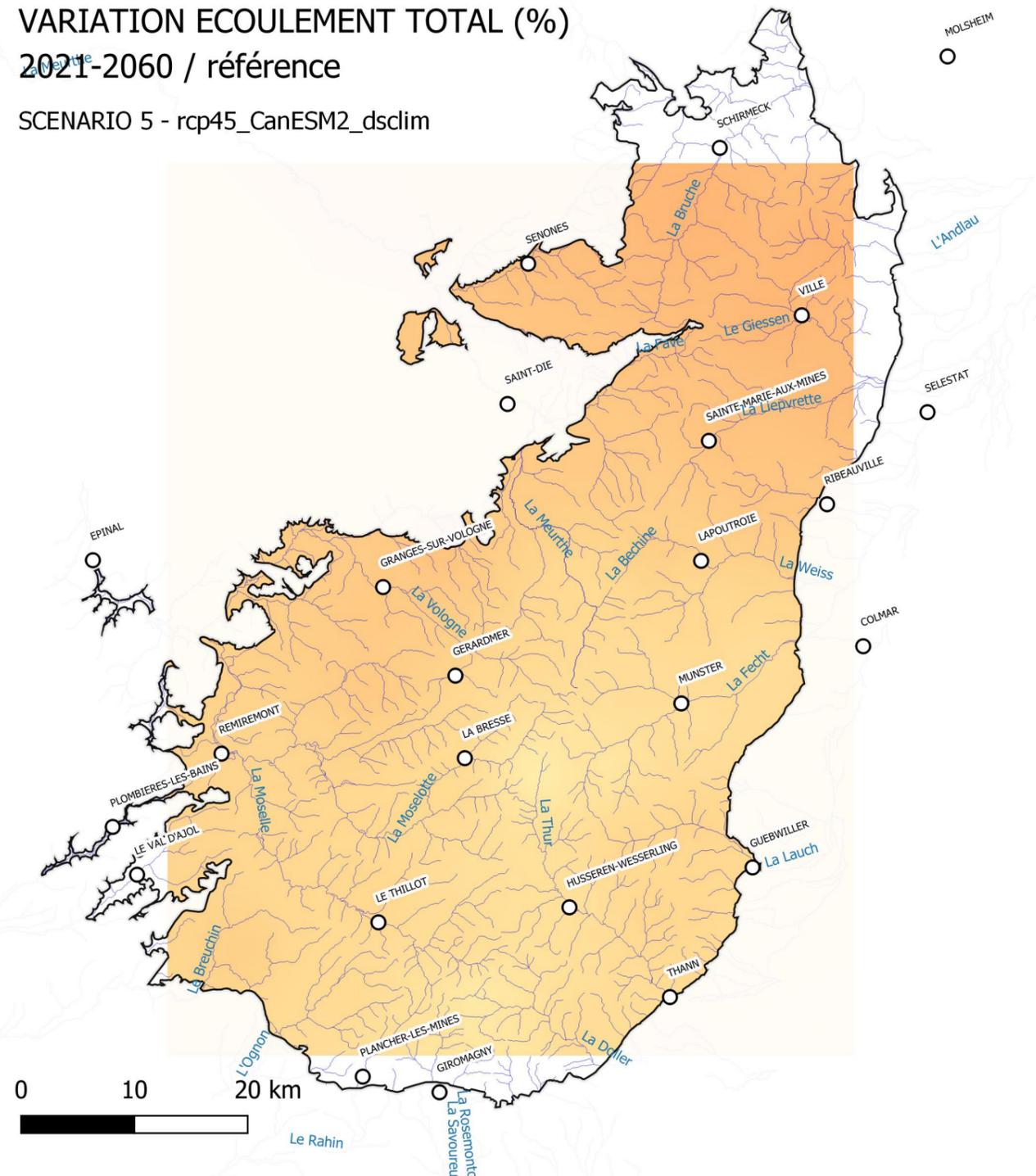
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 5 - rcp45_CanESM2_dsclim

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 5 - rcp45_CanESM2_dsclim



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

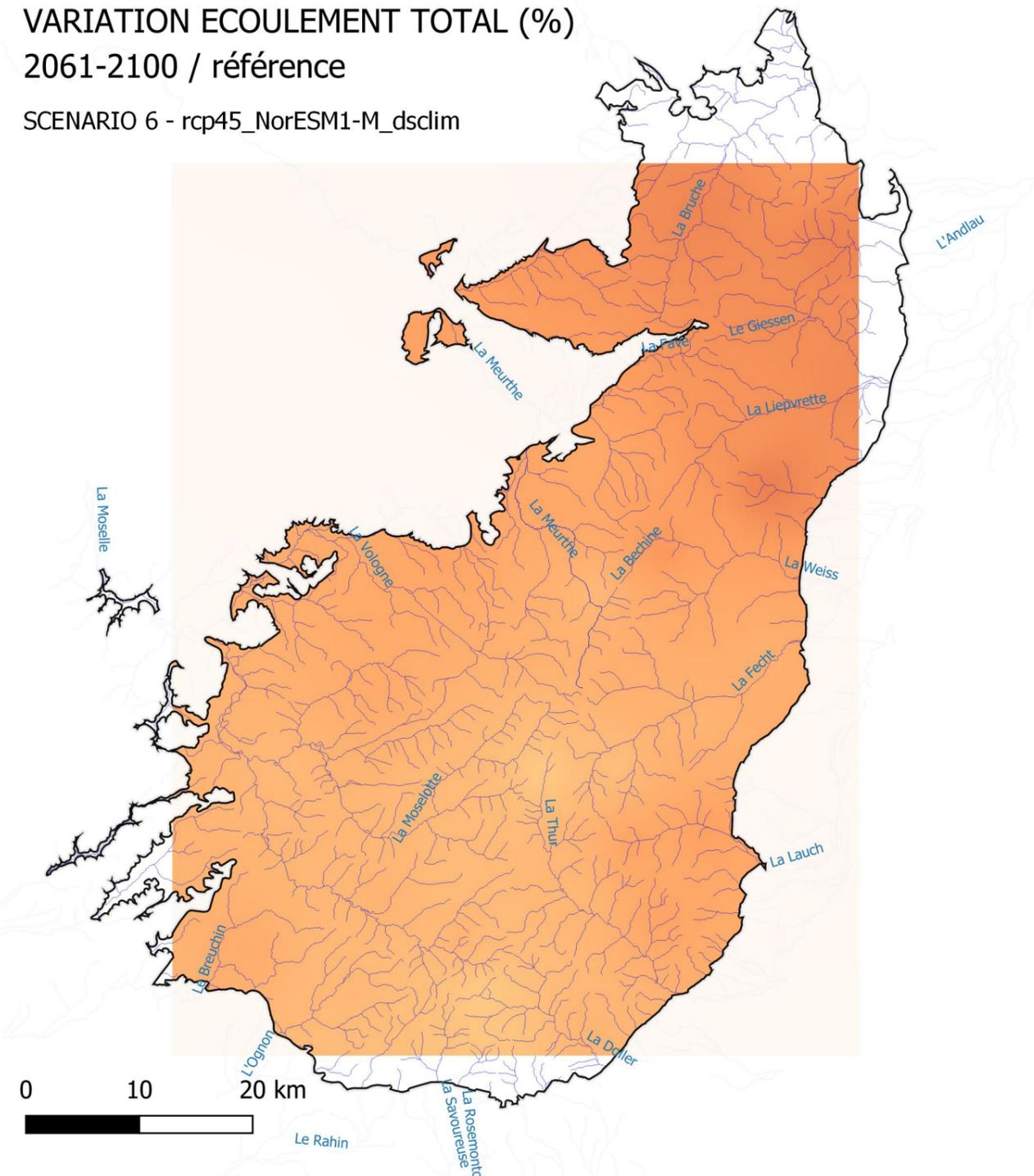
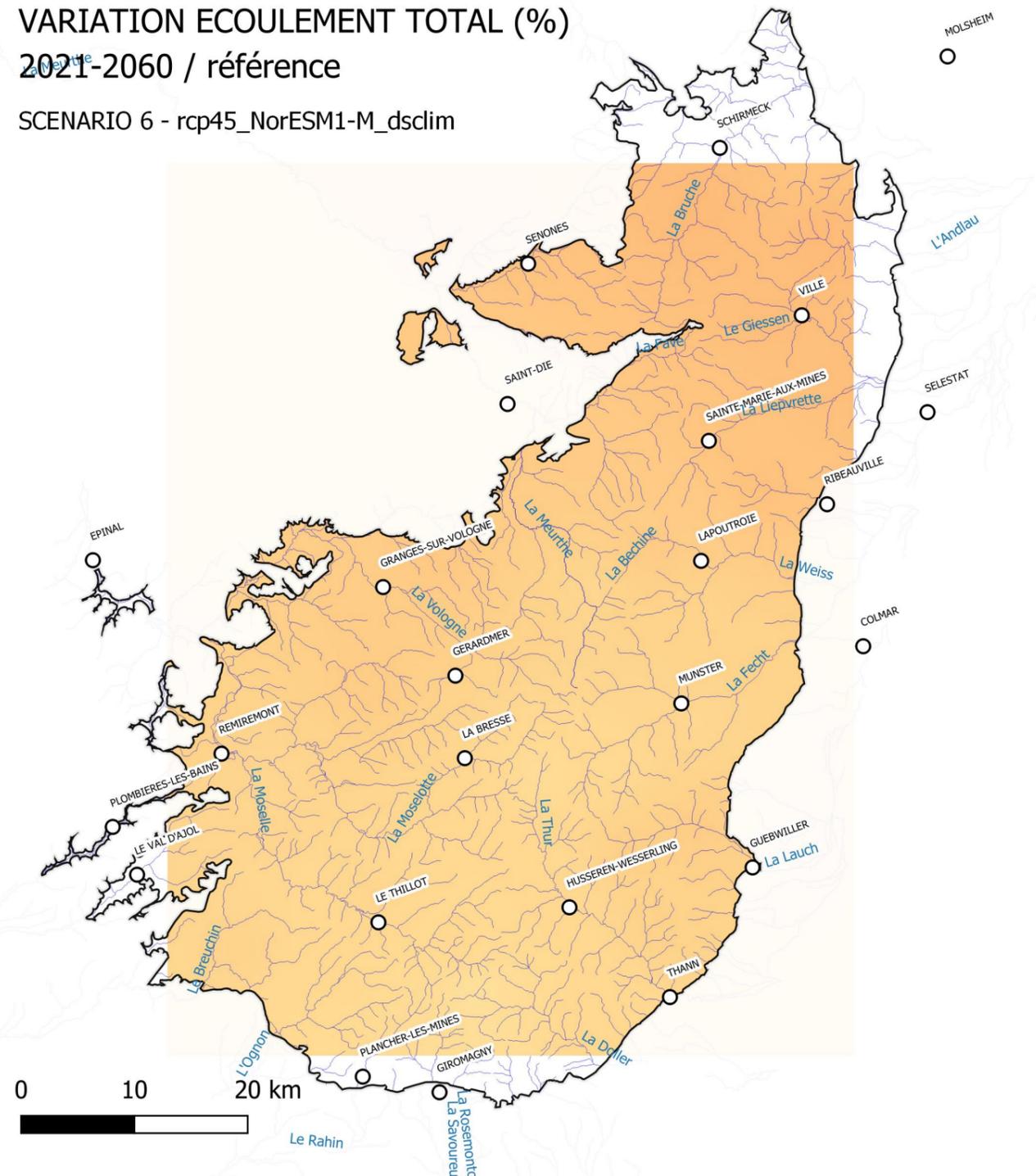
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 6 - rcp45_NorESM1-M_dsclim

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 6 - rcp45_NorESM1-M_dsclim

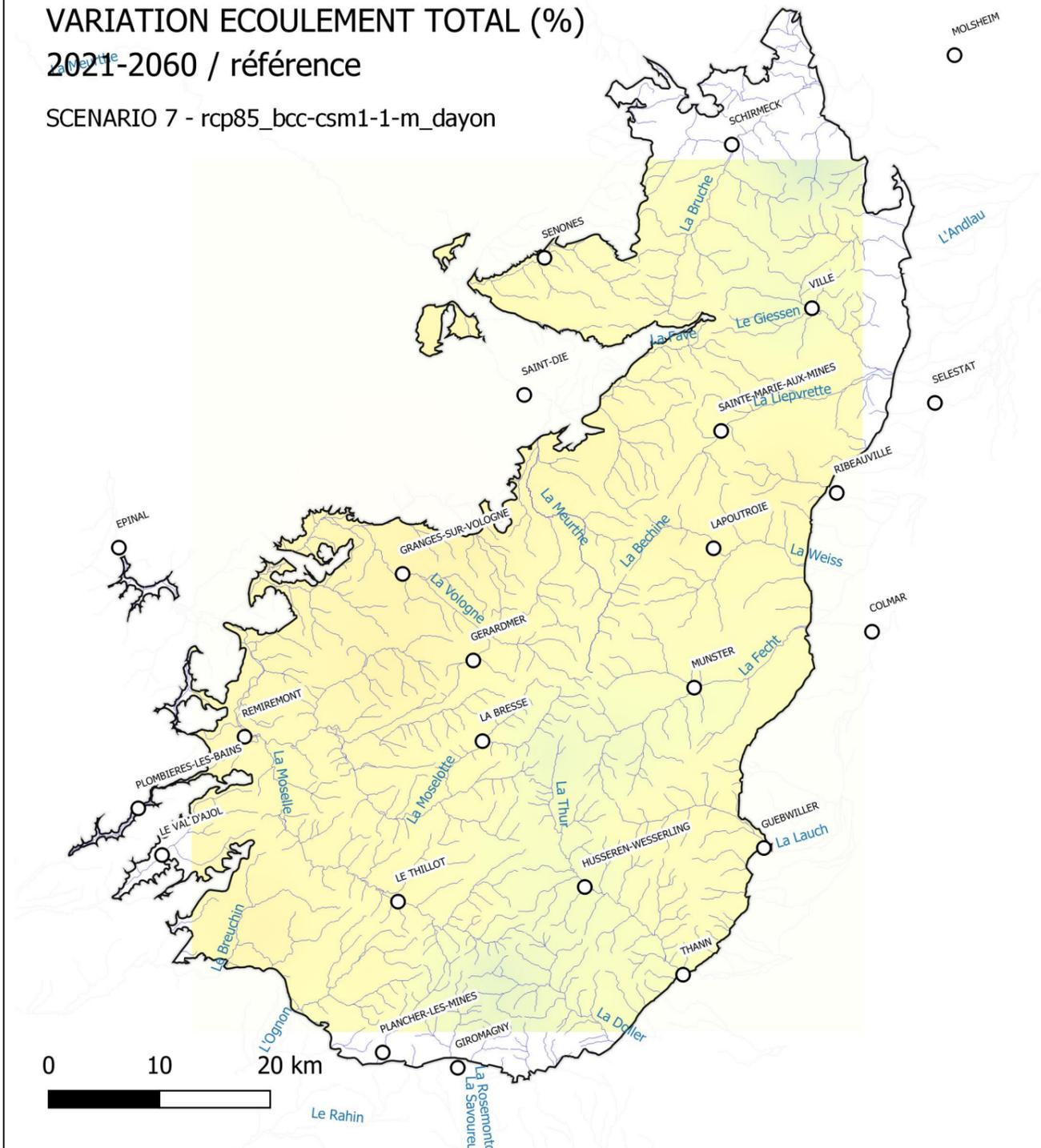


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

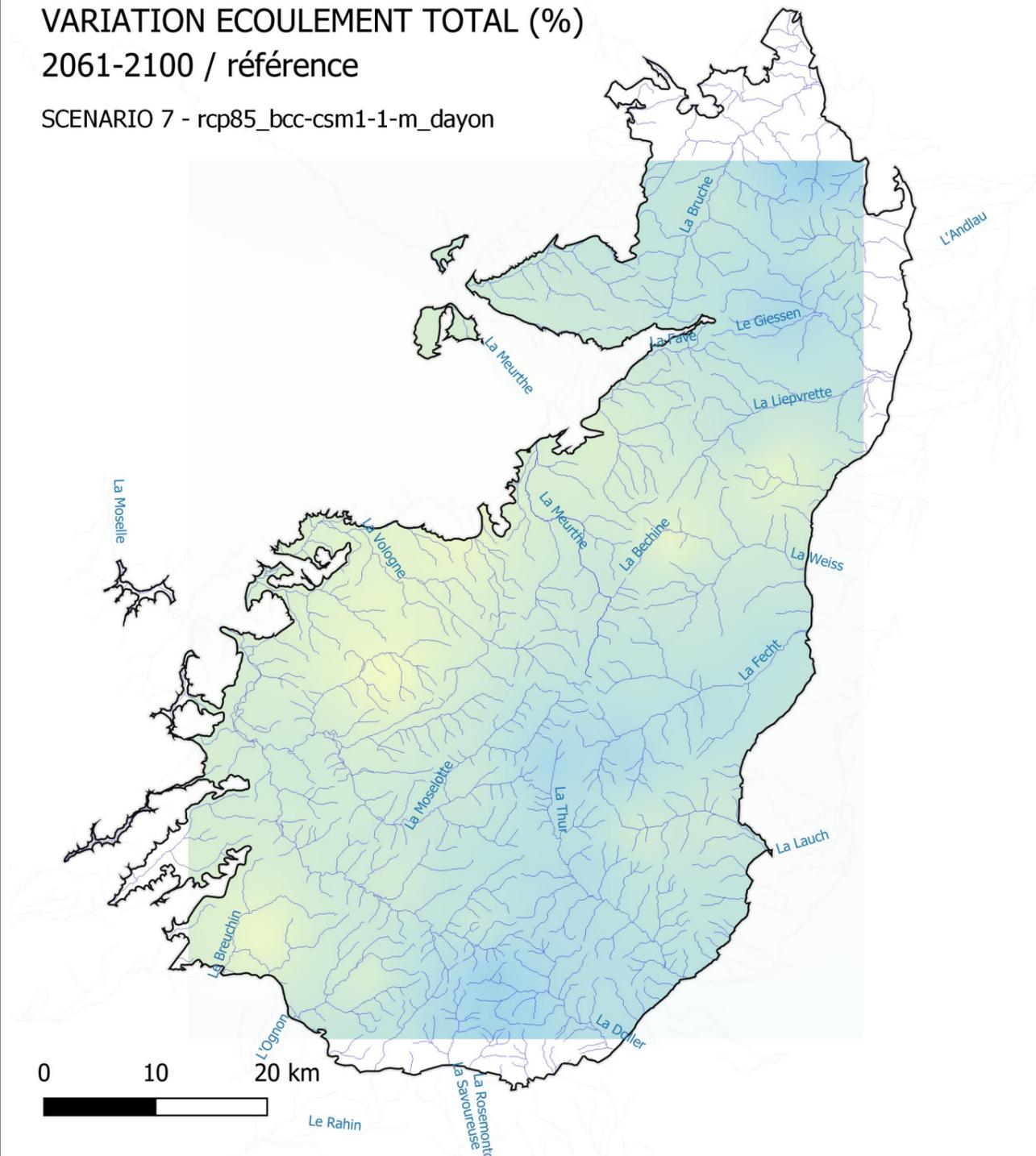
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 7 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 7 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dayon

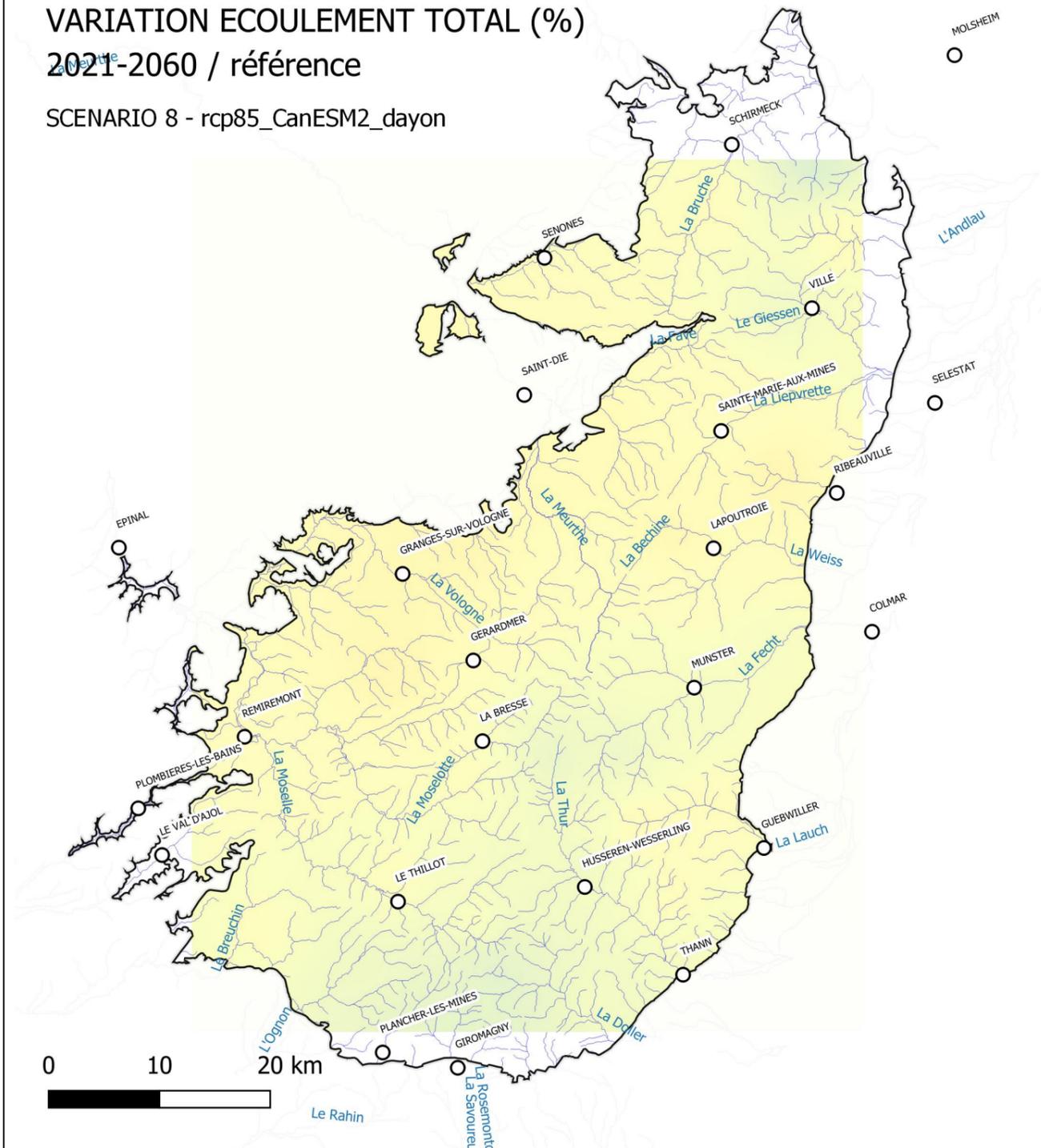


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

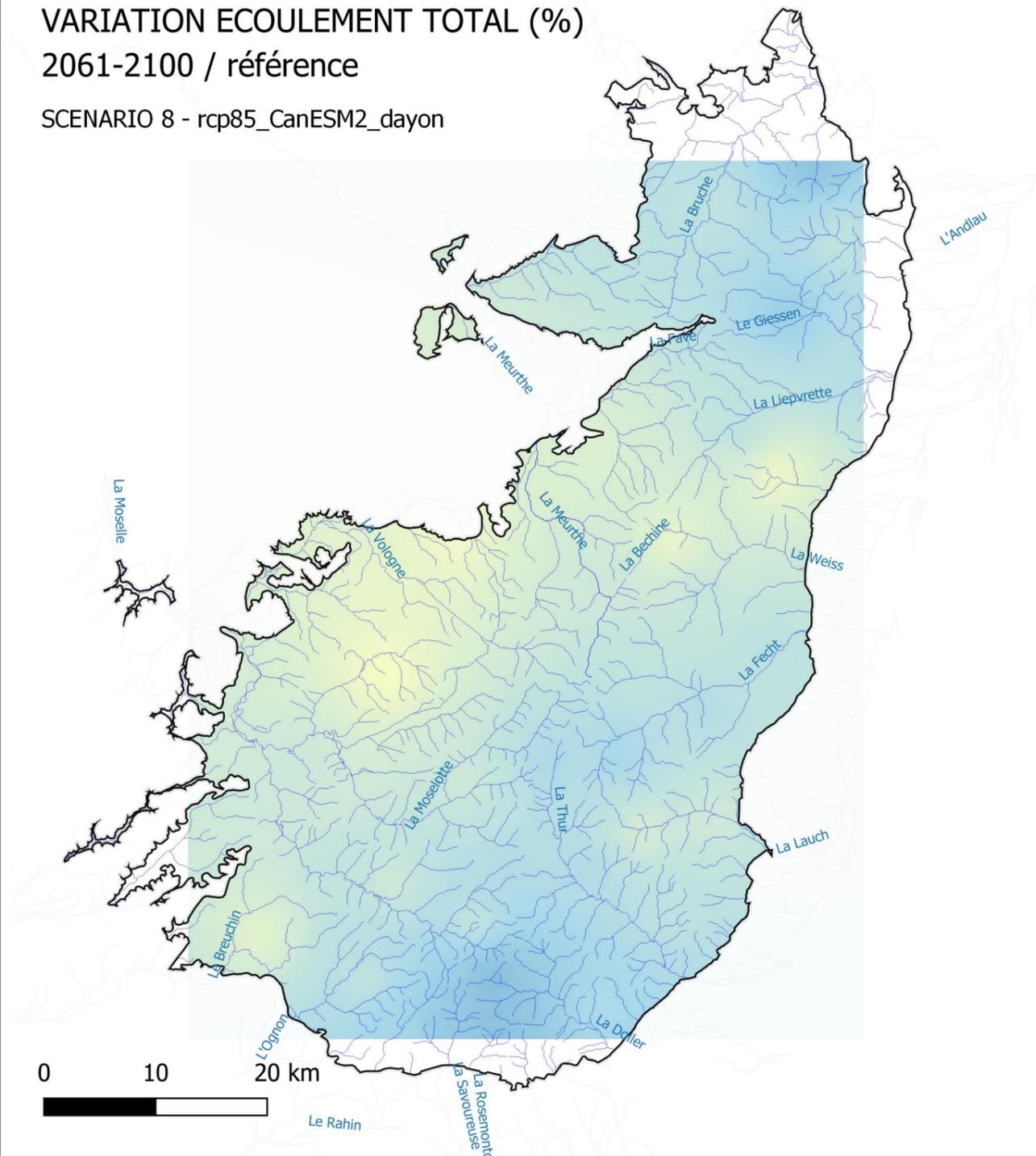
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 8 - rcp85_CanESM2_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 8 - rcp85_CanESM2_dayon

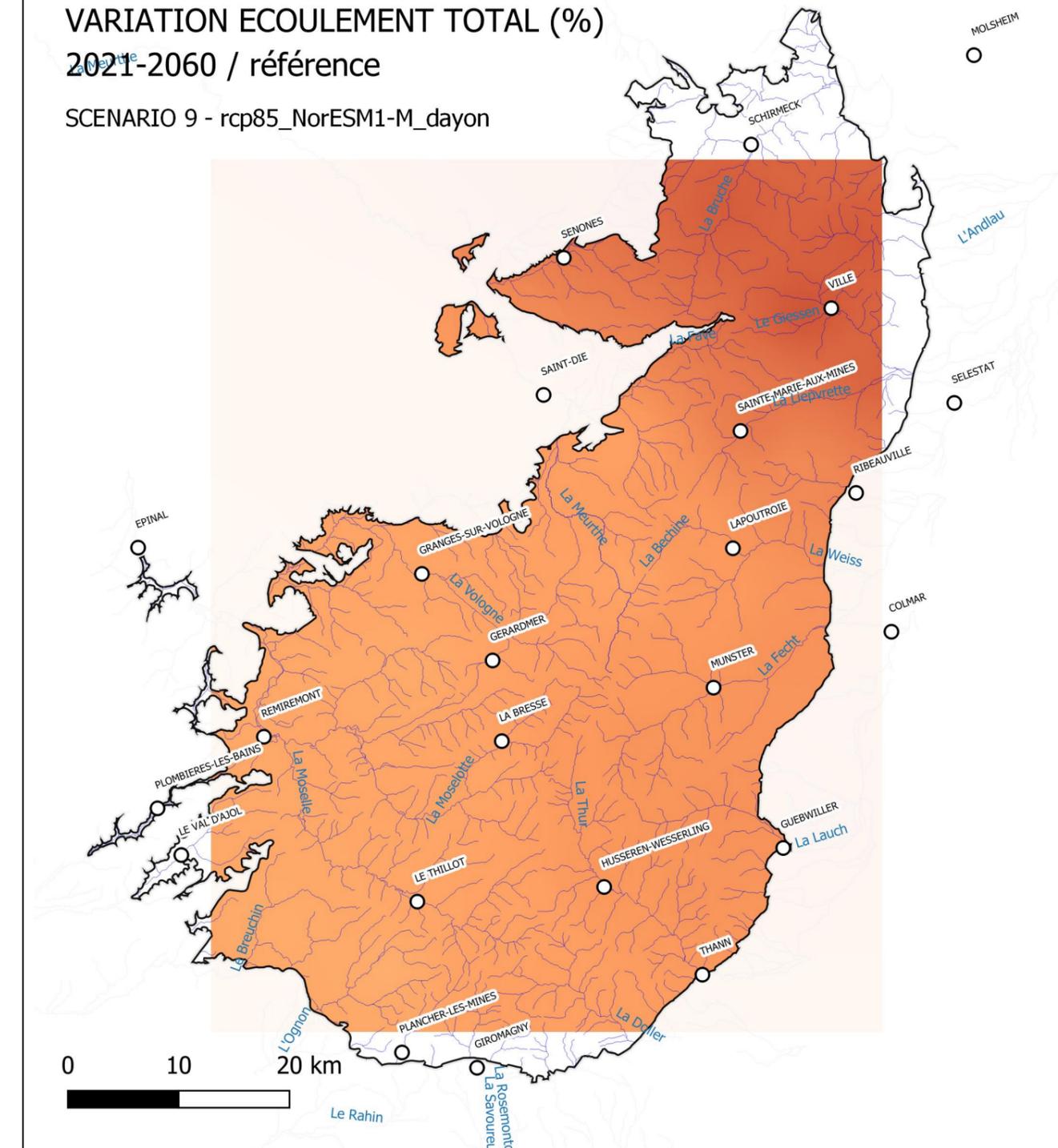


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

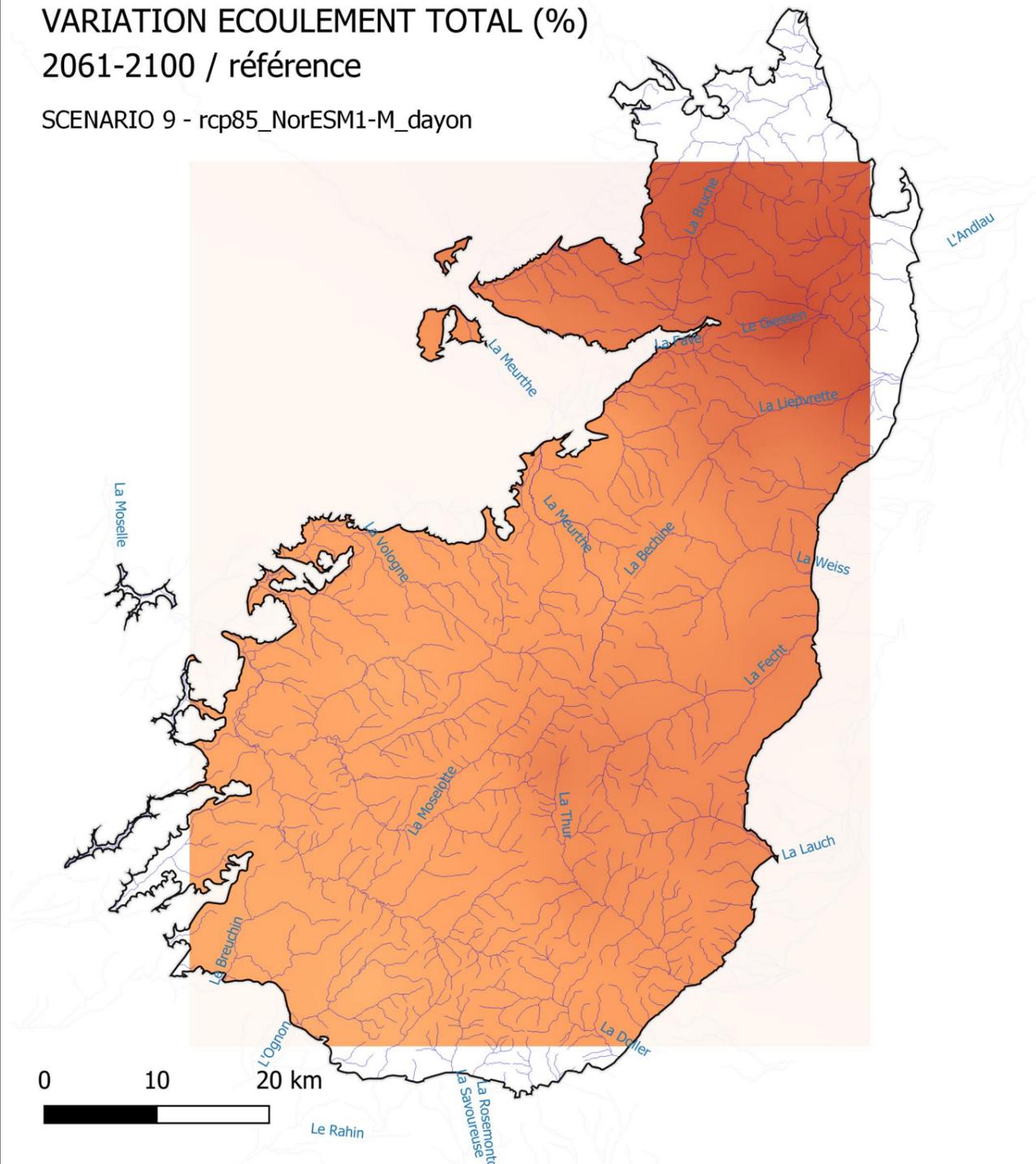
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 9 - rcp85_NorESM1-M_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 9 - rcp85_NorESM1-M_dayon

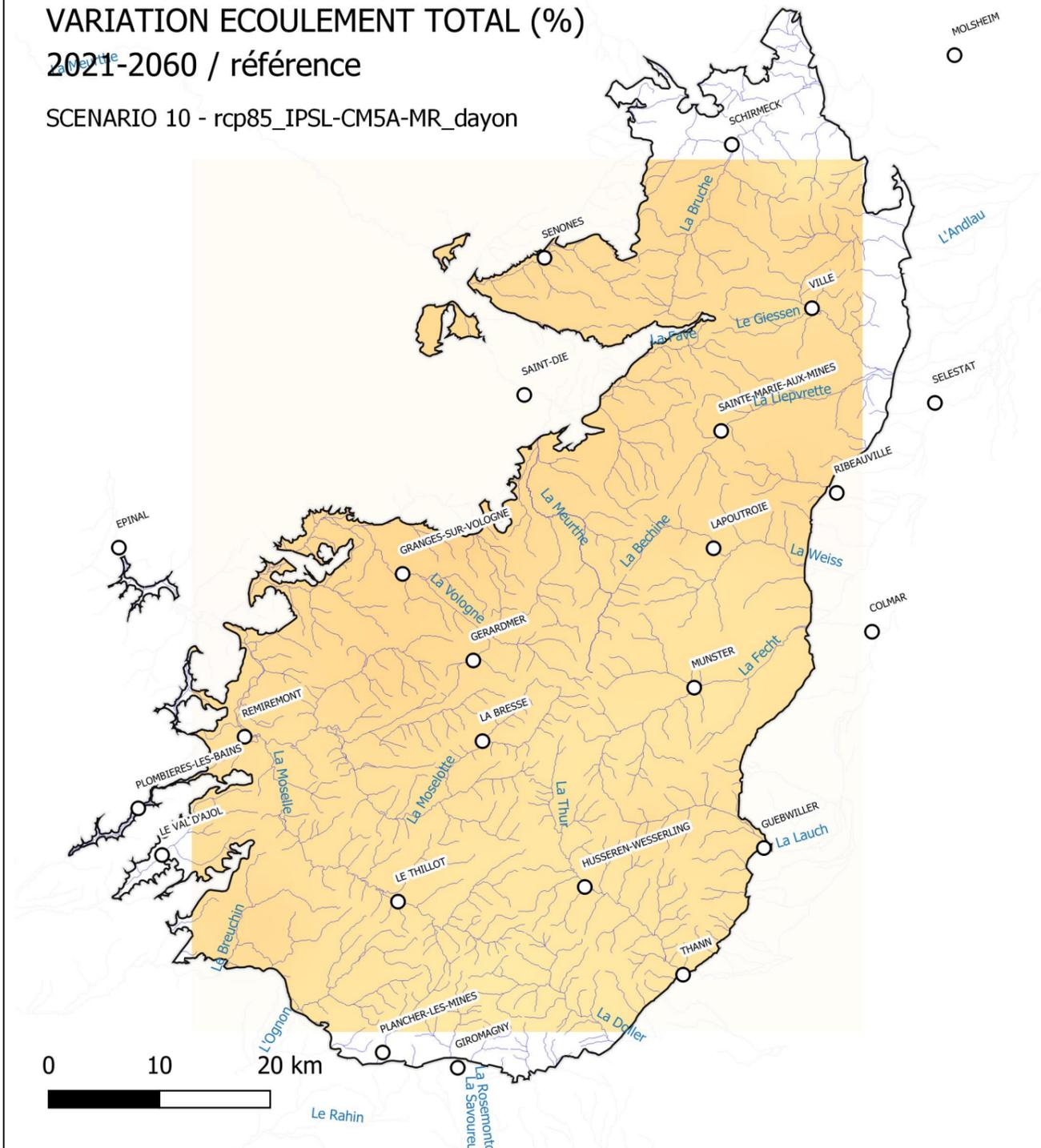


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

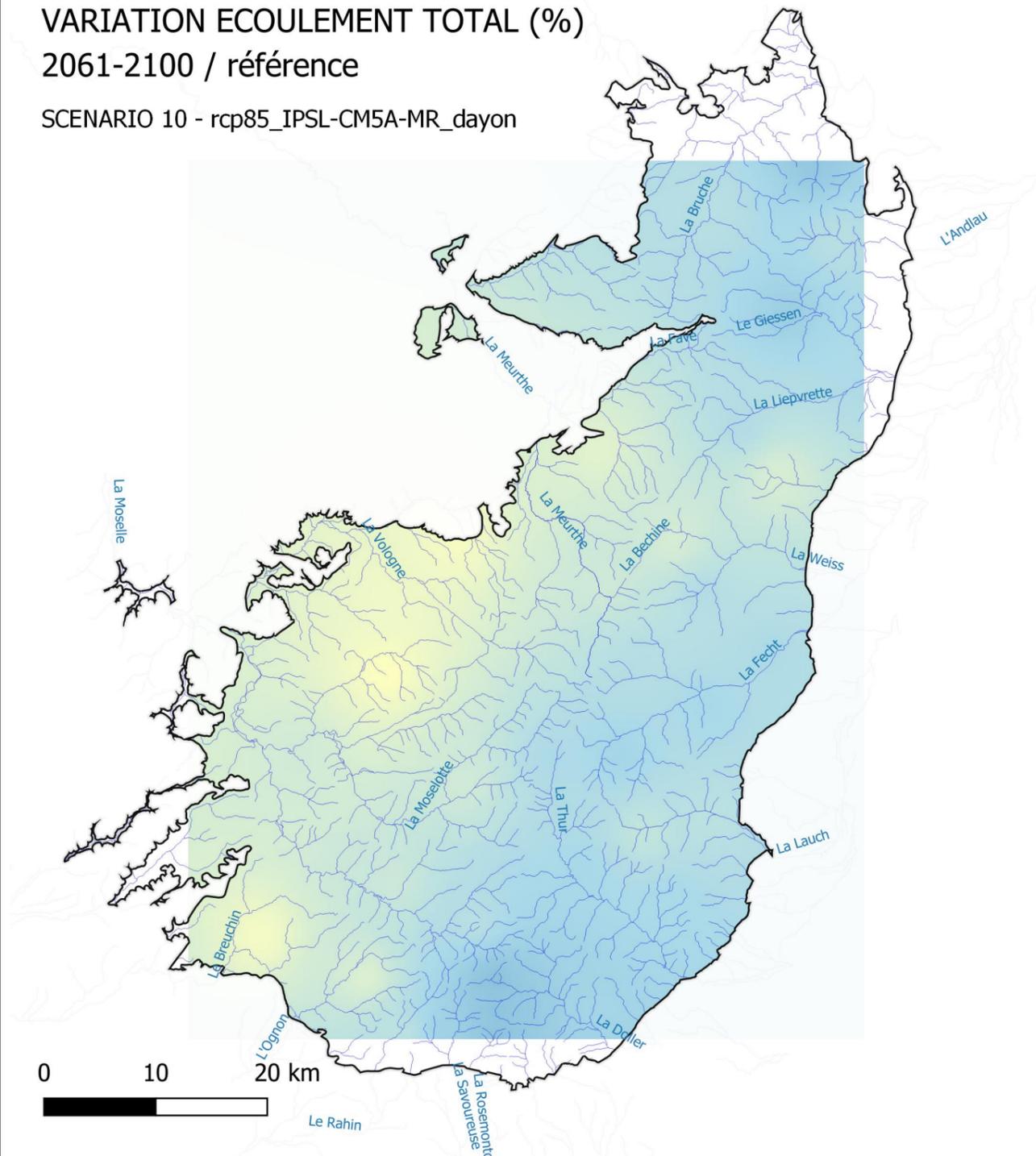
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 10 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 10 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dayon

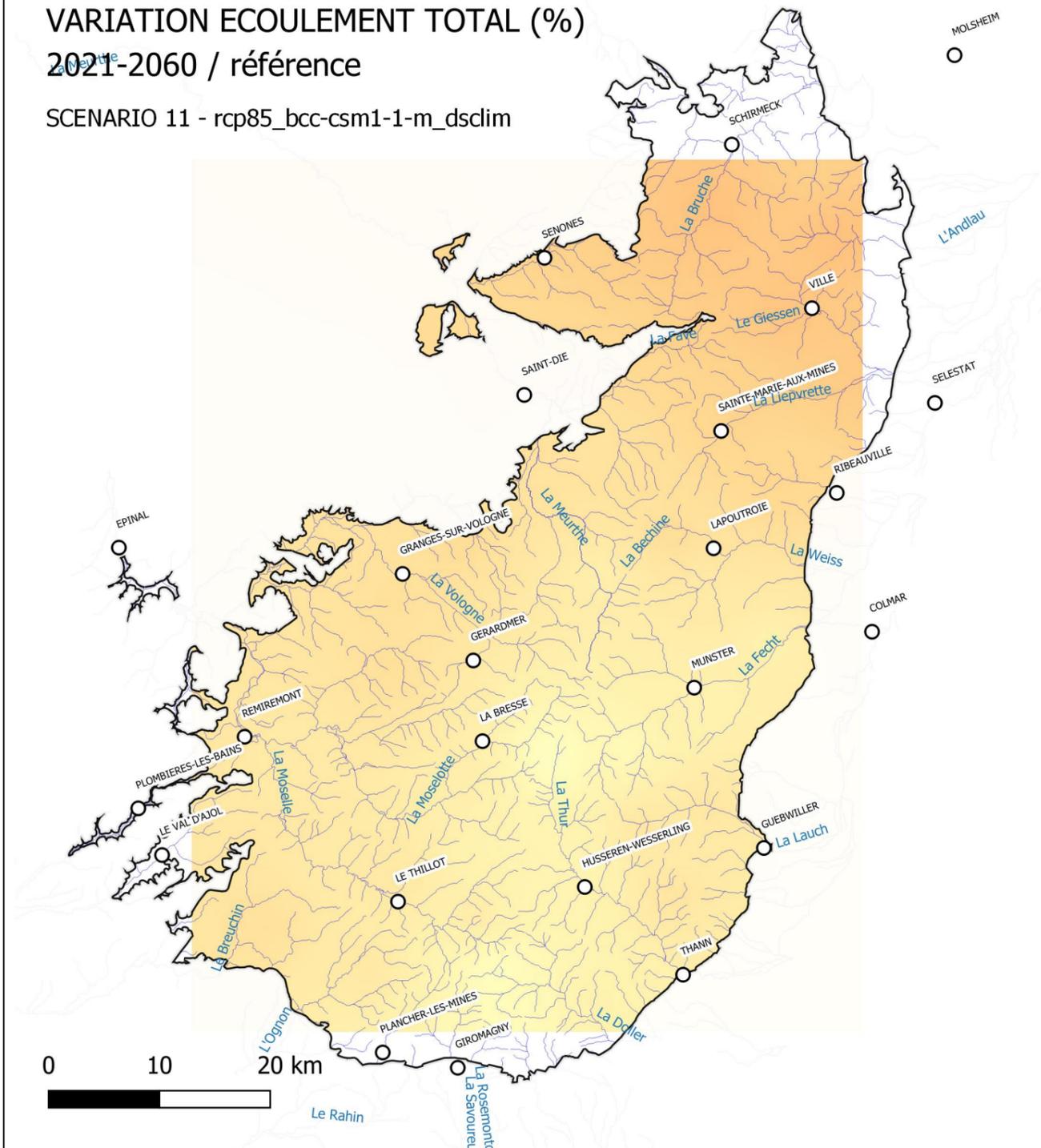


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

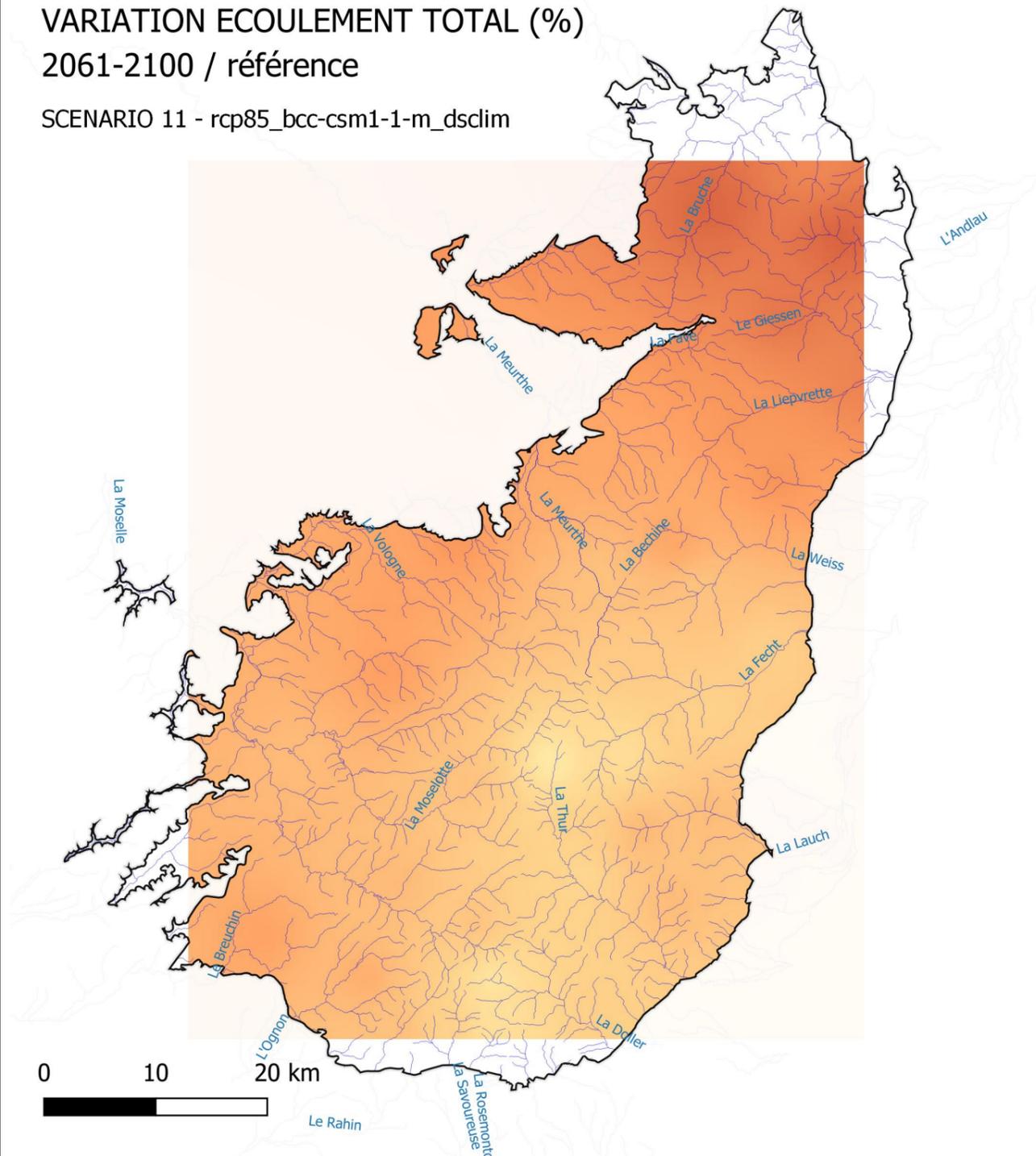
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 11 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 11 - rcp85_bcc-csm1-1-m_dsclim

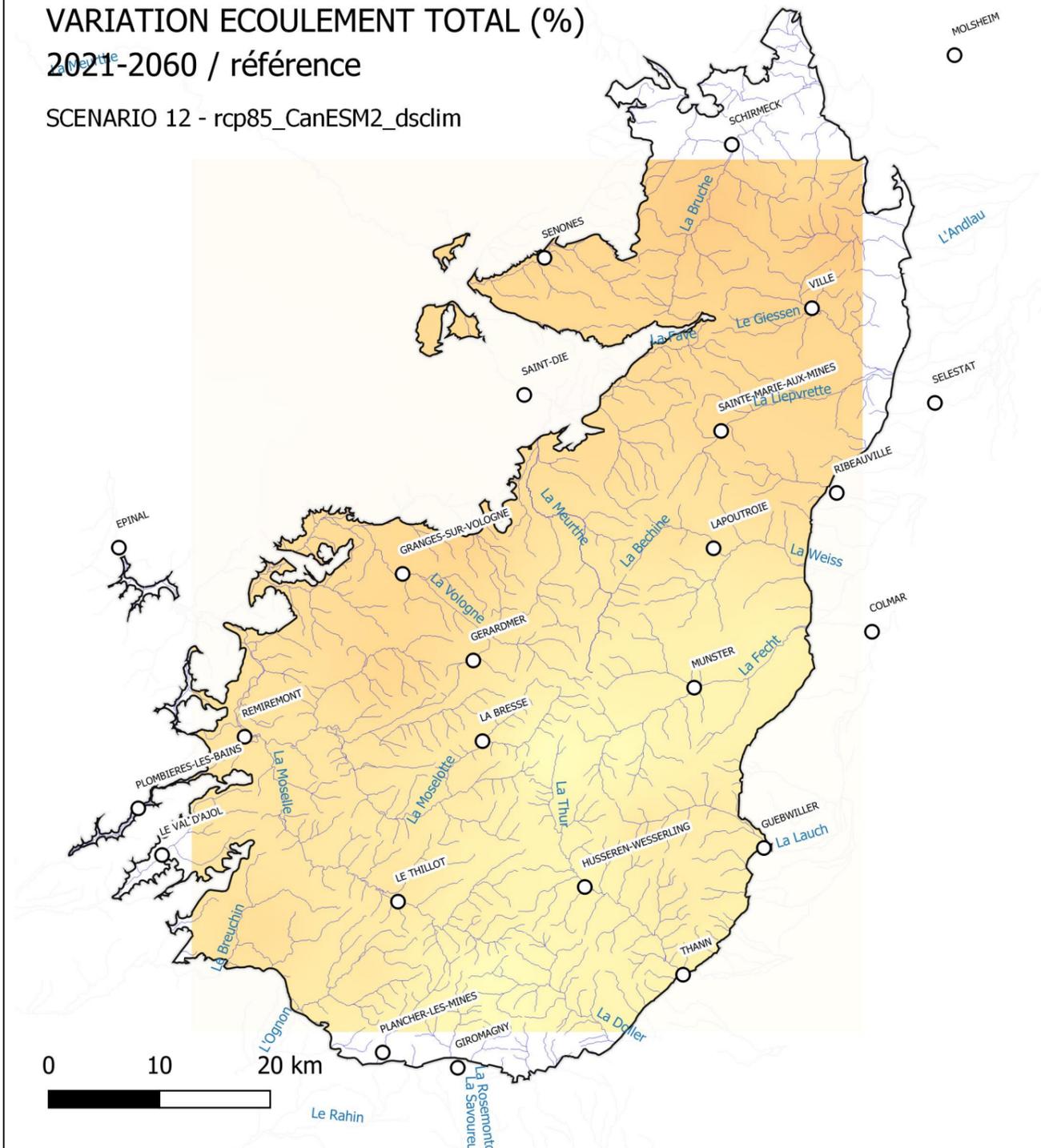


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

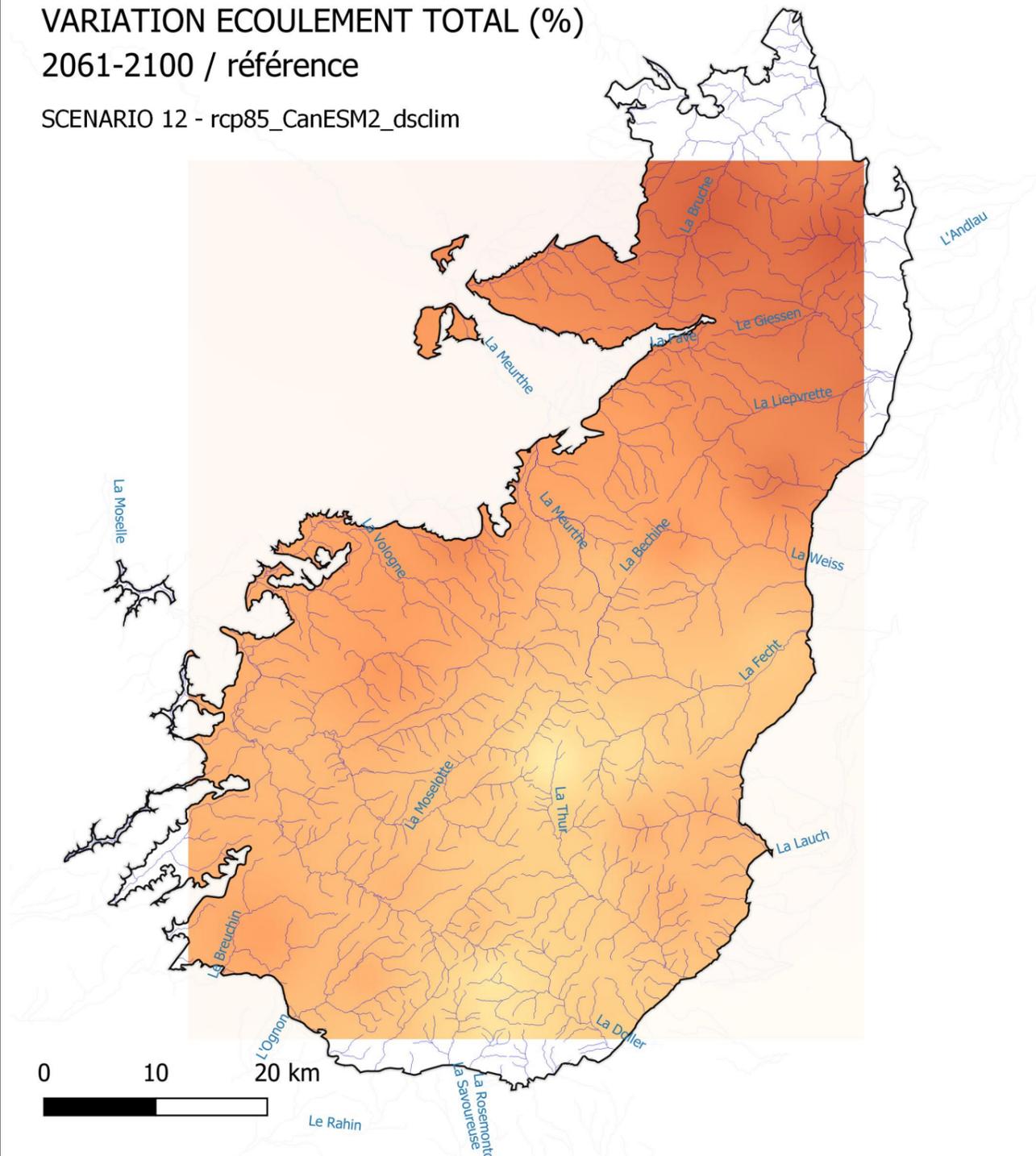
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 12 - rcp85_CanESM2_dsclim



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 12 - rcp85_CanESM2_dsclim

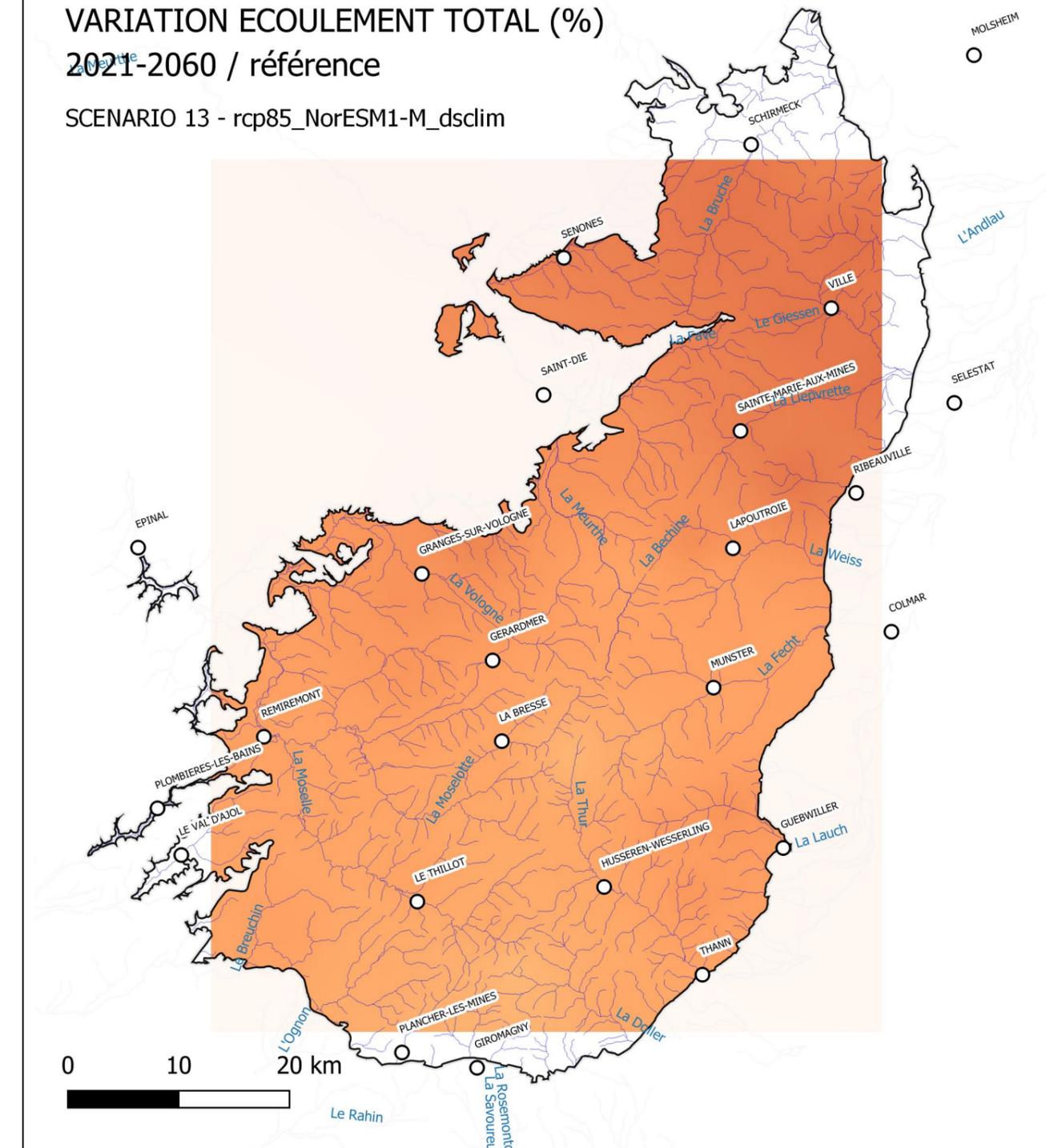


HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

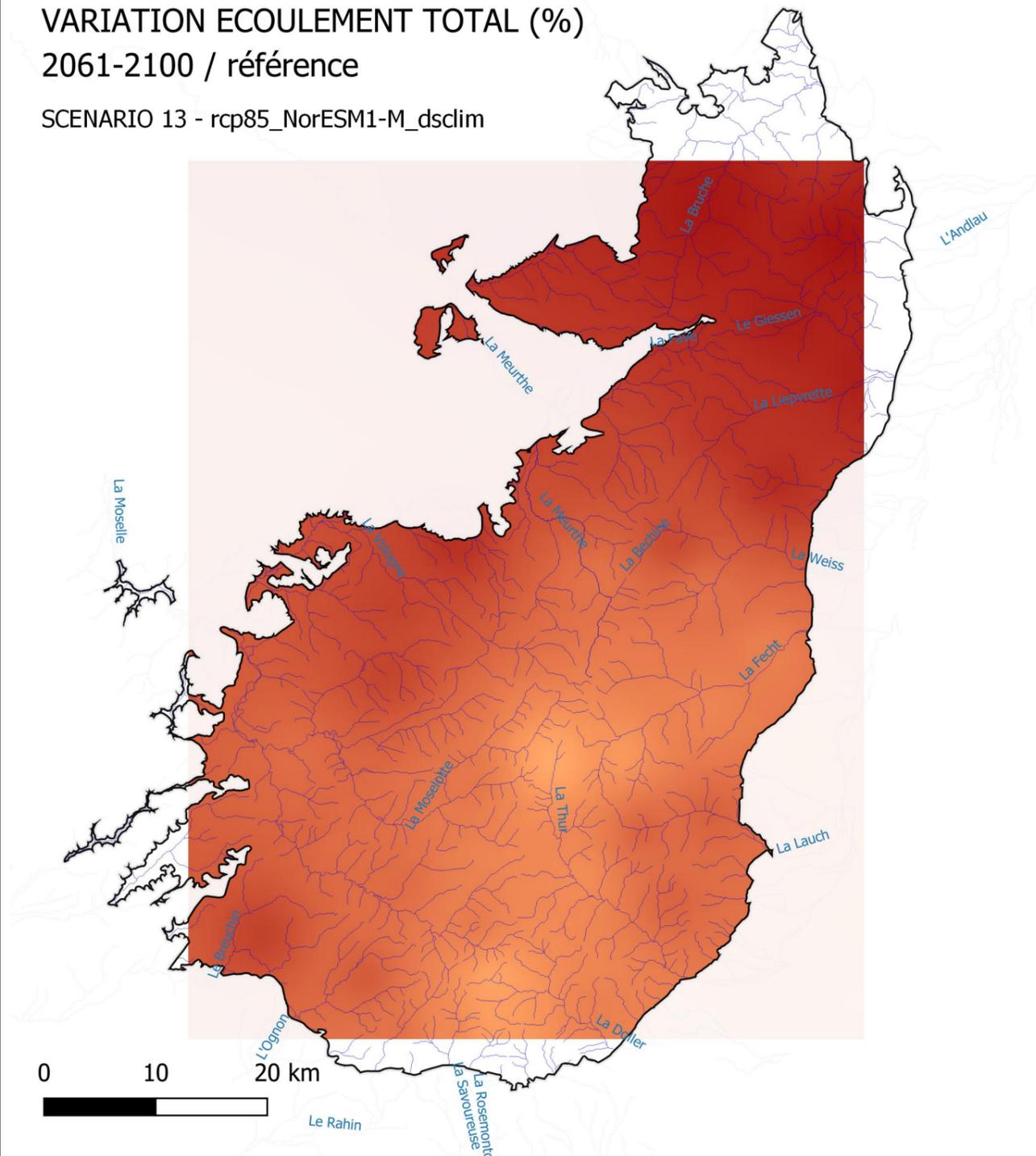
VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 13 - rcp85_NorESM1-M_dsclim



VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

SCENARIO 13 - rcp85_NorESM1-M_dsclim



HORIZON 2060 – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

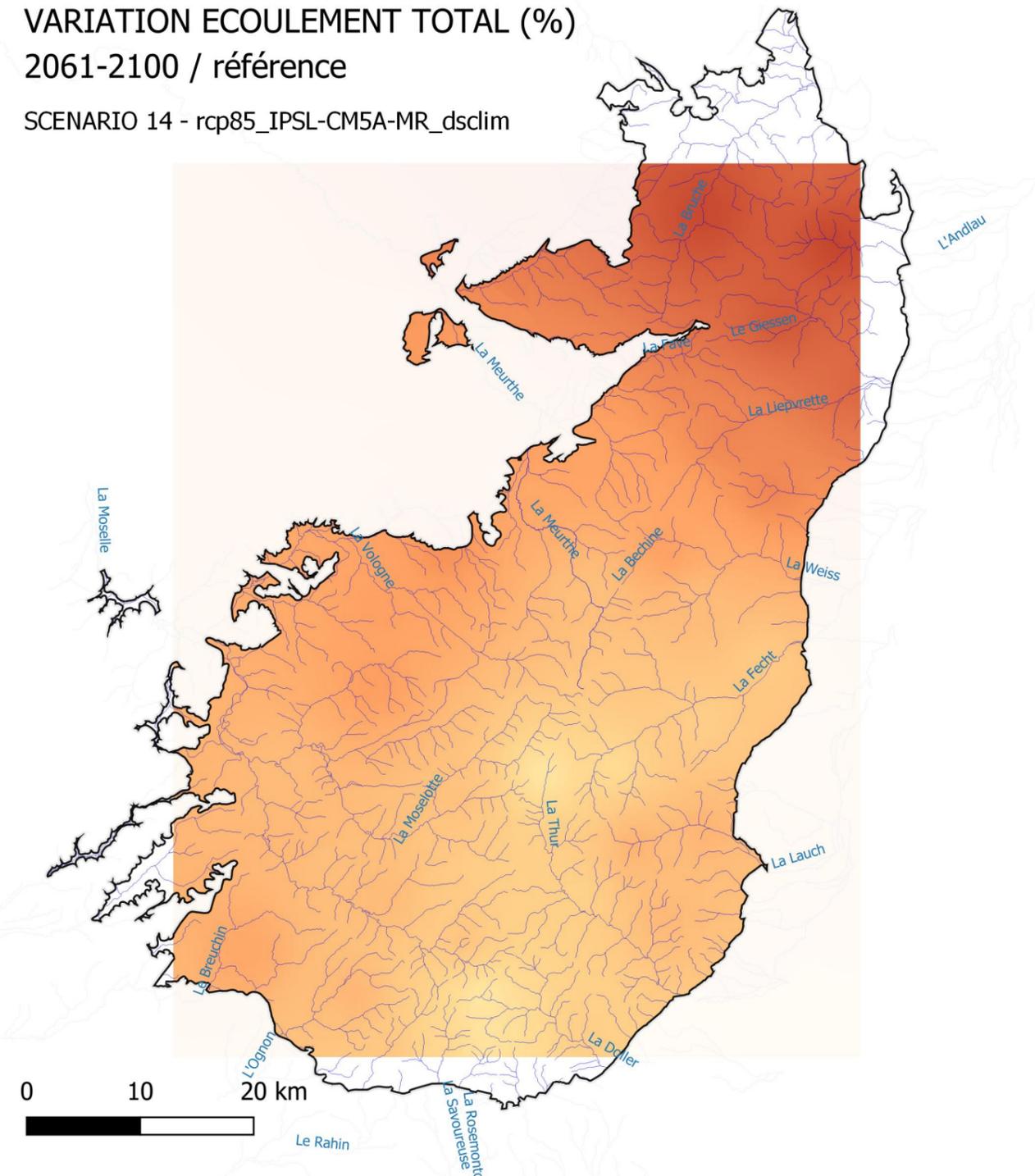
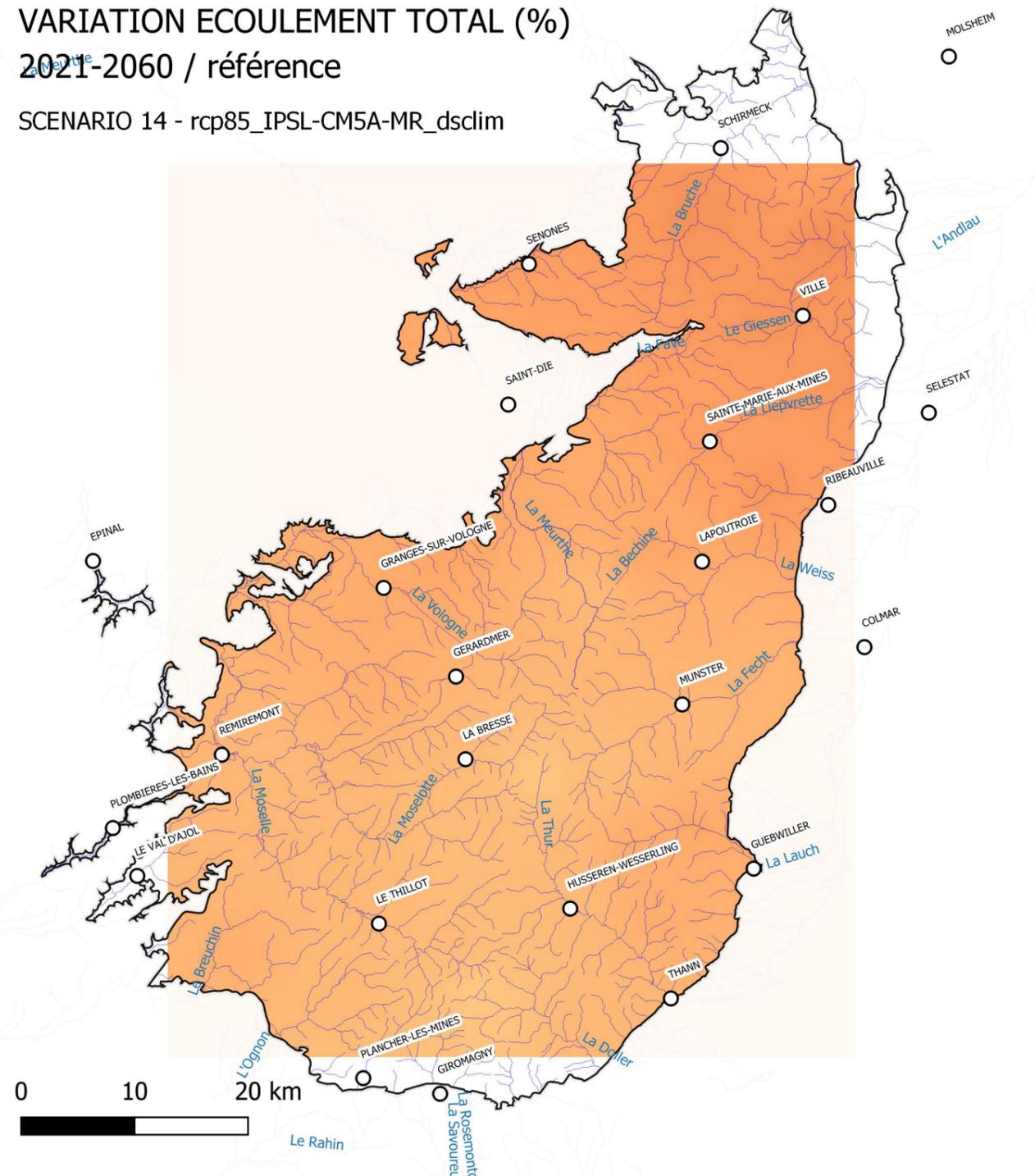
HORIZON 2100 - – Différence relative de la moyenne interannuelle d'écoulement total pour la période 2021-2060 par rapport à la période de référence. Interpolation des valeurs obtenues sur les 37 sous bassin versants modélisés.

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2021-2060 / référence

SCENARIO 14 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim

VARIATION ECOULEMENT TOTAL (%)
2061-2100 / référence

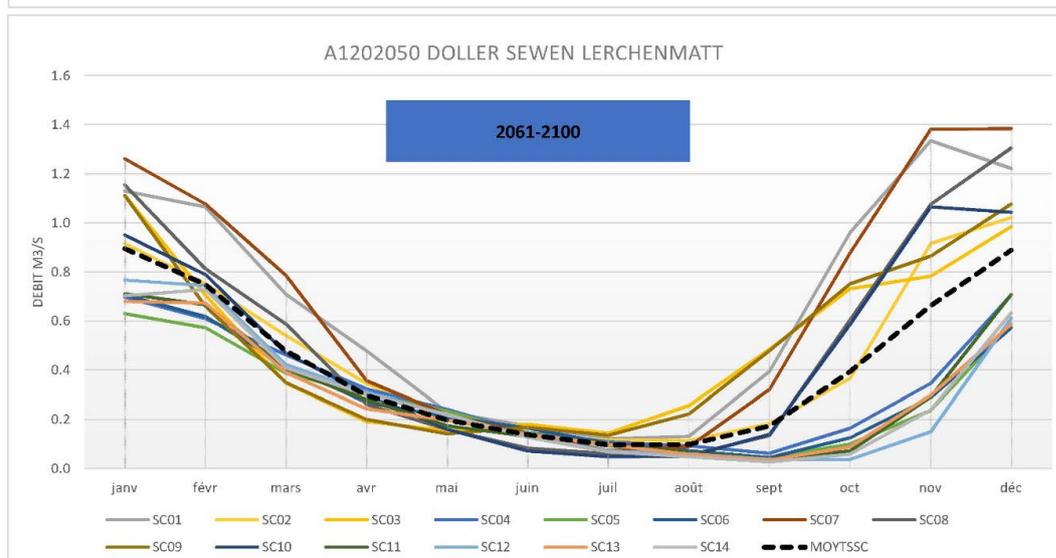
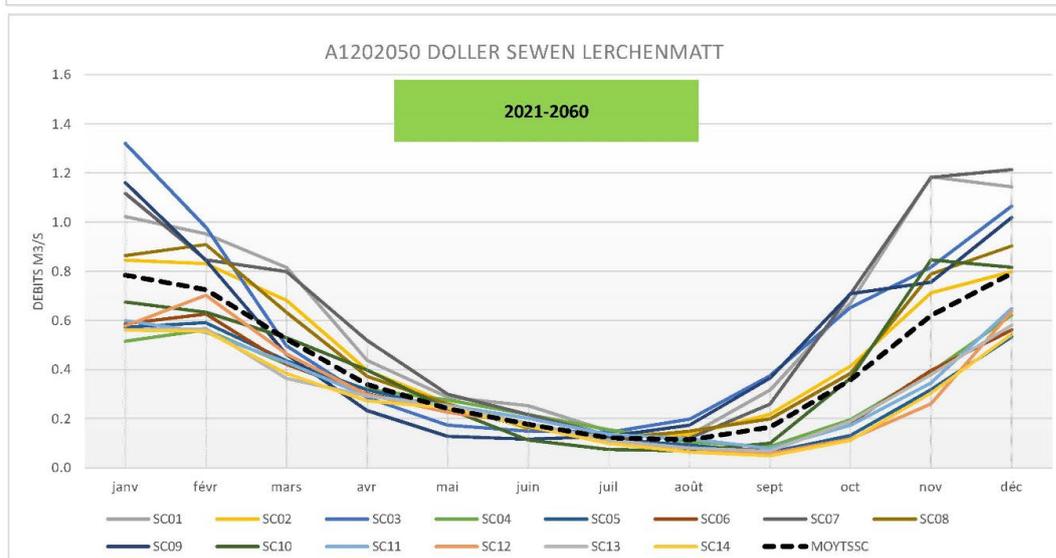
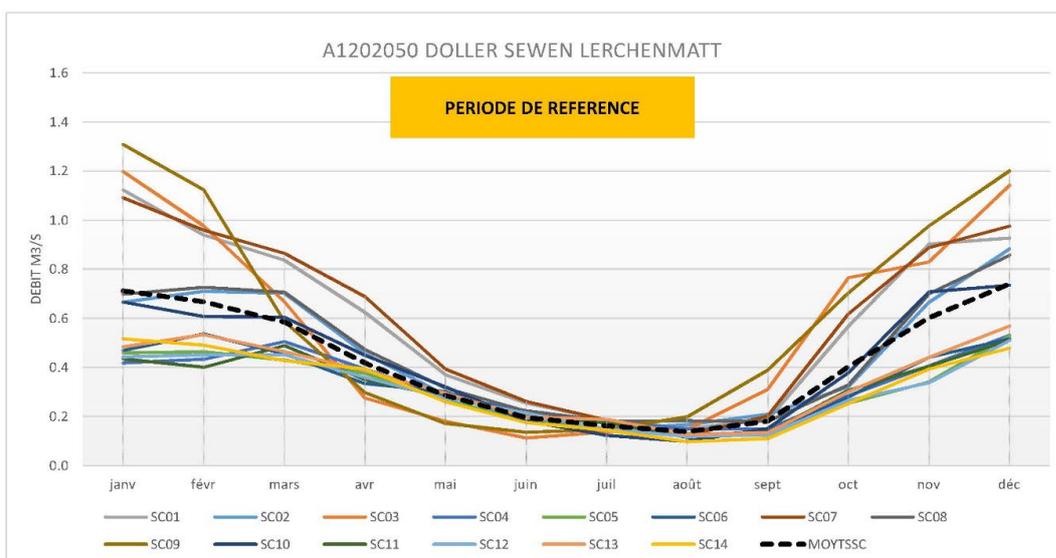
SCENARIO 14 - rcp85_IPSL-CM5A-MR_dsclim



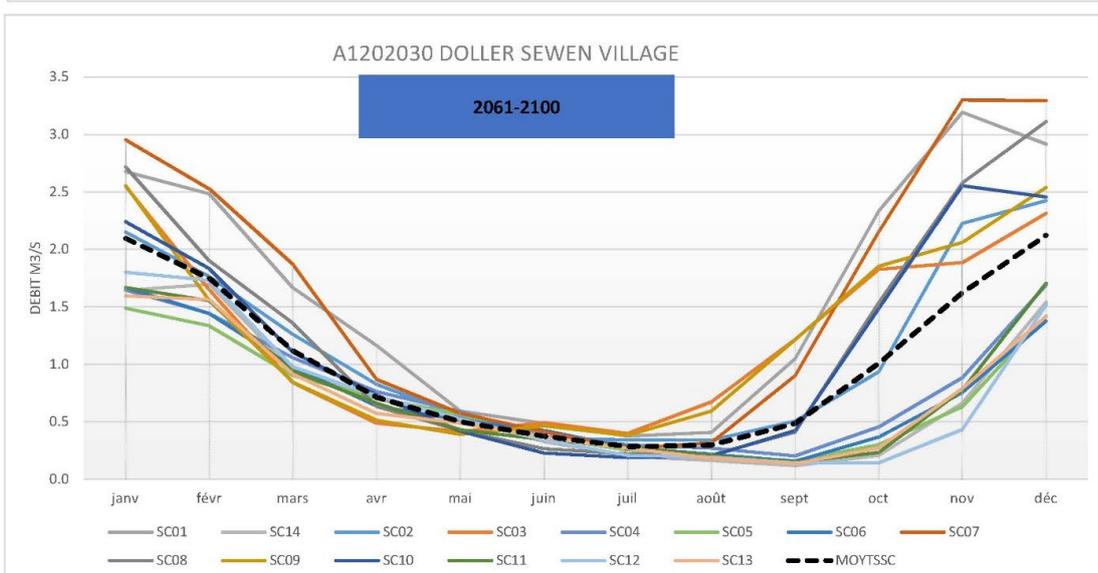
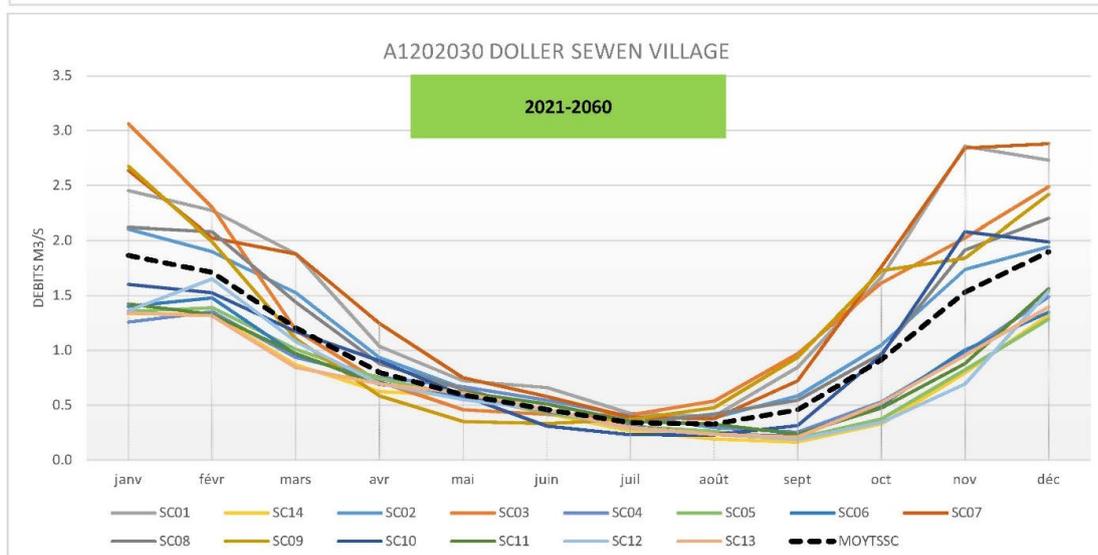
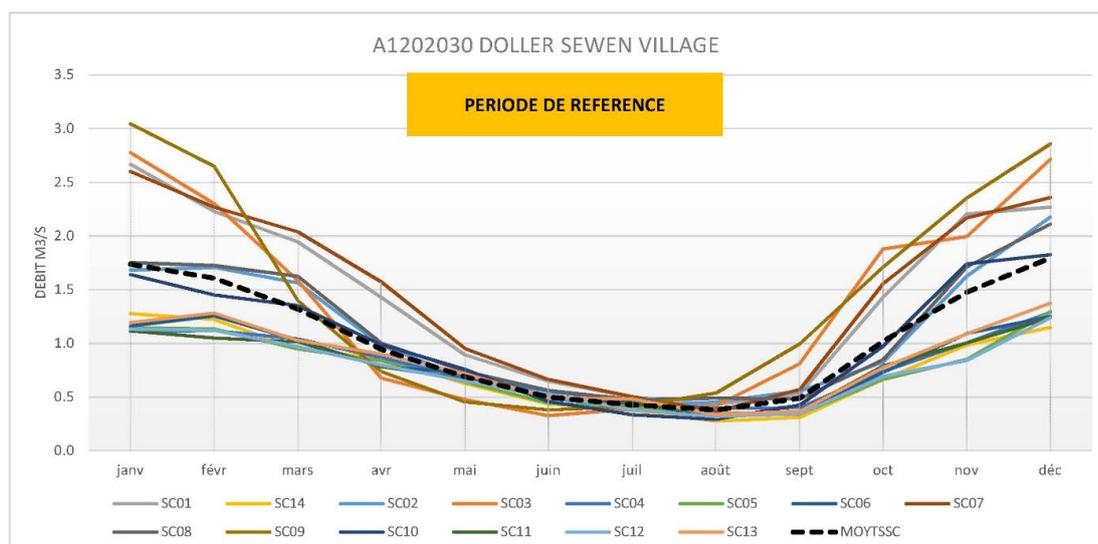
Annexe 3 :

Graphiques de répartition des débits mensuels simulés pour la période de référence et les périodes futures 2021-2060 et 2061-2100 pour chacun des 37 bassins versants du socle vosgien

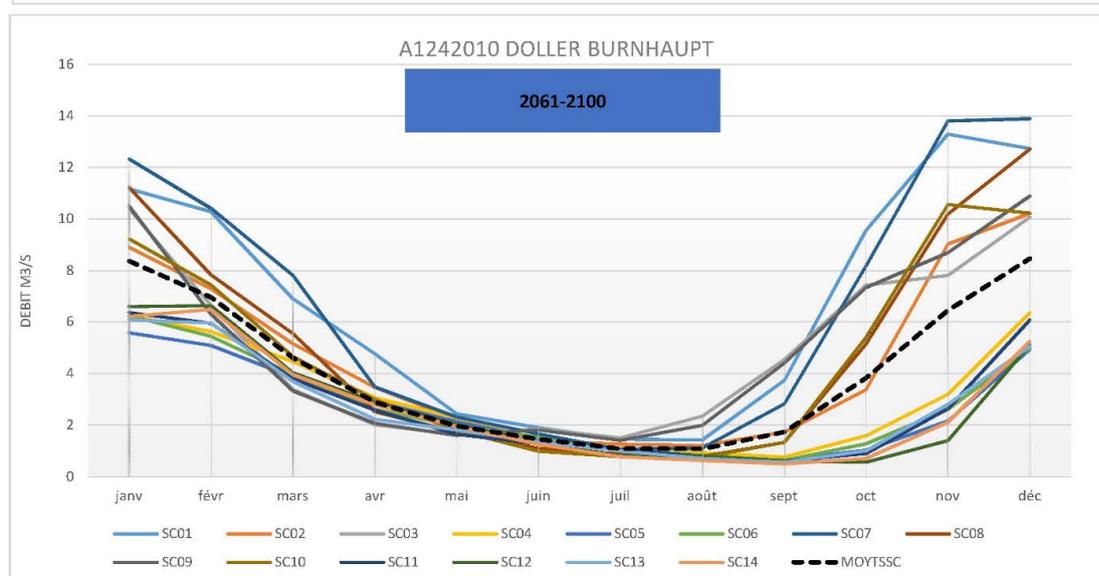
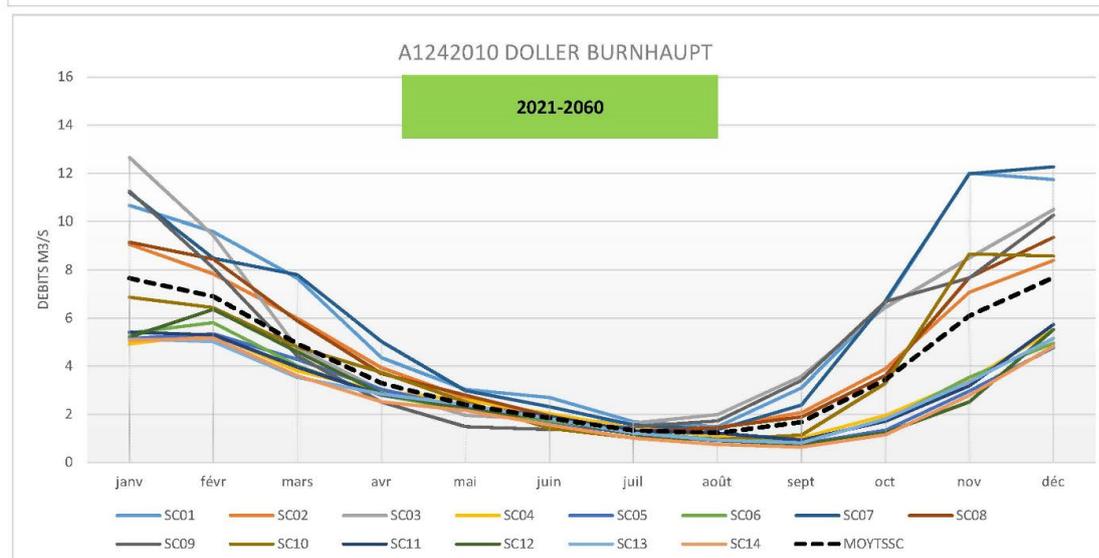
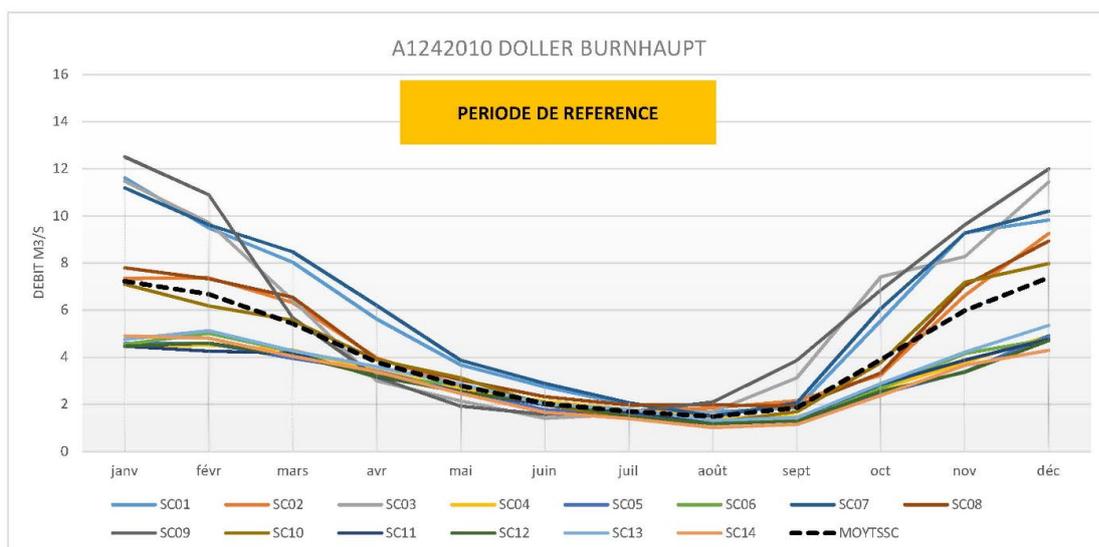
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



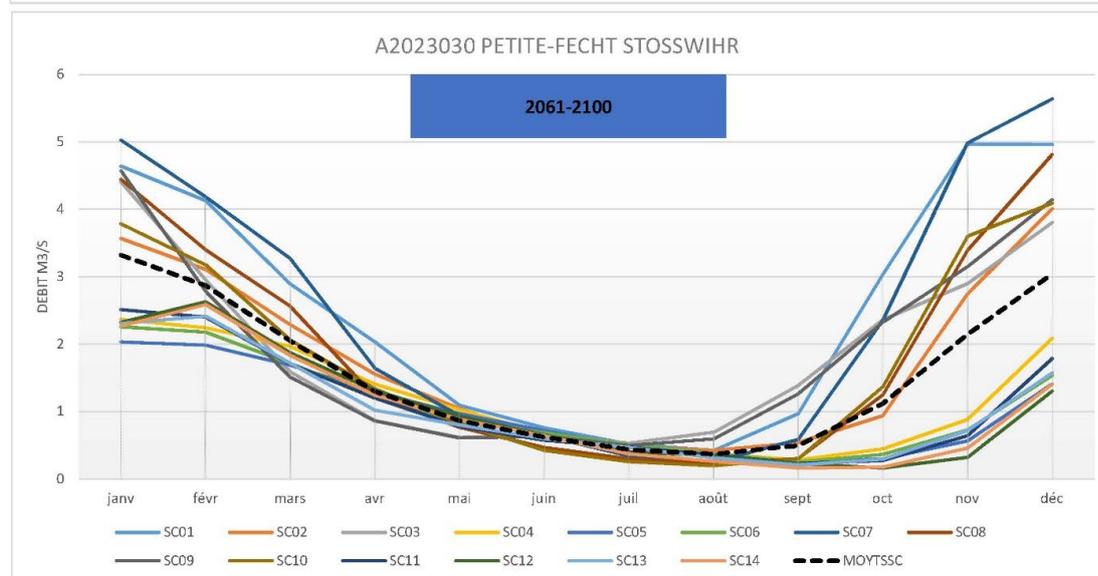
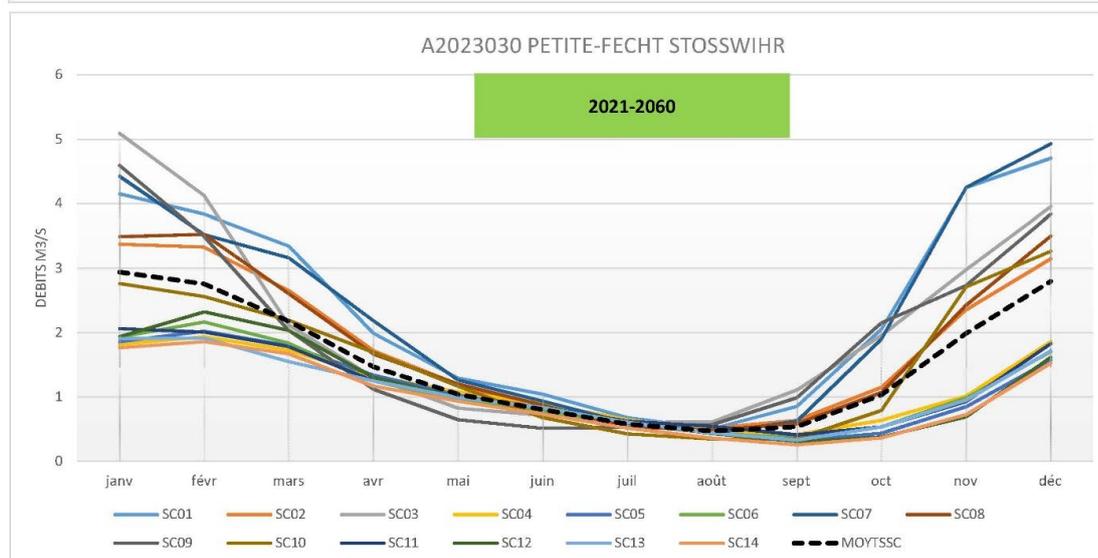
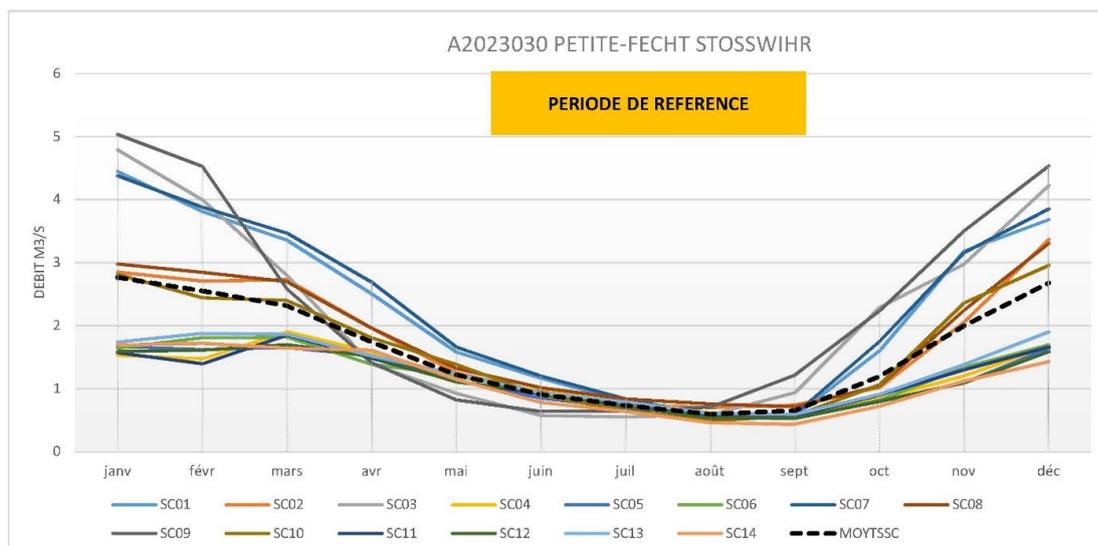
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



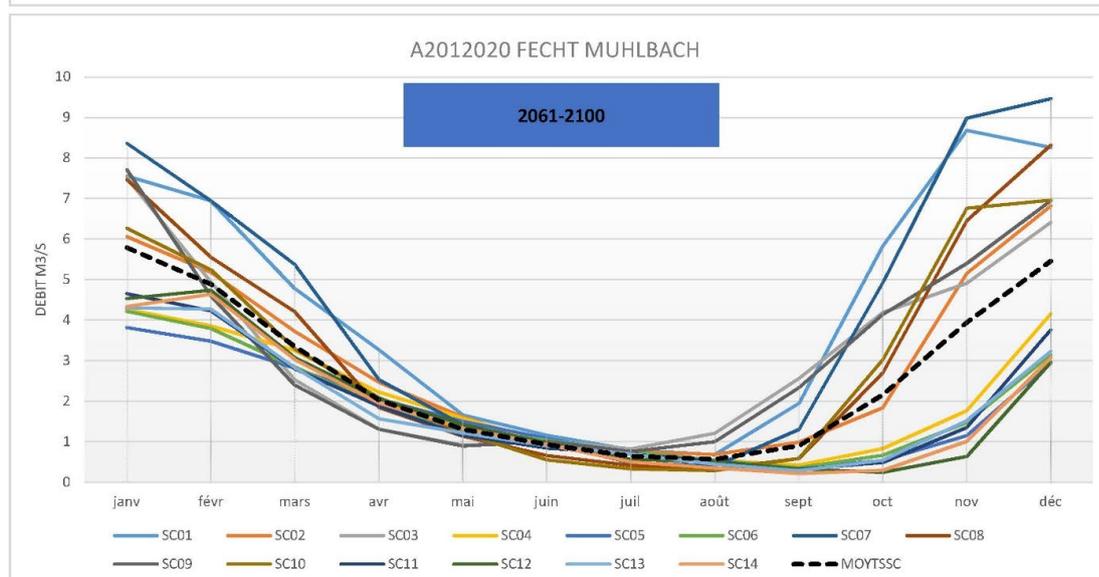
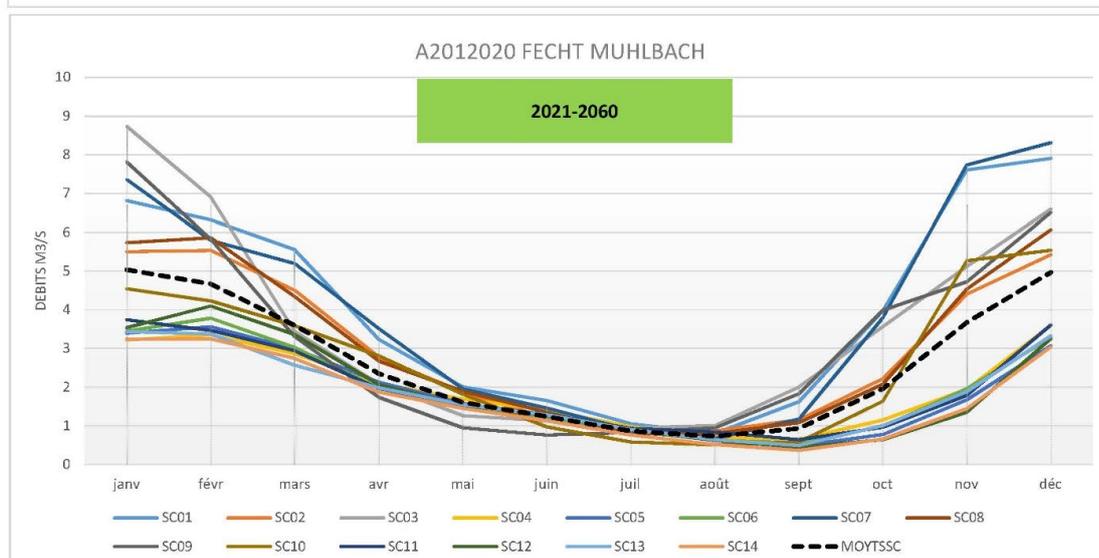
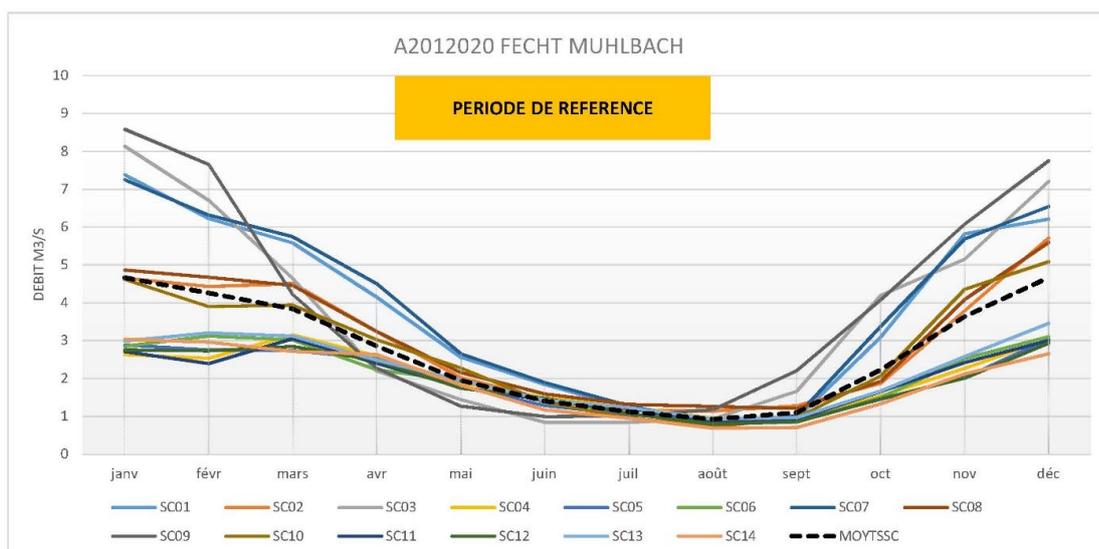
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



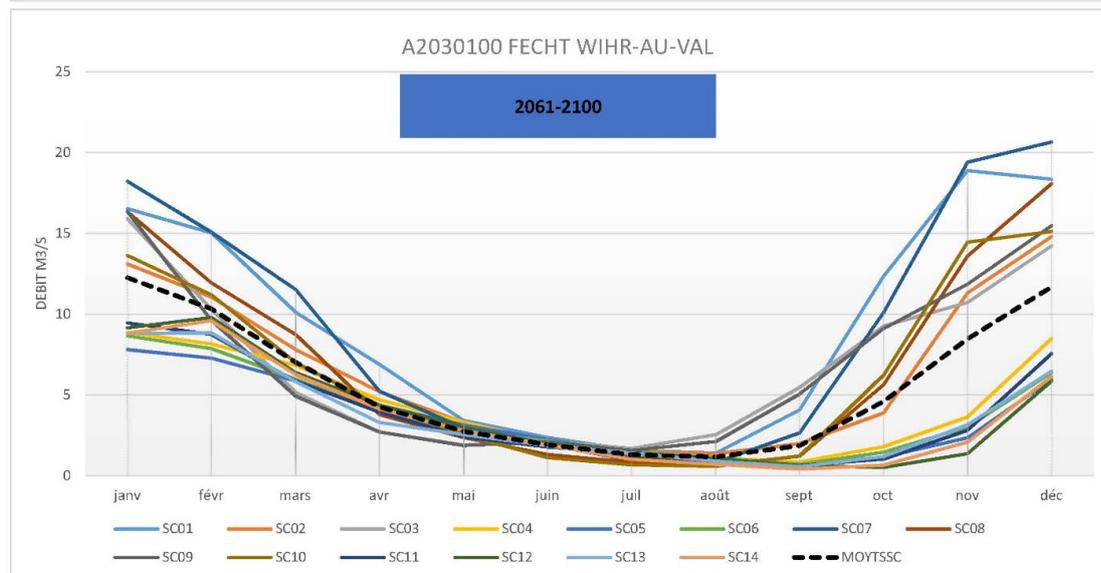
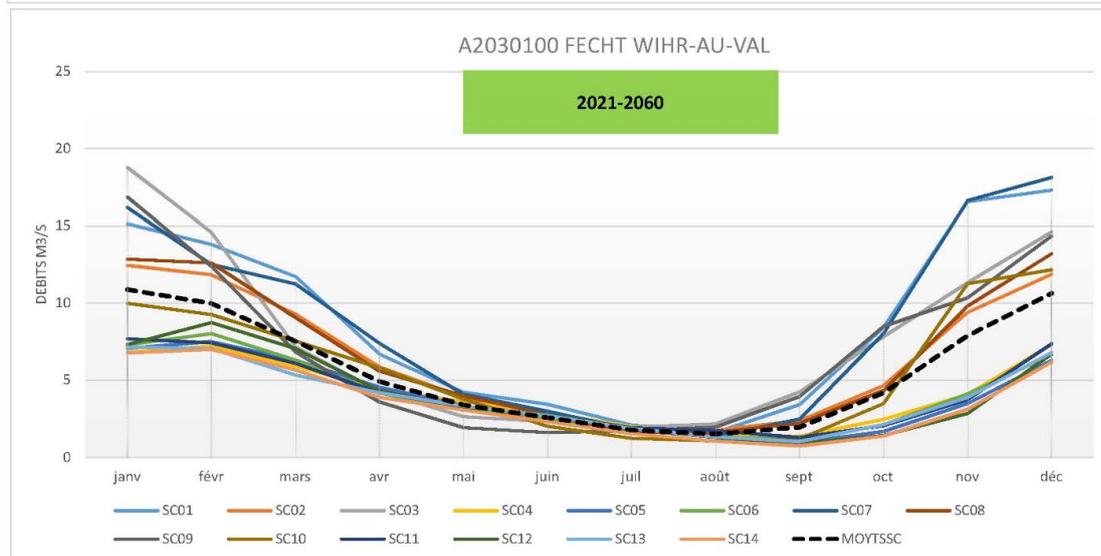
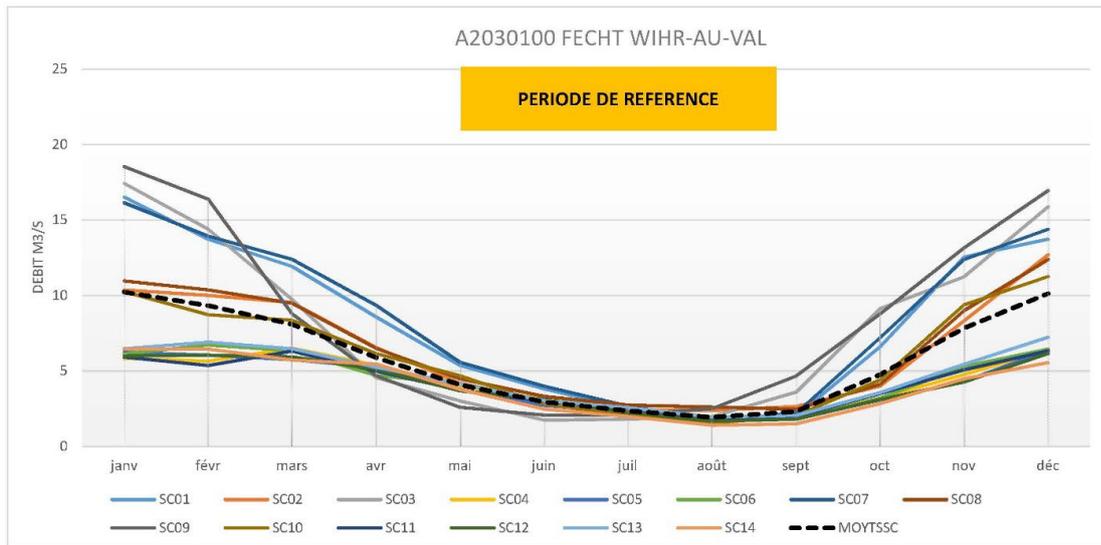
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



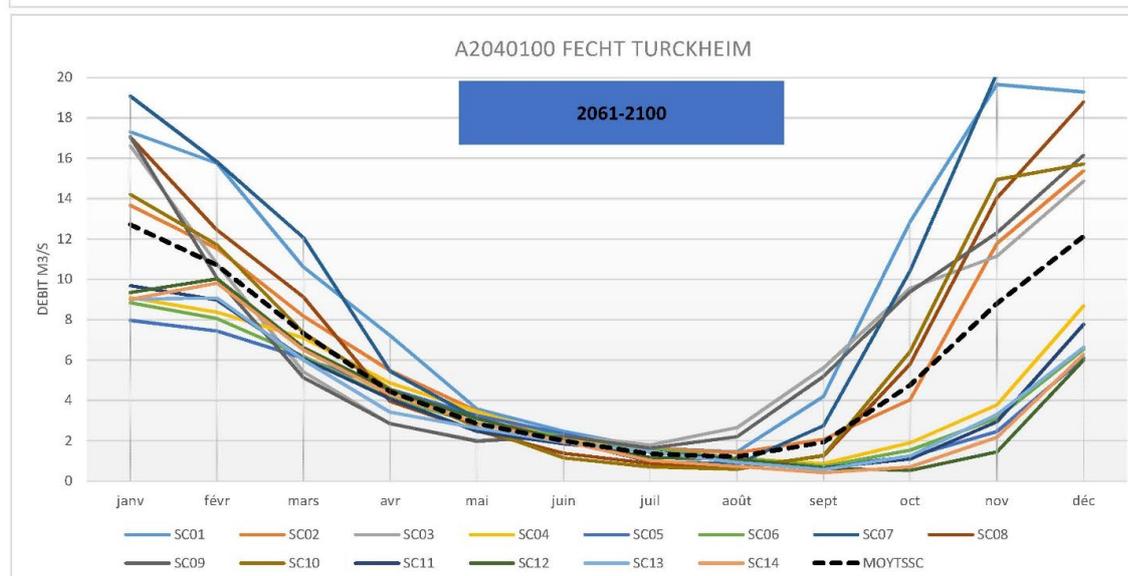
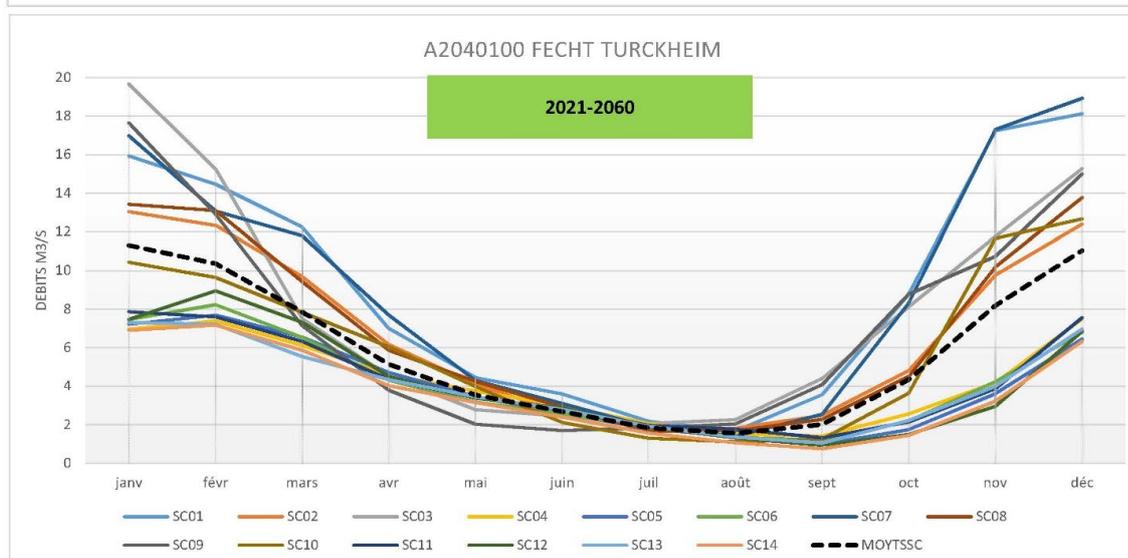
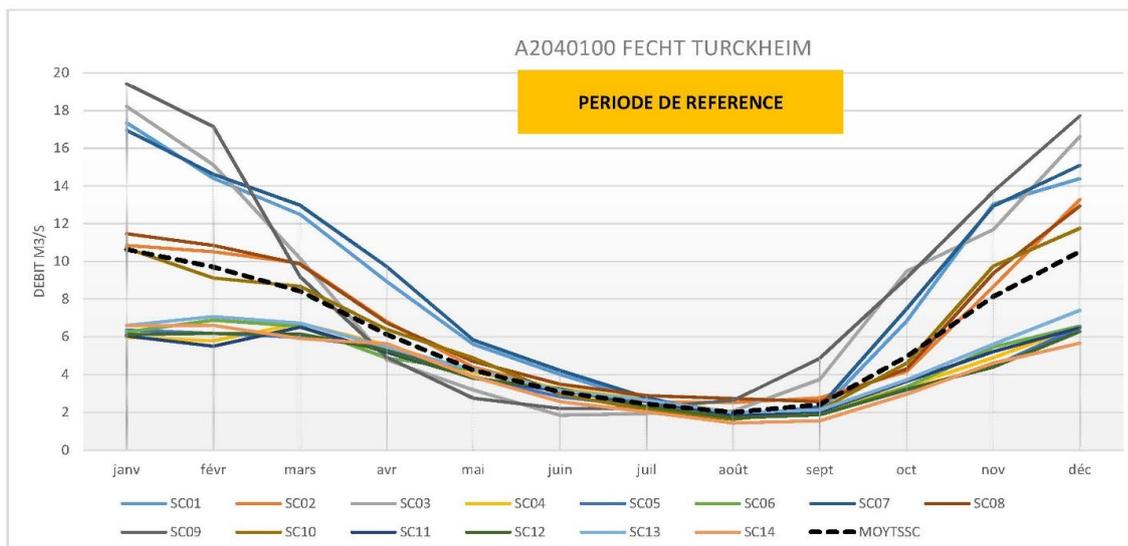
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



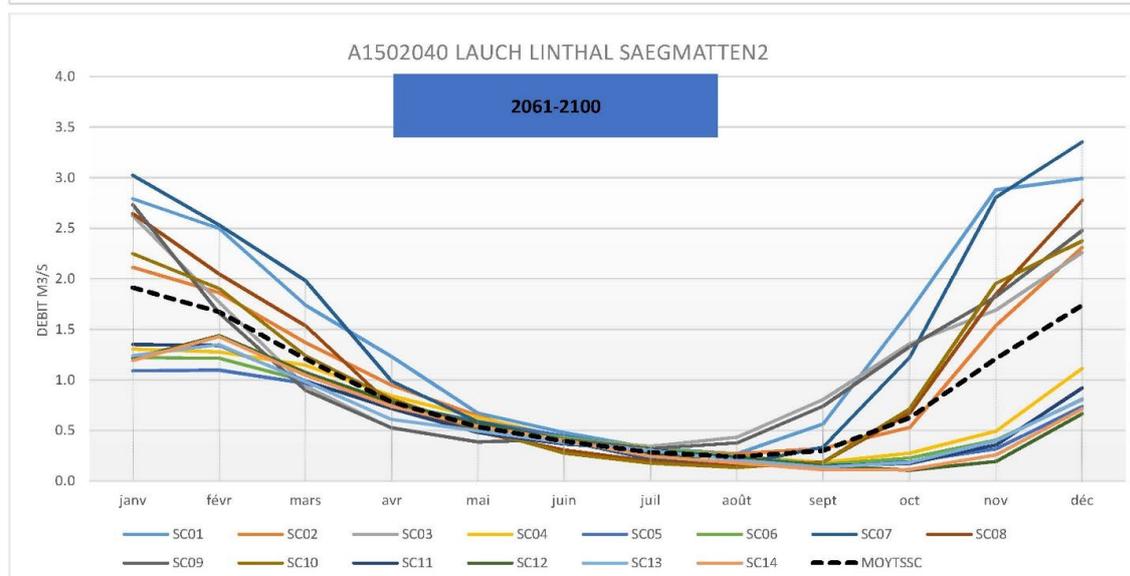
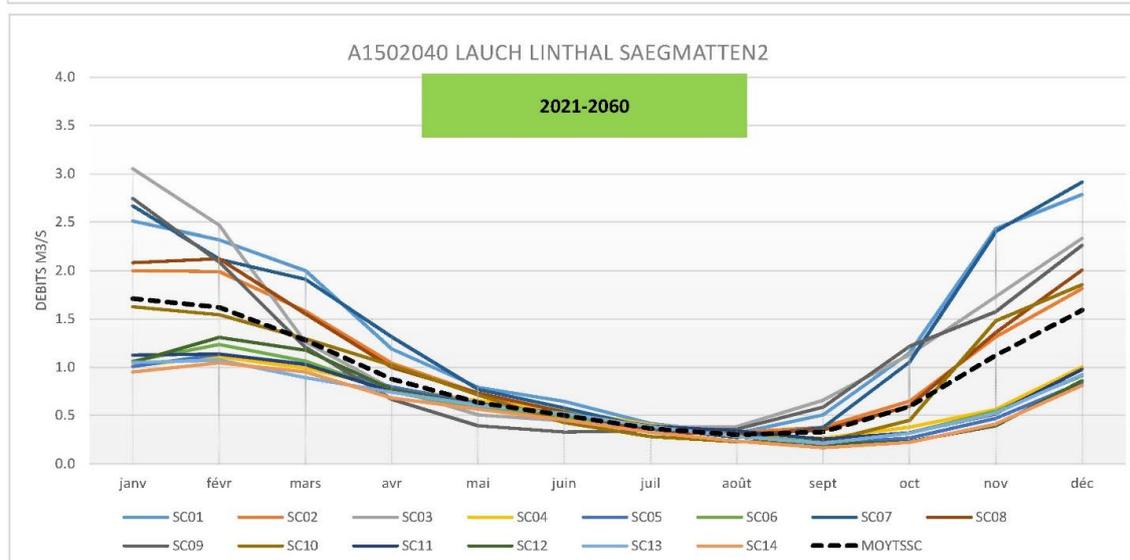
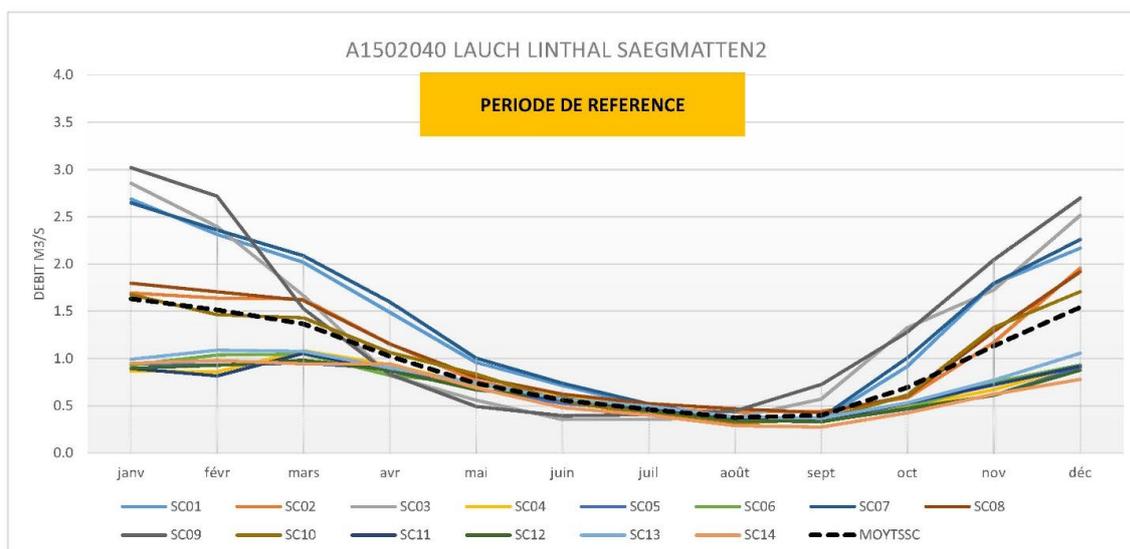
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



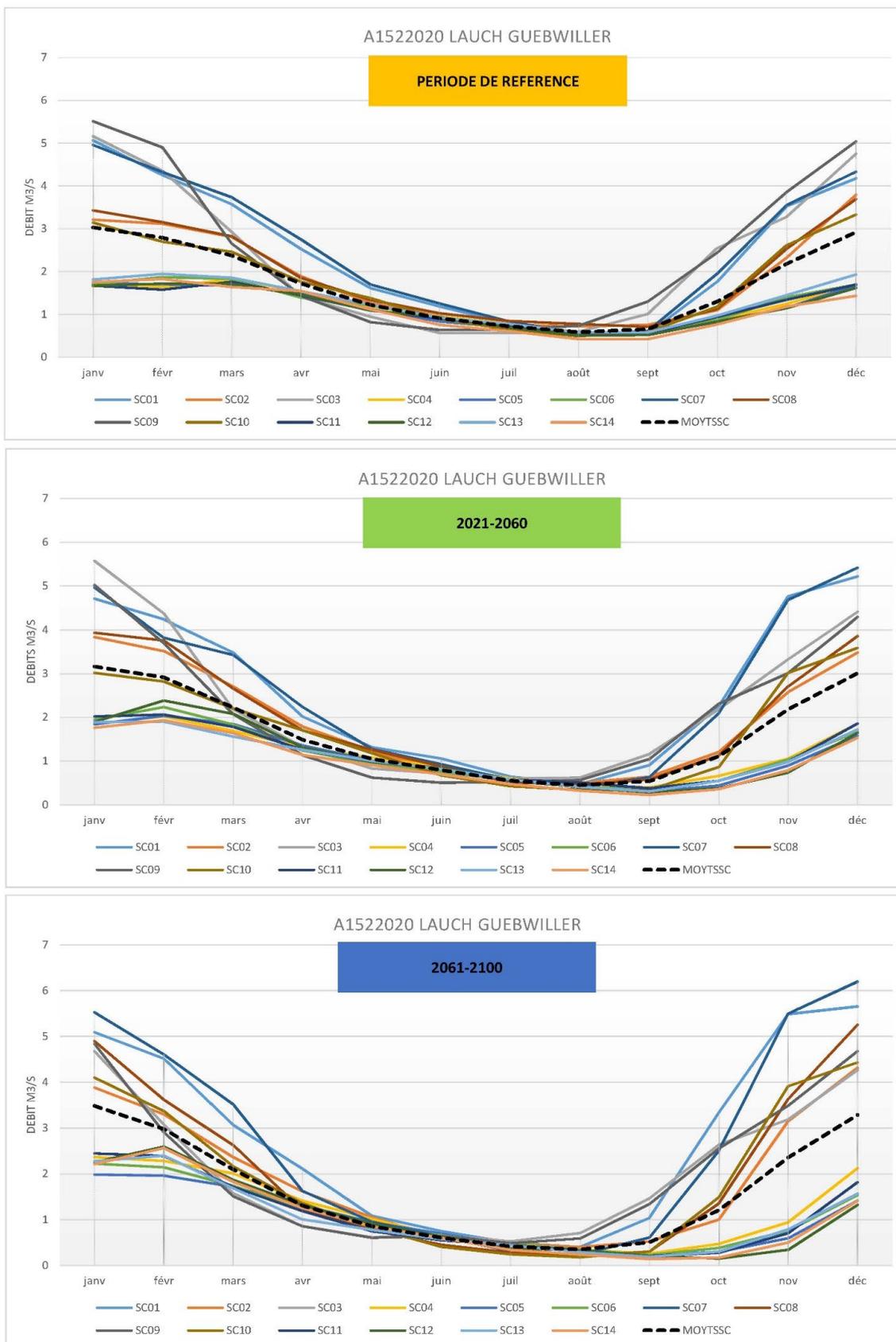
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



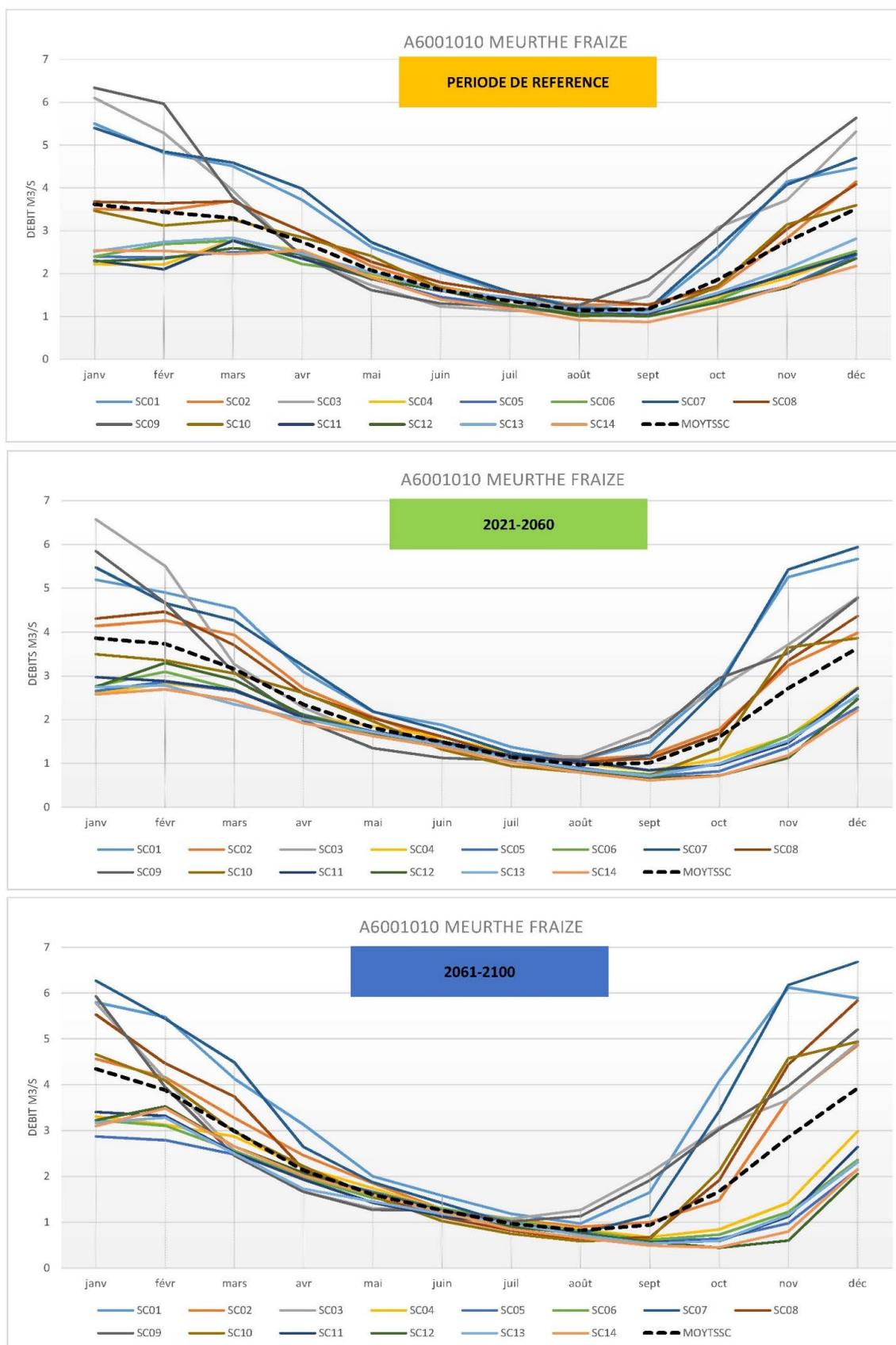
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



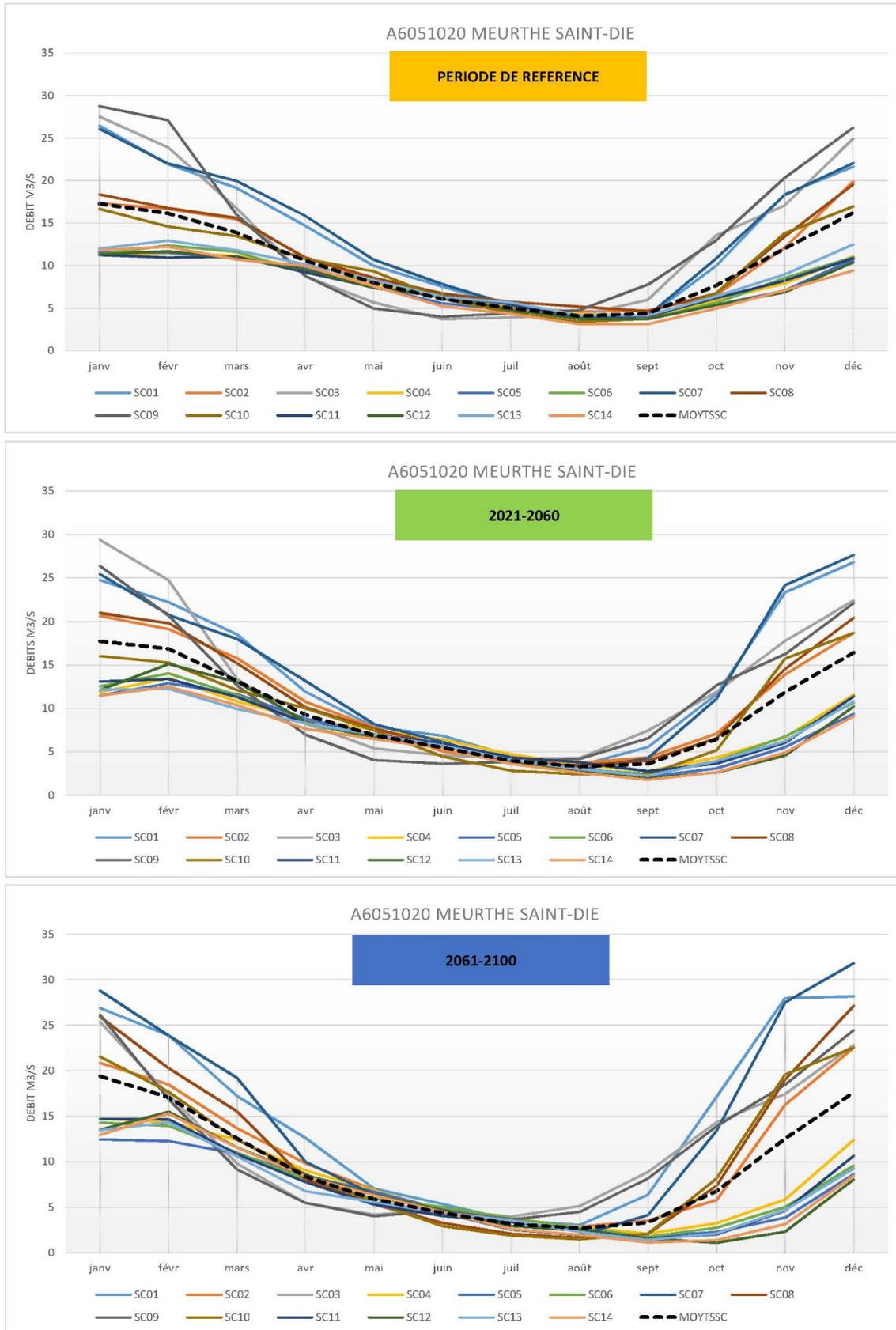
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



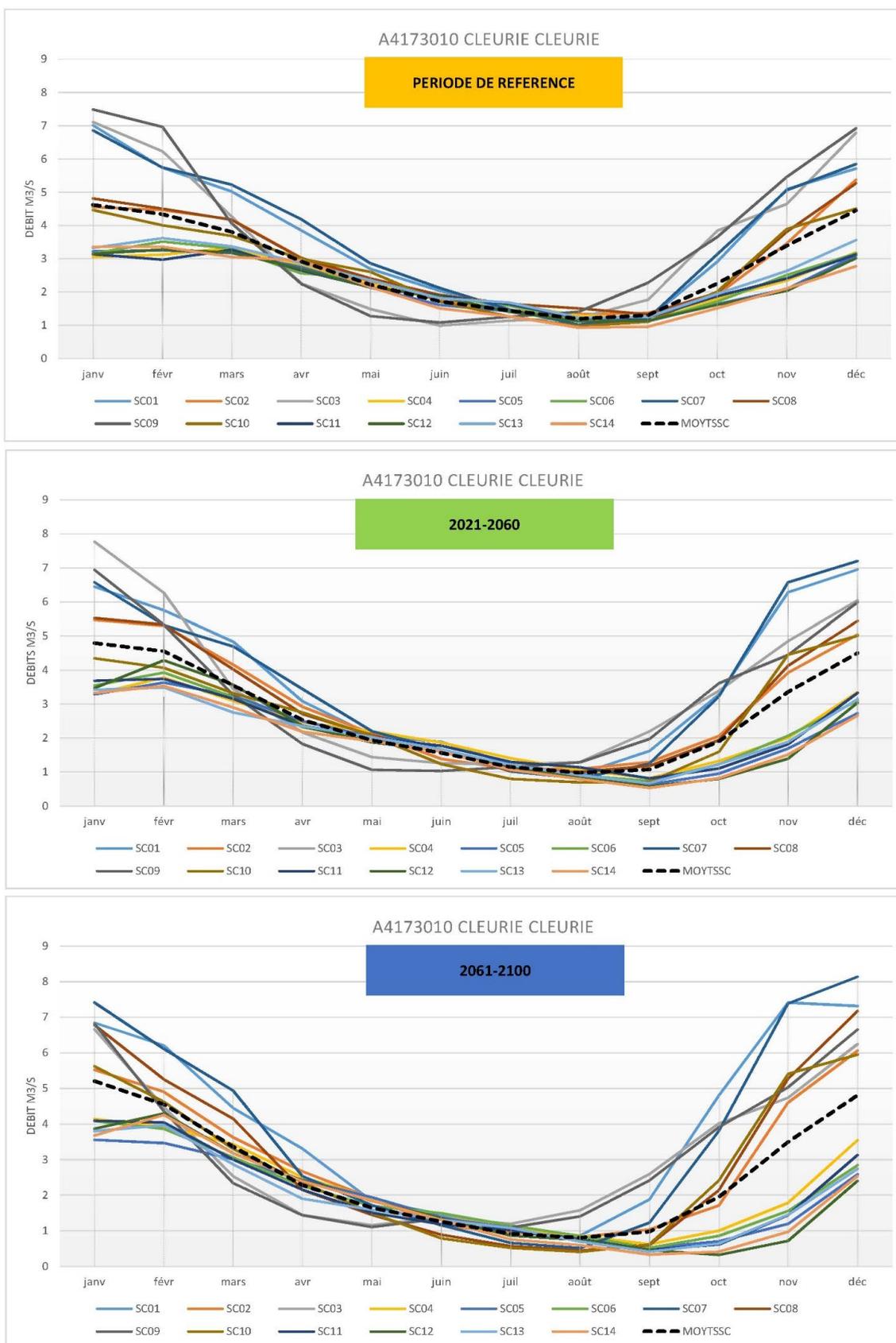
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



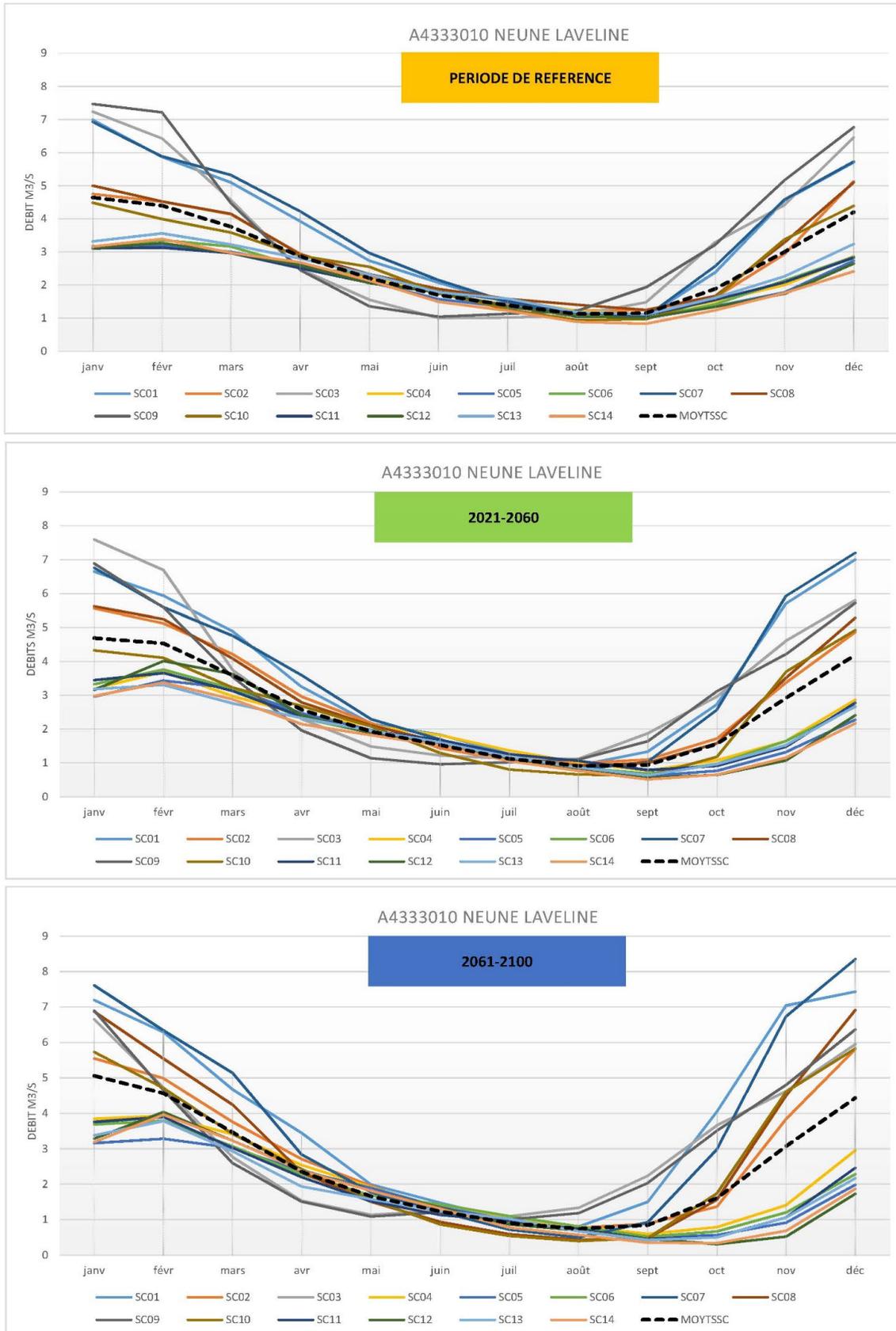
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



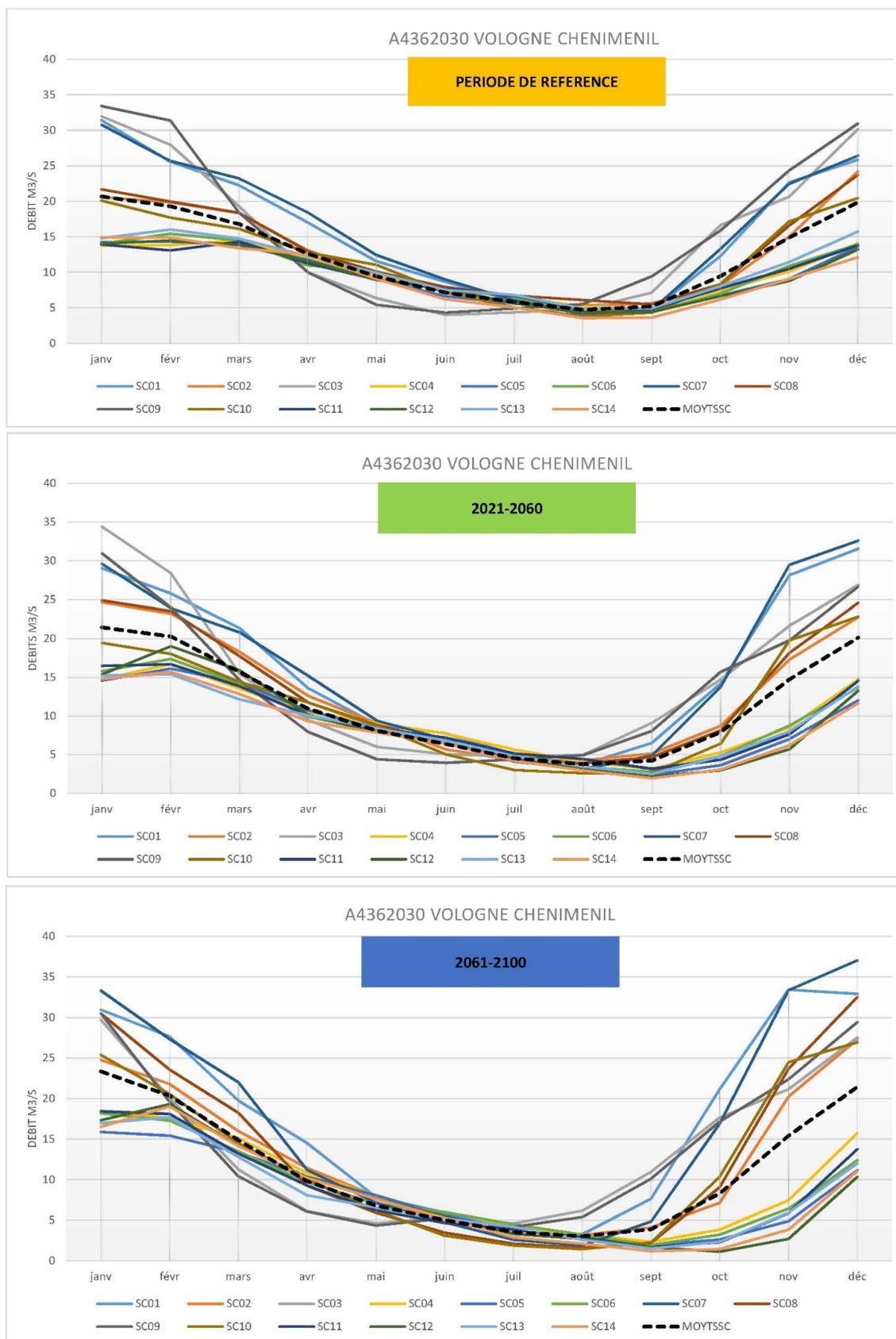
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



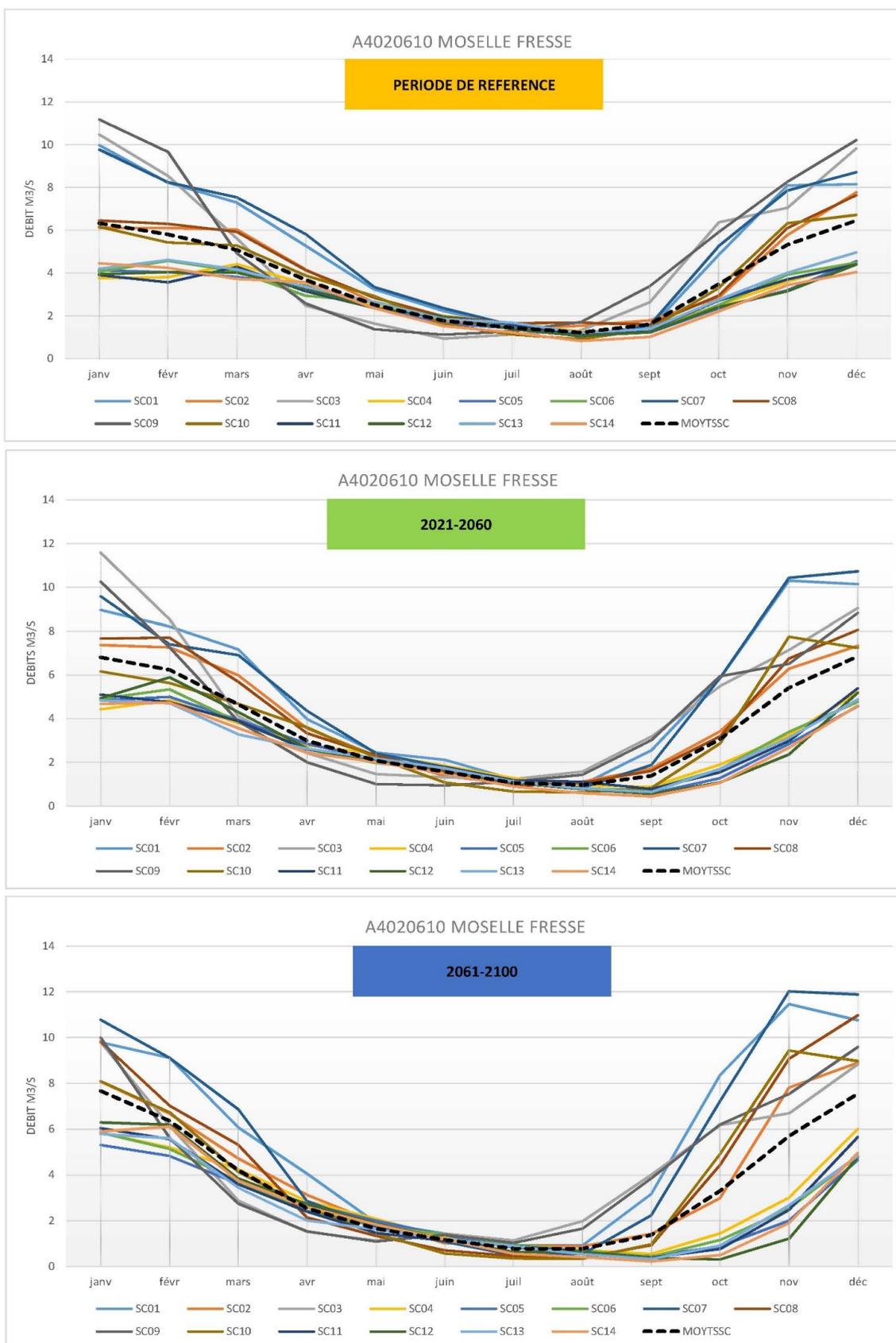
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



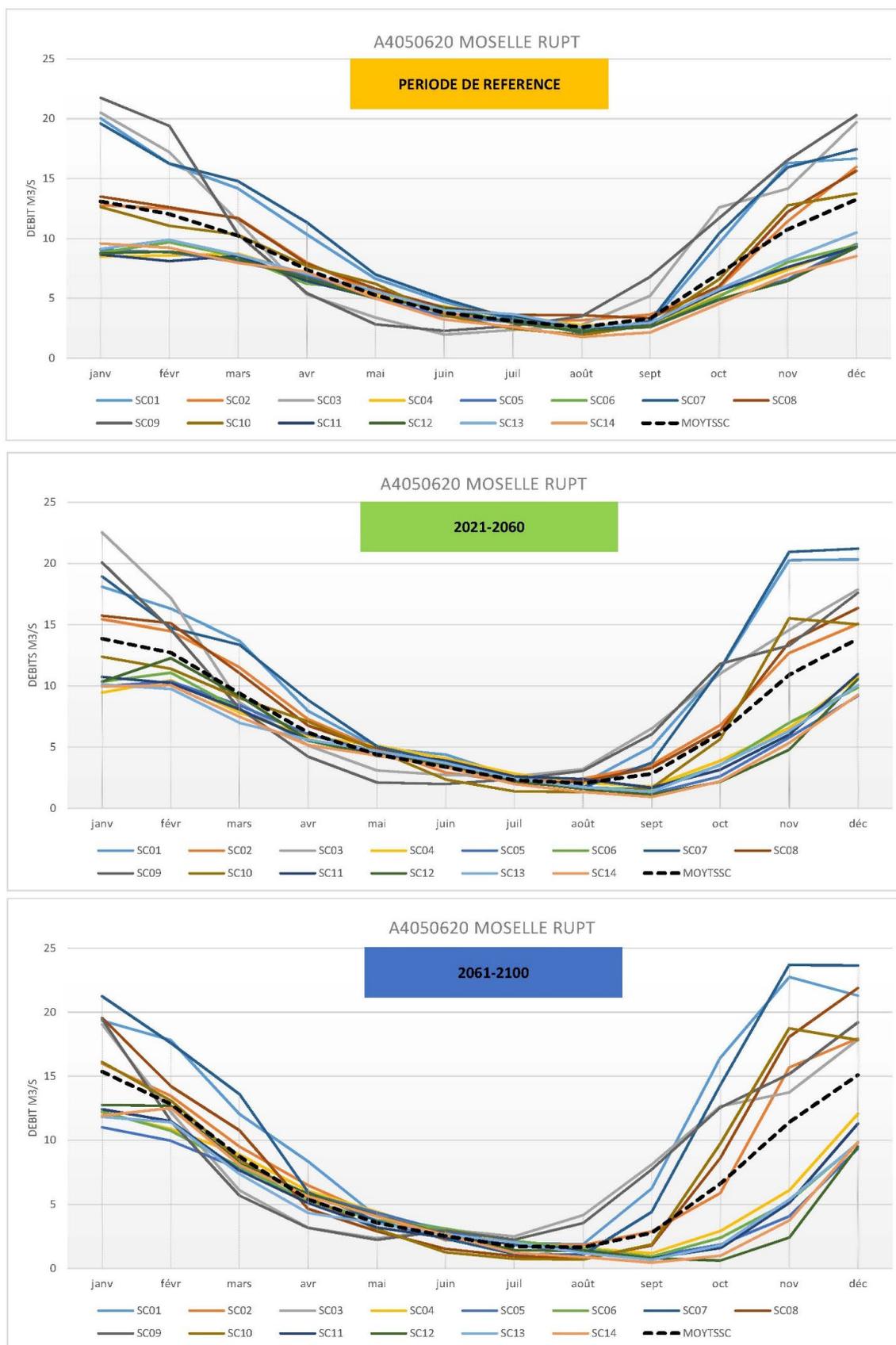
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



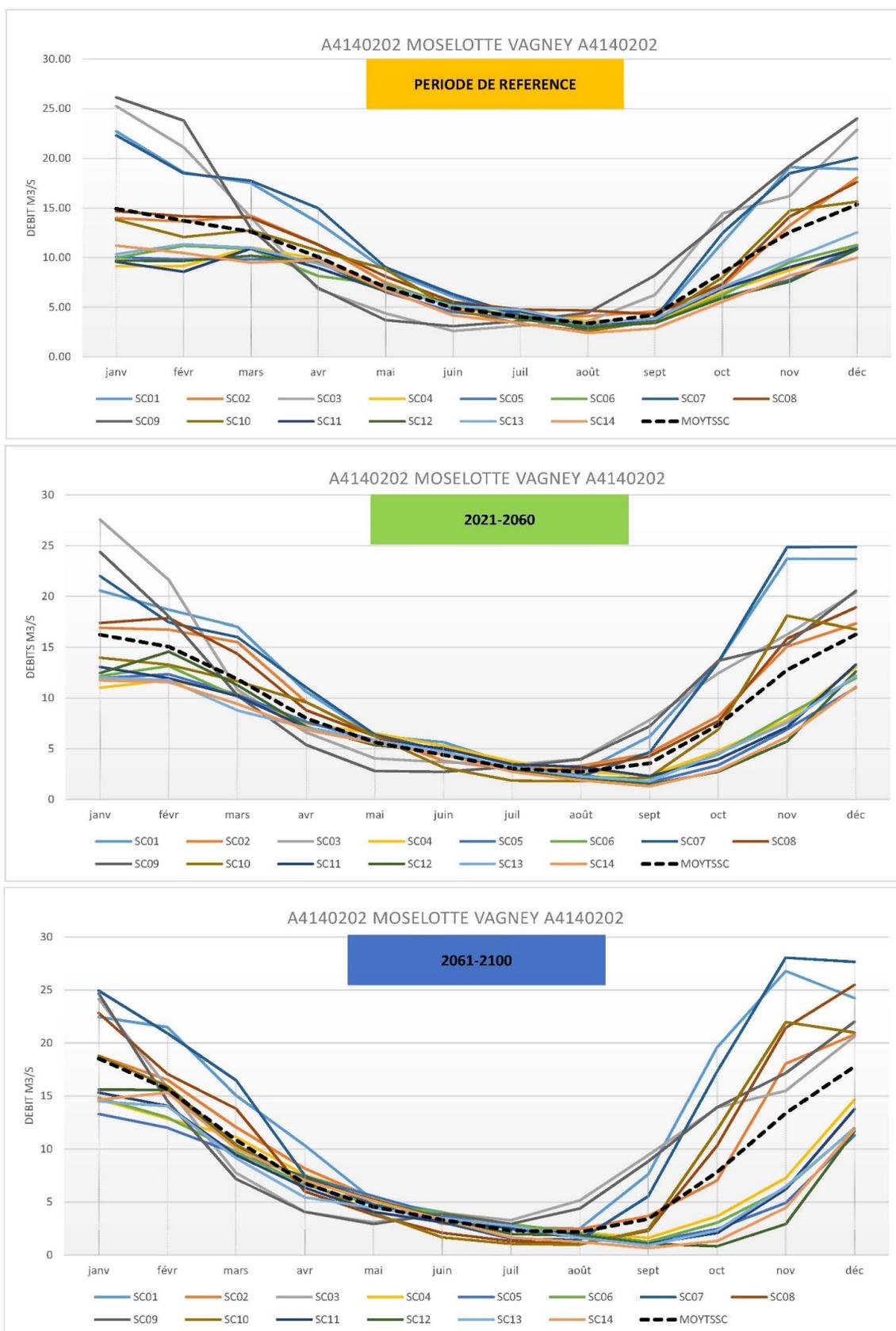
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



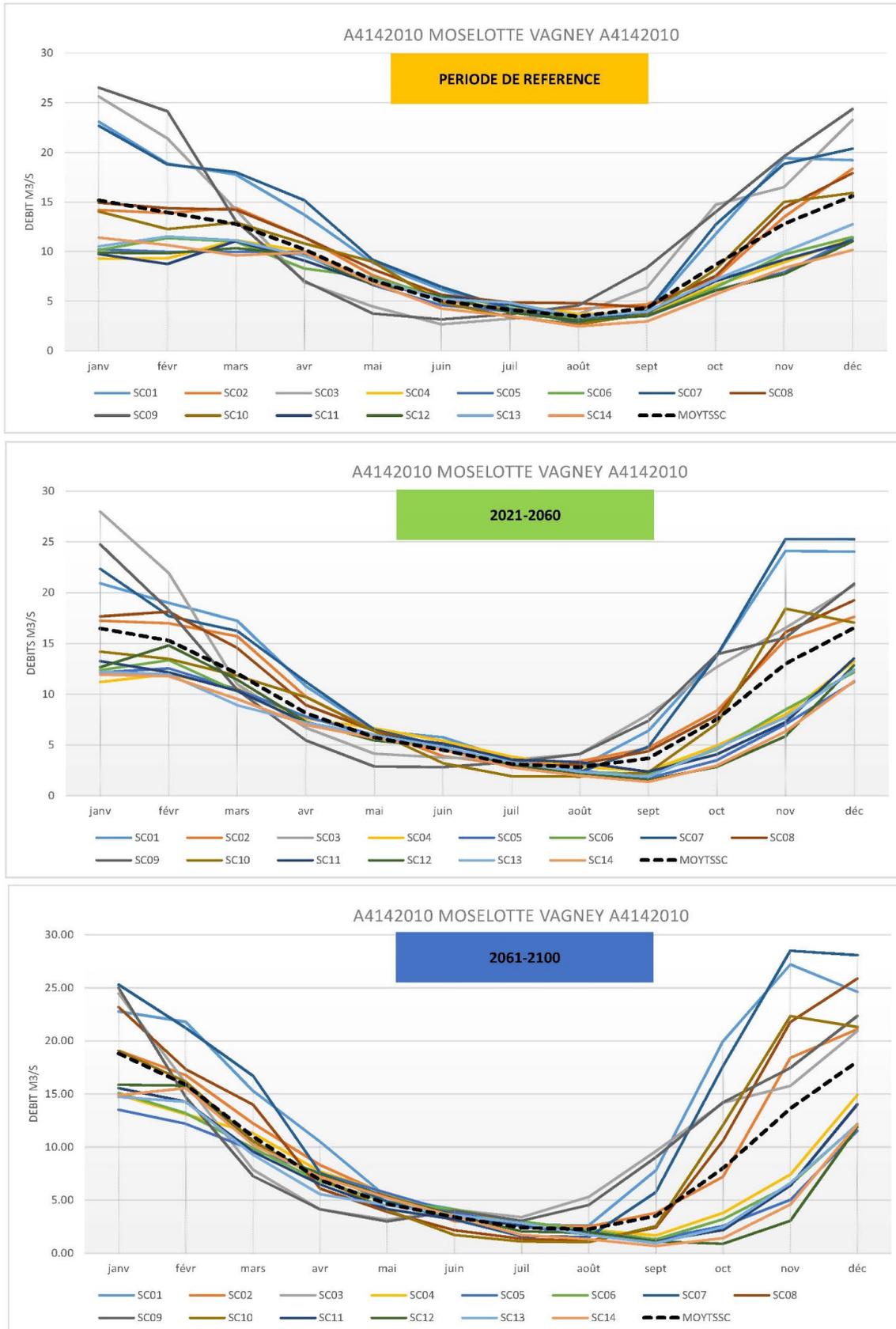
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



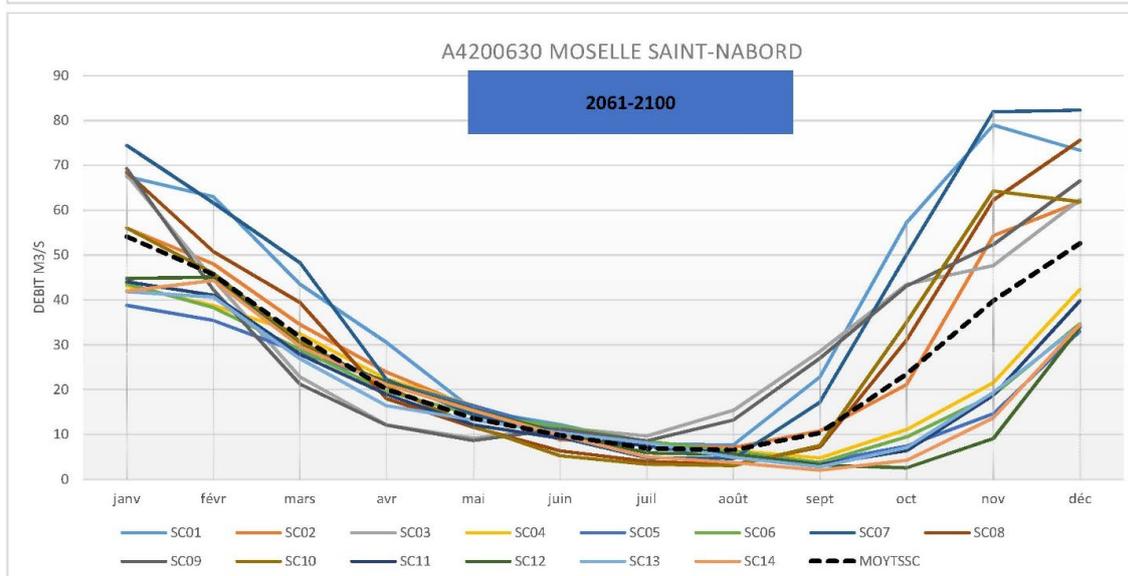
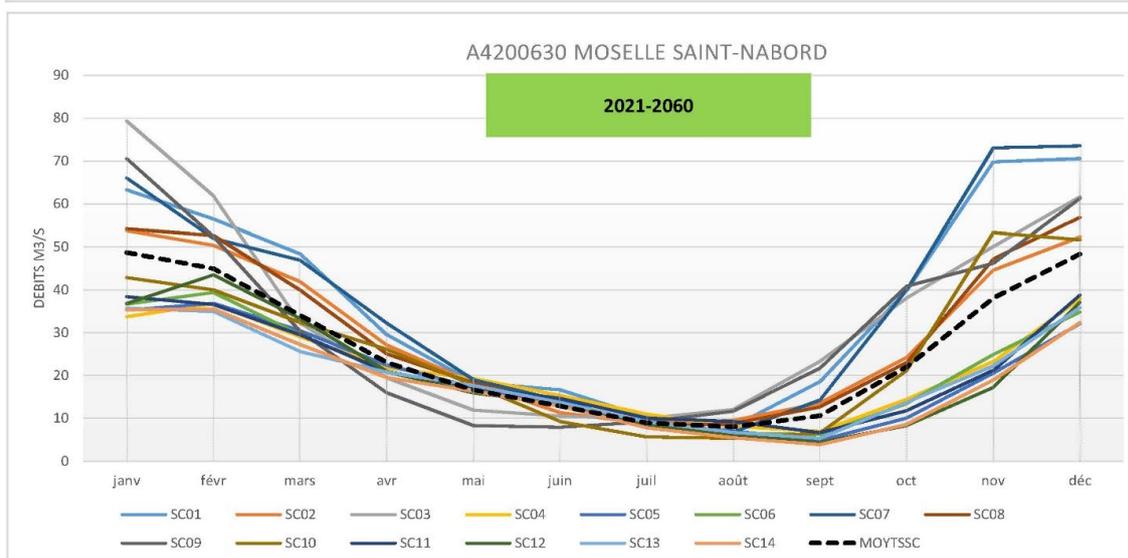
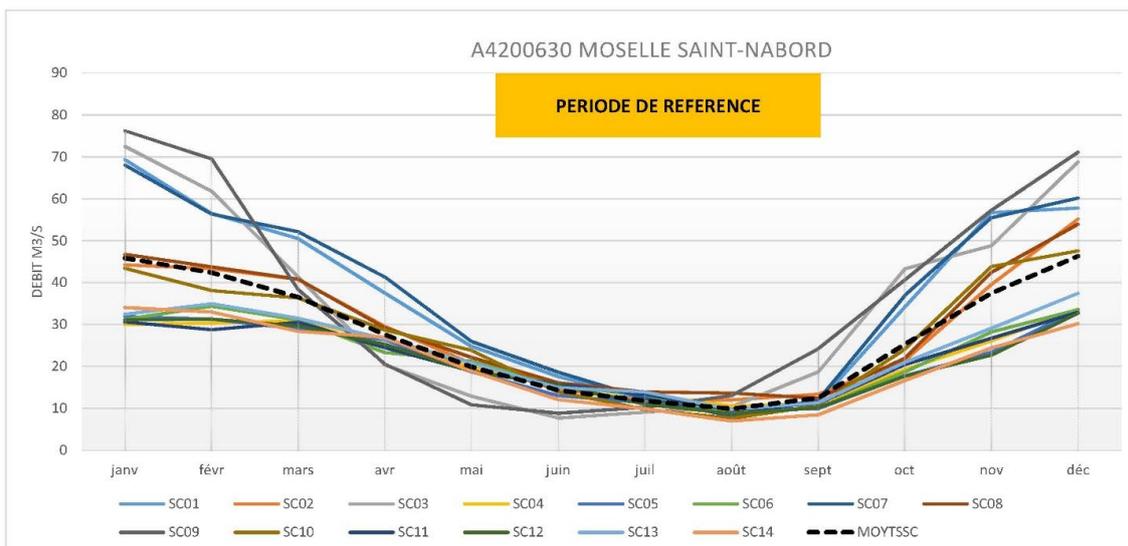
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



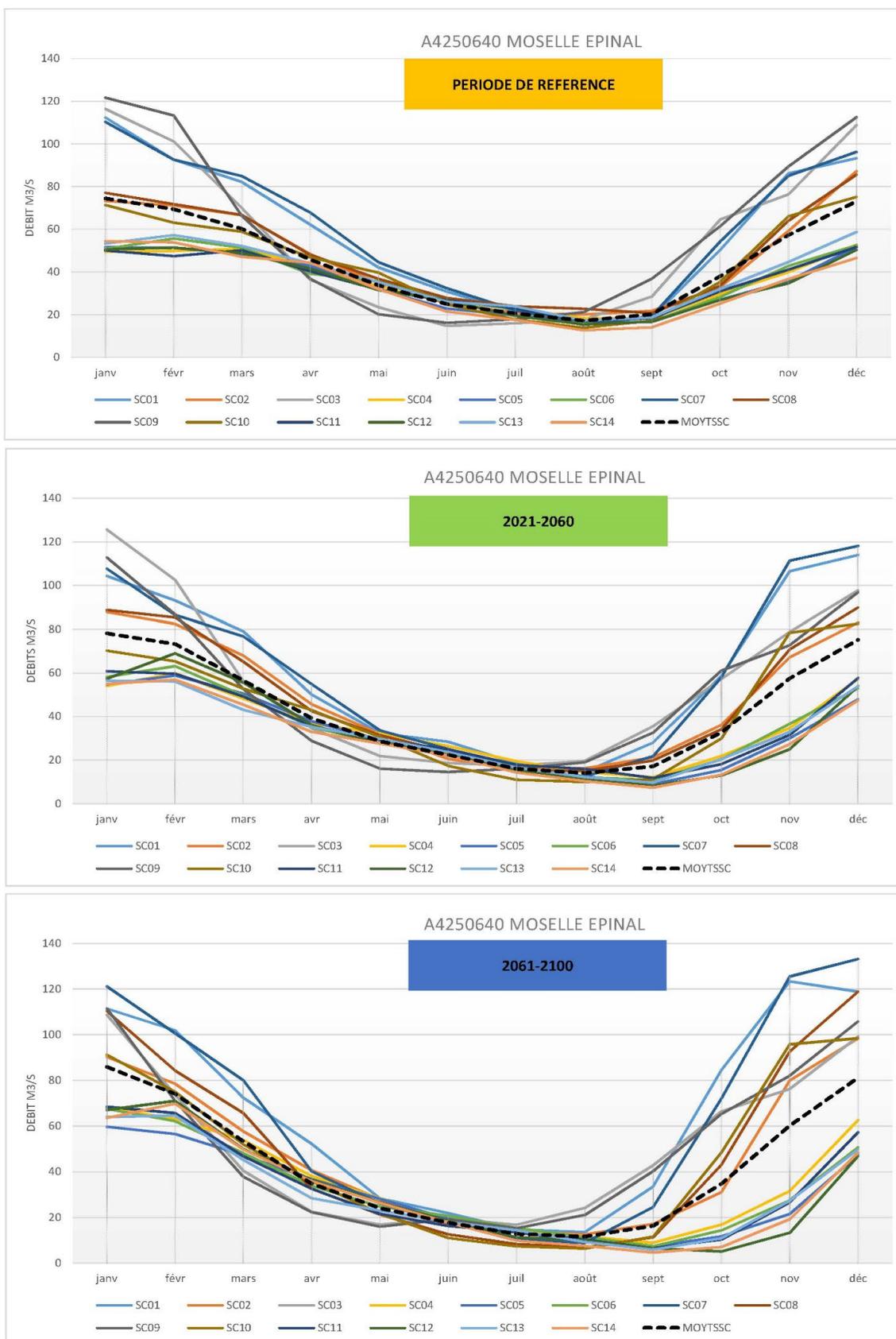
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



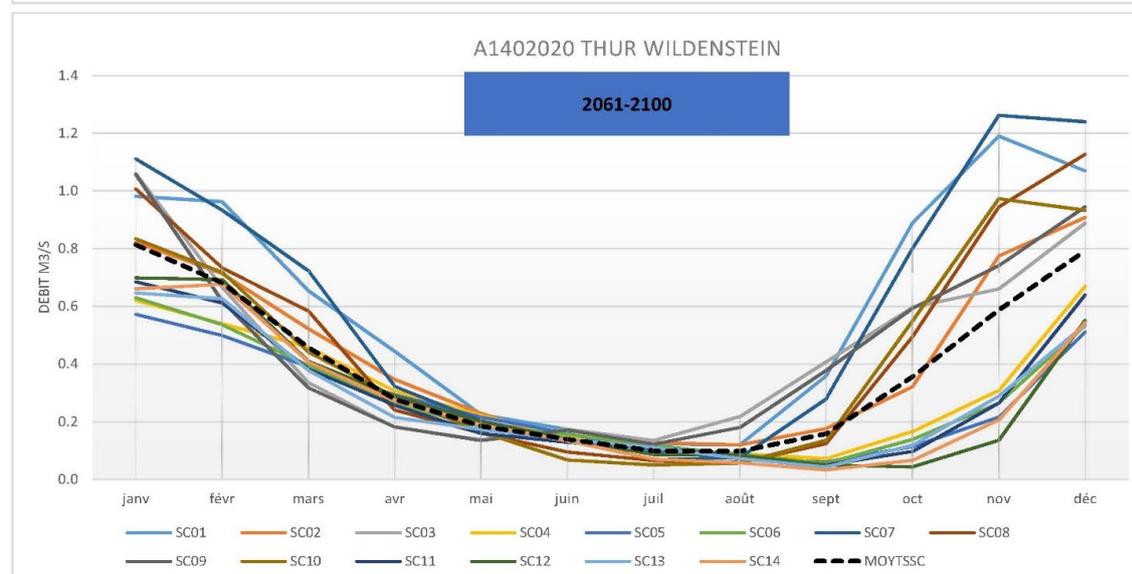
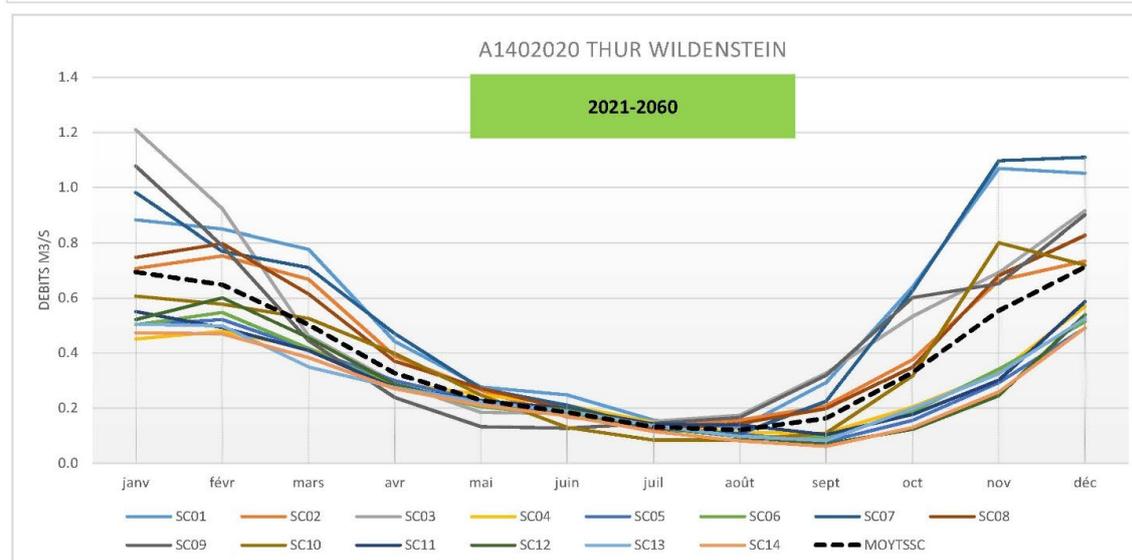
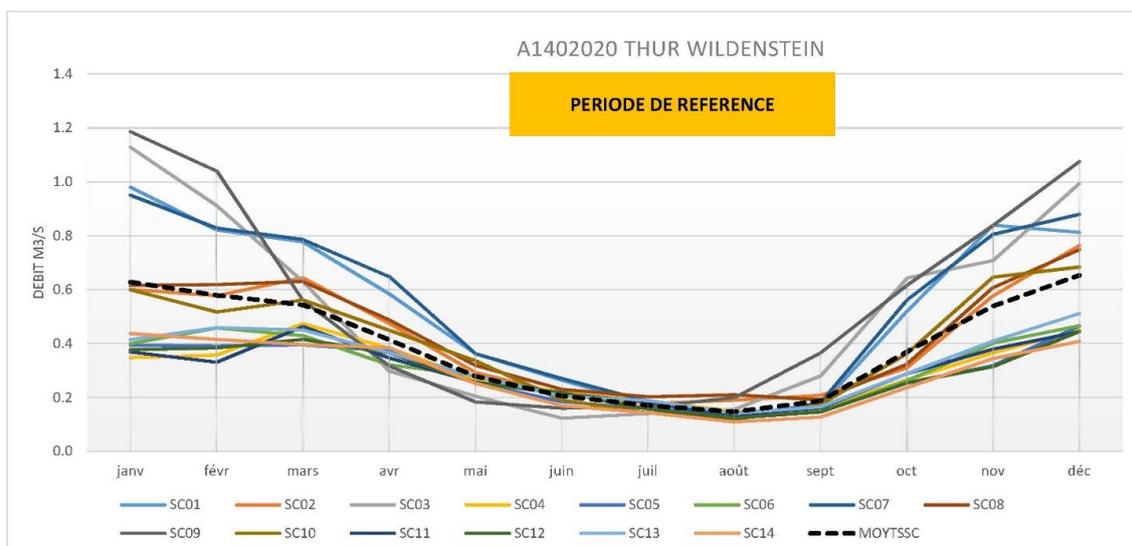
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



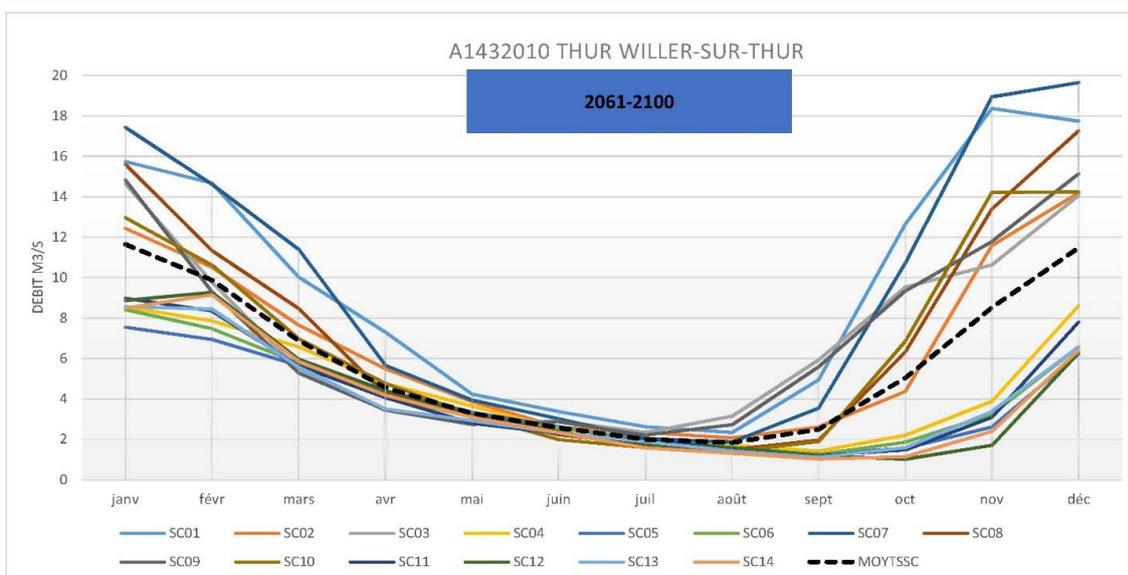
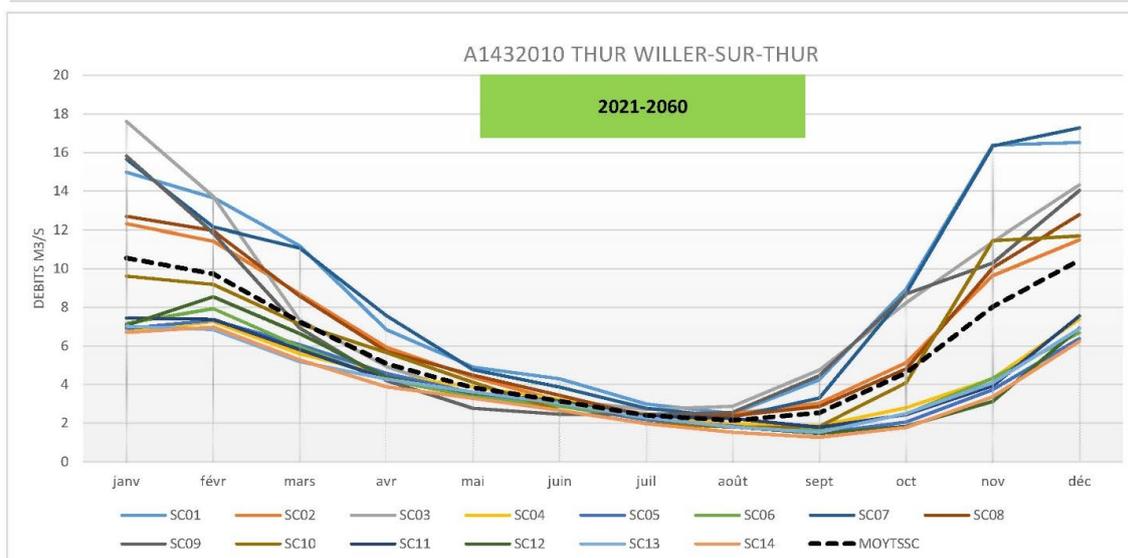
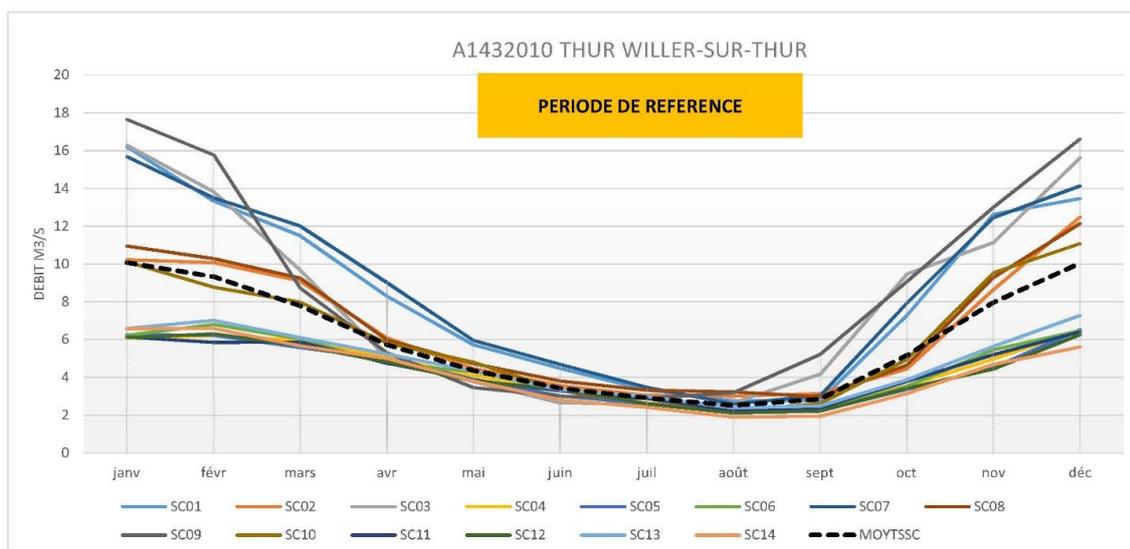
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



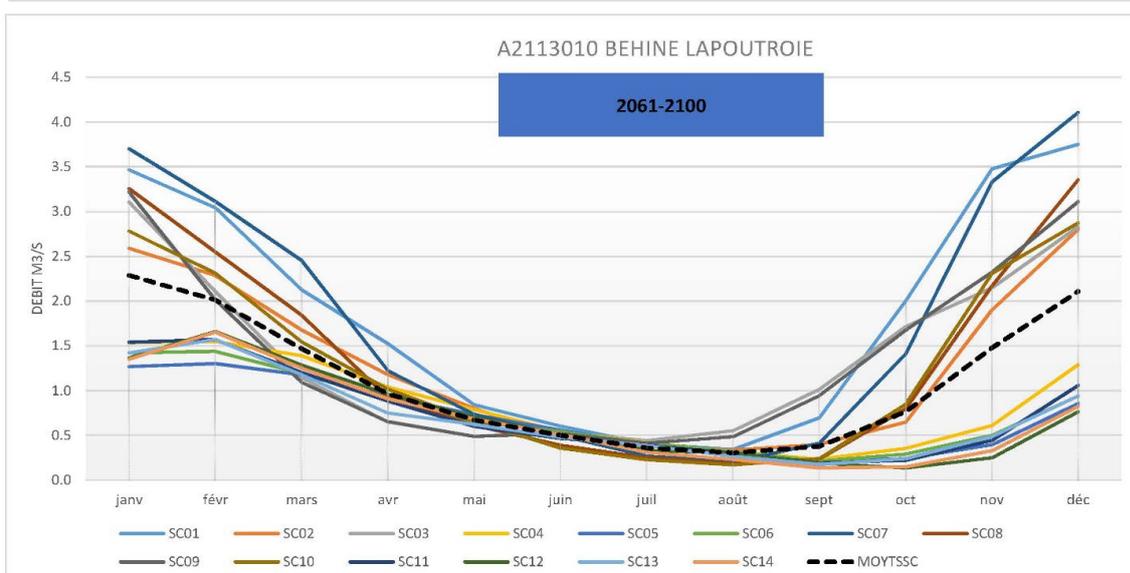
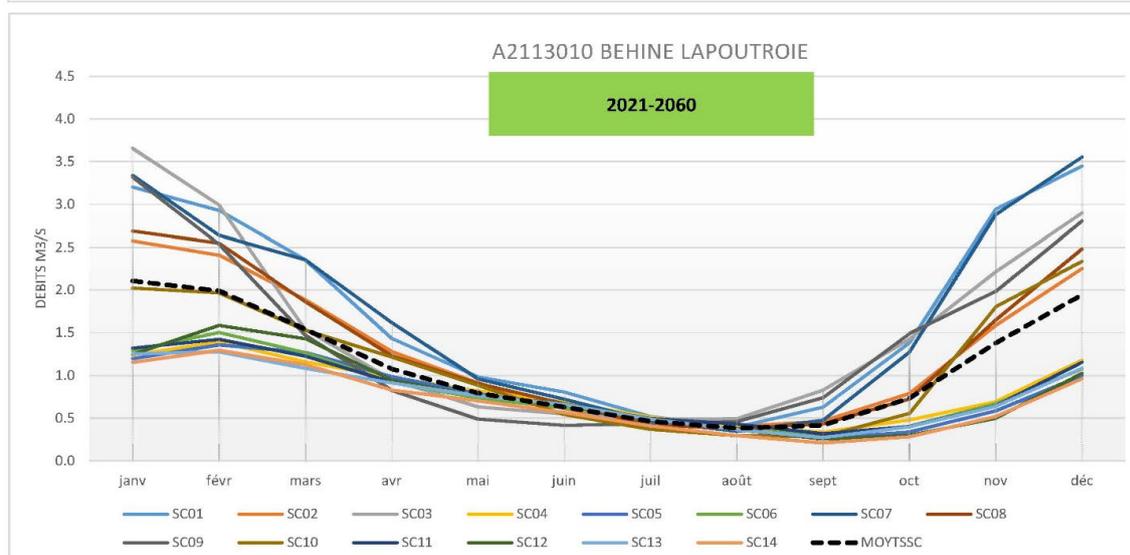
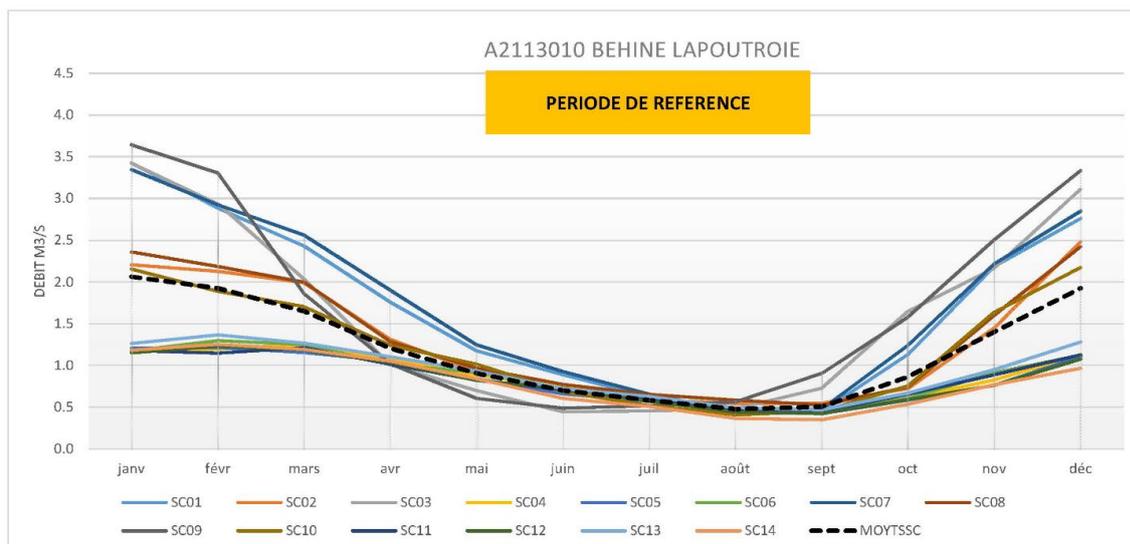
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



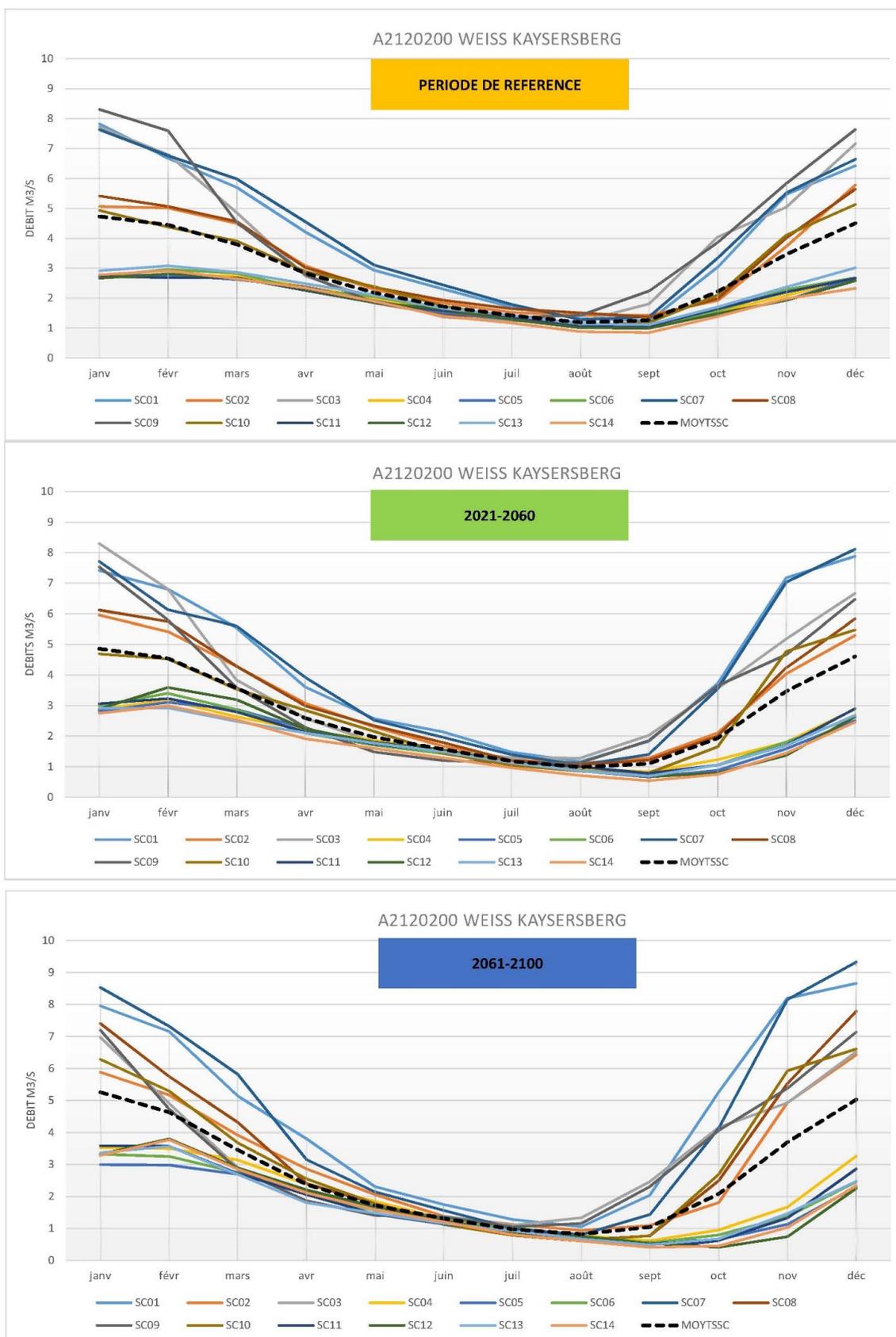
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



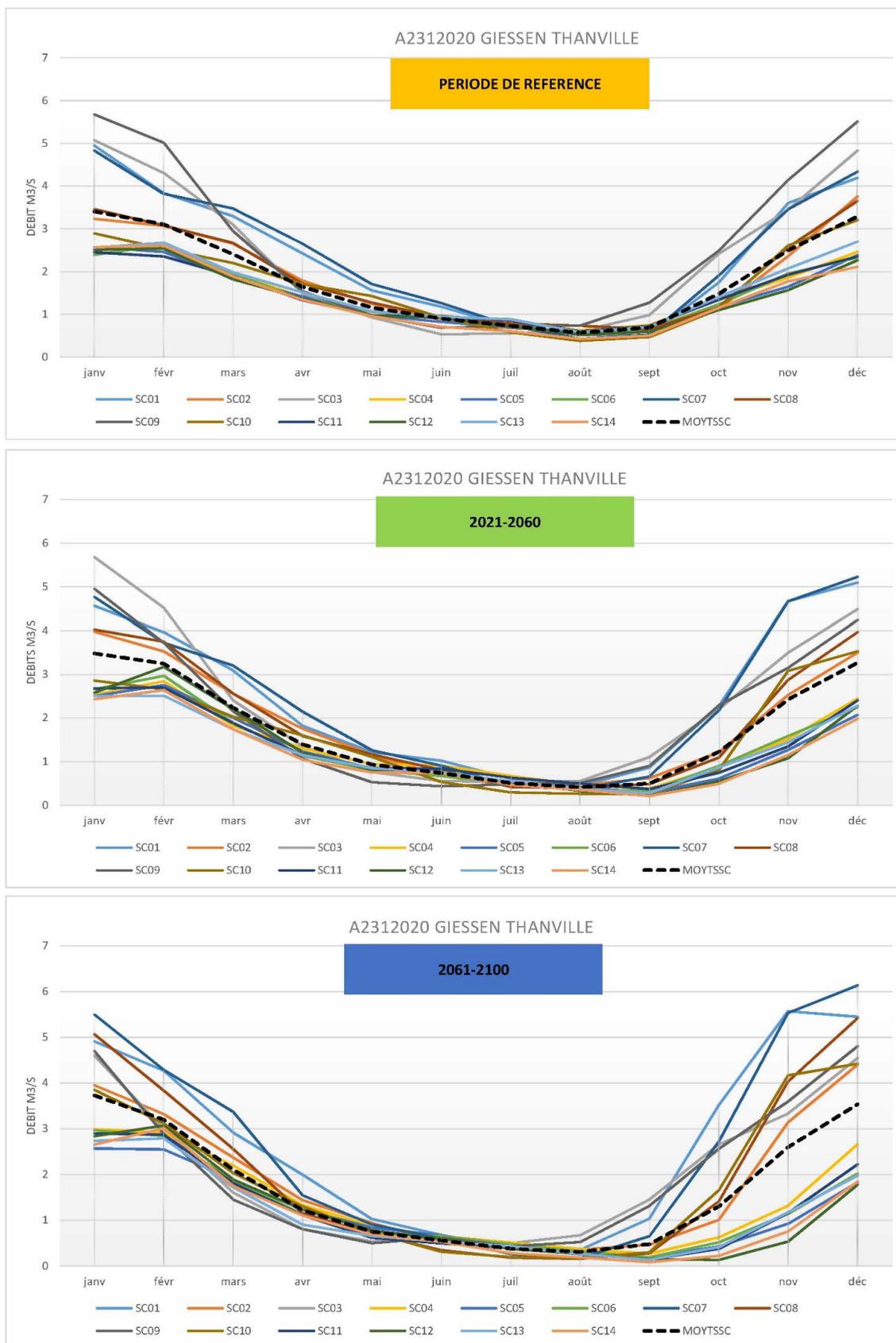
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



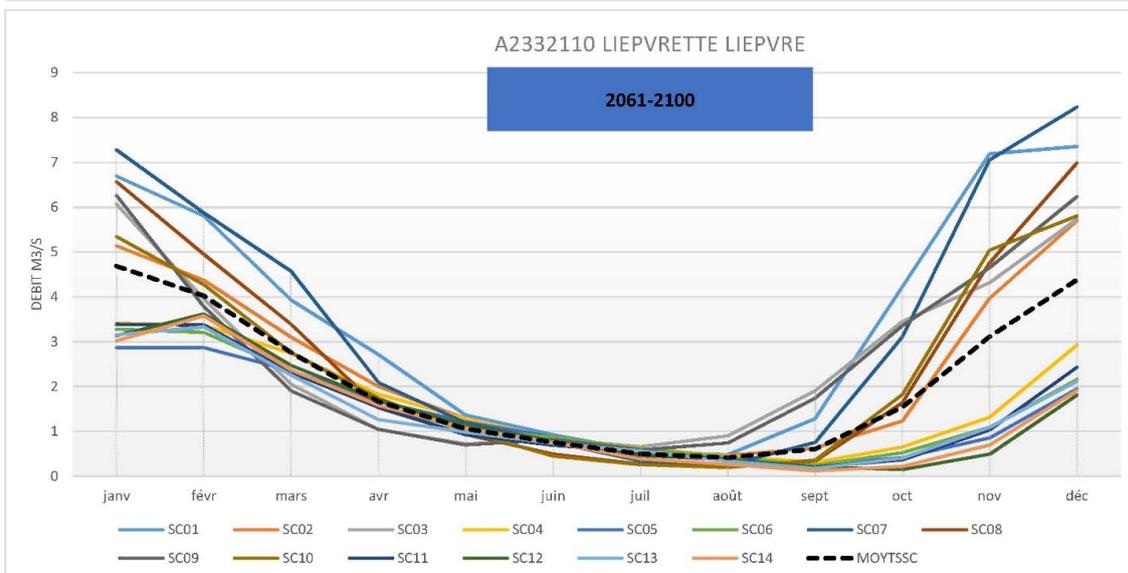
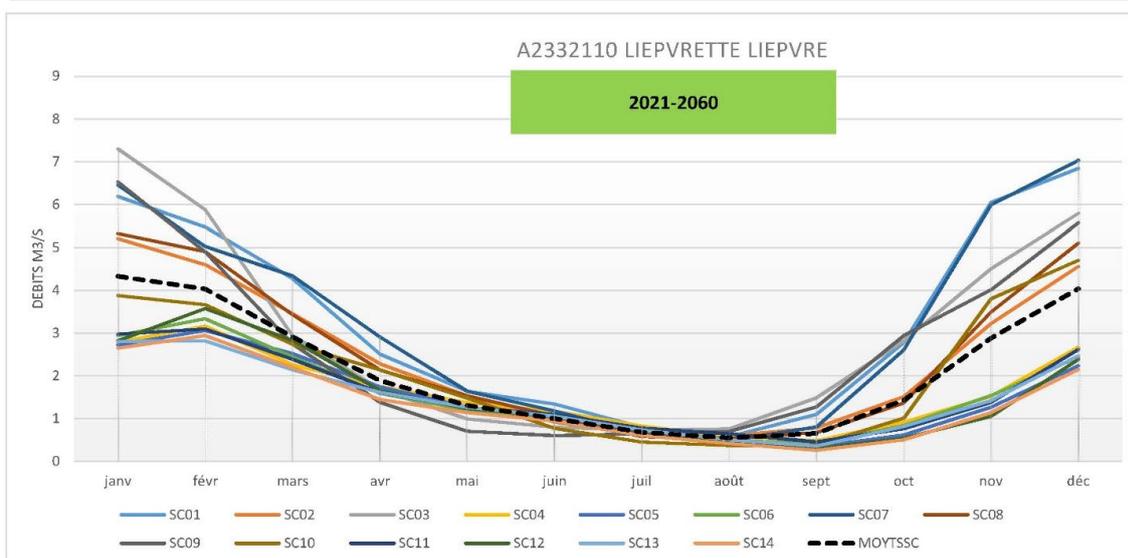
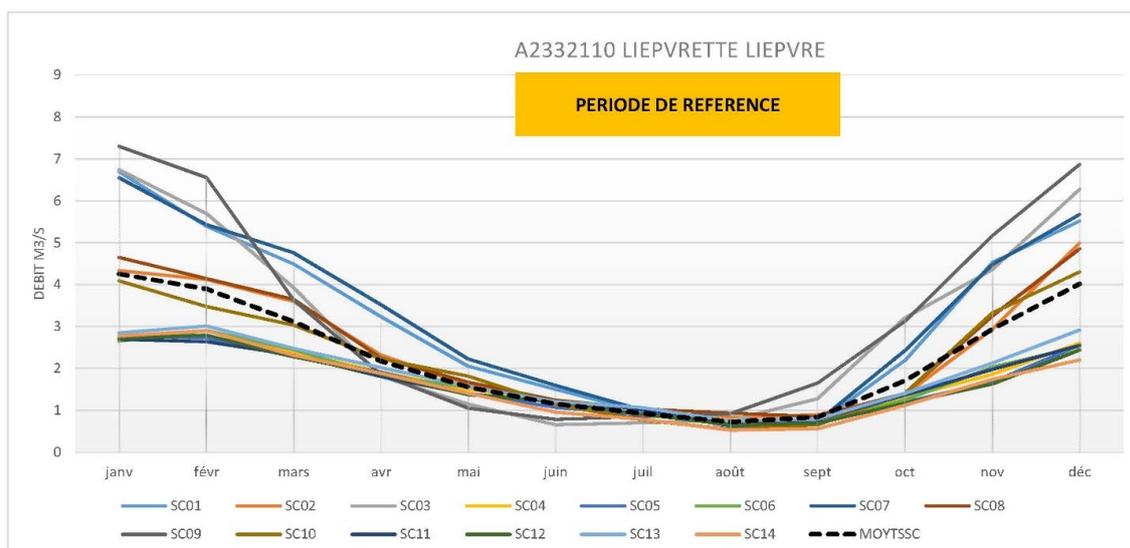
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



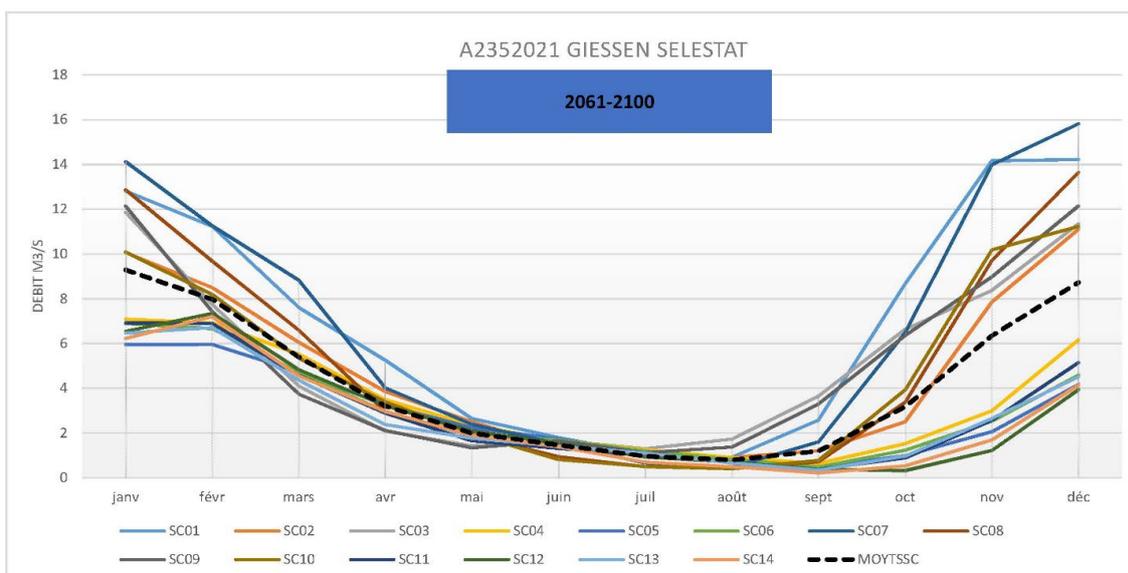
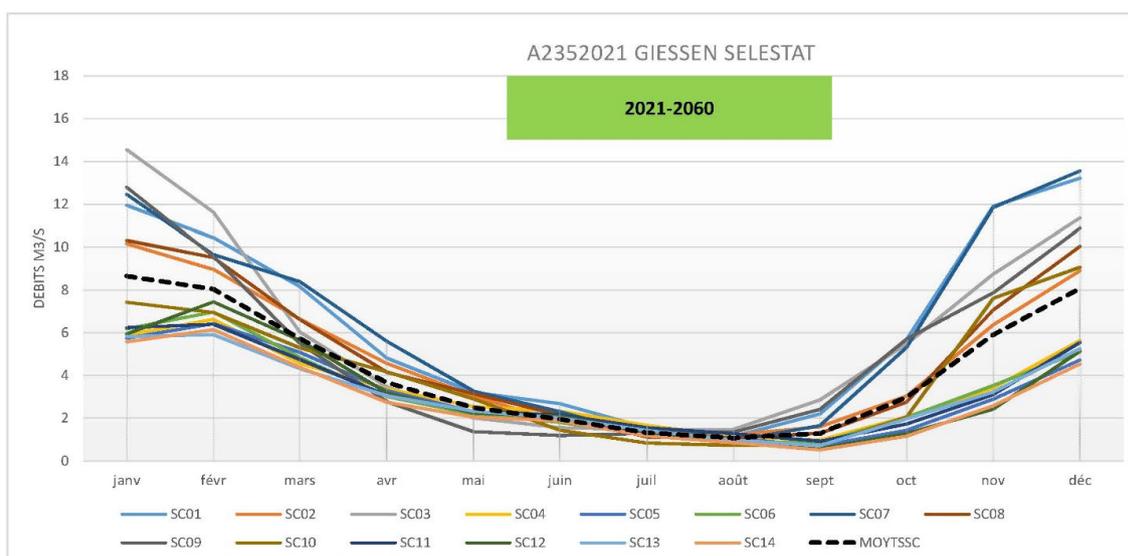
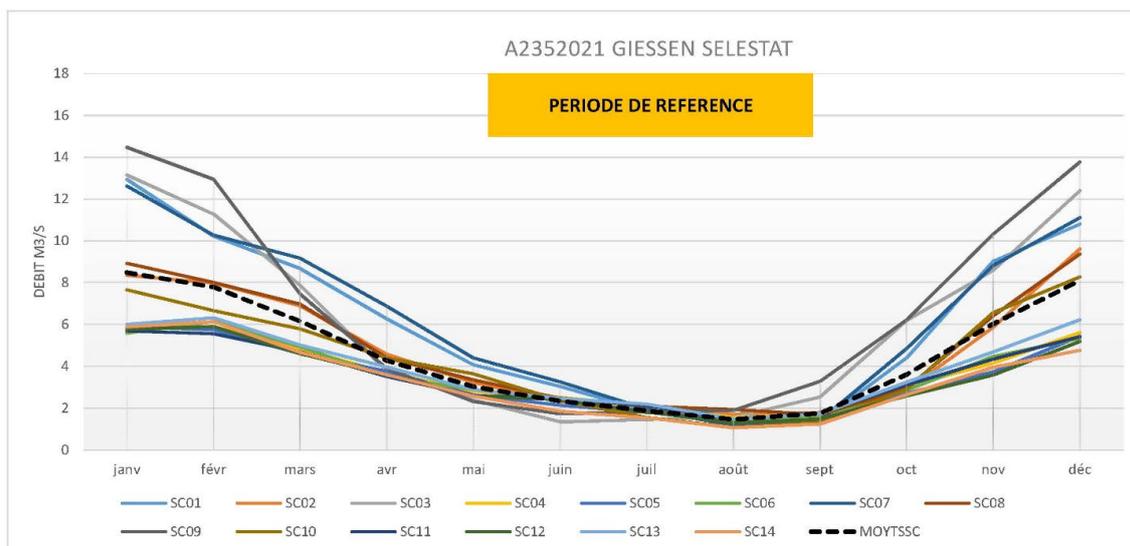
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



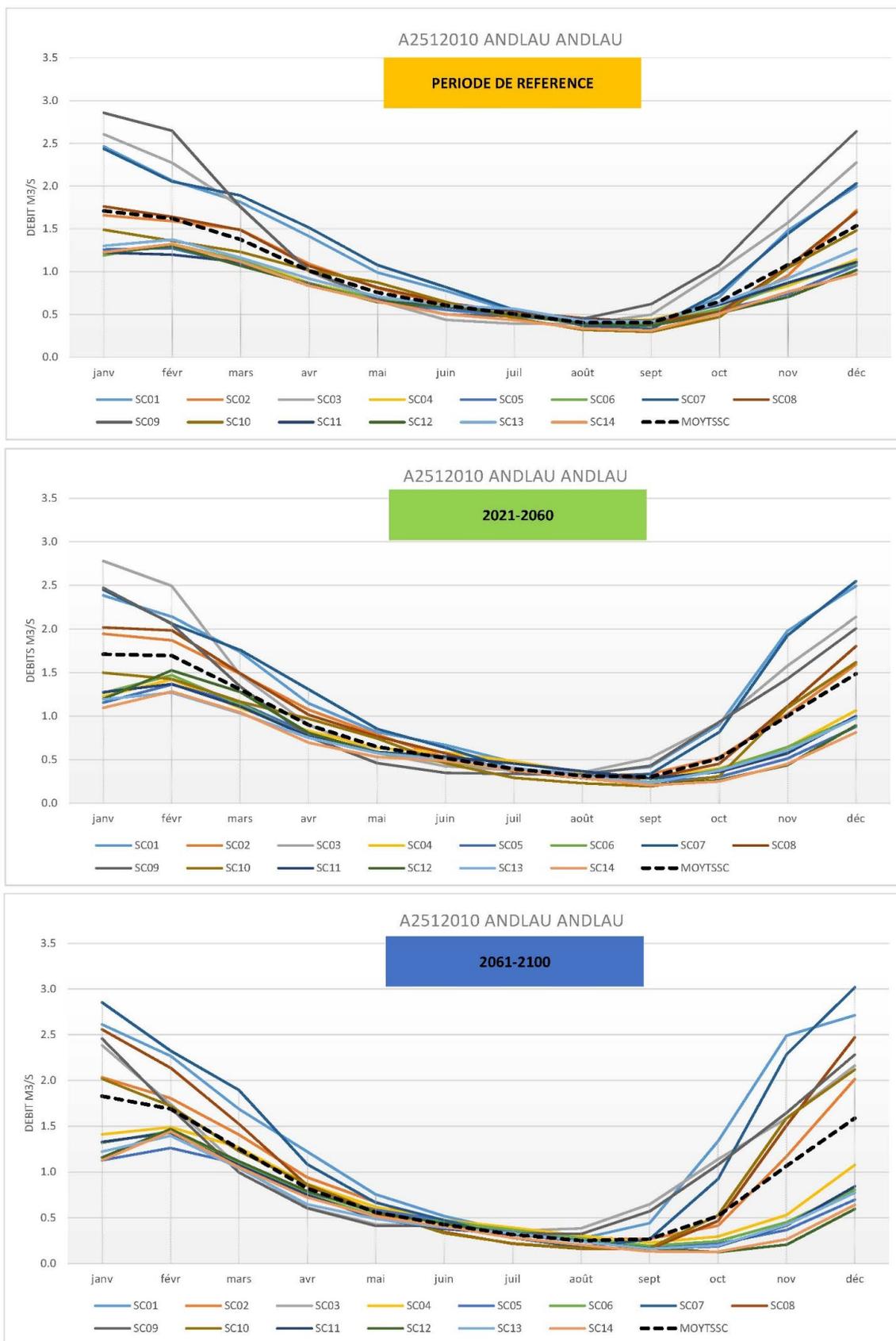
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



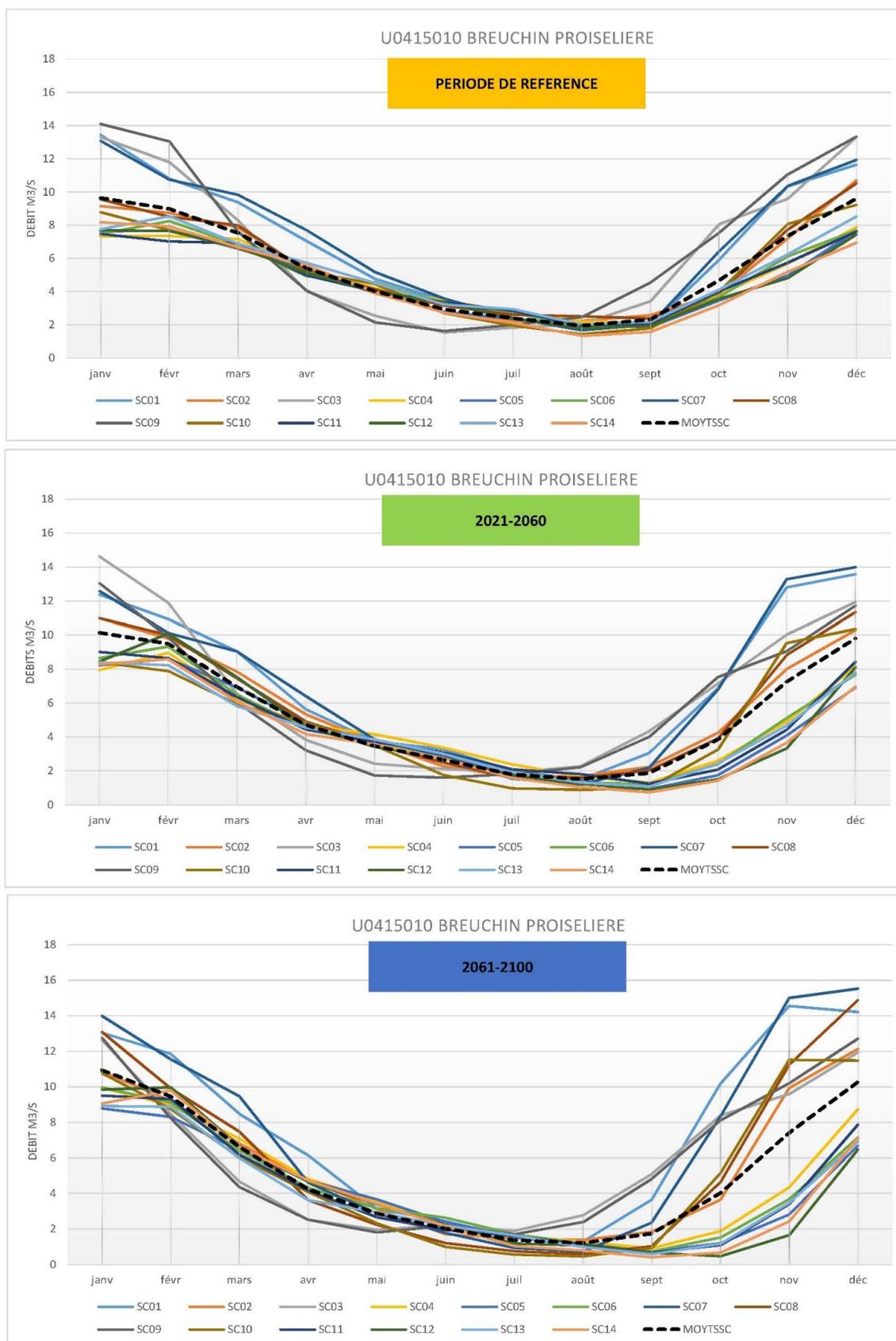
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



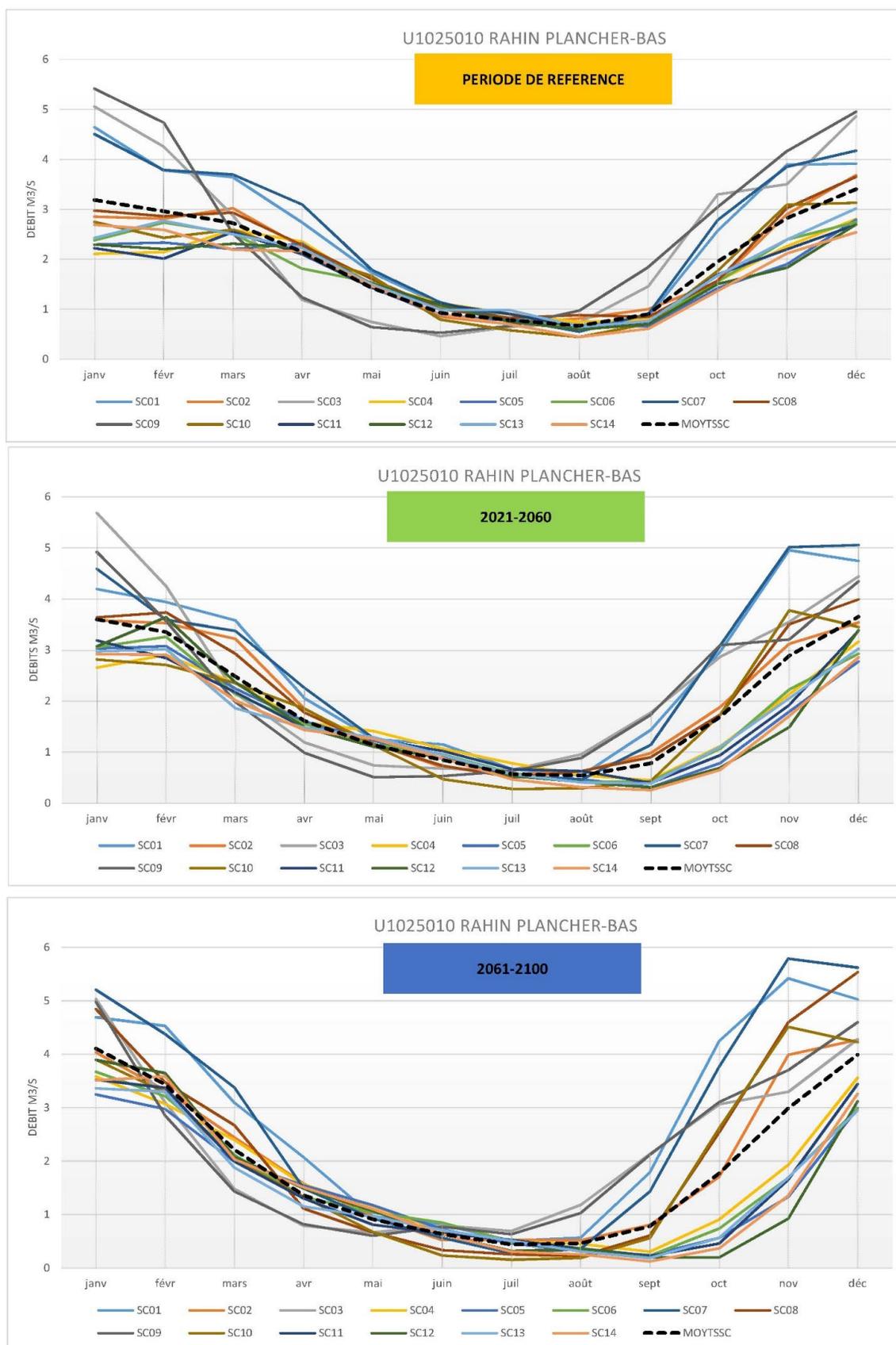
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



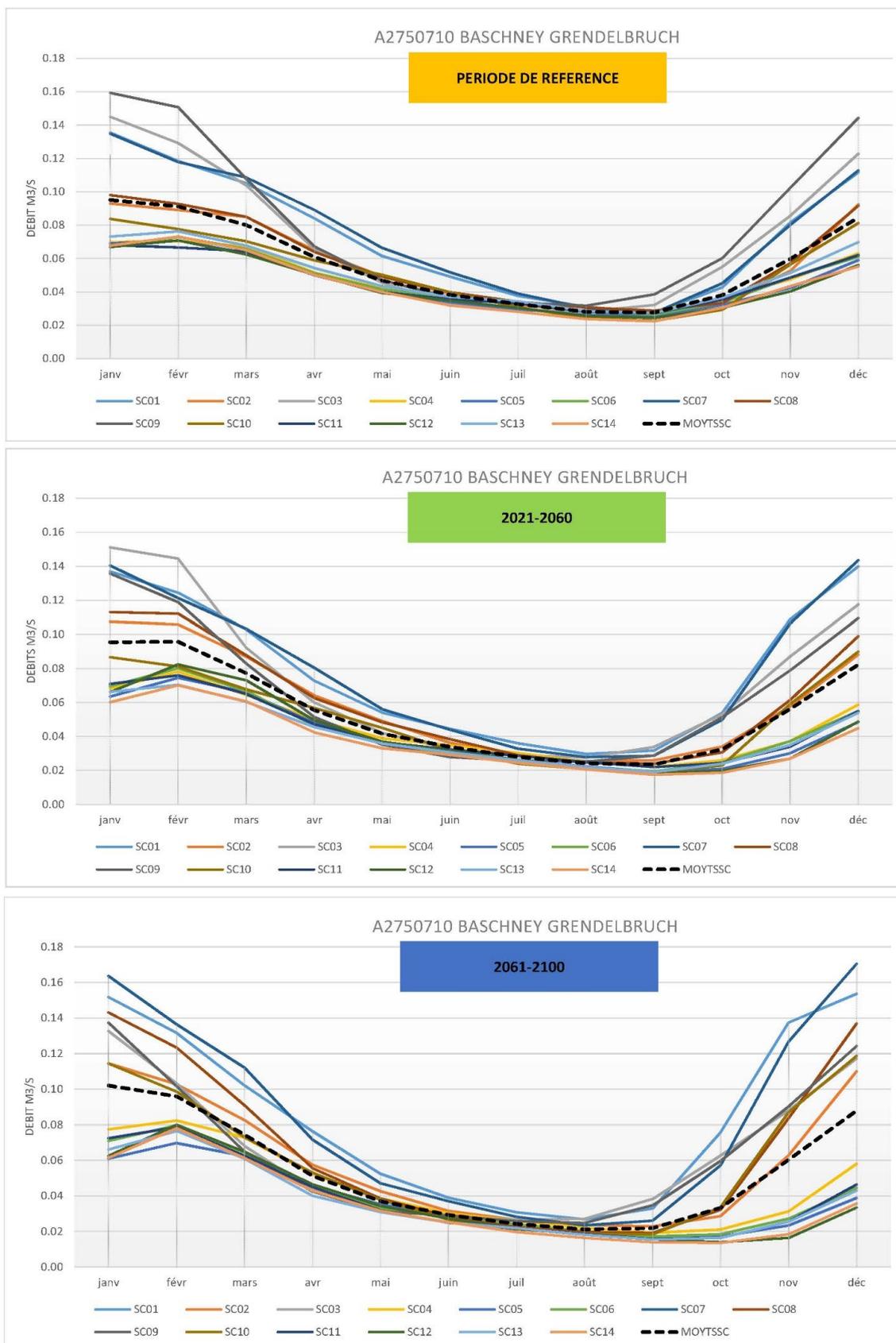
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



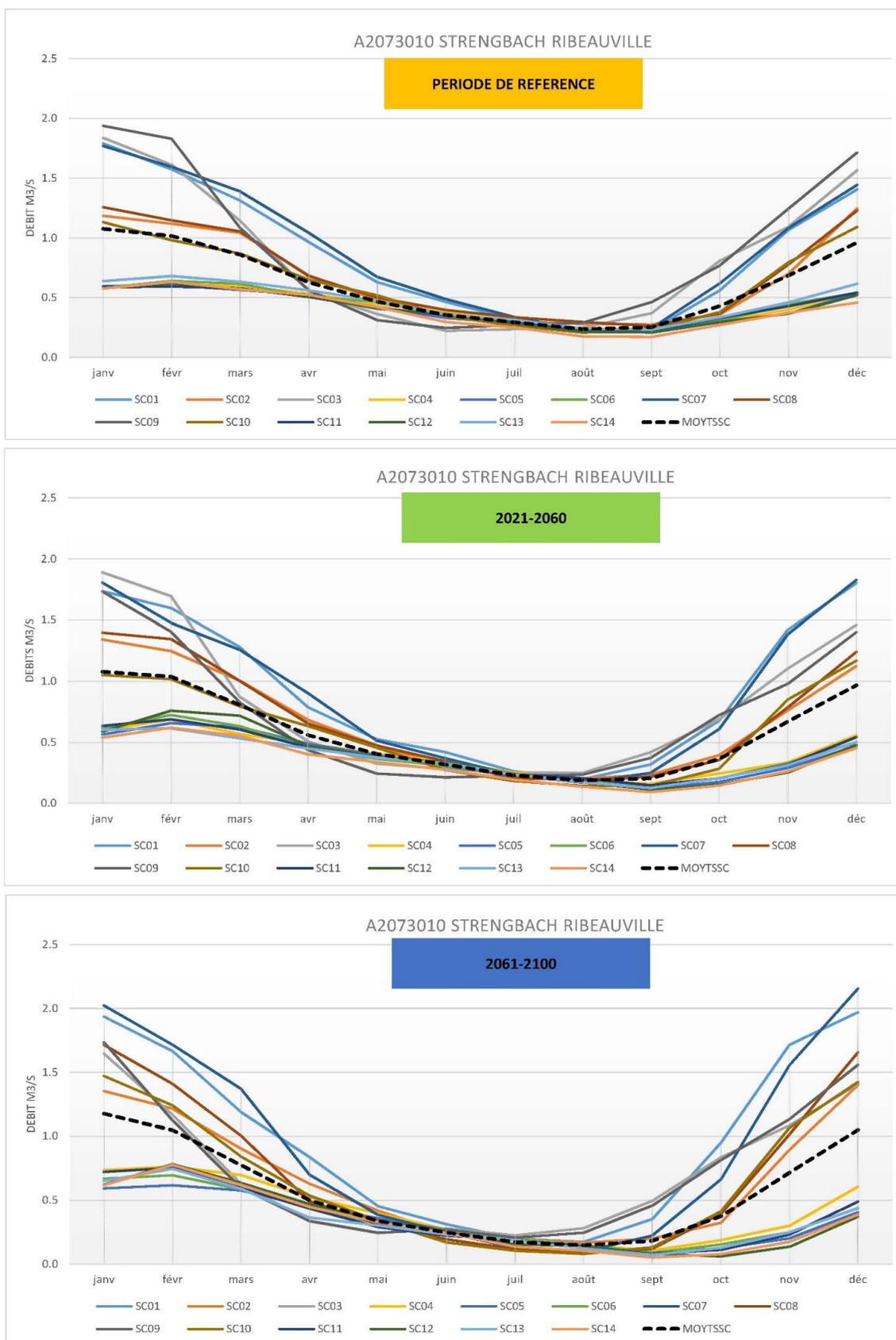
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



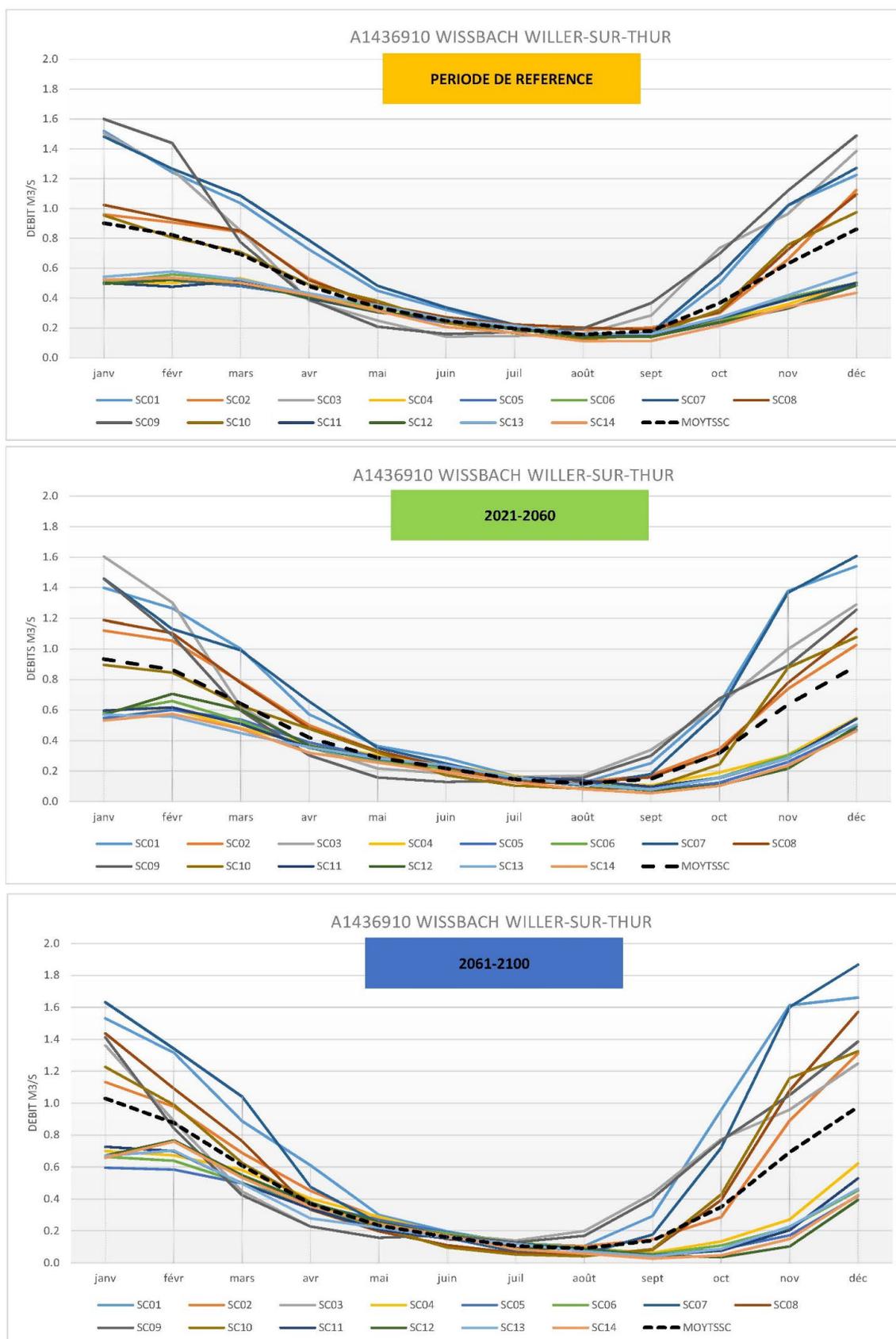
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



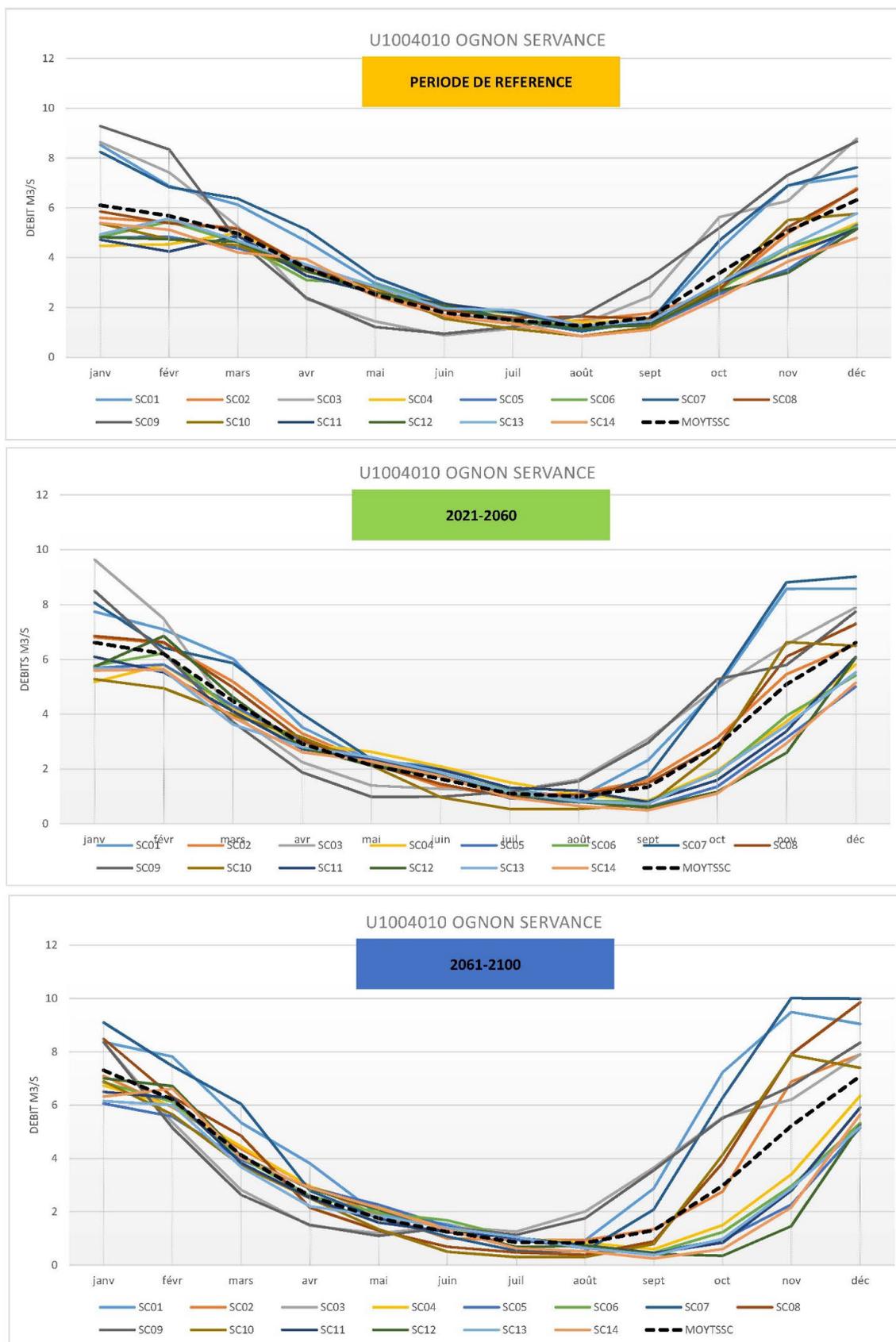
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



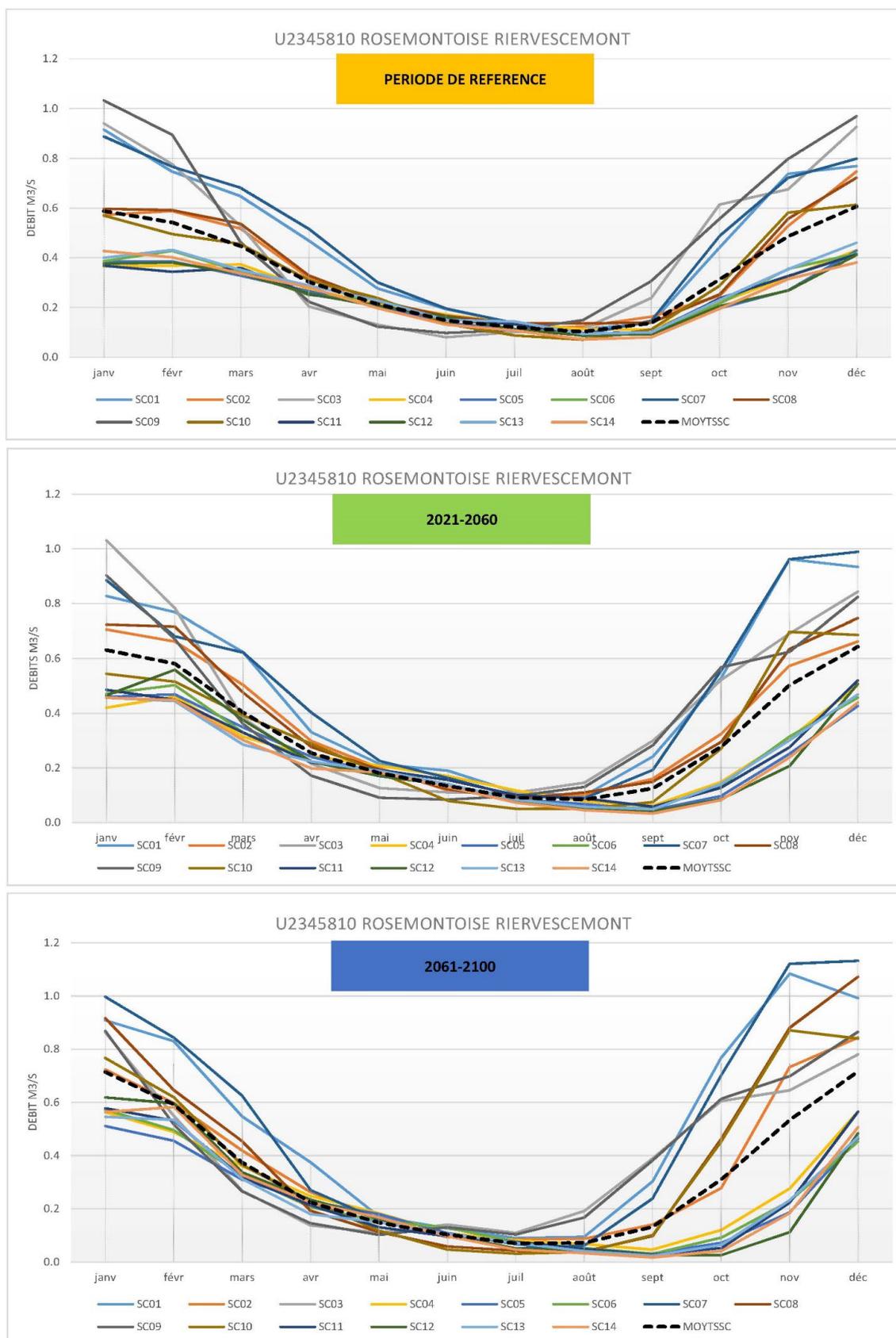
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



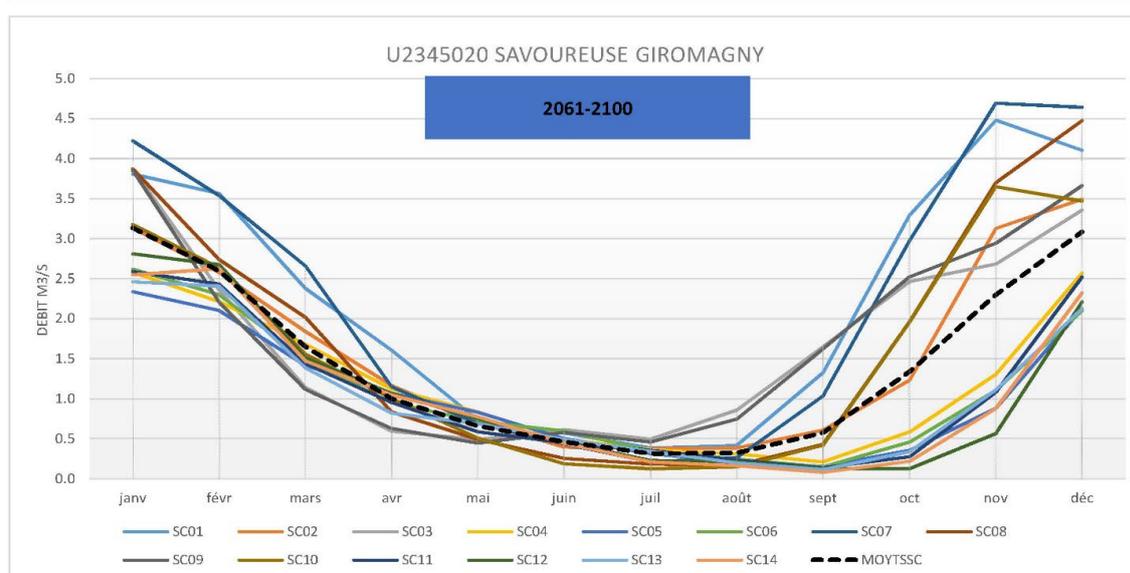
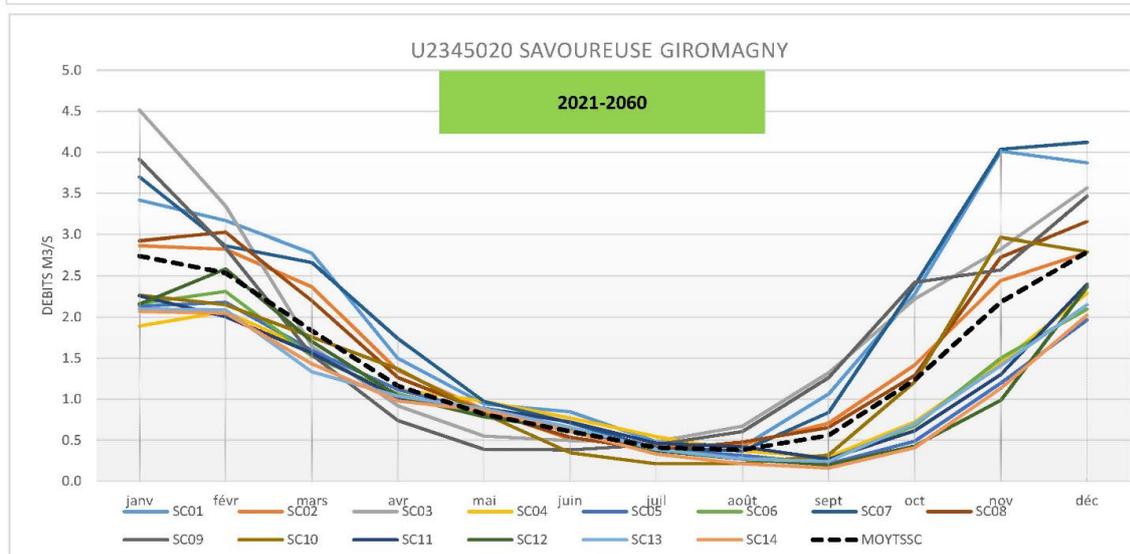
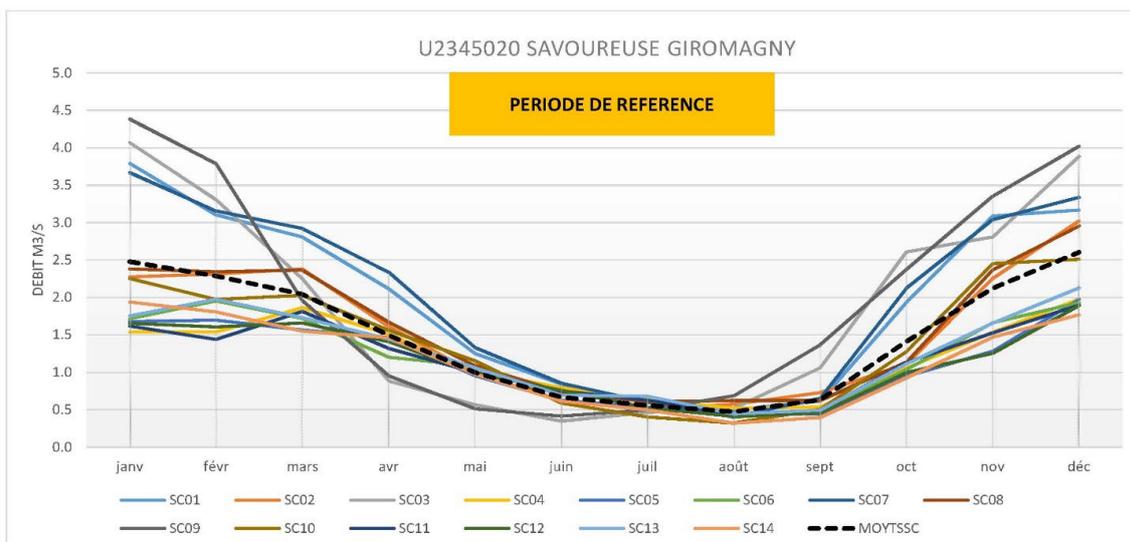
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



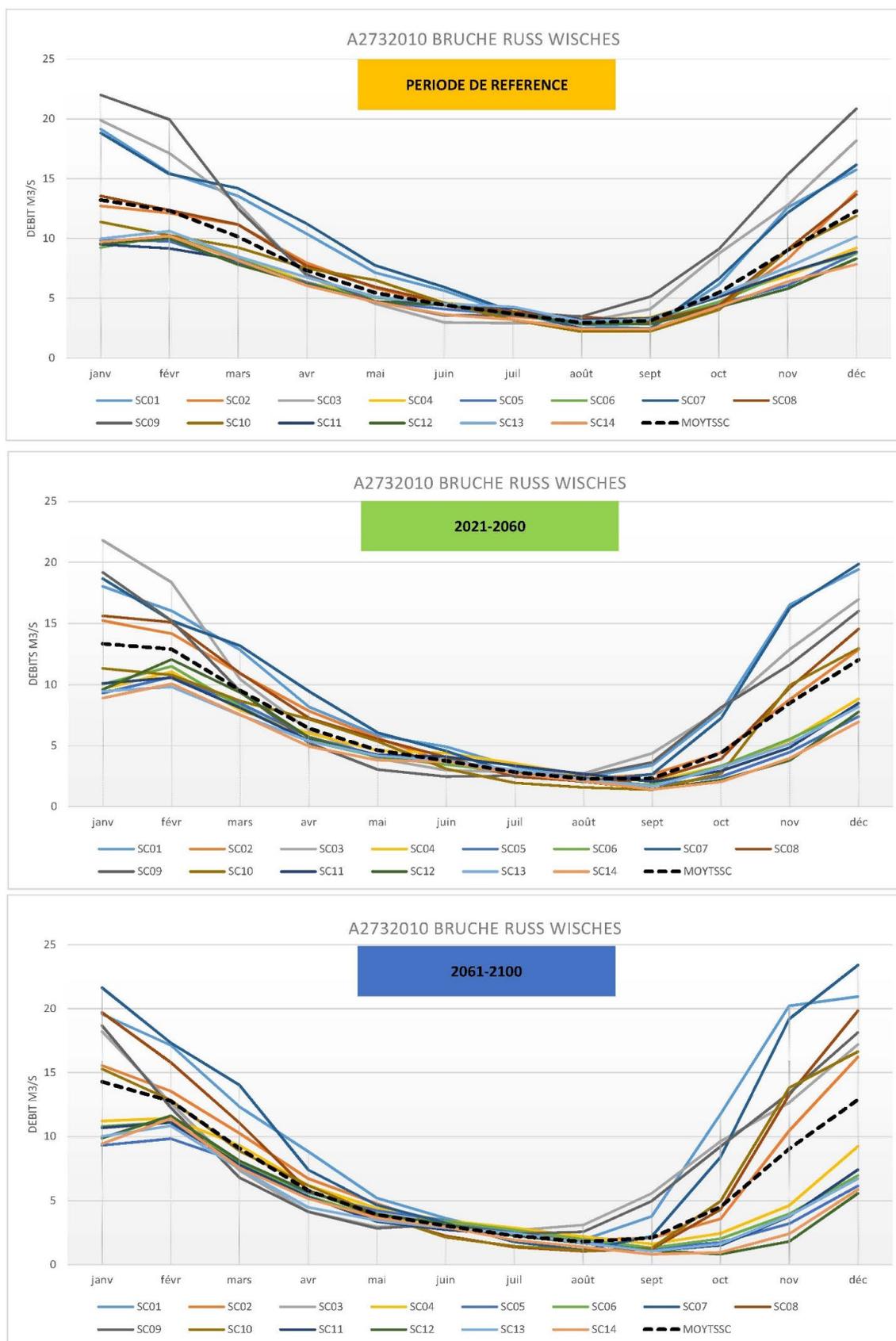
Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges



Impact du changement climatique sur la ressource en eau du Massif des Vosges





Géosciences pour une Terre durable

brgm

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

Direction régionale Grand Est – Site de Nancy
1 rue Jean Zay
54500 Vandoeuvre-lès-Nancy - France
Tél. : 03 83 44 81 49