POST-DOCTORAT SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC

« Synthèse hydrogéologique des connaissances sur l'Impluvium de Volvic : élaboration d'un modèle conceptuel de fonctionnement et modélisation hydrologique du système aquifère »

PROJET

RAPPORT FINAL

PARTIE 2 : MODELISATION HYDROLOGIQUE ET PROSPECTIONS D'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

NEVERS Pierre, CELLE Hélène

Juillet 2024

PROJET

TABLE DES MATIERES

MODELISATION HYDROLOGIQUE ET PROSPECTIONS D'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

I. METHODOLOGIE.....3

I.1 Contexte.....3

I.2 Données utilisées.....6

I.3 Description du modèle hydrologique Gardenia.....8

I.4 Modèle climatique régional (MCR) et scénarios climatiques (RCP) pour la prévision du débit total à la sortie du système.....11

II. RESULTATS.....13

II.1 Simulation recharge récente : Q_{SFC*}récent.....13

II.2 Simulation recharge ancienne – long terme : Q_{SFC*}ancien.....14

II.3 Validation et limites des simulations.....16

III. MODELISATION PROSPECTIVES.....17

III.1 Tendances d'évolution climatique dans le secteur du point de grille de Volvic selon les différents scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) et RCM associés (Regional Climate Models) choisis.....17

II.2 Modèle prédictif RCP 2.6 – RCM Aladin63.....19

II.3 Modèle prédictif RCP 4.5 – RCM RACMO22E.....22

II.4 Modèle prédictif RCP 8.5 – RCM RegCM4-6.....25

II.5 Synthèse.....28

IV. CONCLUSION.....31

V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....34

PROJET

MODELISATION HYDROLOGIQUE ET PROSPECTIONS D'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

I. METHODOLOGIE

I.1 Contexte

Les objectifs de ce travail de recherche, énoncés dans le rapport Partie 1 sont **de mieux appréhender le fonctionnement de l'impluvium de Volvic et d'identifier les causes de la baisse du débit naturel en front de coulée notamment en période d'étiage.** Car en effet, les exutoires du système, les Sources de Front de Coulée ont montré une baisse progressive de leurs débits au cours 40 dernières années avec une accentuation du phénomène à partir de 2015 marqué notamment pas des étiages plus sévères comme en 2019 (figure 1).

La seconde partie de ce travail, présentée dans ce rapport Partie 2, vise à anticiper l'évolution quantitative des masses d'eau du système aquifère de Volvic face au changement climatique. Elle se traduit par la mise en place d'un outil d'aide à la gestion de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic : modèle numérique GARDENIA (BRGM) qui repose sur le modèle conceptuel établi en Partie 1. Il intégrera divers scénarios de changements climatiques affectant la recharge de l'aquifère, afin de déterminer l'évolution des débits à l'horizon 2100 l'influence des prélèvements sur la durabilité de l'aquifère de Volvic.

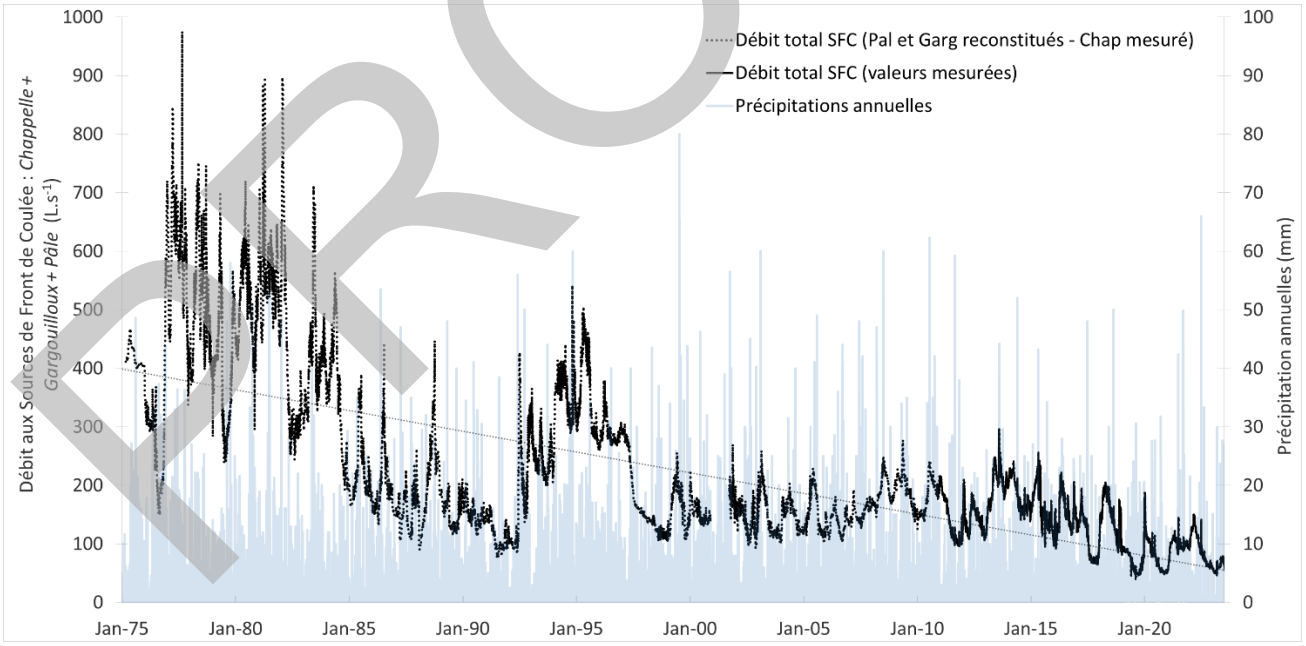


Figure 1 : Précipitations mensuelles (mm) à la station météorologique de Volvic et débit mensuel total (cumul des trois sources, en L.s-1) aux Sources de Front de Coulée de 1975 à 2023. La section en pointillés correspond au débit total basé sur l'estimation des débits de la Pale et Gargouilloux sur la période 1975-2010. La régression linéaire des débits est matérialisée par une droite en pointillés.

PROJET

La figure 2 illustre très bien les effets du changement climatique sur l'évolution de la recharge moyenne annuelle et la température moyenne annuelle à Volvic de 1950 à 2023. Malgré une certaine variabilité interannuelle, les données de recharge annuelle (en bleu) varient d'environ 300 L/s en 1950 à environ 200 L/s en 2023, indiquant une diminution significative. La moyenne mobile sur 5 ans confirme cette tendance à la baisse. En parallèle, la température moyenne annuelle (en rouge) montre une augmentation de presque 1.5°C depuis les années 1970. La moyenne mobile sur 5 ans corrobore cette hausse progressive des températures. Ces tendances suggèrent un réchauffement climatique accompagné d'une réduction notable de la recharge à Volvic.

Cette diminution de recharge annuelle peut avoir des conséquences sur la disponibilité des ressources en eau pour les usages domestiques et industriels à Volvic. L'augmentation des températures exacerbe les effets de la baisse de recharge, augmentant l'évapotranspiration et réduisant davantage la disponibilité en eau. En résumé, les figure 1 et 2 illustrent clairement les enjeux liés au changement climatique à Volvic, avec une augmentation des températures moyennes annuelles associée à une diminution de la recharge et des débits aux exutoires du système, ce qui pourrait poser des défis importants pour la gestion des ressources en eau dans la région. Dans ce contexte, le travail modélisation hydrologique s'avère être un outil adapté pour simuler l'évolution des masses d'eau dans le futur à l'échelle du système hydrologique de Volvic.

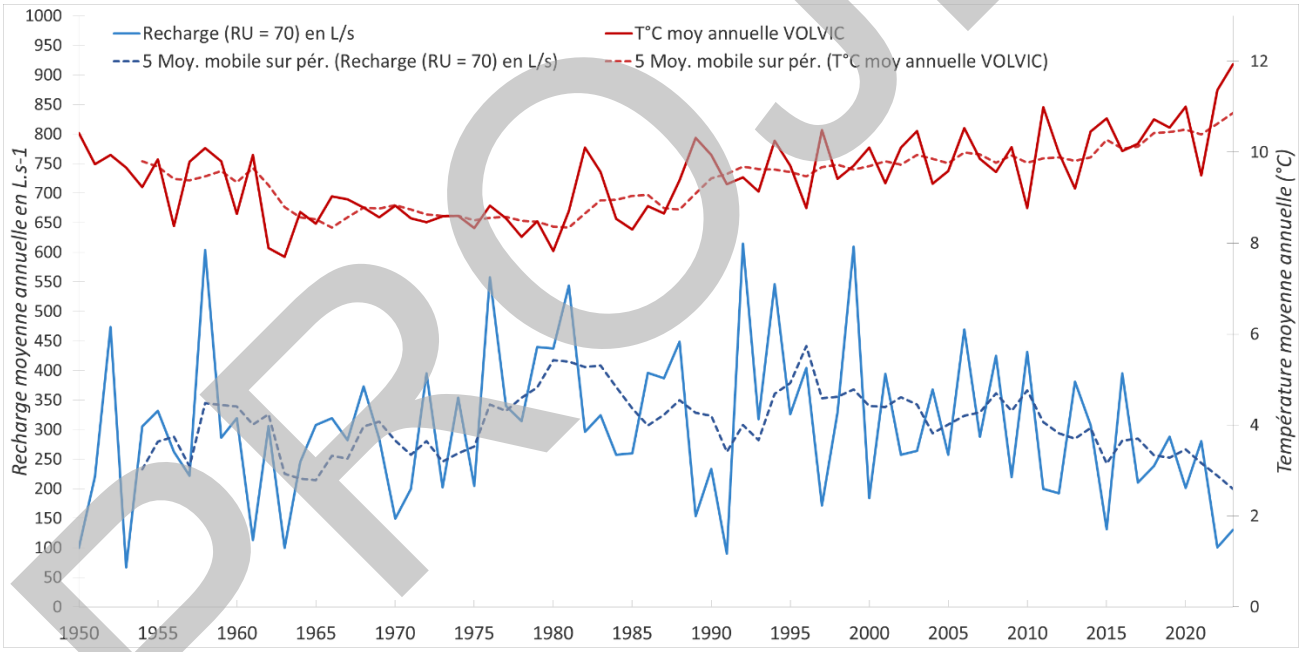


Figure 2 : Evolution de la température moyenne annuelle et de la recharge (moyennes annuelles) sur la période 1950-2023 dans le secteur de l'Impluvium de Volvic (station VOLVIC - Météo-France). Les lignes pointillées correspondent aux moyennes glissantes sur 5 ans.

Pour ce travail de modélisation, le modèle conceptuel Gardenia (Thiéry et al., 1988 ; Thiéry et al., 2014) a été choisi. Il permet de modéliser les débits des rivières à l'exutoire d'un bassin versant et/ou les niveaux des eaux souterraines en se basant uniquement sur les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle. Il présente l'avantage de considérer le cycle de l'eau dans son ensemble (depuis les précipitations, la recharge des nappes souterraines, le ruissellement et les prélèvements jusqu'au débit de la rivière) et d'être calibré sur la base d'un nombre raisonnable de paramètres (8 à 10).

PROJET

Un tel modèle peut être facilement appliqué à n'importe quel bassin versant, et permet de déterminer les principaux facteurs qui déterminent le bilan hydrique et l'évolution de la disponibilité de l'eau dans un contexte de changement climatique. Dans le contexte de l'impluvium de Volvic le modèle conceptuel de fonctionnement défini dans la partie 1 de ce travail est basé sur la mise en évidence d'un fonctionnement selon deux composantes avec d'une part une composante ancienne au comportement inertiel et un temps de résidence moyen de 34.2 ans acquis lors de la circulation selon un modèle Piston des eaux souterraines au travers des édifices volcaniques scoriacés (figure 3). D'autre part, dans les parties médiane et avale de l'impluvium, une composante récente complète le système et correspond à l'infiltration d'eau récente (infra-annuelle) selon un modèle Exponentiel. Pour représenter au mieux ce modèle de fonctionnement il a été décider de réaliser un travail de modélisation hydrologique par 2 modèles numérique Gardénia :

- Un premier modèle visant à modéliser la composante ancienne du système et correspondant à la partie amont de l'impluvium, d'altitude moyenne à 850 mNGF, caractérisée par une recharge élevée >350 mm, à basse température, s'infiltrant dans les cônes de scories (superficie de 15 km²). Dans cette partie de l'hydrosystème, les eaux souterraines circulent selon un modèle piston avec un temps de résidence moyen d'environ 34.2 ans. **Ce modèle a composante ancienne est illustré en figure 3a**.

- Un deuxième modèle traitant la composante récente du système et correspondant au reste de l'impluvium de Volvic (milieu et l'aval) sur une superficie de 30 km² constituée de coulées de lave séparées les unes des autres par leurs bases scoriacées. Dans cette partie la recharge récente qui correspond aux précipitations annuelles qui s'infiltrent préférentiellement au niveau du contact substratum/coulée de lave. **Ce modèle a composante récente est illustré en figure 3b**.

PROJET

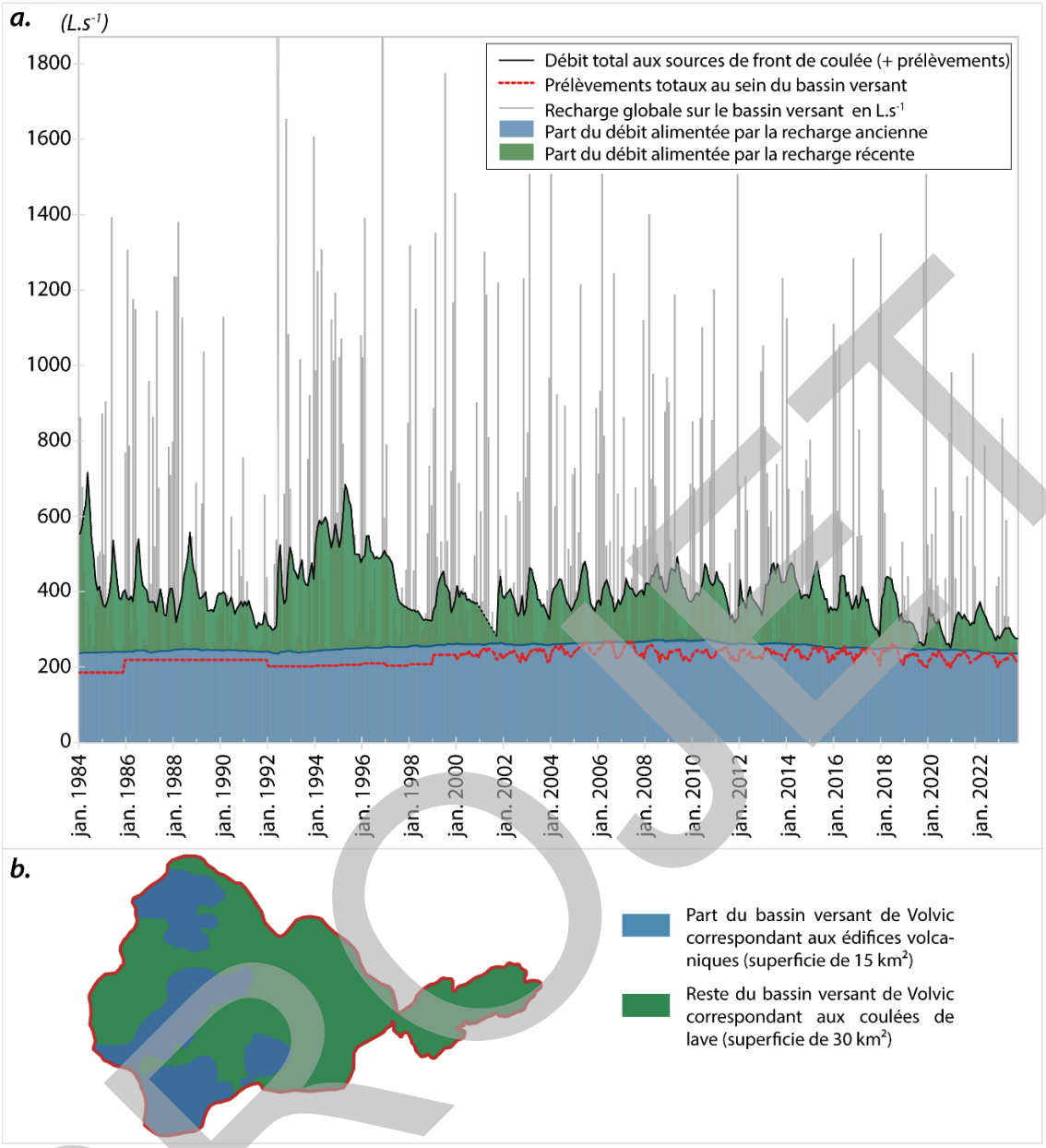


Figure 3 : a. Débit à l'exutoire de l'impluvium de Volvic montrant la contribution des composantes ancienne (bleu) et récente (vert) b. Part du bassin correspondant aux édifices volcaniques et à la zone d'alimentation de la recharge ancienne (en bleu) et part restante du bassin versant correspondant à la zone d'alimentation de la recharge récente (en vert).

I.2 Données utilisées

Les données d'entrée des modèles proposés sont présentées dans les tableaux ci-dessous. A noter que les débits d'entrée pour chacun des systèmes, à composante ancienne et à composante récente, sont respectivement : le débit correspondant à la part de la recharge ancienne et le débit correspondant à la recharge récente (figure 3) (le détail est présenté dans les tableaux 1 et 2). Ces deux derniers additionnés correspondant au débit total aux exutoires du système.

Pour des raisons de commodité liées à la méthode de modélisation (deux modèles choisis : modèle de recharge récente et modèle de recharge ancienne), il a été décidé d'ajouter les débits prélèvements au débit total des exutoires du système (Figure 4), plutôt que de les traiter comme un paramètre d'entrée du modèle.

PROJET

Il est en effet impossible de distinguer l'impact des prélèvements sur les volumes d'eau provenant de la composante récente de celui sur les volumes de la composante ancienne. Ainsi les débits utilisés sont les débits que l'on considère « naturels » c'est-à-dire hors influence des prélèvements. De même les débits qui seront modélisés seront les débits « naturels » sans prélèvements. **On notera ce débit total aux exutoires, incluant les prélèvements : Q_{SFC*}.**

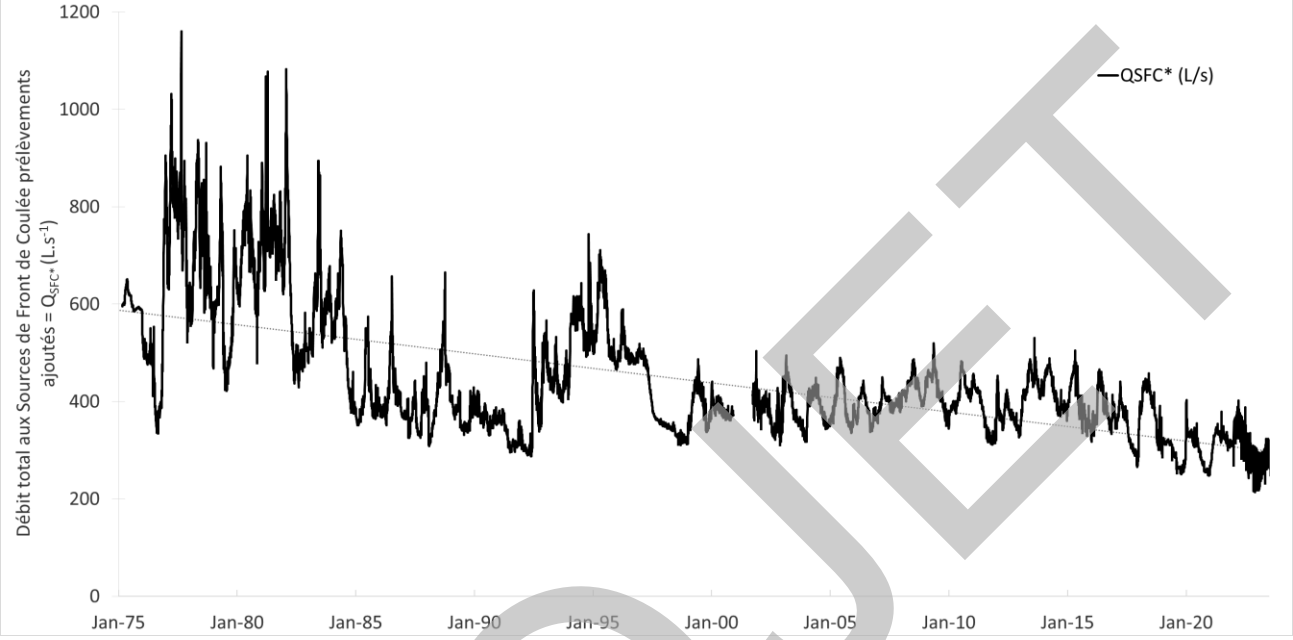


Figure 4 : Débit mensuel total (Q_{SFC*} = cumul des trois sources et des débits prélevés, en L.s-1) aux Sources de Front de Coulée de 1975 à 2023.

Tableau 1 : Liste des données d'entrée utilisées dans la modélisation Gardénia pour le modèle conceptuel à composante récente.

MODELE CONCEPTUEL COMPOSANTE RECENTE

Paramètres	Unités	Pas de temps	Source	Période	Remarques
Précipitations (P)	mm	Mensuel	Météo-France	1984-2022	
Evaportranspiration potentielle (ETP)	mm	Mensuel	Calculé	1984-2022	
Débit total aux exutoires - part correspondant à la composante récente	m^3/s	Mensuel	Mesures DREAL + calculs	1984-2022	*La part de la composante récente correspond au débit total aux exutoires du système avec les prélèvements associés, diminué de la part du débit associé à la composante ancienne*

Tableau 2 : Liste des données d'entrée utilisées dans la modélisation Gardénia pour le modèle conceptuel à composante ancienne.

MODELE CONCEPTUEL COMPOSANTE ANCIENNE

Paramètres	Unités	Pas de temps	Source	Période	Remarques
Précipitations (P)	mm	Mensuel	Météo-France + calculs	1984-2022	*Moyenne glissante sur 34.2 ans des précipitations / avec prise en compte du gradient altitudinal (partie haute de l'impluvium)*
Evaportranspiration potentielle (ETP)	mm	Mensuel	Calculé	1984-2022	*Moyenne glissante sur 34.2 ans des précipitations*
Débit total aux exutoires - part correspondant à la composante ancienne	m^3/s	Mensuel	Calculs	1984-2022	*Correspond à la part de la recharge (recharge ancienne cf-rapport partie 1) sur les cones de scories en partie haute du bassin sur une superficie de 15 km²*

PROJET

Le paramétrage du modèle nécessite la moyenne journalière des précipitations sur 1984-2022, la plus représentative du bassin versant. Dans le cas de l'impluvium de Volvic, nous utiliserons les données de pluviométrie de la station météo de Volvic auquel nous attribuerons le gradient altimétrique défini dans la partie 1 afin d'améliorer la représentativité des données de pluviométrie sur l'ensemble du bassin.

De plus, le cas de Volvic est délicat quant à son fonctionnement hydrogéologique. Selon le modèle, nous utiliserons :

- Modèle conceptuel composante récente : les précipitations mensuelles sur la période 1984-2022
- Modèle conceptuel composante ancienne : la moyenne glissante sur 34.2 ans des précipitations mensuelles afin de tenir compte du temps de séjour défini en partie 1.

La température moyenne journalière de l'air a été mesurée à la station de Volvic. L'évapotranspiration potentielle a été calculée à partir de cette valeur moyenne en utilisant la méthode Oudin (Oudin et al., 2005).

I.3 Description du modèle hydrologique Gardenia

Gardenia est un modèle conceptuel qui a déjà démontré son efficacité dans la simulation et la prévision des débits de rivière et des niveaux de nappes souterraines pour des bassins versants de différentes tailles sur des périodes de temps variables (Thiéry et al., 1993 ; Pointet et al., 2003 ; Habets et al., 2013 ; Jeannin et al., 2021). Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau, les précipitations (P), l'évapotranspiration réelle (ETR), le ruissellement (Rui) et la recharge des nappes souterraines (R), en utilisant des lois physiques simplifiées qui sont traduites en flux à travers une succession de réservoirs (Figure 5, Thiéry, 2014). Le réservoir (U) (figure 5) représente les 10 premiers centimètres du sol affectés par les processus d'évapotranspiration (ETP). La pluie efficace (PE) est dépendante de la capacité du réservoir (U), c'est-à-dire la Réserve Utile (RU avec RUmax : capacité maximale de la réserve), selon les relations :

$$\begin{gathered} Si\ P > ETP\ et\ RU = RUmax, \\ alors\ ETR = ETP \\ et\ \boldsymbol{PE} = (\boldsymbol{P} - \boldsymbol{ETP}) \end{gathered} \quad (1)$$

$$\begin{gathered} Si\ P > ETP\ et\ RU < RUmax, \\ alors\ ETR = ETP - (RUmax - RU) \\ et\ \boldsymbol{PE} = (\boldsymbol{P} - \boldsymbol{ETR}) \end{gathered} \quad (2)$$

$$\begin{gathered} Si\ P < ETP\ et\ RU = RUmax\ ou\ RU < RUmax, \\ alors\ ETR = P \\ et\ \boldsymbol{PE} = \boldsymbol{0} \end{gathered} \quad (3)$$

Ensuite, la PE alimente le réservoir de la zone non saturée (H). La PE est distribuée en Rui et R en fonction de la hauteur de distribution du paramètre de ruissellement-infiltration (RUIPER). Rui alimente l'écoulement superficiel et R alimente le réservoir d'eau souterraine (G_1) (pour la zone saturée). Dans le contexte de Volvic il est considéré que l'ensemble des précipitations s'infiltrent, ainsi Rui est nul et donc PE = R ; Le paramètre

PROJET

ruissellement-infiltration (RUIPER) est fixé de manière à maximiser l'infiltration. Enfin, le paramètre simulé est le débit de l'ensemble de Sources de Front de Coulées auquel sont ajoutés les volumes extraits pour les prélèvements (Q_{SFC*}).

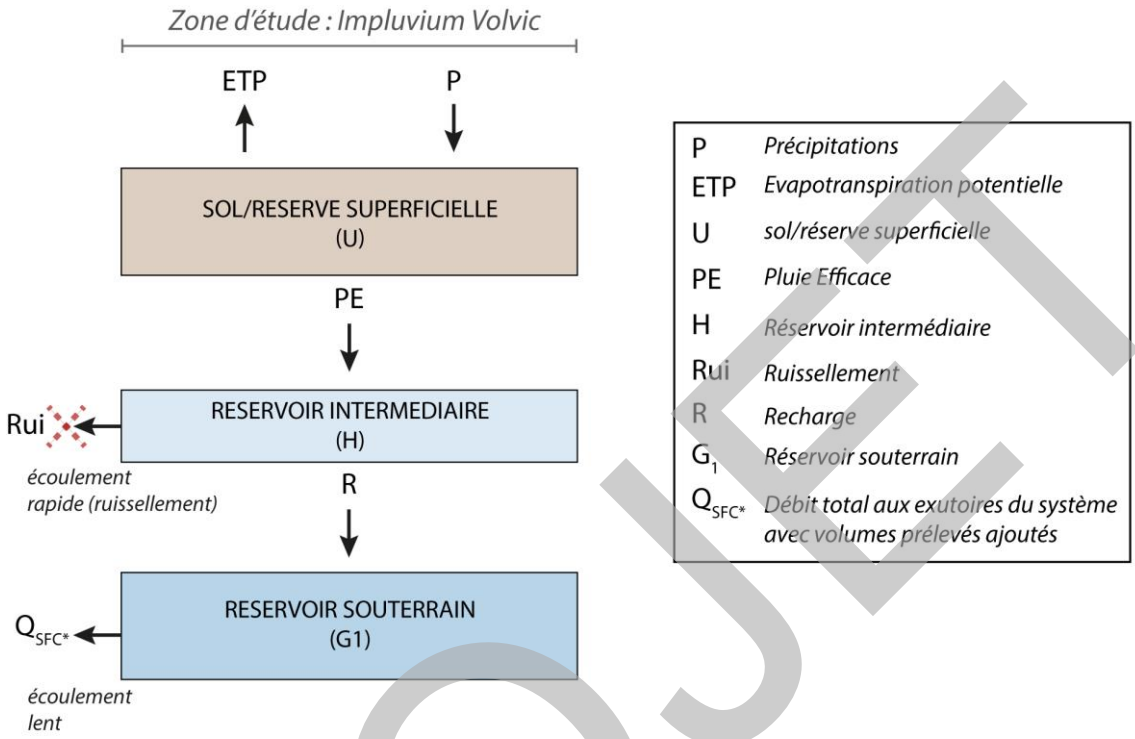


Figure 5 : Schéma fonctionnel du modèle de réservoir Gardenia utilisé dans les modélisations (modèle récent et modèle ancien), adapté de Thiéry (2014).

Tableau 3 : paramètres optimisés et paramètres fixés dans Gardenia et leur description.

	Paramètres	Unités	Description
Paramètres optimisés	Débit extérieur éventuel (Q_o)	m^3/s	*Débit non contrôlé par la mesure à l'exutoire.*
	Correction globale de l'ETP	%	*Correction chargée de compenser une mauvaise représentativité de l'ETP.*
	Temps de 1/2 percolation vers la nappe (THG)	mois	*Temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace (PE) et une augmentation de la composante lente du débit.*
	Temps de 1/2 tarrissement du débit souterrain (TG1)	mois	*Temps au bout duquel, en l'absence de recharge ®, le débit de la composante lente est divisé par deux.*
	Temps de réaction ("retard") du débit de rivière	nbre de pas de temps	*Temps nécessaire pour qu'une impulsion de PE se propage jusqu'à l'exutoire du bassin.*
Paramètres fixés	PE annuelle pour initialisation	mm/an	*Initialisation du modèle par la pluie efficace (PE) moyenne anuuelle.*
	Superficie du bassin versant	km^2	*Superficie du bassin versant étudié.*
	Capacité du réservoir sol de type "réserve utile"	mm	*Capacité du réservoir représentant le sol. L'ETP agit dans la limite de cette capacité. Une PE peut être générée uniquement quand cette réserve utile est complètement pleine.*
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (RUIPER)	mm	*Hauteur d'eau qui conduit à une répartition égale du débit rapide (Rui) et du débit faible (R).*

La calibration du modèle est un processus semi-automatique. L'utilisateur donne pour chaque paramètre optimisé (tableau 3) une valeur initiale pour la première exécution et une fourchette avec une limite inférieure et une limite supérieure.

Afin de tester et de valider les modèles, le débit total des exutoires du système (Q_{SFC*}) a été :

PROJET

- Pour le modèle à composante ancienne : calibré à l'aide des données 1988-2022 (34 ans). Pour ce modèle il n'y a pas de période de validation car au vu du temps de résidence observé (cf. rapport partie 1), il a été décidé de privilégier une calibration sur ce dernier. La période 1984-1988 a donc été utilisée comme période de "chauffe" pour la simulation du débit total aux exutoires issu de la composante ancienne ($Q_{SFC*ancien}$). Cette période a été restreinte pour maximiser la calibration sur la durée du temps de séjour. Attention, ici c'est le débit issu de la composante ancienne qui est donné : $Q_{SFC*ancien}$.

- Pour le modèle à composante récente : calibré à l'aide des données 1994-2012 et validé à l'aide des données 2012-2022. La période de "chauffe" de ce modèle est de 1984 à 1994. Attention, ici c'est le débit issu de la composante récente qui est donné : $Q_{SFC*récent}$.

Ce débit se décompose de la manière suivante :

$$Q_{SFC*} = Q_{SFC*récent} + Q_{SFC*ancien}. \quad (4)$$

Dès le début de la modélisation, certains paramètres ont été définis car déjà connus (Tableau 3). La réserve utile (RU) a été fixée à 70 mm, conformément à sa valeur définie en rapport partie 1. La pluie efficace annuelle, déterminée lors des calculs de bilan, est en moyenne de 250 mm/an. Comme énonce plus haut, il est considéré que l'ensemble des précipitations s'infiltrent, le paramètre ruissellement-infiltration (RUIPER) est fixé à 9999, de manière à maximiser l'infiltration vers le réservoir souterrain (G1). Pour terminer, la superficie pour chacun des modèles, à composante récente et ancienne, est connue (cf. modèle conceptuel rapport partie 1) et a donc été fixée à 30 et 15 km² respectivement.

Afin d'évaluer la capacité des modèles à reproduire les mesures des débit (Q_{SFC*}), le critère d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) (5) (Nash and Sutcliffe, 1970) a été utilisé :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}((Q_{obs}(t) - Q_{sim}(t))^2}{\sum_{t=1}^{T}((Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5)$$

Où $Qobs(t)$ et $Qsim(t)$ sont respectivement le débit observé et le débit modélisé (simulé) à l'instant t et où $\overline{Q}$ est la moyenne des débits observés. Il est compris entre -∞ et 1, 1 étant un ajustement parfait. Au cours du processus de calibration, une pondération a été appliquée à la racine carrée des débits. Les biais sur les débits ($Qbias$) ont été déterminés à l'aide de (6) :

$$Bias\ (m^3.s^{-1}) = Q_{sim\ MOY} - Q_{obs\ MOY} \quad (6)$$

Où $Q_{sim\ MOY}$ et $Q_{obs\ MOY}$ sont respectivement les moyennes simulées et observées pour toute la période de simulation.

PROJET

I.4 Modèle climatique régional (MCR) et scénarios climatiques (RCP) pour la prévision du débit total Q_{SFC*} à la sortie du système

De façon générale, l'objectif des modèles hydrologiques est de prévoir les effets d'actions futures (évolution des prélèvements d'eau par exemple) ou d'une condition hydrologique évolutive (telle que le changement climatique) (Anderson et al. 2015). Pour répondre à cet objectif, et principalement à la question du changement global dans le contexte de l'impluvium de Volvic, les modèles calibrés sont « forcés » en utilisant des données climatiques faisant partie du nouvel ensemble de projections climatiques régionalisées, DRIAS-2020, du projet Euro-Cordex (Valérian et al., 2022). La température de l'air (°C) et les précipitations (mm/j) pour 2022-2099 ont été extraites pour se secteur de la zone d'étude (point de grille Volvic) en considérant les scénarii suivants : cas le plus favorable, cas intermédiaire et cas le plus défavorable : le premier implique le **RCM Aladin63_CNRM-CM5**, qui a été associé au scénario d'émission **RCP2.6**. Le second implique le **EC-EARTH_KNMI-RACMO22E**, associé au scénario **RCP4.5**, et le dernier implique le **RCM RegCM4-6_HadGEM2** associé au scénario **RCP8.5**.

Par rapport aux températures moyennes annuelles de référence "Ref" calculées la période 1984-2023 (10.6 °C) (tableau 4), le RCM Aldadin63 du RCP2.6 est faible en termes de changement climatique avec une température moyenne annuelle très similaire de 10.5 °C. Le modèle intermédiaire RACMO22E du RCP4.5 est très proche également des références historiques. Au contraire, le RCM RegCM4-6 du RCP8.5 induit une augmentation de 2 °C sur la période 2023-2099. En termes de quantités de précipitations annuelle les valeurs sont très proches avec une légère augmentation pour les RCM Aladin63 du RCP2.6 et RCM RegCM4-6 du RCP8.5. Le scénario intermédiaire, RCM RACMO22E du RCP4.5 montre des quantités de précipitations stables par rapport aux références.

Tableau 4 : Moyennes annuelles des températures atmosphériques (°C) et précipitations annuelles (mm/an) sur 2023-2099 les différents scénarios définis : RCP 2.6 – Aladin63 (optimiste), RCP 4.5 – RACMO22E (intermédiaire), RCP 8.5 – RegCM4-6 (pessimiste), sur la base des données collectées par DRIAS-2020. Ces données se réfèrent toutes au point de grille de la zone d'étude et sont présentées par rapport aux valeurs obtenues pour la période de référence "Ref" : 1984-2023 à la station météorologique Météo France de Volvic. La période de référence a été également séparée en périodes 1984-2004 et 2004-2023.

Paramètre	Ref. 1984-2023	1984-2004	2004-2023	RCM Aladin63 RCP 2.6	RCM RACMO22E RCP 4.5	RCM RegCM4-6 RCP 8.5
Température (°C)	10.6	10.3	10.8	10.5	10.9	12.6
Précipitations (mm/an)	729	739	721	751	723	742

Le RCP2.6 est le scénario d'émission le plus optimiste, il amène à une stabilisation des anomalies de la température de l'air autour de l'année 2100 en France : c'est le seul des scénarios qui respecterait l'accord international de Paris sur le changement climatique approuvé en décembre 2015. Dans le cas du scénario RCP8.5, l'absence de régulation des gaz à effet de serre d'origine humaine conduit à une augmentation progressive des anomalies de température jusqu'en 2100 (Figure 6) : c'est un scénario excluant tout politique de régulation du climat menant à un réchauffement global de 5°C à la fin du siècle. Le RCP4.5 est quant à lui un scénario intermédiaire. L'utilisation de trois couples de RCM-RCP permet de donner une gamme d'évolution potentielle du débit total aux exutoires de l'impluvium de Volvic. L'analyse des prévisions de débits Q_{SFC*} pour 2023-2099 sera comparée dans ce travail à la référence 1984-2022.

PROJET

Le choix des scénarios dans ce travail est orienté afin de couvrir le mieux possible la gamme des changements futurs de température et de précipitation, c'est pourquoi 3 scénarios ont été choisis, allant du plus optimiste au plus pessimiste. Il est important de noter que sur la base de 300 scénarios testés dans la littérature : le RCP 8.5, le plus pessimiste, n'est dépassé que par environ 10% des hypothèses envisagées, tandis que le plus favorable, le scénario RCP 2.6, ne dépasse que près de 10% d'entre elles (Valérian et al., 2022).

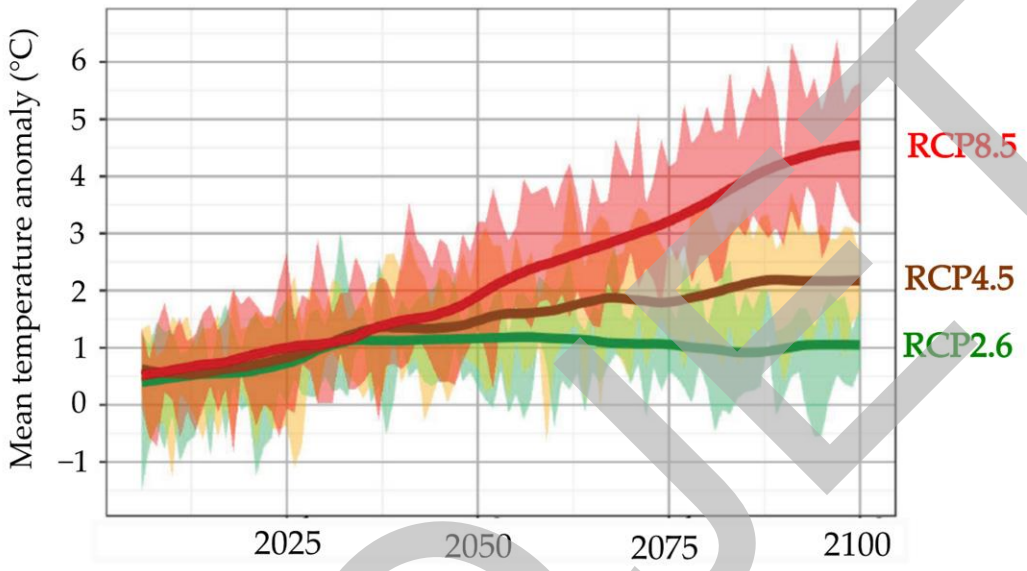


Figure 6 : Evolution de l'anomalie de la température moyenne de l'air (C) en France pour les RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, adaptée de Valérian et al. (2022).

- ***Précisions sur les données météorologiques utilisées pour la projection climatique (point de grille Volvic – station Météo France Volvic)***

Les données météorologiques (précipitations en mm, températures atmosphériques en °C) utilisées en entrée des modèles hydrologiques sont issues des stations de Volvic et de Sayat_SAPC (pour la température et les précipitations à partir de 2018) (cf. Tableau 4 du rapport Partie 1 - https://publitheque.meteo.fr). Ces données considèrent l'influence du gradient altitudinal sur les précipitations et la recharge (cf. rapport Partie 1).

Les données météorologiques utilisées pour les projections sont issues des données DRIAS fournies issue de la plateforme de données DRIAS en ligne (https://www.drias-climat.fr/). Les données correspondent au point de grille (8 km² - Lat, Long du point : 45.8711,3.0064) le plus représentatif du bassin versant de Volvic. La couverture géographique du point de grille étant assez vaste (8km²), ces données ont été corrigées pour les rapprocher au mieux des valeurs d'entrée utilisées pour la calibration des modèles (= données de la station Météorologique de Volvic corrigée du gradient altitudinal). Cette correction a été possible par l'établissement d'une relation de corrélation entre les données météorologiques issues de la station Météo France de Volvic / Sayat_sapc sur la période 1950-2022 et les données issues du point de grille Météo France (utilisées en simulation) pour la même période 1950-2022.

PROJET

II. RESULTATS DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE – CALIBRATION DES MODELES

II.1 Simulation recharge récente : $Q_{SFC*récent}$

La calibration du modèle à composante récente a été réalisée sur un pas de temps mensuel pour Q_{SFC*} de 1994 à 2012 (Figure 7a). Gardenia a été efficace dans la reproduction des modèles de débit Q du modèle à composante récente, avec un NSE de 0,64. Le biais calculé sur la période de calibration est faible : -0.004 m^3/s pour Q_{SFC*}. Les figure 7b et c illustrent la bonne corrélation entre les valeurs observées et simulées, avec un R^2 de 0,67 sur les période de calibration et validation. La simulation du débit total (Q_{SFC*}) sur la période de validation 2012-2022 (Figure 7a,c) montre un NSE plus haut à 0,71 et un Qbias de -0,02 m^3/s. L'ensemble des paramètres (optimisés et fixés) ayant permis cette calibration est présenté dans le tableau 5.

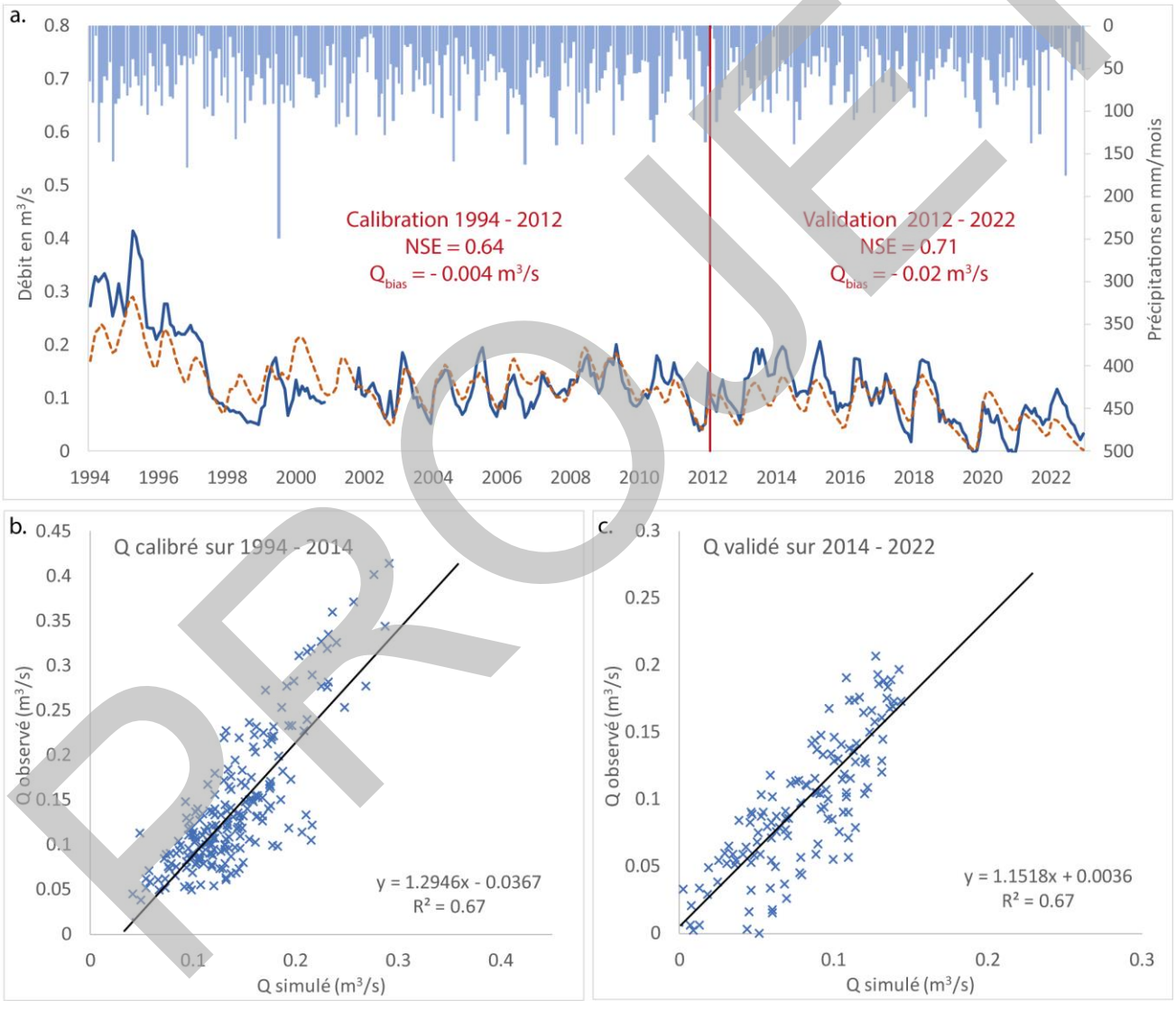


Figure 7 : a. Evolution du débit Q_{SFC*} observé par rapport au débit Q_{SFC*} simulé (m^3/s) pour le modèle à recharge récente avec les courbes de corrélation correspondantes en considérant une calibration utilisant : b. la période 1994 - 2012 et c. une validation utilisant la période 2014 - 2022.

PROJET

Tableau 5 : Paramètres optimisés et de leurs plages d'ajustement ; paramètres fixés ; Pour le modèle conceptuel à composante récente.

	Paramètres	Unités	Valeur optimisée	Min	Max
Paramètres optimisés	Débit extérieur éventuel (Q_o)	m^3/s	-0.07	-	-
	Correction globale de l'ETP	%	-9.40	-10.0	10.0
	Temps de 1/2 percolation vers la nappe (THG)	mois	9.75	0.05	10.0
	Temps de 1/2 tarrissement du débit souterrain (TG1)	mois	0.67	0.05	15.0
	Temps de réaction ("retard") du débit de rivière	nbre de pas de temps	0.62	0.0	10.0

	Paramètres	Unités	Valeur fixée
Paramètres fixés	PE annuelle pour initialisation	mm/an	250
	Superficie du bassin versant	km^2	30
	Capacité du réservoir sol de type "réserve utile"	mm	70
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (RUIPER)	mm	9999

II.2 Simulation recharge ancienne – long terme : $Q_{SFC*ancien}$

La calibration du modèle à composante ancienne (long terme) a été réalisée sur un pas de temps mensuel pour Q_{SFC*} de 1988 à 2022 (Figure 8a). Gardenia a été efficace dans la reproduction des modèles de débit Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne, avec un NSE de 0,83. Le biais calculé sur la période de calibration est faible : -1.14×10^{-4} m^3/s pour Q_{SFC*}. La figure 8b illustre la bonne corrélation entre les valeurs observées et simulées, avec un R^2 de 0,88 sur la période de calibration. L'ensemble des paramètres (optimisés et fixés) ayant permis cette calibration est présenté dans le tableau 6.

PROJET

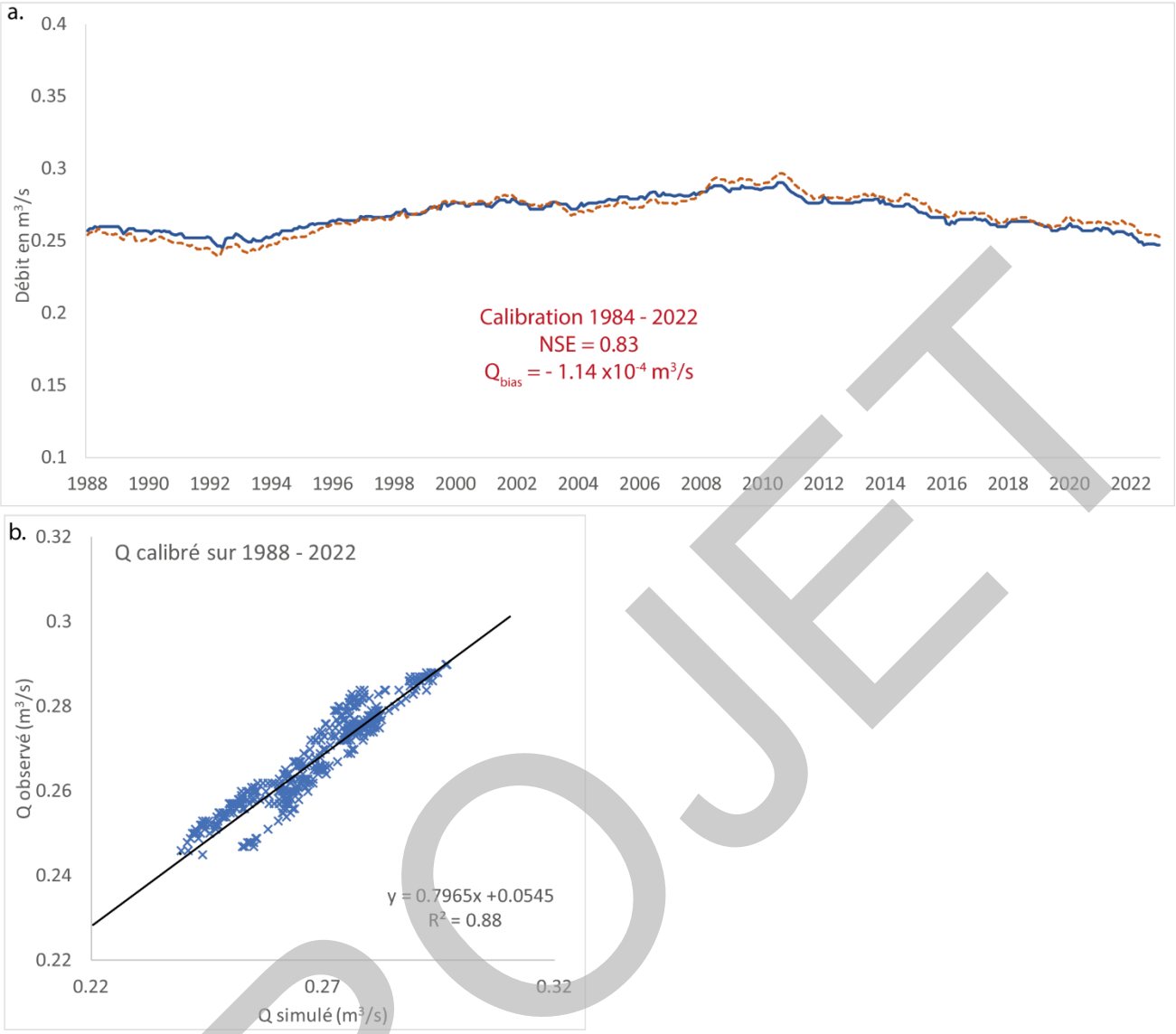


Figure 8 : a. Evolution du débit Q_{SFC*} observé par rapport au débit Q_{SFC*} simulé (m^3/s) pour le modèle à recharge ancienne avec les courbes de corrélation correspondantes en considérant une calibration utilisant : b. la période 1984 – 2012.

Tableau 6 : Paramètres optimisés et de leurs plages d'ajustement ; paramètres fixés ; Pour le modèle conceptuel à composante ancienne.

	Paramètres	Unités	Valeur optimisée	Min	Max
Paramètres optimisés	Débit extérieur éventuel (Q_o)	m^3/s	-0.07	-	-
	Correction globale de l'ETP	%	10.00	-10.0	10.0
	Temps de 1/2 percolation vers la nappe (THG)	mois	0.29	0.05	10.0
	Temps de 1/2 tarrissement du débit souterrain (TG1)	mois	0.30	0.05	15.0
	Temps de réaction ("retard") du débit de rivière	nbre de pas de temps	-0.17	0.0	10.0

	Paramètres	Unités	Valeur fixée
Paramètres fixés	PE annuelle pour initialisation	mm/an	500
	Superficie du bassin versant	km^2	15
	Capacité du réservoir sol de type "réserve utile"	mm	70
	Hauteur de répartition Ruissellement-Percolation (RUIPER)	mm	9999

PROJET

II.3 Validation et limites des simulations

L'analyse de l'efficacité des modèles est donnée par l'indice d'efficacité de Nash-Sutclife (NSE) (tableau 7), largement utilisé dans l'évaluation des modèles hydrologiques. Selon la plupart des auteurs, les modèles de bassins versants dont le NSE est supérieur à 0,5 sont satisfaisants, ceux dont le NSE est supérieur à 0,65 sont bons et ceux dont le NSE est supérieur à 0,75 sont de grande qualité (Lin et al., 2017). Les coefficients NSE obtenus pour les deux modèles donnent des valeurs satisfaisantes, avec 0.64 pour le modèle à composante récente (performance que l'on considère comme bonne) et 0.83 (performance très bonne) pour le modèle à composante ancienne, ce qui indique une bonne représentativité des débits simulés pour chacun des modèle.

Tableau 7 : Valeurs du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (traduit d'après McCuen et al., 2006).

Evaluation de la performance	NSE
Très bonne	0.75 < NSE ≤ 1.00
Bonne	0.65 < NSE ≤ 0.75
Satisfaisante	0.50 < NSE ≤ 0.65
Insatisfaisante	NSE ≤ 0.50

Il est délicat d'obtenir un NSE plus performant pour les deux modèles en raison premièrement de la précision de la donnée utilisée, notamment dans le débit total Q_{SFC*} car les débits de débit prélevés à la galerie du Goulet sont basés sur une valeur moyenne de 162 $L.s^{-1}$ entre 1984 et 2014 et sur des valeurs mesurée avec une incertitude jusqu'à 10 $L.s^{-1}$ de 2014 à 2022 (cf. rapport partie 1). De la même manière, entre 1984 et 1992, les valeurs de débits prélevés à la Société des Eaux de Volvic (SEV) utilisées correspondent aux autorisations de prélèvements.

Il existe également une incertitude issue de l'estimation de la recharge, celle-ci étant calculée comme une moyenne à partir de plusieurs méthodes (feuille de calcul ESPERE, cf. rapport partie 1). L'estimation des précipitations en fonction du gradient altitudinal introduit également un biais incertitude en raison de l'absence de stations météorologiques parfaitement représentatives de l'ensemble du bassin versant et de l'utilisation d'un gradient altitudinal recalculé. De la même manière l'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) est impactée par le manque de station météorologique représentative du bassin de Volvic.

La décompostion du sytème en deux modèles induit une incertitude supplémentaire avec d'une part l'estimation des surfaces de recharge propre à chacun des modèle et d'autre part l'utilisation du débit issu de la recharge ancienne dans ces modèles qui correspond à l'estimation du volume infiltré dans la partie haute du bassin. Cette incertitude se transmet dans l'estimation des débits récents car elle correspond à la soustraction des débits anciens aux débits globaux des sources de front de coulée (Q_{SFC*})(équation. 4).

Cependant les indices d'efficacité NSE proches à minima de 0.65 sont suffisamement fiables pour interpréter des tendances globales (échelle annuelle) et travailler ainsi sur l'évolution de ces tendances en fonction de données issues de prospections climatiques. Les modèles hydrologiques doivent être calibrés du mieux possible afin que les prévisions soient scientifiquement fondées et fiables, un coefficient NSE minimum de 0.65 parait alors adapté pour ce travail de prospection climatique.

PROJET

III. RESULTATS DES MODELISATIONS PROSPECTIVES

Une fois les modèles calibrés et validés, ils sont employés dans cette section pour effectuer des modélisations prospectives basées sur les trois scénarios climatiques présentés dans la méthodologie. Pour chaque RCP, la modélisation prospective est réalisée à la fois sur le modèle à composante récente et sur le modèle à composante ancienne. En dernier lieu, les débits simulés sont combinés afin d'obtenir le signal global de débit aux Sources de Front de Coulée, prélèvements inclus (Q_{SFC*}), permettant ainsi de comparer les volumes d'eau dans le système aquifère aux prélèvements actuels.

III.1 Tendances d'évolution climatique dans le secteur du point de grille de Volvic selon les différents scénarios RCP (Representative Concentration Pathways) et RCM associés (Regional Climate Models) choisis

La figure 9 illustre les projections climatiques issue de Météo France au point de grille Volvic de 2023 à 2099 selon les trois scénarios RCP (2.6, 4.5, 8.5) et RCM associés. Les précipitations annuelles (figure 9a.) montrent une variabilité interannuelle sans tendance linéaire significative à long terme. On notera tout de même que le scénario RCP2.6 – RCMAladin63 induit une légère augmentation des quantités de précipitations par rapports aux autres modèles. La température moyenne annuelle (figure 9b.) augmente dans tous les scénarios, particulièrement sous le RCP8.5 – RCMRegCM4-6 où elle passe d'environ 10°C en 2023 à près de 15°C en 2099. Le RCP4.5 – RACMO22E montre une tendance intermédiaire. L'évapotranspiration potentielle (figure 9c.) suit une tendance similaire, avec une augmentation notable sous RCP8.5, passant d'environ 800 mm en 2023 à environ 1000 mm en 2099. On notera de nouveau que le scénario RCP2.6 implique quant à lui une légère diminution d'ici à 2099 de l'évapotranspiration potentielle. Ces changements suggèrent un réchauffement significatif et une augmentation de l'évapotranspiration, particulièrement sous le scénario le plus pessimiste (RCP8.5).

PROJET



PROJET

Figure 9 : Evolution des paramètres météorologiques (a. Précipitations, b. Température et c. Evapotranspiration Potentielle) au point de grille Volvic selon les scénarios RCP-RCM choisis pour la modélisation prospective. Attention, les valeurs ici sont présentées au point de grille Volvic et ne tiennent pas compte du gradient altitudinal.

III.2 Modèle prédictif RCP 2.6 – RCM Aladin63

Le RCP2.6 est le scénario le plus optimiste, à très faibles émissions de gaz à effet de serre (GES) maximum en 2050. Le RCM Aladin63 du RCP 2.6 induit une faible augmentation des températures et des quantités de précipitations. ***Concentration en GES en 2100 (éqCO_2 ppm) : 475 ppm – Augmentation de la température mondiale en 2100 ≈ + 1°C – forçage radiatif : +2.6 W.m².***

Modèle prédictif RCP 2.6 : recharge récente

Le graphique en figure 10 présente l'évolution du débit associé au modèle à composante récente (*Q_{SFC*}Récent*) observé et simulé sous le scénario climatique RCP 2.6, utilisant le modèle CNRM-ALADIN63. La courbe bleue représente les débits observés de 1994 à 2023, montrant une tendance à la baisse avec des variations saisonnières. La courbe verte correspond aux débits simulés de 2024 à 2099, et indique une tendance globale stable marquée par des fluctuations inter annuelles. La courbe de tendance des débits simulés (*Q_{SFC*}RécentSim*) est linéaire, suggérant une stabilisation sur le long terme de la composante récente.

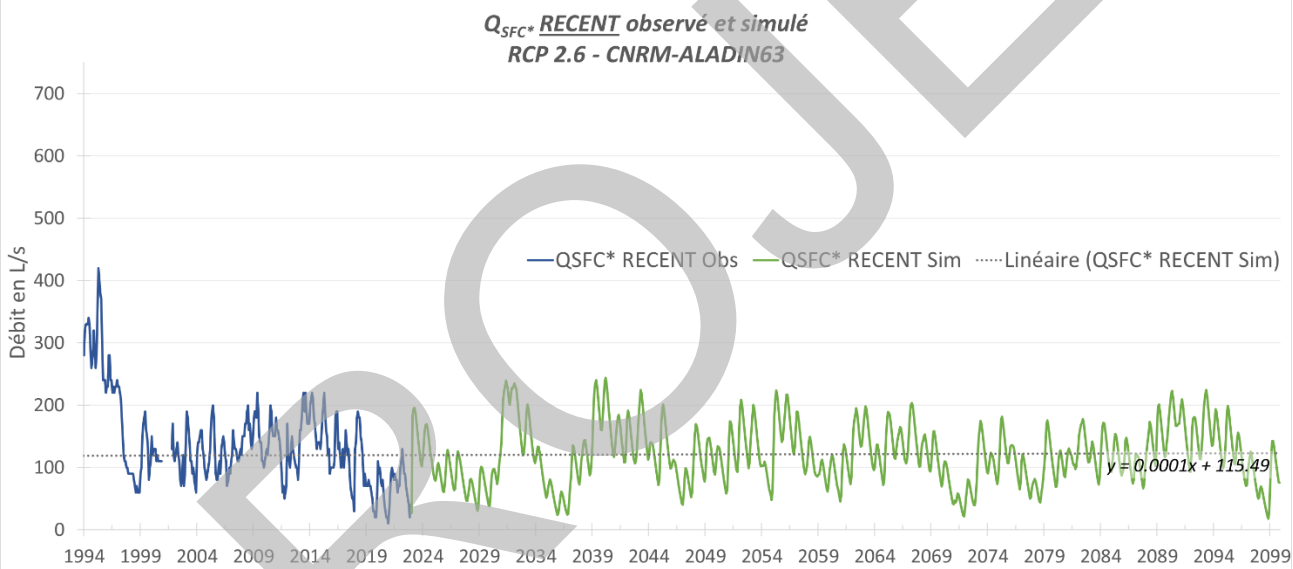


Figure 10 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2023 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert).

Modèle prédictif RCP 2.6 : recharge ancienne

L'évolution du débit observé entre 1994 et 2023 (courbe bleue) et du débit simulé pour le RCP2.6 (Aladin63) (courbe verte), issus du modèle à composante ancienne est visible en figure 11. Pour la période 1994-2023, le débit observé ne montre pas de forte tendance avant une augmentation sur la période 1994-2008 puis une diminution jusqu'en 2023. Les données de projection, montrent que cette tendance à la baisse risque de se poursuivre jusque dans les années 2050 avant d'augmenter à nouveau pour se stabiliser autour de 265 L/s entre 2060 et 2099. La courbe de tendance indique une tendance globale à l'augmentation des débits issus de la composante ancienne pour le scénario de projection RCP2.6 associé au RCM Aladin63.

PROJET

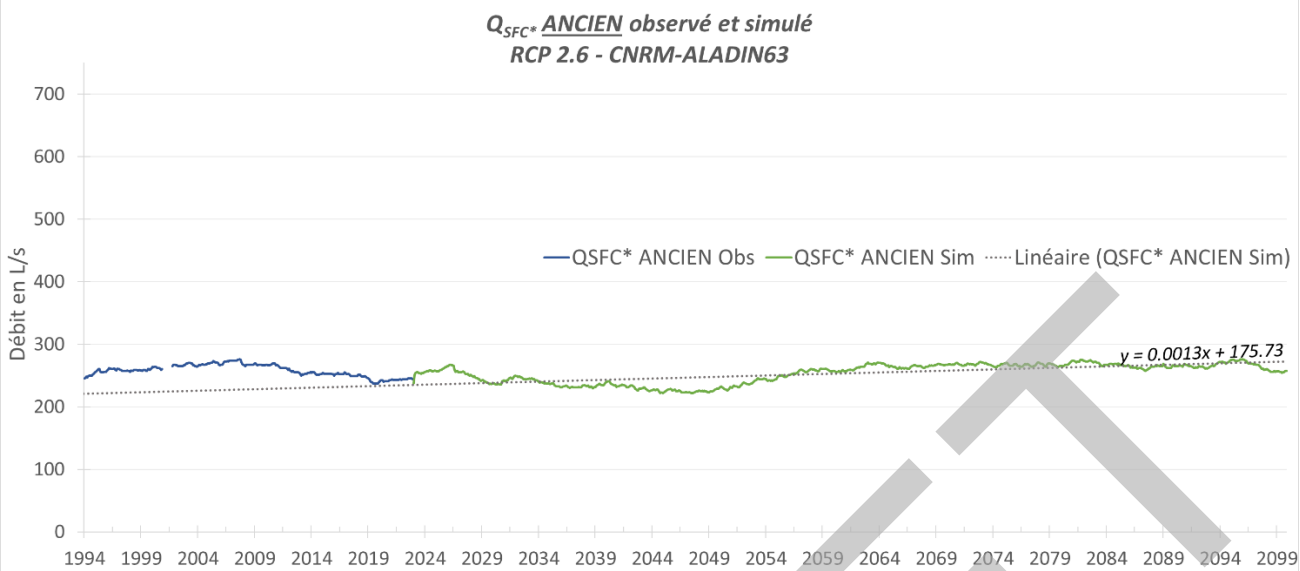


Figure 11 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert).

PROJET

Modèle prédictif RCP 2.6 : Système global

Le modèle prédictif global (figure 12) combine les débits projetés par le modèle à composante récente et ceux par le modèle à composante ancienne. Cela permet de visualiser les projections des débits totaux (prélèvements ajoutés) aux exutoires du système = Q_{SFC*}, selon le scénario RCP2.6 du modèle RCM Aladin63. Afin de prendre en compte la part des prélèvements dans le débit total aux exutoires du système et de mettre en relation les prélèvements face aux ressources disponibles, les valeurs des débits extraits (tous prélèvements confondus), sont figurés en figure 12 par ligne noire. A partir de 2023, les données utilisées sont la moyenne des prélèvements au cours des 5 dernières années (225 L/s).

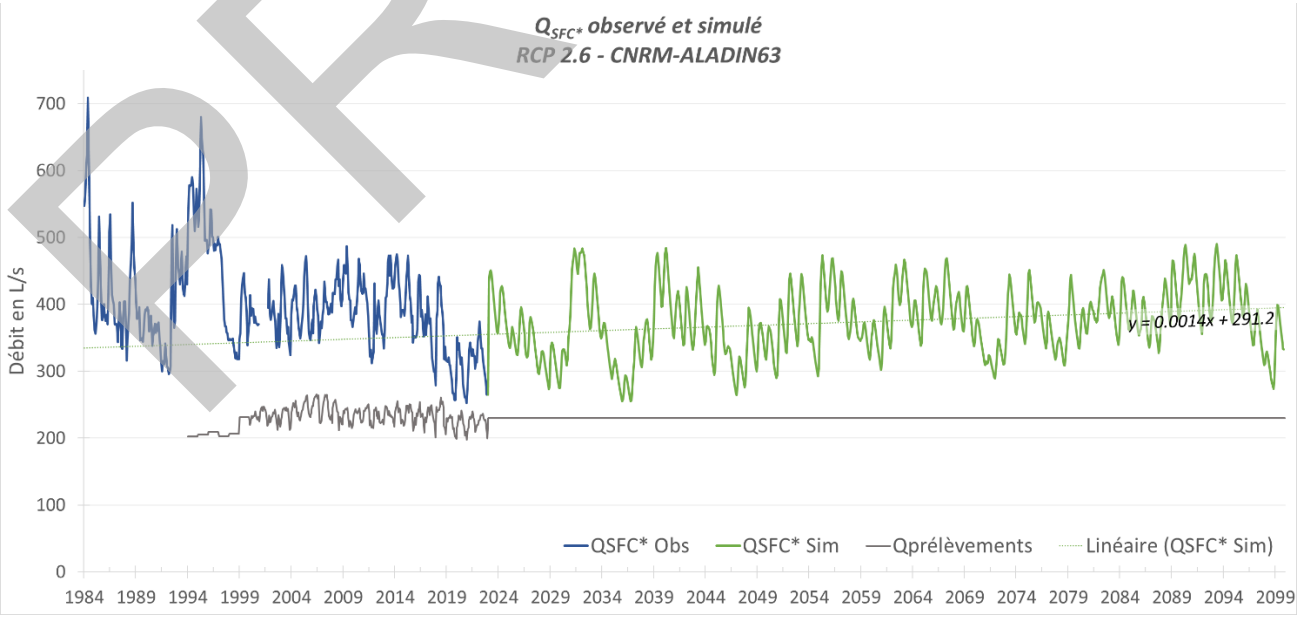


Figure 12 : Q_{SFC*} (= Q_{SFC*} modèle composante récente + Q_{SFC*} modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus).

Les projections des débits Q_{SFC*} indiquent que, sous le scénario à faibles émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), ces débits à l'exutoire du système aquifère de Volvic se maintiennent sans déclin significatif, bien qu'ils continuent à montrer des variations interannuelles. Comparé à la période d'observation, les débits Q_{SFC*} observés entre 2015 et 2023 se maintiennent jusqu'en 2050, suivis d'une augmentation générale. En se concentrant sur la période simulée, les débits montrent une tendance à la hausse jusqu'en 2099, atteignant des valeurs moyennes similaires à celles observées entre 2000 et 2010. Cette augmentation est à associer à l'augmentation de la recharge ancienne (figure 12) qui l'on attribue à la légère augmentation des quantités de précipitation et la baisse de l'ETP d'ici à 2099 selon le RCP2.6 – RCMALadin63 (figure 9).

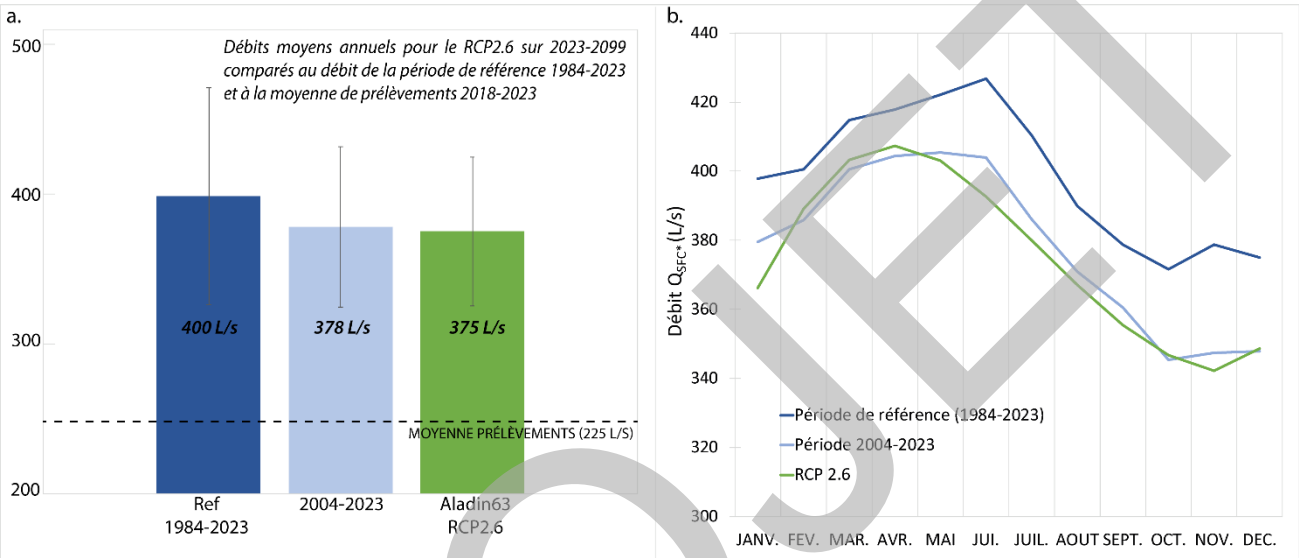


Figure 13 : a. Débits moyens annuels pour le RCP2.6 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP2.6.

La figure 13 a. montre que les débits moyen annuels vont passer de 400 L/s pour la période de référence à 375 L/s en suivant le RCP2.6 – RCMAladin63, soit une baisse de 25 L/s. Cependant, si l'on met cela en regard des tendances plus récentes en comparant les débits projetés aux débits sur la période 2004-2023, il n'apparaît pas d'évolution. En ce qui concerne la répartition annuelle de ces débits moyens, aucune tendance claire de changement n'est observée, à l'exception d'un léger déplacement anticipé des périodes de débits élevés dans l'année (figure 13b).

Le scénario d'évolution RCP2.6 – RCMALadin63 n'implique pas de problème au regard des volumes extraits vis-à-vis des volumes disponibles, si les volumes d'extraction se maintiennent tels qu'aujourd'hui. Toutefois il est important de rappeler que le scénario 2.6 ne dépasse que 10% des 300 scénarios testés, le rendant peu probable.

PROJET

III.3 Modèle prédictif RCP 4.5 – RCM RACMO22E

Le RCP4.5 est un scénario intermédiaire, avec une stabilisation des émissions des GES avant la fin du XXI[e] siècle. Le RCM RACMO22E du RCP 4.5 implique une augmentation modérée à forte des températures et des quantités de précipitations. ***Concentration en GES en 2100 ($éqCO_2$ ppm) : 630 ppm – Augmentation de la température mondiale en 2100 ≈ + 2°C – forçage radiatif : +4.5 W.m².***

Modèle prédictif RCP 4.5 : recharge récente

Le graphique en figure 14 présente l'évolution du débit associé au modèle à composante récente (*Q_{SFC*}Récent*) observé et simulé sous le scénario climatique RCP 4.5, utilisant le modèle EC-EARTH_KMNI-RACMO22E. La courbe bleue, comme précédemment, représente les débits observés de 1994 à 2023, montrant une tendance à la baisse avec des variations saisonnières. La courbe orange correspond aux débits simulés de 2024 à 2099, et indique une tendance globale stable marquée par des fluctuations inter annuelles et une période de débits élevés entre 2024 et 2025. On notera également des périodes où les débits sont proches de 0, particulièrement autour de 2050. La courbe de tendance des débits simulés (*Q_{SFC*}RécentSim*) est linéaire, suggérant une stabilisation sur le long terme de la composante récente marquée par des années de faibles débits.

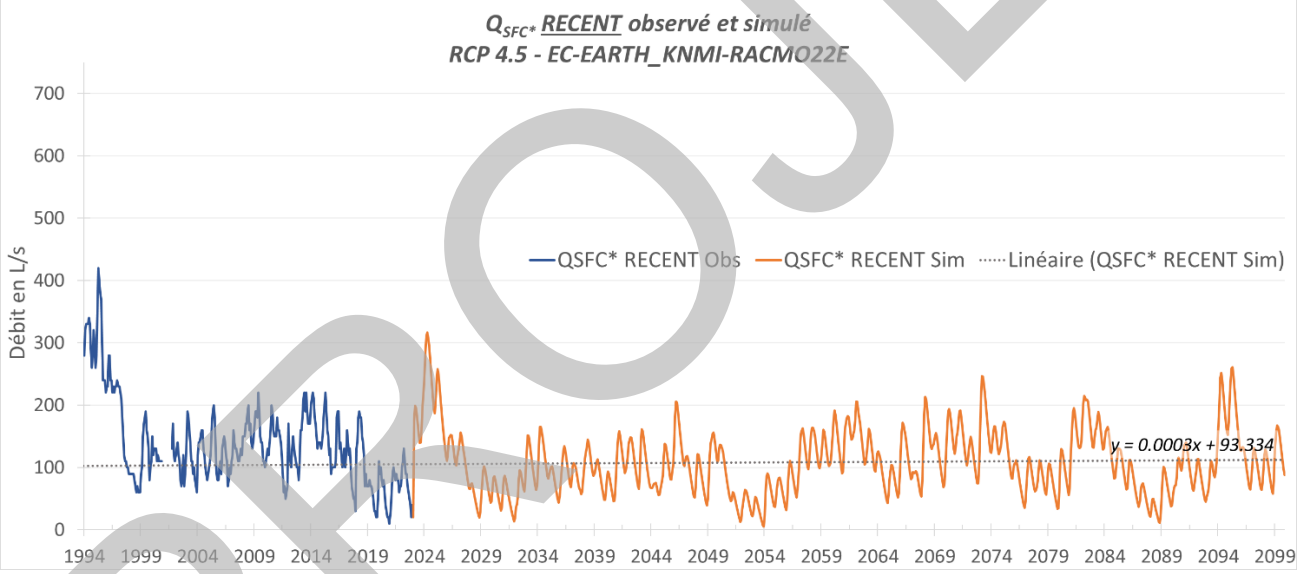


Figure 14 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange).

Modèle prédictif RCP 4.5 : recharge ancienne

L'évolution du débit observé entre 1994 et 2023 (courbe bleue) et du débit simulé pour le RCP4.5 (RACMO22E) (courbe orange), issus du modèle à composante ancienne est visible en figure 15. Pour la période 1994-2023, le débit observé ne montre pas de forte tendance avant une augmentation sur la période 1994-2008 puis une diminution jusqu'en 2023. Les données de projection, montrent que cette tendance à la baisse risque de se poursuivre plus tardivement que le modèle RCP2.6, jusque dans les années 2055-2060 avant d'augmenter à nouveau pour se stabiliser autour de 255 L/s entre 2080 et 2099. La courbe de tendance indique une tendance globale à la stabilisation des débits issus de la composante ancienne pour le scénario de projection RCP4.5 associé au RCM RACMO22E.

PROJET

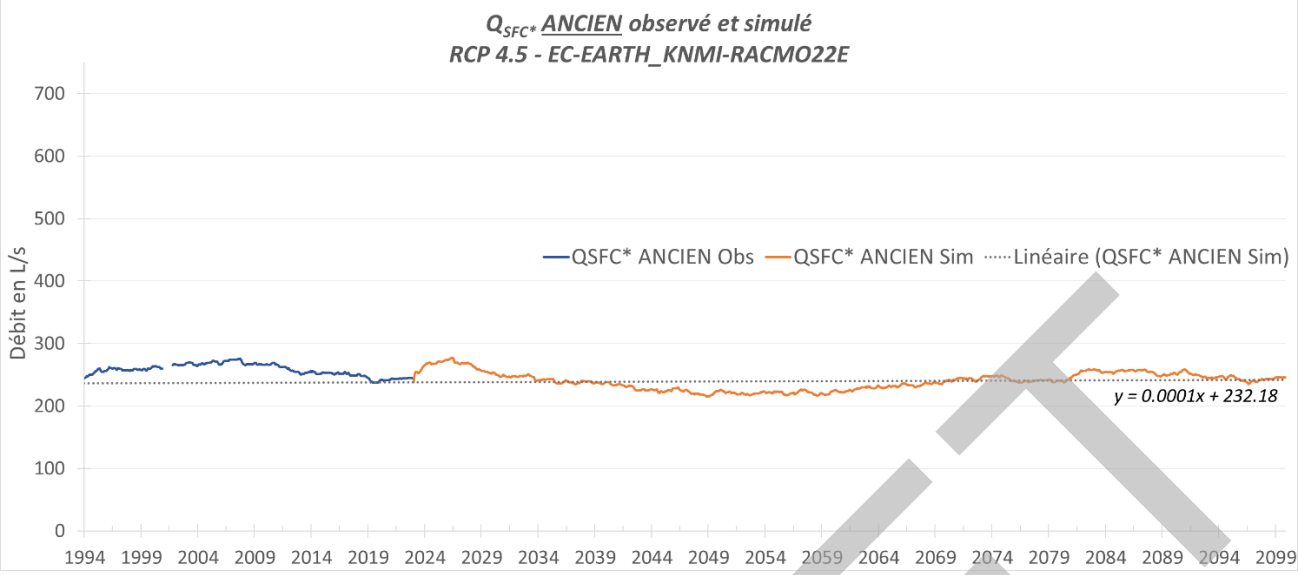


Figure 15 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange).

PROJET

Modèle prédictif RCP 4.5 : Système global

Le modèle prédictif global (figure 16) combine les débits projetés par le modèle à composante récente et ceux par le modèle à composante ancienne. Cela permet de visualiser les projections des débits totaux (prélèvements ajoutés) aux exutoires du système = Q_{SFC*}, selon le scénario RCP4.5 du modèle RCM RACMO22E. Afin de prendre en compte la part des prélèvements dans le débit total aux exutoires du système et de mettre en relation les prélèvements face aux ressources disponibles, les valeurs des débits extraits (tous prélèvements confondus), sont figurés en figure 16 par ligne noire. A partir de 2023, les données utilisées sont la moyenne des prélèvements au cours des 5 dernières années (225 L/s).

Les projections des débits Q_{SFC*} indiquent que, sous le scénario intermédiaire d'émissions de gaz à effet de serre (RCP4.5 – RCMRACMO22E), ces débits à l'exutoire du système aquifère de Volvic ne montrent pas de tendance significative à la baisse où l'augmentation d'ici à 2099. Des variations interannuelles sont toujours visibles, et contrairement au modèle précédent (RCP2.6 - figure 12), il est important de noter dans cette projection, des périodes de bas débits pouvant se rapprocher de la valeur moyenne de prélèvements à 225 L/s, notamment autour de 2050. Par rapport à la période d'observation, les débits Q_{SFC*} connaissent une hausse en 2024-2025, puis se stabilisent jusqu'en 2099 avec des valeurs moyennes similaires à celles observées entre 2000 et 2010. Cependant, cette stabilité est ponctuée de périodes de débits plus faibles, que l'on attribue principalement à des baisses des débits issus de la contribution récente au système (figure 14) elles même liées aux légères augmentations de température et d'ETP observé au point de grille Volvic en figure 9 pour le scénario RCP4.5 – RCMRACMO22E.

La figure 17 a. montre que les débits moyen annuels vont passer de 400 L/s pour la période de référence à 348 L/s en suivant le RCP4.5 – RCMRACMO22E, soit une baisse de 52 L/s. On notera donc, malgré la stabilité évoquée dans le paragraphe précédent, une baisse globale des débits attribué à l'augmentation en durée et intensité de périodes sèches, limitant les débits. En ce qui concerne la répartition annuelle de ces débits, au-delà de la baisse du débit annuel moyen, aucune tendance claire de changement n'est observée, à l'exception d'un léger déplacement anticipé des périodes de débits élevés dans l'année (figure 17b).

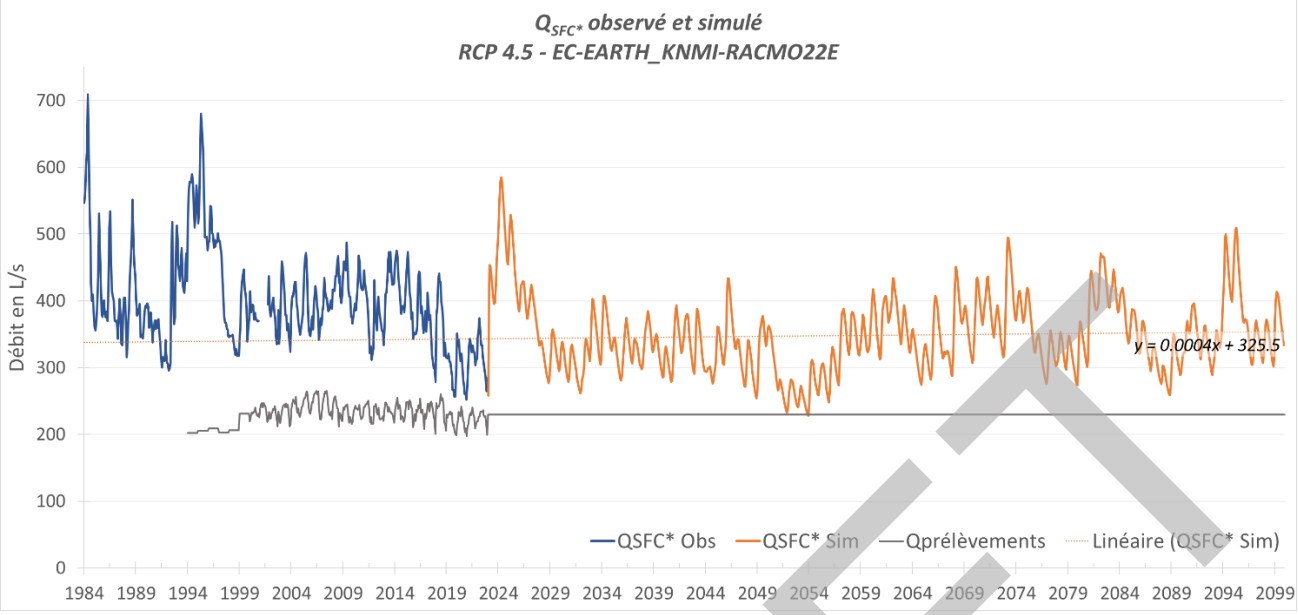


Figure 16 : Q_{SFC*} (= Q_{SFC*} modèle composante récente + Q_{SFC*} modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus).

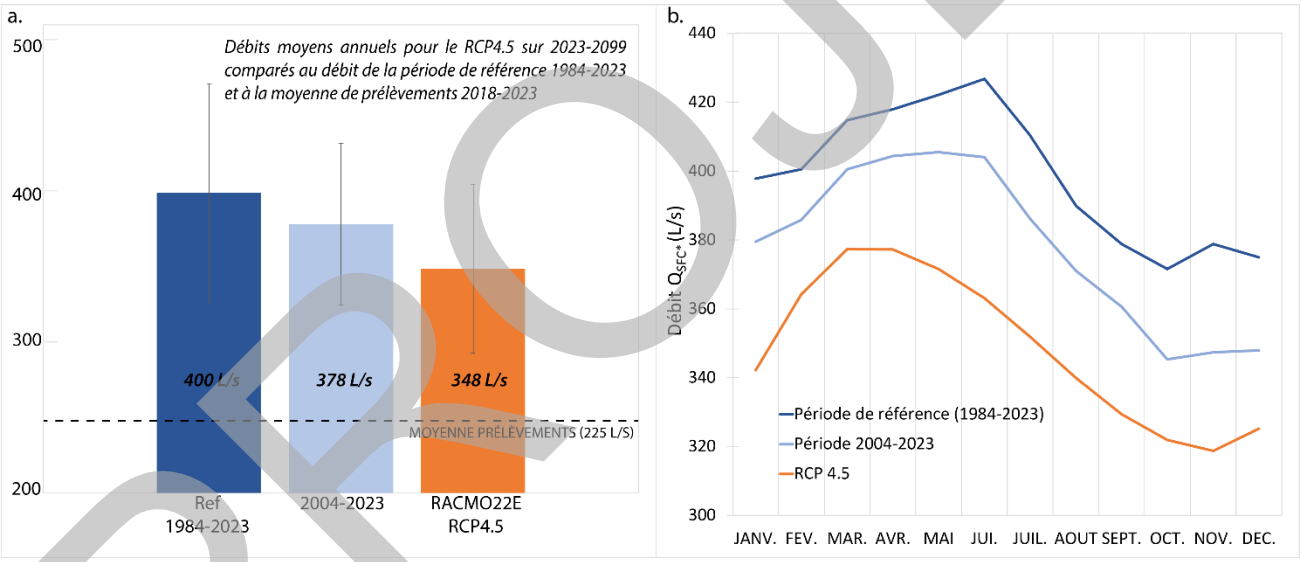


Figure 17 : a. Débits moyens annuels pour le RCP4.5 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP4.5.

Marqué par une baisse des débits annuels moyen sur l'ensemble de la période 2023-2099, le scénario intermédiaire RCP4.5 – RCM RACMO22E montre une relative stabilité de ces débits simulés, ponctuée de périodes où les débits seront bas, atteignent parfois les valeurs moyennes de débit extrait. Ce modèle intermédiaire projette une gestion soutenable de la ressource en eau d'ici à 2099, à condition que les prélèvements soient ajustés en conséquence afin d'anticiper les périodes plus sèches où les débits aux exutoires Q_{SFC*} approchent la moyenne de 225 L/s des débits extraits.

PROJET

III.4 Modèle prédictif RCP 8.5 – RCM RegCM4-6

Le RCP8.5 est le scénario le plus pessimiste, où rien ne change et les émissions de GES continuent d'augmenter au rythme actuel. Le RCM RegCM4-6 du RCP 8.5 induit une forte augmentation des températures et des quantités de précipitations. ***Concentration en GES en 2100 (éqCO_2 ppm) : 1313 ppm – Augmentation de la température mondiale en 2100 ≈ + 4°C – forçage radiatif : +8.5 W.m².***

Modèle prédictif RCP 8.5 : recharge récente

Le graphique en figure 18 présente l'évolution du débit associé au modèle à composante récente (Q_{SFC*}*Récent*) observé et simulé sous le scénario climatique RCP 8.5, utilisant le modèle HadGem2-RegCM4-6. La courbe bleue, comme précédemment, représente les débits observés de 1994 à 2023, montrant une tendance à la baisse avec des variations saisonnières. La courbe rouge correspond aux débits simulés de 2024 à 2099, et indique une tendance globale à une baisse stable et progressive marquée par des fluctuations inter annuelles et notamment des périodes où les débits sont très faibles voir nuls en 2037 et 2075. La courbe de tendance des débits simulés (Q_{SFC*}*RécentSim*) suggère une diminution sur le long terme de la composante récente, marqué par des années où les débits issus de la composante récente est nul.

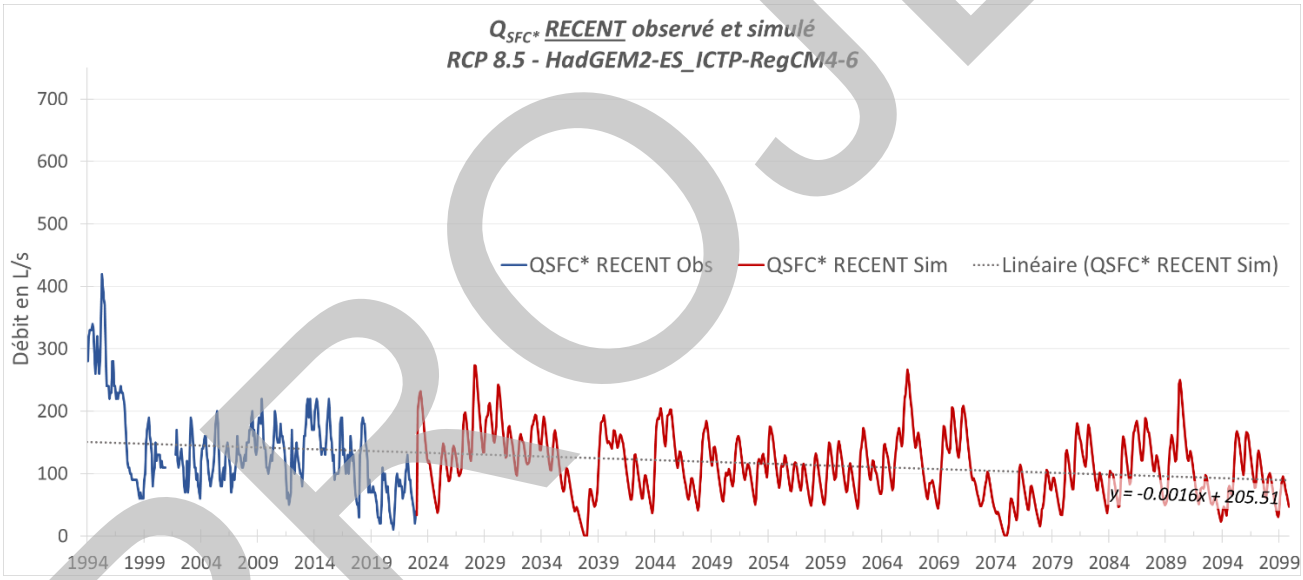


Figure 18 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge).

Modèle prédictif RCP 8.5 : recharge ancienne

L'évolution du débit observé entre 1994 et 2023 (courbe bleue) et du débit simulé pour le RCP8.5 (HadGem2_RegCM4-6) (courbe rouge), issus du modèle à composante ancienne est visible en figure 19. Pour la période 1994-2023, le débit observé ne montre pas de forte tendance avant une augmentation sur la période 1994-2008 puis une diminution jusqu'en 2023. Les données de projection, montrent que cette tendance à la baisse risque de se poursuivre progressivement jusqu'au terme de la période de projection en 2099 pour atteindre des valeurs proches de 200 L/s (201 L/s en Décembre 2099). La courbe de tendance confirme cette tendance globale à la baisse des débits issus de la composante ancienne pour le scénario de projection RCP8.5 associé au RCM HadGem2_RegCM4-6.

PROJET

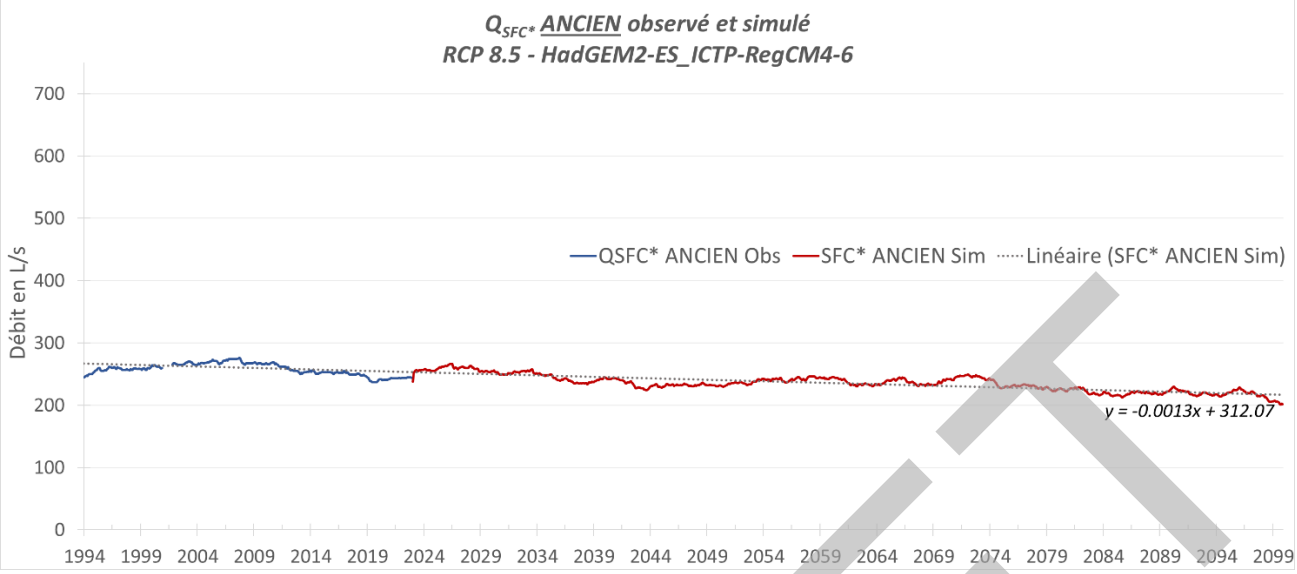


Figure 19 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge).

PROJET

Modèle prédictif RCP 8.5 : Système global

Le modèle prédictif global (figure 20) combine les débits projetés par le modèle à composante récente et ceux par le modèle à composante ancienne. Cela permet de visualiser les projections des débits totaux (prélèvements ajoutés) aux exutoires du système = Q_{SFC*}, selon le scénario RCP8.5 du modèle RegCM4-6. Afin de prendre en compte la part des prélèvements dans le débit total aux exutoires du système et de mettre en relation les prélèvements face aux ressources disponibles, les valeurs des débits extraits (tous prélèvements confondus), sont figurés en figure 16 par ligne noire. A partir de 2023, les données utilisées sont la moyenne des prélèvements au cours des 5 dernières années (225 L/s).

Les projections des débits Q_{SFC*} indiquent que, sous le scénario à fortes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5 – RCMRegCM4-6), ces débits à l'exutoire du système aquifère de Volvic montrent une diminution progressive d'ici à 2099. Des variations interannuelles sont toujours visibles, et tout comme le modèle RCP4.5 – RCMRACMO22E (figure 16) des périodes de bas débits pouvant se rapprocher de la valeur moyenne de prélèvements à 225 L/s sont simulées dès 2035 et se densifient à partir de 2075 jusqu'à la fin de la simulation en 2099. Par rapport à la période d'observation, les débits Q_{SFC*} connaissent une baisse progressive jusqu'en 2099 que l'on associe directement aux observations climatiques aux point de grille Volvic issues des projections du scénario RCP8.5 – RCMRegCM4-6 (figure 9) montrant une hausse progressive des températures (jusqu'à +5°C) et de l'ETP. Cette diminution progressive observé sur le débit total (figure 20) se lit à la fois sur les débits issus du modèle à composante récente (figure 18) que sur les débits du modèle à composante ancienne (figure 19).

Les débits annuels moyens sur la période simulée (figure 21a.) sont identiques au RCP 4.5 cela s'explique par le fait que les débits simulés avec le RCP4.5 montrent des période sèches plus longues au sein d'une baisse des débits plus rapide au début de la période 2023-2099), avant leur stabilisation. En revanche, le scénario RCP 8.5 entraîne une diminution plus progressive et lente des débits dans laquelle il faut souligner l'augmentation de la fréquence des années des faibles débits en se rapprochant de 2099.

Il est important de considérer qu'il également fort probable que dans le cadre du scénario RCP8.5, cette baisse se prolonge au-delà des limites de la simulation (2099), suivant les projections d'augmentation des GES, contrairement au scénario RCP 4.5 où une certaine stabilité pourrait s'observer.

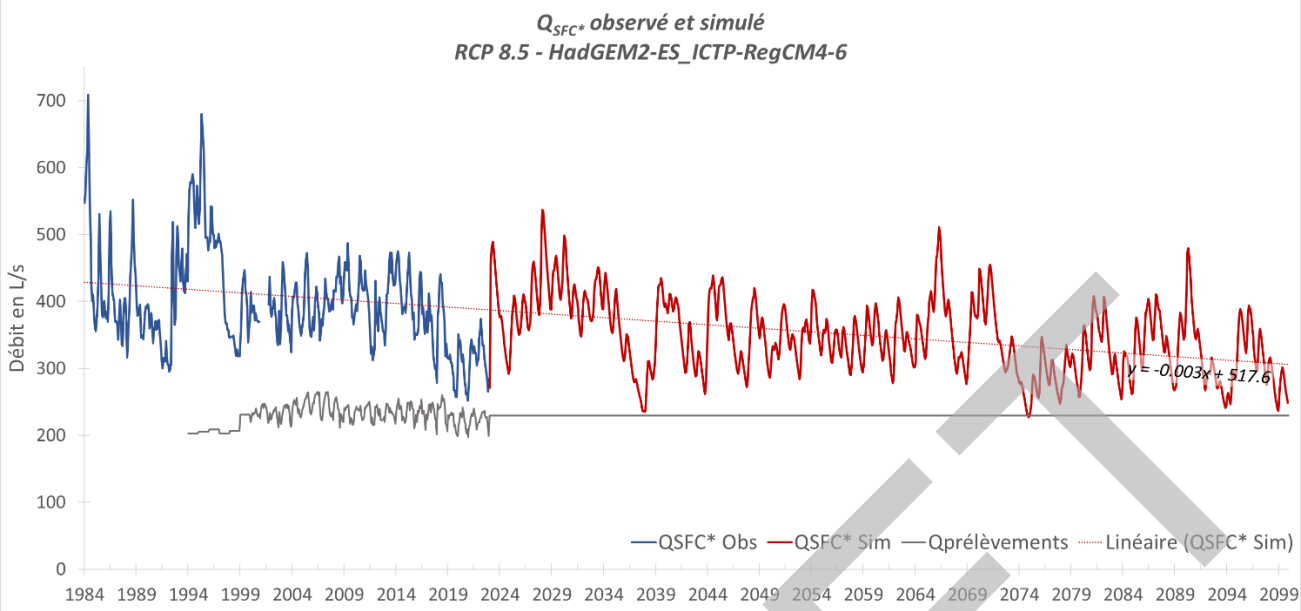


Figure 20 : Q_{SFC*} (= QSFC modèle composante récente + QSFC* modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus).*

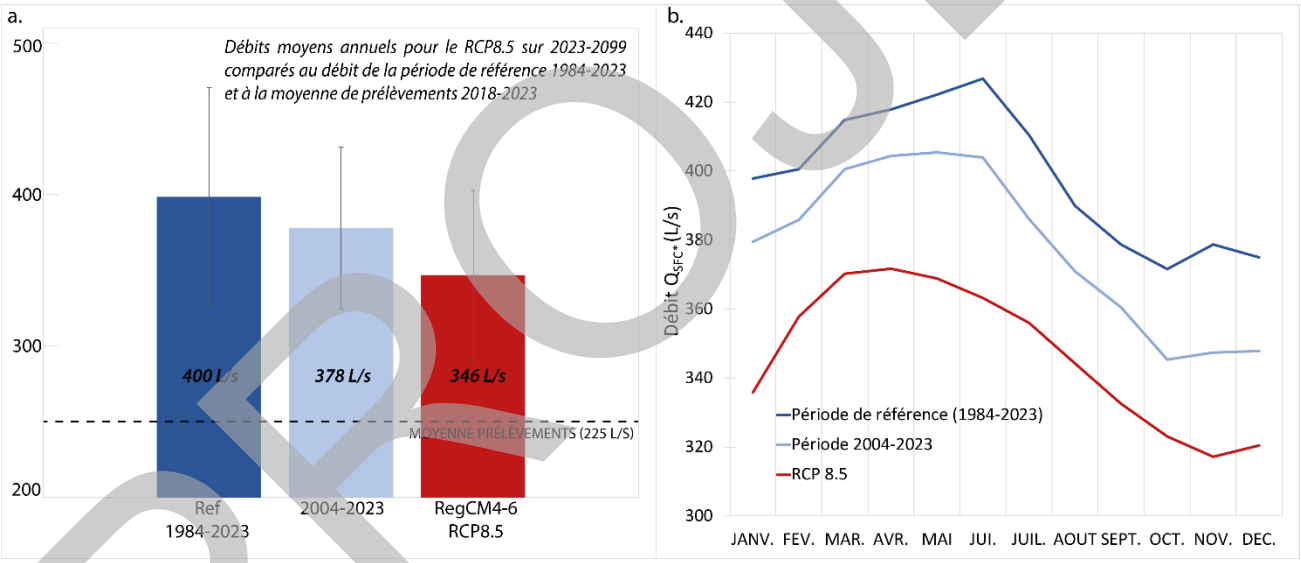


Figure 21 : a. Débits moyens annuels pour le RCP8.5 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP8.5.

Le scénario RCP8.5 – RCMRegCM4-6, montre une diminution progressive des débits aux exutoires du système de Volvic, suivant l'augmentation des températures et d'ETP relatives aux projections climatiques. Hors période ponctuelle proche de 2038, la diminution progressive entraine l'augmentation de périodes de faibles débits à partir des années 2075, se rapprochant ainsi de la valeur moyenne des prélèvements (si ils restent inchangés). Dans un aspect global de gestion de la ressource en eau, il convient d'anticiper cette diminution progressive d'ici à 2075, afin que les débits prélevés n'excèdent pas la capacité de recharge de l'aquifère et soient réduits afin de maintenir un débit minimum aux exutoires de l'impluvium de Volvic.

PROJET

III.5 Synthèse

L'ensemble des simulations issues des différents scénarios de projections choisis montrent une diminution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) par rapport à la période de référence de 1984-2023 (figure 22). Ce changement dans les débits aux exutoires ne semble que très peu varier au sein d'une même année, comme le montre la figure 23 avec les débits moyens mensuels qui montrent une légère anticipation dans l'année des périodes de haut débit par rapport à la période de référence. Selon le scénario, la diminution sera plus au moins importante en lien avec l'intensité des changements climatiques (pluie, température, ETP) induits par les projections climatiques (figure 9) et notamment l'ETP directement associé aux variations de température.

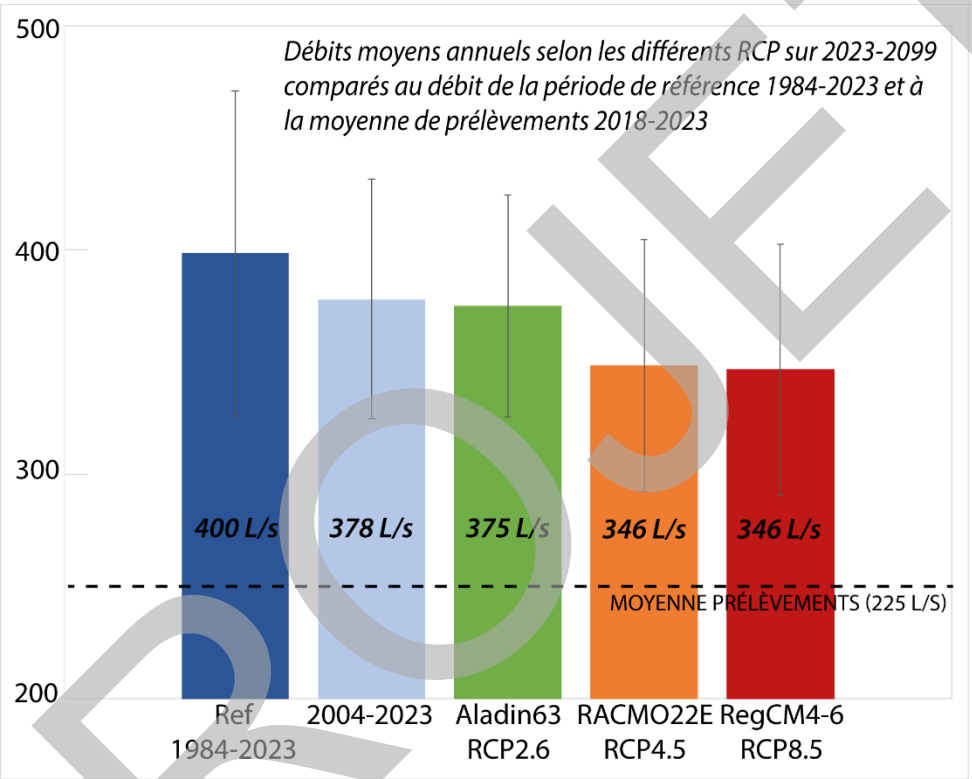


Figure 22 : Moyennes annuelles de Q_{SFC*} (débits totaux = prélèvements inclus) pour la période de référence 1984-2023, la période 2004-2023 et pour les différents RCP : le « meilleur » cas (RCM Aladin63 dans RCP2.6), le cas « intermédiaire » (RCM RACMO22E dans RCP4.5) et le cas « défavorable » (RCM RegCM4-6 dans RCP8.5). Les barres d'erreur représentent les écarts types des débits moyens déterminés pour respectivement la période de référence 1984-2023, la période 2004-2023 et la période allant de 2023 à 2099 pour chaque modèle RCP.

Afin de tenir compte des premiers effets du changement climatique ressentis depuis plusieurs années, nous pouvons utiliser une deuxième période d'observation, plus récente, allant de 2004 à 2023. En effet, les débits mesurés durant cette période sont plus faibles que ceux de la période de référence, indiquant une première diminution du débit total aux exutoires jusqu'en 2023. En ce qui concerne les différentes simulations, cela met en évidence une très faible évolution des débits Q_{SFC*} selon le scénario RCP2.6 – RCMAladin63 par rapport à l'état actuel (2004-2023) des ressources. En revanche, les scénarios RCP4.5- RCMRACMO22E et RCP8.5 – RCMRegCM4-6 montrent toujours une diminution des débits simulés. Ce constat est également valable pour la distribution mensuelle des débits moyens présentée à la figure 23.

PROJET



Figure 23 : Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Le tableau 8 associé indique les pourcentages de variation entre les débits simulés et les débits de la période de référence 1984-2023

Tableau 8 : Débit totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année : moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence) pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, accompagné des pourcentages d'écart par rapport à la période de référence.

	Ref 1984-2023	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Q_{SFC*}	Q_{SFC*}	Diff réf	Q_{SFC*}	Diff réf	Q_{SFC*}	Diff réf
Janvier	398	366	***-8%***	342	***-14%***	336	***-16%***
Février	401	389	***-3%***	364	***-9%***	358	***-11%***
Mars	415	403	***-3%***	377	***-9%***	370	***-11%***
Avril	418	407	***-3%***	377	***-10%***	372	***-11%***
Mai	422	403	***-4%***	372	***-12%***	369	***-13%***
Juin	427	393	***-8%***	363	***-15%***	363	***-15%***
Juillet	410	380	***-7%***	352	***-14%***	356	***-13%***
Août	390	367	***-6%***	340	***-13%***	344	***-12%***
Septembre	379	355	***-6%***	329	***-13%***	333	***-12%***
Octobre	372	347	***-7%***	322	***-14%***	323	***-13%***
Novembre	379	342	***-10%***	319	***-16%***	317	***-16%***
Décembre	375	349	***-7%***	325	***-13%***	320	***-15%***
Moyenne années	399	375	***-6%***	349	***-13%***	347	***-13%***

Q_{SFC*} : Débit en L/s - Diff réf : différence en le débit de référence et le débit simulé par le RCP

PROJET

- ***RCP2.6 – RCMAladin63***

La projection climatique issue du scénario RCP2.6-RCMAladin63 induit une légère augmentation des précipitations accompagnée d'une stabilisation de la température et de l'ETP sur la période 2023-2099 au point de grille (figure 9). Cette simulation n'entraîne pas de changement particulier des débits aux exutoires du système (Q_{SFC*}) avec un débit annuels moyen simulé sur la période 2023-2099 de 375 L/s. On observe une légère diminution par rapport à la période de référence (400 L/s), mais qui s'efface si l'on compare les simulations au débit annuel moyen de la période d'observation 2004-2023 (378 L/s).

En termes de gestion de la ressource en eau, les débits Q_{SFC*} restent au-delà de la moyenne des prélèvements actuels à condition qu'ils restent inchangés ce qui n'impose pas de contraintes particulières pour la gestion de la ressource.

Cependant, ce scénario RCP2.6 est peu probable car, comme énoncé en début de rapport, seul 10% des prévisions (sur un total de 300) se situent dans la limite de ce seuil d'émission de GES.

- ***RCP4.5 – RACMO22E***

La projection climatique basée sur le scénario RCP4.5-RCMRACMO22E prévoit des précipitations relativement stables et inchangées jusqu'en 2099, accompagnées d'une augmentation modérée des températures (+1 à +1.5°C) et de l'ETP. Les débits moyens annuels sur la période simulée (346 L/s) montrent une diminution par rapport à la période de référence (400 L/s) mais aussi par rapport à la période 2004-2023 (378 L/s). D'un point de vue temporel, cette baisse des débits semble arriver rapidement, dès 2030 et semble se maintenir jusqu'au terme de la simulation en 2099, avec quelques périodes de bas débits marqués sur la durée et qui peuvent atteindre la valeurs moyenne des prélèvements actuels de 225 L/s.

Concernant la gestion de la ressource, les débits mensuels moyens se montrent globalement supérieurs aux débits de prélèvement, cependant il est primordial de considérer que certaines années vont pouvoir être déficitaires. Dans ce cas, les débits aux exutoires (Q_{SFC*}) seront équivalents aux débits moyens de prélèvements considérant leur maintien aux niveaux actuels. Cela aura pour conséquence l'assèchement des Sources de Front de Coulée ($Q_{SFC*} - Q_{prélèvements} = 0$).

- ***RCP8.5 – RegCM4-6***

La projection climatique donnée par le scénario RCP8.5-RCMRegCM4-6 montre des précipitations très stables, comme le scénario RCP4.5-RACMO22E, jusqu'en 2099. On constate contrairement aux autres projections, une nette augmentation des températures jusqu'à +5°C, d'ici 2099, accompagnée d'une augmentation de l'ETP. Les débits simulés montrent une tendance à la diminution progressive vers 2099 (figure 20) à laquelle s'ajoute une augmentation de la fréquence d'années de faibles débits à partir de 2075, pouvant atteindre les débits de prélèvements (si maintenus à 225 L/s) et donc assécher les exutoires du système de Volvic. Cependant, les débits moyens annuels montrent la même valeur de 346 L/s que pour le RCP4.5-RCMRACMO22E (figure 22). Cela montre qu'il est important de considérer la simulation dans son ensemble et sur un aspect temporel car, sur le long terme, le scénario RCP8.5-RCMRegCM4-6 entraîne des débits Q_{SFC*} plus faibles, et ce probablement au-delà de 2099 si la tendance de la projection se maintient ainsi.

Il est crucial de prendre en compte cet aspect pour la gestion à long terme de la ressource en eau, afin de réviser les volumes de prélèvement de manière suffisamment anticipée. Cela permettra de prévenir la baisse des débits aux exutoires du système et d'éviter des pénuries d'eau importantes et durables à l'horizon 2075.

Il est toutefois important de rappeler que sur la base de 300 scénarios testés dans la littérature : le RCP 8.5, le plus pessimiste, n'est dépassé que par environ 10% des hypothèses envisagées.

PROJET

IV. CONCLUSION

Ce travail présente une évaluation générale des impacts des paramètres hydrométéorologiques (précipitations, température de l'air, recharge) et anthropiques (prélèvements) sur les débits aux Sources de Front de Coulée, exutoire de l'impluvium de Volvic. La diminution des débits à ces sources, la récurrence des épisodes de basses eaux au cours des dernières années et l'exploitation continue de cet hydrosystème combiné aux effets incertains du changement climatique ont mis en avance la nécessite d'anticiper ces évolutions futures. Dans ce cadre, nous avons proposé à l'échelle du bassin versant de Volvic, d'utiliser la modélisation hydrologique avec Gardenia afin de modéliser l'évolution des débits aux Sources de Front de Coulée suivant différents scénarios de projection climatique, et de mettre en relation les débits simulés aux débits de prélèvements (alimentation en eau potable et embouteillage de l'eau).

Deux modèles Gardénia ont été proposés, en accord avec le modèle conceptuel précédemment établi dans le rapport Partie 1. Ainsi un modèle à composante récente et un modèle à composante ancienne ont pu être établis. La calibration et la validation de ces modèles hydrologiques a par ailleurs permis de valider le modèle conceptuel premièrement défini, intégrant d'une part le comportement réactif du système, correspondant à la composante récente des eaux souterraines, marqué par l'influence des précipitations à l'échelle de l'année. Et d'autre part, le comportement inertiel, caractérisé par une recharge importante dans la partie haute du bassin versant où les eaux souterraines circulent avec un temps de résidence moyen d'environ 34 ans, cette partie du système correspondant à la composante ancienne des eaux souterraines.

Les modèles Gardénia ont permis de reconstituer sur la période 1984-2023 la part du débit total aux exutoires du système Q_{SFC*} (prélèvements intégrés) alimenté par la composante récente du système et la part du débit alimenté par la recharge ancienne. Cela a permis de travailler dans un premier temps sur l'évolution de chacune des composantes au débit total (Q_{SFC*}), la composante récente et la composante ancienne. La combinaison de ces débits simulés a permis dans un deuxième temps de reconstituer le débit total aux exutoires et de travailler sur l'évolution du système dans sa globalité. Une fois ces modèles établis la deuxième partie du travail s'est axée sur l'évolution quantitative de ces masses d'eau face au changement global. Afin de prévoir quantitativement l'évolution des eaux de surface et des eaux souterraines, trois séries de projections climatiques de la base de données DRIAS-2020 (RCP2.6-RCMALadin63, RCP4.5-RCMRegRACMO22E et RCP8.5-RCMRegCM4-6) ont été utilisées. Elles correspondent respectivement au meilleur, à l'intermédiaire et au pire scénario d'évolution considérés dans le cadre de l'étude, RCP2.6-RCMALadin63 étant le meilleur et RCP8.5-RCMRegCM4-6 le pire.

Pour l'ensemble des scénarios de projection choisis, il apparaît que l'hydrosystème de Volvic n'est pas épargné par les influences climatiques et leur évolution. Quel que soit le scénario, le débit total aux exutoires du système, Q_{SFC*}, a diminué par rapport à la valeur de référence déterminée entre 1984 et 2023, avec une amplitude plus ou moins élevée selon le scénario. RCP2.6-RCMALadin63 a conduit à une légère diminution sur une base annuelle mais qu'il est important de contraster au regard d'une comparaison avec les débits observé entre 2004-2023 où il n'y a pas de différence constatée ; ce qui n'implique pas de contrainte particulière en termes de gestion de la ressource en eau. Le scénario RCP4.5-RCMRACMO22E prévoit une diminution des débits moyens annuels de 400 L/s (période de référence) à 346 L/s d'ici 2099. Cette baisse est amorcée et se stabilisera dès 2030 où elle se maintiendra avec des périodes de bas débits plus souvent probables et pouvant atteindre 225 L/s, correspondant aux prélèvements actuels. Il pourra alors être nécessaire d'anticiper dès à présent ces périodes de bas débit en diminuant les débits de prélèvement. Le dernier scénario, le RCP8.5-

PROJET

RCMRegCM4-6 a généré des modifications plus importantes des paramètres météorologiques (précipitations, température, ETP). Il montre une baisse progressive des débits à l'horizon 2099 avec l'augmentation de la fréquence des périodes de bas débits à partir de 2075. Il sera donc crucial, suivant ce scénario d'anticiper et d'ajuster les volumes de prélèvement d'eau afin d'éviter une baisse des débits aux exutoire de l'impluvium de Volvic et prévenir les pénuries d'eau significatives et durables d'ici 2075.

Cette étude met en lumière les différents facteurs affectant la disponibilité des ressources en eau au sein d'un système aquifère complexe tel que l'impluvium de Volvic. Les principaux, le changement climatique et les prélèvements d'eau modifient les processus hydrologiques, et sont intimement liés, car le changement climatique engendre des sécheresses qui ont pour conséquence des prélèvements d'eau plus importants pour la consommation. En utilisant la modélisation hydrologique, cette étude a montré que la variabilité du climat (dans le temps et dans l'espace) est un facteur majeur de l'équilibre hydrique de l'hydrosystème en lien avec les pressions anthropiques telles que les prélèvements d'eau que nous avons fixé dans ce modèle a niveau constant, basé sur la moyenne des 5 dernières années.

Il est important toutefois de souligner que, bien qu'ils soient largement utilisés et acceptés dans la communauté scientifique, les scénarios climatiques ont certaines limites. Les modèles climatiques proposés comportent des incertitudes, et les projections se concentrent principalement jusqu'à 2100, limitant les dynamiques à plus long terme. De plus, les projections globales des RCP peuvent ne pas capturer les variations régionales avec précision. Enfin, ce sont des scénarios qui ne fournissent pas de détails sur les impacts économiques et sociaux spécifiques, ni sur les capacités d'adaptation et de résilience des sociétés humaines. Par ailleurs, comme indiqué dans ce rapport, il est essentiel de nuancer les observations issues des modèles en tenant compte des incertitudes inhérentes à l'établissement d'un modèle hydrologique. Cependant, le travail réalisé ici a permis de limiter au maximum ces incertitudes et, avec un coefficient de Nash-Sutcliffe (NSE) d'au moins 0.65, les modèles sont jugés suffisamment fiables et performantes pour interpréter les tendances globales annuelles de l'évolution des débits et effectuer des prévisions fiables basées sur différents scénarios climatiques.

Ce travail s'est restreint à 3 scénarios parmi les nombreux scénarios issus de l'ensemble de projections climatiques régionalisées, DRIAS-2020, du projet Euro-Cordex (Valérian et al., 2022). Il sera possible de tester d'autres scénarios afin de multiplier les projections et de couvrir une grande variété de cas afin de mettre en relation les potentielles interactions entre les prélèvements et l'évolution de la ressource en eau sur le bassin. Le test d'autres scénarios de projection climatique est d'autant plus intéressant qu'un nouvel ensemble de scénarios climatiques a été développé dans le cadre du sixième rapport du GIEC (IPCC AR6). Il s'agit de nouveaux scénarios, appelés "Shared Socioeconomic Pathways" (SSP), allant de SSP1 (durabilité) à SSP5 (développement intensif basé sur les combustibles fossiles). Ils ont pour objectif d'aider à modéliser différents futurs socio-économiques et d'étudier les efforts nécessaires pour atténuer le changement climatique, comparant les anciens scénarios RCP avec les nouveaux SSP. Ces scénarios pourront être utilisés en compléments des RCP déjà définis par le 5^{e} rapport du GIEC. Au jour d'aujourd'hui les données de projections issues de ces nouveaux scénarios ne sont pas encore disponibles.

L'objectif suite à ce travail est de mener à bien un transfert de compétences d'ici la fin de l'année 2024 au profit des gestionnaires de la ressource, afin qu'ils soient en mesure de prendre en main les modèles élaborés et de réaliser des projections climatiques à partir des données issues des scénarios climatiques qu'ils souhaitent évaluer.

PROJET

Dans un aspect plus large au cadre de l'impluvium de Volvic, d'autres études ont examiné l'impact du changement climatique sur l'hydrologie des rivières et des aquifères français, à l'échelle du bassin, en utilisant des modèles hydrologiques similaires. Habets et al. (2013) sont en accord avec une diminution globale des débits des cours d'eau et des niveaux des nappes phréatiques dans les bassins de la Seine et de la Somme. Les résultats sont plus contrastés d'après Thirel et al. (2019) qui prédit une légère augmentation des débits annuels du Rhin (plus importante dans le RCP8.5), et une diminution des débits d'étiage d'ici 2050. Une étude plus globale réalisée à l'échelle du territoire français (projet Explore 2070, Chauveau et al., 2013) a rapporté, en accord avec nos résultats, une diminution générale des débits des cours d'eau de 10% à 40%. Même si la plupart des indicateurs hydrologiques indiquent une diminution globale des ressources en eau, les conséquences du changement climatique sont très hétérogènes en France et dans le monde.

PROJET

V. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anderson, M.P.; Woessner, W.W.; Hunt, R.J. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, 2nd ed.; Academic Press: San Diego, CA, USA, 2015; ISBN 978-0-12-058103-0.

Buytaert, W.; Celleri, R.; Willems, P.; Bièvre, B.D.; Wyseure, G. Spatial and Temporal Rainfall Variability in Mountainous Areas: A Case Study from the South Ecuadorian Andes. J. Hydrol. 2006, 329, 413–421.

Chauveau, M.; Chazot, S.; Perrin, C.; Bourgin, P.-Y.; Sauquet, E.; Vidal, J.-P.; Rouchy, N.; Martin, E.; David, J.; Norotte, T. : Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? La Houille Blanche 2013, 99, 5–15.

Habets, F.; Boé, J.; Déqué, M.; Ducharne, A.; Gascoin, S.; Hachour, A.; Martin, E.; Pagé, C.; Sauquet, E.; Terray, L.; et al. Impact of Climate Change on the Hydrogeology of Two Basins in Northern France. Clim. Change 2013, 121, 771–785.

Jeannin, P.-Y.; Artigue, G.; Butscher, C.; Chang, Y.; Charlier, J.-B.; Duran, L.; Gill, L.; Hartmann, A.; Johannet, A.; Jourde, H.; et al. Karst Modelling Challenge 1: Results of Hydrological Modelling. J. Hydrol. 2021, 600, 126508.

Lin, Feng & Chen, Xingwei & Yao, Huaxia. (2017). Evaluating the Use of Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient in Goodness-of-Fit Measures for Daily Runoff Simulation with SWAT. Journal of Hydrologic Engineering. 22. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001580.

Ly, S.; Charles, C.; Degré, A. Different Methods for Spatial Interpolation of Rainfall Data for Operational Hydrology and Hydrological Modeling at Watershed Scale. A Review. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2013, 17, 392–406.

McCuen, Richard & Knight, Zachary & Cutter, A.: (2006). Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index. Journal of Hydrologic Engineering - J HYDROL ENG. 11. 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).

Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil, F.; Loumagne, C. Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall–Runoff Model? J. Hydrol. 2005, 303, 290–306.

Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Models Part I—A Discussion of Principles. J. Hydrol. 1970, 10, 282–290.

Pointet, T.; Amraoui, N.; Golaz, C.; Mardhel, V.; Negrel, P.; Pennequin, D.; Pinault, J.-L. La contribution des eaux souterraines aux crues exceptionnelles de la Somme en 2001 Observations, hypothèses, modélisation. La Houille Blanche 2003, 89, 112–122.

Ruelland, D.; Ardoin-Bardin, S.; Billen, G.; Servat, E. Sensitivity of a Lumped and Semi-Distributed Hydrological Model to Several Methods of Rainfall Interpolation on a Large Basin in West Africa. J. Hydrol. 2008, 361, 96–117.

PROJET

Thiery, D. Forecast of Changes in Piezometric Levels by a Lumped Hydrological Model. J. Hydrol. 1988, 97, 129–148.

Thiéry, D. Logiciel Gardenia. version v8.2. Guide d'utilisation ; BRGM : Orléans, France, 2014 ; p. 140.

Thiéry, D.; Diluca, C.; Diagana, B. Modelling the Aquifer Recovery after a Long Duration Drought in Burkina Faso. In Extreme Hydrological Events: Precipitation, Floods and Droughts-Yokohama (Japon); IAHS Press: Yokohama, Japan, 1993; pp. 43–50.

Thirel, G.; Gerlinger, K.; Perrin, C.; Drogue, G.; Renard, B.; Wagner, J.-P. Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill)? La Houille Blanche 2019, 105, 140–149.

Valérian, F.; Comby, G.; Kappelmann, A.; Gimon, M.; Michaux, M. Adaptation Au Changement Climatique. In Annales des Mines—Responsabilité et Environnement ; Les Echos Le Parisien Médias : Paris, France, 2022 ; p. 116.

PROJET

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Précipitations mensuelles (mm) à la station météorologique de Volvic et débit mensuel total (cumul des trois sources, en $L.s^{-1}$) aux Sources de Front de Coulée de 1975 à 2023. La section en pointillés correspond au débit total basé sur l'estimation des débits de la Pale et Gargouilloux sur la période 1975-2010. La régression linéaire des débits est matérialisée par une droite en pointillés. 3
Figure 2 : Evolution de la température moyenne annuelle et de la recharge (moyennes annuelles) sur la période 1950-2023 dans le secteur de l'Impluvium de Volvic (station VOLVIC - Météo-France). Les lignes pointillées correspondent aux moyennes glissantes sur 5 ans. 4
Figure 3 : a. Débit à l'exutoire de l'impluvium de Volvic montrant la contribution des composantes ancienne (bleu) et récente (vert) b. Part du bassin correspondant aux édifices volcaniques et à la zone d'alimentation de la recharge ancienne (en bleu) et part restante du bassin versant correspondant à la zone d'alimentation de la recharge récente (en vert). 6
Figure 4 : Débit mensuel total (Q_{SFC*} = cumul des trois sources et des débits prélevés, en L.s-1) aux Sources de Front de Coulée de 1975 à 2023. 7
Figure 5 : Schéma fonctionnel du modèle de réservoir Gardenia utilisé dans les modélisations (modèle récent et modèle ancien), adapté de Thiéry (2014). 9
Figure 6 : Evolution de l'anomalie de la température moyenne de l'air (C) en France pour les RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, adaptée de Valérian et al. (2022) 12
Figure 7 : a. Evolution du débit Q_{SFC*} observé par rapport au débit Q_{SFC*} simulé (m^3/s) pour le modèle à recharge récente avec les courbes de corrélation correspondantes en considérant une calibration utilisant : b. la période 1994 - 2012 et c. une validation utilisant la période 2014 - 2022 13
Figure 8 : a. Evolution du débit Q_{SFC*} observé par rapport au débit Q_{SFC*} simulé (m^3/s) pour le modèle à recharge ancienne avec les courbes de corrélation correspondantes en considérant une calibration utilisant : b. la période 1984 – 2012. 15
Figure 9 : Evolution des paramètres météorologiques (a. Précipitations, b. Température et c. Evapotranspiration Potentielle) au point de grille Volvic selon les scénarios RCP-RCM choisis pour la modélisation prospective. Attention, les valeurs ici sont présentées au point de grille Volvic et ne tiennent pas compte du gradient altitudinal. 18
Figure 10 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2023 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert). 19
Figure 11 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert). 20
Figure 12 : Q_{SFC*} (= Q_{SFC*} modèle composante récente + Q_{SFC*} modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP2.6 et RCM CNRM-ALADIN63 (en vert) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus). 20
Figure 13 : a. Débits moyens annuels pour le RCP2.6 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP2.6. 21
Figure 14 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange). 22
Figure 15 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange). 23
Figure 16 : Q_{SFC*} (= Q_{SFC*} modèle composante récente + Q_{SFC*} modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP4.5 et RCM EC-EARTH_KNMI-RACMO22E (en orange) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus). 24

PROJET

Figure 17 : a. Débits moyens annuels pour le RCP4.5 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP4.5..... 24
Figure 18 : Q_{SFC*} du modèle à composante récente observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge). 25
Figure 19 : Q_{SFC*} du modèle à composante ancienne observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge). 26
Figure 20 : Q_{SFC*} (= QSFC* modèle composante récente + QSFC* modèle composante ancienne) observé de 1994 à 2022 (en bleu) et simulé jusqu'à 2099 selon le RCP8.5 et RCM HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6 (en rouge) avec la courbe des débits prélevés (tous prélèvements confondus). 27
Figure 21 : a. Débits moyens annuels pour le RCP8.5 sur 2023-2099 comparés au débit de la période de référence et à la moyenne des prélèvements b. Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir du RCP8.5..... 27
Figure 22 : Moyennes annuelles de Q_{SFC*} (débits totaux = prélèvements inclus) pour la période de référence 1984-2023, la période 2004-2023 et pour les différents RCP : le « meilleur » cas (RCM Aladin63 dans RCP2.6), le cas « intermédiaire » (RCM RACMO22E dans RCP4.5) et le cas « défavorable » (RCM RegCM4-6 dans RCP8.5). Les barres d'erreur représentent les écarts types des débits moyens déterminés pour respectivement la période de référence 1984-2023, la période 2004-2023 et la période allant de 2023 à 2099 pour chaque modèle RCP. 28
Figure 23 : Distribution des débits totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année, moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence), 2004 à 2023 pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Le tableau 8 associé indique les pourcentages de variation entre les débits simulés et les débits de la période de référence 1984-2023.. 29

Tableau 1 : Liste des données d'entrée utilisées dans la modélisation Gardénia pour le modèle conceptuel à composante récente..... 7
Tableau 2 : Liste des données d'entrée utilisées dans la modélisation Gardénia pour le modèle conceptuel à composante ancienne. 7
Tableau 3 : paramètres optimisés et paramètres fixés dans Gardenia et leur description. 9
Tableau 4 : Moyennes annuelles des températures atmosphériques (°C) et précipitations annuelles (mm/an) sur 2023-2099 les différents scénarios définis : RCP 2.6 – Aladin63 (optimiste), RCP 4.5 – RACMO22E (intermédiaire), RCP 8.5 – RegCM4-6 (pessimiste), sur la base des données collectées par DRIAS-2020. Ces données se réfèrent toutes au point de grille de la zone d'étude et sont présentées par rapport aux valeurs obtenues pour la période de référence "Ref" : 1984-2023 à la station météorologique Météo France de Volvic. La période de référence a été également séparée en périodes 1984-2004 et 2004-2023. 11
Tableau 5 : Paramètres optimisés et de leurs plages d'ajustement ; paramètres fixés ; Pour le modèle conceptuel à composante récente. 14
Tableau 6 : Paramètres optimisés et de leurs plages d'ajustement ; paramètres fixés ; Pour le modèle conceptuel à composante ancienne..... 15
Tableau 7 : Valeurs du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (traduit d'après McCuen et al., 2006). 16
Tableau 8 : Débit totaux aux Sources de Front de Coulée (Q_{SFC*}) sur une année : moyenne mensuelle de 1984 à 2023 (période de référence) pour les débits observées (Q_{SFC*}Obs) et 2023-2099 pour les débits simulés (Q_{SFC*}Sim) à partir des RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5, accompagné des pourcentages d'écart par rapport à la période de référence. 29

PROJET