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 1 : MODELE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

NEVERS Pierre, CELLE Hélène
Juillet 2024

PROJET

TABLE DES MATIERES

I.1 INTRODUCTION 3
Contexte
Objectifs
I.2 GOUVERNANCE ET FINANCEMENT 5
Institutions participant au projet
Personnel impliqué
Financement
I.3 SITE D'ETUDE 6
Géographie
Occupation des sols
Géologie
Hydrogéologie
I.4 DONNEES, MATERIEL ET METHODES 10
Définition des points de suivi et de prélèvement
Point sur la collecte de données et données disponibles
Chronologie des campagnes de terrain et du suivi
Données climatiques
Données hydrodynamiques
Données hydrochimiques
MODELE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE
II.1 SYNTHESE GEOLOGIQUE 18
II.2 SYNTHESE CLIMATIQUE 20
Bilan hydrologique et spatialisation de la recharge
II.3 SUIVI HYDRODYNAMIQUE 25
II.4 ANALYSES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES (ELEMENTS MAJEURS ET ISOTOPES) 34
II.5 DATATION DES EAUX SOUTERRAINES (CFC-113 ET TRITIUM 3H) 34
II.6 SYNTHESE DES RESULTATS, MODELE CONCEPTUEL ET VALIDATION 39
III. CONCLUSIONS SUR LE MODELE CONCEPTUEL 43
V. VALORISATION 44
VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 45
ANNEXES 54
ANNEXE 1 : CARTES DE L'OCCUPATION DES SOLS (CORINE LANDCOVER) SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC DE 1990 A 2018
ANNEXE 2 : INFORMATIONS RELATIVES AUX DONNEES UTILISEES
ANNEXE 3 : CALCUL DE RECHARGE (A PARTIR DE LA FEUILLE DE CALCUL ESPERE®) A L'ECHELLE DE DIFFERENTES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA CHAINE DES PUYS
ANNEXE 4 : CAPACITE DE STOCKAGE DES FORMATIONS VOLCANIQUES DE L'IMPLUVIUM DE VOLVIC
ANNEXE 5 : CONVENTIONS, AVENANTS ET FICHE PROJET

PROJET

I.1 INTRODUCTION

Contexte

Le contexte hydrogéologique du département du Puy-de-Dôme est relativement complexe. Les principaux aquifères exploités pour l'alimentation en eau potable sont au nombre de deux : la nappe alluviale de l'Allier qui bénéficie du soutien d'étiage par le barrage de Naussac et les aquifères de la Chaîne des Puys classés par le SDAGE Loire-Bretagne en Nappe comme « A réserver en priorité à l'Eau Potable (NAEP) » depuis 2010. Les autres usages, tels que l'irrigation et l'industrie, sollicitent davantage les ressources en eau superficielle, excepté les usines d'embouteillage d'eau qui sont relativement nombreuses dans le Puy-de-Dôme et qui prélèvent dans différents aquifères. La question des usages de l'eau sur le bassin de Volvic se pose de façon croissante depuis plusieurs années. Le maintien d'une ressource en eau suffisante dans le milieu naturel est de plus en plus difficile en étiage étant donné les prélèvements importants, à la fois pour le réseau public d'eau potable (Syndicat Mixte des Utilisateurs de l'eau de la Région de Riom et Riom Limagne et Volcans) mais également pour l'eau embouteillée (Société des Eaux de Volvic, Groupe Danone).

Compte-tenu de la complexité de ce territoire et afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère de Volvic, deux thèses, financées par la Société des Eaux de Volvic, ont été réalisées. La première, encadrée par l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse et le LRPC de Clermont-Ferrand, soutenue en 2002 à huis clos, a permis d'identifier les axes principaux d'écoulement en reconstituant les paléo-reliefs. Cette thèse comportait également un volet géochimique. La seconde, encadrée par l'Ecole des Mines de Paris, soutenue en 2015, a permis d'initier un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème de Volvic avec un focus spécifique sur le rôle de la forêt dans la recharge. Elle propose également un premier outil de gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau. Dans le cadre de cette seconde thèse, la DREAL a équipé deux sources situées en aval du bassin versant : la Pâle et le Gargouilloux ; complétant ainsi l'équipement de la source de La Chapelle/St Genest. Ces trois sondes permettent d'estimer la vidange du système.

Depuis 2016, un comité de suivi de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic a été mis en place à l'initiative des services de l'Etat. Ce comité, constitué de la DDT, l'ARS, la DREAL, la SEV, RLV, le SMUERR et de l'hydrogéologue agréé, se réunit annuellement, sous la présidence du sous-préfet de Riom, pour faire le point notamment sur l'évolution des prélèvements et pour échanger sur les impacts de ces prélèvements sur l'impluvium.

En 2018, l'État a été mis en contentieux par M. de Féligonde, pisciculteur dont l'activité est située en aval des sources précédemment citées, pour sa mauvaise gestion de l'eau de l'impluvium de Volvic. En parallèle, 5 associations déposent un recours contentieux devant le tribunal administratif de Clermont-Ferrand, pour contester l'arrêté cadre sécheresse du 31 mars 2021. Il ne respecterait pas le Code de l'Environnement, et remettrait en cause, notamment, le principe d'égalité car il exclut les embouteilleurs de toute contrainte en période de sécheresse. Des experts sont nommés côté Société des Eaux de Volvic et côté plaignants. Le rapport provisoire est à la consultation des parties depuis le 30 juillet 2021. Le sujet, fortement médiatisé en 2020 et 2021, fait l'objet d'un focus spécifique de la commission parlementaire intitulé « la mainmise sur l'eau par les intérêts privés » en 2021. Suite à ces développement, l'Etat, via la DDT 63, décide en 2021 de nommer un expert indépendant avec l'accord des plaignants et de la SEV et met en place en place un comité de transparence élargi. Le but de cette nouvelle expertise impartiale est **de mieux appréhender le fonctionnement de l'impluvium de Volvic et d'identifier les causes de la baisse du débit naturel en front de coulées notamment en période d'étiage.**

PROJET

Objectifs

Les objectifs de l'étude proposée, du point de vue de la gestion de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic, sont de : 1) savoir s'il existe une ou plusieurs masses d'eau dans l'impluvium ; 2) définir la recharge, sa saisonnalité et donc la pérennité de ces masses au cours de l'année et notamment en période d'étiage ; 3) préciser les temps de transfert entre la zone d'infiltration et les sources de front de coulée ; 3) anticiper l'évolution quantitative de ces potentielles masses d'eau face au changement climatique global.

Volets de l'étude

Afin de répondre à ces objectifs, quatre volets sont proposés :

1) synthèse des nombreuses études, thèses, expertises et rapports existants. Ce travail bibliographique, permet de réinterpréter les données brutes et de définir, si nécessaire, des mesures ou analyses complémentaires à réaliser pour répondre aux objectifs de l'étude ;

2) définition du modèle conceptuel de fonctionnement de l'impluvium de Volvic à partir du traçage naturel des eaux. Ce travail se base sur les données existantes et des données complémentaires acquises lors de l'étude :

- 3 campagnes ponctuelles spatiales à l'étiage et en période de pluie pour : 1) différencier les axes de circulation nord et sud et leur participation aux écoulements à l'aval du bassin versant ; 2) déterminer le temps de séjour des eaux dans le/les aquifères de l'impluvium. Des analyses chimiques des majeurs + traces, isotopes de la molécules eau, ^{13}C/ ^{3}H ont été réalisées dans cet objectif. Cette étape a nécessité la définition des points de suivi (sources, forages, piézomètres) en fonction de leur accessibilité et des contraintes de prélèvements liées à l'exploitation des eaux ;
- Un suivi temporel de la chimie (pas de temps journalier) du débit et de la piézométrie des masses d'eau de l'impluvium de Volvic pour mettre en évidence l'impact de la variabilité intra-annuelle de la recharge sur la ressource en eau. Ce travail réalisé sur le volet qualitatif a pour objectif d'étayer le volet quantitatif du point de vue : 1) des relations nappes/cours d'eau superficiels, 2) du temps de transfert sur les deux axes d'écoulement Nord et Sud, 3) de la distinction du débit de base de l'aquifère par rapport à des alimentations plus superficielles et de leur conséquence sur l'étiage.

3) Définition d'un outil d'aide à la gestion de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic, à partir du modèle conceptuel établi au point 2) et des études préalables déjà réalisées. Il permettra d'intégrer différents scenarii de dérive climatique affectant la recharge et de définir le niveau des prélèvements associés pour ne pas mettre en péril le système aquifère, à l'horizon 2050. Il définit en particulier si les prélèvements ont un impact sur la pérennité de l'aquifère et l'état quantitatif de la nappe de Volvic en se basant sur la méthodologie retenue pour l'état des lieux des masses d'eaux du SDAGE Loire Bretagne (ratio recharge/prélèvement et impact sur les cours d'eau associés), avec une approche pluri-annuelle.

PROJET

I.2 GOUVERNANCE ET FINANCEMENT

Institutions participant au projet

Financeurs

- Préfecture du Puy-de-Dôme (DDT63)
- Communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans (RLV)
- Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom (SMUERR)
- Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB)

Comité de suivi

- Communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans (RLV)
- Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom (SMUERR)
- Comité Environnement pour la Protection de l'Impluvium Volvic (*CEPIV*)
- Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB)
- l'hydrogéologue agrée coordonnateur du département
- La Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (*DREAL*) Auvergne-Rhône-Alpes
- Agence Régionale de Santé (ARS)
- Société des Eaux de Volvic (SEV)
- le syndicat Plaine de Riom
- un représentant des associations environnementales
- Préfecture du Puy-de-Dôme (DDT63)

Laboratoires de recherche

- Laboratoire Chrono-Environnement UMR CNRS 6249 / Université de Franche Comté
- Laboratoire Magmas et Volcans / Université Clermont Auvergne

Le projet est intégré dans le SO AUVERWATCH (AUVERgne WATer CHemistry) de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand.

Personnel impliqué

- Pierre Nevers (Laboratoire Chrono-Environnement / Université de Franche Comté) - *postdoctorant*
- Hélène Celle (Laboratoire Chrono-Environnement / Université de Franche Comté) - *encadrant*
- Benjamin Van Wyk de Vries ((Laboratoire Magma et Volcans / Université Clermont Auvergne) - *encadrant*

Financement

Le projet est financé par l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB), le Département du Puys de Dôme (DDT63), la Communauté d'agglomération Riom Limagne Volcan (RLV), le Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom (SMUERR) pour un budget initial de 150 k€ et une durée de 24 mois. Un complément au budget initial de 13474.4 € a été attribué en 2022. Une prolongation de 6 mois, portant la durée du post-doctorat à 30 mois (fin le 31/07/2024) a été validée, accompagnée d'un complément de budget de 24336 €. Le plan de financement du projet est présenté dans le tableau 1 ci-dessous.

PROJET

Tableau 1: Plan de financement du post-doctorat sur l'Impluvium de Volvic

BESOINS			**RESSOURCES**				
Nature de la dépense	**Montant du projet**	**Préciser en HT ou TTC** (en TTC si vous ne récupérez pas la TVA ou si la somme n'est pas soumise à la TVA)	**Financements**	**Montant subventionnable**	**Forme de l'aide (avance ou subvention)**	**Taux de l'aide en %**	**Montant de la contribution attendue**
Dépenses initiales (salaire / fonctionnement / investissement)	**150 000**	TTC	Agence de l'eau Loire-Bretagne	187 810	subvention	50%	93 905
Dépenses **travaux supplémentaires**	**13 474.4**	TTC	Riom Limagne et Volcans (***RLV)***	187 810	subvention	30%	56 343.1
Extension Post-Doctorat (6mois)	**24 336**	TTC	Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme (***DDT63)***	187 810	subvention	10%	18 781.0
			Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom (***SMUERR)***	187 810	subvention	10%	18 781.0
			Total des ressources externes				**187 810.4**
			Autofinancement (total des besoins - ressources externes)				**0.0**
Total des besoins	**187 810**		**Total des ressources**				**187 810.4**

I.3 SITE D'ETUDE

Géographie

Le bassin versant (ou Impluvium) de Volvic est situé à 15 km au nord-ouest de la ville de Clermont-Ferrand (centre de la France). Il constitue la partie nord-est du site tectonique Chaîne des Puys-Faille de Limagne, inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO. Sa superficie est de 45 km² (limites hydrogéologiques), avec une extension préférentielle ouest-est de 11 km et une altitude décroissante vers l'est de 1 163 m.a.s.l. à 380 m.a.s.l., en rejoignant le bassin de la Limagne. La pluviométrie moyenne sur le bassin versant de Volvic est de 776 mm, valeur stable sur les 30 dernières années. Sa distribution spatiale est contrôlée par le relief et l'effet de foehn : la hauteur des précipitations diminue de 1 000 mm sur les sommets à moins de 600 mm dans la partie inférieure orientale du bassin versant, au sein du bassin de la Limagne (<400 m d'altitude) (Joux, 2002 ; Rouquet, 2012). La température moyenne annuelle est de 9,4 °C pour la période 1959-2023 (données Météo-France).

Occupation des sols

L'occupation du sol[1] est stable depuis 1990 et se compose de 52% de forêts, 15% de terres agricoles, 13% de prairies et 10% de zones urbanisées (Figure 1). Le reste de la surface comprend des terres arables, des zones industrielles ou commerciales (CORINE Land Cover, 1990-2018). En une trentaine d'années, sur la période 1990-2018, seules les surfaces urbaines ont augmenté de manière très faible, gagnant 0.24 km² soit 0.6% de la superficie de l'Impluvium de Volvic (Figure 1c.). Excepté des changements de type de végétation, on ne constate pas de variation de surfaces de prairies et/ou cultures, idem pour les surfaces forestières (feuillus – conifères).

PROJET

[1] *Les cartes d'occupation des sols sur l'Impluvium de Volvic depuis 1990 sont disponibles en annexe 1.*

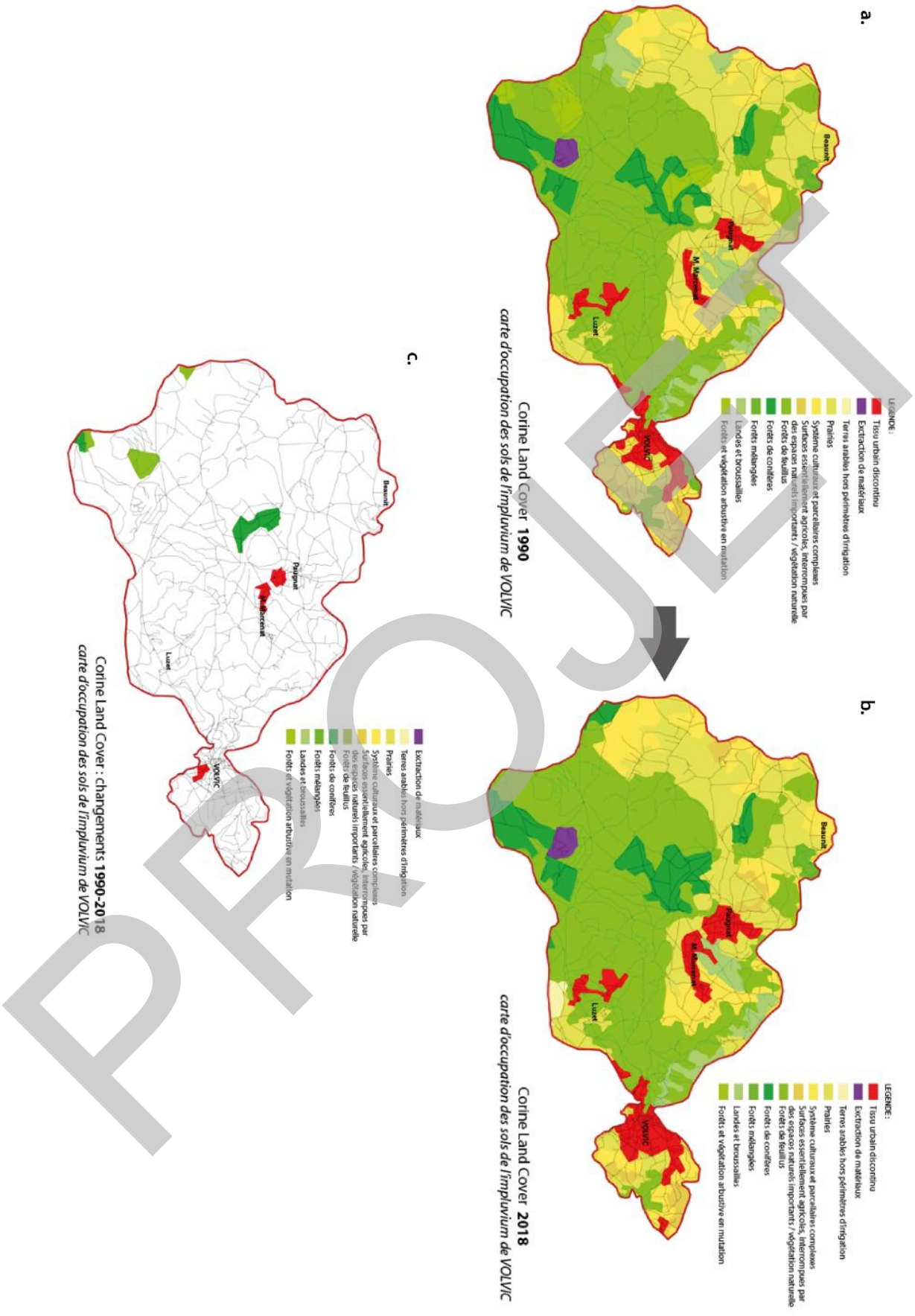


Figure 1: Cartes d'occupation des sols Corine Land Cover. a. carte 1990 b. carte 2018 c. carte des changements entre 1990 et 2018 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0).

PROJET

Géologie

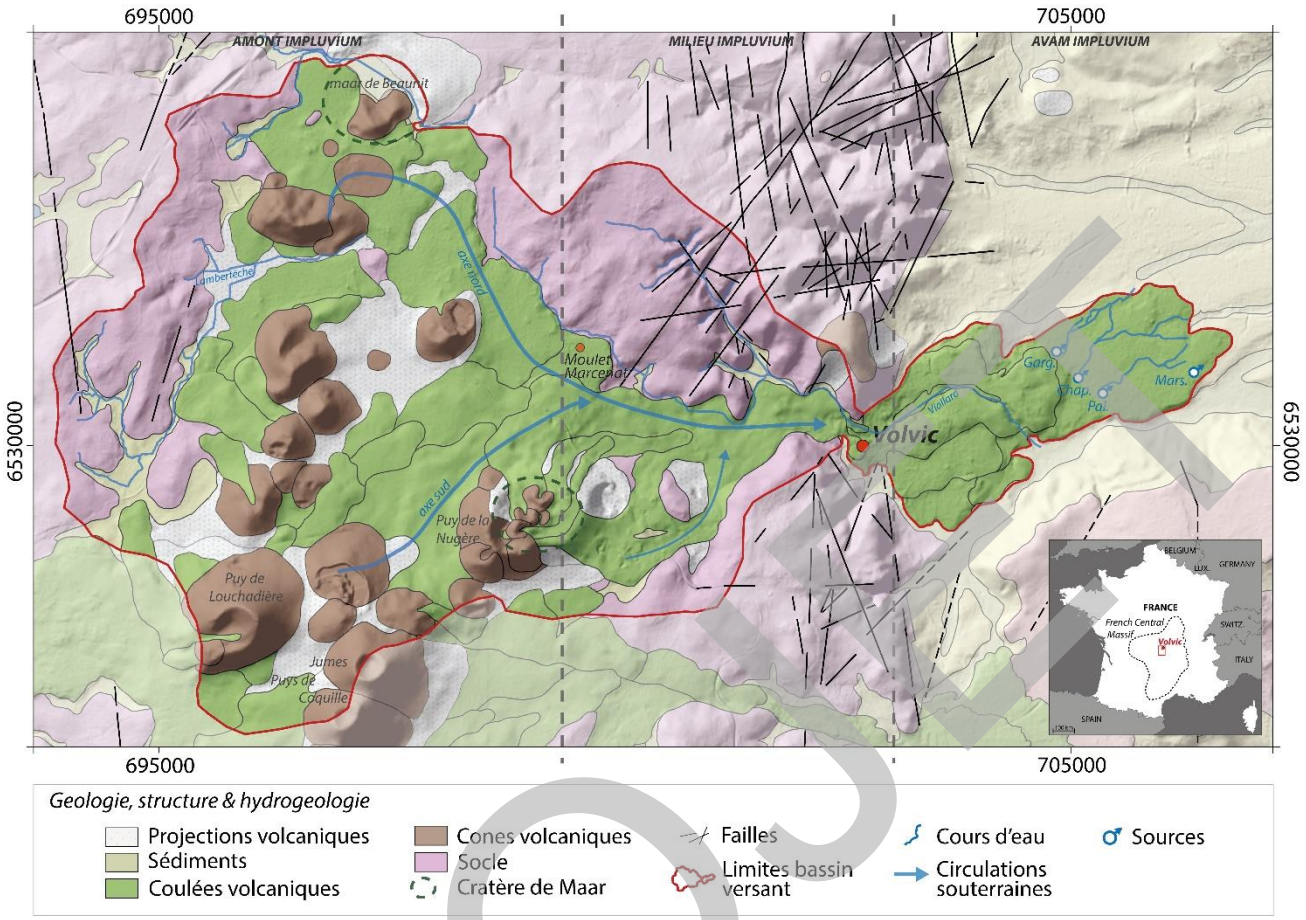


Figure 2 : Carte géologique simplifiée de l'impluvium de Volvic accompagnée d'informations hydrogéologiques (d'après Boivin et al. 2017).

Le bassin versant de Volvic fait partie de l'alignement volcanique N-S de la Chaîne des Puys qui repose sur un substrat granitique fracturé d'âge varisque appelé "Plateau des Dômes". Ce dernier a été affecté par différentes phases tectoniques (hercynien-carbonifère moyen et alpin-miocène) entraînant une fracturation NE/SO et l'affaissement du bassin sédimentaire tertiaire de la Limagne 700 m plus bas (Merle et Michon, 2001 ; Lustrini et Wilson, 2007). La faille de Limagne sépare le Plateau des Dômes du bassin de Limagne. Les nombreuses failles qui traversent le Plateau des Dômes ont favorisé l'érosion (Pliocène), créant des vallées profondes (environ 200-400 m de profondeur), principalement dans la direction E-W (Michon et Merle, 2001 ; Merle et al., 2023). Au cours du Quaternaire, des éruptions volcaniques successives et des coulées de lave issues de la Chaîne des Puys ont été chenalisées dans ces vallées (paléo-thalwegs), présentant des origines et des pétrologies différentes (Camus, 1975 ; Livet et al., 2006 ; Boivin et al., 2017 ; Harris et al., 2023), avant d'atteindre la plaine de la Limagne. Ce volcanisme régional est composé de différents produits issus d'un magmatisme basique produisant des roches allant des basaltes aux trachytes, en passant par les trachy-basaltes et les trachy-andésites (Janot, 2005 ; Rouquet et al., 2012 ; Boivin et al. 2017). Cette diversité pétrologique des magmas et les conditions environnementales lors de l'activité volcanique expliquent la multiplicité des structures volcaniques : dômes, cônes de scories, maars, coulées de lave pahoehoe et aa (Loock et al., 2008 ; Boivin et al., 2017).

Le bassin versant de Volvic est principalement composé de formations volcaniques (80%) avec 6 coulées de lave aa d'extension et d'épaisseur variables, de 10 à 140 mètres (Figure 2), qui se sont progressivement

PROJET

empilées dans les deux paléo-thalwegs du substratum situés dans la partie sud et la partie nord du bassin (Rouquet et al. 2012). Dans leur partie orientale, les coulées s'étendent dans le bassin sédimentaire de la Limagne où elles sont en inversion de relief suite aux processus d'érosion. Dans certaines zones, comme le secteur de la Nugère (cônes de scories associés à des structures de maar), l'épaisseur du remplissage volcanique peut atteindre plus de 180 m (Boivin et al., 2017 ; Aumar et al., 2024). Le substratum granitique (en rose, Figure 2) constitue la limite inférieure du bassin versant de Volvic, qui est délimité dans ses parties nord, ouest et sud-ouest par la topographie du substratum affleurant alors que dans sa partie sud, les limites ont été déterminées par des investigations géophysiques telles que les méthodes de polarisation spontanée et la tomographie de résistivité électrique (Joux, 2002 ; Aumar, 2022).

Hydrogéologie

Les propriétés hydrodynamiques des formations présentes varient en fonction de leur nature, induisant des écoulements complexes et des flux d'eau souterraine à toutes les échelles (Custodio, 1985 ; Josnin et al., 2007 ; Bertrand, 2009 ; Lachassagne et al., 2014 ; Poncela et al., 2022). Les cônes de scories et les maars (phréatomagmatisme) sont constitués d'une structure complexe avec des scories et des dépôts pyroclastiques, très poreux et perméables : la porosité effective de ces formations est estimée entre 30 et 45% (Yokoyama et Takeuchi, 2009 ; Colombier et al., 2017 ; Aumar, 2022). La perméabilité de ces matériaux dépend de la cohésion des produits volcano-clastiques et de la connectivité des pores qu'ils incluent. Les coulées de lave peuvent être très hétérogènes en fonction de leur pétrologie (Look et al., 2008 ; Bertrand et al., 2010 ; Harris et al., 2023). Leur porosité et la perméabilité varient respectivement de 5 à 20 % et de 10^{-3} à 10^{-5} $m.s^{-1}$, en fonction de leur structure et de leur degré de fracturation (Poncela et al., 2022). De plus, lorsque ces coulées sont mises en place, leurs bases et leurs flancs ont tendance à se refroidir plus rapidement que le cœur, produisant un niveau scoriacé en contact avec les roches environnantes pouvant drainer une partie des circulations d'eau.

A Volvic et sur l'ensemble de la Chaîne des Puys, le réseau hydrographique est limité ; les précipitations s'infiltrent préférentiellement, par l'intermédiaire des eaux de ruissellement ou de petits cours d'eau, au contact entre le substratum et les produits volcaniques (ex : Lambertèche et Viallard, Figure : 1 ; Joux 2002 ; Bertrand 2009 ; Boivin et al, 2017) ou directement au travers des fissures des formations volcaniques quaternaires bien que ce flux vertical reste limité et puisse être perturbé par la structure massive des cœurs de coulée (Barbaud 1983 ; Celle-Jeanton et al., 2008 ; Bertrand et al., 2010). Les eaux de pluie infiltrées traversent verticalement l'empilement volcanique, qui peut atteindre 200 m d'épaisseur dans certaines paléovallées, voire plus dans le cas des cônes de scories dans la partie amont du bassin versant. Après percolation, les eaux météoriques atteignent la zone saturée établie au-dessus du substratum, constitué de roches cristallines imperméables et de formations sédimentaires dans le bassin de la Limagne. Ces formations sédimentaires sont également considérées comme imperméable même si certaines études ont identifié des réserves d'eau dans sa partie nord (Tweed et al., 2018). Les eaux souterraines circulent donc à l'interface entre le substratum et les formations volcaniques ou dans les couches de scories en base de chaque coulée de lave massive (Bertrand et al., 2009 ; Rouquet, 2012). Les exutoires de ces hydrosystèmes volcaniques se situent en bout de coulée de lave, au milieu des bassins versants dans le cas des sources intra-volcaniques (interface entre deux coulées de lave) ou à l'extrême aval du bassin versant dans le cas des sources infra-volcaniques.

L'hydrosystème de Volvic a été décrit comme une superposition de niveaux aquifères semi-captifs avec un un drainage préférentiel, reliés par des fractures verticales et/ou fissures des coulées de lave compactes (Joux 2002). Son épaisseur moyenne est d'environ 40 à 50 m ; elle est maximale au centre de l'impluvium, dans le

PROJET

secteur du Goulet (Rouquet et al. 2012). Sur la base de l'hydrogéologie et de la topographie, l'impluvium de Volvic peut être divisé en trois zones :

- L'impluvium amont est principalement composé de cônes de scories et 3 coulées de lave. L'écoulement des eaux souterraines est divisé en deux circulations principales suivant l'axe nord et l'axe sud (Figure 1). L'axe nord s'étend du Maar de Beaunit (inclus dans le bassin de Volvic à sa limite nord (Livet et al. 2000) et pouvant stocker des volumes d'eau conséquents (plusieurs millions de m^3) avec un taux de renouvellement lent) au secteur de Moulet Marcenat. L'axe sud s'étend du secteur des Puys de Louchadière, Jumes et Coquille pour rejoindre l'axe nord au niveau de Moulet Marcenat.
- Le milieu de l'Impluvium est caractérisé par la présence de 6 coulées de lave aa d'extension et d'épaisseur variables empilées dans l'étranglement du Goulet (Van der Min, 1945 ; Barbaud, 1983 ; Joux, 2002 ; Rouquet et al. 2012).
- L'impluvium aval correspond à la fin des coulées de lave (en inversion de relief) dans la plaine de Limagne. Trois émergences principales, les SFC, Sources de Front de Coulée (Gargouilloux, la Pale, Chapelle/St Genest), jaillissent dans la rupture de pente correspondant à la fin d'une coulée de lave au milieu du bassin versant (Joux, 2002). Une quatrième source pérenne, Marsat, est identifiée à l'extrémité est de la dernière coulée volcanique. D'autres sources émergent de cette dernière coulée mais leur débit est faible et elles ne sont pas permanentes. Ces sources alimentent le réseau hydrographique de la plaine de Riom, en direction de la Limagne. Leur débit moyen est estimé à 335 $L.s^{-1}$ pour l'année 2022 et était d'environ 450 $L.s^{-1}$ en 2002 (Joux, 2002).

Les cônes de scories constituent la fonction capacitive de l'aquifère (Josnin et al., 2007 ; Rouquet et al., 2012 ; Boivin et al., 2017) et confèrent à l'impluvium de Volvic une forte capacité de régulation, se traduisant par des fluctuations piézométriques modérées. Les coulées fissurées et la semelle scoriacée (base de coulée), en revanche, présentent une perméabilité élevée, permettant des écoulements rapides (Livet et al., 2006 ; Celle-Jeanton et al., 2008). Certaines études antérieures ont caractérisé la composition chimique de façon globale et se sont principalement concentrées sur les sources potentielles de contamination des niveaux aquifères par des constituants chimiques spécifiques (Joux, 2002 ; Rouquet, 2012). Une composition chimique homogène est mise en évidence en raison d'un pouvoir tampon dû aux grands volumes d'eau dans le système. Certaines preuves d'une contamination plus élevée (apports anthropiques liés à l'infiltration des eaux de surface), en fonction du secteur du bassin versant considéré, a cependant été montrée en raison des transferts rapides associés à l'infiltration des eaux de ruissellement au contact entre le socle et la coulée de lave (Joux 2002 ; Rouquet 2012).

I.4 DONNEES, MATERIEL ET METHODES

Définition des points de suivi et de prélèvement

Sur l'ensemble de l'impluvium de Volvic, un total 15 points de suivi (Figure 3, Tableau 2) ont fait l'objet de prélèvements ponctuels d'échantillons d'eau en vue d'analyses chimiques (majeurs, isotopes, traceurs de datation). Ces points ont été équipés de sondes CTD-Diver permettant un suivi continu de la conductivité, la température et le niveau d'eau (Lat, N27 sont équipés de sondes par le BRGM). Une station météorologique permettant de mesurer la température atmosphérique ainsi que les hauteurs de précipitations a été installée au niveau à Moulet Marcenat, sur le site de pompage AEP (M.Marc). Un collecteur de pluie et de neige a également été installé sur ce site. Le détail de cette instrumentation et des prélèvements/analyses est présenté plus bas dans la partie méthodologie correspondant à chaque type de suivi et mesure.

PROJET

Les prélèvements ont été réalisés dans des conditions hydrométéorologiques proches, sachant que le contexte de l'année 2022 a été particulier avec peu de précipitations, des températures importantes, des débits aux exutoires et des niveaux de nappe relativement faibles. Ainsi, les échantillons ont été prélevés en période de haute eaux modérées en juin 2022 et en octobre 2022 et de basses eaux en février 2023 avec des précipitations limitées.

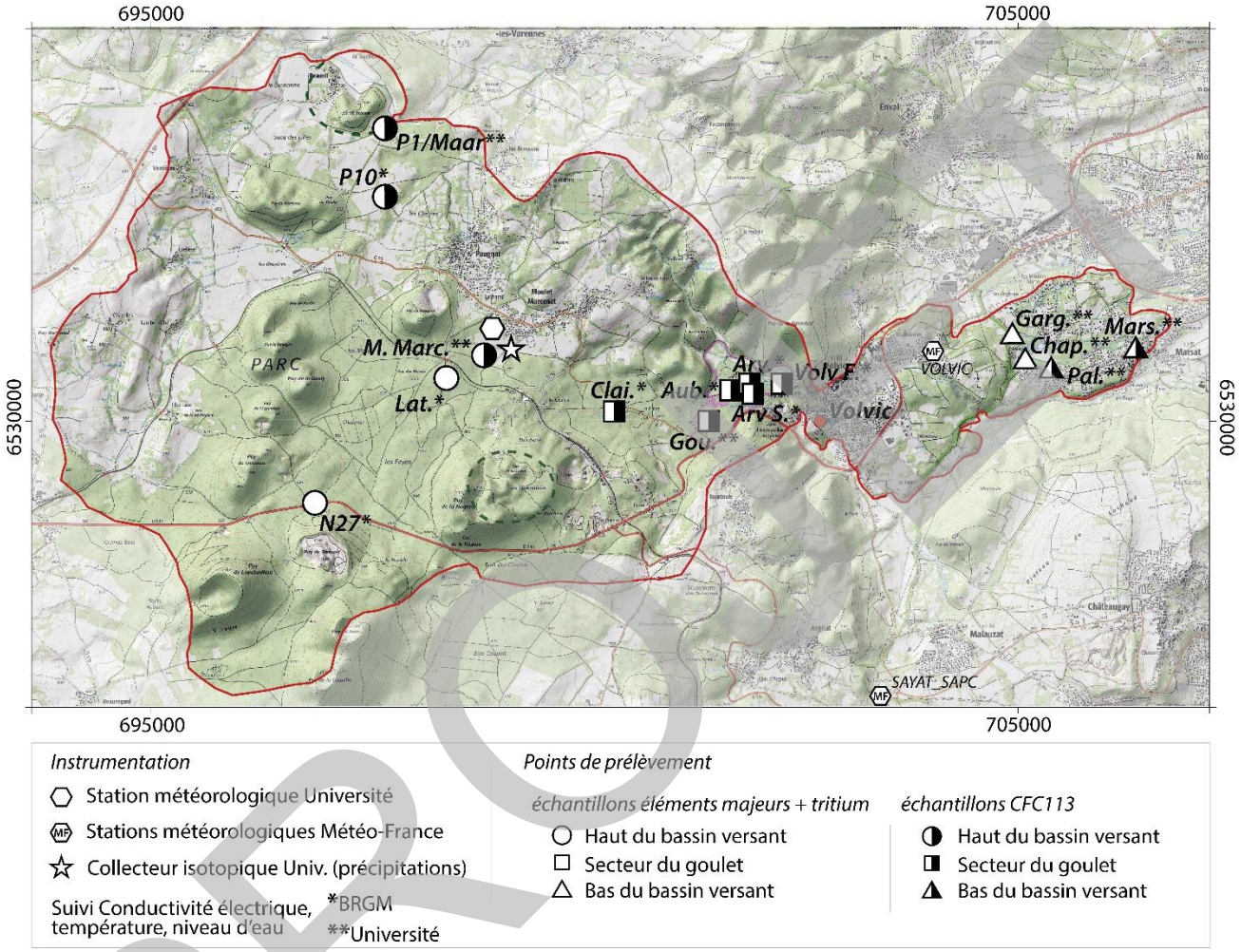


Figure 3 : Carte de localisation des points de suivi accompagnée d'informations sur l'instrumentation et les prélèvements réalisés.

Tableau 2 : Liste du matériel installé sur l'impluvium de Volvic dans le cadre de l'étude

INSTRUMENTATION MISE EN PLACE SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC			
Point de suivi	**Type de matériel**	**Propriétaire**	**Informations**
P1/Maar	1 sonde CTD / 1 sonde BaroDiver	*Université de Franche Comté*	
P10	1 sonde CTD	*Université de Franche Comté*	
Moulet Marcenat (M.Marc	1 sonde CTD / 1 sonde BaroDiver / 1 collecteur pluie (isotopes) / 1 station météorologique	*Université de Franche Comté*	
Galerie du Goulet (Gou.)	1 sonde CTD	*Université de Franche Comté*	
Pale (Pal.)	1 sonde CTD	*Université de Franche Comté*	panne du matériel et remplacement
gargouilloux (Garg.)	1 sonde CTD	*Université de Franche Comté*	matériel volé
Chapelle/ST Genest (Chap.	1 sonde CTD	*Université de Franche Comté*	matériel volé
TOTAL	9 sondes - 1 collecteur de pluie - 1 station météorologique		

PROJET

Synthèse des données disponibles et acquises lors de l'étude

Les données utilisées dans ce travail sont présentées dans le Tableau 3. Il s'agit d'une part de données acquises par l'Université de Franche-Comté et d'autre part, des données collectées auprès des différentes structures intervenant sur l'impluvium de Volvic RLV, SEV, SMUERR, DDT 63, BRGM) ou de sites libres d'accès. D'un point de vue de la temporalité, la mise à disposition des données s'est étendue de 2022 à début 2023 selon le type de donnée où la structure concernée, induisant un délai dans leur intégration dans l'étude. Il est également important de notifier l'incertitude de la donnée concernant les débits à la Source du Goulet. Celle-ci a été corrigée par l'installation d'un nouveau capteur de débit fin 2023.

Tableau 3 : Synthèse des données disponibles sur l'Impluvium de Volvic et fournisseurs[2]

DONNEES DISPONIBLES SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC						
Structure concernée	**Type de donnée**	**Temporalité**	**Pas de temps**	**Remarques**		
RLV *(Riom Limagne Volcans)*	Analyses des eaux sur les différents captages AEP	entre 2011 et 2021	annuel, pluriannuel	données fournies et actualisées sur demande		
	Niveau d'eau forage M.Marcenat (m. NGF)	à partir de 2018	journalier			
	Bilans journaliers des prélèvements du forage de M.Marcenat + autres points AEP	à partir de 2019	journalier			
SEV *(Société des Eaux de Volvic)*	Prélèvements/Volumes pompés/débits (m^3, m^3/s)	1992-2021 2000-2020 2015 à auj.	annuel mensuel journalier	données fournies et actualisées sur demande	pour les volumes prélevés, avant 1992 : valeurs basées sur les autorisations de prélèvements	
	Niveaux de nappe dans les forages (m, m.NGF)	2015 à auj. avant 2015 (2002 et/ou 2006 selon ouvrage)	journalier mensuel			
	Conductivité électrique (µS/cm)	à partir de 2023	journalier			
SMUERR *(Syndicat Mixte des Utilisateur d'Eau de la Région de Riom)*	Débit moyen mensuel Source du Goulet (m^3/h)	à partir de 2014	mensuel	données fournies et actualisées sur demande	Manque de précision sur la mesure de débit à la source donc sur l'estimation des volumes dirigés au trop plein (Trop plein = débit source - débit distriubtion	avant 2014 : utilisation du volume moyen de
	Débit moyen mensuel mis en distribution (m^3/h)	à partir de 2014	mensuel			
DDT63 *(Préfecture du Puy de Dôme)*	Fichier de synthèse : débits Sources de Front de Coulée (L/s) débits prélevés AEP M.Marcenat (m^3, m^3/s) volumes prélevés AEP Goulet (m^3, m^3/s) volumes prélevés AEP Gargouilloux (m^3, m^3/h) volumes prélevés SEV (m^3, L/s) niveaux nappe forage N27 (m, m.NGF)	2015 à 2021	journalier	fichiers de synthèse issu du Comité de Transparence de février 2022		
	débit Viallard (L/s)	2019 à 2021	journalier			
BRGM	Niveaux de nappe dans les forages (m, m.NGF)	2009 à auj.	horaire	ouvrages suivi par le BRGM sur l'Impluvium (8 ouvrages)	données disponibles avant 2006 sur certains forages qui étaient suivi par la DREAL avec des pas de temps sur 6h, journalier, mensuel	données téléchargeables pour mise à jour sur
	Conductivité électrique (µS/cm)	2009 à auj.	horaire	sur 2 forages: N27 & Bois Latia		
UNIVERISTE DE FRANCHE COMTE	SONDES CTD-Diver: conductivité électrique (µS/cm), niveau (m), température (°C)	juin 2022 à auj.	horaire	sur l'ensemble des points de suivi présentés dans la carte d'instrumentation	disfonctionnement de la station et périodes sans enregistrements	
	Station météorologique	octobre 2022 à auj.	journalier	hauteur de pluie - Température		
	Analyses chimiques sur les points de suivi: éléments majeurs et traces isotopes stable de la molécule d'eau tritium CFC-SF6 carbone 13	uin-22 / oct-22 / fév-23 uin-22 / oct-22 / fév-23 uin-22 / oct-22 / fév-23 oct-22 / fév-23 juin-22		instrumentation et campagnes de prélèvement mises en place dans le cadre du postdoctorat		
AUTRES DONNEES EN ACCES LIBRE	Débit des Sources de Front de Coulée: Chapelle (StGenest) la Pâle Gargouilloux	1975 à auj. 2010 à auj. 2010 à auj.	journalier journalier journalier	données collectées sur la banque de données hydroportail du service eaufrance (https://hydro.eaufrance.fr/)	Données reconstituées jusqu'en 1975 à partir d'une loi de corrélation avec des débits de la	
	Données météorologiques (précipitations, températures)	selon la station	journalier	données brutes collectées sur le portail Météo-France : https://publitheque.meteo.fr	Volvic : données au point de grille (8km²) de l'Impluvium fournies par D.Marchal (Météo-France) - données depuis 1950	

Chronologie des campagnes de terrain et du suivi (instrumentation)

La frise chronologique ci-dessous (Figure 4) présente la temporalité des campagnes de terrain ainsi que la période de suivi en continu par l'instrumentation mise en place sur le site. Actuellement, le suivi se poursuit.

[2] *Des informations supplémentaires relatives aux données utilisées sont fournies en annexe 2*

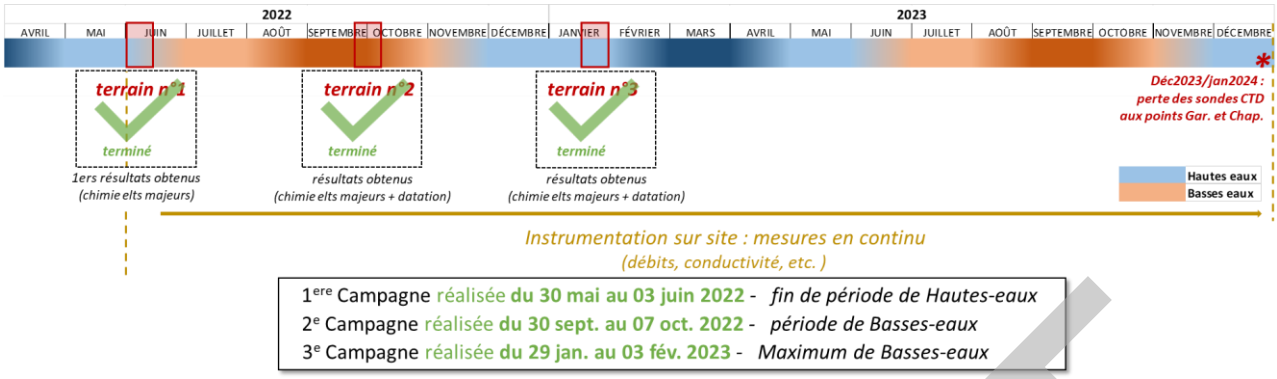


Figure 4 : Chronologie des campagnes de terrain, du suivi et de l'instrumentation sur l'Impluvium de Volvic.

Données climatiques

Les données météorologiques (précipitations en mm, températures atmosphériques en °C) ont été fournies par le portail de données publiques Météo-France sur le point de grille (8 km²) correspondant au bassin versant de Volvic (Lat, Long du point : 45.8711,3.0064). Pour ce point de grille, les données sont disponibles depuis 1959 pour les précipitations et les températures. Les données météorologiques des stations de Sayat_sapc et de Volvic ont également été utilisées (Tableau 4 - https://publitheque.meteo.fr).

L'Evapotranspiration Réelle (ETR) a été calculée selon Oudin et al, 2005. La Réserve Utile (RU) a été fixée à 70 mm pour les calculs du bilan hydrique, sur la base d'études antérieures (Joux, 2002) et de données pédologiques obtenues à partir de jeux de données INRAE en ligne (Le Bas, 2018 ; https://agroenvgeo.data.inra.fr/geonetwork/sr/fre/catalog.search#/metadata/393d8106-4400 51cd9767e8bbef2f73a6). La recharge a été estimée à l'aide du tableur ESPERE (Lanini et al, 2015).

La spatialisation de la recharge présentée dans la section des résultats de ce rapport utilise les stations météorologiques du réseau de Météo-France listées dans le Tableau 4 ci-dessous.

Tableau 4 : Localisation des stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées dans le cadre de l'étude.

Nom	Code MeteoFrance	Lat.	Long.	Altit. (mNGF)	Période de fonctionnement
VOLVIC	63470001	45.8765	3.0508	472	1947 à 2018
SAYAT_SAPC	63417001	45.8396	3.0451	550	1993 à auj.
CLERMONT-FD	63113001	45.7868	3.1493	331	1923 à auj.
FONTAINE-DU-BER_SAPC	63263005	45.7995	2.9916	971	1930 à auj.
PLAUZAT_SAPC	63282001	45.6323	3.1336	503	1995 à auj.
ST-GENES-CHAMPE	63346001	45.4175	2.7236	1010	1951 à 2020
ST-GERVAIS-D AU	63354004	46.0326	2.8038	705	1964 à date

Données hydrodynamiques

Les débits des sources de front de coulée sont mesurés en continu (au moins toutes les heures) aux stations hydrométriques exploitées et gérées par la DREAL (https://www.hydro.eaufrance.fr/stationhydro, Tableau 3). Ces stations sont situées aux trois principaux exutoires du système aquifère : Gargouilloux, Chapelle (/St

PROJET

Genest) et la Pale. La source de la Chapelle/St Genest est surveillée depuis 1975, tandis que les deux autres sont instrumentées depuis 2010.

Les données sur le niveau des eaux souterraines mesurés dans les piézomètres (Tableau 3) sont issues de la Banque de de données du sous-sol (BSS) accessible sur le site infoterre.fr du BRGM (https://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss). Les ouvrages concernés par cette étude sont les suivants (Figure 3) : P1/Maar, P10, Latia, N27.

L'impluvium de Volvic fait l'objet de prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau potable AEP depuis 1929 et pour des usages industriels, dont l'embouteillage depuis 1965. Les volumes prélevés (tous usages confondus) sont de 225 $L.s^{-1}$, valeur relativement constante depuis 2005. On note des variations saisonnières liées aux besoins et à la consommation d'eau. Pour l'AEP, les données utilisées sont celles de la galerie du Goulet et sont fournies par le SMUERR (Tableau 3). Les données n'étant pas parfaitement fiables jusqu'en 2014, est utilisé jusqu'à cette date un volume moyen de 162 $L.S^{-1}$, correspondant à la valeur moyenne initiale depuis le creusement de la galerie (entre 160 et 165 $L.s^{-1}$). De 2014 à 2023, les données ont gagné en fiabilité tout en gardant une incertitude de plusieurs dizaines de litres par seconde. Le site du Goulet était équipé d'un capteur de débit qui a été remplacé en 2023 par un équipement plus performant (en raison de la possible influence du réservoir de stockage sur la mise en charge de la conduite où le débit était mesuré). Il est à noter que le débit mis en production est inférieur à ce débit mesuré, le trop-plein est rejeté dans le ruisseau du Viallard et sort du bassin versant. Les autres volumes extraits pour l'AEP (M.Marcenat par exemple avec un débit de 2.6 $L.s^{-1}$ en 2020-2021, source DDT 63) n'ont pas été pris en compte dans notre étude car considérés comme négligeables par rapport aux prélèvements de la galerie du Goulet.

La Société des Eaux de Volvic prélève dans les forages suivants (Tableau 3, Figure 3).: Clai. (Clairval), Aub. (Aubignat), Arv S. (Arvic Sud), Arv. (Arvic), Volv E. (Volvillante Est). Les prélèvements ont été mis en place progressivement depuis 1965 (Figure 5). Entre 1965 et 1992, les données de prélèvements correspondent aux autorisations de prélèvements. A partir de 1992, les débits sont mesurés au pas de temps mensuel jusqu'en 2002, puis journalier jusqu'en 2024. En 2023, l'ensemble des prélèvements de la SEV s'élevaient à 73 $L.s^{-1}$. La SEV fournit également, à partir de 2002, les niveaux piézométriques de chacun d

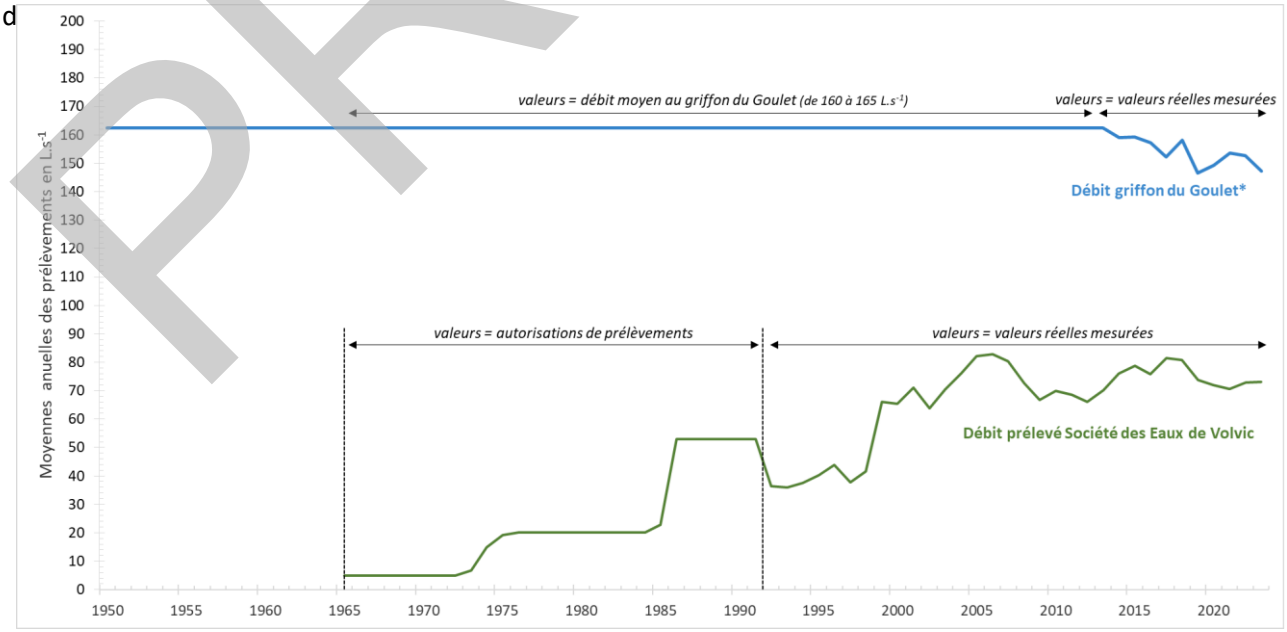


Figure 5: Moyennes annuelles des prélèvements AEP Goulet et de la Société des eaux de Volvic de 1950 à 2023 sur l'Impluvium de Volvic.

PROJET

Données hydrochimiques

Les mesures in situ des paramètres physico-chimiques ont été réalisées à l'aide d'un multiparamètre portable PONSEL ODEON® équipé d'une sonde de pH et d'un capteur de conductivité à 4 électrodes (2 en graphite, 2 en platine) avec une précision de 0,1 unité pH et de 1 % EC. Des sondes CTD-Diver (série DI28x - vanEssen) sont également utilisées pour mesurer la conductivité électrique (avec une précision de ± 2 %) et la température (± 0,1 °C) à haute fréquence (toutes les heures) aux points suivants : Maar, P10, M.Marc, Gou, Garg, Chap, Pal et Mars. Le BRGM fournit des mesures de CE et de température pour les points Lat. et N27 mesurées avec des sondes OTT-CTD (Hydromet) avec des précisions de ± 1,5% EC et ± 0,1°C.

L'échantillonnage comprend un total de 43 échantillons d'eau prélevés sur 15 points de l'impluvium de Volvic au cours de 3 campagnes de terrain menées en juin 2022, octobre 2022 et février 2023. Les sites d'échantillonnage sont répartis en 3 groupes : impluvium amont (Maar, P10, M.Marc, Lat., N27), milieu de l'impluvium (Clai., Aub., Gou, Arv., Arv S., Volv E.), et impluvium aval (Garg., Chap., Pal., Mars.). Des analyses des paramètres physico-chimiques, des éléments majeurs et des isotopes stables de l'eau ($\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$) ont été réalisées pour chacun des 43 échantillons. Des analyses de tritium (^{3}H), de chlorofluorocarbones (CFC-SF6) et de gaz nobles dissous ont été réalisées pour les échantillons prélevés lors des campagnes d'octobre 2022 et de février 2023 ; la première campagne de juin 2022 sert de campagne exploratoire pour évaluer la faisabilité de l'échantillonnage des CFC-SF6. Le tritium a été analysé pour 15 points de prélèvement, représentant 30 échantillons. Les analyses de chlorofluorocarbones et de gaz dissous ont été effectuées sur des points de prélèvement sélectionnés en fonction de la faisabilité de la procédure d'échantillonnage. Ainsi, 10 (octobre 2022) et 11 (février 2023) points de prélèvement ont été sélectionnés, soit 21 échantillons au total.

Ions majeurs

Pour l'analyse des ions majeurs, les échantillons ont été collectés dans des flacons en polyéthylène préalablement rincés 3 fois avec l'eau collectée. Ils sont filtrés à 0,22 µm et ensuite stockés en chambre froide avant analyse. Les analyses ont été effectuées au Laboratoire Chrono-Environnement (UMR 6249), Université de Franche-Comté. Les concentrations en cations sont déterminées par spectroscopie d'absorption atomique (AA 100 PerkinElmer) avec limites de détection de 0,5, 0,1, 0,01 et 0,1 mg L^{-1} pour Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} et K^{+}, respectivement. Les concentrations en anions sont déterminées par chromatographie en phase liquide à haute performance (Dionex DX 100) avec des limites de détection de 0,1, 0,1 et 0,05 mg L^{-1} pour Cl^{-}, SO_4^{2-} et NO_3^{-}, PO_4^{3-}, respectivement. Les concentrations en HCO_3^{-} sont déterminées, avec une précision de 1 %, par titrage acide (N/50 H_2SO_4) dans les 48 heures suivant l'échantillonnage. La concentration en silice dissoute a été analysée à l'aide d'un spectrophotomètre (Spectroquant, Pharo 300, Merck) avec une précision de 3%. Seules les analyses dont la balance ionique inférieure à 10 % ont été prises en compte.

Isotopes stables de la molécule d'eau

Les 43 échantillons des eaux souterraines de l'impluvium ont été prélevés dans des piluliers en verre ambré de 20 ml munies d'un bouchon hermétique, remplies totalement sans bulle d'air. En parallèle, afin de déterminer les teneurs en isotopes stables dans les eaux de pluie de l'impluvium, un pluvio-collecteur dédié à ce type de mesures Palmex RS1 a éte mis en place en complément de la station météorologique, sur le site de M.Marc. à l'altitude 761 mNGF. L'échantillonnage des eaux de pluie a été réalisé en juin 2022, juillet 2022, septembre 2022, octobre 2022, novembre 2022, décembre 2022, mars 2023 et mai 2023. Les analyses en $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ ont été réalisées au Département d'Hydrogéologie de l'Université de Corse, France (CNRS UMR 6134),

PROJET

à l'aide d'un spectromètre infra-rouge DLT-100 (Los Gatos Research) selon le schéma analytique recommandé par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (Penna et al., 2010). Les valeurs sont présentées en unités par millier (‰) par rapport à la norme Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). La qualité de l'analyse isotopique a été vérifiée à l'aide d'un écart-type allant jusqu'à 0,1‰ pour le $\delta^{18}O$ et jusqu'à 1‰ pour le $\delta^{2}H$.

Tritium

Les échantillons d'eau pour l'analyse du tritium ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1L. Les analyses sont effectuées au laboratoire Hydroisotop GmbH par spectrométrie à scintillation liquide (LSC) après concentration par électrolyse. Les mesures sont données en unités tritium (UT) avec un écart-type de 1 UT.

Chlorofluorocarbones (CFC-SF_6) et gaz nobles (dissous)

Les échantillons pour les analyses en CFC (CFC-11, CFC-12 et CFC-113) et SF6ont été prélevés dans des ampoules en acier inoxydable de 40 ml et 300 ml, respectivement, préalablement rincées 3 fois. L'échantillonnage doit se faire sans aucun contact avec l'air. L'eau destinée à l'analyse des gaz rares a été prélevée dans des bouteilles en verre de 500 ml selon le même protocole. L'échantillonnage dans les forages équipés de pompes a été effectué directement au robinet d'eau brute le plus proche de la tête de puits (avant traitement ou réservoir de stockage) afin de minimiser le risque de contamination. Dans les autres forages, l'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'une pompe immergée. L'échantillonnage est réalisé après purge du de l'ouvrage, quand les valeurs des paramètres physico-chimiques sont stabilisées. Pour les sources, l'échantillonnage a été réalisé au point d'émergence, là où le débit est maximal, à l'aide d'une pompe immergée.

Les analyses ont été réalisées au Laboratoire Géosciences Rennes, France (Plateforme CONDATE EAU) rapidement prélèvement. Les analyses en CFC-SF6 ont été réalisées selon la méthodologie décrite dans Labasque et al. (2006) et Ayraud et al. (2008) à l'aide d'un GC-ECD (Perkin- Elmer) à purge et à piège (Busenber & Plummer, 1992). Les concentrations en CFC et SF6 dans les eaux souterraines ont été obtenues en dégazant des échantillons d'eau par stripping au N_2. Les gaz sont piégés dans un tube en acier inoxydable rempli de Porasil C et maintenu à -100 °C dans un bain d'éthanol. Après 10 minutes de préconcentration, le piège est versé dans de l'eau bouillante pour effectuer la désorption des gaz. Les gaz sont ensuite injectés dans un chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur à capture d'électrons (GC-ECD). Avant de commencer toute analyse, un étalonnage avec un standard (air du Groenland calibré par la NOAA) est nécessaire. Un blanc du système a également été réalisé avant chaque série d'analyses. L'incertitude analytique est estimée à 5 % pour les CFC et le SF6. Ainsi, l'incertitude globale sur l'âge, incluant l'échantillonnage, l'analyse, la sélection de la température de recharge dans la loi de Henry, et les effets de dispersion et d'adsorption, est estimée à ± 10 %. Les limites de détection sont de 0,06 fmol/L pour le SF6, 0,05 pmol/L pour le CFC-11, 0,02 pmol/L pour le CFC-12 et 0,015 pmol/L pour le CFC-113. Les concentrations en CFC et SF6 sont ensuite converties en pression partielle atmosphérique (pptv) pour être interprétées plus facilement. La conversion a été effectuée à l'aide des fonctions de solubilité pour le CFC-11, le CFC-12, le CFC-113 et le SF6 fournies respectivement par Warner et Weiss (1985), Bu et Warner (1995) et Bullister et al. (2002). Les résultats obtenus dépendent de la température de recharge, de l'altitude et de l'excès d'air (Darling et al., 2012). Ces paramètres seront détaillés la partie « résultats ».

Les gaz rares ont été analysés à l'aide d'un système de chromatographie en phase gazeuse équipé d'un détecteur de conductivité thermique (micro-GC-TCD). Les gaz ont été extraits par extraction de l'espace de

PROJET

tête avec une phase He. Ils ont ensuite été mesurés à l'aide d'un micro-chromatographe en phase gazeuse (GC 3000, SRA instrument). L'incertitude est d'environ 3% pour les mesures de Ne (eau en équilibre avec l'air à 12°C) et de moins de 2% pour Ar. Cette analyse permet de déterminer le rapport Ne/Ar, de calculer la contribution de l'excès d'air et la température de recharge. La température d'excès d'air et la température de recharge sont dérivées des mesures d'Ar et de Ne (Labasque et al., 2006 ; Ayraud et al., 2008). Les calculs de l'excès d'air sont utilisés pour corriger le SF6 qui peut être fortement influencé par cet excès, contrairement aux CFC (Maiss et Brenninkmeijer, 1998 ; Plummer et al., 2001 ; Vittecoq et al., 2007 ; Ayraud et al., 2008).

La distribution apparente des âges des eaux souterraines a été évaluée en implémentant les données CFC et ^{3}H dans le classeur excel TracerLPM (version 1.1, (Jurgens et al., 2012 - révisé en mars 2014), disponible auprès de l'U.S. Geological Survey et suivant les lignes directrices de l'AIEA « Use of Chlorofluorocarbons in Hydrology » (Plummer et al., 2006). Quatre modèles ont été testés pour déterminer les temps de séjour de tous les échantillons : Piston Flow Model (PFM), Exponential Mixing Model (EMM), Binary Mixing Model (BMM) et Exponential Piston Model (EPM).

PROJET

MODELE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

II.1 SYNTHESE GEOLOGIQUE

Dans un premier temps, une amélioration du modèle géologique de Rouquet et al. 2012 a été réalisée (Figure 6) en compilant de nouvelles observations géologiques de terrain avec les cartes géologiques et les logs de forage issus de la bibliographie. Les trois coupes transversales permettent de définir l'empilement des coulées volcaniques, notamment dans la partie aval de l'impluvium. Les données piézométriques mettent en évidence une connexion hydraulique entre les différentes coulées de lave définissant de fait une masse d'eau unique ; un niveau piézométrique général peut donc être tracé. Il est néanmoins probable que des circulations préférentielles puissent exister au sein des coulées de lave en raison des propriétés hydrodynamiques contrastées du remplissage volcanique (Joux, 2002).

PROJET

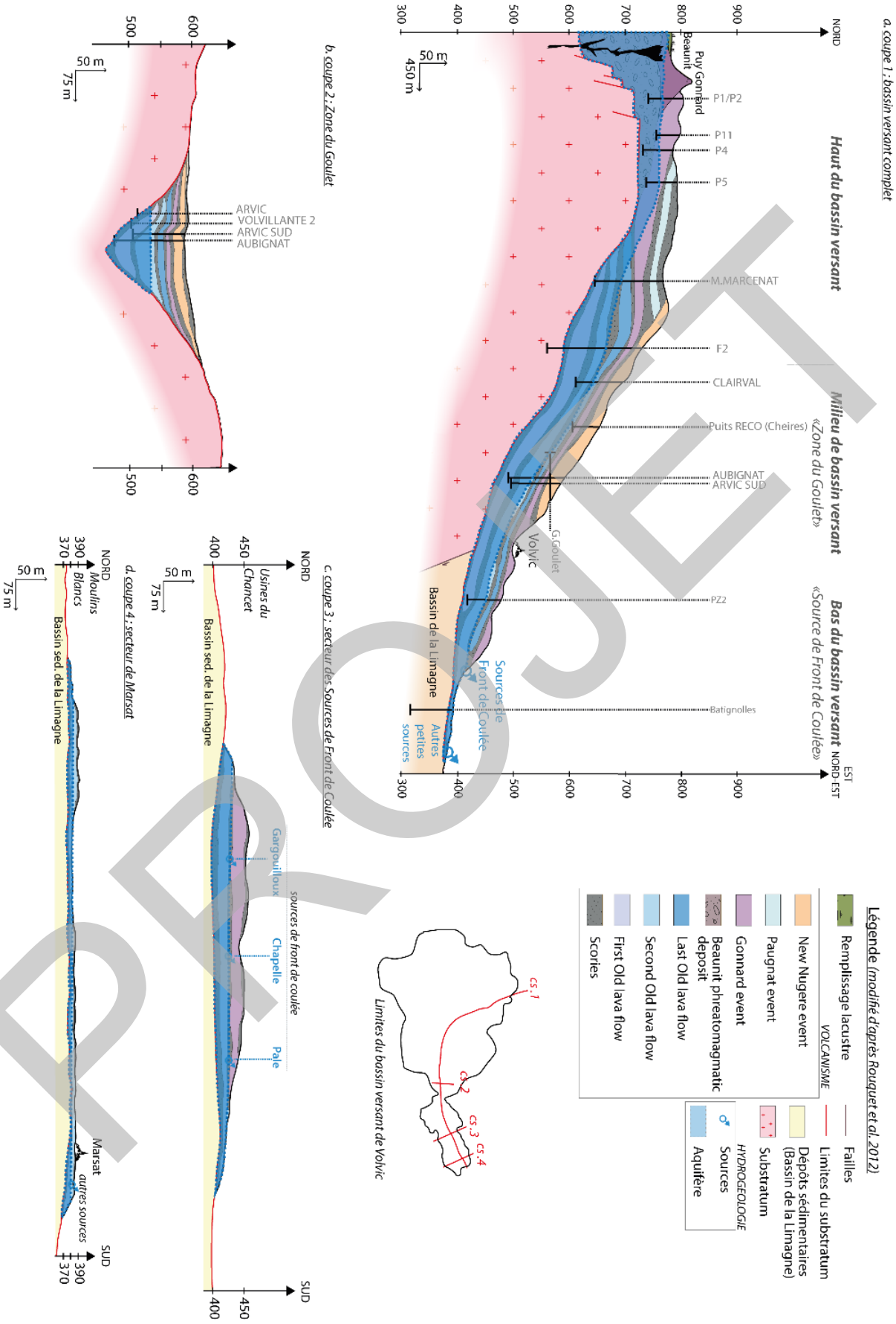


Figure 6 : Géologie du bassin versant de Volvic. a. coupe Nord-Est (cs.1) b. c. et d. coupes Nord-Sud depuis le milieu de l'impluvium (cs.2) vers la partie avale à l'extrémité est (cs.4).

PROJET

II.2 SYNTHESE CLIMATIQUE

Les bases de données disponibles (Météo-France) fournissent 70 ans de données de précipitation et de température pour l'impluvium de Volvic. Il n'y a pas d'évolution notable de la quantité de précipitations annuelles entre 1950 et 2024. La moyenne annuelle des précipitations est de 726 ± 120 mm (Figure 7). La recharge annuelle moyenne (calcul précisé dans la partie « spatialisation de la recharge) sur la période 1950-2023 est de 227 ± 92 mm, ce qui représente 30 % des précipitations totales.

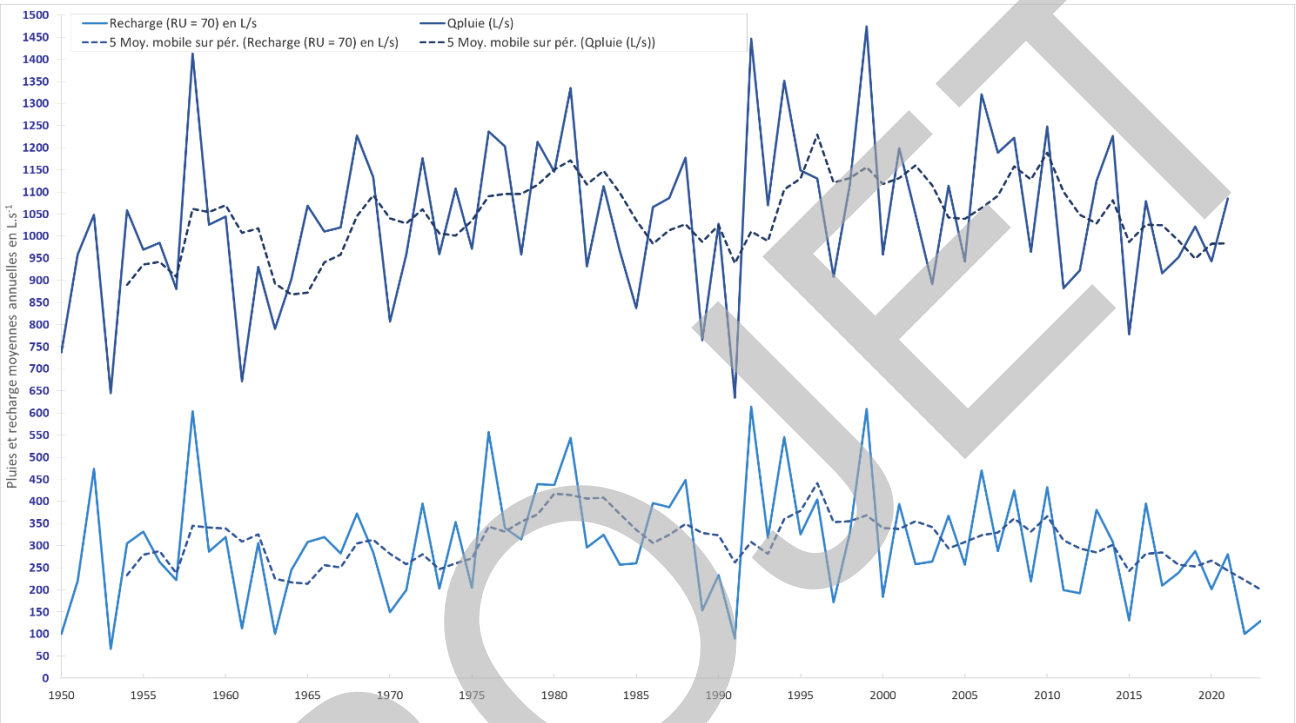


Figure 7 : Evolution des précipitations brutes et de la recharge (moyennes annuelles) sur la période 1950-2023 sur l'Impluvium de Volvic (station VOLVIC - Météo-France). Les lignes pointillées correspondent aux moyennes glissantes sur 5 ans.

La répartition des précipitations au cours des saisons devient plus homogène (Figure 8).

PROJET

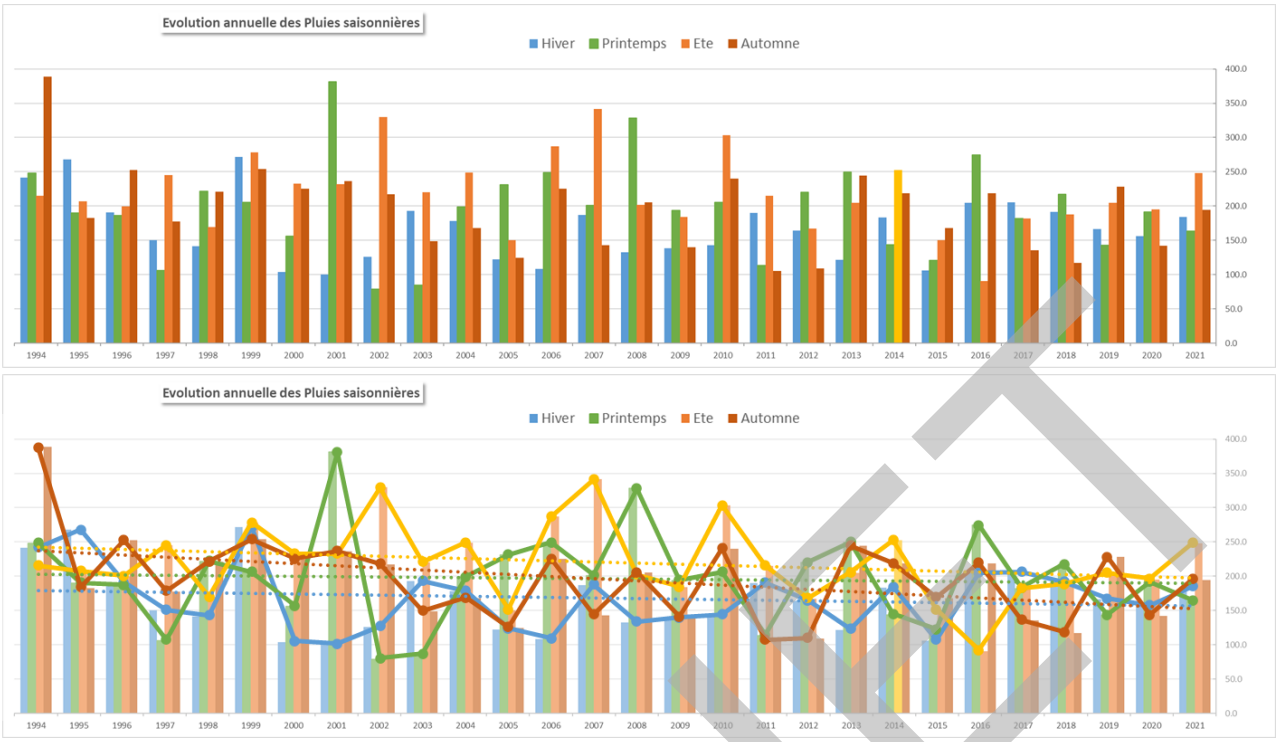


Figure 8 : Evolution annuelle des pluies saisonnières sur l'Impluvium de Volvic - Station météorologique de Sayat_SAPC.

La température montre une augmentation de 1°C à partir des années 1970, en accord avec les conclusions du GIEC dans son sixième rapport d'évaluation (AR6-IPCC, 2021b). La recharge, en parallèle de l'augmentation des températures, diminue à partir des années 1980 (Figure 9).

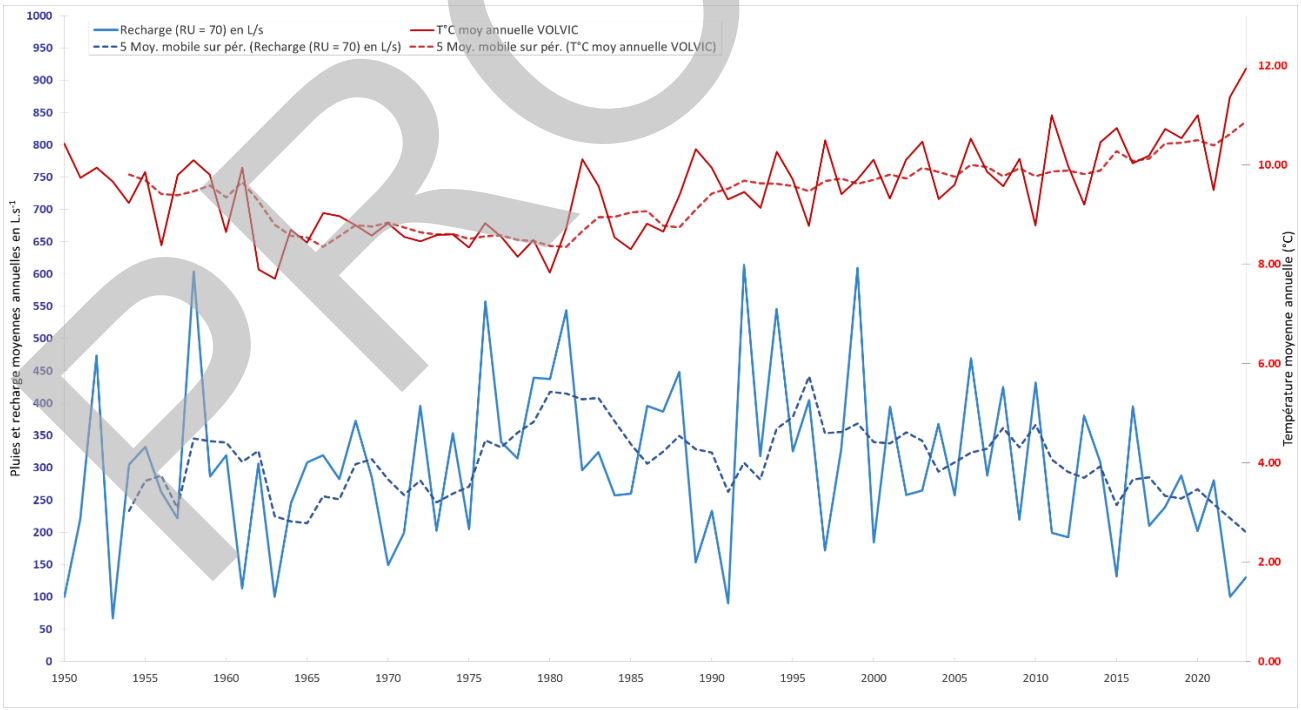


Figure 9 : Evolution de la température moyenne annuelle et de la recharge (moyennes annuelles) sur la période 1950-2023 dans le secteur de l'Impluvium de Volvic (station VOLVIC - Météo-France). Les lignes pointillées correspondent aux moyennes glissantes sur 5 ans.

PROJET

La Figure 10 illustre l'augmentation des températures moyennes annuelles et montre l'accentuation du phénomène au cours des dernières années avec des valeurs supérieures à la moyenne depuis 2010.

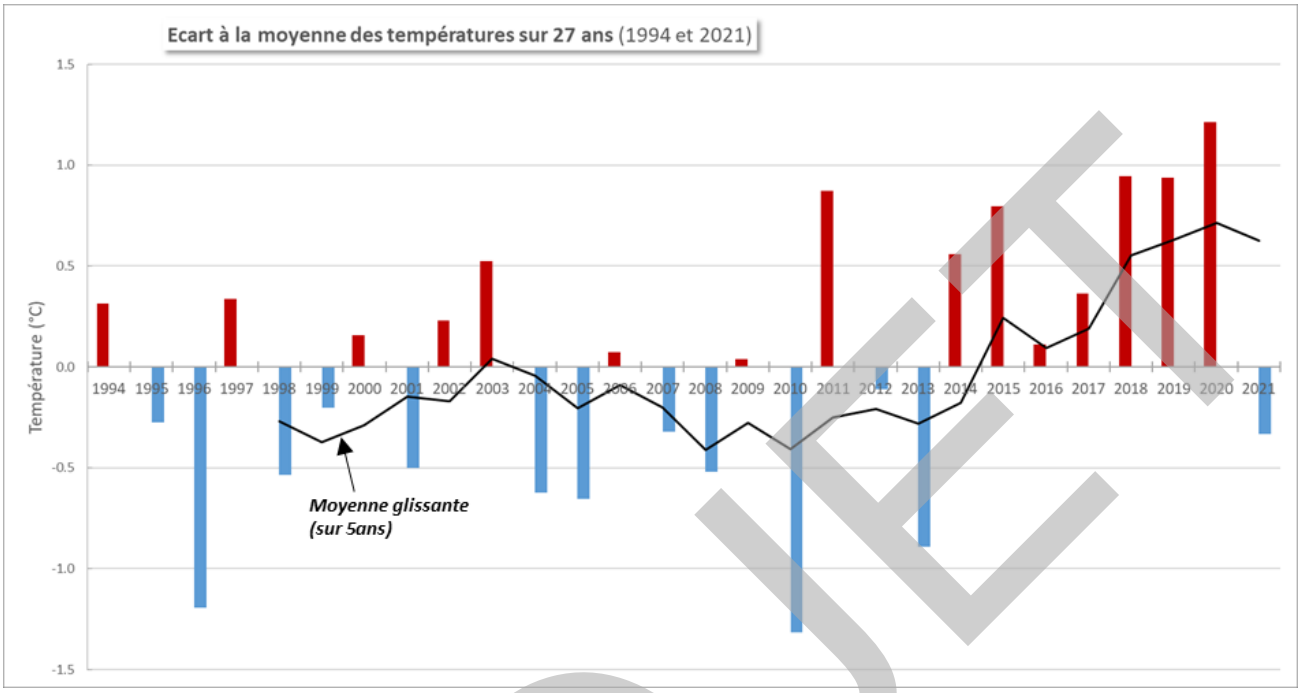


Figure 10 : Ecart à la moyenne (1994-2021) des températures moyennes annuelles sur l'Impluvium de Volvic.

Spatialisation de la recharge

La recharge est déterminée à partir de la feuille de calcul ESPERE du BRGM (Lanini et al. 2015). Cette dernière permet de tester simultanément plusieurs méthodes de calcul de la recharge, rendant le résultat plus robuste. Dans notre étude, la recharge correspond à la moyenne (Figure 12) des recharges obtenues par 5 méthodes (Figure 11. Ce travail d'estimation de la recharge par la feuille de calcul ESPERE a été appliqué aux stations du Tableau 4, les résultats sont présentés en annexe 2 de ce rapport.

PROJET

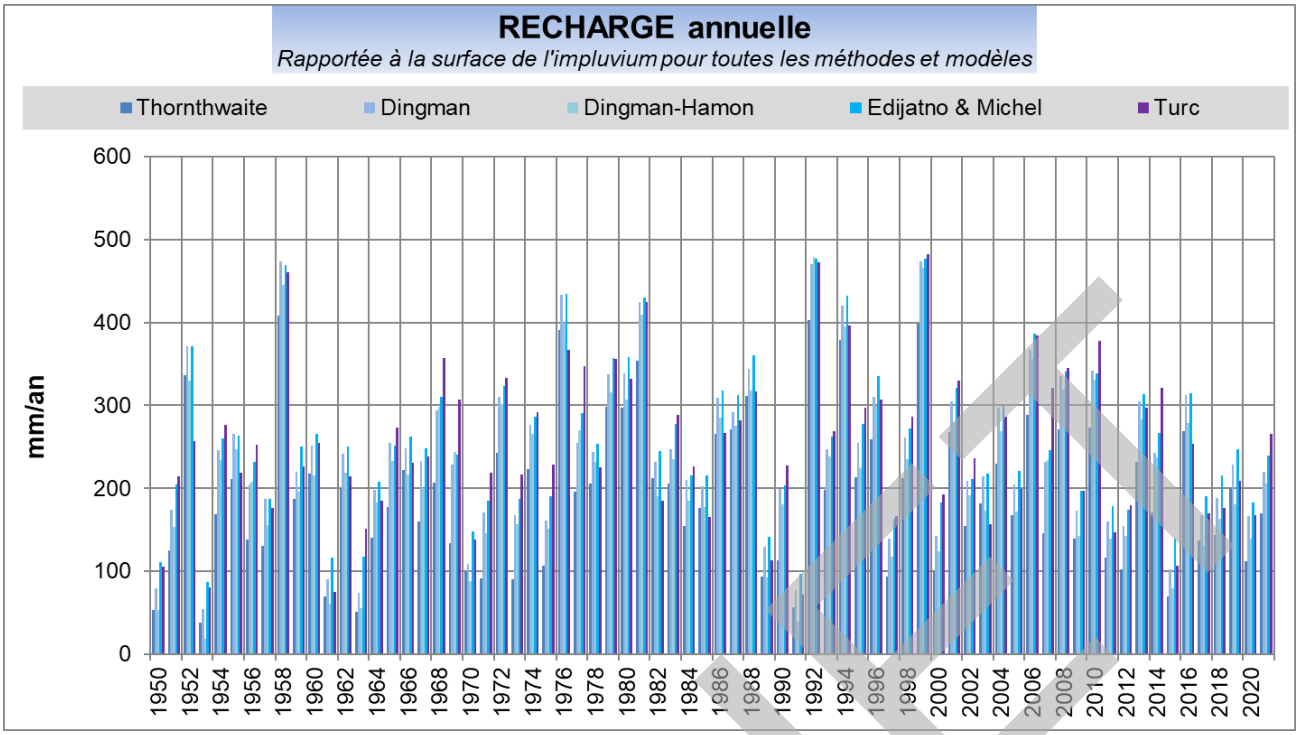


Figure 11 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic par méthode de calcul (d'après ESPERE®) sur la période 1950-2021.

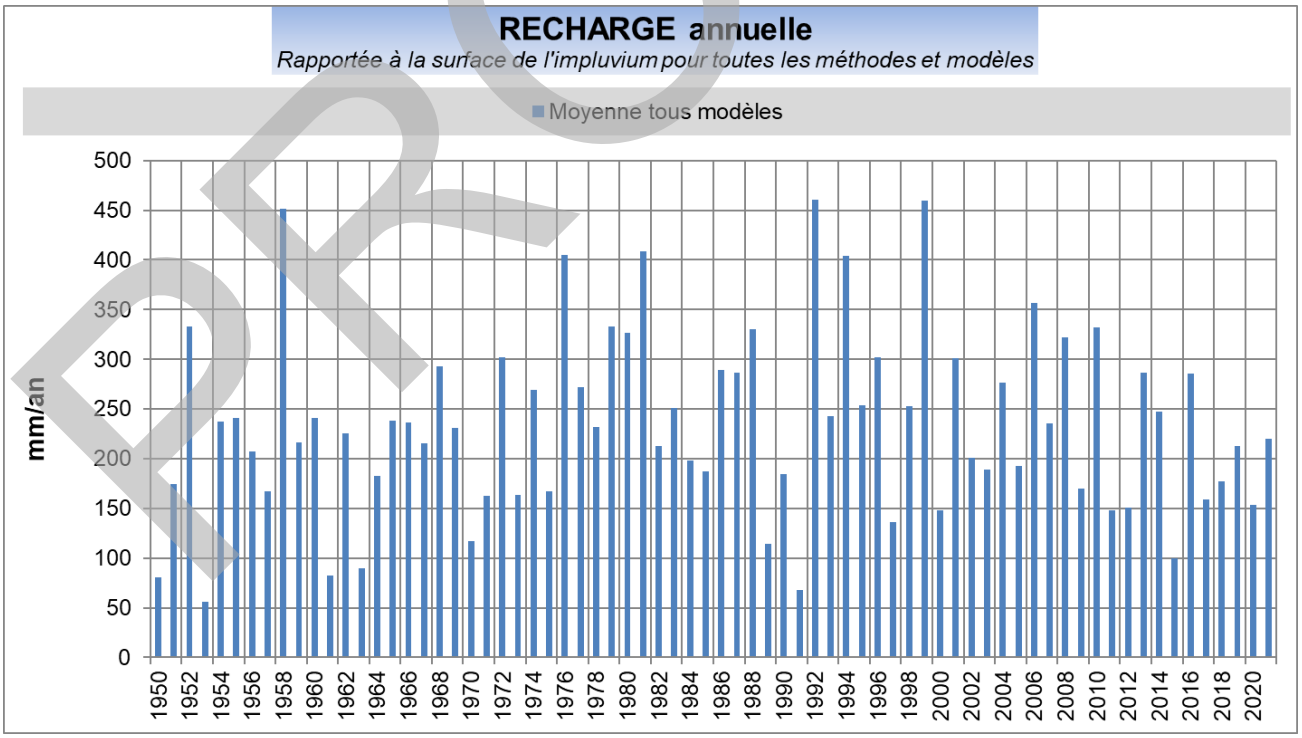


Figure 12 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1950-2021.

PROJET

La figure 13 confirme la baisse de la recharge accentuée depuis 2014-2015.

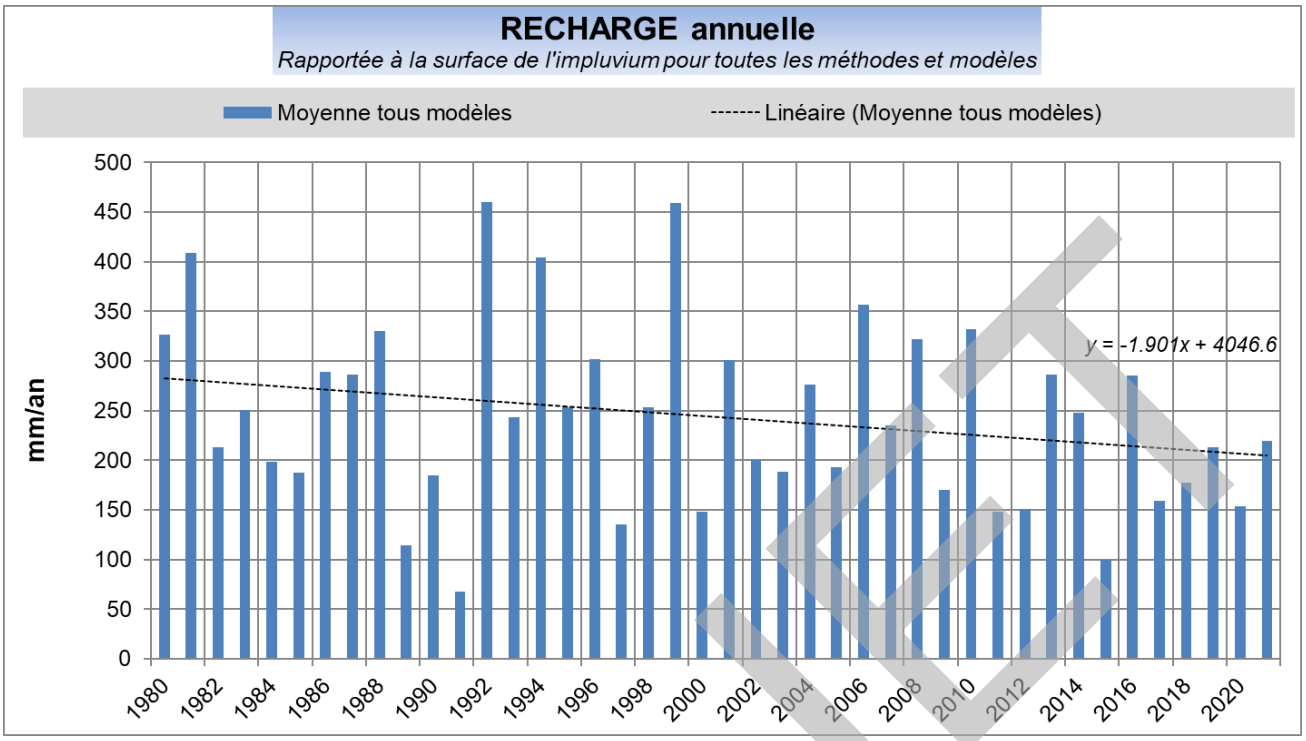


Figure 13 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1980-2021.

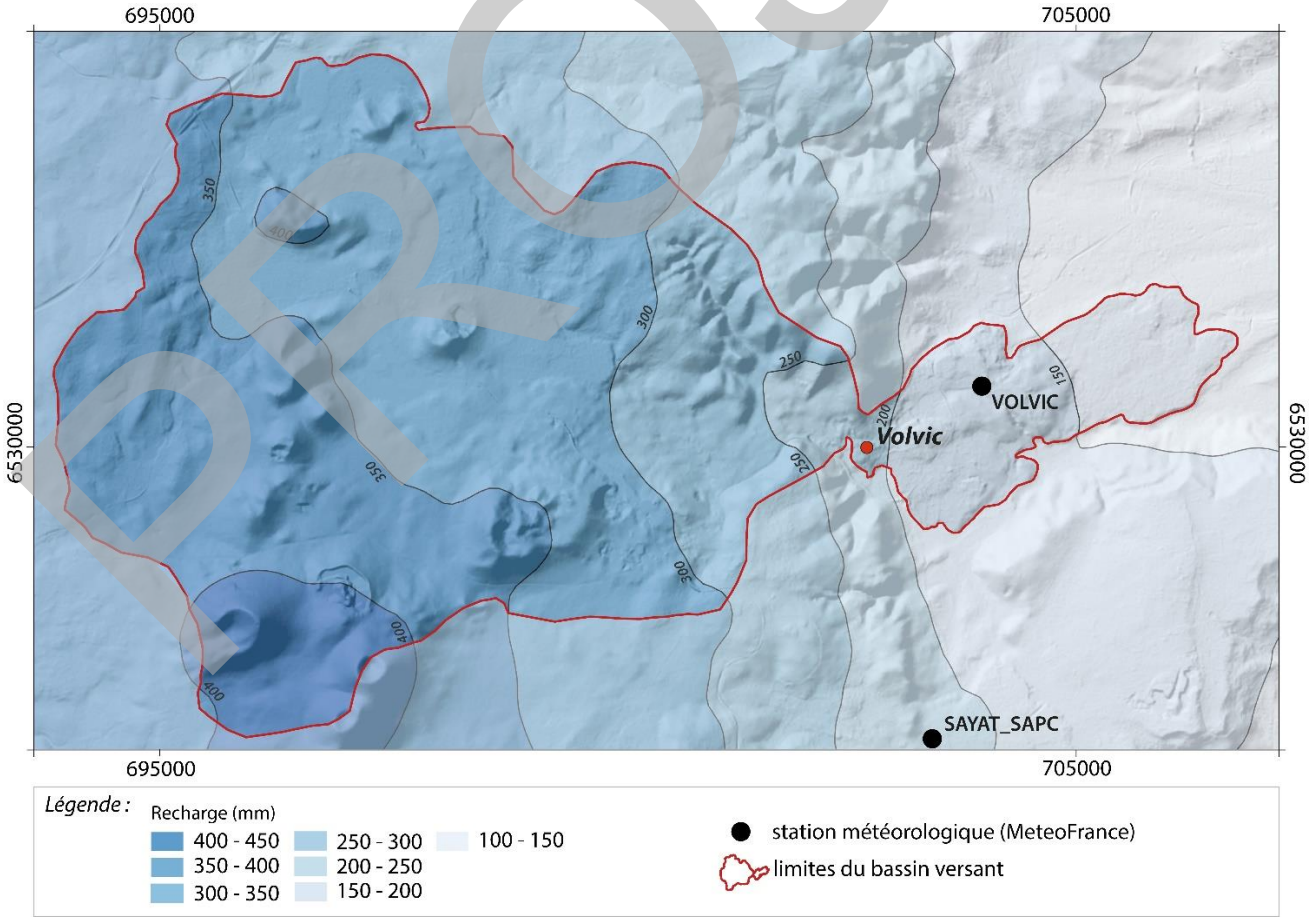


Figure 14 : Carte de la recharge spatialisée sur l'impluvium de Volvic sur la période 2000-2021.

PROJET

La spatialisation de la recharge (Figure 14) met en évidence un fort gradient altitudinal avec des valeurs jusqu'à 2 fois plus élevées dans la partie amont de l'impluvium (> 800 mNGF) par rapport à la partie avale (< 500 mNGF), soutenant les conclusions de Joux (2002) et Bertrand (2009) qui affirment que ce sont les zones d'altitude les plus élevées de la Chaîne des Puys (> 800 mNGF) qui contribuent majoritairement à la recharge des aquifères volcaniques. Le gradient altitudinal de recharge est de 42 mm/100 m pour la période 2000-2021.

II.3 SUIVI HYDRODYNAMIQUE

Débit des Sources de Front de Coulée

La Figure 15 illustre l'évolution des débits pour chacun des exutoires du système, à savoir les sources de la Chapelle/St Genest, la Pale et Gargouilloux. La source de la Chapelle/St Genest est monitorée depuis 1975 alors que les deux autres, Pale et Gargouilloux, ne sont instrumentées que depuis novembre 2010. Cependant la bonne corrélation entre les débits de ces exutoires (R^2=0.8, Figure 16) permet de reconstituer les débits de 1975 à novembre 2010 pour l'ensemble Pale + Gargouilloux et donc d'avoir un débit global pour l'ensemble des sources de front de coulée (Figure 17).

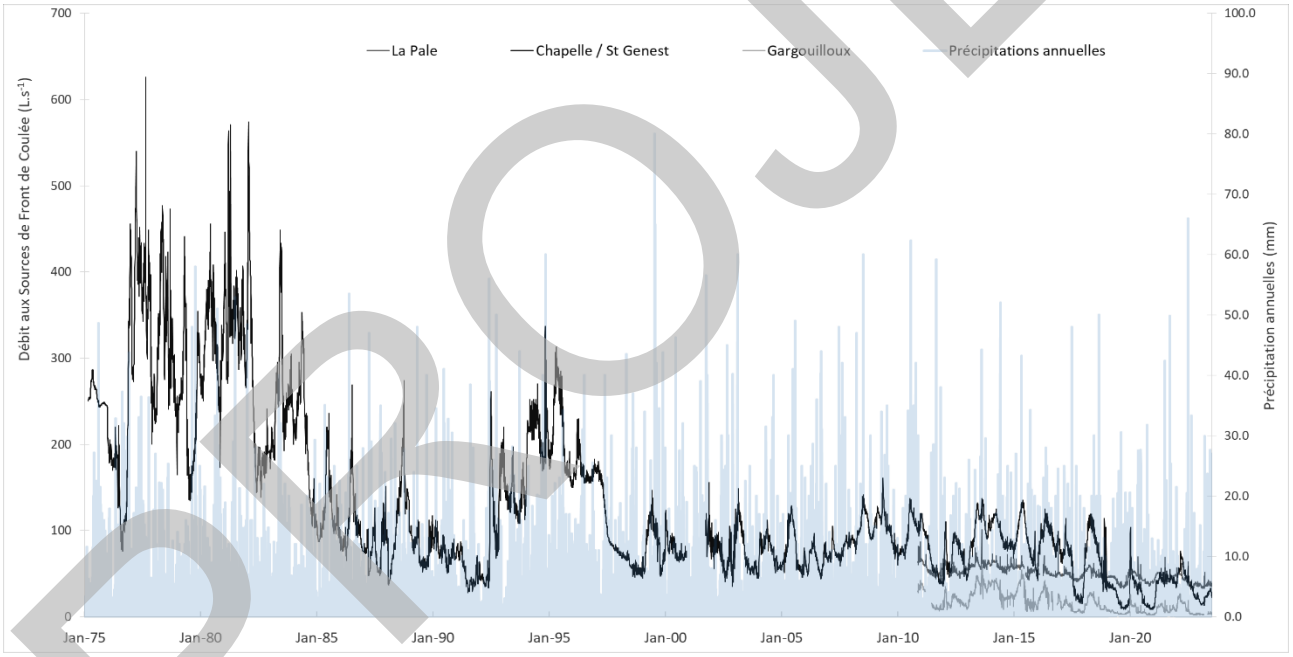


Figure 15 : Précipitations mensuelles (mm) à la station météorologique de Volvic et débit mensuel (L.s^{-1}) à chaque source de front de coulée de 1975 à 2023.

Le débit des sources de front de coulée diminue progressivement de 1975 (moyenne de 457 L.s^{-1} entre 1975 et 1980) à 2023, avec une valeur moyenne de 58 ± 11 L.s^{-1} (Figure 17). La période 2014-2015 marque le début d'une baisse plus prononcée des débits. De 2017 à 2023, les périodes d'étiage deviennent plus sévères, le mois d'août 2019 présentant les valeurs les plus faibles (40 L.s^{-1}) de la période. Il n'y a pas de véritable période d'étiage en 2021-2022, tandis qu'en 2023, il n'y a pratiquement pas de période de hautes eaux. Le suivi des débits réalisé durant la période d'étude montre que les variations de débits et les événements pluvieux sont simultanées.

PROJET

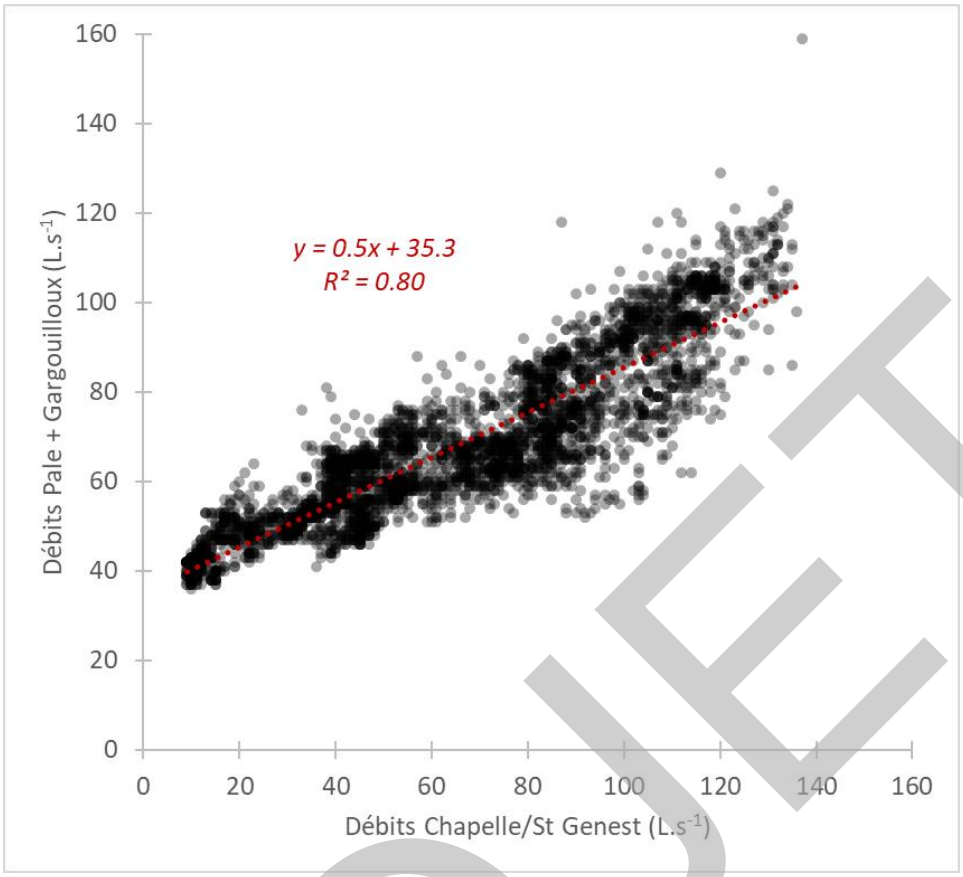


Figure 16 : Corrélation entre le débit de la source Chapelle/St Genest et la somme des débits des sources Pale et Gargouilloux.

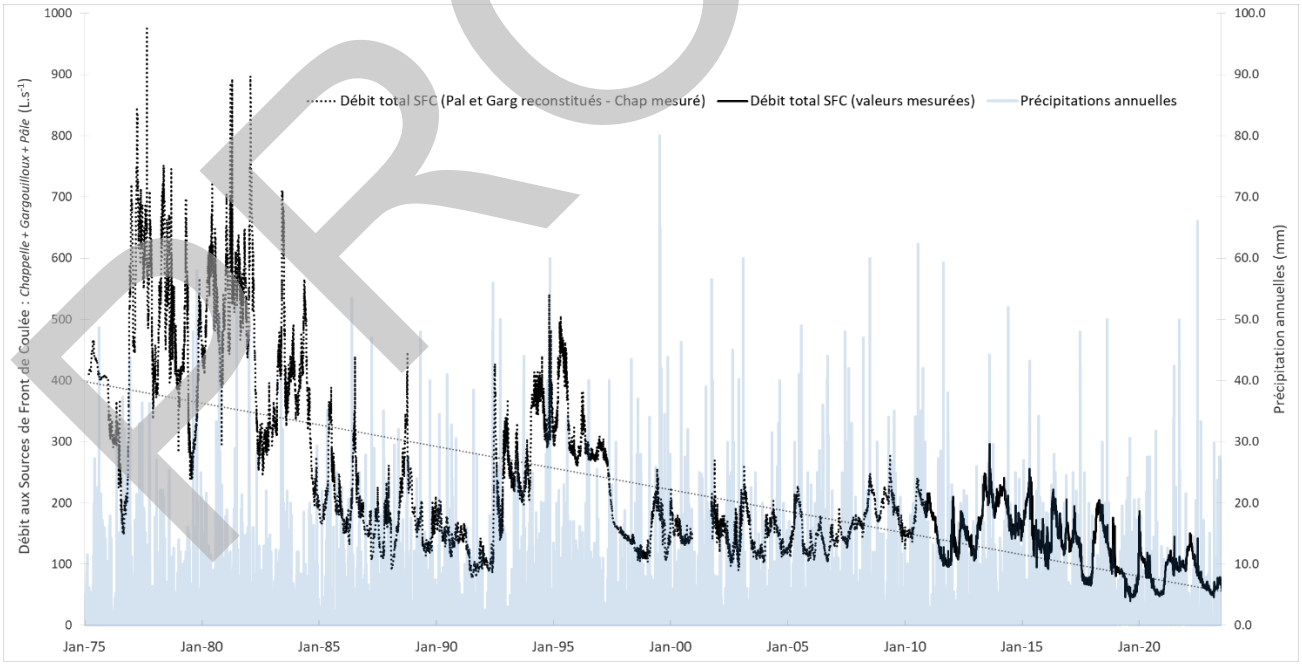


Figure 17 : Précipitations mensuelles (mm) à la station météorologique de Volvic et débit mensuel total (cumul des trois sources, en L.s^{-1}) aux sources de front de coulée de 1975 à 2023. La section en pointillés correspond au débit total basé sur l'estimation des débits de la Pale et Gargouilloux sur la période 1975-2010. La régression linéaire des débits est matérialisée par une droite en pointillés.

PROJET

L'évolution des débits mesurés à la galerie du Goulet montre une saisonnalité (Figure 18). On note une baisse des débits, passant d'une moyenne de 159.2 $L.s^{-1}$ (±2.4) en 2014 à 146.7 $L.s^{-1}$ (±2.6) en 2022-2023, soit une diminution d'environ 12 $L.s^{-1}$ sur les 10 dernières années. Cette diminution est accompagnée d'une diminution des débits mis en distribution.

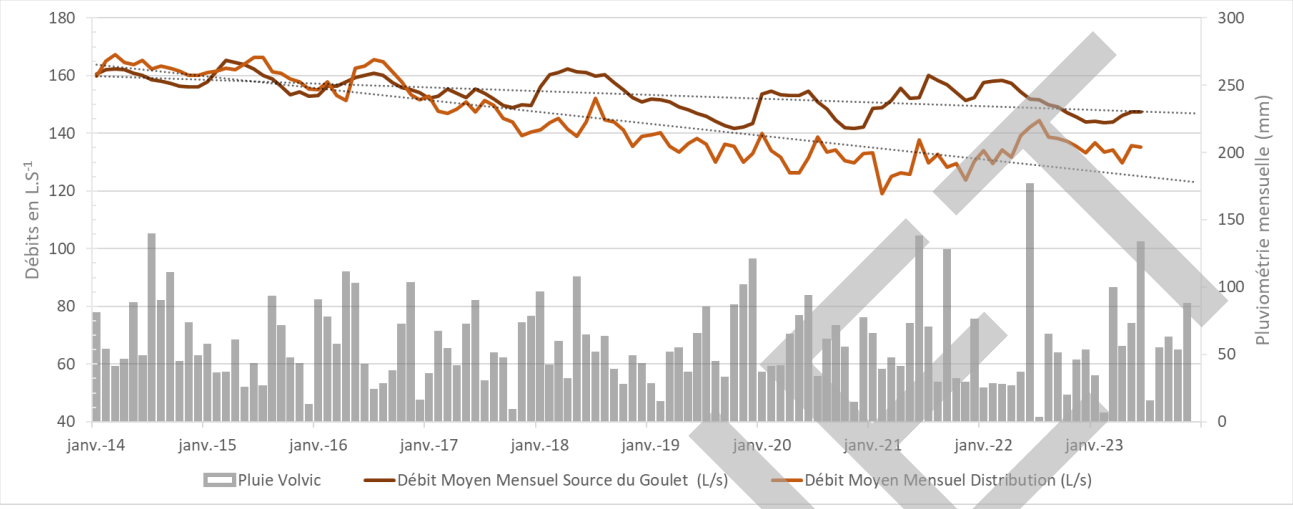


Figure 18 : Evolution des débits mesurés à la galerie du Goulet (Griffon) et débits mis en distribution. La régression linéaire est matérialisée par une droite en pointillés.

Le captage au griffon de la galerie du Goulet correspond à un « écrêtage » du toit de la nappe, ainsi les variations de débits mesurées peuvent également être assimilées à des variations de niveau de nappe dans ce secteur.

Piézométrie

Les Figures 19 et 20 présentent l'évolution des niveaux piézométriques aux points P1/Maar, P10, N27 et Latia et aux forages de la Société des Eaux de Volvic, respectivement. Pour l'ensemble des points de suivi, et en cohérence avec les observations précédentes sur les débits, les niveaux piézométriques mesurés montrent toujours une tendance à la baisse depuis 2009.

N27, malgré une tendance générale à la baisse des niveaux, présente une stabilité notable. Latia présente les mêmes caractéristiques avec quelques variations erratiques entre 2017 et 2021. P1/Maar et P10 sont plus réactifs, bien que le signal de P1/Maar soit atténué, et suivent une alternance de niveaux hauts et bas en réponse aux précipitations. Il est important de quantifier cette variabilité par rapport au volume de la masse d'eau total. Ainsi, l'apport d'eau par les précipitations ne représente que 18% au maximum de la masse d'eau total en cohérence avec les observations de Joux, 2002 et Rouquet, 2012 quant à l'influence des eaux de surface dans ce secteur. A P1/Maar, la variation de la hauteur d'eau est de 6,8 %.

Les ouvrages de la SEV sont également marqués par une baisse de piézométrie accompagnée pour la plupart d'une variabilité saisonnière (hautes eaux/basses eaux). Cette variabilité est liée à l'infiltration de l'eau de pluie et est simultanée pour l'ensemble des ouvrages, mais avec une amplitude variable selon le point considéré. Il est important de noter ici le faible taux de variabilité des niveaux de nappe, de l'ordre de quelques mètres, qui ne représentent pas plus de 16 % (Arvic Sud) de la hauteur totale de la nappe. Dans le reste des

PROJET

ouvrages (hors Arvic Sud) la variabilité du niveau de nappe durant la période d'étude ne dépasse pas les 9% et n'est que de 2.7% pour la plus faible.

Cette variabilité observée met en évidence l'existence d'une masse d'eau importante à laquelle les précipitations annuelles ne contribuent que pour 18% au maximum.

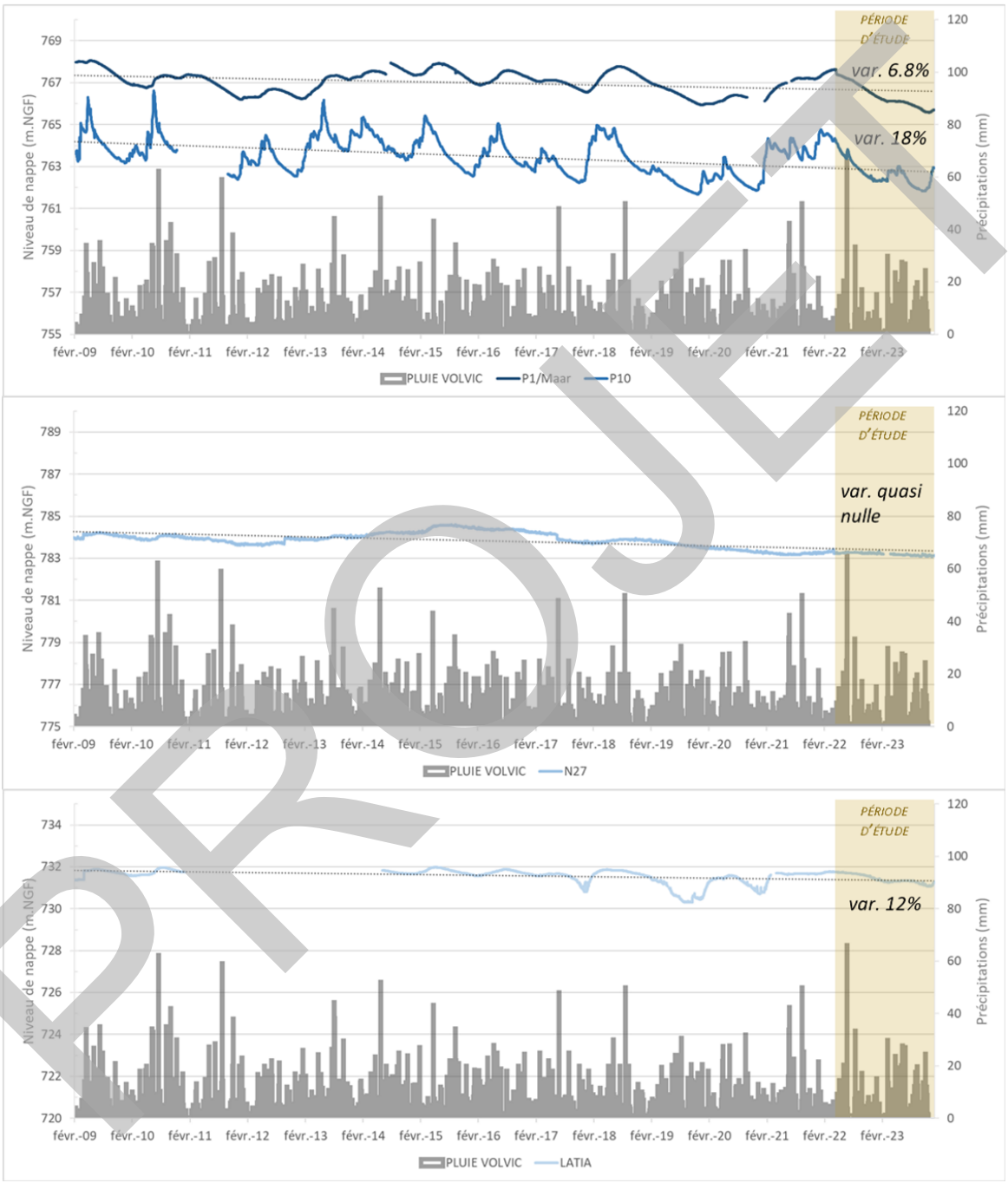


Figure 19 : Chroniques piézométriques aux points de suivi P1/Maar, P10, N27 et LATIA. Les lignes pointillés représentent la régression linéaire des courbes piézométriques. La variabilité maximale du niveau de nappe durant la période d'étude est indiquée en pourcents sur le graphique.

PROJET

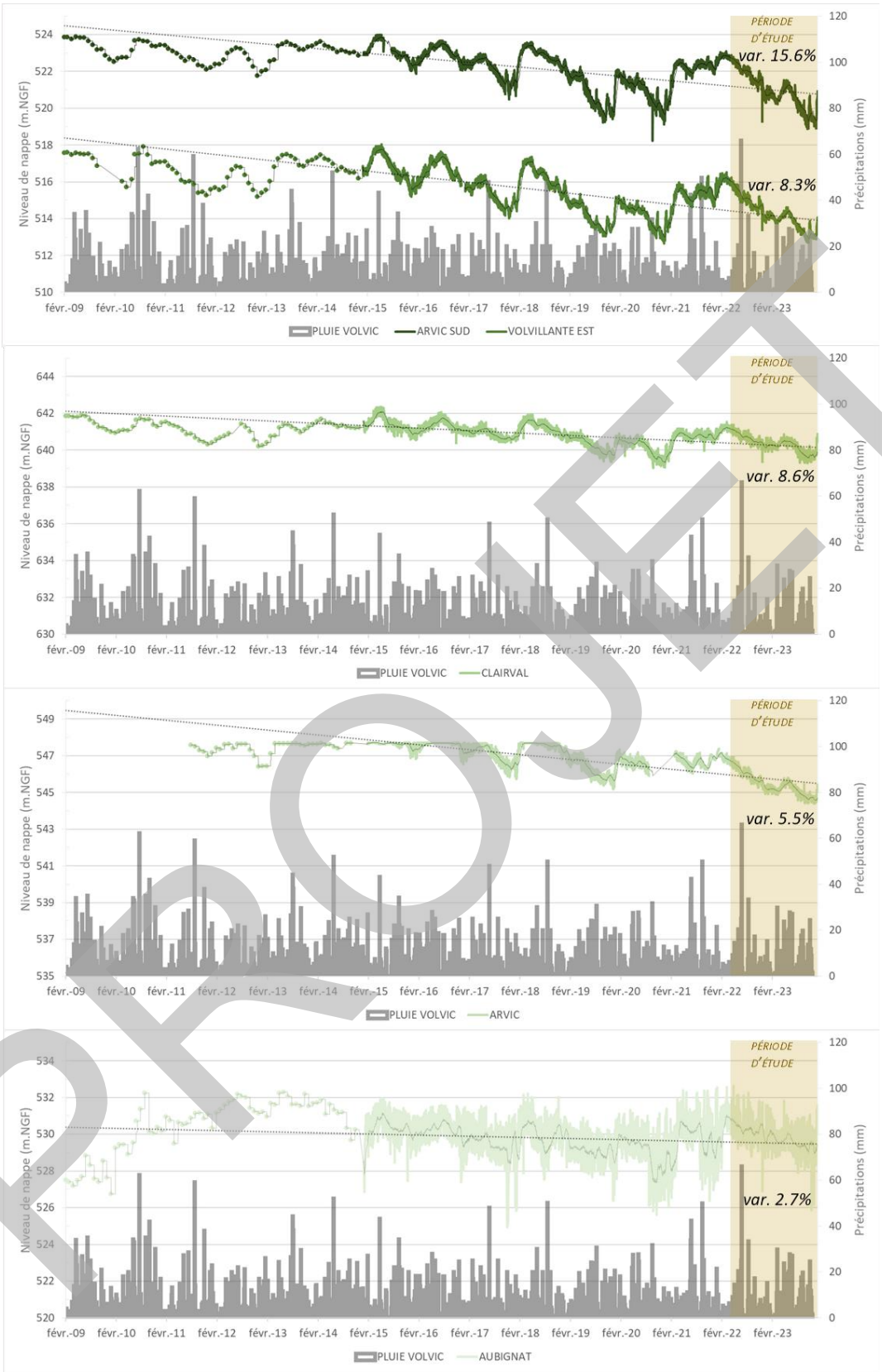


Figure 20 : Chroniques piézométriques aux points de suivi des forages de la Société des Eaux de Volvic : Arvic, Arvic sud, Volvillante est, Clairval et Aubignat. Les moyennes glissantes sur 30 jours sont tracées afin d'observer la tendance du niveau de nappe hors influence des pompages. Les lignes pointillés représentent la régression linéaire des courbes piézométriques. La variabilité maximale du niveau de nappe durant la période d'étude est indiquée en pourcentage sur le graphique.

PROJET

II.4 ANALYSES DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES ET DE LA COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES (ELEMENTS MAJEURS ET ISOTOPES)

La température moyenne des eaux souterraines pour les trois campagnes d'échantillonnage est de 9.9 ± 1°C, proche de la température moyenne annuelle de l'air enregistrée à la station météorologique de Volvic, 9.4°C pour la période 1959-2023, et des valeurs mesurées par les dispositifs CTD-diver installés aux points Maar, P10, M.Marc, Gou., Chap., Pal., et Garg. donnant une moyenne annuelle de 9.2°C dans les eaux souterraines. Le pH moyen est de 7 ± 0.3, proche de la neutralité. La conductivité électrique (CE) varie de 145 µS.cm-1 (en amont) à 266 µS.cm^{-1} (en aval) indiquant des eaux faiblement minéralisées dont la moyenne est de 206 ± 36 µS.cm^{-1} (Tableau 5, Figure 21a).

La composition chimique des eaux souterraines est homogène et présente un faciès bicarbonaté sans cation dominant (Figure 21). On note néanmoins une légère augmentation de la conductivité électrique de l'amont vers l'aval pouvant être attribuée à des interactions eau/roche ou à des apports d'eau de surface.

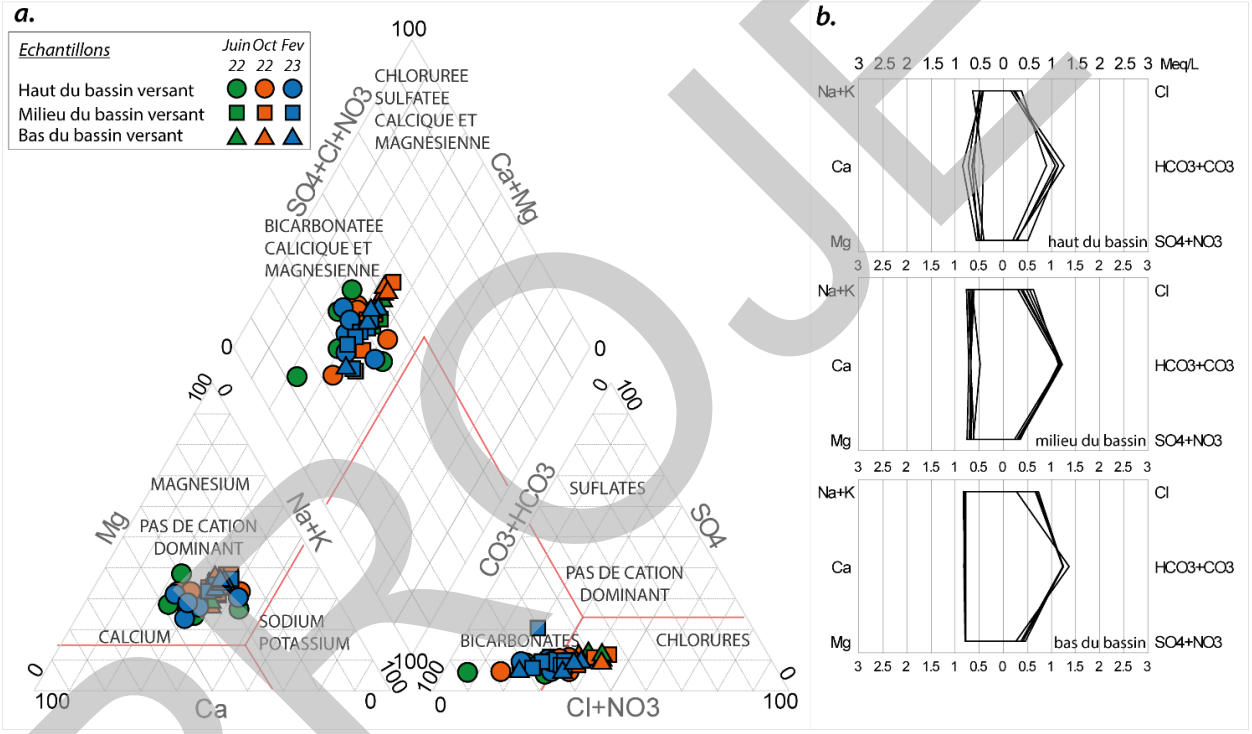


Figure 21 : a. Diagramme de Piper présentant la composition chimique (juin-2022, oct-2022, fév-2023) des eaux échantillonnées sur l'impluvium de Volvic (amont, milieu, aval) b. Diagramme de Stiff présentant les faciès des eaux collectées à l'amont, milieu et aval de l'impluvium de Volvic au cours des trois campagnes.

Rouquet (2012) opte pour cette dernière hypothèse en associant l'augmentation de la conductivité électrique à une augmentation des chlorures liés à l'impact des activités agricoles et/ou des eaux usées et/ou du salage des routes. Cette augmentation des chlorures est clairement démontrée par nos données (Figures 22b et 22c). La Figure 22c montre que l'augmentation des chlorures est plus rapide que celle du sodium tendant à confirmer l'hypothèse d'un apport par salage des routes, les sels de déneigement présentant des compositions variées : NaCl, CaCl^2, MgCl^2, KCl. Par ailleurs, on note un enrichissement en nitrates (NO_3^-) aux sources de front de coulée et à P10. Ce dernier se situe dans un secteur agricole où épandages et mise en pâture de bétail peuvent impacter sa qualité et celle des eaux de surface tels que le ruisseau du Lambertèche. Ceci montre une probable influence de l'infiltration d'eaux de surface sur ce point P10 et dans le secteur. Les

PROJET

apports en nitrates au niveau des sources de front de coulée sont expliqués par l'urbanisation du bas du bassin et le jardinage.

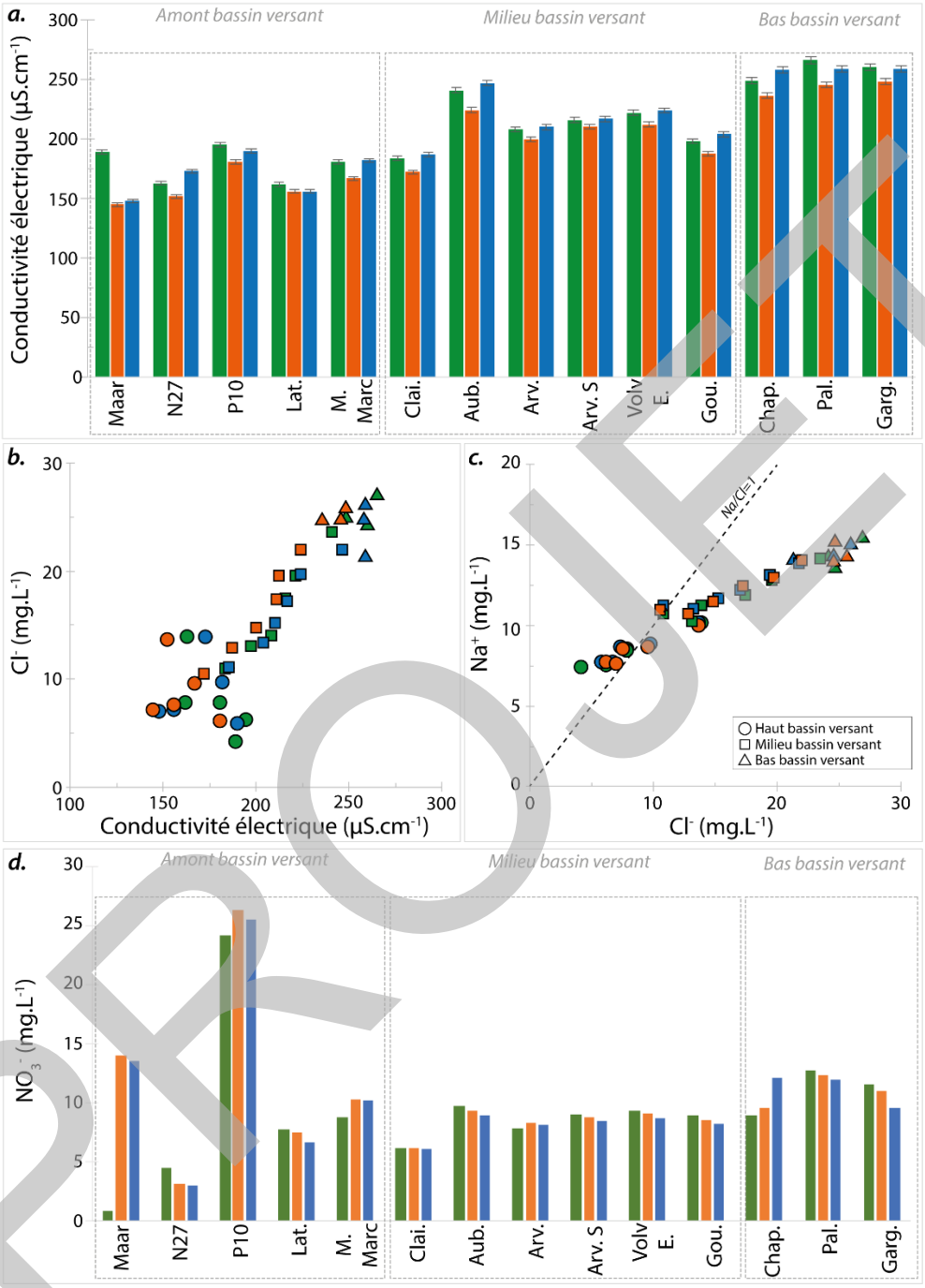


Figure 22 : a. Conductivité électrique en µS.cm^{-1} b. Cl^- (en mg. L^{-1}) en fonction de la conductivité électrique (µS.cm^{-1}) c. Na^+ en fonction de Cl^- (en mg. L^{-1}) et d. Concentration en NO_3^- (en mg. L^{-1}) pour les eaux de l'impluvium de Volvic pour les campagnes de juin 2022 (vert), octobre 2022 (orange) et février 2023.

PROJET

Tableau 5 : Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de l'impluvium de Volvic (pour Garg. et Chap., les mesures et l'échantillonnage ne sont pas effectués directement à l'exutoire mais plusieurs centaines de mètres en aval. Les valeurs, notamment la température, peuvent donc être légèrement impactées par les conditions d'échantillonnage).

Nom ech.	Localisation	Altitude (m .NGF)	Cond. (µs/cm)	pH	T (°C)	Ca	K	Mg	Na	Si	HCO_3^- (mg.L^{-1})	F	Cl-	NO_3^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	δ^2H (‰)	±	$\delta^{18}O$ (‰)	±
1ere campagne de terrain - Juin 2022																				
Maar	**Haut bassin versant**	781	189	7.5	9.6	14.9	3.6	8.6	7.4	13.6	105.6	0.2	4.1	0.8	5.8	n.a.	-57.7	0.27	-8.7	0.02
P10		803.2	195	7.3	9.8	18.3	4.1	6.3	7.5	15.5	77.7	0.1	6.2	24.1	5.1	n.a.	-52.9	0.25	-8.1	0.01
M.Marc		763.7	181	7.4	8.9	15.5	5.3	5.4	8.4	14.4	72.2	0.1	7.8	8.8	5.6	n.a.	-55.6	0.24	-8.4	0.05
Lat.		807	162	7.3	10.0	13.4	5.0	4.5	8.5	12.8	67.6	0.1	7.8	7.8	6.8	n.a.	-55.8	0.31	-8.5	0.04
N27		892.2	163	7.2	9.1	8.9	8.5	4.8	10.1	15.3	58.6	0.2	13.8	4.5	7.2	0.6	-57.2	0.22	-8.8	0.05
Clai.	**Milieu bassin versant**	708.8	184	7.3	11.8	10.2	7.5	7.0	10.7	15.6	78.0	0.3	10.8	6.1	7.0	0.8	-58.0	0.17	-8.8	0.02
Aub.		589.2	241	6.9	11.2	15.1	6.9	8.2	14.0	15.3	78.8	0.2	23.6	9.7	10.7	0.6	-56.7	0.61	-8.7	0.05
Arv.		584	208	7.1	11.0	14.2	6.5	7.3	11.2	14.8	79.5	0.2	14.0	7.8	8.1	0.6	-56.3	0.38	-8.4	0.01
Arv S.		585.2	216	7.1	11.4	14.3	6.6	7.5	11.9	14.9	76.8	0.2	17.4	9.0	9.3	0.6	-56.6	0.19	-8.6	0.03
Volv E.		579.3	222	7.0	11.0	14.6	6.9	7.8	12.8	15.0	77.3	0.2	19.5	9.3	9.7	0.6	-56.9	0.20	-8.5	0.01
Gou.		572.3	198	6.9	9.1	14.1	6.3	6.7	10.3	14.6	77.7	0.2	13.1	8.9	8.0	0.6	-56.0	0.13	-8.7	0.05
Chap.	**Bas bassin versant**	396.4	249	7.5	11.2	16.4	7.4	8.6	13.5	13.8	82.6	0.2	24.8	8.9	11.5	0.4	-56.2	0.26	-8.1	0.02
Pal.		394.7	266	6.9	10.1	17.6	7.1	9.0	15.3	15.1	80.4	0.2	27.0	12.7	13.4	0.5	-55.8	0.49	-8.1	0.01
Garg.		398.5	260	7.3	11.9	17.8	8.1	8.9	14.2	14.5	80.4	0.2	24.3	11.5	11.7	0.4	-57.1	0.22	-8.3	0.03
Moy.			*210*	*7*	*10*	*15*	*6*	*7*	*11*	*15*	*78*	*0.2*	*15*	*9*	*9*	*1*	*-56*		*-8*	
Ecart-Type			*34*	*0.2*	*1*	*3*	*1*	*1*	*3*	*1*	*10*	*0.04*	*8*	*5*	*3*	*0.1*	*1.2*		*0.3*	
2e campagne de terrain - Octobre 2022																				
Maar	**Haut bassin versant**	781	145	6.7	10.0	12.3	3.5	5.5	7.6	14.8	46.5	0.1	7.1	14.0	6.1	n.a.	-54.6	0.33	-8.3	0.09
P10		803.2	181	6.2	10.2	16.7	4.1	7.4	7.7	14.9	59.2	0.1	6.0	26.2	5.1	n.a.	-53.1	0.63	-7.8	0.07
M.Marc		763.7	167	6.9	9.1	14.1	5.2	6.5	8.5	13.9	52.0	0.1	9.6	10.3	7.3	n.a.	-55.5	0.28	-8.5	0.06
Lat.		807	156	7.6	10.0	12.1	4.8	5.4	8.5	12.5	98.5	0.1	7.4	7.4	7.3	n.a.	-55.5	0.90	-8.4	0.13
N27		892.2	152	7.8	8.8	8.1	8.4	6.1	10.0	14.9	44.4	0.2	13.5	3.2	7.0	0.6	-57.4	0.65	-8.7	0.16
Clai.	**Milieu bassin versant**	708.8	172	7.2	9.6	9.3	7.4	8.4	11.0	14.9	59.5	0.2	10.4	6.2	6.8	0.8	-57.1	0.70	-8.8	0.06
Aub.		589.2	224	6.9	10.7	13.8	6.9	9.9	13.9	14.7	50.0	0.2	22.0	9.3	10.4	0.5	-56.3	0.45	-8.6	0.09
Arv.		584	200	6.9	10.8	13.2	6.5	8.8	11.4	14.2	61.2	0.2	14.7	8.3	8.7	0.6	-54.6	0.66	-7.9	0.06
Arv S.		585.2	211	7.0	10.7	13.3	6.8	9.2	12.4	14.5	62.0	0.2	17.3	8.7	9.3	0.5	-56.8	0.80	-8.7	0.13
Volv E.		579.3	212	7.0	10.7	13.1	6.7	9.2	12.8	14.6	66.7	0.2	19.5	9.1	9.7	0.6	-56.3	0.70	-8.6	0.05
Gou.		572.3	188	6.7	9.1	13.3	6.3	8.2	10.6	14.2	64.4	0.2	12.9	8.5	7.9	0.5	-56.2	0.29	-8.6	0.06
Chap.	**Bas bassin versant**	396.4	236	7.3	10.8	15.4	7.9	10.3	14.0	13.2	64.3	0.2	24.6	9.5	11.8	0.4	-57.1	0.33	-8.7	0.03
Pal.		394.7	246	6.6	10.2	15.7	7.3	10.5	15.1	14.6	64.2	0.2	24.7	12.4	12.5	0.5	-56.7	0.60	-8.6	0.14
Garg.		398.5	248	7.2	11.0	16.2	8.4	10.8	14.1	14.1	64.8	0.2	25.7	11.0	12.3	0.4	-57.3	0.50	-8.7	0.08
Moy.			*195*	*7*	*10*	*13*	*6*	*8*	*11*	*14*	*61*	*0.2*	*15*	*10*	*9*	*1*	*-56*		*-8*	
Ecart-Type			*35*	*0.4*	*1*	*2*	*2*	*2*	*3*	*1*	*13*	*0.04*	*7*	*5*	*2*	*0.1*	*1.2*		*0.3*	
3e campagne de terrain - Février 2023																				
Maar	**Haut bassin versant**	781	148	7.0	8.7	12.6	3.1	5.1	7.7	14.7	58.1	n.a.	7.0	13.5	6.5	n.a.	-55.6	0.47	-8.5	0.06
P10		803.2	190	7.4	8.6	16.2	3.7	6.9	7.8	14.8	73.1	n.a.	5.7	25.5	5.5	n.a.	-54.3	0.29	-8.3	0.03
M.Marc		763.7	182	7.3	8.9	14.5	4.6	6.1	8.8	13.8	73.9	n.a.	9.7	10.2	7.7	n.a.	-55.7	0.16	-8.6	0.03
Lat.		807	156	7.4	-	12.1	4.2	4.9	8.6	12.5	67.1	0.2	7.2	6.6	7.7	n.a.	-55.0	0.39	-8.4	0.03
N27		892.2	173	7.5	-	8.3	7.1	5.6	10.1	14.5	60.8	0.2	13.7	3.0	7.5	0.9	-57.4	0.37	-8.8	0.00
Clai.	**Milieu bassin versant**	708.8	187	7.2	8.9	9.7	6.5	7.9	11.2	14.8	80.0	0.3	10.9	6.0	7.2	1.0	-57.1	0.52	-8.5	0.04
Aub.		589.2	247	6.9	10.0	14.2	6.3	9.3	13.8	14.6	82.9	0.2	21.9	8.9	10.9	0.9	-57.2	0.53	-8.7	0.06
Arv.		584	210	7.0	9.3	13.5	5.8	8.4	11.7	14.2	81.6	0.2	15.2	8.1	9.1	0.8	-57.0	0.71	-8.6	0.13
Arv S.		585.2	217	7.0	9.7	13.5	6.0	8.6	12.2	14.2	81.5	0.2	17.0	8.4	9.5	0.8	-56.0	0.40	-8.4	0.03
Volv E.		579.3	224	7.0	10.0	13.6	6.1	8.8	13.0	14.3	79.3	0.2	19.5	8.7	10.0	0.8	-56.6	0.14	-8.7	0.02
Gou.		572.3	204	7.0	9.0	13.6	5.7	7.8	10.9	14.0	82.3	0.2	13.2	8.2	8.5	0.8	-55.7	0.38	-8.4	0.06
Chap.	**Bas bassin versant**	396.4	258	7.6	4.2	16.1	7.2	9.9	14.1	13.3	83.4	0.2	24.6	12.1	12.5	0.8	-56.4	0.69	-8.3	0.06
Pal.		394.7	259	7.0	10.1	15.8	6.5	9.8	14.9	14.5	83.0	0.2	26.0	11.9	12.6	0.8	-56.6	0.75	-8.4	0.07
Garg.		398.5	259	7.3	7.8	16.1	7.1	9.8	13.9	14.1	81.3	n.a.	21.3	9.5	7.7	n.a.	-56.1	0.23	-8.5	0.03
Mars.		365	264	7.3	11.2	16.1	6.9	9.8	15.2	14.8	83.6	0.2	9.6	7.2	7.1	0.8	-56.8	0.18	-8.8	0.04
Moy.			*212*	*7*	*9*	*14*	*6*	*8*	*12*	*14*	*77*	*0.2*	*15*	*10*	*9*	*1*	*-56*		*-9*	
Ecart-Type			*39*	*0.2*	*2*	*2*	*1*	*2*	*3*	*1*	*8*	*0.03*	*7*	*5*	*2*	*0.1*	*0.9*		*0.2*	
Toutes campagnes -																				
Moy.			***206***	***7***	***9.9***	***14***	***6***	***8***	***11***	***14***	***72***	***0.2***	***15***	***10***	***9***	***1***	***-56***		***-8***	
Ecart-Type			***36***	***0.3***	***1***	***2***	***1***	***2***	***3***	***1***	***13***	***0.04***	***7***	***5***	***2***	***0.2***	***1.1***		***0.2***	

PROJET

La conductivité électrique (Figure 23) est peu variable au cours du temps. L'amplitude des variations est au maximum de ± 5 µS.cm^{-1} par rapport à la moyenne au point P10, démontrant une réactivité, toutefois limitée, aux événements pluvieux. Les chroniques de la Pale et de M. Marcenat montrent une très légère variation saisonnière (Pale : moy. 265 ± 5 µS.cm^{-1} ; M.Marcenat : 179 ± 3 µS.cm^{-1}. Le signal observé au Goulet est très stable, avec une moyenne sur la période de suivi de 212 ± 4 µS.cm^{-1}.

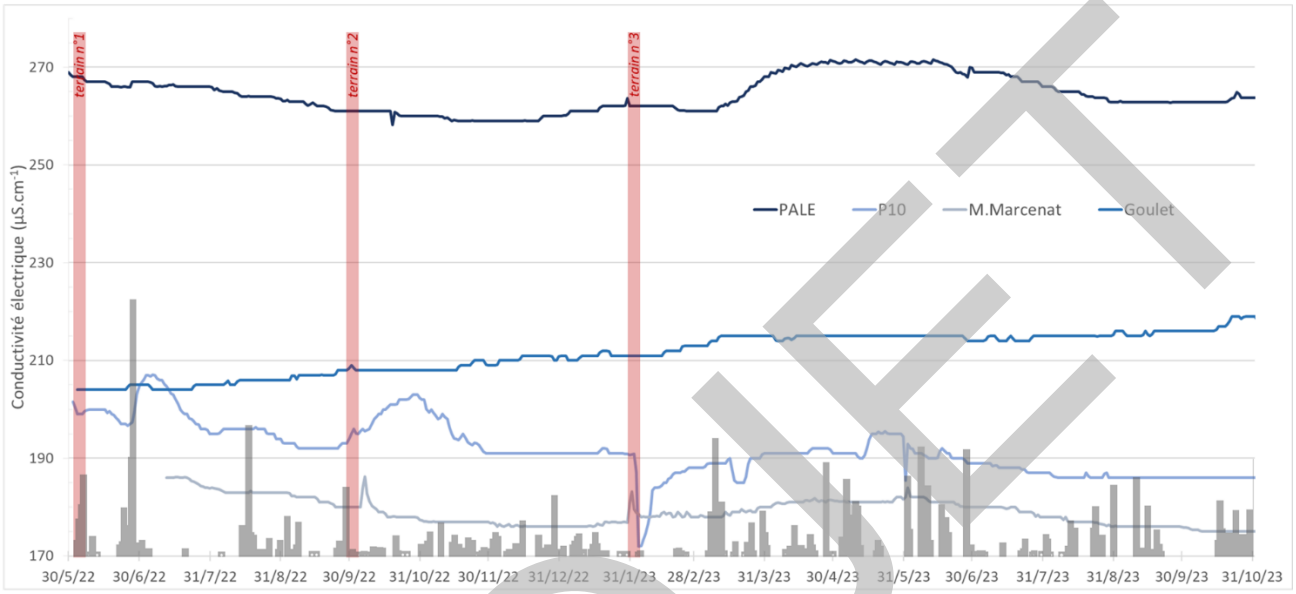


Figure 23 : Chroniques de conductivité électrique (en µS.cm^{-1}) à la Pale, P10, M. Marcenat, Goulet et P1/Maar instrumentés sur la période de l'étude (2022 à 2023).

Le signal de température est stable dans le temps (Figure 24), hormis à la Pale qui montre une légère variabilité saisonnière (moy. 10.4 ± 0.1 °C) associée à des apports superficiels ou à un contact avec l'atmosphère. La température moyenne pour les autres points s'étale de 8.7°C à P1/Maar à 9.0 °C au Goulet.

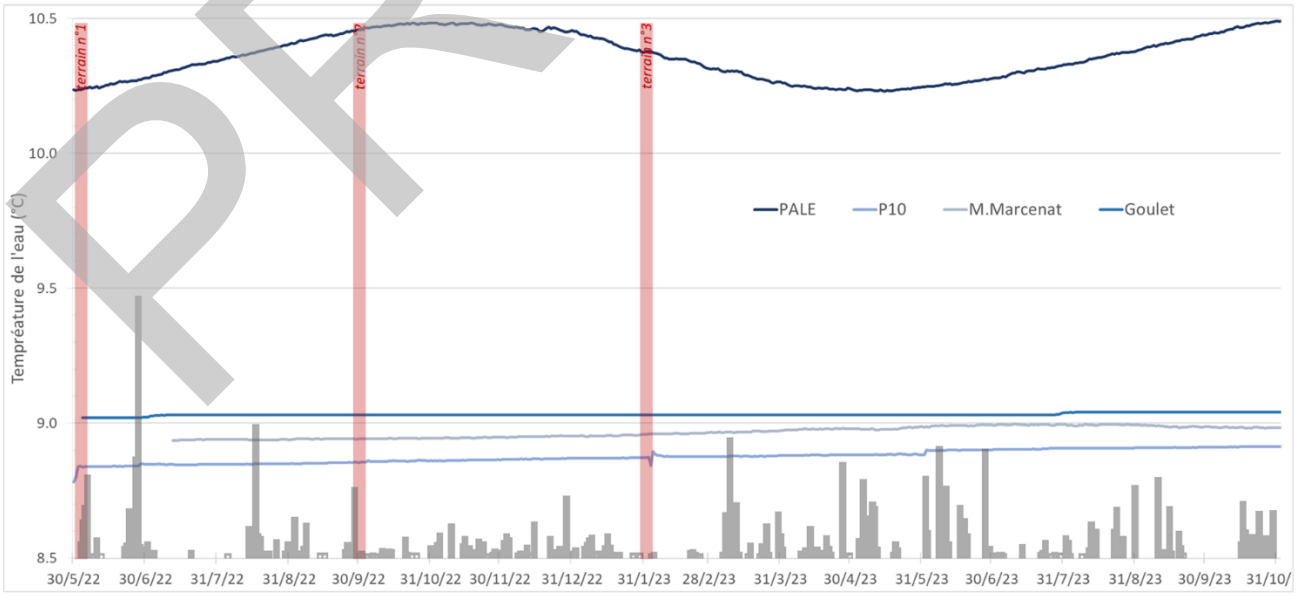


Figure 24 : Chroniques de température (en °C) à la Pale, P10, M. Marcenat, Gouet et P1 instrumentés sur la période de l'étude (2022 à 2023).

PROJET

Les teneurs en $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ (Tableau 5, Figure 25) s'étendent de -7,8‰ à -8,8‰ avec une moyenne de -8,5 ± 1,1‰ et de -50,3‰ à -58,0‰ avec une moyenne de -56,0 ± 0,2‰, respectivement. La Figure 25 montre que l'ensemble des eaux souterraines se situent sur la droite météorique locale définie dans notre étude à partie des pluies collectées à Moulet Marcenat (LMWL : $\delta^{2}H = 8.09\delta^{18}O+13$). Cette dernière est comparable à celle proposée par Fouillac et al. (1991, ($\delta^{2}H = 8\delta^{18}O+13.1$). La recharge des eaux souterraines provient donc des précipitations locales. Par ailleurs, les eaux souterraines sont appauvries par rapport aux eaux de pluie collectées dans la partie centrale du bassin à 761 mNGF, démontrant ainsi que les eaux souterraines sont rechargées majoritairement à haute altitude.

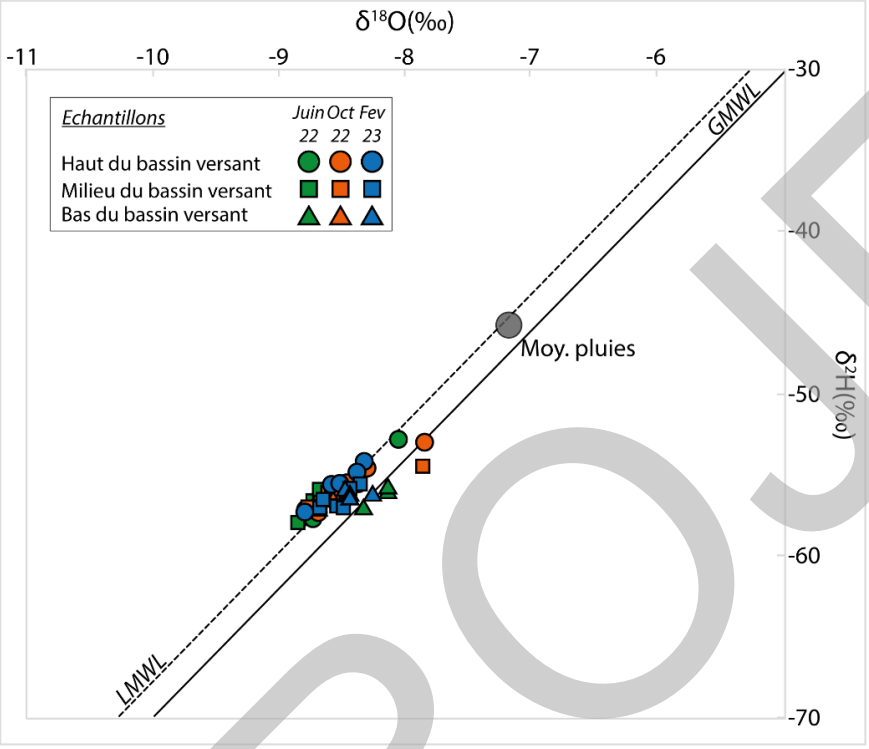


Figure 25 : $\delta^{2}H$ et $\delta^{18}O$ dans les précipitations et les eaux souterraines de l'impluvium de Volvic. Les eaux souterraines ont été échantillonnées en juin 2022, octobre 2022 et février 2023. Le point de pluviométrie moyenne correspond à la moyenne pondérée pour la période de mai 2022 à janvier 2023.

II.5 DATATION DES EAUX SOUTERRAINES (CFC-113 ET TRITIUM 3H)

Le tritium (Tableau 6) varie de 2,4 à 4,1 UT, avec une moyenne de 3,3 ± 0,6 UT. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées lors de la campagne de février 2023 (P10 : 2,4 UT). La campagne oct-2022 présente des valeurs plus élevées (Clai et Gou : 4,1 UT). Malgré ces légères variations, les valeurs de tritium semblent être homogènes et non influencées par la distribution géographique. Les eaux souterraines présentent des teneurs en tritium inférieures à la moyenne atmosphérique de l'hémisphère nord en 2021 (station GNIP de Vienne), qui est de 8,2 UT (AIEA/OMM, 2024 : Réseau mondial d'isotopes dans les précipitations. La base de données du GNIP. Accessible à l'adresse suivante : https://nucleus.iaea.org/wiser).

La concentration d'équilibre des CFCs dans les eaux souterraines dépend de la pression atmosphérique (c'est-à-dire de l'altitude) et de la température de la zone saturée ; elle est fonction de la pression et de la température - loi de Henry. Il est donc nécessaire de déterminer l'altitude et la température de la recharge

PROJET

pour estimer l'âge des eaux souterraines à partir des concentrations en CFCs. La température de recharge correspond à la température dans la zone de recharge au moment de la séparation des eaux de l'atmosphère pendant la recharge. Pour nos calculs, nous prendrons comme température de recharge, la valeur moyenne des eaux souterraines enregistrée par les sondes CTD pendant la période de juin 2022 à octobre 2023 (9,2 ± 0,6 °C) à la fois proche mais plus réaliste que celle définie par les gaz rares Ne, Ar et N_2 (10,6 °C ; Busenberg et Plummer, 1992 ; Plummer et al., 2012) ou la température annuelle moyenne de l'air de l'air enregistrée à la station météorologique de Volvic (9,4 ± 6,9 °C, période : 1959-2023). L'altitude de recharge choisie correspond à l'altitude moyenne de l'amont et du milieu de l'impluvium, considérant le fait que la recharge se fait principalement dans la moitié supérieure du bassin versant (Joux, 2002 + résultats isotopiques). La dégradation microbienne des CFCs en milieu réducteur (Cook et al., 1995 ; Shapiro et al., 1997 ; Sebol et al., 2007 ; Lapworth et al. 2018 ; Chambers et al., 2019) peut être exclue au vu des concentrations en oxygène dissous mesurées puisqu'elles sont inférieures à $6{,}25\times10^{-5}$ mol. L^{-1} (c'est-à-dire 2,0 mg. L^{-1} ; Tableau 6).

Tous les échantillons analysés présentent de légers excès en CFC-11 et de CFC-12. Pour le SF6, tous les échantillons présentent des valeurs nettement supérieures à celles mesurées dans l'atmosphère, ce qui met en évidence une autre origine, potentiellement géogénique, pour ce composant. Nos interprétations se basent donc uniquement sur les concentrations en CFC-113. Il présente des teneurs comprises entre 44,0 et 74,7 pptv, soit une moyenne de 59,2 ±7,0 pptv et de 66,8 ± 6,2 pptv pour les campagnes d'octobre 2022 et février 2023 respectivement. Les faibles écart-types illustrent une grande homogénéité des concentrations obtenues, quelle que soit leur localisation au sein du bassin versant.

PROJET

Tableau 6 : Concentrations en tritium (^3H), CFC-SF6 et gaz dissous dans les eaux souterraines de l'impluvium de Volvic.

Nom ech.	Localisation	^3H (TU)	±	SF_6	±	CFC-12	±	CFC-11	±	CFC-113	±	He	Ne	H_2	Ar	O_2	N_2	CH_4	CO_2
						(pptv)									(mol.L^{-1})				
2e campagne de terrain - Octobre 2022																			
Maar		3.2	0.6	19.1 *E*	1.9	541.2 *E*	54.1	366.8 *E*	36.7	57.8	5.8	2.9E-09	7.9E-09	4.6E-10	1.5E-05	3.3E-05	5.3E-04	4.3E-09	3.6E-04
P10	**Haut bassin versant**	3.2	0.6	21.9 *E*	2.2	562.8 *E*	56.3	389.6 *E*	39.0	68.0	6.8	3.5E-09	8.8E-09	3.8E-10	1.5E-05	2.9E-05	5.8E-04		3.5E-04
M.Marc		3.8	0.5	16.4 *E*	1.6	505.1 *E*	50.5	247.7	24.8	56.4	5.6	6.6E-09	7.8E-09	5.9E-10	1.5E-05	9.8E-05	5.7E-04	4.4E-09	2.6E-04
Lat.		3	0.5																
N27		3.4	0.5																
Clai.		4.1	0.6	16.4 *E*	1.6	516.9 *E*	51.7	253.6 *E*	25.4	69.3	6.9	6.6E-09	8.3E-09	4.7E-10	1.5E-05	1.3E-04	5.8E-04	1.0E-08	3.1E-04
Aub.		3.9	0.5	13.7 *E*	1.4	517.1 *E*	51.7	302.1 *E*	30.2	61.4	6.1	4.1E-08	7.5E-09		1.5E-05	1.9E-04	5.4E-04	6.8E-09	6.6E-04
Arv.	**Milieu bassin versant**	3.5	0.6	16.4 *E*	1.6	510.4 *E*	51.0	268.0 *E*	26.8	57.2	5.7	3.6E-08	7.3E-09		1.5E-05	2.2E-04	5.4E-04	4.7E-09	5.0E-04
Arv S.		3.7	0.6	13.7 *E*	1.4	496.1	49.6	266.5 *E*	26.7	56.0	5.6	4.6E-09	8.5E-09		1.6E-05	1.9E-04	5.9E-04	4.3E-09	5.4E-04
Volv E.		4.9	0.7	13.7 *E*	1.4	505.9 *E*	50.6	291.6 *E*	29.2	60.9	6.1	3.4E-09	7.6E-09	5.1E-10	1.5E-05	1.6E-04	5.5E-04	6.6E-09	5.2E-04
Gou.		4.1	0.5	13.7 *E*	1.4	526.5 *E*	52.7	252.7 *E*	25.3	60.8	6.1	6.8E-09	7.9E-09	2.3E-10	1.5E-05	1.2E-04	5.6E-04	4.8E-09	6.1E-04
Chap.		3.9	0.5																
Pal.	**Bas bassin versant**	4	0.5	10.9 *E*	1.1	525.1 *E*	52.5	330.0 *E*	33.0	44.0	4.4	6.9E-09	7.6E-09		1.4E-05	2.9E-05	5.5E-04	6.3E-09	7.0E-04
Garg.		3.9	0.5																
Moy.		*3.8*		*15.6*		*520.7*		*296.8*		*59.2*		*1.2E-08*	*7.9E-09*	*4.4E-10*	*1.5E-05*	*1.2E-04*	*5.6E-04*	*5.8E-09*	*4.8E-04*
Ecart-Type		*0.5*		*3.2*		*19.6*		*50.2*		*7.0*		*1.4E-08*	*4.8E-10*	*1.2E-10*	*4.2E-07*	*7.2E-05*	*2.0E-05*	*1.9E-09*	*1.6E-04*
3e campagne de terrain - Février 2023																			
Maar		3.1	0.5	16.4 *E*	1.6	506.7 *E*	50.7	317.8 *E*	31.8	65.5	6.6	2.7E-09	9.7E-09	2.7E-09	1.6E-05	3.1E-04	6.4E-04	9.7E-10	2.3E-04
P10	**Haut bassin versant**	2.4	0.4	24.6 *E*	2.5	524.3 *E*	52.4	251.6 *E*	25.2	70.1	7.0	2.9E-09	6.8E-09	2.6E-10	1.2E-05	2.8E-04	4.2E-04	3.1E-08	2.2E-04
M.Marc		2.7	0.4	16.4 *E*	1.6	516.5 *E*	51.6	263.8 *E*	26.4	63.2	6.3	2.6E-09	8.6E-09	5.1E-09	1.3E-05	2.9E-04	5.8E-04	3.7E-09	1.7E-04
Lat.		2.6	0.4																
N27		2.7	0.5																
Clai.		3.4	0.6	13.7 *E*	1.4	513.5 *E*	51.4	256.8 *E*	25.7	55.4	5.5	8.6E-09	8.9E-09	8.9E-08	1.6E-05	3.2E-04	6.3E-04	2.9E-09	2.3E-04
Aub.		2.7	0.4	10.9 *E*	1.1	511.0 *E*	51.1	274.6 *E*	27.5	74.7	7.5	5.0E-09	9.1E-09	1.9E-10	1.5E-05	3.3E-04	6.1E-04	3.6E-09	5.4E-04
Arv.	**Milieu bassin versant**	3.3	0.5	16.4 *E*	1.6	497.1	49.7	252.0 *E*	25.2	74.5	7.5	5.0E-09	9.1E-09	9.3E-08	1.5E-05	3.3E-04	6.1E-04	3.6E-09	4.2E-04
Arv S.		2.7	0.5	16.4 *E*	1.6	508.4 *E*	50.8	259.2 *E*	25.9	59.1	5.9	4.3E-09	6.8E-09	6.2E-08	1.2E-05	3.3E-04	4.2E-04	3.2E-09	5.1E-04
Volv E.		2.8	0.5	13.7 *E*	1.4	499.8 *E*	50.0	268.1 *E*	26.8	58.8	5.9	3.1E-09	8.7E-09	4.1E-10	1.5E-05	3.0E-04	6.1E-04	3.2E-09	4.1E-04
Gou.		2.7	0.4	13.7 *E*	1.4	498.8 *E*	49.9	238.8	23.9	64.5	6.5	6.2E-09	8.9E-09	3.4E-07	1.6E-05	3.1E-04	6.3E-04	2.7E-09	4.7E-04
Chap.		2.9	0.4																
Pal.	**Bas bassin versant**	3.4	0.5	13.7 *E*	1.4	530.8 *E*	53.1	346.6 *E*	34.7	64.2	6.4	7.6E-09	8.5E-09	2.2E-09	1.5E-05	2.6E-04	6.1E-04	3.7E-09	6.0E-04
Garg.		2.6	0.5																
Mars.		3.2	0.5	10.9 *E*	1.1	531.2 *E*	53.1	360.5 *E*	36.0	66.8	6.7	5.2E-09	9.2E-09	2.2E-10	1.5E-05	2.3E-04	6.4E-04	2.8E-09	6.2E-04
Moy.		*2.9*		*15.2*		*512.6*		*280.9*		*65.2*		*4.8E-09*	*8.6E-09*	*5.4E-08*	*1.5E-05*	*3.0E-04*	*5.8E-04*	*5.6E-09*	*4.0E-04*
Ecart-Type		*0.3*		*3.7*		*12.2*		*41.3*		*6.2*		*2.0E-09*	*9.4E-10*	*1.0E-07*	*1.4E-06*	*3.2E-05*	*8.0E-05*	*8.5E-09*	*1.6E-04*
Toutes campagnes -																			
Moy.		*3.3*		*15.4*		*516.4*		*288.5*		*62.3*		*8.17E-09*	*8.27E-09*	*3.53E-08*	*1.48E-05*	*2.14E-04*	*5.71E-04*	*5.69E-09*	*4.40E-04*
Ecart-Type		*0.6*		*3.4*		*16.3*		*45.3*		*7.1*		*1.03E-08*	*8.10E-10*	*8.54E-08*	*1.01E-06*	*1.06E-04*	*5.95E-05*	*6.28E-09*	*1.60E-04*

E *= excès (pour CFC-SF$_6$)*

EXPORT

Les temps de résidence (séjours) moyens des eaux souterraines sont déterminés à l'aide du couple ^{3}H /CFC-113. Des graphiques traceur-traceur ont été utilisés pour identifier le meilleur modèle à paramètres groupés pour expliquer les résultats. Les Figures 26a. et 26b. montre les résultats pour les campagnes d'octobre-2022 (symboles orange) et février-2023 (symboles bleus). Les lignes correspondent au type de modèle expliquant les valeurs : modèle exponentiel (EMM ; courbe rouge), modèle piston (PFM ; courbe bleue) et modèles exponentiels / piston pour les ratios suivants « 80% piston - 20% exponentiel » et « 90% piston - 10% exponentiel » (EPM ; courbes vertes).

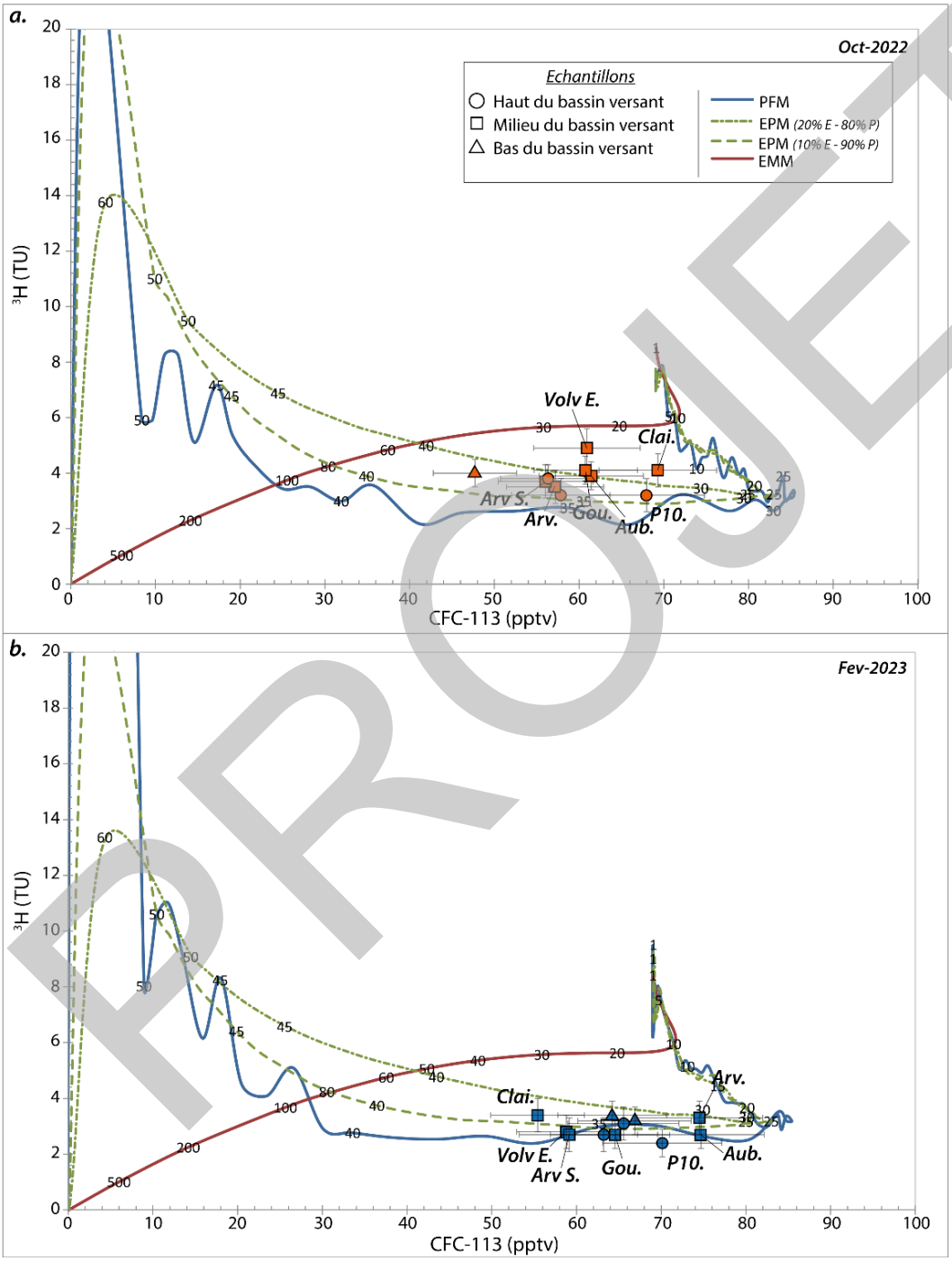


Figure 26 : ^{3}H (TU) vs CFC-113 (pptv) dans les échantillons d'eau souterraine avec a. campagne de terrain d'octobre 2022 et b. campagne de terrain de février 2023. Les courbes théoriques sont représentées pour le modèle d'écoulement piston (PFM ; bleu), le modèle de mélange exponentiel (EMM ; rouge), le modèle d'écoulement piston exponentiel (EPM ; vert). Les âges apparents des eaux souterraines en années sont indiqués au-dessus de chaque modèle. L'EPM est représenté par différentes courbes correspondant aux ratios suivants : 80% piston - 20% exponentiel et 90% piston - 10% exponentiel.

PROJET

Les concentrations en CFCs de la campagne de février 2023 s'expliquent par un modèle piston (PFM). Comme le PFM n'implique pas de mélange pendant le transit des eaux souterraines, il est possible de déterminer les temps de résidence moyens des eaux souterraines au sein de l'Impluvium de Volvic, à l'aide de la feuille de calcul USGS TracerLPM (Jurgens et al. 2012, Figure 26b - Tableau 6). Ce temps de résidence moyen correspond à la durée du transit depuis la recharge par les eaux de pluie dans la partie amont de l'impluvium jusqu'aux exutoires dans sa partie avale. Les âges déterminés sont homogènes (32 à 35 ans, moyenne de 34 ± 1 ans) sur l'ensemble de l'impluvium (Tableau 7).

Le modèle le plus cohérent pour la campagne d'octobre-2022 est le modèle piston exponentiel (EPM) avec une participation entre 10 et 20% du modèle piston. Ce modèle implique la contribution d'une recharge exponentielle sur le milieu et l'aval de l'impluvium. Elle correspond à l'infiltration d'eau récente qui se mélange aux eaux anciennes provenant de la partie amont de l'impluvium. Les eaux souterraines échantillonnées en octobre 2022 sont donc le résultat d'un mélange de 10 à 20 % (voire 30 % pour 2 points) d'eau récente avec un eau ancienne. Ces observations sont cohérentes avec les résultats issus de l'hydrochimie et l'hydrodynamique montrant des variations liées à une réponse aux événements pluvieux. Les échantillons présentant une recharge exponentielle de 20 à 30% sont les plus affectés par les chlorures (Aub., Arv S., et Volv.).

Tableau 7 : Temps de résidence moyens (en années) déterminés pour les eaux souterraines échantillonnées en février 2023 (modèle PFM).

Temps de résidence moyen (^{3}H vs CFC113) basé sur un modèle PISTON

	Echantillon	Localisation	Temps residence moy. (an)	Erreur relative (%)
Campagne terrain - Février 2023	Maar	Haut de bassin versant	34	0.05
	P10		32	0.17
	M.Marc		35	0.08
	Clai.	Milieu de bassin versant	35	0.24
	Aub.		35	0.03
	Arv.		33	0.07
	Arv S.		35	0.01
	Volv E.		33	0.01
	Gou.		35	0.10
	Pal.	Bas de bassin versant	35	0.13
	Mars.		34	0.06
	Moyenne		*34.2*	
	Ecart-Type		*1.2*	

PROJET

II.6 SYNTHESE DES RESULTATS, MODELE CONCEPTUEL ET VALIDATION

Synthèse

Les résultats montrent deux comportements antagonistes au sein du système aquifère de Volvic. D'une part, les données hydrodynamiques et les enregistrements de température mettent en évidence une certaine réactivité du système en réponse aux précipitations ; celle-ci est limitée et correspond au maximum à 20% du système. D'autre part, l'hydrochimie (ions majeurs et isotopes stables de la molécule d'eau) montre un système plutôt inertiel avec des concentrations homogènes, nonobstant les légères variations dans la partie avale de l'impluvium, et une recharge à haute altitude, en cohérence avec les observations de Joux (2002) et Rouquet (2012).

La Figure 27 propose un modèle de fonctionnement basé sur la géologie, les paramètres météorologiques, l'hydrochimie et l'hydrodynamique qui permet d'expliquer le fonctionnement du système en intégrant la réactivité limitée aux évènements pluvieux et l'inertie du système.

Modèle conceptuel

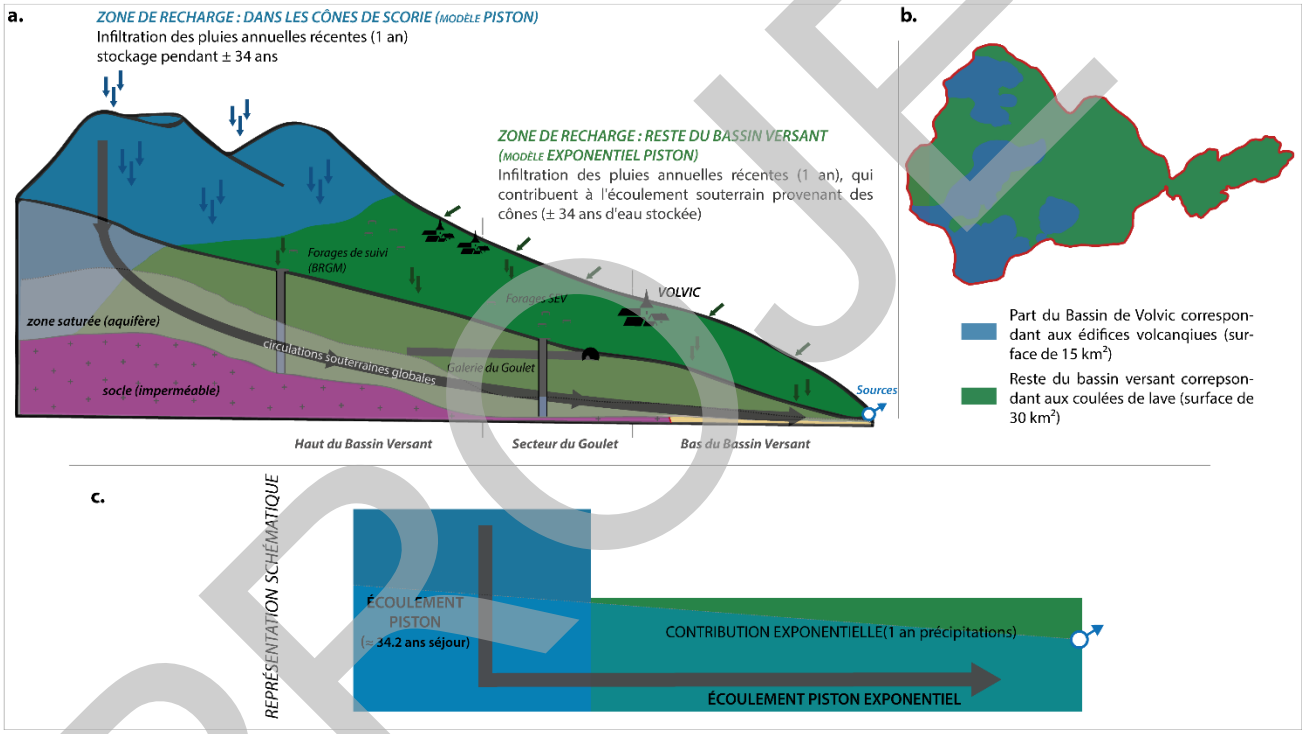


Figure 27 : Modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique de l'Impluvium de Volvic.

Ce modèle prend ainsi en compte :

- Une partie amont de l'impluvium, d'altitude moyenne à 850 mNGF, caractérisée par une recharge élevée >350 mm, à basse température en cohérence avec les observations de Joux, 2002 et Bertrand, 2008. Les précipitations efficaces s'infiltrent dans les cônes de scories[3] (en bleu, Figure 27) qui couvrent une superficie de 15 km² avec un volume de matériaux estimé à 0,99 km³. La porosité effective de ces formations est de 40 à 45% (Joux, 2002 ; Rouquet 2012 ; Aumar, 2022). Compte tenu du volume et de la porosité de ces cônes, la recharge atteint lentement la zone saturée. Dans cette partie de

[3] *Une estimation des volumes d'eau potentiellement infiltrés et de la capacité de stockage des formations aquifères (en fonction de leurs propriétés) est fournie en annexe 4 afin de déterminer le pourcentage de saturation de ces formations.*

PROJET

l'hydrosystème, les eaux souterraines circulent selon un modèle piston avec un temps de résidence moyen d'environ 35 ans. Cette partie du système correspond à la composante ancienne des eaux souterraines.

- Le milieu et l'aval de l'impluvium (en vert, Figure 27) couvrent une superficie de 30 km pour un volume de 1 km^3 et sont constitués de coulées de lave séparées les unes des autres par leurs bases scoriacées. La porosité et la perméabilité de ces matériaux sont respectivement de l'ordre de 15% et de 10^{-3} à 10^{-5} $m.s^{-1}$ (Joux, 2002 ; Rouquet 2012 ; Aumar, 2022). La forte conductivité hydraulique et la faible porosité limitent le stockage de l'eau. Dans cette partie, on note une recharge récente qui correspond aux précipitations annuelles qui s'infiltrent préférentiellement au niveau du contact substratum/coulée de lave (Rouquet, 2012). Cette partie du système correspond à la composante récente de l'aquifère qui suit un modèle de mélange exponentiel.

Le bassin versant de Volvic est donc caractérisé par un modèle Piston-Exponentiel dans lequel les eaux souterraines s'écoulent suivant un modèle Piston depuis la partie amont de l'impluvium et sont complétées à partir du milieu de l'impluvium par des eaux récentes infra annuelle qui s'infiltrent selon un modèle Exponentiel de mélange. Cette dernière contribution est variable en fonction de la période (hautes et basses eaux) et de la localisation du point d'échantillonnage. Pour les campagnes réalisées dans le cadre de l'étude (oct-2022 et fév-2023), les données CFC-Tritium démontrent que cette part de composante récente peut varier de 10 à 30%, avec respectivement 90 à 70% de composante ancienne.

Validation du modèle conceptuel

Les temps de séjour peuvent être modifiés par la solubilité des gaz, les coefficients de diffusion et la teneur en eau du sol (Cook et Herczeg, 2000 ; Heaton et Vogel, 1981), la géologie (Cook et al., 1995, 2006) et les éventuels problèmes de contamination par des rejets externes et des activités humaines (Busenberg et Plummer, 2000 ; Spurlock et al., 2000). L'épaisseur de la zone non saturée peut également jouer un rôle, car le transport des gaz peut être affecté en fonction de son épaisseur en raison de la sorption dans les particules de la phase solide et de la dégradation microbienne potentielle (Cook et al., 1995). De plus, il est important de considérer que l'estimation de la température et de l'altitude de la zone de recharge introduit également un biais dans les concentrations initiales en CFCs. Dans l'aquifère de Volvic, l'épaisseur importante de la zone non saturée peut potentiellement influencer les temps de séjour des eaux souterraines, réduisant ainsi leur précision. En revanche, les conditions réductrices au sein de l'aquifère de Volvic excluent toute dégradation microbienne potentielle des CFCs. En outre, le léger écart entre les températures de recharge estimées à l'aide de gaz rares et les températures des eaux souterraines mesurées in situ à l'aide de sondes CTD-Diver montre que la température de recharge choisie est cohérente. L'incertitude des données comprend un biais de 10 % sur les concentrations de CFC, pour tenir compte à la fois de la variabilité de l'analyse et de la variabilité de la température de recharge. Ce biais est donc déjà inclus dans nos interprétations et conclusions, qui démontrent la cohérence entre la distribution spatiale des âges et l'homogénéité observée de la masse d'eau compte tenu de sa composition chimique et isotopique.

En ce qui concerne les aspects temporels et hydrodynamiques, l'évaluation des pourcentages de contribution des eaux récentes et anciennes, montre qu'il n'y a pas de contribution Piston à 100 % en février 2023, comme on pourrait s'y attendre pour un modèle d'écoulement à piston unique tel que décrit dans le

PROJET

calcul des temps de résidence moyens (figure 26b ; tableau 7). Toutefois, le modèle à piston est approché à 10 % près, considérant à cela la gamme d'erreur induite par les mesures, l'analyse et les calculs. En outre, le modèle de piston à 100 % est une occurrence extrêmement rare dans la nature, de sorte qu'il est très probable qu'il y ai toujours une légère contribution exponentielle de 5 à 10 % sur un modèle associé au fonctionnement du piston.

Evolution des parts respectives de la composante ancienne et récente au cours du temps

La contribution de la composante ancienne (en bleu, Figure 28a) au débit à l'exutoire de l'impluvium (courbe noire) a été calculée pour la période 1984-2023. Le débit à l'exutoire de l'impluvium correspond au débit des sources de front de coulée auquel a été ajouté le débit des prélèvements (courbe rouge, Figure 28a). La recharge de la composante ancienne correspond à la moyenne mobile de 34 ans de recharge en fonction du gradient d'altitude (42 mm/100 m). La différence entre le débit à l'exutoire de l'impluvium et la composante ancienne correspond à la composante récente (en vert, Figure 28a).

La Figure 28a montre que le débit à l'exutoire de l'impluvium pendant les périodes d'étiage provient principalement de la composante ancienne, tandis que la contribution de la composante récente augmente pendant les périodes de hautes eaux et peut même être prédominante par rapport à la composante ancienne (par exemple en 1992-1994). Pour notre période d'étude, la composante ancienne représente 83 à 88% du débit total pour octobre-2022 et février-2023 respectivement, confirmant les résultats obtenus par datation avec un modèle Piston-Exponentiel composé pour 10 à 20 % d'exponentiel.

Les Figures 28a et 28b mettent une baisse du débit à l'exutoire de l'impluvium de Volvic en lien avec la diminution la contribution de la composante récente liée à la baisse de la recharge sur la partie médiane et avale de l'impluvium corrélée au changement climatique. Cette diminution de la recharge est un phénomène global, affectant également la partie amont de l'impluvium ; les répercussions du changement climatique pourraient ainsi avoir un impact sur la composante ancienne d'ici à 30 ans.

PROJET

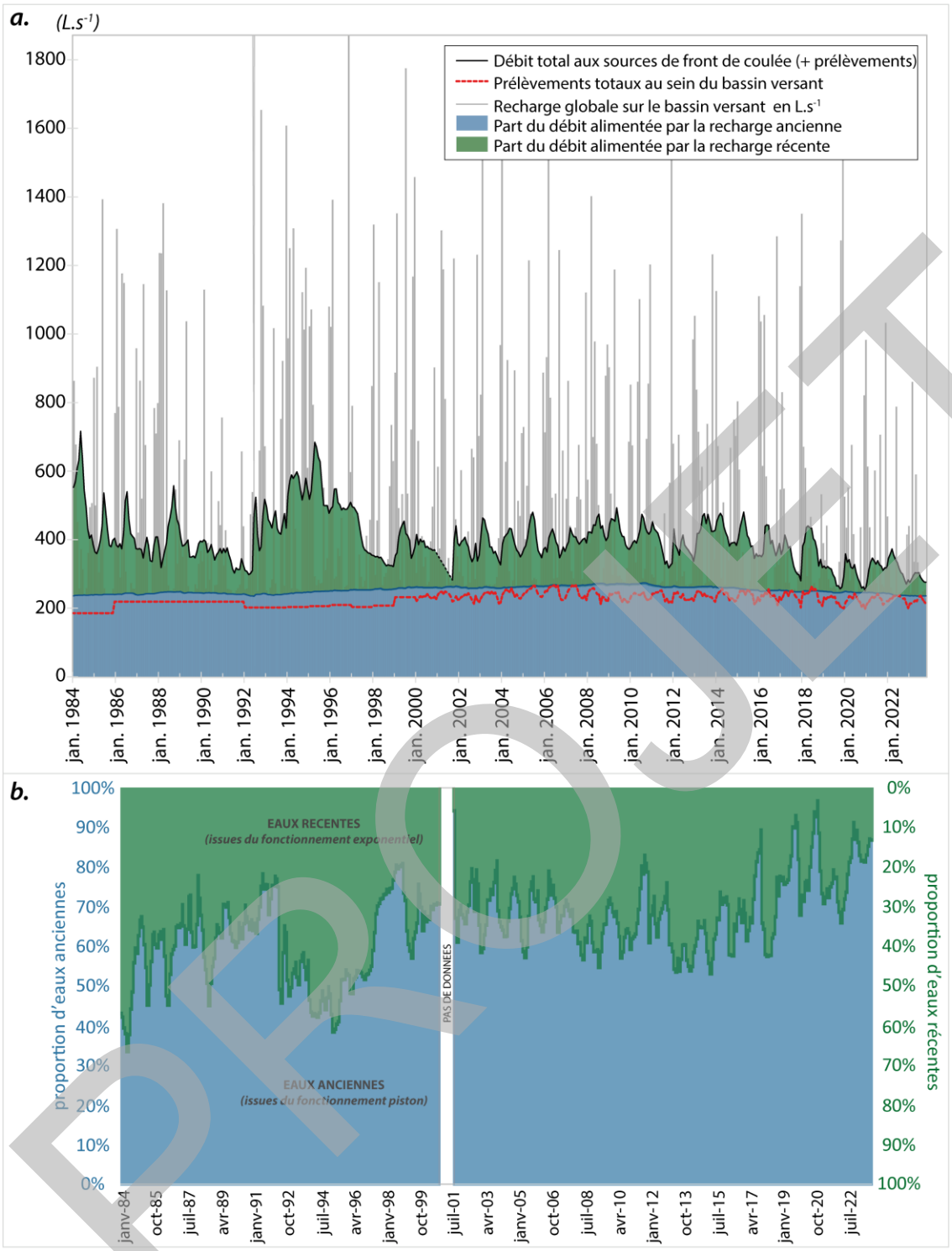


Figure 28 : a. Débit à l'exutoire de l'impluvium de Volvic montrant la contribution des composantes ancienne (bleu) et récente (vert). b. Évolution de la proportion d'eau récente (exponentielle) par rapport à l'eau ancienne (piston) au cours des 30 dernières années.

PROJET

III. CONCLUSIONS SUR LA PARTIE 1 ET LE MODELE HYDROGEOLOGIQUE CONCEPTUEL

Dans un premier temps, le travail réalisé sur l'aspect climatologique a permis de mettre en évidence une certaine stabilité des quantités de précipitations au cours des 70 dernières années, avec toutefois une tendance à une homogénéisation de leur répartition saisonnière. En parallèle les températures atmosphériques montrent une tendance à l'augmentation depuis les années 1970 en accord avec les conclusions du GIEC dans son sixième rapport d'évaluation (AR6-IPCC, 2021b). Cette augmentation a un impact direct sur la recharge, favorisant l'évaporation et réduisant ainsi les volumes d'eau pouvant s'infiltrer. On observe ainsi une diminution de la recharge des eaux souterraines au cours du temps. La spatialisation de la recharge met par ailleurs en évidence un fort gradient altitudinal de cette recharge sur l'impluvium de Volvic (42 mm/an), favorisant une recharge sur la partie amont du bassin.

Du point de vue de l'hydrodynamique, un bilan entrées /sorties a été réalisé à partir des données collectées sur la zone d'étude. Les prélèvements concernent à la fois l'AEP et l'embouteillage par la SEV. Pour l'AEP, la galerie du Goulet fournit un débit qui tend à diminuer depuis 2014. Compte tenu du mode de prélèvement par écrêtage de la nappe, il s'en suit une diminution des prélèvements. Les prélèvements de la Société des Eaux de Volvic débutent en 1965 pour augmenter progressivement jusqu'en 2005. Cinq forages permettent à partir de 2005 d'exploiter un débit moyen de 70 à 75 $L.s^{-1}$. L'exutoire de l'impluvium est constitué des sources de front de coulée. Elles montrent une baisse progressive depuis les années 1980 et qui s'est accentué en 2015. Les débits mesurés montrent une certaine réactivité au cours de l'année, en réponse aux évènements pluvieux. Les niveaux piézométriques, mesurés en plusieurs point sur l'impluvium montrent des comportements contrastés. N27, sur l'axe sud, présente un comportement très inertiel. Les autres ouvrages montrent une légère réactivité en réponse aux précipitations. Les variations sont toutefois très faibles au regard de la masse d'eau totale. Pour notre période d'étude, la variabilité est au maximum de 18% à P10 mais ne dépasse pas 9% pour les autres ouvrages.

L'hydrochimie (ions majeurs et isotopes stables de la molécule d'eau) montre une homogénéité et une stabilité du système au cours du temps en accord avec les résultats de Joux (2002). Une contribution d'eau de surface peut affecter dans une faible proportion la composition chimique des eaux souterraines avec une modification des teneurs en chlorures et en nitrates, conformément aux observations de Rouquet (2012).

Les résultats de datation (CFC-113 / ^{3}H) permettent d'expliquer le fonctionnement de l'hydrosystèmes en démontrant la présence de deux composantes. La composante ancienne présente un comportement inertiel, avec un temps de résidence moyen proche de 35 ans acquis lors de la circulation selon un modèle Piston des eaux souterraines au travers des édifices volcaniques scoriacés. Elle est complétée dans les parties médiane et avale de l'impluvium par une composante récente. Cette dernière correspond à l'infiltration d'eau récente (infra-annuelle) selon un modèle Exponentiel. Cette contribution récente est variable selon la localisation dans le bassin versant, certains points étant plus sensibles à l'apport d'eau de surface récente (par exemple les ouvrages de la SEV : Aubignat, Clairval, et Volvillante Est, montré précédemment par Rouquet, 2012). La contribution récente fluctue également en fonction de la saison ou de l'époque de l'année, avec une contribution plus importante pendant les périodes de hautes eaux. Par ailleurs, si cette contribution d'eau récente a pu être prédominante dans le passé, elle a tendance à diminuer ces dix dernières années en lien avec une baisse de la recharge provoquée par le changement climatique.

PROJET

Du point de vue de la gestion des ressources en eau, ces observations permettent d'évaluer, et éventuellement de réévaluer, la part des prélèvements d'eau actuels dans l'ensemble du système aquifère. En effet, en 2023, la totalité des prélèvements est compensée par la contribution de la composante ancienne qui fait, si le changement climatique se poursuit, va diminuer elle aussi. L'intégration du modèle conceptuel de fonctionnement de l'impluvium de Volvic et des données de changement climatique dans un modèle mathématique devrait permettre d'anticiper ces changements et de modéliser l'évolution future de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic. Cet outil devra donner des indications aux gestionnaires de la ressource en eau, quant à son management.

La première partie de ce travail consistait à collecter les données disponibles, ce qui a été fait en compulsant les nombreuses études, thèses, expertises et rapports existants. Dans une deuxième partie, ces données ont été combinées à de nouvelles données et interprétées afin de proposer un modèle conceptuel de fonctionnement. Ce modèle démontre que c'est la réduction de la recharge sur l'impluvium qui entraine la diminution des débits aux exutoires (Sources de Front de Coulée), les modifications de prélèvements ayant une variabilité minime par rapport à la baisse de la recharge constatée. Le dernier objectif du postdoctorat, consistant à anticiper l'évolution quantitative de ces masses d'eau face au changement global, sera abordé dans la deuxième partie du rapport à travers la modélisation hydrologique (mathématique) de l'impluvium.

IV. VALORISATION

- P.Nevers, H.Celle, C.Aumar, V.Vergnaud, B.Yvard, G.Mailhot *(soumis à STOTEN)* : Understanding complex volcanic hydrosystems in the light of climate change and water usages through multiproxy approaches coupling environmental tracers to geological and hydrogeological investigations.
- P. Nevers, C.Aumar, H.Celle, V.Vergnaud, B.Yvard, F.Huneau, G.Mailhot, 2023. Estimation of groundwater ages, recharge and transfers times in volcanic aquifers: Advantages and interests of multi-tracer approaches (^{3}H, CFC-SF6,^{18}O/^{2}H) coupled to hydrogeological data in the management of water resource of the Volvic watershed (FR). EGU General Assembly 2023
- P. Nevers, H.Celle, C.Aumar, V.Vergnaud, B.Yvard, F.Huneau, G.Mailhot, 2023. A multiproxy study of the Volvic watershed volcanic aquifer (Chaîne des Puys, France) for water resource management under changing climatic conditions and water uses: Hydrogeological functioning and estimation of groundwater ages, recharge, transfers times. IAH Worldwide Groundwater Congress 2023
- P. Nevers, C.Aumar, H.Celle, J.Labbe, G.Mailhot, 2023. Water resources and global change, case study of the Volvic catchment area. 28e Réunion des Sciences de la Terre 2023

PROJET

V. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Arnell, N., Detlef, P. van V., Morna, I.: The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources. Global Environmental Change, 21, 592-603, 10.1016/j.gloenvcha.2011.01.015, 2011.

Ascott, M., Macdonald, D.M.J., Sandwidi, W.J.P., Black, E., Verhoef, A., Zongo, G., Tirogo, J., Cook, P. Time of emergence of impacts of climate change on groundwater levels in sub-Saharan Africa. Journal of Hydrology. 612. 128107. 10.1016/j.jhydrol.2022.128107, 2022.

Aubignat, A. : Le gisement hydrominéral de Volvic. Revue Scientifique et Naturelle d'Auvergne, 29-32, 1973.

Aumar, C. : Modélisation de la topographie anté-volcanique de la Chaîne des Puys : Implications hydrogéologiques pour les bassins versants de la Veyre et de Côme. PhD Thesis, Université Clermont Auvergne, 2022.

Aumar, C., Labazuy, P., Merle, O., Buvat, S., & Merciecca, C. Prevolcanic topography and hydrogeological watershed of the Chaîne des Puys [Data set]. OPGC, LMV. https://doi.org/10.25519/R1PR-G644, 2024.

Ayraud, V., Aquilina, L., Labasque, T., Pauwels, H., Molenat, J., Pierson-Wickmann, A.-C., Durand, V., Bour, O., Tarits, C., Le Corre, P., Fourre, E., Merot, P., Davy, P.: Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. Appl. Geochem. 23, 2686–2707. http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.06.001, 2008.

Barbaud, J.Y. : Etude chimique et isotopique des aquifères de la Chaîne des Puys, temps de transit et vulnérabilité des systèmes de Volvic et d'Argnat. Thèse de 3ième cycle, Faculté des Sciences d'Avignon, Avignon, 209 pp, 1983.

Baud, B.: Characterisation of andesitic volcanic aquifers through a multidisciplinary approach, conceptual model. PhD Thesis, Université de Montpellier, 2024.

Baulon, L. Déterminisme climatique et hydrogéologique de l'évolution à long terme des niveaux piézométriques. Sciences de la Terre, PhD Thesis, Normandie Université. NNT : 2023NORMR015. tel-04123371, 2023

Belin, J.M., Livet, M., Heraud, H.: Autoroute Périgueux Clermont-Ferrand. Dossier d'étude préliminaire de la Chaîne des Puys. Ministère de l'équipement et du Logement, CETE Lyon, laboratoire régional de Clermont-Ferrand, 1988.

Belkessa, R. : Hydrogéologie de la Chaîne des Puys. D.E.S. Univ. Cl-Fd, Université de Clermont-Ferrand, 1977.

Bertrand, G. : De la pluie à l'eau souterraine : Apport du traçage Naturel (ions majeurs, isotopes) à l'étude du fonctionnement des aquifères volcaniques (Bassin d'Argnat, Auvergne France). PhD Thesis, Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand II, 2009.

PROJET

Bertrand, G., Celle-Jeanton, H., Huneau, F., Loock, S., Renac, C., : Identification of different groundwater flowpaths within volcanic aquifers using natural tracers for the evaluation of the influence of lava flows morphology (Argnat basin, Chaîne des Puys, France). Journal of Hydrology 391, 223-234, 2010.

Boivin, P., Thouret, J.C., Briot, D., Deniel, C., Gourgaud, A., Labazuy, P., De Larouzière, F.D., Livet, M., Médard, E., Merciecca. C., Mergoil, J., Miallier, D., Morel, J.M., Thouret, J.C., Vernet, G.: Carte volcanologique de la Chaîne des Puys, 6th ed, 2017.

Bouchet, C. : Hydrogéologie du milieu volcanique, le bassin de la Veyre, analyse et modélisation du bassin versant du lac d'Aydat, étude d'un aquifère fissuré basaltique. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, Avignon, 319 pp, 1987.

Busenberg, E., and Plummer, L.N.: Use of chlorofluorocarbons (CCl3F and CCl2F2) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma, Water Resour. Res., 28(9), 2257–2283, doi:10.1029/92WR01263, 1992.

Busenberg, E., and Plummer, L.N.: Dating Young Ground Water With Sulfur Hexafluoride - Natural and Anthropogenic Sources of Sulfur Hexafluoride. Water Resources Research, 36, 3011-3030, 10.1029/2000WR900151, 2000.

Camus, G. : La Chaîne des Puys (Massif Ce,tral Français) étude structurale et volcanologique. Thèse d'Etat, UEF Sciences exactes et Naturelles, université de Clermont-Ferrand, 322 pp, 1975.

Canellas, C., Gibelin, A.L., Lassegues, P., Kerdoncuff, M., Dandin, P., Simon, P. : Les normales climatiques spatialisées Aurelhy 1981-2010 : températures et précipitations. La Météorologie, 8, 47, 10.4267/2042/53750, 2014.

Celle-Jeanton, H., Bertrand, G., Loock, S., Huneau, F. : Conditions d'alimentation et vulnérabilité des sources de bout de coulées volcaniques de la Chaîne des Puys: exemple du bassin d'Argnat. Géologues 15, 9–13, 2008

CETE/LRPC. : Bilan de la resource hydrogéologique des bassins de la Chaîne des Puys, Lyon, 2009.

Chambers, L.A., Gooddy, D.C., Binley, A.M.: Use and application of CFC-11, CFC-12, CFC-113 and SF6 as environmental tracers of groundwater residence time: A review. Geoscience Frontiers, Volume 10, Issue 5, Pages 1643-1652, ISSN 1674-9871, 10.1016/j.gsf.2018.02.017, 2019.

Colombier, M., Gurioli, L., Druitt, T.H. et al. Textural evolution of magma during the 9.4-ka trachytic explosive eruption at Kilian Volcano, Chaîne des Puys, France. Bull Volcanol 79, 17. https://doi.org/10.1007/s00445-017-1099-7, 2017.

Cook, P., Solomon, D., Plummer, L., Busenberg, E., Schiff, S.: Chlorofluorocarbons as tracers of groundwater transport processes in a shallow, silty sand aquifer. Water Resour. Res., 31, 425–434, 10.1029/94WR02528, 1995.

PROJET

Cook, P., Herczeg, A.: Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, 10.1007/978-1-4615-4557-6, 2000.

Cook, P.G., Plummer, L.N., Busenberg, E., Solomon, D.K., Han, L.F.: Chapter 4: Effects and processes that can modify apparent CFC age. Use of chlorofluorocarbons in hydrology: a guidebook. International Atomic Agency, STI/PUB/1238, Vienna, ISBN 92-0-1000805-8, 2006.

Cosgrove, W.J. and Loucks, D.P., 2015. Water management: current and future challenges and research directions. Water Resources Research, 51, 4823–4839, doi:10.1002/2014WR016869, 2015

Cotterman, K.A.; Kendall, A.D.; Basso, B.; Hyndman, D.W. Groundwater Depletion and Climate Change: Future Prospects of Crop Production in the Central High Plains Aquifer. Clim. Change, 146, 187–20, 2018.

Craig, H.: Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133: 1702-1703, 1961.

Custodio, E. Low permeability volcanics in the Canary Islands (Spain), 1985.

Dayon, G., Boe, J., Martin, E., Gailhard, J.: Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. Comptes Rendus Géoscience, 350, pp.141-153, 10.1016/j.crte.2018.03.001, 2018.

Fouillac C., Fouillac, A.M., Chery, L.: Isotopic studies of deep and surface waters in the French Massif central. Proceedings of isotope techniques in water resources development. Vienne, 11-15 mars, p. 646-648, 1991.

Fournier, C. : Méthodes géoélectriques appliquées à l'hydrogéologie en région volcanique (Chaîne des Puys, Massif Central Français). Développement de la méthode des potentiels spontanés en hydrogéologie. Thèse de 3ième cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1983.

Gaubi, E.B. : Etude hydrogéologique de l'extrémité aval du bassin d'Argnat (Chaîne des Puys, Massif Central Français). Projet de l'autoroute Périgueux-Clermont-Ferrand. Mémoire de DEA national d'hydrogéologie, Sciences de l'eau et aménagement, Besançon, 1990.

Githui, F., Mutua, F., Bauwens, W. : Estimating the impacts of land-cover change on runoff using the soil and water assessment tool (SWAT): case study of Nzoia catchment, Kenya / Estimation des impacts du changement d'occupation du sol sur l'écoulement à l'aide de SWAT: étude du cas du bassin de Nzoia, Kenya. Hydrological Sciences Journal, 54(5), 899–908, 10.1623/hysj.54.5.899, 2009.

Gleick, P.H. and Palaniappan, M.: Peak water limits to freshwater withdrawal and use. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107, 11155–11162. doi:10.1073/pnas.1004812107, 2010.

Harris, A., Latutrie, B., Van Wyk de Vries, B., Saubin, E., Foucher, M., Gurioli, L., Zanella, E., Médard, E., Nauret, F. Emplacement of monogenetic lava flows on eroded terrain, Part II: The case of the Artière valley (Grave Noire, France), Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 438, 2023.

PROJET

Heaton, T., Vogel, J.: Excess air in groundwater. J. Hydrol, 50, 201–216, 10.1016/0022-1694(81)90070-6, 1981.

IAEA/WMO 2024 Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. Accessible at: https://nucleus.iaea.org/wiser.

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

Janot, S. Genèse et évolution des magmas primitifs de la chaine des Puys (Massif Central): une approche par l'étude des inclusions magmatiques. Géologie appliquée. PhD Thesis, Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II. NNT : 2005CLF21619. tel-00684061, 2005

Jasechko, S., Seybold, H., Perrone, D., Fan, Y., Shamsudduha, M., Taylor, R., Fallatah, O., Kirchner, J.: Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. Nature, 625, 715-721, 10.1038/s41586-023-06879-8, 2024.

Josnin, J.Y., Livet, M., Besson, J.C.: Characterizing unsaturated flow from packed scoriated lapilli: Application to Strombolian cone hydrodynamic behaviour. Journal of hydrology 335, 225-239, 2007.

Joux, M. : Structure et fonctionnement hydrogéologique du système aquifère volcanique des eaux minérales de Volvic (Chaîne des Puys, Massif Central Français), PhD Thesis, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 2002.

Labasque, T., Ayraud, V., Aquilina, L., Corre, L. : Dosage des composés chlorofluorocarbonatés et du tétrachlorure de carbone dans les eaux souterraines. Application à la datation des eaux. Cahiers techniques de Géosciences Rennes. No. 4, 2006.

Labbe, J., Celle, H., Devidal, J.L., Albaric, J., Mailhot, G.: Combined Impacts of Climate Change and Water Withdrawals on the Water Balance at the Watershed Scale - The Case of the Allier Alluvial Hydrosystem (France). Sustainability, 15, 3275, 10.3390/su15043275, 2023.

Labrousse, C., Ludwig, W., Pinel, S., Sadaoui, M., Toreti, A., and Lacquement, G. Declining water resources in response to global warming and changes in atmospheric circulation patterns over southern Mediterranean France, Hydrol. Earth Syst. Sci., 26, 6055–6071, 10.5194/hess-26-6055-2022, 2022.

Lachassagne, P., Aunay, B., Frissant, N., Guilbert, M., Malard, A. High-resolution conceptual hydrogeological model of complex basaltic volcanic islands: a Mayotte, Comoros, case study. Terra Nova 26, 307–321, 10.1111/ter.121022014.

Lanini, S., Caballero, Y., Seguin, J.-J. and Maréchal, J.-C.: ESPERE - A Multiple-Method Microsoft Excel Application for Estimating Aquifer Recharge. Groundwater, 54: 155-156. https://doi.org/10.1111/gwat.12390, 2015.

PROJET

Lapworth, D.J., Das, P., Shaw, A., Mukherjee, A., Civil, W., Petersen, J.O., Gooddy, D.C., Wakefield, O., Finlayson, A., Krishan, G., Sengupta, P., MacDonald, A.M.: Deep urban groundwater vulnerability in India revealed through the use of emerging organic contaminants and residence time tracers. Environmental Pollution, Volume 240, Pages 938-949, ISSN 0269-7491, 10.1016/j.envpol.2018.04.053, 2018.

Le Bas, C.. : "Carte de la Réserve Utile en eau issue de la Base de Données Géographique des Sols de France", https://doi.org/10.15454/JPB9RB, Recherche Data Gouv, V2, 2018.

Livet, M., Blavoux, B., d'Arcy, D., Mishellany, A. : Capture and sub-lava storage of groundwater at the volcanic site of Beaunit (Puy-de-Dôme) / Capture et emmagasinement sous coulée au site volcanique de Beaunit (Puy-de-Dôme), Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, Volume 330, Issue 1, Pages 47-52, ISSN 1251-8050, 10.1016/S1251-8050(00)00123-3, 2000.

Loock, S., Celle-Jeanton, H., Bertrand, G., Van Wyk de Vries, B. : Les aquifères des coulées basaltiques. Réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, 21–24 avril 2008, presentation 29-d, 2008.

Lustrino, M. & Wilson, M. The Circum-Mediterranean Anorogenic Cenozoic Igneous Province. Earth-science Reviews - EARTH-SCI REV. 81. 1-65. 10.1016/j.earscirev.2006.09.002, 2007

Magi, F., Doveri, M., Menichini, M., Minissale, A., Vaselli, O.: Groundwater response to local climate variability: hydrogeological and isotopic evidences from the Mt. Amiata volcanic aquifer (Tuscany, central Italy). Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 30, 10.1007/s12210-019-00779-8, 2019.

Maiss, M., Brenninkmeijer, C.a.M.: Atmospheric SF6: trends, sources, and prospects. Environ. Sci. Technol. 32, 3077–3086, 10.1021/es9802807, 1998.

Merle, O. & Michon, L. The formation of the West European Rift; a new model as exemplified by the Massif Central area. Bulletin de la Société Géologique de France. 172 (2), pp.213 - 221. 10.2113/172.2.213, 2001.

Merle, O., Aumar, C., Labazuy, P., Merciecca, C., Buvat, S. Structuration tertiaire et quaternaire du Plateau des Dômes (Chaîne des Puys, Massif central, France). *Géologie de la France*, 2023.

Michel, R. : Hydrogéologie des formations volcaniques de l'Auvergne. Bulletin de la Société Géologique de France, 7, pp. 977-994, 1957.

Murray, S.J., Foster, P.N., Prentice, I.C.: Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. Journal of Hydrology, Volumes 448–449, Pages 14-29, ISSN 0022-1694, 10.1016/j.jhydrol.2012.02.044, 2012.

Nearing, M., Jetten, V.G., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M., Nunes, J.P., Renschler, C., Souchère, V., Oost, K.: Modeling Response of Soil Erosion and Runoff to Changes in Precipitation and Cover. Catena. 131-154. 10.1016/j.catena.2005.03.007, 2005.

PROJET

Parajuli, P.B.: Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi. Hydrol. Process., 24: 3785-3797, 10.1002/hyp.7793, 2010.

Plummer, L.N., Busenberg, E., Bohlke, J.K., Nelms, D.L., Michel, R.L., Schlosser, P.: Groundwater residence times in Shenandoah National Park, Blue Ridge Mountains, Virginia, USA: a multi-tracer approach. Chem. Geol, 179, 93–111, 10.1016/S0009-2541(01)00317-5, 2001.

Plummer, L.N., Busenberg, E., & Cook, P.G.: Chapter 3 Principles of chlorofluorocarbon dating. International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA, 2006.

Plummer, L.N., Eggleston, J.R., Andreasen, D.C., Raffensperger, J.P., Hunt, A.G., Casile, G.C.: Old groundwater in parts of the upper Patapsco aquifer, Atlantic Coastal Plain, Maryland, USA: evidence from radiocarbon, chlorine-36 and helium-4. Hydrogeol. J, 20, 1269–1294, 10.1007/s10040-012-0871-1, 2012.

Poncela, R., Santamarta, J. C., García-Gil, A., Cruz-Pérez, N., Skupien, E., García-Barba, J. Hydrogeological characterization of heterogeneous volcanic aquifers in the Canary Islands using recession analysis of deep water gallery discharge. Journal of Hydrology, 610, 127975, 2022.

Prudhomme, C., et al.: Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111 (9), 3262–3267. National Academy of Sciences, 10.1073/pnas.1222473110, 2014.

Rockström, J., Steffen, Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T.,Van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., Foley, J.: A safe operating space for humanity. Nature, v.461, 472-475, 46, 2009.

Rouquet, S. : Etude du fonctionnement hydrogéologique et modélisation de l'hydrosystème de Volvic : Prise en compte du rôle joué par la forêt. PhD Thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.

Rouquet, S., Boivin, P., Lachassagne, P., Ledoux, E.: A 3-D genetic approach to high-resolution geological modelling of the volcanic infill of a paleovalley system. Application to the Volvic catchment (Chaîne des Puys, France). Bulletin de la Société Géologique de France 183, 395–407. 10.2113/gssgfbull.183.5.395, 2012.

Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R., & Thirel, G.: Predicting flow intermittence in France under climate change. Hydrological Sciences Journal, 66(14), 2046–2059, https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1963444, 2021.

PROJET

Sebol, L.A., Robertson, W.D., Busenberg, E., Plummer, L.N., Ryan, M.C., Schiff, S.L. Evidence of CFC degradation in groundwater under pyrite-oxidizing conditions, Journal of Hydrology, Volume 347, Issues 1–2, Pages 1-12, ISSN 0022-1694, 10.1016/j.jhydrol.2007.08.009, 2007

Shapiro, S. D., Schlosser, P., Smethie, W. M., & Stute, M.: The use of 3H and tritiogenic 3He to determine CFC degradation and vertical mixing rates in Framvaren Fjord, Norway. Marine Chemistry, 59(1-2), 141-157, 10.1016/S0304-4203(97)00007-8, 1997.

Spurlock, F., Burow, K. and Dubrovsky, N.: Chlorofluorocarbon Dating of Herbicide-Containing Well Waters in Fresno and Tulare Counties, California. Journal of Environmental Quality, 29: 474-483, 10.2134/jeq2000.00472425002900020016x, 2000

Strohmenger, L., Ackerer, P., Belfort, B., Pierret, M.C.: Local and seasonal climate change and its influence on the hydrological cycle in a mountainous forested catchment, Journal of Hydrology, Volume 610, 127914, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127914, 2022.

Tweed S., Celle-Jeanton H., Cabot L., Huneau F., De Montety V., Nicolau N., Travi Y., Babic M., Aquilina L., Vergnaud-Ayraud V., Leblanc M. : Impact of irrigated agriculture on groundwater resources in a temperate humid region. Science of The Total Environment, Vol. 613–614, 1302-1316, 2018.

Uriostegui, S., Bibby, R., Esser, B., Clark, J.: Quantifying annual groundwater recharge and storage in the central Sierra Nevada using naturally-occurring 35 S: Quantifying annual groundwater recharge and storage using 35 S. Hydrological Processes, 31, 10.1002/hyp.11112, 2016.

Van Der Min, J. Etude hydrogéologique des grands captages d'eau potable dans les coulées de lave des environs de Clermont-Fd, 1945

Vittecoq, B., Gourcy, L., Baran, N. : Datation des eaux souterraines de Martinique par l'analyse conjointe des CFC, SF6 et tritium et relation avec les concentrations en nitrates et produits phytosanitaires. BRGM/RP-55844-FR, 50 pages, 29 illustrations, 2007.

Waibel, M.S., Gannett, M.W., Chang, H., Hulbe, C.L.: Spatial variability of the response to climate change in regional groundwater systems – Examples from simulations in the Deschutes Basin, Oregon. Journal of Hydrology, Volume 486, Pages 187-201, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.019, 2013.

Wigley, T. & Raper, S.: Interpretation of High Projections for Global-Mean Warming. Science (New York, N.Y.), 293, 451-4, 10.1126/science.1061604, 2001.

Yokoyama, T., & Takeuchi, S. Porosimetry of vesicular volcanic products by a water-expulsion method and the relationship of pore characteristics to permeability. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 114, 2009.

PROJET

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1: Cartes d'occupation des sols Corine Land Cover. a. carte 1990 b. carte 2018 c. carte des changements entre 1990 et 2018 (https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0)..... 7
Figure 2 : Carte géologique simplifiée de l'impluvium de Volvic accompagnée d'informations hydrogéologiques (d'après Boivin et al. 2017). 8
Figure 3 : Carte de localisation des points de suivi accompagnée d'informations sur l'instrumentation et les prélèvements réalisés..... 11
Figure 4 : Chronologie des campagnes de terrain, du suivi et de l'instrumentation sur l'Impluvium de Volvic. 13
Figure 5: Moyennes annuelles des prélèvements AEP Goulet et de la Société des eaux de Volvic de 1950 à 2023 sur l'Impluvium de Volvic. 14
Figure 6 : Géologie du bassin versant de Volvic. a. coupe Nord-Est (cs.1) b. c. et d. coupes Nord-Sud depuis le milieu de l'impluvium (cs.2) vers la partie avale à l'extrémité est (cs.4). 19
Figure 7 : Evolution des précipitations brutes et de la recharge (moyennes annuelles) sur la période 1950-2023 sur l'Impluvium de Volvic (station VOLVIC - Météo-France). Les lignes pointillées correspondent aux moyennes glissantes sur 5 ans. 20
Figure 8 : Evolution annuelle des pluies saisonnières sur l'Impluvium de Volvic - Station météorologique de Sayat_SAPC. 21
Figure 9 : 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. 21
Figure 10 : Ecart à la moyenne (1994-2021) des températures moyennes annuelles sur l'Impluvium de Volvic. 22
Figure 11 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic par méthode de calcul (d'après ESPERE®) sur la période 1950-2021. 23
Figure 12 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1950-2021. 23
Figure 13 : Recharge annuelle au niveau de l'Impluvium de Volvic (moyenne méthodes d'après ESPERE®) sur la période 1980-2021. 24
Figure 14 : Carte de la recharge spatialisée sur l'impluvium de Volvic sur la période 2000-2021..... 24
Figure 15 : Précipitations mensuelles (mm) à la station météorologique de Volvic et débit mensuel ($L.s^{-1}$) à chaque source de front de coulée de 1975 à 2023. 25
Figure 16 : Corrélation entre le débit de la source Chapelle/St Genest et la somme des débits des sources Pale et Gargouilloux. 26
Figure 17 : 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. 26
Figure 18 : Evolution des débits mesurés à la galerie du Goulet (Griffon) et débits mis en distribution. La régression linéaire est matérialisée par une droite en pointillés..... 27
Figure 19 : Chroniques piézométriques aux points de suivi P1/Maar, P10, N27 et LATIA. Les lignes pointillés représentent la régression linéaire des courbes piézométriques. La variabilité maximale du niveau de nappe durant la période d'étude est indiquée en pourcents sur le graphique. 28
Figure 20 : Chroniques piézométriques aux points de suivi des forages de la Société des Eaux de Volvic : Arvic, Arvic sud, Volvillante est, Clairval et Aubignat. Les moyennes glissantes sur 30 jours sont tracées afin d'observer la tendance du niveau de nappe hors influence des pompages. Les lignes pointillés représentent

PROJET

la régression linéaire des courbes piézométriques. La variabilité maximale du niveau de nappe durant la période d'étude est indiquée en pourcentage sur le graphique. 29
Figure 21 : a. Diagramme de Piper présentant la composition chimique (juin-2022, oct-2022, fév-2023) des eaux échantillonnées sur l'impluvium de Volvic (amont, milieu, aval) b. Diagramme de Stiff présentant les faciès des eaux collectées à l'amont, milieu et aval de l'impluvium de Volvic au cours des trois campagnes. 30
Figure 22 : a. Conductivité électrique en $\mu S.cm^{-1}$ b. Cl^- (en mg. L^{-1}) en fonction de la conductivité électrique ($\mu S.cm^{-1}$) c. Na^+ en fonction de Cl^- (en mg. L^{-1}) et d. Concentration en NO_3^- (en mg. L^{-1}) pour les eaux de l'impluvium de Volvic pour les campagnes de juin 2022 (vert), octobre 2022 (orange) et février 2023. 31
Figure 23 : Chroniques de conductivité électrique (en $\mu S.cm^{-1}$) à la Pale, P10, M. Marcenat, Goulet et P1/Maar instrumentés sur la période de l'étude (2022 à 2023). 33
Figure 24 : Chroniques de température (en °C) à la Pale, P10, M. Marcenat, Gouet et P1 instrumentés sur la période de l'étude (2022 à 2023). 33
Figure 25 : δ^2H et $\delta^{18}O$ dans les précipitations et les eaux souterraines de l'impluvium de Volvic. Les eaux souterraines ont été échantillonnées en juin 2022, octobre 2022 et février 2023. Le point de pluviométrie moyenne correspond à la moyenne pondérée pour la période de mai 2022 à janvier 2023. 34
Figure 26 : ^3H (TU) vs CFC-113 (pptv) dans les échantillons d'eau souterraine avec a. campagne de terrain d'octobre 2022 et b. campagne de terrain de février 2023. Les courbes théoriques sont représentées pour le modèle d'écoulement piston (PFM ; bleu), le modèle de mélange exponentiel (EMM ; rouge), le modèle d'écoulement piston exponentiel (EPM ; vert). Les âges apparents des eaux souterraines en années sont indiqués au-dessus de chaque modèle. L'EPM est représenté par différentes courbes correspondant aux ratios suivants : 80% piston - 20% exponentiel et 90% piston - 10% exponentiel. 37
Figure 27 : Modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique de l'Impluvium de Volvic. 39
Figure 28 : a. Débit à l'exutoire de l'impluvium de Volvic montrant la contribution des composantes ancienne (bleu) et récente (vert). b. Évolution de la proportion d'eau récente (exponentielle) par rapport à l'eau ancienne (piston) au cours des 30 dernières années. 42

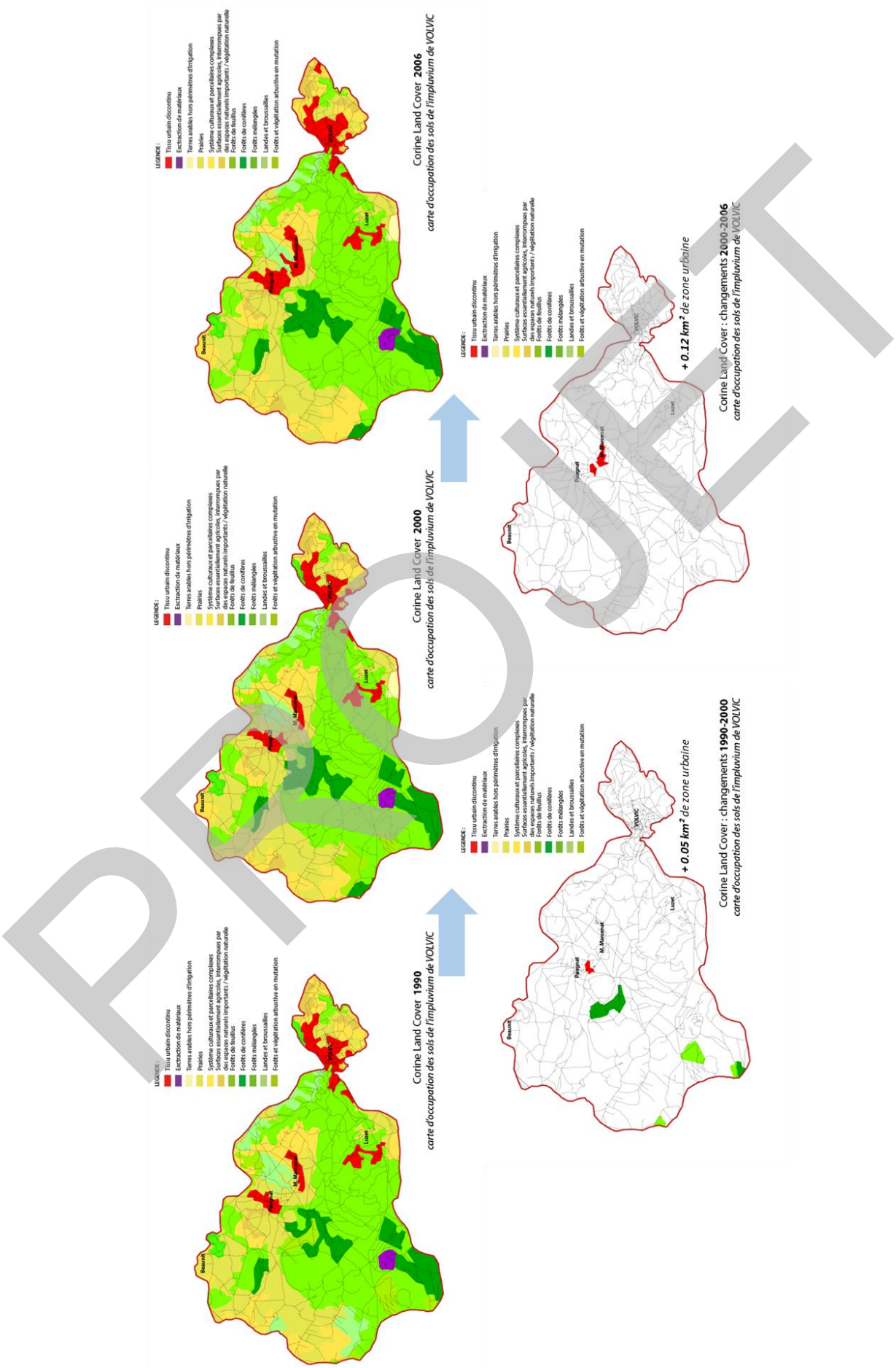
Tableau 1: Plan de financement du post-doctorat sur l'Impluvium de Volvic 6
Tableau 2: Synthèse des données disponibles sur l'Impluvium de Volvic et fournisseurs 12
Tableau 3: Localisation des stations météorologiques du réseau Météo-France utilisées dans le cadre de l'étude 13
Tableau 4: Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines échantillonnées dans le bassin versant de Volvic (pour Garg. et Chap., les mesures et l'échantillonnage ne sont pas effectués directement à l'exutoire mais plusieurs centaines de mètres après. Les valeurs peuvent donc être légèrement différentes, notamment en ce qui concerne la température). 32
Tableau 5: Concentrations en tritium (^3H), CFC-SF6 et gaz dissous dans les eaux souterraines du bassin versant de Volvic. 36
Tableau 6: Temps de résidence moyens (en années) sur la campagne de février 2023 basé sur les multi-traceurs ^3H-CFC-113 et le modèle d'écoulement du piston (PFM). 38

PROJET

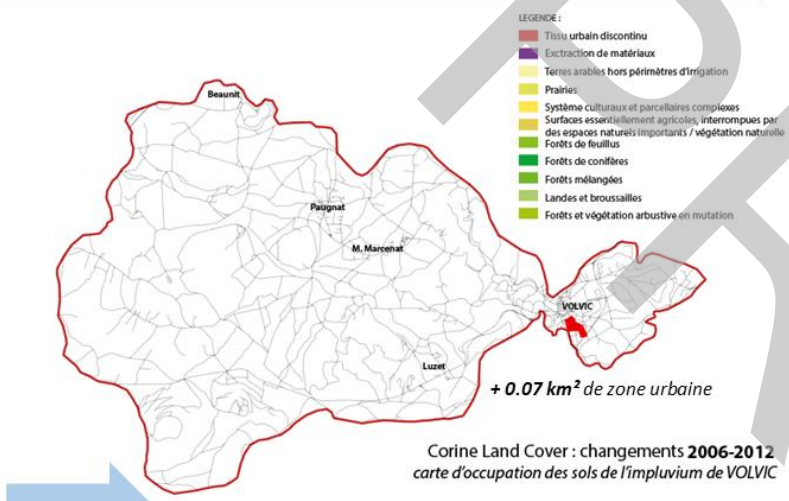
ANNEXES

PROJET

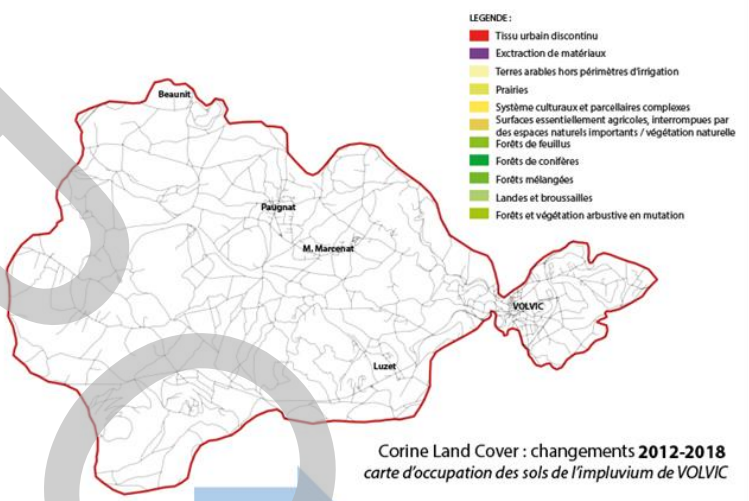
ANNEXE 1 : CARTES DE L'OCCUPATION DES SOLS (CORINE LANDCOVER) SUR L'IMPLUVIUM DE VOLVIC DE 1990 A 2018



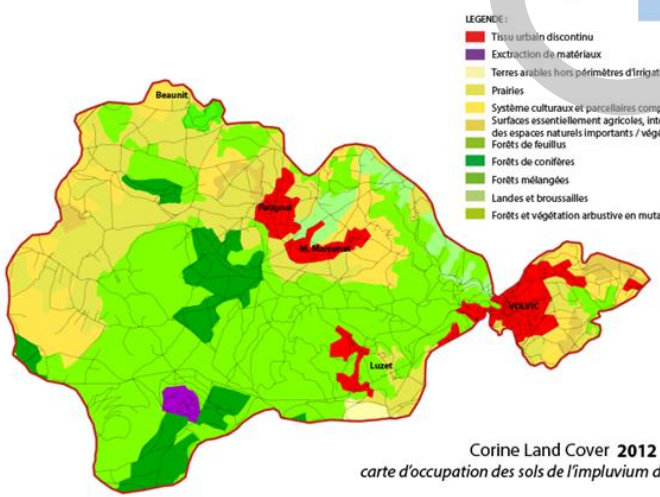
PROJET



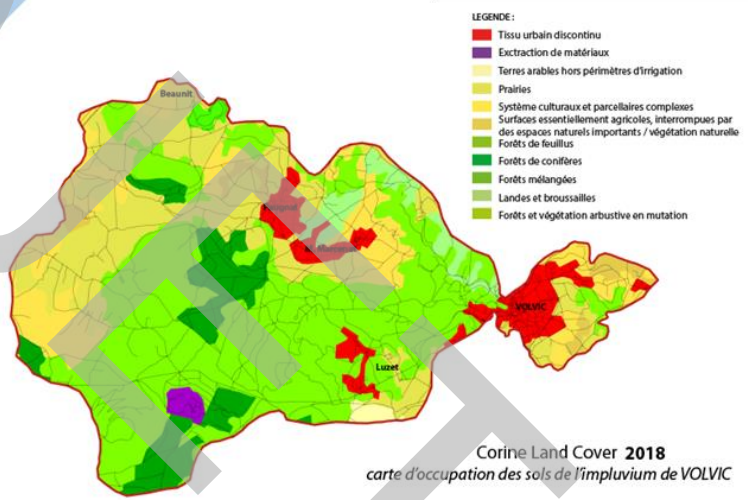
Corine Land Cover : changements **2006-2012**
carte d'occupation des sols de l'impluvium de VOLVIC



Corine Land Cover : changements **2012-2018**
carte d'occupation des sols de l'impluvium de VOLVIC



Corine Land Cover **2012**
carte d'occupation des sols de l'impluvium de VOLVIC



Corine Land Cover **2018**
carte d'occupation des sols de l'impluvium de VOLVIC

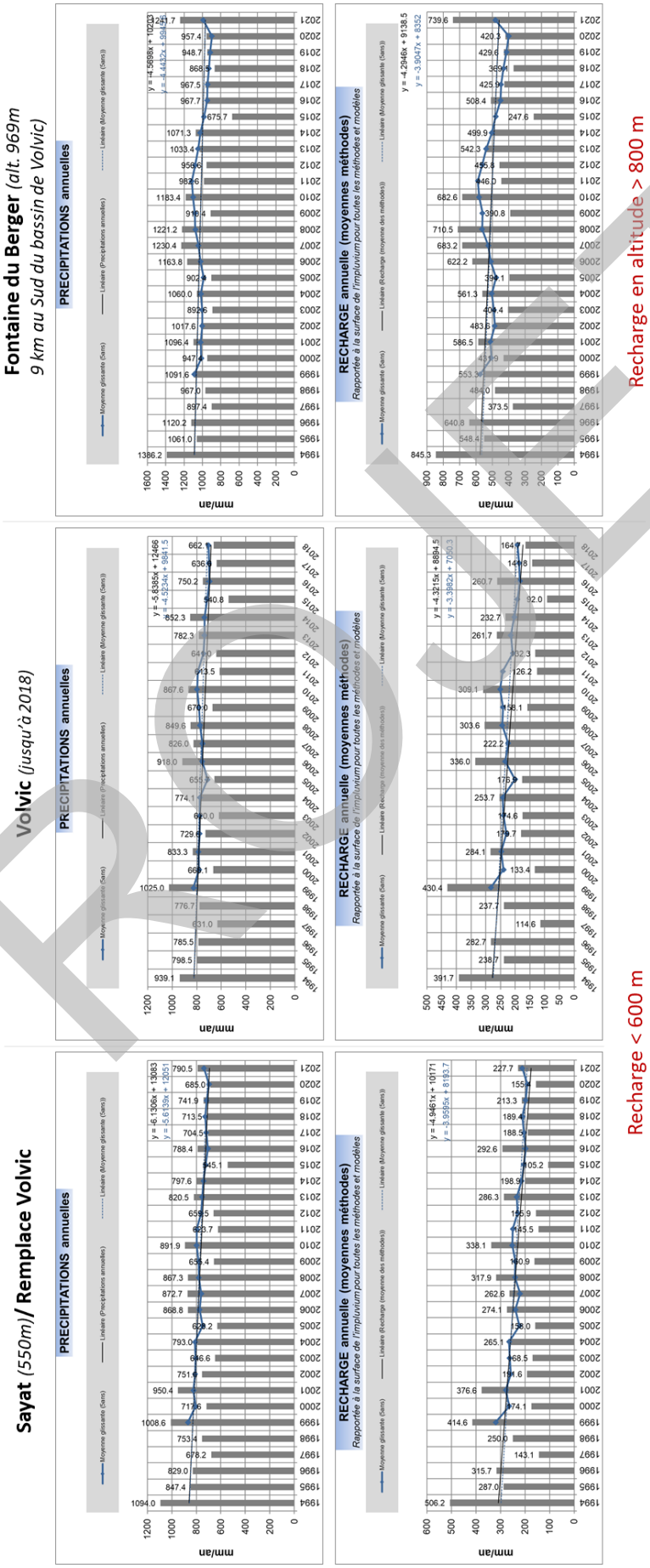
PROJET

ANNEXE 2 : INFORMATIONS RELATIVES AUX DONNEES UTILISEES

TYPE DE DONNEE	SOURCE / FOURNISSEUR	PERIODE UTILISEE début	fin	COMMENTAIRES
Débit Gargouilloux	DREAL (https://www.hydro.eaufrance.fr)	04/11/2010	31/10/2023	Code site: K277 4710
Débit Pâle	DREAL (https://www.hydro.eaufrance.fr)	04/11/2010	31/10/2023	Code site: K276 7010
Débit Chapelle / St Genest	DREAL (https://www.hydro.eaufrance.fr)	01/03/1975	31/10/2023	Code site: K277 8010
Pluviométrie et température point de grille Volvic (8km²)	MétéoFrance (D.Marchal)	01/01/1959	31/10/2023	
Pluviométrie station météorologique de Volvic	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1950	31/12/2018	code : 63470001
Pluviométrie et température station météorologique de Sayat	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63417001
Pluviométrie et température station météorologique de Clermont Fd	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63113001
Pluviométrie et température station météorologique de St Genes	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63346001 *usage: spatialisation de la recharge*
Pluviométrie et température station météorologique de St Gervais	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63354004
Pluviométrie et température station météorologique de Plauzat	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63282001
Pluviométrie et température station météorologique de Font du Ber	MétéoFrance (https://publitheque.meteo.fr)	01/01/1994	31/12/2021	code MétéoFrance: 63263005
Débits prélevés Société des Eaux de Volvic (tous forages)	données internes Société des Eaux de Volvic	01/10/1965	31/10/2023	jusqu'en 1992 valeur autorisation prélèvement puis valeurs mesurées par l'exploitant
Débits prélevés pour Alimentation en Eau Potable au Goulet	données internes Syndicat Mixte des utilisateurs d'eau de la région de Riom (SMUERR)	01/10/1965	31/10/2023	jusqu'à 2014 valeur autorisation prélèvement puis valeurs mesurées par l'exploitant

PROJET

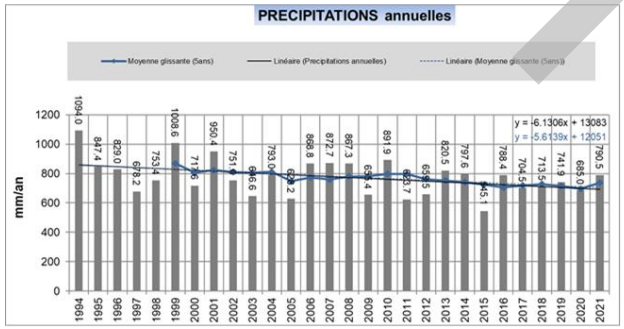
ANNEXE 3 : CALCUL DE RECHARGE (A PARTIR DE LA FEUILLE DE CALCUL ESPERE®) A L'ECHELLE DE DIFFERENTES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA CHAINE DES PUYS

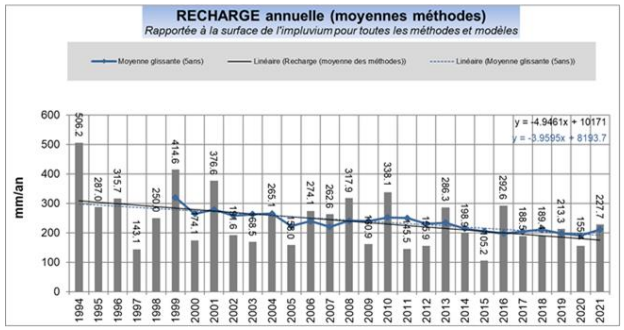


PROJET

*Secteur **Est** Chaine des Puys*

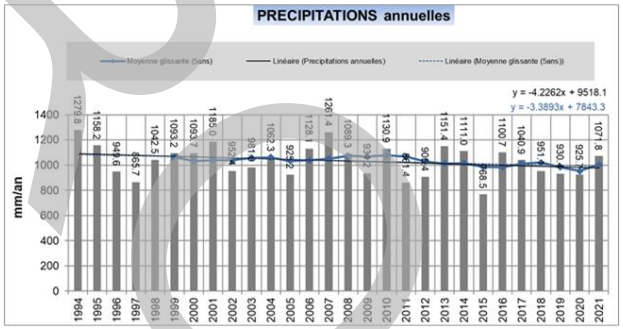
Sayat *(550m)*/ **Volvic**

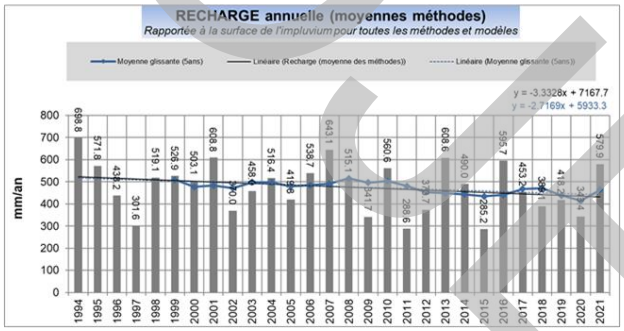




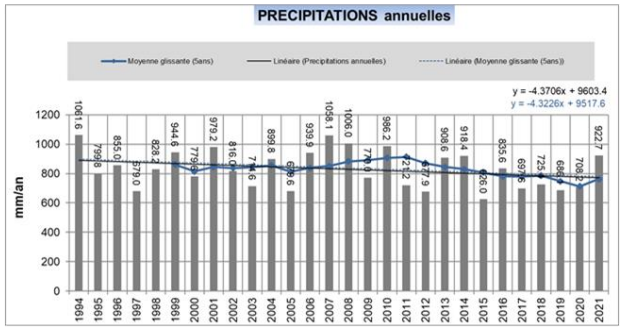
*Secteur **Ouest** Chaine des Puys*

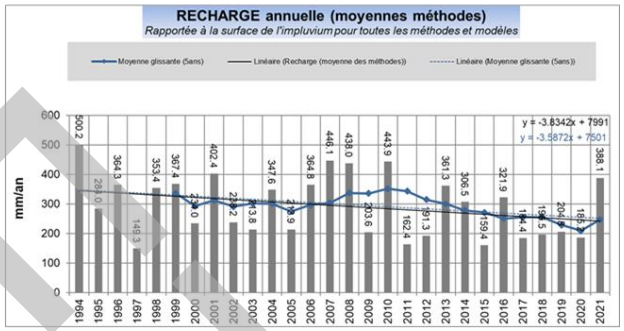
Gelles





St Gervais d'Auvergne





PROJET

ANNEXE 4 : CAPACITE DE STOCKAGE DES FORMATIONS VOLCANIQUES DE L'IMPLUVIUM DE VOLVIC

La condition du remplissage du système aquifère de Volvic et de son éventuelle saturation avait été posée. Cette annexe vise à valider le modèle conceptuel proposé par des calculs de volumes d'infiltration et de taux de saturation des matériaux aquifères.

Pour répondre à cette question, sont calculés les **volumes d'eau pouvant s'infiltrer** (= recharge tenant compte du gradient altitudinal) :

- a. dans un premier temps de la **partie haute du bassin versant**, au niveau des édifices volcaniques (= cônes de scories – illustration a.) où nous estimons une recharge pouvant s'accumuler sur 30 à 40 ans.
- b. sur le **reste du bassin versant**, dans les coulées de lave (illustration b.), où nous estimons une recharge annuelle correspondant à l'apport récent du modèle (partie exponentielle).

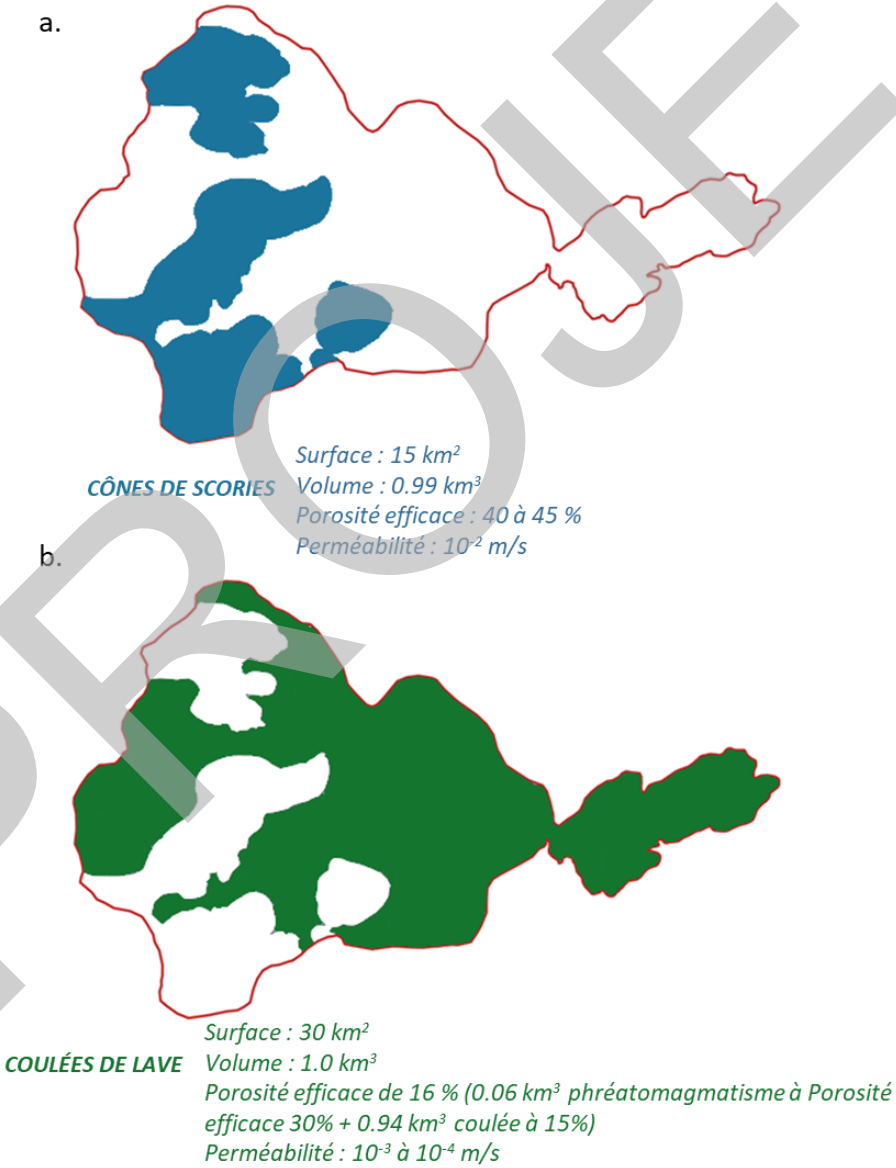


Figure 1 (A4) : a. Superficie du la zone haute de l'Impluvium : cônes de scories et propriétés hydrodynamiques associées b. Superficie des coulées de laves de l'Impluvium et propriétés hydrodynamiques associées.

PROJET

a. estimation des volumes d'eau pouvant s'infiltrer sur la partie haute de l'Impluvium, au niveau des cônes de scories :

Ayant déterminé un temps de résidence moyen des eaux souterraines de 34 ans (± 1,2) ans, nous estimons une recharge pouvant ainsi s'accumuler entre 30 et 40 ans afin de borner avec une valeur basse et une valeur haute nos calculs.

Dans la partie haute du bassin versant, le recharge moyenne est estimée à environ 480 mm/an (déterminée à partir du calcul de la recharge avec ESPERE® sur plusieurs stations météorologiques du réseau Météo France et la spatialisation de cette donnée), en tenant compte de la superficie de la zone et du gradient altitudinal. Ce qui représente un volume d'eau annuel moyenne de 0.007 km^3 :

- Sur 30 ans ce volume d'eau à l'infiltration est de 0.230 km^3
- Sur 40 ans ce volume d'eau à l'infiltration est de 0.307 km^3

A partir des propriétés hydrodynamiques des formations, rappelées dans la figure ci-dessus partie a. (cf. partie site d'étude – Géologie), le volume des vides des matériaux scoriacés (=volume pouvant stocker de l'eau – nommé ci-après *Volume vides $_{cônes}$*) est déterminé :

$$Volume\ vides_{\ cones} = 45\% \times (Volumecones_{\ VOLVIC}) \qquad \textit{eq.(1)}$$

$$Volume\ vides_{\ cones} = 45\% \times 0.99$$

$$\boldsymbol{Volume\ vides_{\ cones} = 0.45\ km^3}$$

Connaissant le volume d'eau pouvant s'infiltrer (recharge sur 30 ou 40 ans) sur la partie haute de l'Impluvium, et connaissance le volume des vides des matériaux (cônes de scories), il est possible d'estimer le pourcentage de saturation des formations :

$$Pourcentage\ de\ saturation = \frac{Volume_{eau\ recharge}}{Volume\ vides_{\ cones}} \qquad \textit{eq.(2)}$$

- Pour une recharge sur 30ans : $\boldsymbol{\%saturation_{30ANS} = \frac{0.230}{0.45} = 51.7}$

PROJET

- Pour une recharge sur 40 ans :

$$\%\boldsymbol{saturation_{40ANS}} = \frac{\mathbf{0.307}}{\mathbf{0.45}} = \mathbf{69.0}$$

Un **pourcentage de saturation** des cônes de **51.7%** (30 ans) à **69.0%** (40 ans) est obtenu, ce qui est cohérent avec le modèle proposé. Les matériaux ne sont pas complètement saturés.

b. estimation des volumes d'eau pouvant s'infiltrer sur le reste de l'Impluvium, (hors cônes de scories) au niveau des coulées de lave :

De la même manière que précédemment :

Sur le **reste du bassin versant**, dans les coulées de lave (illustration b.), nous estimons une recharge annuelle correspondant à l'apport récent du modèle (partie exponentielle). Dans cette partie haute du bassin versant, le recharge moyenne est estimée à 240 mm/an (déterminée à partir du calcul de la recharge avec ESPERE® sur plusieurs stations météorologiques du réseau Météo France et la spatialisation de cette donnée), en tenant compte de la superficie de la zone et du gradient altitudinal. Ce qui représente un volume d'eau annuel moyenne de 0.010 km^3.

A partir des propriétés hydrodynamiques des formations, rappelées dans la figure ci-dessus partie b. (cf. partie site d'étude – Géologie), le volume des vides des coulées de lave (=volume pouvant stocker de l'eau – nommé ci-après *Volume vides $_{coulées}$*) est déterminé :

$$Volume\ vides_{\ coulées} = 16\% \times (Volume_{coulées\ VOLVIC}) \qquad \textit{eq.(3)}$$

$$Volume\ vides_{\ coulées} = 16\% \times 1.0$$

$$\boldsymbol{Volume\ vides_{\ coulées} = 0.16\ km^3}$$

PROJET

Connaissant le volume d'eau pouvant s'infiltrer (recharge sur 1 ans) sur le secteur des coulées de lave, et connaissance le volume des vides des matériaux (coulées de lave), il est possible d'estimer le pourcentage de saturation des formations :

$$Pourcentage\ de\ saturation = \frac{Volume_{eau\ recharge}}{Volume\ vides\ _{coulées}} \qquad eq.(4)$$

$$\%\boldsymbol{saturation} = \frac{\mathbf{0.010}}{\mathbf{0.16}} = \mathbf{6.2}$$

Un **pourcentage de saturation** des coulées de lave de **6.2%** (1 an de recharge) est obtenu, ce qui est cohérent avec le modèle proposé. Les matériaux ne sont pas complètement saturés.

PROJET

ANNEXE 5 : CONVENTIONS, AVENANTS ET FICHE PROJET

PROJET

RIOM LIMAGNE & VOLCANS
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

PRÉFET DU PUY-DE-DÔME
Liberté
Égalité
Fraternité

SYNDICAT MIXTE
DES UTILISATEURS D'EAU
DE LA REGION DE RIOM
S.M.U.E.R.R
Mairie de Volvic

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
CHRONO ENVIRONNEMENT

CONVENTION DE PARTENARIAT SCIENTIFIQUE POUR L'AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DE L'IMPLUVIUM DE VOLVIC

PROJET

Table des matières

1 Objet de la convention 2
2 Durée 3
3 Accueil des personnels 3
3.1 Encadrement scientifique du post-doctorant 3
3.2 Matériel et équipements 3
3.3 Rencontres et échanges avec les financeurs 4
4 Contribution financière des parties 4
4.1 Montant 4
4.2 Répartition du financement de l'Etude 4
4.3 Modalités de versement 4
5 Organisation 5
5.1 Désignation et rôles du Coordinateur 5
5.2 Obligations de l'UFC 5
5.3 Composition et rôles du Comité de Pilotage 5
5.4 Composition et rôles du Comité d'échange technique 6
6 Propriété intellectuelle 6
6.1 Connaissances antérieures 6
6.2 Résultats 6
7 Communication 7
7.1 Confidentialité 7
7.2 Publications 8
8 Résiliation 9

PROJET

Entre

La Communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans collectivité territoriale, sise 5 mail Jost Pasquier 63200 RIOM, représentée par Frédéric BONNICHON, Président, dûment habilité par la délibération du conseil communautaire n°20211207.16 du 7 décembre 2021 ci-après nommée « RLV »

N° SIRET : 200 070 753 00146

et

Le préfet du Puy-de-Dôme, représenté par Guilhem BRUN, le directeur de la Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme, ci-après nommé « DDT »

et

Le Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom, établissement public de coopération locale, sis Rue de la Roche Michel, Zone de Champloup 63530 VOLVIC, représenté par Laurent THÉVENOT, Président, dûment habilité par la délibération du Comité Syndical n°021/2021 du 16 décembre 2021 ci-après nommé « SMUERR »

N° SIRET : 256 302 621 00014

et

L'Université de Franche-Comté,

Etablissement public français à caractère scientifique, culturel et professionnel, identifié sous le numéro SIRET 192 512 150 003 63, dont le siège social est situé 1 rue Claude Goudimel, 25030 Besançon Cedex, France,

Représentée par sa Présidente, Madame Marie-Christine WORONOFF, ci-après désignée par l'« UFC »,

L'UFC, en vertu de la convention entre l'université Bourgogne-Franche-Comté et les établissements membres concernés par des unités de recherche labellisées par le CNRS, signée le 15 décembre 2020, dont l'université de Bourgongne Franch-Comté, est délégataire de la signature de la présente convention de partenariat.

RLV la DDT le SMUERR et l'UFC sont ci-après désignées par « les Parties ».

PROJET

CONSIDERANT

Le contexte hydrogéologique du département du Puy-de-Dôme est relativement complexe. Les principaux aquifères exploités pour l'alimentation en eau potable sont :

- la nappe alluviale de l'Allier qui bénéficie du soutien d'étiage par le barrage de Naussac,
- les aquifères de la Chaîne des Puys.

Les nappes de la Chaîne des Puys sont, par leur quantité et leur qualité, des ressources en eau souterraine stratégiques à l'échelle du bassin Loire Bretagne, qualifiées par le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) de nappes à réserver pour l'alimentation en eau potable (NAEP) depuis 2010.

La question des usages de l'eau sur le bassin de Volvic se pose de façon croissante depuis plusieurs années. Le maintien d'une ressource en eau suffisante dans le milieu naturel est de plus en plus difficile en étiage compte-tenu des différents usages (prélèvements pour l'alimentation en eau potable, usages agricoles tels que élevage, maraîchage et irrigation, embouteillage d'eau) mais également en lien avec l'évolution du changement climatique.

Afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère de Volvic, plusieurs études et notamment deux thèses ont déjà été réalisées, qui ont permis de définir le fonctionnement global du système et de confronter les prélèvements et la recharge à l'échelle annuelle.

1 Objet de la convention

Malgré les différents travaux et thèses ayant déjà été menés sur l'impluvium de Volvic permettant de préciser le fonctionnement global du système, des interrogations demeurent encore sur l'évaluation de la vitesse de circulation de l'eau dans l'aquifère et de son temps de séjour.

La présente convention vise donc à encadrer le partenariat entre les différentes parties pour mener des travaux de recherche complémentaires devant conduire à :

- faire la distinction entre nappe du système volcanique et « nappe-ruissellement » en provenance du système socle,
- définir plus précisément la recharge : saisonnalité entre les axes nord et sud, la pérennité de la recharge au cours de l'année et notamment en période d'étiage et définir les temps de transfert entre la zone d'infiltration et les sources de front de coulée,
- anticiper l'évolution quantitative de ces nappes face au changement climatique et/ou aux prélèvements.

Le projet débutera par une synthèse des nombreuses études, thèses, expertises et rapports existants. Ce travail bibliographique devra permettre :

- d'établir un état des lieux des données et des ouvrages existants sur l'impluvium,
- définir le périmètre de l'impluvium,
- de faire une analyse critique des données existantes et de définir, si nécessaire, les mesures ou analyses complémentaires à réaliser pour répondre aux objectifs scientifiques.

Cette première étape permettra d'établir un modèle conceptuel de fonctionnement du bassin de Volvic qui sera confronté avec les données de terrain. Pour caler le modèle conceptuel, le post-doctorant sera amené à proposer les travaux et campagnes de mesures à réaliser (réalisation de piézomètre, campagne géophysique, tests de perméabilité, essais de pompage, traçage de la nappe, campagne de mesures sur les cours d'eau, etc.).

Une fois le modèle défini, il s'agira d'établir un outil d'aide à la gestion intégrant différents scenarii de dérive climatique affectant la recharge et d'établir le niveau de prélèvement associé pour ne pas mettre en péril le système aquifère à horizon 2050.

PROJET

2 Durée

La présente convention entre en vigueur à compter du 1er janvier 2022 pour une durée de vingt-quatre (24) mois.

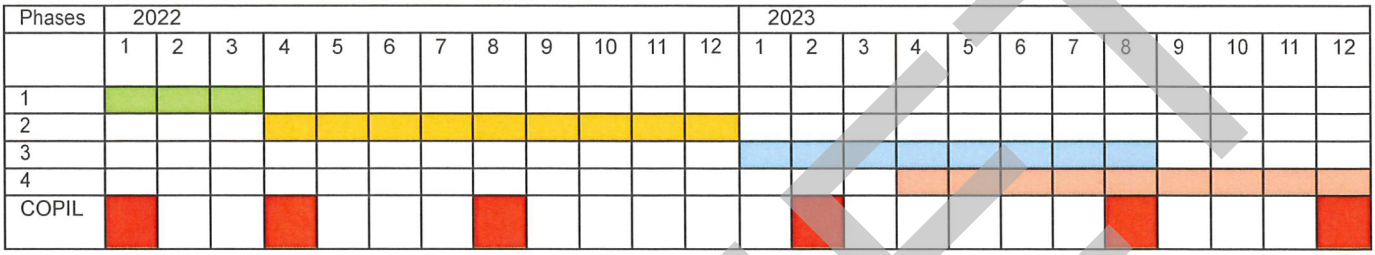
Le calendrier de réalisation du projet est le suivant :

Phase 1 : travail bibliographique, programme des travaux et orientation des campagnes de mesures

Phase 2 : définition du modèle conceptuel, réalisation des campagnes de mesures

Phase 3 : utilisation du modèle pour faire tourner les différents scenarii

Phase 4 : publications / rapport



3 Accueil des personnels

3.1 Encadrement scientifique du post-doctorant

Le post-doctorant est recruté par l'UFC, hébergé au sein de l'UMR Chrono-Environnement, basée à Besançon. Il est encadré scientifiquement par le professeur Hélène CELLE durant toute la durée de la mission.

Compte-tenu des déplacements fréquents sur l'impluvium de Volvic pour réaliser des campagnes de terrain et rencontrer les acteurs locaux, le post-doctorant sera également encadré par le professeur en Volcanologie Benjamin Van der Wyk De Vries du laboratoire magma et volcans de l'université Clermont Auvergne. Il pourra être hébergé dans les locaux de l'Université d'Auvergne.

3.2 Matériel et équipements

Dans le cadre de l'Etude, du personnel de l'une des parties, restant payé par son employeur, peut être amené à travailler dans les locaux de l'autre partie. Le personnel doit alors se conformer au règlement intérieur de l'établissement d'accueil et aux instructions techniques concernant les matériels.

Les matériels et équipements mis par une partie à la disposition de l'autre ou financés par cette partie dans le cadre d'un accord spécifique, restent la propriété de celle-ci. En conséquence chaque partie supportera la charge des dommages subis dans le cadre de l'exécution de l'Etude par les matériels, installations et outillages dont elle est propriétaire, y compris les matériels confiés à l'autre partie et les matériels en essais, même si l'autre partie est responsable du dommage sauf faute lourde ou intentionnelle de cette dernière.

Chaque partie continue toutefois d'assumer à l'égard du personnel qu'elle rémunère, toutes les obligations sociales et fiscales de l'employeur et d'exercer envers lui toutes les prérogatives administratives de gestion (notation, avancement, discipline, etc.). L'établissement d'accueil fournit toute indication utile à l'employeur.

Les Parties assurent la couverture de leurs personnels respectifs en matière d'accidents du travail et de maladies professionnelles sans préjudice d'éventuels recours contre les tiers responsables.

En revanche, la Partie qui accueille les personnels assume la responsabilité civile concernant les actes de ces personnels travaillant dans ses locaux comme s'il s'agissait de son propre personnel, sauf en cas de faute lourde ou intentionnelle, et ce, en vertu du fait que ces personnels sont placés sous son autorité et soumis à son règlement intérieur.

PROJET

3.3 Rencontres et échanges avec les financeurs

A l'occasion des déplacements organisés sur l'impluvium, l'UFC, via le post-doctorant, s'engage à rencontrer les différents financeurs, éventuellement en réunion bilatérale La fréquence moyenne de ces échanges est fixée à 1 jour tous les 2 mois en moyenne sans compter les réunions du comité technique.

Les échanges techniques pourront également se faire en visioconférence à la demande des financeurs ou à la demande du post-doctorant.

4 Contribution financière des parties

4.1 Montant

Le montant de l'opération est fixé à cent cinquante mille Euros TTC (150 000 € TTC).

Celui-ci se décompose de la manière suivante :

- salaire du post-doctorant sur 24 mois : 100 000 € ;
- analyses : 40 000 € (tenant compte du prix élevé des traceurs de datation) : ions majeurs, traces (100 €/ analyse), traceurs de datation 14C (500€/analyse), 3H (100€/analyse), CFCs (100€/analyse), isotopes stables de la molécule d'eau (50€/analyse) et du carbone (50€/analyse). 2 campagnes d'échantillonnage en hautes eaux et en étiage sont prévues. Un suivi temporel sera par ailleurs mis en œuvre sur les exutoires ;
- déplacements (mission + valorisation) : 10 000 €.

Des travaux supplémentaires à la convention pourront être proposés dans le cadre d'un avenant si le comité de pilotage (défini à l'article 5.3) le décide.

4.2 Répartition du financement de l'Etude

Le financement de l'Etude fait l'objet de la répartition financière suivante :

- RLV s'engage à financer 30 % du montant TTC de l'Etude, soit 45 000 € TTC ;
- le SMUERR s'engage à financer 10% du montant TTC de l'Etude, soit 15 000 € TTC ;
- la DDT 63 s'engage à financer 10 % du montant TTC de l'Etude, soit 15 000 € TTC.

Par ailleurs, l'UFC sollicitera directement une subvention complémentaire auprès de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

4.3 Modalités de versement

Le versement de la subvention de l'Agence de l'eau est géré indépendamment de la convention (demande de subvention à effectuer par l'université Franche-Comté auprès de l'Agence de l'eau).

Le versement de la participation de la DDT est géré au travers d'un arrêté préfectoral de subdélégation au profit de l'UFC.

Les versements seront effectués selon les modalités suivantes :

- un premier versement de 30 % à **l'entrée en vigueur** de la convention ;
- un acompte de 40 % après transmission d'un rapport d'avancement fourni au plus tard 12 mois après la date de signature de la convention et permettant de s'assurer de la conformité de l'avancement de l'exécution des actions aux délais présentés dans la demande de subvention ;
- un solde de 30 % sur présentation de l'ensemble des résultats issus du projet et d'un bilan financier.

Si l'avancement est jugé insuffisant au regard de la programmation initiale, les parties intéressées pourront décider de réduire ou de différer le montant de chaque acompte.

PROJET

Les paiements à destination de l'UFC seront effectués par virement au compte de l'Agent Comptable de l'UFC, T.G. du Doubs (Rib ci-dessous), en mentionnant l'attribution au LABORATOIRE Chrono-environnement :

Relevé d'identité bancaire			
Domiciliation : TP Besançon			
Code banque 10071	Code guichet 25000	N° de compte 00001002577	Clé RIB 08
Titulaire du compte : Agent comptable de l'Université de Franche-Comté 1 rue Goudimel 25030 BESANCON CEDEX FRANCE			
IBAN : FR76 1007 1250 0000 0010 0257 708			

5 Organisation

5.1 Désignation et rôles du Coordinateur

Les Parties désignent la DDT en qualité de coordinateur du projet chargé, à ce titre, de :

- convoquer le Comité de pilotage,
- présider le Comité de pilotage,
- rédiger le compte-rendu du Comité de Pilotage,
- coordonner l'action conjointe des Parties.

5.2 Obligations de l'UFC

L'UFC s'engage à une obligation de moyens consistant :

- à réaliser les actions prévues dans le cahier des charges de l'opération,
- à prendre en compte les remarques des financeurs lors du suivi de l'action,
- à préparer les diaporamas préalablement aux différents comités, dans un délai de 10 jours,
- à fournir un rapport à l'issue de chaque phase et à la fin de l'Etude,
- à répondre aux questions et/ou sollicitations des financeurs tout au long de l'Etude.

5.3 Composition et rôles du Comité de Pilotage

Un comité de pilotage (COPIL) regroupant les financeurs (y compris l'agence de l'eau), l'hydrogéologue agréé coordonnateur du département et expert sur le bassin de Volvic et les services de l'État (DREAL-DDT) est mis en place. Ces membres seront les seuls interlocuteurs directs du laboratoire de recherche en charge de mener cette étude. Ce comité suivra de près les travaux. Il se réunira à minima selon le calendrier établi à l'article 2 après une première réunion de lancement de l'étude pour :

- débattre et valider les orientations scientifiques et stratégiques de l'étude,
- valider les actions à réaliser,
- valider le rapport définitif du projet.

En dehors de ces échanges prévus au calendrier, chaque Partie à la présente convention peut réunir le COPIL sur demande expresse, en vue d'une information déterminante pour le projet ou d'un arbitrage nécessaire.

La consultation de tout expert pour éclairer tout ou partie des résultats fera l'objet d'un échange du comité de pilotage par tout moyen traçable.

Les convocations aux réunions du COPIL seront faites par le coordinateur et devront intervenir dans un délai minimum de quinze (15) jours calendaires avant la date de réunion. Une feuille de route sera transmise par l'Université Franche-Comté pour chaque réunion du COPIL, jointe à la convocation et devra contenir les éléments suivants :

PROJET

- rappel du budget détaillé avec, à date, le pourcentage de budget dépensé et le pourcentage de recettes perçues,
- détail des actions réalisées et prochaines actions envisagées,
- toute autre information utile au bon déroulement du projet voire les actions de communication à venir.

Les réunions du COPIL feront l'objet de comptes-rendus rédigés par le coordinateur. Ce compte-rendu est considéré comme accepté par les Parties si dans les quinze (15) jours à compter de la date de réception de ce compte-rendu, aucune objection, ni revendication, n'a été formulée par ces mêmes parties.

5.4 Composition et rôles du Comité d'échange technique

Le comité d'échange technique réunit les autres acteurs du territoire qui peuvent apporter des éclairages techniques et débattre avec le comité de pilotage et l'université sur l'avancement des travaux de post-doctorat. Ces acteurs sont présents soient parce qu'ils prélèvent ou exploitent les eaux de l'impluvium et sont ainsi des fournisseurs de données, soit car ils sont des techniciens ou experts en géologie, géophysique ou hydrogéologie, soit parce qu'ils portent ou réalisent des études qui sont en cours sur la chaîne des Puys et que le partage de données est nécessaire.

Préalablement à tout échange prévu au présent article, les Parties s'engagent à faire signer un accord de confidentialité aux acteurs tiers conformément à l'article 7 de la présente convention.

6 Propriété intellectuelle

6.1 Connaissances antérieures

Chaque Partie reste propriétaire des informations et connaissances, sous quelque forme qu'elles soient, qu'elle détient au moment de l'entrée en vigueur de la Convention ainsi que celles générées postérieurement à son entrée en vigueur indépendamment des travaux menés dans le cadre du Projet et dont elle a le droit de disposer. Ces connaissances seront dénommées par la suite « Connaissances antérieures ».

Hormis les dispositions expressément prévues par la Convention, rien ne saurait être entendu comme conférant à l'une des Parties un quelconque droit de propriété intellectuelle, licence, titre ou intérêt sur les Connaissances antérieures de l'autre Partie et pour un usage autre que celui de la réalisation du Projet.

Nonobstant ce qui précède, il est convenu que chaque Partie concède à l'autre un droit non exclusif et gratuit d'utilisation de ses Connaissances antérieures dans la mesure où ces dernières seraient nécessaires à la réalisation du Projet. Ce droit d'utilisation prendra fin de plein droit au terme de la Convention ou lors de sa résiliation.

Chacune des parties s'engage à fournir à l'Université, au plus tard durant le premier mois de travail du post-doctorant, les Connaissances antérieures dont il dispose. Ces Connaissances antérieures seront compilées par le post-doctorant et transmises aux autres Parties dès le second mois, sous la forme d'une liste exhaustive et des documents associés.

6.2 Résultats

Les résultats, ci-après « Résultats » sont définis comme tout élément, issu des travaux du Projet, obtenu par les Parties dans le cadre de la Convention de quelque nature ou sous quelque forme que ce soit, notamment l'ensemble des connaissances techniques et/ou scientifiques, savoir-faire, expériences, méthodes, procédés, données, algorithmes, logiciels, outils d'aide à la gestion, base de données, dossiers, plans, schémas, dessins, formules ou autres, protégés, protégeables ou non, par un droit de propriété intellectuelle ou autre.

Les Parties seront copropriétaires des Résultats issus de l'Etude au prorata de leurs apports financiers, matériels et intellectuels.

Chaque Partie copropriétaire disposera d'un droit d'usage non exclusif, non transférable et gratuit de l'ensemble des Résultats pour ses besoins propres de recherche en collaboration ou non avec des tiers, à l'exclusion de toute exploitation et de toute utilisation, directe et/ou indirecte, à des fins commerciales.

PROJET

Tous Résultats consistant en un brevet nouveau, un savoir-faire, un logiciel ou une autre connaissance exploitable commercialement et/ou protégeable par un droit de propriété intellectuelle fera l'objet d'un règlement de copropriété ou d'exploitation qui sera établi entre les Parties copropriétaires en tout état de cause avant toute exploitation industrielle et/ou commerciale.

7 Communication

7.1 Confidentialité

Les informations confidentielles, ci-après « Informations Confidentielles », sont définies comme toutes les Informations communiquées par une Partie (la « Partie Emettrice ») à l'autre Partie (la « Partie Réceptrice ») dans le cadre de l'Etude, directement ou indirectement, de manière active ou passive, qu'elles soient écrites, orales et/ou visuelles et quel qu'en soit le support et sous réserve, en cas de divulgation écrite, que la Partie Emettrice ait indiqué de manière claire et non équivoque leur caractère confidentiel ou, dans le cas d'une divulgation orale et/ou visuelle, que la Partie Emettrice ait fait connaître oralement leur caractère confidentiel au moment de la divulgation et ait confirmé par écrit ce caractère dans un délai de quinze (15) jours. Les procédés de transmission des Informations Confidentielles sont de toute nature, notamment la lettre simple, la lettre recommandée avec accusé de réception, la télécopie, la messagerie électronique, les visites sur sites et les réunions.

Les Résultats, les Connaissances antérieures et le contenu de l'Etude sont considérés comme des Informations Confidentielles pour les Parties.

La Partie Réceptrice d'une Information Confidentielle s'engage :

1) A ne pas divulguer à un tiers, à ne pas permettre, ni faciliter, sauf autorisation écrite préalable et expresse de la Partie Emettrice, la publication ou la diffusion de telles Informations Confidentielles ;
2) A ce que toutes les Informations Confidentielles soient utilisées exclusivement dans le cadre de l'Etude et dans le respect du présent Contrat, et ne soient pas employées à d'autres fins, quelles qu'elles soient, sans l'autorisation écrite préalable de la Partie Emettrice ;
3) A ne faire aucune copie ou reproduction des Informations Confidentielles, sans l'autorisation écrite, expresse et préalable de la Partie Emettrice, ainsi qu'à restituer ou détruire, sur demande de la Partie Emettrice, toute Information Confidentielle ainsi que toute copie qui aura pu en être faite ;
4) A ne pas déposer de demande de brevet ou autres titres de propriété industrielle, incluant une Information Confidentielle, sans autorisation formelle et préalable de la Partie Emettrice ;

Chaque Partie prendra les mesures nécessaires pour que toute personne susceptible d'accéder à des Informations Confidentielles observe la même réserve.

Aucune Information Confidentielle ne sera communiquée à des tiers, en particulier ceux visés à l'article de la présente convention, sans qu'un accord de confidentialité reprenant les obligations du présent article ne soit dûment conclu entre les Parties et ledit tiers préalablement à toute communication. Une telle communication d'Informations Confidentielles à des tiers ne pourra intervenir que si elle se justifie pour des motifs objectifs (imposés par la réalisation de l'Etude) et moyennant l'accord écrit et préalable de la Partie Emettrice.

Ces obligations de confidentialité doivent être respectées par les Parties à compter du premier échange d'Informations Confidentielles, et pendant une durée de cinq (5) ans suivant l'expiration ou la résiliation de la présente convention.

Ces obligations de confidentialité ne s'appliquent pas aux Informations Confidentielles dont la Partie Réceptrice pourra prouver :

- qu'elles étaient du domaine public au moment de leur communication, ou ;
- qu'elles y sont tombées par la suite sans que cela soit de son fait ni de sa responsabilité en application des présentes, ou ;
- qu'elle les a légalement reçues d'un tiers autorisé à les divulguer, ou qu'elles étaient en sa possession au moment de leur communication. Dans le cas où elle aurait reçu les Informations Confidentielles d'un tiers la Partie Réceptrice s'engage à en informer sans délai la Partie Emettrice.

PROJET

Aucune des dispositions de la présente convention ne peut être interprétée, ni explicitement, ni implicitement, comme concédant à la Partie Réceptrice un quelconque droit et/ou titre sur le contenu des Informations Confidentielles.

7.2 Publications

7.2.1 - Connaissances antérieures et Résultats

Chaque Partie s'engage à ne pas publier ni divulguer de quelque façon que ce soit les Connaissances antérieures appartenant à l'autre Partie dont elle pourrait avoir connaissance à l'occasion de l'exécution de la présente convention et ce, tant que ces Connaissances antérieures ne seront pas accessibles au public.

7.2.2 – Résultats

Les Parties conviennent que les Résultats n'ont pas vocation à être publiés pendant la durée de la présente convention et sans validation du COPIL.

Toutefois, en cas de volonté de communiquer ou publier des Résultats, ladite publication ou communication des Résultats, par l'une ou l'autre des parties, devra recevoir, pendant la durée de la présente convention l'accord écrit de l'autre partie qui fera connaître sa décision dans un délai maximum d'un (1) mois à compter de la demande. Passé ce délai et faute de réponse, l'accord sera réputé acquis. Lorsque la publication contiendra une Information Confidentielle, les stipulations précitées ne recevront pas application, les Parties se référant alors aux stipulations définies à l'article « Confidentialité ».

En conséquence, tout projet de publication ou communication sera soumis à l'avis de l'autre partie qui pourra supprimer ou modifier certaines précisions dont la divulgation serait de nature à porter préjudice à l'utilisation, dans de bonnes conditions, des Résultats. De telles suppressions ou modifications ne porteront pas atteinte à la valeur scientifique de la publication.

Ces publications et communications devront mentionner le concours apporté par chacune des parties à la réalisation de l'Etude.

Toutefois, ces stipulations ne pourront faire obstacle à l'obligation qui incombe à chacune des personnes participant à l'Etude de produire un rapport d'activité à l'établissement dont elle relève, dans la mesure où cette communication ne constitue pas une divulgation au sens des lois sur la propriété industrielle ;

Les Parties s'engagent à faire leurs meilleurs efforts pour que les acteurs associés dans le cadre du comité d'échange technique, non signataires de la présente convention, signent un accord de confidentialité qui sera préparé par les financeurs.

PROJET

8 Résiliation

La Convention pourra être résiliée de plein droit par l'une des Parties en cas d'inexécution par l'autre d'une ou plusieurs des obligations contenues dans ses diverses clauses. Cette résiliation ne deviendra effective qu'un (1) mois après l'envoi par la Partie plaignante au Coordinateur d'une lettre recommandée avec accusé de réception exposant les motifs de la plainte, à moins que, dans ce délai, la Partie défaillante n'ait satisfait à ses obligations ou n'ait apporté la preuve d'un empêchement consécutif à un cas de force majeure.

L'exercice de cette faculté de résiliation ne dispense pas la Partie défaillante de remplir les obligations contractées jusqu'à la date de prise d'effet de la résiliation.

Fait à Clermont-Ferrand, en 4 exemplaires originaux, le 21 décembre 2021.

Pour RLV

Le Président

Frédéric BONNICHON

Pour le Préfet et par délégation

Le Directeur de la Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme

Guilhem BRUN

Pour le SMUERR

Le Président

Laurent THEVENOT

Pour l'Université de Franche-Comté

La Présidente

Marie-Christine WORONOFF

PROJET

RIOM LIMAGNE & VOLCANS
COMMUNAUTÉ D'AGGLOMÉRATION

PRÉFET DU PUY-DE-DÔME
Liberté
Égalité
Fraternité

SYNDICAT MIXTE DES UTILISATEURS D'EAU DE LA REGION DE RIOM
S.M.U.E.R.R
Mairie de Volvic

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
CHRONO ENVIRONNEMENT

PROJET

AVENANT N°1

CONVENTION DE PARTENARIAT SCIENTIFIQUE POUR L'AMÉLIORATION DE LA CONNAISSANCE DU FONCTIONNEMENT DE L'IMPLUVIUM DE VOLVIC

Entre

La Communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans, collectivité territoriale, sise 5 mail Jost Pasquier 63200 RIOM, représentée par Frédéric BONNICHON, Président, dûment habilité par la délibération du conseil communautaire n° du 4 octobre 2022 ci-après nommée « RLV »

N° SIRET : 200 070 753 00146

et

Le préfet du Puy-de-Dôme, représenté par Guilhem BRUN, le directeur de la Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme, ci-après nommé « DDT »

et

Le Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom, établissement public de coopération locale, sis Rue de la Roche Michel, Zone de Champloup 63530 VOLVIC, représenté par Laurent THÉVENOT, Président, dûment habilité par la délibération du comité syndical n° du ci-après nommé « SMUERR »

N° SIRET : 256 302 621 00014

et

L'Université de Franche-Comté,

Etablissement public français à caractère scientifique, culturel et professionnel, identifié sous le numéro SIRET 192 512 150 003 63, dont le siège social est situé 1 rue Claude Goudimel, 25030 Besançon Cedex, France,

Représentée par sa Présidente, Madame Marie-Christine WORONOFF, ci-après désignée par l'« UFC »,

L'UFC, en vertu de la convention entre l'université Bourgogne-Franche-Comté et les établissements membres concernés par des unités de recherche labellisées par le CNRS, signée le 15 décembre 2020, dont l'université de Bourgogne Franche-Comté, est délégataire de la signature de la présente convention de partenariat.

RLV, la DDT, le SMUERR et l'UFC sont ci-après désignées par « les Parties ».

PROJET

CONSIDERANT

Une convention de partenariat scientifique a été signée le 21 décembre 2021 entre la communauté d'agglomération Riom Limagne et Volcans, l'Etat, le Syndicat Mixte des Utilisateurs d'Eau de la Région de Riom et l'Université Franche-Comté afin d'encadrer l'étude visant à améliorer la connaissance du fonctionnement de l'impluvium de Volvic.

L'article 4.1 de ladite convention prévoit, sur décision du comité de pilotage, que des travaux supplémentaires pourront être proposés dans le cadre d'un avenant.

Lors de la réunion du 16 juin 2022, le comité a acté un programme complet de mesures ce qui implique la mise en place de sondes pour les 3 sources de front de coulée. Le surcoût engendré sera supporté par les différents financeurs.

Article 1 : Répartition du montant des travaux supplémentaires

Le montant des instrumentations complémentaires est de treize mille quatre cent soixante-quatorze euros et quarante cents TTC (13 474,40 € TTC).

Celui-ci comprend :

- 4 campagnes de mesures dont 2 sans tritium et gaz nobles.

Le financement de ce surcoût fait l'objet de la répartition financière suivante :

- RLV s'engage à financer 30 % du montant TTC, soit 4 042,32 € TTC ;
- le SMUERR s'engage à financer 10% du montant TTC, soit 1 347,44 € TTC ;
- la DDT 63 s'engage à financer 10 % du montant TTC, soit 1 347,44 € TTC.

Par ailleurs, l'UFC sollicitera directement une subvention complémentaire auprès de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne, une fois l'avenant signé.

Article 2 : Modalités de versement à l'Université Franche-Comté

Le versement des participations de l'Agence de l'eau et de la DDT s'effectuera selon leurs modalités respectives, conformément à l'article 4.3 de la convention initiale.

Pour RLV et le SMUERR, le versement s'effectuera en totalité dès signature du présent avenant. Un justificatif de réalisation des mesures complémentaires devra être transmis aux financeurs à la clôture des campagnes de mesures.

Les paiements à destination de l'UFC seront effectués par virement au compte de l'Agent Comptable de l'UFC, T.G. du Doubs (RIB ci-dessous), en mentionnant l'attribution au LABORATOIRE Chrono-environnement :

Relevé d'identité bancaire			
Domiciliation : TP Besançon			
Code banque 10071	Code guichet 25000	N° de compte 00001002577	Clé RIB 08
Titulaire du compte : Agent comptable de l'Université de Franche-Comté 1 rue Goudimel 25030 BESANCON CEDEX FRANCE			
IBAN : FR76 1007 1250 0000 0010 0257 708			

PROJET

Fait à Clermont-Ferrand, en 4 exemplaires originaux.

Pour RLV le 2022	Pour le préfet et par délégation le 2022
Le Président, **Frédéric BONNICHON**	**Le directeur de la Direction Départementale des Territoires du Puy-de-Dôme** **Guilhem BRUN**
Pour le SMUERR le 2022	Pour l'Université de Franche-Comté le 2022
Le Président, **Laurent THÉVENOT**	**La Présidente,** **Marie-Christine WORONOFF**

PROJET

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ

Service en charge du contrat :
Service d'Activités Industrielles et Commerciales
(SAIC)
16 route de Gray – Bât DF
25030 Besançon cedex

Personne en charge du dossier :
Madame Sophie LEMERCIER
Téléphone : 03 81 66 58 28
Courriel : sophie.lemercier@univ-fcomte.fr

PROJET

AVENANT N°1 AU CONTRAT DE TRAVAIL A DUREE DETERMINEE N°2022-0015

ENTRE :

Monsieur Pierre NEVERS né le 23/08/1992 à BELFORT, résidant 8 rue Léon Gambetta à BELFORT, France

Ci-après désignée l'« Agent ».

d'une part,

ET :

L'Université de Franche-Comté, établissement public à caractère scientifique, culturel et professionnel, dont le siège est 1, rue Goudimel – 25030 BESANCON Cedex, n° SIRET 192 512 150 003 63, code APE 8542Z, représentée par sa Présidente, Madame Marie- Christine Woronoff.

Ci-après désignée par l' UFC ».

d'autre part,

Ci-après désignées ensemble « les Parties »,

PRÉAMBULE :

L'Agent est engagée par l'UFC en qualité de contractuel dans le corps des ingénieurs de recherche au titre de l'article L 123-5 du code de l'Education susvisé à partir du 1er février 2022 jusqu'au 31 décembre 2023.
L'Agent assure un travail de recherche en hydrogéologie dans le cadre du projet Volvic. Il travaille au sein du laboratoire Chrono Environnement de l'université de Franche-Comté. Il effectue un service à temps complet.

Les Parties souhaitent établir un avenant (ci-après désigné Avenant 1) prorogeant les dates de contrat.

EN CONSÉQUENCE IL EST CONVENU DE CE QUI SUIT :

ARTICLE 1 - OBJET DE L'AVENANT 1 :

Le présent Avenant 1 a pour objet de modifier l'article 1 du contrat qui est remplacé par les stipulations de l'article 2 ci-dessous.

ARTICLE 2 – DUREE DU CONTRAT :

Le Contrat est prorogé jusqu'au **31 juillet 2024**. L'Avenant 1 entre en vigueur le **1er janvier 2024**.

ARTICLE 3 – AUTRES DISPOSITIONS :

Les autres dispositions du Contrat restent inchangées. Les imputations budgétaires de l'Avenant, l'historique des avenants et les voies et délais de recours sont respectivement jointes en annexes 1, 2 et 3.

Fait à Besançon, en trois (3) exemplaires originaux.

L'agent

Pierre NEVERS

Le 14 novembre 2023

L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Pour la Présidente de l'Université et par délégation, la directrice du SAIC

Pour la Présidente et par délégation,
La Directrice SAIC
Service des Activités Industrielles et Commerciales
Sophie LEMERCIER

Sophie LEMERCIER

Le 14 novembre 2023

PROJET

Annexe 1 : Imputations budgétaires:

100 % de la quotité du 01/02/2022 au 31/12/2023

Unité Budgétaire (UB)	**920**
Centre de Ressources (CR)	**4133**
Numéro de convention	**2022-0025 projet VOLVIC**
Destination de la dépense	**10N**

Imputations budgétaires – Avenant 1 présent :

100 % de la quotité du 01/01/2024 au 31/07/2024

Unité Budgétaire (UB)	**920**
Centre de Ressources (CR)	**4133**
Numéro de convention	**2022-0025 projet VOLVIC**
Destination de la dépense	**10N**

Annexe 2 : Historique des contrats et avenants :

Contrat signé le 01/02/2022 - CDD du 01/02/2022 au 31/12/2023
Avenant N° 1 du 01/01/2024 au 31/07/2024

Annexe 3 : voies et délais de recours

Si vous estimez que la décision prise par l'Administration est contestable, vous pouvez former :
- soit un recours gracieux qu'il vous appartiendrait de m'adresser ;
- soit un recours hiérarchique devant Monsieur le Ministre de l'Éducation Nationale ;
- soit un recours contentieux devant le tribunal Administratif Territorialement compétent.

Le recours gracieux ou le recours hiérarchique peuvent être faits sans condition de délais.
Etant assimilés à des demandes, ils doivent donner lieu à un accusé de réception de la part de l'autorité administrative.
En revanche, le recours contentieux doit intervenir dans un délai de ***deux mois*** à compter de la notification de la décision.
Toutefois, si vous souhaitez en cas de rejet du recours gracieux ou du recours hiérarchique former un recours contentieux, ce recours gracieux ou hiérarchique devra avoir été introduit dans le délai sus-indiqué du recours contentieux.
Vous conserverez ainsi la possibilité de former un recours contentieux dans un délai de ***deux mois*** à compter de la décision intervenue sur ledit recours gracieux ou hiérarchique.
Cette décision peut être implicite (absence de réponse de l'Administration pendant ***deux mois***).
Dans les cas très exceptionnels où une décision explicite dans un délai de deux mois après la décision implicite (c'est-à-dire dans un délai de quatre mois à compter de la date du présent avis) vous disposez à nouveau d'un délai de deux mois à compter de la notification de cette décision explicite pour former un recours contentieux.

PROJET

PROJET

Nature de l'allocation	Post-doctorat
Durée post-doctorat	24 mois (1/11/2021 – 31/10/2023)
Rémunération	Salaire net entre 1700 et 2000 € selon expérience
Intitulé du sujet de l'allocation	Synthèse hydrogéologique des connaissances sur l'impluvium de Volvic et élaboration d'un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème
Laboratoire d'accueil	Laboratoire Chrono-environnement UMR 6249 UCBF-CNRS
Etablissement	Université de Bourgogne Franche-Comté
Contacts	Hélène CELLE-JEANTON (helene.jeanton@univ-fcomte.fr, Laboratoire Chrono-Environnement) /

Contexte :

Le contexte hydrogéologique du département du Puy-de-Dôme est relativement complexe. Les principaux aquifères exploités pour l'alimentation en eau potable sont au nombre de deux : la nappe alluviale de l'Allier qui bénéficie du soutien d'étiage par le barrage de Naussac et les aquifères de la Chaîne des Puys classée par le SDAGE Loire-Bretagne en Nappe A réserver en priorité à l'Eau Potable (NAEP) depuis 2010. Les autres usages, tels que l'irrigation et l'industrie sollicitent davantage les ressources en eau superficielle, excepté les usines d'embouteillage d'eau qui sont relativement nombreuses dans le Puy-de-Dôme et qui prélèvent dans différents aquifères.

La question des usages de l'eau sur le bassin de Volvic se pose de façon croissante depuis plusieurs années. Le maintien d'une ressource en eau suffisante dans le milieu naturel est de plus en plus difficile en étiage étant donné les prélèvements pour les usages AEP importants, à la fois pour le réseau public d'eau potable (syndicat de production du SMUERR revendant l'eau au syndicat Plaine de Riom ainsi qu'à Riom Limagne et Volcans) mais également pour l'eau embouteillée (Société des Eaux de Volvic du groupe Danone).

Compte-tenu de la complexité de ce territoire et afin d'améliorer la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère de Volvic, deux thèses, financées par la Société des Eaux de Volvic, ont été réalisées. La première, encadrée par l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse et le LRPC de Clermont-Ferrand, soutenue en 2002 à huis clos, a permis d'identifier les axes principaux d'écoulement en reconstituant les paléoreliefs. Cette thèse comportait également un volet géochimique. La seconde, encadrée par l'Ecole des Mines de Paris, soutenue en 2015, a permis d'initier un modèle de fonctionnement de l'hydrosystème de Volvic avec un focus spécifique sur le rôle de la forêt dans la recharge. Elle propose également un premier outil de gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau. Dans le cadre de cette seconde thèse, la DREAL a équipé deux sources situées en aval du bassin versant la Pâle et le Gargouilloux complétant la source de Saint-Genes l'Enfant déjà équipée, permettant d'estimer la vidange du système.

Par ailleurs, un comité de suivi de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic a été mis en place depuis l'année 2016 (suite à l'AP de 2014 et l'élaboration de la convention de mise à disposition des données des différents préleveurs auprès de la SEV) à l'initiative des services de l'Etat. Ce comité, constitué de la DDT, l'ARS, la DREAL, la SEV, le SAEP de la Région de Riom remplacé par le RLV, le SMUERR et de l'hydrogéologue agréé, se réunit annuellement, sous la présidence du sous-préfet de Riom, pour faire le point notamment sur l'évolution des prélèvements (AEP réseau public et SEV) mais également pour échanger sur les impacts de ces prélèvements sur les différents aquifères de l'impluvium.

Depuis 2018, l'État a été porté dans différents contentieux, avec des acteurs locaux (collectivités, industriel), par le pisciculteur situé en aval des sources de résurgence, pour sa mauvaise gestion quantitative de l'eau sur le bassin de Volvic. Le rapport provisoire est à la consultation des parties depuis le 30 juillet 2021. De plus, fin 2019, l'attention d'un collectif d'associations s'est portée sur l'impluvium de Volvic en lien avec la baisse marquée du débit des résurgences avales du bassin. Le sujet a été fortement médiatisé en 2020 et 2021 et a fait l'objet d'un focus spécifique dans le cadre de la commission parlementaire intitulée « la mainmise sur l'eau par les intérêts privés » qui s'est déroulée en 2021 et au cours de laquelle M. le Préfet du Puy-de-Dôme et Mme la Ministre de l'Ecologie ont été auditionnés. Le Préfet du Puy-de-Dôme a mis en place, en plus du comité de suivi, un comité de transparence beaucoup plus large. Il s'est réuni pour la première fois en décembre 2020 et devrait se réunir de nouveau à l'automne 2021.

Les études précédemment réalisées ont permis de définir le fonctionnement global du système et de confronter les prélèvements et la recharge à l'échelle annuelle. Il apparaît au travers des différents contentieux que les problèmes de gestion quantitative se posent surtout lors de l'étiage. Par ailleurs, du fait même de sa géographie et géologie, l'impluvium de Volvic présente certaines disparités qu'il faudrait préciser, ces disparités jouant notamment sur la vitesse de circulation de l'eau dans l'aquifère et donc sur son temps de séjour.

Les objectifs de l'étude proposée, du point de vue de la gestion de la ressource en eau de l'impluvium de Volvic, sont : 1) de savoir s'il existe une ou plusieurs masses d'eau dans l'impluvium ; 2) de définir la recharge (sa saisonnalité et donc la pérennité de ces masses au cours de l'année et notamment en période d'étiage) et préciser les temps de transfert entre la zone d'infiltration et les sources de front de coulée ; 3) d'anticiper l'évolution quantitative de ces potentielles masses d'eau face au changement climatique ou aux prélèvements.

Afin de répondre à ces objectifs, trois volets sont proposés :

1/ Le projet débutera par une synthèse des nombreuses études, thèses, expertises et rapports existants. Ce travail bibliographique, devra permettre de réinterpréter les données brutes ou leur exploitation et de définir, si nécessaire, des mesures ou analyses complémentaires à réaliser pour répondre aux objectifs scientifiques.

2/ Le projet devra permettre d'établir un modèle conceptuel de fonctionnement du bassin de Volvic à partir du traçage naturel des eaux, c'est-à-dire la chimie intrinsèque des eaux liée à leurs temps et conditions de circulation dans l'hydrosystème. Ce travail se basera sur les données existantes et des données complémentaires à acquérir à l'issue de la bibliographie. A ce stade, il est envisagé :

- 2 campagnes ponctuelles spatiales à l'étiage et en période de pluie pour différencier les axes de circulation nord et sud et leur participation aux écoulements à l'aval du bassin versant et déterminer le temps de séjour des eaux dans le/les aquifères de l'impluvium. Des analyses chimiques des majeurs + traces, isotopes de la molécules eau, 13C/ 3H/ 14C seront réalisés dans cet objectif. Il conviendra de définir les points à suivre, leur accessibilité et les modalités de prélèvements en fonction des contraintes d'exploitation éventuelles (sources, forages, piézomètres)
- Un suivi temporel (campagne hebdomadaire ou bimensuelle) de la chimie, du débit et de la piézométrie des masses d'eau du bassin versant permettra de mettre en évidence l'impact de la variabilité intra-annuelle de la recharge sur la ressource en eau. Les points de suivis seront définis à partir de la première campagne spatiale.

PROJET

Ce travail réalisé sur le volet qualitatif, permettra d'étayer le volet quantitatif du point de vue des relations nappes/cours d'eau superficiels, du temps de transfert sur les deux axes d'écoulement Nord et Sud, de la distinction du débit de base de l'aquifère par rapport à des alimentations plus superficielles et de leur conséquence sur l'étiage.

3/ à partir du modèle conceptuel établi au point 2 et des études préalables déjà réalisées, il s'agira d'établir un outil d'aide à la gestion intégrant différents scenarii de dérive climatique affectant la recharge et de définir le niveau des prélèvements associés pour ne pas mettre en péril le système aquifère, à l'horizon 2050. Il devra en particulier définir, si les prélèvements ont un impact sur la pérennité de l'aquifère et l'état quantitatif de la nappe de Volvic en se basant sur la méthodologie retenue pour l'état des lieux des masses d'eaux du SDAGE Loire Bretagne (ratio recharge/prélèvement et impact sur les cours d'eau associés), avec une approche pluri-annuelle. Ces travaux s'articuleront avec l'étude menée en parallèle avec le BRGM, sur la définition d'indicateurs piézométriques de référence sur le département pour la gestion des étiages en eau souterraine.

4/ Publications et production d'outils d'aide à la gestion de la ressource en eau.

Moyens mis en œuvre et calendrier prévisionnel :

Tâches	2021		2022												2023									
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1																								
2																								
3																								
4																								
Comité suivi																								

Le budget prévisionnel est de 150 000 € HT, découpé comme suit :

- 24 mois de post-doctorant : 100 000 €
- Analyses : 40 000 € (tenant compte du prix élevé des traceurs de datation)
- Déplacement (mission + valorisation) : 10 000 €

Encadrement du post-doc

L'équipe hydrogéologie du laboratoire Chrono-Environnement (UMR 6249 CNRS) de l'Université Bourgogne Franche-Comté se focalise sur les interac ons eau/roche et l'apport de la chimie au sens large dans la compréhension du fonc onnement hydrodynamique des aquifères. Le référent du post-doctorant sera Hélène Celle-Jeanton, Professeur en hydrogéologie. Le sujet sera co-encadré / suivi par le Professeur en Volcanologie, Benoît Van Wyk De Vries du laboratoire magma et volcans de l'Université Clermont Auvergne.

Le projet de post-doc sera également intégré dans le SO AUVERWATCH (AUVERgne WATer Chemistry) de l'Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand.

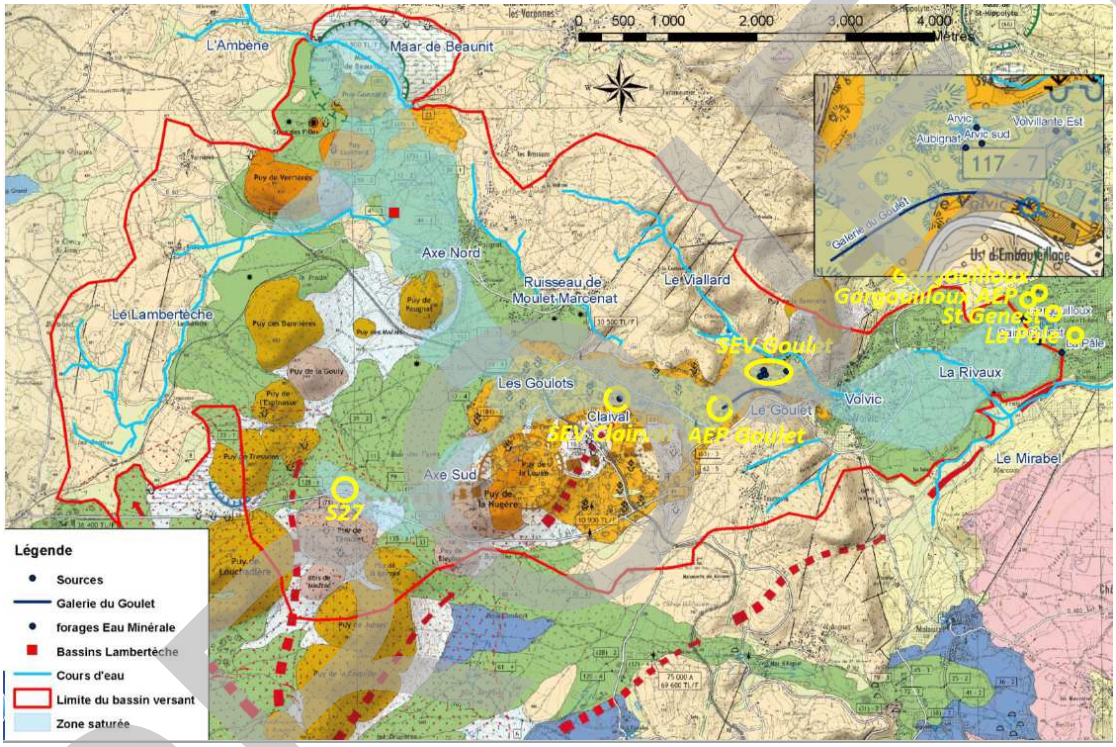
PROJET

Comité de suivi

Un **comité de suivi** sera constitué intégrant les principales structures présentes sur le territoire : RLV, le SMUERR, le Cepiv, l'Agence de l'Eau, l'hydrogéologue agrée coordonnateur du département, la DREAL, l'ARS, la SEV, le syndicat Plaine de Riom, un représentant des associations environnementales et la DDT qui suivra de près les travaux et rendra compte auprès du ministère de l'Ecologie.

Des experts pourront également être mobilisés dans le comité de suivi : M. Labazuy, Docteur en Géophysiques et P. Boivin, ancien Docteur en Volcanologie à l'Université Clermont Auvergne.

1 à 2 réunions plus larges, type comité de transparence présidé par le corps préfectoral pourront être organisées au cours desquels un point d'avancement sera présenté.



PROJET