



Eau Ain-Dombes-Saône 2050

Un projet du territoire pour la gestion de la ressource en eau

Rapport de Phase 1 - Etat des lieux
Volet B : hydrogéologie, hydrologie, climat



Eau Ain
Dombes Saône
2050

Le climat change.
Et vous ?

Commanditaire



Prestataire



Avec le soutien financier de



Eau Ain-Dombes-Saône 2050

Rapport de Phase 1 B_Etat des Lieux *Volet hydrogéologique, hydrologique et climatique*

REDACTION	Stéphane Grange, Bénédicte Coudreuse
RELECTURE	Alexandre Hoez, Pierre Levisse,
MAITRE D'OUVRAGE	Communauté de Communes de la Dombes 100 Av. Maréchal Foch, 01400 Châtillon-sur-Chalaronne
BUREAUX D'ETUDES	ACTeon 17 rue Diderot. 38000 Grenoble GINGER- Burgeap 2 Rue du Tour de l'Eau, 38400 Saint-Martin-d'Hères
CONTACTS	Stéphane Grange s.grange@groupeginger.com Alexandre Hoez a.hoez@ccdombes.fr
NOMBRE DE PAGES	115
NOMBRE D'ANNEXES	3
VERSION	24/04/2024

Table des matières

1.INTRODUCTION	8
2.CONTEXTE GEOLOGIQUE	10
2.1 Les cailloutis de la Dombes	10
2.2 Mise à jour des connaissances sur les cailloutis de la Dombes	17
2.3 Synthèse sur l'état des connaissances de la géométrie des cailloutis de la Dombes et de la couverture morainique	22
3.FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE DES CAILLOUTIS DE LA DOMBES	23
3.1 Fonctionnement général, alimentation et drainage	23
3.2 Piézométrie	24
3.3 Synthèse sur l'état des connaissances du fonctionnement de la nappe des cailloutis	33
4.HYDROLOGIE	35
4.1 Les cours d'eau de la Dombes	35
4.2 Données hydrologiques	35
4.3 Rôle des étangs dans le cycle de l'eau	41
4.4 Relations nappe/rivières	44
4.5 Influence des stations d'épuration	51
5.CLIMATOLOGIE	53
5.1 Approche méthodologique	53
5.2 Données climatiques exploitables	53
5.3 Climatologie de la Dombes	54
6.EVALUATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE PAR BILAN HYDROLOGIQUE	65
6.1 Evolution de la ressource – analyse des chroniques piézométriques	65
6.2 Approche par calage d'un modèle pluie/niveau de nappe	70
6.3 Approche par analyses corrélatoires et spectrales	74
6.4 Approche par bilan de l'infiltration	81
7.SYNTHESE DE L'ETAT DES LIEUX :	101
8.ANNEXE 1 : INFORMATIONS RELATIVES AU RENFORCEMENT DU RESEAU DE SUIVI PIEZOMETRIQUE PAR LE DEPARTEMENT DE L'AIN	106
9.ANNEXE 2 : DETAIL DES FORMULES DE CALCUL UTILISEES POUR EVALUER L'EVAPOTRANSPIRATION	112
10.ANNEXE 3 EVOLUTION DES PRECIPITATIONS BRUTES ET EFFICACES ANNUELLES (FORMULE EMPIRIQUE DE TURC) ET DES TEMPERATURES ANNUELLES	113

Table des illustrations

Figure 1 : Schéma géologique simplifié de la Dombes et de la Bresse (BURGEAP)	11
Figure 2 : Entités géologiques de la Dombes	13
Figure 3 : Coupes géologiques du plateau de la Dombes (Extrait du rapport BURGEAP Rly.206 de 1995)	16
Figure 4 : Connaissances de la géologie du plateau de la Dombes (mise à jour de la base de données de forages)	19
Figure 5 : Epaisseur de la couverture morainique	20
Figure 6 : Altitude du toit des cailloutis	21
Figure 7 : Schéma conceptuel du fonctionnement de l'aquifère des cailloutis de la Dombes (BURGEAP, 2015)	24
Figure 8 : Esquisses piézométriques : BURGEAP 1995 (Carte de gauche) et BRGM 1975 (carte de droite) avec localisation des dômes piézométriques (en bleu).	27
Figure 9 : Comparaison entre l'esquisse piézométrique de 1995, les suivis piézométriques en continu et les relevés piézométriques de 2022	29
Figure 10 : Illustration de la mise en charge de la nappe des cailloutis (BURGEAP)	31
Figure 11 : Mise en charge de la nappe des cailloutis	32
Figure 12 : Coupes hydrogéologiques simplifiées (BURGEAP)	34
Figure 13 : Stations de mesure en continu du débit des cours d'eau de la Dombes	36
Figure 14 : Stations ponctuelles de mesures de débit des cours d'eau	40
Figure 15 : exemple d'une chaîne d'étangs sur Chalamont suivie dans le cadre des PSE	41
Figure 16 : Zones d'assec et zones de soutien du débit d'étiage des cours (synthèse des observations des syndicats des gestionnaires de l'eau et données bibliographiques)	46
Figure 17 : Flux de bordure à l'étiage, drainés par les cours d'eau en situation d'étiage	48
Figure 18 : Hypothèses de répartition des flux souterrains selon le drainage de nappe par les cours d'eau à l'étiage	50
Figure 19 : Débits entrants des STEU	51
Figure 20 : Typologie des STEU et de leur capacité théorique (en EH, équivalent habitant)	52
Figure 21 : Répartition des pluies sur le plateau de la Dombes	54
Figure 22 : Indice de Nicholson (indices centrés réduits) sur les données pluviométriques annuelles (données METEO France, traitement BURGEAP)	57
Figure 23 : Filtre de Hanning (indices pondérées centrés réduits) sur les données pluviométriques annuelles	58
Figure 24 : Evolution des précipitations et des températures mensuelles (données METEO France, traitement BURGEAP)	60
Figure 25 : Evolution de l'ETP annuelle à Lyon et à Mâcon	61
Figure 26 : Précipitations efficaces évaluées à la station de Marlieux pour une RFU de 100 mm à partir de la méthode du bilan de flux de Thornthwaite à pas mensuel (données METEO France, traitement BURGEAP)	64

Figure 27 : Ecart à la moyenne des précipitations	64
Figure 28 : Position des 4 piézomètres de suivi sur l'esquisse piézométrique de 1995	66
Figure 29 : Coupes géologiques et techniques des piézomètres de suivi	67
Figure 30 : Evolution de la piézométrie	69
Figure 31 : Schématisation du fonctionnement du logiciel GARDENIA	71
Figure 32 : Résultats des simulations sous GARDENIA pour le piézomètre de Villars	73
Figure 33 : Résultats des simulations sous GARDENIA pour le piézomètre de Villeneuve	73
Figure 34 : Résultats des simulations sous GARDENIA pour le piézomètre de Saint-Rémy	74
Figure 35 : Déroulement de l'analyse	75
Figure 36 : Corrélogrammes simples	78
Figure 37 : Spectres simples	78
Figure 38 : Corrélogrammes croisés	80
Figure 39 : Découpage du territoire pour la modélisation climatique par WEENAT	85
Figure 40 : Réserve en eau des sols dombistes	86
Figure 41 : Résultats du calcul d'infiltration sans prise en compte des étangs	87
Figure 42 : Evolution piézométrique à Villars	87
Figure 43 : Comparaison entre le volume annuel en sortie du bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars, la pluie brute (à Marlieux) et la pluie efficace	89
Figure 44 : Rapport entre le volume annuel en sortie du bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars, et la pluie efficace	89
Figure 45 : Résultats du calcul d'infiltration profonde	91
Figure 46 : Amplitude piézométrique de la recharge au piézomètre de Villars	91
Figure 47 : Résultats du calcul de l'infiltration par bassin versant	95
Figure 48 : Estimation des gammes possibles de la recharge annuelle	96
Figure 49 : Test de sensibilité sur les méthodes	97
Figure 50 : bilan hydrique global selon année humide/sèche	105
Figure 51 : bilan besoins / ressource selon années sèches et humides	106

Table des tableaux

Tableau 1. Station de suivi du débit en continu sur les cours d'eau de la Dombes	37
Tableau 2. Estimations des débits des cours d'eau sur la Côtère secteurs Ain et Rhône (Synthèse à partir des données bibliographiques et/ou estimation BURGEAP)	38
Tableau 3. Estimations des débits des cours d'eau sur la Côtère secteur Saône (Synthèse à partir des données bibliographiques et/ou estimation BURGEAP)	39
Tableau 4. Evolution de la pluviométrie (données METEO FRANCE, traitement BURGEAP)	55
Tableau 5. Evolution de la température (données METEO FRANCE, traitement BURGEAP)	59
Tableau 6. Résultats des paramètres de calage sous GARDENIA	71
Tableau 7. Données utilisées pour le bilan de flux	84
Tableau 8 : résultats du calcul de l'infiltration par sous bassin versant	93

Acronymes

AEP : Alimentation en Eau Potable

AERMC : Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

DOCOB : DOcument d'OBjectifs

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunal

ICPE : Installations Classées Protection de l'Environnement

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INSEE : Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques

PGRE : Plan de Gestion de la Ressource en Eau

PTGE : Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau

RFU : Réserve Facilement Utilisable des sols

RU : Réserve Utile des sols

RGA : Recensement Général Agricole

RPG : Registre Parcellaire Graphique

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau

SAU : Surface Agricole Utile

SCOT : Schéma de COhérence Territorial

UGB : Unité Gros Bovin

ZPS : Zone de Protection Spéciale

1. INTRODUCTION

La nappe des cailloutis (masse d'eau souterraine FRDG177) s'étend sur une surface d'environ 1600 km² au sud-ouest du département de l'Ain. Elle constitue une ressource majeure pour le territoire de la Dombes et sa périphérie : eau potable pour les populations, irrigation pour les activités agricoles, eau de process pour les activités industrielles, alimentation de zones humides naturelles.

Le plateau dombiste est marqué par la présence d'un vaste réseau d'étangs peu profonds, dont la surface cumulée avoisine les 12 000 hectares (soit près de 120 km²). Ces étangs sont principalement d'origine anthropique. Ils ont été aménagés dès le Moyen-Âge par les moines pour mettre à profit le modelé naturel de ce terroir limono-argileux hydromorphe et exploiter les nombreuses dépressions naturelles, trop humides pour être cultivées, à des fins piscicoles, tradition ancestrale unique qui perdure aujourd'hui. Les étangs de la Dombes sont le siège d'une biodiversité aussi fragile que remarquable, qui fondent véritablement l'identité du territoire, raison pour laquelle ce territoire entretient un rapport très fort avec la gestion de l'eau en général.

Les sécheresses successives des dernières années ont mis en tension une ressource en eau qui jusque-là n'avait jamais montré de réels signes de fragilité. Outre l'impact direct sur les milieux aquatiques (baisse significative du niveau de remplissage des étangs et du débit des cours d'eau), les conditions climatiques de ces dernières années ont également impacté la nappe des cailloutis, réputée robuste : baisse de productivité de certains captages, baisse continue du niveau piézométrique en certains endroits de la nappe traduisant un déficit de recharge important. Cette situation préoccupante a amené l'ensemble des acteurs du territoire, dont les collectivités, à se mobiliser pour une gestion de l'eau à la fois coordonnée et concertée.

Ne disposant pas localement d'un document de gestion tel qu'un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion de l'Eau), les acteurs du territoire se sont engagés dans une démarche « Projet de Territoire pour la Gestion de l'Eau »¹. La communauté de communes de la Dombes s'est portée volontaire pour animer cette démarche, lancée officiellement en juin 2022.

L'étude qui a été engagée pour accompagner l'élaboration du PTGE est découpée en 4 phases :

Phase 1 – cadrage et état des lieux

¹ Les PTGE sont définis par l'instruction du gouvernement du 7 juin 2019, qui complète celle du 4 juin 2015. Un PTGE est un processus de dialogue territorial visant à faire émerger des solutions adaptées aux besoins et enjeux locaux, en contexte de changement climatique. Ces démarches doivent aboutir à l'élaboration d'un plan d'actions partagé.

Phase 2 – diagnostic de vulnérabilité

Phase 3 – analyse prospective et stratégie d'adaptation

Phase 4 – plan d'adaptation

Dans chaque phase, un volet technique vise à collecter les données existantes, produire de la connaissance et objectiver les débats autour de la disponibilité présente et future de la ressource en eau ; un volet communication et concertation vise à mobiliser le plus grand nombre d'acteurs du territoire pour partager leurs expertises, leurs besoins et interrogations, et aboutir à un plan d'action co-construit.

Les questions pour lesquelles il est attendu des réponses précises à travers la réalisation du PTGE, sont les suivantes :

- La disponibilité de la ressource en eau souterraine, c'est-à-dire la part qui se renouvelle chaque année par les pluies, son évolution face au changement climatique et la capacité de la ressource à répondre aux besoins ;
- La disponibilité des eaux de surface (rivières/étangs) qui revêtent une forte importance économique et écologique pour le territoire, ainsi que leurs interactions avec le compartiment souterrain ;
- Les modèles de développement économique à envisager dans le contexte d'évolution de la ressource en eau ;
- Les politiques d'action à mettre en œuvre pour atteindre à moyen et long terme un équilibre entre les besoins et les ressources, et l'organisation efficiente des acteurs du territoire.

Ce document constitue le rapport de phase 1. Dans un souci de facilitation de la lecture, il a été dissocié en deux volets : A – volet socio-économique et usages et B – volet hydrogéologique, hydrologique et climatique.

Le rapport de Phase 1B porte sur la description du fonctionnement de l'hydrosystème de la Dombes, incluant la description géologique du plateau (Chapitre 2), le fonctionnement de la nappe des cailloutis (Chapitre 3), l'hydrologie (Chapitre 4), la climatologie (Chapitre 5), et l'évaluation de la recharge de la nappe (Chapitre 6).

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Dans le chapitre 2 sont repris dans les grandes lignes le contexte géologique du plateau dombiste qui a fait l'objet de descriptions détaillées dans les études BURGEAP de 1995 (Synthèse hydrogéologie de la Dombes) et 2015 (Etude aquifère stratégique). Des données récentes (coupes de forages, mesures géophysiques) ont pu être mobilisées pour mettre à jour certains éléments de constat quant à la nappe des cailloutis.

L'objectif de ce chapitre est de rappeler le contexte général dans lequel s'inscrit l'aquifère des cailloutis, pour mettre en lumière sa complexité et mieux appréhender son fonctionnement.

2.1 LES CAILLOUTIS DE LA DOMBES

Les cailloutis de la Dombes regroupent les formations Plio-Quaternaires sous morainiques du plateau de la Dombes, mises en place vers la fin du Pliocène (-5.3 à -2.6 millions d'années) jusqu'au début du Quaternaire. Les cailloutis sont composés de galets de tailles variables (de 10 à 150 mm environ) et de sables fins, pouvant renfermer quelques intercalations argileuses. Cette puissante série (20 à 30 mètres d'épaisseur en moyenne) est caractéristique de dépôts sédimentaires fluviatiles. Ils forment un aquifère d'intérêt régional exploité par puits sur le plateau de la Dombes et au niveau des différentes sources en périphérie du plateau.

Ces deux clichés, pris au niveau d'une ancienne carrière d'extraction de granulats (carrière de Pizay), sont caractéristiques et permettent d'apprécier la nature des cailloutis :



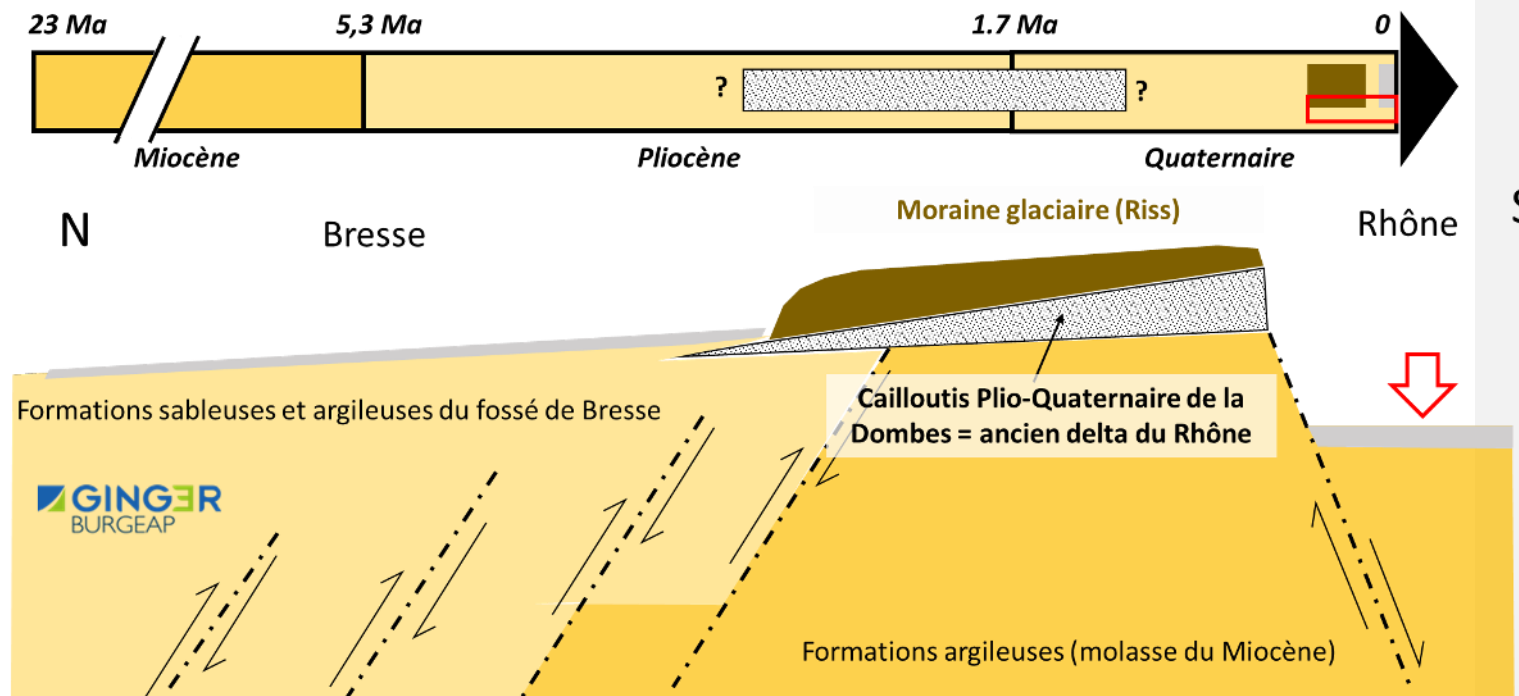


Figure 1 : Schéma géologique simplifié de la Dombes et de la Bresse (BURGEAP)

La connaissance géologique et hydrogéologique de l'aquifère a fait l'objet de différentes synthèses à partir des données de forages : une première par le BRGM en 1975 et une seconde par BURGEAP en 1995. C'est cette dernière étude qui fait encore référence aujourd'hui à défaut de connaissances nouvelles sur l'aquifère. En effet, à l'exception de quelques campagnes de géophysique pour la recherche de nouvelles ressources en eau, limitées dans l'espace (Sulignat, Lent, Birieux, Monthieux, Miribel, Tramoyes), il n'existe pas de prospection géophysique globale à l'échelle du plateau.

Seule la terminaison Nord-Est des cailloutis dans la région de Bourg-en-Bresse a fait l'objet d'une étude détaillée en 2006 (CPGF-Horizon et BURGEAP pour le compte de Grand Bourg Agglomération), avec la réalisation de profils géophysiques et de forages.

Des études sont en cours dans la terminaison Nord-Ouest menées par le syndicat Bresse-Dombes-Saône sur un vaste secteur compris entre Saint-Julien-Sur-Veyle au Nord et Chaleins au Sud (prospection géophysique réalisée en 2022, forages de reconnaissance programmés pour 2023).

Les principaux traits caractéristiques de l'aquifère des cailloutis sont les suivants :

- **Les cailloutis sont des graves sableuses**, présentes sur l'ensemble du plateau, mais dont l'épaisseur et la perméabilité peuvent varier dans l'espace, y compris sur de très courtes distances. Ils sont présents en moyenne sur 20 à 30 m d'épaisseur sous tout le plateau. Cette nature gravo-sableuse rend cette **formation propice à l'emmagasinement de l'eau souterraine**, raison pour laquelle les cailloutis de la Dombes constituent un puissant réservoir ;
- **Les cailloutis sont recouverts sur la quasi-totalité du plateau de la Dombes par des formations glaciaires** attribuées au Riss, pour l'essentiel des moraines à faciès d'argiles à blocs, localement à faciès plus sableux ou plus graveleux sous forme lenticulaire. L'épaisseur totale des moraines est en moyenne comprise entre 20 et 30 m, avec des disparités locales. **La nature peu perméable des formations morainiques freine la recharge de la nappe sous-jacente, voire l'empêche totalement selon qu'on se situe sur une zone de forte épaisseur ou sur une zone à forte proportion argileuse ;**
- **Une couche de limons argileux (loess) d'environ 3 m d'épaisseur recouvre la totalité du plateau.** Cette formation à la perméabilité médiocre constitue également un frein important à l'infiltration et explique la nature hydromorphe des sols dombistes. Elle présente en revanche une capacité de rétention significative, propice à la constitution d'une réserve utile importante pour la végétation ;
- Les cailloutis affleurent localement en bordure du plateau : vers le point culminant du plateau dans le secteur de Chalamont, en bordure Est (Druillat), dans les talus des cours d'eau de la côtère Sud et sur la bordure Ouest (val de Saône) avec les « Alluvions jaunes » rattachées aux cailloutis ;

- Les cailloutis reposent directement sur les formations du Miocène (Côtière sud) ou du Pliocène (terminaison Nord, bordure Ouest), puissantes formations de nature argilo-sableuse. Vers le Nord et le Nord-Ouest, la transition entre les cailloutis et les sables du Pliocène est mal connue. Dans le secteur de Bourg en Bresse, on peut admettre une continuité entre ces formations et considérer que les cailloutis s’imbriquent dans les sables du Pliocène.

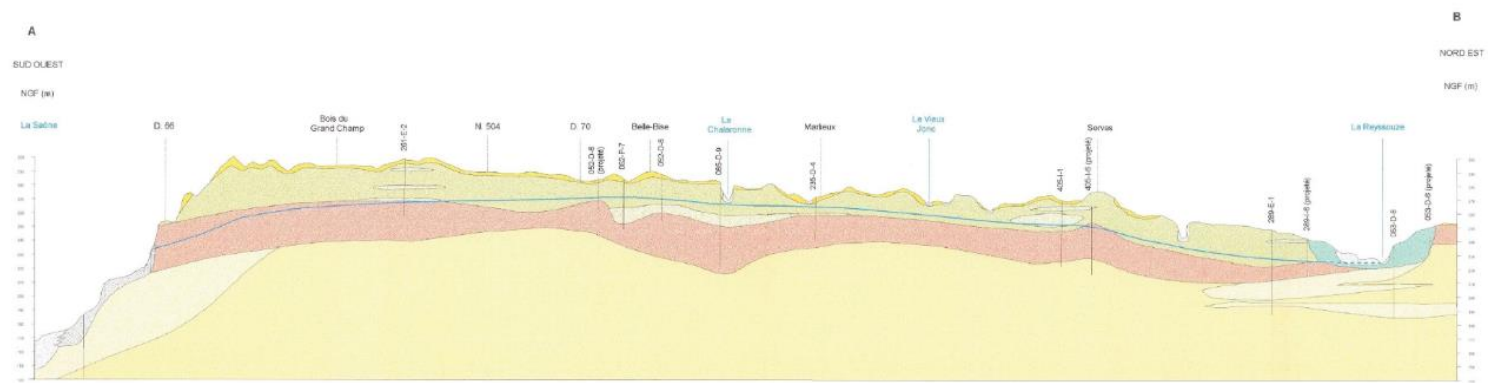
La Figure 2 présente les entités géologiques à l’affleurement. Les lœss du plateau ne sont pas représentés. Les formations du Miocène et du Pliocène à facies sableux et argileux ont été regroupés en une seule unité.

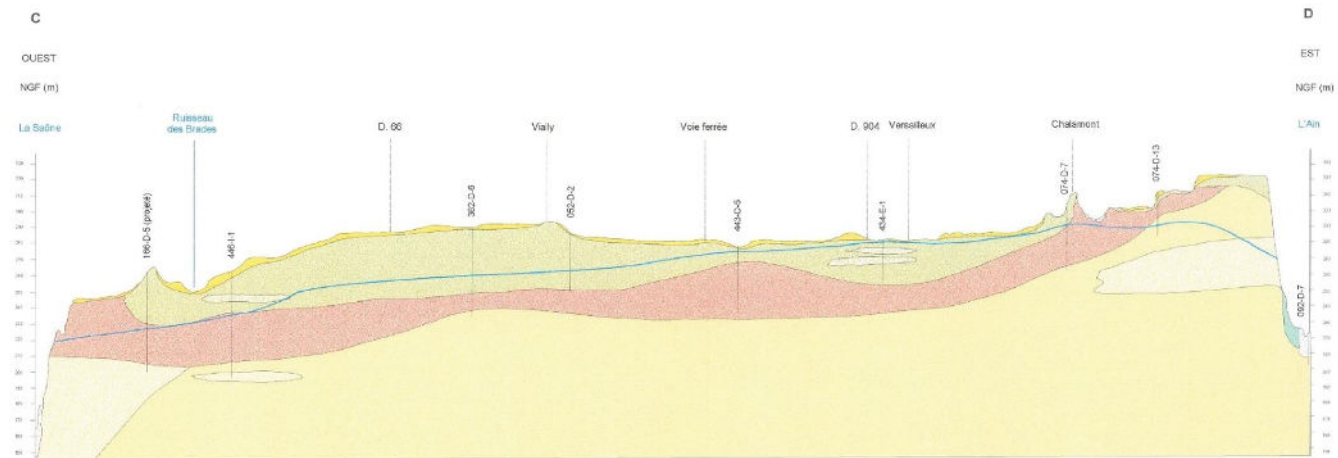
La limite entre les cailloutis et les sables du Pliocène (faciès de sables fins plus ou moins argileux) peut être cartographiée à partir des descriptions géologiques des forages dans la terminaison Nord et Nord-Ouest du plateau.

Bien que les coupes hydrogéologiques de l’étude BURGEAP de 1995 soient localement perfectibles, elles restent néanmoins suffisantes pour apprécier la géométrie générale des cailloutis de la Dombes (Figure 3).



Figure 2 : Entités géologiques de la Dombes





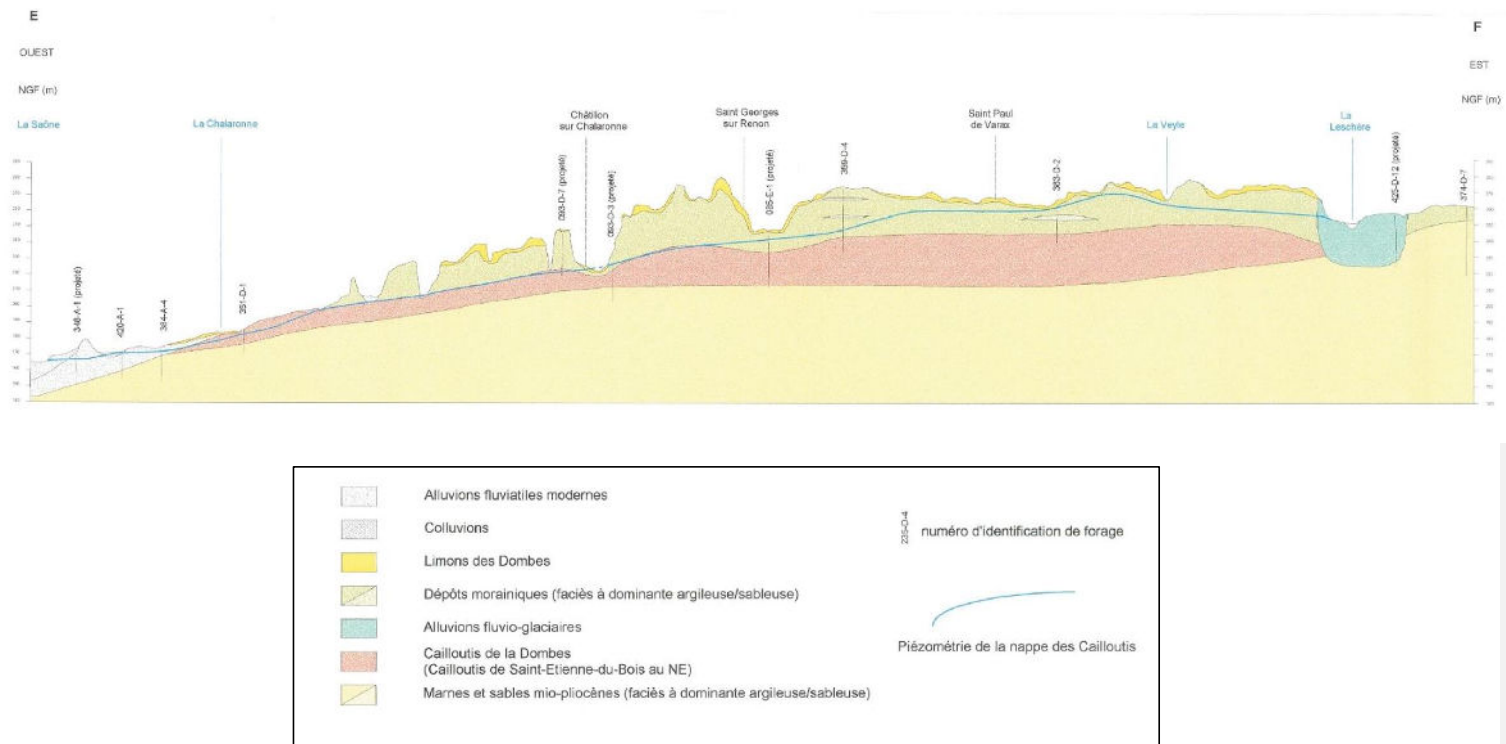


Figure 3 : Coupes géologiques du plateau de la Dombes (Extrait du rapport BURGEAP Rly.206 de 1995)

2.2 MISE A JOUR DES CONNAISSANCES SUR LES CAILLOUTIS DE LA DOMBES

Les données récentes mobilisées depuis l'étude de synthèse de 2015 sont les suivantes :

- Les nouvelles coupes de forages mises en ligne dans la Banque du sous-sol (BSS). Il peut s'agir soit de coupes de sondages anciens intégrées suite à la mise à jour de la banque de données, soit de forages réalisés après 2015 ;
- Une prospection géophysique par panneaux électriques réalisée en 2022 dans la terminaison Nord-Ouest des cailloutis sous maîtrise d'ouvrage du syndicat Bresse-Dombes-Saône (cette campagne de recherche sera accompagnée par la réalisation de forages de reconnaissance, courant 2023).

Nous n'avons pas pu accéder à de nouvelles données de forages hors banque de données du sous-sol. S'il n'est pas rare que les coupes de forage ne soient pas communiquées au BRGM pour être intégrées à la BSS, il semblerait qu'un faible nombre de nouveaux forages aient été créés ces dernières années. De plus, la réalisation d'un puits isolé (irrigation par exemple) n'est pas toujours accompagnée d'une coupe géologique fiable ou d'un résultat de pompage d'essai (pas nécessairement bancarisées à la Chambre d'agriculture ou à la DDT). Seuls 3 nouveaux forages d'irrigation réalisés en 1996 dans le secteur de Miribel ont été intégrés à la base.

Le Conseil Départemental de l'Ain s'est engagé en faveur de déploiement d'un meilleur réseau de suivi piézométrique sur la nappe des cailloutis, avec la création de 9 points d'observation supplémentaires. Sur ces 9 points, 3 concernent l'équipement en sondes de mesures de forages/puits existants, aujourd'hui non utilisés, dont les caractéristiques connues (profondeur, cimentation) permettent d'être sûrs que l'on mesure uniquement le niveau de la nappe des cailloutis ; les 6 autres points prévoient la création de nouveaux piézomètres, pour lesquels des relevés de foration seront faits.

A ce jour (janvier 2024), 8 des 9 points de suivi sont opérationnels. Le dernier point sera mis en œuvre dans le cadre des sondages que devra pratiquer le SIE Bresse Dombes Saône pour tester la productivité de l'aquifère dans les secteurs prospectés (dans le secteur de la commune de Valeins à priori). Lorsque l'ensemble du réseau de suivi sera en place, ce seront 12 points qui permettront de suivre en quasi-temps réel les battements de la nappe.

La carte figurant l'implantation des 8 points de suivis fraîchement créés est donnée en annexe 1, ainsi que les coupes des 5 forages associées. Ces données consolident les éléments de connaissance jusqu'ici reconnus (profondeur de la nappe, épaisseurs de cailloutis, caractère libre ou captif de la nappe).

La base de données de forages issue des études BURGEAP de 1995 et 2015 a ainsi pu être complétée pour affiner la représentation de l'épaisseur et l'altitude de la base de la couverture morainique (Figure 5 et Figure 6).

Des secteurs particuliers du plateau se distinguent :

- Le Centre et le Sud-Est du plateau, où la couverture morainique est globalement inférieure à 10 m. **Ces secteurs de moindre couverture morainique constituent des secteurs plus favorables à l'infiltration des pluies vers les cailloutis, donc potentiellement les zones de recharge préférentielles (cf. chapitre 3.2) ;**
- Les secteurs à fort approfondissement de la moraine (épaisseur de moraine supérieure à 40 m) : à l'Est de Tramoyes, au Nord-Est d'Ambérieux-en-Dombes, Chaleins, Nord-Est de Saint-Trivier-sur-Moignans, entre Saint-Germain-sur-Renom et Saint-Paul-de-Varax.

Sur le reste du plateau, l'épaisseur de la moraine est en moyenne comprise entre 20 et 30 m. Dans les coupes géologiques des forages, il est parfois décrit des formations plus graveleuses au sein de la moraine. Compte tenu de la trop faible densité des points de forage sur le plateau, il n'est pas possible de cartographier avec précision les hétérogénéités locales. **La présence d'horizons plus graveleux au sein de la moraine semble néanmoins circonscrite à de petites formes lenticulaires contraintes dans l'espace. Elles peuvent jouer un rôle de stockage intermédiaire des eaux infiltrées à la surface du plateau vers les cailloutis mais ne constituent pas des aquifères à proprement parler.**

Il est important de souligner que la transition entre le toit des cailloutis et la moraine est rarement franche si bien que la description de graves argileuses peut être rattachée soit aux moraines soit aux cailloutis selon les interprétations. Il peut s'agir d'une réelle transition progressive entre les 2 formations mais aussi de problèmes d'interprétation géologique au moment de la réalisation du forage. Il est généralement nécessaire d'utiliser les coupes géologiques de plusieurs forages dans un même secteur pour apprécier avec précision la position de l'interface moraine/cailloutis. Malheureusement certains secteurs manquent de données suffisantes pour lever les doutes (absence de forages ou coupes d'interprétation manquantes). C'est le cas sur les secteurs de Savigneux, Saint-Trivier-sur-Moignans, Sandrans, Lapeyrouse, Le Montellier, Rignieux-le-Franc, Dompierre-sur-Veyle, Neuville-les-Dames et Romans.

En résumé, l'état de la connaissance actuelle conjugué à la forte hétérogénéité rencontrée au sein des formations morainiques (hétérogénéité liée aux conditions de sédimentation, jouant à la fois sur la composition des matériaux, +/- argileuse ou graveleuse, et sur leur épaisseur) ne permet pas d'appréhender dans les moindres détails ce qui se passe en sous-sol, à une échelle très fine. Toutefois, cette part d'incertitude n'empêche pas de comprendre ce qui se passe à l'échelle globale du plateau, comme décrit dans la suite du rapport.

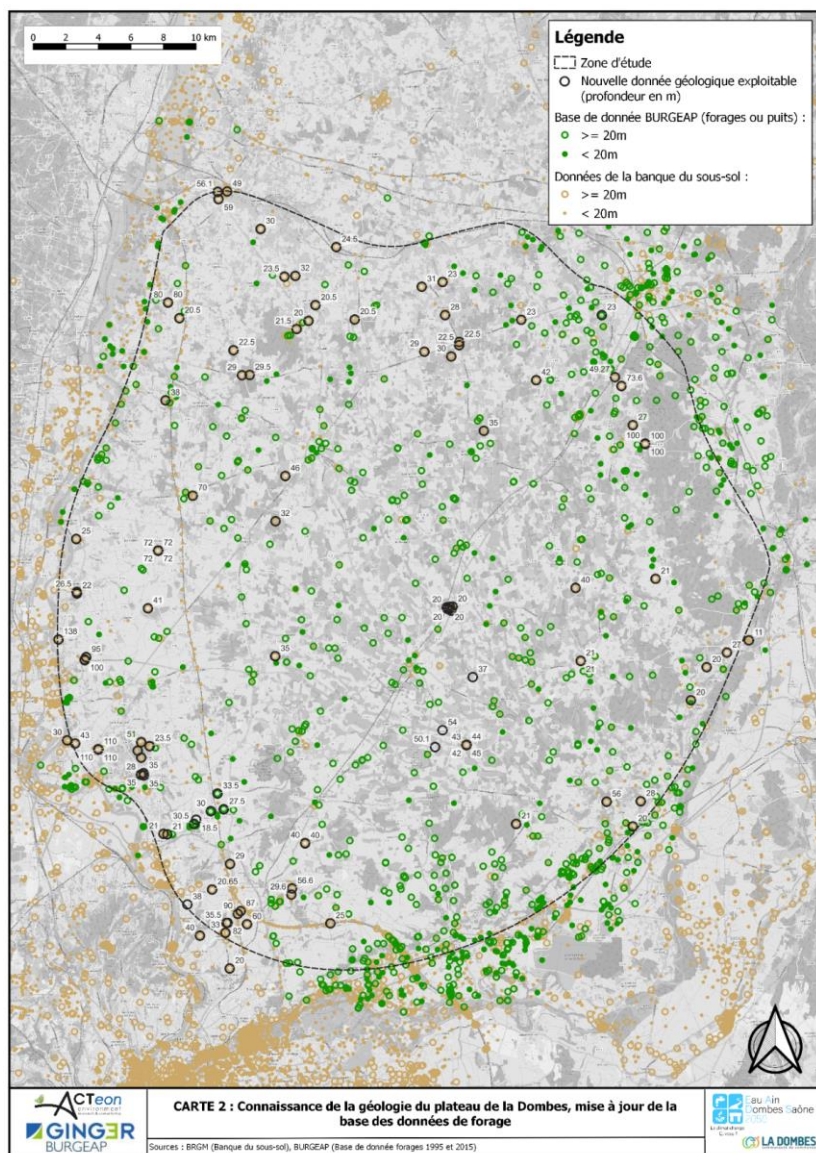


Figure 4 : Connaissances de la géologie du plateau de la Dombes (mise à jour de la base de données de forages)

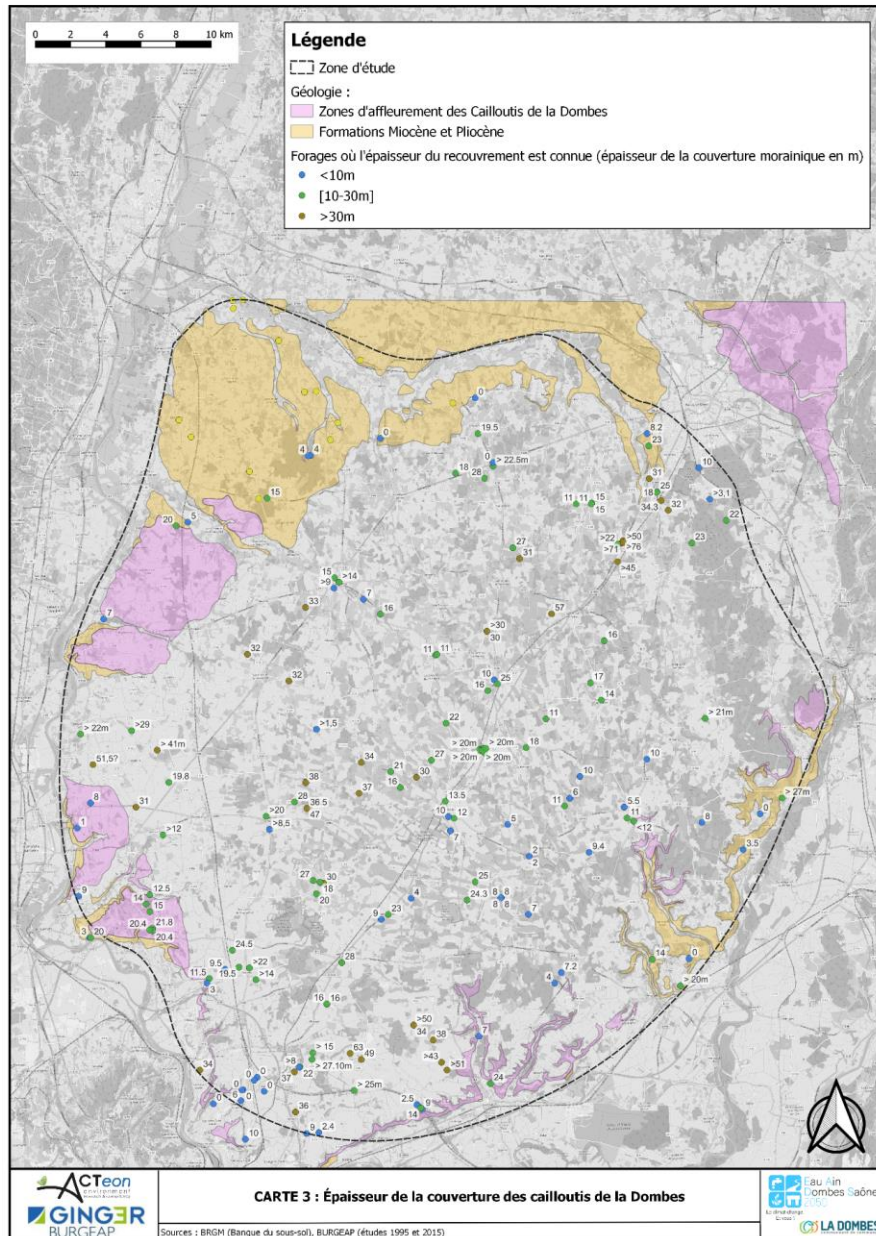


Figure 5 : Épaisseur de la couverture morainique

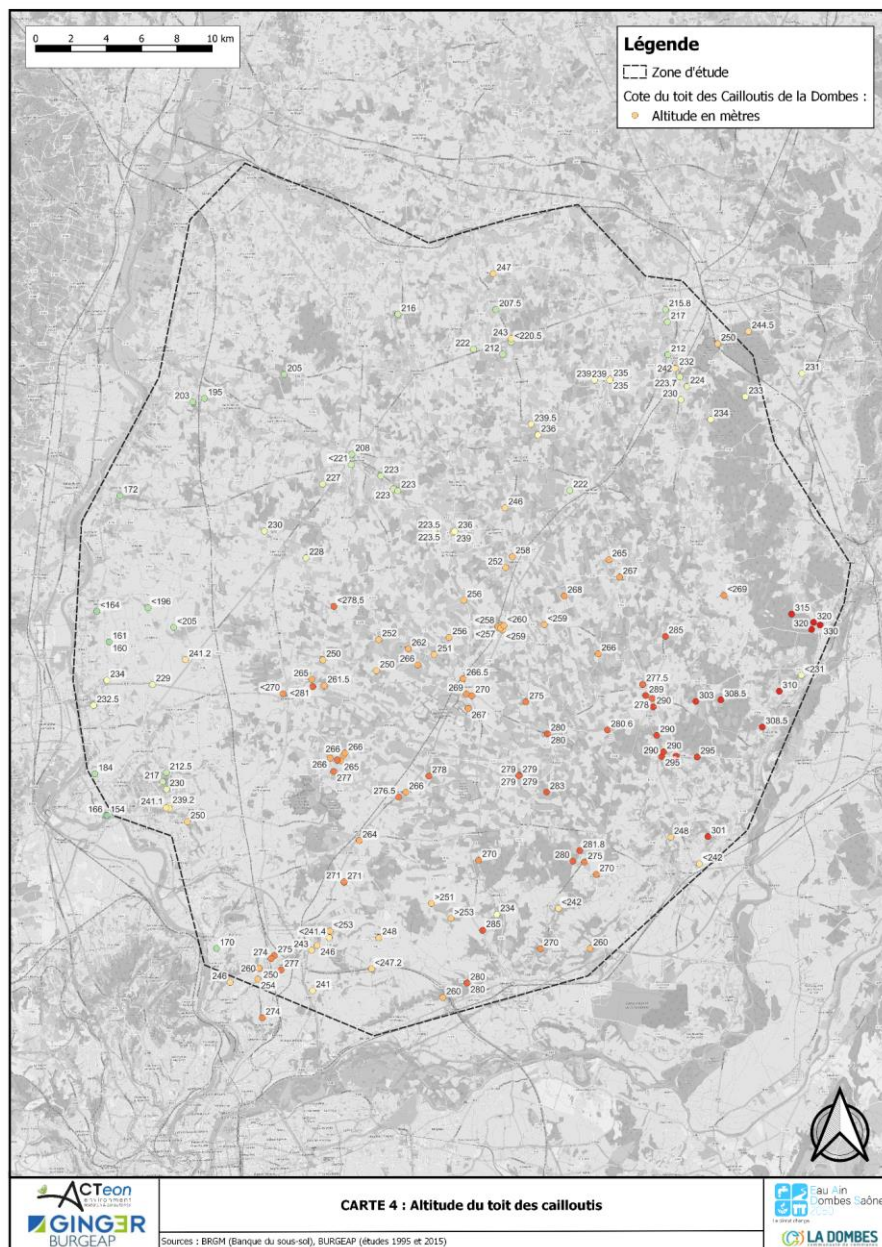


Figure 6 : Altitude du toit des cailloutis

2.3 SYNTHÈSE SUR L'ÉTAT DES CONNAISSANCES DE LA GEOMETRIE DES CAILLOUTIS DE LA DOMBES ET DE LA COUVERTURE MORAINIQUE

Compte tenu de la vaste étendue géographique de la zone d'étude et de la forte variabilité latérale observée dans les différentes formations géologiques rencontrées, la connaissance accumulée jusqu'à présent souffre de certaines lacunes pour apprécier les choses dans le détail.

Ces connaissances ont principalement été acquises pour et autour des champs captant en eau potable (AEP). Le secteur de Bourg en Bresse est le mieux connu. Pour le reste du territoire, on bénéficie d'informations ponctuelles autour des forages atteignant la nappe (majoritairement AEP ou agricoles).

Aucune prospection géophysique à grande échelle n'a été menée à l'échelle du Plateau. L'étude de recherche en eau actuellement menée par le SEP Bresse Dombes Saône sur le secteur Nord-Ouest de la Dombes devrait apporter des informations importantes pour parfaire la compréhension du fonctionnement de la nappe des cailloutis.

Ce type d'étude pourrait être mobilisé pour renforcer la connaissance, en particulier sur les secteurs dépourvus de données suffisantes :

- Secteur de Mionnay, Civrieux et Rancé ;
- Secteur d'Ambérieux-en-Dombes et de Saint-Trivier-sur-Moignans ;
- Secteur de Romans et de Neuville-les-Dames ;
- Secteur de Dompierre-sur-Veyle ;
- Plus localement, sur la partie amont du plateau sur les communes de Saint-André de-Corcy, le Montellier, Saint-Eloi, Rignieux-le-Franc, Lapeyrouse, le Plantay.

Une réflexion pourra être menée sur la possibilité de couverture géophysique électrique et/ou électromagnétique afin de combler les zones peu documentées par des méthodes non invasives, et assez faciles à mettre en œuvre, donc moins contraignantes sur le plan financier, axés sur :

- L'étude des mécanismes de recharge de l'aquifère et le rôle de la couverture glaciaire, donc préférentiellement dans la partie Sud du plateau ;
- Les limites de l'aquifère, en particulier la continuité avec l'aquifère des sables du Pliocène au Nord ;

Quelques forages complémentaires devront être réalisés pour calibrer la géophysique. Une optimisation est à chercher avec l'opportunité de réaliser de nouveaux piézomètres (cf chapitre 3.2).

3. FONCTIONNEMENT DE L'AQUIFERE DES CAILLOUTIS DE LA DOMBES

3.1 FONCTIONNEMENT GENERAL, ALIMENTATION ET DRAINAGE

Le fonctionnement général de l'aquifère des cailloutis la Dombes peut être synthétisé ainsi :

- **La recharge de l'aquifère provient uniquement de la part de précipitations qui parvient à s'infiltrer à travers les formations morainiques peu perméables** recouvrant les cailloutis (moraine + loess) ; en effet, du fait de sa situation topographique, **cette nappe n'est alimentée ni par les cours d'eau latéraux (Ain, Rhône, Saône), ni par des circulations d'eau souterraines (échange avec d'autres nappes)**. Les loess, sols fins et hydromorphes, favorisent le ruissellement ; la couverture morainique peu perméable et très épaisse par endroit fait globalement obstacle à l'infiltration et freine la recharge de la nappe sous-jacente ;
- La nappe est drainée en périphérie par de nombreuses résurgences, que ce soit des sources isolées (particulièrement bien visibles le long de la côtière Sud-Est) ou des sources en rivière ;
- La majorité des cours d'eau qui prennent leur source sur le plateau dombiste participent au drainage de la nappe sur la partie aval de leur lit, lorsque ce lit recoupe la nappe des cailloutis. La nappe maintient les cours d'eau pérennes au-delà des zones de résurgence.
- Sur la bordure Nord-Est du plateau, la nappe est en continuité avec celle des alluvions du couloir de Certines (hors zone d'étude). Cette dernière draine la nappe des cailloutis ; le couloir de Certines est également alimenté par le karst du Revermont sur sa bordure Est ;
- Sur la bordure Ouest (Val de Saône), l'aquifère est drainé par les cours d'eau ou les alluvions récentes de la Saône en continuité des cailloutis ;
- Sur la bordure Nord, les cailloutis sont vraisemblablement en contact avec les sables du Pliocène et les alluvions récentes de la Veyle (ce secteur reste mal connu) ;

Le schéma de la Figure 7 illustre le fonctionnement global de l'aquifère.

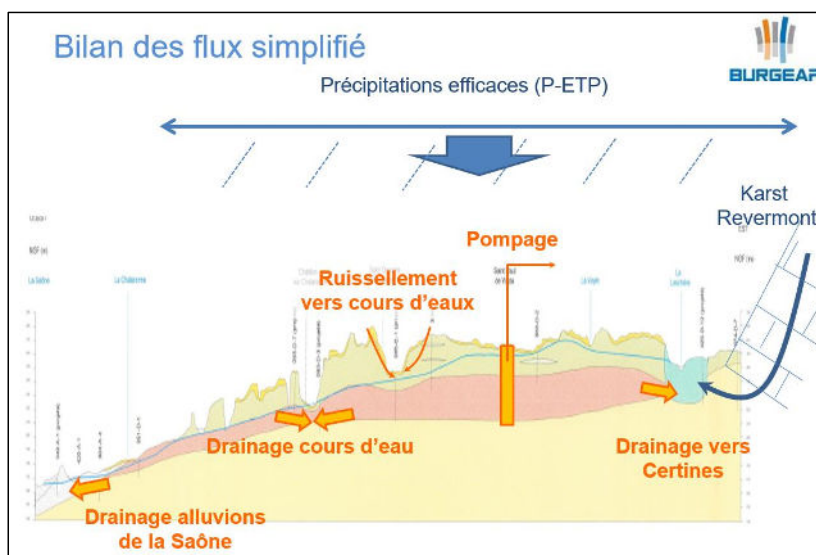


Figure 7 : Schéma conceptuel du fonctionnement de l'aquifère des cailloutis de la Dombes (BURGEAP, 2015)

3.2 PIEZOMETRIE

3.2.1 Piézométries de référence

Le débatement de la nappe des cailloutis est suivi en continu depuis une vingtaine d'années par l'intermédiaire de 3 forages de référence (Figure 8). Leur fonction est de suivre la dynamique de recharge/décharge de l'aquifère au fil des saisons et de décider la mise en place de mesures de gestion le cas échéant (cf. arrêté cadre sécheresse départemental). Ces piézomètres de références sont les suivants :

- Piézomètres de Villeneuve à l'Ouest et de St Rémi au Nord, suivis par la DDT01,
- Piézomètre de Villars les Dombes au Centre, suivi par le CD01

Un ancien forage agricole situé sur la commune de Tramoyes, suivi par l'ASIA de l'Ain depuis 2003, venait compléter le réseau de suivi sur le Sud du périmètre. Cet ouvrage fait désormais partie intégrante du réseau de suivi départemental depuis qu'il a été équipé d'une sonde de mesure en continue par le Conseil Départemental de l'Ain, comme 8 autres points supplémentaires (cf. Partie 2.2), portant à terme à 12 le nombre de piézomètres de références à l'échelle de la nappe des cailloutis.

Ces piézomètres de référence ne sont naturellement pas suffisants pour établir une carte piézométrique à l'échelle du plateau. Deux esquisses piézométriques ont pu être établies par le passé pour mettre en relief la nappe des cailloutis à l'échelle de la Dombes :

- Une première esquisse piézométrique réalisée par le BRGM en 1975 en distinguant trois niveaux aquifères différents : les terrains glaciaires, les cailloutis, et la nappe inférieure (sables argileux du Miocène ou du Pliocène) ;
- Une seconde esquisse piézométrique réalisée par BURGEAP en 1995 pour la nappe des cailloutis. C'est cette dernière qui est encore prise pour référence aujourd'hui ;

Les points de mesure utilisés pour le tracé de ces cartes furent, pour la plupart, des puits agricoles, sans possibilité de vérification du niveau réellement capté (absence de coupe géologique ou technique), et parfois avec des campagnes de mesure non synchrones. **Il existe donc une part d'incertitude quant aux niveaux mesurés et il faut considérer ces cartes comme des « esquisses piézométriques » donnant une image des directions d'écoulement au sein même de la nappe.** Pour établir une carte piézométrique la plus fine possible, il serait nécessaire de revérifier l'ensemble des points de mesure disponibles, de densifier les points sur certains secteurs, et de réaliser plusieurs campagnes synchrones à des périodes contrastées (hautes eaux et/ou période de recharge, basses eaux).

Les deux esquisses piézométriques (Figure 8) montrent sensiblement les mêmes choses : écoulements divergents à partir du point culminant de la Dombes (situé aux alentours de la commune de Chalamont), en lien avec la géologie et la topographie (point culminant du plateau) ; la piézométrie de cette nappe décroît vers le Nord, l'Ouest et le Sud-Ouest, depuis la zone centrale (cote 290 m NGF, secteur de Chalamont), jusqu'à atteindre +/- 200 m NGF en périphérie.

La piézométrie de BURGEAP laisse apparaître 5 sous-bassins versant hydrogéologiques (BURGEAP, 1995), dont les 4 premiers sont dans l'aquifère des cailloutis :

- Le bassin « Veyle-Reyssouze » (gradient moyen de 4 à 5‰) ;
- Le bassin « Chalaronne » (gradient moyen de 3‰) ;
- Le bassin « Dombes Ouest » (gradient moyen de 3‰, puis de 1 % du fait du drainage par la Saône) ;
- Le bassin « Dombes Sud » avec un fort gradient et un drainage marqué sur la côtère par les cours d'eau (Sereine, Cottey et Toison).

Un cinquième bassin concerne le couloir de Certines à l'Est (hors zone d'étude).

La piézométrie du BRGM de 1975 diffère de celle de 1995 principalement par le tracé des dômes piézométriques complémentaires dans la partie Sud-Ouest :

- Un dôme centré sur les communes d'Ambérieux-en-Dombes et Lapeyrouse ;
- Un second dôme centré sur les communes de Saint-Jean-de-Thurigneux et de Saint-André de Corcy ;

Les données relevées par BURGEAP en 1995 dans la partie Sud-Ouest sur les ouvrages atteignant uniquement les moraines montrent clairement qu'il s'agit d'un problème d'interprétation des données par le BRGM. Ces observations sont confirmées par des relevés réalisés en 2022 (cf chapitre 3.2.2) dans la nappe des cailloutis.

La position du dôme piézométrique dans la partie Centre-Est du plateau, qui pourrait correspondre à une zone de recharge préférentielle de la nappe, coïncide avec le secteur de moindre épaisseur de la couverture morainique (<10 m).

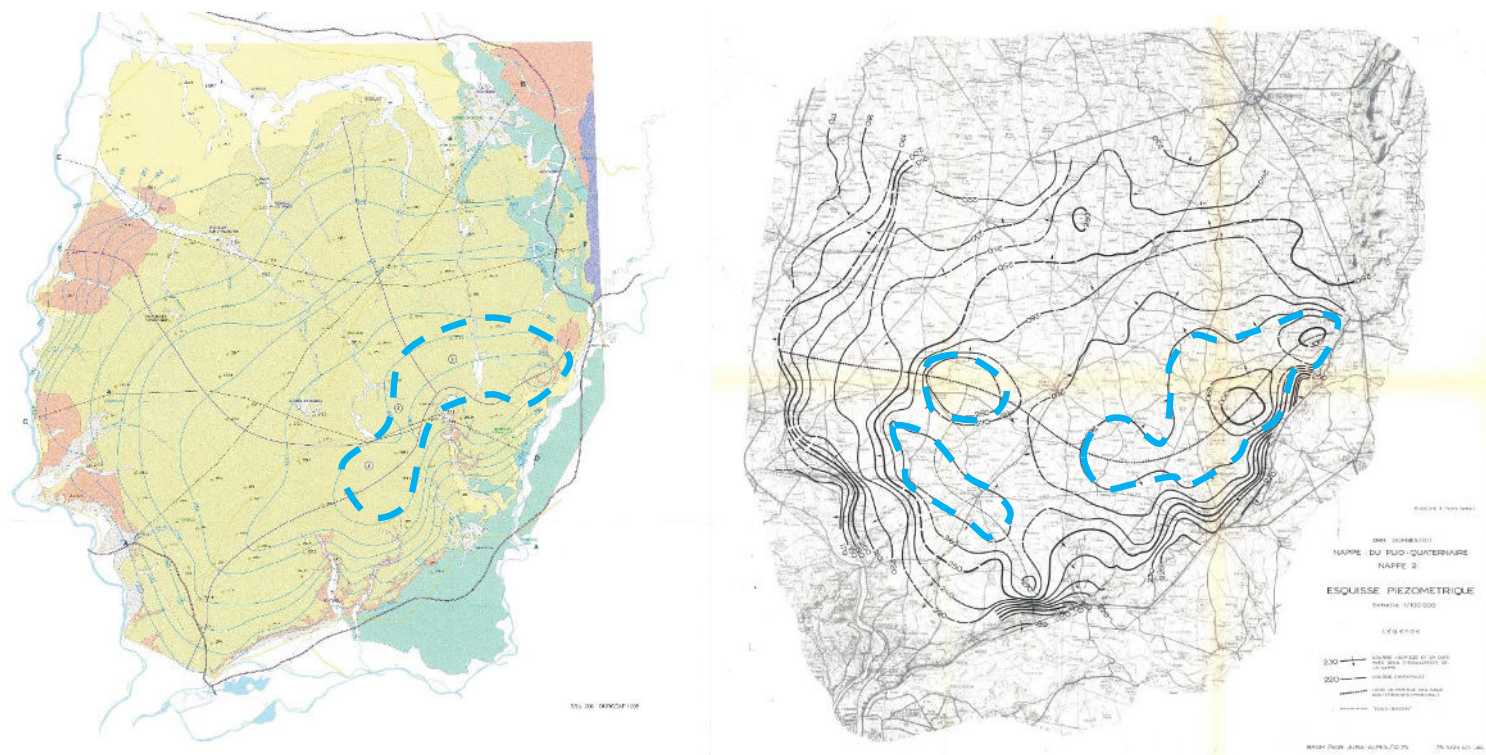


Figure 8 : Esquisses piézométriques : BURGEAP 1995 (Carte de gauche) et BRGM 1975 (carte de droite) avec localisation des dômes piézométriques (en bleu).

3.2.2 Autres suivis piézométriques

D'autres suivis plus ponctuels ont pu être réalisés dans le cadre d'études locales. Ils concernent des portions plus limitées du territoire, et peuvent difficilement être exploités à l'échelle du plateau. Par ailleurs, nous disposons d'un suivi en continu sur 4 piézomètres (cf. chapitre 6.1).

Deux relevés piézométriques ont été réalisés en mai et juillet 2022 par la société EKS pour le compte du Conseil Départemental de l'Ain dans le cadre des suivis « qualité » de la nappe des cailloutis de la Dombes.

La Figure 9 présente les valeurs relevées sur les piézomètres suivis en continu (valeurs minimale, moyenne et maximale) ainsi que les valeurs relevées en 2022.

Des écarts sont observés avec l'esquisse de 1995 sur les secteurs suivants :

- Au Nord et à l'Est de Villars-les-Dombes ;
- Dans le secteur de Tramoyes ;
- Autours des puits de Monthieux ;
- A l'Ouest de Saint-Trivier-sur-Moignans.

Les écarts peuvent être localement importants (2 m) et peuvent s'expliquer par l'imprécision des relevés de 1995 (2 campagnes non synchrones), par l'imprécision du repère d'altitude des puits, mais aussi par des baisses plus sensibles de la nappe sur certains secteurs. **Ces observations ne remettent pas en cause l'allure générale du tracé de l'esquisse piézométrique (direction des écoulements, position du dôme piézométrique) et confirment l'absence de dôme piézométrique dans la partie Ouest tel que proposé par le BRGM.**

L'incohérence entre certains relevés piézométriques mettent en avant la **nécessité de lancer un nouveau relevé piézométrique exhaustif à partir des ouvrages atteignant la nappe des cailloutis, et certainement de prévoir de nouveaux piézomètres dans les zones dépourvues de points de mesure de la nappe.** Un travail important de vérification serait à faire sur le terrain pour s'assurer de l'utilisation d'ouvrages inventoriés en 1995, **avec un enjeu fort sur la partie Centre-Est du plateau (dôme piézométrique).**

3.2.3 Mise en place de nouveaux piézomètres de référence

Le Conseil Départemental de l'Ain, dans le cadre de ses actions pour le suivi qualitatif et quantitatif des masses d'eau de l'Ain, a entrepris de densifier le réseau de piézomètres de références sur le secteur Dombes. Ce renforcement portera de 3 à 12 le nombre de points de suivi en continu (cf. Partie 2.2). Sur les 9 points supplémentaires, six sont de nouveaux piézomètres, créés sur les secteurs de Rancé, Faramans, Dompierre-sur-Veyle, Saint-André-sur-Vieux-jonc, Neuville-les-Dames et Valeins (ce dernier sera réalisé par le Syndicat Bresse Dombes Saône dans le cadre de l'étude de recherche en eau en cours sur la terminaison Nord-Ouest de la nappe). Les trois autres points (Chalamont, Marlieux et Tramoyes) correspondent à des ouvrages existants, inutilisés et correctement réalisés, désormais équipés d'une sonde enregistreuse autonome.

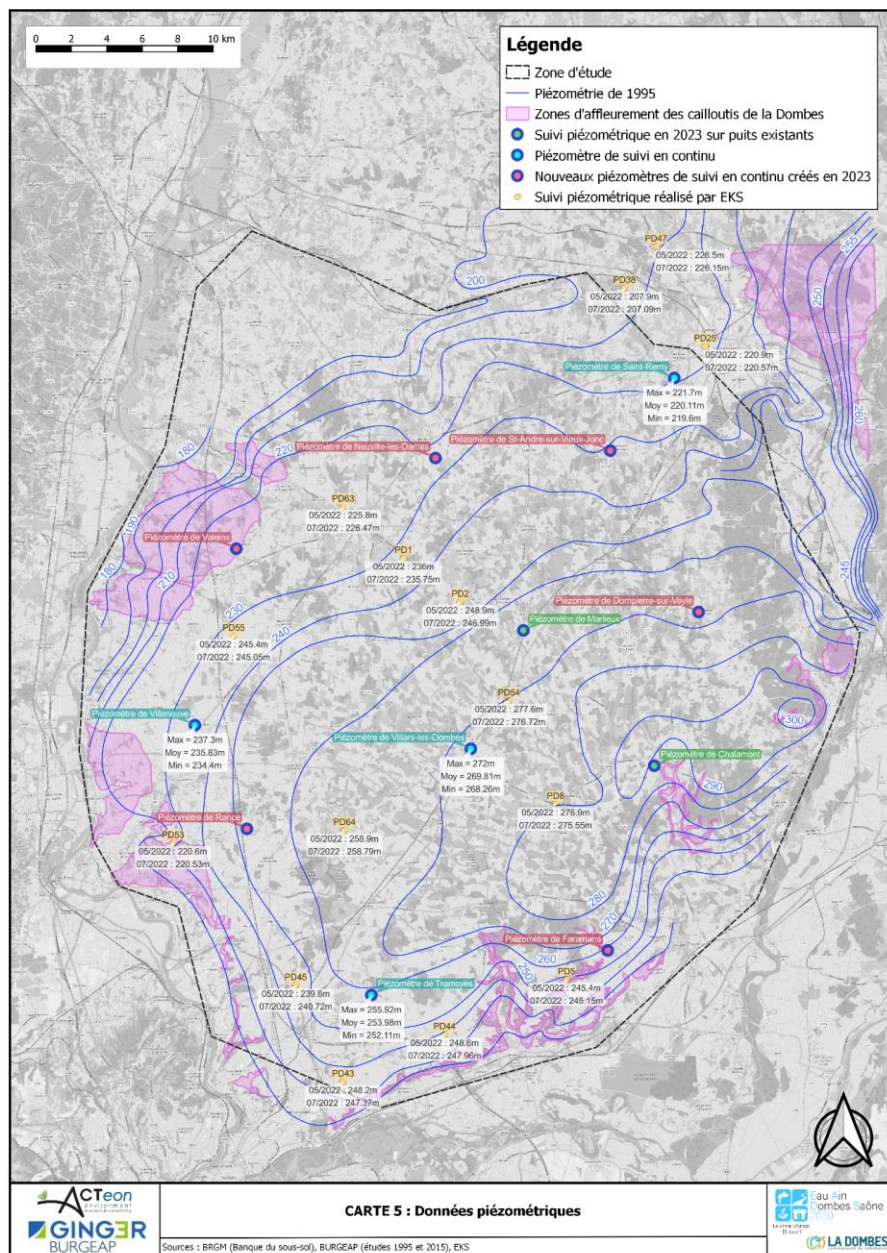


Figure 9 : Comparaison entre l'esquisse piézométrique de 1995, les suivis piézométriques en continu et les relevés piézométriques de 2022

3.2.4 Mise en charge de la nappe

La mise en charge possible de la nappe des cailloutis par la couverture morainique est un facteur important à intégrer pour comprendre les mécanismes de recharge de la nappe par les précipitations. En effet, la présence d'une couche limono-argileuse à la fois épaisse et continue, constitue une situation propice à la mise en charge la nappe, phénomène qui vient limiter, voire bloquer les possibilités d'infiltration de l'eau de pluie vers la nappe des cailloutis.

La présence d'une couverture continue ne signifie pas que la nappe est en charge en tous points du plateau. Dans des secteurs où l'épaisseur de la moraine est inférieure à 30 m, le niveau de nappe peut être situé plus bas que l'interface moraine/cailloutis. Il existe dans ce cas la présence d'une zone non saturée dans l'aquifère des cailloutis, entre le toit de la nappe et la base des moraines. La fluctuation du niveau de nappe entre deux périodes de hautes et basses eaux correspond à la quantité d'eau qui a été stockée ou déstockée de l'aquifère en considérant la porosité moyenne de l'aquifère (quelques %).

Lorsque le niveau de la nappe est situé au-dessus de la base des moraines, il n'est pas possible de stocker plus d'eau dans l'aquifère (ou très peu), car il n'existe pas de zone perméable non saturée dans les cailloutis. Seul le niveau piézométrique (ou pression dans l'aquifère) lié aux zones de recharge plus en amont, peut varier dans l'aquifère (Figure 9).

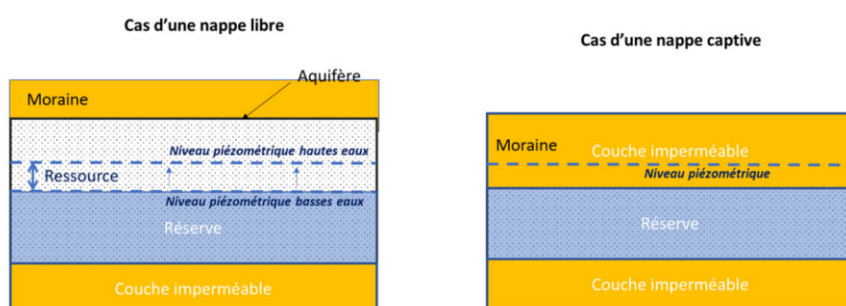
Dans la réalité, la couverture morainique peut être localement plus perméable et se comporter comme un matériaux « semi-perméable », rendant possible les phénomènes de « drainance », c'est-à-dire les transferts verticaux d'eau entre les différents étages stratigraphiques. Les volumes échangés par drainance restent relativement faibles car particulièrement lents. La présence de lentilles de graviers peut également jouer le rôle de réservoir intermédiaire.

La zone principale de recharge par les pluies, qui va permettre le stockage d'eau dans l'aquifère et faire monter le niveau ne peut correspondre qu'à un secteur de nappe libre à faible couverture morainique ou à couverture morainique plus perméable car plus sablo-graveleuse qu'argileuse (Figure 10).

La cartographie de la mise en charge de la nappe (Figure 11) a été construite à partir de l'altitude de la base des moraines (Figure 6) et de la piézométrie de 1995. Cette carte peut évoluer dans le temps avec un déplacement de la limite de captivité de la nappe suivant la période de mesure, dans les zones proches de cette limite. Les valeurs sur la carte, exprimées en mètres, correspondent à l'écart entre le niveau de nappe et la base des moraines. Les valeurs négatives correspondent à un décroché du niveau de la nappe par rapport à la base des moraines, donc des secteurs de nappe libre. Les valeurs positives correspondent à un niveau de nappe au-dessus de la base des moraines, donc des secteurs de nappe captive (nappe en charge). La précision sur le choix de la limite moraine/cailloutis à partir des coupes de forage, et les secteurs d'absence de données rendent imprécis le tracé. Cela concerne les zones autour des valeurs proches de zéro où l'on peut estimer la précision à +/- 2 m de charge. Les zones d'affleurements des cailloutis (en violet sur le Figure 11) sont des secteurs de nappe libre, en périphérie Ouest et Sud du plateau.

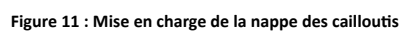
Sous couverture morainique, le secteur de nappe libre est globalement situé sur la moitié Sud du plateau, ainsi que dans la zone de moindre épaisseur de la moraine, centrée sur le dôme piézométrique de l'esquisse de 1995. On note un secteur de nappe libre étendu vers le Sud-Ouest du plateau sur les secteurs de Civrieux, Mionnay, Saint-André-de-Corcy et Monthieux. Plus au Nord, l'absence de forage ne permet pas de préciser la mise en charge éventuelle de la nappe.

Immédiatement au Nord d'une ligne Villars-Chalamont, toute la partie Nord et Nord-Est du plateau est en nappe captive jusqu'en limite des cailloutis, correspondant à l'affleurement des sables du Pliocène, soit sensiblement jusqu'à une ligne passant par l'Abergement-Clémenciat, Neuville-les-Dames, et Saint-André-sur-Vieux Jonc. L'importance de la mise en charge de la nappe est dans le détail hétérogène, et la faible densité de point de forage ne permet pas toujours de bien la préciser. En revanche, les zones de surépaisseur de la moraine identifiées sur la Figure 5 correspondent localement à des zones de mise en charge de la nappe : Est de Tramoyes, Nord-Est d'Ambérieux-en-Dombes, Chaleins, Nord-Est de Saint-Trivier-sur-Moignans, entre Saint-Germain-sur-Renom et Saint-Paul-de-Varax.



La présence d'une couche de moraine ne signifie pas nécessairement que la nappe est captive : le niveau piézométrique peut être plus bas que la base de la couverture morainique
En nappe captive, les fluctuations piézométriques sont des variations de pression dans l'aquifère, on ne peut pas faire varier (ou très peu) la quantité d'eau stockée dans l'aquifère

Figure 10 : Illustration de la mise en charge de la nappe des cailloutis (BURGEAP)



3.3 SYNTHÈSE SUR L'ÉTAT DES CONNAISSANCES DU FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE DES CAILLOUTIS

Le manque de connaissance et les pistes d'acquisition sont les suivantes (Figure 12) :

- **La piézométrie de la nappe** : la piézométrie de référence date de 1995 avec une densité de points parfois insuffisante et une nécessaire interprétation du tracé des isopièzes. Un travail important de recensement des ouvrages atteignant les cailloutis doit être mené, en plus de la réalisation de piézomètres complémentaires dédié au suivi de la nappe dans la zone de recharge supposée ;
- **Les limites de l'aquifère**, en particulier la continuité avec l'aquifère des sables du Pliocène au Nord ;
- **Les paramètres hydrodynamiques** : toutes les études mettent en avant la très grande hétérogénéité dans la perméabilité des cailloutis, y compris à une échelle très réduite. Une approche intégratrice sur de vastes secteurs du plateau par géophysique électrique, électromagnétique ou par résonnance protonique, avec calage à partir des résultats de pompages d'essai existants, pourrait être mise en œuvre, en cherchant à couvrir préférentiellement les zones d'absence de données ;
- **Les mécanismes de recharge de l'aquifère**. Une première approche est proposée à partir des suivis en continu sur 4 piézomètres (cf. chapitre 6.1) et les bilans de l'infiltration (Chapitre 6.4) ;
- **Le rôle de la couverture morainique glaciaire** (aucune étude spécifique sur la perméabilité de la couverture n'a encore été menée) et plus précisément le rôle de réservoir intermédiaire que peuvent jouer certaines lentilles graveleuses observées en forage dans la couverture morainique ;
- **Les relations nappe / rivières**, qui n'ont jamais fait l'objet d'une synthèse sur la Dombes, mais que les observations transmises par les syndicats de rivière et la fédération de pêche (assecs, soutien d'étiage) et les campagnes de mesures débits permettent de quantifier (Cf chapitre 4.3). Le principal axe de travail concernerait ici l'équipement de systèmes de mesure de débit en continu sur les sources et cours d'eau en périphérie Sud et Sud-Ouest du plateau, où le suivi des débits n'est actuellement pas assuré.

Une modélisation mathématique de la nappe des cailloutis serait un outil intégrateur de l'ensemble des données et permettrait de simuler plus précisément l'évolution de la recharge et l'impact des prélèvements en nappe sur les secteurs à enjeu.

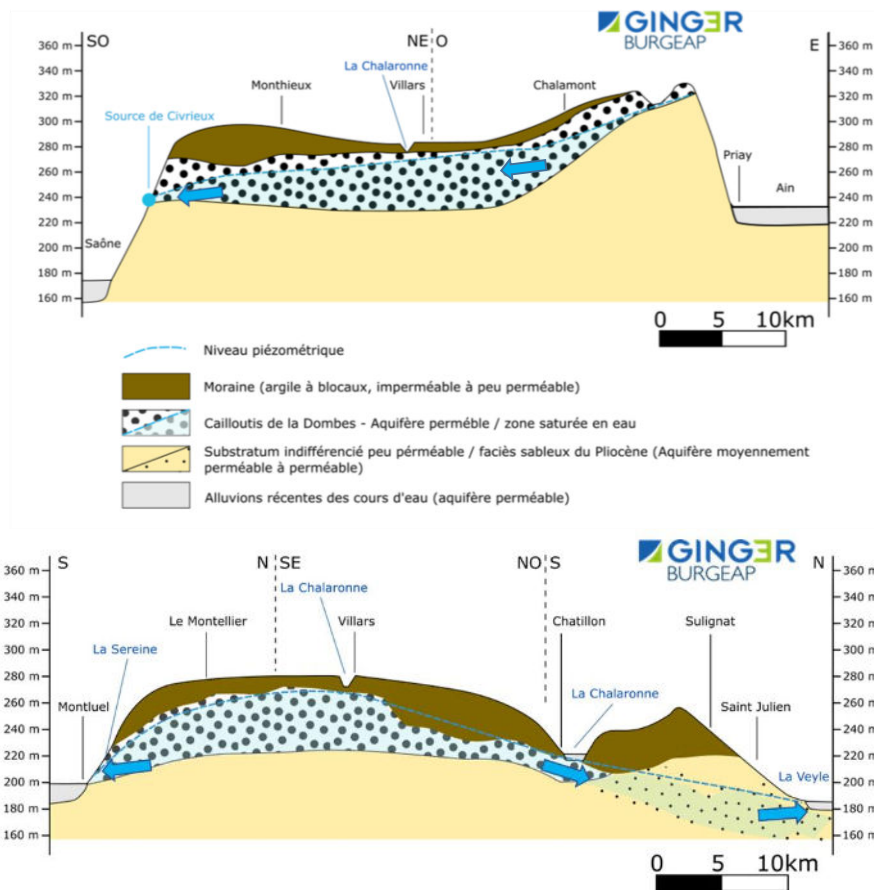


Figure 12 : Coupes hydrogéologiques simplifiées (BURGEAP)

4. HYDROLOGIE

4.1 LES COURS D'EAU DE LA DOMBES

La Dombes présente une pente faible et régulière vers le Nord et une zone de côtière dans sa partie Sud et Sud-Ouest. Les principaux cours d'eau drainant le plateau du Sud vers le Nord avec :

- La Chalaronne qui prend sa source au sud de Villard-les-Dombes et qui se jette dans la Saône à Thoissey, pour un bassin versant d'environ 157 km² ;
- Le Renon, qui prend sa source à Versailleux et qui conflue en rive gauche de la Veyle à Vonnas pour un bassin versant d'environ 131 km² ;
- L'Irance qui prend sa source à Saint-André-le-Bouchoux et qui conflue avec la Veyle à Mézeriat pour un bassin versant d'environ 212 km² ;
- Le Vieux Jonc, qui prend sa source à Saint-Nizier-le Désert et qui conflue avec l'Irance à Buellas pour un bassin versant d'environ 158 km² ;
- La Veyle, qui prend sa source à Châtenay et draine les principaux cours d'eau (Renon, Irance) au Nord du plateau, en prenant la direction de l'Ouest. Elle se jette dans la Saône à Pont-de-Veyle, pour un bassin versant de 672 km².

Les cours d'eau de la côtière Sud et Sud-Ouest, sont des cours d'eau de plus faible extension, qui confluent tous avec l'Ain, le Rhône ou la Saône. Les principaux cours d'eau sont le Toison, le Longevent, la Sereine (côtière Sud), le Morbier et le Formans (côtière Sud-Ouest).

4.2 DONNEES HYDROLOGIQUES

4.2.1 Stations de mesure en continu

Neuf cours d'eau de la Dombes bénéficient d'une station de mesure en continu, avec des historiques allant de 17 années de suivi (Le Toison à Rignieux-le-Franc) à plus de 60 années (la Veyle et le Renon).

Les données de la Chalaronne à Saint-Etienne-sur-Chalaronne et de la Calonne à Guéreins ne sont pas bancarisées. D'après le Syndicat des Rivières Dombes Chalaronne Bords de Saône, les mesures sur la Calonne ne sont pas fiables en raison d'une évolution importante du lit du cours d'eau. Les données de la station de Saint-Etienne-sur-Chalaronne sont jugées fiables, mais disponibles depuis fin 2017 uniquement.

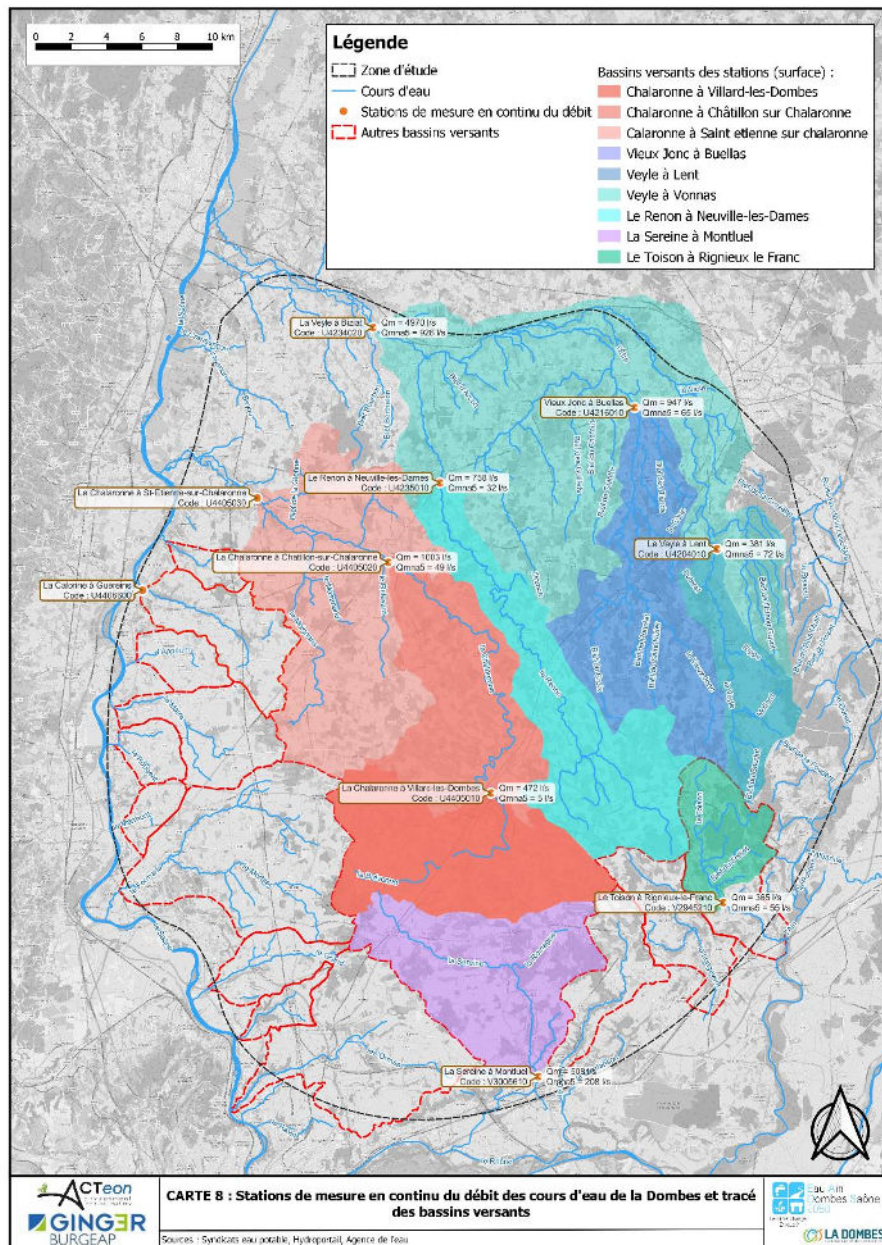


Figure 13 : Stations de mesure en continu du débit des cours d'eau de la Dombes

Tableau 1. Station de suivi du débit en continu sur les cours d'eau de la Dombes

Nom de la station	Code station	Surface bassin versant topographique (km²)	Suivi en continu	Module (l/s)	QMNA5 (l/s)	Plage d'incertitude s (l/s) sur QMNA5	Rapport QMNA5/module	Rapport QMNA5/surface (l/s/km²)
La Chalaronne à Villars	U4405010	87	Depuis janvier 1972	472	5	[2-6]	1%	0.06
La Chalaronne à Chatillon	U4405020	175	Depuis février 1982	1003	49	[33-55]	5%	0.28
<i>La Chalaronne à St Etienne-sur-Chalaronne</i>	<i>U4405030</i>	<i>307</i>	<i>Depuis décembre 2017</i>	<i>[800-1000]</i>	<i>[250-350]</i>		<i>33%</i>	<i>0.98</i>
Le Renon à Neuville-les-Dames	U4235010	102	Depuis janvier 1969	758	32	[24-41]	4%	0.31
Le Toison à Rigneux-Lefranc	V2945210	33	Depuis Août 2005	365	55	[40-74]	15%	1.67
La Sereine à Montluel	V300 5610□	78	Depuis décembre 1980	508	208	[193-224]	41%	2.67
<i>La Calonne à Guéreins</i>	<i>U440 6600</i>	<i>35</i>	<i>Problème de fiabilité de la station, données non bancarisées</i>					
La Veyle à Lent	U4204010	34	Depuis décembre 1967	381	72	[62-82]	19%	2.12
La Veyle à Biziat	U4234020	490	Depuis septembre 1990	4970	926	[799-1090]	19%	1.89

4.2.2 Mesures ponctuelles

Ces données sont utilisées pour la réalisation du bilan hydrologique et étudier les relations nappe/rivières en particulier en période d'étiage.

Les débits des cours d'eaux qui ne bénéficient pas d'une station de mesure en continu sont mesurés ponctuellement dans le cadre d'études spécifiques sur un cours d'eau ou de suivi qualité. C'est le cas d'une majorité des cours d'eau de la Dombes lors des campagnes de mesure qualité par le CD01 (Figure 14). Ces données sont complétées par les observations des agents de terrain (syndicats de rivière) en période d'étiage et de quelques mesures de terrain issues d'étude locales.

Les cours d'eau qui ne bénéficient pas de données de mesure de débit d'étiage ont fait l'objet d'une campagne de mesure de débit le 12/09/22. Cette campagne concerne des cours d'eau des côtières Sud-Ouest et Sud.

Tableau 2. Estimations des débits des cours d'eau sur la Côtière secteurs Ain et Rhône (Synthèse à partir des données bibliographiques et/ou estimation BURGEAP)

	Nom de la station	Surface bassin versant topographique (km²)	Suivi ponctuel	Estimation Module (l/s)	Estimation QMNAS (l/s)	Estimation rapport QMNAS/module	Estimation rapport QMNAS/surface (l/s/km²)
Côtière Ain	Bief de l'Ecotay	3.5	4 mesures sur 1 station en 2016 (CD01)	[10-15]	[0-2]	8%	0
	Bief de la Fougère	14	Mesure du 19/09/22 (9,8 l/s)	-	[10-15]	-	0.89
	Le Copan	2.6	4 mesures sur 1 station en 2016 (CD01)	[10-15]	[2-5]	28%	1.35
	Bief du Janet	0.9	A sec le 19/09/22	-	0	-	0.00
	Le Gardon	2.5	4 mesures sur 1 station en 2016 (CD01)	[3-10]	[0-1]	7%	0.20
	La Toison	40	4 mesures sur 3 stations en 2011 et 2016 (CD01)	[200-300]	[60-100]	32%	2.00
	Le Longevent	21.5	4 mesures sur 1 station en 2016 (CD01)	[150-250]	[50-80]	33%	3.02
Côtière Rhône	Le Merdanson	7	Mesure du 19/09/23 (3,1 l/s)	-	[3-7]	-	0.71
	Le Cottey	22	4 mesures sur 1 station en 2011 (CD01)	[250-300]	[130-160]	52%	6.59
	La Sereine	78	Station en continue	508	[193-224]	41%	2.67
	Cours d'eau Montluel	-	Sur le principal, estimation < 1 l/s du 19/09/23	-	[0-2]	-	-
	Ruisseau du Raupand	2.3	Mesure du 19/09/23 (7,1 l/s)	-	[7-10]	-	3.70
	La Méandrière	0.7	Mesure du 19/09/23 (2,6 l/s)	-	[3-5]	-	5.71
	TP Sources de Beynot	-	Mesure du 19/09/23 (5,7 l/s)	-	[6-10]	-	-
	Le champ des sources	-	Mesure du 19/09/23 (< 0,5 l/s)	-	[0-2]	-	0.00
	Côtière de Neyron, Ruisseau du Molliet, Bois Berlin	-	Tous les axes écoulement à sec le 19/09/22	-	0	-	-
	Sources de la côtière lyonnaise	-	Bibliographie	20	[10-20]	-	-

Tableau 3. Estimations des débits des cours d'eau sur la Côtère secteur Saône (Synthèse à partir des données bibliographiques et/ou estimation BURGEAP)

	Nom de la station	Surface bassin versant topographique (km²)	Suivi ponctuel	Estimation Module (l/s)	Estimation QMNA5 (l/s)	Estimation rapport QMNA5/module	Estimation rapport QMNA5/surface (l/s/km²)
Côtère Saône	Combe de Sathonay	7.5	Mesure du 19/09/22 (5,4 l/s)	-	[5-10]	-	1.00
	Ruisseau des Vosges	7	Estimé le 19/09/22 (20 à 40 l/s en aval)	-	[20-40]	-	4.29
	Ruisseau des Echets	39	A sec sur tout son cours en aval du marais le 19/09/22		0		0.00
	Ruisseau des Torrières	9	Estimé le 19/09/22 (15 à 45 l/s en aval)		[15-25]		2.22
	Ruisseau du Grand Rieux	18	4 mesures sur 1 station en 2018 (CD01)		[25-35]		1.67
	Ruisseaux du Formant et du Morbier	70	4 mesures sur 2 stations en 2018 (CD01) + mesures CC DSV en 2019	[200-250]	[130-170]	64%	2.07
	Le Marmant	7.5	Mesure du 19/09/23 (13 l/s)		[13-16]	-	1.93
	Le Rougeat	10.5	4 mesures sur 2 stations en 2018 (CD01)	[12-16]	[6-8]	50%	0.67
	Le Maître	30	4 mesures sur 3 stations en 2016 (CD01)	[95-120]	[48-60]	50%	1.80
	L'Appeum	13	4 mesures sur 3 stations en 2016 (CD01)	[23-30]	[14-18]	58%	1.23
	La Calonne	34	4 mesures sur 5 stations en 2011 et 2015 (CD01)	[200-300]	[130-170]	58%	4.41
	La Petite Calonne	6.5	4 mesures sur 5 stations en 2011 et 2015 (CD01)	[10-20]	[5-10]	50%	1.15

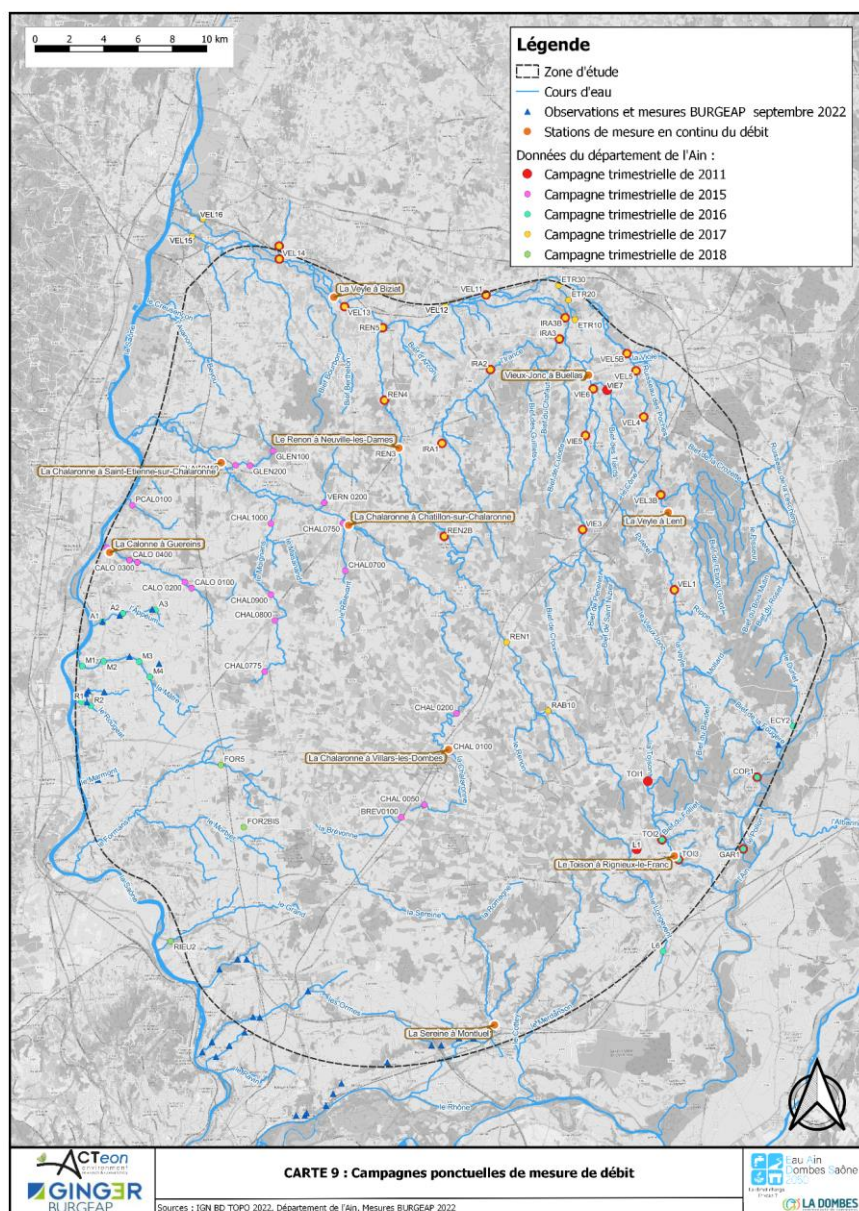


Figure 14 : Stations ponctuelles de mesures de débit des cours d'eau

4.3 ROLE DES ETANGS DANS LE CYCLE DE L'EAU

La Dombes compte un peu plus de 1000 étangs, totalisant à peu près 11 200 ha de surface (110 km²) soit 10% de la surface d'étude (cf. rapport 1A, chapitre 7). A quelques exceptions près, tous les étangs constituent un maillon d'une chaîne, que l'on appelle chaîne d'étangs. Le territoire comporte une quarantaine de chaînes de plus de 3 étangs.

De façon très schématique, les étangs sont alimentés par le ruissellement issu du bassin versant amont, intercepté et distribué grâce à un réseau de fossés complexe et de systèmes d'empellement. Pour satisfaire de bonnes conditions de remplissage, il faut une surface de bassin versant comprise entre 6 à 7 fois la surface de l'étang. Plus les étangs sont situés en aval d'une chaîne et plus ils deviennent tributaires de l'eau relarguée par les étangs situés à l'amont. Les choses sont éminemment plus complexes dans les faits et pour s'en rendre compte il suffit de visualiser cette carte, sur laquelle figure une chaîne d'étangs suivie dans le cadre des PSE :



Figure 15 : exemple d'une chaîne d'étangs sur Chalamont suivie dans le cadre des PSE

Le volume d'eau potentiel contenu dans les étangs est considérable. En évaluant à 80 cm la hauteur d'eau moyenne contenue dans les étangs, la capacité de stockage totale pour une surface totale cumulée de l'ordre de 110 km² se situe autour de 100 millions de m³ d'eau !

Les 2/3 des étangs environ (soit 7 000 ha) sont exploités pour la pisciculture, le 1/3 restant pour des activités de loisir (pour la chasse en particulier). Dans le cadre de la pisciculture traditionnelle, les étangs restent en eau 4 ans environ (évolage) et sont mis en assec la cinquième année pour redonner au milieu les propriétés physico-chimiques adéquates (en oxydant la matière organique notamment), entretenir les berges et la pêche, et repartir pour 4 ans d'élevage piscicole dans de bonnes conditions. Ce sont donc en moyenne 1500 à 2000 hectares de surface d'étangs qui sont laissés en assec chaque année, laissant place à une culture d'été généralement.

Dans le cadre de la pisciculture traditionnelle toujours, les pêches ont lieu tous les ans, par vidanges successives : on commence par les étangs situés le plus à l'aval des chaînes puis on remonte vers l'amont pour récupérer l'eau de vidange dans les étangs du dessous. Ainsi, seule l'eau contenue dans l'étang situé à l'extrémité aval d'une chaîne est restituée au cours d'eau. Il est difficile d'évaluer avec précision la quantité d'eau que cela représente puisque la quantité d'eau restituée dépend de la surface de l'étang, de son profil (+/- profond), mais aussi de son niveau de remplissage au moment de la vidange (très dépendant des conditions météorologiques de l'année écoulée). De façon très approximative, on peut évaluer à moins de 20% la part du stock d'eau restituée aux cours d'eau au moment des vidanges (sur la base de 7000 hectares, dont 20% sont en assec chaque année, cela représente moins de 8 Mm³ sur les 40 potentiellement stockés).

En ce qui concerne les étangs de loisir, qui ne sont généralement pas conduits de façon piscicole, il n'y a pas de vidange périodique hors travaux exceptionnels d'entretien.

Du point de vue des cours d'eau, ce qui se passe à l'échelle des étangs et de leur bassin d'alimentation exerce donc une influence majeure sur l'hydrologie du territoire, même si le stock total évoqué de 100 Mm³ n'est pas renouvelé tous les ans (du fait des pratiques décrites précédemment). Seul un volume correspondant à la compensation des pertes par évaporation et à celles dues aux vidanges est nécessaire, ce qui représente des volumes d'autant plus importants que l'année (ou la succession d'années) a été déficitaire en pluies. Pour une année telle que 2022, durablement chaude et sèche (Pluie = 550 mm / ETP = 950 mm), une perte de 400 mm à l'échelle de 110 km² de surface d'étangs représente pas moins de 40 Mm³ de stock d'eau à reconstituer !

Il n'existe pas à ce jour de modélisation précise du fonctionnement hydrologique de ce système « étangs » unique en son genre, ni de sa place réelle dans le cycle de l'eau local (favorisant

l'infiltration de l'eau ou l'évaporation de l'eau ?). La perception de ce fonctionnement est fondée sur des savoirs empiriques, principalement détenus par les gestionnaires d'étangs. A souligner que le mode de gestion traditionnel des étangs dombistes doit sa pérennité à un ensemble d'acteurs passionnés et aux efforts entrepris par l'APPED et le Syndicat des Propriétaires d'Etangs pour fédérer la filière et veiller au respect des us et coutumes.

Les observations ci-dessous sont issues des échanges avec l'ISARA et des gestionnaires d'étangs². L'ISARA mène actuellement un travail pointu sur le fonctionnement de ce système atypique en partenariat avec la Communauté de Communes de la Dombes, le Syndicat Mixte Veyre Vivante et le Syndicat des Rivières Dombes Chalaronne Bords de Saône, dans le cadre du suivi du dispositif PSE, programme financé par l'Agence de l'Eau RMC. Les données sont en cours d'acquisition sur 2 chaînes d'étangs (sur Chalamont et Joyeux) et ce travail permettra à terme de mieux comprendre ces phénomènes.

La réalisation d'un système d'information géographique complet à l'échelle des étangs de la Dombes permettrait de suivre dans le temps et de façon globale leur situation hydrologique. Une réflexion est en cours sur la possibilité d'utiliser des images satellites infrarouges et/ou des photos aériennes pour faciliter ce suivi. La mise en place d'un tel outil serait un préalable nécessaire dans l'éventualité d'une modélisation hydrologique de la Dombes.

En période de canicule, la baisse des niveaux d'eau dans les étangs peut être proche de 1 cm par jour. Il est observé un phénomène d'accélération de l'évaporation des étangs, liée aux bordures végétalisées (arbustes, broussailles) lorsque la tranche d'eau devient faible sur ces bordures. On observe le même phénomène sur d'autres zones humides hors territoire de la Dombes, avec un rôle prépondérant de certaines végétations dans l'évaporation, ce qui ne signifie pas, bien au contraire, que la végétation de ceinture doive être supprimée.

Il faut une année correspondant à 1000 mm de précipitations pour avoir de bonnes conditions de remplissage pour les étangs. La situation se complique pour une pluviométrie annuelle située entre 800 et 900 mm de précipitations si l'année précédente a été sèche. Pour des précipitations annuelles en dessous de 600 mm, beaucoup d'étangs ne peuvent plus être empoissonnés.

D'après les observateurs de terrain, il est possible qu'une partie de l'eau puisse s'infiltrer au fond des étangs, bien que ce fond soit clairement argileux (observations de fentes de retrait). Aucune mesure ne permet de confirmer ces observations. La mise en culture périodique des étangs (déstructuration des argiles en fond d'étang) pourrait également participer à une plus

² Ces observations ont été complétées par la visite de l'étang du Vernays à Joyeux en juillet 2022 en compagnie d'un garde pêche privé.

Commenté [MD1]: A quel moment est ce empoissonné ? De quand a quand ils regardent les 600?

Commenté [SG2R1]: Je n'ai pas l'info

forte infiltration de l'eau. L'étude BURGEAP de 1995, à partir de prélèvements isotopiques ponctuels, semble montrer la participation des eaux des étangs (enrichissement en isotope lourd par évaporation) à la recharge des cailloutis de l'ordre de 10 à 25 %. **Ce résultat ponctuel reste à confirmer.**

Dans la suite du travail, dans un souci de précision, l'approche par bilan hydrologique intègre l'évaporation à la surface d'eau libre des étangs (différente de l'évapotranspiration à la surface des sols) pour le calcul de l'infiltration efficace.

4.4 RELATIONS NAPPE/RIVIERES

4.4.1 Localisation des zones d'assecs et de soutien d'étiage

Les relations nappe/rivières sont évaluées à partir de l'ensemble des mesures et observations sur les débits des cours d'eau, des observations des syndicats de rivières, mais aussi à partir des facteurs géologiques et hydrogéologiques (relations potentielles entre les cours d'eau et la nappe des cailloutis).

Lorsque la nappe échange de l'eau avec la rivière, cela se traduit par :

- **Un gain de débit important sur un tronçon du cours d'eau, dans le cas où la rivière draine la nappe.** On observe un débit de base constant dans l'année et un soutien du débit d'étiage du cours d'eau en période de sécheresse, les seuls apports naturels potentiels au cours d'eau proviennent uniquement des eaux souterraines. La réflexion doit tenir compte des apports parasites et tout particulièrement de rejets des stations d'épuration qui peuvent localement influencer ce débit (STEU, voir chapitre suivant)
- **Une perte importante du débit sur un tronçon du cours d'eau, voire un assec total du cours d'eau dans le cas où la rivière alimente la nappe.**

Un travail de synthèse a été réalisé à partir des observations des syndicats de rivière (assecs, soutien du débit d'étiage, températures de l'eau) et de l'exploitation des mesures de débit pour identifier les zones de pertes ou de gains de débit.

La Figure 16 présente la carte des zones d'assecs et des zones de résurgences/soutien du débit d'étiage par les eaux souterraines. Certaines zones du plateau sont mal connues.

On constate globalement des apports de nappe là où les cours d'eau recoupent les zones d'affleurement des cailloutis, c'est-à-dire sur les parties aval des vallées et en périphérie du plateau (Côtère de l'Ain, du Rhône et de la Saône). Les cours d'eau drainent ainsi la nappe de manière +/- marquée selon les secteurs, constituant un soutien d'étiage important pour les milieux aquatique.

Ces soutiens aux débits d'été peuvent être significatifs, parfois de l'ordre de 100 à 300 l/s : le Cottey, la Sereine, le Longevent, le Toison, sur la Côtère Ain et Rhône, le Formans, la Calonne côté val de Saône ainsi que la partie inférieure de la Chalaronne.

Sur les têtes de bassin versant (zone Centre-Sud du plateau), les cours d'eau, qui coulent directement sur les moraines, sont caractérisés par un très faible débit estival, voire des assecs marqués. C'est également le cas pour l'Irance et ses affluents au Nord-Est du plateau (zone de surépaisseur de la moraine) avant sa confluence avec la Veyle ; peu de données sur certaines têtes de bassin versant (Renom, Charonne, Veyle) dans des secteurs d'assecs. En situation de plus hautes eaux, ou dans une situation transitoire (début de pluie après une période sèche, et/ou vidange des étangs) ces cours d'eau peuvent contribuer à réalimenter la nappe, en particulier dans la partie Sud du plateau (zone identifiée de recharge). Le seul cas de perte de débit du cours d'eau observé est celui de la Chalaronne au droit des puits de la Chapelle du Chatelard. Ces pertes de débit seraient liées à l'influence du pompage AEP proche.

Quelques cours d'eau peuvent aussi présenter des assecs fréquents coté val de Saône, comme le ruisseau des Echets (cours d'eau anthropique) lié à l'approfondissement du niveau de la nappe des cailloutis dans la pointe Sud-Ouest de la Dombes.

On note sur la Veyle des singularités, avec des zones très localisées de soutien d'été : à l'aval des sources de Lent, et surtout à la confluence avec l'Irance où des résurgences de nappe de fort débit (> 500 l/s) sont connues dans ce secteur. Une partie de ce flux provient du transfert de flux souterrain du couloir de Certines vers le bassin versant de la Veyle.

Ces zones de résurgence constituent des secteurs à enjeux majeurs parce que ce sont sur ces secteurs que les milieux aquatiques sont les mieux préservés d'une part (apports d'eau fraîche et de bonne qualité), et les plus résilients dans un contexte de changement climatique. Compte tenu des enjeux de la démarche PTGE, les zones de résurgences devront probablement ressortir avec un statut de préservation particulier.

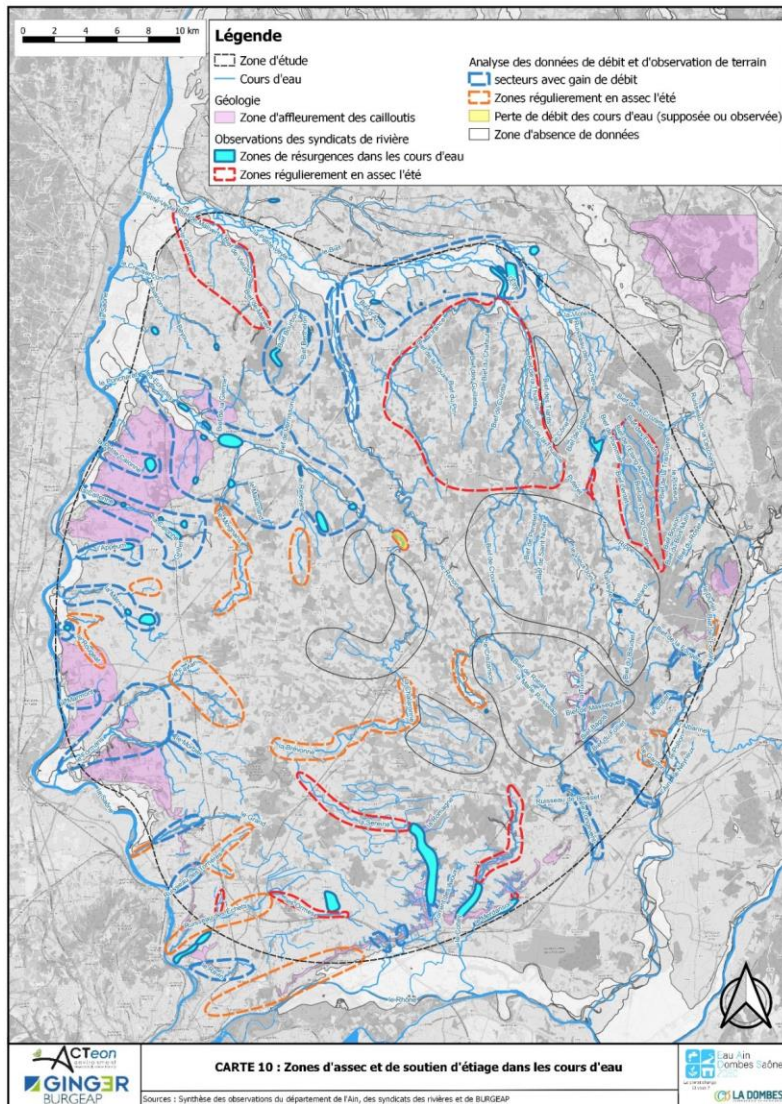


Figure 16 : Zones d'assec et zones de soutien du débit d'été des cours (synthèse des observations des syndicats des gestionnaires de l'eau et données bibliographiques)

4.4.2 Quantification des flux de nappe drainés par la rivière

Les flux de nappe drainés par les rivières sur leurs tronçons inférieurs représentent des volumes cumulés potentiellement importants. Il est essentiel de pouvoir quantifier avec un maximum de précisions ce paramètre pour l'intégrer dans l'analyse globale, qui vise justement à caractériser les mécanismes recharge/décharge de la nappe des cailloutis, et à apprécier le poids des différents types d'export sur son équilibre.

Au même titre que les prélèvements anthropiques, les résurgences naturelles nappe/rivières constituent des volumes d'eau qui sortent du système aquifère, il conviendra donc de les intégrer dans la lecture du bilan hydrologique pour évaluer l'équilibre de la nappe.

Le « débit de fuite » de la nappe vers les cours d'eau peut, dans la configuration du plateau dombiste, être évalué avec une précision relativement bonne :

- Les principales résurgences se situent au niveau de cours d'eau qui prennent leur source sur le plateau ; le débit de ces cours d'eau n'est pas influencé par des apports de débit depuis les territoires voisins. Ainsi, en situation d'étiage sévère ceux-ci ne sont plus alimentés que par les résurgences nappe/rivières. Le reste du temps, les débits d'étiage sont fondus dans le débit total du cours d'eau et donc masqués. **Une mesure du débit des cours d'eau à l'étiage permet ainsi de quantifier les flux nappe/rivière.**
- **Lorsque les résurgences se matérialisent par des sources isolées en côtère, une mesure de débit de ces sources peut facilement être entreprise.**

Les conditions d'observation des débits d'étiage ont été particulièrement bonnes à la fin de l'été 2022 (sécheresse exceptionnelle) et des mesures de débit au niveau des sources/cours d'eau non suivis en continu ont pu être réalisées courant septembre 2022.

Les données issues de l'analyse et/ou de l'estimation des débits d'étiage des cours d'eau (cf. tableaux 1, 2 et 3) sont présentés sur la fugue en page suivante (Figure 17). En première approximation, nous considérerons que ces débits sont stables et réguliers dans le temps.

Au total, le flux de bordure drainé par les rivières est estimé entre 1,5 et 2,2 m³/s, soit entre 47 et 69 Mm³/an ! Ainsi, pour assurer à minima l'équilibre de la nappe (entrées = sorties), il est nécessaire que les conditions météorologiques offrent des conditions de recharge suffisantes pour qu'un volume d'eau équivalent atteigne la nappe³.

³ Nous verrons dans la partie 6.4 portant sur le calcul du bilan hydrologique que les conditions de recharge de ces dernières années n'ont pas été suffisantes pour compenser ces pertes naturelles

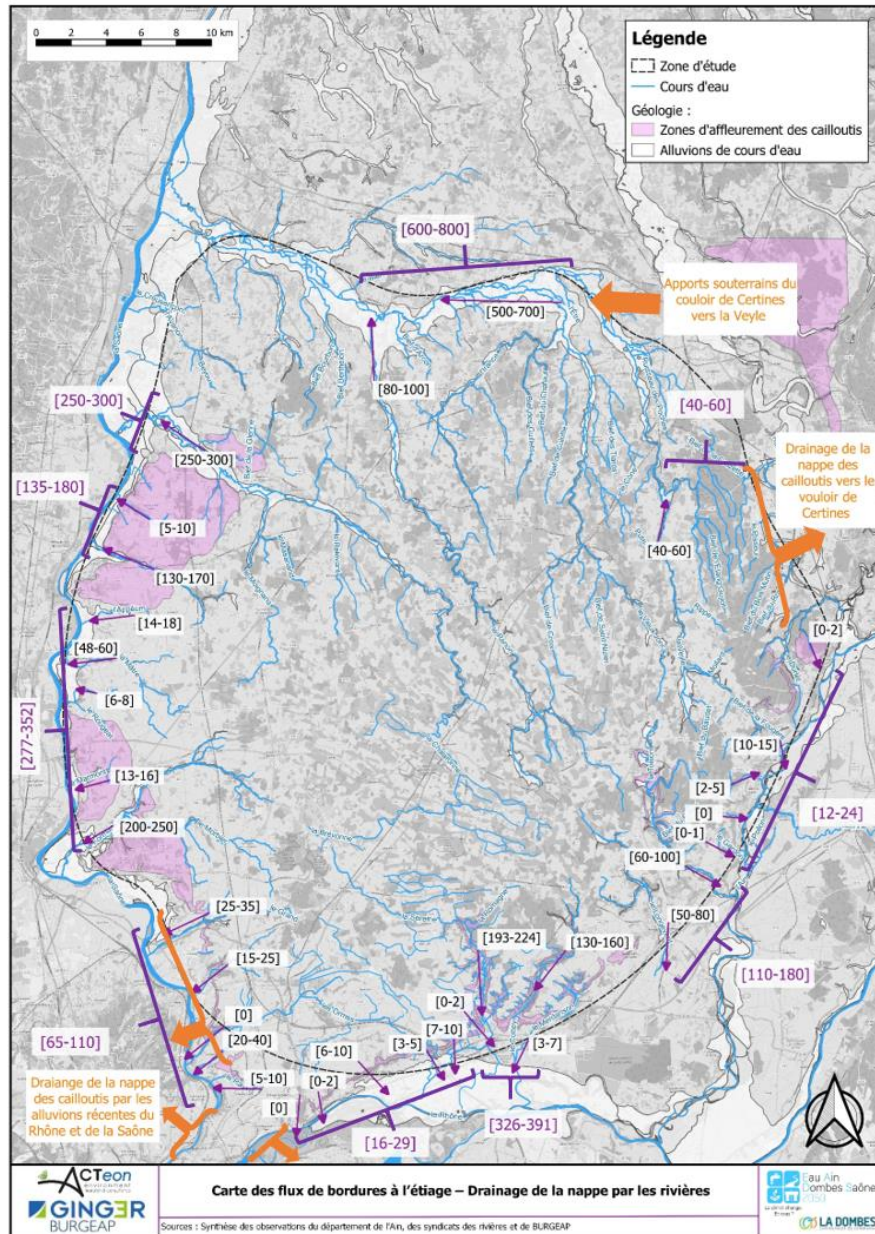


Figure 17 : Flux de bordure à l'étiage, drainés par les cours d'eau en situation d'étiage (en L/s)

Observations (à titre purement informatif) :

- Si on suppose le système à l'équilibre, pour une recharge efficace de l'ordre de 250 mm/an (estimation grossière), la surface de recharge correspondante serait comprise entre 100 et 150 km², ce qui est un ordre de grandeur compatible avec la surface de la zone qui offre à priori les meilleures conditions de recharge dans le contexte hydrogéologique dombiste (dôme piézométrique, nappe libre, moindre épaisseur de la moraine). Cette zone, située en partie Centre-Est du plateau (Figure 18 : Hypothèses de répartition des flux souterrains selon le drainage de nappe par les cours d'eau à l'étiage) pourrait être une zone de recharge préférentielle de la nappe.
- Une partie du flux de sortie se fait par les aquifères en continuité des cailloutis (couloir de Certines, Rhône et Ain), comme une partie du débit drainé par la Veyle provient du couloir de Certines. Ces flux ne sont malheureusement pas quantifiables.
- Si on considère en première approximation que la répartition des flux souterrains au sein de la nappe correspond plus ou moins à la part de débit respectivement drainé par chacun des cours d'eau à l'étiage, cela tend à montrer que les flux se répartissent inégalement depuis la zone supposée de recharge préférentielle, avec une majeure partie de flux qui se dirigerait vers le Nord (bassin versant de la Veyle), tandis que la partie Sud et Sud-Ouest de la nappe bénéficierait d'une moindre alimentation (Figure 18 : Hypothèses de répartition des flux souterrains selon le drainage de nappe par les cours d'eau à l'étiage).

Ces observations doivent être considérées avec prudence tant qu'elles ne peuvent pas être corroborées par une étude hydrogéologique complémentaire (piézométrie, variabilité de la perméabilité des cailloutis).

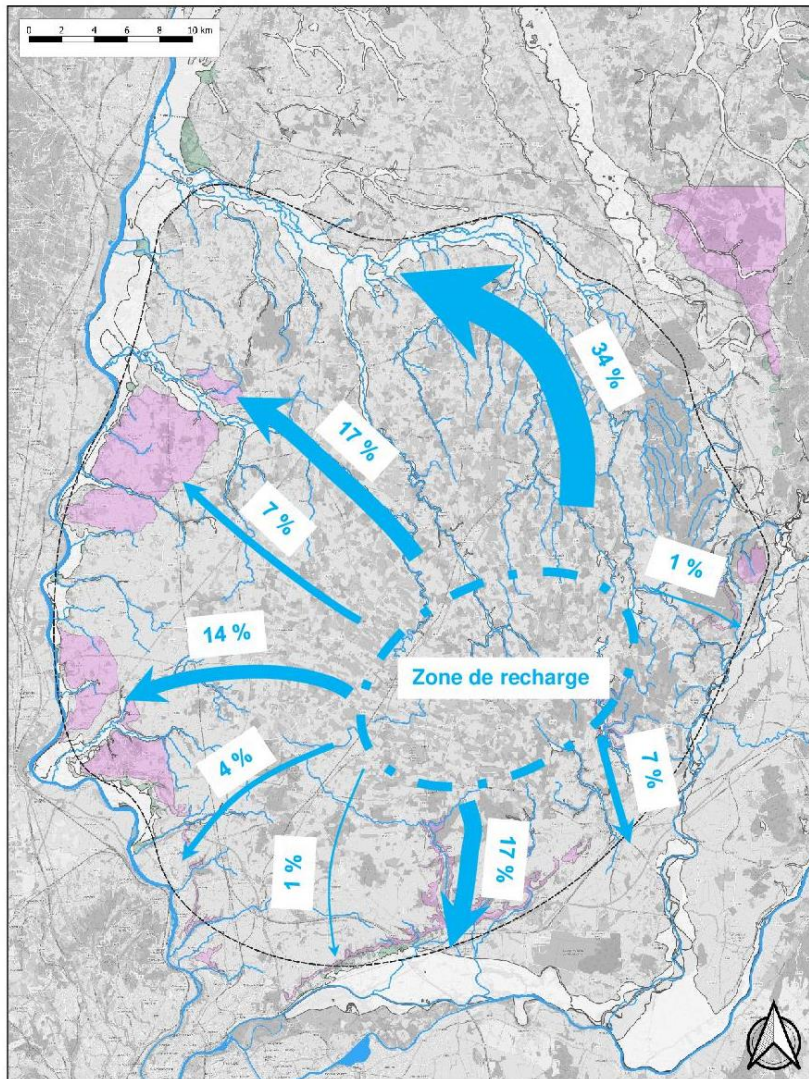


Figure 18 : Hypothèses de répartition des flux souterrains selon le drainage de nappe par les cours d'eau à l'étiage

4.5 INFLUENCE DES STATIONS D'EPURATION

Les rejets de STEU (Stations de Traitement des Eaux Usées) influencent artificiellement le débit des cours d'eau. Les données sont issues du portail national pour l'assainissement collectif (www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr). Les données ont été traitées sur les cours d'eau de la zone d'étude avec :

Les débits entrants dans chaque station pour l'année 2020 (

- Figure 19)
- La typologie des stations et leur dimensionnement théorique (
- Figure 20)

Ces valeurs seront utilisées pour corriger, dans le bilan hydrologique, les débits des rivières (cf chapitre 6.4). Le débit cumulé entrant des STEU de la zone d'étude représente, en 2020, 128 l/s, soit 5,4 Mm³/an.

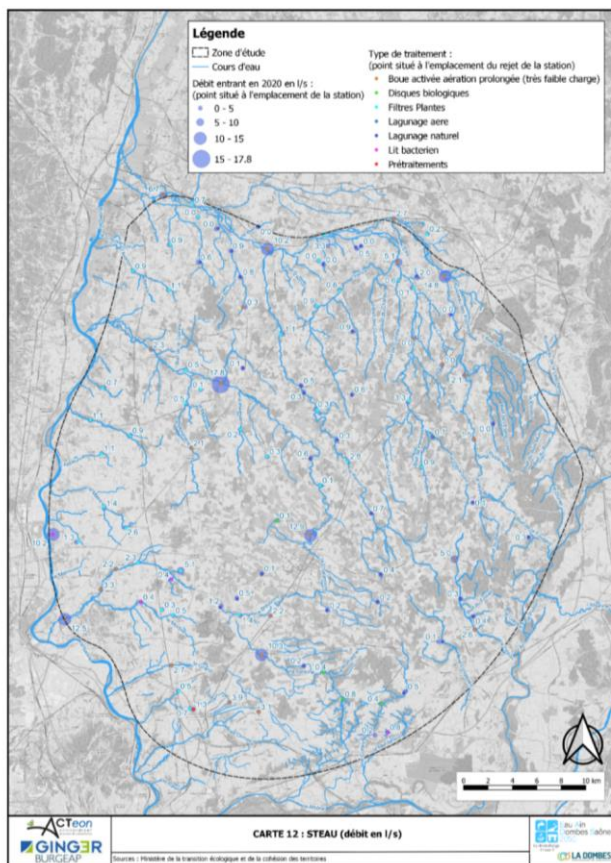


Figure 19 : Débits entrants des STEU

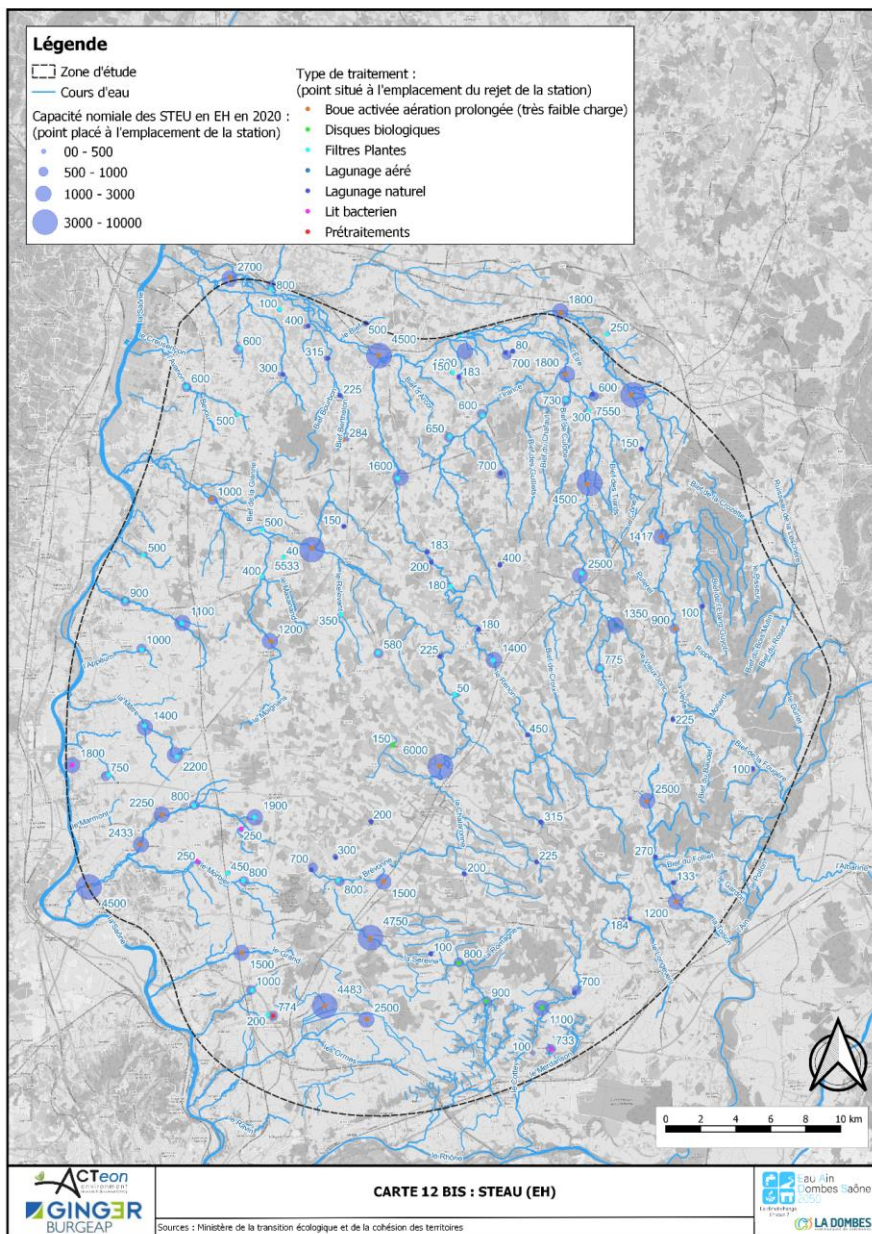


Figure 20 : Typologie des STEU et de leur capacité théorique (en EH, équivalent habitant)

5. CLIMATOLOGIE

5.1 APPROCHE METHODOLOGIQUE

Cette partie de l'analyse porte sur le climat de la Dombes, en particulier sur les paramètres précipitations, températures et évapotranspiration qui influencent le plus le cycle de l'eau.

Cette analyse est conduite selon deux approches méthodologiques :

- Analyse des données climatiques sur l'ensemble du territoire à pas mensuel à partir de stations météorologiques existantes sur le plateau, ou sur les territoires limitrophes (stations METEO France).
- Modélisation climatique fine sur l'ensemble du plateau réalisée par la société WEEANAT sur la période 2012-2021. Ces données sont exploitées pour les bilans de flux par sous-bassins-versants (Chapitre 6.3) pour bien cerner la répartition des pluies sur le plateau et intégrer dans le bilan ces disparités locales.

5.2 DONNEES CLIMATIQUES EXPLOITABLES

Les stations météorologiques disposant de chroniques longues sont peu nombreuses sur le plateau dombiste. La seule station METEO France exploitée se situe sur la commune de Marlieux ; elle offre un historique depuis 1992.

Le réseau METEO France est complété par la station de Villefranche sur Saône à l'Ouest (1992), Macon au Nord-Ouest (1976), Ceyzeriat au Nord-Est (1995), Ambérieu-en-Bugey à l'Est (1992) et Lyon Sud-Exupéry au Sud (1976). Les données sont exploitables et comparables sur une période commune de 26 ans (1995-2021).

De nouvelles stations météo se mettent en route progressivement hors réseau METEO France et viennent enrichir les jeux de données disponibles. Citons par exemple celle du réseau associatif Info Climat (Saint-André-de-Corcy, Trevoux, Bressoles, Buellas, Priay, Pont d'Ain), celles mises en place par l'ISARA dans le cadre de leur suivi des étangs de la Dombes (Ambérieu en Dombes, Chalamont, Condeissiat, Joyeux et St Paul de Varax), ou celles de collectivités (CC Dombes, etc ...).

Compte tenu des disparités qui peuvent être fortes en matière de pluviométrie, même sur de courtes distances, plus il y a de points de mesure, mieux c'est.

5.3 CLIMATOLOGIE DE LA DOMBES

5.3.1 Pluviométrie

REPARTITION DES PLUIES

Sur la période exploitable 1995-2021 (26 années), on observe un gradient pluviométrique d'Ouest en Est, entre le val de Saône (784 mm/an à Villefranche), le centre du plateau (892 mm/an à Villefranche), le centre du plateau (892 mm/an à Marlieux), et le pied du relief jurassien (1043 mm/an à Ceyzeriat, 1115 mm/an à Ambérieu-en-Bugey).

Le travail de reconstitution réalisé sur les 10 dernières années (2012-2021) par la société WEENAT à partir de données satellites confirme ce gradient pluviométrique d'Ouest en Est et permet d'en affiner les contours. On observe ainsi une extension de la zone de plus forte pluviométrie sur la partie Sud du plateau.

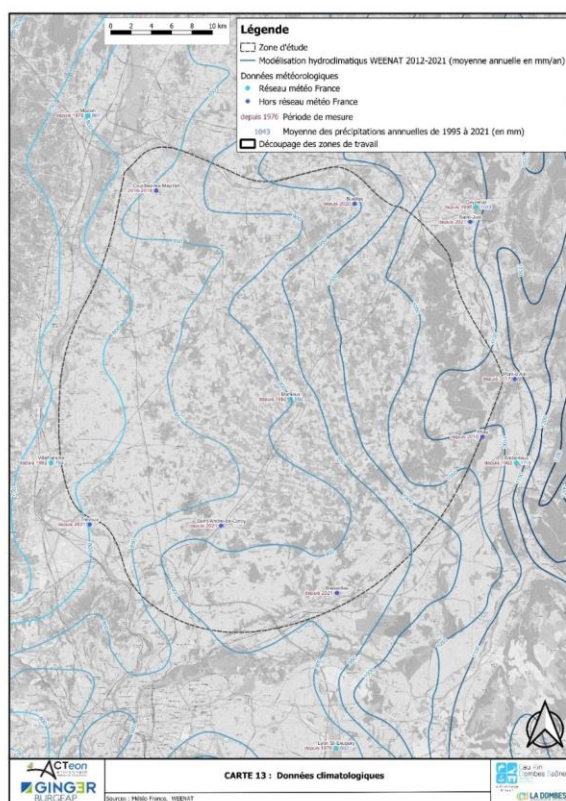


Figure 21 : Répartition des pluies sur le plateau de la Dombes

EVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE

L'évolution des précipitations sur les 6 stations météorologiques montre une légère évolution à la baisse des cumuls moyens annuels, mais cela reste relativement ténue (0,5 à 1% de baisse), à l'exception de Lyon où cette baisse est un peu plus marquée (3 % de baisse).

Tableau 4. Evolution de la pluviométrie (données METEO FRANCE, traitement BURGEAP)

Station	Période d'observation	Tendance moyenne observée sur les cumuls de précipitations annuelles
Lyon Saint Exupéry	1976-2021	- 21,5 mm sur 46 ans
Marlieux	1992-2021	- 9,1 mm sur 30 ans
Ceyzériat	1995-2021	- 4,6 mm sur 27 ans
Ambérieu	1992-2021	- 4,6 mm sur 30 ans
Macon	1976-2021	- 4,4 mm sur 46 ans
Villefranche	1992-2021	- 1,5 mm sur 30 ans

INDICES CLIMATOLOGIQUES ET CYCLES PLUVIOMETRIQUES

Les indices climatologiques servent à mettre en évidence des variations ou des ruptures dans les séries temporelles, ici les cumuls pluviométriques. Deux principaux indices sont utilisés :

- L'indice de NICHOLSON (Figure 22), qui est une variable centrée et réduite, permettant de suivre les fluctuations des régimes pluviométriques ;
- Le filtre de HANNING (Figure 23), qui permet une meilleure lecture des variations interannuelles, en éliminant les variations saisonnières, via une pondération des cumuls pluviométriques ;

On distingue dans les graphiques les chroniques longues (Mâcon et Lyon, 1976-2021) des chroniques plus courtes (Marlieux, Ambérieu et Villefranche, 1992-2021). La chronique de Ceyzériat (1995-2021) n'a pas été représentée pour faciliter la lecture des graphiques.

Pour les **chroniques longues**, les périodes de rupture sont assez marquées avec :

- Entre 1976 et 1983, un cycle d'années humides à Lyon-Saint-Exupéry, et un cycle d'années sèches sur Mâcon
- Entre 1984 et 1989, un cycle d'années sèches pour les 2 stations
- Une longue période entre 1990 et 2000, cycle d'années très humides pour les 2 stations

- Une longue période entre 2001 et 2021, sur un cycle d'années sèches pour les 2 stations, exceptées les années 2012 à 2014

Pour **les chroniques plus courtes**, les périodes de rupture sont plus resserrées sur la chronique d'observation avec :

- Entre 1992 et 1994, un cycle d'années humides à très humides pour les 3 stations ;
- Entre 1985 et 1998, un cycle d'années sèches pour les 3 stations ;
- Entre 1999 et 2001, un cycle d'années humides pour les 3 stations ;
- Entre 2002 et 2005, un cycle d'années sèches pour les 3 stations ;
- Entre 2006 et 2008, un cycle d'années humides pour les 3 stations ;
- Entre 2009 et 2011, un cycle d'années sèches pour les 3 stations (excepté Villefranche en 2009, plus humide) ;
- Entre 2012 et 2014, un cycle d'années humides assez marqué pour les 3 stations (similaire aux cycles sur Lyon et Macon) ;
- Entre 2009 et 2011, un cycle d'années sèches pour les 3 stations (excepté Villefranche en 2009, plus humide) ;
- Entre 2015 et 2021, un cycle plus long d'années sèches pour les 3 stations (excepté Ambérieu en 2021, plus humide) ;

La station de Ceyzeriat se comporte sensiblement comme les stations de Marlieux, Ambérieu en Bugey et Villefranche, mais avec des anomalies certaines années plus humides : 1995-1998, 2009-2001 et 2018.

La durée de la chronique joue sur le traitement statistique des données, ce qui rend plus difficile la comparaison des chroniques entre elles. Il est possible qu'une partie des cycles plus longs des chroniques de Lyon et Mâcon puisse se retrouver sur les chroniques de Marlieux, Ambérieu et Villefranche si les chroniques de suivi avaient existé sur la même période (1976-2021).

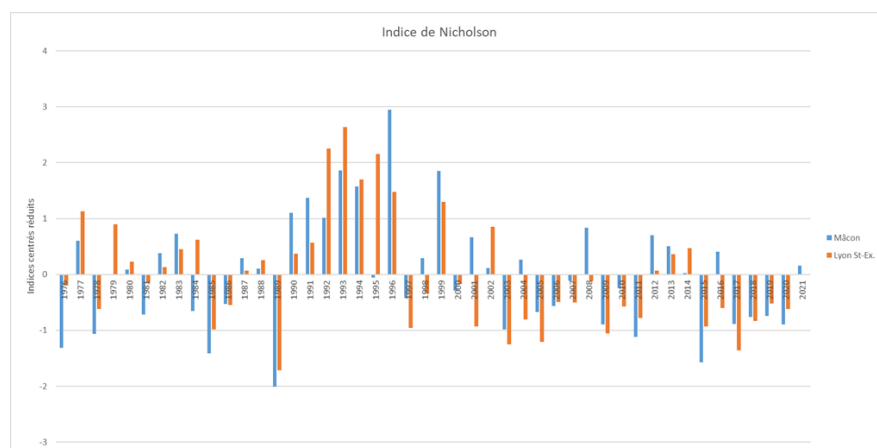
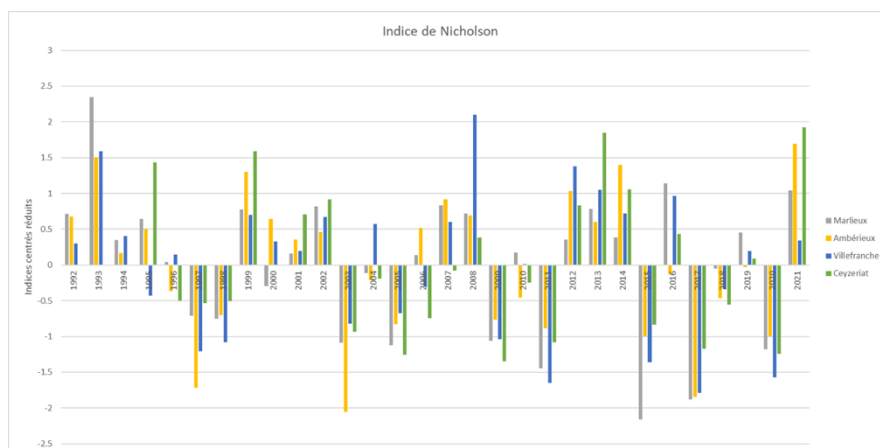


Figure 22 : Indice de Nicholson (indices centrés réduits) sur les données pluviométriques annuelles (données METEO France, traitement BURGEAP)

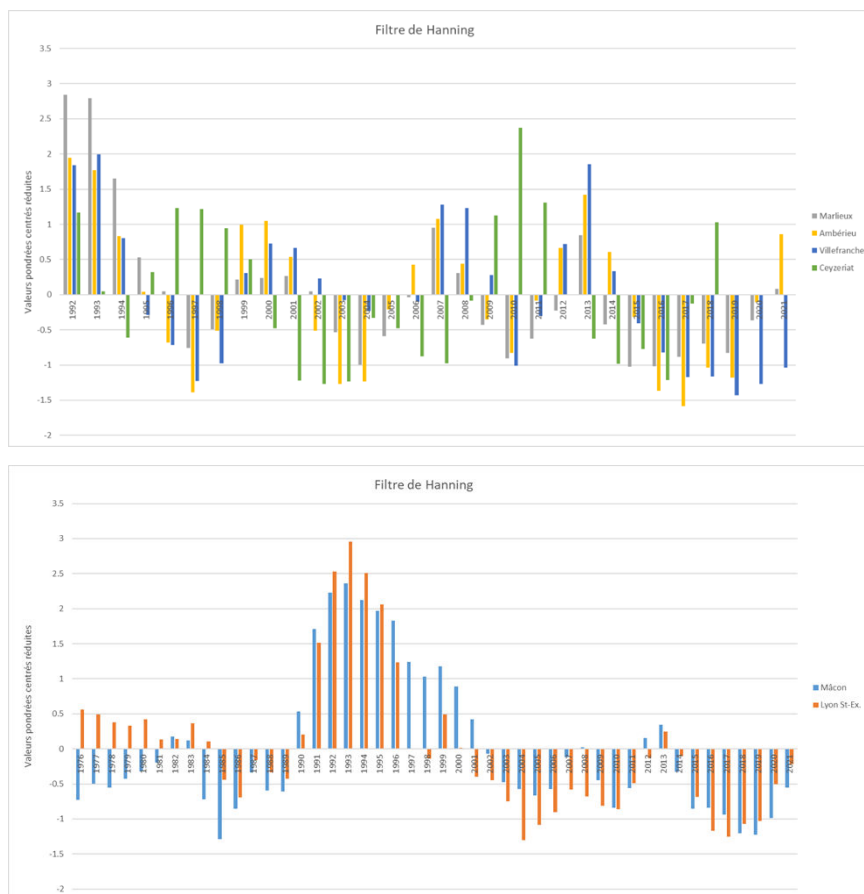


Figure 23 : Filtre de Hanning (indices pondérées centrés réduits) sur les données pluviométriques annuelles

5.3.2 Températures

L'évolution des températures sur les 6 stations météorologiques montre une tendance générale très nettement à la hausse, avec une augmentation des températures de l'ordre de 1,2 °C sur 30 années, et 2,5 °C sur une période plus longue de 46 ans pour Lyon et Mâcon.

Tableau 5. Evolution de la température (données METEO FRANCE, traitement BURGEAP)

Station	Période d'observation	Tendance observée pour les températures
Lyon Saint Exupéry	1976-2021	+ 2,44 °C en 46 ans
Marlieux	1992-2021	+ 1,21 °C en 30 ans
Ceyzériat	1995-2021	+ 1,18 °C en 27 ans
Ambérieu	1992-2021	+ 1,25 °C en 30 ans
Mâcon	1976-2021	+ 2,49 °C en 46 ans
Villefranche	1992-2021	+ 1,30 °C en 30 ans

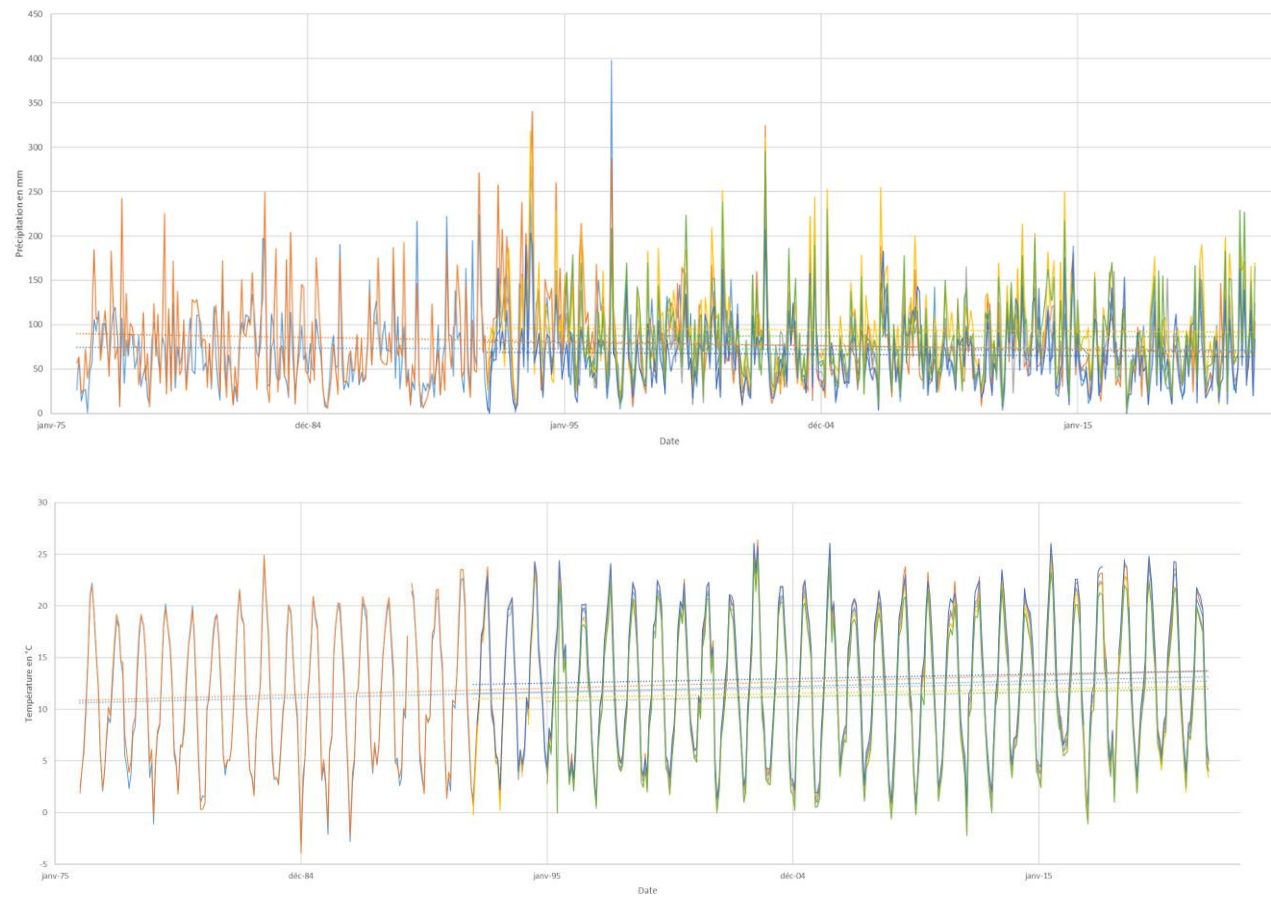


Figure 24 : Evolution des précipitations et des températures mensuelles (données METEO France, traitement BURGEAP)

5.3.3 Evapotranspiration

Le graphique ci-après présente l'évolution de l'évapotranspiration potentielle sur les stations de Lyon-Bron et de Mâcon. Sur 30 ans, on observe une augmentation linéaire de l'ETP en tendance moyenne, en lien avec l'augmentation des températures. L'augmentation de l'ETP est de +39 mm/an sur 10 ans à Lyon et de + 48 mm sur 10 ans à Mâcon. Cette gamme de valeur est conforme à la tendance observée en Auvergne-Rhône-Alpes.

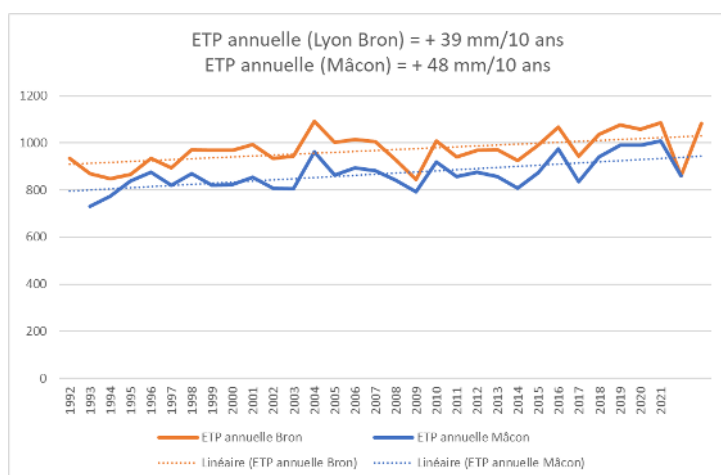


Figure 25 : Evolution de l'ETP annuelle à Lyon et à Mâcon)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est une valeur théorique. Il s'agit de la quantité maximale d'eau susceptible d'être évaporée par évapotranspiration sous un climat donné par un couvert végétal continu bien alimenté en eau. Elle comprend donc l'évaporation du sol/substrat et la transpiration de la végétation d'une région donnée pendant le temps considéré.

5.3.4 Précipitations efficaces

APPROCHE GLOBALE

Les précipitations efficaces correspondent à la part de précipitations brutes disponible pour le ruissellement où l'infiltration vers les nappes après déduction de l'évapotranspiration. Si les précipitations brutes sont facilement mesurables, l'évapotranspiration est un paramètre qui reste difficile à évaluer avec précision. En effet, l'évapotranspiration dépend à la fois du remplissage de l'évapotranspiration potentielle ETP (qui dépend des paramètres climatiques

et du type de couvert végétal), mais aussi de la réserve eau des sols (RFU, Réserve Facilement Utilisable par les plantes).

Une première approche permet d'apprécier les précipitations efficaces à partir de la Formule de Turc (Annexe 2) à pas annuel. La Formule de Turc est une formule empirique qui ne dépend que des variables de cumuls des précipitations annuelles et des températures moyennes annuelles de la station considérée (pas de paramétrage pour le paramètre de la réserve en eau des sols). Elle tend à surestimer l'évaluation des précipitations efficaces. Elle donne cependant un premier ordre de grandeur de la variabilité des précipitations efficaces entre années sur la période homogène d'observation (1995-2021, Tableau 6). Les graphiques de l'Annexe 3 permettent de visualiser l'évolution des précipitations brutes et efficaces sur chaque station sur les périodes de suivi.

En moyenne, avec cette première approche empirique, environ 1/3 des précipitations sont efficaces sur le territoire. Ce chiffre est un peu plus élevé pour les stations en pied du relief jurassien et un peu plus faibles dans le Val de Saône. Cela s'explique par des précipitations plus fortes en pied du relief jurassien tandis que l'évapotranspiration est une variable régionale qui change peu d'une station à l'autre.

Tableau 6. Précipitations efficaces moyennes sur les stations météorologiques de suivi pour la période 1995-2021 à partir de la Formule de Turc (données METEO France, traitement BURGEAP)

Station de mesure	Précipitations moyennes P (mm)	Précipitations efficaces Peff (mm)	Rapport P/Peff
Lyon Saint Exupéry	883	321	36 %
Macon	861	313	36 %
Ceyzériat	1043	483	46 %
Ambérieu	1115	536	48 %
Marlieux	892	339	38 %
Villefranche	784	240	31 %

DETAIL POUR LA STATION DE MARLIEUX

Une analyse plus fine est réalisée sur la station météorologique de Marlieux, seule station disponible sur le plateau de la Dombes. Les précipitations efficaces sont calculées à pas mensuel à partir de la méthode du bilan de flux de Thornthwaite en considérant le remplissage de la RFU des sols (réserve facilement utilisable par les plantes). On prend en première approche une RFU de 100 mm, approche conventionnelle pour ce type de calcul. L'ETP utilisée est celle de la station de Lyon-Bron à pas mensuel.

La Figure 26 présente une synthèse des cumuls de précipitations efficaces à pas annuel. La Figure 27 présente les écarts à la moyenne pour mieux visualiser les périodes excédentaires ou déficitaires.

Sur la période d'observation (1992-2021), les précipitations efficaces sont en moyenne de 200 mm/an, soit environ 22 % de la pluie brute. **Ce chiffre est nettement plus faible que celui donné par la formule empirique de Turc.**

Si on regarde sur la dernière période de sécheresse, qui correspond à la période entre 2015 et 2022, laquelle fait suite à une période pluvieuse de bonne recharge (2013-2014), **on enregistre sur 8 années un déficit pluviométrique de 588 mm, soit plus d'une demi-année de pluie brute et un déficit de pluies efficaces de 378 mm, soit presque 2 années de déficit de recharge en 8 ans.**

Un test de sensibilité sur la RFU montre, sur la période de calcul, des précipitations efficaces moyennes de 252 mm pour une RFU de 50 mm (sol graveleux et filtrant), et de 155 mm pour une RFU de 150 mm (sol très argileux). **Une approche plus fine à partir des données climatiques modélisées et spatialisées sur le plateau sur 10 ans, mais aussi une spatialisation des données de RFU du plateau est proposée dans l'estimation de la recharge par bilan hydrologique au chapitre 6.4.**

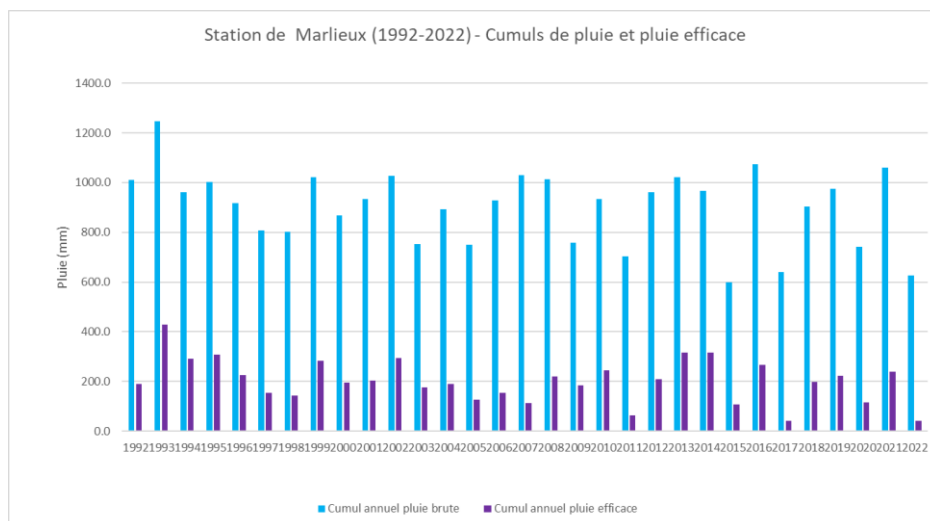


Figure 26 : Précipitations efficaces évaluées à la station de Marlieux pour une RFU de 100 mm à partir de la méthode du bilan de flux de Thornthwaite à pas mensuel (données METEO France, traitement BURGEAP)

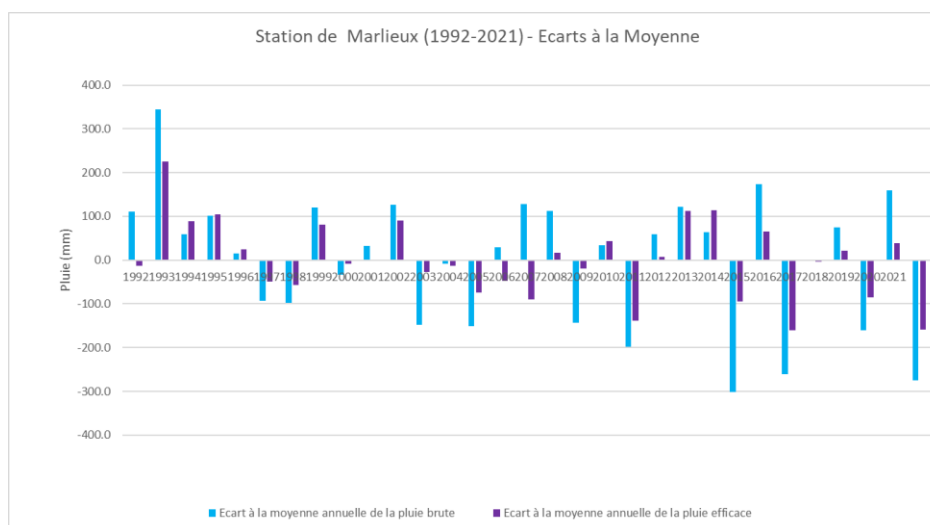


Figure 27 : Ecart à la moyenne des précipitations (données METEO France, traitement BURGEAP)

6. EVALUATION DE LA RECHARGE DE LA NAPPE PAR BILAN HYDROLOGIQUE

6.1 EVOLUTION DE LA RESSOURCE – ANALYSE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

6.1.1 Piézomètres de suivi et fiabilité des mesures

Comme rappelé précédemment, le niveau de la nappe des cailloutis de la Dombes est suivi historiquement par le biais de 4 ouvrages de référence (Figure 288). Neuf autres piézomètres viennent désormais compléter ce réseau de suivi (cf. partie 2.2) mais les chroniques ne sont pas assez anciennes pour étayer l'analyse qui suit. L'analyse ne peut être conduite pour l'instant que sur la base des 4 piézomètres historiques suivants :

- Le piézomètre de Villeneuve à l'Ouest du plateau (BSS001SBPB / 06742X0001/VILLEN), suivi en continu depuis janvier 2004 ;
- Le piézomètre de Villars-les-Dombes, au Centre du plateau (BSS001SBSW / 06744X0025/PZ), suivi en continu depuis octobre 2002 ;
- Le piézomètre de Saint-Remy au Nord-Est du plateau (BSS001REWW / 06512X0037/STREMY), suivi en continu depuis octobre 1977 ;
- Un ancien puits agricole à Tramoyes au Sud-Ouest du plateau, suivi manuellement depuis juin 2003 par l'ASIA.

Les coupes lithologiques et techniques sont présentées en Figure 299. Les 4 ouvrages sont crépinés dans l'aquifère des cailloutis. Les données des coupes lithologiques d'autres forages proches permettent de confirmer la coupe lithologique et la position de l'interface moraines/cailloutis.

Les piézomètres de Villeneuve et Tramoyes sont en nappe libre. Le piézomètre de Villars est en nappe libre, en limite de captivité. Ces 3 ouvrages présentent une transition moraine / cailloutis pas toujours franche, avec la présence de lentilles graveleuses dans la moraine. Le piézomètre de Saint-Rémy est en nappe captive avec une transition franche entre moraine et cailloutis.

Le comportement atypique du piézomètre de Villeneuve depuis 2015, en comparaison des piézomètres de Villars et de Saint-Rémy, interroge sur sa fiabilité et/ou sa représentativité. Une vérification a été faite auprès du BRGM en charge du relevé des sondes piézométriques sur ce piézomètre. L'ouvrage est utilisé par un particulier, mais l'influence sur la piézométrie est mineure du fait du très faible débit prélevé (alimentation d'une pompe à chaleur). Le piézomètre est ensablé à sa base, mais sans remettre en cause le transfert de pression dans la nappe des cailloutis. Le suivi piézométrique reste fiable et représentatif de la nappe de

cailloutis autour du piézomètre Villeneuve. Le piézomètre de Tramoyes présente un comportement similaire à celui de Villeneuve, confirmant la fiabilité du suivi sur Villeneuve.

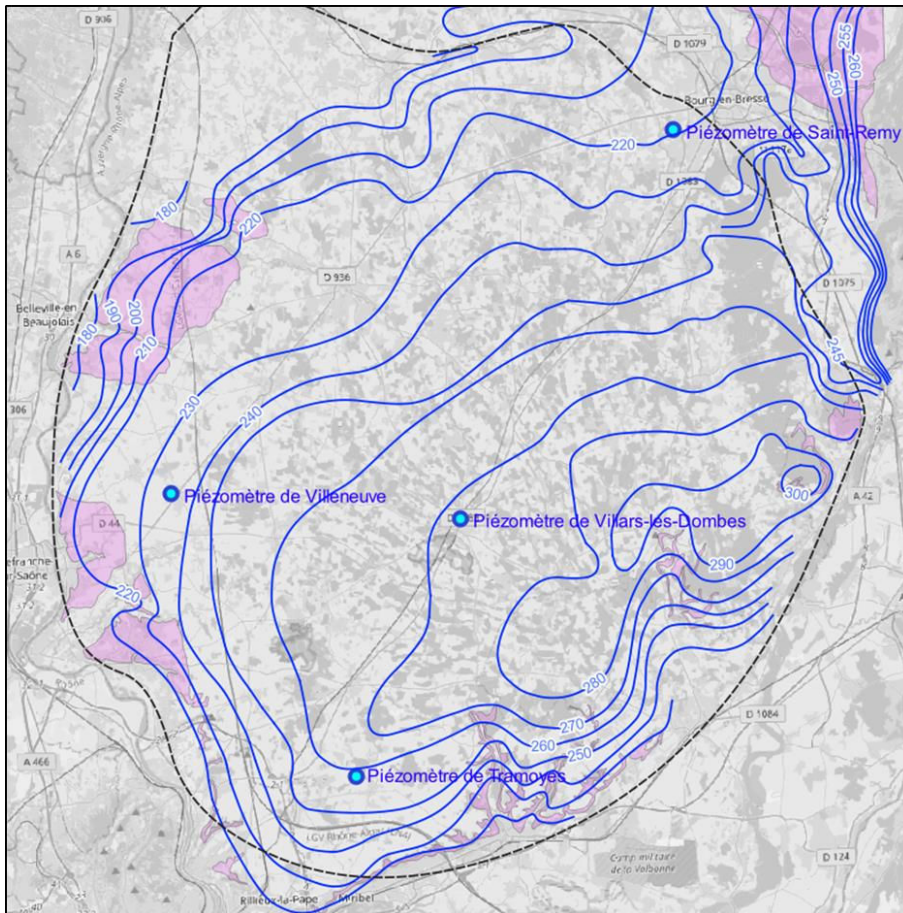


Figure 28 : Position des 4 piézomètres de suivi sur l'esquisse piézométrique de 1995 (BURGEAP)

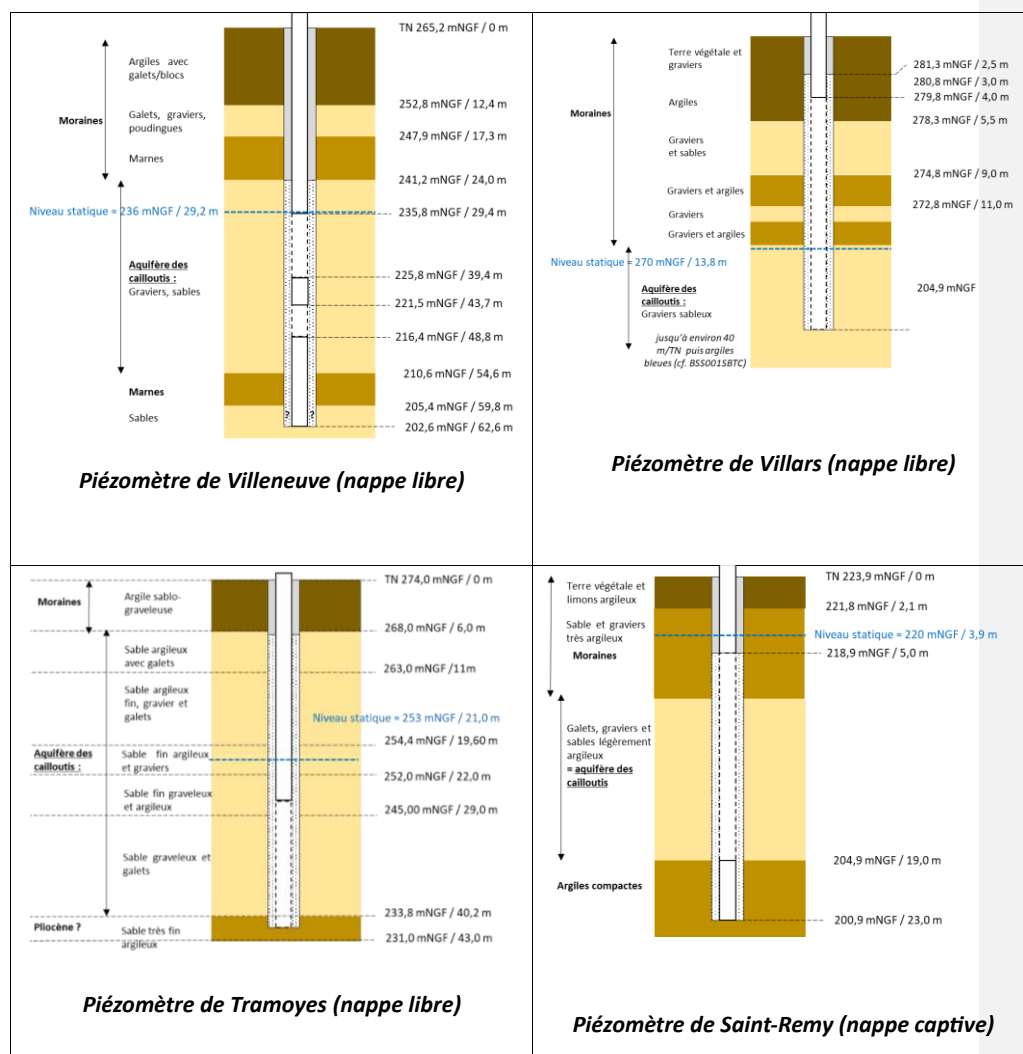


Figure 29 : Coupes géologiques et techniques des piézomètres de suivi

6.1.2 Evolution de la piézométrie

La Figure 30 présente l'évolution de la piézométrie sur les 4 ouvrages de suivi sur la nappe des cailloutis. Pour faciliter la lecture et la comparaison des données entre elles, les chroniques ont été recalées en altitude (début de la période commune de suivi) sur le piézomètre de Villars à partir de 2003.

On peut observer deux cycles de variation :

- Sur les piézomètres de Villars et de Saint Remy, des cycles annuels de hautes et basses eaux correspondant aux périodes de recharge hivernale et de décharge estivale, corrélés aux précipitations efficaces (données mensuelles de la station de Marlieux, pour une RFU de 100 mm). L'amplitude de ces fluctuations sont marquées sur Villars (2 m de fluctuations sur un cycle annuel entre hautes et basses eaux). L'amplitude est plus faible à Saint-Rémy (0,5 à 1 m). Ces cycles sont également observés sur les piézomètres de Villeneuve et de Tramoyes, mais pas chaque année et/ou avec des amplitudes très atténuées. Les cycles annuels sont absents en 2007-2008, 2010- 2011, et après 2015 sur Villeneuve et Tramoyes.
- Sur l'ensemble des piézomètres, des cycles pluriannuels de fluctuations piézométriques de plus grande amplitude, avec :
 - o Une période de croissance entre 2004 et 2009 ;
 - o Une période de décroissance entre 2009 et 2012 ;
 - o Une période de croissance entre 2013 et 2015 ;
 - o Une période de décroissance très marquée en amplitude entre 2015 et 2022 sur les piézomètres de Villeneuve et de Tramoyes ;
 - o Un cycle de remontée amorcé fin 2022, mais qui semble s'interrompre sur la fin 2022.

On note également un décalage temporel important entre les cycles des précipitations efficaces, et la remontée du niveau piézométrique par exemple lors de l'année 2022 de sécheresse marquée, qui succède à une année 2021 excédentaire. Le cycle de remontée ne s'amorce qu'au deuxième semestre 2022 pour Villeneuve et Tramoyes, en décalage de 6 mois environ avec la recharge mesurée au droit des piézomètres de Villars et St Rémy, corrélée au pic hivernal de la recharge.

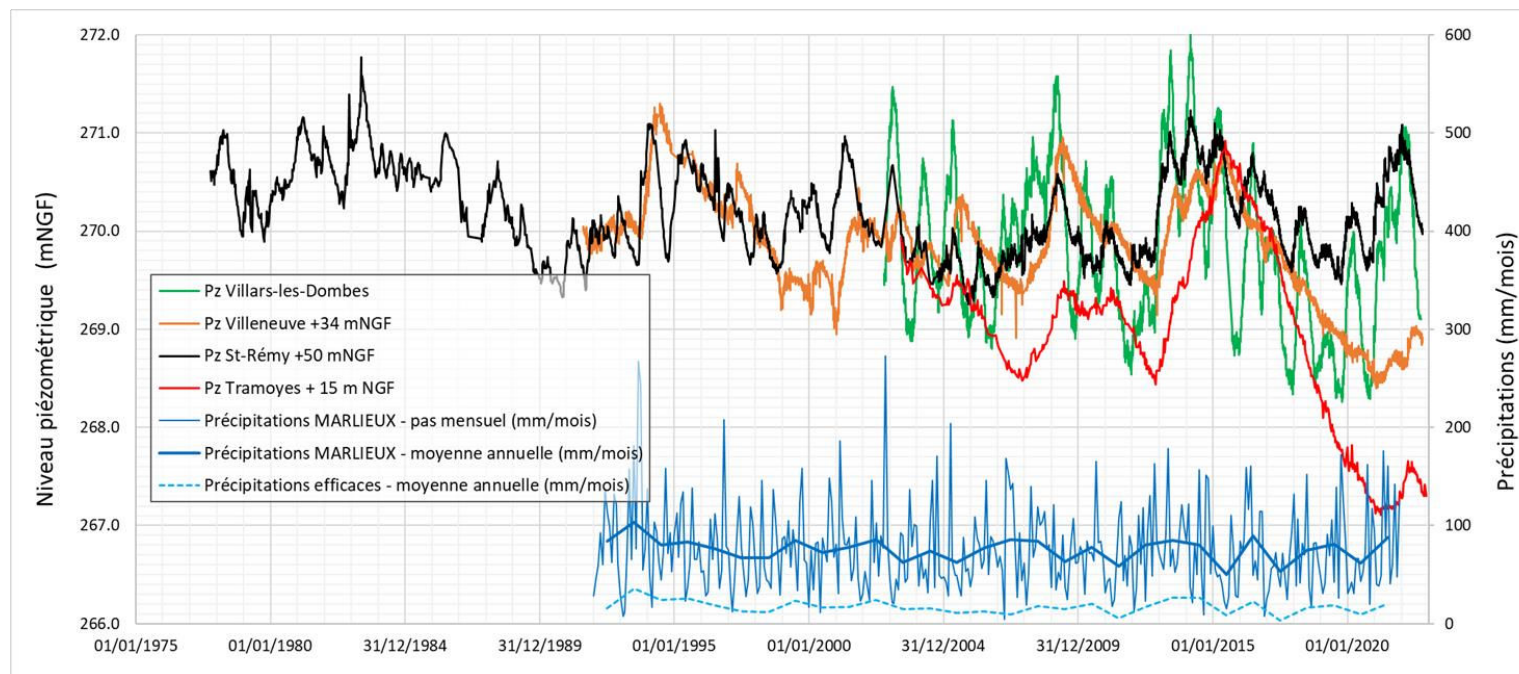


Figure 30 : Evolution de la piézométrie

6.2 APPROCHE PAR CALAGE D'UN MODELE PLUIE/NIVEAU DE NAPPE

6.2.1 Méthodologie

L'objectif de cette approche est de vérifier, par un premier calage, le comportement des piézomètres à l'aide d'un outil prospectif de reconstitution de chroniques piézométriques. La grande majorité de ces outils sont des modèles dits en « boîte noire », c'est-à-dire qu'ils modélisent le signal de sortie (une chronique piézométrique) à partir d'un signal d'entrée (une chronique de pluie efficaces) à partir d'une formule mathématique non rattachée à des paramètres physiques de l'aquifère.

Nous utilisons ici le logiciel GARDENIA développé par le BRGM, qui est un modèle semi-boîte noire, qui peut se rattacher à un certain nombre de paramètres physiques simplifiés de l'aquifère.

Dans un premier temps, cette approche sert à vérifier des différences de comportement entre piézomètres, et d'appréhender les paramètres qui permettent de caler au mieux les chroniques piézométriques (signal de sortie) à partir des données de pluie (signal d'entrée). Dans un second temps, cet outil servira à faire des projections d'évolution possible de la piézométrie pour différentes conditions climatiques (Phase 2 de l'étude).

Nous utilisons les chroniques piézométriques à pas mensuel pour les piézomètres de Villeneuve, Villars les Dombes et Saint-Rémy, et les données de pluie brute et de température mensuelle de la station de Marlieux (le calcul de pluies efficaces est géré directement par le logiciel).

GARDÉNIA (Modèle Global À Réservoirs pour la simulation de DÉbits et de Niveaux Aquifères) permet de calculer, à partir de la séquence des données météorologiques (précipitations, évapotranspiration potentielle) sur son bassin d'alimentation :

- Le débit à l'exutoire d'un cours d'eau (ou d'une source) ;
- Et / ou le niveau piézométrique en un point de la nappe libre sous-jacente.

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs. Les paramètres de calage sont les suivants :

Les paramètres de calage sont les suivants :

- Coeff_emmag : coefficient d'emménagement équivalent (ou apparent) ;
- Rsup_Progr : capacité du réservoir sol progressif (« comparable » à la RFUmax)

- Rui_Perco : hauteur d'eau dans le réservoir H (ZNS) pour laquelle la percolation et l'écoulement rapide sont égaux ;
- T1/2_Perco : temps caractérisant la vitesse de réaction entre une pluie efficace et un accroissement de la composante lente du débit ;
- T1/2_Taris : temps de ½ tarissement de l'écoulement lent depuis le réservoir G1, temps au bout duquel en l'absence de percolation le débit est divisé par 2.

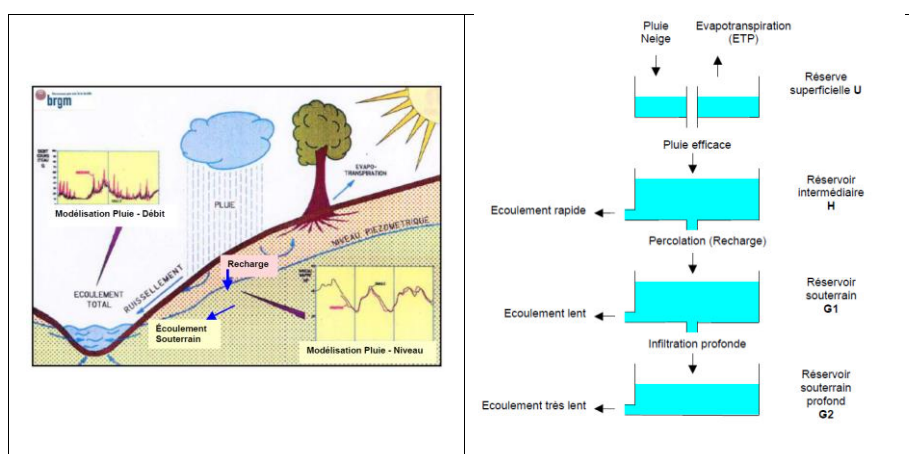


Figure 31 : Schématisation du fonctionnement du logiciel GARDENIA

6.2.2 Résultats des simulations

Le tableau ci-dessous présentent les paramètres de calage : les paramètres de base proposés par GARDENIA, et les paramètres issus de l'essai de calage, ainsi que le coefficient de corrélation R.

Tableau 6. Résultats des paramètres de calage sous GARDENIA

		Coef_Emmag	Rsup_Progr	Rui_Perco	T1/2_Perco	T1/2_Taris1
	R_global	%	mm	mm	mois	mois
Base	-	3.0	50	70	3.0	6.0
St-Rémy	0.74	6.5	113	59	2.6	6.4
Villars-les-Dombes	0.93	0.2	312	3	8.1	4.2
Villeneuve	0.81	3.3	426	56	10.0	10.2

Le meilleur calage est obtenu pour le piézomètre de Villars les Dombes (Figure 32) avec un $R=0,93$. Le calage reproduit bien la chronique piézométrique sur la période d'observation (2003-2021), à la fois sur les cycles annuels et sur les cycles pluriannuels.

Le calage pour le piézomètre de Villeneuve est un peu moins bon ($R = 0,81$). Le calage reproduit assez bien la piézométrie sur la plupart des périodes hautes eaux, mais assez mal sur les périodes de basses eaux en particulier la baisse piézométrique entre 2015 et 2021, qui est sous-estimée. Les cycles pluriannuels sont assez bien représentés.

Le calage pour le piézomètre de Villeneuve ($R = 0,74$) reproduit difficilement certains cycles, même si le calage global reste satisfaisant. Le calage en fin de période (2021) est sous-estimé.

Les paramètres de calage sont assez hétérogènes d'un piézomètre à l'autre et traduisent un comportement différent :

- Le coefficient d'emménagement est faible sur Villars et plus fort Saint-Rémy, alors que ce dernier est en nappe captive. Le logiciel a été conçu spécifiquement pour des nappes libres, il est donc tout à fait possible que le coefficient d'emménagement trop élevé se traduise par un mauvais calage sur d'autres paramètres pour Saint -Rémy.
- A contrario, le réservoir progressif (accumulation d'eau dans les sols) est très élevé sur Villars et Villeneuve, et traduit donc une accumulation d'eau importante à faible profondeur (sol et/ou réservoirs intermédiaires). Ce dernier a été identifié comme partiellement existant dans la moraine d'après les coupes de forage ;
- La différence entre Villars et les 2 autres piézomètres est surtout marquée par le coefficient de percolation qui semble traduire une plus forte réactivité de la nappe (remontée plus rapide du niveau de nappe), liée au faible coefficient d'emménagement retenu sur Villars ;
- On note un temps de percolation un peu plus rapide sur Villars par rapport à Villeneuve et un tarissement (vidange) nettement plus rapide sur Villars que sur Villeneuve, traduisant une plus forte inertie sur Villeneuve.

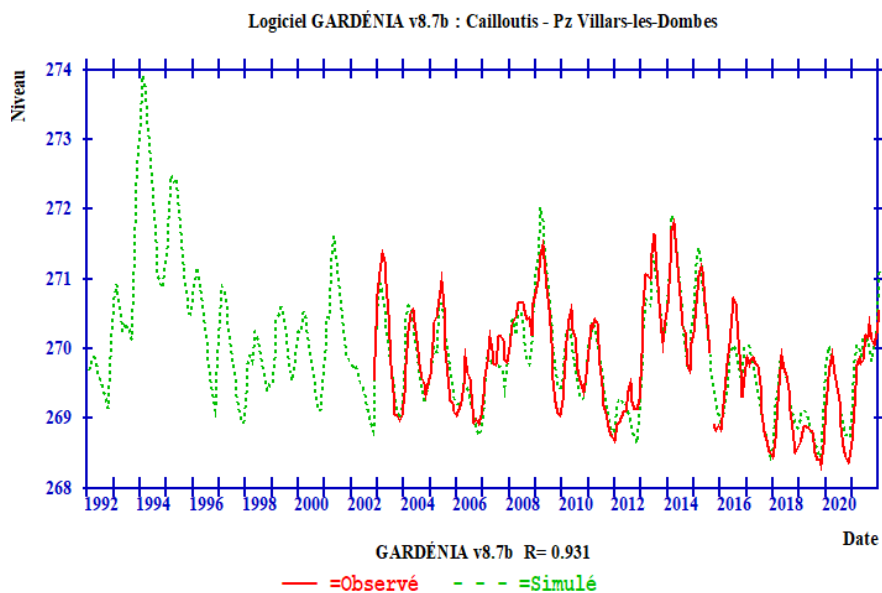


Figure 32 : Résultats des simulations sous GARDÉNIA pour le piézomètre de Villars

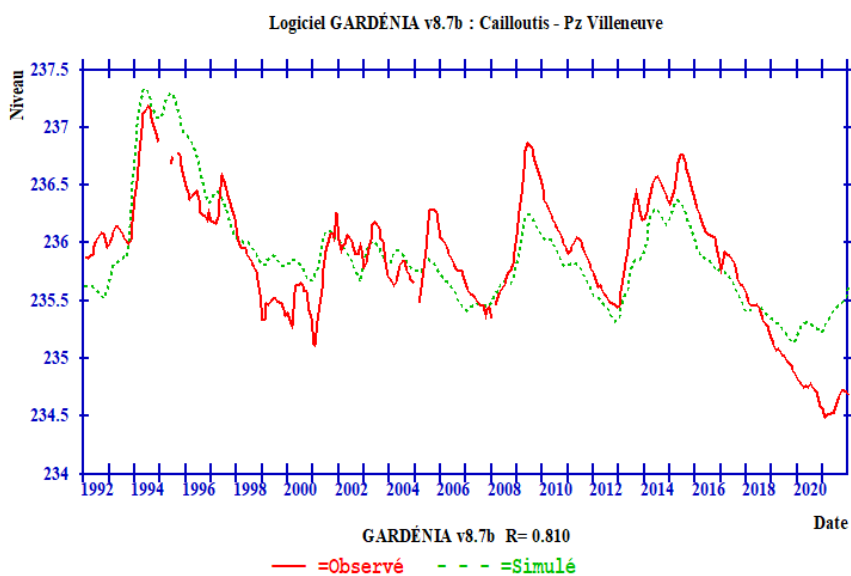


Figure 33 : Résultats des simulations sous GARDÉNIA pour le piézomètre de Villeneuve

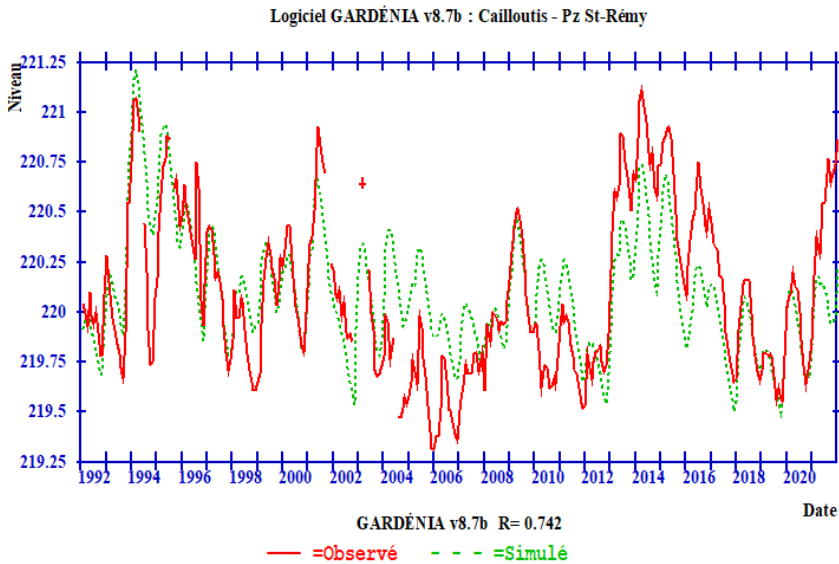


Figure 34 : Résultats des simulations sous GARDÉNIA pour le piézomètre de Saint-Rémy

6.3 APPROCHE PAR ANALYSES CORRELATOIRES ET SPECTRALES

6.3.1 Méthodologie

GENERALITES

Les analyses corrélatoire et spectrales ont été développées pour l'analyse de séries temporelles par Jenkins & Watts en 1970 ; Hannan 1970. Ces méthodes ont ensuite été adaptées à l'hydrologie et appliquées pour étudier le fonctionnement des karsts pyrénéens dans les années 1980 par A. Mangin (Mangin, 1981, Mangin and Pulido-Bosch, 1983, et Mangin, 1984). Ces techniques, analogues aux méthodes de traitement du signal, permettent d'étudier la structure des données (inertie, tendance, période de retour...) via l'analyse des fonctions d'autocorrélation et du spectre simple. L'analyse croisée (corrélogramme croisé, fonction de phase, ...) permet ensuite d'analyser comment un signal d'entrée (pluie, débit, crues, ...) est reproduit/modulé au niveau du signal de sortie (débit, niveau piézométriques, ...) en termes de corrélation, de déphasage et de gain et donc d'en déduire l'effet de filtre ou d'amplification plus ou moins prononcé d'un système.

Ce type d'analyse nécessite de disposer d'une chronique de données suffisamment longue et avec le moins de lacunes possibles.

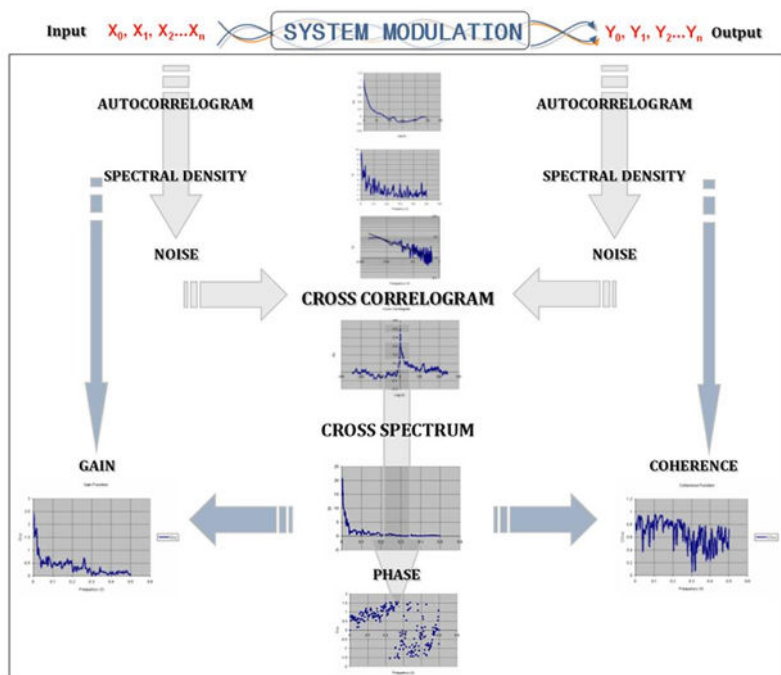


Figure 35 : Déroulement de l'analyse

METHODES DE CALCUL

Analyse simple

L'analyse simple revient à étudier de manière indépendante la structure de chaque signal à partir de l'étude de la fonction d'autocorrélation et du spectre de densité de variance. L'autocorrélogramme met en évidence la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Il traduit par conséquent la « mémoire du système » (A. Mangin, 1982).

$$r_k = \frac{C_k}{C_0}$$

$$C_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})$$

Avec :

- $R_k = -1$ à 1 , coefficient de corrélation ;
- n : nombre de données ;
- $k = 0$ à m , pas de temps considéré ;
- m : troncature.

Le spectre de densité de variance (S_f) consiste à effectuer un changement d'espace en déplaçant l'analyse du domaine temporelle vers le domaine fréquentiel via la transformation de Fourier. Il traduit la part de la variance portée par chaque fréquence. Cela présente l'avantage de mieux faire apparaître les variations périodiques.

$$S_f = 2 \left[1 + 2 \sum_{k=1}^m D(k) r(k) \cos(2\pi f k) \right]$$

Analyse croisée

L'analyse croisée permet de caractériser la modulation induite par le système entre un signal d'entrée et le signal de sortie. On s'intéresse ici à étudier comment l'information contenue dans le signal d'entrée est reproduite sur le signal de sortie en termes de corrélation ($R_{xy}(k)$, corrélogramme croisé), de temps de réponse ($\Theta_{xy}(f)$, fonction de phase) et d'atténuation ou d'amplification ($g_{xy}(f)$, fonction de gain).

6.3.2 Séries de données analysées

Les données analysées correspondent aux moyennes piézométriques mensuelles entre janvier 2004 et décembre 2021 (période de chroniques communes), soit 216 mois (18 années).

Pour l'approche croisée, les données piézométriques sont corrélées aux précipitations efficaces mesurées à la station de Marlieux (RFU de 100 mm).

6.3.3 Résultats

ANALYSE SIMPLE

L'analyse simple consiste à calculer, pour chaque variable :

- **L'autocorrélogramme** (ou corrélogramme simple) : qui met en évidence, sur une chronique piézométrique, la dépendance des événements entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Il traduit par conséquent la mémoire du système (A. Mangin, 1982). Il peut être apparenté au variogramme des géostatisticiens

dans le sens où l'on va chercher le degré de corrélation entre deux valeurs, non pas espacées géographiquement, mais dans le temps.

Dans le cas d'un phénomène aléatoire, le degré de corrélation entre une valeur et celles qui l'entourent à plus ou moins long terme est nulle. Ces événements indépendants se traduisent par un coefficient de corrélation (r_k) nul ou négligeable. Dans le cas de phénomènes structurés, la décroissance du corrélogramme est plus lente. Lorsqu'il existe des cycles périodiques dans le phénomène étudié, le corrélogramme montrera des pics sur les périodes correspondantes.

A partir du corrélogramme simple, nous pouvons déduire l'effet mémoire, autrement appelé le temps de régulation : il s'agit de la valeur de k pour $r_k=0,2$. Il s'agit d'une valeur arbitraire, introduite par A. Mangin qui permet d'appréhender l'inertie des systèmes. L'effet mémoire indique donc le temps que met l'information à se propager dans le système : plus l'effet mémoire est court plus le système est réactif.

- **Le spectre simple** (ou spectre de densité), qui permet d'étudier les composantes périodiques du signal car elles apparaissent comme des pics caractéristiques d'une certaine fréquence. Le spectre représente la part de la variance associée à chaque fréquence (ou période). Il correspond à la transposition du corrélogramme dans le domaine fréquentiel via l'application de la transformée de Fourier. Sur le spectre des fréquences, l'abscisse du maximum de chaque pic fournit la fréquence de la périodicité du phénomène concerné. Cette valeur est cependant entachée d'une certaine imprécision, surtout dans les basses fréquences, et il ne faut donc travailler que sur les ordres de grandeur. Les fortes valeurs à l'origine traduisent des phénomènes de période supérieure à la fenêtre d'observation. Afin de réduire la forte surestimation de la variance induite par la transformée de Fourier, on utilise un filtre qui doit offrir un compromis satisfaisant entre un bon lissage du spectre et une bande passante la plus large possible.

Les corrélogrammes et spectres simples de chaque variable sont illustrés sur les graphiques suivants :

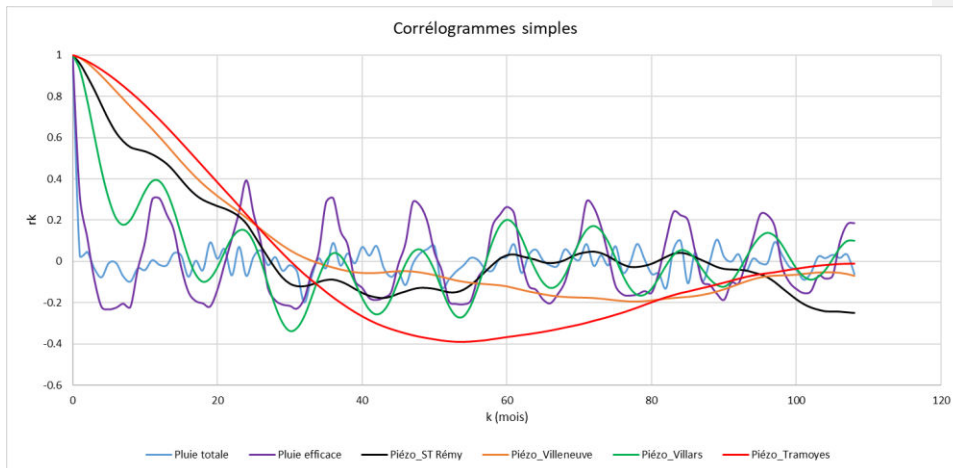


Figure 36 : Corrélogrammes simples

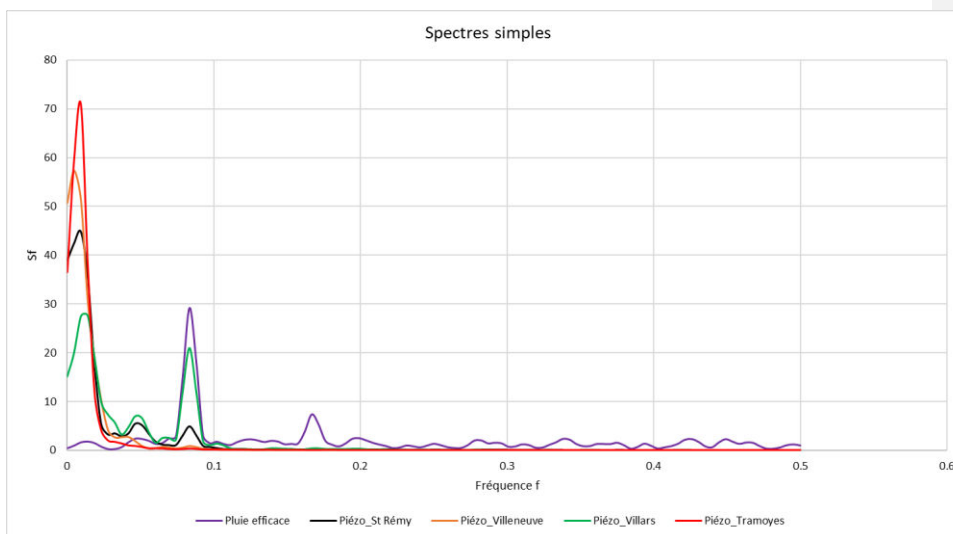


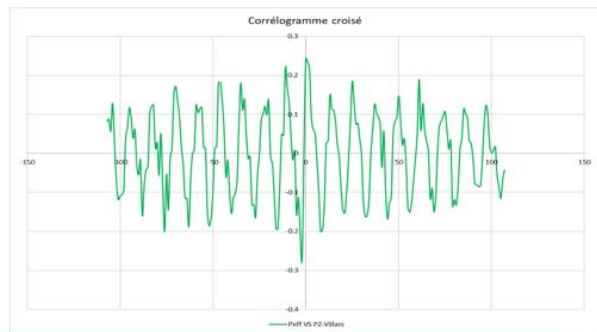
Figure 37 : Spectres simples

Sur le graphique de la Figure 36 (analyse simple), la pluie brute est une variable aléatoire, puisque la valeur de r_k oscille autour de zéro. La pluie efficace est une variable saisonnière avec une périodicité de 12 mois. Le piézomètre de Villars présente le même comportement que la pluie efficace, avec une périodicité de 12 mois, et un effet mémoire compris entre 7 et 15 mois. Les 3 autres piézomètres ont des comportements différents, avec un effet mémoire de 25 mois, traduisant une très forte inertie du système. On note pour le piézomètre de Saint-Rémy une périodicité de 12 mois qui colle sur celle de Villars, mais avec un signal plus atténué. Pour les piézomètres de Villeneuve et de Tramoyes, on ne peut pas déduire de périodicité dans le signal à plus long terme, la chronique étant trop courte. Le domaine de validité des interprétations s'étend sur 72 mois (nombre de valeur/3).

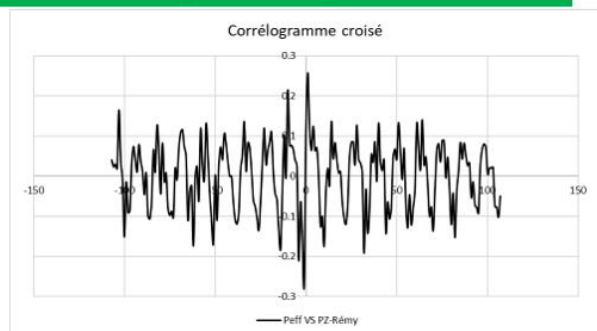
Sur le graphique de la Figure 37 (spectres simples), le piézomètre de Villars, tout comme la pluie efficace, réagit à des fréquences correspondant à une périodicité de 12 mois. On note un très léger pic pour Saint-Rémy sur cette même fréquence. Les piézomètres de Villeneuve, Tramoyes et Saint-Rémy réagissent à des pics de basse fréquence correspondant à une périodicité comprise entre 22 et 100 mois. Pour les basses fréquences, les données sont peu précises, c'est l'ordre de grandeur que l'on vérifie. On note également un pic sur le piézomètre de Villars d'amplitude équivalente à celui des cycles longs (basses fréquences) des autres piézomètres. Cela traduit, pour ce piézomètre, la présence d'un cycle long, en plus du cycle de 12 mois, comparable à celui des 3 autres piézomètres.

ANALYSE CROISEE

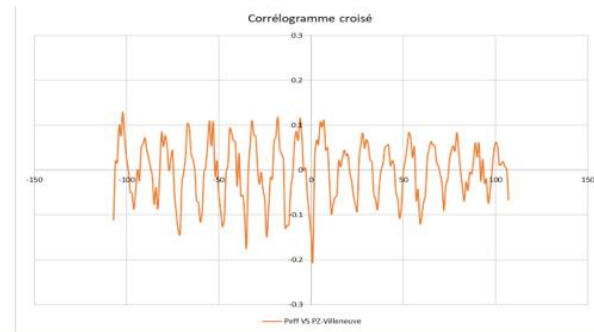
L'analyse croisée (Figure 38) met en évidence une relation de cause à effet entre les précipitations efficaces et les fluctuations piézométriques. La forme pointue du corrélogramme, avec un pic positif à proximité de l'origine (sur la droite du graphique) indique cette relation. Le décalage de ce pic par rapport à l'origine indique le décalage temporel entre le signal d'entrée (la pluie efficace) et le signal de sortie (la piézométrie). Les meilleures corrélations sont obtenues avec le piézomètre de Saint-Rémy et de Villars avec respectivement un coefficient de 26 et 24 %. On note un décalage temporel de 1 mois pour Saint-Rémy et l'absence de décalage pour Villars (pour rappel, le pas de travail est mensuel). Les piézomètres de Tramoyes et de Villeneuve ont un coefficient de corrélation plus faible, respectivement 19 et 11 %. Pour le piézomètre de Villeneuve, la forme en pic à droite du graphique est peu évidente. Le décalage temporel est de 4 mois pour Tramoyes et de 6 mois pour Villeneuve, traduisant un temps de réponse aux précipitations efficaces beaucoup plus important pour ces 2 ouvrages.



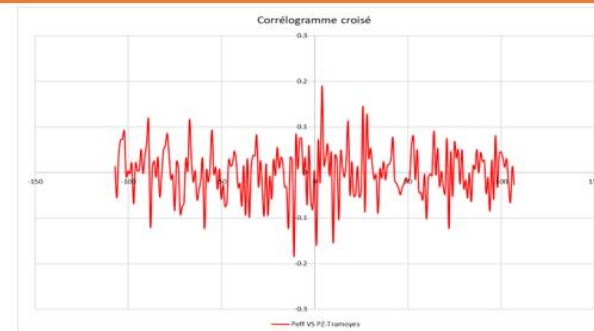
Villars: décalage 0 mois, corrélation 24 %



Saint Remy : décalage 1 mois, corrélation 26 %



Villeneuve: décalage 6 mois, corrélation 11 %



Tramoyes: décalage 4 mois, corrélation 19 %

Figure 38 : Corrélogrammes croisés

6.3.4 Conclusions sur les apports des analyses corrélatoire et spectrales

Les analyses corrélatoire et spectrales confirment la différence de comportement de la nappe observable au droit des 4 piézomètres de référence à notre disposition :

- Le piézomètre de Villars (nappe libre) est très réactif aux précipitations efficaces (temps de réaction de quelques jours maximum) car proche de la zone de recharge. Il présente une très bonne corrélation avec les cycles de recharge. On voit également une corrélation sur des cycles longs pluriannuels observables sur les autres piézomètres ;
- Les piézomètres de Villeneuve et de Tramoyes (nappe libre), éloignés de la zone de recharge, montrent une corrélation aux précipitations efficaces mais très atténuée en amplitude et un décalage du signal des précipitations efficaces de 4 à 6 mois, traduisant la très forte inertie du système. En revanche, l'analyse corrélatoire ne permet pas ici d'établir un lien entre les cycles longs de recharge/décharge observés et la variable climatique. Il semblerait que ces cycles soient davantage liés à l'intensité de la recharge (hauteur de pluies efficaces) et à leur durée qu'à l'existence de cycles pluriannuels ;
- Le piézomètre de Saint-Rémy (nappe captive) est atypique : bien qu'éloigné de la zone de recharge, il est réactif aux précipitations efficaces (1 mois de décalage), mais réagit également avec une grande inertie selon les cycles longs observés sur Villeneuve et Saint-Rémy. L'explication peut venir du caractère captif de la nappe au droit du piézomètre, avec un signal d'entrée se propageant rapidement du fait d'une plus forte diffusivité de la nappe (réponse temporelle rapide à un signal). Il a cependant un caractère inertiel important se rapprochant de ce qui est observé à Villeneuve et Tramoyes pour les cycles longs.

6.4 APPROCHE PAR BILAN DE L'INFILTRATION

6.4.1 Méthodologie

Le bilan de l'infiltration consiste à évaluer, sur un bassin versant hydrographique donné, la quantité d'eau infiltrée (I) à l'aide de la formule suivante :

$$P = ETR + R + I \text{ ou plutôt } I = P - ETR - R$$

Ces paramètres s'expriment en m³ ou en mm, avec

P = Précipitations brutes à la surface du bassin versant hydrologique, calculées sur la base de la hauteur de pluie (en mm) multipliée par la surface (en m²). Pour ce paramètre, des données météorologiques spatialisées ont été achetées auprès de l'opérateur WEENAT pour avoir une mesure la plus fiabilisée possible, car la seule station MétéoFrance de référence, située à Marlieux, ne permettait pas de tenir compte des disparités locales et

du gradient pluviométrique observé (+/- 200 mm/an entre l'Ouest et l'Est du territoire, cf. partie 5.3.1). Ne pas travailler à partir d'une valeur territorialisée aurait engendré une incertitude trop importante.

ETR = EvapoTranspiration Réelle, estimée dans notre approche conceptuelle à partir de l'ETP (EvapoTranspiration Potentielle) en fonction du remplissage de la réserve en eau des sols (cf. parties 5.3.3 et 5.3.4), c'est à dire la réserve en eau contenue dans les 2 premiers mètres des sols, atteignable par le système racinaire des plantes (idem méthode de Thornthwaite). Dans cette approche, l'évapotranspiration est considérée comme nulle lorsque la réserve en eau des sols est épuisée, à l'issue d'une longue période sans pluies. Pour rappel, l'ETP est une valeur théorique donnée par MétéoFrance, qui prend en compte les conditions météorologiques en surface, et suppose que la végétation peut transpirer normalement, donc que les sols contiennent encore de l'eau utilisable.

De façon simplifiée, dans ce bilan de l'infiltration, $ETR = ETP$ si $RU > 0$ et $ETR = 0$ si $RU = 0$.

A noter que cette formule est appliquée aux sols uniquement. En effet, nous distinguons les étangs et leurs 12 000 hectares de surface environ (soit 10% de la surface étudiée) en considérant qu'à la surface des étangs, $ETR =$ évaporation à la surface d'eau libre (paramètre dont les valeurs ont aussi été acquises au pas de temps journalier pour les 10 dernières années). Une correction est aussi apportée pour déduire la surface d'étangs en assec chaque année (en considérant que 20% des étangs ne sont pas en eau en année moyenne).

R = Ruissellement, correspond au débit d'eau sortant du bassin versant autrement que par infiltration ou évaporation. Ce paramètre est calculé grâce au suivi en temps réel des principaux cours d'eau du territoire. Le terme R est corrigé de la part de drainage des cours d'eau sur les eaux souterraines (résurgences, puisqu'une part non négligeable du débit des rivières correspond non pas à du ruissellement mais à des eaux d'infiltration qui réalimentent les rivières/les sources) et du rejet des stations d'épuration (cf. parties 4.4 et 4.5).

La contribution de la nappe aux débits des cours d'eau/rivières peut être évaluée avec une précision relativement bonne lors d'étiages prolongés, puisque l'on peut considérer qu'à l'issue d'une longue période sans pluies, l'eau des rivières n'est plus apportée que par les résurgences de nappe en rivière. L'année 2022 ayant été historiquement sèche, les valeurs de débits mesurées en rivières nous ont permis de quantifier le débit des résurgences avec une bonne précision.

Dans le contexte dombiste, la principale incertitude relative au calcul du volume ruisselé provient de la part d'eau interceptée par les étangs, réservoirs dont le remplissage est en majeure partie assuré par le ruissellement. Des corrections ont ainsi dû être apportées pour intégrer dans le volume ruisselé la part d'eau interceptée pour les remplir à nouveau.

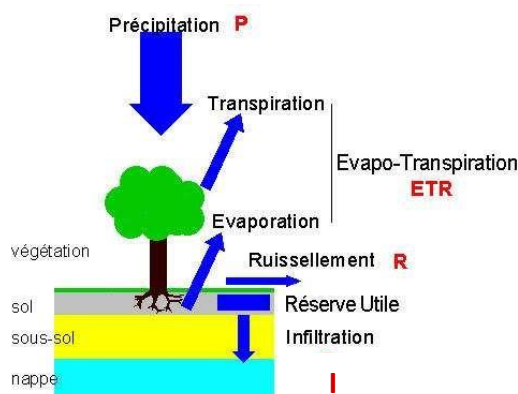
les étangs (sortie d'assec, compensation des pertes par évaporation), part plus ou moins grande selon la durée et la sévérité des épisodes de sécheresse traversés. Faute d'outils de mesures précis pour quantifier cette part, ce paramètre est très difficile à évaluer autrement que de manière empirique. Toutefois, grâce à un calage minutieux (comme on le ferait pour de la modélisation) cette incertitude a pu être réduite au maximum.

I = Infiltration, paramètre qui nous intéresse en premier lieu dans cette analyse. Le terme I correspond à la part d'eau qui parvient à s'infiltrer en profondeur et atteint la zone saturée (= la nappe). C'est cette part de l'eau infiltrée en profondeur qui recharge efficacement de la nappe des cailloutis, recharge dont nous cherchons à déterminer la valeur à l'échelle de la nappe des cailloutis.

$$I = I_{sup} + I_{prof}$$

Selon une approche simplifiée, nous considérons dans le calcul que l'eau ne peut s'infiltrer qu'à partir du moment où les couches superficielles de sol sont saturées d'eau (RU à 100% de sa capacité). Par exemple, pour un sol présentant une réserve utile de 100 mm qui se situerait à 90% de saturation (soit 90 mm) au moment où une pluie de 17 mm survient, avec une ETR de 5 mm ce jour-là (donc pluie efficace de 12 mm), on considère que les 10 premiers mm servent à re-saturer le sol, les 2 mm restant se partageant entre ruissellement et infiltration profonde.

Par souci de précision, ce calcul intégrant pluie efficace et réserve utile des sols est effectué au pas de temps journalier sur la période 2012-2022. Les résultats sont agrégés à pas mensuel et annuel sur chaque bassin versant objet du bilan.



6.4.2 Données d'entrée

Les données d'entrée utilisées dans le bilan de flux sont les suivantes :

Tableau 7. Données utilisées pour le bilan de flux

Paramètres	Origine de la données	contexte
Précipitation	WEENAT, reconstitution climatique* à pas journalier à partir de données satellites	Modélisation climatique sur 7 sous-secteurs (voir Figure 39)
ETP		
ETR surface d'eau libre	Données ETR surface d'eau libre METEO France à pas mensuel à Mâcon	L'ETP à la surface d'eau libre n'est appliquée qu'à la surface des étangs (4/5 des étangs en eau chaque année)
Débit des rivières	Données de débit des stations hydrologiques de référence	Chroniques disponibles à pas journaliers sur 7 bassins versants (Figure 13 page 36)
RU/RFU	RU évalué par la Chambre d'agriculture. La RFU a été prise au 2/3 de la RU	Synthèse cartographique réalisée par la chambre d'agriculture à partir du référentiel pédologique régional. Il n'existe pas d'autres cartographies des sols à l'échelle de la Dombes (voir Figure 40)
Rejet des STEAU	Portail national pour l'assainissement collectif	Débit moyen du rejet des STEP (voir Figure 19 page 51)
Drainage de nappe	Utilisation des données des QMNA5 des stations hydrologiques concernées + mesures de débit à l'étiage sur petits affluents Ain/Rhône/Saône	Le débit des cours d'eau en étiage sévère ne provient que du drainage des eaux souterraines (voir chapitre 4.4)

*Rappel : les données de précipitations et d'ETP à pas journalier sont issues d'un travail de modélisation climatique réalisé par la société WEENAT sur la période 2012-2021 (10 années). Le travail est une compilation de plusieurs sources de données (radar de pluie, stations météo France, rayonnement par données satellitaires...) permettant de recréer des chroniques climatiques spatialisée plus fiables que la simple extrapolation des stations météorologiques (on supprime les effets de bords). Le travail a été réalisé sur 7 sous-secteurs différents (Figure 39).

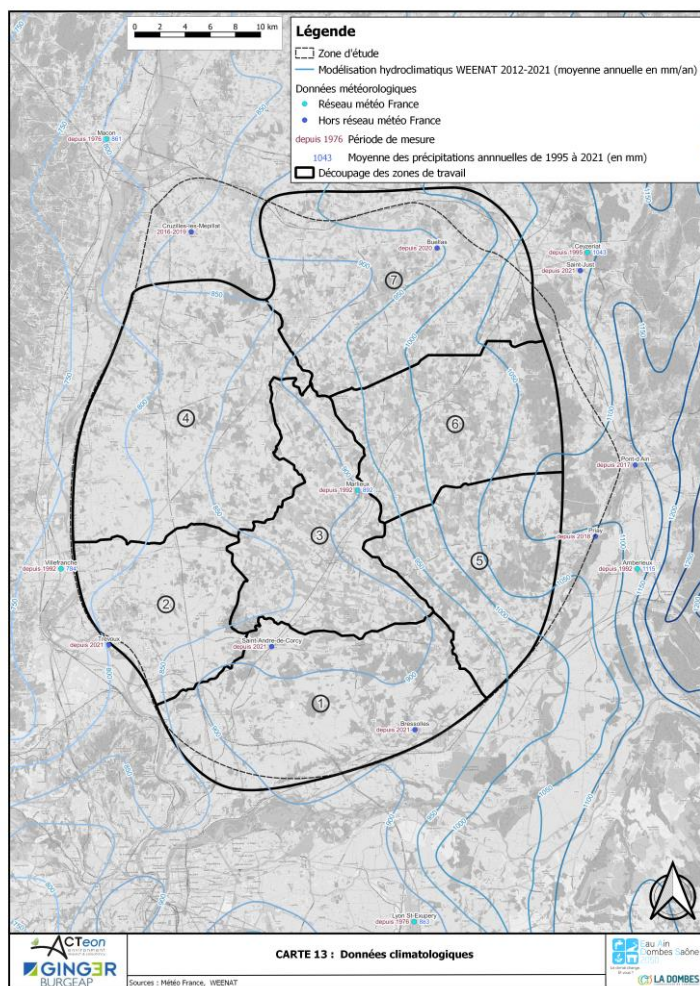


Figure 39 : Découpage du territoire pour la modélisation climatique par WEENAT

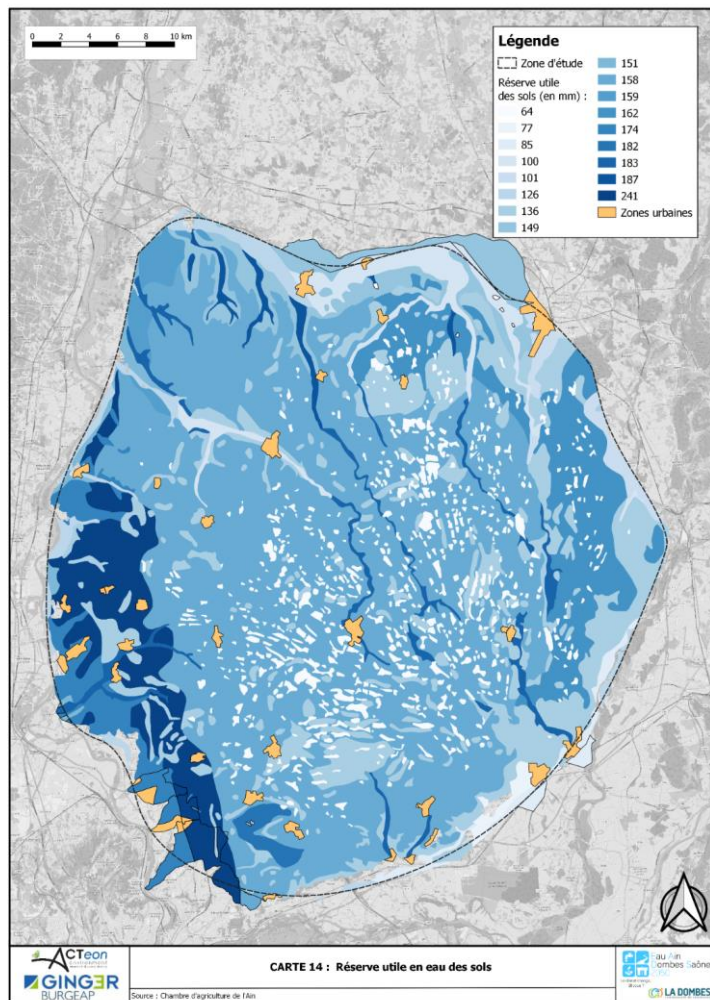


Figure 40 : Réserve en eau des sols dombistes

6.4.3 Paramétrage du bilan

DE PREMIERS RESULTATS PERFECTIBLES

Le premier bilan réalisé (Figure 41), sur la base des paramètres décrits précédemment, montrait une incohérence entre l'infiltration calculée et la recharge observée au piézomètre de Villars (seule chronique piézométrique disponible proche de la zone de recharge préférentielle, voir chapitre 6.1 et Figure 42). Aux années de moindre recharge observée

correspondait les volumes les plus importants, en particulier sur les années de déficit pluviométriques de 2018, 2019 et 2020. Inversement, pour les années de plus forte pluviométrie (2012, 2013, 2014) et de plus forte remontée piézométrique, l'infiltration calculée ressortait comme trop faible.

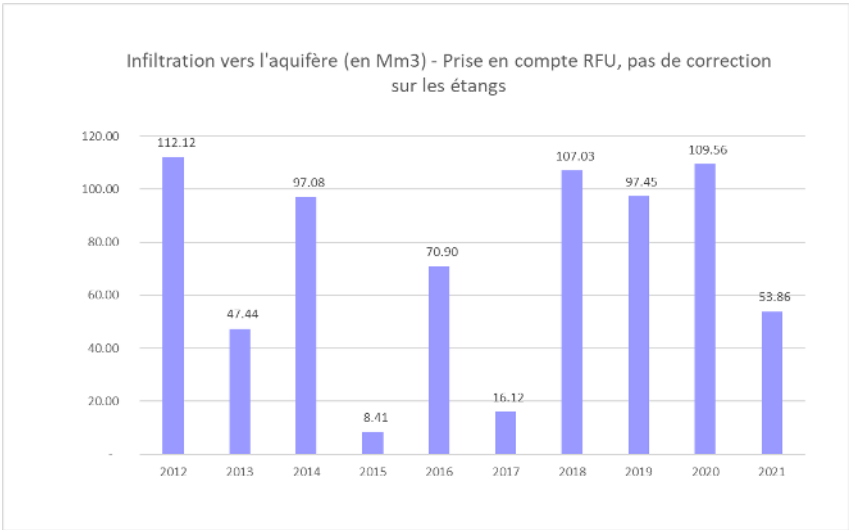


Figure 41 : Résultats du calcul d'infiltration profonde « I_{prof} » du bilan de flux en prenant en compte la RFU, sans prise en compte du remplissage des étangs

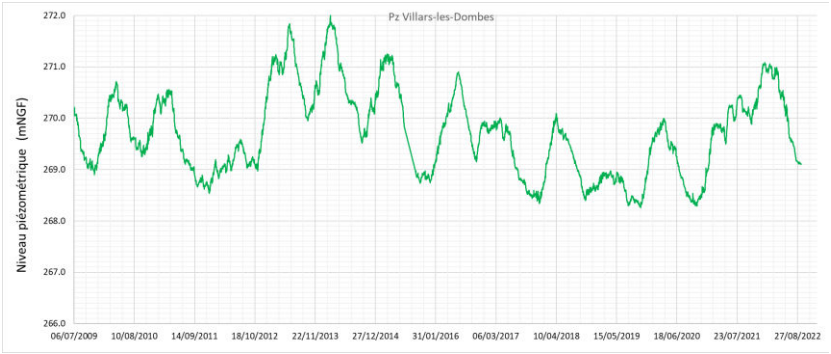


Figure 42 : Evolution piézométrique à Villars

Des corrections ont dû être appliquées, pour prendre en compte les particularités du fonctionnement hydrologique de la Dombes, à l'appui des observations et remarques des acteurs du territoire (COTECH DU 23/03/23, journée thématique étang du 24/04/23, COSUI du 07/07/23) :

- Le remplissage des étangs : sur la Dombes centrale, l'eau ruisselant sur le bassin versant est majoritairement interceptée par les étangs. Le ruissellement ne gagne les cours d'eau qu'une fois les étangs remplis, retardant ainsi la remontée des débits des cours d'eau. Ce phénomène est plus marqué au sortir d'années où le déficit pluviométrique a été important, et à fortiori lorsque l'on enchaîne les années de déficit pluviométrique. Ne pas prendre en compte dans le calcul le volume d'eau intercepté par les étangs reviendrait à considérer que cette eau, non comptabilisée dans le volume ruisselé, serait de l'infiltration efficace, ce qui induirait une erreur sur le résultat importante.
- La prise en compte de la RFU initialement envisagée, montre ses limites dans le cas d'années sèches, où la désaturation des sols peut se faire sur des profondeurs importantes, amenant la végétation, en conditions de stress hydrique, à utiliser l'eau du sol au-delà de la RFU, donc de la RU.

Une dizaine de tests de sensibilité a été réalisé sur ces 2 paramètres.

INTEGRATION DES ETANGS DANS LE BILAN HYDROLOGIQUE

Pour évaluer l'impact de l'effet du remplissage des étangs, nous avons comparé les volumes d'eau annuels en sortie du bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars (corrigé de l'effet des rejets des STEU et du drainage de nappe), à la pluie annuelle efficace (à la station de Marlieux, Figure 43). Pour deux années comparables en termes de précipitations efficaces (par exemple 2012 et 2018), les volumes d'eau en sortie du bassin versant par les rivières sont très différents, presque 3 fois plus élevés en 2012 qu'en 2018. Lorsque l'on fait le rapport entre le volume d'eau sorti par les rivières et les précipitations efficaces, on peut avoir des variations d'un facteur 1 à 4 suivant les années (Figure 44). Les plus faibles ratios sont obtenus les années sèches de faible recharge en 2018, 2019 et 2020. Ce phénomène illustre la captation de l'eau par les étangs au détriment des rivières (terme Ruissellement « R »), et donc la surestimation de l'infiltration « I » dans le bilan hydrologique. Une correction dans le bilan est nécessaire pour prendre en compte le phénomène de remplissage des étangs, qui fait appel à des volumes potentiellement conséquents. Inversement, dans les situations où une proportion plus importante d'étangs sont pleins, l'effet des vidanges sur les cours d'eau tend à maximiser le paramètre Ruissellement et minimiser l'infiltration ; une correction est là aussi nécessaire.

Faute de moyens de mesure précis, il est difficile d'évaluer avec précision les volumes mobilisés par le stockage/déstockage des étangs (cf. partie 4.3), surtout à postériori. Plusieurs essais ont été réalisés pour parvenir à caler le modèle mathématique. Les résultats les plus satisfaisants,

en comparant les résultats avec les fluctuations piézométriques, sont obtenus en corrigeant le terme « R » du bilan :

- Pour les années 2012, 2018, 2019 et 2020, en soustrayant le volume stocké dans les étangs en considérant une profondeur moyenne des étangs de 80 cm et un remplissage de 80 % des étangs.
- Pour les années 2013 et 2015, en considérant un déstockage d'une partie de l'eau des étangs en ajoutant le volume équivalent à la vidange des étangs au terme « R » ruissellement.

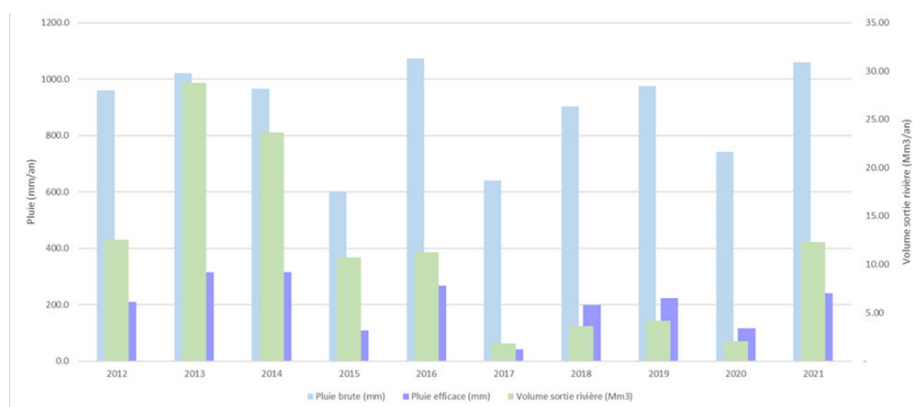


Figure 43 : Comparaison entre le volume annuel en sortie du bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars, la pluie brute (à Marlieux) et la pluie efficace

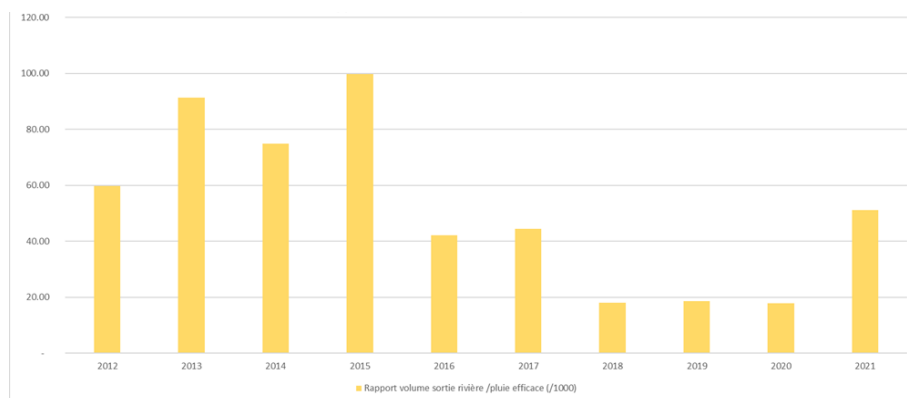


Figure 44 : Rapport entre le volume annuel en sortie du bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars, et la pluie efficace

MODULATION DE LA RESERVE EN EAU DES SOLS

De la même manière, un calage du paramètre RU/RFU est apparu nécessaire. En effet :

- La prise en compte de la RFU seule tend à minimiser l'évapotranspiration réelle ETR, donc surévaluer le terme d'infiltration.
- La prise en compte de la RU seule a l'effet inverse. Ce terme est très sensible dans le bilan, le passage de la RU à la RFU diminue l'infiltration d'un facteur 2.

Ainsi, un calcul mené en prenant en compte la RU des sols lors des années de sécheresse marquée et la RFU les autres années donne des résultats plus satisfaisants au regard des fluctuations piézométrique à Villars. C'est ce calage qui a été retenu au final.

SYNTHESE DES AJUSTEMENTS ET COMPARAISON A LA CHRONIQUE PIEZOMETRIQUE DE VILLARS

Les résultats qui collent le mieux aux observations sont ceux obtenus en combinant les corrections sur le stockage/déstockage des étangs et la prise en compte de la RU les années sèches. En résumé, les corrections opérées aux bilans sont les suivantes :

- Prise en compte de la RU à la place de la RFU, les années de sécheresse marquées (2012, 2017, 2018, 2019, 2020) ;
- Corrections de l'effet de déstockage d'eau en 2013 et 2015 ;
- Corrections de l'effet de stockage d'eau dans les étangs en 2012, 2018, 2019 et 2020.

Le bilan est présenté en année civile, plutôt qu'en année de recharge, qui correspond classiquement à la période hivernale. On observe en effet une forte variabilité de la période de recharge qui démarre classiquement entre septembre et décembre avant de s'interrompre au printemps, mais peut aussi se décaler certaines années dans le temps, comme en 2016 et en 2021, où une recharge notable sur la période printemps/été a pu être constatée.

Grâce à ces corrections, les résultats du calcul de l'infiltration concordent avec les amplitudes de recharge mesurées au droit du piézomètre de Villars (Figure 45 : Résultats du calcul d'infiltration profonde « I_{prof} » du bilan de flux après correction RU/RFU et de l'effet de remplissage/déstockage des étangs (cumul des 7 bassins versants) et Figure 46 : Amplitude piézométrique de la recharge au piézomètre de Villars.

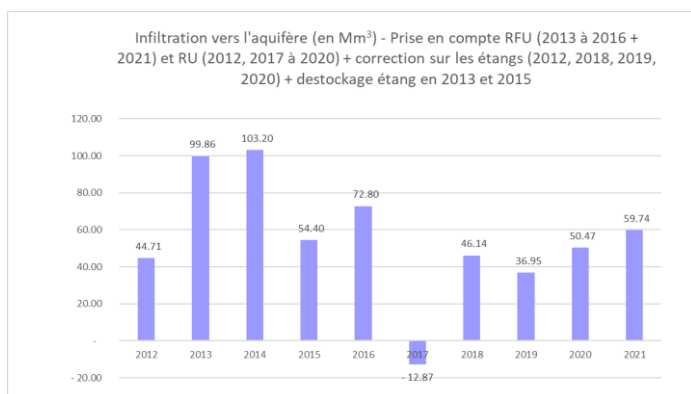


Figure 45 : Résultats du calcul d'infiltration profonde « Iprof » du bilan de flux après correction RU/RFU et de l'effet de remplissage/déstockage des étangs (cumul des 7 bassins versants)

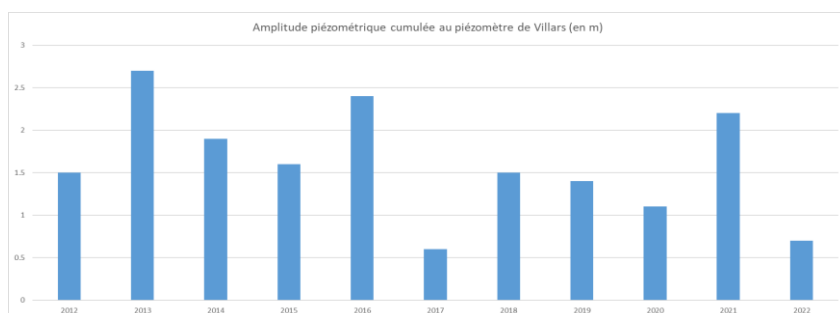


Figure 46 : Amplitude piézométrique de la recharge au piézomètre de Villars

6.4.4 Résultats du bilan et discussions sur les limites et incertitudes

RESULTATS DU BILAN

Le Tableau 8 : résultats du calcul de l'Infiltration par sous bassin versant présente les résultats du bilan d'infiltration pour chacun des 7 sous-bassins versants ; certains sont inclus dans un bassin versant plus grand (lignes grisées) sur lequel le calcul a pu être réalisé :

- Le bassin versant de la Chalaronne à Chatillon (174 km²) intègre dans sa partie amont le bassin versant de la Chalaronne à Villars (89 km²). L'infiltration moyenne sur 10 ans est de 12 Mm³/an dont 6,6 Mm³ en amont de Villars ;

- La Veyle à Biziat (497 km²) intègre plusieurs sous bassins versants, dont celui de la Veyle à Lent (40 km²), du Vieux Jonc à Buellas (103 km²) et du Renom à Neuville (103 km²). L'infiltration totale est, en moyenne sur 10 ans, de 24,6 Mm³/an pour le BV de la Veyle à Biziat, dont 16,6 Mm³ pour sur parties Veyle à Lent, Vieux Jonc à Buellas et Renom à Neuville réunies. Ce résultat paraît cohérent puisque les autres affluents, situés en partie Nord, semblent peu contribuer à la recharge de la nappe sur cette partie où elle est captive.

On note que les bassins versants hydrographiques de la Chalaronne, du Renom, du Vieux Jonc et de la Veyle, orientés Sud/Nord, recoupent à la fois la partie Centre-Est du plateau, supposée être la zone préférentielle de recharge (dôme piézométrique), et la partie Nord du plateau où les cours d'eau drainent la nappe. Des stations intermédiaires de débit dans la partie nord sur la Veyle, le Renom et le Vieux Jonc seraient nécessaires pour affiner le bilan.

L'infiltration la plus importante est calculée au droit du bassin versant de la Sereine (86 km²) avec une valeur de 18,8 Mm³/an. La Sereine est proche du dôme piézométrique. En comparaison, le bassin de la Chalaronne à Villars immédiatement au Nord et de taille comparable ne contribue qu'à hauteur de 6,6 Mm³.

Le résultat du calcul pour le bassin versant du Toison ressort négatif, ce qui signifie que la quantité d'eau mesurée en sortie de ce bassin versant est supérieure à la quantité d'eau s'infiltrant théoriquement à l'échelle du bassin versant topographique. Cela peut s'expliquer par un caractère phréatique de cette rivière, qui drainerait la nappe des cailloutis sur un bassin versant hydrogéologique bien plus vaste que le bassin versant topographique.

Pour rappel, le calcul sur les 7 bassins versants disposant d'une station de mesure en continue représente environ les 2/3 de la surface du plateau de la Dombes. Pour autant, la partie Ouest et Sud-Ouest du plateau, où les cours d'eau ne sont pas équipés de station de mesure en continue, semblent peu ou pas contribuer à la recharge selon les arguments hydrogéologiques suivants (chapitre 6.2) :

- Position éloignée du dôme piézométrique ;
- Forte inertie observée au piézomètre de Villeneuve ;
- Présence d'une couverture morainique peu perméable épaisse de 30 à 40 mètres.

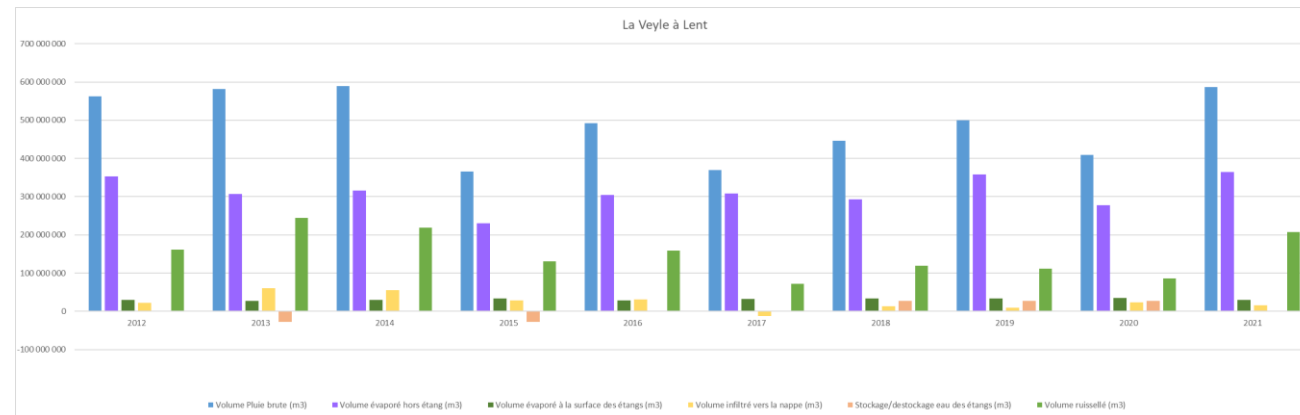
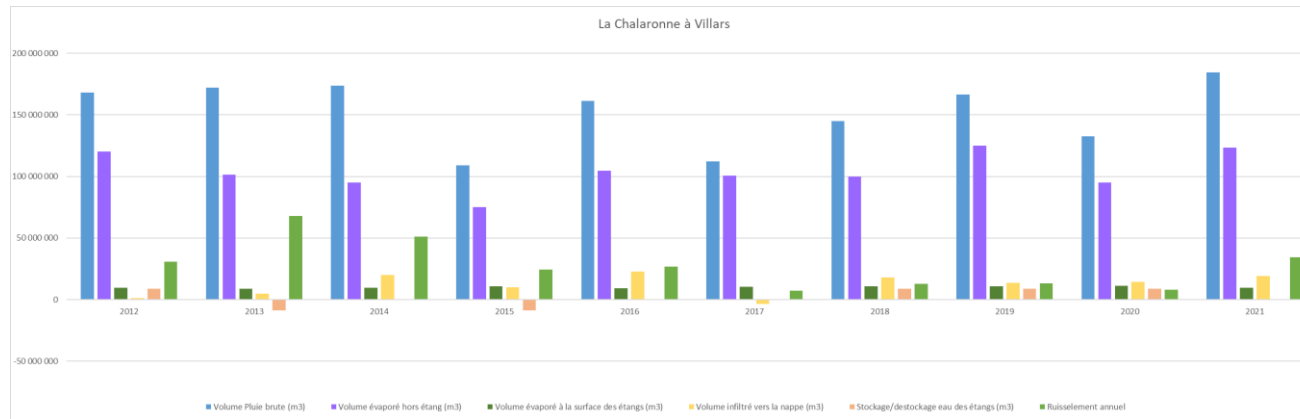
En première estimation, le calcul du bilan de flux représente environ 70 % du volume de la recharge. En l'absence d'autres données de calage (modèle de nappe), il n'est pas possible d'affiner davantage ce chiffre moyen de la recharge.

En moyenne, l'infiltration efficace (c'est-à-dire la recharge de la nappe) serait de 74 Mm³/an sur la période 2012-2016, et de 36 Mm³/an sur la période 2017-2021.

Ces valeurs sont affectées d'une incertitude liée aux limites de la méthode et aux imprécisions sur certaines données d'entrée. On peut estimer à 30 % la marge d'incertitude.

Tableau 8 : résultats du calcul de l'infiltration par sous bassin versant

		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Moyenne
A	La Sereinie à Montluel	21 328 947	34 065 316	27 726 106	15 784 607	19 443 962	3 412 678	15 376 272	14 518 632	12 185 053	24 614 351	18 845 592
B	Le Toison à Rignieux	- 7 432 040	- 9 717 306	- 6 055 448	- 3 292 292	- 1 806 578	- 4 327 602	- 2 735 826	- 3 121 415	- 4 533 366	- 7 240 861	- 5 026 273
C	La Veyle à Lent	3 170 361	1 041 622	2 737 677	- 180 474	2 352	- 937 403	2 244 728	2 203 549	- 185 644	- 2 980 858	711 591
D	La Veyle à Biziat	22 160 328	60 765 925	55 329 076	28 783 497	30 518 498	- 12 614 806	12 913 247	8 818 521	23 717 709	15 731 488	24 612 348
E	Le Vieux Jonc à Buellas	- 1 806 652	15 118 869	11 719 047	9 731 543	7 820 711	667 453	2 385 155	2 988 958	5 105 388	4 418 597	5 814 907
F	Le Renom à Neuville	7 171 856	22 066 346	17 195 459	13 887 016	10 813 728	60 694	5 716 136	5 496 369	5 253 924	12 667 401	10 032 893
G	La Chalaronne à Villars	- 1 818 252	11 002 910	10 367 912	7 559 121	12 462 860	- 2 505 421	6 488 586	4 784 640	3 790 284	14 254 648	6 638 729
H	La Chalaronne à Chatillon	1 219 584	5 027 936	20 140 814	9 836 185	22 835 251	- 3 669 080	17 847 928	13 612 543	14 565 034	19 393 670	12 080 986
Total infiltration sur les Bv disposant d'une chronique de mesure de débit		44 708 858	99 859 177	103 195 996	54 404 289	72 797 711	- 12 871 208	46 137 446	36 949 697	50 467 797	59 739 509	55 538 927



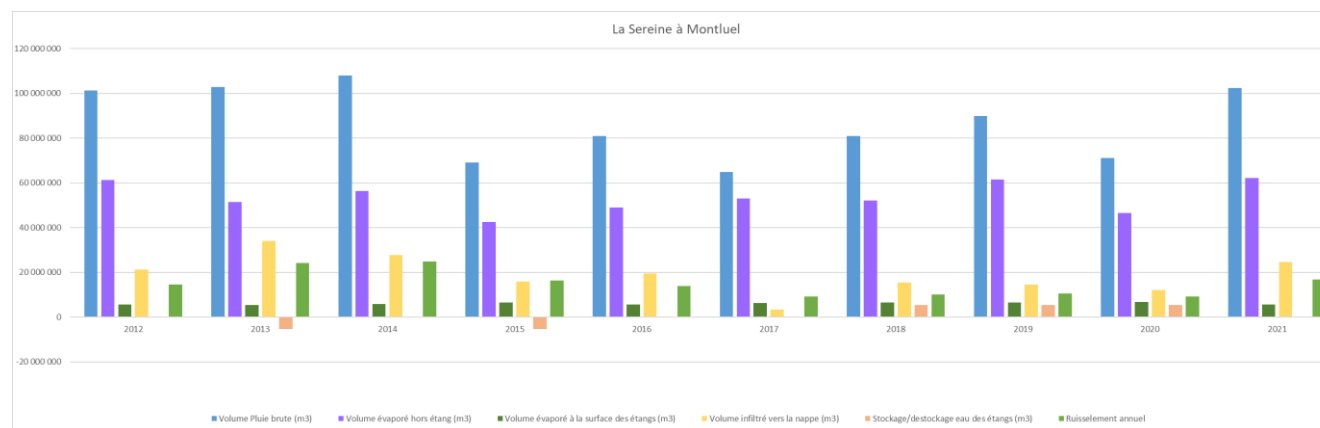


Figure 47 : Résultats du calcul de l'infiltration par bassin versant

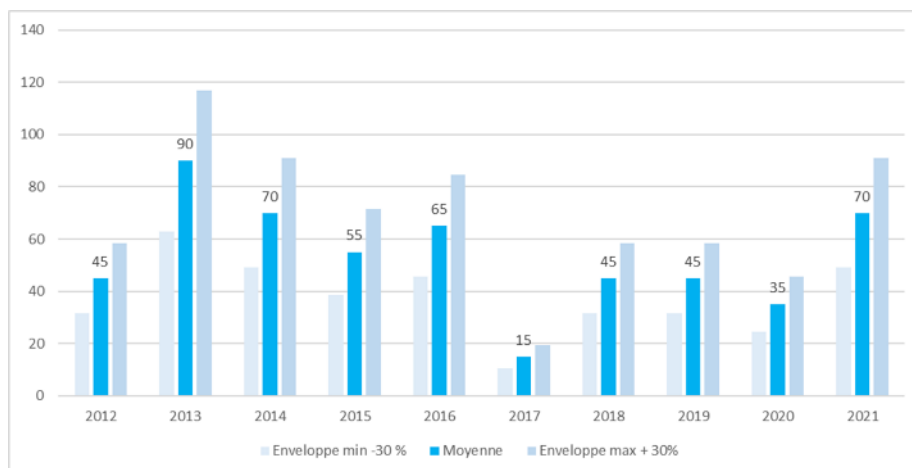


Figure 48 : Estimation des gammes possibles de la recharge annuelle

INCERTITUDES SUR LES DONNÉES DU BILAN

La pluie brute

Les données d'entrée de pluie brute journalière (modélisation climatique WEENAT) sont plus fiables que l'extrapolation des stations Météo France (Marlieux, seule station sur le plateau disposant d'une chronique longue de mesure) et permettent d'avoir une vision spatialisée de la variabilité pluviométrique sur le plateau (gommage des effets de bords). La mise en place de pluviomètres complémentaires peut s'avérer pertinente pour affiner la donnée à plus long terme.

L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évaluation de l'ETP reste une approche plus ou moins empirique, à partir de données physiques mesurées sur une station météorologique (pluie, insolation, température, humidité, vent...). Plusieurs formules de calculs sont proposées par les différents auteurs.

Les données d'ETP modélisées par WEENAT sont calculées à partir de la formule de l'équation de « Penman-Monteith », soit pour un standard de surface couverte en herbe (pour le coefficient de résistance aérodynamique). Cette formule de calcul possède une signification physique bien définie. C'est cette même formule de calcul qui est utilisée par Météo France et recommandée par la FAO. Des coefficients culturels peuvent être appliqués à l'ETP en fonction de la nature du couvert végétal et son stade de développement selon un coefficient culturel

Kc modulant ainsi l'ETP, coefficient compris généralement entre 0 et 1. Plus le coefficient est grand, plus le sol est végétalisé.

D'autres formules de calcul existent pour évaluer l'ETP, certaines sont plus empiriques et nécessitent un nombre plus limité des paramètres facilement accessibles (température, pluviométrie, latitude...).

Intégration de l'ETP au bilan et calcul de l'ETR

Un test de sensibilité réalisé à partir du module de calcul ESPERE du BRGM (*Estimation de la Pluie Efficace et de la Recharge selon différentes méthodes*), pour différentes formules de calcul théoriques utilisées dont la méthode de « Thornthwaite » (pas mensuel) et la méthode de « Turc » (à pas annuel). Le test a été réalisé pour le bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars et ne concerne que l'approche précipitations efficaces (P-ETR) à pas mensuel.

La méthode du bilan de Thornthwaite repose sur le calcul du bilan de flux et de remplissage de la réserve en eau des sols tel que proposé dans le calcul du bilan de flux. Les données d'entrée sont identiques (P, ETP issues du travail de WEENAT). La méthode de Turc au pas annuel est purement empirique, et ne prend pas en compte la réserve en eau des sols.

D'autres méthodes sont proposées, qui présentent des similitudes avec la méthode du bilan de Thornthwaite, comme la méthode de Dignman (prise en compte d'une vidange exponentielle des sol), la méthode de Dignman-Hamon (ETP estimée par une autre formule), la méthode d'Edijatno et Michel (vidange du stock d'eau du sol selon un modèle quadratique). Certaines méthodes non applicables ici ont été écartées.

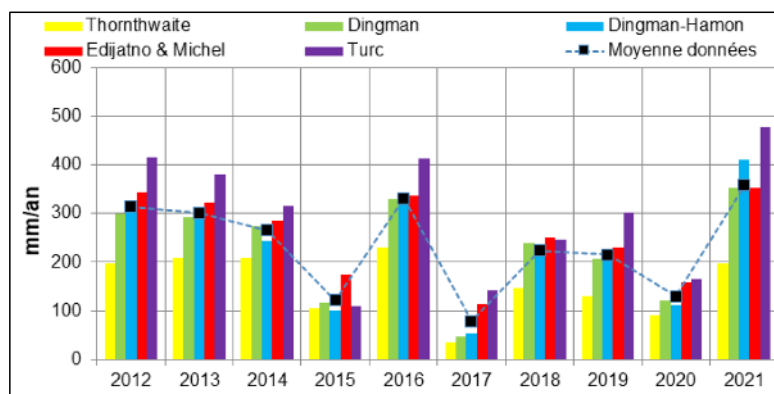


Figure 49 : Test de sensibilité sur les méthodes de calcul sur le bassin versant de la Chalaronne en amont de Villars (RU 150 mm) à partir du module de calcul ESPERE du BRGM

Les tests de sensibilité montrent :

- Que la méthode du bilan de Thornthwaite présente de manière systématique les pluies efficaces les plus faibles (Figure 49) ;
- Les résultats sont plus contrastés selon les mois pour les autres formules, mais toujours un peu supérieurs à la méthode de Thornthwaite ;
- La formule empirique de l'ETR du Turc au pas annuel doit être écartée, car elle tend à sous-estimer l'ETR, et donc surestimer la pluie efficace (donc la recharge de la nappe), constat que l'on retrouve dans d'autres documents scientifiques sur le sujet. C'est cette formule de calcul qui avait été utilisée dans les précédentes études, pour une approche globale de l'infiltration, sur des moyennes annuelles.

Les résultats sont d'autant plus contrastés que la réserve en eau des sols est importante. Les écarts sont plus importants entre formules les années pluvieuses (surestimation des autres méthodes par rapport à la méthode des bilans de flux de Thornthwaite) .

L'ETR calculée dans le bilan de flux ne semble pas sous-estimée, à l'exception de l'influence du couvert végétal qui peut localement augmenter l'évapotranspiration, et qui n'est pas pris en compte avec entre autre ; non pris en compte dans le calcul :

- Les forêts, avec une interception plus importante des pluies par le feuillage (à plus forte raison si présence de conifères) ;
- Les zones humides, qui peuvent en avoir un K_c , coefficient cultural légèrement supérieur à 1.

Le choix de la RU / RFU et l'évaluation précise de la nature des sols du plateau, de leur réserve en eau et de leur comportement en période de sécheresse, paramètres estimés à l'échelle de la Dombes, influe de manière importante sur le bilan et donc reste un axe de travail majeur pour affiner le bilan.

L'évaporation à la surface d'eau libre des étangs est calculée par METEO France, sur la base de la formule de Penman modifiée pour intégrer l'effet du vent. Le vent n'est pas mesuré sur le plateau de la Dombes, mais il est statistiquement en augmentation sur la région lyonnaise ces dernières années (nombre de jours de vent/an).

Le débit des cours d'eau à l'exutoire

Les données sont celles enregistrées dans les stations de mesure de débit en continu des cours d'eau. Ces stations sont mesurées via une sonde de hauteur d'eau et une Loi hauteur/débit. Nous ne connaissons pas la précision du calage et la fiabilité de la loi hauteur/débit qui peut être moindre sur les extrêmes (débit d'étiage sévère, débit de crue).

Drainage des eaux souterraines par les cours d'eau

La correction opérée dans le bilan de flux du drainage des eaux souterraines par les cours d'eau (QMNAS), est en réalité non linéaire, il diminue au fur et à mesure que le niveau de nappe dans l'aquifère baisse en période d'étiage, et augmente en période de hautes eaux. La prise en compte d'une valeur plus fiable nécessite une étude des courbes de tarissements des cours et probablement le calage d'un modèle eaux de surface et eaux souterraines. On notera que la variabilité du drainage des eaux souterraines dans le temps est beaucoup plus faible que les variations de débit des cours d'eau liées aux précipitations sur le bassin versant.

Rôle tampon de réservoirs intermédiaires dans les moraines

Des réservoirs intermédiaires dans les moraines (niveaux plus graveleux) ont été identifiés dans les coupes géologiques des sondages du plateau, mais leur extension et leur rôle ne sont pas appréhendés aujourd'hui.

Rôle des étangs

Pour mieux comprendre et intégrer le rôle des étangs dans le bilan, les données manquantes sont les suivantes :

- Les volumes d'eau stockés à instant donné dans l'étang, qui ne fait l'objet d'aucun suivi ;
- Le volume de rétention de chaque étang non connu avec précision (il est aujourd'hui approché) ;
- Le volume d'eau déstocké en sortie d'étang, en cas d'excès d'eau ou en cas de vidange en aval des chaînes d'étang, dans le réseau hydrographique, non mesuré, même si les périodes de vidanges sont connues par les exploitants (principalement en automne)

Les étangs ont été construits dans des dépressions semi-fermées à fond argileux, supposées retenir l'eau. L'infiltration vers les nappes à partir des fonds d'étang est supposée faible à nulle. Mais il n'est pas exclu que certains étangs puissent participer à la recharge. Les résultats des suivis réalisés sur 2 chaînes d'étangs actuellement en cours d'acquisition par l'ISARA doivent permettre de mieux comprendre le rôle des étangs.

Le principal enseignement c'est qu'aujourd'hui le remplissage des étangs a un impact sur le débit des cours d'eau après une année sèche par interception du ruissellement, et plus généralement sur le cycle de l'eau par augmentation de l'évaporation en surface de l'étang.

Le rôle des drains agricoles

Ces drains avaient initialement pour fonction de désengorger les sols argileux, pour ne pas saturer en permanences certaines cultures. Compte tenu de l'évolution climatique constatée sur la Dombes, ils pourraient jouer, en situation de déficit pluviométrique chronique, un

facteur aggravant dans les mécanismes de recharge de la nappe, en évacuant trop vite des eaux qui peinent à s'infiltrer.

Il n'existe pas de cartographie de ces drains à l'échelle du plateau. Un travail sur la position de ces drains et leur rôle doit être envisagé (à priori possible, en exploitant les archives voire les données du LIDAR du territoire).

6.4.5 Interprétation des résultats

Le chiffre moyen de recharge proposé sur 10 ans ($55 \text{ Mm}^3/\text{an}$) est du même ordre de grandeur que la valeur des débits cumulés des résurgences nappes/rivières (cf. partie 4.4), évalué à $60 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (+/-10%). Sans intégrer à ce stade les prélèvements anthropiques, cette correspondance consolide d'une certaine façon les résultats du calcul. Cela ne serait pas le cas si le résultat du calcul était le double : le système serait en sur équilibre, avec beaucoup trop de volume d'eau « entrant » comparé au volume « sortant ». Idem s'il était inférieur de moitié (le système serait alors en sous équilibre avec pas assez d'eau entrante par rapport à ce qui ressort naturellement de l'aquifère).

La lecture en valeur moyenne fait perdre de vue la dynamique du système et la forte variabilité du bilan selon les années :

- Les années de forte recharge (2013, 2014), l'infiltration efficace atteint les 100 Mm^3 , couvrant largement les besoins anthropiques annuels (16 Mm^3) et les pertes de la nappe vers les milieux naturels ($50\text{-}70 \text{ Mm}^3$).
Le bilan est positif et le système peut reconstituer ses réserves, voire accumuler un excédent ;
- Les années de faible recharge (2017, 2020), l'infiltration efficace n'est plus que de 15 à 20 Mm^3 . Ce volume ne suffit plus à compenser les prélèvements anthropiques et la vidange naturelle de la nappe.
Le bilan devient négatif, le système mobilise ses réserves pour soutenir les besoins et voit son stock diminuer.
- Ces résultats sont proposés à une échelle globale, ils masquent les problématiques locales. L'analyse pourrait différer si nous redescendions à l'échelle des sous-bassins versants, puisque la nappe est +/- bien alimentée selon les compartiments considérés, compartiments eux même +/- sollicités pour les prélèvements. Une lecture à une échelle plus fine nécessiterait d'avoir une carte piézométrique précise et actualisée ...

7. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES LIEUX :

La nappe des cailloutis de la Dombes est établie au sein d'une puissante série sédimentaire correspondant à un épandage massif de galets et de sables fins, charriés par les eaux du Rhône à la fin de l'ère Tertiaire (hypothèse la plus vraisemblable). Cette nappe, aujourd'hui recouverte par une épaisse couche de dépôts glaciaires (moraines) et éoliens (loess), s'étend sur toute la surface du plateau de la Dombes avec une épaisseur et une profondeur variable. Elle est délimitée de façon très nette à l'Est, à l'Ouest et au Sud par les côtières de l'Ain, de la Saône et du Rhône. Sa limite Nord reste plus approximative puisqu'elle vient se fondre avec la nappe des sables du pliocène au fur et à mesure que l'on se rapproche du lit de la Veyle.

Cette nappe est uniquement alimentée par les précipitations directes, et seule une petite fraction de la pluie brute parvient à s'infiltrer à travers la couverture de dépôts glaciaires (moraine et loess peu perméables) pour atteindre les cailloutis. Les loess (de 1 à 5 m d'épaisseur), sols fins et hydromorphes présents en surface, favorisent le ruissellement. La couverture morainique, plus ou moins perméable et très épaisse par endroit, fait globalement obstacle à la recharge de la nappe sous-jacente.

Les secteurs qui constituent à priori des zones de recharge préférentielle semblent localisés sur la partie Centre-Est du plateau, correspondante au dôme piézométrique et associée à une moindre épaisseur de la couverture de la moraine.

La nappe des cailloutis ne constitue pas une masse d'eau statique et hermétique. L'eau s'écoule tangentiellement, sous l'effet du gradient hydraulique, depuis le dôme piézométrique vers les zones périphériques où une partie de cette eau vient alimenter des sources en côte et des résurgences en rivière. Le débit cumulé de l'ensemble des sources/résurgences est évalué à 60 Mm³/an (+/- 10%).

Le fonctionnement global de l'aquifère des cailloutis de la Dombes est bien appréhendé mais, compte tenu de son extension géographique (1500 km² environ) et de la forte variabilité latérale et verticale observée au sein des différentes formations géologiques rencontrées, les choses restent difficiles à apprécier dans le détail.

Les connaissances les plus fines ont été acquises autour des champs captant pour l'eau potable (AEP). Aucune prospection géophysique n'a été menée à l'échelle du Plateau et certains secteurs n'ont jamais été investigués. Des compléments de recherche seraient utiles pour mieux appréhender l'hétérogénéité spatiale des cailloutis et des moraines (épaisseur, perméabilité, etc ...), en particulier autour du dôme piézométrique.

Du point de vue climatique, on constate à partir des chroniques météorologiques passées (pluie, température, évapotranspiration) et des observations des acteurs du territoire (baisse

du débit des cours d'eau, soutien d'étiage de plus en plus faible, difficultés à remplir les étangs, baisse des niveaux piézométriques) le basculement récent du plateau vers un régime plus sec, en rupture avec des conditions historiques réputées humides.

Cette évolution récente se caractérise par :

- Un déficit pluviométrique plus ou moins marqué depuis 2015, accentué par des épisodes de canicule estivale quasi systématiques ces dernières années, qui viennent déshydrater les sols sur des profondeurs de plus en plus importantes. La saturation des sols devient de plus en plus rare avec la baisse des pluies efficaces, or ce n'est qu'en condition de saturation des sols en eau que l'on peut espérer voir la nappe se recharger et les étangs se remplir dans le contexte très particulier de la Dombes. Entre 2015 et 2022, le déficit pluviométrique correspond à 2 années de pluie efficace, alors que l'année 2021 a été excédentaire ! Ce phénomène est peut-être conjoncturel, car on ne constate pas de tendance à la baisse de la pluviométrie (ou une très légère baisse) sur une période de 30 ans (1992-2021), mais il peut aussi être annonciateur d'une évolution du climat local vers un climat plus sec.
- Une augmentation linéaire des températures (+0,4°C de température moyenne annuelle tous les 10 ans) et de l'évapotranspiration (+40 mm/an tous les 10 ans), qui vient là encore renforcer l'assèchement des sols.

Il est également évoqué l'hypothèse d'une augmentation de l'intensité des pluies qui, à quantité égale sur l'année, viendrait encore favoriser le ruissellement au détriment de l'infiltration (l'influence de ce paramètre n'a pas pu être étudiée dans le cadre de cette étude).

Les mécanismes de recharge ont pu être objectivés à partir d'une analyse corrélatrice des relevés piézométriques. Cette analyse met en évidence une corrélation forte avec les pluies efficaces au niveau de la zone de recharge, une forte inertie du système pour les secteurs éloignés de la zone de recharge, et probablement de moindres apports souterrains vers la partie Sud-Ouest du plateau (expliquant depuis 2015 la baisse piézométrique à Villeneuve et Tramoyes, la baisse de productivité des captages de Civrieux, Monthieux et Pizay). Les 8 nouveaux points de suivi en continu (bientôt 9) mis en place par le Conseil Départemental apporteront un gain considérable en matière de compréhension de la dynamique de cet aquifère.

Le volume de l'infiltration efficace (représentatif de la recharge de la nappe), évalué par la méthode du bilan hydrologique, fait état d'une recharge moyenne sur la période 2012-2021 de 55 Mm³/an (+/- 30%). Ce chiffre masque le contraste important entre les années excédentaires (2013 et 2014, 100 Mm³ de recharge annuelle environ) et les années sèches (2017-2022, 15 Mm³/an). En moyenne, la recharge est de 74 Mm³/an entre 2012 et 2016 et de seulement 36 Mm³/an entre 2017 et 2021.

Dans le contexte de la Dombes, seule une petite fraction de la hauteur de pluie totale gagne la zone saturée et contribue à la recharge effective de la nappe des cailloutis. Reprenant les chiffres du bilan hydrique, la figure 50 illustre la répartition des pluies brutes selon les principaux compartiments de l'hydrosystème : atmosphère (évaporation + transpiration végétation), surface (ruissellement vers les cours d'eau + étangs) et souterrain (infiltration profonde). Cette figure montre à quel point les volumes disponibles pour alimenter les milieux humides superficiels et les réservoirs souterrains sont affectés à la baisse en année sèche, tandis que les pertes par évapotranspiration restent relativement constantes.

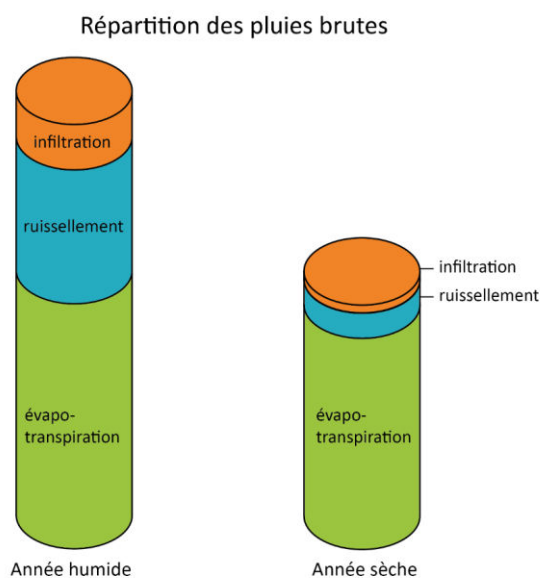


Figure 50 : bilan hydrique global selon année humide/sèche

Pour évaluer l'équilibre de la ressource en eau souterraine au regard de sa recharge, les chiffres doivent être mis en perspective avec « ce qui sort », autrement dit les exports. Les exports sont de deux types :

- Les prélèvements anthropiques, pour desservir les différentes activités telles que décrites dans le rapport 1A. Les prélèvements sur la nappe des cailloutis, tous usages confondus, se situent actuellement autour de 16 Mm³/an. Cette valeur est relativement stable selon les années ;

- Les sorties naturelles de la nappe vers les milieux (cf. partie 4.4), évaluées à 60 Mm³/an environ. En première approximation, compte tenu de l'inertie du système, nous pouvons considérer cette valeur comme stable selon les années.

La figure 51 illustre la différence de situation entre année humide / sèche, avec un volume total infiltré (en beige) qui compense ou pas la somme des sorties naturelles (résurgences) et anthropiques (prélèvements) ; lorsque cette compensation n'est pas faite, l'équilibre n'est plus assuré et on vient alors mobiliser la réserve en eau de cette nappe ...

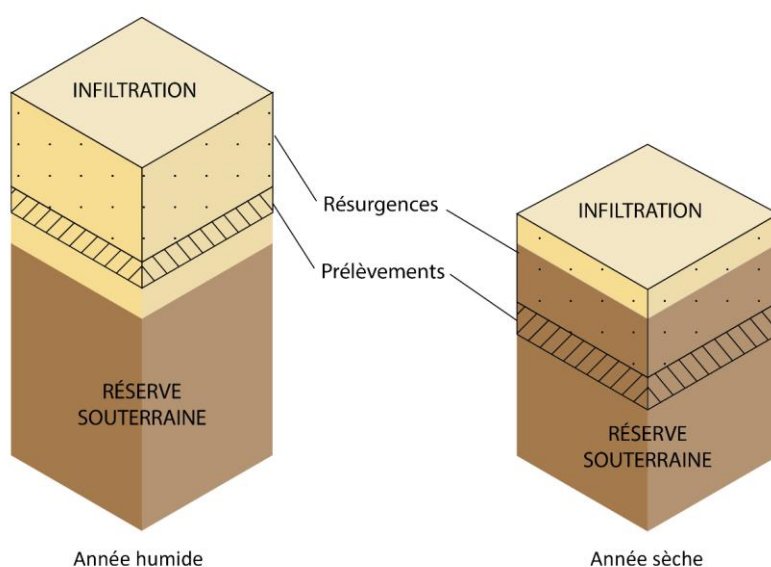


Figure 51 : bilan besoins / ressource selon années sèches et humides

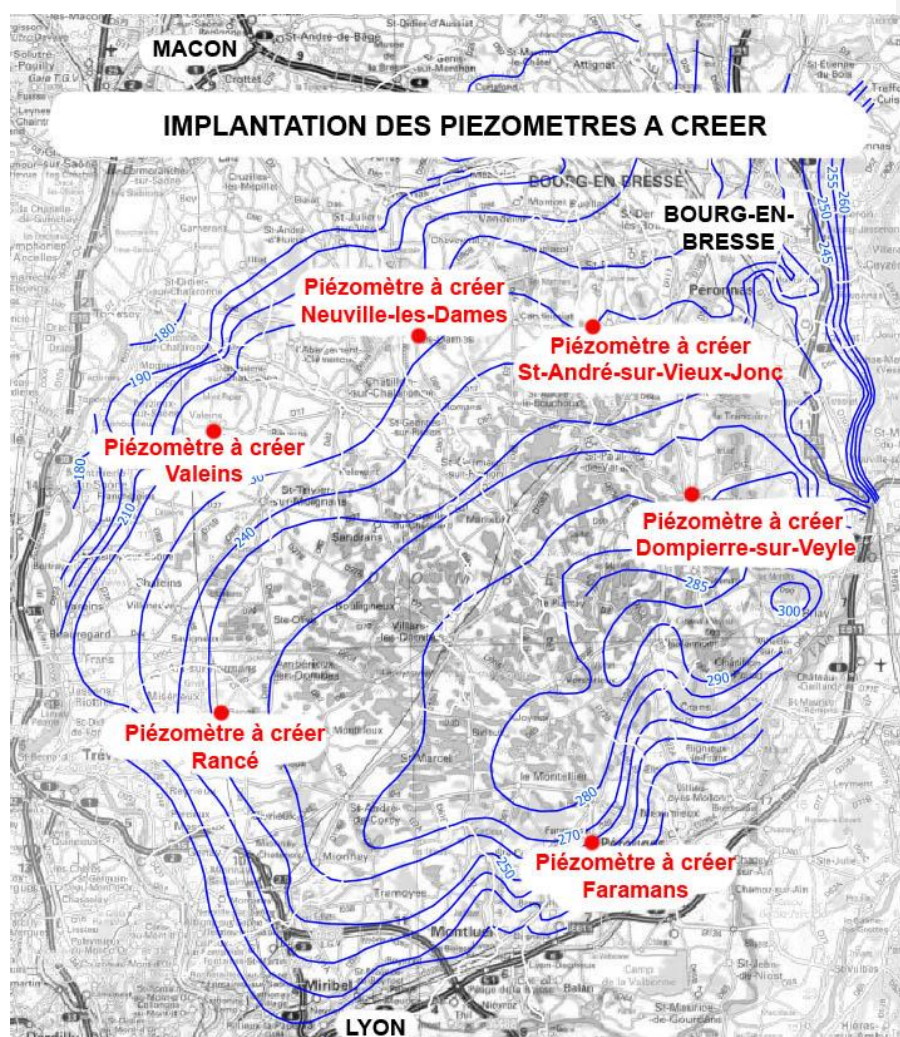
Ainsi, pour que le système soit équilibré, les apports (infiltration) doivent compenser les exports (prélèvements + résurgences). Les résultats du bilan d'infiltration montrent que la situation oscille entre des années où l'équilibre est assuré et des années où il ne l'est pas. Les années de suréquilibre, l'excédent peut venir compenser un éventuel déficit de l'année passée ou de l'année suivante. En revanche, en cas de succession d'années déficitaires, les déficits ne sont plus compensés d'une année sur l'autre et le système voit ses réserves se contracter progressivement, et le déficit se creuser d'année en année.

Depuis 2015, l'équilibre général du système semble avoir été affecté. La situation n'est pas égale en tout point du territoire et les premiers secteurs impactés sont ceux qui bénéficient d'une moindre alimentation de la nappe. Sur ces secteurs, il faudra attendre de basculer dans une période durablement excédentaire en pluie pour reconstituer les stocks et voir les niveaux piézométriques remonter aux niveaux antérieurs à 2015.

Actuellement, la piézométrie mesurée sur ces secteurs n'a jamais atteint des niveaux aussi bas depuis que les relevés existent, nous plaçant dans une situation encore jamais vécue. Les usages AEP ont d'ores et déjà été impactés avec des productivité d'ouvrage qui nettement chuté (Civrieux, Monthieux, Pizay). Les années qui viennent seront certainement déterminantes pour tous les usages dépendant de la nappe sur ces secteurs.

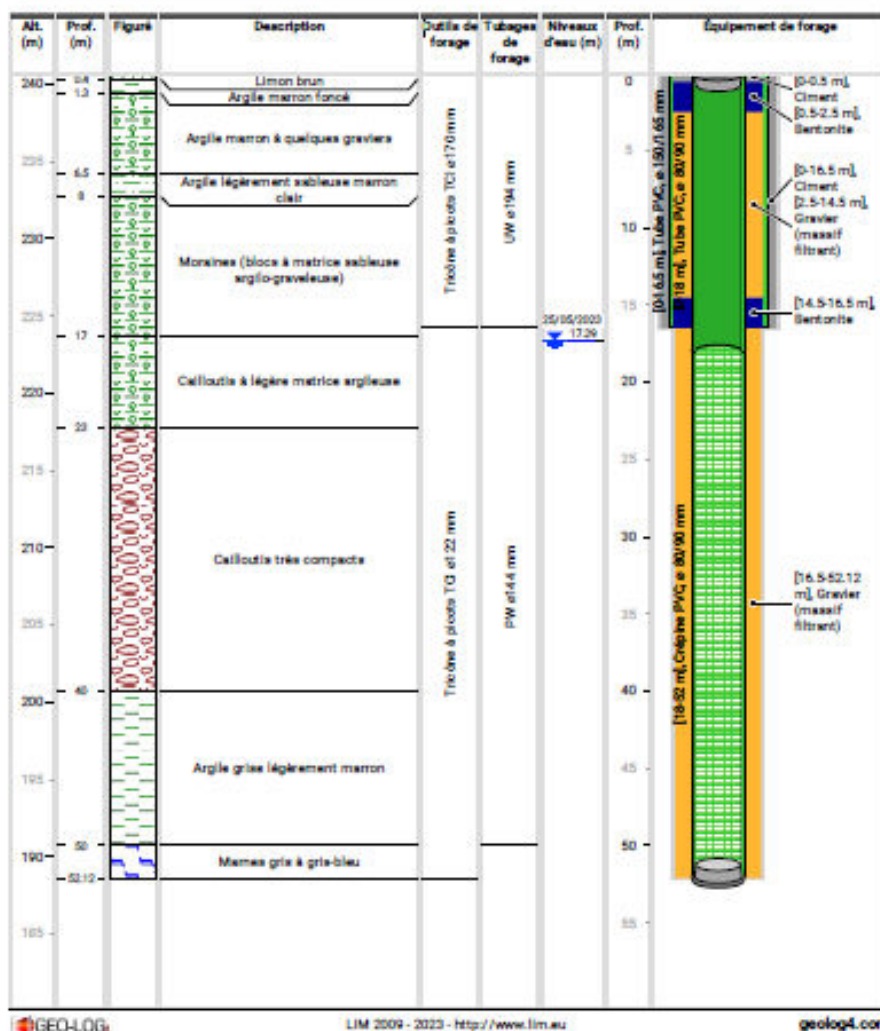
La réalité du changement climatique s'impose brutalement depuis quelques années. Quelles seront les conséquences sur la ressource et les usages, c'est que nous verrons dans la phase 2 de la démarche, avec le diagnostic tendanciel 2050 du territoire.

8. ANNEXE 1 : INFORMATIONS RELATIVES AU RENFORCEMENT DU RESEAU DE SUIVI PIEZOMETRIQUE PAR LE DEPARTEMENT DE L'AIN

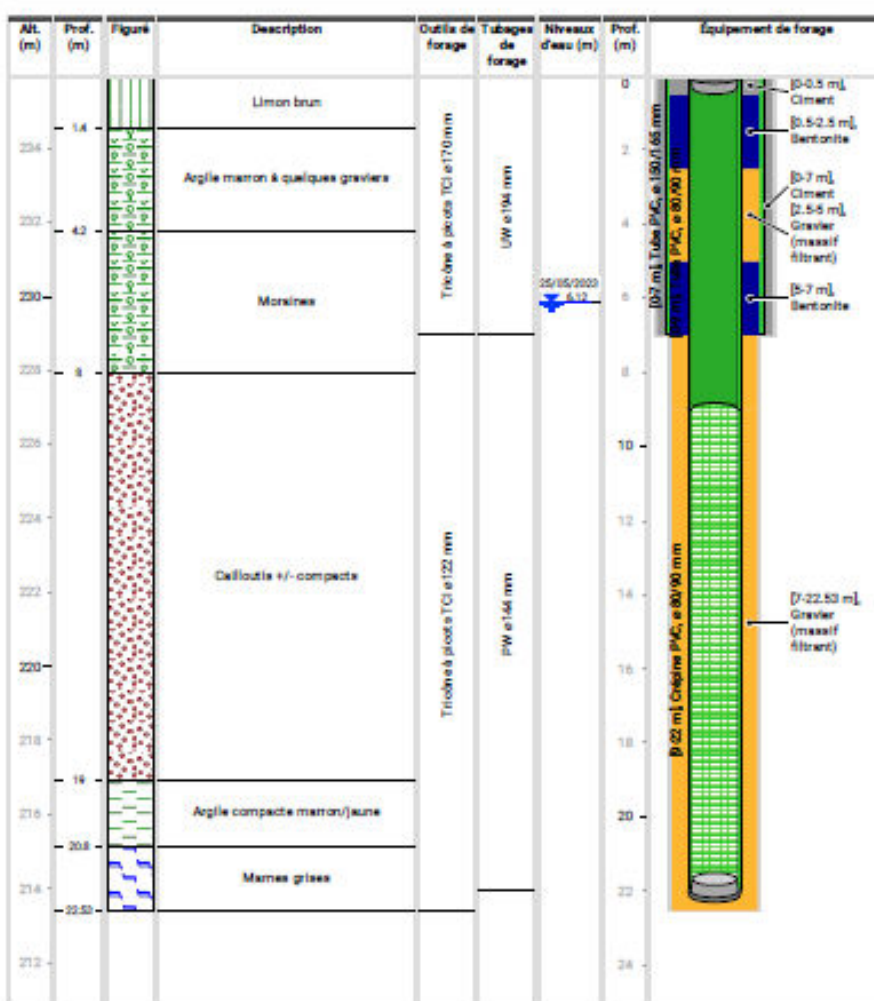


Observation

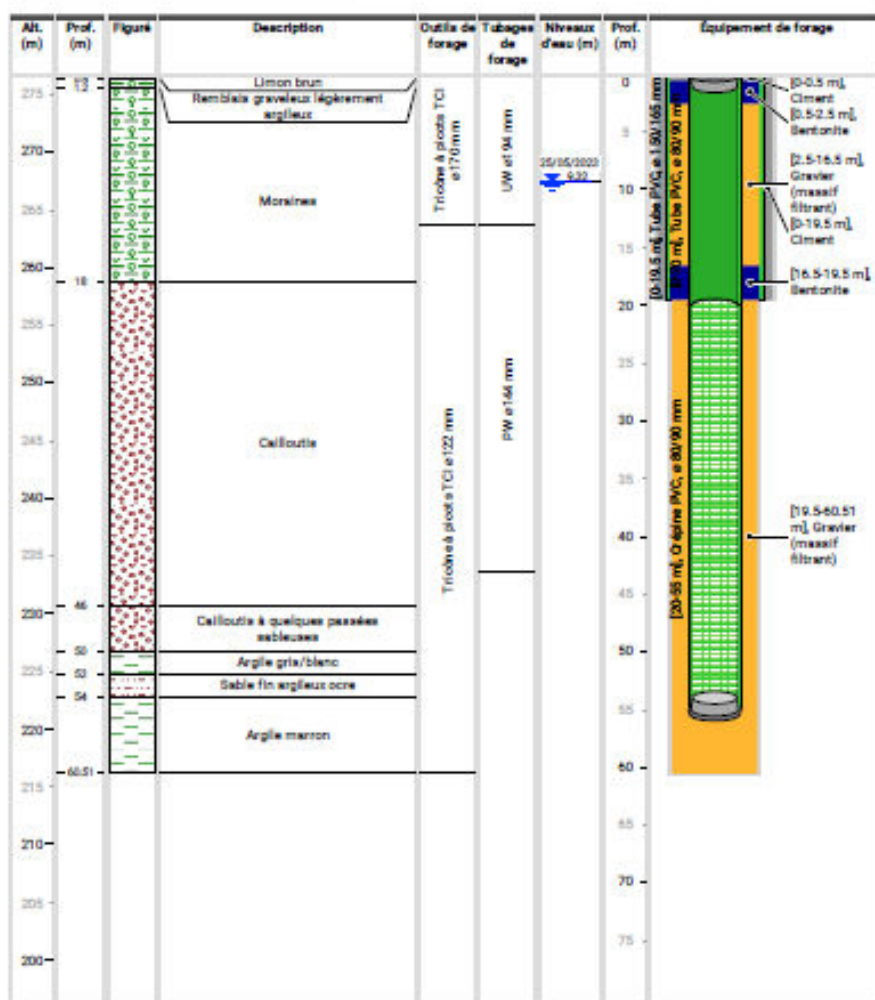
Forage P21	Chantier NEUVILLE LES DAMES	Dossier LY22 13265-3
Pléziomètre		
Date de début 20/03/2023	Cote début 0 m	Machine GEO 601 (3178)
Opérateur OC	Cote fin 52.12 m	Outil de forage Tricône à picots TCI Diamètre de l'outil 170 mm, 122 mm
X 855 194.563	Y 6 563 502.212	Altitude 240.722 m (massif béton)



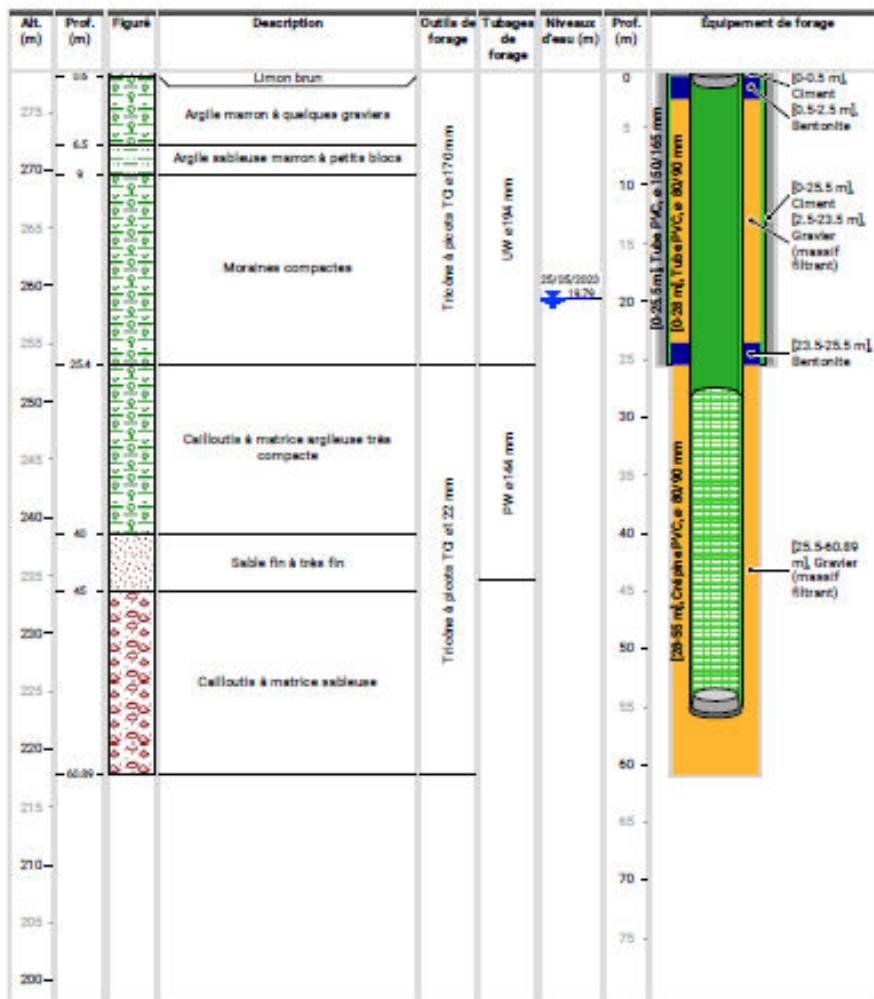
 Antémis G E O T E C H N I Q U E Rue du Développement - 91900 GUENICHY Tél. : 01 55 88 22 38 - Fax : 01 70 69 17 33 Observation	Forage P22	Chantier SAINT ANDRE SUR VIEUX JONC	Dossier LY22 13265-5
	Pléziomètre Date de début 22/03/2023 Cote début 0 m, 6.51 m Machine GEO 601 (3178) Opérateur OC Cote fin 22.53 m Outil de forage Tricône à picots TCI Diamètre de l'outil 170 mm, 122 mm		
	X 865 064.629	Y 6 563 940.468	Altitude 235.937 m (massif béton)



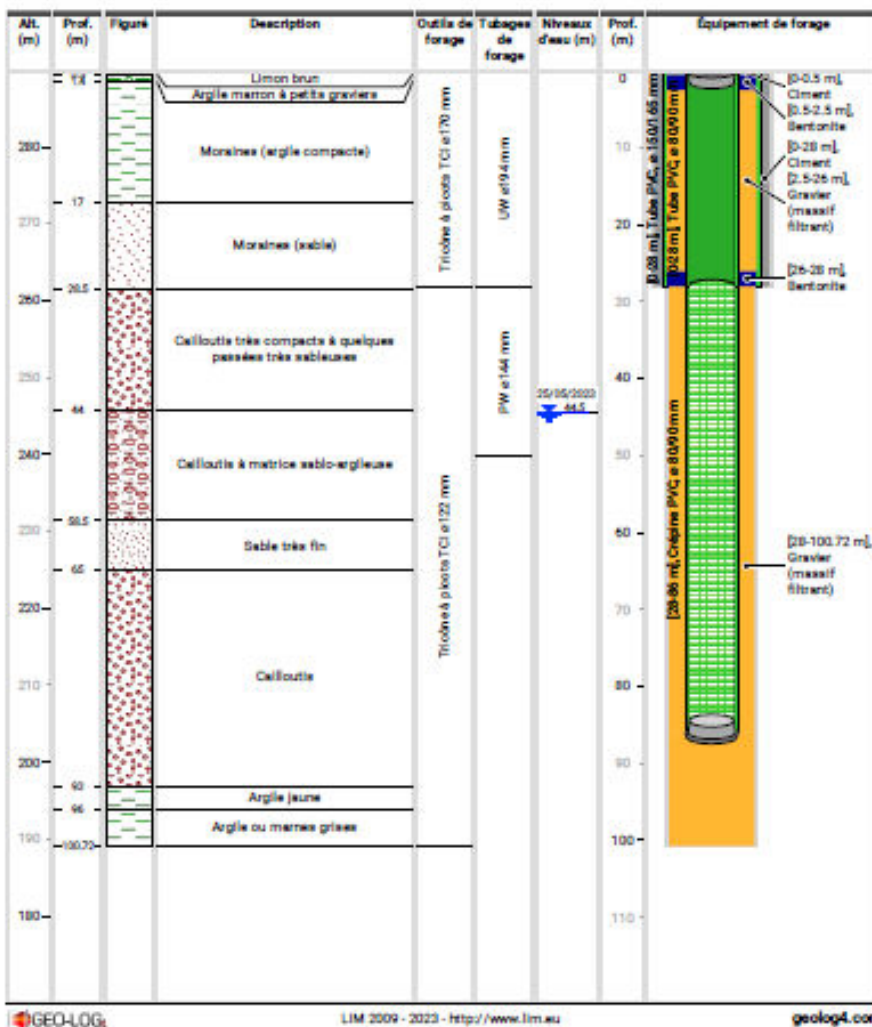
Forage P23	Chantier DOMPIERRE SUR VEYLE	Dossier LY22 19265-1
Pléziomètre		
Date de début 23/03/2023	Cote début 0 m	Machine GEO 601 (3178)
Opérateur GC	Cote fin 60.51 m	Outil de forage Tricoène à plots TCI
		Diamètre de foutil 170 mm, 122 mm
X 870 034.509	Y 6 554 822.315	Altitude 276.71 m



 Antémys GEOTECHNIQUE Rue du Développement - 04900 GUERINCH Tél. 04 93 85 23 18 - Fax 04 93 85 17 58 Observation	Forage P24	Chantier FARAMANS	Dossier LY22 13265-2
	Piézomètre		
	Date de début 28/03/2023	Cote début 0 m	Machine GEO 601 (3178)
	Opérateur QC	Cote fin 60.89 m	Outil de forage Tricoïne à picots TCI
			Diamètre de l'outil 170 mm, 122 mm
	X 864 940.277	Y 6 535 740.972	Altitude 278.662 m (massif béton)



Forage P25	Chantier RANCE	Dossier LY22 13265-4
Piézomètre		
Date de début 31/03/2023	Cote début 0 m	Machine GEO 601 (3178)
Opérateur GC	Cote fin 100.72 m	Outil de forage Tricoène à plots TCI
		Diamètre de foutil 170 mm, 122 mm
X 844 551.510	Y 6 542 608.182	Altitude 289.922 m (massif béton)



9. ANNEXE 2 : DETAIL DES FORMULES DE CALCUL UTILISEES POUR EVALUER L'EVAPOTRANSPIRATION

Formule du TURC (évolution ETR, pas annuel, empirique)

$$ETR = \frac{P}{(0.9 + P^2/L^2)^{1/2}} \quad L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

P = pluie annuelle en mm.
T = température moyenne annuelle en °C.

Formule du Penman-Monteith (ETP journalière)

La formule de PENMAN – MONTEITH est une combinaison du bilan énergétique et de la méthode de transfert de masse. Parmi les différentes méthodes de calcul des ETP, elle est recommandée par la FAO (Allen et al, 1998). Cette formule brute se présente comme suit :

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_w - e)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

R_n : rayonnement net

G : flux de chaleur du sol

ρ_a : densité moyenne de l'air

c_p : chaleur spécifique d'air

λ : chaleur latente de changement d'état (2450 kJ.kg⁻¹)

e : tension de vapeur à la température t

e_w : tension de vapeur saturante à la température t

Δ : la pente de la courbe de tension de vapeur saturante

r_a : la résistance aérodynamique

r_s : la résistance du couvert végétal

γ : la constante psychrométrique

10. ANNEXE 3 EVOLUTION DES PRECIPITATIONS BRUTES ET EFFICACES ANNUELLES (FORMULE EMPIRIQUE DE TURC) ET DES TEMPERATURES ANNUELLES

