HAL
open science

# Compréhension expérimentale et numérique des chemins de l'eau sur l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon

Aurore Réfloch

▶ **To cite this version:**

Aurore Réfloch. Compréhension expérimentale et numérique des chemins de l'eau sur l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon. Hydrologie. Université Grenoble Alpes, 2018. Français. NNT : 2018GREAU015 . tel-01863921

**HAL Id: tel-01863921**

**https://theses.hal.science/tel-01863921v1**

Submitted on 29 Aug 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Communauté UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

# THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par **Aurore RÉFLOCH**

Thèse dirigée par **Laurent OXARANGO**

préparée au sein de l'**I**nstitut des **G**éosciences de l'**E**nvironnement et de la Direction de l'Eau de la Métropole de Lyon
dans **l'École Doctorale Terre, Univers, Environnement**

# Compréhension expérimentale et numérique des chemins de l'eau sur le champ captant de la Métropole de Lyon

Thèse soutenue publiquement le **31 mai 2018**
devant le jury composé de :

**M. Olivier BOUR**
Pr. Université de Rennes 1, Rapporteur
**M. Hervé JOURDE**
Pr. HydroSciences Montpellier, Rapporteur
**M. Christian GEINDREAU**
Pr. Université de Grenoble Alpes, Président du Jury
**M. Pierre PERROCHET**
Pr. Université de Neuchâtel, Examinateur
**M. Laurent OXARANGO**
Pr. Université de Grenoble Alpes, Directeur de thèse
**M. Jean-Paul GAUDET**
IGR. Université de Grenoble Alpes, Co-Directeur de thèse

**Mme. Anne PERRISSIN**
IG. Métropole de Lyon, Invitée
**M. Yvan ROSSIER**
PAST. Université de Grenoble Alpes, Invité

## RÉSUMÉ

L'alimentation en eau potable des 1 300 000 habitants de la Métropole de Lyon provient essentiellement de réserves souterraines, puisées sur le site du champ captant de Crépieux-Charmy. Ce captage est un système complexe de par sa superficie (375 ha), le nombre d'ouvrages de pompage (111 puits et forages), le système de réalimentation artificielle (12 bassins d'infiltration), la présence de différents bras du Rhône en interaction avec l'eau souterraine, mais également du fait de la complexité lithologique naturelle du sous-sol. La compréhension des interactions entre les compartiments de ce système est nécessaire pour assurer la pérennisation quantitative et qualitative de la ressource.

La caractérisation des écoulements repose sur trois outils essentiels : l'observation, l'expérimentation et la modélisation numérique.

L'observation, basée sur les nombreuses données acquises in-situ, met en évidence le rôle prépondérant de l'exploitation hydrique du site sur les écoulements (pompages et bassins). La réalimentation artificielle met en jeu, annuellement, un volume d'eau qui équivaut à la moitié du volume puisé sur l'ensemble du site, et entraîne un réchauffement non négligeable de la nappe en période estivale. Les cartes piézométriques et thermiques à l'échelle du champ captant permettent de visualiser les évolutions spatiales et temporelles des écoulements. D'après l'analyse de données, le dôme hydraulique créé par la réalimentation artificielle (et destiné à obtenir une barrière hydraulique de protection contre une contamination accidentelle des eaux de surface) semble perdurer au maximum 1 à 2 jours après l'arrêt de l'alimentation des bassins. Un indice d'infiltrabilité est défini pour déterminer la capacité d'infiltration de chaque bassin : tenant compte des diverses variables affectant la vitesse d'infiltration, une diminution temporelle de l'indice d'infiltrabilité reflète le colmatage progressif de la couche de sable de fond de bassin. Cet indice est de ce fait un outil d'aide à la décision pour la priorisation des bassins à réhabiliter.

Le volet expérimental se décline en deux points : la caractérisation des fonds de bassins par essais d'infiltration (gain d'infiltrabilité par renouvellement du sable, couche compactée sous le sable caractérisée par une forte anisotropie de sa conductivité hydraulique) et la caractérisation des sens d'écoulement par traçage thermique à l'échelle d'un bassin. Un dispositif expérimental, créé de part et d'autre d'un des bassins permet de suivre l'évolution piézométrique et thermique lors des cycles de remplissage. La création des 31 ouvrages de ce dispositif expérimental a permis de mieux caractériser la lithologie en présence, de valider la présence de la zone non saturée règlementaire au droit du bassin, de confirmer l'existence d'écoulements sous le Vieux-Rhône mais aussi de mettre en évidence le fonctionnement 3D des écoulements.

Enfin, un modèle numérique a été créé pour simuler les transferts d'eau et de chaleur, sur l'ensemble du site de captage. Cet outil permet d'identifier et de quantifier les sources d'alimentation de la zone de captage, de mettre en évidence la protection partielle des ouvrages de pompage par les dômes hydrauliques créés par les bassins, et de montrer la complexité des relations nappe-rivière, notamment leur dépendance au niveau d'eau. D'ores et déjà opérationnel pour des temps longs (supérieurs à 15 jours), l'outil numérique proposé est exploitable pour des scénarios d'évolutions climatiques ou d'évolutions de l'exploitation du site. Pour les temps inférieurs à deux semaines, le modèle nécessite une amélioration de la connaissance des interactions nappe-rivière et des transferts thermiques (prise en compte du non-équilibre thermique local).



**Mots clés** : Hydrogéologie, réalimentation artificielle, essais d'infiltration, traçages thermiques, modélisation hydro-thermique 3D.

## ABSTRACT

The supply of drinking water for the 1,300,000 inhabitants of Lyon Metropole mainly comes from underground reserves in the well field of Crépieux-Charmy. This well field is a complex system because of its surface area (375 ha), the number of pumping wells (111 wells), the artificial recharge system (12 infiltration ponds), the interaction between the Rhône River and groundwater, as well as its natural lithological complexity. Understanding the interactions between the compartments of this system is necessary to ensure quantitative and qualitative sustainability of the water resource.

The characterization of field-scale flows is based on three essential tools: observation, experimentation and numerical modelling.

The observations, based on a lot of operational field data, highlight the influence of site operation on the flows (pumping and basins). Annually, artificial recharge requires a volume of water which accounts for half of the volume pumped on the whole site. This also leads to a significant rise in water table temperatures during summer periods. Piezometric and water temperature maps at the well field scale allow for visualization of the spatial and temporal evolutions of the flow directions. According to the data analysis, hydraulic domes created by the artificial recharge (and designed to provide a hydraulic barrier to protect against accidental contamination of superficial water) seem to persist for a maximum of 1 to 2 days after water supply of the basins has been stopped. An infiltration index has been defined in order to determine the infiltration capacity of each basin. It takes into account the multiple variables affecting the infiltration rate. The temporal evolution of the infiltration capacity of each basin illustrates the fouling of the basement sand layer. The infiltration index is also a decision support tool for the prioritization of basins to be rehabilitated.

The experimental component is divided into two parts: basins characterization by infiltrometer tests (increase of infiltration by renewal of the sand layer, compacted layer under the sand characterized by a strong anisotropy of its hydraulic conductivities) and characterization of the flow direction by heat tracing at scale of an infiltration pond. An experimental system, created on both sides of one of the basins allows tracking of the evolution of piezometric and water temperature during filling cycles.
The creation of the 31 piezometers of this experimental system enabled better characterization of the lithology of the ground, to validate the conservation of the unsaturated zone under the basin, to confirm the existence of flows under the Vieux-Rhône River, and to highlight the three-dimensional flows.

A digital model has been created to reproduce water and heat transfer on the entire well field. This tool is used to identify and quantify the sources of water of the water catchment area, to highlight the partial protection of the pumping wells by the hydraulic domes, and to show the complexity of the groundwater-river relationship, in particular their dependence on the water level. Already operational on long periods (over 15 days), the proposed digital model is useful for scenarios of climate change or changes in operational conditions. For periods shorter than two weeks, the model requires an improvement in the knowledge of groundwater-river interactions and heat transfer (taking into account the local thermal non-equilibrium).

**Key words**: Hydrogeology, artificial recharge, infiltrometer tests, heat tracing, 3D hydro-thermal modelling.

## REMERCIEMENTS

Le début de ce travail remonte à 2014 et mon arrivée sur Lyon. Ville qui m'était jusque-là inconnue, mais qui m'a pourtant accueillie à bras ouverts, et ce dès le premier jour ! Naviguant entre Lyon et Grenoble puisqu'il s'agissait d'un travail collaboratif entre l'Université de Grenoble Alpes, la Métropole de Lyon et Eau du Grand Lyon, je tenais à remercier les nombreuses personnes qui ont partagé mon quotidien…

Je remercie tout d'abord mes **encadrants de thèse** de l'Université de Grenoble Alpes, du laboratoire IGE : Laurent Oxarango, Yvan Rossier et Jean-Paul Gaudet. Chacun m'apportant ses compétences tout au long de ce travail de thèse, parfois tumultueux, me permettant ainsi d'aboutir à la finalisation de ce manuscrit. Ce travail aura été très riche tant d'un point de vue de l'enrichissement professionnel que de l'enrichissement personnel.

Jean-Paul, un merci tout particulier pour votre patience face à mes questionnements, mes doutes et mes remises en question permanentes. Nos journées du mardi ont été plus que nécessaires pour la réussite de ce travail !

Je remercie également l'ensemble des membres de l'IGE. Je pense notamment aux membres de mon comité de thèse et aux compagnons des repas de midi au No-Name qui se reconnaitront !

Je remercie Olivier Bour et Hervé Jourde pour avoir accepté d'être les **rapporteurs** de mon travail de thèse. Je tiens également à remercier tous les membres du jury pour leur présence et leur participation à l'évaluation de ce travail.

Ce travail de thèse n'aurait pas pu avoir lieu sans le **financement** de la Métropole de Lyon et de la société dédiée Eau du Grand Lyon. Un grand merci pour la confiance que vous avez su m'accorder.

Ne passant que peu de temps physiquement dans les bureaux de la **Métropole de Lyon**, je tiens à remercier toute l'équipe ESO de la Direction de l'Eau, et notamment Anne Perrissin, responsable de l'Unité Ressource. Merci à toute l'équipe ESO pour votre accueil dès le premier jour, merci pour les échanges professionnels tant nécessaires qu'enrichissants, merci pour les midis partagés dans la salle de réunion qui ont souvent suscité de réels fous rires, merci pour les sorties extérieures (je pense notamment à la soirée au laser-game) qui nous ont permis de se découvrir sous un nouveau jour !

La grande majorité de mon temps de travail s'est déroulé au sein de l'usine de production de Croix-Luizet, auprès des équipes de la société dédiée **Eau du Grand Lyon**. Encore une fois c'est un accueil très chaleureux qui m'a été réservé.

Frédéric, tu étais l'interlocuteur de ce travail de thèse. Je te remercie pour la confiance que tu m'as accordée, notamment avant le démarrage de la thèse en me proposant un contrat de travail en attendant la régularisation administrative de démarrage de thèse.

Merci à Gilles et Roger : faisant anciennement partie de l'équipe Ressource, vous m'avez accompagnée sur le terrain, et m'avez transmis une grande connaissance du site de captage. Roger, partageant ton bureau, j'ai passé de nombreuses heures à tes côtés et j'espère que cela n'aura pas été l'épreuve la plus énergivore de ta carrière ! Pour moi, tu as été un soutien très fort tout au long de ces trois années, tant d'un point de vue professionnel que personnel. Je te remercie pour ta présence, ta gentillesse et ta bienveillance « *Oh regarde, la fleur a bougé !* »

Je tiens à remercier l'équipe que j'aurai sans nul doute sollicitée le plus souvent au cours de ces travaux de thèse : le poste de commande de Croix-Luizet. « *Dis, pourquoi il ne fonctionne pas le bassin 5-2 ?* », « *C'est possible d'arrêter tous les puits du poste n°12 ?* », … Merci à Thierry, responsable du poste de commande, ainsi qu'à toute l'équipe, d'avoir toujours accepté mes demandes d'exploitation spécifiques pour pouvoir mener mes expérimentations, et même d'avoir été intéressés de comprendre les enjeux et les objectifs de tous ces essais. Je suis

même souvent venue vous embêter les weekends : « *Bonjour c'est Aurore, tu peux m'ouvrir le portail s'il te plait ?* ». A tous les 13, je vous dis un grand Merci.
Je remercie enfin l'ensemble des autres services de l'usine de Croix-Luizet : le service Maintenance (les équipes Sites et Ouvrages, Electro-mécanique et Automatisme-Informatique-Industrielle), et le service Qualité Eau. Sans oublier tous les stagiaires et alternant(e)s que j'ai eu le plaisir de rencontrer au cours de ces trois années : je pense à Juliette, Eva, Léa et Fanny. Merci pour tous les instants que j'ai pu passer avec les unes et les autres. Une présence féminine de même génération ne fait jamais de mal au sein de l'usine de production !

Je souhaite remercier l'ensemble des membres de la **Plateforme Recherche** (Métropole de Lyon, Eau du Grand Lyon, Agence de l'Eau, Veolia VERI, Laboratoire du LEHNA, BURGEAP et IRSTEA Lyon). Se réunissant tous les 6 mois pour faire un point sur les avancées scientifiques sur le champ captant, tous ont toujours montré un réel intérêt pour les études en cours au sein de l'IGE, et des liens amicaux se sont créés avec le temps. Je pense notamment aux membres du LEHNA, avec qui j'ai passé le plus de temps, en partageant des instants sur le terrain lors d'expérimentations.

Pour finir, je tiens à remercier l'ensemble de ma famille - ma mère, mes frères/sœurs, cousins/cousines, oncles/tantes - et de mes amis bretons. M'éloigner géographiquement de vous tous n'était pas un choix facile, mais il était nécessaire : parfois il faut savoir écouter son cœur. Je vous remercie d'avoir, je pense, compris ma décision.

Si certains ne retrouvent pas leur nom dans cette liste de remerciements, ils le retrouveront sans doute dans ce qui suit. Vous avez tous joué un rôle très important pour moi, que ce soit professionnel ou personnel, au cours de ces trois années passées à vos côtés.

**MERCI À TOUS !**

**LISTE DES ACRONYMES** ..... **9**

**NOMENCLATURE** ..... **11**

**INTRODUCTION GENERALE** ..... **15**

**CHAPITRE I : LA RESSOURCE EN EAU, SES USAGES ET L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE – *EXEMPLE DE LA METROPOLE DE LYON*** ..... **21**

**I.1. LA RESSOURCE EN EAU SUR LA PLANETE ET SON UTILISATION** ..... **21**
*I.1.1. La répartition de l'eau sur la planète* ..... *21*
*I.1.2. Les usages de l'eau dans le monde* ..... *22*
**I.2. LES RESERVES D'EAU EN FRANCE** ..... **25**
*I.2.1. Quantité, qualité et prélèvements annuels* ..... *25*
*I.2.2. L'eau potable et la pérennisation de la ressource* ..... *25*
*I.2.3. La potabilisation et la distribution de l'eau* ..... *27*
**I.3. ZOOM SUR LA METROPOLE DE LYON** ..... **28**
*I.3.1. Contexte climatique, hydrographique et hydrogéologique de la région* ..... *28*
*I.3.2. L'eau potable de la Métropole de Lyon* ..... *32*

**CHAPITRE II : LA MODÉLISATION DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR** ..... **43**

**II.1. LA MODELISATION DES ECOULEMENTS EN NAPPE LIBRE** ..... **43**
*II.1.1. Ecoulement 3D dans un aquifère libre* ..... *43*
*II.1.2. Ecoulement en milieu variablement saturé : modèle de Richards* ..... *48*
**II.2. LE TRANSFERT DE CHALEUR EN MILIEU POREUX** ..... **50**
*II.2.1. Les mécanismes de transfert de chaleur* ..... *50*
*II.2.2. Hypothèse de l'équilibre thermique local : le modèle à une température* ..... *50*
*II.2.3. Les caractéristiques thermiques* ..... *50*
*II.2.4. La conservation de la chaleur* ..... *51*
*II.2.5. Les conditions initiales et conditions aux limites* ..... *52*
**II.3. METHODE DE RESOLUTION NUMERIQUE ET CODES DE CALCULS SELECTIONNES** ..... **53**

**CHAPITRE III : INSTRUMENTATION, MESURES IN-SITU ET OBSERVATIONS – *LES DONNEES TELE-GEREES, LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET LES OBSERVATIONS QUI EN DECOULENT*** ..... **59**

**III.1. L'OBSERVATION ET LE SUIVI DE LA RESSOURCE PAR L'EXPLOITANT** ..... **59**
*III.1.1. Les données disponibles concernant la ressource* ..... *59*
*III.1.2. Vérification, validation et manques de données dans les chroniques* ..... *66*
**III.2. UN DISPOSITIF EXPERIMENTAL POUR AMELIORER LES CONNAISSANCES** ..... **67**
*III.2.1. Présentation du dispositif expérimental* ..... *67*
*III.2.2. Connaissances acquises et observations réalisées* ..... *70*
**III.3. ÉVOLUTIONS PIEZOMETRIQUES A L'ECHELLE DU CHAMP CAPTANT** ..... **81**
*III.3.1. Objectifs et méthodologie* ..... *81*
*III.3.2. Évolution dans le temps et dans l'espace des niveaux de nappe* ..... *81*
**III.4. ÉVOLUTIONS DES TEMPERATURES DE NAPPE SUR LA TOTALITE DU CHAMP CAPTANT** ..... **85**
*III.4.1. Méthodologie pour la réalisation des cartes de température* ..... *85*
*III.4.2. Présentation des résultats et interprétation des cartes de température* ..... *92*
*III.4.3. Conclusions et perspectives* ..... *96*
**III.5. OSCILLATIONS LOCALES DES TEMPERATURES DE NAPPE** ..... **98**
*III.5.1. Présentation des données* ..... *98*
*III.5.2. L'analyse des données pour comprendre les oscillations thermiques* ..... *99*
*III.5.3. La mise en évidence d'écoulements 3D par interprétation des résultats* ..... *103*

**CHAPITRE IV : RÔLE ET FONCTIONNEMENT DE LA RÉALIMENTATION ARTIFICIELLE DE LA NAPPE – *OBSERVATIONS ET EXPERIMENTATIONS* ..... 113**

**IV.1. LA REALIMENTATION ARTIFICIELLE DES NAPPES SOUTERRAINES ..... 113**
*IV.1.1. Qu'est-ce que la réalimentation artificielle et quelle est son utilité ? ..... 113*
*IV.1.2. Les différents types de Recharge Artificielle Contrôlée ..... 114*
*IV.1.3. La Recharge Artificielle Contrôlée dans le monde et en France ..... 115*
**IV.2. LES BASSINS D'INFILTRATION DE CREPIEUX-CHARMY ..... 118**
*IV.2.1. Localisation, conception et gestion des bassins d'infiltration ..... 118*
*IV.2.2. Le double rôle des bassins d'infiltration sur le site d'étude ..... 122*
*IV.2.3. L'exploitation des bassins en quelques chiffres ..... 123*
**IV.3. OBSERVATIONS ET EXPERIMENTATIONS ..... 128**
*IV.3.1. La caractérisation du fond d'un bassin d'infiltration ..... 128*
*IV.3.2. Les traçages thermiques à l'échelle d'un bassin d'infiltration ..... 138*
*IV.3.3. L'observation de l'efficacité de la barrière hydraulique sur l'ensemble du champ captant . 151*
*IV.3.4. L'indice d'infiltrabilité : visualiser, comprendre et comparer l'évolution des capacités d'infiltration des bassins ..... 157*

**CHAPITRE V : MODÉLISATION NUMÉRIQUE HYDRO-THERMIQUE 3D SUR L'ENSEMBLE DU CHAMP CAPTANT – *VERS UNE COMPREHENSION APPROFONDIE DES CHEMINS DE L'EAU* ..... 167**

**V.1. LA REALISATION DU MODELE NUMERIQUE A GRANDE ECHELLE ..... 168**
*V.1.1. Extension spatiale du modèle, géologie rencontrée et maillage ..... 168*
*V.1.2. Stratégie de modélisation ..... 170*
*V.1.3. Modélisation hydrodynamique en régime permanent ..... 171*
*V.1.4. Modélisation hydro-thermique en régime transitoire ..... 176*
*V.1.5. Améliorations apportées par calibration hydrodynamique ..... 180*
*V.1.6. Evaluation du modèle hydro-thermique après calibration ..... 186*
**V.2. L'INTERPRETATION DES CHEMINS DE L'EAU ..... 196**
*V.2.1. Les sources d'alimentation des ouvrages de pompage du champ captant ..... 197*
*V.2.2. Les bassins d'infiltration : rôle de barrière hydraulique et impact thermique engendré ..... 199*
*V.2.3. Impact des conditions d'exploitation du captage sur l'origine de l'eau pompée dans les puits et forages du champ captant ..... 201*
**V.3. QUELLES AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES D'UTILISATION DE L'OUTIL NUMERIQUE ? ..... 207**
*V.3.1. Améliorer les connaissances concernant les échanges nappe-rivière ..... 207*
*V.3.2. Calibration des transferts de chaleur ..... 207*
*V.3.3. Un outil numérique, pour quelles applications futures ? ..... 208*

**CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES ..... 217**

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 225**

**LISTE DES FIGURES ..... 233**

**LISTE DES TABLEAUX ..... 237**

**ANNEXES ..... I**

# Liste des acronymes

**ADES : A**ccès aux **D**onnées sur les **E**aux **S**outerraines

**AEP** : **A**limentation en **E**au **P**otable

**ASR** : **A**quifer **S**torage and **R**ecovery

**ASRT** : **A**quifer **S**torage, **T**ransfer and **R**ecovery

**BRGM : B**ureau de **R**echerches **G**éologiques et **M**inières

**CEREMA** : **C**entre d'**É**tudes et d'expertise sur les **R**isques, l'**E**nvironnement, la **M**obilité et l'**A**ménagement

**CGDD** : **C**ommissariat **G**énéral au **D**éveloppement **D**urable

**CI** : **C**ondition **I**nitiale

**CIFRE** : **C**onventions **I**ndustrielles de **F**ormation par la **RE**cherche

**CL** : **C**ondition aux **L**imites

**FEFLOW** : **F**inite **E**lement subsurface **FLOW** system

**GIEC : G**roupe d'experts **I**ntergouvernemental sur l'**É**volution du **C**limat

**IGRAC : I**nternational **G**roundwater **R**esources **A**ssessment **C**enter

**MAR** : **M**anaged **A**rtificial **R**echarge (ou Recharge artificielle contrôlée)

**nRMSE** : **n**ormalized **R**oot **M**ean **S**quare **E**rror

**OMS** : **O**rganisation **M**ondiale de la **S**anté

**ONEMA** : **O**ffice **N**ational de l'**E**au et des **M**ilieux **A**quatiques

**PCET** : **P**lan **C**limat **É**nergie **T**erritorial

**PPI – PPR – PPE : P**érimètres de **P**rotection **I**mmédiat, **R**approché et **É**loigné

**SOeS** : **S**ervice de l'**O**bservation et des **S**tatistiques

**SRCAE** : **S**chéma **R**égional **C**limat **A**ir **É**nergie

**ZNS** : **Z**one **N**on **S**aturée

**ZS** : **Z**one **S**aturée

# Nomenclature

Les dimensions des symboles sont exprimées dans le Système International (S.I.) :
*L : Longueur (en mètre)*
*M : Masse (en kilogramme)*
*T : Temps ou durée (en seconde)*
*I : Intensité électrique (en ampère)*
*Θ : Température (en kelvin*)*
* Dans ce travail, la température est transformée en degré Celsius : 1 kelvin = 1 °C + 273,15

| Symbole latin | Dimension | Définition |
|---|---|---|
| $A$ | $L^2$ | Surface perpendiculaire à l'écoulement |
| $A_b$ | $L^2$ | Surface du bassin d'infiltration considéré |
| $Cv_f$ | $M.L^{-1}.T^{-2}.\Theta^{-1}$ | Capacité thermique volumique de la phase fluide |
| $Cv_s$ | $M.L^{-1}.T^{-2}.\Theta^{-1}$ | Capacité thermique volumique de la phase solide |
| $d$ | L | Epaisseur de la couche colmatée en fond de cours d'eau |
| $D$ | L | Tenseur de dispersivité |
| $e_A$ | L | Epaisseur de l'aquifère |
| $e_S$ | L | Epaisseur de la couche de sable en fond de bassin |
| $g$ | $L.T^{-2}$ | Accélération de la pesanteur |
| $h$ | L | Charge de pression |
| $H$ | L | Charge hydraulique |
| $H_b$ | L | Hauteur d'eau dans le bassin d'infiltration considéré |
| $H_{calc}$ | L | Charge hydraulique calculée |
| $H_f$ | L | Charge hydraulique finale |
| $H_i$ | L | Charge hydraulique initiale |
| $H_{max}$ | L | Charge hydraulique maximale |
| $H_{obs}$ | L | Charge hydraulique observée |
| $H_{min}$ | L | Charge hydraulique minimale |
| $I_{Inf}$ | $L.T^{-1}$ | Indice d'infiltrabilité |
| $I$ | L | Lame d'eau infiltrée |
| $j$ | $T^{-1}$ | Temps de fonctionnement du bassin d'infiltration considéré |
| $k$ | $L^{-2}$ | Perméabilité intrinsèque |
| $K_r$ | $L.T^{-1}$ | Conductivité hydraulique relative |
| $K_{sh}$ | $L.T^{-1}$ | Conductivité hydraulique à saturation horizontale |
| $K_s$ | $L.T^{-1}$ | Conductivité hydraulique à saturation |
| $K_{sv}$ | $L.T^{-1}$ | Conductivité hydraulique à saturation verticale |
| $L$ | L | Distance séparant deux points de mesure |
| $M_w$ | M | Masse d'eau de l'échantillon de sol |
| $M_H$ | M | Masse humide de l'échantillon de sol |
| $M_{in}$ | M | Masse d'eau entrante dans le domaine |
| $M_{out}$ | M | Masse d'eau sortante du domaine |
| $M_S$ | M | Masse sèche de l'échantillon de sol |
| $P$ | $M.L^{-1}.T^{-2}$ | Pression |
| $q$ | $M.T^{-1}$ | Flux de Darcy |
| $Q$ | $L^3.T^{-1}$ | Débit |
| $QE$ | $L^3.T^{-1}$ | Débit exhauré (ou pompé) |
| $QI$ | $L^3.T^{-1}$ | Débit infiltré |

| | | |
|---|---|---|
| $Q_{out\text{-}X}$ | $L^3.T^{-1}$ | Débit exhauré de l'ouvrage X |
| $r$ | L | Extension de la tache d'humidité autour de l'anneau |
| $S_e$ | - | Saturation effective |
| $S_{ya}$ | - | Coefficient d'emmagasinement apparent |
| $T$ | $\Theta$ | Température |
| $T_f$ | $\Theta$ | Température du fluide |
| $T_r$ | $L^2.T^{-1}$ | Transmissivité de l'aquifère |
| $T_s$ | $\Theta$ | Température du solide |
| $T_X$ | $\Theta$ | Température enregistrée dans l'ouvrage X |
| $t_f$ | T | Temps final |
| $t_i$ | T | Temps initial |
| $t_{inf}$ | T | Durée de la mise en eau du bassin (durée d'infiltration) |
| $U$ | J | Energie interne |
| $U_{pores}$ | $L.T^{-1}$ | Vitesse d'écoulement réelle du fluide |
| $U_{inf}$ | $L.T^{-1}$ | Vitesse d'infiltration |
| $U_r$ | $L.T^{-1}$ | Vitesse d'expansion de la tache d'humidité |
| $U_{rel}$ | $L.T^{-1}$ | Vitesse de relaxation du dôme hydraulique |
| $V_{exh}$ | $L^3$ | Volume exhauré (ou pompé) |
| $V_w$ | $L^3$ | Volume d'eau |
| $V_{inf}$ | $L^3$ | Volume infiltré |
| $V_T$ | $L^3$ | Volume total |
| $V_V$ | $L^3$ | Volume de vide |
| $z_0$ | L | Cote de la mesure |
| $Z_{sol}$ | L | Altitude du sol |
| $Z_{sonde}$ | L | Altitude de la sonde de mesure |

| **Symbole grec** | **Dimension** | **Définition** |
|---|---|---|
| $\alpha$ , $n$ | $L^{-1}$, - | Paramètres de Van-Genuchten |
| $\alpha_L$ | L | Coefficient longitudinal de dispersivité thermique |
| $\alpha_T$ | L | Coefficient transversal de dispersivité thermique |
| $\varepsilon_{eff}$ | $L^3.L^{-3}$ | Porosité efficace |
| $\varepsilon_t$ | $L^3.L^{-3}$ | Porosité totale |
| $\theta$ | $L^3.L^{-3}$ | Teneur en eau |
| $\theta_f$ | $L^3.L^{-3}$ | Teneur en eau finale |
| $\theta_i$ | $L^3.L^{-3}$ | Teneur en eau initiale |
| $\theta_r$ | $L^3.L^{-3}$ | Teneur en eau résiduelle |
| $\theta_s$ | $L^3.L^{-3}$ | Teneur en eau à saturation |
| $\lambda_f$ | $M.L.T^{-3}.\Theta^{-1}$ | Conductivité thermique de la phase fluide |
| $\lambda_s$ | $M.L.T^{-3}.\Theta^{-1}$ | Conductivité thermique de la phase solide |
| $\mu_{T°}$ | $M.L^{-1}.T^{-1}$ | Viscosité dynamique du fluide à la température T° |
| $\rho_d$ | $M.L^{-3}$ | Masse volumique apparente sèche du sol |
| $\rho_s$ | $M.L^{-3}$ | Masse volumique sèche du solide |
| $\rho_w$ | $M.L^{-3}$ | Masse volumique de l'eau liquide (= 1000 $kg.m^{-3}$) |
| $\Phi$ | $T^{-1}$ | Coefficient d'échange nappe-rivière |

# INTRODUCTION

# GÉNÉRALE

# Introduction Générale

*EAU !*
*Tu n'es pas nécessaire à la vie, Tu ES la vie !*
*Tu es la plus grande richesse qui soit au monde,*
*Et Tu es aussi la plus délicate.*
*Toi si pure au ventre de la Terre…*

Antoine de Saint-Exupéry
« Terre des Hommes »

L'eau est un aliment vital pour la survie des humains. Cette ressource est limitée à l'échelle de notre Planète et elle est inégalement répartie. L'eau constitue ainsi un enjeu fort pour la population dans le monde entier. En moyenne, la quantité d'eau qui sert à l'alimentation en eau potable ne représente que 10 % du total de l'eau prélevée dans le milieu naturel. Cette eau peut provenir de réserves superficielles ou souterraines. En France, deux tiers de l'eau est issue du milieu souterrain.
A Lyon, l'eau potable a toujours été un enjeu primordial. Aujourd'hui, la ressource est principalement issue d'un site de captage : le champ captant de Crépieux-Charmy. Etendu sur une superficie de 375 ha, ce site produit aujourd'hui, à lui seul, 87 % du volume total consommé par la population de la Métropole de Lyon (chiffres de 2016-2017). Sa capacité de production lui permettrait d'alimenter la quasi-totalité de l'agglomération lyonnaise mais des captages périphériques sont utilisés dans le but de diversifier les sources d'alimentation en eau potable. Situé dans la plaine alluviale du Rhône, le champ captant de Crépieux-Charmy dispose d'une ressource en grande quantité et de bonne qualité. Mais devant l'enjeu de cette ressource pour la Métropole de Lyon, il est primordial de bien caractériser les écoulements souterrains qui s'y opèrent pour connaitre d'une part les sources d'alimentation de ce site, mais également l'impact de l'exploitation du site sur la pérennisation de la ressource. Les pompages intenses (111 puits et forages en état de fonctionnement) et la réalimentation artificielle de la nappe (par le biais de 12 bassins d'infiltration) influencent fortement l'écoulement et la température de l'eau souterraine à l'échelle du site de captage.

De nombreuses études ont déjà été réalisées sur le site de captage de Crépieux-Charmy. Citons par exemple les travaux menés par le BRGM jusque dans les années 80, qui concernent d'une part la caractérisation de la géologie et le suivi de l'exploitation de la ressource *[Collin, 1971 ; Collin et al., 1973 ; Rousselot, 1975 ; Barthélémy, 1979 ; Barthélémy, 1980 ; Plongeron et al., 1981]*, les travaux de thèse de S. Loizeau qui s'est notamment attaché à comprendre le fonctionnement du site de captage à l'échelle d'un bassin d'infiltration *[Loizeau, 2013]*, les travaux de recherche concernant le colmatage des fonds de bassins d'infiltration *[Gette-Bouvarot, 2014]* ; mais également les études conduites par le bureau d'étude BURGEAP, qui concernent l'hydrogéologie générale de la zone d'étude par le biais des modèles numériques développés pour la gestion de la ressource mais aussi le suivi des bassins d'infiltration *[BURGEAP, 1989 ; BURGEAP 1990 ; BURGEAP, 1997 ; Tribouillard, 2009]*.

L'ensemble de ces études s'accordent sur le fait que le site de Crépieux-Charmy est alimenté par quatre sources principales : la pluie efficace (part des précipitations qui s'infiltre dans la nappe), les nappes souterraines environnantes (nappe des alluvions du Rhône, nappe de l'Est Lyonnais et nappe de la Dombes), les échanges nappe-rivière et les bassins d'infiltration de la réalimentation artificielle de la nappe. Le champ captant bénéficie d'une instrumentation fournie alimentant une base de données concernant le suivi de la ressource (d'un point de vue quantitatif par le biais de mesures de niveaux de nappe et qualitatif par les mesures de température de nappe mais aussi par des prélèvements d'eau effectués dans les ouvrages de pompage), l'exploitation de la ressource (volumes d'eau pompés connus sur chaque ouvrage de pompage, volume d'eau infiltré dans chaque bassin d'infiltration), et le suivi des eaux de surface (hauteur d'eau, débit, température, suivi qualité).

Cependant, des questionnements sur les échanges entre les différents compartiments du site (nappe / cours d'eau / bassins d'infiltration), mais également sur la connaissance globale du site (complexité lithologique, effet de l'exploitation du site) restent d'actualité, comme illustré sur la Figure 1.

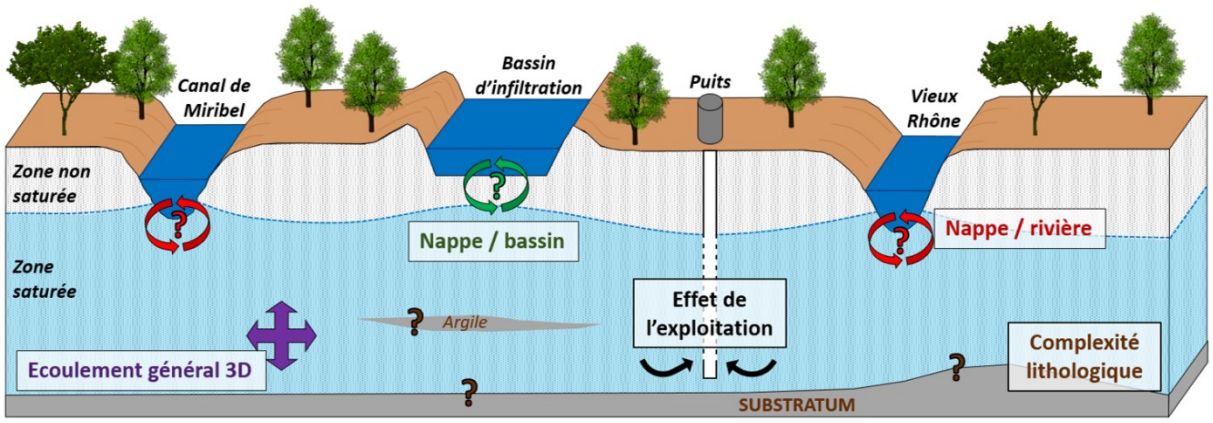



*Figure 1 : Schéma conceptuel des écoulements sur le site de Crépieux-Charmy et des questionnements liés à la compréhension des chemins de l'eau*

Le travail de thèse présenté ici s'inscrit dans les travaux menés par la Plateforme Recherche de Crépieux-Charmy. Mise en place en 2010, cette Plateforme regroupe différents membres : deux laboratoires universitaires (IGE : **I**nstitut des **G**éosciences de l'**E**nvironnement, et LEHNA : **L**aboratoire d'**É**cologie des **H**ydrosystèmes **N**aturels et **A**nthropisés), le propriétaire du site (Métropole de Lyon), l'Exploitant du site (société dédiée Eau du Grand Lyon depuis 2015, anciennement Veolia Eau), des institutionnels et/ou des bureaux d'études (Agence de l'Eau, BURGEAP, IRSTEA). Ces travaux collaboratifs permettent des échanges sur les avancées scientifiques et sur leur intégration pour la gestion du site et l'exploitation de la ressource.

Financée dans le cadre d'une convention CIFRE[1] et encadrée par la Métropole de Lyon, Eau du Grand Lyon et le laboratoire IGE, cette thèse a pour objectif d'améliorer l'identification des chemins de l'eau sur l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon, notamment pour essayer de répondre aux questions suivantes :

→ D'où vient l'eau qui alimente le champ captant de la Métropole de Lyon, et dans quelles proportions ? Comment cela perdurera-t-il dans le temps et comment adapter l'exploitation du site de captage dans le but de pérenniser cette ressource ?

→ Comment déterminer et s'assurer de l'efficacité de la réalimentation artificielle par les bassins d'infiltration ? Le rôle de soutien de la nappe et de barrière hydraulique est-il efficace ? Qu'en est-il de la qualité de l'eau de nappe d'un point de vue thermique ?

→ Où, quand et comment réaliser des observations représentatives du fonctionnement de l'aquifère ?

[1] CIFRE : **C**onventions **I**ndustrielles de **F**ormation par la **RE**cherche

La méthodologie mise en place pour ce travail de thèse repose sur trois principaux outils.

Le premier outil est l'**OBSERVATION** des phénomènes qui se produisent, sans aucune modification des conditions d'exploitation du site. Elle s'appuie principalement sur des données de débits pompés et fournis aux bassins, ainsi que de niveaux piézométriques et de température de nappe dans des ouvrages de pompage et les piézomètres de suivi. L'analyse de ces données permet de faire un premier état des lieux de la compréhension des écoulements.

Suite à l'observation, des **EXPÉRIMENTATIONS** sont menées. Cette étape consiste à imposer des conditions d'exploitation particulières (en pilotant notamment les pompages et les bassins d'infiltration) et à observer les réactions de la nappe. Ces conditions spécifiques permettent de compléter l'analyse issue de l'observation.

Pour finir, la **MODÉLISATION** est un troisième outil d'aide à la compréhension du système. Le but est de reproduire, via l'outil numérique, les phénomènes hydrodynamiques et thermiques observés. Ceci permet de quantifier les paramètres hydrodynamiques et thermiques du sous-sol par calage du modèle. Lorsque le modèle reproduit correctement les phénomènes observés, il permet de simuler des scénarios prédictifs, dans le but de quantifier l'impact d'un changement de condition limite par exemple (pompage qui évolue dans le temps, température infiltrée par les bassins et les cours d'eau qui augmente au cours du temps, …).

Le présent manuscrit de thèse s'articule en cinq chapitres.

Le **premier chapitre** est un état de l'art concernant les ressources en eau dans le monde, ainsi que de leurs usages principaux. Un focus est ensuite entrepris sur le territoire français, ainsi que sur le champ captant de Crépieux-Charmy. Cette partie permet de poser le contexte, et notamment de présenter les enjeux sociétaux et environnementaux du plus vaste champ captant d'Europe.

Le **deuxième chapitre** sera consacré à la présentation des équations de transfert de masse et de chaleur nécessaires à la modélisation mise en œuvre dans les chapitres suivants.

Le **troisième chapitre** s'intéresse au volet « Observations » de l'étude. Un inventaire des mesures faites et des données à disposition est présenté dans cette partie, ainsi que le dispositif expérimental mis en place sur une zone spécifique du site d'étude. Ce chapitre permet d'illustrer le fonctionnement hydrodynamique et thermique du champ captant, en se basant sur les observations de terrain.

Le **quatrième chapitre** est consacré au rôle et au fonctionnement des bassins d'infiltration. Des observations ainsi que des expérimentations spécifiques (essais d'infiltration pour caractériser les fonds de bassins, traçages thermiques pour visualiser et comprendre les chemins de l'eau autour d'un bassin d'infiltration) sont présentées afin de comprendre le fonctionnement des bassins d'infiltration.

Le **cinquième chapitre** est entièrement consacré à la modélisation réalisée à l'échelle du champ captant pour simuler une année complète. Les résultats calculés sont comparés aux données issues des enregistrements sur le terrain pour évaluer le modèle et interpréter les écoulements et transferts thermiques qui s'opèrent.

Le document présentera enfin les **conclusions générales et les perspectives**, faisant ainsi le bilan des travaux effectués au cours de ce travail de thèse et des améliorations et compléments futurs à apporter.

# Chapitre I

## La ressource en eau, ses usages et l'alimentation en eau potable

Exemple de la Métropole de Lyon

***Sommaire***

**I.1. La ressource en eau sur la planète et son utilisation**
- I.1.1. La répartition de l'eau sur la planète
- I.1.2. Les usages de l'eau dans le monde

**I.2. Les réserves d'eau en France**
- I.2.1. Quantité, qualité et prélèvements annuels
- I.2.2. L'eau potable et la pérennisation de la ressource
- I.2.3. La potabilisation et la distribution de l'eau

**I.3. Zoom sur la Métropole de Lyon**
- I.3.1. Contexte climatique, hydrographique et hydrogéologique de la région
- I.3.2. L'eau potable de la Métropole de Lyon

***Introduction***

Ce premier chapitre a pour but de faire un état des lieux de la **ressource en eau** dans le Monde, en France et plus particulièrement à Lyon.

Cet état des lieux permettra de répondre aux questions suivantes :

- ✓ Quels sont les usages principaux de l'eau ?
- ✓ D'où vient l'eau qui s'écoule à nos robinets ?
- ✓ Qui contrôle la qualité de l'eau potable ?
- ✓ Comment une agglomération de l'envergure de la Métropole de Lyon peut garantir une eau en quantité suffisante et de bonne qualité à tout instant de la journée et pour les années futures ?

Ce chapitre permettra ainsi de présenter la zone d'étude de ces travaux de thèse, à savoir le champ captant principal de la Métropole de Lyon, qui assure l'alimentation en eau potable de la population, et qui constitue l'un des plus vastes sites de captage d'Europe de par le nombre d'ouvrages de pompage. La question du devenir, sur le long terme, de cette ressource apparaît de plus en plus cruciale.

# Chapitre I : LA RESSOURCE EN EAU, SES USAGES ET L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE – *Exemple de la Métropole de Lyon*

## I.1. La ressource en eau sur la planète et son utilisation

### I.1.1. La répartition de l'eau sur la planète

L'eau recouvre aux alentours de 71 % de la surface de la planète Terre, ce qui lui confère le nom de Planète Bleue *[Shiklomanov and Rodda, 2003]*. L'eau, visible à la surface du globe et celle invisible contenue dans l'atmosphère, le sol et le sous-sol, correspond à un volume total d'environ $1{,}39.10^9$ km$^3$.
Ce volume d'eau n'est pas totalement exploitable pour les besoins des humains comme montré sur la Figure 2 : il inclut l'eau salée à hauteur de 97 % du volume d'eau total, répartie dans les quatre océans de la planète *[Stepanov, 1983]*, dans certains lacs mais également dans certains réservoirs souterrains, et l'eau douce qui représente un peu moins de 3 % du volume d'eau total de l'hydrosphère.

De manière simplifiée, la part d'eau douce peut elle-même être divisée en deux catégories :

- ✓ **L'eau solide** qui est piégée sous forme de neige ou de glace (principalement contenue dans les calottes glaciaires, les glaciers et les neiges éternelles).
  Cette eau solide représente près de **70 % du volume d'eau douce** de la planète *[Gleick, 1996]*.
- ✓ L'**eau disponible** contenue dans les aquifères, les lacs, les cours d'eau, l'atmosphère. Sachant que seulement **1 %** de l'eau disponible est considéré comme **accessible**, le volume d'eau facilement prélevable et utilisable est estimé à environ **$1{,}13.10^5$ km$^3$**.

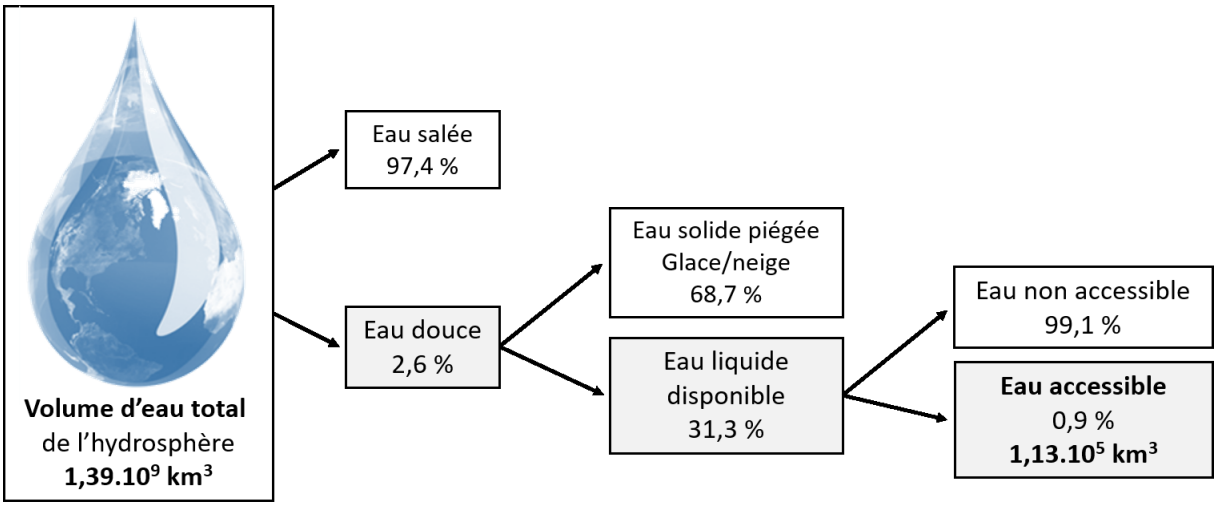



*Figure 2 : Répartition de la ressource en eau sur la planète*
*[Modifiée d'après Shiklomanov and Rodda, 2003 et Gleick, 1996]*

En plus d'être en quantités limitées, l'eau accessible est inégalement répartie sur l'ensemble du globe. Ceci est vrai d'un point de vue des volumes d'eau présents dans chacun des compartiments (glaciers, eau souterraine, lacs et cours d'eau) des différents continents (Tableau 1, adapté de l'article de *Shiklomanov and Rodda, 2003*). Dans ce tableau, la distinction entre l'eau douce et l'eau salée n'est pas réalisée du fait de la complexité de son estimation.

Cette inégalité intercontinentale provient des différences de réserves en eau dont chaque continent dispose mais elle est également liée à la superficie du continent, à la densité de population qui engendre des besoins en eau plus ou moins importants et à la recharge de ces réserves qui est très dépendante du climat *[Margat, 1998]*. Appelée l'Or bleu dans certaines régions arides, l'eau est la première ressource vitale pour l'Homme. Les zones les plus démunies en réserves d'eau sont principalement localisées en Afrique, au Moyen-Orient et en Asie Centrale. Ainsi, dans plusieurs métropoles du monde, principalement situées dans la zone intertropicale, plus de 20 % de la population n'a pas accès à l'eau potable à domicile. La raison de cette situation est bien évidemment la quantité limitée de la ressource, mais également l'inégalité face aux moyens de prélèvement et de traitement de cette ressource vitale.

| | | **Volume d'eau douce et salée (en km$^3$) contenue dans** | | | | **TOTAL** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Les glaciers** | **Les réservoirs souterrains** | **Les lacs** | **Les cours d'eau** | |
| **Europe** (10,5.10$^6$ km²) | | 4 090 | 1 600 000 | 80 027 | 80 | **1 684 197** |
| **Asie** (43,5.10$^6$ km²) | | 15 630 | 7 800 000 | 30 947 | 565 | **7 847 142** |
| **Afrique** (30,1.10$^6$ km²) | | 3 | 5 500 000 | 30 000 | 195 | **5 530 198** |
| **Amérique** | **du Nord** (24,2.10$^6$ km²) | 14 062 | 4 300 000 | 25 642 | 250 | **4 339 954** |
| | **du Sud** (17,8.10$^6$ km²) | 6 760 | 3 000 000 | 915 | 1 000 | **3 008 665** |
| **Océanie** (8,9.10$^6$ km²) | | 107 | 1 200 000 | 328 | 25 | **1 200 460** |
| **Antarctique** (14,0.10$^6$ km²) | | 21 600 000 | - | - | - | **21 600 000** |
| **Arctique** | | 2 423 500 | - | - | - | **2 423 500** |
| **TOTAL** | | **24 064 142** | **23 400 000** | **167 859** | **2 115** | **47 634 116** |

*Tableau 1 : Répartition des volumes d'eau par compartiments selon les continents [Modifiée d'après Shiklomanov and Rodda, 2003]*

### I.1.2. Les usages de l'eau dans le monde

Les consommations d'eau par pays et par usage dépendent de trois facteurs majeurs, à savoir : le climat, la densité de population et le développement économique du pays. L'Homme consomme la ressource en eau pour trois usages principaux, à savoir :

- ✓ **L'agriculture** (en majeure partie pour l'irrigation des terres)

Cet usage de l'eau représente en moyenne sur l'ensemble de la planète 70 % des volumes d'eau consommés. Les pays sous climats arides, semi-arides ou tropicaux (pays situés dans l'Hémisphère Sud et en zone intertropicale principalement) présentent des pourcentages élevés de consommation d'eau pour l'usage agricole (Figure 4). Ceci est dû au déficit pluviométrique qu'il est nécessaire de combler afin d'assurer une production de nourriture suffisante pour la population. Certains pays, comme l'Inde par exemple, peuvent voir la part de l'agriculture représenter plus de 90 % de leur consommation en eau totale. Cette eau agricole est presque intégralement absorbée par les plantes ou évaporée vers l'atmosphère.

- ✓ **L'industrie et la production d'énergie**

La moyenne mondiale de cet usage représente 20 % de la ressource en eau totale consommée. Sur la Figure 4, il apparaît nettement que la part de l'usage industriel est la plus élevée dans la plupart des pays de l'Hémisphère Nord.
Cette eau est presque intégralement restituée au milieu naturel, après avoir subi des modifications telles qu'une hausse de sa température et une dégradation plus ou moins marquée de sa qualité.

✓ **Les usages domestiques**

Les usages domestiques de l'eau correspondent à la part la plus faible des volumes d'eau douce consommés au niveau mondial (en moyenne 10 % du volume total prélevé).
Mais cette ressource est vitale pour la survie de l'Homme. L'OMS[2] préconise un minimum vital de 20 litres par habitant et par jour (pour l'hydratation et l'hygiène personnelle). Un réel confort est estimé à partir de 100 l/hab./j.

Sur Terre, une très forte inégalité des consommations d'eau pour l'usage domestique est constatée, comme illustré sur la Figure 3. La consommation d'eau domestique est la plus faible en Afrique Sub-saharienne (moins de 50 l/hab./j), alors qu'elle correspond à plus de 60 % de la consommation en eau totale du Gabon, du Cameroun et de la République Démocratique du Congo (Figure 4).

**Consommation d'eau pour l'usage domestique, en litres par habitant et par jour :**

| >250 | 160 à 250 | 130 à 160 | 100 à 130 | 50 à 100 | <50 |
|---|---|---|---|---|---|
| Canada | Finlande | Danemark | Allemagne | Asie | Afrique Sub-saharienne |
| Etats-Unis | Italie | Royaume-Uni | Pays-Bas | Amérique latine | |
| Japon | Espagne | Autriche | Belgique | | |
| Australie | Portugal | France | Hongrie | | |
| Suisse | Corée du Sud | Luxembourg | Bulgarie | | |
| | Grèce | Irlande | Pologne | | |
| | Suède | | R. Tchèque | | |

*Figure 3 : L'inégale répartition des consommations mondiales de l'eau pour l'usage domestique*

[2] OMS : Organisation Mondiale de la Santé

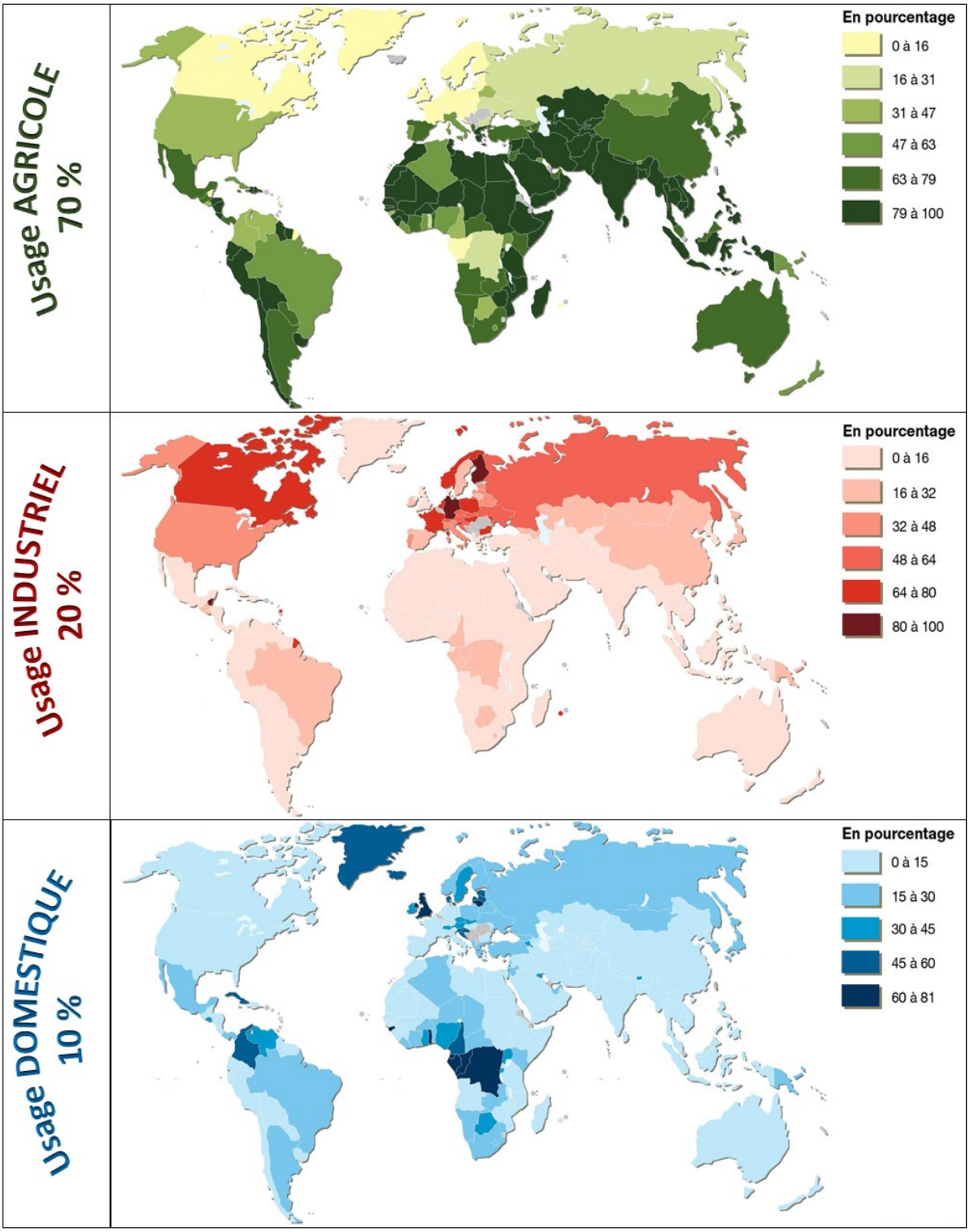



*Figure 4 : Les usages de l'eau dans le monde*
*[Modifiée d'après Rekacewicz, 2008]*

## I.2. Les réserves d'eau en France

### I.2.1. Quantité, qualité et prélèvements annuels

La ressource en eau est contenue dans les différents réservoirs aquifères du milieu souterrain, et dans les eaux de surface. La ressource souterraine est principalement renouvelée par la portion des précipitations qui s'infiltre dans le sol, et via les infiltrations par les berges des cours d'eau. En France, le volume moyen annuel de précipitations est estimé à 501 milliards de $m^3$ *[C.G.D.D./SOeS/ONEMA, 2016]*. 60 % de ce volume d'eau rejoint l'atmosphère par évaporation, alors que les 40 % restants, appelés « pluie efficace » permettent essentiellement la recharge des nappes par infiltration.
D'après ce même rapport, 90,4 % des masses d'eau souterraine[3] sont considérées être en bon état quantitatif, ce qui signifie que le volume prélevé est inférieur à la capacité de renouvellement de la ressource. En période de sècheresse, la capacité de renouvellement de la ressource est affaiblie. Des mesures de limitation des usages de l'eau peuvent être mises en place (fortement déployées en 2003 et 2015 sur la majeure partie du territoire français, du fait des températures élevées enregistrées en période estivale). Concernant les eaux de surface, une étude menée en période d'étiage de l'année 2014 (entre mai et septembre) permet de mettre en évidence que l'écoulement d'eau est visible (continu, permanent et visible à l'œil nu) dans 93,5 % des observations réalisées, alors que les cours d'eau sont en assec ou sans écoulement visible dans 6,2 % des sites observés.
En 2013, le prélèvement d'eau est estimé à 33 milliards de $m^3$ sur l'ensemble de la France métropolitaine d'après le rapport de *Pasquier, 2017* (C.G.D.D.). L'énergie (hors hydroélectricité) correspond à l'usage principal de l'eau prélevée en France (17 $Mm^3$). Les quatre autres usages principaux sont la production d'eau potable (5,6 $Mm^3$), l'alimentation des canaux (5,6 $Mm^3$), l'agriculture (2,7 $Mm^3$) et l'industrie (2,7 $Mm^3$).

D'un point de vue de la qualité chimique des eaux à l'échelle nationale, 67% des masses d'eaux souterraines sont considérées être en bon état, contre près de 33 % en état médiocre, notamment du fait de la présence de nitrates et pesticides *[C.G.D.D./SOeS/ONEMA, 2016]*. Concernant les eaux de surface, la concentration en nitrates reste plus ou moins stable depuis 1998 alors que la concentration en phosphate tend à diminuer grâce aux progrès environnementaux (amélioration du traitement des eaux urbaines, restriction de l'utilisation d'engrais phosphatés).

### I.2.2. L'eau potable et la pérennisation de la ressource

En 2012, la consommation moyenne des français était de 145 litres par habitant et par jour. Cette consommation est inégalement répartie sur l'ensemble du territoire national : les différences de climat à l'échelle du territoire en est la principale cause. Pour exemple, la consommation est de 109 l/hab./jour en Nord-Pas-de-Calais alors qu'elle est de 193 l/hab./jour en Corse.

L'eau potable en France métropolitaine (environ 5,6 $Mm^3$ d'eau prélevée par an) est issue de deux sources principales : l'eau souterraine et l'eau superficielle. A l'échelle nationale, le nombre de captages d'eau souterraine est largement supérieur au nombre de captages d'eau superficielle : 96 % des captages, soit 33 500, puisent dans la ressource souterraine. Malgré cette majorité en termes de nombre de captages, les volumes issus des prélèvements souterrains ne représentent que 65,6 % du volume total d'eau prélevée *[C.G.D.D./SOeS/ONEMA, 2016]*. Les captages d'eau potable en France ont la particularité de pomper des débits faibles : 95 % des captages ont une capacité inférieure à 2 000 $m^3.j^{-1}$.

[3] Masse d'eau souterraine : découpage de l'eau souterraine en zones sur la base de critères géologiques et hydrogéologiques (599 masses d'eau souterraine dénombrées en France métropolitaine lors de la mise à jour de 2013).

Entre 1994 et 2013, près de 8 000 captages d'eau ont été abandonnés. Les principales raisons de ces abandons sont la détérioration de la qualité de l'eau (majoritairement à cause de la présence de nitrates et de pesticides dans les eaux), la rationalisation des réseaux, les débits prélevés qui deviennent trop faibles par rapport aux besoins, les problèmes techniques ou de vétusté, l'impossibilité de mettre en place une protection du captage et enfin les raisons administratives.
Garantir la pérennisation de la ressource d'un point de vue quantitatif et qualitatif est un enjeu primordial. Des règles administratives et techniques ont vu le jour au cours du temps pour répondre à cet enjeu de grande envergure.
L'un des textes fondateurs est la **loi sur l'eau du 16 décembre 1964**. Cette loi permet la mise en place d'objectifs de maintien de la quantité et de la qualité de la ressource en eau. Elle permet également la création des six Agences de Bassins, renommées Agences de l'Eau en 1991 (arrêté préfectoral du 14 novembre 1991).
S'en est suivi la **loi sur l'eau du 03 janvier 1992**. Cette loi précise la loi de 1964, et repose sur la gestion de la ressource, avec par exemple, la mise en place des S(D)AGE[4] et la redéfinition de la qualité des eaux. La loi de 1992 rend notamment obligatoire la protection des captages via la mise en place de périmètres de protection autour des captages. L'objectif de ces périmètres est de prévenir et de diminuer les causes de pollution locale, ponctuelle et/ou accidentelle, susceptible de dégrader la qualité des eaux prélevées. Les périmètres protègent le captage ainsi qu'un secteur proche autour de celui-ci, et non l'ensemble de la ressource captée. Ces aires de protection sont majoritairement définies sur la base de critères hydrogéologiques, et sont généralement différenciées en trois zones, illustrées sur la Figure 5 et définies dans le guide technique de la « Protection des captages d'eau » *[Ministère de la Santé et des Sports, 2008]* :

- ✓ **Périmètre de Protection Immédiat** (PPI).

Ce périmètre est clôturé, toute activité autre que l'exploitation et l'entretien du captage y est interdite. Le but étant d'interdire toute introduction directe de substances polluantes dans l'eau prélevée et d'empêcher la dégradation des ouvrages de pompage.

- ✓ **Périmètre de Protection Rapproché** (PPR).

Destiné à lutter contre les risques de pollutions accidentelles et ponctuelles, le PPR constitue une zone tampon entre les activités à risque pour la qualité de l'eau captée et le captage. La délimitation de ces périmètres repose notamment sur le type d'aquifère où l'eau est prélevée et sur le contexte hydrologique.

- ✓ **Périmètre de Protection Éloigné** (PPE).

Facultatif, ce périmètre de protection correspond en général à l'aire d'alimentation du captage, et permet de règlementer les activités sur une zone plus étendue que les périmètres de protection précédents.

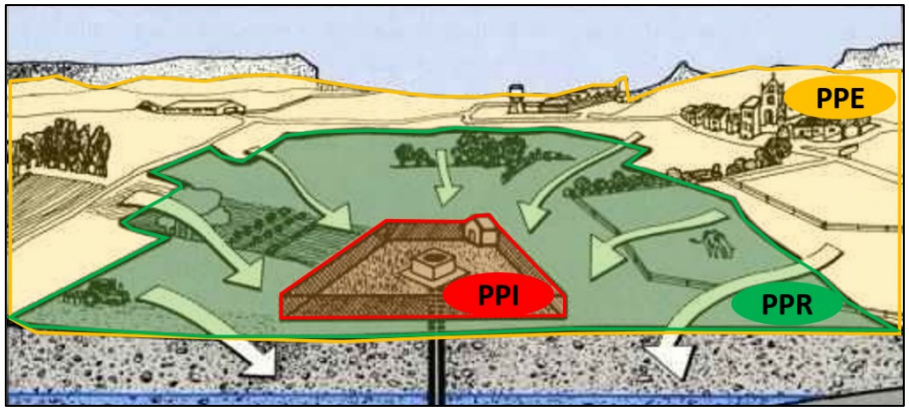



*Figure 5 : Schéma de délimitation des périmètres de protection autour d'un captage [Modifiée d'après Rey et al., 2008]*

[4] S(D)AGE : Schéma (Directeur) d'Aménagement et de Gestion des eaux

Cette délimitation de périmètres implique l'apparition de conflits d'intérêt (voies de circulation, urbanisation, agriculture, pêche, …). C'est pourquoi, l'arrêté préfectoral, qui autorise le prélèvement d'eau et qui instaure ces périmètres de protection, fixe des servitudes de protection opposables aux tiers par le biais d'une **Déclaration d'Utilité Publique** (DUP).

Selon les chiffres de fin 2014 *[C.G.D.D./SOeS/ONEMA, 2016]*, plus de 70 % des captages d'eau souterraine en France sont protégés et déclarés d'utilité publique. La protection est portée en priorité aux captages les plus productifs : 91 % des captages qui produisent plus de 100 000 $m^3.j^{-1}$ sont protégés. Seulement 57 % des captages d'eau superficielle sont protégés, alors qu'ils présentent un risque non négligeable de contamination.
Le 30 décembre **2006, la LEMA** (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) a vu le jour. Cette loi a pour fonction de transposer en droit français la directive cadre européenne sur l'eau d'octobre 2000, afin de parvenir aux objectifs posés (bon état des eaux à l'horizon 2015, amélioration des conditions d'accès à l'eau pour tous, …).

Les services de l'Etat en charge du contrôle sanitaire (D.D.A.S.S.[5] jusqu'en 2010, puis A.R.S.[6]) veillent au respect des règles fixées au travers des textes règlementaires.

### I.2.3. La potabilisation et la distribution de l'eau

Selon la qualité des eaux prélevées, différentes étapes de potabilisation peuvent être nécessaires afin de respecter les normes de potabilité avant qu'elle ne soit distribuée aux différents consommateurs.

- ✓ **Dégrillage** : retient les particules grossières présentes dans les eaux de surface.
- ✓ **Clarification** : ajout de coagulant, sélectionné selon la qualité de l'eau, pour créer des flocs de particules qui sont ensuite séparées par décantation ou par flottaison.
- ✓ **Filtration** : écoulement de l'eau au travers de sable et/ou de charbon actif pour retenir les particules fines en suspension, les pesticides et les hydrocarbures.
- ✓ **Désinfection** : ozonation et/ou ajout de chlore pour détruire les dernières bactéries et maintenir la bonne qualité de l'eau pendant le transport dans le réseau de distribution.

Après traitement, l'eau doit respecter plus de 50 critères pour être considérée comme potable *[arrêtés du 11 janvier 2007, du 21 janvier 2010 et des 9 et 24 décembre 2015]*. Parmi ces nombreux critères de potabilisation, des caractéristiques physico-chimiques (couleur, conductivité, concentration en fer, en cuivre, en aluminium, …) et microbiologiques (Escherichia Coli, Entérocoques, …) peuvent être cités.
De nombreux prélèvements d'eau sont effectués depuis la zone de prélèvement jusqu'au robinet du consommateur afin de s'assurer de la potabilité de l'eau : vecteur de risques sanitaires élevés et ressource vitale pour l'Homme, l'eau est l'aliment consommé le plus surveillé en France.

Une fois considérée comme potable, la dernière étape du cycle de l'eau domestique est son transport. En France, le réseau d'eau potable dans sa totalité compte un linéaire de près de 1 000 000 km. Dans le but de garantir une eau de bonne qualité et en quantité suffisante au robinet du consommateur, le réseau de distribution fait l'objet d'un suivi minutieux.
A l'échelle nationale, le rendement moyen du réseau est de 79,4 %. Ceci signifie qu'en moyenne 20 % des volumes d'eau produits retournent dans le milieu naturel sans être utilisés par le consommateur (ces fuites de réseaux laissent s'échapper environ 1 $Mm^3.an^{-1}$). « Elles (les fuites) sont souvent liées à la vétusté des canalisations ou à une pression trop élevée, mais aussi aux mouvements des sols » *[C.G.D.D./SOeS/ONEMA, 2016]* ou aux conditions

[5] D.D.A.S.S. : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales
[6] ARS : Agence Régionale de la Santé

climatiques qui provoquent des casses sur les conduites de distribution. Un effort d'amélioration de rendement est mené à l'échelle nationale dans le but de réduire les volumes prélevés, et donc de limiter la pression exercée sur la ressource en eau.

Après avoir été utilisée par le consommateur, l'eau est traitée en station d'épuration. Suite à ce traitement, l'eau peut être rejetée dans les cours d'eau, peut permettre la recharge des nappes par injection (bassins, puits), ou peut être utilisée pour l'irrigation en agriculture.

## I.3. Zoom sur la Métropole de Lyon

### I.3.1. Contexte climatique, hydrographique et hydrogéologique de la région

#### *I.3.1.1. Le contexte climatique*

Selon Météo-France *[Météo-France, 2017]*, la température moyenne de l'air à l'échelle nationale est établie à 11,8 °C (moyenne des mesures issues de 30 stations, sur la période 1961-1990). Depuis 1850, la température a tendance à augmenter : +0,6 °C à l'échelle mondiale et +0,9 °C à l'échelle de la France *[GIEC, 2014* et *Météo-France, 2017]*.
Depuis les années 1980, la hausse des températures semble s'accélérer (+0,3 °C par décennie). Ainsi, sur une année, le nombre de journées chaudes augmente (températures maximales supérieures à 25 °C), tandis que le nombre de jours de gel diminue. Les évolutions thermiques et pluviométriques observées semblent impacter le cycle de l'eau (sècheresses plus fréquentes et intenses, évolution des hauteurs d'eau dans les cours d'eau), et devraient s'accentuer dans le temps *[GIEC, 2014]*.

L'agglomération lyonnaise profite d'un climat continental tempéré, dit « rhodanien ». D'un point de vue des températures, la moyenne annuelle est établie à 11 °C, avec des hivers plutôt doux (moyenne de 2,5 °C) et des périodes estivales chaudes (moyenne de 21,3 °C).
La pluviométrie moyenne annuelle sur Lyon, est estimée à 832 $mm.an^{-1}$ (calculée sur la période 1981-2010, Météo-France). Le nombre de jours pluvieux est plutôt faible (de l'ordre de 100 $j.an^{-1}$) mais l'intensité des pluies est assez conséquente.

D'après le rapport du PCET[7] du Grand Lyon *[PCET du Grand Lyon, 2015]*, une évolution des températures moyennes annuelles à Lyon est à prévoir dans les prochaines décennies : il faut compter une augmentation de 1 à 2 °C d'ici 2030 et jusqu'à + 5 °C à l'horizon 2050. Si les prévisions sont correctes, le climat lyonnais de 2050 correspondra au climat actuel de Madrid, et en 2100 à celui d'Alger.
Cette évolution des températures engendrera alors des conséquences non négligeables d'un point de vue de la ressource en eau. Par exemple, les précipitations pourraient diminuer de 25 à 40 % en période estivale d'ici 2080 *[Météo-France, 2010]* et le débit du Rhône pourrait diminuer de 15 à 30 % en moyenne d'ici 2100 et jusqu'à 40 % en été *[Milano, 2010]*.
Ces évolutions climatiques impliquent donc une réelle problématique liée à la vulnérabilité de la ressource en eau (quantité et qualité) pour les années à venir *[PCET du Grand Lyon, 2015]*.

#### *I.3.1.2. Le contexte hydrographique*

La Métropole de Lyon est située à la confluence de la Saône et du Rhône (Figure 6). Ancien fleuve à tresses, le Rhône a évolué morphologiquement avec le temps, du fait notamment de la construction du Canal de Miribel dans les années 1850 pour faciliter la navigation *[Bravard, 2004]* et du Canal de Jonage en 1898 pour l'alimentation de l'usine hydro-électrique de Cusset. Entre ces deux canaux, un ancien site d'extraction de gravier a entrainé la mise à nu de la nappe alluviale, dans les années 1970. Il s'agit aujourd'hui du lac artificiel de Miribel, autrement appelé le lac des Eaux Bleues.

[7] Plan Climat Energie Territorial

Le débit du Rhône peut enregistrer de fortes évolutions au cours du temps. Au niveau du barrage de Jons (Figure 6), EDF gère les débits d'entrée dans les canaux de Miribel et de Jonage. Un débit minimum réservé de 30 ou 60 $m^3.s^{-1}$ est toujours fourni au Canal de Miribel (adapté selon la hauteur d'eau dans le lac des Eaux Bleues) et le débit envoyé au Canal de Jonage ne peut pas dépasser 640 $m^3.s^{-1}$. Ainsi en période de crue, le débit qui s'écoule dans le Canal de Miribel peut être conséquent.
Par exemple le 23 janvier 2018 (épisode de crue le plus fort enregistré entre 2014 et 2018), le débit du Rhône mesuré à la station CNR de Villeurbanne (Figure 6) a atteint un débit de 2 430 $m^3.s^{-1}$ (moyenne journalière), soit un débit de l'ordre de 1 790 $m^3.s^{-1}$ transitant dans le Canal de Miribel.

Dans l'Est lyonnais (au Sud-Est de la Métropole de Lyon), les cours d'eau sont inexistants (mise à part l'Ozon, qui s'écoule au Sud du couloir d'Heyrieux, Figure 7) du fait de l'infiltration de la quasi-totalité des eaux météoritiques dans des terrains très perméables.

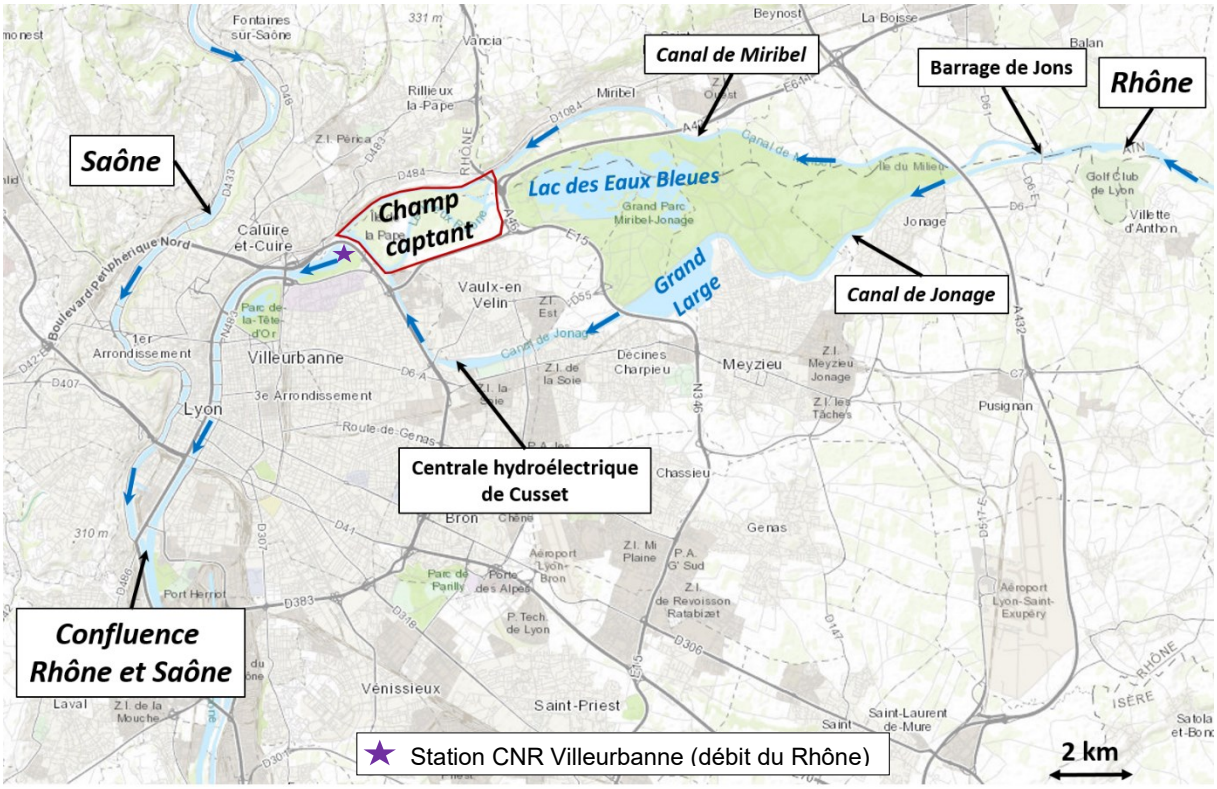



*Figure 6 : Repères hydrographiques autour de la Métropole de Lyon*

### *I.3.1.3. Le contexte hydrogéologique*

La région lyonnaise recouvre deux grands ensembles géologiques. Au Nord-Ouest de Lyon (au niveau de la commune de St-Romain-au-Mont-d'Or sur la Figure 7) est retrouvée une partie du Massif Central Français. Datant de l'époque antéhercynienne et hercynienne, il est constitué de roches cristallines, métamorphiques et plutoniques. A l'Est de Lyon, il s'agit d'une partie du grand fossé d'effondrement Rhodanien, qui relie les plateaux de Haute-Saône à la Méditerranée. Ce fossé est comblé par des terrains tertiaires : au Nord du Rhône, le plateau des Dombes a conservé la morphologie Tertiaire alors qu'au Sud du fleuve, les terrains ont été affectés, au Quaternaire, par l'emprise des glaciers. C'est au sein de ce fossé d'effondrement que les ressources en eaux souterraines sont majeures.

Les ressources en eaux souterraines proviennent essentiellement de trois formations aquifères, à savoir la molasse Miocène, le fluvio-glaciaire et le fluviatile moderne.

Ces formations sont l'aboutissement d'épisodes de dépôts à différentes périodes du Tertiaire au Quaternaire *[Martelat and Collin, 1996]*. L'histoire géologique débute au Tertiaire, à l'époque du Miocène, avec les dépôts molassiques, principalement sableux avec des passées argilo-sableuses, sur une épaisseur d'environ 200 mètres dans l'Est Lyonnais *[Barat and Gouisset, 1988]*. Présente en tout point de la région, cette couche molassique a été recouverte par les formations quaternaires : l'avancée du glacier rhodanien a entrainé le dépôt des formations glaciaires et fluvio-glaciaires *[Collin et al., 1973]*. Plus récemment, les formations fluviatiles modernes viennent recouvrir le tout.

#### *I.3.1.3.1. Le réservoir molassique*

Faiblement exploité du fait de sa faible conductivité hydraulique à saturation (qui est estimée à $10^{-5}$ m.s$^{-1}$), la molasse Miocène constitue une réserve en eau d'importance régionale. L'épaisseur moyenne de cet aquifère est estimé à 175 m *[Barat and Gouisset, 1988 ; Brenot et al., 2009]*.

L'extension spatiale importante de ce réservoir et le nombre conséquent d'ouvrages (sondages de reconnaissance, piézomètres, ouvrages de pompages) permet d'avoir une bonne connaissance du toit de cette molasse (Annexe 1), qui n'est jamais affleurant dans la région étudiée.

La connaissance de l'altitude du toit de cette couche est primordiale ici puisqu'elle est considérée comme étant le substratum des dépôts fluvio-glaciaires et fluviatiles, bien que des échanges entre ces différents réservoirs ont été mis en évidence *[Brenot et al., 2009]*.

#### *I.3.1.3.2. Le réservoir fluvio-glaciaire*

Les alluvions fluvio-glaciaires s'organisent en trois couloirs : Meyzieu, Décines et Heyrieux (illustrés sur la Figure 7). Il s'agit d'aquifères libres d'une trentaine de mètres d'épaisseur, pouvant présenter des surcreusements de l'ordre de 50 à 70 mètres de profondeur par endroits. Ce sont des formations grossières, peu argileuses. Les couloirs fluvio-glaciaires présentent des conductivités hydrauliques à saturation de l'ordre de $10^{-5}$ m.s$^{-1}$ sur les parties latérales des couloirs, et de $10^{-2}$ m.s$^{-1}$ dans la partie centrale *[Rousselot and Beguin, 1975 ; Rousselot, 1975 ; Collin et al., 1973]*.
Ce réservoir aquifère est très vulnérable face aux potentielles pollutions de surface, notamment causées par l'urbanisation, l'industrialisation et l'agriculture.

Les dépôts fluvio-glaciaires reposent sur une couche morainique *[David et al., 1979* ; *Pomerol et al., 2002]* quand elle est présente, ou directement sur la molasse Miocène. Les couloirs fluvio-glaciaires sont entourés par des dépôts morainiques (Figure 7) : les moraines sont retrouvées à l'affleurement sur un contour de collines à l'Est (qui relie Jonage à Grenay, en passant par Pusignan et Collombier-Saugnieu) et au niveau de buttes de séparation des couloirs fluvio-glaciaires (butte de Feyzin au Sud, butte de Saint-Priest/Grenay qui sépare les couloirs d'Heyrieux et de Décines, et enfin la butte de Décines qui forme un îlot entre les couloirs de Décines et de Meyzieu). Les moraines proviennent de dépôts issus de l'avancée du glacier rhodanien *[David et al., 1979]*. Il s'agit d'un mélange hétérométrique de galets et de graviers, emballés dans une matrice plus fine à dominante argileuse *[Collin, 1971]*. La recharge de ce compartiment aquifère est assurée par l'eau météoritique et par les échanges avec la molasse Miocène sous-jacente *[Brenot et al., 2009]*. Du fait des fortes conductivités hydrauliques, aucun réseau hydrographique n'est présent en surface : l'eau s'infiltre et s'écoule directement dans le sol.

#### *I.3.1.3.3. Le réservoir fluviatile moderne*

Les alluvions fluviatiles modernes se sont déposées le long de la Saône et du Rhône. La largeur des alluvions de la Saône est très réduite comparé à celle des alluvions du Rhône (moins de 1 km de large pour la Saône et plus de 4 km pour le Rhône). Ceci est dû au relief escarpé en bord de Saône.

Le champ captant de Crépieux-Charmy étant situé dans les alluvions du Rhône, la description du réservoir fluviatile moderne sera consacrée à la nappe d'accompagnement du Rhône. Les alluvions fluviatiles modernes correspondent à des alternances de sables, de mélanges sablo-graveleux, de passées argileuses et de couches de graviers-galets très propres, sur une épaisseur comprise entre 15 et 25 m *[Barthélémy, 1980 ; Loizeau, 2013]*.

La conductivité hydraulique à saturation de cette couche est élevée : de l'ordre de $10^{-3}$ à $5.10^{-2}$ m.s$^{-1}$ *[Loizeau, 2013]*.

A la base des alluvions, une épaisseur réduite d'alluvions fluvio-glaciaires peut être rencontrée. Plus grossières, elles permettent une forte vitesse d'écoulement. En dessous, un niveau argileux marque la limite du substratum constitué par la molasse Miocène *[Loizeau, 2013]*.

En amont de Lyon, la piézométrie de la nappe alluviale d'accompagnement du Rhône suit globalement le sens d'écoulement du Rhône, c'est à dire selon une orientation globalement Est-Ouest. L'extension spatiale des alluvions fluviatiles du Rhône est limitée au Nord par la Côtière des Dombes, et au Sud par les alluvions fluvio-glaciaires et moraines (le long du Canal de Jonage). Le Rhône et la Saône confluent au niveau de la Métropole de Lyon, avant de s'écouler en direction du Sud.

La recharge de la nappe alluviale du Rhône, en amont de Lyon, provient principalement des échanges nappe-rivière avec l'eau du Rhône, ainsi que par des écoulements souterrains en provenance des couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines *[Barthélémy, 1978a]*. Au niveau du champ captant de Crépieux-Charmy (situé entre les communes de Rillieux-la-Pape, Vaulx-en-Velin et Villeurbanne), la nappe alluviale du Rhône est fortement influencée par la recharge artificielle due aux bassins d'infiltration ainsi que par les pompages de production d'eau potable.

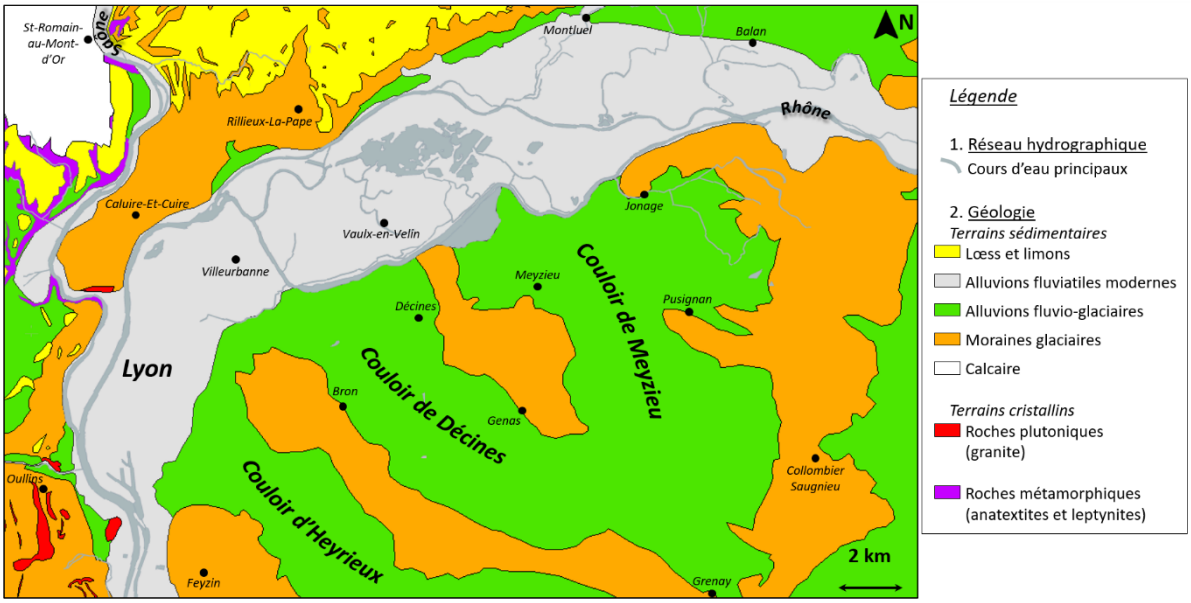



*Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la région Lyonnaise*
*[Modifiée d'après Loizeau, 2013]*

### I.3.2. L'eau potable de la Métropole de Lyon

#### *I.3.2.1. L'histoire de l'eau à Lyon*

L'approvisionnement en eau de la ville de Lyon a toujours été un enjeu fort, d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Le Guide du patrimoine Rhônalpin *[Jonac, 2015]* retrace l'histoire de l'alimentation en eau de Lyon.

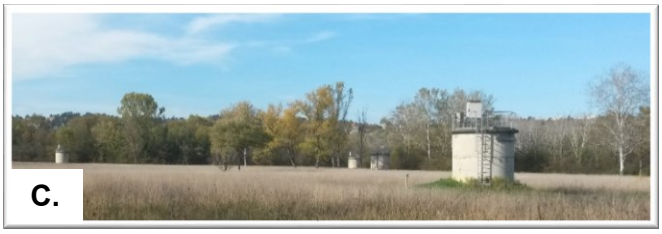
A l'époque romaine, un réseau de quatre aqueducs, long de 222 km au total (illustré sur la Figure 8 A.), permettait de transporter une eau de bonne qualité et en quantité suffisante jusqu'à la capitale des Gaules *[de Montauzan, 1909 ; Burdy, 2002]*. A cette époque, entre 25 000 et 45 000 $m^3$ d'eau par jour étaient disponibles pour la population. Au Moyen Age, l'abandon des aqueducs a conduit à un manque d'eau. Les eaux superficielles (Rhône et Saône) deviennent la principale source d'alimentation, ce qui entraine de nombreuses épidémies (peste, typhoïde, choléra) du fait de la qualité médiocre de cette ressource *[Freney, 2014]*. Différents projets d'amélioration de l'approvisionnement en eau voient le jour, de la Renaissance à 1850 (construction de puits publics, machines hydrauliques pour récupérer de l'eau du Rhône, réhabilitation d'un ancien aqueduc, …). En 1853, Lyon dispose de 90 fontaines publiques, 2 000 puits et 200 sites de stockage, mais les ressources ne sont toujours pas assez abondantes pour subvenir aux besoins.

La Compagnie Générale des Eaux s'est vu attribuer un projet d'adduction des eaux, avec la création d'une galerie filtrante de 600 $m^2$ en bordure du Rhône (illustré sur la Figure 8 B.), d'un dispositif élévatoire de trois machines à vapeur (pompes de « Cornouailles»), de trois réservoirs (capacité totale de 20 000 $m^3$), de 78 km de canalisation et de 120 fontaines.

L'approvisionnement en eau est alors grandement amélioré à cette époque mais reste cependant insuffisant malgré un agrandissement du site et du réseau de distribution entre 1857 et 1866 (alimentation de Fourvière, 240 fontaines supplémentaires, galerie filtrante agrandie et atteignant 7 000 $m^2$). Dans les années 1880, un concours de projets pour l'alimentation en eau de la ville est mené. Des projets pharaoniques sont alors exposés, tels que : l'amenée des eaux du lac de Genève *[Bigard, 1882]*, prises d'eau sur le Rhône *[Prunier, 1881]*, captage d'eau à la Balme en Savoie *[Villard, 1880]*, galeries filtrantes aux abords du Rhône *[Léger, 1885]*, prise d'eau dans le lac d'Annecy, dérivation des eaux de la Loire *[Raclet, 1888]*. Etant tous trop onéreux, seul un « petit projet » a été retenu : la construction d'un site de captage sur les berges du Rhône (usine du Grand-Camp, actuellement parc de la Feyssine), situé sur la berge en face de l'usine de Saint-Clair et de sa galerie filtrante.

Suite à une nouvelle pénurie d'eau en 1962 (du fait des conditions climatiques), le « Plan de l'an 2000 » est lancé *[Girard, 1966]*. De ce plan naît la création du captage de Crépieux-Charmy (illustré sur la Figure 8 C.), principale source d'alimentation en eau potable de la Métropole de Lyon aujourd'hui.

Quatorze siècles ont donc été nécessaires pour que les Lyonnais retrouvent, comme à l'époque romaine, une eau abondante et de bonne qualité.




*A. Aqueduc à Chaponost*
*Source : Archives municipales de Lyon*
*B. Galerie filtrante de Saint-Clair*
*Source : https://www.eaualyon.fr/le-site-de-saint-clair*
*C. Captage de Crépieux-Charmy*
*Source personnelle*

*Figure 8 : L'histoire de l'eau à Lyon en photographies.*

#### *I.3.2.2. La production d'eau potable aujourd'hui*

Sur l'agglomération lyonnaise, la répartition des consommations d'eau potable est identique aux moyennes françaises, à savoir : 7 % pour l'alimentation, 33 % pour le nettoyage et 60 % pour l'hygiène *[Métropole de Lyon, 2016]*.

La Métropole de Lyon, née en janvier 2015, est une collectivité territoriale créée par la fusion de la Communauté urbaine de Lyon et du Conseil général du Rhône sur les 59 communes qui composent le territoire du Grand Lyon. La Métropole se voit attribuer différentes missions et compétences, à savoir : le développement économique, l'éducation, la culture et les loisirs, les solidarités, le cadre de vie et la gestion au quotidien. C'est dans cette dernière mission qu'apparaît la compétence « Eau Potable ».
Depuis février 2015, la Métropole a délégué la production et la distribution de l'eau potable sur l'ensemble du territoire (à l'exception de cinq communes[8] desservies par un syndicat extérieur) à la société dédiée Eau du Grand Lyon, filiale de Veolia Eau. Le contrat lui confère la responsabilité de capter l'eau, la distribuer, contrôler sa qualité, garantir le fonctionnement et l'entretien d'une partie des ouvrages et assurer la relation avec l'usager.

Quelques chiffres clés sur l'eau de la Métropole de Lyon en **2016** *[Métropole de Lyon, 2016]* :

- ✓ Plus de 1,3 millions d'habitants desservis,
- ✓ Production de près de 245 000 $m^3.j^{-1}$ d'eau en moyenne en 2016 (210 000 $m^3.j^{-1}$ en provenance du champ captant principal et 35 000 $m^3.j^{-1}$ extraits des captages périphériques),
- ✓ 64 réservoirs et châteaux d'eau sur l'ensemble du territoire,
- ✓ Plus de 4 050 km de linéaire de conduites,
- ✓ Rendement réseau de 85 %,
- ✓ Près de 330 000 mesures réalisées en 2016 pour le suivi de la qualité sur les eaux brutes, traitées et distribuées (dont 30 % au titre du suivi règlementaire par l'A.R.S. et 70 % au titre de l'autocontrôle par l'Exploitant).

Du fait des enjeux sociétaux et environnementaux, de la forte vulnérabilité de la ressource et du risque de contamination des eaux, la production d'eau potable de la Métropole de Lyon est assurée par 11 captages, répartis sur l'ensemble du territoire (Figure 9). L'eau potable prélevée dans ces captages provient en grande partie de l'exploitation de ressources souterraines (Tableau 2) :

- ✓ **4 captages** prélèvent de l'eau dans la nappe alluviale du Rhône et **2 captages** prélèvent de l'eau dans la nappe alluviale de la Saône,
- ✓ **4 captages** pompent de l'eau dans la nappe fluvio-glaciaire,
- ✓ **1 captage** prélève de l'eau superficielle sur le Lac des Eaux Bleues (lac de Miribel).

Les volumes prélevables autorisés dans chacun des sites sont définis par arrêtés préfectoraux. Les volumes réellement prélevés, moyennés sur les années 2015 et 2016, sont nettement inférieurs aux volumes autorisés comme illustré dans le Tableau 2 : en moyenne, le volume réel prélevé correspond à moins de la moitié du volume prélevable autorisé pour chacun des sites.

Le captage de Crépieux-Charmy, qui prélève de l'eau de la nappe alluviale du Rhône, correspond au captage principal de la Métropole de Lyon. En 2016, 85 % du volume d'eau potable consommé a été extrait de ce site *[Métropole de Lyon, 2016]*. Les autres captages, dits « périphériques », permettent une plus faible production, de par le nombre d'ouvrages de pompage en présence. Les volumes produits par les captages périphériques peuvent être très variables d'un mois à l'autre : cela dépend des besoins de production, mais également des « essais 72h ». Ces essais permettent de contrôler la réponse de la nappe suite à un pompage au débit maximal autorisé, et ce sur une longue durée de 72h. Ils sont menés régulièrement

[8] La-Tour-de-Salvagny, Lissieu, Marcy-l'Étoile, Quincieux et Solaize.

(2 fois par an pour chaque site de pompage) afin de s'assurer du bon fonctionnement de ces captages secondaires en cas de besoin. Cette **diversité de captages** (plusieurs sites, et différentes sources d'alimentation) est essentielle pour assurer la continuité de l'alimentation en eau potable d'une telle agglomération, en assurant une sécurité élevée.
D'un point de vue de la qualité de l'eau prélevée, seule l'eau issue du lac des Eaux Bleues suit une filière de traitement par floculation, filtration et ozonation (Usine de La Pape). L'eau qui provient des captages d'eaux souterraines étant de bonne qualité *[Métropole de Lyon, 2016]*, une simple chloration en sortie d'usine de production assure le maintien de la qualité de l'eau jusqu'au robinet des consommateurs.

| Ressource exploitée | Nom du captage | N° sur la carte (Figure 9) | Volume prélevable autorisé [$m^3.j^{-1}$] | Volume moyen réel prélevé en 2016 [$m^3.j^{-1}$] |
|---|---|---|---|---|
| **Nappe alluviale du Rhône** | **Crépieux-Charmy** | 1 | 600 000 | 207 344 |
| | Les Vernes – Jonage | 2 | 3 800 | 527 |
| | Garenne – Meyzieu | 3 | 24 000 | 5 073 |
| | Rubina – Décines | 4 | 6 000 | 1 120 |
| **Nappe alluviale de la Saône** | Tourneyrand – Fleurieu | 5 | 2 200 | 353 |
| | Charnaise – Curis | 6 | 3 000 | 132 |
| **Nappe fluvio-glaciaire** | Afrique – Chassieu | 7 | Pas de DUP | 195 |
| | Quatre chênes – Saint Priest | 8 | 40 000 | 12 711 |
| | Les Romanettes – Corbas | 9 | 4 000 | 2 060 |
| | Sous-la-Roche – Mions | 10 | 1 000 | 231 |
| **Eau superficielle** | Lac des Eaux Bleues – Miribel | 11 | 150 000 | 12 447 |

*Tableau 2 : Liste des captages de production d'eau potable de la Métropole de Lyon et des volumes moyens journaliers prélevables/prélevés*

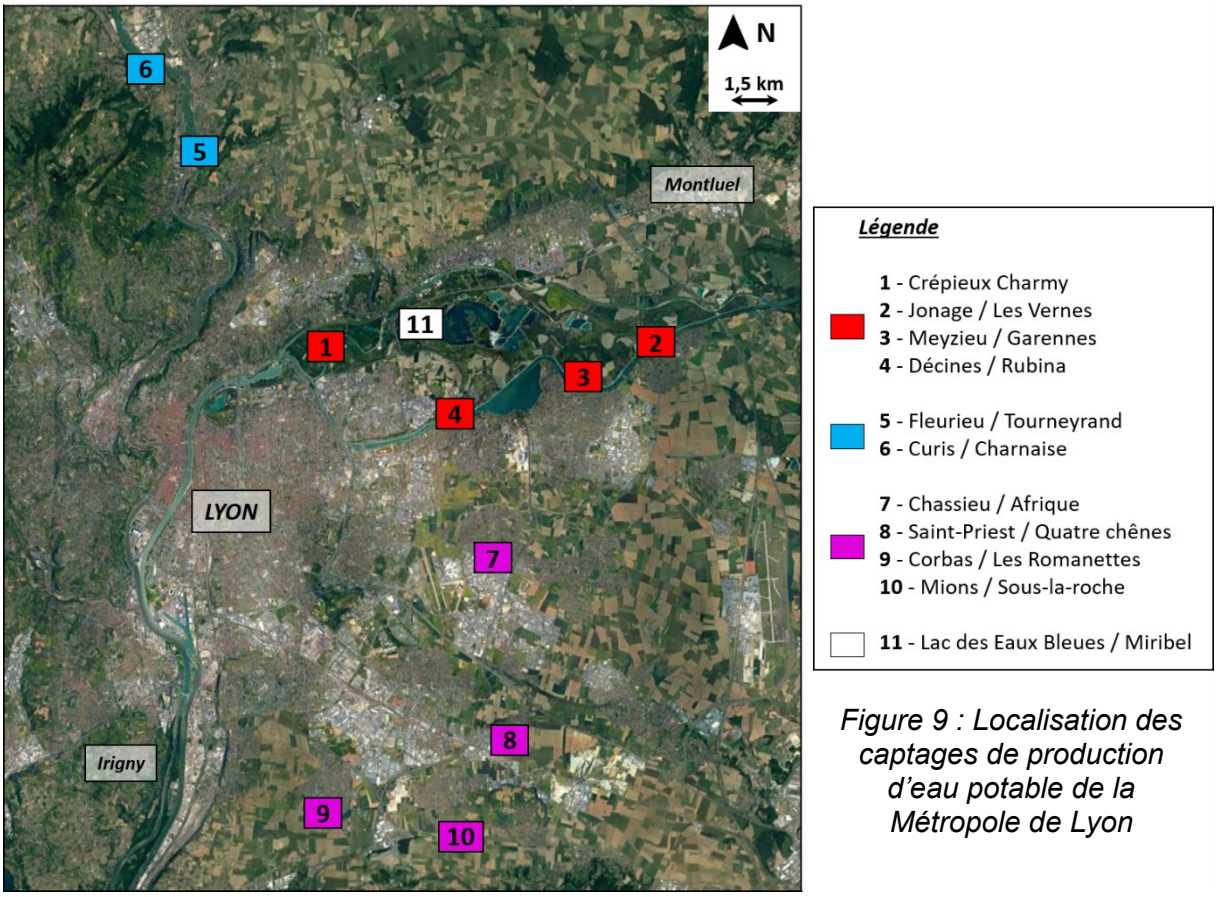



*Figure 9 : Localisation des captages de production d'eau potable de la Métropole de Lyon*

### I.3.2.3. Présentation du captage principal de Crépieux-Charmy

87 % du volume d'eau potable distribué à la population de l'agglomération lyonnaise a été prélevé sur le site de Crépieux-Charmy (moyenne réalisée sur les données de 2016-2017, Figure 12). Ce site comporte donc un fort enjeu pour la Métropole de Lyon.

#### I.3.2.3.1. Localisation du site

Le champ captant de Crépieux-Charmy (Figure 9) est situé dans la plaine alluviale du Rhône, à l'amont immédiat de Lyon et à l'aval du lac des Eaux Bleues, entre les communes de Rillieux-la-Pape, Villeurbanne et Vaulx-en-Velin.

Le site de captage est encerclé et traversé par différents bras du Rhône, qui constituent les frontières du champ captant (Figure 10) : le Canal de Miribel au Nord, le Canal Sud qui sépare le champ captant de l'autoroute, le Vieux-Rhône qui traverse le site et qui permet la délimitation en deux îles distinctes (Crépieux et Charmy), et enfin de Canal de Jonage qui constitue la frontière en direction de l'Ouest.

LEGENDE
- Direction d'écoulement des cours d'eau
- Limites du champ captant
- Ile de Crépieux
- Ile de Charmy
- Nom — Communes limitrophes

*Figure 10 : Les frontières du champ captant de Crépieux-Charmy*

#### *I.3.2.3.2. La protection du site et la pérennisation de la ressource*

Du fait de sa localisation en plein cœur de l'agglomération lyonnaise (communes proches, voie ferrée située au nord du champ captant, autoroute à l'Est et au Sud du site de captage) et du risque que cela implique pour la sécurité de la ressource, une vigilance accrue est menée contre les risques d'intrusion et les risques de contamination sur le site de captage.

Ce site est de grande envergure : le prélèvement moyen est établit à 210 000 $m^3.j^{-1}$ en 2016, mais il présente de fortes fluctuations (entre avril 2014 et décembre 2017, le débit prélevé journalier maximum est de 317 200 $m^3.j^{-1}$ le 03/07/2015, et le débit prélevé journalier minimum est de 40 000 $m^3.j^{-1}$ le 31/01/2015). Du fait de ces débits de prélèvements conséquents, le champ captant de la Métropole de Lyon est soumis à une DUP (**D**éclaration d'**U**tilité **P**ublique) depuis 1976. Ce document a fait l'objet d'une actualisation en 2011 *[DUP, 2011]*.

Cette DUP autorise un prélèvement de 600 000 $m^3.j^{-1}$ d'eau et délimite les périmètres de protection autour de la zone de captage (Section I.2.2). Le contour du périmètre de protection immédiat (PPI) correspond en grande partie aux cours d'eau qui encadrent le champ captant et englobe les usines de production d'eau (Croix-Luizet, Crépieux et Velette) et la station de traitement du lac des Eaux Bleues (usine de La Pape), comme illustré sur la Figure 11.

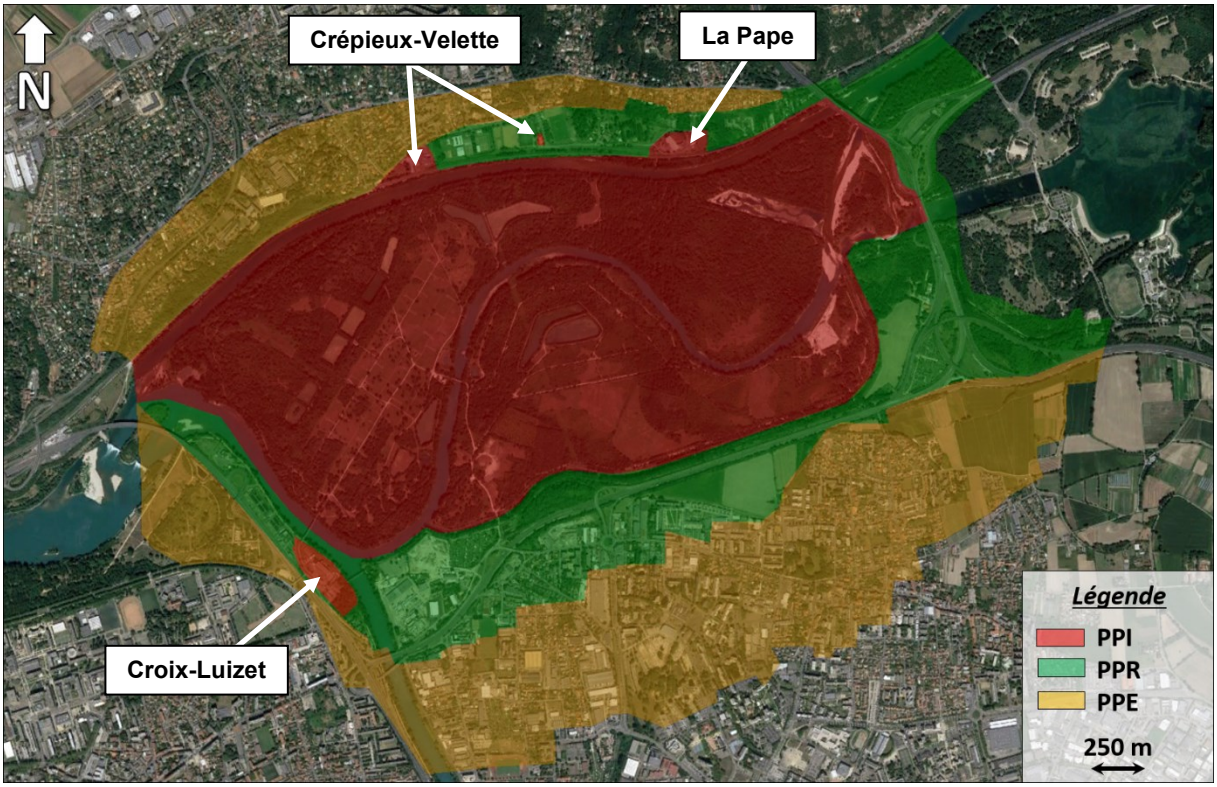



*Figure 11 : Périmètres de protection immédiat (PPI), rapproché (PPR) et éloigné (PPE) qui encadrent le champ captant de Crépieux-Charmy [Modifiée d'après la DUP, 2011]*

En plus d'être règlementés par la D.U.P., le champ captant et l'ensemble de Miribel-Jonage sont classés zone Natura 2000. De ce fait, l'implantation de nouveaux ouvrages doit prendre en compte la faune et la flore du site, qui peuvent présenter des espèces rares et/ou menacées, et répondre aux différentes règlementations concernant l'environnement.

#### *I.3.2.3.3. L'exploitation de la ressource en quelques chiffres*

Le volume prélevé total évolue au cours du temps, selon les conditions météorologiques mais aussi selon les besoins de la population : les années chaudes correspondent à des années de forte production d'eau (exemple de l'année 2003 qui a été marquée par une sécheresse intense), et les mois d'août enregistrent une production d'eau plus faible que le reste de l'année puisqu'il s'agit de la période de l'année où une partie de la population est absente.

La Figure 12 illustre l'évolution mensuelle du débit moyen journalier prélevé entre 1995 et 2017 sur l'ensemble de la Métropole de Lyon. La distinction est faite entre l'eau prélevée uniquement sur le champ captant de Crépieux Charmy (courbe bleue) et l'eau totale prélevée sur l'ensemble des onze captages de la Métropole de Lyon (courbe en pointillés rouges).

Entre 1995 et 2000, le débit moyen journalier prélevé, tous captages confondus, était de l'ordre de 275 000 $m^3.j^{-1}$. Entre 2000 et 2003, une hausse considérable de la production d'eau s'est fait ressentir, notamment du fait de la sècheresse de 2003 (passage de 275 000 à 300 000 $m^3.j^{-1}$ en moyenne). Depuis 2003, la production d'eau a tendance à diminuer. Cette diminution est liée au changement de comportement de la population (économies d'eau), mais également aux efforts menés sur le rendement du réseau de distribution (moins de fuites). Une stabilisation des volumes prélevés est remarquée entre 2008 et 2013 (aux alentours de 250 000 $m^3.j^{-1}$). Depuis 2014, la production d'eau diminue progressivement. Les années 2016 et 2017 présentent les plus faibles volumes d'eau produits depuis le début de l'historique (moins de 250 000 $m^3.j^{-1}$, tous captages confondus).

Le volume prélevé, uniquement sur le champ captant de Crépieux Charmy, représente en moyenne 95 % du volume total issu de l'ensemble des captages entre 1995 et 2017. Depuis 2003, le volume d'eau extrait des captages périphériques est de plus en plus conséquent : il s'agit ici d'une volonté de la Métropole de Lyon afin de diversifier les sources de prélèvement pour la sécurité et la pérennité de la ressource en eau.

Le champ captant de Crépieux-Charmy reste tout de même largement en tête d'un point de vue des volumes prélevés : en 2016 et 2017, le volume extrait de ce captage représente **87 % du volume total prélevé** (soit un débit moyen de l'ordre de 210 000 $m^3.j^{-1}$). Le détail des données mensuelles est présenté en Annexe 2.

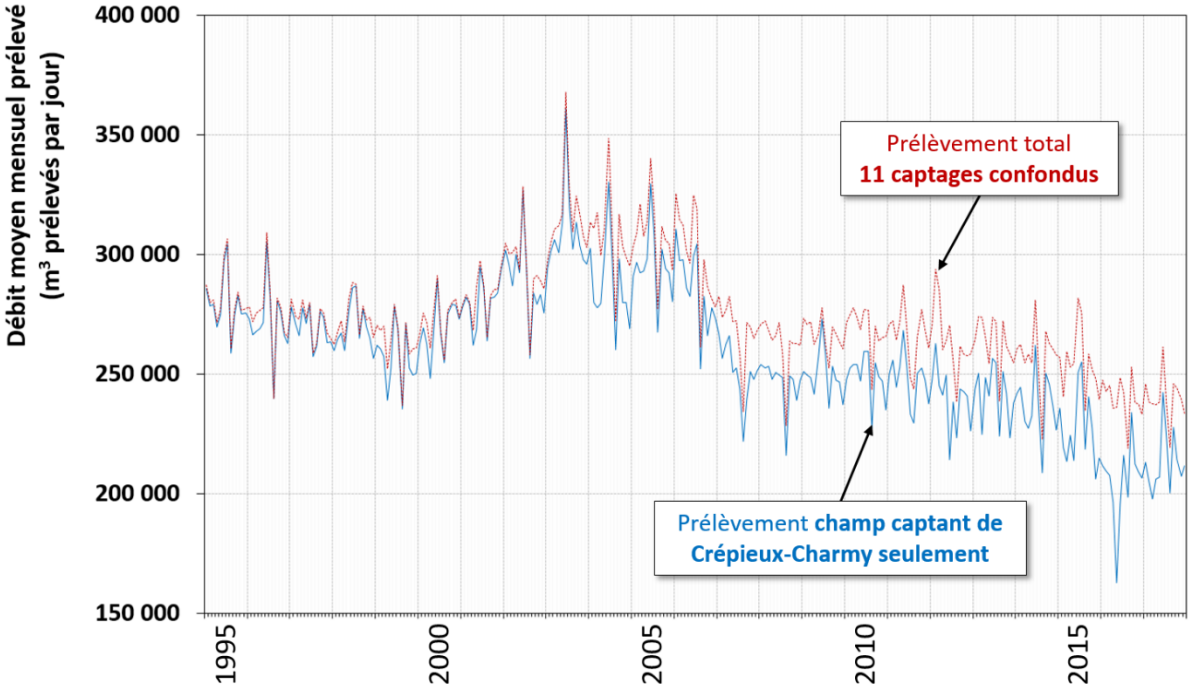



*Figure 12 : Évolution des prélèvements d'eau de la Métropole de Lyon entre 1995 et 2017, sur le champ captant de Crépieux-Charmy et sur l'ensemble des sites de captage*

Cette évolution du volume prélevé au cours du temps permet de mettre en évidence des évènements particuliers qui jouent un rôle sur les prélèvements d'eau, tels que le mois de mai 2016 qui correspond au volume prélevé le plus faible sur le champ captant depuis 1995 (Figure 12). Cet évènement est lié aux chasses des barrages du Rhône pendant lesquelles les captages périphériques ont été sollicités de manière accrue pour limiter les risques sur le champ captant de Crépieux-Charmy.

L'évolution de la ressource du champ captant de Crépieux-Charmy, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif, est suivie avec beaucoup de minutie par l'intermédiaire d'un équipement spécifique et conséquent, dont voici une liste très succincte (le Chapitre III détaille les paramètres suivis ainsi que les types d'instrumentations mis en place) :

- ✓ **Les ouvrages de pompage**

Assurer une telle production d'eau sur un site de captage unique nécessite un nombre conséquent d'ouvrages de pompage. Le champ captant de Crépieux-Charmy dénombre un total de 111 puits et forages en état de fonctionnement, répartis sur les îles de Crépieux et Charmy. Tous les ouvrages ne fonctionnent pas de manière continue : le nombre de pompes en marche est défini en fonction des besoins en eau, et ils sont répartis de manière homogène sur l'ensemble du site.

- ✓ **Les bassins d'infiltration**

Au nombre de 12, les bassins d'infiltration jouent un double rôle sur le site : protéger la qualité de l'eau de la nappe en cas de contamination dans les eaux superficielles du Rhône par inversion des sens d'écoulement, et soutenir le niveau d'eau dans la nappe (rôle de réalimentation de la nappe). Le rôle de ces bassins ainsi que leur fonctionnement sera détaillé dans le Chapitre IV de ce travail de thèse.

- ✓ **Le suivi de la ressource**

Le suivi quantitatif de la ressource est assuré à la fois par un réseau dense de mesures de niveaux de nappe (en piézomètres et en ouvrages de pompage) et par la présence d'un débitmètre par ouvrage de pompage depuis 2014 (les forages sont équipés d'un débitmètre par doublet d'ouvrages).
Le suivi qualitatif de la ressource repose sur des campagnes régulières de prélèvement sur les eaux issues des ouvrages de pompage (analyses bactériologiques et physico-chimiques), un suivi de la température de nappe (équipements en piézomètres et en ouvrages de pompage), mais également un suivi des eaux de surface : deux stations d'alerte permettent d'évaluer la qualité des eaux superficielles avant leur arrivée au niveau du champ captant (une est située au niveau du barrage de Jons, et la seconde est positionnée en aval de la diffluence entre le Vieux-Rhône et le Canal Sud), et chaque bras du Rhône transitant au niveau du champ captant est équipé de mesures de la hauteur d'eau et de la température.

Les pompages importants et la réalimentation par les bassins influencent l'écoulement naturel des eaux souterraines. L'objectif de ce travail de thèse est de mieux comprendre les chemins de l'eau souterraine, en étudiant notamment l'impact quantitatif et qualitatif des bassins d'infiltration sur le site de captage. Pour répondre à cette question, l'observation des phénomènes, la réalisation d'expérimentations spécifiques et la simulation par l'outil numérique seront mis en œuvre.

## *CHAPITRE I – CONCLUSIONS ET IDÉES À RETENIR*

### L'eau sur la planète Terre

L'eau douce disponible et accessible représente **moins de 1 %** de la totalité de l'eau présente sur la planète. De **fortes inégalités quantitatives et qualitatives** de la ressource en eau sur la planète sont visibles. Cet or bleu devient une source de conflits du fait du caractère vital de cet aliment pour l'Homme.

En moyenne dans le monde, l'utilisation de l'eau prélevée dans le milieu naturel répond à trois utilisations principales : l'**agriculture** (70 %), l'**industrie** (20 %) et l'**usage domestique** (10 %). Selon le niveau de développement de chaque pays et le climat, la répartition de ces trois usages peut fortement varier. L'usage domestique, bien que minoritaire en terme de pourcentage d'utilisation, est primordial : l'eau est un aliment vital pour la survie de l'Homme.

### En France

En France, l'eau prélevée est utilisée en grande majorité pour la **production d'énergie et pour le refroidissement des centrales** (à hauteur de 51 % du volume total prélevé). S'en suivent ensuite divers usages principaux : **l'alimentation en eau potable** (17 %), **l'alimentation des canaux** (17 %), **l'agriculture et notamment l'irrigation des terres** (8 %) et enfin **l'industrie** (8 %).

L'eau utilisée pour l'usage domestique provient de deux sources principales : les **ressources souterraines** et les **ressources superficielles**. Deux tiers du volume d'eau prélevé est issu de réserves souterraines (chiffres de 2012). Avant d'être consommée l'eau doit être considérée comme potable. Pour ce faire divers critères physico-chimiques doivent être respectés.

Afin de garantir la pérennité de cette ressource indispensable pour notre espèce, les quantités et la qualité de l'eau extraite du milieu naturel sont contrôlées et règlementées, de la zone d'extraction jusqu'au robinet du consommateur.

### À Lyon

La Métropole de Lyon, située à la confluence du Rhône et de la Saône, assure l'alimentation en eau potable de plus de 1 300 000 habitants via **11 captages** (10 captages prélèvent de l'eau souterraine de la nappe alluviale du Rhône, de la Saône ou de la nappe de l'Est Lyonnais, et 1 captage pompe de l'eau de surface dans le Lac de Miribel). Cette **diversité de sources d'alimentation est nécessaire pour assurer l'alimentation en eau potable en cas de crise majeure**.

Le **champ captant de Crépieux-Charmy** est l'un des plus vastes captages d'alimentation en eau potable d'Europe du fait du nombre d'ouvrages de pompage. A lui seul, il assure aujourd'hui la production de **87 % du volume d'eau consommé** par la population de l'agglomération lyonnaise (en moyenne en 2016-2017). Le débit moyen journalier prélevé sur ce site est de **210 000 $m^3.j^{-1}$** (moyenne en 2016), mais il peut fortement fluctuer : **prélèvements compris entre 317 200 et 40 000 $m^3.j^{-1}$** sur la période avril 2014 – décembre 2017. Ce captage représente ainsi un **fort enjeu sociétal, économique et environnemental pour la Métropole de Lyon**.

**L'exploitation intensive** du champ captant de Crépieux-Charmy (111 ouvrages de pompages ainsi que 12 bassins d'infiltration) **influence** fortement **l'écoulement naturel** de la nappe alluviale du Rhône, tant d'un point de vue **hydrodynamique** que **thermique**.

Il est donc **nécessaire de mener des études pour affiner la compréhension et la caractérisation des écoulements à l'échelle du site de captage dans le but de garantir la pérennité de la ressource**. La question du devenir, sur le long terme, de cette ressource apparaît de plus en plus cruciale.

# Chapitre II

## La modélisation des transferts d'eau et de chaleur

L'écoulement en nappe libre, le transfert thermique et les outils de simulation sélectionnés

***Sommaire***

**II.1. La modélisation des écoulements en nappe libre**
- II.1.1. Écoulement 3D dans un aquifère libre
- II.1.2. Écoulement en milieu variablement saturé : modèle de Richards

**II.2. Le transfert de chaleur en milieu poreux**
- II.2.1. Les mécanismes de transfert de chaleur
- II.2.2. Hypothèse de l'équilibre thermique local : le modèle à une température
- II.2.3. Les caractéristiques thermiques
- II.2.4. La conservation de la chaleur
- II.2.5. Les conditions initiales et conditions aux limites

**II.3. Méthode de résolution numérique et codes de calculs sélectionnés**

***Introduction***

Ce chapitre a pour objectif de rappeler la conceptualisation des transferts de masse et de chaleur dans le milieu souterrain étudié (les sols et les nappes souterraines) et les équations qui les décrivent.

Pour la part la plus importante de la modélisation, et dans un souci de parcimonie de paramètres, l'écoulement est décrit par la loi de Darcy, pour les terrains saturés et une nappe « à surface libre ». L'analyse du fonctionnement d'un bassin et la caractérisation hydrodynamique de son fond sont faites plus finement, en considérant le milieu poreux variablement saturé avec l'équation de Richards.

Les transferts de chaleur en milieux poreux sont décrits par un modèle de convection-dispersion-conduction dont on détaillera les hypothèses conceptuelles.

Toutes les variables et tous les paramètres nécessaires sont décrits dans ce Chapitre.

Une dernière partie présentera l'implémentation de ces modèles dans les outils de simulation numérique utilisés pour ce travail de thèse (à savoir Comsol Multiphysics et FEflow).

# Chapitre II : LA MODÉLISATION DES TRANSFERTS D'EAU ET DE CHALEUR

## II.1. La modélisation des écoulements en nappe libre

### II.1.1. Ecoulement 3D dans un aquifère libre

#### *II.1.1.1. La charge hydraulique et la loi de Darcy*

La charge hydraulique (*H*), autrement appelée potentiel hydraulique, correspond en tout point à l'intensité des forces de pression et de gravité appliquées au fluide. Elle se définit comme suit :

$$H = \frac{P - P_{atm}}{\rho_w \, g} + z_0 \qquad \textit{Eq. II-1}$$

Avec *H* la charge hydraulique (en m), *P* la pression de l'eau (en Pa), $P_{atm}$ la pression atmosphérique (en Pa), $\rho_w$ la masse volumique de l'eau (en kg.m$^{-3}$), *g* l'accélération de la pesanteur (en m.s$^{-2}$) et $z_0$ la cote de la mesure (en m).

Darcy a montré de manière expérimentale, en 1856, que, sous certaines conditions, le flux passant au travers d'une colonne de milieu poreux est proportionnel au gradient hydraulique responsable de l'écoulement.
La loi de Darcy permet d'estimer le débit d'écoulement (*Q*) traversant une surface (*A*) en milieu saturé, sous plusieurs hypothèses :

- ✓ L'écoulement est considéré unidirectionnel,
- ✓ L'écoulement est monophasique et permanent,
- ✓ La matrice solide est homogène, isotrope et rigide,
- ✓ Le fluide est incompressible et isotherme.

La loi de Darcy *[Darcy, 1856]* s'écrit :

$$Q = K_s \, A \, \frac{\Delta H}{L} \qquad \textit{Eq. II-2}$$

Avec *Q* le débit (en m$^3$.s$^{-1}$), $K_s$ la conductivité hydraulique à saturation (en m.s$^{-1}$), $\Delta H$ la différence de charge hydraulique (en m) entre deux points séparés de la distance *L* (en m), et *A* la surface perpendiculaire à l'écoulement (en m$^2$).

A partir de la loi de Darcy (Eq. II-2), le flux de Darcy (*q*) peut être défini, exprimé en m.s$^{-1}$, tel que :

$$q = \frac{Q}{A} = K_s \, \frac{\Delta H}{L} \qquad \textit{Eq. II-3}$$

Or $q$ et $K_s$ dépendent des trois directions de l'espace ($x$, $y$ et $z$) et du temps ($t$).
On peut généraliser la loi de Darcy (Eq. II-2) en deux ou trois dimensions en exprimant le flux de Darcy comme un vecteur, vérifiant :

$$\vec{q} = -\overline{\overline{K_s}}\,\vec{\nabla}H \qquad \textit{Eq. II-4}$$

Le flux de Darcy est une densité de flux volumique traversant toute la surface du milieu poreux. La vitesse réelle d'écoulement dans les pores ($U_{pores}$) est toujours supérieure à cette densité de flux et sa valeur moyenne vérifie :

$$U_{pores} = \frac{q}{\varepsilon_t} \quad \text{où} \quad \varepsilon_t = \frac{V_V}{V_T} \qquad \textit{Eq. II-5}$$

Avec $\varepsilon_t$ la porosité totale du milieu poreux (en $m^3.m^{-3}$), $V_V$ le volume de vides (en $m^3$) et $V_T$ le volume total (en $m^3$).

#### *II.1.1.2. Influence de la température sur les propriétés hydrodynamiques du sol*

La conductivité hydraulique exprime la capacité d'un milieu à laisser s'écouler le fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Cette grandeur dépend à la fois des propriétés du sol, et de celles du fluide. La conductivité hydraulique à saturation (lorsque la teneur en eau est égale à la porosité totale), peut s'écrire :

$$K_s = \frac{k\,\rho_w\,g}{\mu} \qquad \textit{Eq. II-6}$$

Avec $k$ la perméabilité intrinsèque du sol (en m²) et $\mu$ la viscosité dynamique du fluide (en Pa.s).

La dépendance explicite de la loi de Darcy (Eq. II-2) avec la température est généralement attribuée exclusivement aux variations des propriétés du fluide, à savoir sa viscosité dynamique ($\mu$) et sa masse volumique ($\rho$).
La loi décrivant la variation de la viscosité dynamique du fluide en fonction de la température est dérivée de Mercer and Pinder (1974) :

$$\frac{\mu_0}{\mu} = \frac{1 + 0{,}7063\,C - 0{,}04832\,C^3}{1 + 0{,}7063\;C_{(T=T_0)} - 0{,}04832\;C^3_{(T=T_0)}} \quad \text{où} \quad C = \frac{T-150}{100} \qquad \textit{Eq. II-7}$$

Avec $\mu$ la viscosité dynamique du fluide (en Pa.s) à la température $T$ considérée (en °C) ; et $\mu_0$ la viscosité dynamique du fluide à la température de référence $T_0$.

En ce qui concerne la dépendance de la masse volumique de l'eau à la température, elle est souvent considérée comme linéaire à charge constante. *Perrochet et Tacher (1997a)* proposent une méthode pour calculer un coefficient d'expansion non-linéaire, afin de mieux approcher le comportement physique de la densité de l'eau pour la gamme de température comprise entre 0 et 100 °C.
Par cette méthode, la variation de la densité du fluide selon la température s'écrit :

$$\rho(T) = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 \qquad \textit{Eq. II-8}$$

D'après les données expérimentales de *[Kell, 1967]*, si le fluide est de l'eau douce, alors les paramètres de l'Eq. II-8 sont :

| | | |
|---|---|---|
| $a$ = 9,998677.10$^{2}$ | $d$ = 9,143518.10$^{-5}$ | $g$ = -1,359813.10$^{-11}$ |
| $b$ = 6,764771.10$^{-2}$ | $e$ = -8,907391.10$^{-7}$ | |
| $c$ = -8,993699.10$^{-3}$ | $f$ = 5,291959.10$^{-9}$ | |

En introduisant une température arbitraire $T_0$ pour laquelle $\rho_{w0} = \rho_w(T_0)\ et\ \mu_0 = \mu(T_0)$, le flux de Darcy (Eq. II-4) pour les milieux saturés dans un système à trois dimensions devient alors :

$$\vec{q} = -\overline{\overline{K_0}}\,\frac{\mu_0}{\mu}\left[\vec{\nabla}h + \frac{(\rho_w - \rho_{w0})}{\rho_{w0}}\,\vec{\nabla}z\right] \qquad \textit{Eq. II-9}$$

Avec $\overline{\overline{K_0}}$ (en m.s$^{-1}$) le tenseur de conductivité hydraulique à la température de référence $T_0$ (en °C).

### *II.1.1.3. Équation de continuité (conservation de la masse)*

Le principe de conservation de la masse, conduit à l'équation de continuité, dans un volume élémentaire représentatif (VER), du milieu poreux :

$$\Delta M_w = M_{in} - M_{out} \qquad \textit{Eq. II-10}$$

Avec $\Delta M_w$ la variation de masse d'eau (en kg), $M_{in}$ et $M_{out}$ respectivement la masse d'eau entrante et sortante (en kg) pendant un intervalle de temps $\Delta t$.

La masse d'eau qui transite à travers une surface est calculée comme étant égale au produit de sa masse volumique ($\rho_w$) et du flux ($q$) transitant par unité de temps ($\Delta t$). Cette masse d'eau doit être prise en compte selon les trois directions de l'espace $x$, $y$ et $z$, et sur un volume $\Delta x \Delta y \Delta z$.
D'où :

$$\frac{\Delta M_w}{\Delta t} = -\left[\frac{\Delta}{\Delta x}(\rho_w q_x) + \frac{\Delta}{\Delta y}(\rho_w q_y) + \frac{\Delta}{\Delta z}(\rho_w q_z)\right]\Delta x \Delta y \Delta z \qquad \textit{Eq. II-11}$$

En passant à la limite ($\Delta t$, $\Delta x$, $\Delta y$ et $\Delta z$ tendent vers 0), on obtient la formulation générale de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial M_w}{\partial t} = -\left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho_w q_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_w q_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_w q_z)\right] d_x d_y d_z \qquad \textit{Eq. II-12}$$

En négligeant la compressibilité de l'eau et de la matrice solide, le flux d'écoulement massique (Eq. II-12) peut être exprimé en flux d'écoulement volumique (avec $V_w$ le volume d'eau exprimé en $m^3$).
On obtient :

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = -\left[\frac{\partial}{\partial x} q_x + \frac{\partial}{\partial y} q_y + \frac{\partial}{\partial z} q_z\right] d_x d_y d_z \qquad \textit{Eq. II-13}$$

Afin de faire apparaitre la charge dans le terme instationnaire de l'Eq. II-13, on introduit classiquement le coefficient d'emmagasinement apparent $S_{ya}$ (sans unité) :

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} = S_{ya} \frac{\partial H}{\partial t} dxdydz \qquad \textit{Eq. II-14}$$

En combinant l'Eq. II-13 et l'Eq. II-14, on obtient la forme générale de l'équation de diffusivité pour les aquifères :

$$\vec{\nabla}.(K_s \vec{\nabla} H) = S_{ya} \frac{\partial H}{\partial t} \qquad \textit{Eq. II-15}$$

Dans le cas particulier du régime d'écoulement permanent, $\frac{\partial H}{\partial t}$ est nul par définition. L'équation de diffusivité devient donc :

$$\vec{\nabla}.(K_s \vec{\nabla} H) = 0 \qquad \textit{Eq. II-16}$$

#### *II.1.1.4. Conditions initiales et conditions aux limites*

La loi de Darcy décrit l'écoulement transitoire d'un fluide à travers un domaine donné. Pour décrire les écoulements non-permanents, il est nécessaire de préciser les conditions initiales (à $t$ = 0) et les conditions imposées aux limites du domaine (variables dans le temps).

##### *II.1.1.4.1. Conditions initiales*

La condition initiale représente un état à un instant précis. En ce qui concerne la modélisation des écoulements selon les hypothèses précédentes, seule la zone saturée est prise en compte dans le modèle numérique. La condition initiale à renseigner dans le modèle à l'instant t = 0 correspond à la valeur de $H$ en tout point du domaine. Ce champ de valeurs sera généralement issu des cartes d'interpolation de la piézométrie observée ou estimée in situ.

##### *II.1.1.4.2. Conditions aux limites*

Les conditions aux limites fixent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur à ce domaine *[Ledoux, 2003]*. Il existe trois principaux types de conditions aux limites :

- ✓ 1er type : **condition de Dirichlet** : *H condition de charge imposée*

Cette limite permet d'imposer une charge hydraulique, sur une frontière du modèle (lorsque la cote piézométrique est connue, ainsi que son évolution temporelle). Cette limite peut également être utilisée pour modéliser le niveau d'eau dans un cours d'eau, à condition que le fond du cours d'eau ne soit pas colmaté (c'est-à-dire que le niveau d'eau dans le cours d'eau est égal à la charge hydraulique de la nappe en contact).

- ✓ 2ème type : **condition de Neumann** : $\vec{\nabla} H.\vec{n}$ *condition de flux imposé*
  $\vec{n}$ est la normale extérieure à la frontière considérée.

Ce type de condition est imposé lorsque le flux entrant ou sortant à la frontière est connu. Ils permettent par exemple de tenir compte de la pluie efficace qui s'infiltre en surface, des flux qui s'infiltrent dans les bassins d'infiltration, des flux pompés et des flux en provenance de l'extérieur du domaine.
Un flux nul équivaut à $\vec{\nabla} H.\vec{n} = 0$ , et il est mis en application en hydrogéologie pour marquer la limite avec le substratum imperméable en fond de domaine, ou pour marquer une limite géologique imperméable.

- ✓ 3ème type : **condition de Cauchy** : $\vec{\nabla} H.\vec{n} = \Phi(H - H_0)$ *condition de charge imposée avec transfert imposé*

Cette condition est principalement utilisée pour simuler l'échange nappe-rivière. La charge à imposer est souvent connue (hauteur d'eau dans la rivière). Le second terme fait intervenir un coefficient d'échange difficile à estimer. Ce paramètre de transfert est estimé de la manière suivante :

$$\Phi = \frac{K_s}{d} \qquad \textit{Eq. II-17}$$

Avec $\Phi$ le coefficient d'échange nappe-rivière (en $s^{-1}$), $K_s$ la conductivité hydraulique à saturation de la couche colmatée de fond de rivière (en $m.s^{-1}$), $d$ est l'épaisseur de la couche colmatée prise en compte (en m), $H$ la charge hydraulique sous la couche colmatée située à la limite du domaine de calcul (en m) et $H_0$ la charge hydraulique dans la rivière (en m).

### II.1.2. Ecoulement en milieu variablement saturé : modèle de Richards

Au cours de ce travail de thèse, les bassins d'infiltration présents sur la zone ont fait l'objet d'études de caractérisations spécifiques (Section IV.3.1). Pour modéliser l'infiltration au droit de ces ouvrages, il est nécessaire de tenir compte de la non-saturation du sol sous-jacent.

#### *II.1.2.1. La teneur en eau et l'équation de Richards*

A l'échelle du VER, la teneur en eau volumique $\theta$ est définie comme étant égale à :

$$\theta = \frac{V_w}{V_T} \qquad \textit{Eq. II-18}$$

Où $\theta$ est la teneur en eau volumique (en $m^3.m^{-3}$), $V_w$ est le volume d'eau total de l'échantillon (en $m^3$) et $V_T$ correspond au volume total de l'échantillon qui tient compte du volume de vide et du volume de solide (en $m^3$).

La teneur en eau varie entre une valeur maximale, à saturation, $\theta_s$, et une valeur minimale, résiduelle, $\theta_r$. Cette teneur en eau résiduelle est expliquée par l'eau qui reste piégée dans les pores non connectés, et par l'eau absorbée sur la matrice (eau difficilement mobilisable). Ainsi, la teneur en eau disponible à l'écoulement correspond à la différence $\theta_s - \theta_r$.

Ces valeurs de teneurs en eau permettent de définir la saturation effective, notée Se (sans unité), qui équivaut à :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad \textit{Eq. II-19}$$

L'écoulement et les variations de teneur en eau sont modélisés à l'aide de l'équation de Richards *[Richards, 1931]*, que l'on utilisera essentiellement en géométrie 2D axisymétrique :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[K_{sh} * K_r(h)\frac{\partial H}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_{sv} * K_r(h)\frac{\partial H}{\partial z}\right] \qquad \textit{Eq. II-20}$$

Où $K_{sh}$ et $K_{sv}$ sont respectivement les conductivités hydrauliques à saturation horizontale et verticale (en $m.s^{-1}$), $K_r(h)$ est la fonction de conductivité hydraulique relative, $H$ est la charge hydraulique (en m), $z$ est la coordonnée verticale (en m), $r$ est la coordonnée radiale (en m), $\theta$ est la teneur en eau (en $m^3.m^{-3}$), $t$ est le temps (en s) et $h$ est la charge de pression (en m).

La charge de pression $h$ est définie étant égale à :

$$h = H - z_0 \qquad \textit{Eq. II-21}$$

### *II.1.2.2. Courbe de rétention et évolution de la conductivité hydraulique*

Un degré de complexité supplémentaire en milieu partiellement saturé en eau vient de la dépendance à la teneur en eau de la charge de pression et de la conductivité hydraulique.

La courbe de rétention d'eau $S_e(h)$ et l'évolution de la conductivité hydraulique $K_r(h)$ sont décrites, dans ce travail, par les fonctions de van Genuchten – Mualem *[Mualem, 1976* ; *van Genuchten, 1980]* :

$$S_e(h) = [1 + (\alpha\, h)^n\,]^{-m}$$

$$K_r(h) = {S_e}^{0,5}\left[1 - \left(1 - {S_e}^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2 \qquad \textit{Eq. II-22}$$

$$avec\ \ m = 1 - \frac{1}{n}$$

Où $S_e$ est la saturation effective (sans unité), $\theta_r$ est la teneur en eau résiduelle (en $m^3.m^{-3}$), $\theta_s$ est la teneur en eau à saturation (en $m^3.m^{-3}$), $\alpha$ (en $m^{-1}$) et $n$ sont les paramètres de van Genuchten, dépendants du milieu poreux étudié.

### *II.1.2.3. Equation de Richards exprimée en variable de charge de pression*

Pour résoudre l'Eq. II-20 à deux inconnues ($\theta$ et $h$), la variable $\theta$ est éliminée en l'exprimant en fonction de $h$. Cette forme, dite en $h$, de l'équation de Richards, permet de gérer de façon naturelle la transition entre zone saturée et zone non-saturée. Pour ce faire, la capacité capillaire, notée C et exprimée en $m^{-1}$, est introduite :

$$C(h) = \frac{\partial\theta}{\partial h} \qquad \textit{Eq. II-23}$$

En dérivant la fonction de van Genuchten – Mualem (Eq. II-22), la capacité capillaire s'exprime :

$$C(Se) = \frac{\alpha\, m}{1-m}(\theta_s - \theta_r)\, Se^{1/m}\left(1 - Se^{1/m}\right)^m \quad \text{pour } h < 0$$

$$C(Se) = 0 \quad \text{pour } h \geq 0 \qquad \textit{Eq. II-24}$$

La résolution du problème de l'écoulement nécessite de préciser les conditions initiales et aux limites exprimées en terme de charge de pression. On donne un exemple complet de résolution d'un problème d'infiltration avec anisotropie de conductivité hydraulique dans la Section IV.3.1 *[Réfloch et al., 2017].*

La texture et la structure du sol influencent la succion (égale à la valeur absolue de la charge de pression), comme le montre la Figure 13 ci-contre.

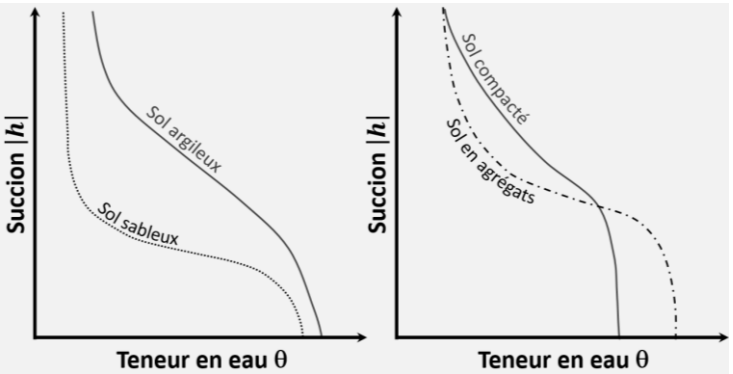



*Figure 13 : Influence de la texture et de la structure du sol sur l'évolution de* |h|(θ) *[d'après Mermoud, 2006]*

## II.2. Le transfert de chaleur en milieu poreux

### II.2.1. Les mécanismes de transfert de chaleur

Le transport de chaleur dans les sols est soumis à trois mécanismes principaux :

- ✓ La conduction dans la matrice solide,
- ✓ Le transport par l'eau (convectif et dispersif),
- ✓ L'échange de chaleur entre la phase solide et la phase fluide du milieu poreux.

### II.2.2. Hypothèse de l'équilibre thermique local : le modèle à une température

Pour ne pas avoir à traiter deux températures (température du solide et du liquide), on considère, en première approximation, que les échanges thermiques entre phases sont suffisamment rapides pour assurer une mise à l'équilibre thermique instantané des phases liquide et solide.

Cette hypothèse est une simplification de la réalité puisque la température du solide n'est pas équivalente instantanément à celle du fluide. En effet, la vitesse d'écoulement ainsi que la granulométrie de la matrice influencent les transferts thermiques qui se produisent entre les deux phases.
D'après *Houpeurt et al. (1965)*, la phase solide et la phase liquide se retrouvent à l'équilibre thermique en moins d'une minute pour un milieu dont la granulométrie est inférieure à 1 mm, et en moins de 2h pour une granulométrie de 10 cm. Ainsi la prise en compte du non-équilibre thermique local est nécessaire pour l'observation de phénomènes sur des temps courts.

Sous réserve que la condition d'équilibre thermique soit valide, on peut écrire :

$$T_f = T_s = T \qquad \textit{Eq. II-25}$$

Avec $T_f$ la température du fluide (en °C), $T_s$ la température du solide (en °C) et $T$ la température du milieu poreux (en °C).

### II.2.3. Les caractéristiques thermiques

#### *II.2.3.1. La capacité thermique volumique*

La capacité thermique volumique, notée *Cv* et exprimée en $J.m^{-3}.K^{-1}$, correspond à la capacité d'un matériau, dans notre cas liquide ou solide, à stocker de la chaleur.
Pour un milieu poreux, saturé en eau, la capacité thermique est déterminée par la somme des capacités des phases solides et liquides, pondérées par la fraction volumique correspondante :

$$Cv_a = \varepsilon_t \, Cv_f + (1 - \varepsilon_t)Cv_s \qquad \textit{Eq. II-26}$$

Avec $Cv_a$, $Cv_f$ et $Cv_s$ les capacités thermiques volumiques respectives du milieu poreux, de la phase liquide et de la phase solide (en $J.m^{-3}.K^{-1}$), et $\varepsilon_t$ la porosité totale (en $m^3.m^{-3}$).

#### *II.2.3.2. La conductivité thermique*

La conductivité thermique, notée $\lambda$ et communément exprimée en W.m$^{-1}$.K$^{-1}$, représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 K (ou 1 °C) par mètre.

La conductivité thermique du milieu poreux dépend du degré de saturation en eau de manière non-linéaire.

Pour un milieu saturé en eau, en négligeant les effets liés à la tortuosité de la matrice poreuse, on considère, en première approximation, que :

$$\lambda_a = \varepsilon_t \, \lambda_f \; + (1 - \varepsilon_t \,)\lambda_s \qquad \textit{Eq. II-27}$$

Avec $\lambda_a$, $\lambda_f$ et $\lambda_s$ les conductivités thermiques respectives du milieu poreux, de la phase liquide et de la phase solide (en W.m$^{-1}$.K$^{-1}$), et $\varepsilon_t$ la porosité totale (en m$^3$.m$^{-3}$).

La conductivité thermique du milieu poreux intervient dans la loi de Fourier qui exprime que le flux thermique conductif est proportionnel au gradient de température.
Un autre mécanisme créé un flux thermique proportionnel au gradient de température : la dispersion hydrodynamique. Ce mécanisme n'intervient que lorsqu'il y a écoulement, et par similitude avec le transport de soluté, on considère que la dispersion thermique est proportionnelle à la vitesse d'écoulement.
On peut noter que cette dépendance est généralement considérée quadratique dans des travaux théoriques ou des applications liées au génie des procédés *[Quintard et al., 1997]*.
La dispersion est différente dans la direction de l'écoulement et dans une direction perpendiculaire. On l'exprime par des coefficients de dispersivité longitudinale ($\alpha_L$) et transversale ($\alpha_T$), exprimés en mètres.
Finalement on regroupe ces mécanismes de flux proportionnels au gradient de température dans des coefficients apparents que sont les conductivités thermiques longitudinale ($\lambda_L$) et transversale ($\lambda_T$), telles que :

$$\begin{aligned} \lambda_L &= \lambda_a \; + \propto_L Cv_f \; U_{pores} \\ et \qquad \lambda_T &= \lambda_a \; + \propto_T Cv_f \; U_{pores} \end{aligned} \qquad \textit{Eq. II-28}$$

On obtient ainsi un tenseur de conductivité thermique, noté $\lambda_A$ (exprimé en W.m$^{-1}$.K$^{-1}$), orienté par la vitesse de l'écoulement, et qui correspond à la conductivité globale équivalente de l'aquifère.

### II.2.4. La conservation de la chaleur

Le transport de chaleur en milieu poreux est soumis à trois phénomènes : la convection, la conduction et la dispersion. Chacun de ces trois phénomènes décrit un flux d'énergie intervenant dans le milieu poreux.

Le calcul du flux d'énergie apporté par convection, noté $F_{convection}$ (en W), fait intervenir la capacité thermique volumique du milieu (Eq. II-26) ainsi que le débit d'échange (qui peut être positif ou négatif selon le sens d'écoulement).

Le flux d'énergie apporté par conduction et dispersion, noté $F_{conduction/dispersion}$ (en W), fait appel à la conductivité thermique globale équivalente de l'aquifère $\lambda_A$.

A ces flux d'énergie peuvent s'ajouter un terme source qui correspond à un flux d'énergie injecté au système, et qui sera noté $F_{source}$ (en W).

D'après l'équation de conservation de la chaleur, la somme de ces trois flux d'énergie est égale à la variation d'énergie du système :

$$F_{convection} + F_{conduction/dispersion} + F_{source} = \frac{\partial U}{\partial t} \qquad \textit{Eq. II-29}$$

Avec *U* l'énergie interne (en J).

Dans notre cas, $F_{source}$ est nul. L'équation de la conservation de la chaleur peut alors s'écrire :

$$\vec{\nabla}.\left(\lambda_A \nabla \mathrm{T} - Cv_f\, \vec{\mathrm{q}}\, \mathrm{T}\right) = Cv_a \frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{t}} \qquad \textit{Eq. II-30}$$

Pour rappel, $\vec{\mathrm{q}}$ est le flux de Darcy, exprimé en m.s$^{-1}$ (Eq. II-4).

Le premier terme de l'Eq. II-30 correspond à l'étalement du front thermique par dispersion et conduction, le second terme illustre le transport convectif par la vitesse d'écoulement et le troisième terme représente l'accumulation locale de chaleur dans le milieu poreux (phase solide et liquide).

### II.2.5. Les conditions initiales et conditions aux limites

Tout comme pour l'écoulement, la modélisation des transferts de chaleur nécessite de renseigner une condition initiale et des conditions aux limites.

La condition initiale, en faisant l'hypothèse que la température est homogène selon l'axe vertical, sera généralement issue de cartes d'interpolation de la température observée ou estimée in-situ.

En termes de conditions aux limites, les trois types de conditions imposées décrites pour l'écoulement dans la Section II.1.1.4.2 peuvent s'appliquer aux transferts de chaleur :

- ✓ Condition de Dirichlet : *T condition de température imposée*
- ✓ Condition de Neumann : $\vec{\nabla}\, T.\vec{n}$ *condition de flux thermique imposé*
- ✓ Condition de Cauchy : $T + \vec{\nabla}\, T.\vec{n}$ *condition de température imposée avec transfert imposé*

Dans ce travail de thèse, seules des conditions aux limites de Dirichlet sont mises en œuvre pour les transferts de chaleur dans le modèle numérique (Chapitre V).

Des conditions de flux nuls ($\vec{\nabla}\, T.\vec{n} = 0$) seront également utilisées sur les bords du domaine d'étude ainsi qu'en fond d'aquifère. En effet, d'après de récents travaux *[Attard, 2017]*, tenir compte du gradient géothermique en fond d'aquifère n'est pas nécessaire : l'impact d'un tel gradient (estimé à 0,075 W.m$^{-2}$ dans la région lyonnaise d'après *Gable, 1979*) est négligeable du fait de la faible profondeur de l'aquifère (environ 20 m), mais également du fait du fort impact thermique causé par l'exploitation du site d'étude (Section III.4.2).

## II.3. Méthode de résolution numérique et codes de calculs sélectionnés

L'objectif de la simulation numérique est de résoudre les différentes équations de transfert d'eau et de chaleur, sur l'ensemble du domaine étudié, en tenant compte des différentes conditions initiales et conditions aux limites imposées.

Parmi les différentes possibilités de résolution numérique, les éléments finis ont été choisis (Figure 14), essentiellement pour leur capacité à prendre en charge des géométries complexes.

Explicitée dans le manuel de FEflow *[Diersch, 2013]*, cette méthode a pour avantage de discrétiser localement le domaine d'étude (selon la géométrie plus ou moins complexe et selon les points d'intérêt tels que les ouvrages de pompage), tout en limitant le nombre de nœuds de façon à restreindre le temps de calcul. Dans notre cas d'étude, travaillant sur un site complexe de captage d'eau potable (nombreux pompages, réalimentation par bassins d'infiltration et interactions avec plusieurs cours d'eau), la méthode des éléments finis est particulièrement adaptée.

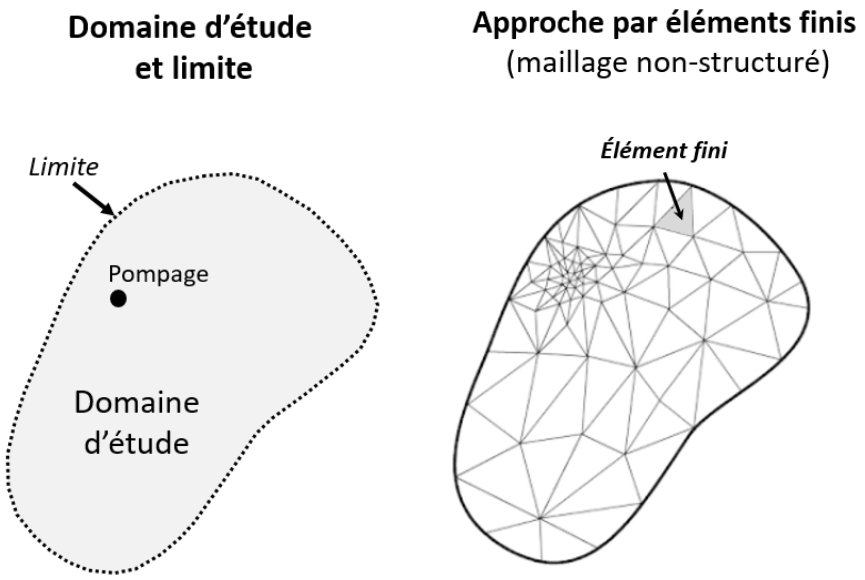



*Figure 14 : Exemple d'une discrétisation d'un domaine 2D par éléments finis [Modifiée de Diersch, 2013]*

Deux codes de calculs ont été sélectionnés pour ce travail de thèse : Comsol Multiphysics pour interpréter les essais d'infiltration réalisés sur le site de captage (Section IV.3.1) et FEflow pour la modélisation hydro-thermique à l'échelle de l'Est Lyonnais et englobant la zone de captage de Crépieux-Charmy (Chapitre V).

## *CHAPITRE II – CONCLUSIONS ET IDÉES À RETENIR*

Pour la modélisation à l'échelle du champ captant, il a été choisi de **simuler les écoulements par la loi de Darcy en milieu saturé**, et non en variablement saturé, de manière à minimiser le nombre de paramètres (conductivités hydrauliques à saturation et coefficients d'échanges nappe-rivière) et à simplifier leur identification.

La **modélisation des écoulements en non-saturé est fondée sur l'équation de Richards** et son utilisation sera limitée à la caractérisation des fonds de bassin. Cette modélisation impose d'identifier plus de paramètres, par l'intermédiaire d'expérimentations dédiées.

Les **transferts de chaleur** seront simulés pour reproduire le traçage des chemins de l'eau par le suivi de l'évolution des températures. L'**hypothèse d'équilibre thermique local** est retenue dans le but de ne traiter qu'une seule variable de température.

La résolution numérique des systèmes d'équations est basée sur la **méthode des éléments finis** et les simulations ont été réalisées à l'aide de logiciels commerciaux : Comsol Multiphysics et FEflow.

# Chapitre III

## Instrumentation, mesures in-situ et observations

Les données télé-gérées, le dispositif expérimental et les observations qui en découlent

***Sommaire***

**III.1. L'observation et le suivi de la ressource par l'Exploitant**
III.1.1. Les données disponibles concernant la ressource
III.1.2. La vérification, la validation et les manques de données dans les chroniques

**III.2. Un dispositif expérimental pour améliorer les connaissances**
III.2.1. Présentation du dispositif expérimental
III.2.2. Connaissances acquises et observations réalisées

**III.3. Évolutions piézométriques à l'échelle du champ captant**
III.3.1. Objectifs et méthodologie
III.3.2. Évolutions temporelles et spatiales des niveaux de nappe

**III.4. Évolutions thermiques à l'échelle du champ captant**
III.4.1. Méthodologie pour la réalisation des cartes de température
III.4.2. Présentation des résultats et interprétation des cartes de température
III.4.3. Conclusions et perspectives

**III.5. Oscillations locales des températures de nappe**
III.5.1. Présentation des données
III.5.2. L'analyse des données pour comprendre les oscillations thermiques
III.5.3. La mise en évidence d'écoulements 3D par interprétation des résultats

***Introduction***

La première approche pour la compréhension des écoulements souterrains repose sur l'observation des phénomènes. L'observation est basée sur les mesures réalisées in-situ, sans modification des conditions d'exploitation du site de captage.

Ce chapitre débute par un inventaire des données acquises et disponibles sur le site d'étude, la méthode de vérification des données et l'explication des manques de données qui peuvent survenir. S'en suivra la présentation du dispositif expérimental, déployé au travers des travaux de recherche actuels, qui permet de comprendre le fonctionnement du système sur une échelle réduite.

À l'échelle du champ captant, les évolutions piézométriques et thermiques qui surviennent permettent de visualiser et proposer une première interprétation des écoulements.
L'observation peut également s'intéresser à des phénomènes plus locaux, comme les oscillations de température de nappe rencontrées dans certains ouvrages en cas de conditions d'exploitation spécifiques.

# Chapitre III : INSTRUMENTATION, MESURES IN-SITU ET OBSERVATIONS – *Les données télé-gérées, le dispositif expérimental et les observations qui en découlent*

## III.1. L'observation et le suivi de la ressource par l'Exploitant

Dans cette partie seront détaillées les instrumentations et mesures à disposition, à savoir, les données sur les ouvrages de pompage, les bassins d'infiltration, les ouvrages de suivi de la ressource et des eaux superficielles. Un sous-chapitre sera consacré à l'analyse critique des mesures (validité et manques de données).

### III.1.1. Les données disponibles concernant la ressource

#### *III.1.1.1. L'exploitation de la ressource*

##### *III.1.1.1.1. Les ouvrages de pompage*

**111 puits de pompage** peuvent être activés sur le site (+ cinq ouvrages désaffectés). Divisés en trois groupes selon leur localisation et leur diamètre, ils se répartissent comme suit (Figure 32) :

- ✓ **32 puits sur l'île de Charmy**, construits entre 1954 et 1967

Les puits de Charmy sont raccordés aux postes d'alimentation électriques 11, 12, 13 et 14. Chaque poste électrique permet l'alimentation de 8 puits. Tous les ouvrages sont des puits maçonnés de 2,5 m de diamètre (poste 11) ou 2,1 m de diamètre (postes 12, 13 et 14), creusés jusqu'au substratum imperméable. La profondeur des puits varie de 15 à 19 m par rapport au terrain naturel. Les arrivées d'eau dans les ouvrages sont assurées par des barbacanes de différentes sortes : barbacanes rectangulaires, multicellulaires ou rondes. Le nombre de rangées de barbacanes et de barbacanes par rangée varie selon les puits, et assurent une épaisseur captante de l'ordre de 2 à 3 m.
Chaque puits de Charmy est équipé d'une pompe de type « électropompe multicellulaire immergée » de 100 à 250 $m^3.h^{-1}$ à 23 m de Hauteur Manométrique Totale (HMT).

- ✓ **52 puits sur l'île de Crépieux** (dont 3 désaffectés), construits entre 1968 et 1975

Les puits de Crépieux sont raccordés aux postes d'alimentation électriques 1 à 8. Tous les ouvrages ont un diamètre de 3 mètres et ont été creusés jusqu'au substratum imperméable. La profondeur des puits varie de 15 à 23 mètres par rapport au terrain naturel. Les arrivées d'eau dans les ouvrages sont assurées par des barbacanes rondes en PVC. Le nombre de rangées de barbacanes et de barbacanes par rangée varie selon les ouvrages, et assurent une épaisseur captante de l'ordre de 4 m.
Chaque puits de Crépieux est équipé de deux pompes de type « électropompes multicellulaires immergées » de 250 $m^3.h^{-1}$ à 23 m de HMT.

- ✓ **32 forages au Sud-Ouest de Crépieux** (dont 2 désaffectés), réalisés entre 1979 et 1980

Il s'agit de forages en acier de diamètre 800 mm et surmontés d'une structure étanche destinée à éviter la pénétration d'eau de surface. Ces forages sont reliés aux postes d'alimentation électriques 9 et 10.
Les arrivées d'eau sont assurées par un tube crépiné dans l'ouvrage, sur une hauteur moyenne de 12 m. Les crépines sont constituées d'acier semi-Inox APS 20 A, à l'exception du forage 09-06-01 qui est en acier galvanisé. Chaque forage de Crépieux est équipé d'une pompe de type « électropompe multicellulaire immergée » de 150, 250 ou 350 $m^3.h^{-1}$ à 23 m de HMT.

Tous ces ouvrages de pompage, dont les caractéristiques principales sont présentées en Annexe 3, font l'objet d'inspection vidéo et de pompages d'essai (en moyenne 12 inspections

vidéo et 12 pompages d'essai par an sont réalisés). Ainsi chaque ouvrage de pompage est inspecté au maximum tous les 10 ans (respect de la norme et du contrat entre l'Exploitant et la Métropole de Lyon). En cas de besoin, des régénérations d'ouvrage peuvent être menées. En moyenne, sur le site, les ouvrages sont régénérés tous les 12 à 14 ans.

Les ouvrages de pompages constituent des points de suivi de la ressource d'un point de vue quantitatif et qualitatif (Tableau 3) :

- ✓ **Suivi quantitatif de la ressource**

Tous les ouvrages de pompage possiblement actifs sont équipés de sondes de mesure de niveau de nappe. Bien qu'ils soient fortement impactés en cas de fonctionnement du pompage de l'ouvrage, les mesures de niveaux piézométriques au cœur des puits correspondent à une réelle information sur l'état quantitatif de la nappe.
Chaque puits est équipé d'un débitmètre depuis 2014 (les forages de Crépieux sont équipés d'un débitmètre par doublet d'ouvrage). Pour ne pas créer de creux piézométriques locaux, les pompages sont répartis de manière homogène sur l'ensemble du champ captant (environ un puits sur deux). En fonctionnement normal, un puits est actif au maximum 20h/24h. Depuis 2015, un effort environnemental est mené : les pompes les plus rentables d'un point de vue énergétique sont privilégiées au détriment des pompes les plus énergivores. De ce fait, les pompages sur les postes électriques 7 et 8 sont privilégiés.

- ✓ **Suivi qualitatif de la ressource**

Parmi l'ensemble des ouvrages de pompage, 49 puits et forages sont équipés de sondes de température. Mises en place entre 2012 et 2014, ces sondes sont situées en fond d'ouvrage, et permettent de contrôler la qualité thermique de l'eau. En cas de température supérieure à 25 °C, le risque de développement bactériologique est accru.

Par ailleurs, l'eau de chaque puits est contrôlée au maximum une fois par trimestre. Les analyses permettent de suivre l'évolution de différentes variables physico-chimiques classiques (température, oxygène dissous, pH, conductivité électrique, turbidité) mais aussi la qualité bactériologique.

| Type de mesure | Localisation de la mesure | Nombre d'ouvrages équipés | Pas de temps de la mesure | Instrumentation |
|---|---|---|---|---|
| **Débit de pompage** ($m^3.s^{-1}$) | Sortie d'ouvrage | 81 puits + 15 doublets de forages | 1 minute | Débitmètre Kröhne Waterflux 3000/f Précision : 3 % |
| **Niveau piézométrique** (mIGN69) | Fond d'ouvrage | 111 | 10 minutes | Précision : 0,05 m |
| **Température de nappe** (°C) | Fond d'ouvrage | 49 | 1 heure | PT100 Précision : 0,1 °C |

*Tableau 3 : Inventaire des données acquises en continu dans les ouvrages de pompage*

#### *III.1.1.1.2. Les bassins d'infiltration*

Au nombre de 12, les bassins d'infiltration jouent un double rôle de protection de la ressource en cas de contamination dans les eaux de surface mais également de maintien de la nappe (Chapitre IV).
La réglementation impose un certain nombre de critères à respecter lors de l'exploitation des bassins, notamment une vitesse d'infiltration de l'ordre de 2 $m.j^{-1}$ et la conservation d'une zone

non saturée (ZNS) d'un mètre d'épaisseur au droit de chaque bassin pour garantir la filtration de l'eau infiltrée au travers des alluvions. Dans la pratique, 2 m de ZNS sont maintenus.
Dans le but de répondre à ces critères règlementaires, plusieurs données sont enregistrées en continu au niveau des bassins, comme illustré dans le Tableau 4.

Les mesures de niveau et de températures sont réalisées au niveau du tranquilisateur. Il s'agit d'un cylindre en béton, à proximité de la tulipe de remplissage du bassin, ouvert dans le fond. Ainsi les mesures de hauteur d'eau ne sont pas impactées par les remous lors du remplissage du bassin. Suite à l'ajout d'une sonde de température au centre du bassin 5-2, il semblerait que le cylindre bétonné n'influence pas les mesures de températures (aussi bien en hiver qu'en été). L'analyse de cette comparaison de mesures est présentée en Annexe 4.

| Type de mesure | Localisation de la mesure | Nombre d'ouvrages équipés | Pas de temps d'enregistrement | Instrumentation |
|---|---|---|---|---|
| **Débit introduit** ($m^3.s^{-1}$) | Tulipe de remplissage du bassin | 12 | 1 minute | Capteur de hauteur de lame d'eau déversante Rosemount |
| **Hauteur d'eau** (m) | Tranquilisateur, proche de la tulipe de remplissage | 12 | 10 minutes | Capteur ultrasons Hitec (CP5220) ; Endress+Hauser (fmx167) ou Siemens (7mf1570) |
| **Température** (°C) | Tranquilisateur, proche de la tulipe de remplissage | 12 | 1 heure | PT100 |
| **Conservation de la ZNS de 2 m** (mIGN69) | Piézomètre de référence pour chaque doublet de bassin | 7 | 10 minutes | Capteurs immergeables Endress+Hauser (waterpilot fmx167), Siemens (sitrans P série MPS) ou Hitec (CP5210) |

*Tableau 4 : Inventaire des données issues des bassins d'infiltration*

#### *III.1.1.1.3. Les données en sortie d'usine de production*

L'ensemble de l'eau prélevée sur le champ captant est ensuite distribuée entre deux usines de production (localisation sur la Figure 11) :

- ✓ **L'usine de Croix-Luizet** : elle permet d'alimenter les zones de basses et moyennes altitudes du réseau de distribution (pression de 4 et 6 bars respectivement). La sortie de l'usine est assurée par 4 conduites.
- ✓ **L'usine de Crépieux-Velette** : qui permet l'alimentation des hautes altitudes, grâce à une pression plus élevée de l'ordre de 12 bars.

Des mesures de débit et de température sont réalisées au niveau des différentes conduites en sortie du champ captant (Figure 15). Pour ce travail de thèse, les températures de sortie d'usine permettent d'estimer la température de nappe moyenne sur l'ensemble du champ captant. De ce fait, seules les températures en sortie de l'usine de Croix-Luizet sont prises en compte (moyenne des températures enregistrées sur les quatre conduites) puisque la température enregistrée en sortie d'usine de Crépieux est fortement impactée par la température de l'eau en provenance de la prise d'eau de l'usine de La Pape lorsque celle-ci est en fonctionnement.

La température moyenne à la sortie de l'usine de Croix-Luizet présente une cyclicité annuelle bien marquée (Figure 15) : en période estivale la température de l'eau prélevée peut

atteindre jusqu'à 19 °C alors qu'en période hivernale elle est de l'ordre de 12 °C. Cette évolution saisonnière est très largement liée à l'exploitation des bassins d'infiltration qui jouent un rôle prépondérant sur l'évolution des températures de nappe en période estivale (Sections III.4.2 et IV.3.2). Cette observation est notamment remarquée au mois de juin 2016 : les bassins n'ont pas fonctionné pendant un mois complet, ce qui est largement ressenti du point de vue de l'évolution des températures en sortie d'usine (température stable entre mai et juin 2016).

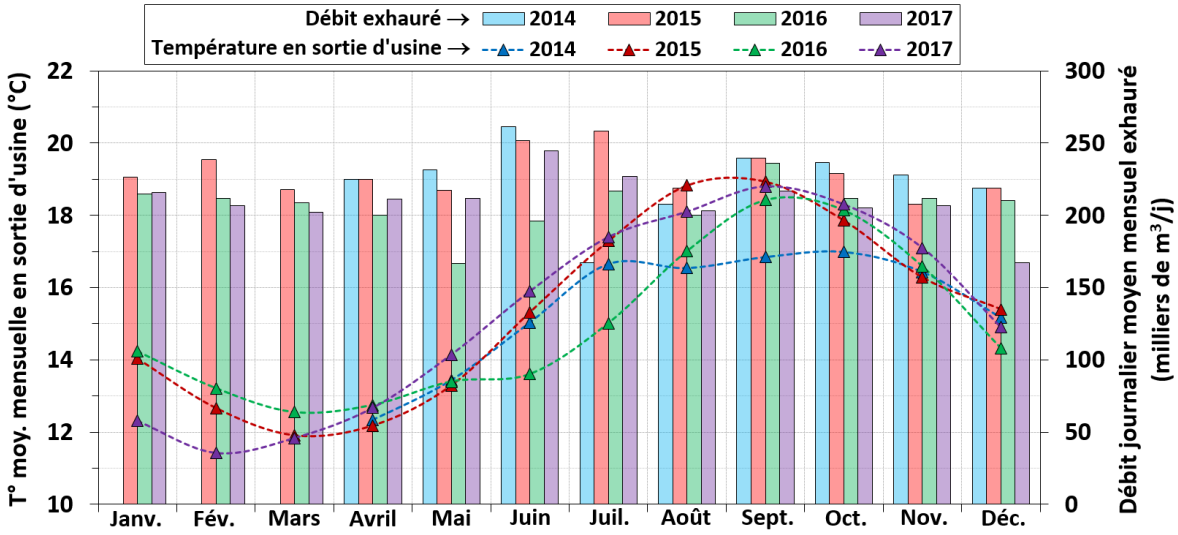



*Figure 15 : Evolution du débit journalier moyen mensuel extrait du champ captant, et de la température moyenne mensuelle en sortie d'usine de Croix-Luizet entre avril 2014 et décembre 2017*

Le piézomètre S13 peut être considéré comme étant la référence de la température de nappe sans influence de l'exploitation du site (localisé en amont hydraulique de la zone de captage, éloigné des pompages et des bassins de réalimentation, Figure 28). La température de nappe enregistrée au sein de cet ouvrage ne présente que peu de variations annuelles : sur la période 2015-2016, la température moyenne enregistrée est de 13,7 °C (écart-type $\sigma$ = 0,39).
Par comparaison aux températures moyennes mensuelles de sortie d'usine, l'exploitation du champ captant provoque une augmentation de l'ordre de 4 à 5 °C en été, alors que la diminution en période hivernale est limitée à 2 °C maximum. De ce fait l'impact thermique des bassins d'infiltration est ressenti de manière prononcée en période estivale (Figure 15).

La Figure 15 présente également les débits moyens mensuels prélevés sur le champ captant de 2014 à 2017. En moyenne sur la période avril 2014 – décembre 2017, ce débit est de 218 515 $m^3.j^{-1}$. Le débit prélevé minimal est rencontré en juin 2016 (= 166 700 $m^3.j^{-1}$) et le débit moyen mensuel le plus élevé sur la période analysée est enregistré en juin 2014 (= 261 200 $m^3.j^{-1}$). Les prélèvements d'eau varient selon les mois de l'année, et d'une année sur l'autre, en fonction des besoins en eau de la population, des conditions météorologiques (en cas de crue de Rhône, les pompages peuvent être réduits pour limiter les infiltrations sur berges), et des pompages au sein des captages périphériques : en cas de production importante dans les captages périphériques, le volume d'eau extrait du champ captant est réduit.

#### *III.1.1.2. Le suivi de la ressource – Eaux souterraines et eaux superficielles*

##### *III.1.1.2.1. Suivi des eaux souterraines*

Les eaux souterraines font l'objet d'un suivi en temps réel au sein des piézomètres, mais également des puits de pompage. La liste des capteurs présents dans les piézomètres et dans les ouvrages de pompage sont détaillés dans le Tableau 5. Tous ces capteurs font l'objet d'un contrôle annuel pour s'assurer de l'absence de dérive de la mesure ou de dérive de l'horloge interne.

Un réseau de 152 piézomètres est présent sur le site du champ captant. Sur l'ensemble de ces ouvrages, seuls 57 piézomètres sont équipés de sondes de mesures télétransmises du niveau de nappe, et 9 sont équipés de sonde de mesure de la température de nappe. La télétransmission de ces données permet de connaitre l'état de la nappe en temps réel et d'adapter l'exploitation du site. Certains ouvrages sont particulièrement suivis, comme par exemple (Figure 28 et Figure 47) :

- ✓ Le **piézomètre M12**, situé au centre de la prairie de captage. Il s'agit du piézomètre de référence de l'Exploitant. Le niveau piézométrique enregistré sur ce point est considéré comme étant au centre du creux piézométrique créé par la zone de pompage.
- ✓ Les **piézomètres de référence des bassins d'infiltration**. Équipés de seuils d'alerte, ces ouvrages contribuent à l'exploitation des bassins d'infiltration (ce sont les points de référence pour garantir la conservation de la zone non saturée au droit des bassins).

Un dispositif expérimental (Section III.2), situé de part et d'autre du bassin 5-2, a été conçu entre 2012 et 2015 dans le cadre des travaux de recherche menés sur le champ captant *[Loizeau, 2013]*. Le dispositif est composé de 31 piézomètres, chacun étant équipé d'une sonde de niveau et de température, permettant de mieux comprendre et caractériser les écoulements souterrains en interaction avec un bassin d'infiltration et les cours d'eau.

##### *III.1.1.2.2. Le suivi des eaux de surface*

Les eaux superficielles jouent un rôle fondamental à l'échelle du champ captant puisque les échanges nappe-rivière contribuent à l'alimentation de la ressource souterraine mais aussi parce que l'eau infiltrée dans les bassins d'infiltration, à partir d'un bassin de décantation, est prélevée dans le Vieux-Rhône (Figure 47). Le suivi des eaux superficielles contribue à la pérennisation de la ressource.

Chaque cours d'eau bordant ou traversant le champ captant est équipé d'une sonde de mesure du niveau d'eau et de la température de surface (détails dans le Tableau 5 et localisation sur la Figure 16). La précision des mesures de niveau est de 0,05 m et l'erreur maximale autorisée pour la mesure de température est de 1 °C. La position géographique de ces capteurs de mesure peut influencer les mesures : lors des périodes d'étiage, les capteurs peuvent ne pas être assez éloignés du rivage, ce qui entraine des manques de données plus ou moins importants (sur le Canal Sud notamment).

Deux stations d'alerte (Figure 16) ont pour objectif de suivre la qualité de l'eau qui circule dans les cours d'eau. Une des stations est située au niveau du barrage de Jons (à 14 km en amont du champ captant), la deuxième est localisée à l'aval de la divergence entre le Canal Sud et le Vieux-Rhône (partie Est du champ captant).

Les mesures physico-chimiques réalisées en temps réel sur ces eaux de surface permettent de détecter les contaminations potentielles avant leur arrivée au niveau du champ captant. Elles comportent des mesures de température, d'oxygène dissous, de pH, de conductivité électrique, de turbidité, de concentration en métaux (zinc, cadmium, plomb, cuivre et chrome), de concentration en hydrocarbures et nitrates. Ainsi l'exploitation du site de

captage peut être adaptée en cas de risque avant l'arrivée de la contamination (arrêt de l'alimentation des bassins d'infiltration avant l'arrivée de la possible contamination dans les bassins de décantation, arrêt de certains pompages proches des cours d'eau pour limiter les infiltrations par les berges des cours d'eau).

Le suivi des eaux de surface comprend également les mesures réalisées dans le Lac des Eaux Bleues (Figure 16). Une prise d'eau étant présente dans ce lac pour alimenter l'usine de secours de La Pape, il est nécessaire de suivre l'évolution de la qualité et de la quantité des eaux de cette retenue d'eau en temps réel. Différentes données y sont disponibles, telles que la hauteur d'eau dans le lac, la température, le pH, la turbidité, les volumes prélevés, …

| Localisation | Type de mesure et nombre d'ouvrages équipés | Type de capteur |
|---|---|---|
| **Piézomètres**<br><br>**Puits et forages** | **Niveau piézométrique**<br>57+31 piézomètres<br>111 puits et forages | Capteurs immergeables (précision de 0,05 m)<br>✓ Endress+Hauser (waterpilot fmx167)<br>✓ Siemens (sitrans P série MPS)<br>✓ Hitec (CP5210)<br>✓ OTT (Orpheus Mini) |
| | **Température**<br>9+31 piézomètres<br>49 puits et forages | PT 100 ou OTT Orpheus mini |
| **Cours d'eau**<br>Canal de Miribel<br>Vieux Rhône<br>Canal Sud<br>Canal de Jonage | **Hauteur d'eau**<br>4 bras du Rhône | Capteur ultrason Rosemount (3101)<br>Endress+Hauser (FDU 82)<br>Mobrey (paratronic MPS 422) |
| | **Température**<br>4 bras du Rhône | PT 100 |

*Tableau 5 : Liste des capteurs mis en œuvre pour le suivi de la ressource souterraine et de l'eau superficielle*

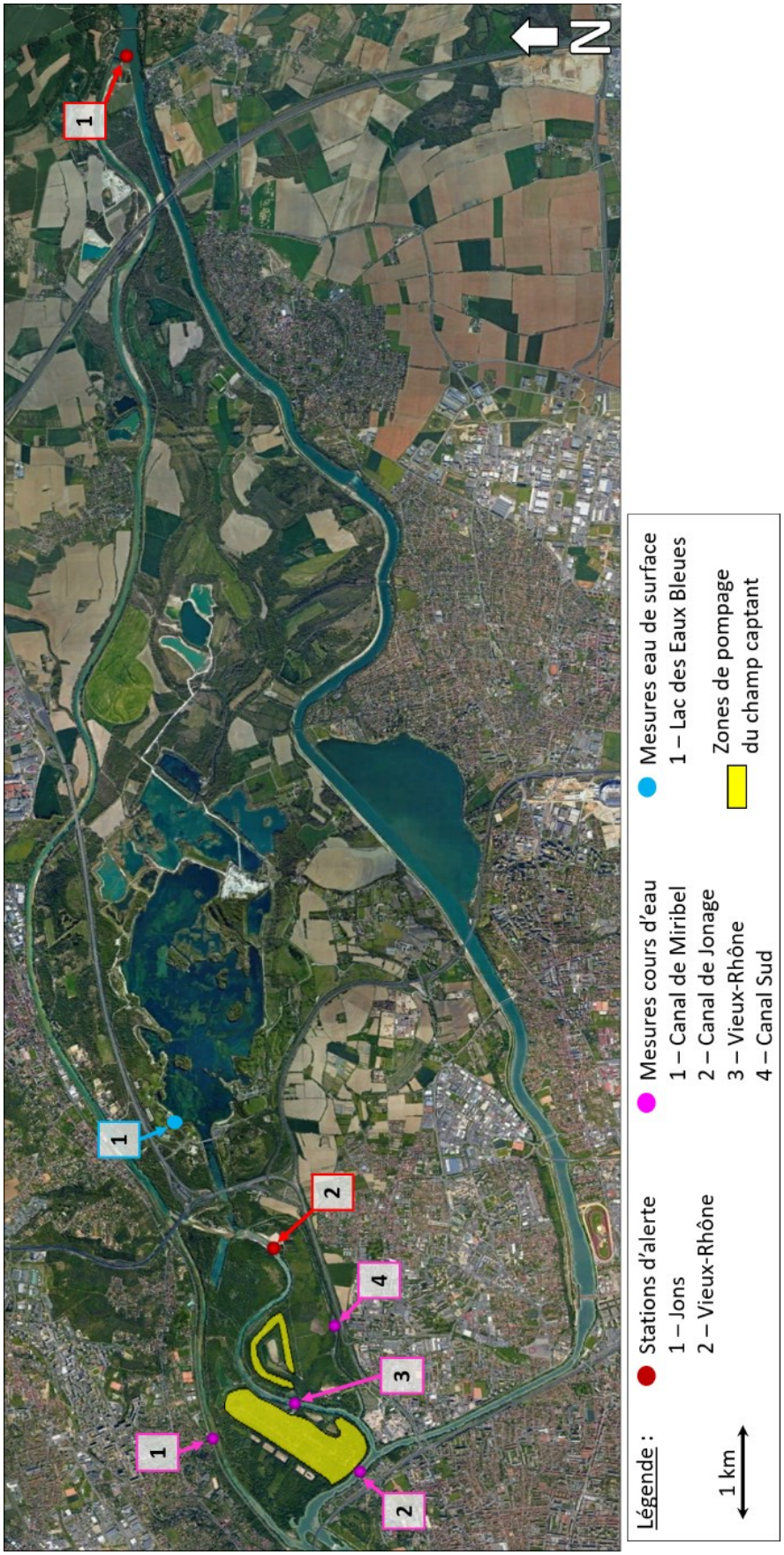



*Figure 16 : Carte de localisation des stations d'alerte, des points de mesure sur les cours d'eau et de la délimitation des zones de pompages sur le champ captant.*

### III.1.2. Vérification, validation et manques de données dans les chroniques

Comme illustré dans la Section III.1.1, le nombre d'équipements sur site est considérable. La plupart des appareils de mesure sont contrôlés une fois par an sur le terrain pour éviter et/ou corriger toute dérive de mesure ou de l'horloge des capteurs. Par ailleurs, une vérification des appareils de mesure est systématiquement réalisée en cas de défaut ou de panne de l'instrumentation. Les gammes de valeurs ainsi que les erreurs maximales acceptées pour chaque type d'appareil de mesure sont reportées dans le Tableau 6.

** $Z_{sonde}$ : Altitude de la sonde ; ** $Z_{sol}$ : Altitude du sol*

| Type de mesure | Localisation de la mesure | Erreur maximale acceptée dans la mesure | Gamme de valeurs acceptées |
|---|---|---|---|
| **Débit** | Dans les puits/forages (débit de pompage) | 5 % | 0 $m^3/h$ < mesure ≤ 1 000 $m^3.h^{-1}$ |
| | Dans les bassins d'infiltration (débit introduit) | 5 % | 0 $m^3/h$ < mesure ≤ 4 000 $m^3.h^{-1}$ |
| **Niveau d'eau** | Dans les piézomètres | 0,05 m | $Z_{sonde}$* < mesure ≤ $Z_{sol}$** |
| | Dans les cours d'eau | 0,05 m | $Z_{sonde}$ < mesure ≤ $Z_{sol}$ |
| | Dans les bassins d'infiltration | 0,05 m | 0 m < mesure ≤ 2,5 m |
| **Température** | Dans les piézomètres | 1 °C | 0 °C < mesure ≤ 40 °C |
| | Dans les cours d'eau | 1 °C | -2,5 °C < mesure ≤ 50 °C |
| | Dans les bassins d'infiltration | 1 °C | -2,5 °C < mesure ≤ 50 °C |

*Tableau 6 : Erreur maximale et gamme de valeurs acceptées pour le traitement et la validation des données brutes issues des différents types d'appareils de mesure*

Malgré les contrôles des capteurs in-situ et compte tenu du nombre de données acquises et enregistrées dans la base de données, il est nécessaire de réaliser un travail de validation et de traitement des données brutes avant de pouvoir interpréter les phénomènes observés. Ce travail d'analyse et de traitement de l'ensemble des données brutes consiste à supprimer toutes les données aberrantes lorsqu'elles sont situées hors-gamme (Tableau 6), mais également à détecter les données erronées moins facilement décelables. Par exemple, il arrive que l'appareil de mesure se bloque à une certaine valeur pendant plusieurs heures voire même plusieurs jours. Ces données ne correspondent pas à des valeurs aberrantes (elles ne sont pas hors-gamme), mais elles sont considérées comme erronées lorsqu'il est impensable qu'une valeur reste constante pendant plusieurs jours consécutifs.

En général, les données erronées sont liées à une défaillance technique de l'appareil de mesure, ou à un problème lors de la transmission de la donnée.

Du fait des pas de temps d'enregistrement qui diffèrent selon les types de mesures (Tableau 3 et Tableau 4), les chroniques de données sont automatiquement générées à différents pas de temps au sein de la base de données. Exemple : les chroniques de débits des ouvrages de pompage, enregistrées toutes les minutes, sont transformées en chroniques de débits horaires ou journaliers. Ces transformations automatiques peuvent être erronées. Il est donc nécessaire de contrôler les chroniques extraites de la base de données, en se basant toujours sur la chronique brute initiale (chronique à la minute pour les débits). L'analyse des chroniques menées dans ce travail de thèse a permis de déceler certaines erreurs qui ont été corrigées dans la base de données.

## III.2. Un dispositif expérimental pour améliorer les connaissances

### III.2.1. Présentation du dispositif expérimental

#### *III.2.1.1. La première phase de réalisation du dispositif*

Le dispositif expérimental créé en 2012, lors des travaux de thèse de S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*, a été positionné entre le bassin 5-2 et le Vieux-Rhône dans le but d'améliorer la caractérisation de l'aquifère sur une zone éloignée des pompages (localisation illustrée sur la Figure 17).

Ce dispositif expérimental est composé de 12 piézomètres « classiques », 9 piézomètres en « flûte de pan » et 1 forage expérimental (au centre du dispositif).

- ✓ Les **piézomètres « classiques »** captent l'eau de nappe sur toute la profondeur de l'aquifère (tubage crépiné sur toute la hauteur de l'ouvrage). Ces ouvrages sont uniformément espacés les uns par rapport aux autres et forment un Y entre le bassin d'infiltration et le Vieux-Rhône. Ils sont repérables par leur dénomination débutant par un « S » (Figure 17).
- ✓ Les **piézomètres en « flûte de pan »** sont quant à eux crépinés sur une épaisseur limitée de l'aquifère (0,5 ou 1 m). Une flûte de pan est composée en général de 3 ouvrages : un dont le fond atteint le substratum, un dont le fond atteint une profondeur intermédiaire de l'aquifère, et enfin un dernier dont le fond est proche du niveau piézométrique statique. Ils sont repérables par leur dénomination débutant par un « P ». Dans le but de mieux caractériser les échanges bassin-nappe et nappe-rivière, une flûte de pan a été placée juste au sud du bassin 5-2 et deux flûtes de pan sont localisées à proximité des berges du Vieux-Rhône.

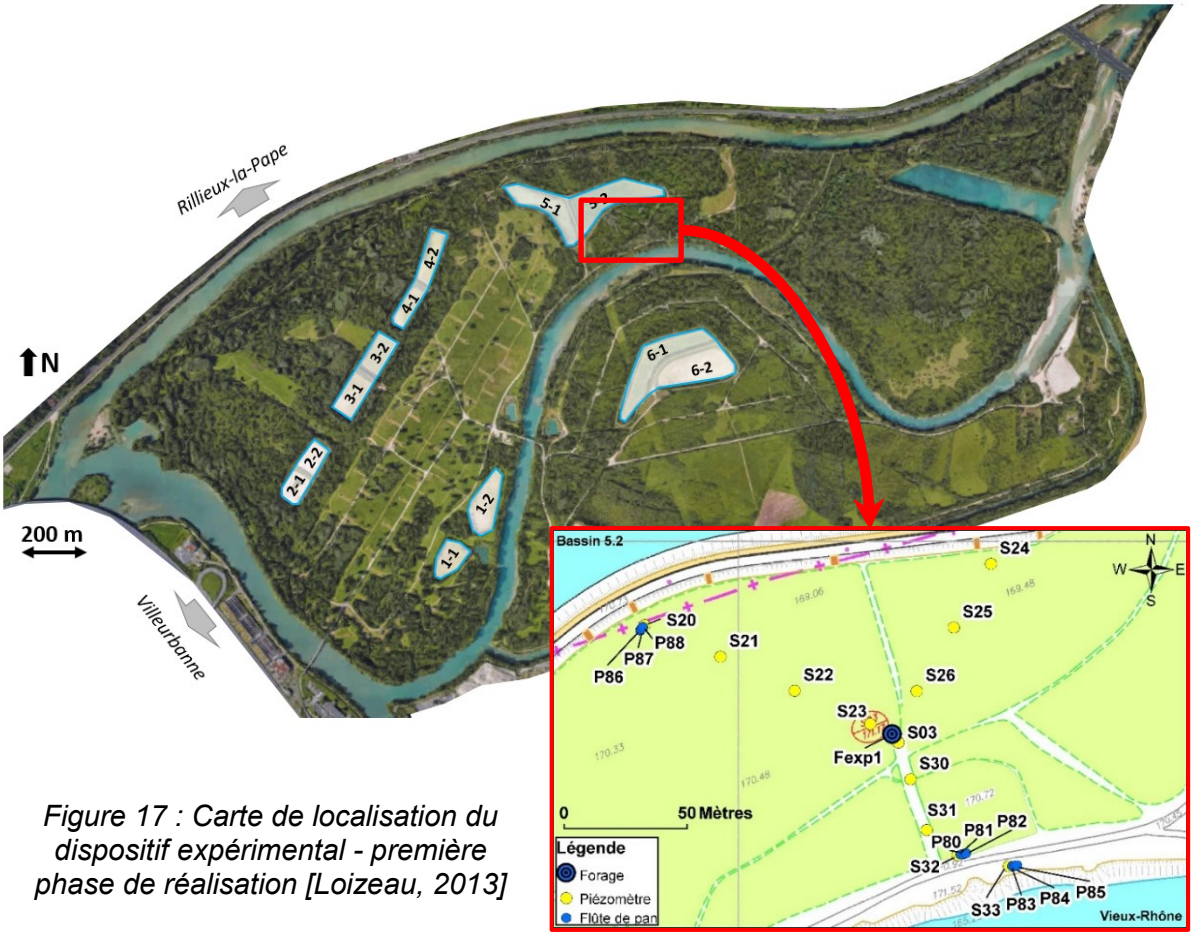



*Figure 17 : Carte de localisation du dispositif expérimental - première phase de réalisation [Loizeau, 2013]*

Chaque ouvrage est équipé d'une sonde OTT Orpheus Mini, permettant l'enregistrement en continu du niveau piézométrique (toutes les 10 minutes) et de la température de nappe (toutes les heures). Les sondes sont positionnées en fond d'ouvrage, au niveau du tubage crépiné pour éviter l'enregistrement de données sur de l'eau stagnante. Une campagne de relevé trimestrielle est réalisée dans le but de repérer puis éventuellement de corriger toute dérive dans la mesure et dans le temps (mesure au limnimètre et vérification de l'horloge interne de l'appareil de mesure).

La première phase de réalisation du dispositif expérimental a permis de :

- ✓ **Caractériser la lithologie de la zone d'étude** : l'analyse des cuttings lors des forations a permis de localiser précisément le substratum, l'épaisseur de l'aquifère et de mettre en évidence la présence d'une couche moins perméable. Localisée à une profondeur de 9 m par rapport au terrain naturel, et sur une épaisseur d'environ 1 m, cette couche moins perméable correspond à des dépôts alluvionnaires dont la matrice comporte de l'argile. Elle est notamment retrouvée dans les ouvrages S20, S21, S22, S24 et S25 (localisation sur la Figure 17), c'est-à-dire dans les ouvrages les plus proches du bassin d'infiltration.

- ✓ **Comprendre les écoulements** entre le bassin et la nappe, et entre le Vieux-Rhône et la nappe. Des différences de potentiels hydrauliques mesurés dans les ouvrages en flûte de pan permettent de préciser les sens d'écoulement.
  L'impact de la couche moins perméable s'avère non négligeable sur les écoulements *[Loizeau, 2013]*.

- ✓ **Estimer certaines caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, comme la transmissivité**. Des pompages d'essai réalisés au niveau du forage expérimental (centre du dispositif) ont permis d'estimer que la transmissivité de l'aquifère est comprise entre $1{,}78.10^{-1}$ et $2{,}10.10^{-1}$ $m^2.s^{-1}$.
  La transmissivité ($T_r$) correspond à la conductivité hydraulique à saturation ($K_s$) multipliée par l'épaisseur de l'aquifère ($e_A$).
  Ainsi, pour une épaisseur d'aquifère de 10 m, la conductivité hydraulique au sud du bassin 5-2 est de l'ordre de $1{,}8.10^{-2}$ à $2{,}1.10^{-2}$ $m.s^{-1}$. Ces valeurs de conductivité hydraulique correspondent aux valeurs typiquement retrouvées dans les alluvions graveleuses non argileuses *[de Marsily, 1986]*.

Suite aux travaux de S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*, un manque de connaissances au Nord et au centre du bassin d'infiltration 5-2 limitait la caractérisation des écoulements et donc les interprétations issues de la modélisation numérique (notamment un questionnement sur la conservation ou non de la zone non-saturée au droit du bassin 5-2 et sur la continuité de l'horizon argileux).
Une extension de ce dispositif expérimental était donc nécessaire pour une meilleure caractérisation et compréhension des chemins de l'eau sur cette zone d'étude fortement influencée par les deux bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 ainsi que par les deux cours d'eau principaux.

#### *III.2.1.2. L'extension du dispositif expérimental*

L'extension du dispositif expérimental a consisté à la création de neuf piézomètres durant l'été 2015. Un tableau récapitulatif des dénominations, localisation et profondeurs des 31 ouvrages du dispositif expérimental est illustré en Annexe 5. Ces nouveaux ouvrages sont disposés comme suit (Figure 18) :

- ✓ **Deux ouvrages en flûte de pan au centre du bassin 5-2**.

Etant situés au centre du bassin, une vigilance accrue a été apportée sur la conception de ces deux piézomètres pour éviter tout risque d'infiltration préférentielle de l'eau du bassin le long du piézomètre. Pour cela, l'espace interstitiel entre le trou de foration et le tubage plein du piézomètre a été cimenté (au lieu d'être comblé de massif filtrant comme réalisé habituellement). Les coupes techniques de ces ouvrages sont intégrées en Annexe 5.
Crépinés sur une hauteur restreinte de 1 m, un des piézomètres atteint le substratum (P95), alors que le second s'arrête juste au-dessus de la zone moins perméable qui a été rencontrée à une profondeur de 9 m par rapport à la surface (P96).

- ✓ **Une flûte de pan sur la bordure Nord du bassin 5-2**.

Pour comprendre les écoulements entre l'eau du bassin et la nappe en direction du Nord, trois piézomètres en flûte de pan (P92, P93 et P94) ont été mis en œuvre. Le plus profond d'entre eux, P92, atteint le substratum. Le moins profond (P94) s'arrête juste au-dessus de la zone moins perméable rencontrée à une profondeur de 7 m.
Le piézomètre « classique » associé à cette flûte de pan était déjà existant (M24).

- ✓ **Une flûte de pan en bordure du Canal de Miribel**.

Dans le but d'avoir une meilleure connaissance des échanges entre la nappe et le Canal de Miribel, mais également de visualiser l'impact des bassins sur une plus longue distance en direction du Nord, 3 piézomètres en flûte de pan (P89, P90 et P91) ont été créés à proximité du Canal de Miribel. Ces ouvrages sont accompagnés d'un nouveau piézomètre « classique », dénommé S34.

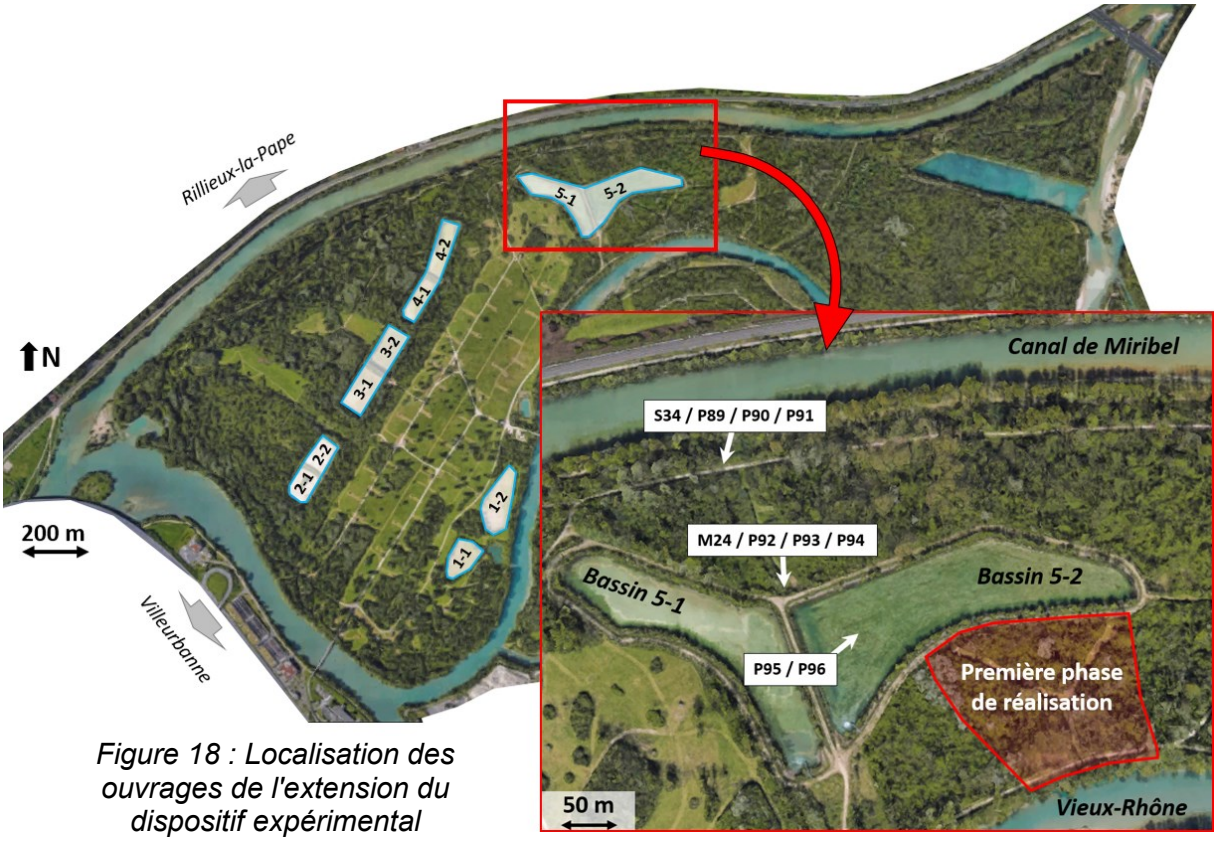



*Figure 18 : Localisation des ouvrages de l'extension du dispositif expérimental*

### III.2.2. Connaissances acquises et observations réalisées

#### *III.2.2.1. Caractérisation de la lithologie au nord et au droit du bassin 5-2*

Au cours des travaux de réalisation de cette extension du dispositif expérimental, des échantillons de sol ont été prélevés tous les mètres de foration, afin de réaliser les coupes lithologiques de chaque ouvrage comme présenté ci-dessous.

La couche moins perméable, mise en évidence dans certains ouvrages au Sud du bassin *[Loizeau, 2013]*, a été rencontrée au sein de tous les nouveaux ouvrages réalisés au centre et au Nord du bassin (figuré vert sur la Figure 19). Cette couche semble être présente sur une épaisseur d'environ 1 m aux alentours de -8 à -10 m par rapport à la surface du sol. En direction du Nord, elle semble être plus épaisse (entre 2 et 4 m d'épaisseur) et un deuxième niveau moins perméable est rencontré aux alentours de -14 m. L'extension spatiale de cette couche contenant des argiles, entre les piézomètres et dans les zones dépourvues d'ouvrages, reste cependant mal connue. Malgré des campagnes de mesures géophysiques (prospections électriques, sismiques, géo-radar) effectuées dans le cadre des travaux de la Plateforme Recherche *[Conte-Chenuc et al., 2016]*, l'extension spatiale de la couche moins perméable n'a pas pu être caractérisée, notamment parce qu'elle est située dans la zone saturée du sous-sol.

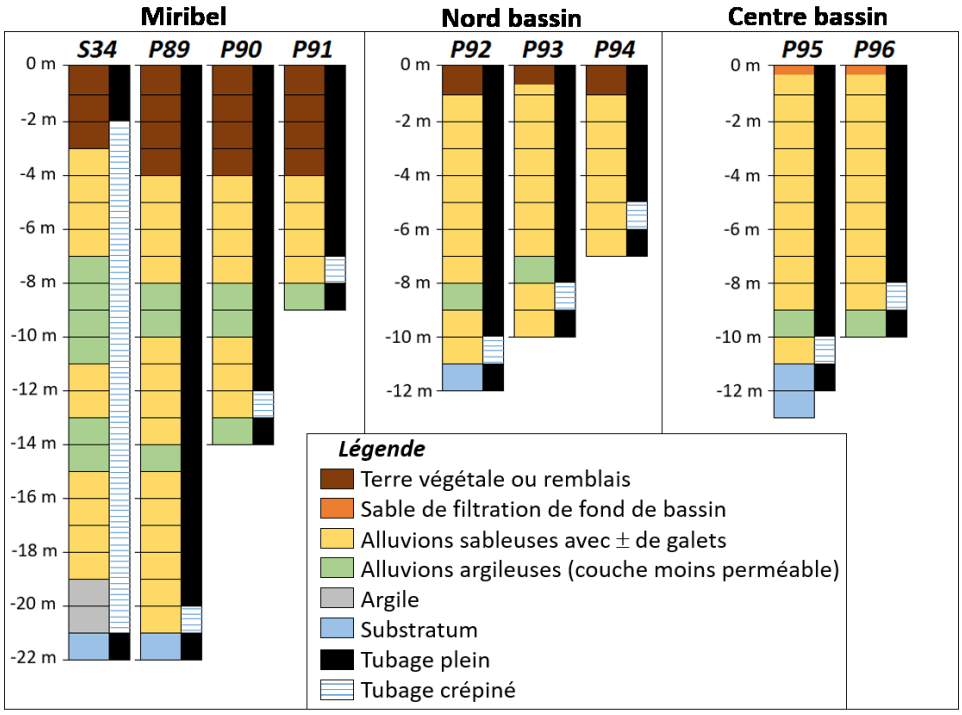



*Figure 19 : Coupes lithologiques des piézomètres de l'extension du dispositif expérimental, et localisation de la zone captante (par tubage crépiné)*

L'épaisseur de l'aquifère n'est pas identique en tout point : le substratum plonge en direction du Nord. Le toit du substratum est retrouvé à une profondeur de 21 m par rapport au terrain naturel (soit à une altitude de 149,58 mIGN69) au niveau de la flûte de pan située à proximité du Canal de Miribel (S34), alors que le piézomètre P95 (au centre du bassin) présente un substratum à 11 m de profondeur par rapport au terrain naturel (soit à une altitude de 158,29 mIGN69).

Une coupe pseudo 2D recoupant les ouvrages du dispositif expérimental, quasi-alignés, permet de mettre en évidence la non-régularité de la surface du toit du substratum et l'extension spatiale de la couche moins perméable (Figure 20). Le niveau de nappe illustré sur cette coupe ne représente pas un état réel à un instant donné : il représente un niveau piézométrique possiblement trouvé au cours d'un cycle de remplissage du bassin 5-2 (remontée piézométrique au droit du bassin).

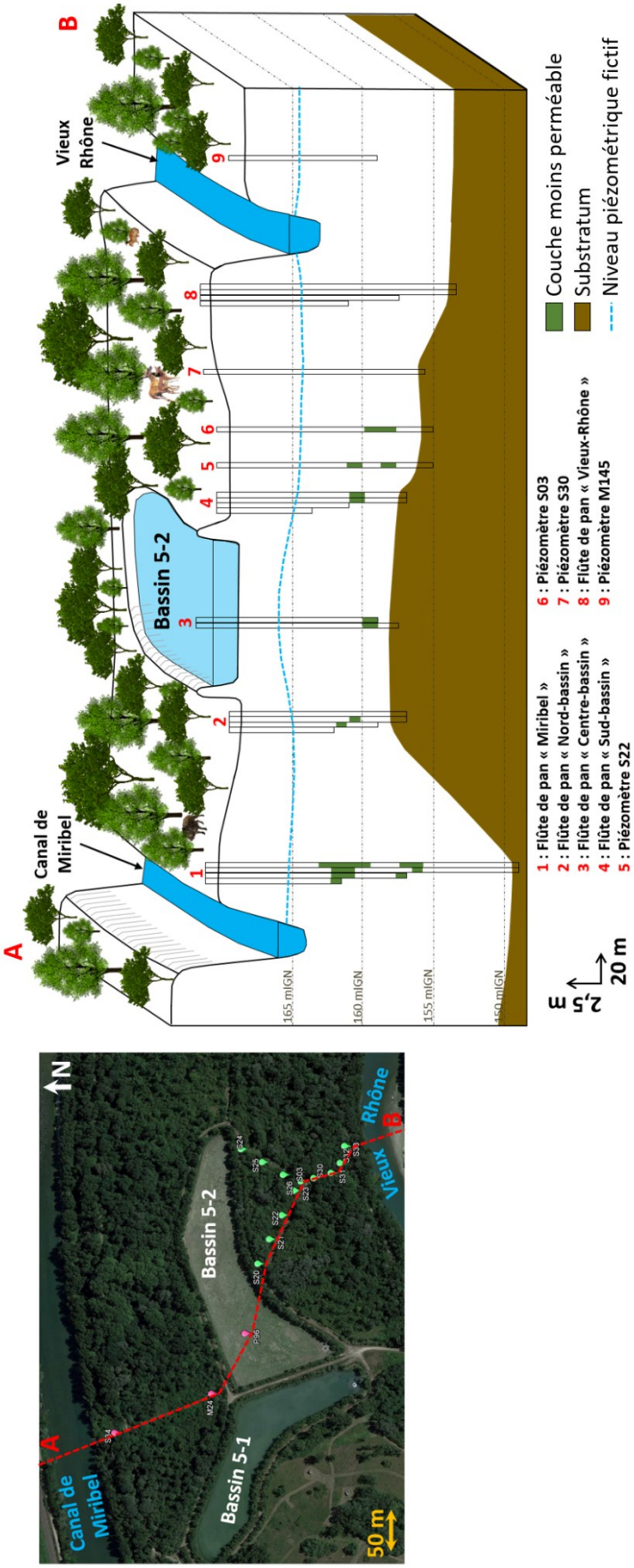



*Figure 20 : Coupe pseudo2D au sein du dispositif expérimental, selon un axe Nord-Sud et traversant le Canal de Miribel, le bassin 5-2 et le Vieux-Rhône.*

#### *III.2.2.2. La compréhension des sens d'écoulement par le suivi des évolutions piézométriques et thermiques*

Tout comme pour les ouvrages de la première phase de réalisation du dispositif expérimental, une sonde OTT Orpheus mini a été installée dans tous les nouveaux piézomètres réalisés. Située dans la partie basse de la crépine de chaque piézomètre (Annexe 5), la sonde permet l'enregistrement en continu du niveau piézométrique et de la température de l'eau de nappe.
Pour rappel, les niveaux piézométriques sont enregistrés toutes les 10 minutes alors que les températures sont enregistrées au pas de temps horaire.

L'année 2016 est une année intéressante puisqu'elle présente des périodes longues de non-fonctionnement des bassins 5-1 et 5-2 (notamment au mois de juin 2016), mais également des périodes pendant lesquelles le niveau d'eau dans le Canal de Miribel est au plus bas (valable en août et septembre 2016).

Deux périodes spécifiques ont été retenues pour analyser les mesures issues du dispositif expérimental et ainsi mieux comprendre les chemins de l'eau (Figure 21) :

- ✓ **Le mois de juin 2016** : il correspond à une longue période d'assec des bassins pendant un épisode de crue prononcée et de longue durée dans le Canal de Miribel.

- ✓ **De mi-mars à début avril** : cette période correspond à une période de mise en eau des bassins 5-1 et 5-2 en simultané (cycles de remplissages entre 1,8 et 1,5 m), en période de basses eaux sans épisode de crue dans le Canal de Miribel.

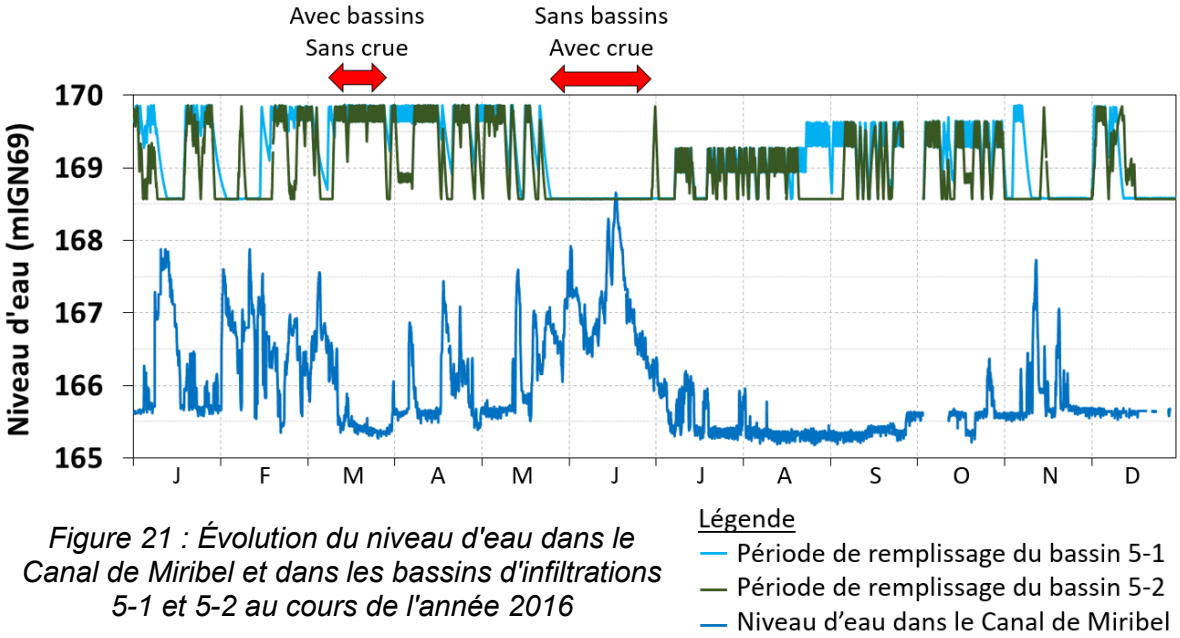
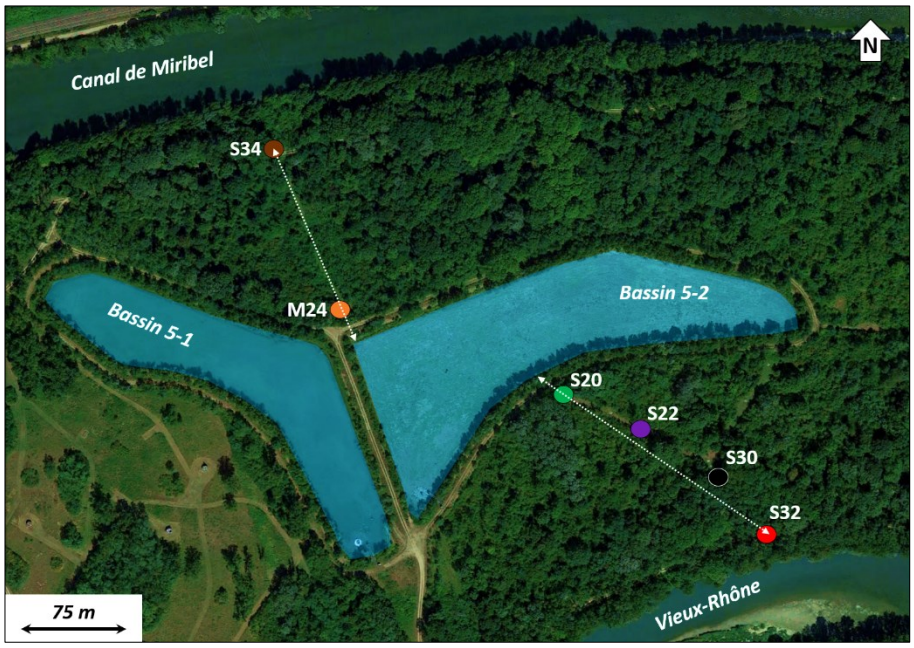



*Figure 21 : Évolution du niveau d'eau dans le Canal de Miribel et dans les bassins d'infiltrations 5-1 et 5-2 au cours de l'année 2016*

L'évolution piézométrique et thermique de la nappe est analysée, au cours des deux périodes sélectionnées, en se basant sur les données acquises au sein de 6 piézomètres du dispositif expérimental (Figure 22). Seuls les ouvrages alignés et crépinés sur la totalité de l'épaisseur de l'aquifère sont sélectionnés pour cette analyse. De cette manière, les ouvrages peuvent être caractérisés par la distance les séparant du bord du bassin 5-2.




| Ouvrage | Distance au bord du bassin |
|---|---|
| **S34** | 145 m |
| **M24** | 22 m |
| **S20** | 22 m |
| **S22** | 86 m |
| **S30** | 140 m |
| **S32** | 191 m |

*Figure 22 : Localisation des 6 piézomètres de suivi pour la compréhension des écoulements au sein du dispositif expérimental*

#### *III.2.2.2.1. Suivi des niveaux piézométriques en période de crue, sans fonctionnement des bassins*

Au cours de l'année 2016, les bassins d'infiltration sont à l'arrêt pendant une longue période d'un mois (juin), lié aux chasses des barrages du Rhône (Section V.1.4.1). Cette période est intéressante à observer puisque, les bassins étant à l'arrêt, les fluctuations piézométriques enregistrées sont liées essentiellement à l'évolution des niveaux dans les cours d'eau et aux pompages.

En traçant l'évolution des niveaux au cours du mois de juin dans le Canal de Miribel, et dans les 6 piézomètres (S34, M24, S20, S22, S30 et S32), plusieurs points sont à noter (Figure 23) :

- ✓ Les niveaux piézométriques enregistrés dans les ouvrages du dispositif expérimental ne dépassent jamais le niveau d'eau enregistré dans le Canal de Miribel. Ainsi, le **cours d'eau alimente la nappe** tout au long du mois observé, et aucune inversion du sens d'écoulement n'est observée.
- ✓ **Plus l'ouvrage de suivi est proche du cours d'eau, plus le niveau piézométrique enregistré co-fluctue avec le cours d'eau**. Dès qu'une crue est enregistrée dans le cours d'eau, elle se répercute dans la mesure du niveau de nappe du piézomètre le plus proche (S34). En moyenne au cours du mois de juin, le niveau enregistré dans le S34 est plus faible de 0,7 m comparé au niveau d'eau du Canal de Miribel.
- ✓ A partir d'une certaine distance entre le cours d'eau et l'ouvrage de suivi de la nappe (> 150 m), les fluctuations de niveau de faible amplitude enregistrées dans le Canal de Miribel sont totalement atténuées dans la nappe. La tendance générale de remontée de nappe liée à la crue est toujours présente mais elle est atténuée et retardée : le pic

de crue le plus important (crue du 18/06 à minuit) est enregistrée dans le piézomètre S34 au bout de 4h, alors qu'elle n'est mesurée dans le piézomètre M24 qu'au bout de 59h seulement (20/06 à 11h).

- ✓ Le piézomètre le plus éloigné du Canal de Miribel (S32) présente des fluctuations de faible amplitude plus prononcée que dans les autres ouvrages. Ce phénomène est lié à la **proximité d'ouvrages de pompages** (situés à 123 m seulement) et qui provoquent ces variations de niveau de nappe lors de la mise en marche ou à l'arrêt de pompes.

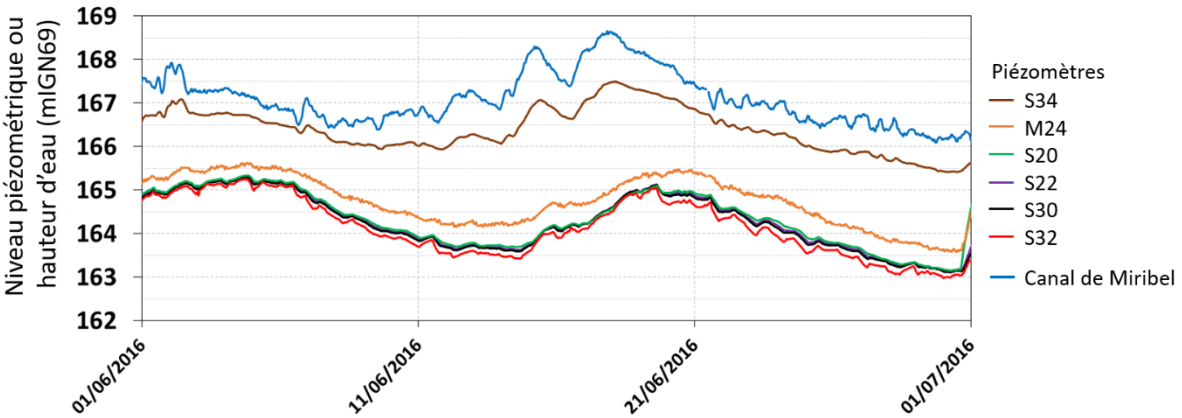



*Figure 23 : Suivi des niveaux piézométriques en période de crue, sans fonctionnement des bassins (juin 2016)*

#### *III.2.2.2.2. Suivi des niveaux piézométriques en période d'étiage, avec fonctionnement des bassins*

Sur la période du mois de mars 2016 (Figure 24), les bassins 5-1 et 5-2 ont fonctionné, de manière simultanée, et avec une hauteur d'eau élevée ($H_b$ compris entre 1,8 et 1,5 m).

Dans le même temps, le niveau dans le Canal de Miribel est au plus bas, à savoir de l'ordre de 165,4 mIGN69 (qui correspond à la côte du débit réservé de 30 $m^3.s^{-1}$).

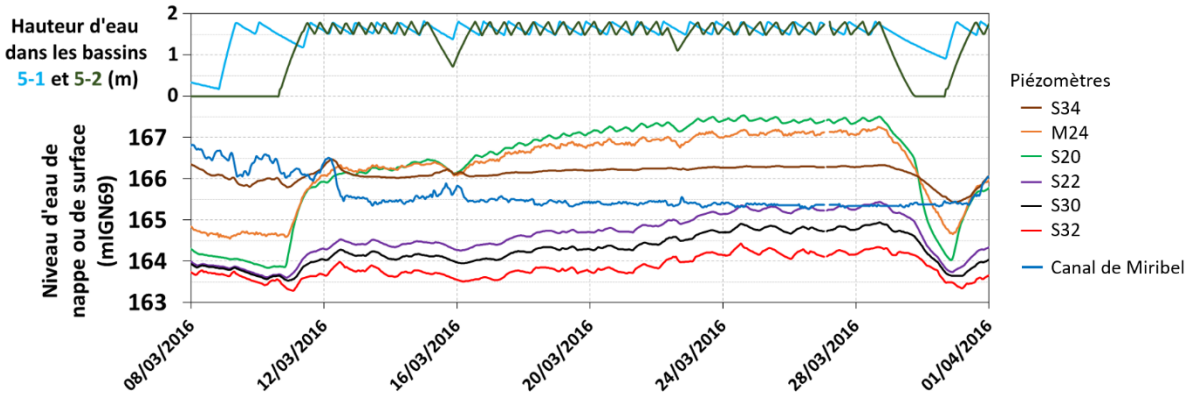



*Figure 24 : Suivi des niveaux piézométriques en période d'étiage, avec fonctionnement des bassins (mars 2016)*

La mise en eau du bassin 5-2 a eu lieu le 10/03/2016 à 15h (le bassin 5-1 était quant à lui déjà en fonctionnement). Suite à cette mise en eau, les ouvrages les plus proches du bassin (S20 et M24) enregistrent une augmentation du niveau de nappe rapide et de grande amplitude. Les ouvrages plus éloignés voient leur niveau piézométrique être impactés par la mise en eau du bassin 5-2, mais de manière retardée et atténuée (Tableau 7).

Les vitesses de propagation du dôme hydraulique sont comprises entre 1,0 et $5{,}6.10^{-3}$ $m.s^{-1}$ (Tableau 7). Ces valeurs coïncident avec les valeurs de conductivités hydrauliques à saturation estimées par essais de pompage, au Sud du bassin 5-2, comprises entre $7{,}5.10^{-3}$ et $4{,}9.10^{-2}$ $m.s^{-1}$ *[Loizeau, 2013]*.

| | **Distance par rapport au bord du bassin** | **Réaction de la nappe** | | **Vitesse de propagation du dôme hydraulique** |
|---|---|---|---|---|
| | | **Δt entre mise en eau du bassin et remontée de nappe observée** | **Battement de nappe observé** | |
| | [m] | [h] | [m] | [$m.s^{-1}$] |
| **S34** | 145 | 9 | + 0,66 | $4{,}47.10^{-3}$ |
| **M24** | 22 | 6 | + 1,73 | $1{,}02.10^{-3}$ |
| **S20** | 22 | 4 | + 2,27 | $1{,}53.10^{-3}$ |
| **S22** | 86 | 6 | + 0,93 | $3{,}98.10^{-3}$ |
| **S30** | 140 | 7 | + 0,75 | $5{,}55.10^{-3}$ |
| **S32** | 191 | 11 | + 0,69 | $4{,}82.10^{-3}$ |

*Tableau 7 : Temps de réaction de la nappe suite au remplissage du bassin 5-2 dans certains ouvrages du dispositif expérimental*

L'observation de cette phase de mise en eau permet de mettre en évidence que :

- ✓ Suite au **remplissage** du bassin 5-2, le **sens d'écoulement naturel de la nappe est inversé**. En effet, les piézomètres S34, M24 et S20 enregistrent un niveau d'eau supérieur à celui enregistré dans le Canal de Miribel (Figure 24).
  Ceci signifie donc que la nappe s'écoule selon une direction S-N lorsque le bassin est en fonctionnement.
- ✓ **Le dôme hydraulique créé par la mise en eau du bassin n'est pas symétrique**.
  Comme indiqué dans le Tableau 7, le battement de nappe est plus fort au Sud du bassin (S20 = +2,27 m) qu'au Nord (M24 = +1,73 m), et la réaction de nappe est plus rapide en direction du Sud suite à la mise en eau du bassin : le piézomètre S20 enregistre un début de remontée de nappe au bout de 4h, alors que 6h sont nécessaires pour constater une remontée de nappe dans le piézomètre M24 situé au Nord du bassin.
  L'asymétrie du dôme hydraulique peut provenir de la forme originale du bassin qui implique une remontée de nappe de forme complexe, des chemins d'écoulements préférentiels du fait de la lithologie en présence, ou alors des pompages situés à l'ouest du bassin et qui influencent la position du dôme hydraulique.
  Un dôme asymétrique engendre un questionnement sur l'efficacité de la barrière hydraulique : si la remontée de nappe est moins marquée sur une zone, alors l'écoulement naturel de la nappe pourrait ne pas être inversé comme le prévoit la mise en eau du bassin.
- ✓ Le dôme hydraulique créé par la mise en eau du bassin présente une **pente très abrupte** : malgré leur localisation peu éloignée (Figure 22 et Tableau 7), les piézomètres S20 et S22 enregistrent un battement de nappe très différent (de l'ordre de 2,3 m pour le S20 situé à 22 m du bord du bassin, et de 0,93 m seulement pour le S22 qui est situé à 86 m du bord du bassin).

Le gradient hydraulique $\frac{\Delta H}{L}$ (Eq. II-2) entre ces deux ouvrages est de l'ordre de 2,7 %, alors qu'il n'est que de 0,5 % entre les ouvrages S22 et S30.

- ✓ En ce qui concerne les **piézomètres les plus éloignés du bassin** (S34, S30 et S32), les calculs sont plus difficiles à réaliser et à interpréter puisque les niveaux piézométriques sont **impactés par l'évolution du niveau dans les cours d'eau** (pour le S34), **et par les pompages** (pour les piézomètres S30 et S32).
  Cependant, le bassin d'infiltration 5-2 parvient à influencer les niveaux de nappe sur des distances élevées (plus de 200 m), mais avec un battement plus faible et un temps de réaction de la nappe plus long (Tableau 7).

#### *III.2.2.2.3. Suivi des températures de nappe aux abords des bassins d'infiltration*

Dans le but de limiter le nombre de données présentées dans cette partie, on se focalisera sur les données de température de nappe acquises dans 4 ouvrages du dispositif expérimental (S34, S20, S22 et S30), situés autour du bassin d'infiltration 5-2 (Figure 22).
Pour rappel, ces ouvrages sont situés à 145 m du bord du bassin en direction du Nord pour S34, et à 22 m, 86 m et 140 m en direction du Sud pour les ouvrages S20, S22 et S30.

L'objectif de cette analyse est d'affiner notre compréhension des chemins de l'eau durant le remplissage d'un bassin. Il s'agit ici d'observer les échanges thermiques à grande échelle entre les eaux de surface (injectées dans le bassin d'infiltration) et les eaux souterraines. Ces observations seront ensuite affinées par des expérimentations spécifiques (traçages thermiques dans des conditions d'exploitation choisies et maitrisées) qui seront détaillées dans la Section IV.3.

Les données thermiques acquises au cours de la période estivale 2016 (juin à novembre) sont présentées sur la Figure 25.

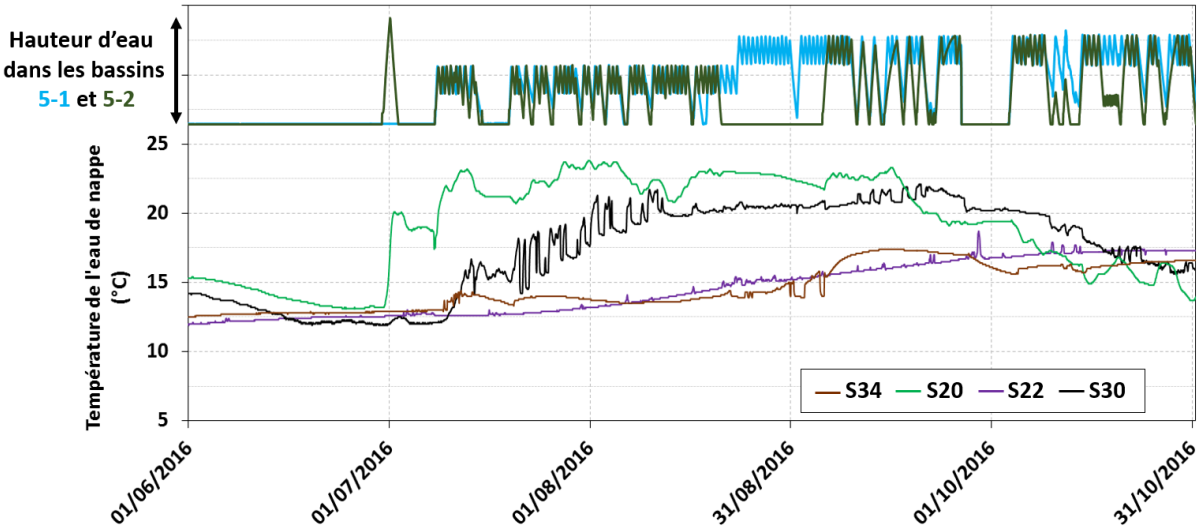



*Figure 25 : Evolution des températures de nappe dans quelques ouvrages du dispositif expérimental entre juin et novembre 2016, et cycles de remplissage/vidange des bassins d'infiltration 5-1 et 5-2*

L'analyse permet de montrer plusieurs points clés :

- ✓ Le **bassin d'infiltration 5-1**, quand il est **seul** à être en fonctionnement, **impacte faiblement les températures de nappe mesurées dans les ouvrages du dispositif expérimental** (fin aout 2016 sur la Figure 25). Ceci vient du fait que les pompages présents à l'Ouest du bassin 5-1 impliquent un sens d'écoulement d'Est en Ouest prononcé.
- ✓ La **durée des cycles de remplissage du bassin 5-2 est un critère important** pour pouvoir observer un impact thermique au sein des ouvrages éloignés du bassin. Un cycle de remplissage unique du bassin (exemple entre le 30/06 et le 03/07/2016) n'entrainera une modification des températures que dans les ouvrages très proches comme le S20, situé à 22 m du bord du bassin. Une évolution des températures pourra être remarquée dans les ouvrages éloignés (S30 à 140 m et S34 à 145 m) qu'à partir du moment où le bassin est en eau pendant une longue durée (environ 15 jours) : des cycles de remplissage du bassin de longue durée impliquent un volume infiltré conséquent et provoquent donc un impact thermique sur de plus longues distances.
- ✓ **Plus les piézomètres sont proches du bassin 5-2, plus la température de nappe se met rapidement en équilibre avec la température de l'eau injectée** dans le bassin. Ainsi le piézomètre S20 enregistre des variations thermiques rapides et de forte amplitude dès la mise en eau du bassin. Le piézomètre S30, plus éloigné, connait un réchauffement progressif au cours de la période estivale.
  Pour rappel, seuls les ouvrages crépinés sur leur totalité sont illustrés dans cette analyse. Cependant le S20 fait partie d'une flûte de pan, localisée au Sud du bassin 5-2. De ce fait, les mesures issues des ouvrages P86 et P88, crépinés sur une épaisseur restreinte de 0,5 m, peuvent être comparées à celles issues du piézomètre S20. A partir de la Figure 25, on se focalise sur la  période du 25/06 et le 01/08/2016 (période de modification des conditions d'exploitation des bassins qui engendre une évolution thermique brutale dans l'ouvrage S20). La comparaison des températures acquises au sein des ouvrages de la flûte de pan, montre que la température du S20 suit celle enregistrée en fond d'aquifère (ouvrage P88) lorsque le bassin est en fonctionnement (Figure 26). L'ouvrage P86, captant la partie superficielle de l'aquifère, enregistre un retard en terme d'évolution thermique. Ceci semble donc indiquer une **zone de non-continuité de la couche moins perméable**, qui permet un transfert vertical rapide, localement dans l'aquifère. Les écarts de températures perçus entre les différents ouvrages de la flûte de pan n'apparaissent que lorsque le bassin est en fonctionnement (zones bleutées sur la Figure 26).

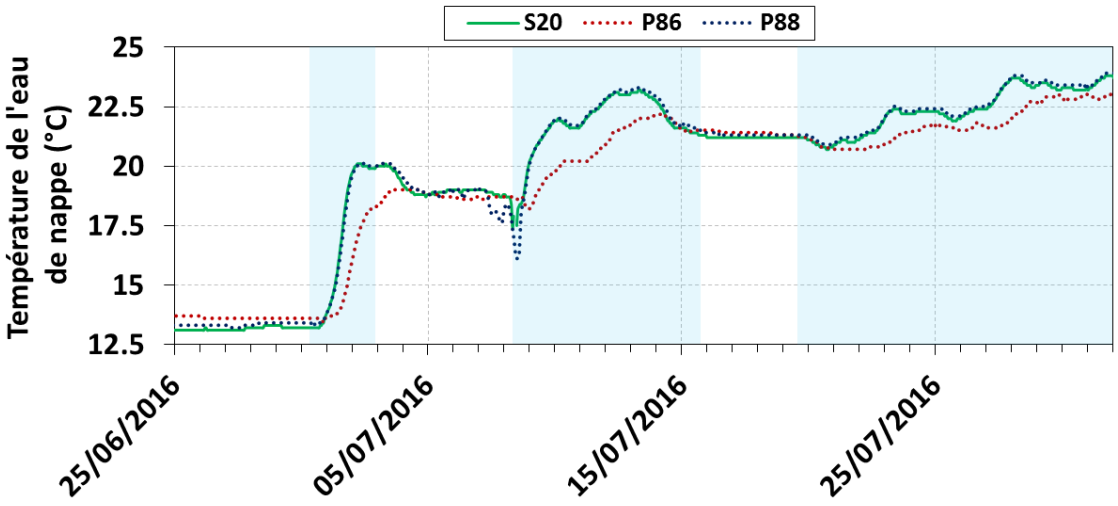



*Figure 26 : Evolution des températures de nappe au Sud du bassin 5-2, dans les ouvrages S20, P86 (superficiel) et P88 (profond) entre le 25/06 et le 01/08/2016*

- ✓ La **température de nappe est fortement impactée par l'alimentation des bassins d'infiltration**, notamment en période estivale ou hivernale. Les températures des eaux superficielles et souterraines présentant une différence de plusieurs degrés, il est possible de suivre les chemins de l'eau suite au remplissage du bassin au travers du dispositif expérimental.
- ✓ La **complexité des chemins de l'eau** peut être mise en évidence en observant les températures de nappe du S22 : situé entre le S20 et le S30 en direction du Sud, cet ouvrage ne réagit pas du tout de la même manière comparé aux autres ouvrages d'un point de vue thermique. La température issue du piézomètre S22 subit une augmentation très progressive (de l'ordre de 5 °C entre juin et novembre 2016), et ne semble pas être impactée par les cycles de remplissage/vidange du bassin d'infiltration. Pour rappel, l'extension spatiale de la couche moins perméable retrouvée au droit du bassin 5-2 atteint l'ouvrage S22, et elle est absente dans les ouvrages situés plus au Sud (Section III.2.1.1 et Figure 20). L'évolution thermique enregistrée dans ce piézomètre semble être liée à la complexité lithologique de la zone (fin de l'extension spatiale de la couche moins perméable) et non pas à une mauvaise réalisation de l'ouvrage ou à un défaut dans la mesure.

#### *III.2.2.3. Conservation de la zone non saturée au droit du bassin*

Lors des travaux de thèse de S. Loizeau, la zone non saturée de 2 m d'épaisseur ne semblait pas être conservée au droit du bassin 5-2 au cours des cycles de remplissage de ce dernier. Ne disposant pas de piézomètre implanté dans le bassin à cette époque, cette hypothèse était issue d'une simulation numérique *[Loizeau, 2013]*.

Le piézomètre B10, référence des bassins 5-1 et 5-2, et situé sur la digue de séparation des deux bassins, enregistre le niveau piézométrique de manière continue. Rappelons que le fond des deux bassins n'est pas situé à la même altitude : 168,65 et 169,35 mIGN69 respectivement pour les bassins 5-1 et 5-2. L'alimentation des bassins est stoppée lorsque le niveau piézométrique du B10 atteint la côte seuil de 166,65 mIGN69 (qui correspond à une épaisseur de 2 m par rapport au fond du bassin 5-1). Ainsi la zone non saturée de 2 m est toujours conservée au droit de ce bassin. L'altitude du fond du bassin 5-2 étant située 0,7 m plus haut que celle du bassin 5-1, le seuil de 166,65 mIGN69 permettrait donc la conservation d'une ZNS de 2,7 m au droit du bassin 5-2.

Depuis le mois d'août 2015, les piézomètres P95 et P96 permettent de suivre l'évolution du niveau de nappe au droit du bassin 5-2 (Figure 18). Equipés d'une sonde de mesure du niveau piézométrique et de température, ils permettent de mieux comprendre les écoulements souterrains lors des périodes de mise en eau ou d'assec des bassins d'infiltration, et notamment de mettre en évidence l'impact de la zone moins perméable retrouvée à 8 m de profondeur.

L'évolution des niveaux piézométriques, issus des ouvrages du centre du bassin (P95 et P96), du Nord du bassin (M24) et sur la digue de séparation des deux bassins (B10), est illustrée sur la Figure 27. Les données étant nombreuses depuis août 2015, il a été décidé de réduire la fenêtre d'observation entre le 01/06 et le 31/10/2016. Cette figure montre que :

- ✓ En période de **non fonctionnement** du bassin d'infiltration 5-2 (49 % du temps sur la période étudiée), le piézomètre **M24** enregistre un **niveau de nappe supérieur** de 0,58 m par rapport aux autres ouvrages qui présentent un comportement similaire les uns par rapport aux autres (moins de 0,15 m d'écart entre les trois ouvrages P95, P96 et B10). Cette observation est vraie même lorsque le bassin 5-1 est à l'arrêt.
  Cette différence de potentiel hydraulique entre le M24 et les ouvrages du centre du bassin illustre un écoulement Nord-Sud en provenance du Canal de Miribel (ou de la nappe de la Dombes).

- ✓ En période de mise en eau du couple de bassins 5-1 et 5-2, le piézomètre B10 enregistre un niveau de nappe inférieur de 0,70 m en moyenne par rapport au niveau de nappe issu des trois autres ouvrages (M24, P95 et P96)**. Le piézomètre de référence des bassins 5 (B10) ne correspond pas au point culminant du dôme hydraulique**.
- ✓ Il est également à noter une différence de niveau entre les deux piézomètres du centre du bassin : le piézomètre P96, dont la crépine est située au-dessus de la couche moins perméable, présente un niveau piézométrique supérieur de 0,15 m à celui du piézomètre P95, dont la crépine est située en-dessous de la couche moins perméable (Figure 20).
  Etant constant dans le temps et apparaissant seulement lorsque le bassin est en eau, cet écart ne peut pas être dû à un décalage dans la mesure. **La couche moins perméable**, située à 8 m de profondeur, **joue un rôle non négligeable d'un point de vue des potentiels hydrauliques :** elle créé une sorte de barrière hydrodynamique limitant les écoulements vers le fond de l'aquifère.
- ✓ Bien que les piézomètres P95 et P96 soient supérieurs de 0,7 m par rapport au B10, **la ZNS de 2 m d'épaisseur est bien conservée au droit du bassin 5-2 depuis août 2015** (un très léger dépassement est à noter le 09/09/2016 et le 31/10/2016 avec un minimum de 1,79 m de ZNS conservée).

Les piézomètres B10 et M24 ne sont pas équipés de mesure de température. En s'appuyant sur les données de température enregistrées au sein des deux ouvrages du centre du bassin (Figure 27), il est à noter que :

- ✓ Une **différence de température** apparaît entre les deux piézomètres lors des cycles de remplissage du bassin 5-2 et en particulier durant le premier remplissage (01/07/2016) : la température réagit plus vite dans le piézomètre P96 (le moins profond) et la variation est de plus grande amplitude comparé à celle du piézomètre P95 (tableau ci-dessous). Le piézomètre P96 enregistre une température de nappe très proche de la température de l'eau infiltrée.
  Ce phénomène est lié, comme pour l'évolution des niveaux piézométriques, à la réduction des écoulements verticaux par la couche moins perméable. Cette zone argileuse peut donc être considérée comme une pseudo-barrière hydrodynamique et thermique.
- ✓ La **température** du **piézomètre profond** (P95) a tendance à **revenir à son état initial plus rapidement** que le piézomètre P96 après l'arrêt d'alimentation du bassin. Ceci met en évidence un **écoulement horizontal plus rapide en fond d'aquifère** (en-dessous de la zone moins perméable). Par ailleurs, des variations de température de faible amplitude sont visibles dans l'ouvrage profond. Ces observations sont liées aux pompages dans les puits proches, qui semblent provoquer un écoulement rapide en fond d'aquifère.

*Exemple* : Mise en eau du bassin le 30/06/2016 à 10h, avec une température de 21,2 °C en moyenne.

| Piézomètre | Température | | Durée écoulée entre la mise en eau et le gain de 1°C dans la nappe | Évolution de la température | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Initiale | Maximale | | Vitesse d'augmentation | Vitesse de diminution |
| **P95** | 13,0 °C | 18,0 °C | 32,0 h | 0,08 °C.h$^{-1}$ | 2,6.10$^{-2}$ °C.h$^{-1}$ |
| **P96** | 13,1 °C | 20,9 °C | 25,5 h | 0,13 °C.h$^{-1}$ | 1,3.10$^{-2}$ °C.h$^{-1}$ |

***Remarque***

La température de l'eau infiltrée dans le bassin est indiquée sur la Figure 27 de manière simplifiée (température moyenne de chaque période de mise en eau du bassin 5-2), pour ne pas alourdir le graphique d'un point de vue du nombre de courbes.

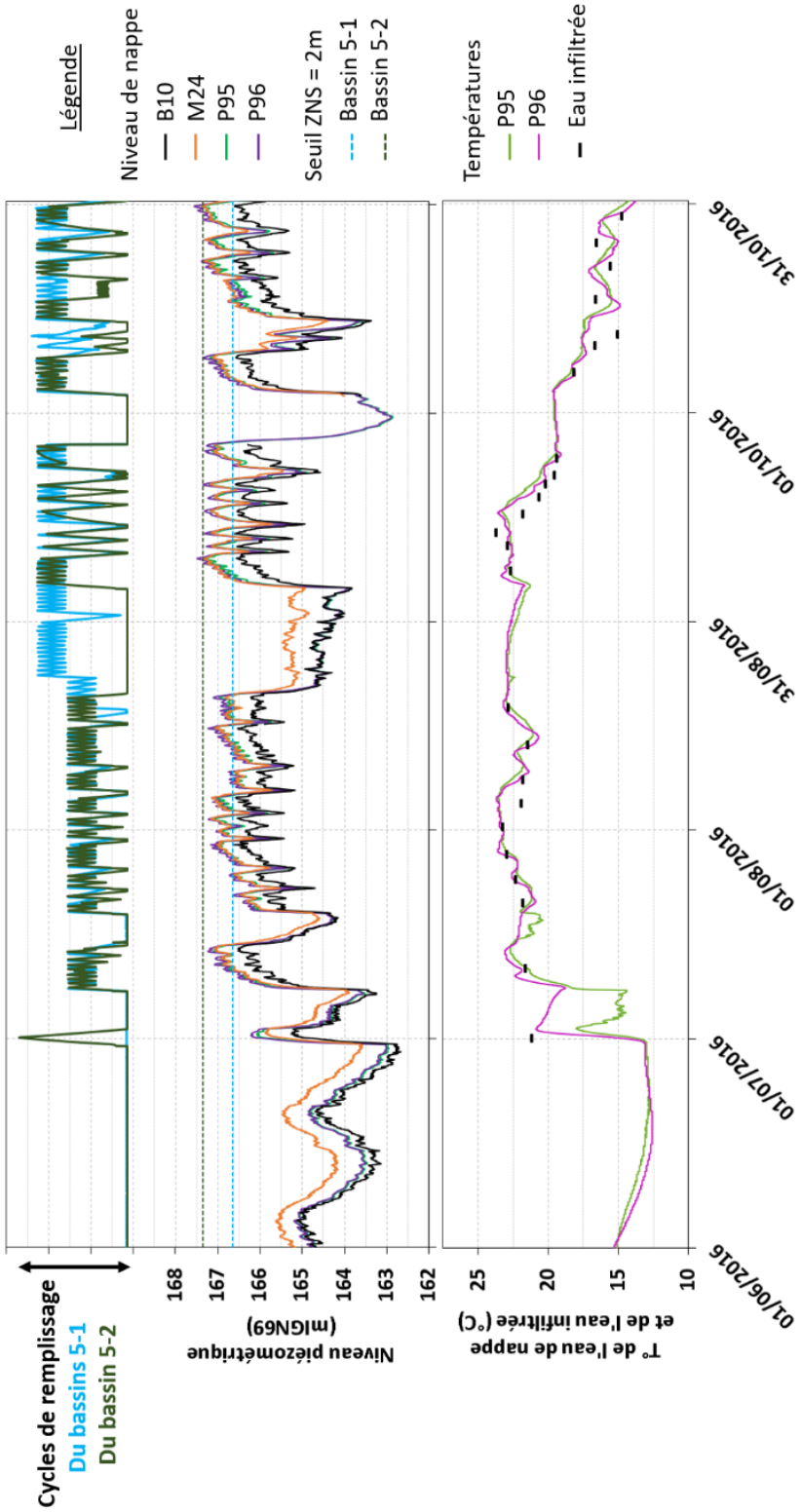



*Figure 27 : Evolution des niveaux piézométriques et des températures de nappe au droit du bassin 5-2 au cours des cycles de remplissage des bassins 5-1 et 5-2 (de juin à octobre 2016)*

## III.3. Évolutions piézométriques à l'échelle du champ captant

### III.3.1. Objectifs et méthodologie

Les mesures piézométriques peuvent être analysées de manière individuelle pour comprendre les réactions de la nappe localement en un point donné, ou de manière plus intégrée à l'échelle du champ captant. Le site du champ captant comporte des zones intégralement dépourvues ou très pauvres en termes de points de mesure. Il est cependant possible de tracer des cartes piézométriques à l'échelle du champ captant en notant tout de même que l'interpolation de la piézométrie est très délicate sur certaines zones (à l'Est, au Sud et au Nord-Ouest du site).
L'analyse des données piézométriques permet de comprendre l'impact des différents compartiments du système (cours d'eau, bassin, nappe) notamment en termes de recharge de nappe et de sens d'écoulement.

### III.3.2. Évolution dans le temps et dans l'espace des niveaux de nappe

#### *III.3.2.1. Évolutions piézométriques locales*

Quatre piézomètres ont été sélectionnés pour observer l'évolution piézométrique au cours de l'année 2016 à des endroits stratégiques du champ captant (localisation sur la Figure 28) :

- ✓ Au centre de la prairie de captage (M12),
- ✓ Proche d'un cours d'eau (S09, proche du Canal de Jonage),
- ✓ Au sud du champ captant sur l'île de Charmy (S13),
- ✓ Proche d'un bassin d'infiltration (B10, proche du couple de bassins 5).

*Figure 28 : Localisation des quatre piézomètres stratégiques pour le suivi des niveaux piézométriques*

L'évolution piézométrique de ces différents ouvrages, au cours de l'année 2016, est présentée en Figure 29. Les piézomètres M12 et S09 sont situés au sein de la prairie de captage. Ils présentent un niveau moyen inférieur à celui des deux autres piézomètres du fait du rabattement créé par les pompages (Figure 29). L'influence des pompages entraine également des battements de nappe brutaux et répétitifs. L'influence des cours d'eau est également sensible et explique notamment le niveau supérieur dans S09 par rapport à M12 en janvier et février 2016 du fait d'un niveau d'eau élevé dans le Canal de Jonage à cette période.
Le piézomètre S13 enregistre quant à lui un niveau d'eau généralement plus haut et plus lissé que les deux ouvrages précédents : ceci est dû à sa localisation au Sud du champ captant, qui correspond à l'arrivée de la nappe de l'Est (amont hydraulique) et par son éloignement des pompages (lissage du niveau piézométrique).
Le piézomètre B10 est directement impacté par les cycles de remplissage / vidange des bassins 5-1 et 5-2 et présente donc un battement de nappe abrupt et de grande amplitude.

Selon la localisation sur le champ captant, le niveau de nappe peut fortement fluctuer au cours du temps. Ce niveau de nappe est influé par les conditions d'exploitation du site (pompages et recharge par les bassins) mais également par les conditions « naturelles » (périodes de crues ou d'étiage dans les cours d'eau qui jouent un rôle non négligeable sur les évolutions piézométriques).

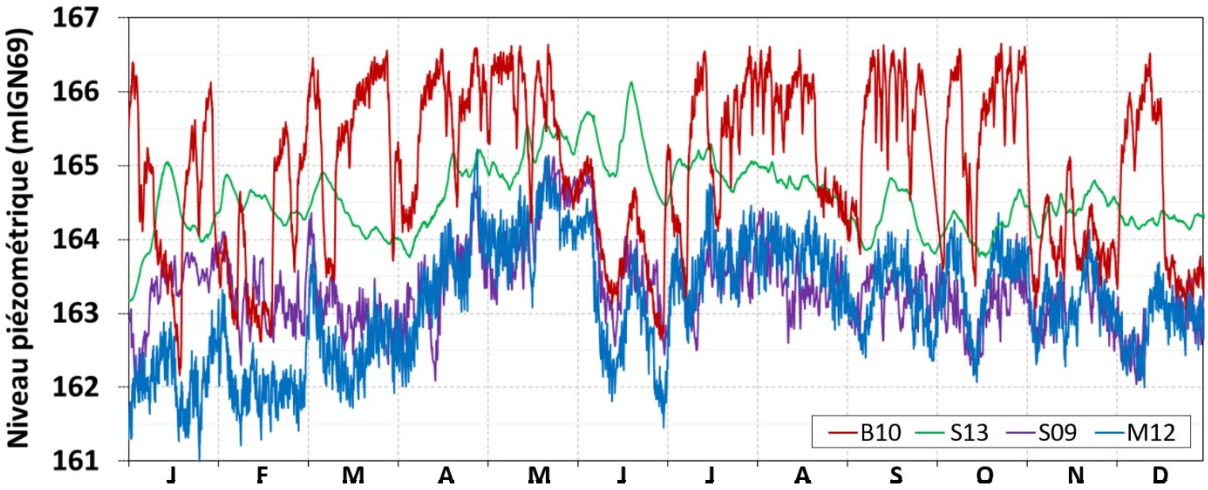



*Figure 29 : Evolution piézométrique observée en 2016 au sein de quatre ouvrages stratégiques du site d'étude*

### *III.3.2.2. Les cartes piézométriques à l'échelle du champ captant*

Les cartes piézométriques sont une représentation cartographique du toit de la nappe à un instant donné. Les isopièzes correspondent à des courbes de même niveau de nappe, interpolées entre les points de mesure réels. Les cartes piézométriques renseignent sur la situation de la nappe (hautes eaux, basses eaux) et sur le sens et la vitesse d'écoulement. L'écoulement de la nappe est perpendiculaire aux isopièzes.

Pour réaliser la carte piézométrique, seuls les niveaux de nappe enregistrés au sein des piézomètres sont pris en compte. Il a été choisi de ne pas tenir compte des mesures de niveau dans les ouvrages de pompage pour se dédouaner de l'effet local des pompages (création de cônes de rabattement). Les points retenus pour réaliser les cartes sont présentés sur la Figure 30. Les cartes piézométriques (tracé des isopièzes et champ vectoriel des sens d'écoulement) sont réalisées à l'aide du logiciel de cartographie ArcGis 10.3, en se basant sur la méthode du krigeage.

Le manque de données sur les zones extérieures au champ captant ne facilite par l'interprétation des écoulements en dehors de la zone d'exploitation. De même, certaines zones intérieures à la zone de captage présentent peu de points de mesure de niveau de nappe (le tiers Est du champ captant ne compte qu'un seul ouvrage de suivi, le Sud de l'île de Charmy ne comporte qu'un seul ouvrage également, et un manque de données est identifié dans la zone Nord-Ouest au-delà des bassins d'infiltration 2 et 3). La précision de la carte piézométrique est faible dans ces zones peu denses de points de mesure.

Deux cartes piézométriques ont été tracées au cours de l'année 2016 (Figure 30) :

- ✓ Le **30 juin 2016**, qui correspond à une période de basses eaux sans alimentation par les bassins d'infiltration tout au long du mois de juin.
- ✓ Le **31 octobre 2016**, qui correspond à une période de hautes eaux, avec fonctionnement de la recharge artificielle par les bassins.

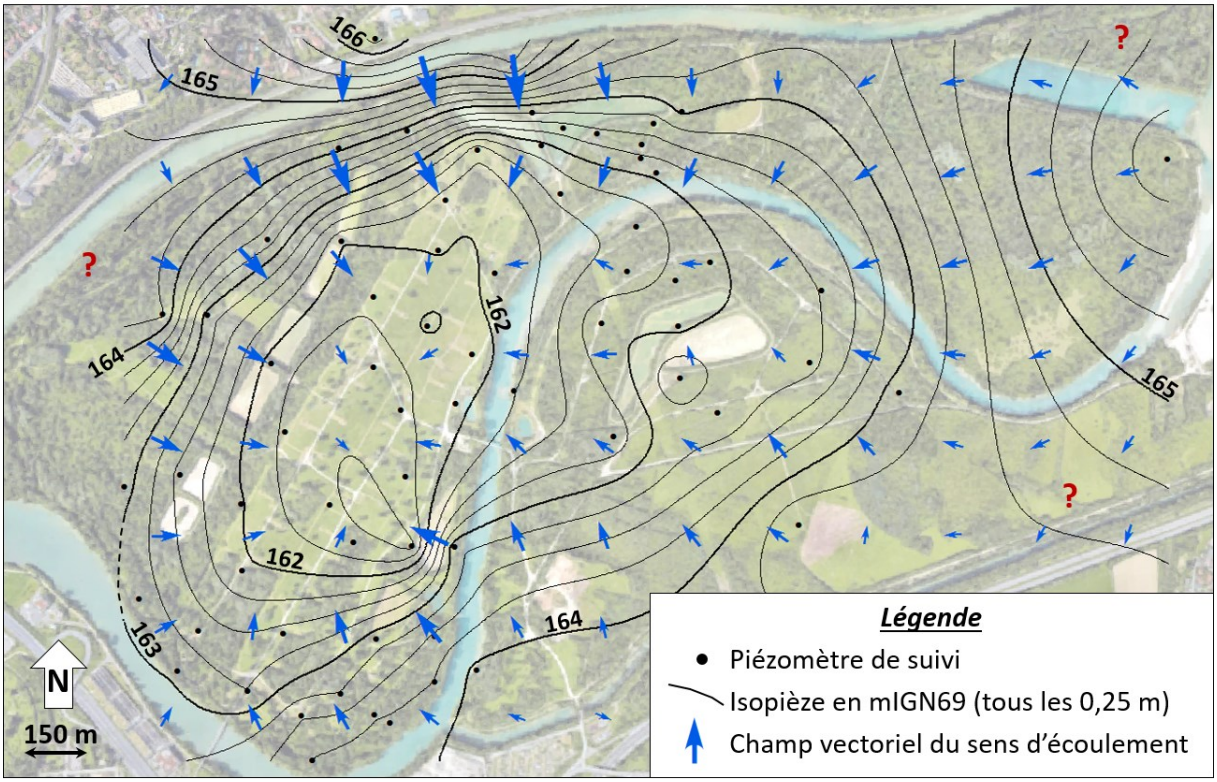
D'après les observations réalisées à l'échelle du champ captant entre 2014 et 2017, il apparaît une certaine évolution saisonnière des niveaux piézométriques : en période estivale, les niveaux piézométriques ont tendance à être plus élevés qu'en période hivernale. Ceci est principalement dû à la demande en eau limitée en période estivale (surtout au mois d'août, Figure 12). Diminuer les pompages en période estivale, à l'échelle du site, contribue à la remontée du niveau piézométrique général.

L'analyse des cartes piézométriques (Figure 30) montre que les conditions d'exploitation jouent un rôle prépondérant sur les distributions piézométriques : la mise en eau des bassins d'infiltration permet une augmentation du niveau de nappe de manière générale sur le champ captant, mais provoque aussi des dômes hydrauliques à proximité immédiate des bassins (gradient hydraulique plus élevé aux alentours des bassins 5 et du bassin 1-2). Ces remontées de niveau de nappe impactent le sens d'écoulement régional (qui suit une direction globale Nord-Est/ Sud-Ouest) sur le site du champ captant.
Les pompages sont également mis en évidence sur les cartes piézométriques : de manière générale, tout au long de l'année, un creux piézométrique est observé sur l'ensemble de la prairie de captage, principalement sur l'île de Crépieux.

En ce qui concerne les échanges nappe-rivière, il apparait très clairement qu'un écoulement sous le Vieux-Rhône se produit : l'écoulement n'est pas impacté par la présence du cours d'eau. Le manque de points d'observations ne permet pas l'interprétation pour le Canal de Miribel, Canal de Jonage et Canal Sud.

Une carte piézométrique est un outil de mise en évidence du sens d'écoulement régional ainsi que du sens et de la vitesse d'écoulement à un instant *t*. Les cartes permettent d'illustrer la modification de cet écoulement par les conditions spécifiques d'exploitation du site (niveau d'activité des pompages, mise en eau des bassins suite à une période d'assèchement plus ou moins longue).

**A. Carte piézométrique du 30 juin 2016 à 12h**




**B. Carte piézométrique du 31 octobre 2016 à 12h**

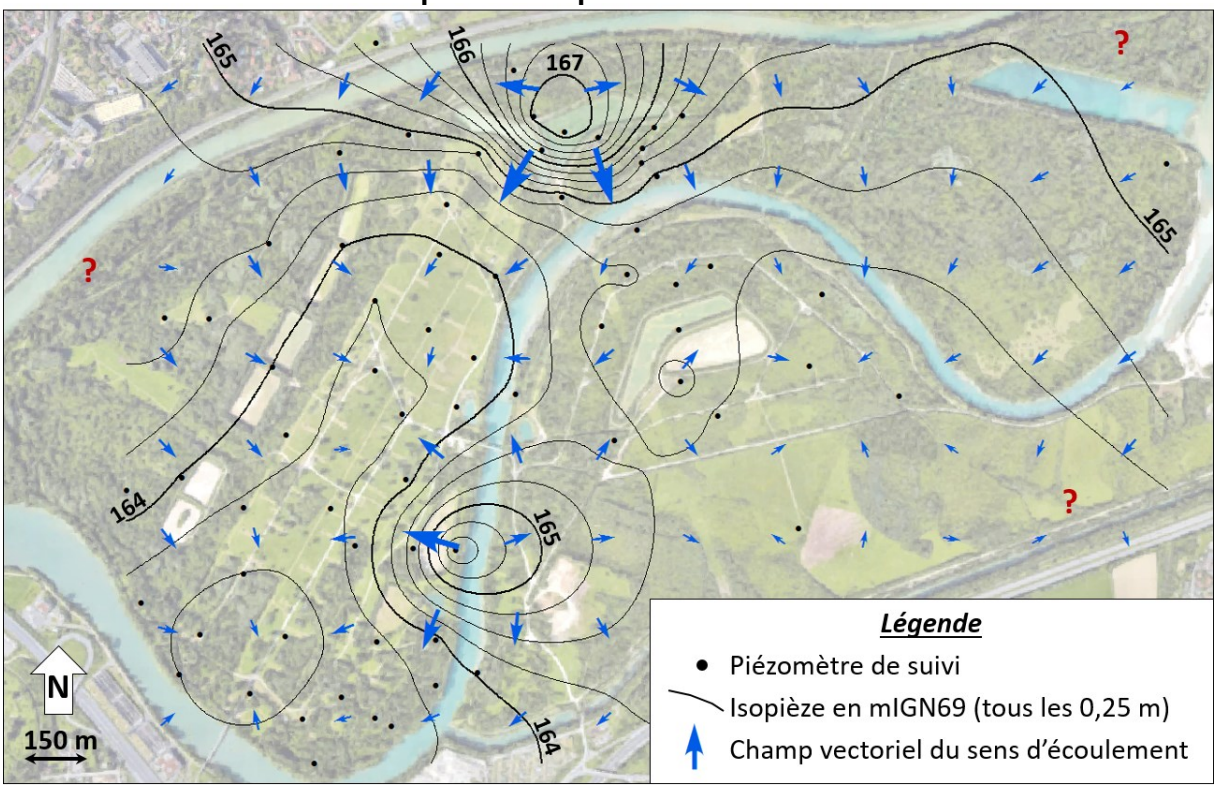



*Figure 30 : Cartes piézométriques sans fonctionnement des bassins d'infiltration (A.) et avec la recharge artificielle par les bassins (B.)*

## III.4. Évolutions des températures de nappe sur la totalité du champ captant

Il est possible de réaliser des cartes de température de nappe à l'échelle du champ captant du fait de l'instrumentation non négligeable du site. Cette analyse est une nouveauté puisque les mesures acquises par les sondes de températures n'étaient pas exploitées jusqu'à présent.

Réaliser des cartes de température des eaux souterraines à l'échelle du champ captant présente différents objectifs :

- ✓ Observer les **chemins préférentiels de l'eau** superficielle plus chaude ou plus froide que l'eau souterraine, et ainsi mieux appréhender les échanges cours d'eau / nappe et bassins / nappe.
- ✓ Obtenir une **condition initiale de température pour les modèles** (savoir quelle température attribuer en tout point du modèle en début de simulation) et **procéder au calage des modèles au cours de la simulation** (le fait de réaliser une carte des températures à pas de temps régulier permet de comparer avec les sorties du modèle aux mêmes pas de temps). Cet objectif sera développé dans le Chapitre V.
- ✓ Créer un **outil de gestion pour la pérennisation de la ressource**, en mettant notamment en évidence les directions d'écoulements autour des bassins d'infiltration ou en visualisant les ouvrages les plus exposés aux risques (barrière hydraulique peu efficace, puits enregistrant des températures très élevées présentant un risque de contamination bactérienne, …)

### III.4.1. Méthodologie pour la réalisation des cartes de température

#### *III.4.1.1. Données prises en compte et pas de temps entre deux cartes*

Les cartes de températures sont élaborées entre les mois **d'avril 2014 et octobre 2017**. Avant le mois d'avril 2014, la densité des mesures de température de nappe était insuffisante pour assurer une interpolation exploitable des températures de nappe.

Afin de montrer l'évolution des températures à l'échelle du champ captant, et sur plusieurs années, un pas de temps **mensuel** a été retenu. Pour ce faire, et de façon arbitraire, la température de nappe en chaque point de mesure correspond à la **température moyenne enregistrée sur les 3 derniers jours du mois considéré**.
Dans l'optique de mettre en évidence des phénomènes plus locaux, il pourrait être pertinent de réduire le pas de temps entre deux cartes de façon à améliorer la résolution de l'observation.

L'évolution des températures de nappe à l'échelle du champ captant est dépendante des conditions météorologiques naturelles (qui influencent les eaux de surface : cours d'eau et bassins d'infiltration) mais également des conditions d'exploitation du site (volumes pompés, volumes infiltrés).
De ce fait, les cartes de température mensuelles doivent tenir compte d'un certain nombre de données, divisées en trois catégories, et concaténées au sein de chacune des cartes de température :

- ✓ **Données de nappe** : température de l'eau de nappe et niveau piézométrique moyen.
- ✓ **Données sur les eaux de surface** : températures des cours d'eau et débit du Rhône.
- ✓ **Données d'exploitation** : volumes pompés et infiltrés, température des eaux infiltrées et de l'eau en sortie d'usine.
  Pour information, les volumes pompés sont renseignés par poste électrique (regroupement de plusieurs puits/forages), et les volumes infiltrés sont renseignés pour chaque bassin d'infiltration. La localisation de ces différents ouvrages est présentée en Figure 32 et Figure 33.

L'Annexe 6 présente la méthodologie de traitement de l'ensemble des données nécessaires à la réalisation des cartes de température. Seul le traitement des données de température de nappe sera présenté ici, ainsi qu'un bilan du nombre de données totales concaténées sur une carte mensuelle.

#### *III.4.1.2. Le traitement des données de température de nappe*

Sur l'ensemble du champ captant, **76 sondes de température** permettent l'acquisition de données de température de nappe en continu. Localisées sur la Figure 31, elles se répartissent ainsi :

- ✓ 49 sont situées dans les ouvrages de pompage (puits ou forage),
- ✓ 18 sont issues de piézomètres de la Plateforme Recherche (seuls les piézomètres crépinés sur toute leur profondeur sont pris en compte dans les cartes),
- ✓ 9 piézomètres sont équipés de sondes de température par l'Exploitant.

La température est mesurée par des sondes de type PT100 ou par des sondes de type OTT Orpheus mini (précision à 0,1 °C). L'enregistrement des mesures de température est programmé au pas de temps horaire. Situées en fond d'ouvrage, ces sondes ne sont pas toutes à la même altitude du fait de l'épaisseur variable des dépôts alluvionnaires sur la zone d'étude. Ne disposant pas de sondes de mesures à différentes profondeurs, nous considèrerons ici que la **température de nappe est homogène sur toute l'épaisseur de l'aquifère**.

Les points de mesure ne forment pas une grille homogène sur le champ captant. Sur les zones où les points sont assez denses, une interpolation des températures par krigeage est réalisée à l'aide du logiciel ArcGis 10.3. Les points isolés (comme le piézomètre situé tout à l'Est du champ captant ou celui au Sud de la zone d'étude) apparaitront sur les cartes de température mais l'interpolation depuis d'autres points de mesure ne sera pas réalisée du fait de la trop forte incertitude entre ces points éloignés.

Les cartes de températures sont une représentation de la température de nappe en fin de mois. Pour ne pas tenir compte de variations thermiques locales et brutales (Section III.5), la température de nappe renseignée en chaque point correspond à la moyenne des données acquises au cours des trois derniers jours du mois considéré.

Ainsi, chaque carte mensuelle tient compte de 5 472 données brutes de mesure de température de nappe (3 jours de données, avec un enregistrement horaire, sur 76 points).

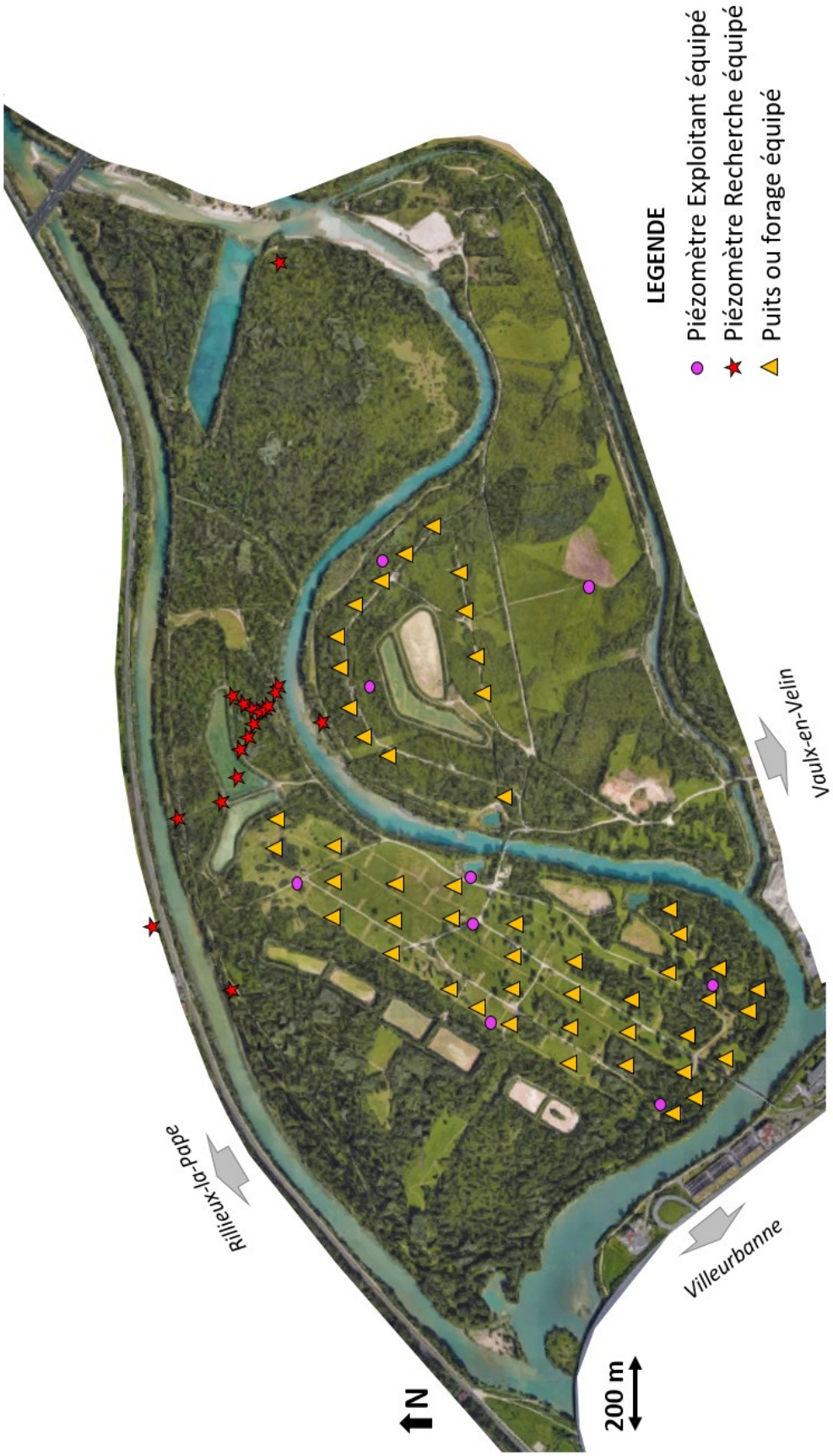



*Figure 31 : Localisation des sondes de mesure de température de nappe sur l'ensemble du champ captant*

*Figure 32 : Localisation des postes électriques et du nombre d'ouvrages de pompage associés*

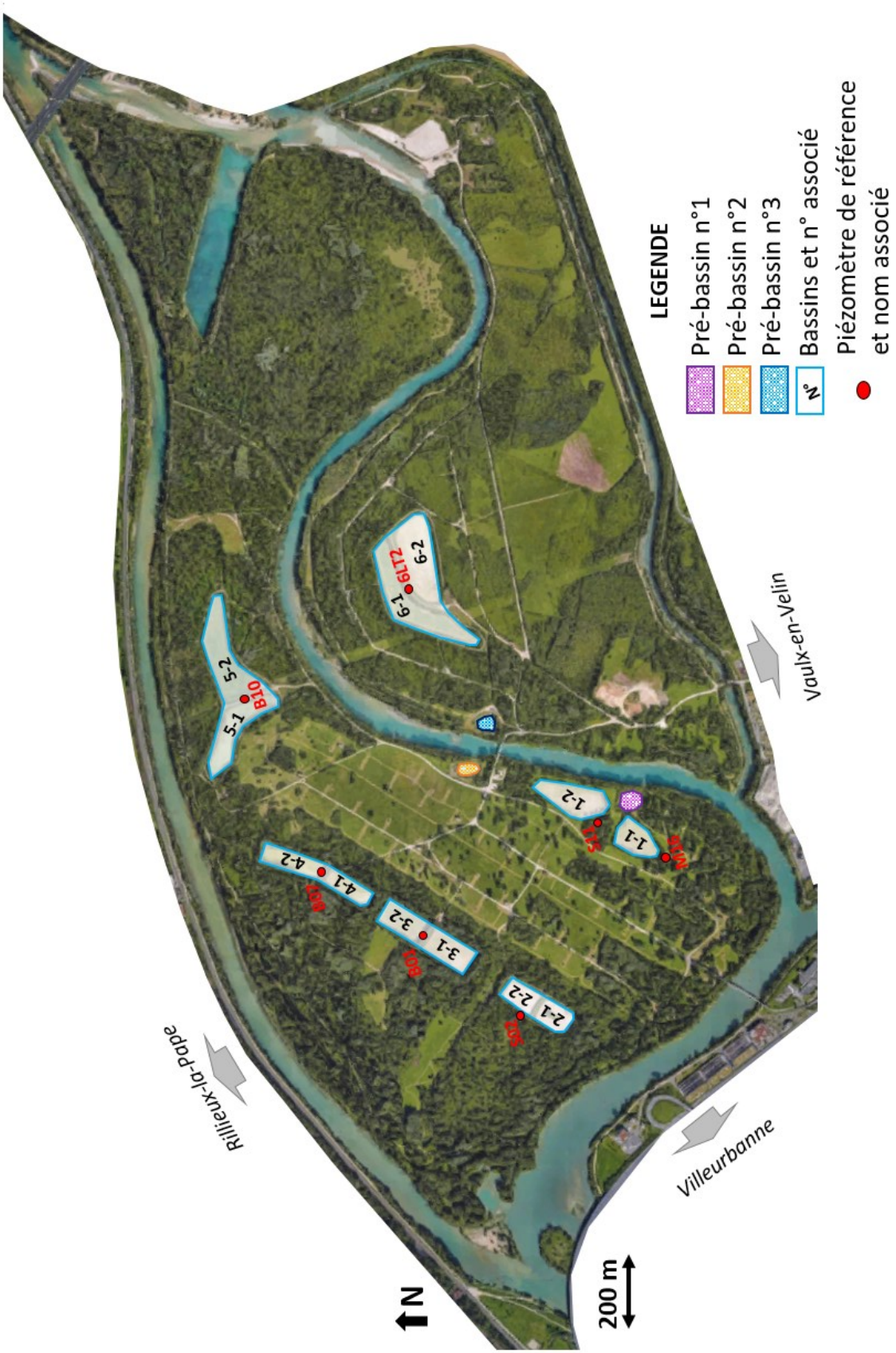



*Figure 33 : Localisation des 12 bassins d'infiltration sur le champ captant de la Métropole de Lyon*

### *III.4.1.3. Analyse et traitement des données*

#### *III.4.1.3.1. Nombre de données prises en compte*

Une carte des températures mensuelle comporte un total de **4 376 188 à 4 844 479 données brutes** selon le nombre de jours du mois de l'année considéré. Le détail des données incorporées aux cartes est présenté dans le Tableau 8.

** : dépend du nombre de jours du mois considéré*

| Type de données | | Nombre de points de mesure | Pas de temps d'enregistrement | Remarque | Nombre de données pour une carte mensuelle* |
|---|---|---|---|---|---|
| **Température** | **De nappe** | 76 | 1 heure | Les températures de nappe sont intégrées dans les cartes de température en tenant compte de la moyenne glissante des 3 derniers jours du mois considéré | **5 472** |
| | **De sortie d'usine de production** | 4 | 1 heure | La température moyenne en sortie d'usine est calculée à partir des données horaires enregistrées sur les 4 conduites de sortie de l'usine de production d'eau potable | **2 688 à 2 976** |
| | **De l'eau infiltrée** | 12 | 1 heure | Les températures des eaux infiltrées, mesurées dans chaque bassin, sont moyennées pour obtenir une valeur unique moyenne mensuelle. | **8 064 à 8 928** |
| | **Des cours d'eau** | 2 | 1 heure | Une valeur de température moyenne mensuelle est calculée pour chacun des deux cours d'eau principaux. | **1 344 à 1488** |
| **Niveau piézométrique** | | 1 | 10 minutes | Le niveau piézométrique intégré aux cartes de température correspond à la moyenne mensuelle calculée sur un piézomètre unique | **4 032 à 4 464** |
| **Volumes** | **Infiltrés** | 12 | 1 minute | Les volumes infiltrés mensuels sont calculés pour chaque bassin. | **483 840 à 535 680** |
| | **Pompés** | 96 | 1 minute | Les volumes de pompage mensuels apparaissent sur les cartes par postes électriques mais les données brutes prises en compte proviennent des 96 débitmètres installés sur le site (un débitmètre par ouvrage de pompage, sauf pour les forages du poste 9 : un débitmètre pour deux ouvrages) | **3 870 720 à 4 285 440** |
| **Débit du Rhône** | | 1 | 1 jour | Les débits moyens journaliers du Rhône permettent de calculer le débit moyen mensuel. | **28 à 31** |

*Tableau 8 : Détail des données brutes prises en compte pour la réalisation d'une carte de température mensuelle*

#### *III.4.1.3.2. Principe de l'analyse et du traitement des données*

Du fait du nombre conséquent de valeurs prises en compte pour la création d'une seule carte, il est primordial de mettre en place une étape d'analyse et de traitement des données brutes. Comme expliqué dans la Section III.1.2, la première étape du traitement des données consiste à enlever les **valeurs aberrantes**. Pour les mesures de températures en nappe, toutes les valeurs inférieures à 0°C ou supérieures à 40°C sont supprimées. Pour les mesures de températures sur les eaux superficielles (cours d'eau et bassins), la gamme de valeurs est plus étendue (de -2,5 à +50°C). En ce qui concerne les mesures de débit de pompage, peu de valeurs aberrantes apparaissent. Les seules qui peuvent apparaitre interviennent en général à la suite d'une coupure électrique ou d'un dysfonctionnement de la communication. Ainsi toutes les mesures de débits de pompage inférieures à 0 ou supérieures à 1 000 $m^3/h$ sont supprimées. Pour les mesures de débit introduit dans les bassins, l'analyse est identique à celle des données de pompage, mais avec une gamme de valeur plus grande du fait des débits plus importants : les valeurs inférieures à 0 ou supérieures à 4 000 $m^3/h$ sont supprimées des données brutes de réalimentation.

Après avoir supprimé les valeurs aberrantes dans les chroniques, il faut vérifier que les données ne présentent pas de **plateau**. Que ce soit pour les eaux de surface ou les eaux souterraines, si les données présentent des plateaux pour les mesures de niveaux ou de température, alors la sonde est « bloquée ». Ces enregistrements, s'ils durent plus d'un jour consécutif, sont supprimés des chroniques. Dans de rares cas, les coupures électriques ou un défaut sur un appareil de mesure peuvent occasionner des manques de données sur plusieurs heures voir plusieurs jours.
Travaillant sur la base de moyennes mensuelles pour les cartes de températures, les manques de données dans les chroniques ne se font pas ressentir.

Voici en quelques chiffres les manques de données enregistrés sur l'année 2016 après suppression des valeurs aberrantes ou des plateaux de valeurs (Tableau 9) :

| | | **Nombre de données attendues « A »** | **Nombre de données manquantes « B »** | **Rapport « B / A »** |
|---|---|---|---|---|
| **Température** | **De nappe** | 65 588 | 794 | 1,2 % |
| | **De l'eau infiltrée** | 105 408 | 1 437 | 1,4 % |
| | **Des cours d'eau** | 17 568 | 998 | 5,7 % |
| | **De sortie d'usine** | 35 136 | 69 | 0,2 % |
| **Niveau piézométrique (M12)** | | 52 704 | 51 | 0,1 % |
| **Débit** | **Pompage** | 50 595 840 | 15 600 | 0,003 % |
| | **Réalimentation** | 6 324 480 | 4 717 | 0,07 % |
| | **Rhône** | 366 | 4 | 1,1 % |

*Tableau 9 : Détail du manque de données dans les chroniques pour la réalisation des cartes de températures de 2016*

### III.4.2. Présentation des résultats et interprétation des cartes de température

Pour rappel, les cartes de températures ont été réalisées entre avril 2014 et décembre 2017. Ces dernières peuvent être analysées et interprétées individuellement, ou être comparées d'un mois à l'autre d'une même année, ou d'une année sur l'autre afin de constater les évolutions sur des temps plus ou moins longs.

#### *III.4.2.1. Exemple de la carte des températures du mois de janvier 2016*

La Figure 34 illustre la carte des températures du mois de janvier 2016. Sur cette carte, toutes les données nécessaires citées dans le chapitre précédent, ont été concaténées.
Cette carte permet de visualiser :

- ✓ Les **températures** moyennes :
  - de l'**eau souterraine à l'échelle du champ captant**, et de visualiser l'hétérogénéité spatiale de cette température. En janvier 2016, la température moyenne est de l'ordre de 12,4 ± 2,3 °C (moyenne des températures enregistrées dans tous les ouvrages souterrains).
  - des **eaux de surface** (de l'ordre de 7,6 ± 0,9 °C en janvier).
  - de l'**eau en sortie d'usine** (14,2 ± 0,7 °C)
  - de l'**eau infiltrée via les bassins d'infiltration** (8,4 ± 1,1 °C)
- ✓ Les **conditions d'exploitation** du site de captage : **volume refoulé** mensuel total (6 653 107 $m^3$ en janvier) et **volume infiltré** mensuel total (2 496 805 $m^3$), ainsi que la **répartition de ces volumes selon les ouvrages**.
  Au moins de janvier 2016, la recharge artificielle a principalement eu lieu au sein des bassins 5-2 et 6-1 ; alors que les pompages sont assez homogènes mise à part un volume plus faible produit par le poste 09.
- ✓ Le **niveau de nappe moyen mensuel** du piézomètre M12, comparé à la moyenne enregistrée entre avril 2014 et octobre 2017. En janvier 2016, ce niveau piézométrique moyen mensuel relatif est plutôt faible : - 0,45 m.
- ✓ Le **débit moyen mensuel du Rhône** en aval du champ captant : équivalent à 755 $m^3.s^{-1}$ en janvier 2016 (ce qui correspond à un débit supérieur de 205 $m^3.s^{-1}$ par rapport à la moyenne enregistrée entre avril 2014 et décembre 2017).

Même seule, une carte de température mensuelle renseigne sur les chemins de l'eau et sur l'influence des bassins d'infiltration et des échanges nappe-rivière en termes de transferts thermiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En effet, la carte de janvier 2016, illustrée sur la Figure 34 montre que, autour des bassins 5-2 et 6-1 là où les infiltrations ont été les plus conséquentes, un panache thermique plus froid se forme. A proximité des bassins 2 et 3, qui ont infiltré un faible volume d'eau, une diminution moins marquée des températures de nappe est à remarquer. Les cours d'eau ne semblent pas influencer les températures de nappe : au nord des bassins 5 (berges du Canal de Miribel), à l'Est de la zone de captage de l'île de Charmy (berges du Vieux-Rhône), et à l'extrême Ouest du captage (berges du Vieux-Rhône), la température de surface est déconnectée de la température souterraine. Par contre, sur la partie Sud-Ouest de l'île de Crépieux, il semblerait que les températures de nappe au sein des ouvrages de pompages soient impactées par la température de l'eau du Canal de Jonage (entrée d'eau froide). Le centre de la prairie de captage de l'île de Crépieux présente des températures de l'ordre de 15°C, non influencées par les bassins d'infiltration ou les cours d'eau. Au Sud de l'île de Charmy, la température est constante toute l'année (de l'ordre de 15°C) et serait le témoin de l'arrivée de la nappe de l'Est. La conductivité électrique enregistrée est plus élevée dans les ouvrages du poste électrique

n°14 (situé au Sud de l'île de Charmy, Figure 32), de l'ordre de 530 µS.cm$^{-1}$ (moyennes des valeurs acquises au cours des campagnes de prélèvements de 2015-2016 par l'Exploitant), comparé à la conductivité électrique mesurée dans les ouvrages du poste électrique n°12 (au Nord de l'île de Charmy, Figure 32) qui est en moyenne de 390 µS.cm$^{-1}$ en 2015-2016.

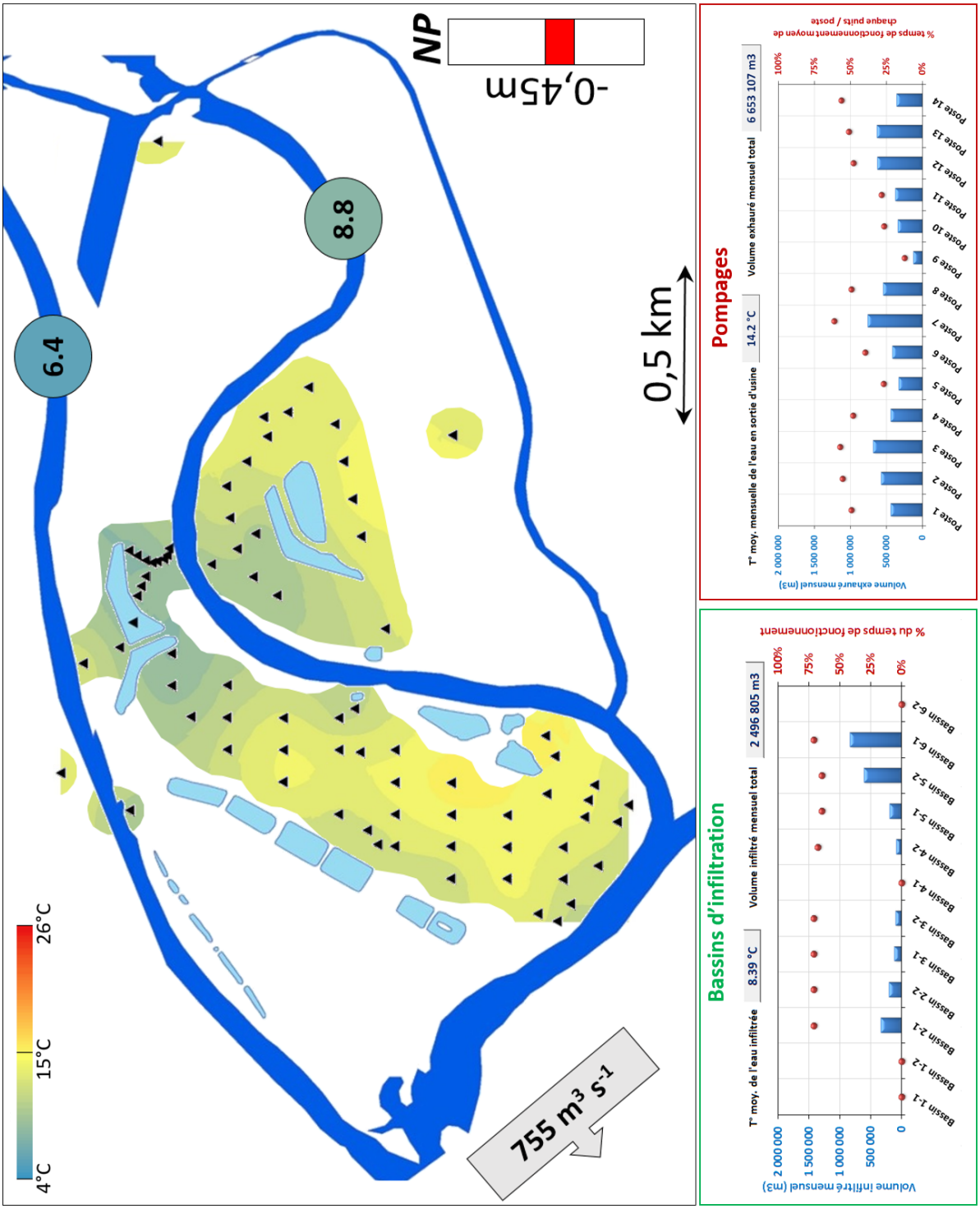



*Figure 34 : Carte des températures du mois de janvier 2016*

#### *III.4.2.2. Evolution des températures souterraines au cours du temps*

La température de l'eau de la nappe présente une évolution spatiale et temporelle. Ceci est principalement dû à l'exploitation du site (pompages et bassins d'infiltration) et aux chemins d'écoulement de l'eau souterraine au travers des alluvions.
De ce fait, analyser l'évolution entre deux cartes de températures permet de visualiser et de comprendre l'impact des conditions d'exploitation sur l'écoulement souterrain.

Prenons l'exemple des cartes des mois de mai et juin 2015, illustrées sur la Figure 35.

Le mois de mai correspond à un état plutôt stable d'un point de vue des températures : la température de nappe à l'échelle du champ est homogène, de l'ordre de 12,6 °C (mise à part la zone située au Nord des bassins 6 du fait de l'alimentation de ces bassins avec une température moyenne de 16,7 °C).

Le mois suivant, en juin 2015, les conditions météorologiques ont fortement évolué. Une augmentation de 6 °C est à noter dans les eaux des cours d'eau, ce qui implique une augmentation de la température de l'eau infiltrée par les bassins : passage de 16,7 °C en mai à 21,8 °C en juin).

Cette évolution des températures, superposée à un fonctionnement des bassins beaucoup plus soutenu au mois de juin (presque tous les bassins ont été en eau plus de la moitié du temps en juin, alors qu'au mois de mai ils n'avaient fonctionné qu'aux alentours de 40 % du temps), entraîne un volume d'eau infiltré bien plus élevé qu'au mois de mai.

Ces conditions d'exploitation se font ressentir sur la carte des températures de juin : des panaches thermiques chauds se dessinent autour des bassins d'infiltration en fonctionnement (notamment les bassins 6-1 et 6-2 ; 5-1 ; 4-1 et 2-1).

L'évolution spatiale et temporelle de ces panaches renseigne sur les sens d'écoulement de l'eau souterraine comme illustré sur la Figure 36.

Une fois de plus, la déconnexion thermique entre les cours d'eau et la nappe est bien marquée (Sud du bassin 5-2 et Sud-Est de la zone de pompage de l'île de Charmy).

**À l'échelle de temps mensuelle, l'évolution thermique** qui se produit dans la nappe alluviale au **centre la prairie de captage n'est liée qu'à l'alimentation des bassins d'infiltration et non aux apports par les cours d'eau.**

Si l'objectif est d'observer les phénomènes de transfert thermique sur le plus long terme, alors les cartes de températures peuvent être comparées pour un même mois, d'une année à l'autre.

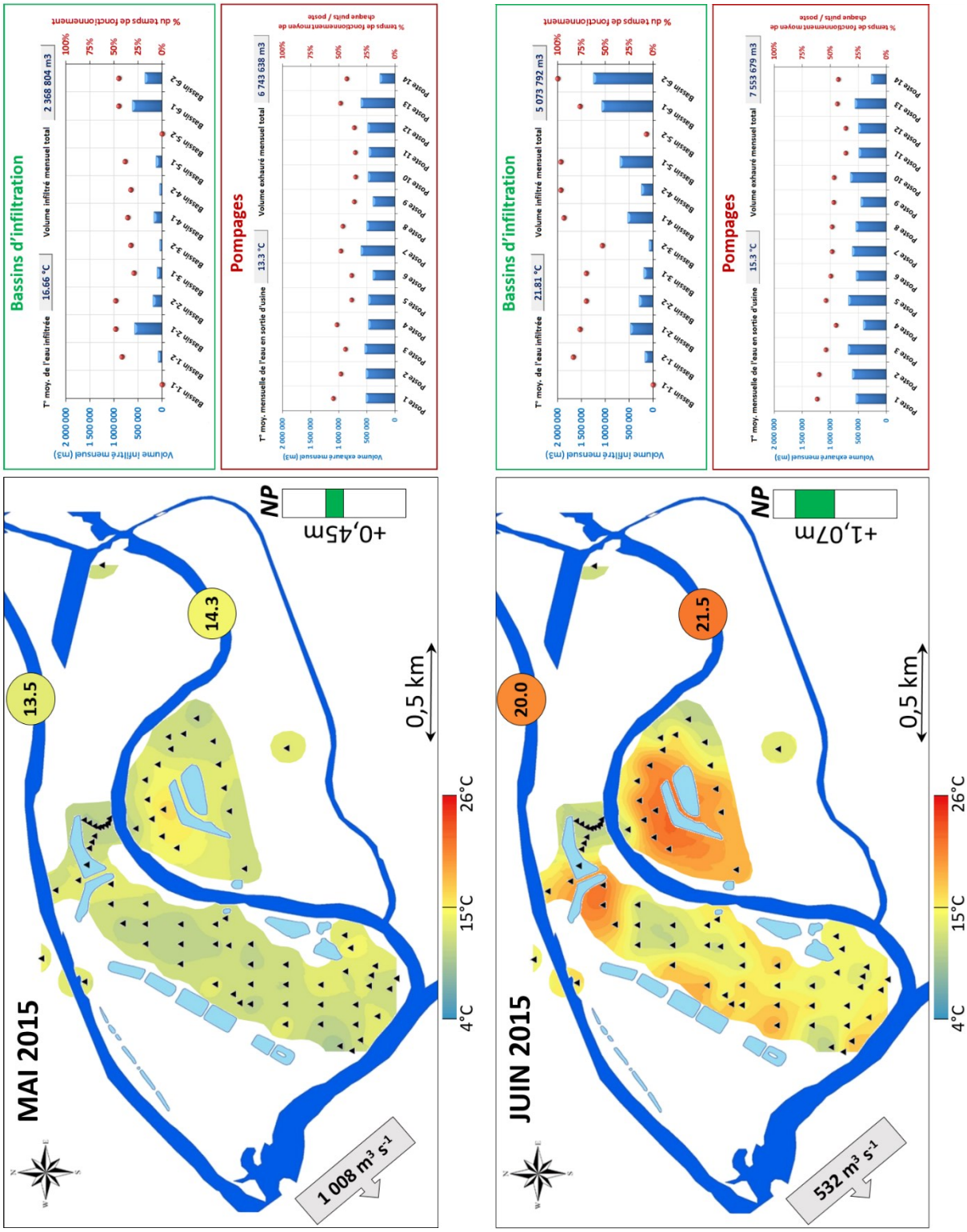



*Figure 35 : Evolution des températures de nappe, à l'échelle du champ captant, entre les mois de mai et juin 2015*

### III.4.3. Conclusions et perspectives

Rappelons que les sondes de mesure de température sont en grande majorité situées en fond d'ouvrage. Les cartes de températures illustrent la température de nappe, en considérant que cette dernière est **homogène selon la profondeur**.

Malgré cette simplification, les sens d'écoulements mis en évidence sur les cartes de température à l'échelle du champ captant (illustrés sur la Figure 36) sont en adéquation avec les observations faites à partir des cartes piézométriques.

**L'évolution thermique** permet de confirmer que l'eau souterraine située **au centre de la prairie de captage** est **liée en grande majorité à l'apport par les bassins d'infiltration** et non aux échanges nappe-rivière : les panaches thermiques se dessinent autour des bassins d'infiltration et se dirigent vers la zone de pompage. Il semblerait qu'une déconnexion thermique soit avérée entre les cours d'eau et la nappe en différents endroits du champ captant, localisés sur la Figure 36. Le fait que la température de la nappe ne soit pas à l'équilibre avec la température des eaux superficielles peut s'expliquer par la durée nécessaire pour que le transfert thermique impacte le fluide et le milieu environnant.

Ainsi, l'interprétation en parallèle des cartes piézométriques et thermiques est difficile puisque **la piézométrie est le marqueur d'un évènement à échelle temporelle réduite alors que la thermique est un traceur des évènements présents et passés** (cinétiques différentes).

Le suivi de la température permet également de mettre en évidence les arrivées de nappes souterraines sur la zone de captage (Figure 36), notamment l'arrivée de la nappe de l'Est sur l'île de Charmy (qui enregistre une température de l'ordre de 14 °C, qui varie très peu au cours de l'année).

A l'Ouest du site de captage, la nappe de Lyon (Figure 36) peut entraîner une réponse thermique sur les pompages de Crépieux puisque la zone d'appel des pompages s'étend au-delà du Canal de Jonage. Il ne s'agit pas d'un écoulement naturel : cet écoulement qui vient de l'Ouest est causé par l'exploitation du site de Crépieux-Charmy.

Lorsque les bassins sont en fonctionnement en période estivale, avec une **température d'eau infiltrée supérieure à 25 °C**, cela engendre **un risque pour la qualité de l'eau de nappe**. En effet, certains ouvrages situés à proximité immédiate des bassins voient leur température atteindre la température de l'eau infiltrée dans les bassins (notamment dans les ouvrages situés au nord des bassins 6).

Pour rappel, une température supérieure à 25 °C est susceptible d'accroitre le risque de développement bactérien ; et un prélèvement d'eau pour analyses est réalisé une fois par trimestre sur chaque ouvrage de pompage. Pour ne pas manquer une analyse d'eau de nappe en période estivale, **les cartes de températures pourraient devenir un outil de suivi de la qualité thermique de l'eau**, et définir les ouvrages de pompage prioritaires pour prélèvement.

Au total, 76 points de mesure de température de nappe sont disponibles sur le site de captage, avec un enregistrement en continu (toutes les heures). Malgré ce déploiement de grande envergure, un **manque de données** est à noter sur les zones **Nord-Ouest**, **Ouest** et **Sud** du champ captant (Figure 36). L'acquisition de nouvelles données dans ces zones permettrait de mieux comprendre les échanges nappe-rivière mais également de s'assurer de l'efficacité de la barrière hydraulique des bassins d'infiltration 2, 3 et 4.

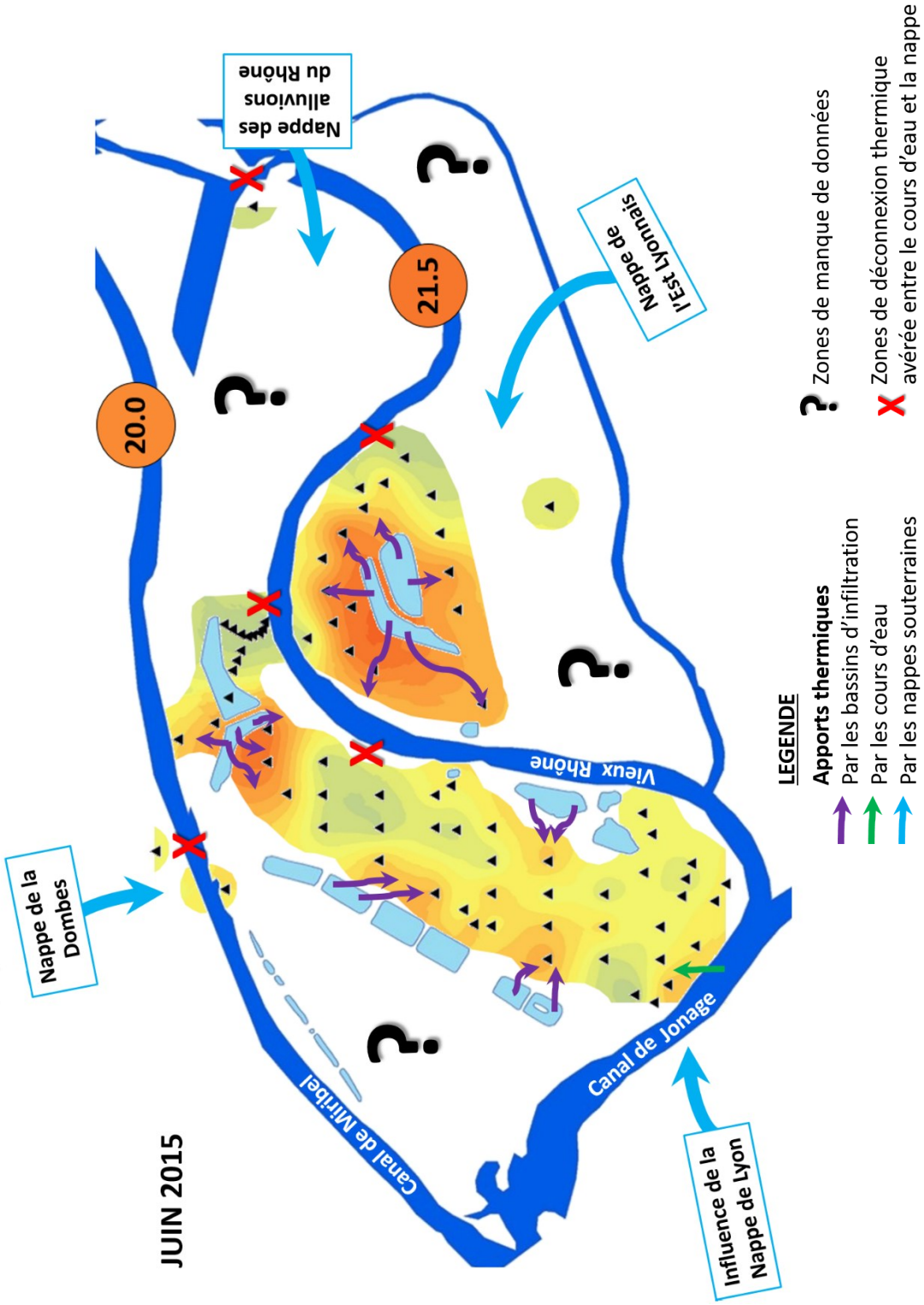
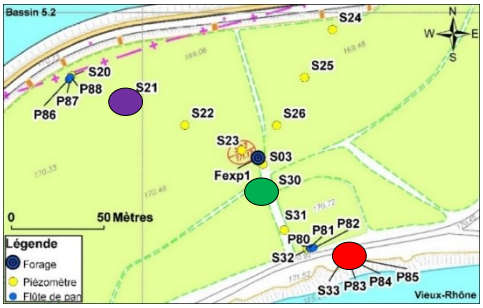



*Figure 36 : Interprétation des cartes de températures à l'échelle du champ captant : carte du mois de juin 2015*

## III.5. Oscillations locales des températures de nappe

### III.5.1. Présentation des données

Lors d'une campagne de relevé de données du dispositif expérimental (Section III.2), des données de températures étonnantes, illustrées en Figure 37, ont été découvertes au mois de décembre 2016 dans un piézomètre, situé à proximité du Vieux-Rhône (piézomètre S33).



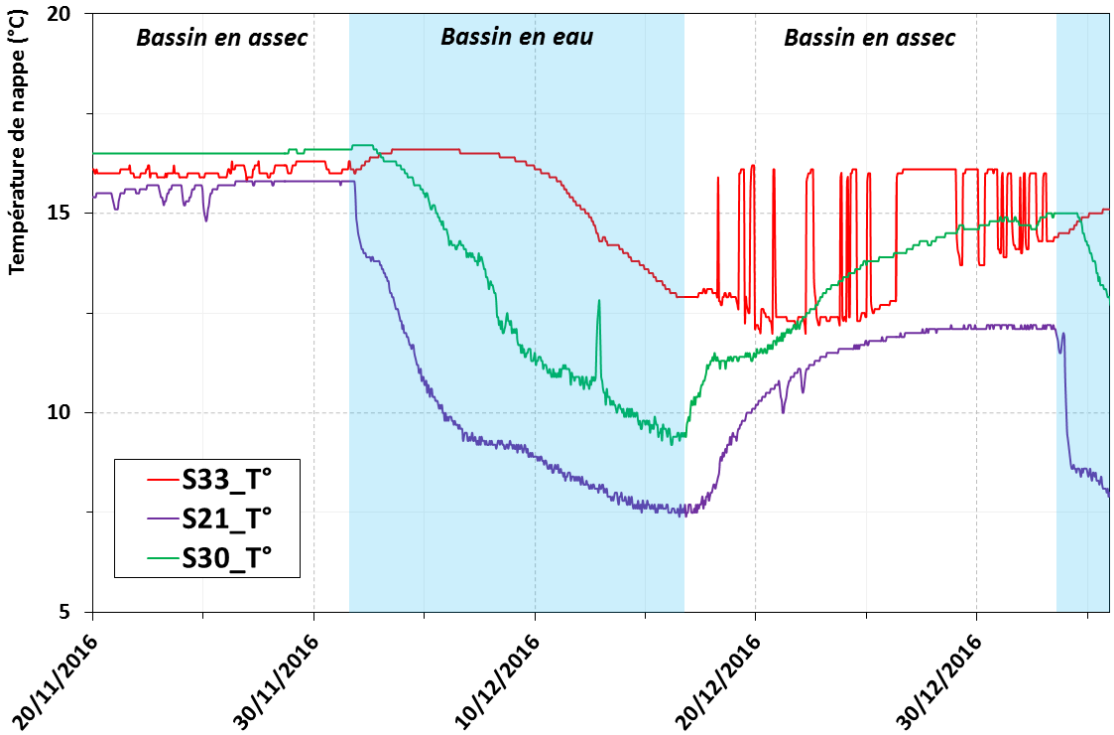




*Figure 37 : Localisation de la zone d'étude des oscillations thermiques et données enregistrées entre le 20/11/2016 et le 05/01/2017*

Initialement, les températures de nappe des piézomètres S21, S30 et S33 sont comprises entre 15 et 17°C. Ces trois piézomètres sont des ouvrages crépinés sur toute l'épaisseur de l'aquifère, et dont la sonde est située en fond d'ouvrage, en face d'une partie crépinée de l'ouvrage (Figure 38).

Comme illustré sur le graphique de la Figure 37, les bassins 5-1 et 5-2 sont mis en eau du 01 au 16/12/2016 (zone bleutée), et la température de l'eau infiltrée est de 7 °C.
Lorsque le bassin est en fonctionnement, l'eau s'écoule du bassin d'infiltration vers le Vieux-Rhône (direction Nord-Sud). Ceci explique la chute des températures de nappe dans les piézomètres, plus ou moins rapidement selon leur éloignement au bassin, jusqu'à atteindre une température comprise entre 7 et 13 °C. Le piézomètre S21, situé à 110 m du centre du bassin est le premier à réagir (sa température diminue de 1 °C en 8,5 h) alors que le piézomètre S33, le plus éloigné (260 m du centre du bassin) est le dernier à enregistrer une baisse des températures (la température diminue de 1 °C en 234 h).
Au cours de la période d'assèchement du bassin qui suit (du 16/12/2016 au 02/01/2017), les températures de nappe remontent pour revenir vers une température proche de l'état initial.
Pendant la remontée des températures, le piézomètre S33 est le seul de la liste à enregistrer des oscillations thermiques brutales, de forte amplitude (de l'ordre de 4 °C) et de manière répétée.

### III.5.2. L'analyse des données pour comprendre les oscillations thermiques

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces variations brutales de température, à savoir :

- ✓ En première approche, une **défaillance de la sonde** a été envisagée.

Le piézomètre S33 fait partie d'une flûte de pan. Ceci signifie que d'autres ouvrages de suivi de la nappe sont très proches (espacés de 1 m), situés à différentes profondeurs, crépinés sur une zone restreinte de 0,5 m d'épaisseur et équipés d'une sonde de température localisée en fond d'ouvrage (Section III.2 et Figure 38).

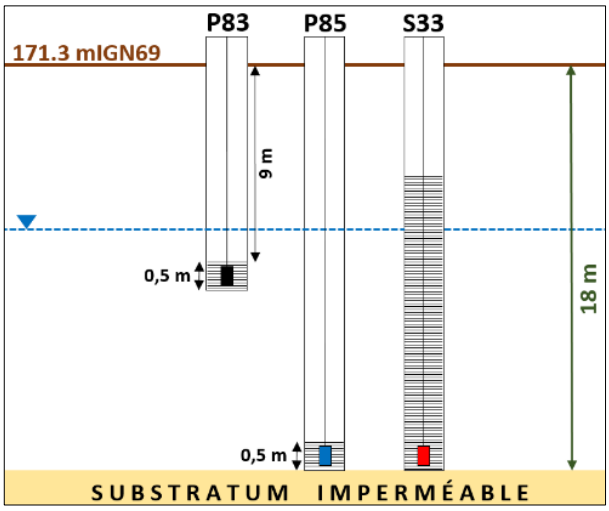



*Figure 38 : Coupe simplifiée des ouvrages de la flûte de pan à proximité du Vieux-Rhône et localisation des sondes de température*

Après comparaison des données de température enregistrées dans les trois ouvrages de la flûte de pan, il s'est avéré que les oscillations thermiques observées dans le S33 sont encadrées par celles issues du piézomètre profond (P85) et superficiel (P83) comme illustré sur la Figure 39.

De plus, le même phénomène a été observé sur une autre flûte de pan très proche de celle étudiée (située à environ 20 m en direction du Nord-Ouest, il s'agit de la flûte de pan composée de l'ouvrage S32, Figure 17).

**L'hypothèse d'une défaillance de la sonde a donc pu être abandonnée.**

- ✓ Une deuxième hypothèse est la **formation de cellules de convection au sein même de l'ouvrage**, qui expliquerait les oscillations de température.

Rappelons que les sondes de mesure sont situées en fond d'ouvrage. Ainsi, les oscillations thermiques observées pourraient faire penser à des cellules de convection au sein de l'ouvrage : l'eau superficielle apportée par le bassin, plus froide que l'eau souterraine en période hivernale, aurait tendance à descendre vers le fond de l'ouvrage du fait de sa plus forte densité.

Les données hivernales présentées sur le graphique de la Figure 39 montrent que l'ouvrage crépiné (S33) voit sa température évoluer comme celle du piézomètre superficiel P83 (plutôt une température froide), et que les oscillations thermiques correspondent à la température chaude enregistrée au sein de l'ouvrage profond P85.

En observant les données à une échelle temporelle plus large (Figure 39), il s'avère que le phénomène d'oscillations thermiques apparaît aussi bien en période hivernale (flèches violettes sur la figure, en décembre 2016 et février 2017) qu'en période estivale (flèches vertes sur la figure, en août et septembre 2016 et en mai 2017).

Durant l'été, l'eau injectée dans les bassins est plus chaude que l'eau de la nappe. Les échanges thermiques entre les eaux superficielles et souterraines sont donc inversés comparé aux données hivernales (température initiale de l'ordre de 15 °C, qui augmente pendant la phase d'alimentation du bassin, et qui revient à l'état initial pendant la phase d'assec du bassin).

Dans cette configuration, la convection thermique au sein même de l'ouvrage n'a pas lieu de survenir (l'eau chaude n'est pas plus dense que l'eau froide, et ne plonge donc pas en fond d'ouvrage).

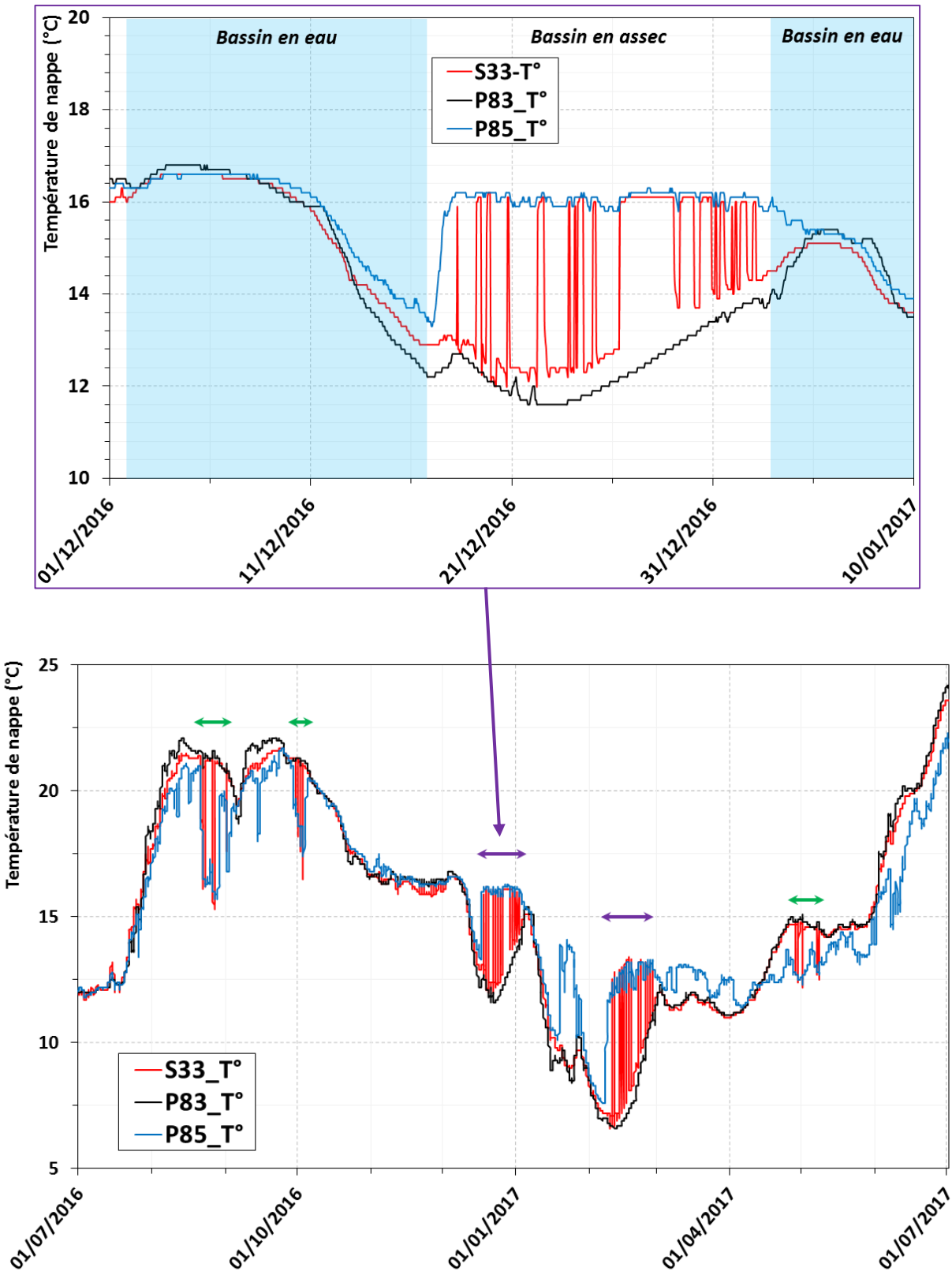



*Figure 39 : Evolution des températures de nappe dans les ouvrages de la flûte de pan à proximité du Vieux-Rhône sur une année complète*

- ✓ La dernière hypothèse formulée est **l'activation ou non d'écoulements préférentiels** au cours du temps.

Il est à noter que la température du piézomètre S33 suit la température du piézomètre superficiel de manière générale, et que les oscillations thermiques (en période estivale ou hivernale) correspondent toujours à la température du piézomètre profond.

Ces phénomènes étant brutaux et répétés, il est envisageable qu'ils soient liés à des changements brusques des sens d'écoulement. Les bassins sont à l'arrêt lors de l'apparition des oscillations. La seule cause possible à ces changements de sens d'écoulement, et donc de température, semble être liée aux pompages. Les pompages les plus proches de la zone d'étude, et donc susceptibles d'être à l'origine des oscillations thermiques, sont divisés en 4 postes électriques (Figure 32) :

- Le poste électrique n°8, comportant 6 ouvrages de pompage, situés sur l'île de Crépieux (rive droite du Vieux-Rhône).
- Les postes électriques n°11 – 12 et 13, comportant un total de 24 ouvrages de pompage, situés sur l'île de Charmy (rive gauche du Vieux Rhône).

Une chronique de débit pompé horaire est associée à chaque ouvrage de pompage. Le débit pompé horaire de chaque poste électrique est obtenu par la somme des débits pompé de chaque ouvrage de pompage rattaché au même poste électrique ($Q_{out\text{-}n°poste}$).
Afin de représenter le débit pompé sur l'île de Charmy, une équation empirique (Eq. III-1) a été utilisée afin de pondérer le débit pompé en fonction de l'éloignement de chaque poste électrique à la zone d'étude. De cette manière, on attribue une importance plus forte au pompage du poste électrique n°12 comparé aux postes n°11 et 13 (qui sont plus éloignés).

$$Q_{out-Charmy} = 0{,}25Q_{out-n°11} + 0{,}25Q_{out-n°13} + 0{,}5Q_{out-n°12} \qquad \textit{Eq. III-1}$$

Les chroniques de pompage $Q_{out\text{-}n°8}$ et $Q_{out\text{-}charmy}$ sont ensuite comparées aux chroniques de température de nappe (Figure 40). Il en ressort que les oscillations thermiques ne semblent pas être en lien direct avec le pompage sur l'île de Crépieux ($Q_{out\text{-}n°8}$) : toutes les oscillations thermiques ne coïncident pas avec des variations d'exploitation du poste n°8.
Par contre, les pompages sur l'île de Charmy et les oscillations thermiques semblent anti-corrélées : les oscillations apparaissent ($T°_{S33} = T°_{P85}$) lorsque le pompage sur l'île de Charmy est faible.

En parallèle aux mesures de températures, une sonde de conductivité a été mise en place au fond de l'ouvrage S33 en février 2017, proche de la sonde de température. Suite à un nouveau cycle de remplissage du bassin 5-2 puis une période d'assèchement de ce bassin assez longue (du 07 au 27 février 2017), de nouvelles oscillations thermiques ont été observées.

Illustrées sur la Figure 41, les mesures de température et de conductivité électrique (ramenée à 25 °C) montrent toutes deux des oscillations, qui coïncident parfaitement dans le temps : lorsque qu'un pic de température chaude est enregistré (température profonde, qui provient de l'écoulement régional lorsque le pompage sur l'île de Charmy est réduit), la conductivité électrique présente une valeur plus faible que sa valeur « normale ». Cette mesure de conductivité permet habituellement de renseigner sur les origines de l'eau. Une conductivité élevée est liée à une forte ionisation de l'eau, causée par la dilution des éléments minéraux dans l'eau lors de son écoulement *[Davis et al., 1980]*.

L'amplitude des variations de conductivité électriques qui sont mesurées ici sont faibles (variations d'environ 10 à 15 $\mu S.cm^{-1}$). Il est donc difficile de pouvoir interpréter l'origine de l'eau, d'autant plus qu'il y a peu de différence de conductivité électrique entre les eaux de la nappe alluviale et les eaux des cours d'eau environnants (et donc des eaux qui proviennent de l'infiltration par les bassins).

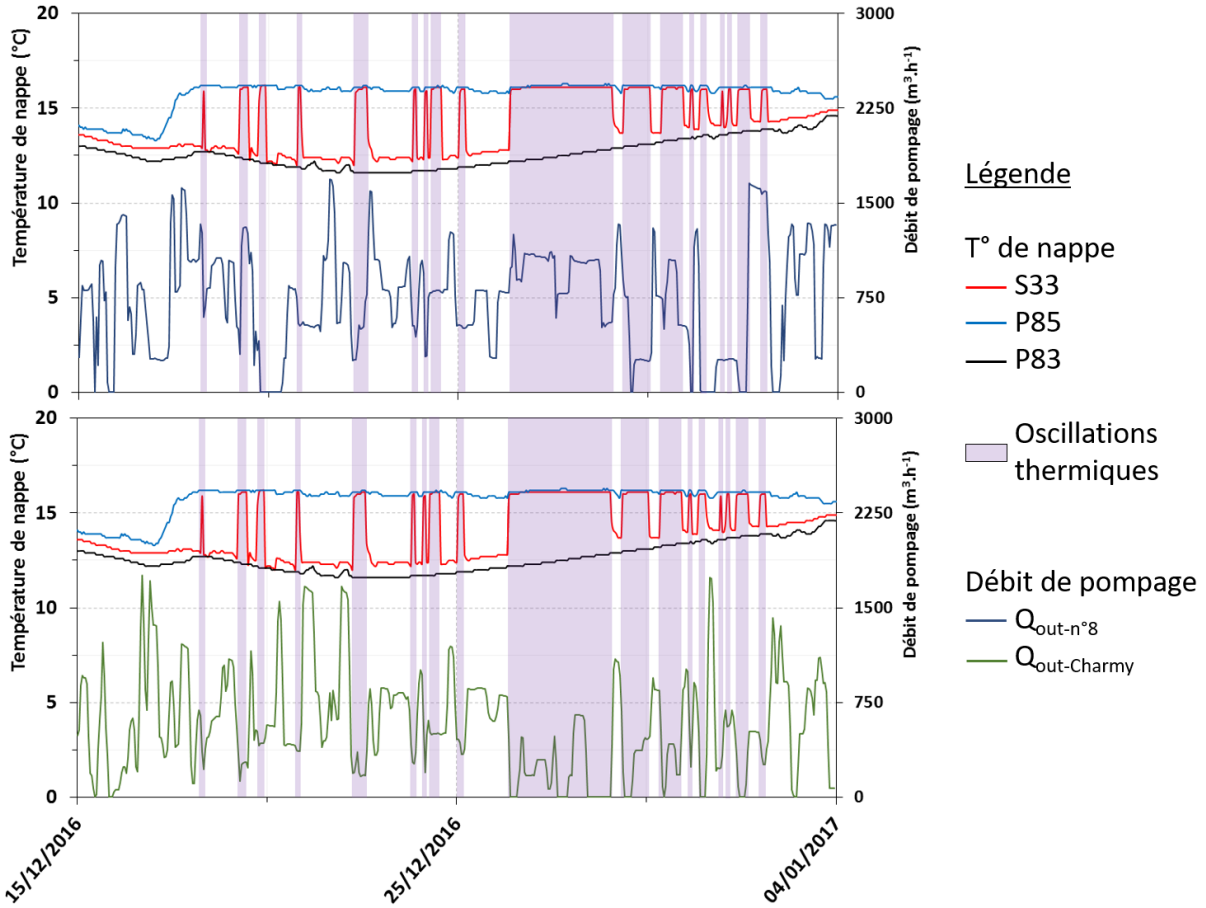



*Figure 40 : Comparaison des températures de nappe et des chroniques de pompage issues du poste électrique n°8 et des ouvrages de pompage de l'ile de Charmy*

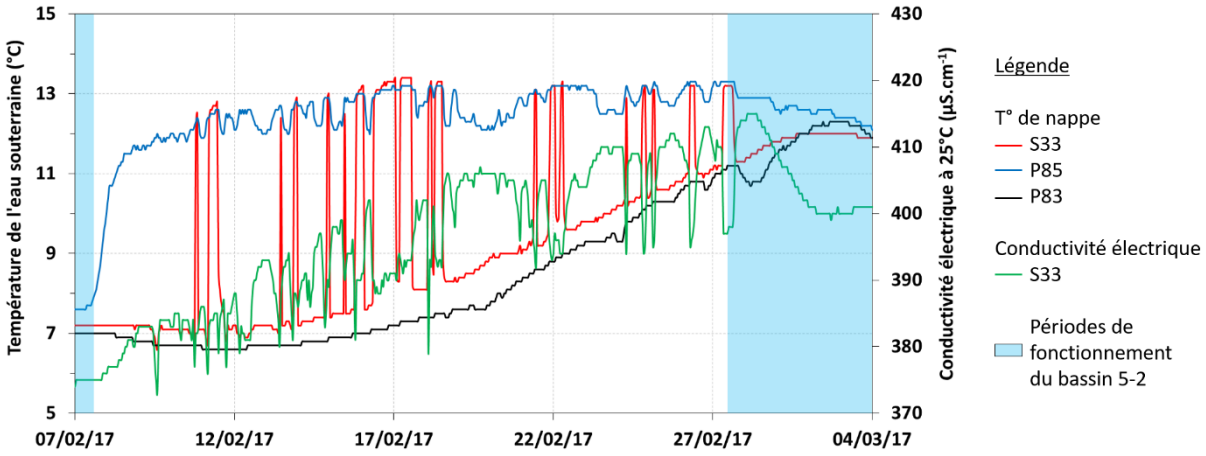



*Figure 41 : Comparaison de l'évolution de la température et de la conductivité électrique dans le piézomètre S33 en février 2017*

### III.5.3. La mise en évidence d'écoulements 3D par interprétation des résultats

Les oscillations thermiques sont le marqueur d'un changement de sens d'écoulement aux alentours des bassins d'infiltration suite à un assèchement de ces derniers.
Ce phénomène, qui tient compte d'un **aspect 3D**, est illustré sur la Figure 42 selon une vue de dessus et sur la Figure 43 selon une vue en coupe. Ces deux figures permettent d'expliquer le changement de sens d'écoulement qui peut s'opérer selon les conditions d'exploitation du bassin d'infiltration et des pompages de l'île de Charmy :

- ✓ **Pendant le fonctionnement du bassin** (n°1 sur la Figure 42), un **panache thermique** se dessine aux abords du bassin et s'étend progressivement en direction du Sud.
  Cet **écoulement Nord-Sud** dominant est actif tant que le bassin est en fonctionnement. L'écoulement régional Est-Ouest se retrouve ainsi très limité, sans aucune dépendance aux pompages présents sur l'île de Charmy.
- ✓ Dès lors que **l'alimentation du bassin est stoppée** (n°2 et n°3 sur la Figure 42), l'**écoulement régional d'Est en Ouest** se renforce, notamment en **fond d'aquifère**. En effet, la vitesse d'écoulement est plus rapide en fond d'aquifère par rapport celle de la partie superficielle de par la lithologie en présence *[Loizeau, 2013]*. Ceci explique que la température de l'ouvrage profond (P85) retrouve sa température initiale rapidement, alors que l'ouvrage superficiel (P83) revient progressivement à sa température initiale (illustration selon une coupe 2D sur la Figure 43). C'est au cours de cette phase de non-fonctionnement du bassin que les **conditions d'exploitation** de l'île de Charmy vont jouer un **rôle important sur les sens d'écoulement dominants** :
  - Si le **pompage est important** (n°2 sur la Figure 42 et Figure 43), alors **l'écoulement Nord-Sud est plus fort** que l'écoulement Est-Ouest. De ce fait, l'ouvrage S33 enregistre une température équivalente à celle de l'ouvrage superficiel P83.
  - Si le **pompage est faible**, alors **l'écoulement Est-Ouest est dominant**, et l'ouvrage S33 voit sa température correspondre à celle de l'ouvrage profond P85 (n°3 sur la Figure 42 et Figure 43).

  Après un certain temps, le panache thermique lié au remplissage du bassin s'estompe et les températures de nappe redeviennent homogènes selon la profondeur.

Ainsi, pour comprendre l'origine des oscillations thermiques observées, il est primordial de tenir compte de **l'aspect 3D des écoulements** : l'écoulement régional et l'écoulement en provenance du bassin sont perpendiculaires, et dépendent de la profondeur. Les pompages sur la rive opposée du Vieux-Rhône jouent un rôle d'activation ou non de chemins préférentiels d'écoulement, ou plutôt de changement de sens d'écoulement. Ceci permet une fois de plus de mettre en évidence l'écoulement souterrain qui se produit au droit du Vieux-Rhône.

Les oscillations thermiques n'apparaissent pas sur tous les ouvrages de suivi de la température présents sur le champ captant et ces variations sont enregistrées dans des conditions bien particulières :

- ✓ Une **différence de température de plus de 5 °C** entre les eaux superficielles (injectées dans le bassin d'infiltration) et les eaux souterraines.
- ✓ Un **épisode de remplissage** des bassins 5-1 et 5-2 d'assez longue durée (environ 15 jours) pour que la température dans les piézomètres éloignés du bassin ait le temps d'évoluer, suivi d'une **période d'assec** des bassins de 15 jours pour que la température dans les piézomètres éloignés revienne à son état initial.
- ✓ Une évolution du volume pompé dans les ouvrages des postes électriques n° 11 à 13 (les oscillations thermiques apparaissent lorsque les pompages sont faibles voire nuls).
- ✓ Une hauteur d'eau dans le Vieux-Rhône assez faible pour ne pas limiter les écoulements profonds.

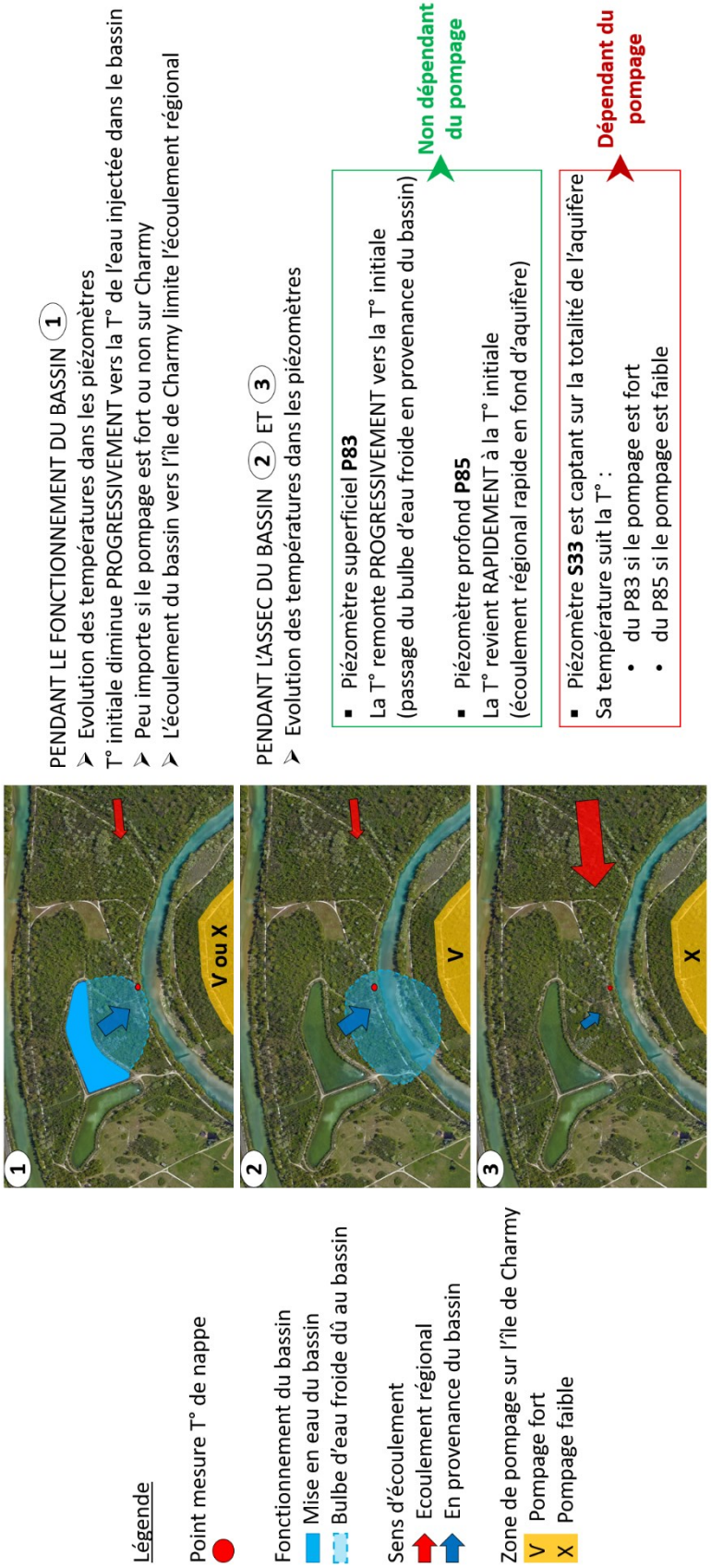



*Figure 42 : Vue du dessus de l'évolution des températures de nappe suite à un remplissage du bassin 5-2, et selon les conditions de pompage sur l'île de Charmy*

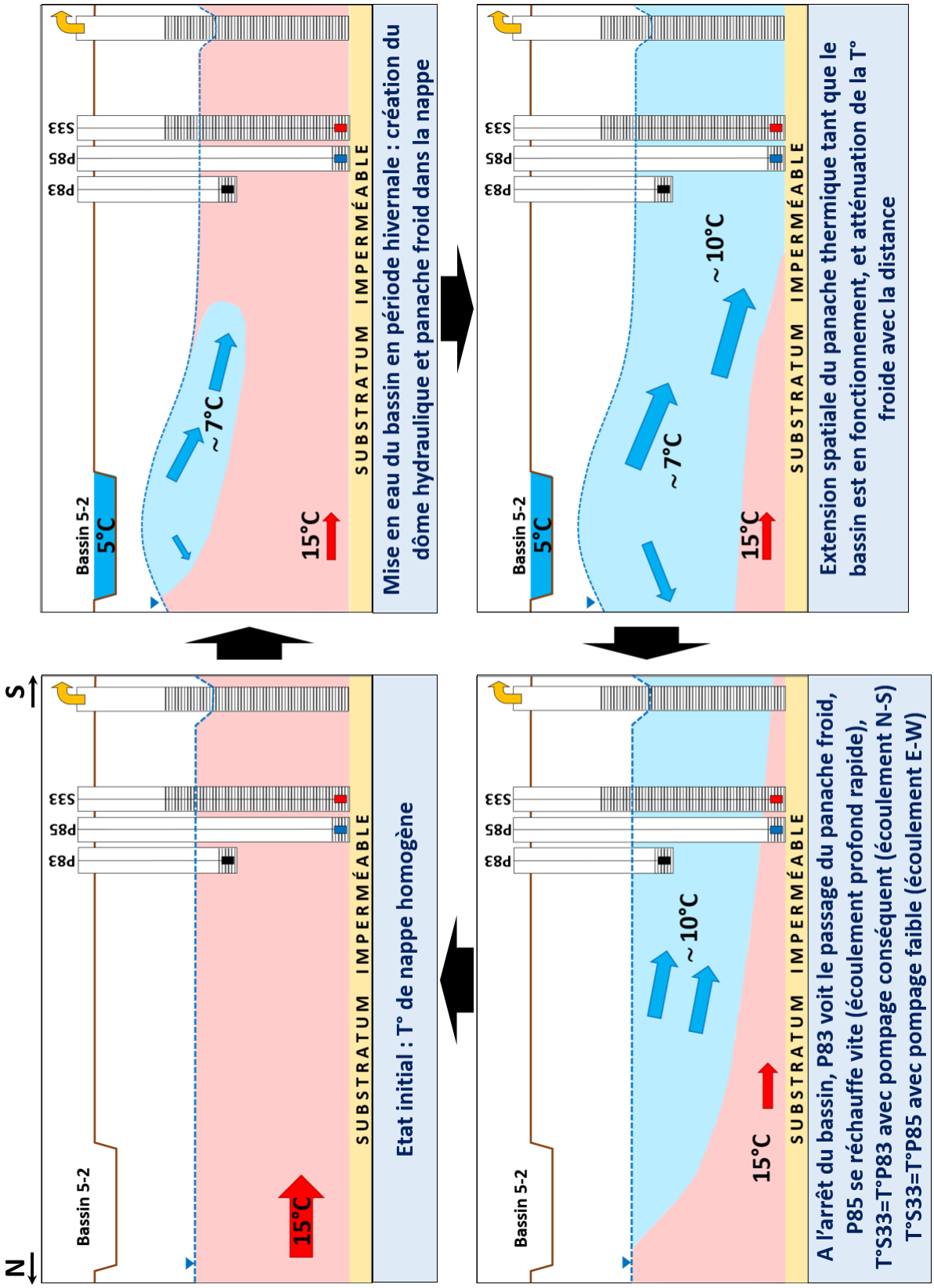



*Figure 43 : Représentation schématique 2D, selon une coupe Nord-Sud entre le bassin et les piézomètres, de l'évolution des températures de nappe, en période hivernale.*

## *CHAPITRE III – CONCLUSIONS ET IDÉES À RETENIR*

### Un large panel de données disponibles sur le site d'étude

Avoir accès à un panel de données aussi vaste sur une même zone d'étude est une grande chance dans le domaine de l'hydrogéologie. Les données acquises sur le champ captant peuvent être divisées en trois groupes (seules les données utilisées au cours du travail de thèse sont énumérées ici) :

| | Lieu d'acquisition | Type de mesure | Nombre de points de mesure | Fréquence d'enregistrement |
|---|---|---|---|---|
| **Exploitation** | Pompage | Volume pompé | 81+15 | 1 min |
| | Bassins d'infiltration | Volume introduit<br>Hauteur d'eau<br>Température | 12<br>12<br>12 | 1 min<br>10 min<br>1 h |
| | Sortie usine | Température | 4 | 1 h |
| **Suivi des eaux souterraines** | Piézomètres | Niveau piézométrique<br>Température | 57<br>9 | 10 min<br>1 h |
| | Puits<br>Forages | Niveau piézométrique<br>Température<br>Analyses physico-chimiques | 111<br>49<br>111 | 10 min<br>1 h<br>1 prélèvement/trimestre dans chaque puits ou forage |
| **Suivi des eaux de surface** | Cours d'eau | Hauteur d'eau<br>Température<br>Stations d'alerte | 4<br>4<br>2 | 10 min<br>1 h<br>Dépend du type de mesure |
| | Lac de Miribel | Hauteur d'eau<br>Température<br>Volume prélevé | 1<br>1<br>1 | 10 min<br>1 h<br>1 min |

La **vérification** et la **validation** de ces données est une étape primordiale, bien que chronophage, avant toute opération d'analyse et d'interprétation des phénomènes. Il est essentiel de toujours conserver un œil critique sur les données acquises. Malgré tous les efforts menés, des manques de données dans les chroniques peuvent apparaitre.

### La création d'un dispositif expérimental fortement instrumenté

Exclusivement dédié aux travaux de recherche, le dispositif expérimental a été créé autour d'un bassin d'infiltration : le bassin 5-2. Caractérisé par une surface conséquente, une forme complexe, son éloignement de la zone de pompage et sa localisation à égale distance du Canal de Miribel et du Vieux-Rhône, le bassin 5-2 correspond à la zone la plus adaptée pour mener des travaux de recherche.

Le but est ici de mieux comprendre les chemins de l'eau entre les différents compartiments de la zone (nappe, cours d'eau, bassin). Les **31 piézomètres** du dispositif expérimental sont équipés d'une sonde de mesure en continu, du niveau piézométrique et de la température de nappe, depuis 2011 pour certains ouvrages et depuis 2015 pour les ouvrages les plus récents.

Deux types d'ouvrages sont à différencier : les **ouvrages dits « classiques »** (crépinés sur la totalité de leur profondeur, et atteignant le substratum), et les **ouvrages « en flûte de pan »** (crépinés sur une hauteur restreinte de 0,5 à 1 m, et dont le fond d'ouvrage atteint soit le substratum, soit la mi-hauteur de l'aquifère, soit s'arrête à un niveau superficiel de la nappe).

La localisation, le type d'ouvrage ainsi que leur équipement (type de sonde de mesure, emplacement de cette dernière, pas de temps d'enregistrement) sont des critères importants à considérer pour obtenir des données exploitables et intéressantes pour améliorer la compréhension du système.

La réalisation des différents ouvrages du dispositif expérimental a notamment permis de :

- ✓ **Connaître la lithologie du sous-sol de part et d'autre du bassin d'infiltration**
  - L'**altitude du toit du substratum** peut varier de plusieurs mètres sur la zone d'étude (épaisseur d'alluvions plus conséquente au Nord du bassin),
  - Mise en évidence de la présence d'une **zone moins perméable** contenant de l'argile aux alentours de 10 m de profondeur au Sud du bassin lors de la première phase de réalisation du dispositif, et au droit du bassin ainsi qu'en direction du Nord durant l'extension du dispositif expérimental.
- ✓ Valider le fait que **la zone non saturée règlementaire de 2 m d'épaisseur est bien conservée au droit du bassin** pendant les cycles de remplissage. Cette validation est possible grâce aux mesures du niveau de nappe réalisées dans les nouveaux ouvrages situés au centre du bassin.
- ✓ Quantifier l'impact de la zone moins perméable rencontrée de part et d'autre du bassin : la **couche argileuse joue un rôle non négligeable sur les échanges hydrodynamiques et thermiques entre les eaux d'infiltration du bassin et les eaux souterraines**.
- ✓ Mener des **expérimentations spécifiques** telles que des pompages d'essai *[Loizeau, 2013]* et des traçages thermiques à l'échelle du bassin (Section IV.3.2)

**L'évolution piézométrique et thermique à l'échelle du champ captant**

Les cartes piézométriques et thermiques à l'échelle du champ captant montrent des **évolutions spatiales et temporelles importantes**, dominées notamment **par les conditions d'exploitation du site**.

Les cartes piézométriques illustrent le **creux piézométrique formé au centre de la prairie de captage de l'île de Crépieux**, tout au long de l'année (du fait du pompage total permanent au cours du temps). L'écoulement de la nappe des alluvions du Rhône suit une direction générale Est-Ouest, bien visible sur les cartes piézométriques lorsque les bassins d'infiltration ne fonctionnent pas. De la même manière, l'écoulement en provenance du Sud est expliqué par l'arrivée de la nappe de l'Est Lyonnais.

Après une période de **mise en eau des bassins d'infiltration**, les **sens d'écoulement se retrouvent considérablement affectés** : la barrière hydraulique générée limite ainsi l'écoulement naturel de la nappe, notamment par la présence des bassins 5 et 6 (qui présentent des superficies importantes, ce qui implique un volume d'eau infiltré conséquent).

Les écoulements souterrains ne semblent **pas être impactés par le Vieux-Rhône**, cours d'eau de surface qui traverse la prairie de captage. Le manque de données sur les bords du captage limite l'interprétation en ce qui concerne les autres cours d'eau du site.

Les cartes de température mensuelles permettent d'illustrer les températures de nappe au cours du temps et de manière spatialisée à l'échelle du champ captant, tout en tenant compte des conditions d'exploitation (volumes infiltrés, volumes pompés).

Ces observations thermiques montrent une fois de plus **l'impact très prononcé de l'exploitation des bassins d'infiltration sur la ressource souterraine**. En période estivale, des panaches d'eau chaude se forment autour des bassins, et renseignent sur les **chemins d'écoulement de l'eau** depuis les bassins vers les pompages. En comparaison, l'impact thermique des cours d'eau paraît beaucoup plus limité en particulier en ce qui concerne le Vieux-Rhône.

Ces cartes de température illustrent la **déconnexion thermique qui existe entre les cours d'eau et la nappe** et mettent en évidence les **zones dépourvues de données** qui limitent l'analyse des échanges thermiques à la partie centrale du champ captant.

Piézométrie et thermique sont difficilement interprétable en parallèle : bien qu'elles apportent toutes deux des connaissances sur les sens d'écoulement, les réactions piézométriques de la nappe présentent une cinétique beaucoup plus rapide que les évolutions thermiques. La **piézométrie illustre les évènements sur des temps courts** alors que la **thermique est influencée par l'histoire des transferts**.

**Des oscillations thermiques locales qui indiquent des écoulements 3D**

Localement des **oscillations thermiques brusques**, de **forte amplitude** et **répétées** peuvent apparaitre dans certains ouvrages de suivi.

Il a été démontré que les oscillations thermiques sont présentes seulement si **des conditions particulières d'exploitation sont respectées** (exploitation spécifique des bassins d'infiltration et des pompages, différence de température nécessaire entre les eaux de surface et les eaux souterraines).

Plusieurs remarques importantes découlent de ces observations de terrain :

- ✓ Les oscillations thermiques observées ont pu être expliquée par la présence d'ouvrages en **flûte de pan**. Habituellement, seuls les ouvrages crépinés sur toute leur profondeur sont présents. Or, les oscillations thermiques s'opèrent dans cet ouvrage. Les ouvrages superficiels et profonds de la flûte de pan ont permis de comprendre les phénomènes expliquant ces oscillations, grâce à des mesures de température sur des zones restreintes de l'aquifère.
  Le **choix de l'emplacement des ouvrages**, la **profondeur d'investigation** de ces derniers ainsi que la **position de la sonde** au sein de l'ouvrage et l'**enregistrement de données en continu** sont des critères importants pour la compréhension des chemins de l'eau.
- ✓ La **température** s'avère être un **bon traceur pour la compréhension des chemins de l'eau** sur le site d'étude du fait des écarts thermiques enregistrés entre les eaux superficielles et les eaux souterraines.
- ✓ Des **chemins préférentiels** de fond d'aquifère (liés à la couche profonde très perméable) se retrouvent **activés ou non** par les pompages. Les conditions d'exploitation (bassins et pompage) du site conditionnent fortement les sens d'écoulement de l'eau souterraine.
- ✓ **L'eau souterraine circule sans difficultés sous le Vieux-Rhône**, ce qui confirme les informations fournies par les cartes piézométriques.
- ✓ La **distribution complexe des ouvrages** de pompage et des bassins rends **impossible** une **interprétation purement 2D des écoulements** et justifie le choix d'une **modélisation 3D** des écoulements et des transferts thermiques (Chapitre V).
- ✓ L'**activation temporaire d'écoulements profonds**, avec une origine de l'eau très peu différenciée (entre les bassins et la nappe de l'Est Lyonnais) **rend extrêmement difficile l'estimation quantitative de la contribution des différentes sources**.

# Chapitre IV

## Rôle et fonctionnement de la réalimentation artificielle de la nappe

Observations et expérimentations

***Sommaire***

**IV.1. La réalimentation artificielle des nappes souterraines**
IV.1.1. Qu'est-ce que la réalimentation artificielle et quelle est son utilité ?
IV.1.2. Les différents types de Recharge Artificielle Contrôlée
IV.1.3. La Recharge Artificielle Contrôlée dans le monde et en France

**IV.2. Les bassins d'infiltration de Crépieux-Charmy**
IV.2.1. Localisation, conception et gestion des bassins d'infiltration
IV.2.2. Le double rôle des bassins d'infiltration sur le site d'étude
IV.2.3. L'exploitation des bassins en quelques chiffres

**IV.3. Observations et expérimentations**
IV.3.1. La caractérisation du fond d'un bassin d'infiltration
IV.3.2. Les traçages thermiques à l'échelle d'un bassin d'infiltration
IV.3.3. L'observation de l'efficacité de la barrière hydraulique sur l'ensemble du champ captant
IV.3.4. L'indice d'infiltrabilité : visualiser, comprendre et comparer l'évolution des capacités d'infiltration des bassins

***Introduction***

Les bassins d'infiltration de Crépieux-Charmy jouent un rôle prépondérant sur les écoulements souterrains mais également sur la température de nappe (Chapitre III). De ce fait, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement de ces entités de manière globale (tous bassins confondus) et individuelle (pour chaque bassin séparément) afin d'identifier les écoulements souterrains sur le site d'étude.

Ce chapitre débute par un état de l'art de la recharge artificielle contrôlée (MAR) dans le monde et en France. Après avoir présenté les bassins d'infiltration qui composent la MAR du site de Crépieux Charmy, nous nous focaliserons sur les observations et expérimentations menées sur ces bassins, à savoir :

- ✓ La caractérisation hydrodynamique des bassins par essais d'infiltration,
- ✓ La compréhension des chemins de l'eau par essai d'infiltration à grande échelle (le bassin en tant qu'infiltromètre, et la température en tant que traceur naturel des eaux souterraines),
- ✓ L'observation de la création du dôme hydraulique sur l'ensemble des bassins d'infiltration,
- ✓ Le développement d'un indice d'infiltrabilité permettant de comparer l'efficacité des bassins de manière objective.

# Chapitre IV : RÔLE ET FONCTIONNEMENT DE LA RÉALIMENTATION ARTIFICIELLE DE LA NAPPE – *Observations et expérimentations*

## IV.1. La réalimentation artificielle des nappes souterraines

### IV.1.1. Qu'est-ce que la réalimentation artificielle et quelle est son utilité ?

L'eau souterraine représente 98 % de l'eau douce présente sur la planète *[Bouwer, 1978]*. La recharge naturelle des nappes se fait principalement par les infiltrations sur berges (cours d'eau, lacs) et par la pluie efficace (part des précipitations qui s'infiltre vers la nappe) *[Freeze and Cherry, 1979]*.
Selon les climats, cette recharge naturelle via les précipitations est spatialement hétérogène (environ 30 à 50 % des précipitations sous climat tempéré humide, 10 à 20 % des précipitations sous climat Méditerranéen et aux alentours de 0 à 2 % des précipitations sous climat aride *[Bouwer, 2002]*) et variable d'une année sur l'autre.
Cette recharge est inégalement répartie alors que les besoins en eau sont en constante augmentation du fait de l'évolution démographique, et entraînent une sollicitation croissante des réserves en eaux souterraines.

Des solutions de stockage de la ressource en eau ont été apportées, dans un premier temps sous forme de barrages. Ce stockage d'eau superficielle présente de nombreux inconvénients tels que l'évaporation, l'accumulation de sédiments, le coût de construction et l'impact environnemental et sociologique *[Devine, 1995 ; Pearce, 1992]*.

Dans le but de « sécuriser l'approvisionnement en eau, de lutter contre les effets du changement climatique et plus généralement contribuer à l'amélioration de l'état quantitatif des masses d'eau souterraines » *[Casanova et al., 2013]*, le concept de recharge artificielle des nappes s'est fortement développé dans le temps.
La recharge artificielle des nappes correspond à « l'augmentation de la quantité d'eau bénéficiant aux réservoirs d'eau souterraine via des dispositifs artificiels » *[Todd, 1961]*. Déjà à l'époque romaine, en Tunisie, ce procédé était mis en place en collectant les eaux de ruissellement pour l'irrigation des terres agricoles *[Bize, 1975]*. L'investissement financier lors de la mise en place d'un système de recharge artificielle n'étant pas négligeable *[Khan et al., 2008]*, la méthode s'est principalement développée au cours des quatre dernières décennies dans les pays développés (Etats-Unis, et maintenant en Europe) *[Levantesi et al., 2010]*.

Le principal objectif de la réalimentation artificielle est de soutenir un niveau de nappe pour répondre aux besoins en eau de la population *[Pyne, 1995]*. D'autres objectifs peuvent également être cités : la réduction de l'intrusion d'eau salée dans les aquifères proches des littoraux par inversion des sens d'écoulements naturels *[Abu-Taleb, 2003* ; *Misut and Voss, 2007]*, l'amélioration de la qualité de l'eau par dilution et filtration dans le sol, le stockage d'eau dans le sous-sol par injection forcée, l'utilisation des nappes comme moyen de transport de l'eau *[Bouwer, 2002]*.
La recharge artificielle peut être non-intentionnelle, non-gérée (exemples : la déforestation qui favorise l'infiltration d'eau, les fuites de réseaux de distribution, surplus d'eau d'irrigation …), ou contrôlée, par exemple dans le cas de la recharge par infiltration des eaux de ruissellement urbain *[Dillon et al., 2009]*.

Dans ce chapitre, seule la recharge artificielle contrôlée (MAR) sera abordée, puisque cette méthode est mise en place sur le site d'étude de Crépieux-Charmy (recharge artificielle de la nappe par des bassins d'infiltration).

### IV.1.2. Les différents types de Recharge Artificielle Contrôlée

La recharge artificielle contrôlée, ou MAR, utilise en général de l'eau en provenance du réseau hydrographique ou de la récupération des eaux pluviales. L'eau utilisée peut également être de l'eau usée traitée : actuellement ce processus est interdit en France *[Miquel, 2003]*, mais il est très largement utilisé dans les régions où les climats arides sévissent et pour lesquelles les périodes d'étiage sont très fréquentes *[Casanova et al., 2013]*.

L'emplacement et le type de MAR sont définis selon le contexte hydrogéologique, hydrologique, topographique et l'occupation des sols de la zone concernée *[Dillon, 2005]*.

Les MAR peuvent être classées en trois principales catégories (Figure 44), qui reposent sur les techniques de recharge mises en œuvre *[Casanova et al., 2016 ; Sprenger et al., 2017 ; Dillon, 2005]* :

- ✓ **La recharge par infiltration**

La méthode consiste à faciliter l'infiltration d'eau superficielle vers la nappe, en général par le biais de bassins d'infiltration (Figure 44). Ce système permet de recharger la nappe tout en améliorant la qualité de l'eau infiltrée par filtration naturelle dans la zone non saturée située au droit du bassin d'infiltration.

Bien que l'objectif principal de ce type de MAR soit le soutien de la nappe, il n'est pas rare qu'il soit utilisé pour créer une barrière hydraulique.

Les caractéristiques des bassins sont adaptées selon les objectifs de la recharge artificielle. Par exemple, la vitesse d'infiltration pourra être de l'ordre de plusieurs mètres par jour si l'objectif de la recharge est purement quantitatif, alors qu'elle sera fortement réduite (jusqu'à 0,5 $m.j^{-1}$) pour permettre un temps de filtration plus long au travers de la zone non saturée si l'objectif principal est d'améliorer la qualité de l'eau de nappe. De la même manière, la superficie du bassin sera définie selon les besoins de recharge, et la technique de filtration en fond de bassin pourra être adaptée selon la qualité de l'eau introduite.

La technique de recharge par infiltration présente un avantage majeur, à savoir l'investissement financier peu onéreux. Un inconvénient majeur survient quant à la garantie d'un bon fonctionnement sur le long terme : les vitesses d'infiltrations dépendent de la température des eaux infiltrées (plus l'eau est froide, plus l'infiltration est ralentie du fait de l'augmentation viscosité de l'eau) et du colmatage du fond de la surface d'infiltration (qui implique une réduction des vitesses d'infiltration au cours du temps).

- ✓ **La recharge par injection directe**

Cette technique de recharge artificielle des nappes est la plus souvent utilisée à travers le monde *[Casanova et al., 2016]*. Les deux objectifs principaux sont la recharge des aquifères captifs ou semi-captifs, ainsi que la création d'une barrière hydraulique.

Deux variantes de recharge par injection existent (Figure 44) :

- **ASR** (Aquifer Storage and Recovery). Dans ce cas, l'eau est injectée dans un puits, et pompée dans le même puits en période de forte demande en eau.
- **ASTR** (Aquifer Storage Transfer and Recovery). Dans ce cas, une étape de filtration de l'eau est ajoutée comparé au système ASR : l'eau est injectée dans un puits, transite au travers de l'aquifère, et est pompée dans un deuxième puits. Cette technique est notamment mise en œuvre pour la production d'eau potable puisque le transit dans l'aquifère permet d'ajouter une étape de filtration naturelle.

- ✓ **La recharge par filtration**

Le principe de cette méthode repose sur l'accentuation des échanges de la nappe avec les cours d'eau ou les retenues d'eaux superficielles en mettant en place des pompages proches des berges (Figure 44). Le pompage, qui créer un cône de rabattement, augmente la différence de charge hydraulique entre le cours d'eau et la nappe. Ceci permet une augmentation des vitesses d'écoulement depuis les eaux de surface vers la nappe. L'eau superficielle est filtrée dans le sol au cours de son déplacement en direction de l'ouvrage de

pompage. En général ce type de MAR est mise en œuvre lorsque le sol est constitué de dépôts alluvionnaires, qui permettent une filtration de l'eau et des vitesses d'écoulements rapides.

Cette méthode présente un inconvénient non négligeable à savoir le colmatage des berges : les particules fines en suspension présentes dans les eaux de surface colmatent la porosité des dépôts alluvionnaires au cours du temps, ce qui a tendance à réduire les échanges naturels qui ont lieu entre les eaux de surface et la nappe. Il est donc nécessaire de limiter les débits de pompage pour minimiser le colmatage des berges.

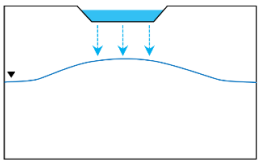
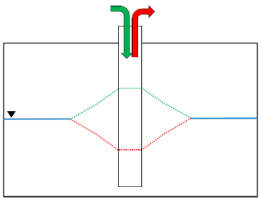
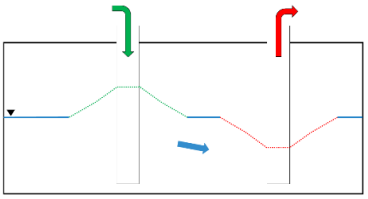
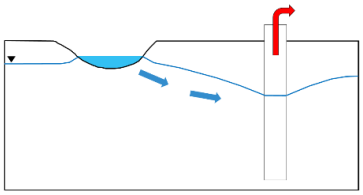
| CATÉGORIES PRINCIPALES DE RECHARGE ARTIFICIELLE DES NAPPES | | |
|---|---|---|
| **Par infiltration** | **Par injection** | **Par filtration** |
|  <br>*Exemple : Bassin d'infiltration* | **ASR** : **A**quifer **S**torage and **R**ecovery<br>  <br>**ASTR** : **A**quifer **S**torage **T**ransfer and **R**ecovery<br>  |  <br>*Exemple : Filtration par les berges d'un cours d'eau* |

*Figure 44 : Schéma de fonctionnement des trois principales catégories de recharge artificielle des nappes [Modifiée d'après Dillon, 2005]*

### IV.1.3. La Recharge Artificielle Contrôlée dans le monde et en France

#### *IV.1.3.1. A l'échelle mondiale*

Depuis 2015, un inventaire des MAR au niveau mondial est réalisé par l'IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center). Il s'agit d'une association de chercheurs de plusieurs institutions européennes, qui ont recueilli, analysé et compilé plus de 1200 études de cas de recharge artificielle managée de 62 pays d'Europe, d'Asie, d'Afrique, d'Amérique du Nord et du Sud et en Océanie *[Stefan and Ansems, 2017]*.

Le but de cet inventaire est, par la mise à jour tous les 3 ans de la plateforme Web (marportal.un-igrac.org), d'accroître les connaissances sur les MAR : ajout de sites, dates de mises en service, volumes mis en jeu lors de la recharge, source d'alimentation du MAR, type d'aquifère concerné, utilisation finale de l'eau produite sur les sites d'exploitation, etc...

Cette base de données est à l'heure actuelle loin d'être exhaustive. L'inventaire repose principalement sur une recherche bibliographique, or tous les sites de MAR ne font pas l'objet de rédaction d'articles.

Ce travail d'inventaire permet cependant une première analyse de la recharge artificielle contrôlée à l'échelle mondiale, par continent. Il en ressort notamment que l'utilisation finale de l'eau des sites de MAR est différente selon les continents (Figure 45). Les usages peuvent

être divisés en quatre catégories : l'usage agricole, l'usage domestique (alimentation en eau potable), l'usage écologique et enfin l'usage industriel.

La Figure 45 illustre la répartition de ces usages de l'eau par continent :

- ✓ L'usage agricole est le principal usage de l'eau issue des MAR en Amérique du Sud et en Asie (à hauteur de 59 et 53 % respectivement).
- ✓ L'Europe est le continent qui compte l'usage domestique le plus élevé : 87 % de l'eau issue des sites de MAR est utilisée comme eau potable. Cet usage domestique est également majoritaire en Australie, en Amérique du Nord et en Afrique (respectivement 59 %, 56 % et 71 %).
- ✓ Sur l'ensemble des continents, l'eau issue des sites de MAR est peu utilisée pour les usages écologiques et industriels (moins de 25 %).

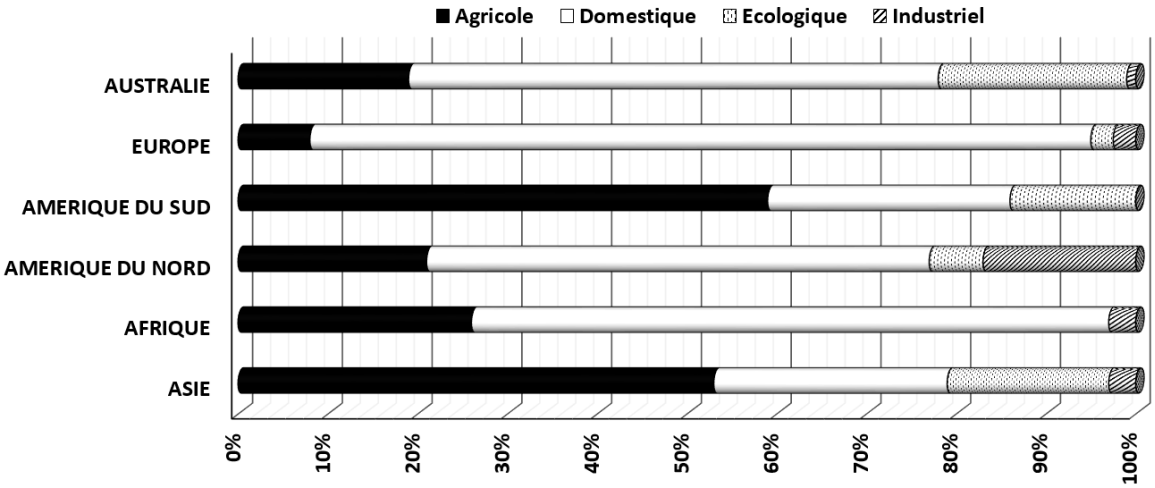


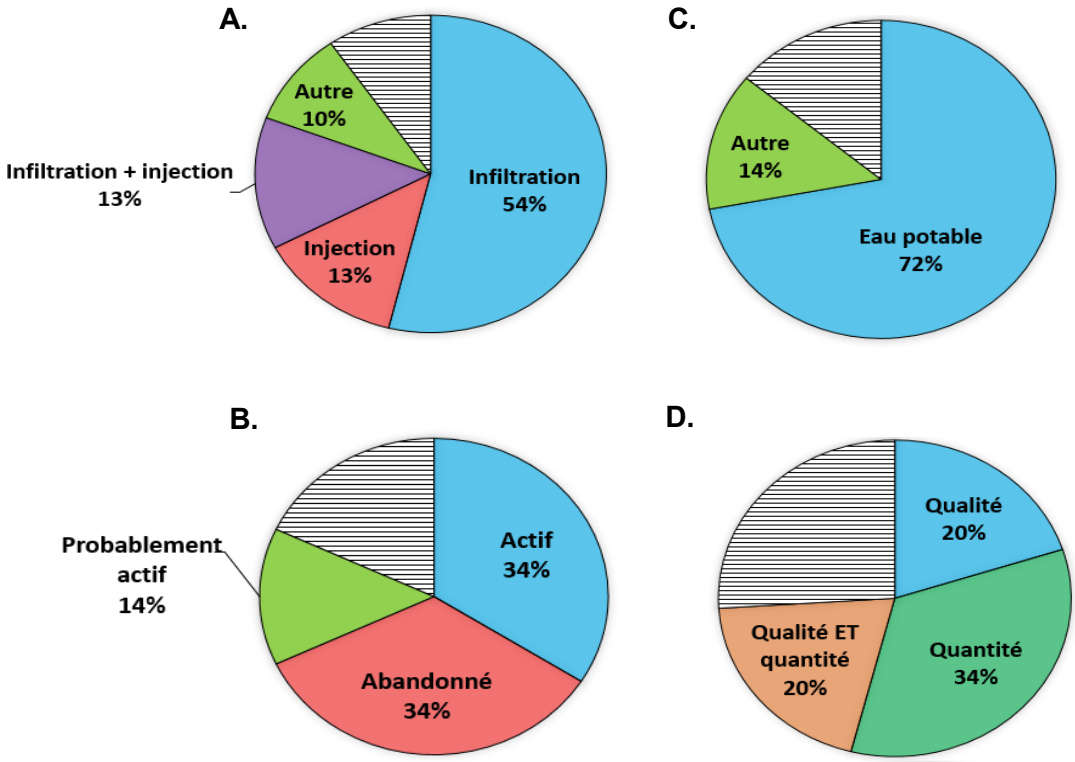

*Figure 45 : Utilisation finale de l'eau extraite des sites de MAR par continent [Modifiée d'après Stefan and Ansems, 2017]*

### *IV.1.3.2. En France*

La France est au 3ème rang des pays européens en termes de nombre de sites de recharge artificielle, après l'Allemagne et les Pays-Bas *[Sprenger et al., 2017]*. Un rapport sur l'état actuel de la recharge artificielle des nappes en France a été rédigé récemment *[Casanova et al., 2013, 2016]*. Ce rapport met en évidence le nombre de sites de réalimentation artificielle existants en France, le type de MAR mis en œuvre, s'ils sont actifs ou non, les enjeux de réalimentation de chaque site, et enfin l'usage de l'eau produite sur ces sites de réalimentation. Le manque de données impacte les statistiques.

Néanmoins, cette étude permet de montrer que (Figure 46) :

- ✓ La recharge artificielle des nappes est un procédé utilisé en France, de manière non négligeable (plus de 78 sites répertoriés sur le territoire français).
- ✓ Plus de la moitié des MAR en France correspondent à une recharge par infiltration.
- ✓ 34% des sites sont abandonnés.
- ✓ La majorité des sites ont pour objectif premier la réalimentation quantitative de la nappe. Le deuxième objectif étant une amélioration qualitative de la ressource (notamment par dilution des nitrates et/ou pesticides).
- ✓ L'eau produite dans 72 % des sites répertoriés est destinée à la production d'eau potable d'après l'inventaire réalisé.




A. Selon les catégories de MAR mises en œuvre,
*B. Selon le statut actuel (actif ou non),*
*C. Selon l'usage de la production d'eau,*
*D. Selon l'objectif premier du MAR.*

*Figure 46 : Répartition des MAR en France [Modifiée d'après Casanova et al., 2016]*

## IV.2. Les bassins d'infiltration de Crépieux-Charmy

### IV.2.1. Localisation, conception et gestion des bassins d'infiltration

#### *IV.2.1.1. Historique et localisation des bassins*

En 1978, un lâcher de barrage sur le Rhône, à l'amont de Lyon, a provoqué un colmatage avancé du Vieux-Rhône par des particules fines limitant ainsi les échanges nappe-rivière. Des travaux de décolmatage des berges du Vieux-Rhône et l'aménagement d'une ancienne lône (ancien bras du Rhône) ont alors été réalisés. Ces travaux ont permis une remontée du niveau de nappe significative *[Barthélémy, 1979]*. La lône ainsi aménagée a servi de bassin de réalimentation (aujourd'hui appelé bassin d'infiltration n°1-1 et dont la localisation est illustrée sur la Figure 47).

C'est à partir de ce moment que des études de faisabilité pour la création de nouveaux bassins d'infiltration sur la zone de captage ont été menées, par le bureau d'étude BURGEAP, dans le but de créer une barrière hydraulique *[BURGEAP, 1989 ; BURGEAP, 1990]*.

Suite aux conclusions apportées par ces études, 11 bassins d'infiltration ont vu le jour entre 1989 et 2008, sur les îles de Crépieux et Charmy comme illustré sur la Figure 47. Ces 12 bassins sont répartis par doublet. Leurs caractéristiques détaillées sont présentées dans le Tableau 10.

La superficie totale des 12 bassins représente plus de 145 000 $m^2$ pour un débit infiltré maximal autorisé de 390 000 $m^3.j^{-1}$ *[arrêtés préfectoraux des 05/11/1992 et 10/10/2003]*.

L'eau d'alimentation des bassins provient de 3 pré-bassins (Figure 47), eux même en connexion directe avec le Vieux-Rhône. Ces pré-bassins constituent une première étape de filtration des particules grossières (par décantation) contenues dans les eaux du Rhône avant d'être pompées pour alimenter les différents bassins d'infiltration.

Le pré-bassin n°1 alimente les bassins 1-1 à 4-1, le pré-bassin n°2 alimente les bassins 5-1 et 5-2 alors que le pré-bassin n°3 alimente les bassins 6-1 et 6-2.

Chaque doublet de bassins est doté d'un piézomètre de référence, qui assure le suivi en continu du niveau piézométrique au droit des ouvrages de recharge de la nappe (Tableau 10). En général, le piézomètre de suivi est situé sur la digue de séparation de chaque doublet de bassins (sauf cas particulier des couples de bassins 1 et 2), comme illustré sur la Figure 47.

| Bassin d'infiltration | Date de création | Superficie ($m^2$) | Piézomètre de référence | Altitude du radier (mIGN69) | Débit infiltré autorisé ($m^3/j$) | Alimentation |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ***1-1*** | 1978 | 8 874 | M16 | 165,75 | 45 000 | Pré-bassin n°1 |
| ***1-2*** | 1993 | 13 197 | S11 | 167,25 | | |
| ***2-1*** | 1993 | 6 059 | S02 | 166,50 | 34 500 | Pré-bassin n°1 |
| ***2-2*** | 1993 | 6 007 | | | | |
| ***3-1*** | 1989 | 11 216 | B01 | 166,46 | 40 000 | Pré-bassin n°1 |
| ***3-2*** | 1989 | 11 171 | | | | |
| ***4-1*** | 1993 | 8 763 | B07 | 167,80 | 50 000 | Pré-bassin n°1 |
| ***4-2*** | 1993 | 8 473 | | | | |
| ***5-1*** | 2008 | 12 339 | B10 | 168,65 | 220 230 | Pré-bassin n°2 |
| ***5-2*** | 2008 | 19 980 | | 169,35 | | |
| ***6-1*** | 2006 | 19 576 | 62LT2 | 167,70 | | Pré-bassin n°3 |
| ***6-2*** | 2006 | 20 758 | | | | |

*Tableau 10 : Caractéristiques générales et entretien des bassins d'infiltration du champ captant de Crépieux-Charmy*

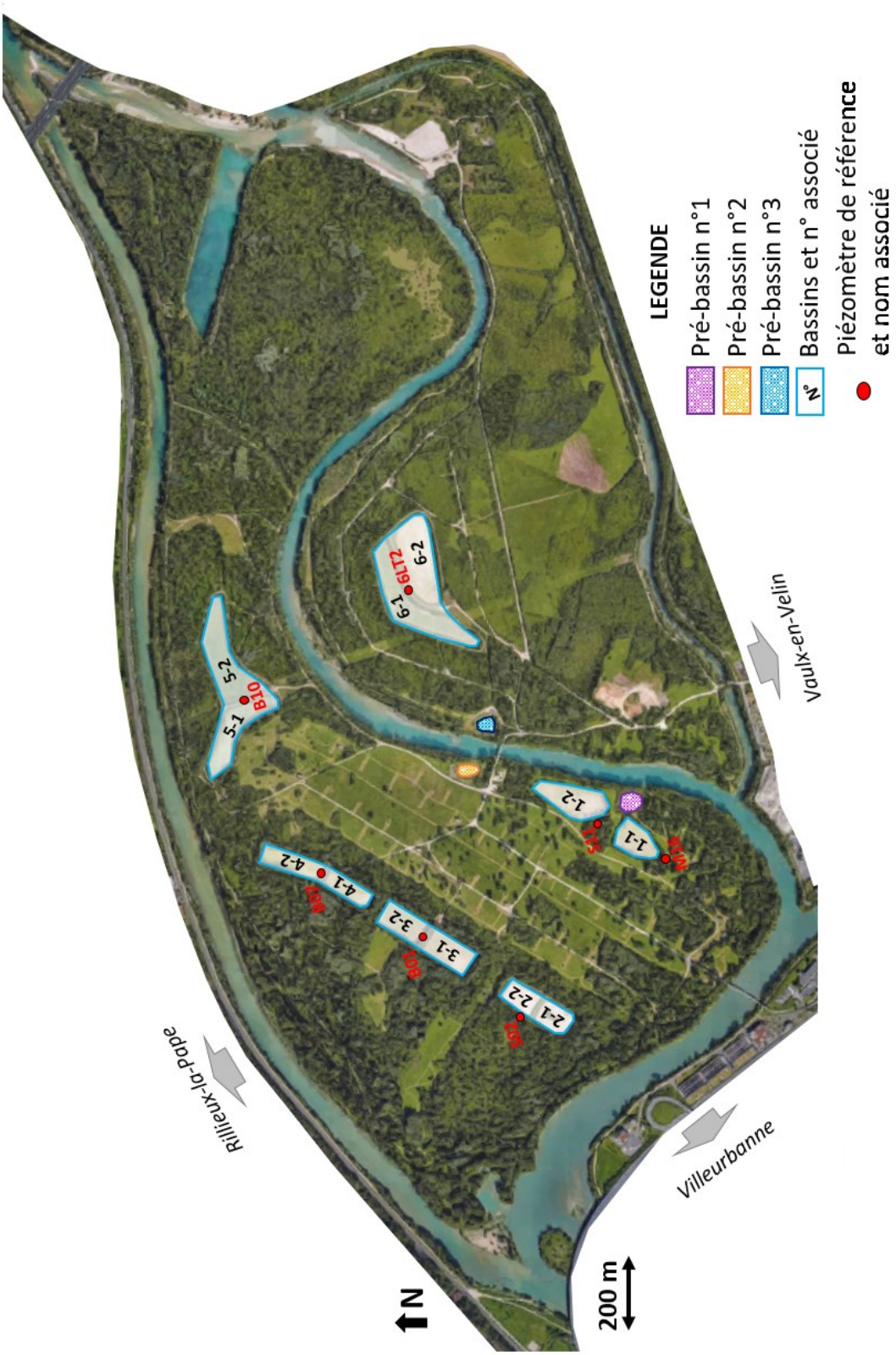



*Figure 47 : Localisation des pré-bassins, des bassins d'infiltration et de leurs piézomètres de référence, sur le champ captant de Crépieux-Charmy*

#### *IV.2.1.2. Conception des bassins*

Les bassins d'infiltration du site d'étude sont des excavations creusées artificiellement dans les alluvions modernes du Rhône. Les bords de bassins sont surélevés via des digues d'environ 2 m de haut pour limiter les risques d'inondation en cas de crue décennale. Ces digues permettent un remplissage des bassins jusqu'à 1,8 m de hauteur d'eau.

Le fond de chaque bassin est recouvert d'une couche de sable de filtration de 30 cm minimum. Les caractéristiques de ces sables sont issues des recommandations du BURGEAP *[*BURGEAP, 1997*]*. La couche de sable a pour objectif de filtrer les particules en suspension de l'eau injectée dans les bassins avant qu'elle ne s'infiltre dans le sol.

Les études précédentes *[Loizeau, 2013]* ainsi que les expérimentations détaillées dans la Section IV.3.1 permettent de mettre en évidence une couche compactée située en dessous de la couche de sable, d'une épaisseur de 50 cm environ. Cette couche compactée, formée lors de la création des bassins par compactage mécanique lors des passages des engins de terrassement, a la particularité de limiter les vitesses d'infiltration (le compactage mécanique réduit la conductivité hydraulique). Les études BURGEAP recommandent des vitesses d'infiltration de l'ordre de 2 $m.j^{-1}$, ce qui correspond aux conductivités hydrauliques généralement associées aux terrains sableux *[Bouwer, 2002].*

En dessous de cette couche compactée, nous retrouvons les alluvions modernes du Rhône, d'une épaisseur de l'ordre de 10 à 25 m selon les endroits. Déposés au fil du temps par le Rhône, ces alluvions présentent une hétérogénéité non négligeable (dépôts de galets plus ou moins grossiers, couches plus fines contenant des argiles, …) comme expliqué dans les études précédentes *[Loizeau, 2013]* et mis en évidence au travers des coupes lithologiques des différents ouvrages du site d'étude ou des fosses pédologiques réalisées dans certains bassins au cours de ces travaux de thèse (Sections III.2 et IV.3.1).

La Figure 48 illustre une coupe schématique type d'un bassin d'infiltration sur le site de captage de la Métropole de Lyon et de son influence en termes de niveau piézométrique lors du fonctionnement du bassin.

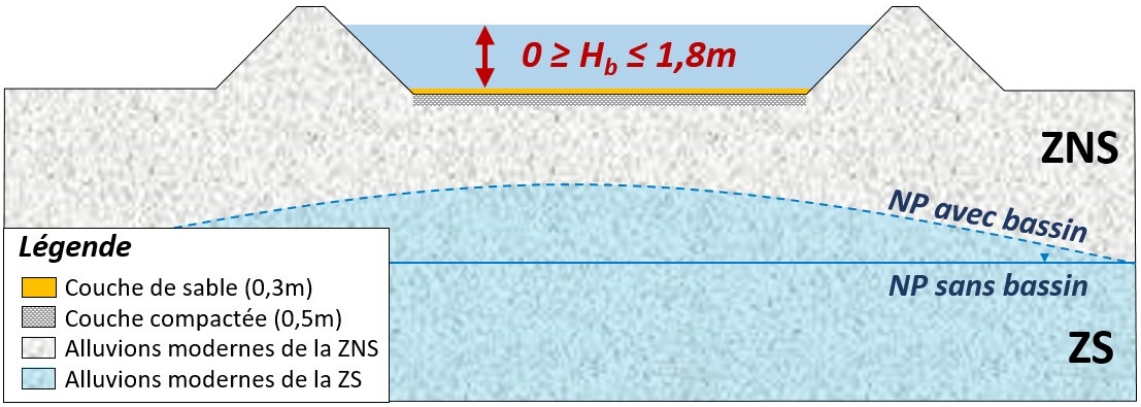



*Figure 48 : Coupe schématique d'un bassin d'infiltration*
*ZNS : Zone Non Saturée ; ZS : Zone Saturée ; NP : Niveau Piézométrique ; Hb : Hauteur d'eau dans le bassin*

#### *IV.2.1.3. Gestion et suivi des bassins*

Un certain nombre de données sont enregistrées en temps réel pour le suivi des bassins d'infiltration. Chaque bassin est équipé d'une sonde de mesure de hauteur d'eau du bassin et de température des eaux de surface. Les sondes sont positionnées dans un « tranquilisateur » proche de la tulipe de remplissage des bassins. La hauteur d'eau dans les bassins ($H_b$) peut varier de 0 à 1,8 m.
Par ailleurs, une mesure du débit introduit dans chaque bassin est réalisée, soit par un débitmètre, soit par un étalonnage de la hauteur de la lame d'eau se déversant au niveau de la tulipe de remplissage des bassins.

La règlementation impose la conservation d'une zone non saturée (ZNS) au droit des bassins de 1 m. Le rôle de cette zone non saturée est de finaliser l'étape de filtration de l'eau avant qu'elle n'atteigne la nappe et de permettre une épuration aérobie encore assez mal connue.

Sur le site du champ captant de Crépieux-Charmy, il a été décidé de conserver une ZNS de 2 m. Pour ce faire, chaque bassin est équipé d'un piézomètre de référence (Tableau 10). Lorsque le niveau de nappe atteint la côte piézométrique correspondant aux 2 m d'épaisseur de ZNS, l'alimentation du bassin concerné est stoppée. La remise en eau du bassin ne peut se faire que lorsque la relaxation du dôme hydraulique a permis une baisse d'un mètre (soit une épaisseur de ZNS de 3 m).

Lorsque les vitesses d'infiltration sont fortement atténuées, notamment à cause du colmatage biologique de la couche de sable de fond de bassin, des opérations d'entretien sont réalisées. Ces opérations correspondent aux chantiers de renouvellement de sable, au hersage du fond de bassin ou à l'arrachage des végétaux. Toutes les opérations d'entretien menées depuis 2010 sont répertoriées dans le Tableau 11.

| Bassin d'infiltration | Entretien du fond de bassin depuis 2010 | | |
|---|---|---|---|
| | Changement du sable de fond de bassin | Hersage du sable de fond de bassin | Arrachage des végétaux présents |
| ***1-1*** | - | 03/2011 | 09/2010<br>10/2013<br>09/2016 |
| ***1-2*** | 11/2015 | 03/2011 | 10/2013 |
| ***2-1*** | 09/2014 | 03/2011 | 10/2013 |
| ***2-2*** | 09/2014 | 03/2011 | 10/2013 |
| ***3-1*** | 09/2016 | 03/2011 | 09/2013 |
| ***3-2*** | 04/2012<br>09/2017 | 03/2011<br>09/2016 | - |
| ***4-1*** | 11/2015 | 03/2011 | - |
| ***4-2*** | 09/2016 | 03/2011 | - |
| ***5-1*** | 04/2012 | - | - |
| ***5-2*** | - | - | 10/2013 |
| ***6-1*** | 09/2017 | 04/2010 | 10/2013 |
| ***6-2*** | 01/2013 | - | - |

*Tableau 11 : Historique des opérations d'entretien des fonds de bassins d'infiltration depuis 2010*

### IV.2.2. Le double rôle des bassins d'infiltration sur le site d'étude

La création de bassins d'infiltration sur le site du champ captant de la Métropole de Lyon a pour but premier d'assurer la protection de la ressource souterraine d'un point de vue qualitatif en cas de contamination des eaux du Rhône par inversion des sens d'écoulement.

Du fait de la diminution du niveau de nappe parfois important, notamment expliquée par l'évolution des conditions climatiques (qui entrainent une diminution des crues dans les cours d'eau), les bassins d'infiltration jouent un second rôle : la protection quantitative par soutien du niveau de nappe.

#### *IV.2.2.1. La protection qualitative de la ressource souterraine*

La mise en eau des bassins d'infiltration permet de créer un dôme hydraulique au droit de ces ouvrages. Ceci signifie que le toit de la nappe est localement plus haut qu'il ne le serait sans réalimentation artificielle (Figure 49). Naturellement, l'eau des cours d'eau alimente la nappe, qui elle-même s'écoule vers la zone de pompage. L'objectif de la barrière hydraulique est d'inverser localement les sens d'écoulement, et ainsi d'éviter que la potentielle contamination provenant des cours d'eau ne puisse s'écouler vers la zone de pompage.

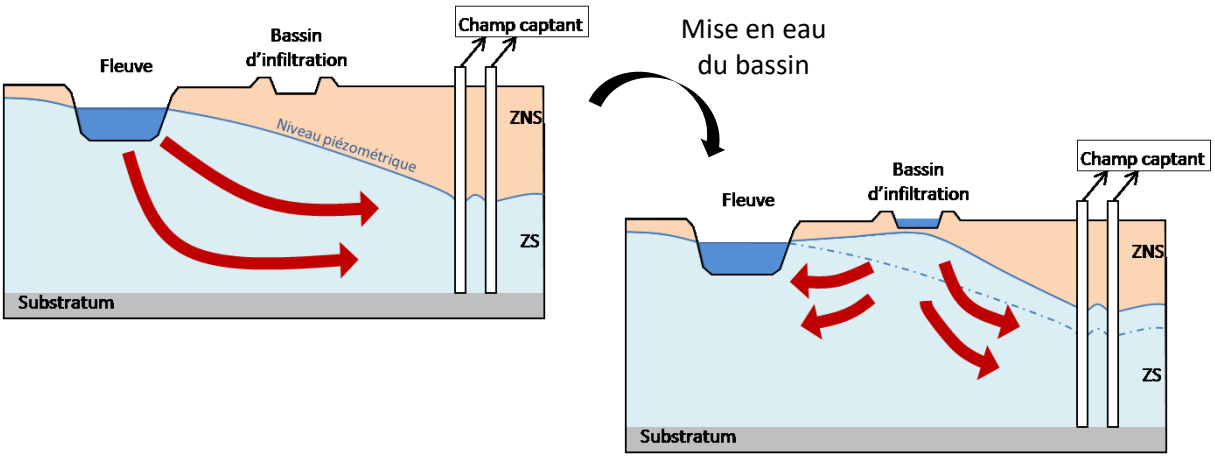



*Figure 49 : Schéma de fonctionnement de la barrière hydraulique créée par les bassins d'infiltration*

La localisation des bassins d'infiltration est primordiale pour que la barrière hydraulique soit efficace. Par ailleurs, la mise en eau des bassins doit être réalisée de manière continue pour que le dôme hydraulique soit actif à tout moment.
L'eau introduite dans les bassins provient du Rhône. Si une contamination est présente dans ces eaux de surface, l'alimentation des bassins d'infiltration est arrêtée (pour ne pas que la contamination se retrouve dans les bassins). La barrière hydraulique reste donc active le temps de la relaxation du dôme hydraulique. En cas de contamination de longue durée, les pompages du champ captant ne sont plus actifs pour limiter l'infiltration des eaux de surface vers la prairie de captage.

#### *IV.2.2.2. La protection quantitative de la ressource souterraine*

Du fait des volumes prélevés non-négligeables sur le champ captant et de la diminution des niveaux d'eau dans les cours d'eau, les bassins d'infiltration jouent de plus en plus un rôle de soutien de la nappe. L'ensemble des 12 bassins permet en moyenne un débit d'infiltration de l'ordre de 100 000 $m^3.j^{-1}$. Ce volume correspond à 50 % du volume pompé moyen sur l'ensemble du site.

En cas de non-réalimentation par les bassins pendant une durée plus ou moins longue, les niveaux de nappe diminuent rapidement et de manière significative, en fonction du débit du Rhône. Si la nappe est haute (donc si le débit du Rhône est élevé), les bassins d'infiltration n'ont pas besoin d'être en fonctionnement.

Par exemple, en fin d'année 2015 (Figure 50), deux périodes assez longues de non-fonctionnement de l'ensemble des bassins ont eu lieu : 9 jours d'assec en septembre 2015 et 4 jours d'assec en octobre 2015. Le niveau piézométrique moyen journalier issu de l'ouvrage M12, situé au centre de la prairie de captage, enregistre une diminution de 2,4 m lors de la période d'assèchement du mois de septembre et 1,8 m lors de la période d'assèchement du mois d'octobre. Il est à noter que le débit dans le Rhône était assez faible et stable sur ces deux périodes (de l'ordre de 300 $m^3.s^{-1}$).

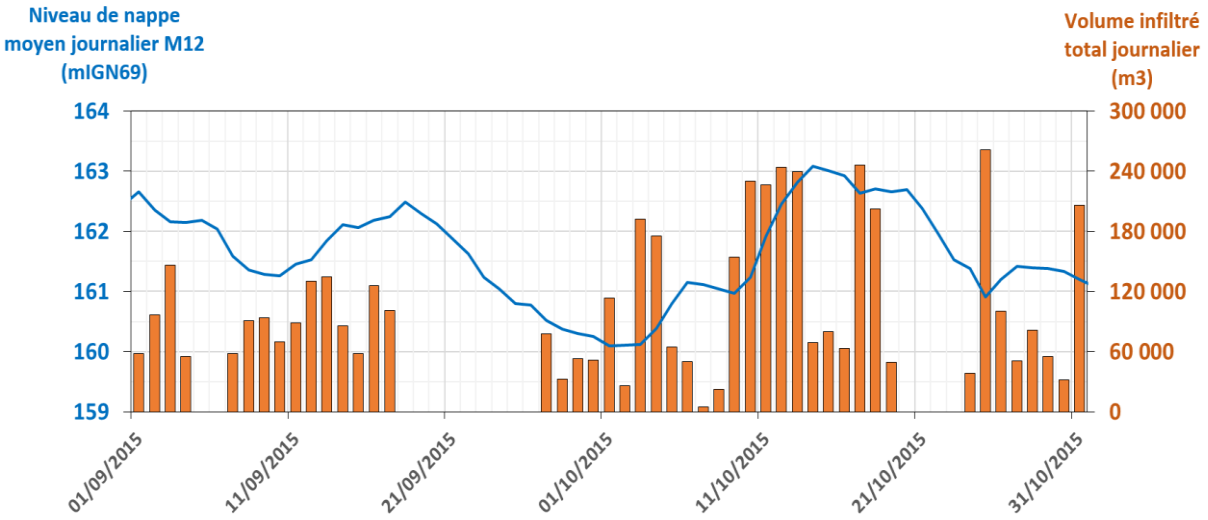



*Figure 50 : Evolution du niveau piézométrique de l'ouvrage M12 et du volume infiltré journalier sur l'ensemble des bassins entre le 01/09/2015 et le 31/10/2015*

### IV.2.3. L'exploitation des bassins en quelques chiffres

#### *IV.2.3.1. Les causes de non-fonctionnement des bassins d'infiltration*

Pour garantir l'efficacité de la barrière hydraulique à tout instant, la théorie voudrait que les bassins d'infiltration soient en eau de manière continue dans le temps. Or, l'eau introduite dans ces bassins provient des eaux de surface, dont la qualité peut varier. En cas de contamination des eaux de surface, l'alimentation des bassins d'infiltration est stoppée et la barrière hydraulique reste active le temps de la relaxation du dôme hydraulique. Ceci explique qu'il est nécessaire que les bassins soient en eau le plus souvent possible, pour que la barrière hydraulique soit déjà active en cas d'arrivée de contamination dans le Rhône.

Malgré cette nécessité de mise en eau des bassins le plus souvent possible, l'alimentation ne peut pas toujours être maintenue. Les causes de l'arrêt des bassins sont réparties en trois grandes catégories (détaillées en Annexe 7) :

- ✓ Les **arrêts contraints** (turbidité élevée dans les eaux superficielles, ZNS inférieure à 2 m d'épaisseur, prolifération de moustiques et chantiers d'entretien des bassins),
- ✓ Les **arrêts subits** (station d'alerte hors service, pollution dans les eaux de surface ou défaut d'instrumentation),
- ✓ Les **arrêts pour cause expérimentale**.

Du fait de ces différentes causes possibles de l'arrêt des bassins, il est difficile de pouvoir garantir le maintien des bassins en eau sur des longues périodes. En 2016 et 2017 (Annexe 7), en moyenne, chaque bassin est en fonctionnement moins de 70 % du temps.

### *IV.2.3.2. Evolution des débits infiltrés entre avril 2014 et décembre 2017*

Le débit infiltré moyen journalier ($\overline{QI}$) entre avril 2014 et décembre 2017 est de **101 275 m³.j⁻¹**. Calculé de la même manière, le débit exhauré (ou pompé) moyen journalier ($\overline{QE}$) est de **218 515 m³.j⁻¹**.

La Figure 51 illustre l'évolution mensuelle des débits journaliers moyens mensuels infiltrés et exhaurés ($Q_{Inf}$ et $Q_{Exh}$) entre 2014 et 2017. Ces données montrent que, contrairement aux débits exhaurés qui sont plutôt stables au cours de l'année (de +19 à -24 % par rapport à $\overline{QE}$), les quantités d'eau infiltrées peuvent fortement varier au cours du temps (de +73 à -94 % par rapport à $\overline{QI}$).

Ceci est expliqué par le fait que la demande en eau est quasi-équivalente tout au long de l'année alors que la recharge par les bassins évolue selon divers critères : les conditions climatiques (évolution des vitesses d'infiltration selon la température de l'eau d'infiltration), l'état de colmatage des fonds de bassin (plus un bassin est colmaté, moins les vitesses d'infiltration seront importantes), selon les conditions d'exploitation des bassins (différentes causes de non-fonctionnement limitent les quantités d'eau infiltrées).

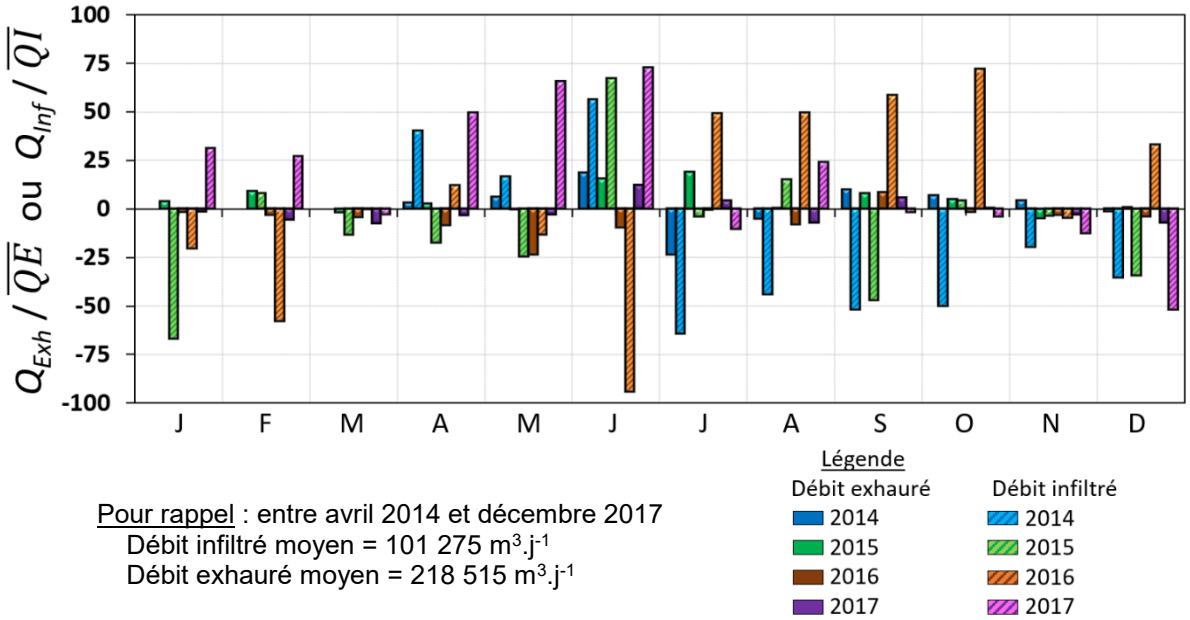



*Figure 51 : Evolution des débits moyens journaliers mensuels exhaurés et infiltrés, par rapport aux débits moyens calculés sur la période avril 2014 – décembre 2017*

**<u>Comparaison des volumes infiltrés et exhaurés</u> : $V_{inf}$ / $V_{exh}$**

Le volume infiltré mensuel représente en moyenne 46 % du volume exhauré mensuel sur l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon (Figure 52). Ce rapport de volumes évolue fortement au cours du temps.

Les pourcentages extrêmes enregistrés (81 % en octobre 2016, et 3 % en juin 2016) sont liés à un évènement particulier : le lâcher de barrages du Rhône. Du fait de l'augmentation de la turbidité dans les eaux superficielles pendant cet épisode, le fonctionnement des bassins a été stoppé en juin. Par la suite, une période d'alimentation intense (de juillet à octobre 2016) a eu lieu pour faire remonter le niveau de nappe du site de captage.

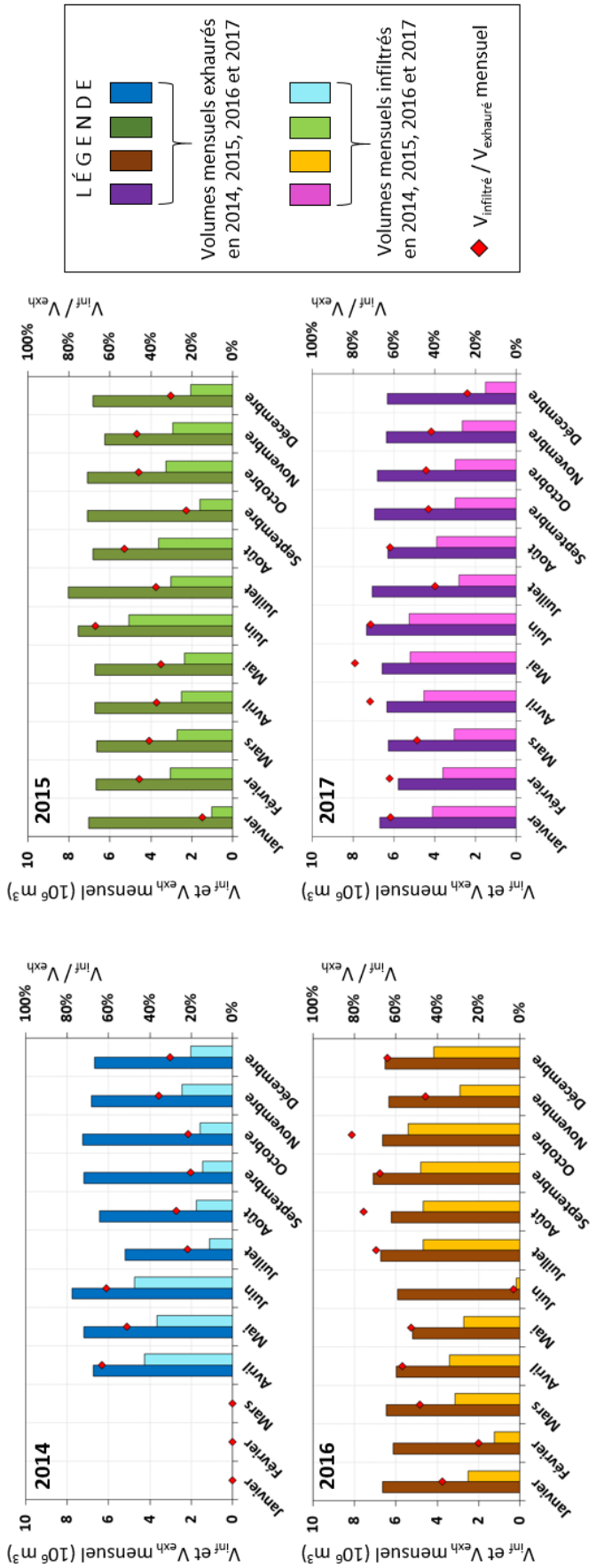



*Figure 52 : Evolution des volumes infiltrés et exhaurés mensuels sur la période avril 2014 – décembre 2017*

Si l'analyse des données est réalisée sur une échelle temporelle réduite (données journalières plutôt que mensuelles), alors une certaine évolution du rapport $V_{inf}$ / $V_{exh}$ est également remarquée.

**Exemple du mois de juillet 2016** (Figure 53) : $V_{inf}$ / $V_{exh}$ moyen mensuel = 69,6 %, $V_{inf}$ / $V_{exh}$ journalier varie de 22,8 % le 16 juillet à 128,5 % le 14 juillet.

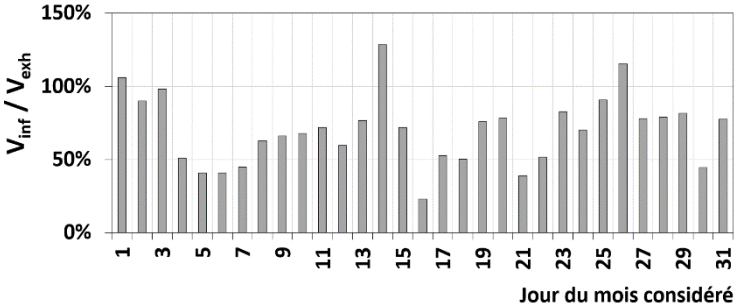



*Figure 53 : Evolution du rapport $V_{inf}$ / $V_{exh}$ journalier au cours du mois de juillet 2016*

Ces données journalières ont été analysées sur la période complète entre avril 2014 et décembre 2017. Il n'est pas rare de rencontrer un volume infiltré journalier supérieur à 50 %, 75 % voire même 100 % du volume exhauré journalier. Le Tableau 12 répertorie la fréquence d'apparition de ces situations, en différenciant les périodes estivales (de début avril à fin septembre) et les périodes hivernales (de début septembre à fin mars).

En moyenne sur la période complète analysée (avril 2014 à décembre 2017), les données montrent que :

- ✓ $V_{inf} \geq V_{exh}$ à hauteur de **5 %** du temps,
- ✓ ¾ $V_{exh} \leq V_{inf} < V_{exh}$ à hauteur de **13 %** du temps,
- ✓ ½ $V_{exh} \leq V_{inf} <$ ¾ $V_{exh}$ à hauteur de **29 %** du temps.

⇒ **Ceci signifie que, près de un jour sur deux (47 % du temps), le volume infiltré est supérieur ou égal à la moitié du volume exhauré !**

Notons également que les fréquences d'apparition des dépassements de seuils de 50, 75 et 100 % apparaissent plus souvent en période estivale qu'en période hivernale. Pendant ces périodes chaudes, l'eau s'infiltre plus vite du fait de la viscosité moins élevée à haute température (Eq. II-7).

Par ailleurs, sur la période analysée, une évolution du rapport $V_{inf}$ / $V_{exh}$ en période estivale est notable. En 2014, 75 jours en été enregistrent un $V_{inf} \geq$ ½ $V_{exh}$, en 2015 ce chiffre passe à 80 jours, en 2016 il est de 116 jours pour atteindre 122 jours en 2017 (Tableau 12).

Si une détérioration de la qualité de l'eau était avérée lorsque l'augmentation de la température de nappe dépasse un seuil, il serait judicieux de parvenir **à limiter les volumes infiltrés en période estivale**, tout en maintenant la barrière hydraulique active.

Pour répondre à cet objectif, une solution serait de restreindre la hauteur d'eau des cycles de remplissage des bassins. Habituellement les cycles de remplissage des bassins oscillent entre deux valeurs seuils : 1,8 et 1,5 m. Limiter cette hauteur d'eau à des cycles compris entre 1,0 et 0,75 m, par exemple, en période estivale, permettrait de diminuer le volume infiltré, et de réduire ainsi l'impact thermique engendré par l'alimentation de la barrière hydraulique.

* **PE** : Période estivale (avril à septembre) ; **PH** : Période hivernale

| | **Période analysée** | $^1/_2\ V_{exh} \leq V_{inf} < {}^3/_4 V_{exh}$ | $^3/_4\ V_{exh} \leq V_{inf} < V_{exh}$ | $V_{inf} \geq V_{exh}$ | $V_{inf} \geq {}^1/_2 V_{exh}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| **2014** | PE (183 j) | 40 jours → 22 % | 23 jours → 12 % | 12 jours → 7 % | 75 jours **→ 41 %** |
| | PH (92 j) | 12 jours → 13 % | 2 jours → 2 % | 0 jour → 0 % | 14 jours → 15 % |
| | Total 275 jours | 52 jours soit 19 % de l'année | 25 jours soit 9 % de l'année | 12 jours soit 4 % de l'année | 89 jours → 32 % de l'année |
| **2015** | PE (183 j) | 61 jours → 33 % | 13 jours → 7 % | 6 jours → 3 % | 80 jours **→ 44 %** |
| | PH (182 j) | 32 jours → 18 % | 13 jours → 7 % | 9 jours → 5 % | 54 jours → 30 % |
| | Total 365 jours | 93 jours soit 26 % de l'année | 26 jours soit 7 % de l'année | 15 jours soit 4 % de l'année | 134 jours → 37 % de l'année |
| **2016** | PE (183 j) | 62 jours → 34 % | 38 jours → 21 % | 16 jours → 9 % | 116 jours **→ 63 %** |
| | PH (183 j) | 62 jours → 34 % | 28 jours → 15 % | 11 jours → 6 % | 101 jours → 55 % |
| | Total 366 jours | 124 jours soit 34 % de l'année | 66 jours soit 18 % de l'année | 27 jours soit 7 % de l'année | 217 jours → 59 % de l'année |
| **2017** | PE (183 j) | 76 jours → 42 % | 40 jours → 22 % | 6 jours → 3 % | 122 jours **→ 67 %** |
| | PH (182 j) | 58 jours → 32 % | 21 jours → 12 % | 4 jours → 2 % | 83 jours → 46 % |
| | Total 365 jours | 134 jours soit 37 % de l'année | 61 jours soit 17 % de l'année | 10 jours soit 3 % de l'année | 205 jours → 56 % de l'année |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **2014** | PE (732 j) | 239 jours → 33 % des PE | 114 jours → 16 % des PE | 40 jours → 5 % des PE | 393 jours → 54 % des PE |
| | PH (639 j) | 164 jours → 26 % des PH | 64 jours → 10 % des PH | 24 jours → 4 % des PH | 252 jours → 39 % des PH |
| **2017** | **Total 1 371 jours** | **403 jours soit 29 % de 2014 à 2017** | **180 jours soit 13 % de 2014 à 2017** | **64 jours soit 5 % de 2014 à 2017** | **645 jours → 47 % de 2014 à 2017** |

*Tableau 12 : Fréquence d'apparition estivale et hivernale des volumes infiltrés journaliers supérieurs à 50, 75 ou 100% des volumes exhaurés sur la période avril 2014 – décembre 2017*

## IV.3. Observations et expérimentations

### IV.3.1. La caractérisation du fond d'un bassin d'infiltration

#### *IV.3.1.1. Objectifs de la caractérisation du fond de bassin*

Les vitesses d'infiltration au droit des bassins dépendent de l'état de colmatage de la couche de sable de fond de bassin mais également de la compaction de la couche sous-jacente *[Loizeau, 2013]*.

D'après l'analyse des données d'exploitation du bassin 2-2 en début d'année 2014, son indice d'infiltrabilité était faible : de l'ordre de 0,4 $m.j^{-1}$ (Section IV.3.4). C'est pourquoi ce bassin a fait l'objet d'un renouvellement de sable au cours de l'hiver 2014.

Profitant de ce chantier, des essais d'infiltration ont été réalisés avant, pendant et après le changement de sable. Le but de ces expérimentations spécifiques est de caractériser le fond de ce bassin d'infiltration, en quantifiant notamment la conductivité hydraulique à saturation de la couche compactée, et en analysant l'impact du changement de sable en termes de gain de vitesse d'infiltration.

La démarche, l'analyse d'une partie du jeu de données ainsi que l'interprétation qui en découle a fait l'objet d'un article scientifique *[Réfloch et al., 2017]*.

Communément, les essais d'infiltration simple anneau sont réalisés à partir d'anneaux de petits diamètres *[White et al., 1992]*. Ces expérimentations ont pour but, en calculant le volume d'eau infiltré au cours du temps, de caractériser les capacités d'infiltration du sol et donc de déterminer la conductivité hydraulique à saturation de la couche de sol.

D'autres méthodes de mesure d'infiltration existent pour déterminer les caractéristiques physiques des sols *[Angulo-Jaramillo et al., 2016 ; Boivin, 1988 ; Touma, 1984]*, telles que les essais d'infiltration double anneau. Ces méthodes diverses ne seront pas détaillées ici puisqu'elles n'ont pas été expérimentées sur le site d'étude.

Pour rappel, le bassin d'infiltration 2-2 est situé dans la partie Est du champ captant (Figure 33). Sa superficie est de 6 007 $m^2$ et son radier est situé à une altitude de 166,5 mIGN69. Le fond de bassin est considéré comme étant composé de trois couches, à savoir :

- ✓ Une **couche de sable de fond de bassin**, colmaté ou non selon son âge de mise en place,
- ✓ Une **couche compactée** située en dessous de la couche de sable, principalement issue du compactage mécanique lors de la création du bassin d'infiltration,
- ✓ Une **couche de dépôts alluvionnaires**, qui présente des hétérogénéités en termes de granulométrie.

Les essais d'infiltration sont menés dans le but de caractériser les deux premières couches de sol en présence (sable de fond de bassin et couche compactée).

La création d'une fosse pédologique à l'emplacement du site n°1 (Tableau 13) ainsi qu'une caractérisation du fond de bassin par géo-radar *[Roux, 2015]* ont permis de mettre en évidence l'hétérogénéité spatiale des dépôts alluvionnaires jusqu'à la surface libre de la nappe (alternance de couches de sable fin, de couches de galets ou de lentilles d'argiles, qui présentent des pendages plus ou moins prononcés).

#### *IV.3.1.2. Matériel et méthode*

Sur le site d'étude, du fait de l'hétérogénéité spatiale et de la gamme de granulométrie rencontrée, un anneau de 1 mètre de diamètre est utilisé pour réaliser les essais d'infiltration simple anneau.

Le protocole mis en œuvre pour la réalisation d'un essai d'infiltration est décrit sur la Figure 54. L'enfoncement de l'anneau dans le sol est limité à environ 0,01 m, pour restreindre les risques d'impact de la paroi de l'anneau sur l'infiltration *[Dusek et al., 2009]*. De la bentonite est ajoutée sur les bords de l'anneau afin de prévenir les risques de fuites au cours de l'expérience.

L'emplacement des essais à réaliser est défini de manière à ne pas être trop proche des bords du bassin, pour ne pas que l'infiltration soit impactée par les digues du bassin.
Deux sites ont été sélectionnés pour mener les quatre essais d'infiltration, localisés dans le Tableau 13.

Le principe d'un essai d'infiltration (Figure 54) est de maintenir une certaine lame d'eau dans l'anneau et d'observer la lame d'eau infiltrée cumulée ainsi que l'expansion de la tache d'humidité autour de l'anneau au cours de l'expérimentation.

| ***Nom de l'essai*** | ***Date*** | ***Localisation (WGS84)*** | ***Type de sol testé*** |
|---|---|---|---|
| **GA1** | 27/08/2014 | *Site n°1*<br>X : 4°53'18.8830" E Y : 45°47'42.3197" N | SABLE COLMATÉ<br>(avant renouvellement) |
| **GA2** | 23/09/2014 | | COUCHE COMPACTÉE<br>(sans sable) |
| **GA3** | 20/10/2014 | *Site n°2*<br>X : 4°53'18.6515" E Y : 45°47'42.4417" N | |
| **GA4** | 15/04/2015 | | SABLE NON COLMATÉ<br>(après renouvellement) |

*Tableau 13 : Liste des essais d'infiltrations menés dans le bassin d'infiltration 2-2, leur localisation, ainsi que le type de sol testé*

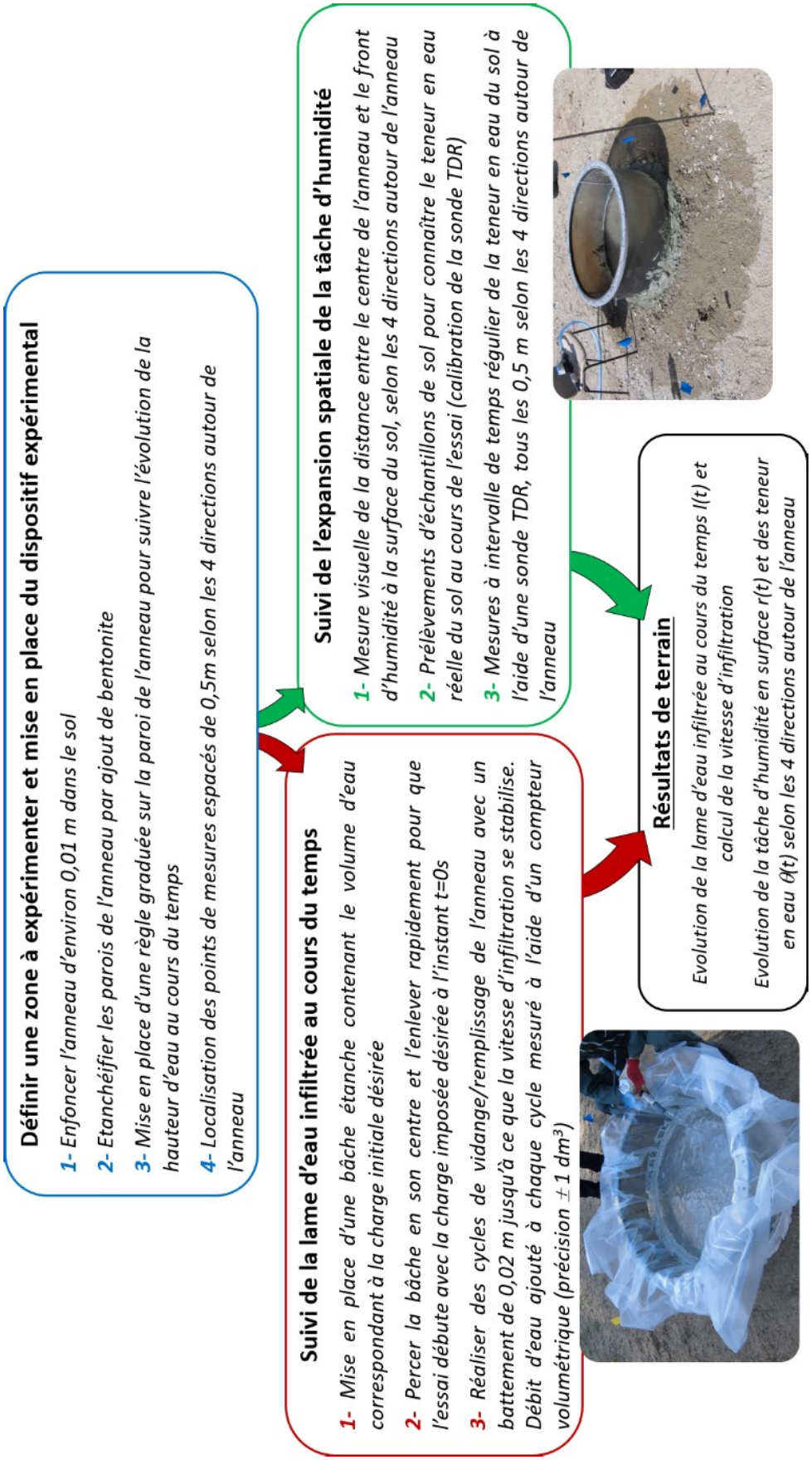



*Figure 54 : Protocole de réalisation d'un essai d'infiltration simple anneau et les données acquises en cours d'expérimentation*

### *IV.3.1.3. Résultats expérimentaux*

#### *IV.3.1.3.1. Prélèvement de sol et calibration de la sonde TDS*

Les prélèvements de sol sont réalisés à l'aide d'anneaux calibrés, dont le volume est connu ($V_T$). La masse humide de l'échantillon ($M_H$) est mesurée par pesée en laboratoire, alors que la masse sèche ($M_S$) est obtenue après séchage de l'échantillon au four à 105 °C pendant une durée suffisante pour évaporer toute l'eau contenue dans l'échantillon. La différence entre la masse humide et la masse sèche permet de connaître la masse d'eau ($M_E$) de l'échantillon prélevé. La $M_S$ est nécessaire pour calculer la masse volumique apparente sèche du sol ($\rho_d$), ainsi que la teneur en eau volumique du sol ($\theta$), en considérant que $\rho_w$ est la masse volumique de l'eau (= 1 g.cm$^{-3}$), d'après les relations suivantes :

$$\rho_d = \frac{M_S}{V_T} \qquad \textit{Eq. IV-1}$$

et,

$$\theta = \frac{M_E}{M_S}\frac{\rho_d}{\rho_w} \qquad \textit{Eq. IV-2}$$

La porosité totale ($\varepsilon_t$) du sol échantillonné, qui correspond au rapport du volume des vides sur le volume total du sol (Eq. II-5), peut également être calculée comme suit :

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \qquad \textit{Eq. IV-3}$$

Avec $\rho_s$ la masse volumique sèche de solide, considérée égale à 2,65 g.cm$^{-3}$ (qui correspond à la masse volumique du quartz).

Dans le bassin d'infiltration 2-2, quatre prélèvements de sol ont été réalisés dans le sable et dans la couche sous-jacente (couche compactée) avant de réaliser les essais d'infiltration. La couche de sable est prélevée à l'aide d'un cylindre de 7,4 cm de diamètre et 5 cm de hauteur, alors que les prélèvements dans la couche compactée sont réalisés avec un cylindre plus restreint de par la difficulté d'échantillonnage (5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur).

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons prélevés sont présentés dans le Tableau 14.

| N° d'échantillon | Type de sol prélevé | $V_T$ | $M_H$ | $M_S$ | $M_E$ | $\rho_d$ | $\varepsilon_t$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [cm$^3$] | [g] | [g] | [g] | [g.cm$^{-3}$] | [cm$^3$.cm$^{-3}$] |
| **DA1** | Sable ancien | 215,04 | 379,6 | 356,9 | 22,7 | 1,66 | 0,37 |
| **DA2** | Couche compactée | 98,17 | 204,7 | 195,3 | 9,4 | 1,99 | 0,25 |
| **DA3** | | 98,17 | 190,9 | 182,3 | 8,6 | 1,86 | 0,30 |
| **DA4** | | 98,17 | 198,8 | 188,6 | 10,2 | 1,92 | 0,28 |

*Tableau 14 : Résultats des analyses effectuées sur les prélèvements de la couche de sable et de la couche compactée*

La couche de sable de fond de bassin étant constituée d'un sable calibré *[BURGEAP, 1997]*, un seul prélèvement est réalisé. De plus, plusieurs analyses menées sur la couche de sable d'un autre bassin d'infiltration *[Loizeau, 2013]* montraient des résultats homogènes.

Les analyses effectuées sur la couche compactée présentent quant à elles une certaine hétérogénéité : la masse volumique apparente sèche ($\rho_d$) de cette couche est comprise entre 1,99 et 1,86 g.cm$^{-3}$ et la porosité totale varie de 0,30 à 0,25 cm$^3$.cm$^{-3}$ sur les échantillons testés.

Pour la suite de l'interprétation de l'essai d'infiltration, la teneur en eau à saturation est considérée comme étant égale à la porosité totale (soit $\theta_s$ = 0,25 cm$^3$.cm$^{-3}$), et la teneur en eau résiduelle, $\theta_r$, est considérée équivalente à 0,01 cm$^3$.cm$^{-3}$ (très proche d'une désaturation totale).

#### *IV.3.1.3.2. La lame d'eau infiltrée cumulée au cours du temps – $I_t$*

Les résultats concernant l'évolution de la lame d'eau infiltrée cumulée pour les quatre essais d'infiltration sont concaténés dans le Tableau 15 et sur la Figure 55.

| Nom de l'essai | Charge imposée dans l'anneau | Durée de l'expérience | Lame d'eau totale cumulée infiltrée | Vitesse d'infiltration ($U_{inf}$) |
|---|---|---|---|---|
| | [m] | [s] | [mm] | [mm.s$^{-1}$] |
| **GA1** | 0,21 | 21 007 | 1582,0 | 7,5.10$^{-2}$ |
| **GA2** | 0,08 | 27 147 | 272,7 | 1,0.10$^{-2}$ |
| **GA3** | 0,10 | 23 926 | 301,9 | 1,3.10$^{-2}$ |
| **GA4** | 0,95 | 21 942 | 3 918,0 | 1,8.10$^{-1}$ |

*Tableau 15 : Résultats issus de l'analyse de la lame d'eau infiltrée au cours des quatre essais d'infiltration menés dans le bassin 2-2*

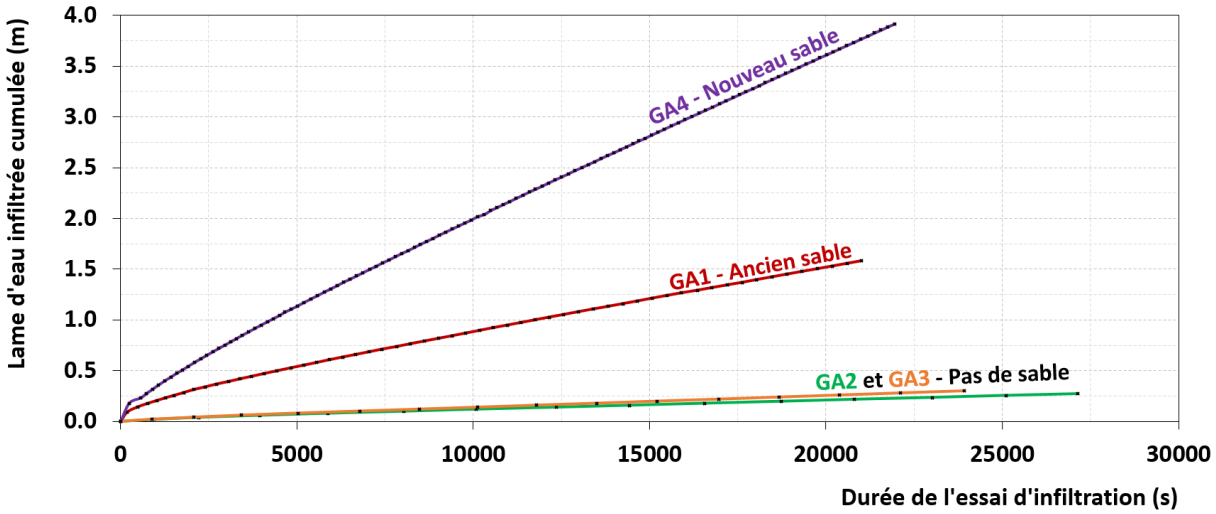



*Figure 55 : Evolution de la lame d'eau infiltrée cumulée au cours du temps ($I_t$) pour les quatre essais d'infiltration*

***Remarques***

La charge imposée dans l'anneau n'est pas identique pour les 4 essais d'infiltration (Tableau 15). Une hauteur d'eau de 0,21 m a été imposée lors de l'essai GA1, alors qu'elle n'est que de 0,1 m en moyenne pour les autres essais. En effet, lorsque l'anneau repose sur la couche compactée, l'hétérogénéité de granulométrie rend difficile l'enfoncement de l'anneau dans le sol. Ainsi, des fuites sur les bords de l'anneau surviennent si la charge imposée est trop importante, et ce malgré l'ajout de bentonite.

#### *IV.3.1.3.3. Evolution de la tache d'humidité autour de l'anneau – $r_{(t)}$ et $\theta_{(t)}$*

La tache d'humidité, qui se forme autour de l'anneau lors de l'essai d'infiltration, est suivie à intervalle de temps plus ou moins régulier, de deux manières distinctes :

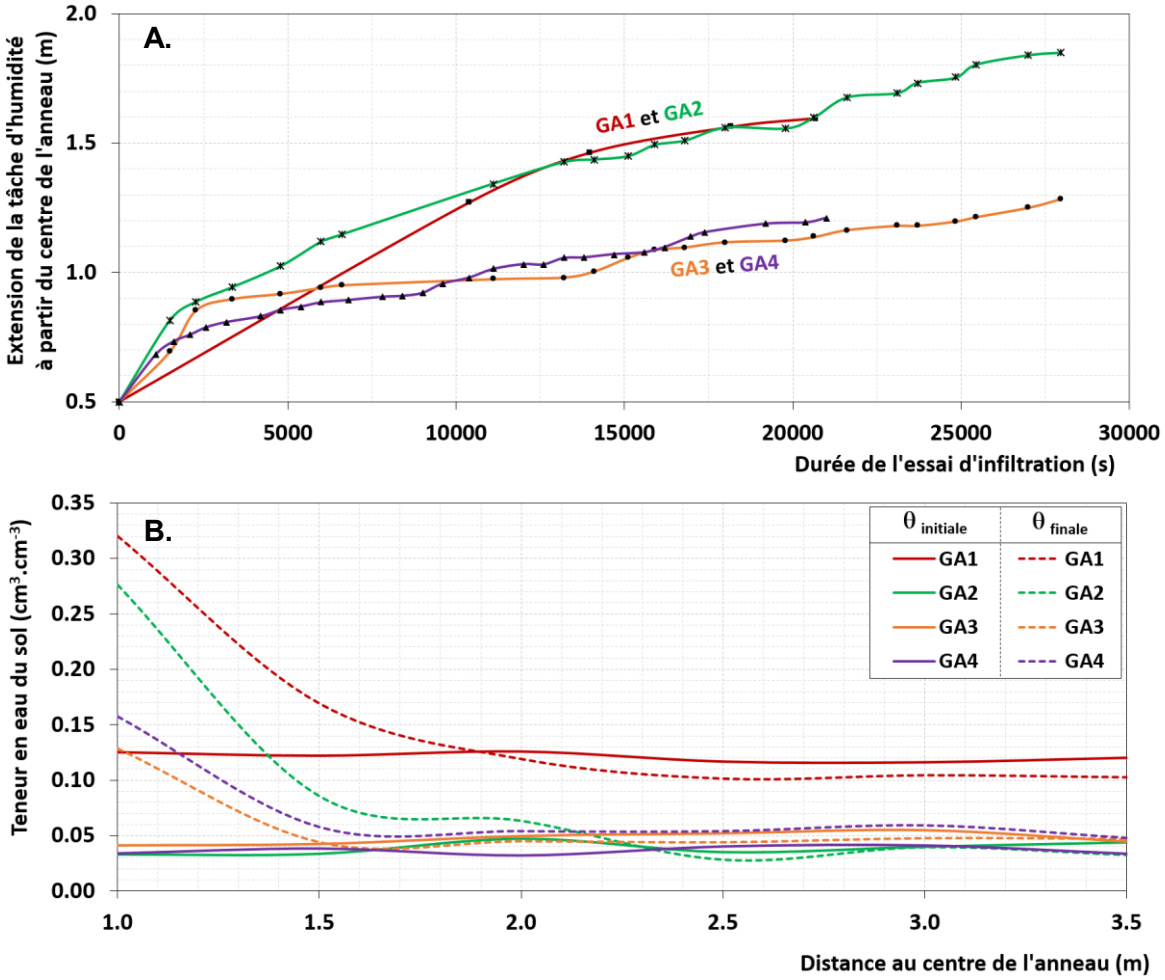
- ✓ Une **analyse visuelle** de la tache d'humidité visible à la surface du sol est effectuée, selon les quatre directions autour de l'anneau, à intervalle de temps régulier. Un mètre ruban permet d'estimer l'éloignement du front d'humidité par rapport au centre de l'anneau.
- ✓ Des **mesures** de teneur en eau sont effectuées à l'aide d'une **sonde TDR** (Time Domain Reflectometry *[Evett, 2003]*). Ces mesures sont faites tous les 0,5 m à partir du bord de l'anneau, et selon les quatre directions autour de ce dernier.

Afin de calibrer les mesures de teneurs en eau par TDR, de nouveaux prélèvements de sol ont été recueillis au début et en fin d'essai d'infiltration. Ces échantillons ont fait l'objet d'une mesure de teneur en eau par la sonde TDR et en laboratoire. C'est par comparaison des valeurs de teneur en eau acquises par ces deux méthodes, que la sonde TDR est calibrée. Ainsi toutes les mesures réalisées par la sonde TDR en cours d'expérience peuvent être transformées en teneur en eau.

Les données de terrain qui concernent l'évolution de la tache d'humidité (analyse visuelle et mesures TDR) sont effectuées selon les 4 directions autour de l'anneau. Ces données sont ensuite moyennées, en considérant que la tache d'humidité forme un cercle autour de l'anneau. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 16 et sur la Figure 56.

| **Nom de l'essai** | **Mesure par sonde TDR (à 1 m du centre de l'anneau)** | | **Analyse visuelle de la tache d'humidité** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Teneur en eau initiale** | **Teneur en eau finale** | **Distance atteinte par le front d'humidité par rapport au centre de l'anneau en fin d'expérience** | **Vitesse d'expansion de la tache d'humidité ($U_r$)** |
| | [$cm^3.cm^{-3}$] | [$cm^3.cm^{-3}$] | [m] | [$mm.s^{-1}$] |
| **GA1** | 0,13 | 0,32 | 1,60 | $7,6.10^{-2}$ |
| **GA2** | 0,03 | 0,28 | 1,85 | $6,8.10^{-2}$ |
| **GA3** | 0,04 | 0,13 | 1,28 | $5,3.10^{-2}$ |
| **GA4** | 0,03 | 0,16 | 1,21 | $5,5.10^{-2}$ |

*Tableau 16 : Résultats de l'analyse visuelle de l'extension de la tache d'humidité au cours du temps ($r_{(t)}$) et de l'évolution des teneurs en eau selon la distance au centre de l'anneau ($\theta_{(t)}$) au cours des quatre essais d'infiltration menés dans le bassin 2-2*




A. Analyse visuelle de l'évolution du front d'humidité depuis le centre de l'anneau ($r_{(t)}$)
B. Mesure des teneurs en eau (sonde TDR) selon l'éloignement au centre de l'anneau ($\theta_{(t)}$)

*Figure 56 : Evolution de la tache d'humidité au cours du temps pour les quatre essais d'infiltration*

### *IV.3.1.4. Analyse des résultats et interprétation par simulation numérique*

#### *IV.3.1.4.1. Analyse des résultats issus des données de terrain*

Pour rappel, les couples GA1 / GA2 et GA3 / GA4 sont positionnés à deux endroits différents dans le bassin d'infiltration 2-2. Les essais GA1 et GA4 sont réalisés sur une couche de sable (colmatée ou non), alors que les essais GA3 et GA4 sont directement positionnés sur la couche compactée (sous-jacente à la couche de sable).

Par ailleurs, les conditions initiales et limites ne sont pas identiques : la teneur en eau initiale dans le sol est trois à quatre fois plus élevée pour l'essai GA1 comparé aux autres essais, la charge hydraulique imposée dans l'anneau est de 0,2 m pour l'essai GA1 alors qu'elle est réduite de moitié pour les autres essais d'infiltration.

La comparaison des résultats des différents essais réalisés montre que :

- ✓ *Comparaison des lames d'eau infiltrées cumulées selon les essais d'infiltration* (Figure 55)

Les essais réalisés sur le sable (GA1 et GA4), qu'il soit colmaté ou non, enregistrent une lame d'eau cumulée infiltrée beaucoup plus conséquente que les essais réalisés sur la couche compactée (GA2 et GA3). Ceci est dû à la conductivité hydraulique qui est plus élevée dans la couche de sable.

L'analyse de ces vitesses d'infiltration montre également que l'essai GA4 (charge imposée de 0,1 m, sur sable neuf) permet une vitesse d'infiltration augmentée de 140 % comparé à l'essai GA1 (charge imposée de 0,2 m, sur sable colmaté). Le chantier de renouvellement de sable a donc permis une nette amélioration de la capacité d'infiltration de la couche de sable (passage de $7{,}5.10^{-2}$ à $1{,}8.10^{-1}$ mm.s$^{-1}$ entre les essais GA1 et GA4).

Les essais GA2 et GA3, réalisés sur la couche compactée, présentent des vitesses d'infiltration similaires (1,0 et $1{,}3.10^{-2}$ mm.s$^{-1}$). Du fait de la charge imposée qui est identique, ces deux essais sont comparables. L'emplacement de l'anneau ayant changé entre ces deux essais, il est possible de dire que la vitesse d'infiltration dépend directement de la lithologie rencontrée, et qu'elle semble spatialement peu hétérogène (dépend peu de l'emplacement de la zone investiguée).

- ✓ *Comparaison de l'expansion de la tache d'humidité autour de l'anneau des différents essais d'infiltration*

L'analyse visuelle de l'extension de la tache d'humidité est mesurée par rapport au centre de l'anneau, et l'axe des ordonnées de la Figure 56 A. débute à 0,5 m (qui correspond au rayon de l'anneau). Les mesures de la progression du front d'humidité ne sont pas faites aussi régulièrement d'un essai à l'autre. L'essai GA1 n'a fait l'objet que de quatre mesures tout au long de l'essai, ce qui explique la forme de la courbe différente comparé aux autres essais (du fait du manque de points de mesures).

Du fait des résultats (Figure 56 A.), il est très nettement remarquable que l'emplacement de l'essai d'infiltration joue un rôle prépondérant sur l'extension de la tache d'humidité. En effet, les essais GA1 et GA2 présentent une vitesse d'avancée moyenne du front d'humidité ($U_r$) 1,32 fois plus élevée que celle des essais GA3 et GA4.

L'analyse de l'évolution des teneurs en eau (Figure 56 B.) montre que les essais d'infiltration ont une influence jusqu'à environ 1,5 m par rapport au centre de l'anneau.

L'essai GA1 présente une teneur en eau initiale ($\theta_i$) de 0,13 cm$^3$.cm$^{-3}$ alors que pour les autres essais présentent $\theta_i$ = 0,03 à 0,04 cm$^3$.cm$^{-3}$. En fin d'expérience, les essais GA1 et GA2 présentent une teneur en eau finale ($\theta_f$) de 0,3 cm$^3$.cm$^{-3}$ en moyenne à 1 m du centre de l'anneau, alors que les essais GA3 et GA4 voient leur $\theta_f$ atteindre seulement 0,15 cm$^3$.cm$^{-3}$ à 1 m de distance.

Ce résultat consolide l'hypothèse que la localisation de l'essai impacte l'extension de la tache d'humidité autour de l'anneau.

Vitesse d'infiltration $U_{inf}$ ➡ **Dépend de la lithologie**
$U_{inf\ sable\ neuf} > U_{inf\ sable\ colmaté} > U_{inf\ couche\ compactée}$

Vitesse d'expansion de la tache d'humidité $U_r$
Gain de teneur en eau au cours de l'expérience $\Delta\theta$
} ➡ **Dépend de la localisation de l'essai**
$U_{r\ site\ n°1} > U_{r\ site\ n°\ 2}$ et $\Delta\theta_{site\ n°1} > \Delta\theta_{site\ n°2}$

#### *IV.3.1.4.2. L'interprétation par simulation numérique*

Suite aux expérimentations de terrain, il est possible de reproduire les essais à l'aide d'un logiciel de modélisation numérique. Le logiciel COMSOL Multiphysics 5.1 a été sélectionné pour interpréter un essai d'infiltration.
Le calage de la lame d'eau infiltrée et de l'expansion du front d'humidité autour de l'anneau au cours du temps permet de déterminer les caractéristiques physiques des couches lithologiques, notamment la conductivité hydraulique à saturation qui correspond à une caractéristique physique déterminante des écoulements. S'intéressant particulièrement à la caractérisation de la couche compactée présente sous la couche de sable, il a été choisi de modéliser l'essai d'infiltration GA2 (réalisé sur le terrain après l'enlèvement de la couche de sable).

L'écoulement et les variations de teneur en eau sont modélisés à l'aide de l'équation de Richards *[Richards, 1931]*, en géométrie 2D axisymétrique (Eq. II-20). La courbe de rétention d'eau Se(h) et l'évolution de la conductivité hydraulique K(h) sont décrits par les fonctions de van Genuchten – Mualem *[Mualem, 1976* ; *Van Genuchten, 1980]*, rappelées dans le Chapitre II (Eq. II-22).
Les paramètres de van Genuchten $\alpha$ et $n$ sont déterminés à priori ($\alpha$ = 2 m$^{-1}$ et $n$ = 2,4), en se basant sur les valeurs les plus communément utilisées pour ce type de sol, et déjà utilisées dans les travaux de S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*.

Les dimensions du modèle sont les suivantes : 2 m d'épaisseur pour 2,5 m de largeur. La taille du modèle est définie de sorte que le bulbe d'eau formé au cours de l'essai d'infiltration n'atteigne pas les limites du modèle. Les paramètres hydrodynamiques ainsi que les conditions initiales et limites sont répertoriées dans le Tableau 17. L'objectif est ici, par calage du modèle, d'estimer la conductivité hydraulique de la couche compactée présente au fond du bassin 2-2. Pour ce faire, deux modèles ont été réalisés :

- ✓ Un **modèle isotrope** pour lequel $K_{sh} = K_{sv}$,
- ✓ Un **modèle anisotrope** où $K_{sv} \neq K_{sh}$.

Pour parvenir à caler la lame d'eau infiltrée cumulée ET l'avancée du front d'humidité au cours du temps, il est admis que le front d'humidité mesuré au cours de l'expérimentation correspond à une teneur en eau de 15 % (mesure réalisée par prélèvement d'un échantillon de sol localisé sur le front d'humidité).

| | | **Modèle numérique isotrope** | **Modèle numérique anisotrope** |
|---|---|---|---|
| **Dimensions du modèle** | | 2,0 m * 2,5 m | |
| **Paramètres hydrodynamiques** | $\theta_r$ | 0,01 m$^3$.m$^{-3}$ | |
| | $\theta_s$ | 0,25 m$^3$.m$^{-3}$ | |
| | $\alpha$ | 2 m$^{-1}$ | |
| | $n$ | 2,4 | |
| | $K_{sh}$ | A caler : 3,8.10$^{-6}$ m.s$^{-1}$ | A caler : 1,0.10$^{-4}$ m.s$^{-1}$ |
| | $K_{sv}$ | | A caler : 8,0.10$^{-7}$ m.s$^{-1}$ |
| **Condition initiale** | | Equilibre hydrostatique avec une charge hydraulique constante de -0,5 m au fond du modèle | |
| **Conditions limites** | | Charge hydraulique de 0,07 m imposée dans l'anneau (rayon de 0,5 m)<br>Condition de flux nul sur toutes les autres frontières du modèle | |

*Tableau 17 : Dimensions, choix des paramètres hydrodynamiques et des conditions initiales/limites pour la modélisation de l'essai d'infiltration GA2*

D'après les résultats de simulation, après calibration des modèles (Figure 57), le modèle isotrope ($K_{sh}$=$K_{sv}$=3,8.10$^{-6}$ m.s$^{-1}$) reproduit bien $I_{(t)}$ mais pas $r_{(t)}$. Sans anisotropie, la tache d'humidité modélisée est trop restreinte comparé à la mesure réalisée au cours de l'expérimentation. Le modèle anisotrope, qui reproduit bien $I_{(t)}$ et $r_{(t)}$, est caractérisé par une **conductivité hydraulique horizontale 125 fois plus forte que la conductivité hydraulique verticale** ($K_{sh}$ = 1,0.10$^{-4}$ m.s$^{-1}$ et $K_{sv}$ = 8,0.10$^{-7}$ m.s$^{-1}$).

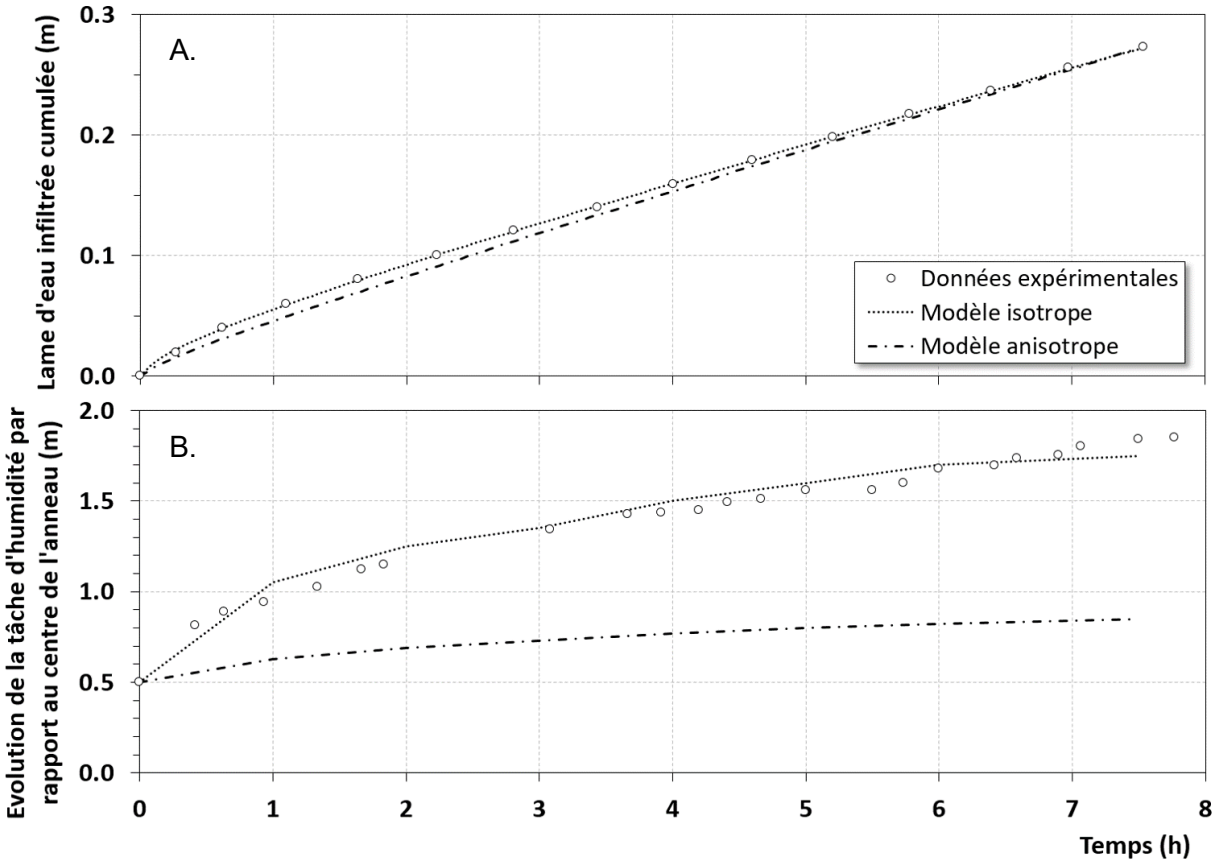



*Figure 57 : Comparaison des données expérimentales et des modèles isotropes et anisotropes pour la lame d'eau infiltrée cumulée (A.) et pour l'extension de la tache d'humidité (B.)*

### *IV.3.1.5. Synthèse de la caractérisation du fond de bassin*

D'après les résultats expérimentaux des quatre essais d'infiltration menés dans le bassin 2-2, **$I_{(t)}$ dépend fortement de la présence ou non de sable, alors que $r_{(t)}$ dépend de la localisation de l'essai et peu de la lithologie en présence** (sable ou non).

La caractérisation du fond de bassin à petite échelle n'est significative que si :

- ✓ La taille de l'infiltromètre est suffisante pour s'affranchir de l'hétérogénéité granulométrique rencontrée.
- ✓ L'anisotropie de conductivité hydraulique est prise en compte (ici en tenant compte à la fois de $I_{(t)}$ et de $r_{(t)}$).

En ce qui concerne le fonctionnement du bassin complet, seul **$K_{sv}$ de la couche compactée règle l'infiltration**, tant que le sable n'est pas colmaté. Ceci explique la volonté de bien identifier cette propriété. L'interprétation par simulation numérique permet d'estimer l'ordre de grandeur de $K_{sv}$ dans la couche compactée (de l'ordre de 10$^{-6}$ m.s$^{-1}$). Cette valeur est plus faible d'un ordre de grandeur que celle estimée par S. Loizeau *[Loizeau, 2013]* au droit du bassin d'infiltration 3-1 ($K_{sv}$ = 10$^{-5}$ m.s$^{-1}$ au droit du bassin 3-1).

Cette valeur de conductivité hydraulique à saturation sera importante pour renseigner le modèle à grande échelle (Chapitre V).

### IV.3.2. Les traçages thermiques à l'échelle d'un bassin d'infiltration

Le traçage artificiel des eaux souterraines est un outil d'aide à la gestion et à la préservation de la ressource en eau. Cette méthode correspond souvent à la seule possibilité de prouver des phénomènes hydrogéologiques intuitifs.

Le principe des traçages est d'injecter un traceur connu dans le milieu environnant (souvent chimique ou colorimétrique), et de suivre son passage dans le sous-sol en différents points de mesure (quantitatifs ou qualitatifs).

Les traçages en nappe ont vu le jour dans les milieux karstiques dans les années 1970 *[Mangin et al., 1976]*. Ces régions présentant des « fleuves » souterrains étaient propices à ce genre de méthode de caractérisation des chemins de l'eau. Cette méthode s'est ensuite généralisée du fait des problèmes de vulnérabilité et de pollution de la ressource, aggravés par la demande croissante en eau liée à l'augmentation de la population mondiale *[Bakalowicz, 1977]*. Les traçages en nappe sont aujourd'hui utilisés pour répondre à diverses études ou questionnements, tels que : la caractérisation des systèmes hydrogéologiques naturels (sens d'écoulement, vitesses de transfert, …), la délimitation des aires d'alimentation et des périmètres de protection des ouvrages d'alimentation en eau potable, les études d'impact des rejets de stations d'épuration dans le milieu naturel, les études de propagation des pollutions souterraines existantes ou potentielles et le dimensionnement des ouvrages de dépollution, les études géotechniques (infiltrations, fuites d'ouvrages…), etc...

Dans le cadre des travaux menés sur le site de captage de Crépieux-Charmy, des traçages étaient nécessaires pour mieux comprendre les sens d'écoulement entre les bassins d'infiltration et la nappe. Les traceurs chimiques ou colorimétriques n'étaient pas envisageables dans la zone de protection d'un site de production d'eau potable. Depuis des décennies, la température est considérée comme un traceur, mais pas forcément utilisée dans le domaine de l'hydrogéologie. C'est depuis le XXI$^{e}$ siècle que la température prend une réelle envergure dans ce domaine d'activité *[Anderson, 2005]*.
De nos jours, la thermique est de plus en plus utilisée pour les traçages. La différence de température peut être imposée (injection) ou s'appuyer sur les variations naturelles pour caractériser les échanges nappe-rivière *[Schmidt et al., 2007 ; Kerry et al., 2007 ; Constantz, 2008 ; Vogt et al., 2010]*, pour comprendre les effets du changement climatique *[Brouyère et al., 2004]*, pour localiser des chemins d'écoulements préférentiels ou des fractures *[Pehme et al., 2013* ; *Klepikova et al., 2011* ; *Sellwood et al., 2015]*, pour visualiser l'impact des activités anthropiques *[Menberg et al., 2013* ; *Attard, 2017]*, mais également pour estimer la capacité de stockage de chaleur en aquifère *[Sauty et al., 1982b ; Wu et al., 2008]*.

Les traçages thermiques présentent plusieurs avantages pour le site de Crépieux-Charmy. D'une part, étant situé en climat tempéré, des différences thermiques naturelles apparaissent entre les eaux de surface et les eaux souterraines (l'eau souterraine enregistre une température stable au cours de l'année de l'ordre de 14 °C, alors que les eaux de surface présentent de fortes variations entre les périodes estivales et hivernales : de moins de 5 °C à plus de 25 °C).
Par ailleurs, les mesures de température engendrent un coût financier très faible comparé aux mesures réalisées lors de traçages chimiques.
L'application de cette méthode sur le site de Crépieux-Charmy est possible du fait des moyens développés pour l'instrumentation du suivi thermique (Chapitre III).

Cependant, les traçages thermiques ne sont pas toujours faciles à interpréter : la température n'est pas « conservative » (au sens des traceurs) puisqu'une partie de l'énergie est injectée dans le milieu environnant. Les transferts thermiques peuvent s'avérer très dispersifs en particulier lorsque les vitesses d'écoulement sont élevées, comme dans les alluvions fluvio-glaciaires. Ce comportement tend à étaler les fronts de température. Enfin, selon la vitesse d'écoulement de l'eau et la microstructure du sol, le fluide et le solide ne se retrouvent pas forcément à la même température. On parle alors de non-équilibre thermique local.

#### *IV.3.2.1. Localisation, objectifs et méthode de réalisation des traçages thermiques*

Des expériences de traçages thermiques ont été menées sur le site du champ captant de Crépieux-Charmy. Cherchant à comprendre les sens d'écoulement et à mettre en évidence des chemins d'écoulement préférentiels entre les différents compartiments du site d'étude (cours d'eau, nappe, bassins), et du fait de l'instrumentation à disposition, il a été choisi de réaliser les expérimentations de traçage thermique au niveau des bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 (Section III.2).

Le principe de l'expérimentation est d'injecter un certain volume d'eau, à température connue et différente de celle de la nappe, dans les bassins d'infiltration. En ce sens, cette expérience se base sur des conditions limites fixées. L'interprétation de l'essai est ensuite basée sur le suivi de la propagation de la sollicitation thermique et sur l'évolution des charges hydrauliques générées dans les ouvrages de suivi (piézomètres). Le bassin se comporte alors comme un infiltromètre à grande échelle.

La zone d'étude sélectionnée présente de nombreux avantages, à savoir :

- ✓ Les bassins 5-1 et 5-2 ont une **surface conséquente** par rapport aux autres bassins : ils représentent plus de 22 % de la superficie de l'ensemble de la recharge artificielle. Le volume infiltré dans ce couple de bassins correspond à plus de la moitié du volume mis en jeu par la recharge artificielle de l'ensemble du site de captage.
- ✓ Les bassins sélectionnés correspondent à ceux qui sont **le plus éloignés de la zone de pompage**. Mener des expériences sur cette zone réduit de ce fait les contraintes liées à l'exploitation du champ captant.
- ✓ Les bassins 5-1 et 5-2 sont situés **à égale distance du Canal de Miribel et du Vieux Rhône**.
- ✓ Le **dispositif expérimental**, positionné de part et d'autre du bassin 5-2, permet d'enregistrer l'évolution piézométrique et thermique de la nappe selon une coupe complète Nord-Sud.

#### *IV.3.2.2. Présentation de deux traçages thermiques*

Parmi les différents traçages réalisés, seuls deux traçages thermiques seront présentés ici : un traçage thermique estival et un traçage thermique hivernal, tous deux menés au cours de l'année 2016.

La présentation et l'analyse de chaque traçage thermique nécessite de récapituler les conditions d'exploitation des bassins avant, pendant et après l'expérimentation thermique (durée de la période d'assèchement qui précède le traçage, volume total infiltré pendant la période de mise en eau, vitesse d'infiltration et température moyenne de l'eau infiltrée au cours du traçage, durée d'assèchement qui suit le traçage), et de tenir compte des conditions aux limites imposées dans les cours d'eau (hauteur d'eau et température moyenne enregistrée dans le Vieux Rhône).

Les données de nappe qui servent à l'analyse du traçage thermique sont extraites selon une coupe Nord-Sud, entre le Canal de Miribel et le Vieux-Rhône, au sein du dispositif expérimental (Section III.2). Du fait du nombre important de points de mesure, seule une partie des ouvrages du dispositif expérimental servira à l'analyse des données. Le choix de ces ouvrages est fonction de leur éloignement au bassin (chaque ouvrage est caractérisé par une distance le séparant du bord du bassin), et selon leur profondeur captante (tous les piézomètres sélectionnés sont crépinés sur la totalité de l'épaisseur de l'aquifère sauf les piézomètres P95 et P96, Figure 19).

La Figure 58 permet de visualiser l'emplacement des ouvrages sélectionnés pour l'analyse des traçages thermiques, et de connaitre la distance les séparant du bord du bassin.

**Eloignement des ouvrages par rapport au bord du bassin 5-2**

S34 → 145 m
M24 → 22 m
P95 et P96 → 0 m
S20 → 22 m
S30 → 140 m
S33 → 210 m

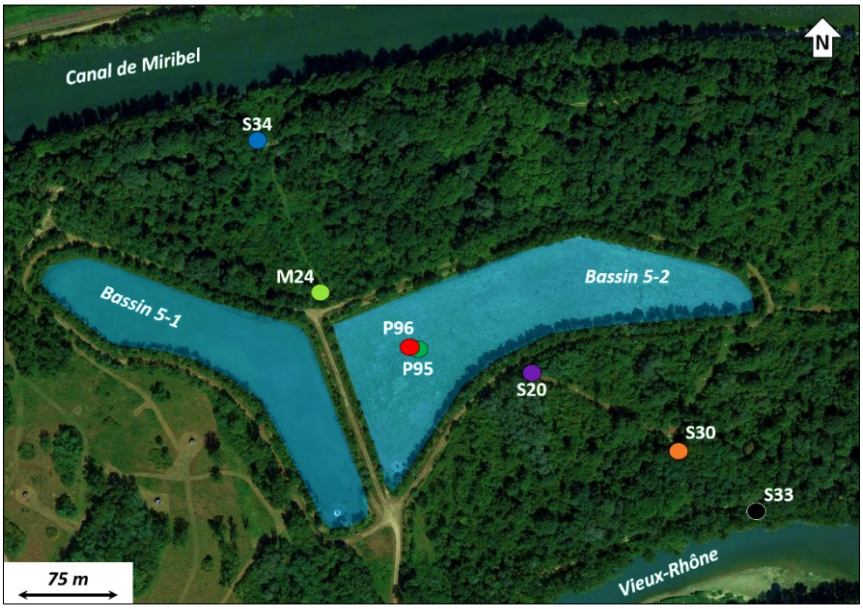



*Figure 58 : Localisation des piézomètres du dispositif expérimental exploités pour l'analyse des traçages thermiques*

#### *IV.3.2.2.1. Le traçage thermique estival – juin/juillet 2016*

Ce traçage thermique estival permet de suivre le cheminement d'une eau injectée à une température élevée par rapport à la température de l'eau souterraine.

Le traçage thermique estival présenté ici est un traçage de « courte durée » (Tableau 18) : la mise en eau est effective sur une période restreinte de 2,5 jours et l'injection d'eau est assurée par le bassin 5-2 uniquement (le bassin 5-1 est maintenu en assec tout au long de l'expérimentation). Les ouvrages éloignés ne sont donc pas impactés par le traçage thermique. Cette expérimentation présente cependant un avantage non négligeable : la période d'assèchement, avant le début du traçage, est de très longue durée (>1 mois), ce qui engendre une condition initiale de température souterraine très homogène.

**<u>Dates et conditions de réalisation du traçage thermique estival</u> (**Tableau 18**)**

| FONCTIONNEMENT DES BASSINS | Bassin 5-1 | Bassin 5-2 |
|---|---|---|
| Durée de l'assec avant le traçage | > 1 mois de non fonctionnement des bassins (chasses du Rhône) | |
| Période de mise en eau des bassins | Bassin tenu en assec tout au long du traçage | Du 30/06/2016 à 10h00 au 02/07/2016 à 22h00 |
| Volume total d'eau infiltrée ($m^3$) | 0 | 91 500 |
| Vitesse d'infiltration moyenne ($m.j^{-1}$) | 0 | 1,83 |
| T° moyenne de l'eau infiltrée (°C) | 0 | 21,5 ($\sigma$ = 1,25 °C) |
| T° moyenne de l'eau souterraine avant la mise en eau des bassins (°C) | 12,7 ($\sigma$ = 0,5 °C) | |
| Date de remise en eau des bassins après l'expérimentation | Le 08/07/2016 à 10h00 | |
| Cours d'eau | Période de hautes eaux<br>En moyenne 165,8 mIGN dans le Vieux-Rhône et 166,2 mIGN69 dans le Canal de Miribel<br>T° moyenne de 18,2 °C | |

*Tableau 18 : Conditions de réalisation du traçage estival 2016*

**<u>Evolutions piézométriques et thermiques enregistrées dans la nappe au cours du traçage estival</u>** (Figure 59).

*Remarque* : la période de mise en eau du bassin est indiquée par la flèche bleue sur la figure.

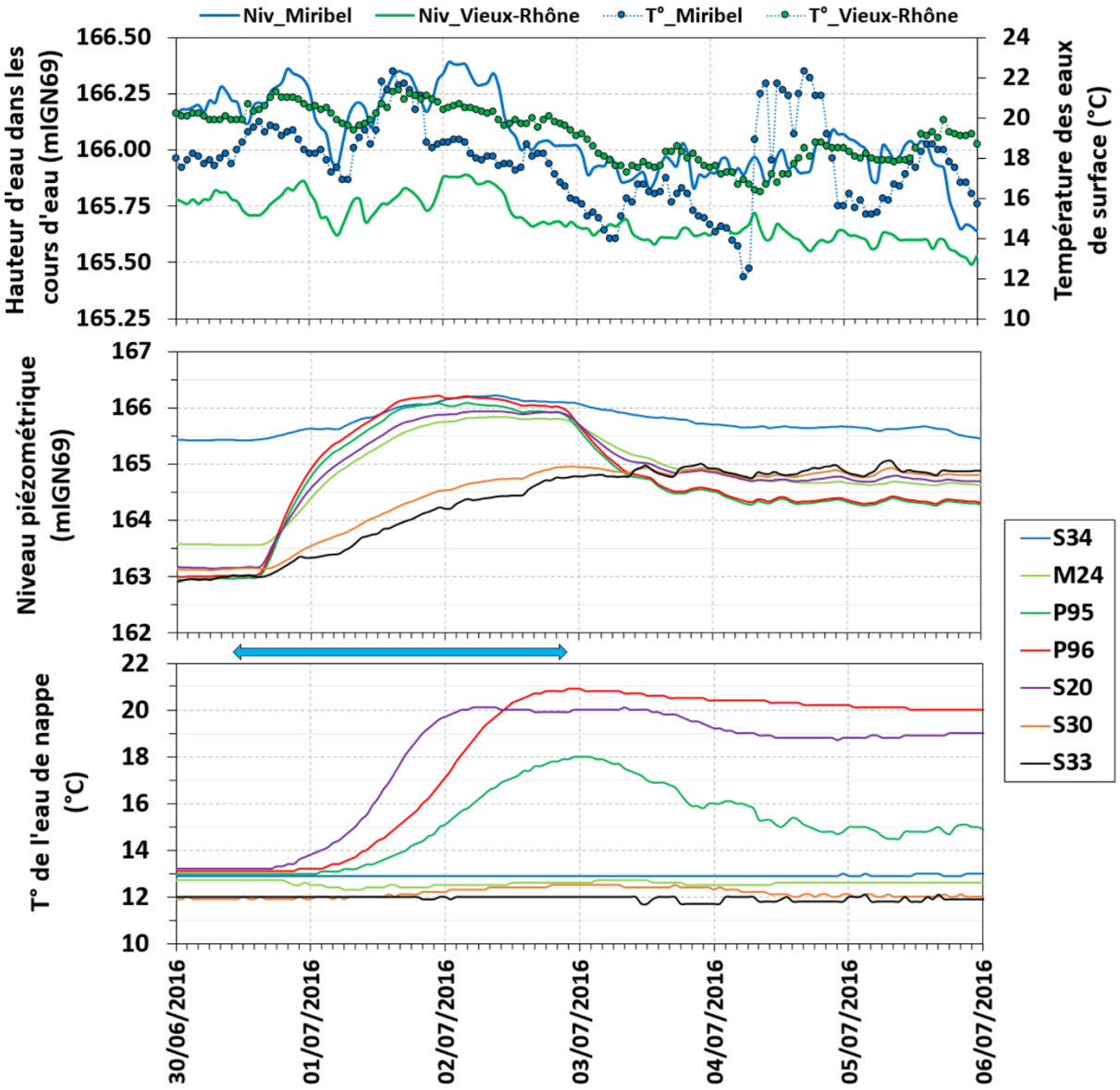



*Figure 59 : Données acquises dans les eaux de surface et dans les piézomètres du dispositif expérimental au cours du traçage thermique estival 2016*

**<u>Analyse des données issues des piézomètres de suivi</u>** (Tableau 19)

** : Le niveau piézométrique du S34 a été impacté par une remontée du niveau du Canal de Miribel*

| | Lieu | Piézomètre | Début de réaction | Fin de réaction | Variation totale (m ou °C) | Temps réaction après mise en eau du bassin | Vitesse de variation ($m.j^{-1}$ ou $°C.j^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Evolution piézométrique** | Miribel | S34 | 30/06 13h00 | 02/07 09h00 | +0,8 m | Non calculé* | Non calculé* |
| | Nord bassin | M24 | 30/06 15h00 | 02/07 09h00 | +2,3 m | 5h00 | +1,31 $m.j^{-1}$ |
| | Centre bassin | P95<br>P96 | 30/06 14h40 | 02/07 04h10 | +3,0 m<br>+3,2 m | 4h40 | +1,92 $m.j^{-1}$<br>+2,05 $m.j^{-1}$ |
| | Sud bassin | S20 | 30/06 14h00 | 02/07 05h00 | +2,8 m | 4h00 | +1,72 $m.j^{-1}$ |
| | Centre « Y » | S30 | 30/06 16h00 | 02/07 22h00 | +1,8 m | 6h00 | +0,80 $m.j^{-1}$ |
| | Vieux Rhône | S33 | 30/06 15h00 | 03/07 04h00 | +1,8 m | 5h00 | +0,71 $m.j^{-1}$ |
| **Evolution thermique** | Miribel | S34 | Pas de réaction | | | | |
| | Nord bassin | M24 | Pas de réaction | | | | |
| | Centre bassin | P95<br>P96 | 01/07 00h00 | 03/07 00h00 | +5 °C<br>+8 °C | 14h00 | +2,5 $°C.j^{-1}$<br>+4,0 $°C.j^{-1}$ |
| | Sud bassin | S20 | 30/06 16h00 | 02/07 06h00 | +7 °C | 06h00 | +4,4 $°C.j^{-1}$ |
| | Centre « Y » | S30 | 01/07 15h00 | 02/07 19h00 | +0,5 °C | 29h00 | +0,4 $°C.j^{-1}$ |
| | Vieux Rhône | S33 | Pas de réaction | | | | |

*Tableau 19 : Analyse des données du traçage thermique estival 2016*

#### *IV.3.2.2.2. Le traçage thermique hivernal – décembre 2016*

Ce traçage thermique hivernal permet de suivre l'évolution d'une eau injectée à une température plus faible que celle de l'eau souterraine.

L'essai a été réalisé sur une « longue durée » (Tableau 20). Compte tenu de la propagation limitée observée pendant le traçage estival, la période de mise en eau du bassin a été fixée à 15 jours.

Cette expérimentation a fait l'objet d'une mise en eau simultanée des bassins 5-1 et 5-2 pour permettre l'infiltration d'un volume d'eau conséquent. Ainsi tous les ouvrages de suivi présentent une évolution de température au cours du temps.

**Dates et conditions de réalisation du traçage thermique hivernal** (Tableau 20)

| FONCTIONNEMENT DES BASSINS | Bassin 5-1 | Bassin 5-2 |
|---|---|---|
| Durée de non fonctionnement des bassins avant le traçage | 20 jours | 15 jours |
| Période de mise en eau des bassins | Du 01/12/2016 à 14h00 au 12/12/2016 à 14h00 | Du 01/12/2016 à 14h00 au 16/12/2016 à 19h00 |
| Volume total d'eau infiltrée ($m^3$) | 131 403 | 559 947 |
| Vitesse d'infiltration moyenne ($m.j^{-1}$) | 0,97 | 1,84 |
| T° moyenne de l'eau infiltrée (°C) | 8,64 ($\sigma$ = 0,78 °C) | |
| T° moyenne de l'eau souterraine avant la mise en eau (°C) | 15,1 ($\sigma$ = 1,4 °C) | |
| Date de remise en eau des bassins après l'expérimentation | Le 02/01/2017 à 16h00 | |
| Cours d'eau | Période de basses eaux<br>En moyenne 164,6 mIGN dans le Vieux-Rhône et 165,6 mIGN69 dans le Canal de Miribel<br>T° moyenne de 8,6 °C | |

*Tableau 20 : Conditions de réalisation du traçage hivernal 2016*

**<u>Evolutions piézométriques et thermiques au cours du traçage hivernal</u>** (Figure 60).

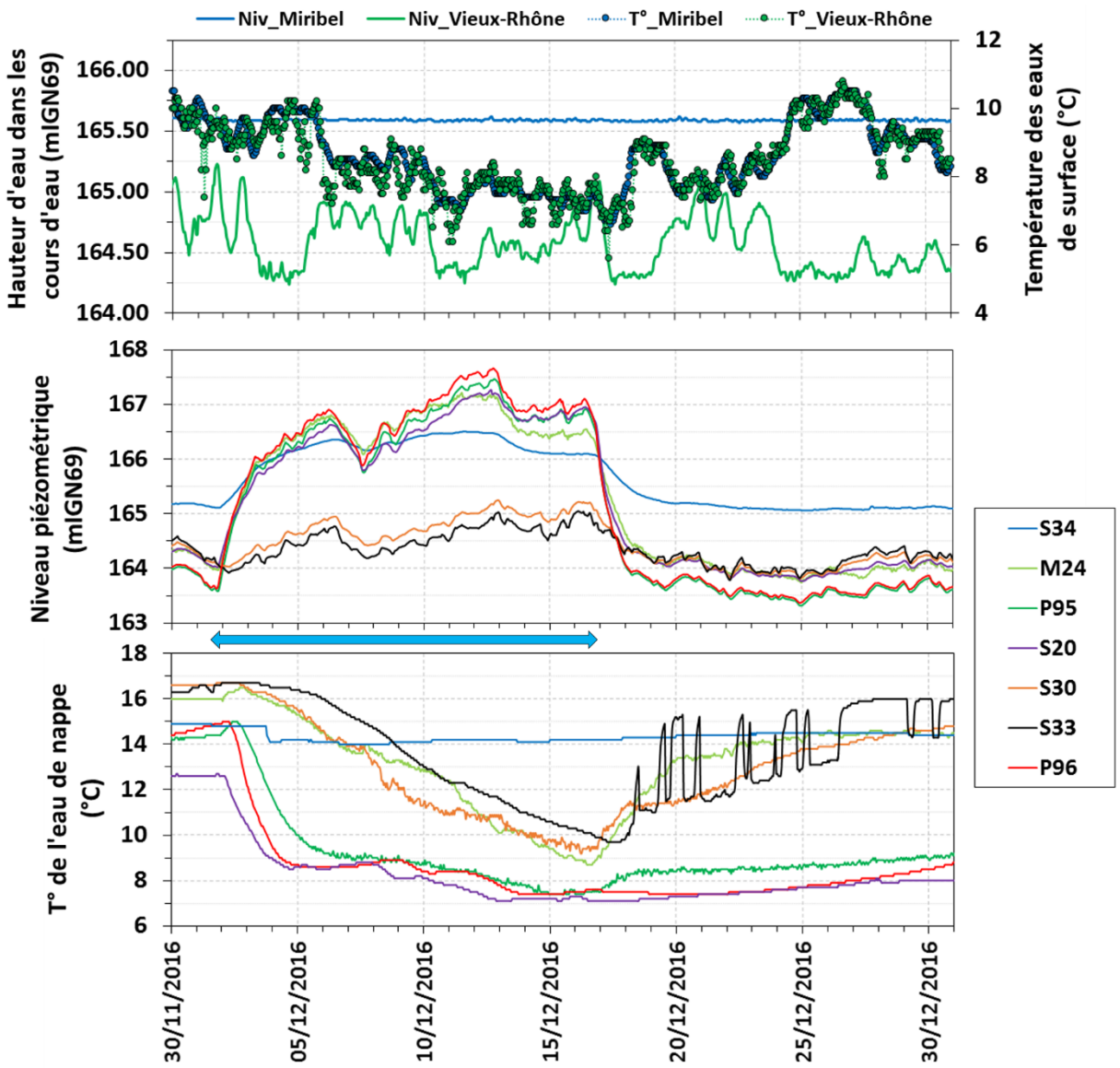



*Figure 60 : Données acquises dans les eaux de surface et dans les piézomètres du dispositif expérimental au cours du traçage thermique hivernal 2016*

**<u>Analyse des données issues des piézomètres de suivi</u>** (Tableau 21)

| | Lieu | Piézomètre | Début de réaction | Fin de réaction | Variation totale (m ou °C) | Temps réaction après mise en eau du bassin | Vitesse de variation ($m.j^{-1}$ ou $°C.j^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Evolution piézométrique** | Miribel | S34 | 01/12 21h00 | 06/12 09h00 | +1,25 m | 07h00 | +0,28 $m.j^{-1}$ |
| | Nord bassin | M24 | 01/12 20h00 | 06/12 08h00 | +2,82 m | 06h00 | +0,63 $m.j^{-1}$ |
| | Centre bassin | P95<br>P96 | 01/12 20h00 | 06/12 07h00 | +3,14 m<br>+3,30 m | 06h00 | +0,70 $m.j^{-1}$<br>+0,74 $m.j^{-1}$ |
| | Sud bassin | S20 | 01/12 19h00 | 06/12 08h00 | +2,61 m | 05h00 | +0,57 $m.j^{-1}$ |
| | Centre « Y » | S30 | 02/12 06h00 | 06/12 12h00 | +0,92 m | 16h00 | +0,22 $m.j^{-1}$ |
| | Vieux Rhône | S33 | 02/12 06h00 | 06/12 11h00 | +0,85 m | 16h00 | +0,20 $m.j^{-1}$ |
| **Evolution thermique** | Miribel | S34 | 03/12 18h00 | 03/12 23h00 | -0,7 °C | 52h00 | -3,36 $°C.j^{-1}$ |
| | Nord bassin | M24 | 02/12 20h00 | 16/12 14h00 | -7,8 °C | 30h00 | -0,57 $°C.j^{-1}$ |
| | Centre bassin | P95 | 02/12 15h00 | 06/12 07h00 | -6,0 °C | 25h00 | -1,64 $°C.j^{-1}$ |
| | | P96 | 02/12 07h00 | 05/12 03h00 | -6,4 °C | 17h00 | -2,26 $°C.j^{-1}$ |
| | Sud bassin | S20 | 02/12 03h00 | 04/12 17h00 | -4,1 °C | 13h00 | -1,59 $°C.j^{-1}$ |
| | Centre « Y » | S30 | 02/12 16h00 | 16/12 06h00 | -7,5 °C | 26h00 | -0,55 $°C.j^{-1}$ |
| | Vieux Rhône | S33 | 02/12 23h00 | 17/12 12h00 | -7,0 °C | 33h00 | -0,48 $°C.j^{-1}$ |

*Tableau 21 : Analyse des données du traçage thermique hivernal 2016*

#### *IV.3.2.3. Interprétation des résultats*

Les traçages thermiques peuvent être représentés sur la coupe pseudo-2D qui traverse le dispositif expérimental selon une direction Nord-Sud (Figure 20).
Cette représentation permet, à différents instants de l'essai, d'illustrer le niveau piézométrique et la température de nappe enregistrée dans chaque ouvrage (Figure 61).

##### *IV.3.2.3.1. La création du dôme hydraulique*

Au cours des deux traçages thermiques étudiés, une **remontée du niveau de nappe** au droit du bassin est perçue lors de la mise en eau des bassins d'infiltration. Ce dôme piézométrique est **plus ou moins prononcé selon la durée de fonctionnement du bassin**.

Pendant la période estivale étudiée, un cycle unique de remplissage/vidange du bassin a lieu. Ceci explique que les niveaux piézométriques dans les différents ouvrages de suivi enregistrent des variations de faible amplitude (Figure 59). Un cycle unique de remplissage du bassin permet une remontée de l'ordre de 3 m au droit du bassin. Plus on s'éloigne du centre du bassin, plus le dôme hydraulique est réduit en terme d'amplitude (de l'ordre de 1,8 m dans la zone Sud du bassin). La vitesse de montée de ce dôme piézométrique évolue fortement en fonction de l'éloignement au bassin : de l'ordre de 2 $m.j^{-1}$ au centre du bassin, et de l'ordre de 0,7 $m.j^{-1}$ à 210 m du centre du bassin (en direction du Sud).

Au cours de la période hivernale, la durée de mise en eau des bassins est plus longue et la hauteur d'eau dans le bassin 5-2 fluctue au cours du temps. Ceci explique que les niveaux piézométriques enregistrent des fluctuations de faible amplitude de manière répétée au cours de la période de fonctionnement du bassin (Figure 60). Pendant la première phase de remplissage du bassin, le gain piézométrique est semblable à celui observé au cours de la période estivale (de l'ordre de 3 m au droit du bassin). La période de fonctionnement du bassin étant plus longue, les niveaux piézométriques augmentent au cours du temps (amplitude maximale de l'ordre de 4 m au droit du bassin). Par contre, la vitesse de création de ce dôme hydraulique est bien plus lente au cours de la période hivernale : de l'ordre de 0,72 $m.j^{-1}$ au droit du bassin, et de 0,2 $m.j^{-1}$ à 210 m du centre du bassin (en direction du Sud).

Ce comportement est à priori lié à l'augmentation de la viscosité de l'eau en période hivernale : l'eau plus froide s'infiltre moins vite, ce qui ralenti la formation du dôme hydraulique. Le niveau piézométrique initial ainsi que les conditions d'exploitation des ouvrages de pompage à proximité du bassin peuvent également avoir un impact sur la formation du dôme hydraulique. Ceci explique que les rations de remontées du dôme hydraulique et de viscosité ne sont pas comparables.

**L'amplitude du dôme hydraulique dépend de la durée de fonctionnement du bassin et de la distance séparant l'ouvrage de suivi au centre du bassin**. De manière générale, plus la durée de fonctionnement du bassin est longue, plus l'amplitude du dôme hydraulique est importante ; et plus on s'éloigne du bassin, moins le gain piézométrique est important.

Par ailleurs, selon la période de l'année étudiée, la vitesse de mise en place du dôme hydraulique peut être très différente. Un délai de 4 à 6 heures est nécessaire suite à la mise en eau du bassin pour que le niveau de nappe entame son augmentation au droit du bassin. Ce délai est d'autant plus long que l'on s'éloigne du centre du bassin.

Au cours de l'essai hivernal, les niveaux piézométriques enregistrés dans les différents ouvrages permettent de calculer les gradients hydrauliques en divers endroits du dôme hydraulique, illustrés dans le Tableau 22.

| Couple d'ouvrages | Distance entre les deux ouvrages | Différence de charge hydraulique moyenne entre le 04/12 et le 15/12 | Gradient hydraulique |
|---|---|---|---|
| P96 – M24 | 86 m | 0,19 m | 0,22 % |
| P96 – S20 | 85 m | 0,28 m | 0,33 % |
| S20 – S30 | 118 m | 1,76 m | 1,49 % |
| S30 – S33 | 70 m | 0,23 m | 0,33 % |
| M24 – S34 | 123 m | 0,38 m | 0,31 % |

*Tableau 22 : Calcul du gradient hydraulique de part et d'autre du bassin 5-2 au cours du fonctionnement de ce dernier (entre le 04 et le 15 décembre 2016)*

Entre les ouvrages S20 et S30, le gradient hydraulique est plus prononcé qu'ailleurs (1,5 % entre ces deux ouvrages et 0,3 % ailleurs).
Cette observation pourrait être liée à une conductivité hydraulique plus faible du terrain au sud du bassin qui n'a pas été mise en évidence par les prélèvements lors des forations. Elle pourrait également être liée au fait que le flux injecté en direction du Sud soit sensiblement plus important qu'en direction du Nord. La forte différence de charge à l'état initial entre les piézomètres S33 au Sud et S34 au Nord semble confirmer que l'écoulement en direction du Sud est favorisé.

#### *IV.3.2.3.2. L'amplitude et la vitesse des transferts thermiques*

L'homogénéisation de la **température initiale** de la nappe dans l'ensemble des ouvrages du dispositif expérimental est très **dépendante de la durée de la période d'assèchement** qui précède la réalisation du traçage thermique (Figure 61). Le traçage thermique estival ayant bénéficié d'une période d'assèchement très longue (plus d'un mois), les températures initiales dans la nappe sont très semblables d'un piézomètre à l'autre (moyenne de 12,7 °C avec un écart-type de seulement 0,5 °C). Lors du traçage hivernal (période de non-fonctionnement des bassins limitée à 15 jours), les piézomètres présentent une gamme de températures initiales plus étendue (moyenne de 15,1 °C avec un écart-type de 1,4 °C).
Concernant les piézomètres proches des cours d'eau (S34 et S33), une **déconnexion en termes de températures est à noter entre les eaux de surface et les eaux souterraines**. Les sondes de mesures des piézomètres sont situées en fond d'aquifère, mais disposant d'ouvrages peu profonds à proximité immédiate des ouvrages S34 et S33 (Section III.5), nous savons que la température de la partie superficielle de l'aquifère est très proche de la température en fond d'aquifère lorsque les bassins ne fonctionnent pas. De ce fait, les échanges thermiques semblent être très faibles entre les cours d'eau et la nappe. Cette observation confirme les observations basées sur les cartes piézométriques et sur les cartes de températures à l'échelle du champ captant (Sections III.3 et III.4).

**L'extension spatiale de la diffusion du panache thermique dans la nappe dépend de la quantité d'eau infiltrée** et donc du temps de mise en eau du bassin. De ce fait, au cours du traçage estival, seuls les piézomètres P95, P96 et S20 enregistrent une évolution de leurs températures (le volume d'eau mis en jeu étant faible). Le traçage thermique hivernal permet quant à lui une évolution thermique de l'ensemble des piézomètres, même au niveau des ouvrages les plus éloignés du centre du bassin.

**Les transferts thermiques** suite à la mise en eau du bassin semblent être **plus rapides en direction du sud du bassin** : le piézomètre S20 présente une évolution thermique avant que le M24 ne commence à réagir. De plus, la température du S20 atteint une valeur très proche de celle de l'eau injectée dans le bassin. Ceci signifie qu'il y a très peu de perte de chaleur lors de l'écoulement. Cette observation laisse entrevoir une **circulation rapide depuis le bassin en direction du Sud**, qui permet de confirmer l'interprétation des données piézométriques, en écartant l'hypothèse d'une conductivité hydraulique plus faible dans la zone Sud.

Lors de la période d'assèchement du bassin qui suit le traçage thermique, des oscillations thermiques peuvent apparaitre dans certains ouvrages lorsque les températures reviennent à leur état initial (c'est le cas du piézomètre S33, situé à proximité du Vieux Rhône, suite au traçage thermique hivernal : Figure 60). Ces oscillations thermiques locales sont générées par des conditions d'exploitation spécifiques, expliquées dans la Section III.5.

#### *IV.3.2.3.3. L'influence de la lithologie sur les évolutions piézométriques et thermiques*

Pour connaitre **l'impact de la lithologie sur les évolutions piézométriques et thermiques** lors du fonctionnement des bassins d'infiltration, on se focalise sur les ouvrages P95 et P96. Ces ouvrages ne captent l'eau de l'aquifère que sur une épaisseur réduite de 1 m. P95 permet de connaitre la charge hydraulique et la température de l'eau en fond d'aquifère, alors que P96 est captant sur une zone moins profonde de l'aquifère (juste au-dessus d'une zone moins perméable, illustrée en vert sur les coupes de la Figure 61).

Ces deux ouvrages montrent une augmentation de charge hydraulique simultanée suite à une mise en eau du bassin 5-2. Mais un **décalage de charge hydraulique** apparait entre les deux piézomètres : la charge du P96 est supérieure de 0,2 m en moyenne, quand le bassin est en eau (Figure 59 et Figure 60).

**L'évolution thermique est différente entre les deux piézomètres** : P95 enregistre l'arrivée du panache thermique apporté par le bassin avec un temps de retard comparé au piézomètre P96. L'amplitude des variations thermiques est plus grande dans le cas du piézomètre peu profond (P96), et le retour à l'état initial après l'arrêt du bassin est plus rapide dans l'ouvrage profond (vitesse d'écoulement plus rapide en fond d'aquifère).
La **zone moins perméable joue un rôle d'atténuation des vitesses de transferts de masse et de chaleur vers la profondeur**.

#### *IV.3.2.3.4. Une efficacité quantitative et qualitative de la barrière hydraulique ?*

Les deux traçages thermiques présentés montrent que les bassins d'infiltration permettent une augmentation du niveau de nappe, mais que cette dernière est limitée lorsque la mise en eau du bassin est restreinte dans le temps. Ainsi le traçage estival de courte durée n'entraine pas d'inversion du sens d'écoulement (les rivières alimentent la nappe). L'inversion des sens d'écoulement est effective lors du traçage de longue durée (le niveau piézométrique des ouvrages proches des cours d'eau est supérieur à la hauteur d'eau dans le Canal de Miribel et le Vieux Rhône).

**La barrière hydraulique semble donc être efficace d'un point de vue quantitatif lors des mises en eau de longue durée, soit sur une période de 15 jours minimum** (inversion des sens d'écoulement).

Cependant, la **température de nappe de la zone de captage est fortement liée au fonctionnement des bassins** et non à la température des eaux superficielles dans les cours d'eau. Ainsi, si la barrière hydraulique est efficace d'un point de vue des inversions de sens d'écoulement, elle peut engendrer un risque du point de vue de la qualité des eaux souterraines. En cas d'injection d'eau de plus de 25 °C, cette température est susceptible de se retrouver jusqu'au fond de l'aquifère, et une température de plus de 25 °C est un facteur aggravant du risque de développement bactérien, d'où la nécessité de la présence de la couche de sable en fond de bassin et la ZNS de 2 m au droit des bassins.

#### *IV.3.2.4. De l'expérience à la préconisation d'un protocole de réalisation d'un traçage thermique interprétable*

Suite à différents traçages thermiques menés entre 2015 et 2017 un protocole de réalisation a été défini. Celui-ci énumère les conditions à réunir pour que le traçage soit concluant. Ces conditions portent sur :

- ✓ Le **choix de la date pour mener l'expérimentation**.

Il est préférable de s'assurer que le traçage thermique soit réalisé **en période estivale ou hivernale**, à un moment où les eaux superficielles et les eaux souterraines présentent une **différence de température** ($\Delta$T°) **de plus de 5 °C**. Si l'écart est trop faible, alors les cheminements de l'eau ne sont pas visualisés.
Cet écart de température doit perdurer dans le temps : si la température de l'eau superficielle évolue au cours du traçage thermique, alors l'interprétation de ce dernier est complexe puisque l'apport thermique n'est pas constant.

- ✓ La **période de non-fonctionnement du couple de bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 avant le début de l'expérimentation.**

L'assèchement des bassins permet d'obtenir une condition initiale homogène d'un point de vue des températures de nappe (pas d'influence thermique par l'exploitation des bassins). Plus la période d'assèchement est longue, plus la condition initiale est homogène. Cependant, les contraintes d'exploitation du site de captage et la sécurisation de la ressource par la barrière hydraulique ne permettent pas toujours de maintenir les bassins en assec très longtemps.
Compte tenu de l'inertie thermique du système étudié, une période de non-fonctionnement d'**une quinzaine de jours** a été choisie pour que la condition thermique initiale de la nappe soit homogène de part et d'autre du bassin.

- ✓ **La durée de l'infiltration d'eau** par les bassins.

Il est nécessaire d'apporter un volume d'eau conséquent via les bassins pour que les ouvrages de suivi les plus éloignés du bassin 5-2 soient impactés en termes de température. De ce fait, la **mise en eau simultanée des bassins 5-1 et 5-2 est privilégiée** et la période de mise en eau est maintenue **pendant une quinzaine de jours**. De cette manière, le panache thermique peut s'étendre autour du couple de bassins au cours de la mise en eau de ces derniers, jusqu'à atteindre le piézomètre S33 situé à 260 m du centre du bassin 5-2.
En cas d'arrêt prématuré des bassins pour raison technique ou environnementale, le traçage thermique ne pourra être analysé et interprété que sur une zone restreinte autour du bassin d'infiltration.

- ✓ **La période d'assec à la suite du traçage thermique**

Après la période de mise en eau, une dernière étape consiste à **assécher les deux bassins** pour que les températures de nappe reviennent à leur état initial. Cette période d'assèchement doit être maintenue pendant **15 jours au minimum**. La remise en eau prématurée des bassins implique l'impossibilité d'interpréter le retour à l'état initial des températures.

La durée totale d'un traçage thermique nécessite un total de **45 jours**. Si des changements climatiques trop importants surviennent au cours du traçage (forte diminution / augmentation des températures de surface), ou si des contraintes d'exploitation modifient les périodes d'assèchement ou de mise en eau des bassins, alors les données sont difficilement interprétables et réduites sur une zone restreinte à proximité du bassin d'infiltration.

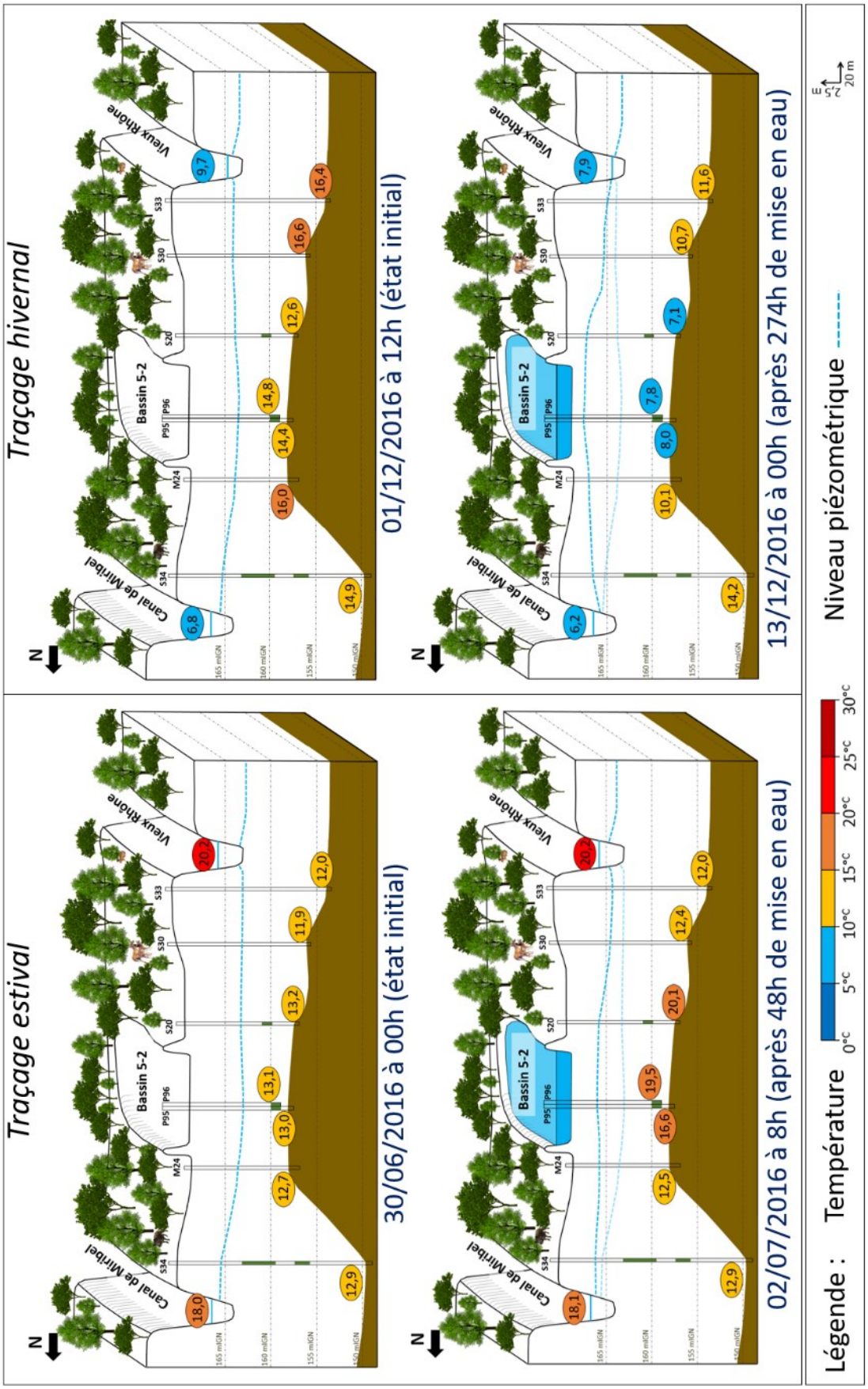



*Figure 61 : Représentation en coupe des traçages thermiques estivaux et hivernaux à l'état initial et au cours du fonctionnement du bassin 5-2*

### IV.3.3. L'observation de l'efficacité de la barrière hydraulique sur l'ensemble du champ captant

#### *IV.3.3.1. Répartition du volume infiltré selon les bassins*

Comme indiqué dans la Section IV.2.3.2, le débit infiltré moyen est de **101 275** $m^3.j^{-1}$ sur la période avril 2014 – décembre 2017. Ce débit correspond à la moyenne tous bassins confondus. Or, ces bassins présentent des caractéristiques différentes, notamment du point de vue de leur superficie et de leurs vitesses d'infiltration. La répartition des volumes infiltrés à l'échelle du champ captant est donc hétérogène.

La Figure 62 illustre la répartition des volumes infiltrés mensuels par bassins entre avril 2014 et décembre 2017. En moyenne, plus de la moitié du volume total infiltré est issu de l'infiltration via les bassins 5 et 6. Ceci vient du fait que la superficie des bassins 5 et 6 correspond à la moitié de la surface de l'ensemble des douze bassins d'infiltration.

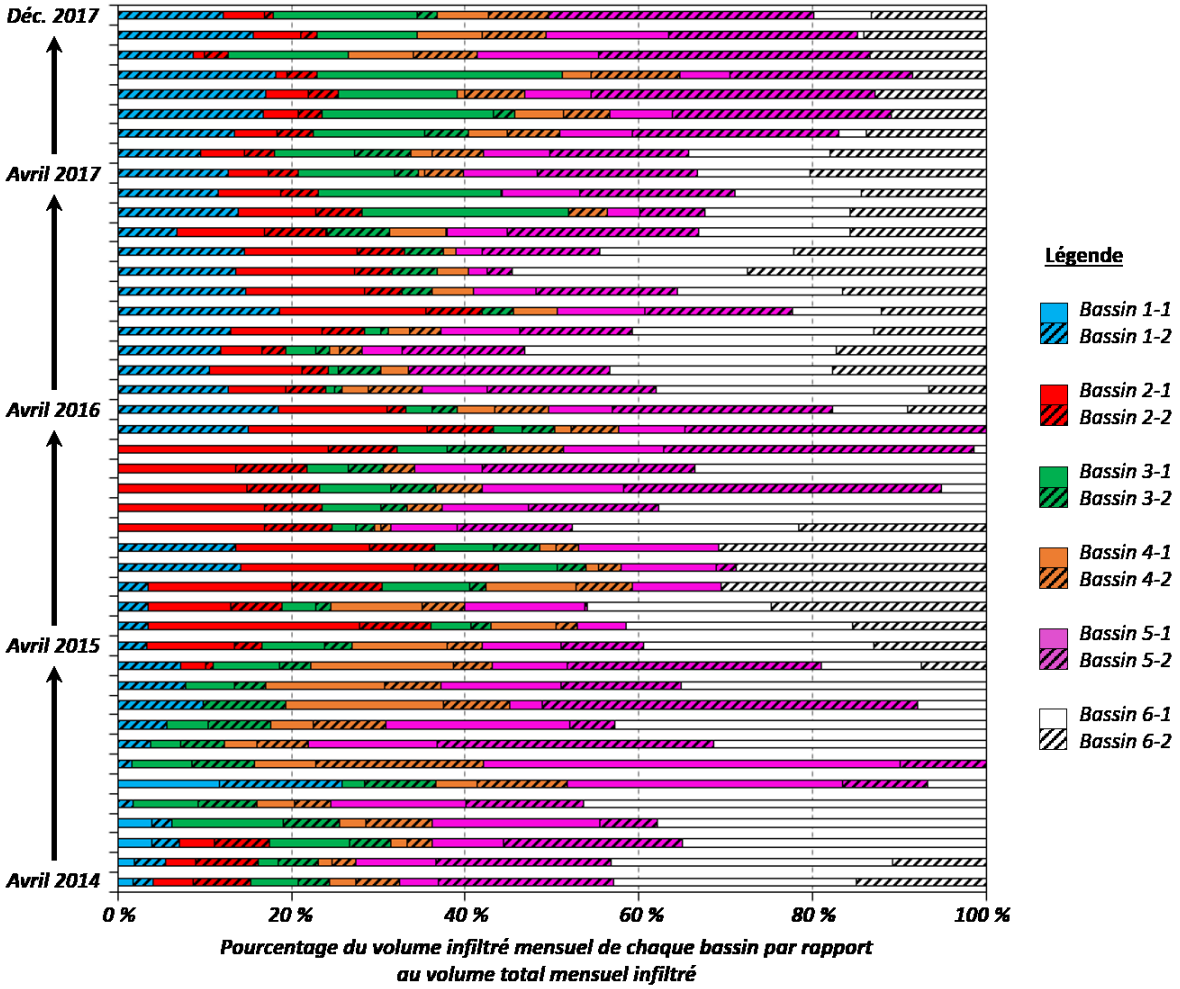



*Figure 62 : Répartition des volumes mensuels infiltrés par bassins par rapport au volume total infiltré, entre avril 2014 et décembre 2017*

Ainsi, si l'attitude à adopter, pour limiter l'impact de l'exploitation des bassins sur la hausse des températures moyennes de nappe en période estivale, est de diminuer la quantité d'eau infiltrée, il est donc possible de se focaliser sur les bassins 5 et 6 dans un premier temps.

#### *IV.3.3.2. Conservation de la zone non saturée règlementaire*

Une zone non saturée de 1 mètre d'épaisseur doit être conservée au droit des bassins d'infiltration lors des cycles de remplissage et de vidange comme le recommandent les guides pour l'infiltration d'eaux pluviales en milieu urbain *[CEREMA, 2003]*. Cette zone non saturée, qui contient de l'eau et de l'air au sein de sa porosité, a pour objectif d'améliorer la filtration de l'eau au cours de son infiltration jusqu'à la nappe, comparé à la filtration naturelle dans les alluvions *[Chouteau, 1984]*.

Pour répondre à cette règlementation de conservation d'une certaine épaisseur de zone non saturée, un piézomètre de référence est assigné à chaque doublet de bassins, voire à chaque bassin d'infiltration (comme c'est le cas pour les bassins 1-1 et 1-2 qui présentent une configuration particulière).
Dans la plupart des cas, le piézomètre de référence est situé sur la digue de séparation des doublets de bassins (Figure 47). Cette localisation est expliquée par le fait que le point le plus haut du dôme hydraulique est potentiellement situé au centre de l'ouvrage d'infiltration (si le doublet de bassins d'infiltration est considéré comme un ouvrage).

Ces piézomètres de référence sont équipés d'une sonde de mesure du niveau piézométrique. Des seuils d'alerte sont paramétrés dans chaque sonde pour permettre l'arrêt de l'alimentation du bassin lorsque le niveau de nappe atteint une côte de -2 m par rapport au fond de bassin. Du fait des altitudes de fond de bassins qui ne sont pas identiques, les seuils d'alerte (relatifs au niveau de nappe) ne sont pas les mêmes d'un bassin à l'autre (Tableau 23). Si le seuil d'alerte est atteint dans un piézomètre de référence, l'alimentation du (ou des) bassin d'infiltration associé est immédiatement stoppée. Le niveau d'eau dans le bassin pouvant être élevé, la vidange complète de ce bassin peut provoquer une certaine augmentation du niveau piézométrique (ce qui explique que le seuil d'alerte est fixé à -2 m par rapport au fond de bassin, et non pas à -1 m). La remise en eau du bassin ne peut se faire qu'à partir du moment où le niveau piézométrique atteint une côte de -3 m par rapport au fond de bassin.

L'analyse de l'évolution du niveau piézométrique issues des sept ouvrages de référence sur la période avril 2014 - décembre 2017 (Tableau 23) montre que :

- ✓ **La zone non saturée règlementaire de 1 m d'épaisseur est toujours conservée** pour l'ensemble des bassins du fait de la marge de 2 m définie par les seuils d'alerte dans les piézomètres de référence.
- ✓ Les **seuils d'alerte** fixés à -2 m par rapport au fond de chaque bassin ne sont **pas atteints à la même fréquence** selon les bassins.

| Bassins d'infiltration | Côte seuil alerte ZNS = 2m | % temps où ZNS < 2 m | Remarque |
|---|---|---|---|
| **Bassins 1** | 165,25 mIGN69 | Bassin 1-1 : 20,24 %<br>Bassin 1-2 : 5,22 % | Bassin 1-1 : très faible altitude du fond de bassin -> ZNS trop réduite même à l'arrêt du bassin) |
| **Bassins 2** | 164,5 mIGN69 | 1,15 % | - |
| **Bassins 3** | 164,46 mIGN69 | 1,43 % | - |
| **Bassins 4** | 165,8 mIGN69 | 0 % | La ZNS de 2 m n'est jamais atteinte du fait des faibles vitesses d'infiltration au droit de ce couple de bassins |
| **Bassins 5** | 166,65 mIGN69 | 0,16 % | Les fonds des bassins 5-1 et 5-2 ne se situent pas aux même altitudes mais les seuils pour la ZNS sont identiques (calés sur le bassin le plus bas) |
| **Bassins 6** | 165,7 mIGN69 | 0,06 % | - |

*Tableau 23 : Fréquence d'atteinte de la ZNS de 2 m au droit de chaque couple de bassins, calculée sur la période avril 2014 – décembre 2017*

En exemple, la Figure 63 illustre l'analyse des données concernant le couple de bassins 3.

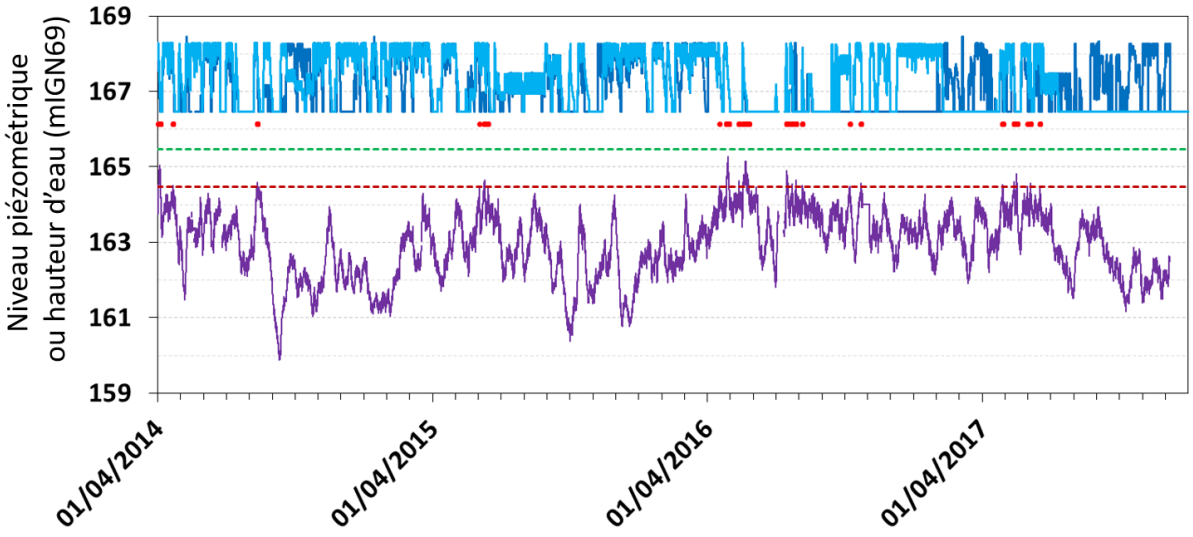



*Figure 63 : Suivi de la zone saturée au droit des bassins 3 entre avril 2014 et décembre 2017*

Légende
Hauteur d'eau
Bassin 3-1
Bassin 3-2
Niveau piézométrique (NP)
B01
Côtes seuils
ZNS = 1m
ZNS = 2m
NP > ZNS 2m

#### *IV.3.3.3. Mise en place du dôme hydraulique au droit de chaque couple de bassins*

##### *IV.3.3.3.1. Gain moyen de niveau piézométrique par la recharge artificielle*

Le gain de niveau piézométrique par la recharge artificielle est très dépendant des conditions initiales (niveau de nappe initial, périodes d'assèchement des bassins, température de la nappe et des eaux de surface) et des conditions aux limites (pompages à proximité, niveau d'eau dans les cours d'eau, bassins à proximité en service ou en assec).
L'évolution du niveau de nappe dans les piézomètres de référence des bassins présente de fortes différences selon les bassins d'infiltration.

La Figure 64 illustre l'évolution piézométrique des cinq piézomètres de référence des bassins d'infiltration entre janvier et juin 2017. Cette analyse ne tient pas compte des bassins 1 puisque le bassin 1-1 n'est pas en fonctionnement sur la période étudiée. Le niveau piézométrique enregistré au droit des bassins 5 enregistre un battement de nappe beaucoup plus important qu'au droit des autres bassins d'infiltration.

En se focalisant seulement sur les périodes où le battement de nappe est dû à une mise en eau du bassin (mise en eau du bassin après une période d'assèchement), les bassins peuvent être divisés en trois catégories :

- ✓ Ceux pour lesquels la remontée de nappe est **de l'ordre du mètre** (cas des bassins 4),
- ✓ Ceux pour lesquels la remontée de nappe est comprise **entre 1,5 et 2 m** (exemple des bassins 2 et 3),
- ✓ Ceux pour lesquels la remontée de nappe est **supérieure à 2 m** (bassins 5 et 6).

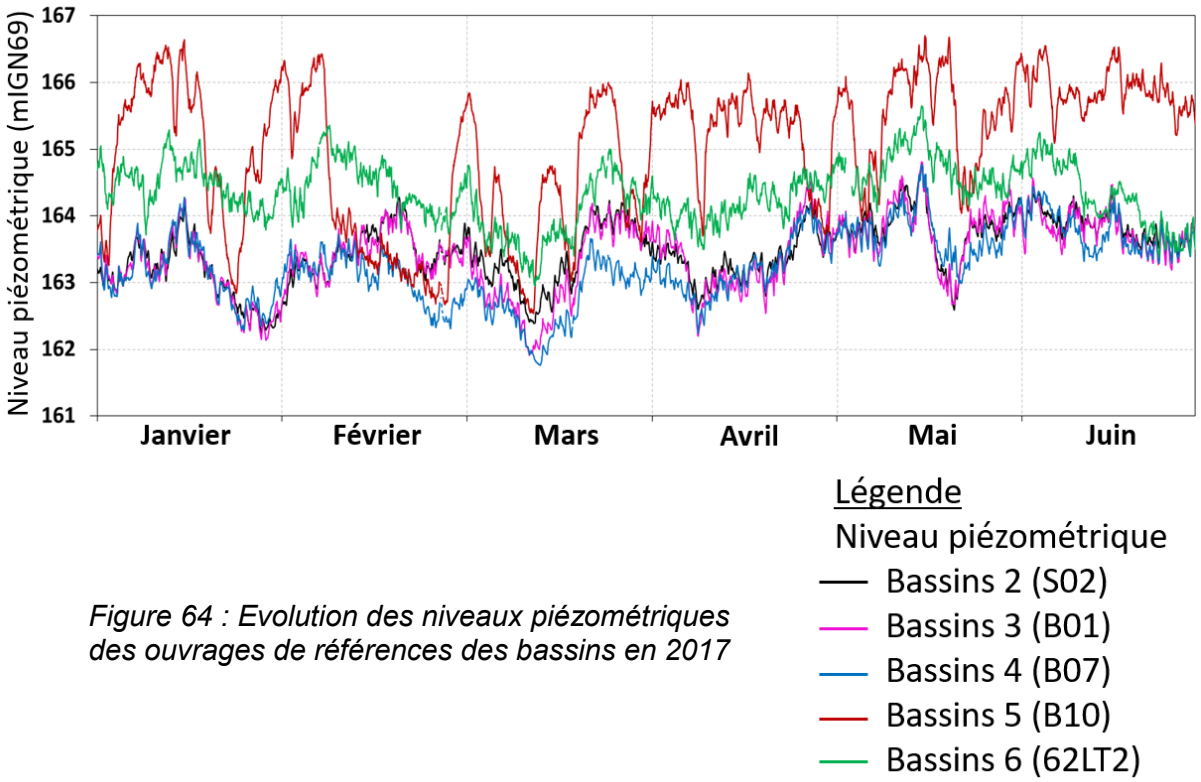



*Figure 64 : Evolution des niveaux piézométriques des ouvrages de références des bassins en 2017*

#### *IV.3.3.3.2. Vitesse de relaxation du dôme hydraulique*

La vitesse de relaxation du dôme hydraulique renseigne sur le temps pendant lequel la barrière hydraulique peut rester efficace après l'arrêt de l'alimentation du bassin : plus la vitesse de relaxation est lente, plus la barrière hydraulique est efficace longtemps.

Pour comparer le temps de relaxation du dôme hydraulique selon les bassins, il a été décidé de calculer la vitesse de descente de la nappe suite à un épisode d'arrêt du bassin du fait d'un niveau de nappe trop haut (Figure 65). L'analyse des vitesses de descente de la nappe n'est donc effectuée qu'en période de nappe haute, lorsque le bassin est arrêté après avoir atteint le seuil d'alerte des 2 m de zone non saturée. Cette fenêtre d'analyse permet de s'assurer du non-fonctionnement du bassin : il ne peut être remis en service qu'à partir du moment où le niveau de nappe atteint -3 m par rapport au radier. En cas de remontée de la nappe sur la période de non-fonctionnement du bassin, il peut s'agir de l'influence d'un autre bassin situé à proximité qui peut être en fonctionnement, de l'influence des cours d'eau en cas de crue ou alors de l'influence d'un pompage très faible à proximité du bassin étudié qui permette ainsi une remontée locale de la nappe. Si une remontée de nappe est visible lors de la relaxation du dôme hydraulique, alors le calcul de vitesse de relaxation n'est pas réalisé. De ce fait, seules quelques périodes sont favorables pour l'analyse (Tableau 24).

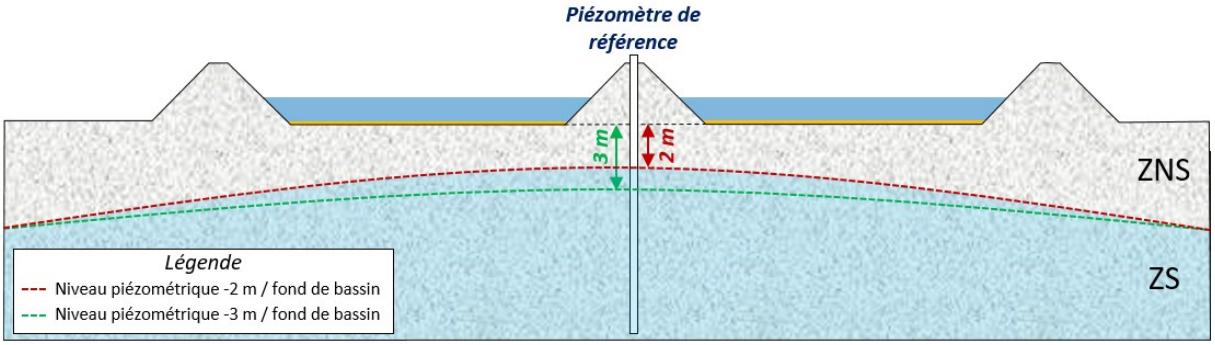



*Figure 65 : Coupe schématique au travers d'un couple de bassins et côtes piézométriques de référence pour le calcul du temps de relaxation du dôme hydraulique*

La vitesse de relaxation du dôme hydraulique est calculée comme suit :

$$U_{rel} = \frac{H_i - H_f}{t_f - t_i} \qquad \textit{Eq. IV-4}$$

Où $U_{rel}$ est la vitesse de relaxation du dôme hydraulique (en m.j$^{-1}$), $H_i$ (en m) est la charge hydraulique initiale c'est-à-dire lorsque la nappe est à son niveau le plus haut avant la relaxation du dôme (ce niveau peut dépasser la côte des 2 m de ZNS si la hauteur d'eau dans le bassin est importante lors du déclenchement du seuil d'alerte dans le piézomètre de référence), $H_f$ (en m) est la charge hydraulique finale c'est-à-dire après une baisse d'environ 1 m par rapport au niveau initial en début de relaxation du dôme, $t_f$ - $t_i$ (en j) est le temps nécessaire pour passer de $H_i$ à $H_f$.

Le Tableau 24 est un récapitulatif des vitesses de relaxation calculées sur l'ensemble des bassins d'infiltration, entre avril 2014 et décembre 2017.

- ✓ Les **bassins 1 ne sont pas pris en compte dans cette étude** : l'évolution des niveaux piézométriques dans les deux ouvrages de référence étant trop liés aux oscillations de niveaux enregistrées dans le Vieux-Rhône.
- ✓ Le **dôme hydraulique ne se relaxe pas de la même manière selon les bassins considérés** :
  - La vitesse de relaxation est de 1,39 ± 0,51 $m.j^{-1}$ au droit des bassins 5 et de 1,42 ± 0,30 $m.j^{-1}$ au droit des bassins 6.
  - La vitesse de relaxation est plus faible au droit des bassins 2 et 3 (0,80 ± 0,06 $m.j^{-1}$ pour les bassins 2 et 0,90 ± 0,16 $m.j^{-1}$).
- ✓ Les **bassins 4 présentent la plus faible vitesse de relaxation** (0,65 ± 0,15 $m.j^{-1}$) : n'atteignant jamais la ZNS de 2 m, l'analyse de la vitesse de relaxation est réalisée sur les périodes où la nappe est au plus haut (c'est-à-dire lorsqu'elle dépasse 164,0 mIGN69).

| Bassins étudiés | Nombre de périodes analysées | Vitesse de relaxation moyenne ($m.j^{-1}$) | Ecart type (-) |
|---|---|---|---|
| **Bassins 2** | 4 | 0,80 | 0,06 |
| **Bassins 3** | 5 | 0,90 | 0,16 |
| **Bassins 4** | 4 | 0,65 | 0,15 |
| **Bassins 5** | 20 | 1,39 | 0,51 |
| **Bassins 6** | 9 | 1,42 | 0,30 |

*Tableau 24 : Vitesse de relaxation du dôme hydraulique par doublet de bassins entre les mois d'avril 2014 et décembre 2017*

Du fait du gain piézométrique et des vitesses de relaxation de chaque couple de bassins (Figure 64 et Tableau 24), la **barrière hydraulique semble perdurer pendant une période de 1 à 2 jours maximum** après l'arrêt de l'alimentation des bassins.

### IV.3.4. L'indice d'infiltrabilité : visualiser, comprendre et comparer l'évolution des capacités d'infiltration des bassins

Comme présenté précédemment, le volume infiltré est différent d'un bassin à l'autre. Mais l'infiltration évolue également au cours du temps selon les conditions d'exploitation des bassins et selon l'état de colmatage de la couche de sable de fond de bassin. La comparaison des vitesses d'infiltration de chaque bassin, et la compréhension des évolutions de vitesses s'avère donc être complexe du fait du nombre de données à comparer.

L'analyse de l'évolution mensuelle du volume infiltré d'un seul bassin repose sur la comparaison de ce volume avec différentes variables, telles que :

- ✓ Le **pourcentage de temps** pour lequel le bassin est en **fonctionnement**,
- ✓ La **hauteur d'eau moyenne** dans le bassin,
- ✓ La **température moyenne** de l'eau infiltrée dans le bassin.

*Exemple* : Données mensuelles concernant le bassin 5-2 entre avril 2014 et décembre 2017 (Figure 66)

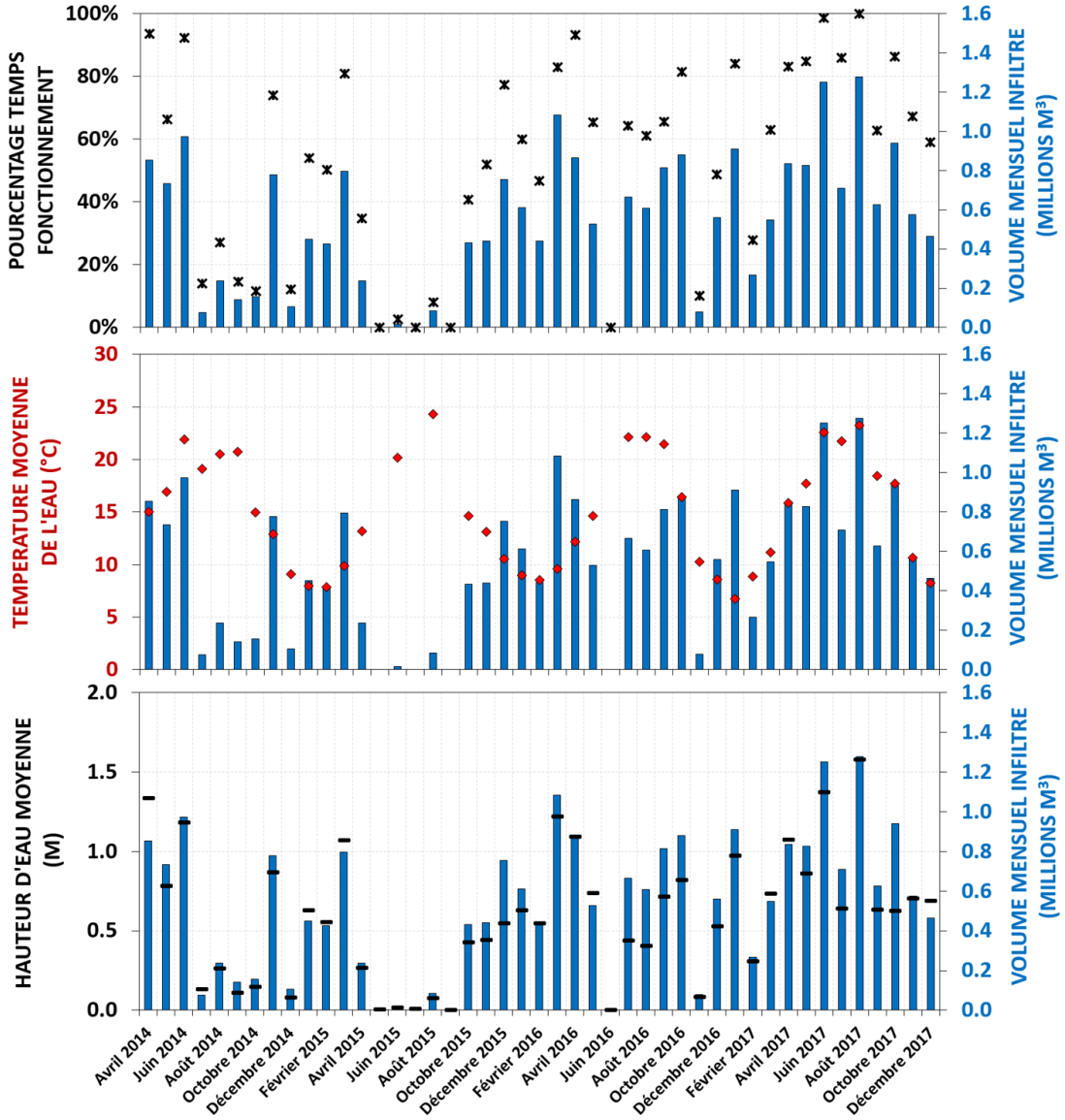



*Figure 66 : Evolution du volume infiltré par rapport au pourcentage du temps de mise en eau, à la température moyenne de l'eau infiltrée et à la hauteur d'eau moyenne dans le bassin 5-2 entre avril 2014 et décembre 2017*

A partir de ces données, la compréhension de l'évolution des volumes infiltrés au cours du temps s'avère être complexe, et ce pour un bassin unique : pour un même pourcentage de temps de mise en eau du bassin, le volume infiltré ne sera pas similaire puisqu'il est dépendant de la température, de la hauteur d'eau dans le bassin mais aussi du taux de colmatage de la couche de sable de fond de bassin.

Dans le but de faciliter l'analyse de l'évolution temporelle des vitesses d'infiltration d'un bassin, et de pouvoir comparer les bassins les uns par rapport aux autres, un indice d'infiltrabilité a été défini.
Cet indice, qui a la dimension d'une vitesse, est calculé au pas de temps mensuel, pour chaque bassin. Le choix du pas de temps mensuel permet de faire l'hypothèse que le volume infiltré est égal au volume introduit dans le bassin (en considérant que l'évaporation est négligeable).

La construction de l'indice est basée sur :

- ✓ **La vitesse d'infiltration moyenne** $U_{inf}$ calculée à partir du volume infiltré, de la surface du bassin et du temps de fonctionnement :

$$U_{inf} = \frac{V_{inf}}{A_b} * \frac{1}{j} \qquad \textit{Eq. IV-5}$$

Où $V_{inf}$ est le volume mensuel infiltré (en m$^3$), $A_b$ est la superficie du bassin (en m$^2$), $j$ est le nombre de jours de fonctionnement du bassin (nombre de jours pour lesquels la hauteur d'eau dans le bassin est supérieure à 0,03 m).

- ✓ Une correction de cette vitesse permettant de rendre compte de l'**influence de la hauteur d'eau moyenne** dans le bassin. Pour ce faire, une estimation du gradient hydraulique moyen au travers de la couche de sable a été retenue par analogie à la loi de Darcy (Eq. II-2).

- ✓ Un **ratio de viscosité** permettant de ramener toutes les mesures à une température de 20 °C.

L'indice d'infiltrabilité a donc pour avantage de prendre en compte l'ensemble des conditions opératoires du bassin. Il est calculé comme suit :

$$I_{Inf} = U_{inf} * \left[\frac{1}{\frac{H_b + e_S}{e_S}}\right] * \left[\frac{\mu_T}{\mu_{20°C}}\right] \qquad \textit{Eq. IV-6}$$

Où $U_{inf}$ est la vitesse d'infiltration moyenne (en m.j$^{-1}$), $H_b$ est la hauteur d'eau moyenne mensuelle dans le bassin (en m), $e_S$ est l'épaisseur de la couche de sable (en m), $\mu_{20°C}$ est la viscosité dynamique de l'eau à 20°C (= 1,002 Pa.s) et enfin $\mu_T$ est la viscosité dynamique de l'eau (en Pa.s) à la température $T$.

Les valeurs de viscosité dynamique de l'eau, qui est dépendante de la température, sont retrouvées dans la littérature *[Sengers and Watson, 1986]*. Elles peuvent cependant être calculées à partir de l'Eq. II-7 *[Mercer and Pinder, 1974]*. Sur la gamme de températures concernée par cette étude (température comprise entre 0 et 35 °C), la viscosité dynamique évolue entre 1,82 et 0,72 Pa.s. Ceci implique un impact non négligeable de la température sur les vitesses d'infiltration.

***Remarque***
Le volume infiltré est considéré égal au volume introduit dans le bassin. Or, si le bassin n'est mis en eau qu'à la fin du mois, le volume introduit dans le bassin ne sera plus comparable au volume infiltré et faussera les calculs de l'indice $I_{Inf}$.
Ainsi, pour que cet indice d'infiltrabilité devienne un outil opérationnel et qu'il soit calculé de manière automatique, il est préférable de limiter les étapes de traitement des données. Ne tenir compte des indices $I_{inf}$ pour lesquels le temps de fonctionnement est supérieur à 25 % évite de devoir estimer le volume d'eau restant dans le bassin à la fin du mois.

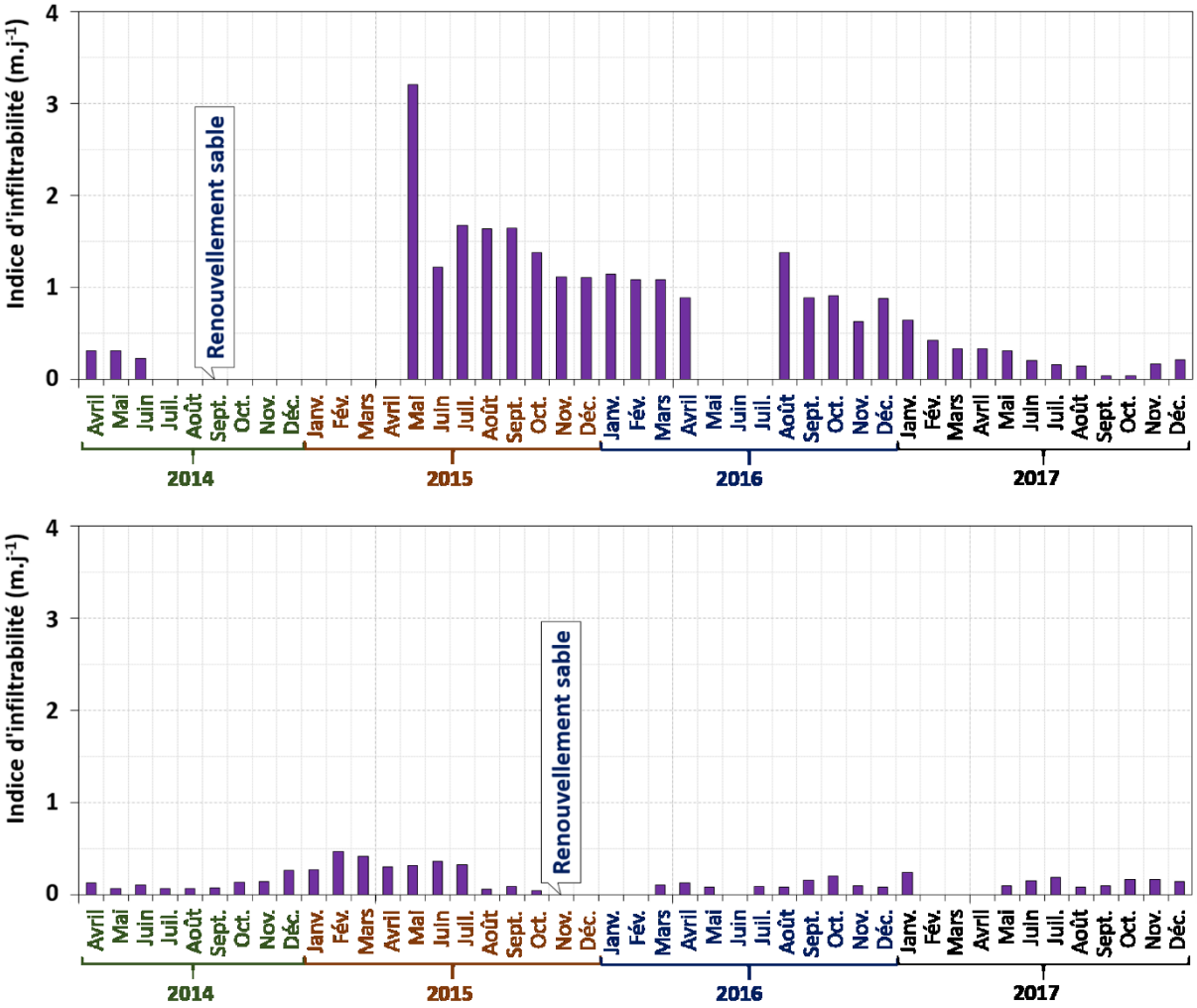



*Figure 67 : Evolution de l'indice d'infiltrabilité mensuel pour le bassin 2-1 (graphique du haut) et le bassin 4-1 (graphique du bas) sur la période avril 2014-décembre 2017*

La Figure 67 illustre les indices mensuels d'infiltrabilité des bassins d'infiltration 2-1 et 4-1 qui ont bénéficié d'un changement de sable sur la période d'étude. L'échelle est volontairement identique entre les deux graphiques de la Figure 67 afin de visualiser la différence d'infiltrabilité qui peut survenir entre deux bassins d'infiltration. Les indices d'infiltrabilité des autres bassins d'infiltrations sont illustrés en Annexe 8.

L'analyse des indices d'infiltrabilité permet de mettre en évidence :

✓ Une **disparité d'infiltrabilité selon les bassins** considérés

La comparaison des indices d'infiltrabilité moyens ( $\overline{I_{Inf}}$ ) sur la période analysée entre avril 2014 et décembre 2017 entre les différents bassins permet de montrer que, malgré la prise en compte de tous les critères dans le calcul de l'indice d'infiltrabilité, des différences d'infiltrabilité sont notables entre bassins (détails de chaque bassin dans le Tableau 25). Les bassins 3-2, 4-1, 4-2 et 5-1 enregistrent un $I_{Inf}$ faible (< 0,25 m.j$^{-1}$), les bassins 1-1, 1-2, 2-2, 3-1, 5-2 et 6-2 présentent un $I_{Inf}$ intermédiaire (compris entre 0,25 et 0,5 m.j$^{-1}$), et les bassins 2-1 et 6-1 présentent eux un $I_{Inf}$ élevé (> 0,5 m.j$^{-1}$).

Ces différences d'infiltrabilité moyenne entre bassins peut-être expliquée par la **lithologie**. Ceci est notamment vérifié pour les bassins 4 qui présentent un $I_{Inf}$ faible et pour lesquels la présence d'une zone argileuse proche de la surface est avérée (ce qui limite les vitesses d'infiltration).

| Bassin d'infiltration considéré | Entre avril 2014 et décembre 2017 | | Entre novembre 2017 et décembre 2017 |
|---|---|---|---|
| | $\overline{I_{Inf}}$ en m.j$^{-1}$ | Ecart-type | $\overline{I_{Inf}}$ en m.j$^{-1}$ |
| **Bassin 1-1** | 0,33 | 0,11 | Pas de valeurs |
| **Bassin 1-2** | 0,33 | 0,12 | 0,38 |
| **Bassin 2-1** | 0,80 | 0,67 | 0,19 |
| **Bassin 2-2** | 0,38 | 0,20 | **0,07** |
| **Bassin 3-1** | 0,28 | 0,23 | 0,26 |
| **Bassin 4-1** | 0,17 | 0,11 | 0,16 |
| **Bassin 4-2** | 0,17 | 0,06 | 0,16 |
| **Bassin 5-1** | 0,22 | 0,07 | 0,22 |
| **Bassin 5-2** | 0,41 | 0,08 | 0,38 |
| **Bassin 6-2** | 0,27 | 0,11 | **0,10** |
| **Bassin 3-2** | 0,11 | 0,05 | Pas de valeurs |
| **Bassin 6-1** | 0,62 | 0,29 | Pas de valeurs |

**Bassins prioritaires** pour le renouvellement de sable en 2018

**Bassins renouvelés en 2017** (pas assez mis en eau pour calculer $I_{Inf}$)

*Tableau 25 : Valeur des indices d'infiltrabilité moyens par bassins sur la période avril 2014 - décembre 2017, ainsi que sur les deux derniers mois de l'année 2017*

✓ **L'impact de l'entretien du sable de fond de bassin**.

Suite à un chantier de renouvellement de sable, un gain en termes d'infiltrabilité est notable sur les premiers mois de remise en service du bassin. Cette augmentation d'infiltrabilité peut être très marquée (exemple du bassin 2-1 : passage de $I_{Inf}$ = 0,22 à 3,20 m.j$^{-1}$ après le changement de sable de septembre 2014, Figure 67), comme très limitée (exemple du bassin 4-1 : passage de $I_{Inf}$ = 0,05 à 0,10 m.j$^{-1}$ après le changement de sable de novembre 2015, Figure 67).

Un essai de hersage du sable a été réalisé en septembre 2016 sur le bassin 3-2. Ce procédé consiste à herser le fond de bassin afin de briser et d'enlever la couche de dépôts limoneux qui colmate la partie supérieure du sable.

Le hersage du sable ne présente qu'un faible gain d'infiltrabilité, et qui s'estompe très rapidement (dès le mois suivant l'opération d'entretien) : $I_{Inf}$ = 0,15 m.j$^{-1}$ avant l'opération de hersage, $I_{Inf}$ = 0,22 m.j$^{-1}$ en septembre 2016 (mois durant lequel le hersage a été réalisé), et $I_{Inf}$ = 0,18 m.j$^{-1}$ en octobre 2016.

Le gain d'infiltrabilité suite à un renouvellement de sable peut être expliqué par deux phénomènes :

- Le sable se colmate au cours du temps. Notamment par le biais d'un développement algal (dans le fond des bassins mais également à la surface de l'eau) et par le dépôt de particules fines présentes en suspension dans les eaux infiltrées. Le laboratoire du LEHNA, intégré au sein de la Plateforme Recherche de Crépieux-Charmy, s'intéresse au colmatage biologique des bassins, afin de trouver des solutions écologiques pour limiter la propagation du colmatage biologique *[Gette-Bouvarot, 2014]*.
  Lorsque le colmatage de la couche filtrante est trop prononcé (c'est-à-dire lorsque les vitesses d'infiltration deviennent trop faibles), le renouvellement du sable permet de retrouver une infiltrabilité plus élevée.
- D'autre part, lors du chantier de renouvellement du sable de fond de bassin, les engins de chantier peuvent détériorer la couche compactée présente sous le sable. Cette couche compactée joue le rôle de limitation des vitesses d'infiltration de par sa faible conductivité hydraulique. L'épaisseur de cette couche sous-jacente au sable est variable et elle peut être très restreinte.

✓ **L'impact d'une période d'assèchement d'assez longue durée**.

Contrairement aux études précédentes *[Loizeau et al., 2017]* qui mettent en évidence une diminution des vitesses d'infiltration suite à une période de non-fonctionnement des bassins (notamment par le phénomène de piégeage d'air dans la porosité du sable de fond de bassin), l'indice d'infiltrabilité enregistre plutôt une tendance à être plus élevé suite à une période longue d'assèchement du bassin.

Cette observation s'explique par le fait que l'indice d'infiltrabilité ne permet pas d'observer les phénomènes qui se produisent sur des temps courts puisqu'il est calculé au pas de temps mensuel. Ainsi le phénomène de piégeage d'air dans la couche de sable n'est pas perçu par le calcul de l'indice d'infiltrabilité.

✓ **Outil d'aide à la décision pour le choix des bassins où le sable est à renouveler**

Contractuellement, la couche de sable de fond de bassin doit être renouvelée sur deux ouvrages tous les ans. Le choix des bassins à renouveler doit être méthodique : un bassin qui connaît une dégradation de sa capacité d'infiltration du fait du colmatage du sable sera prioritaire.

L'indice d'infiltrabilité devient alors un outil d'aide à la décision puisqu'il permet une analyse rapide de l'évolution des vitesses d'infiltration à tout moment de l'année (quelles que soient les conditions climatiques et les conditions d'exploitation des bassins).

Si l'indice d'infiltrabilité présente une diminution progressive, et ce pendant plusieurs mois consécutifs, alors il est fort probable que cette diminution soit liée au colmatage du sable de fond de bassin.

L'analyse des données sur l'année 2017 montre que les bassins 2-2 et 6-2 seraient prioritaires pour un renouvellement de sable en 2018 (Tableau 25) : ces deux bassins d'infiltration enregistrent les deux valeurs d'$I_{Inf}$ les plus faibles en fin d'année 2017. En plus de cela, les bassins 2-2 et 6-2 présentent une diminution constante de leur infiltrabilité depuis fin 2016 (Annexe 8).

## *CHAPITRE IV – CONCLUSIONS ET IDÉES À RETENIR*

### La Recharge Artificielle Managée de Crépieux-Charmy

Le site de Crépieux-Charmy fait l'objet d'une **recharge artificielle contrôlée de la nappe**, par le biais de **12 bassins d'infiltration**.

Ces bassins assurent un double rôle : une **protection quantitative** du fait du maintien de la nappe par la recharge et une **protection qualitative** par l'inversion des sens d'écoulement qui limitent le risque d'intrusion de contamination en provenance des cours d'eau.

Les principales idées à retenir sur l'exploitation des bassins d'infiltration :

- ✓ Les bassins sont **en fonctionnement plus de la moitié du temps** (chiffres de 2016 et 2017).
- ✓ L'**eau infiltrée** par cette recharge artificielle **équivaut à la moitié du volume pompé** sur l'ensemble du site. Les bassins 5 et 6 contribuent à 50 % du volume total infiltré.
- ✓ Les périodes où la recharge par les bassins est conséquente par rapport à la production (*Vinf* > ½ *Vexh*) sont plus fréquentes en période estivale qu'en période hivernale.

### La couche compactée : celle qui régule les vitesses d'infiltration

**Quatre essais d'infiltration** ont été réalisés, dans le bassin d'infiltration 2-2, au cours d'un chantier de renouvellement de sable de fond de bassin.
Par comparaison des différents résultats expérimentaux, il a été montré que **la lame d'eau infiltrée cumulée au cours du temps** ($U_{inf}$) **dépend de la lithologie** en présence, et que la vitesse **d'expansion de la tache d'humidité autour de l'anneau** (*Ur*) **dépend de l'emplacement** de l'essai d'infiltration :

$$U_{inf\ \text{sable neuf}} > U_{inf\ \text{sable colmaté}} > U_{inf\ \text{couche compactée}} \quad \text{ET} \quad U_{r\ \text{site n°1}} > U_{r\ \text{site n° 2}}$$

La caractérisation des fonds de bassins par essais d'infiltration simple anneau ont permis de valider la présence d'une couche compactée au droit du bassin 2-2, et de caractériser sa **conductivité hydraulique à saturation** : pour reproduire numériquement l'évolution de la lame d'eau infiltrée et l'extension de la tache d'humidité autour de l'anneau au cours du temps, il est nécessaire d'imposer une très forte **anisotropie de conductivité hydraulique** dans la couche, telle que :

$$K_{sh} \approx 10^{-4}\ \text{m.s}^{-1} \text{ et } K_{sv} \approx 10^{-6} \text{ à } 10^{-7}\ \text{m.s}^{-1}$$

### Les traçages thermiques à l'échelle d'un bassin d'infiltration
### Vers une compréhension approfondie et globale des chemins de l'eau

La température, utilisée comme **traceur naturel des chemins de l'eau** du fait des différences entre les eaux superficielles et les eaux souterraines, permet de comprendre les sens d'écoulement entre un bassin d'infiltration et la nappe. Les expérimentations sont menées sur la zone du bassin 5-2, équipé de part et d'autre par les ouvrages du dispositif expérimental.

Un **protocole de réalisation des traçages thermiques** a été établi : des conditions spécifiques sont nécessaires pour obtenir des résultats interprétables :

- ✓ **Condition initiale** de température de nappe **homogène** dans les ouvrages de suivi du dispositif expérimental. Pour ce faire, une période d'assec de l'ordre de 15 jours, des bassins 5-1 et 5-2, est nécessaire avant le début du traçage thermique.
- ✓ **Différence de température** de l'ordre de **5 °C** entre l'eau superficielle injectée dans le bassin et l'eau de nappe. Cette condition nécessite de réaliser les traçages thermiques

en périodes estivales ou hivernales, lorsque les différences thermiques sont les plus marquées.

- ✓ **Volume d'eau infiltré suffisant** pour que l'impact thermique se fasse ressentir dans les ouvrages éloignés du bassin : la période de mise en eau du bassin d'infiltration 5-2 doit donc être maintenue pendant une quinzaine de jours.
- ✓ **Période d'assec de l'ordre de 15 jours** en fin de traçage thermique permet d'analyser le retour à l'état initial, du point de vue des températures de nappe mais également des niveaux piézométriques.

**D'après les résultats des traçages thermiques réalisés** :
Avant le remplissage du bassin, **l'eau de nappe s'écoule naturellement du Nord vers le Sud**. De ce fait, lors de la mise en eau, le bassin alimente beaucoup plus le Sud que le Nord (fort gradient hydraulique et suivi de la propagation de température). La majeure partie de l'eau injectée sert donc à renforcer la barrière en rive droite du Vieux-Rhône, qui était déjà protégée par l'écoulement naturel.
La **viscosité de l'eau semble impacter la propagation du dôme hydraulique** : en période hivernale, l'eau injectée est plus froide qu'en période estivale, ce qui conduit à une vitesse de remontée de nappe plus lente.
Par ailleurs, la **lithologie joue un rôle non négligeable sur les transferts verticaux** (la couche moins perméable créé une zone de transferts atténués au droit du bassin 5-2).

**La barrière hydraulique : combien de temps perdure-t-elle après l'arrêt du bassin ?**

La barrière hydraulique générée par les bassins d'infiltration peut être caractérisée, pour chaque doublet de bassins, par le **gain de niveau piézométrique** constaté au cours des cycles de remplissage (battement de nappe) et par la **vitesse de relaxation du dôme hydraulique** à partir du moment où les bassins sont à l'arrêt.
Les données analysées montrent que la nappe est rehaussée en moyenne de 1 à 3 m selon les bassins considérés. La vitesse de relaxation du dôme hydraulique en période de nappe haute (vitesse de relaxation calculée sur les périodes où les bassins sont mis à l'arrêt pour cause de ZNS inférieure à 2 m d'épaisseur) est comprise entre 0,6 et 1,4 $m.j^{-1}$ selon les bassins.

Ainsi, dès lors que les bassins ne sont plus en fonctionnement, **la barrière hydraulique créée au droit de chaque couple de bassins semble perdurer pendant une durée d'environ 1 à 2 jours maximum**.

**L'indice d'infiltrabilité, un outil d'aide au suivi du colmatage du sable de fond de bassin**

Chaque bassin peut être caractérisé par un **indice d'infiltrabilité**, qui évolue au cours du temps (calculé mensuellement). Cet indice permet de visualiser l'évolution de la capacité d'infiltration de chaque bassin, en tenant compte des critères qui influencent les vitesses d'infiltration (hauteur d'eau, température de l'eau, temps de fonctionnement).

Prenant en considération la superficie de chaque bassin, l'indice d'infiltrabilité est un **outil de comparaison des capacités d'infiltration des bassins les uns par rapport aux autres,** et ce à tout instant de l'année.

Cet indice met notamment en évidence l'impact du colmatage de la couche de sable sur la diminution des vitesses d'infiltration. Si l'indice d'infiltrabilité devient trop faible, alors la **décision de renouveler le sable** de fond de bassin peut être actée. D'après les observations, les bassins 2-2 et 6-2 seraient prioritaires pour un renouvellement de leur couche de sable en 2018.

# Chapitre V

## Modélisation numérique hydro-thermique 3D sur l'ensemble du champ captant

Vers une compréhension approfondie des chemins de l'eau

***Sommaire***

**V.1. La réalisation du modèle numérique à grande échelle**
- V.1.1. Extension spatiale du modèle, géologie rencontrée et maillage
- V.1.2. Stratégie de modélisation
- V.1.3. Modélisation hydrodynamique en régime permanent
- V.1.4. Modélisation hydro-thermique en régime transitoire
- V.1.5. Améliorations apportées par calibration hydrodynamique
- V.1.6. Evaluation du modèle hydro-thermique après calibration

**V.2. L'interprétation des chemins de l'eau**
- V.2.1. Les sources d'alimentation des ouvrages de pompage du champ captant
- V.2.2. Les bassins d'infiltration : rôle de barrière hydraulique et impact thermique engendré
- V.2.3. Impact des conditions d'exploitation du captage sur l'origine de l'eau pompée dans les puits et forages du champ captant

**V.3. Quelles améliorations et perspectives d'utilisation de l'outil numérique ?**
- V.3.1. Améliorer les connaissances sur les échanges nappe-rivière
- V.3.2. Calibration des transferts de chaleur
- V.3.3. Un outil numérique, pour quelles applications futures ?

***Introduction***

Après avoir observé les phénomènes hydrodynamiques et thermiques à l'échelle du champ captant, notamment liés à la recharge artificielle de la nappe, un outil numérique a été développé. Cet outil est réalisé à partir du logiciel FEflow *[Diersch, 2013].*

Dans un premier temps seront présentés l'extension spatiale du modèle numérique et la stratégie de modélisation pour simuler l'écoulement et les transferts thermiques en régime transitoire à l'échelle du champ captant. Une évaluation du modèle numérique en régime transitoire sera présentée à la fin de cette première partie.

Une deuxième partie sera consacrée à l'interprétation des chemins de l'eau à partir des résultats de la simulation numérique. Ainsi, nous verrons que la modélisation numérique vient compléter les observations et expérimentations réalisées in-situ.

Enfin, une dernière partie permettra de définir les pistes d'amélioration possibles de l'outil numérique, ainsi que de ses possibles applications (scénarios prédictifs).

# Chapitre V : MODÉLISATION NUMÉRIQUE HYDRO-THERMIQUE 3D SUR L'ENSEMBLE DU CHAMP CAPTANT – *Vers une compréhension approfondie des chemins de l'eau*

Comme indiqué dans le Chapitre II, l'outil de simulation sélectionné pour cette modélisation grande échelle est le logiciel FEflow *[Diersch, 2013]*. L'outil numérique est ici mis en œuvre, dans le but de comprendre et caractériser les systèmes d'écoulements de la zone du champ captant de la Métropole de Lyon. Un système d'écoulement est défini par sa source d'alimentation, son sens d'écoulement et son exutoire.

La démarche générale de modélisation suit le schéma conceptuel présenté sur la Figure 68 *[Kiraly, 1997]*.
Le principe est, à partir d'un système réel complexe, de créer un schéma conceptuel abstrait basé sur les équations physiques adéquates, et d'en déduire un modèle numérique qui permet de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans les conditions souhaitées.

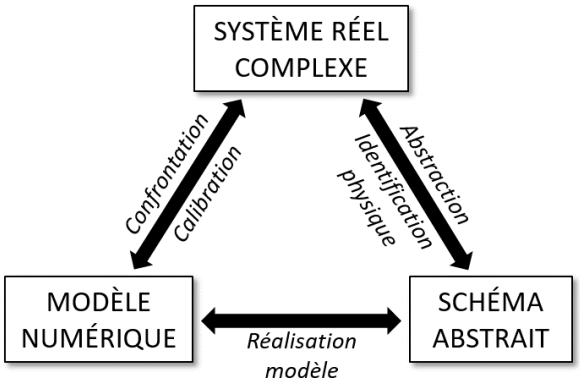



*Figure 68 : Schéma conceptuel de la démarche de modélisation [Modifiée d'après Kiraly, 1997]*

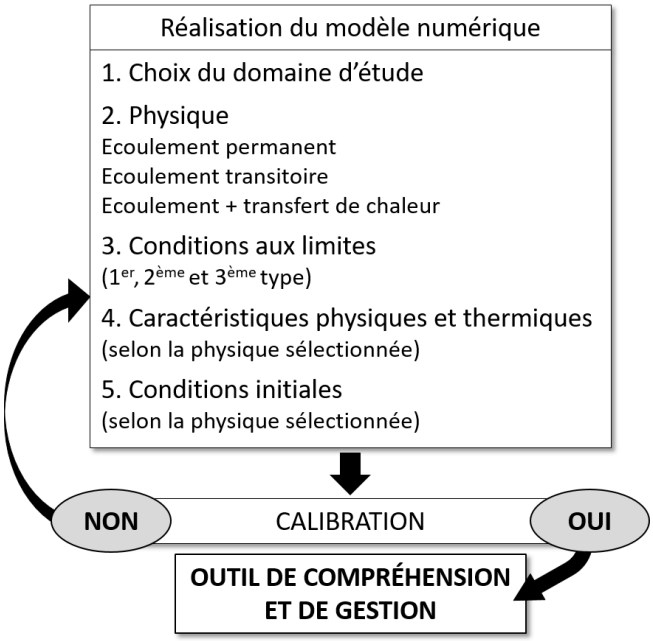



*Figure 69 : La réalisation d'un modèle numérique [Modifiée d'après Attard, 2017]*

La réalisation du modèle numérique nécessite : la définition d'un domaine d'étude, le choix de la physique, et la détermination des conditions aux limites, des conditions initiales et des caractéristiques physiques et thermiques (Figure 69).

L'étape suivante consiste à calibrer ce modèle numérique, en comparant les résultats de la simulation et les observations réalisées sur le terrain. Des modifications du modèle numérique peuvent survenir, en jouant notamment sur les caractéristiques physiques et thermiques et/ou sur les conditions initiales et conditions aux limites.
Lorsque la simulation reproduit correctement les phénomènes observés, le modèle devient un outil de compréhension et de gestion de la ressource (notamment en réalisant des scénarios prédictifs).

## V.1. La réalisation du modèle numérique à grande échelle

### V.1.1. Extension spatiale du modèle, géologie rencontrée et maillage

Pour simuler les écoulements à l'échelle du champ captant, il est nécessaire de tenir compte d'une zone plus étendue que la superficie du site de captage, notamment en amont, pour prendre en considération les sources d'alimentation du champ captant en provenance de la nappe des alluvions fluviatiles du Rhône, de la nappe de l'Est Lyonnais (couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines), et de la nappe de la Dombes (en direction du Nord). L'extension spatiale du domaine d'étude tient compte de la topographie de la zone mais aussi de la géologie rencontrée (Figure 70).

La limite Nord du modèle, qui correspond à la limite entre les alluvions du Rhône et le plateau de la Dombes (dépôts morainiques et dépôts tertiaires conglomératiques), longe les communes de Rillieux-La-Pape, Beynost et Montluel.

La limite Nord-Est du modèle est située dans les alluvions du Rhône, et elle est fixée entre Montluel et le barrage de Jons (diffluence du Canal de Miribel et du Canal de Jonage), le long de l'isopièze 180 mNGF de la carte piézométrique du BRGM *[Collin et al., 1973]*, présentée en Annexe 10.

Les limites Est, Sud et Sud-Ouest du domaine correspondent à la limite entre les alluvions fluvio-glaciaires et les dépôts morainiques, en longeant notamment les communes de Jonage, Pusignan, Colombier-Saugnieu, Saint-Bonnet-de-Mûre, Saint-Priest et enfin Bron. Cette extension spatiale permet d'englober dans le modèle les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines, ainsi que la butte glaciaire de séparation de ces deux couloirs (Figure 70).

L'aval hydraulique du domaine d'étude, à l'Ouest, est de nouveau situé dans les dépôts fluviatiles modernes du Rhône. La limite est fixée le long de l'isopièze 165 mNGF de la carte piézométrique du BRGM *[Collin et al., 1973]* dans le but d'englober la totalité de la zone de captage de Crépieux-Charmy.

La superficie du domaine d'étude représente un total de 21 060 ha, dont 375 ha pour le champ captant.

Sur l'ensemble du domaine d'étude, trois types de formations géologiques sont rencontrées à l'affleurement (illustrées sur la Figure 70) :

- ✓ Les alluvions fluviatiles modernes sur la moitié nord du domaine d'étude,
- ✓ Les alluvions fluvioglaciaires au sein des couloirs de Meyzieu et de Décines,
- ✓ Les dépôts glaciaires au niveau de la butte de séparation des deux couloirs fluvioglaciaires.

L'altitude de la surface du modèle incorpore les données du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de l'IGN, selon une précision à 10 m. Le fond du modèle correspond à l'altitude du toit de la molasse, considérée comme étant le substratum (connu en certain points, et interpolé entre ces points), dont la carte est illustrée en Annexe 1.

La résolution numérique du code de calcul FEflow utilise une approche en éléments finis (présentée au Chapitre II). Les éléments finis sont des éléments prismatiques à 6 nœuds de calcul. Le nombre d'éléments finis présents dans le modèle numérique dépend du raffinement du maillage. Il a été choisi de le raffiner le long des différents cours d'eau et des retenues d'eau (lac de Miribel, lac du Grand Large), au niveau des ouvrages de pompage, le long des bordures des bassins d'infiltration, ainsi que le long de la butte glaciaire (Figure 70).

Pour pouvoir reproduire la complexité lithologique selon la profondeur, sans trop augmenter le temps de calcul, le modèle numérique est discrétisé en six couches selon la verticale (quatre couches sont consacrées aux alluvions fluviatiles du Rhône, une couche représente les alluvions fluvio-glaciaires, et la dernière correspond aux dépôts glaciaires).
Le modèle réalisé dénombre 266 154 éléments finis par couche, soit un total de 1 596 924 éléments finis sur l'ensemble du modèle en considérant les six couches selon la profondeur (266 154 * 6).

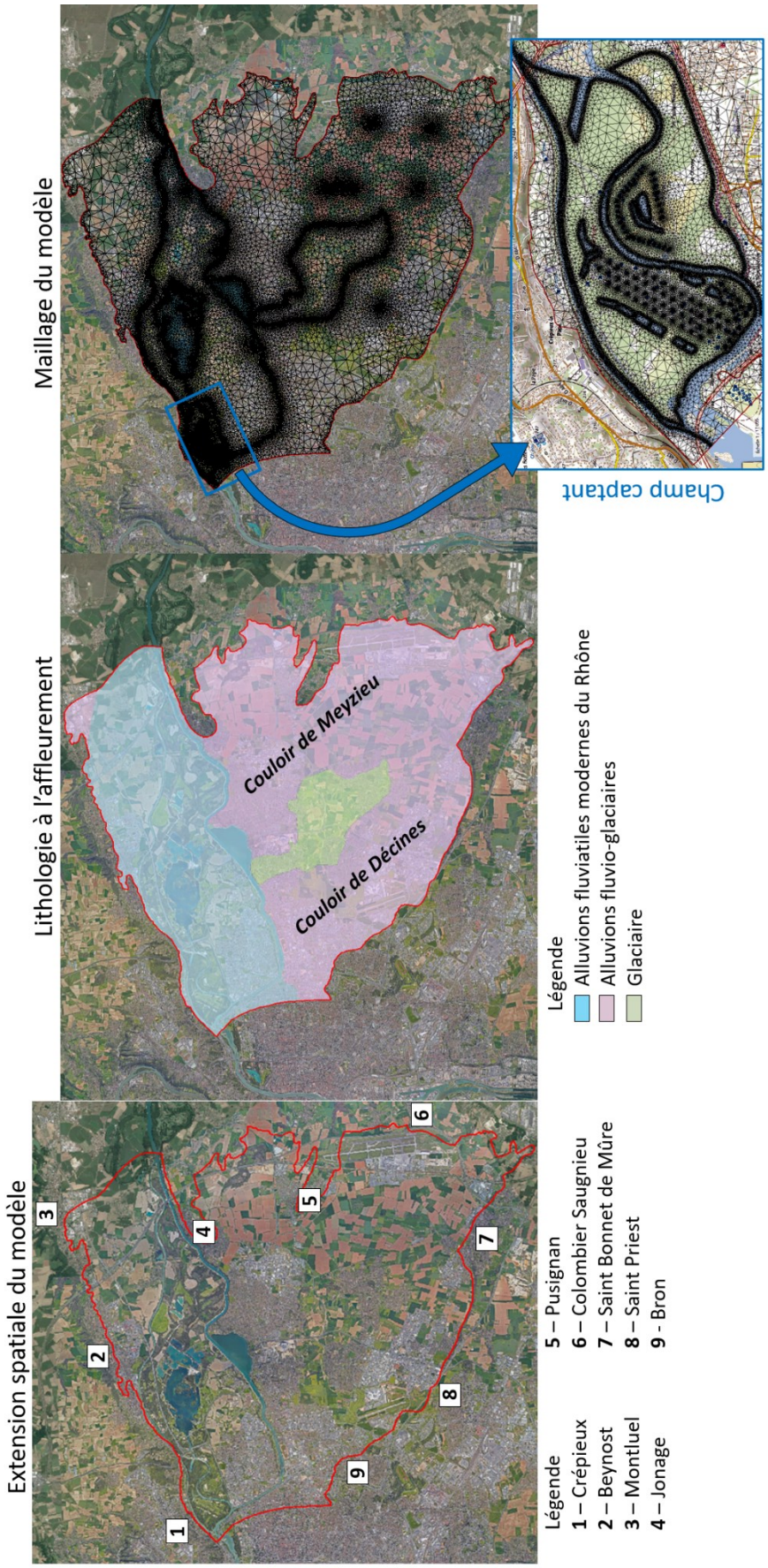



*Figure 70 : Présentation de l'extension spatiale, de la lithologie à l'affleurement et du maillage du modèle FEflow*

### V.1.2. Stratégie de modélisation

L'objectif de cette modélisation grande échelle est de simuler l'écoulement et les transferts de chaleur à l'échelle du champ captant de Crépieux-Charmy, sur une période d'un an. Pour ce faire, une stratégie de modélisation a été adoptée :

✓ **1ère étape : Modélisation hydrodynamique en régime permanent**

La première étape consiste à représenter correctement les apports d'eau souterraine en amont du champ captant, par les couloirs fluvio-glaciaires et par la nappe alluviale du Rhône. Pour rappel, l'écoulement en régime permanent est simulé grâce à l'équation de diffusivité (Eq. II-16), explicitée dans le Chapitre II :

$$\vec{\nabla}.(K_s\,\vec{\nabla}H) = 0 \qquad \textit{Eq. V-1}$$

Où $K_s$ est la conductivité hydraulique à saturation (en m.s$^{-1}$) et $H$ la charge hydraulique (en m).

La calibration de cette simulation en régime permanent est réalisée sur une carte piézométrique du BRGM *[Collin et al., 1973]* établie en régime stationnaire (Annexe 10), à partir de conditions expérimentales disponibles les plus proches possible de nos hypothèses de travail. Cette carte de 1973 correspond à une période où peu de pompages étaient en service et les bassins d'infiltration n'existaient pas. Du fait de l'équation de diffusivité (Eq. V-1), le calage du modèle repose essentiellement sur le choix du champ de conductivités hydrauliques à saturation et des conditions aux limites sur l'ensemble du domaine d'étude.

L'état final obtenu correspond à la condition initiale à imposer pour la deuxième étape de modélisation.

✓ **2ème étape : Simulation de l'écoulement en régime transitoire**

Pour cette étape, on se focalise sur la zone du champ captant de Crépieux-Charmy. Cette simulation est réalisée sur une période définie, d'assez longue durée : l'année 2016.
En régime transitoire, l'équation de diffusivité est différente de celle en régime permanent (Eq. V-1), puisqu'elle fait appel à une caractéristique physique de plus : le coefficient d'emmagasinement ($S_{ya}$). Explicitée dans le Chapitre II (Eq. II-15), cette équation s'écrit :

$$\vec{\nabla}.(K_s\,\vec{\nabla}H) = S_{ya}\frac{\partial H}{\partial t} \qquad \textit{Eq. V-2}$$

Où $S_{ya}$ est le coefficient d'emmagasinement apparent, et $t$ le temps (en s).

La comparaison entre les résultats de cette simulation à l'échelle du champ captant et les données issues des mesures de terrain permet de calibrer le modèle de manière à reproduire correctement l'écoulement. Du fait de l'expression de l'équation de diffusivité (Eq. V-2), la calibration repose sur le choix des champs de conductivités hydrauliques à saturation, du coefficient d'emmagasinement et des conditions initiales et conditions aux limites imposées.

✓ **3ème étape : Intégration du transfert de chaleur en régime transitoire**

Comme présenté dans le Chapitre II, le transfert de chaleur est simulé par l'équation de convection-conduction-dispersion (Eq. II-30), qui s'écrit :

$$\vec{\nabla}.\left(\lambda_A\nabla T\ - Cv_f\,\vec{q}\,T\right) = \ Cv_a\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \textit{Eq. V-3}$$

Où $\lambda_A$ est la conductivité globale équivalente de l'aquifère (en J.m$^{-1}$.s$^{-1}$.K$^{-1}$), $T$ (en °C) est la température du milieu poreux (considérée équivalente à la température de l'eau de nappe), $Cv_f$ et $Cv_a$ sont les capacités thermiques volumiques respectivement de la phase fluide et du milieu poreux (en J.m$^{-3}$.K$^{-1}$), et $q$ est le flux de Darcy (en m.s$^{-1}$).

Les résultats de la simulation des transferts de chaleur au cours de l'année 2016 sont comparés aux mesures acquises sur le terrain, sans passer par l'étape de calibration des caractéristiques thermiques et des conditions aux limites du transfert de chaleur. Les valeurs des caractéristiques thermiques sont issues de la bibliographie, et seules des conditions aux limites de 1er type seront mises en œuvre.

### V.1.3. Modélisation hydrodynamique en régime permanent

#### *V.1.3.1. Les caractéristiques physiques à renseigner*

En régime permanent, l'équation de diffusivité nécessite de renseigner une seule caractéristique physique : la **conductivité hydraulique à saturation**, en tout point du modèle. Considérées comme **isotropes** dans la nappe, les conductivités hydrauliques sont identiques selon les trois directions de l'espace. Les conductivités hydrauliques initiales choisies dans le modèle à grande échelle proviennent en grande majorité des différents modèles réalisés par le BRGM *[Collin et al., 1973 ; Rousselot and Beguin, 1975 ; Rousselot, 1975]* et des essais de pompage sur la zone de captage de Crépieux-Charmy effectués dans les années 1978-1981 par le BRGM *[Barthélémy, 1979 ; Barthélémy, 1980 ; Plongeron et al., 1981]* et plus récemment par S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*. La carte de ces conductivités hydrauliques à saturation est présentée sur la Figure 74.

#### *V.1.3.2. Condition initiale et conditions aux limites imposées*

Dans le but de faciliter la résolution numérique du régime permanent, il a été choisi de partir d'un modèle totalement saturé (la condition initiale de charge hydraulique est imposée égale à la topographie sur l'ensemble du domaine d'étude), et d'atteindre un état stationnaire en simulant une longue période en imposant des conditions aux limites moyennes annuelles, constantes dans le temps.

Les différentes conditions aux limites imposées dans le domaine d'étude sont les suivantes (Figure 71) :

- ✓ Condition de **charge imposée** sur la partie amont et aval des alluvions du Rhône.

  Partie amont des alluvions fluviatiles : $H$ = 180 mIGN69
  Partie aval des alluvions fluviatiles : $H$ = 165 mIGN69

  Ces valeurs sont issues de la carte piézométrique qui sert de référence pour le calage du modèle *[Collin et al., 1973]*. Cette carte est reportée en Annexe 10.

  Sur l'ensemble du lac de Miribel, une condition de suintement est imposée (puisque ce lac correspond à une mise à nu de la nappe alluviale).
- ✓ Condition de **flux imposé** sur les bordures Nord, Est, Sud et Sud-Ouest du modèle, correspondant à la pluie efficace provenant de chaque versant situé à l'extérieur du domaine d'étude. Le flux n'est pas identique sur toutes les zones participant à l'alimentation du domaine d'étude puisqu'il dépend de la surface du versant considéré.
- ✓ **Pompage moyen annuel** imposé sur chaque ouvrage de pompage (pompages au sein du couloir fluvio-glaciaire de Meyzieu, et des différents captages de la Métropole de Lyon situés dans le domaine d'étude : Afrique, Les Vernes, Garenne, Rubina et le champ captant de Crépieux-Charmy).
- ✓ **Pour les cours d'eau** : la condition aux limites imposée pour les cours d'eau pourrait correspondre à une condition de 1$^{er}$ ou de 3$^{ème}$ type (Dirichlet ou Cauchy, Chapitre II). Du fait du manque de données concernant les potentiels hydrauliques à proximité des cours d'eau en amont du champ captant, l'estimation du coefficient d'échange nappe-rivière s'avère difficile. De ce fait, il a été choisi d'imposer une condition de 1$^{er}$ type le long des cours d'eau pour la simulation en régime permanent : la charge imposée dans les cours est égale au niveau piézométrique issu de la carte piézométrique de référence *[Collin et al., 1973]*.
- ✓ **Pluie efficace**, imposée sur la totalité de la surface du modèle, et estimée à 330 mm.an$^{-1}$. Cette estimation est réalisée en considérant que l'eau qui s'infiltre dans la nappe représente un peu plus d'un tiers des précipitations totales. D'après Météo-France, les précipitations moyennes annuelles à Lyon sont évaluées à 832 mm.an$^{-1}$ (calculées sur la période 1981-2010).

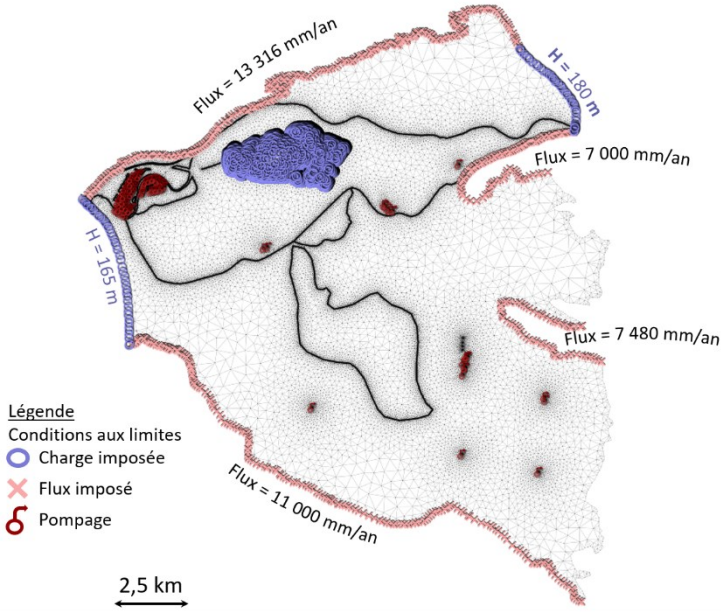



*Figure 71 : Conditions aux limites de charge imposée, flux imposé et pompage pour le modèle à grande échelle, en régime stationnaire*

Les bords du domaine qui ne présentent aucune condition aux limites imposée sont considérés comme étant des limites à flux nuls ( $\vec{\nabla} H.\vec{n} = 0$ ).

#### *V.1.3.3. Calibration du modèle*

L'objectif de ce modèle en régime stationnaire est de reproduire la carte piézométrique du BRGM *[Collin et al., 1973]*. La calibration repose essentiellement sur des choix de conductivités hydrauliques à assigner en chaque élément du maillage du domaine, et sur les choix de conditions aux limites à imposer.

Le modèle « avant calage » correspond à la simulation pour laquelle les conductivités hydrauliques sont issues des modèles BRGM *[Rousselot and Beguin, 1975 ; Rousselot, 1975, Collin et al., 1973]*. Pour pouvoir comparer les résultats issus de cette simulation « avant calage » avec la carte piézométrique de référence, des points de contrôle ont été définis dans les alluvions du Rhône ainsi que dans les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines (localisation des points de contrôle sur la Figure 73). En comparant la charge hydraulique de référence et celle calculée par la simulation, une différence de +3 m est constatée en moyenne pour les points de contrôle situés dans les alluvions du Rhône, et de -5,9 et -4,5 m respectivement dans les alluvions fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines (Figure 72).

Suite aux ajustements opérés en termes de conductivités hydrauliques sur l'ensemble du domaine d'étude (Tableau 26), la nouvelle carte piézométrique calculée est considérablement améliorée et peut être considérée comme suffisamment proche de la carte piézométrique de référence (Figure 72 et Figure 73) : le système d'écoulement simulé est similaire à celui observé (sens d'écoulement cohérents avec la carte piézométrique de référence et gradients hydrauliques satisfaisants). Suite à ce travail de calage des conductivités hydrauliques, les charges hydrauliques calculées et mesurées sur les points de contrôle ne présentent plus qu'une différence de 0,34 m en moyenne dans les alluvions du Rhône, et de 0,32 m et 0,42 m respectivement dans le couloir de Meyzieu et de Décines (Figure 72).

Dans la partie centrale des alluvions du Rhône, aucun point de contrôle n'est présent. Ceci est dû au fait que le lac de Miribel n'était pas présent à l'époque du tracé de la carte piézométrique de référence. Or, ce lac joue un rôle non négligeable sur les écoulements. Comparer la carte de référence et les charges hydrauliques calculées dans cette zone n'a donc pas de sens.

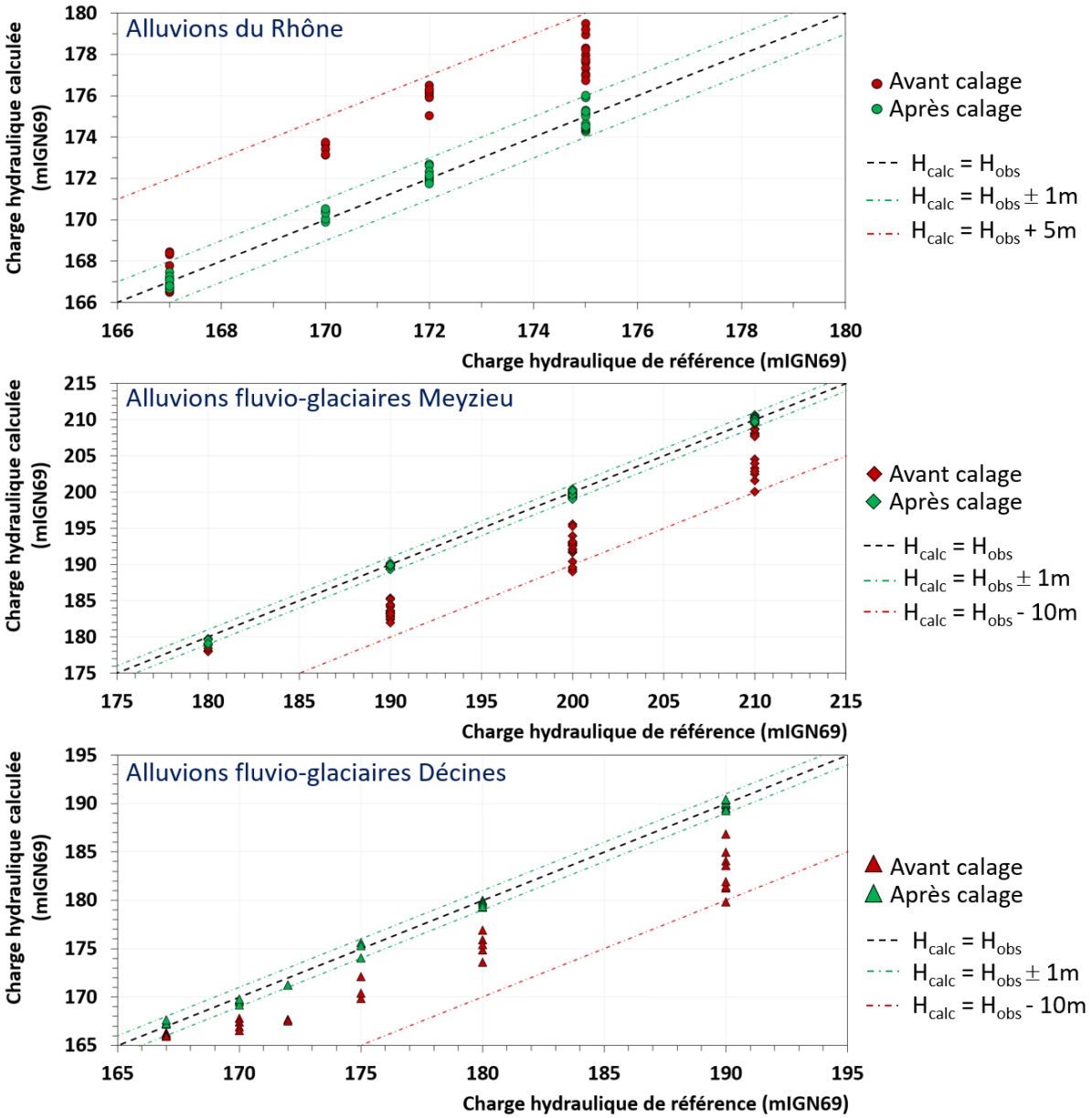



*Figure 72 : Comparaison des charges hydrauliques calculées et observées avant et après calage des conductivités hydrauliques, en dissociant les points de contrôles situés dans les alluvions du Rhône et dans les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines*

Pour quantifier l'écart entre les résultats issus des modèles et ceux issus des observations (carte piézométrique de référence), il est possible de calculer l'erreur-type normalisée ou nRMSE (**n**ormalized **R**oot **M**ean **S**quare **E**rror), selon l'équation :

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_{calc} - H_{obs})^2}{n_{PC}}} * \frac{1}{H_{max} - H_{min}} \qquad \textit{Eq. V-4}$$

Avec $n_{PC}$ le nombre de points de contrôle ; $H_{calc}$, $H_{mes}$, $H_{max}$ et $H_{min}$ respectivement les charges hydrauliques calculées, observées, maximales et minimales (en mIGN69).

Le calage du modèle en termes de conductivités hydrauliques permet d'améliorer cette erreur-type. Le nRMSE du modèle initial (avant calage) et du modèle final (après calage) enregistre un gain considérable :

- ✓ Passage de nRMSE = 23,7 à 3,04 % dans la partie des alluvions du Rhône,
- ✓ Passage de nRMSE = 19,7 à 1,21 % dans le couloir de Meyzieu,
- ✓ Passage de nRMSE = 21,0 à 2,02 % dans le couloir de Décines.

Le Tableau 26 répertorie les gammes de valeurs de conductivités hydrauliques rencontrées, pour chaque compartiment géologique, avant et après calibration du modèle numérique. Ces champs de valeurs de $K_s$ sont également illustrés sur la Figure 74. Les gammes de conductivités hydrauliques (Tableau 26) ainsi que la carte piézométrique simulée en régime permanent (Figure 73), sont en adéquation avec d'autres modèles existants *[Tribouillard, 2013]*.

| | **Alluvions fluviatiles du Rhône** | **Alluvions fluvio-glaciaires** | | **Dépôts glaciaires** |
|---|---|---|---|---|
| | | **Couloir de Meyzieu** | **Couloir de Décines** | |
| **Avant calage** Valeurs de conductivités hydrauliques issues des modèles BRGM | De $5{,}0.10^{-2}$ à $3{,}0.10^{-3}$ m.s$^{-1}$ | De $7{,}9.10^{-2}$ m.s$^{-1}$ au centre du couloir à $1{,}0.10^{-5}$ m.s$^{-1}$ sur les bordures | De $5{,}0.10^{-2}$ m.s$^{-1}$ au centre du couloir à $1{,}0.10^{-5}$ m.s$^{-1}$ sur les bordures | - |
| **Après calage** en régime permanent | De $4{,}0.10^{-2}$ à $3{,}0.10^{-4}$ m.s$^{-1}$ | De $1{,}3.10^{-1}$ m.s$^{-1}$ au centre du couloir à $2{,}0.10^{-6}$ m.s$^{-1}$ sur les bordures | De $3{,}9.10^{-2}$ m.s$^{-1}$ au centre du couloir à $1{,}5.10^{-5}$ m.s$^{-1}$ sur les bordures | $1{,}0.10^{-5}$ m.s$^{-1}$ |

*Tableau 26 : Gammes de conductivités hydrauliques retrouvées au sein des différentes lithologies avant et après calibration du modèle en régime permanent*

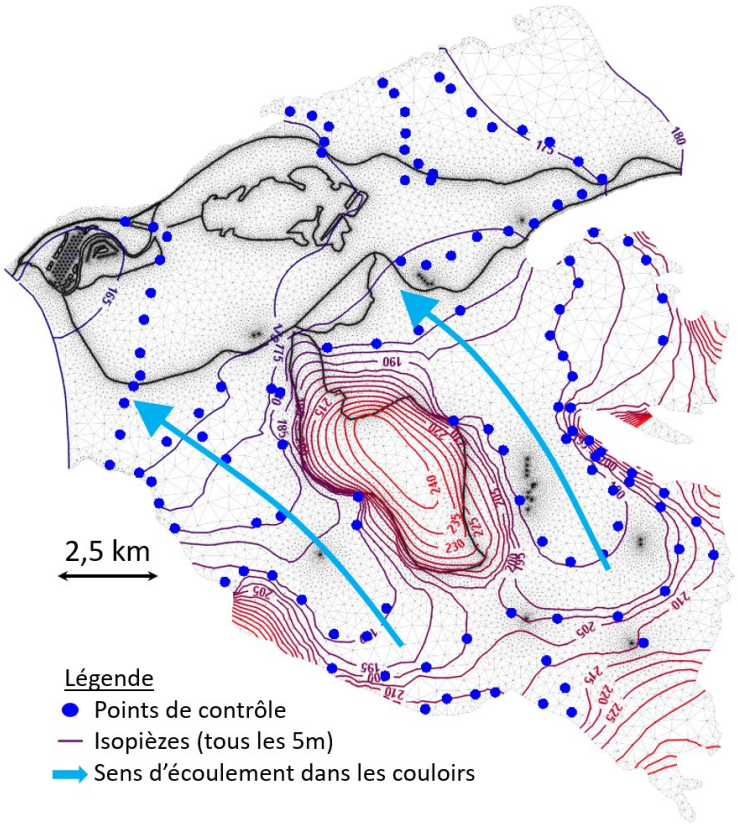



*Figure 73 : Localisation des points de contrôle et tracé de la carte piézométrique calculée après la calibration des conductivités hydrauliques*

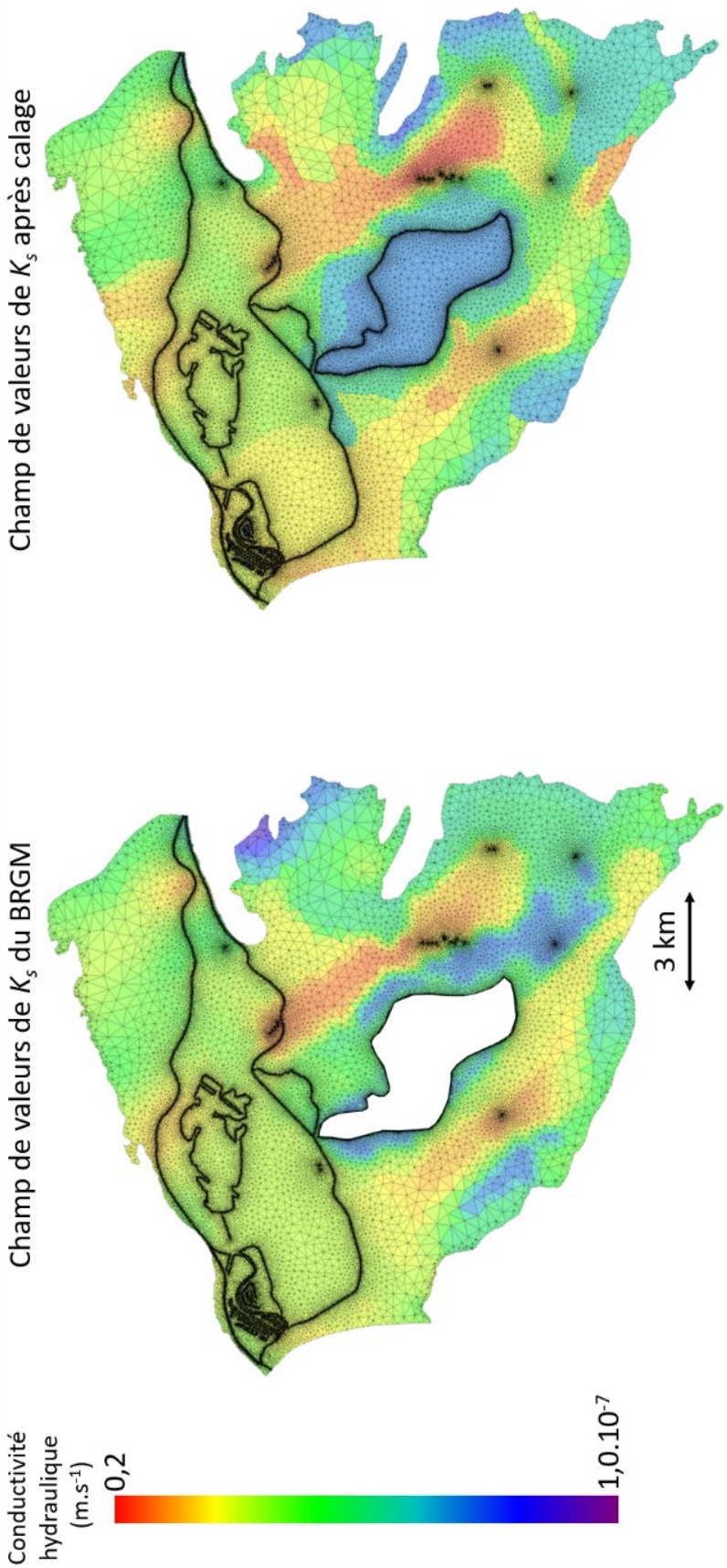



*Figure 74 : Champ de conductivités hydrauliques à saturation issues des différents modèles du BRGM [Collin et al., 1973 ; Rousselot and Beguin, 1975 ; Rousselot, 1975] et après calibration de la piézométrie.*

### V.1.4. Modélisation hydro-thermique en régime transitoire

#### *V.1.4.1. Choix de la période simulée*

L'année 2016 a été retenue comme période de simulation. Divers avantages liés au choix de cette période sont à souligner (Figure 75) :

- ✓ L'année 2016 enregistre les **évolutions temporelles d'un point de vue des conditions hydrologiques** d'une part (illustrées par la courbe noire de la Figure 75 : périodes de crues, notamment au mois de juin 2016 lors des chasses des barrages du Rhône, et périodes longues de niveau d'eau faible dans les cours d'eau, comme par exemple entre août et octobre), et **d'autre part d'un point de vue des conditions d'exploitation** (le volume d'eau infiltré par l'ensemble des bassins d'infiltration et le volume d'eau exhauré par la totalité des ouvrages de pompages varient fortement au cours du temps, comme le montre la Figure 75).
  De ce fait, les ouvrages de suivi de la ressource enregistrent des variations piézométriques au cours du temps (comme par exemple le piézomètre M12 sur la Figure 75 : qui est situé au centre de la prairie de captage (Figure 28)).
- ✓ En termes de températures, simuler une année complète a pour avantage de présenter des **variations thermiques conséquentes dans les eaux de surface** : l'eau qui s'infiltre dans la nappe via les cours d'eau ou les bassins d'infiltration, voit sa température évoluer de +04 à +26 °C au cours de l'année 2016. Cette variation de température des eaux de surface influence les températures souterraines de manière non négligeable (les ouvrages de suivi enregistrent une gamme de température de nappe, sur le site de captage, comprise entre 6 et 25 °C au cours de l'année 2016).

Les données issues des mesures de terrain (volumes infiltrés et température de l'eau dans les bassins d'infiltration, volumes exhaurés par les ouvrages de pompage, …) correspondent à des conditions aux limites à renseigner dans le modèle numérique. L'acquisition de mesures sur le terrain et leur validation sont donc deux étapes primordiales pour le paramétrage du modèle numérique.

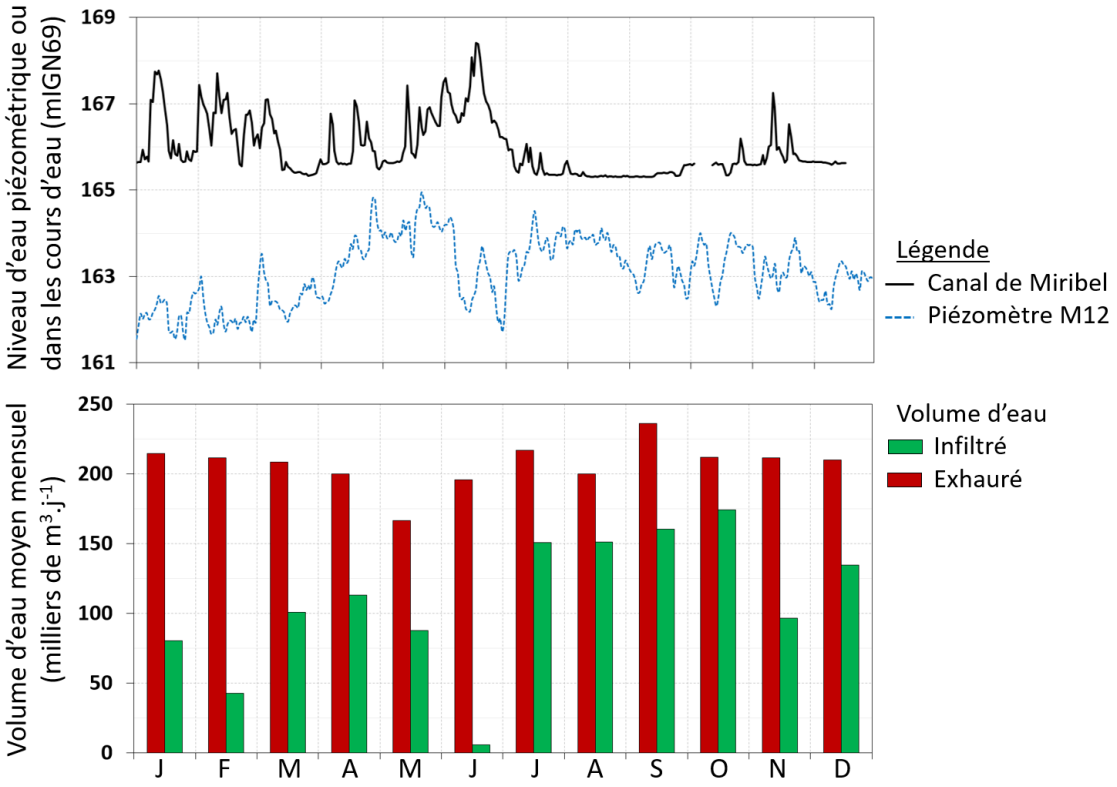



*Figure 75 : Evolution des principales données de terrain au cours de l'année 2016*

#### *V.1.4.2. Caractéristiques physiques et thermiques*

Parmi les caractéristiques physiques et thermiques à renseigner dans le modèle numérique en régime transitoire, certaines sont définies à priori, en se basant sur les résultats de la calibration de la simulation en régime permanent ou sur des valeurs issues de la bibliographie, et d'autres sont définies par calibration de la simulation en régime transitoire.

D'après l'équation de diffusivité en régime transitoire (reportée en Eq. V-2), la simulation de l'écoulement nécessite de renseigner le champ de conductivités hydrauliques à saturation et le coefficient d'emmagasinement en tout point du modèle (ou la porosité efficace disponible à l'écoulement dans le cas d'une nappe libre). Les valeurs de $K_s$ proviennent du résultat du calage de la simulation en régime permanent (gammes de conductivités hydrauliques selon la lithologie renseignées dans le Tableau 26). Seule la conductivité hydraulique au droit des bassins d'infiltration est modifiée : du fait des observations et des expérimentations réalisées dans les bassins d'infiltration (Chapitres III et IV), une conductivité hydraulique à saturation de $8.10^{-6}$ m.s$^{-1}$ est assignée sur une couche de 1 m d'épaisseur afin de représenter la couche compactée (illustrée par exemple pour le bassin 5-2 sur la Figure 81).
Une porosité efficace ($\varepsilon_{eff}$) de 20 % est assignée en tout point du domaine d'étude. Cette valeur de porosité est typiquement rencontrée dans les milieux alluvionnaires *[de Marsily, 1986]*. Cet ordre de grandeur avait été estimé par traçages à l'iode et à la rhodamine sur le champ captant *[Rousselot, 1980 ; Darmendrail, 1987]*, et confirmé par différents tests de simulations numériques lors des travaux de S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*.

Au cours de l'étape de calibration du modèle en régime transitoire, les valeurs de conductivités hydrauliques et de porosité efficace pourront être modifiées afin de représenter correctement les écoulements, en se focalisant **exclusivement sur la zone du champ captant de Crépieux-Charmy**.

Les caractéristiques thermiques nécessaires pour résoudre l'équation du transfert de chaleur (Eq. V-3) sont quant à elles définies à priori. Listées dans le Tableau 27, ces caractéristiques se voient attribuer les valeurs issues de la bibliographie *[Diersch, 2013]*. La calibration du modèle numérique n'étant pas réalisé pour les transferts thermiques, les caractéristiques thermiques resteront constantes pour la suite des simulations numériques.

* Rappels : $Cv_f$ et $Cv_s$ sont les capacités thermiques volumiques (phase liquide et solide), $\lambda_f$ et $\lambda_s$ sont les conductivités thermiques (phase liquide et solide), $\alpha_L$ et $\alpha_T$ sont les dispersivités longitudinales et transversales.

| **Caractéristiques physiques** | **Alluvions fluviatiles du Rhône** | **Alluvions fluvio-glaciaires et formations glaciaires** |
|---|---|---|
| $K_s$ | $K_s$ issues du calage en régime permanent (Tableau 26), A caler sur la zone du champ captant | $K_s$ issues du calage en régime permanent (Tableau 26) |
| $\varepsilon_{eff}$ | A caler sur la zone du champ captant | |
| **Caractéristiques thermiques*** | **En tout point du modèle** | |
| $\varepsilon_{eff\ thermique}$ | $\varepsilon_{eff\ thermique} = \varepsilon_{eff}$ | |
| $Cv_f$ | 4,2 MJ.m$^{-3}$.K$^{-1}$ | |
| $Cv_s$ | 2,52 MJ.m$^{-3}$.K$^{-1}$ | |
| $\lambda_f$ | 0,65 J.m$^{-1}$.s$^{-1}$.K$^{-1}$ | |
| $\lambda_s$ | 3,0 J.m$^{-1}$.s$^{-1}$.K$^{-1}$ | |
| $\alpha_L$ | 5 m | |
| $\alpha_T$ | 0,5 m | |

*Tableau 27 : Caractéristiques physiques et thermiques sélectionnées*

### *V.1.4.3. Conditions initiales et conditions aux limites imposées*

**Conditions initiales – Piézométrie et thermique**

A l'état initial de la simulation en régime transitoire, la charge hydraulique *H* est définie en tout point comme étant égale au résultat de la fin de la simulation du régime permanent.

Pour la température, une valeur initiale homogène de 14 °C est assignée en tout point du domaine d'étude (il s'agit de la température moyenne annuelle de la nappe dans le champ captant, estimée à partir de données acquises in-situ Section III.1.1.1.3).

**Conditions aux limites concernant la simulation de l'écoulement**

- ✓ **La pluie efficace à la surface du sol**

A partir des données de pluviométrie *[Métropole de Lyon, 2017]* et d'évapotranspiration *[Météo-France, 2017]* sur la station de Bron sur les années 2015 et 2016, la pluie efficace a pu être estimée pour chaque décade de l'année 2016 *[Brochet and Gerbier, 1974].* Cette méthode d'estimation de la pluie efficace nécessite de tenir compte de la réserve utile du sol (notée RU et qui dépend du type de sol), et de la réserve facilement utilisable (notée RFU, et qui dépend de l'enracinement des sols). Dans notre cas, nous considérons que RU = 100 mm (correspondant aux sols sableux à argileux d'après *Jamagne et al., 1977*) et RFU = ½ RU = 50 mm. La pluie efficace estimée par cette méthode est considérée spatialement homogène à la surface de l'ensemble du domaine d'étude.

- ✓ **Les flux entrants sur les bordures du domaine**

Les flux entrants sur les bordures du domaine d'étude sont identiques à celles renseignées lors de la simulation en régime permanent, et sont donc constantes dans le temps.

- ✓ **Les charges imposées à l'amont et à l'aval des alluvions du Rhône**

Les charges hydrauliques imposées sur les bordures des alluvions ont été définies à l'aide de deux piézomètres de suivi situés en dehors du domaine d'étude (Tableau 28), dont les données sont disponibles sur le site internet ADES. Ces deux piézomètres permettent de connaitre les variations de niveaux piézométriques enregistrés dans le temps. Ces variations sont ensuite incorporées à la charge hydraulique constante qui était imposée lors de la simulation en régime permanent (à savoir, 180 mIGN69 à l'amont et 165 mIGN69 à l'aval).

| Localisation | Lieu | N° BSS | Producteur de données |
|---|---|---|---|
| Bordure amont | Balan | 06991X0220/PZ | Conseil départemental de l'Ain |
| Bordure aval | Campus de la Doua | 06987A0186/S | BRGM |

*Tableau 28 : Ouvrages de suivi pour la création des bordures amont et aval des alluvions du Rhône*

De cette manière, les conditions de charge imposée sur les bordures amont et aval des alluvions de Rhône tiennent compte de l'évolution temporelle du niveau piézométrique réellement enregistré. A l'amont, la charge hydraulique imposée dans le modèle n'évolue que peu (comprise entre 179,7 et 180,4 mIGN69). A l'aval, les variations sont plus soutenues au cours de l'année (oscillations piézométriques comprises entre 164,2 et 166,2 mIGN69).

- ✓ **Les pompages et les bassins d'infiltration**

Chaque ouvrage de pompage (111 puits et forages possiblement actifs sur le champ captant + ouvrages de pompage des captages périphériques de la Métropole de Lyon) se voit imposer un débit pompé moyen journalier (en $m^3.j^{-1}$) tout au long de l'année 2016.

Pour les bassins d'infiltration du champ captant de Crépieux-Charmy, une chronique de la vitesse d'infiltration (en $m.j^{-1}$) est assignée, au pas de temps journalier, pour chacun des 12 bassins. Ces vitesses d'infiltration sont estimées à partir des chroniques de données brutes des volumes d'eau injectés dans les bassins, et des temps de mise en eau des bassins.

- ✓ **Les cours d'eau**

Sur la zone du champ captant, les cours d'eau se voient attribuer une condition de Cauchy (ou condition de 3ème type). Comme expliqué dans le Chapitre II, cette condition nécessite d'imposer une charge en tout point des cours d'eau, ainsi qu'un coefficient d'échange, noté $\Phi$, et exprimé en $j^{-1}$ (Eq. II-17).

Disposant d'une seule mesure de hauteur d'eau pour chacun des cours d'eau (Figure 16), une interpolation linéaire est réalisée pour connaitre la hauteur d'eau en tout point. Cette charge imposée sur l'ensemble des cours d'eau évolue donc dans l'espace et dans le temps (prise en compte des chroniques de mesures de niveau d'eau dans les cours d'eau de l'année 2016 dans sa totalité).
Concernant les coefficients d'échange nappe-rivière, ils sont considérés homogènes sur l'ensemble de chaque cours d'eau. Les valeurs sont issues du calage du modèle numérique développé par S. Loizeau sur une zone réduite du champ captant *[Loizeau, 2013]*, mais adaptées pour une couche colmatée d'un mètre d'épaisseur, soit :

- **Canal de Miribel** : $\Phi = 8{,}64.10^{-2}\ j^{-1}$ ;
- **Vieux-Rhône** : $\Phi = 8{,}64.10^{-3}\ j^{-1}$ ;
- **Canal Sud** : $\Phi = 8{,}64.10^{-3}\ j^{-1}$ (estimé identique à celui du Vieux-Rhône).

En dehors de la zone du champ captant, les cours d'eau se voient attribuer une condition de 1er type (comme pour la simulation en régime permanent). Cette méthode est appliquée sur la zone amont du champ captant puisque le coefficient d'échange nappe-rivière est difficile à quantifier (manque de données le long des cours d'eau). La charge qui est imposée dans le cours d'eau provient d'une interpolation linéaire entre les conditions de charges hydrauliques amont et aval du domaine d'étude, qui évoluent au cours du temps. Imposer la charge hydraulique dans le cours d'eau en tant que niveau d'eau permet ainsi de reproduire correctement la réaction de nappe en période de crue.
Cette condition limite pourrait être améliorée, en calant les échanges nappe-rivière sur la partie amont du champ captant en utilisant des mesures de potentiel hydraulique dans des ouvrages proches des cours d'eau.

**<u>Conditions aux limites concernant la simulation des transferts thermiques</u>**
Seules des conditions aux limites de 1er type sont mises en œuvre :

- ✓ **Limite amont et aval des alluvions fluviatiles du Rhône**

Sur les limites amont et aval des alluvions du Rhône, une température de nappe de 14 °C (constante dans le temps) est imposée sur toute l'épaisseur du domaine.

- ✓ **Température des eaux de surface dans les cours d'eau et les bassins d'infiltration**

Une température moyenne décadaire est imposée pour chaque cours d'eau et chaque retenue d'eau (elle est considérée comme spatialement homogène pour chaque entité, mais elle varie dans le temps, comme illustré sur la Figure 76). La température dans les cours d'eau est comprise entre +5 et +24 °C au cours de l'année. Le Canal de Jonage et le Vieux-Rhône enregistrent des températures assez similaires alors que la température du Canal de Miribel a tendance à être plus faible (-1 à -2 °C, Annexe 6). Les chroniques de mesures étant très incomplètes sur le Canal Sud, la température imposée sur ce cours d'eau est considérée identique à celle du Vieux-Rhône. Le lac de Miribel enregistre quant à lui une gamme de températures un peu plus étendue (comprise entre +4 et +26 °C).
Pour les bassins d'infiltration, une température moyenne journalière est imposée, seulement au cours des périodes de fonctionnement de chaque bassin (ce qui explique la discontinuité des chroniques, comme présenté sur la Figure 76).

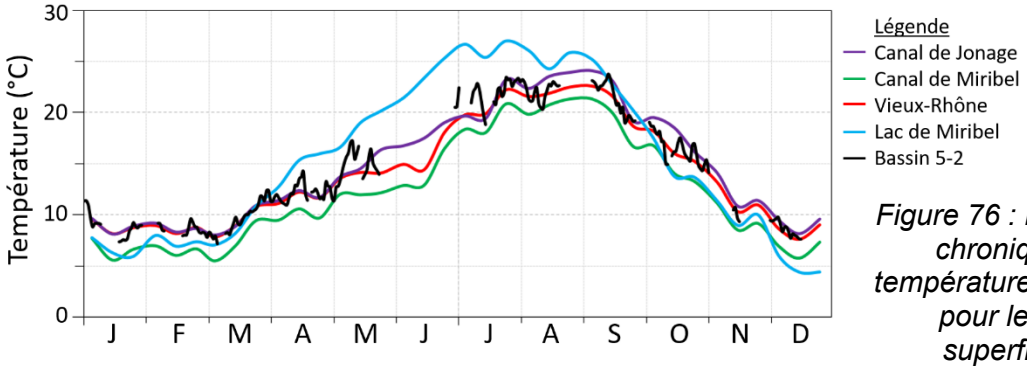



*Figure 76 : Exemple de chroniques de températures imposées pour les eaux superficielles*

### V.1.5. Améliorations apportées par calibration hydrodynamique

Les piézomètres équipés de sondes de mesure de niveau de nappe permettent la comparaison des évolutions piézométriques calculées par la simulation numérique et celles observées sur le terrain.

Cette étape de calibration a permis de déceler un premier point important : **le choix du pas de temps dans les chroniques d'exploitation** (chroniques de débits pompés et de vitesses d'infiltration dans les bassins) est une étape primordiale. En effet, selon le pas de temps imposé dans les conditions d'exploitation (pas de temps décadaire ou journalier), l'évolution piézométrique calculée au cours de la simulation numérique n'est pas identique. La première approche consistait à imposer des conditions d'exploitation au pas de temps décadaire pour limiter les temps de calculs de la simulation de l'année 2016. Pour ce faire chaque ouvrage de pompage et chaque fond de bassin se voyaient imposer un débit pompé moyen ou un flux infiltré moyen calculé pour chaque décade de l'année 2016 (courbe noire sur les graphiques de la Figure 77). Ce choix de conditions d'exploitation très lissées entraîne une évolution piézométrique calculée très éloignée de l'évolution piézométrique observée, comme illustré sur la Figure 78 pour l'ouvrage M12, situé au centre de la prairie de captage. Imposer les conditions d'exploitation au pas de temps journalier permet de considérablement améliorer le résultat de la simulation (Figure 78), mais entraîne un temps de calcul plus long.

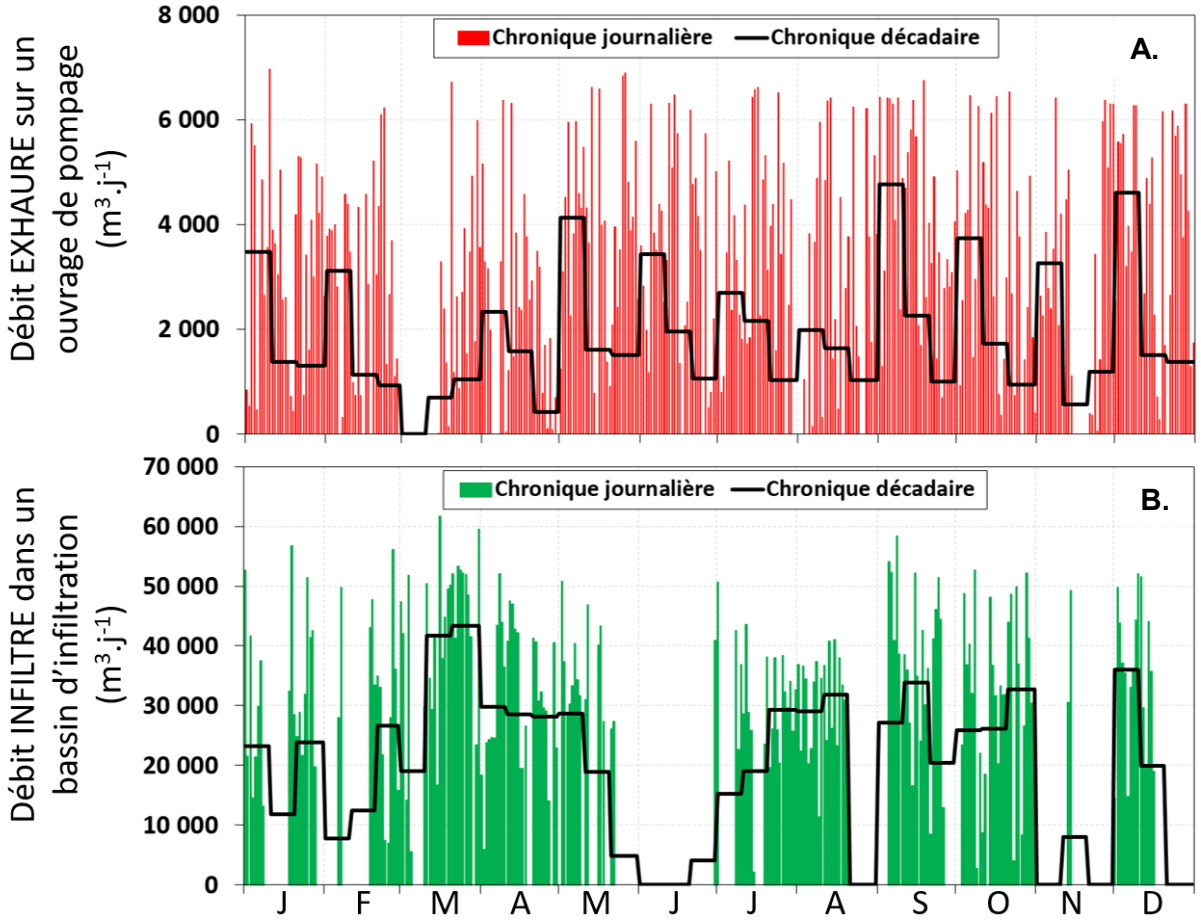



*Figure 77 : Chronique de pompage du puits 01-04 au pas de temps journalier et décadaire (A.), et chronique de débit infiltré dans le bassin d'infiltration 5-2 (B.) au cours de l'année 2016*

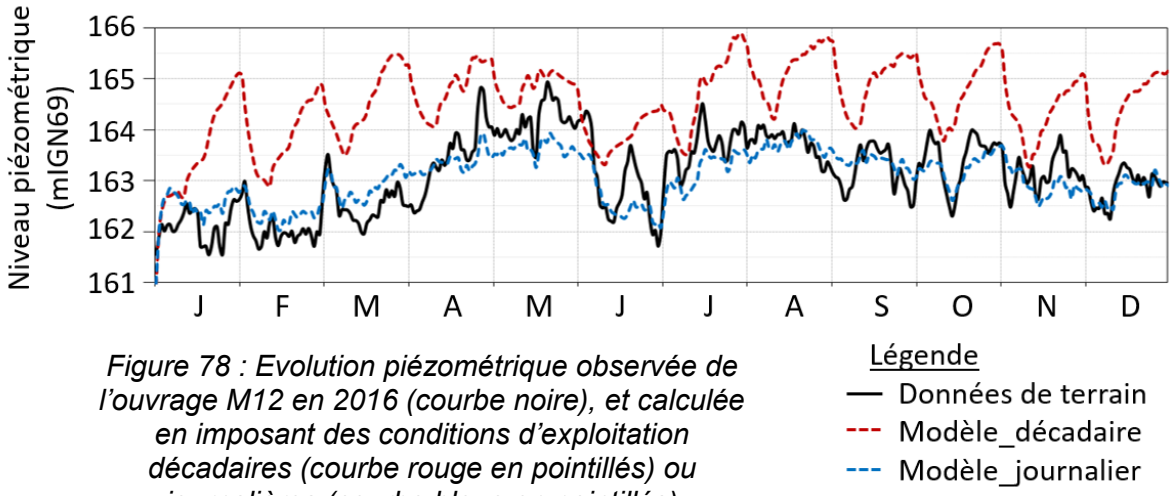



*Figure 78 : Evolution piézométrique observée de l'ouvrage M12 en 2016 (courbe noire), et calculée en imposant des conditions d'exploitation décadaires (courbe rouge en pointillés) ou journalières (courbe bleue en pointillés)*

La simulation numérique initiale (avant calage, mais tenant compte des chroniques d'exploitations journalières) montre quelques écarts vis-à-vis de la piézométrie observée au cours de l'année 2016. La Figure 79 présente l'évolution de la piézométrie acquise sur le terrain (courbe noire) et de celle calculée par la simulation initiale (courbe rouge en pointillés), tout au long de l'année 2016, pour les piézomètres B10 et M25 (situés tous deux à proximité du bassin d'infiltration 5-2, Figure 85).

Les principaux écarts rencontrés entre l'observation et la simulation concernent :

- ✓ La **condition initiale** (cercles violets sur la Figure 79) : la piézométrie initiale, issue de la simulation en régime stationnaire ne représente pas correctement la piézométrie observée. En effet, la piézométrie est fortement impactée par les conditions réelles d'exploitation qui sont survenues en décembre 2015.
- ✓ Le **battement de nappe au droit des bassins d'infiltration 5** (cercle vert sur la Figure 79). Etant au cœur des observations et des expérimentations menées au cours de ce travail de thèse, il est nécessaire de bien reproduire l'écoulement au droit de ce couple de bassins d'infiltration.
- ✓ Les **échanges nappe-rivière** ne semblent pas reproduire correctement les épisodes de fortes crues (cercles bleus sur la Figure 79 qui mettent en évidence le mois de juin 2016 lors des lâchers des barrages du Rhône).

Dans le but de mieux représenter les réactions piézométriques enregistrées sur le terrain tout au long de l'année 2016, une calibration hydrodynamique du modèle est nécessaire. Celle-ci s'attache à améliorer les trois principaux points évoqués ci-dessus, en modifiant la condition initiale, les conditions aux limites le long du Canal de Miribel et les caractéristiques physiques concernées ($K_s$ et $\varepsilon_{eff}$).

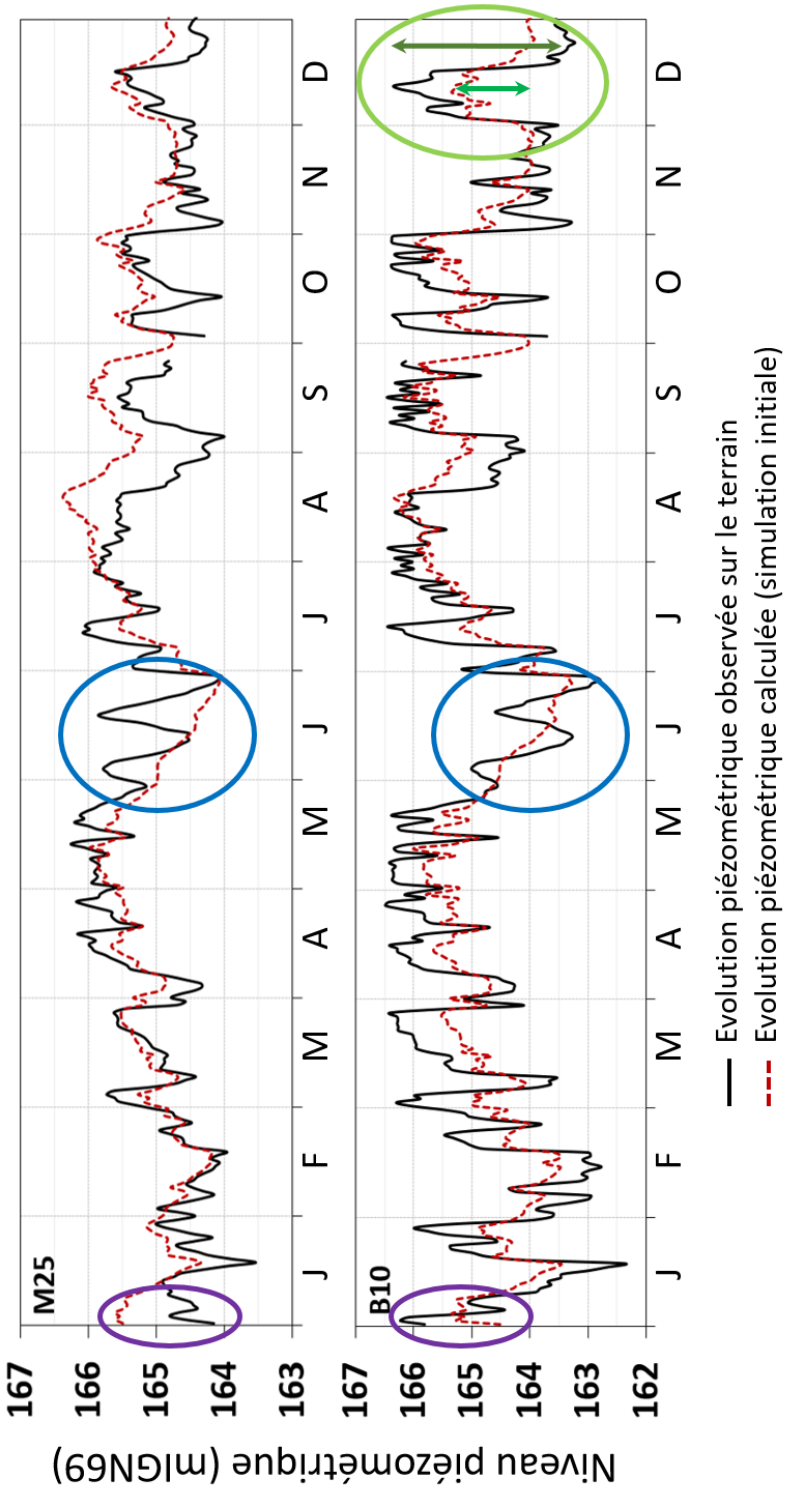



*Figure 79 : Evolutions piézométriques observées et calculées pour les ouvrages M25 (graphique du haut) et B10 (graphique du bas), sur l'année 2016, et mise en évidence des pistes d'amélioration de la simulation*

**Amélioration de la condition initiale de charge hydraulique et de température à l'échelle du champ captant**

L'état initial imposé, issu du résultat du régime stationnaire ne représente pas correctement les niveaux de nappe réels à l'échelle du champ captant à la date du 01 janvier 2016. En effet, la simulation en régime permanent tenait compte de pompages moyens annuels, et ne considérait pas la réalimentation par les bassins d'infiltration. Or, l'exploitation du site de captage peut entraîner de fortes variations piézométriques et thermiques localement.

Dans le but de tenir compte de l'exploitation du site de captage sur la période précédant le 01 janvier 2016, il a été décidé d'imposer la carte piézométrique mesurée au 01 janvier 2016 à minuit (Figure 80), à l'échelle du champ captant. Cette carte est issue de l'interpolation de 68 mesures de niveau piézométrique, exclusivement en piézomètre pour ne pas tenir compte de cônes de rabattements locaux autour des ouvrages de pompage. Cette amélioration permet, au pas de temps initial de la simulation en régime transitoire, de débuter avec un niveau piézométrique simulé très proche du niveau piézométrique observé, et ce en tout point du champ captant.

Il en est de même pour la condition initiale de température de nappe à l'échelle du champ captant : la température initiale imposée correspond à la température de nappe observée sur le terrain à la date du 01 janvier 2016 à minuit (Figure 80). Cette carte est issue de l'interpolation de 57 mesures de température de nappe, réalisées dans les piézomètres et dans les ouvrages de pompage.

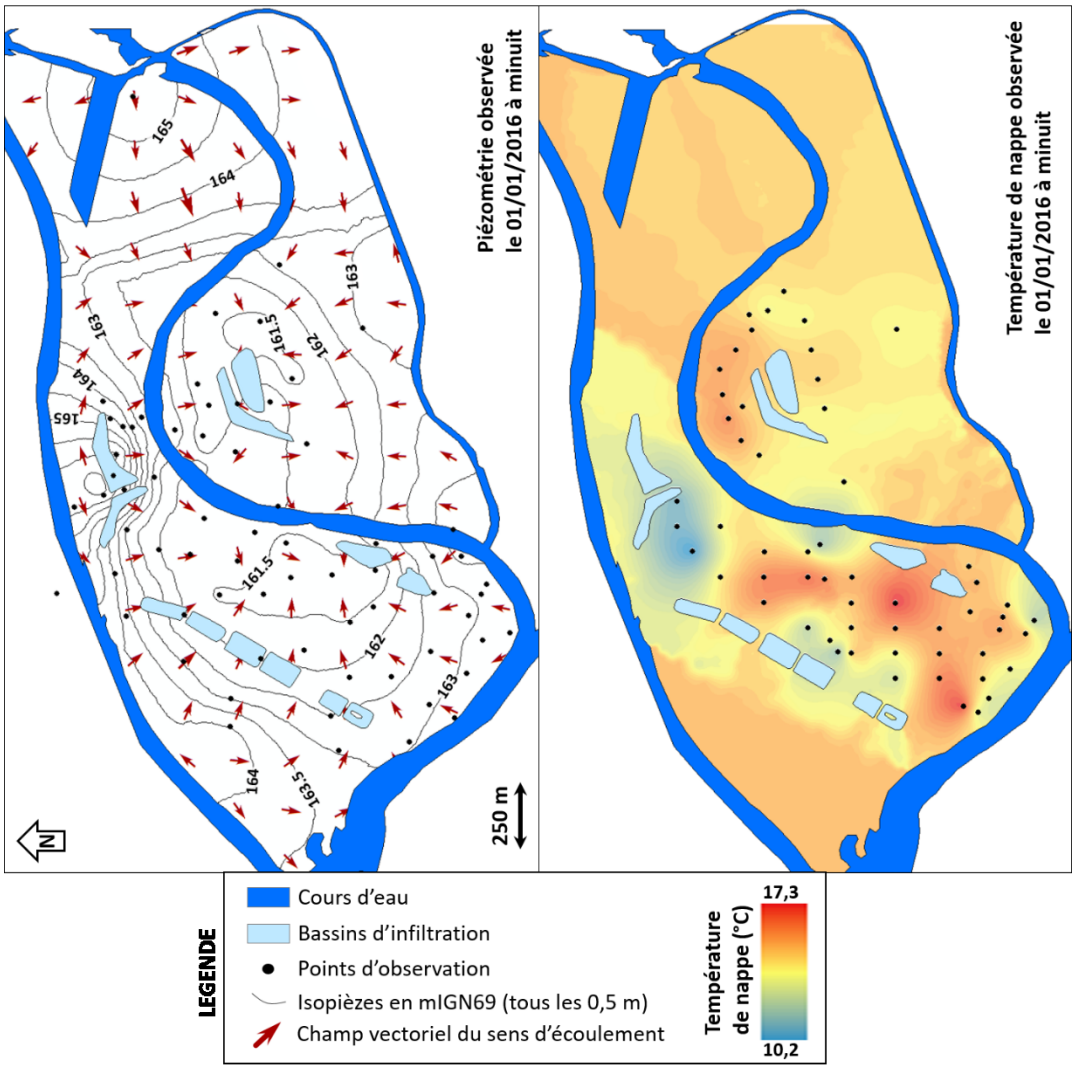



*Figure 80 : Piézométrie et température de nappe initiales imposées dans le modèle*

**Amélioration du battement de nappe au droit des bassins d'infiltration 5**

Le piézomètre B10, situé sur la digue de séparation des bassins 5-1 et 5-2 enregistre dans la réalité un battement de nappe prononcé lors des cycles de remplissage/vidange des bassins (Chapitre IV). La simulation de cette évolution piézométrique engendre un battement de nappe trop limité en termes d'amplitude.

Pour tenir compte de ce phénomène, il a été décidé d'attribuer une **faible porosité efficace** (de l'ordre de 5 % au lieu des 20 % initiaux) pour jouer sur la capacité de stockage du réservoir aquifère. Cette valeur très faible n'est pas aberrante compte tenu des résultats de pompages d'essai sur le site de captage qui ont révélé un emmagasinement local faible de l'aquifère (compris entre $1.10^{-3}$ à $1.10^{-2}$) *[Loizeau, 2013]*.

Par ailleurs, la création des nouveaux piézomètres du dispositif expérimental au centre et au nord du bassin 5-2, ont prouvé l'existence **d'une zone moins perméable**, située à 8 m de profondeur environ (Figure 20). Par les observations et les expérimentations menées sur le site, il a été montré que cette couche joue un rôle non négligeable sur les écoulements et les transferts thermiques (Chapitre III).

Cette couche moins perméable a donc été intégrée dans le modèle (Figure 81). Son extension spatiale est considérée continue entre les ouvrages du dispositif expérimental. Elle est caractérisée par une conductivité hydraulique à saturation faible ($K_s$ = 9,0.$10^{-7}$ m.$s^{-1}$) comparé à celle des alluvions fluviatiles.

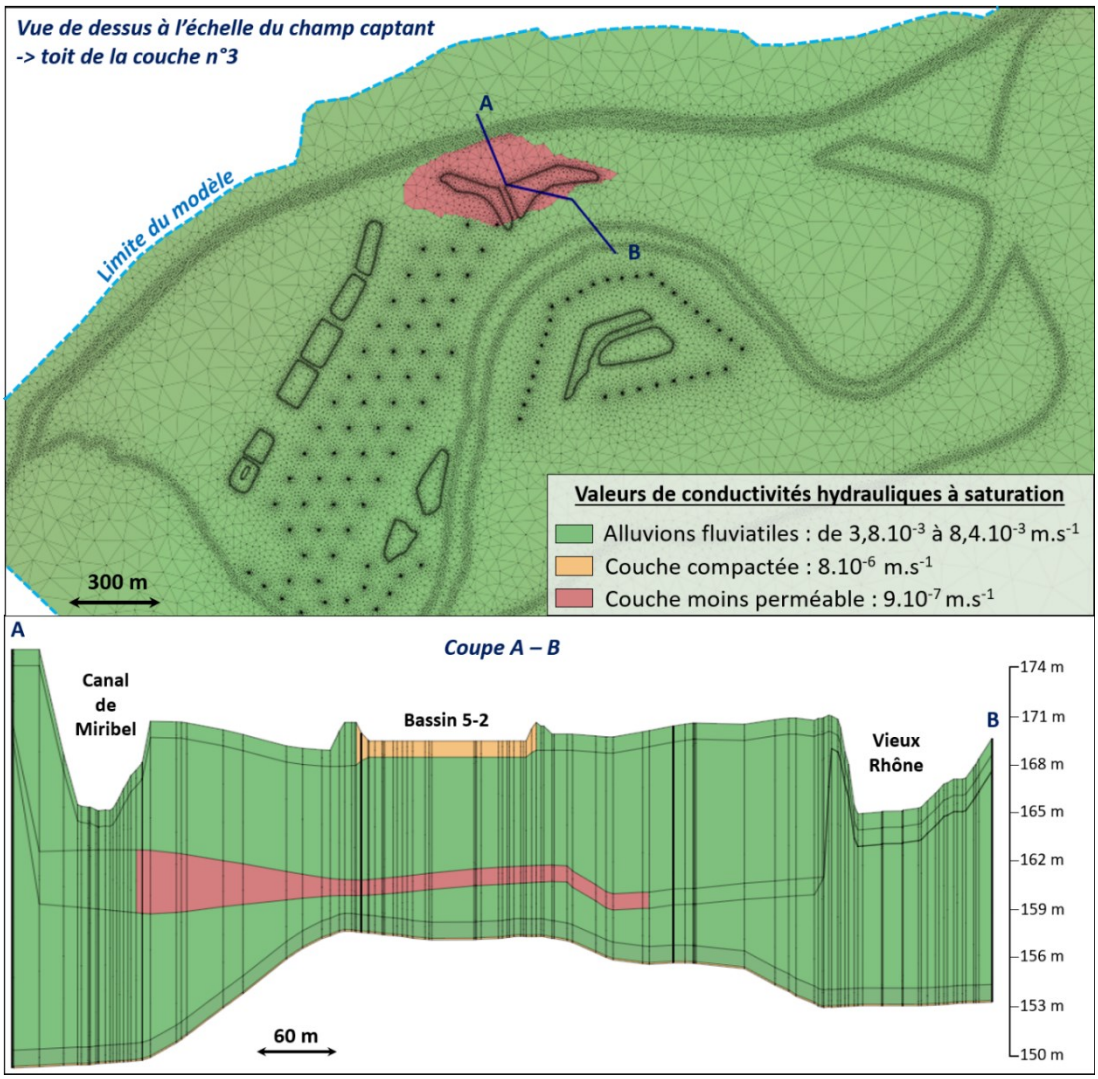



*Figure 81 : Gamme de conductivités hydrauliques à l'échelle du champ captant et extension spatiale de la couche moins perméable présente au droit du bassin d'infiltration 5-2 (vue de dessus et vue en coupe au travers du dispositif expérimental)*

**Amélioration des échanges nappe-rivière le long du Canal de Miribel**

Au mois de juin 2016, les lâchers des barrages du Rhône ont provoqué une crue conséquente dans les cours d'eau, et la réalimentation artificielle a dû être arrêtée. La simulation initiale montre une évolution piézométrique très éloignée de la réalité au cours du mois de juin : l'onde de crue est inexistante dans les chroniques piézométriques simulées (Figure 79). Ceci signifie que le coefficient d'échange nappe-rivière n'est pas bien calé (pour rappel, $\Phi$ = 0,0864 $j^{-1}$ dans la simulation initiale, comme illustré sur la Figure 82). Différentes valeurs de coefficients de transferts ont été testées pour réussir à reproduire le passage de la crue dans la nappe. Pour reproduire la crue du mois de juin, un coefficient d'échange nappe-rivière de l'ordre de $\Phi$ = 0,7 $j^{-1}$ est nécessaire. Imposer un coefficient aussi élevé entraine une remontée irréaliste du niveau piézométrique calculé le reste de l'année.

Une solution pour reproduire correctement les échanges nappe-rivière est de faire l'hypothèse qu'à partir d'un certain niveau d'eau dans les cours d'eau, seulement atteint en période de crue (*H* = 167 mIGN69), le coefficient d'échange est fortement augmenté : l'eau des cours d'eau atteint une zone de berges non colmatées. Ainsi, le long du Canal de Miribel, deux coefficients d'échange peuvent être imposés selon l'éloignement par rapport au centre du cours d'eau :

- ✓ Un coefficient d'échange faible sur le fond du lit du Canal ($\Phi$ = 0,02 $j^{-1}$),
- ✓ Un coefficient d'échange plus fort sur le haut des berges ($\Phi$ = 0,7 $j^{-1}$).

Du fait du manque de raffinage du maillage dans le modèle numérique actuel le long des cours d'eau, il a été choisi d'imposer un coefficient d'échange nappe-rivière variable selon l'éloignement au centre du cours d'eau, mais également fonction de la hauteur d'eau dans le cours d'eau (donc variable dans le temps) : ceci permet de forcer la forte contribution des cours d'eau uniquement pendant les périodes de crues avérées (Figure 82).

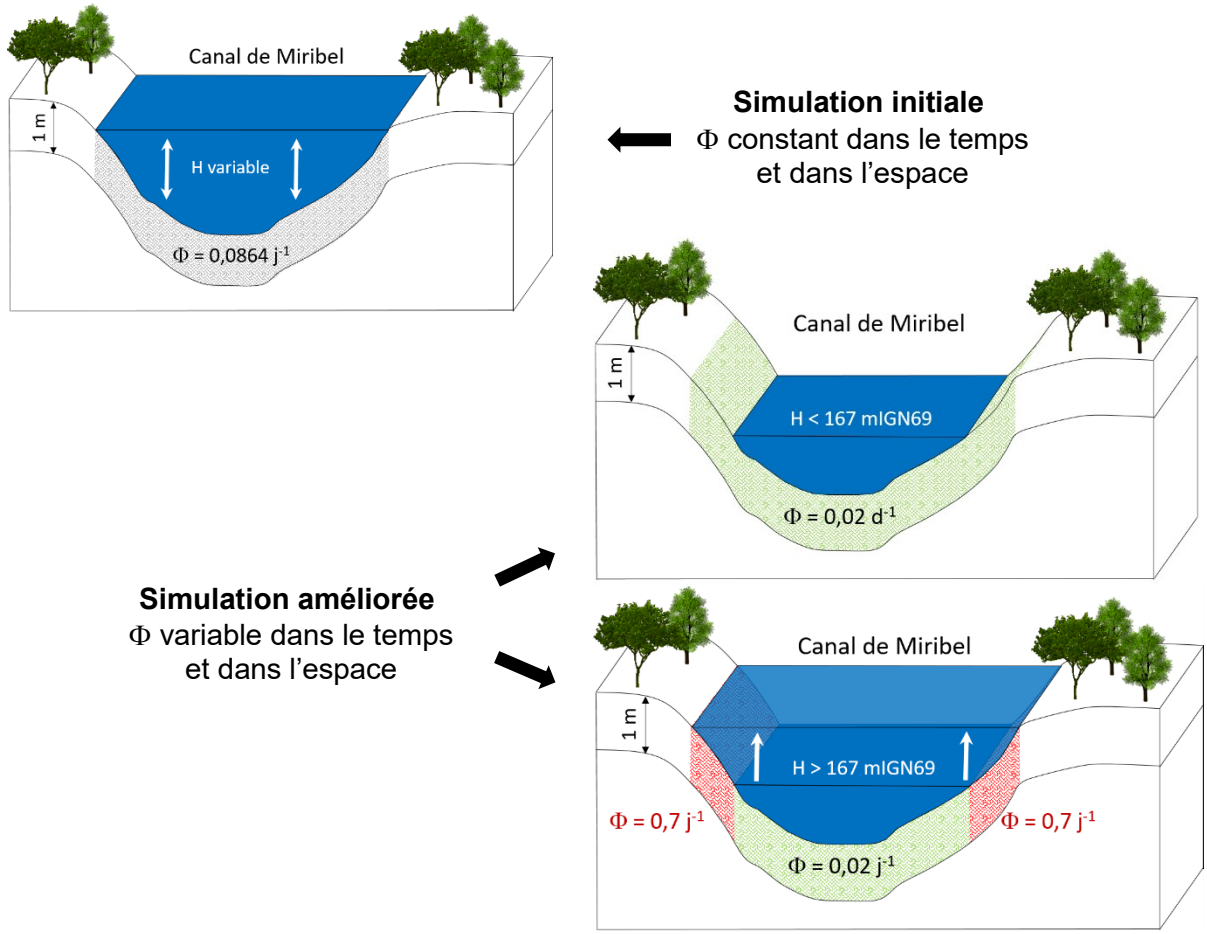



*Figure 82 : La variabilité spatiale et temporelle du coefficient d'échange nappe-rivière (Φ)*

### V.1.6. Evaluation du modèle hydro-thermique après calibration

L'évaluation du modèle est exclusivement réalisée **sur le site de captage de Crépieux-Charmy** du fait du manque de données en dehors de cette zone d'étude.
L'évaluation consiste, à partir de la simulation en régime transitoire (année 2016), à comparer les **données de niveaux piézométriques** et **de températures** observées sur le terrain, avec les résultats issus de la simulation numérique après calibration hydrodynamique du modèle numérique (prise en considération des améliorations, énoncées dans la Section V.1.5).

#### *V.1.6.1. Evaluation des niveaux piézométriques à l'échelle du champ captant*

La piézométrie observée et calculée peut être comparée sur les points d'observations, qui correspondent aux piézomètres équipés de mesures de niveau de nappe sur le terrain suivis par l'Exploitant et quelques ouvrages du dispositif expérimental (soit **62 points de contrôle**, dont la localisation et la dénomination sont fournies sur la Figure 85).

La comparaison des chroniques piézométriques moyennes journalières observées et simulées de certains points d'observation du champ captant est présentée sur la Figure 83. Rappelons que le piézomètre B10 est situé entre les bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 ; M12 est situé au centre de la prairie de captage de l'île de Crépieux ; S34, S09 et C05 sont des ouvrages proches de cours d'eau (Canal de Miribel, Canal de Jonage ou Vieux-Rhône).
Pour chaque point de contrôle, la courbe noire continue correspond à la **chronique observée**, alors que la courbe noire en pointillés correspond à la **chronique calculée**.

La Figure 83 montre que la simulation de l'écoulement semble cohérente avec l'observation faite au niveau de la plupart des points d'observation. Les battements de nappe observés et simulés sont très proches et la gamme de niveau piézométrique simulé est cohérente avec celle enregistrée sur le terrain.

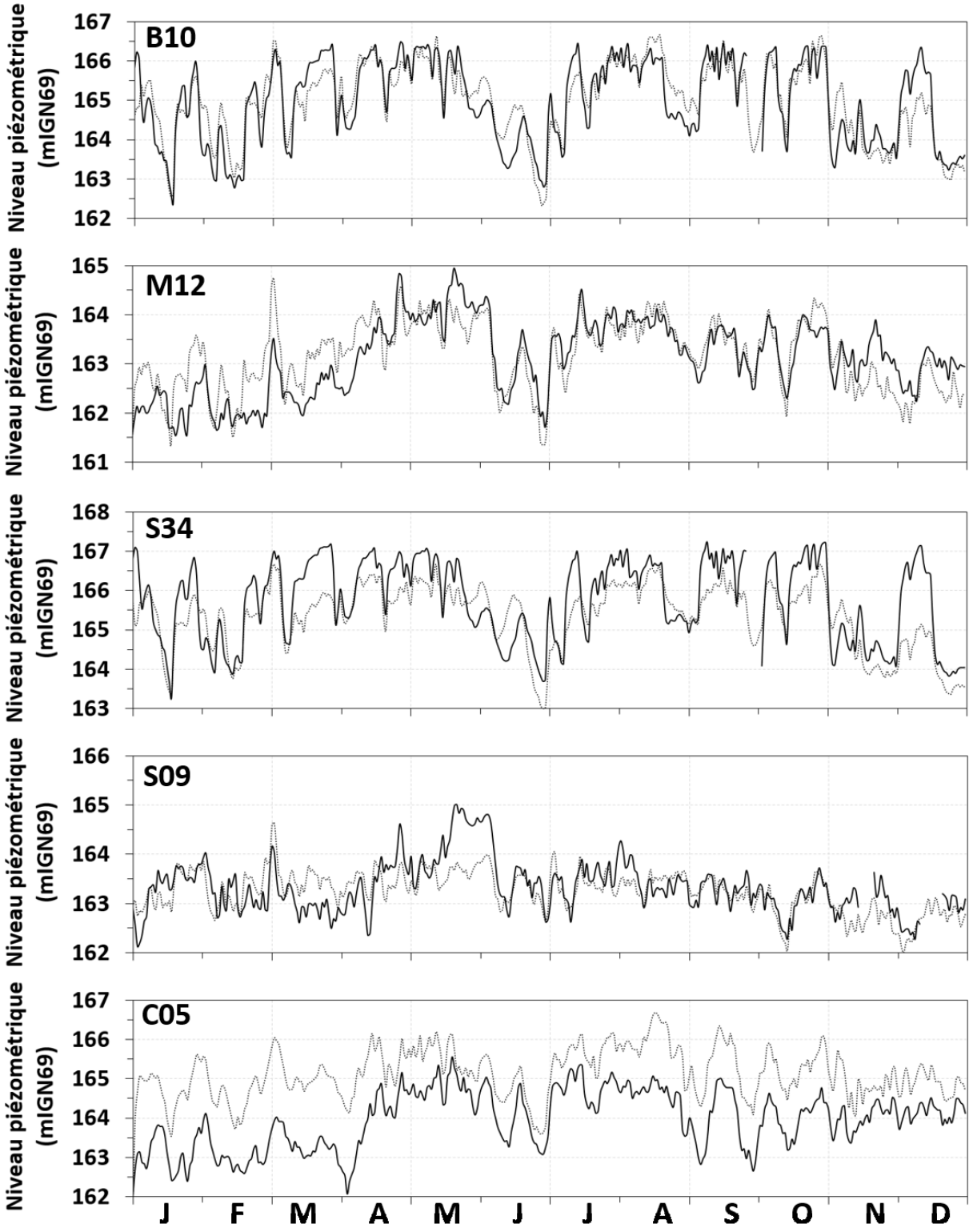



*Figure 83 : Comparaison de l'évolution du niveau piézométrique observé et calculé au cours de l'année 2016, pour cinq ouvrages stratégiques (B10, M12, S34, S09 et C05)*

Pour pouvoir illustrer la comparaison des chroniques observées et calculées pour l'ensemble des 62 points d'observation, un **écart de niveau piézométrique journalier**, qui évolue dans le temps, est estimé. Pour représenter l'évolution temporelle et spatiale de cet écart, une carte est réalisée à l'échelle du champ captant (Figure 84) : elle illustre, pour chaque point d'observation, le pourcentage du temps (sur l'ensemble de l'année 2016) pour lequel le niveau piézométrique simulé est à 0,5 m du niveau piézométrique observé ; compris entre 0,5 et 0,75 m ou supérieur à 0,75 m.

L'analyse de cette évolution spatiale et temporelle montre que sur la majorité des points d'observation, **la simulation numérique est à plus ou moins 0,75 m de la mesure faite sur le terrain, pour plus de 75 % du temps** (cumul des zones vertes et orangées en chaque point de la Figure 84).

Les zones rouges correspondent au pourcentage du temps de l'année 2016 où le point de contrôle enregistre un écart de plus de 0,75 m entre l'observation et le calcul. L'évolution piézométrique sur l'île de Charmy présente fréquemment des écarts piézométriques de plus de 0,75 m, tout comme sur les ouvrages situés au Sud du bassin d'infiltration 5-2 et l'ouvrage S12 (situé entre le Vieux-Rhône et le bassin d'infiltration 1-2). Tous ces ouvrages sont localisés proches du Vieux-Rhône. L'échange nappe-rivière semble être trop prononcé le long de ce cours d'eau (ce bras du Rhône n'a pas fait l'objet d'amélioration du coefficient d'échange : seul le coefficient d'échange le long du Canal de Miribel a été amélioré en tenant compte d'un effet « seuil »).

Si le niveau piézométrique calculé sur ces points d'observation est trop élevé comparé au niveau piézométrique observé, il est tout de même à noter que l'évolution temporelle en chaque point présente des variations piézométriques similaires à celles enregistrées sur le terrain (exemple du piézomètre C05, situé à l'Est de Charmy, et dont l'évolution est présentée sur la Figure 85).

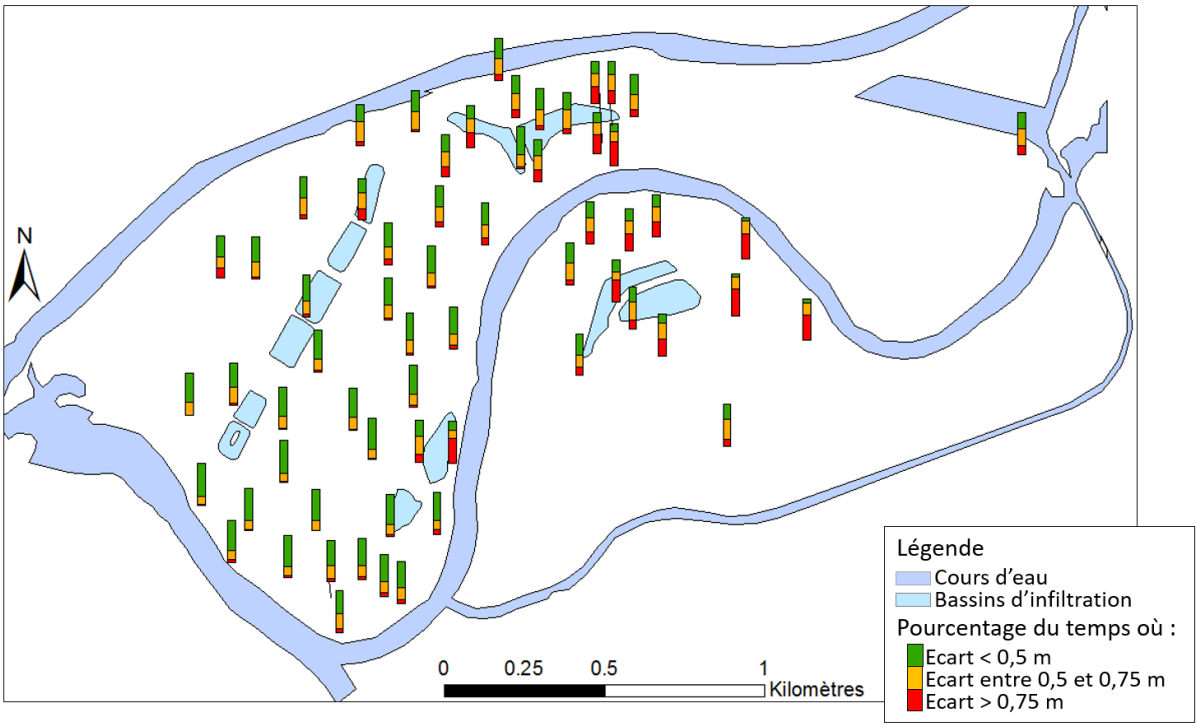



*Figure 84 : Carte des écarts constatés entre les niveaux piézométriques calculés et observés en chaque point de contrôle, exprimés en pourcentage d'apparition sur l'année 2016*

Si la comparaison observé / calculé est réalisée à un instant précis, et non pas sur la totalité de l'année simulée, alors certains points d'observation semblent présenter des écarts conséquents. Prenons l'exemple de la carte des écarts observés / simulés à la date du 31 juillet 2016 (illustré en Figure 85), qui correspond à la date où la corrélation est la moins bonne.

Sur cette carte, on remarque que :

- ✓ 13 points d'observation (soit 21 % de la totalité des points d'observation) présentent un écart supérieur à 0,75 m. Ces points sont essentiellement situés à proximité des berges des cours d'eau (qui n'ont pas fait l'objet d'amélioration du coefficient d'échange nappe-rivière, à savoir le Vieux-Rhône et le Canal de Jonage) et de certains bassins d'infiltration (bassins 1, 5 et 6) dont les volumes infiltrés ont été conséquents (en rouge sur la Figure 85).
- ✓ 33 points d'observation (soit 53 % de l'ensemble des points) présentent un écart supérieur à 0,5 m. La majorité des points qui enregistrent un écart compris entre 0,5 et 0,75 m sont localisés dans la zone Sud-Ouest de l'île de Charmy (en orange sur la Figure 85)

L'évaluation du modèle ne peut pas se faire par comparaison des niveaux piézométriques observés / simulés à un instant donné, puisque l'écart évolue dans le temps. **La date du 31 juillet 2016 correspond à la date où la corrélation est la moins bonne** : cette date est impactée d'une part par la crue du mois de juin, mais aussi par la reprise intensive de l'exploitation des bassins d'infiltration.

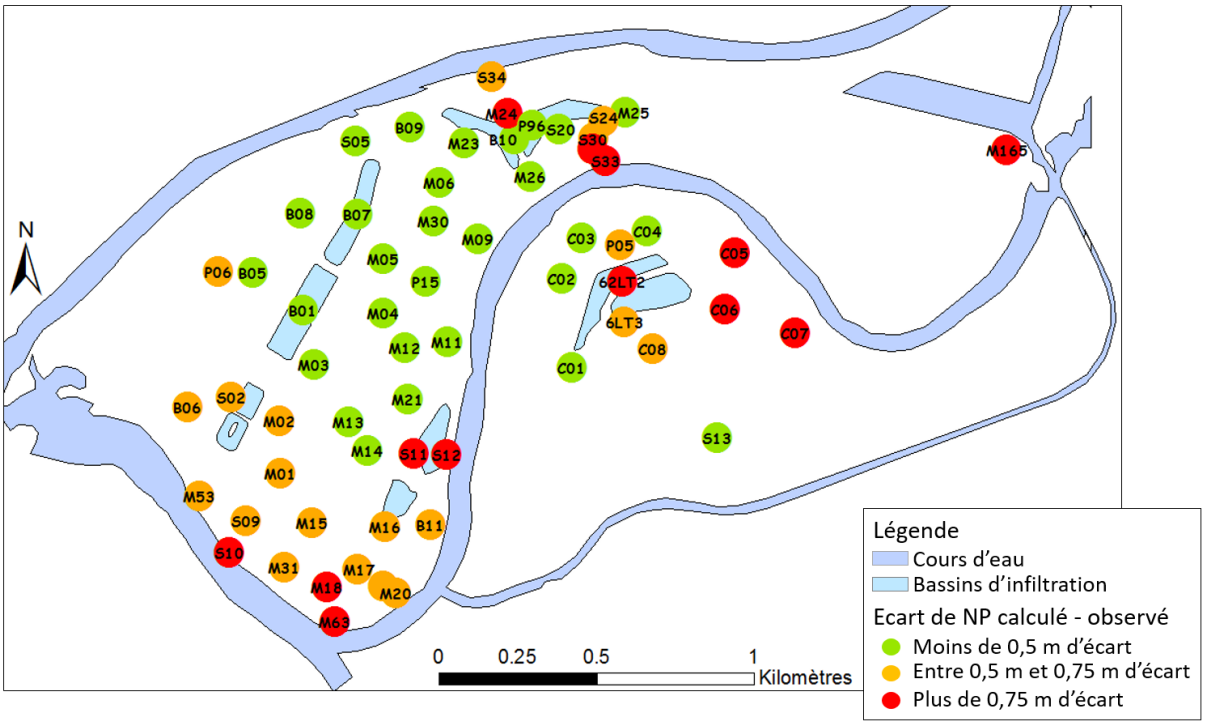



*Figure 85 : Cartes des écarts absolus entre les niveaux piézométriques moyens journaliers calculés et observés à la date du 31 juillet 2016*

#### *V.1.6.2. Evaluation de la température de nappe à l'échelle du champ captant*

Tout comme pour la piézométrie, les températures de nappe issues des observations de terrain peuvent être comparées aux températures de nappe calculées.
Les points d'observation, qui permettent de faire la comparaison entre l'observation et le calcul, correspondent uniquement aux **17 piézomètres** équipés de sondes de température de nappe (9 sont gérés par l'Exploitant du site et 8 sont issus du dispositif expérimental), dont la localisation et la dénomination sont présentées sur la Figure 87. Les températures issues des ouvrages de pompage ne servent pas de point de contrôle puisque la mesure de température est impactée par le pompage, actif ou non, dans l'ouvrage. De la même manière, les piézomètres qui ne captent pas la totalité de l'épaisseur de l'aquifère (ouvrages en flûte de pan, Section III.2) ne sont pas considérés comme des points d'observation, mise à part le piézomètre P96 (puisqu'il s'agit du seul piézomètre qui permet de comparer l'observation et le calcul de la température de nappe au droit d'un bassin d'infiltration).

La Figure 86 illustre l'évolution des températures moyennes journalières observées et calculées, au cours de l'année 2016, au sein de quelques ouvrages équipés de sondes de mesure (l'ensemble des ouvrages est disponible en Annexe 11) : P96 (situé au centre du bassin d'infiltration 5-2), S26 (situé au Sud du bassin d'infiltration 5-2, à une distance de 200 m), M12 et M03 (situés au centre de la prairie de captage de l'île de Crépieux) et S09 (situé à proximité du Canal de Jonage, dans la partie Sud-Ouest de l'île de Crépieux).
Pour chaque point de contrôle, la courbe noire continue correspond à la **chronique observée**, alors que la courbe noire en pointillés correspond à la **chronique calculée**.

Les chroniques de températures simulées sont bien représentatives de la température observée (Figure 86), et ce sans calage des caractéristiques thermiques du modèle numérique. Pour rappel, les caractéristiques thermiques renseignées dans le modèle sont issues de la bibliographie (Tableau 27), et on fait l'hypothèse de l'équilibre thermique local (les températures du fluide et du solide sont considérées égales, de manière instantanée).

**D'après la comparaison des chroniques de températures observées et simulées, les gammes de valeurs ainsi que les tendances simulées sont représentatives des observations**. Seule la température simulée dans l'ouvrage S09 semble présenter une évolution différente de celle observée sur le terrain (Figure 86). Cet ouvrage fera l'objet d'une analyse plus poussée dans la suite de cette partie.

**Des retards peuvent apparaitre** lors des fortes évolutions de températures en période estivale (exemple de l'ouvrage S26 sur la Figure 86 qui enregistre un décalage d'environ 15 jours entre la température simulée et celle observée, lors de la hausse des températures au mois de juillet). Ce retard peut être expliqué par la faible discrétisation verticale, mais également par l'absence de calibration thermique : **tenir compte du non-équilibre thermique local permettrait sûrement d'améliorer le résultat de la simulation**. Le piézomètre S26 est situé à proximité du bassin 5-2, et la hausse brutale de la température de nappe, qui est observée sur ce point, est liée à la remise en eau du bassin d'infiltration suite aux épisodes de crues du mois de juin. La mise en eau du bassin après une période longue d'assèchement provoque une infiltration d'eau conséquente, et donc des vitesses d'écoulement qui peuvent être rapides localement. Ce phénomène peut donc entrainer un non-équilibre thermique local (expliqué au Chapitre II) : la phase solide du milieu poreux n'est pas instantanément à la même température que la phase fluide. Ce phénomène implique donc, sur le terrain, une propagation du panache thermique plus rapide que celle qui est calculée.
Il est à noter que l'évolution thermique qui survient entre juillet et octobre, sur l'ensemble des points d'observation, est presque exclusivement liée à la recharge par les bassins d'infiltration et non aux échanges nappe-rivière : la hausse des températures est rapide et de grande amplitude au sein des ouvrages proches des bassins (exemple des ouvrages P96 et S26 sur la Figure 86). Cette hausse des températures est retardée et atténuée en s'éloignant des bassins d'infiltration (exemple de l'ouvrage M12).

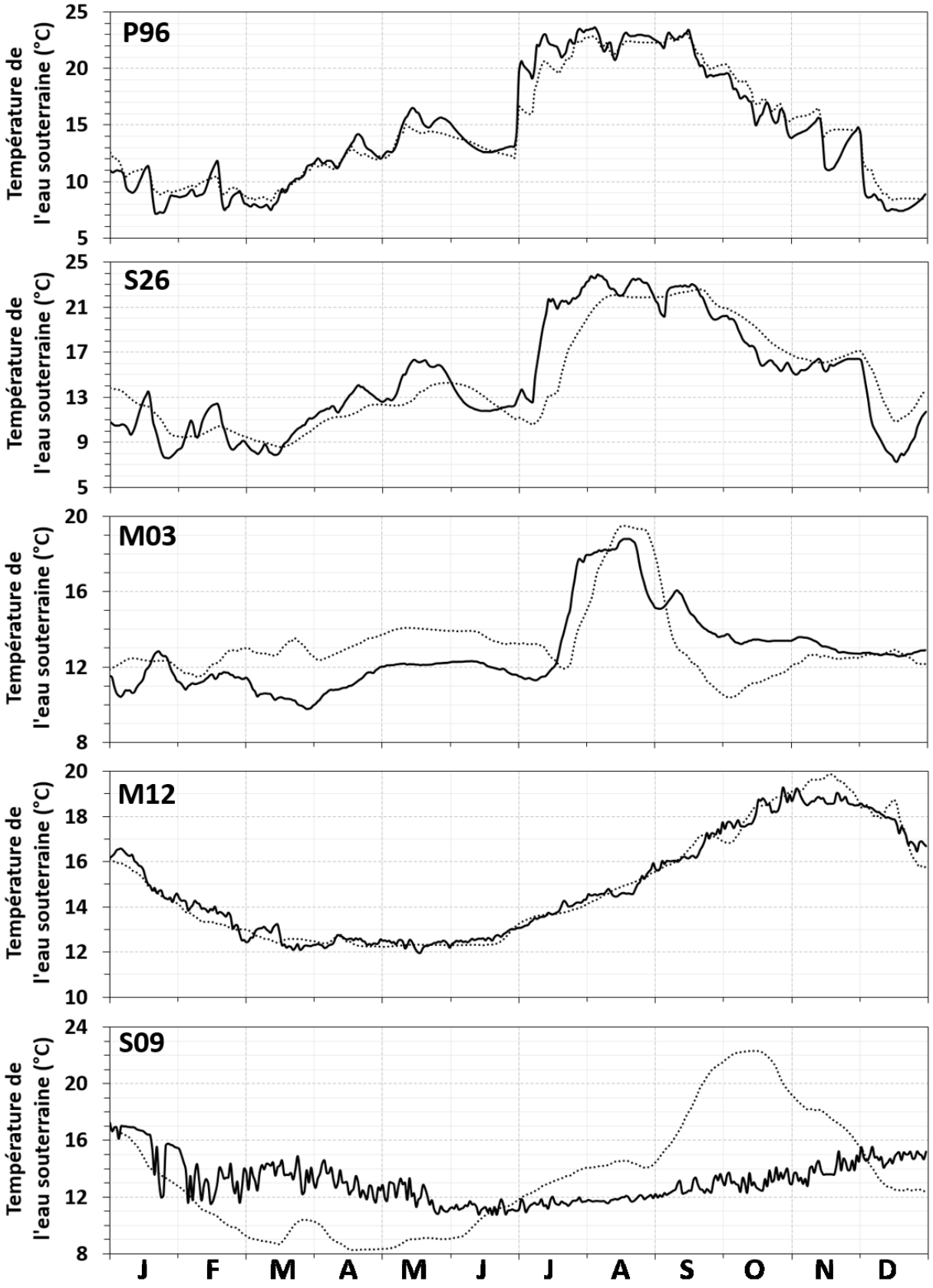



*Figure 86 : Comparaison de l'évolution de la température de nappe observée et calculée au cours de l'année 2016, pour cinq ouvrages : P96, S26, M03, M12 et S09.*

Tout comme pour la piézométrie, **les écarts de température entre l'observation et les résultats de simulation peuvent être illustrés en tenant compte de son évolution tout au long de l'année 2016**.

Pour ce faire, une carte, présentée en Figure 87, est réalisée. Les écarts de température constatés entre l'observation et la simulation sont divisés en trois classes :

- ✓ Ecart de température **inférieur à 1 °C** (en vert sur la Figure 87),
- ✓ Ecart de température **compris entre 1 et 2 °C** (en orange sur la Figure 87),
- ✓ Ecart de température **supérieur à 2 °C** (en rouge sur la Figure 87).

Pour chacun des 17 points d'observation, la carte de la Figure 87 permet d'illustrer le pourcentage du temps d'apparition des trois classes d'écarts de température, tout au long de l'année 2016.

Le Tableau 29 présente les valeurs de ces pourcentages du temps d'apparition, pour chaque point de contrôle.

Les points de contrôle S13 et M12 (Figure 87 et Tableau 29) présentent une très bonne corrélation entre la température calculée et observée (l'écart de température est inférieur à 1 °C plus de 98 % du temps).

Tous les autres points de contrôle présentent un écart inférieur à 2 °C plus de la moitié du temps.

Seule la simulation de la température de l'ouvrage S09 n'est pas satisfaisante : déjà remarquée sur la Figure 86, la température simulée présente un écart de plus de 2 °C par rapport à la température observée à hauteur de 70 % de l'année 2016 (Figure 87 et Tableau 29).

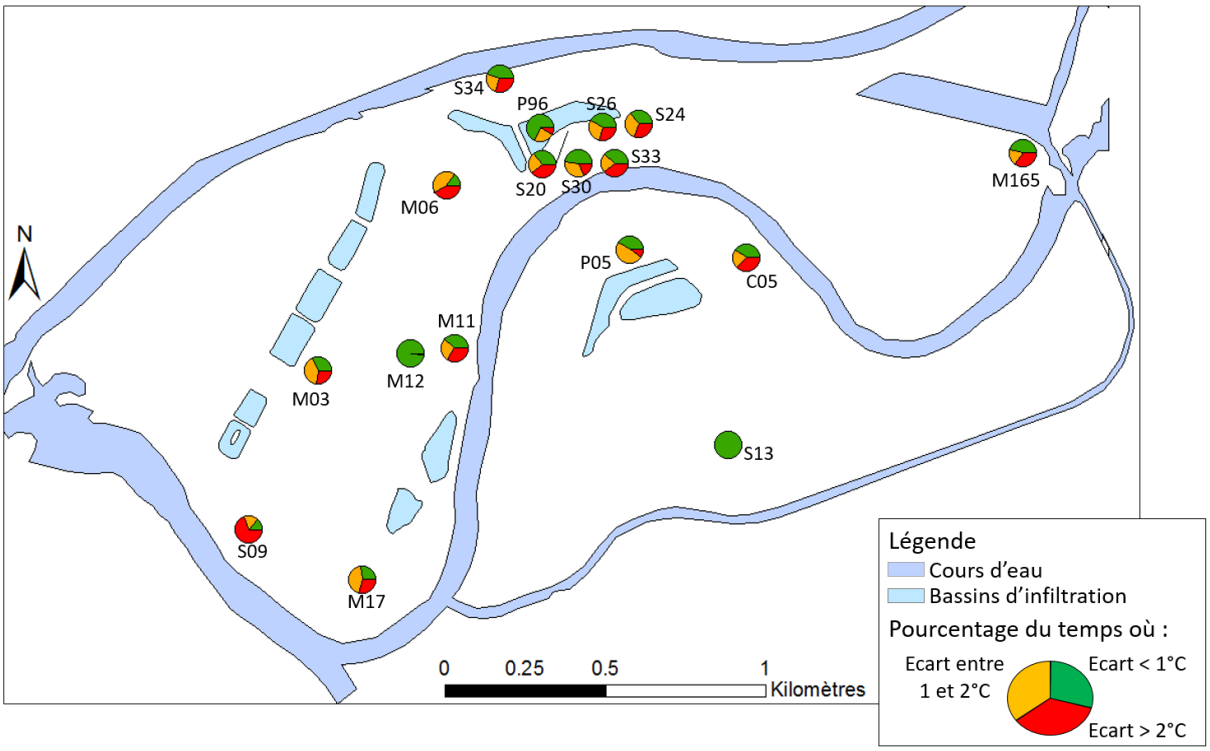



*Figure 87 : Carte des écarts constatés entre les températures de nappe calculées et observées en chaque point de contrôle, exprimés en pourcentage d'apparition sur l'année 2016*

| Points de contrôle | S13 | M17 | S09 | M11 | M03 | M12 | M06 | P05 | C05 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ecart moyen annuel (en °C) | -0,23 | 0,57 | 0,36 | 1,31 | 0,40 | -0,03 | -0,51 | 0,34 | 0,52 |
| **% de temps où** | | | | | | | | | |
| Ecart < 1°C | **100** | 27 | 14 | 39 | 32 | **98** | 15 | 42 | 40 |
| Ecart entre 1 et 2°C | 0 | 44 | 17 | 27 | 41 | 2 | 43 | 49 | 22 |
| Ecart > 2°C | 0 | 29 | **70** | 34 | 27 | 0 | 42 | 9 | 37 |
| **Points de contrôle** | **S20** | **S24** | **S26** | **S30** | **S33** | **S34** | **P96** | **M165** | |
| Ecart moyen annuel (en °C) | 0,27 | 0,08 | -0,10 | 0,35 | -0,19 | -1,64 | 0,11 | 1,31 | |
| **% de temps où** | | | | | | | | | |
| Ecart < 1°C | 36 | 37 | 41 | 48 | 39 | 45 | 67 | 46 | |
| Ecart entre 1 et 2°C | 25 | 33 | 29 | 33 | 21 | 24 | 24 | 20 | |
| Ecart > 2°C | 40 | 30 | 30 | 19 | 40 | 31 | 8 | 34 | |

*Tableau 29 : Evaluation du modèle numérique d'un point de vue thermique pour la simulation en régime transitoire (année 2016)*

Intéressons-nous au point de contrôle qui présente l'écart de température le plus prononcé (entre l'observation et le résultat de la simulation) : l'ouvrage **S09**, situé au Sud-Ouest de l'île de Crépieux (Figure 86 et Tableau 29).

La chronique de température observée dans cet ouvrage enregistre peu de variations au cours de l'année 2016 (température de nappe comprise entre 10,5 et 17,0 °C), et qui semble être impactée par les pompages à proximité (oscillations thermiques brusques et répétitives). Le résultat de la simulation numérique montre quant à elle une évolution des températures plus prononcée, comprise entre 8,3 et 22,3 °C.

D'après les sens d'écoulement du modèle numérique, et du fait de la localisation de l'ouvrage S09, la hausse des températures, simulée entre septembre et octobre 2016, est directement liée à l'infiltration d'eau en période estivale dans les bassins d'infiltration 2-1 et 2-2 (Figure 88). Rappelons que l'évolution piézométrique simulée dans ce piézomètre S09 est cohérente vis-à-vis de l'évolution du niveau de nappe observée en ce même point (Figure 83).

→ **Puisque l'évolution piézométrique simulée est correcte, comment expliquer que l'évolution thermique simulée de l'ouvrage S09 ne soit pas représentative de l'observation ?**

Pour répondre à cette question, la température de nappe observée dans l'ouvrage S09 peut être comparée à la température observée dans les ouvrages pompages équipés de sondes et situés à proximité (Figure 88).

D'après les données de terrain, les puits 01-06, 01-07 et 09-01 (Figure 88) présentent une certaine évolution thermique au cours de l'année 2016, différente de celle enregistrée dans le piézomètre S09 (Figure 89). Le puits 01-03 enregistre une évolution thermique intermédiaire. La température de nappe observée sur le terrain montre donc une certaine hétérogénéité dans cette zone.

En comparant les températures observées de ces différents ouvrages et le résultat de la simulation de l'évolution thermique du S09 (illustrée par la courbe en pointillés sur la Figure 89), il s'avère que l'amplitude de la variation de température simulée est cohérente avec la température observée dans les ouvrages de pompage 01-06, 01-07 et 09-01.

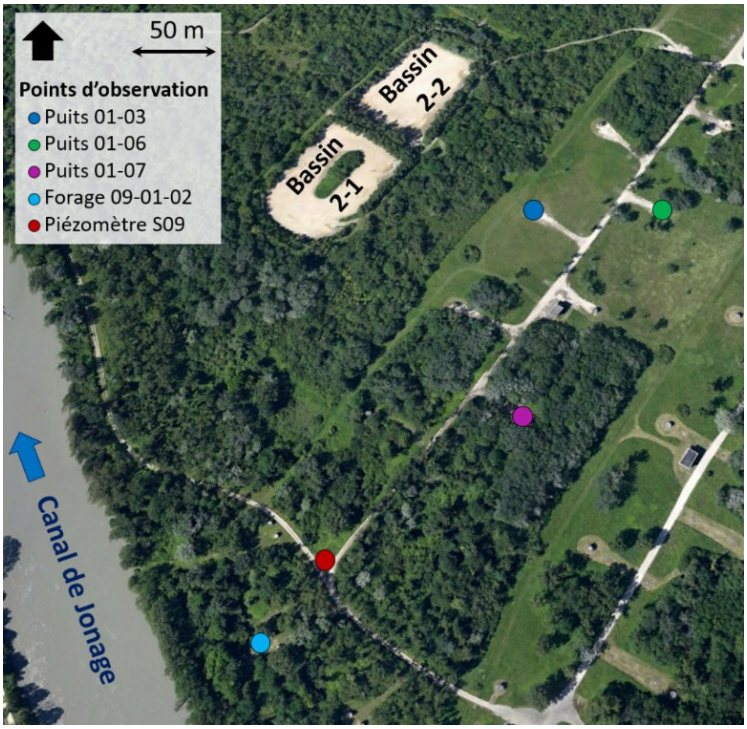



*Figure 88 : Localisation des ouvrages équipés de sondes de température dans la zone Sud-Ouest du champ captant*

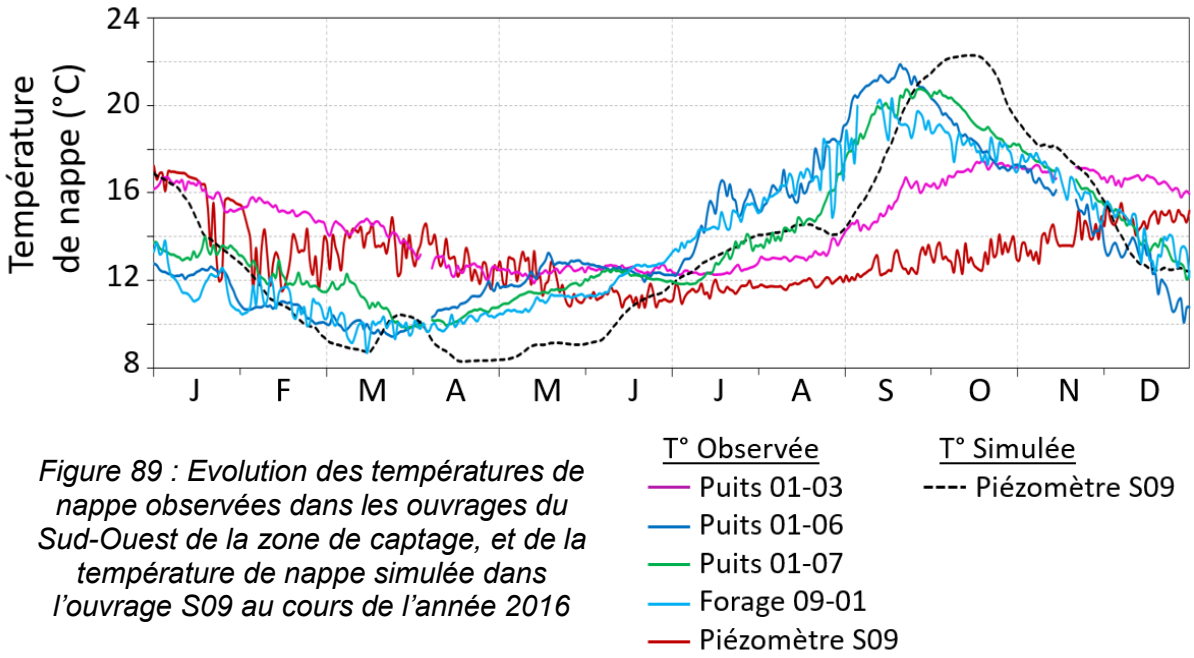



*Figure 89 : Evolution des températures de nappe observées dans les ouvrages du Sud-Ouest de la zone de captage, et de la température de nappe simulée dans l'ouvrage S09 au cours de l'année 2016*

L'analyse des données de terrain sur l'ensemble des ouvrages équipés de sondes de température sur cette zone du champ captant, nous permet de dire que la mesure de température acquise au sein de l'ouvrage S09 ne semble pas être fausse. Le puits 01-03 enregistre un **comportement thermique intermédiaire** entre les autres ouvrages de pompage (01-06 ; 01-07 et 09-01) et le piézomètre S09. Si cette mesure n'avait pas été présente, alors la mesure du piézomètre S09 aurait pu être considérée comme aberrante, et de ce fait ne pas être prise en considération pour l'interprétation des écoulements.

Du fait de l'hétérogénéité des températures de la zone d'étude, nous pouvons **suspecter la présence d'une zone moins perméable dans le sous-sol, située entre les bassins d'infiltration 2 et le piézomètre S09**. Cette zone moins perméable restreint l'avancée du front thermique en provenance des bassins d'infiltration, du fait d'une conductivité hydraulique à saturation plus faible. Ceci expliquerait la faible évolution thermique observée dans l'ouvrage S09, malgré la mise en eau des bassins 2-1 et 2-2.

La simulation numérique, qui tient compte d'un sous-sol homogène dans cette zone de champ captant (pas de couche moins perméable introduite), reproduit une évolution thermique de l'amplitude de celle réellement acquise dans les ouvrages de pompage situés aux alentours du S09 : le résultat du modèle laisse donc entrevoir l'arrivée du panache thermique en provenance des bassins d'infiltration jusqu'au piézomètre S09, alors que sur le terrain, ce panache thermique ne parvient pas jusqu'à cet ouvrage.

L'écart de température observée / simulée au sein de l'ouvrage S09 n'est donc pas aberrant. Cet écart permet de **mettre en évidence la complexité lithologique du milieu souterrain qui peut avoir un impact sur l'évolution thermique** de la nappe en certains points.

Cette analyse de données montre une fois de plus l'**importance du nombre de points de mesure dans un système complexe**. Interpréter les sens d'écoulement 3D nécessite une diversité de points de mesures pour mettre en évidence des écoulements préférentiels.

## V.2. L'interprétation des chemins de l'eau

La simulation numérique à grande échelle permet de mettre en évidence deux systèmes d'écoulement sur le domaine d'étude :

✓ **Un système d'écoulement « régional »**

Ce système d'écoulement correspond aux circulations de l'eau souterraine à grande échelle, illustrées sur la Figure 90. Les sources d'alimentation de ce système correspondent à l'arrivée de la nappe alluviale du Rhône sur la partie amont du domaine d'étude, et aux arrivées d'eaux souterraines par les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines. D'après les sens d'écoulement de ce système, l'ensemble de l'eau en provenance des sources d'alimentation se dirigent vers l'exutoire du domaine d'étude, à savoir la partie aval des alluvions du Rhône.

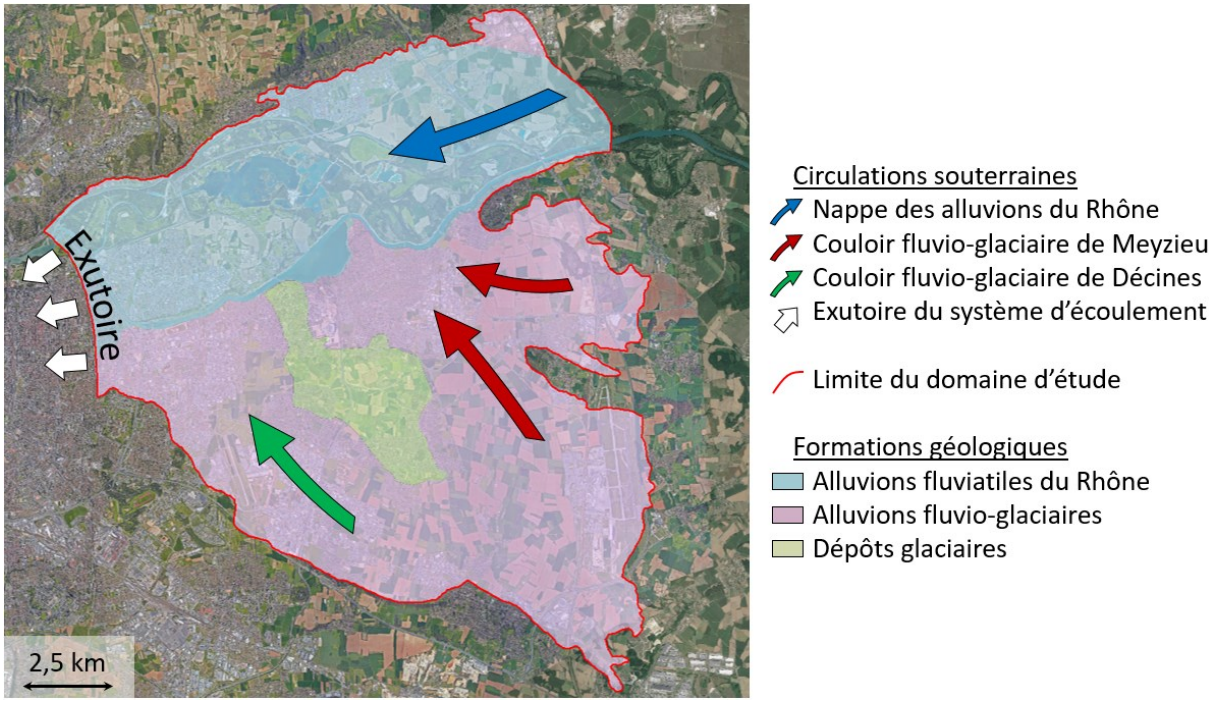



*Figure 90 : Schématisation du système d'écoulement régional du domaine d'étude*

✓ **Un système d'écoulement « réduit », à l'échelle du champ captant**

Le champ captant de la Métropole de Lyon peut être considéré comme un système d'écoulement à part entière. Il est défini par plusieurs sources d'alimentation (les arrivées d'eaux souterraines des diverses nappes, les bassins d'infiltration, les cours d'eau et la pluie efficace). Les sens d'écoulement au sein de ce système sont très dépendants des conditions d'exploitation du site de captage (pompages et bassins). L'exutoire de ce système d'écoulement correspond aux ouvrages de pompage présents sur le site de captage.

La calibration du modèle en régime transitoire étant réalisée à l'échelle du champ captant, le système d'écoulement « réduit » peut être décrit plus précisément.
Dans les parties suivantes, nous allons analyser les différentes sources d'alimentation des ouvrages de pompage du captage de Crépieux-Charmy. Une analyse plus approfondie des aires d'alimentation des bassins d'alimentation et de leur impact thermique sera ensuite réalisée. Enfin, nous observerons l'impact du changement d'exploitation du captage sur les aires de captages des puits de pompage.

### V.2.1. Les sources d'alimentation des ouvrages de pompage du champ captant

La simulation en régime transitoire à grande échelle permet de confirmer le fait que les ouvrages de pompage du champ captant de la Métropole de Lyon sont alimentés par quatre sources d'alimentation, à savoir : les nappes souterraines (nappe des alluvions du Rhône et nappe de l'Est par les couloirs de Meyzieu et de Décines), les bassins d'infiltration, les cours d'eau et la pluie efficace.

La quantité d'eau qui transite par les bassins d'infiltration est connue et maîtrisée. En moyenne sur la période avril 2014 – décembre 2017, le volume infiltré par la recharge artificielle correspond à 46 % du volume pompé sur l'ensemble du champ captant (Section IV.2.3.2).
Au cours de l'année simulée (2016), le volume infiltré correspond à 52 % du volume pompé (volume infiltré = 39 807 973 $m^3$ et volume pompé = 75 887 747 $m^3$). Dans la simulation numérique, une grande majorité de particules injectées dans les bassins d'infiltration se dirigent vers les ouvrages de pompage (on estime que 80 % de l'eau injectée dans les bassins est récupérée par les puits). De ce fait, nous pouvons estimer que **les bassins d'infiltration contribuent au moins à 40 % de l'alimentation des ouvrages de pompage du site de Crépieux-Charmy (**Figure 91).

Un bilan de masse réalisé sur chaque cours d'eau bordant le captage ou le traversant permet d'estimer la quantité d'eau apportée à la nappe par chaque bras du Rhône, à l'échelle du champ captant, et tout au long de l'année simulée.
D'après les calculs (Tableau 30), le canal de Miribel est le bras du Rhône qui apporte le plus grand volume d'eau à la nappe (= 11 612 109 $m^3.an^{-1}$). Suivent ensuite le Canal de Jonage, le Canal Sud et le Vieux-Rhône. Ces apports dépendent du coefficient d'échange nappe-rivière imposé dans le modèle et de la longueur de chaque bras du Rhône. **Si la totalité de l'eau infiltrée est captée par les ouvrages de pompage, alors le volume infiltré par les berges des cours d'eau représenterait un maximum de 17,3 %** du volume pompé sur le champ captant (Figure 91) tout au long de l'année 2016. Or, toute l'eau qui s'infiltre par les cours d'eau ne parvient pas aux ouvrages de pompage, mais il est difficile de quantifier cette répartition. **Si on considère que 80 % de l'eau est captée par les ouvrages de pompage, alors les échanges nappe-rivière représenteraient 13,8 % de l'alimentation de la zone de captage** de Crépieux-Charmy.
Par ailleurs, du fait de l'évolution du coefficient d'échange renseigné dans le modèle selon le niveau d'eau dans le Canal de Miribel (Section V.1.5), l'apport par les berges de ce cours d'eau n'est pas constant dans le temps : il est bien plus important en période de crue.

| | **Canal de Miribel** | **Canal de Jonage** | **Vieux-Rhône** | **Canal Sud** | **Total** |
|---|---|---|---|---|---|
| Volume infiltré annuel (en $m^3.an^{-1}$) | 11 612 109 | 758 277 | 333 069 | 408 226 | **13 111 681** |
| Si toute l'eau infiltrée parvient aux ouvrages de pompage, que représente ce volume infiltré par rapport au volume prélevé sur le champ captant ? | 15,30 % | 0,44 % | 0,54 % | 1,0 % | **17,28 %** |
| Si 80 % de l'eau infiltrée parvient aux ouvrages de pompage, que représente ce volume infiltré par rapport au volume prélevé sur le champ captant ? | 12,24 % | 0,35 % | 0,43 % | 0,80 % | **13,82 %** |

*Tableau 30 : Apports par les cours d'eau – Résultats de la simulation de l'année 2016*

La pluie efficace moyenne annuelle est de 330 mm.an$^{-1}$. En 2016 elle n'est que de 163,7 mm.an$^{-1}$. Le champ captant s'étend sur une surface totale de 375 ha. Ainsi **si toute l'eau de pluie qui s'infiltre sur la zone de captage parvient aux ouvrages de pompage**, elle ne représente que 613 875 m$^3$.an$^{-1}$ au maximum, **soit 0,81 % du volume annuel pompé** (Figure 91).

La dernière source d'alimentation possible du champ captant correspond aux apports par les eaux souterraines. D'après les estimations des sources d'alimentation précédentes, **les eaux de nappe représenteraient environ 45 % du volume pompé sur l'ensemble du champ captant** (Figure 91).
A partir de la simulation actuelle, du fait de l'absence de calage en régime transitoire en dehors de champ captant de Crépieux-Charmy, il est difficile de déterminer la quantité d'eau exacte en provenance de la nappe des alluvions du Rhône et des deux couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines.
Ceci étant, il apparait clairement que le couloir de Meyzieu alimente la zone de captage de Crépieux-Charmy plus fortement que le couloir de Décines (d'après les sens d'écoulement du couloir de Décines qui semblent se diriger préférentiellement vers la limite aval des alluvions du Rhône et du fait des conductivités hydrauliques plus fortes dans le couloir de Meyzieu).

La Figure 91 schématise un bilan de la quantification des différentes sources d'alimentation de la zone de captage de Crépieux-Charmy. Du fait des hypothèses posées quant à la part des volumes infiltrés qui parviennent aux ouvrages de pompage, les proportions de chaque source d'alimentation de la prairie de captage sont estimées à plus ou moins 5 %.

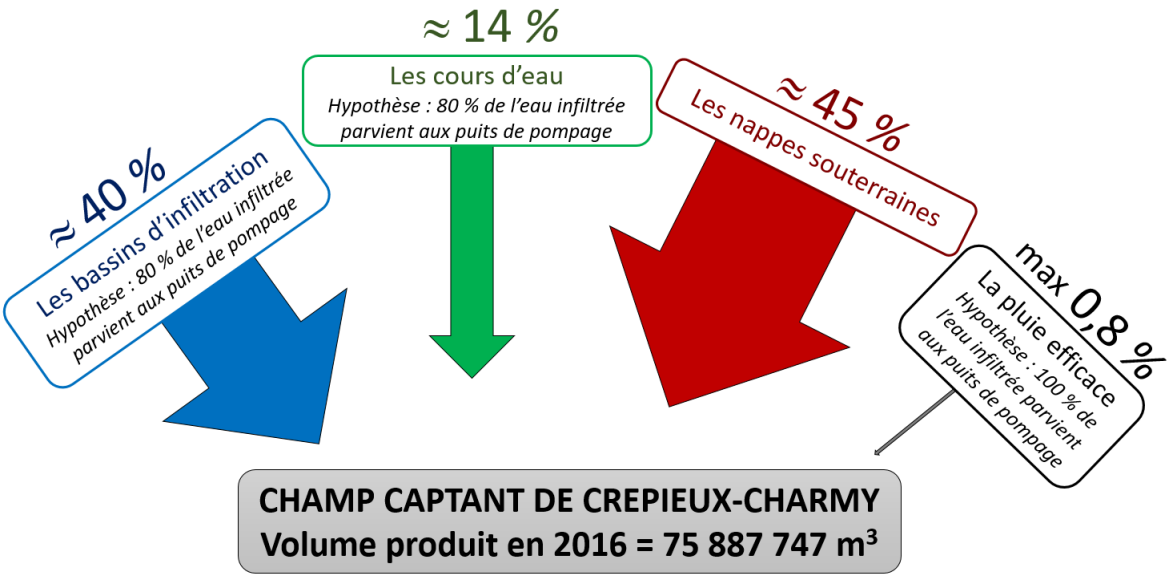



*Figure 91 : Estimation de la part de chaque source d'alimentation du champ captant de Crépieux-Charmy (en pourcentage d'apport par rapport au volume pompé sur le site)*

### V.2.2. Les bassins d'infiltration : rôle de barrière hydraulique et impact thermique engendré

#### *V.2.2.1. Les aires d'alimentation de chaque couple de bassins d'infiltration*

L'outil numérique FEflow permet de tracer les lignes de courants qui suivent le cheminement de l'eau injectée dans chaque bassin d'infiltration, et donc de visualiser l'aire d'alimentation de chaque entité. Cependant, seul le mécanisme de convection est pris en compte dans le tracé des lignes de courant.

Les aires d'alimentation sont délimitées par couple de bassins, à des pas de temps d'enregistrement de la simulation au cours desquels les deux sous-bassins ont fonctionné. Le bassin 1-2 est considéré seul puisque le bassin 1-1 n'est plus en fonctionnement depuis 2014. Le choix des dates pour l'analyse des résultats est limité puisque seuls les pas de temps d'enregistrement des calculs de la simulation permettent le tracé des lignes de courant (or l'enregistrement n'est réalisé que le dernier jour de chaque mois). Les aires d'alimentation obtenues pour chaque couple de bassin, ainsi que les dates retenues pour réaliser leur tracé, sont illustrées sur la Figure 92. Les dates n'étant pas identiques, les conditions d'exploitation du site (pompages et alimentation des autres bassins d'infiltration) sont différentes d'une carte à l'autre. De ce fait, **chaque aire d'alimentation est à interpréter de manière indépendante**.

Chaque couple de bassin semble contribuer à la protection du centre de la prairie de captage de l'île de Crépieux (Figure 92) : toutes les aires d'alimentation se dirigent vers le centre de la prairie de captage. Les aires d'alimentation sont plus ou moins étendues selon les bassins considérés, notamment les bassins 3 et 4 qui présentent des aires d'alimentation très réduites (Figure 92). Cette observation est à relier aux faibles vitesses d'infiltration que ces deux couples de bassins présentaient en 2016 (les bassins 3-1 et 4-2 ont d'ailleurs fait l'objet d'un renouvellement de sable de fond de bassin en septembre 2016, Annexe 8). Du fait des faibles volumes d'eau mis en jeu par ces deux couples de bassins au cours de l'année 2016, l'eau infiltrée alimente les puits de captage mais ne permet pas l'inversion du sens d'écoulement en direction du Nord-Ouest (pas d'écoulement des bassins en direction du Canal de Miribel).
Les bassins 2, qui ont bénéficié d'un renouvellement de sable en 2014 (Annexe 8), sont en capacité d'infiltrer un volume d'eau bien plus conséquent, ce qui explique l'étendue l'aire d'alimentation de ce couple de bassins.

Les aires d'alimentation des bassins 5 et 6 montrent un **écoulement sous le Vieux-Rhône qui se produit sans difficulté apparente**. Ce résultat numérique appuie les observations réalisées sur le site d'étude :

- ✓ Oscillations thermiques dans la partie du Sud du bassin 5-2 en lien avec l'exploitation de ce bassin et des pompages actifs ou inactifs de l'île de Charmy → Section III.5 ;
- ✓ Cartes de température de nappe qui illustrent la propagation des panaches thermiques des bassins 6 sous le Vieux-Rhône, en direction de l'île de Crépieux → Section III.4.

D'un point de vue de la protection des ouvrages de pompage (en cas de contamination dans les cours d'eau), il semblerait que la barrière hydraulique ne protège pas l'ensemble des forages du poste électrique n°10 (situé au Sud de l'île de Crépieux), ainsi que certains puits situés à l'Est de l'île de Charmy.

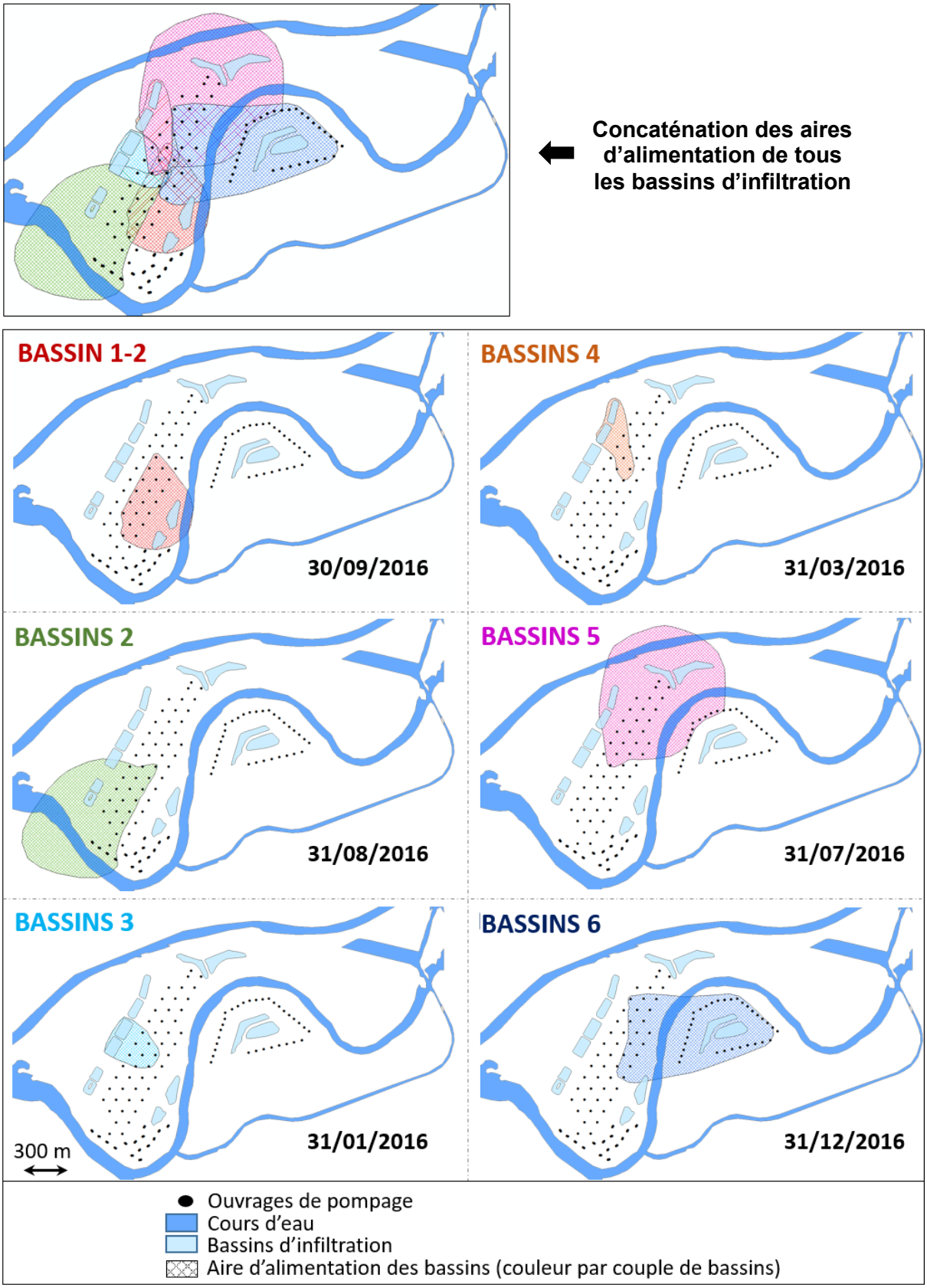



*Figure 92 : Les aires d'alimentation de chaque couple de bassins d'infiltration du champ captant de Crépieux-Charmy*

#### *V.2.2.2. Impact thermique engendré par les bassins d'infiltration*

L'évaluation du modèle numérique d'un point de vue de l'évolution des températures de nappe montre que le calcul reproduit bien la température observée sur le terrain, pour des temps longs. En effet, il a été montré que l'absence de calage thermique du modèle impacte les résultats sur les temps courts, inférieurs à 15 jours (Section V.1.6) : un certain retard est visible entre la température de nappe observée et calculée, notamment en cas d'évolution brutale de la température lors de la mise en eau des bassins en période estivale.
Ce retard est vraisemblablement lié au non-équilibre thermique local : les vitesses d'écoulements étant rapides, il serait nécessaire de différencier la température de l'eau et celle de la phase solide du milieu poreux puisque les deux ne sont pas égales instantanément.

Bien que le non-équilibre thermique local ne soit pas pris en considération dans la simulation actuelle, il est tout de même possible d'analyser l'évolution des températures de nappe au cours de l'année (donc sur des temps plutôt longs) : les tendances générales d'évolutions thermiques calculées reproduisent bien les tendances observées sur le terrain, et l'amplitude des variations thermiques est également bien reproduite au cours de la simulation (Figure 86).

La simulation de l'année 2016 montre que **la hausse des températures qui est enregistrée au cours de la période estivale est liée à la réalimentation artificielle de la nappe, et non aux infiltrations par les berges des cours d'eau** (Annexe 11) : les ouvrages proches des bassins d'infiltration (piézomètres S20 et P05) sont plus impactés thermiquement comparé aux ouvrages situés à proximité des berges des cours d'eau (piézomètres S34 et C05).
Ce résultat de simulation numérique confirme les observations et expérimentations réalisées sur le site de captage (cartes de température à l'échelle du champ captant et traçages thermiques, présentés dans la Section IV.3), qui semblaient prédire un impact thermique prépondérant par les bassins d'infiltration.

Bien que le calage thermique ne soit pas effectué pour ce modèle numérique, il est tout de même envisageable de réaliser des **scénarios prédictifs sur le long terme** (par exemple pour estimer l'impact thermique du changement climatique sur la température de nappe de la prairie de captage, ou l'impact thermique d'un changement d'exploitation du site de captage).

### V.2.3. Impact des conditions d'exploitation du captage sur l'origine de l'eau pompée dans les puits et forages du champ captant

Au cours des travaux de thèse de S. Loizeau, un modèle numérique avait été réalisé sur une zone restreinte du champ captant, centré sur les bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 (zone modélisée présentée en Annexe 9), et seuls certains puits faisaient partie intégrante du modèle *[Loizeau, 2013]*. D'après les résultats de ce modèle, certains ouvrages de pompage semblaient être directement alimentés par les cours d'eau, même si les bassins 5-1 et 5-2 étaient en fonctionnement.

Le modèle numérique grande échelle permet aujourd'hui de reproduire l'écoulement sur l'ensemble du champ captant. En traçant les trajectoires de particules injectées dans les cours d'eau et dans les bassins d'infiltration, il est possible de visualiser, pour chaque pas de temps d'enregistrement de la simulation, la provenance de l'eau captée dans chacun des ouvrages de pompage.

Comparons, à l'échelle du champ captant, les résultats des simulations du 31 mai 2016, date à laquelle l'ensemble des bassins d'infiltration étaient à l'arrêt (Figure 93 A.), et du 30 avril 2016, date à laquelle certains bassins d'infiltration sont en fonctionnement (Figure 93 B.). La Figure 93 représente les trajectoires des particules injectées dans les eaux de surface

(cours d'eau et bassins d'infiltration), et dont le code couleur permet de différencier les origines de l'eau captée par les ouvrages de pompage.

Il apparait que, **selon l'exploitation des bassins d'infiltration** (en fonctionnement ou à l'arrêt), **et selon les conditions de pompage** (pompages actifs ou non localement), **les lignes de courant des eaux sont modifiées**.

Ainsi, lorsque la barrière hydraulique n'est pas en fonctionnement (Figure 93 A.), les différents bras du Rhône alimentent les ouvrages de pompage. Le Canal de Miribel alimente les ouvrages de pompage situés au Nord et à l'Ouest de la prairie de captage de l'île de Crépieux, et les ouvrages situés au Nord de l'île de Charmy. Le Vieux-Rhône permet l'alimentation des ouvrages de Charmy principalement, mais également les puits du centre et du Sud de l'île de Crépieux. Le Canal Sud voit son eau parvenir aux ouvrages du Sud de l'île de Charmy, mais également aux ouvrages présents sur la moitié Sud de Crépieux. Le Canal de Jonage est peu sollicité par les ouvrages de pompage : seuls certains puits et forages de l'extrême Sud de l'île de Crépieux captent de l'eau en provenance de ce Canal. Il est à noter que la Figure 93 A. représente les trajectoires de particules à la date du 31 mai 2016. Cette date correspond aux lâchers de barrages du Rhône. De ce fait, le débit dans les cours d'eau est conséquent (les échanges nappe-rivière sont donc plus élevés que la normale), et les pompages ont été réduits à cette période (le débit moyen journalier pompé sur l'ensemble du champ captant au mois de mai 2016 s'élève à 167 000 $m^3.j^{-1}$ comparé à la moyenne de 210 000 $m^3.j^{-1}$ au cours de l'année 2016). Les ouvrages situés au Sud de Crépieux n'étaient pas actifs afin de limiter les échanges nappe-rivière. Ceci explique que l'eau superficielle n'est pas appelée sur cette partie du champ captant.

Lors du fonctionnement des bassins d'infiltration (Figure 93 B.), les trajectoires sont modifiées, comme c'est le cas à la date du 30 avril 2016. Sur cet exemple, seuls les bassins 1-2, 4-2, 5-1, 5-2 et 6-1 sont en fonctionnement. L'eau pompée dans les puits de pompage, localisés dans l'aire d'alimentation des bassins actifs, provient en grande majorité de l'infiltration d'eau par les bassins. Les trajectoires de particules injectées dans le Canal de Miribel sont déviées du fait du fonctionnement des bassins 5 (zone Nord du champ captant). **Ceci montre l'efficacité de la barrière hydraulique** lors de la mise en eau des bassins 5 (inversion des sens d'écoulement naturels).

Malgré le fonctionnement des bassins d'infiltration, **quelques « brèches » peuvent apparaitre dans la barrière hydraulique** : des ouvrages de pompage peuvent être alimentés par de l'eau en provenance des cours d'eau. Si certains bassins d'infiltration sont à l'arrêt, alors ces « brèches » peuvent présenter une dimension non négligeable.
Pour illustrer ces propos, la Figure 94 illustre les trajectoires de particules aux dates du 25 mars 2016 et du 22 octobre 2016. Les conditions d'exploitation des bassins d'infiltration, à ces deux dates, sont les suivantes :

- ✓ **Le 25 mars** (Figure 94 A.) : les bassins 1-1, 6-1 et 6-2 sont à l'arrêt.
- ✓ **Le 22 octobre** (Figure 94 B.) : les bassins 1-1, 3-1 et 4-2 sont à l'arrêt.

Une brèche dans la barrière hydraulique semble survenir entre les bassins 4-2 et 5-1, malgré le fonctionnement de ces deux bassins (Figure 94 A.).Si le bassin d'infiltration 4-2 est à l'arrêt (Figure 94 B.), alors la brèche est plus large. Les ouvrages de pompage qui se situent dans la zone de la brèche sont alors alimentés par le Canal de Miribel.

De la même manière, les ouvrages situés à l'Est des bassins d'infiltration 6-1 et 6-2 (île de Charmy) ne semblent pas protégés par la barrière hydraulique (Figure 94 A. et B.) : ces puits sont alimentés par les cours d'eau, peu importe si les bassins d'infiltration sont en fonctionnement ou non.

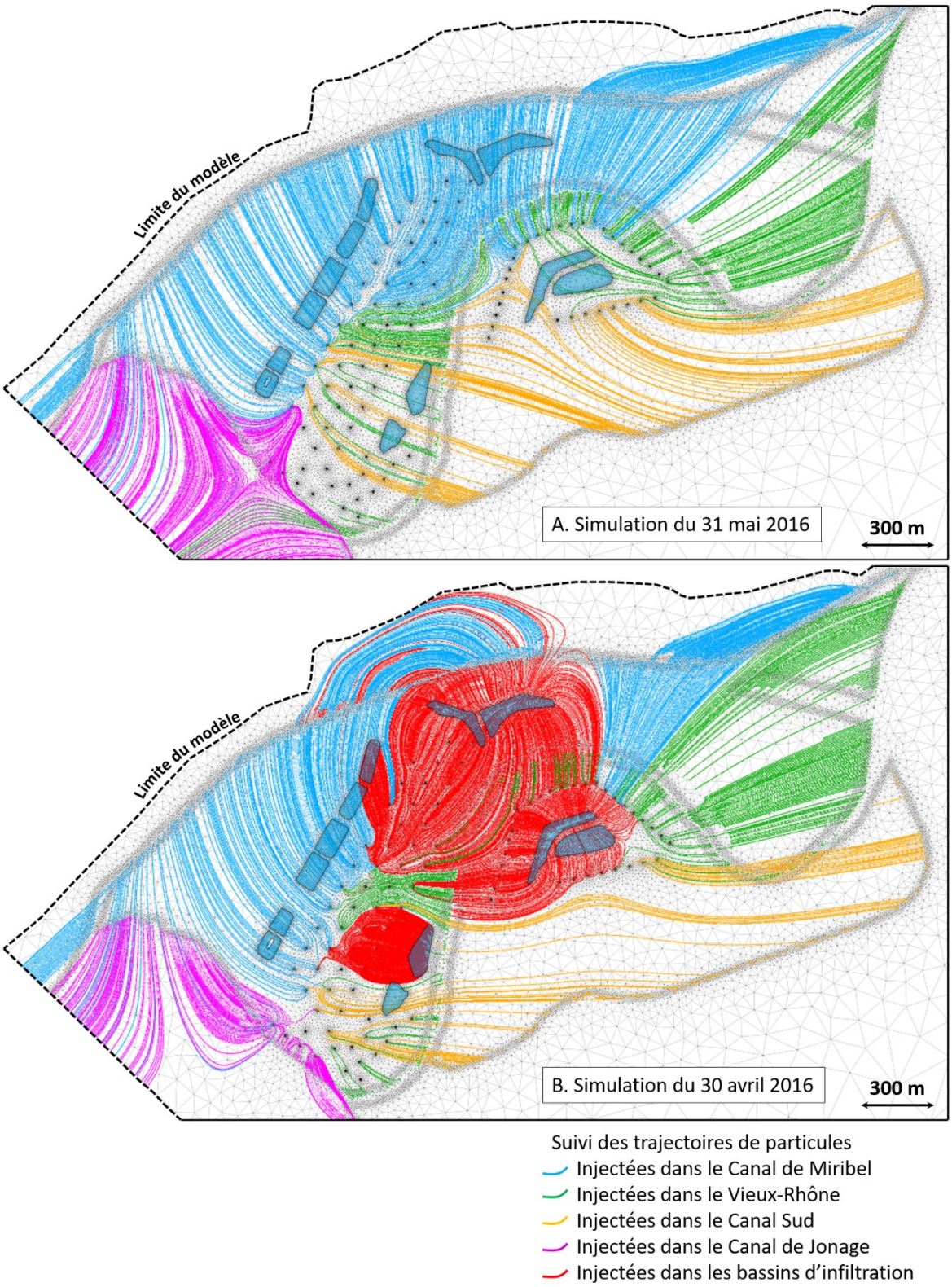



*Figure 93 : Suivi des trajectoires de particules en provenance des eaux superficielles, sans fonctionnement des bassins d'infiltration (A.) et avec mise en eau de certains bassins (B.)*

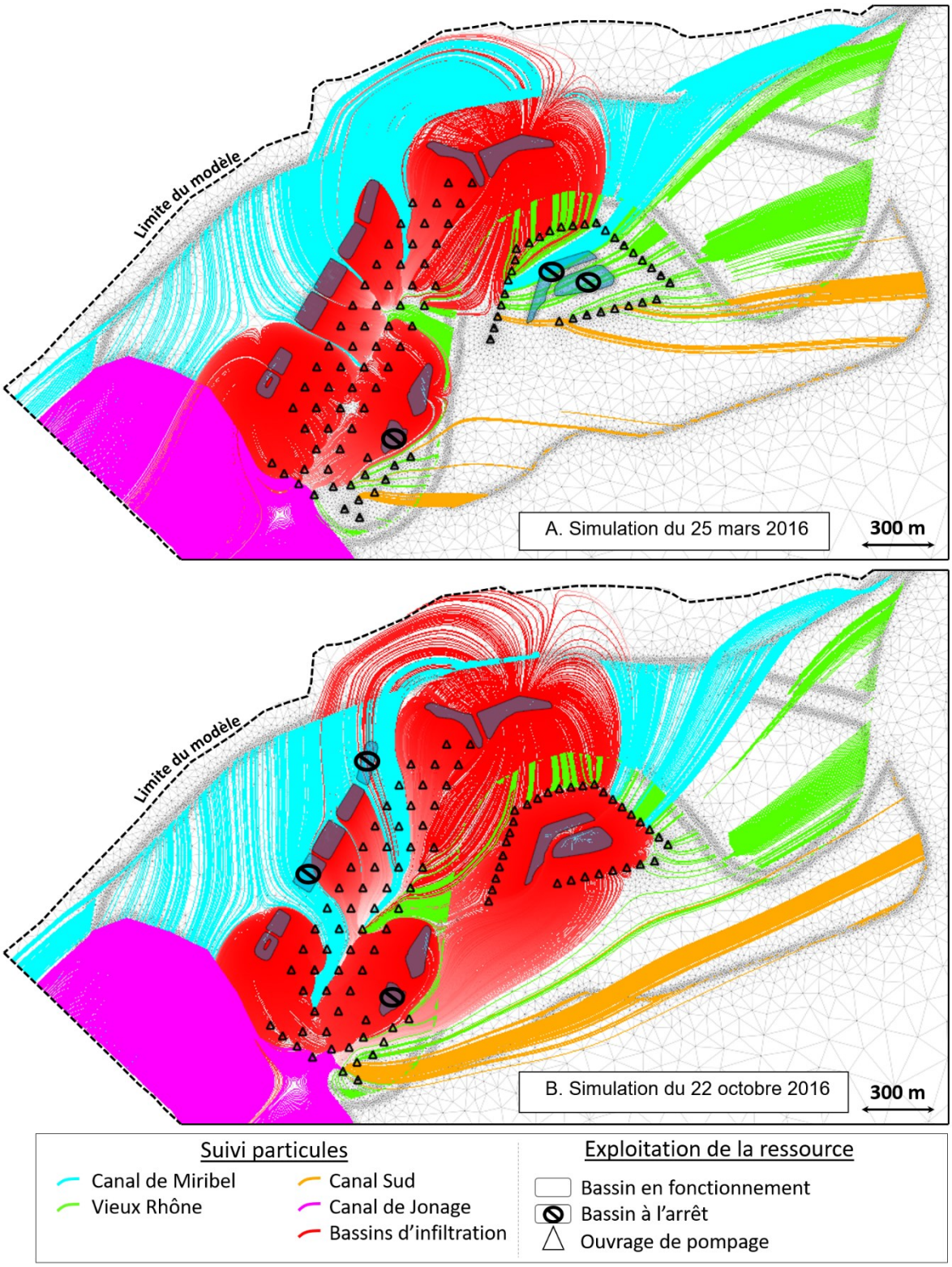



*Figure 94: Suivi des trajectoires de particules en provenance des eaux superficielles, à la date du 25 mars 2016 (A.) et du 22 octobre 2016 (B.)*

Si certaines zones des cartes illustrées en Figure 93 et Figure 94 sont appauvries en tracé de particules, ceci s'explique par le fait que ces cartes ne représentent pas les écoulements en provenance de la nappe alluviale du Rhône et des couloirs fluvio-glaciaires. En traçant les trajectoires de particules en provenance des nappes souterraines (en violet sur la Figure 95), on remarque que les arrivées d'eau souterraine jouent un rôle très important dans l'alimentation des puits de pompage. De plus, les écoulements sont tridimensionnels : les trajectoires de particules en provenance des eaux superficielles (Figure 93 et Figure 94) et des eaux souterraines (Figure 95) peuvent se superposer (notamment à l'Est du champ captant et au Sud), ce qui illustre la stratification verticale des écoulements (mis en évidence par l'observation dans la Section III.5).

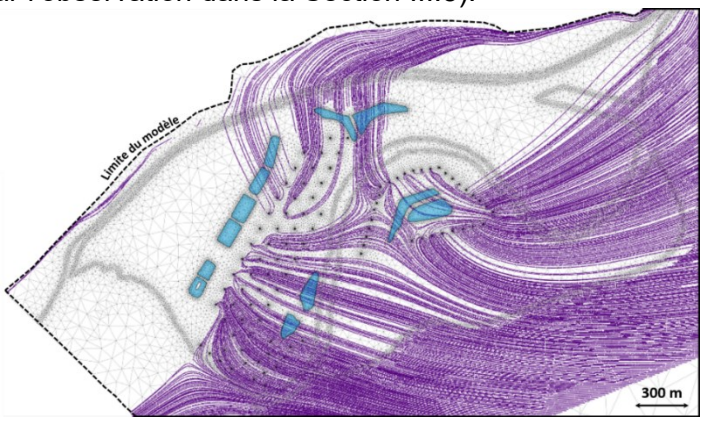



*Figure 95 : Suivi des trajectoires de particules en provenance des nappes souterraines à la date du 31 mai 2016*

De la même manière, l'outil de suivi de particules permet de connaître l'**aire de captage de chaque ouvrage de pompage** présent sur le champ captant.
Prenons l'exemple des ouvrages de pompage rattachés au poste électrique n°12 (situé au Nord de l'île de Charmy). L'aire de captage de ces ouvrages de pompage est très dépendant des conditions d'exploitation du site, notamment selon les bassins d'infiltration en fonctionnement ou à l'arrêt. La Figure 96 illustre l'aire de captage des ouvrages du poste n°12 dans trois situations différentes :

- ✓ **1er cas** : **le bassin 6-1 est le seul à être en fonctionnement (**Figure 96 A.)

Dans ce cas, les ouvrages de pompage du poste n°12 sont principalement alimentés par l'eau d'infiltration du bassin 6-1 (écoulement selon la direction SE-NW). Une partie de l'eau captée vient de l'infiltration par le Canal de Miribel (écoulement selon la direction NE-SW).

- ✓ **2ème cas** : **le bassin 5-2 est le seul à être en fonctionnement (**Figure 96 B.)

Si le bassin 6-1 n'est pas en service, alors les puits de pompage du Nord de l'île de Charmy captent de l'eau en provenance du bassin 5-2 s'il est en fonctionnement, et/ou du Canal de Miribel.
De ce fait, les écoulements sous le Vieux-Rhône sont conséquents (bras du Rhône séparant les îles de Crépieux et Charmy), et le Vieux-Rhône ne participe que très peu à l'alimentation des ouvrages de pompage du poste n°12.
Dans ce cas, l'écoulement est majoritairement orienté selon une direction Nord-Sud.

- ✓ **3ème cas** : **les bassins 5-2 et 6-1 sont tous deux en fonctionnement (**Figure 96 C.)

Si les deux bassins 5-2 et 6-1 sont en fonctionnement, alors les ouvrages de pompages captent de l'eau en provenance de ces deux sources d'apports en eau, ainsi que de l'eau en provenance du Canal de Miribel.

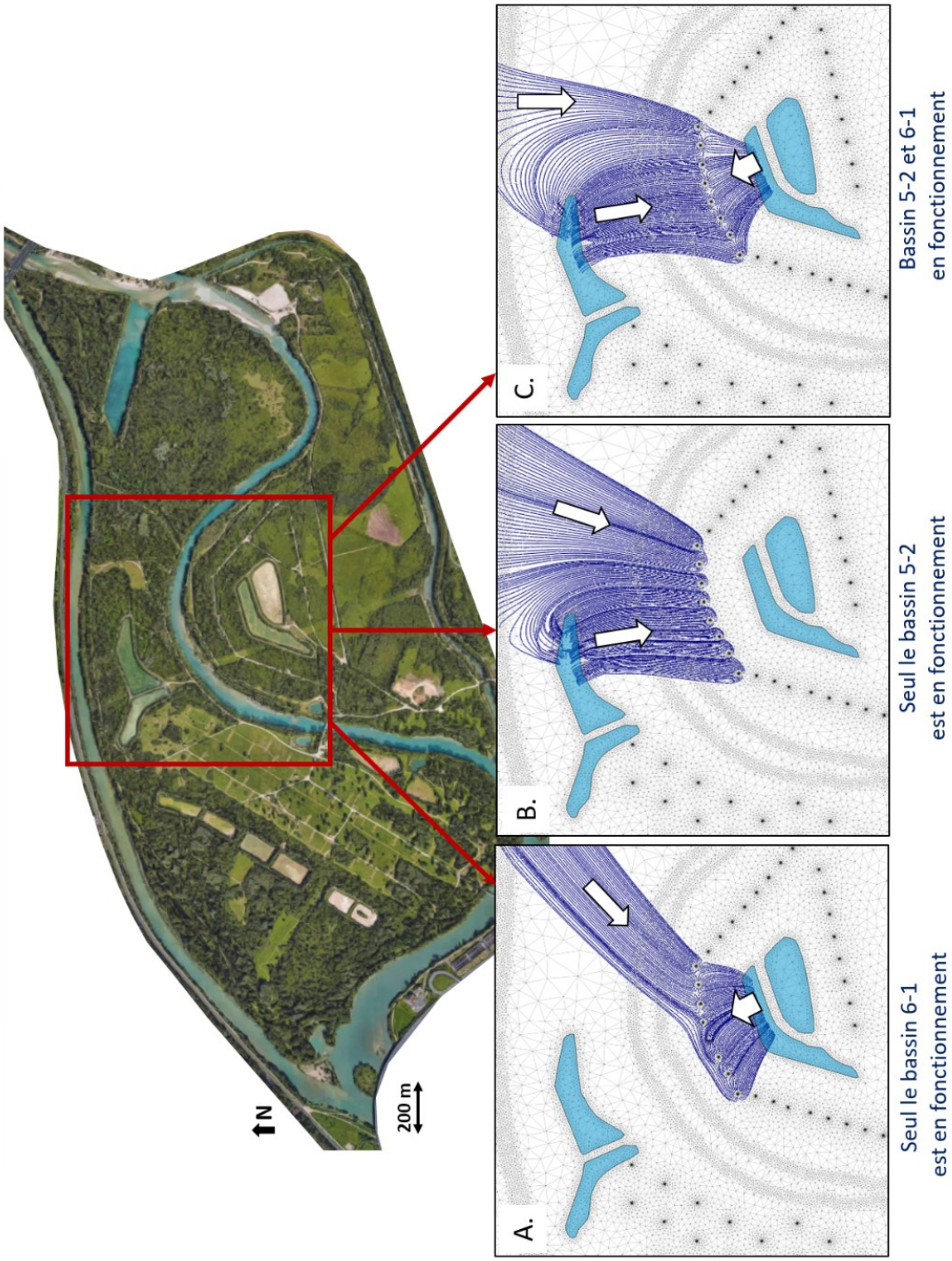



*Figure 96 : Aire de captage des ouvrages du poste électrique n°12 (Nord de l'île de Charmy), selon différentes conditions d'exploitation des bassins d'infiltration.*

## V.3. Quelles améliorations et perspectives d'utilisation de l'outil numérique ?

### V.3.1. Améliorer les connaissances concernant les échanges nappe-rivière

La modélisation actuelle nous permet de reproduire de manière satisfaisante l'évolution piézométrique, à l'échelle du champ captant, dans les ouvrages proches des cours d'eau, notamment à proximité du Canal de Miribel.
Pour rappel, la condition limite imposée dans le Canal de Miribel est une condition de 3ème type, qui évolue dans le temps et dans l'espace : le coefficient d'échange nappe-rivière est plus élevé à partir d'une certaine hauteur de berge (= seuil), et il n'est imposé seulement qu'en période de crue (Section V.1.5). Cette condition limite est assez brutale (puisqu'elle est variable dans le temps et dans l'espace) mais elle est nécessaire du fait du manque de raffinage de maillage (sur certaines portions, la hauteur entre le fond du cours d'eau et le haut de la berge n'est divisée qu'en une à deux mailles).
Bien que la condition limite imposée soit brutale, un gain non-négligeable est apporté par cette méthode. Ainsi nous pouvons en déduire qu'un « effet seuil » est notable en ce qui concerne les échanges nappe-rivière. Ceci vient du fait que le fond des cours d'eau est plus colmaté que le haut des berges. À partir d'une certaine hauteur d'eau dans les bras du Rhône, l'infiltration naturelle sur le haut des berges est bien plus importante que sur le fond des cours d'eau.

L'observation des données piézométriques acquises sur le terrain, ainsi que le résultat de la simulation numérique montrent l'effet non négligeable des échanges nappe-rivière à l'échelle du champ captant (même les ouvrages les plus éloignés des cours d'eau enregistrent les passages de crues).
De ce fait, il est maintenant nécessaire de mieux comprendre les phénomènes qui se produisent dans la réalité, et spatialiser l'information à l'échelle du champ captant. Est-ce que tous les cours d'eau présentent cet « effet seuil » ? Est-ce que le coefficient d'échange nappe-rivière peut être considéré constant entre l'amont et l'aval de chacun des bras du Rhône ou évolue-t-il ?
Pour répondre à ces différentes questions, la Plateforme Recherche de Crépieux Charmy a proposé un projet de recherche de 2018 à 2022. Ce projet est focalisé sur la compréhension des échanges nappe-rivière par l'intermédiaire d'observations et d'expérimentations in-situ (notamment par la mise en place de mini-piézomètres sur berges avec acquisition en continu des niveaux piézométriques, des températures, et de différents paramètres physico-chimiques.
Le but à terme est de comprendre les phénomènes naturels (échanges nappe-rivière, capacité épuratoires des berges) de chaque bras du Rhône pour les intégrer dans un modèle numérique amélioré.

### V.3.2. Calibration des transferts de chaleur

Actuellement, le calage du modèle numérique repose seulement sur l'hydrodynamique des écoulements. Sans calage de la thermique, il se trouve que les résultats du modèle ne sont pas très éloignés de la réalité. En effet, les évolutions thermiques des points de contrôle suivent les bonnes tendances, ainsi que les bonnes gammes de variations. Le modèle actuel permet donc de simuler des scénarios d'évolutions thermiques sur le long terme, et ce sans nécessité de calage.

Par contre, sur les temps plus courts, la simulation peut présenter des écarts assez importants par rapport aux températures de nappe réellement enregistrées sur le terrain. Ceci est notamment vrai pour les points de contrôle situés à proximité des conditions limites imposées, par exemple à proximité des bassins d'infiltration. L'écart présent entre

l'observation et la simulation correspond à un certain retard. Ceci est typique d'un phénomène de non-équilibre thermique local.
Le modèle actuel considère que l'eau et le milieu environnant sont à la même température de manière instantanée. Or, en cas d'écoulement rapide et selon la granulométrie du milieu environnant, la température du sol ne se met pas instantanément à l'équilibre avec la température de l'eau. Ceci peut expliquer le retard qui survient quant à l'évolution des températures simulées par rapports aux températures observées. Tenir compte du non-équilibre thermique local permettrait d'améliorer l'évolution thermique sur des temps plus courts.

### V.3.3. Un outil numérique, pour quelles applications futures ?

L'outil numérique a pour but de simuler des scénarios multiples d'évolution de la ressource à l'échelle du champ captant. Dès à présent, ou suite aux pistes d'améliorations proposées (échanges nappe-rivière et calage thermique), il est possible de simuler l'évolution hydrodynamique et thermique de la ressource sur des temps longs.
La méthodologie consiste à imposer les conditions limites adaptées à chaque scénario, et à analyser les résultats du modèle sur des temps longs. Ce type d'outil numérique est particulièrement adapté pour observer l'impact du changement climatique, ou l'impact d'un changement de condition d'exploitation de la ressource sur le long terme. Une liste non-exhaustive d'exemples de scénarios à tester est présentée ci-après :

- ✓ **Quid du changement climatique ?**

L'évolution climatique est une question d'actualité depuis déjà plusieurs dizaines d'années, et elle entraîne de fortes interrogations quant à la pérennisation de la ressource.
D'après le *PCET du Grand Lyon* (2015), la température de surface à Lyon pourrait subir une hausse de +5 °C d'ici 2050, la pluviométrie pourrait diminuer de 25 à 40 % en période estivale d'ici 2080, et le débit du Rhône pourrait chuter de 15 à 30 %.
En se basant sur la simulation de l'année 2016 (conservation des conditions d'exploitation réelles : pompages et bassins d'infiltration), il serait intéressant d'adapter les conditions limites des cours d'eau et de la pluviométrie aux prévisions climatiques les plus défavorables. Ceci signifie que les chroniques de données de l'année 2016 seraient adaptées à un changement climatique marqué, tel que :

- La pluviométrie serait abaissée de 25 % tout au long de l'année,
- Le débit moyen journalier du Rhône de 2016 serait abaissé de 30 %,
- La température des cours d'eau et de l'eau infiltrée dans les bassins d'infiltration seraient augmentées de l'ordre de 2 à 3 °C (la température des eaux de surface serait alors supérieure à 25 °C pendant une grande partie des mois de juillet et août).

Les résultats de simulation permettront ensuite de connaître l'impact d'une telle évolution climatique sur la ressource du champ captant, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif (lié aux températures).

- ✓ **Quid d'un changement d'exploitation du champ captant de la Métropole de Lyon ?**

Que se passerait-t-il si les bassins d'infiltration ne pouvaient plus être en fonctionnement pour une raison quelconque, et ce sur une longue période ?
La simulation d'un tel évènement permettrait de simuler l'évolution piézométrique sur l'ensemble du site de captage, et ce sans modifier les conditions climatiques et les conditions de pompage (les chroniques sont identiques à celles de 2016, seuls les bassins sont totalement arrêtés).
Cette simulation permettra d'analyser le comportement de la nappe en cas de réalimentation artificielle de la nappe non-active, et de quantifier la durée de pompage possible avant d'atteindre le seuil d'alerte (= niveau de nappe très bas qui entraine une crise et la nécessité

de puiser de l'eau hors du champ captant pour assurer l'alimentation en potable de la population).

Que se passerait-t-il si les besoins en eau de la population augmentent avec le temps ?
Si la population de l'agglomération lyonnaise s'accroît, alors la demande en eau augmentera dans le futur. De ce fait, il serait intéressant de simuler une période assez longue pour laquelle le volume pompé sur l'ensemble du champ captant augmenterait de 10 % par exemple. Ceci permettrait de quantifier la perte de niveau de nappe sur des temps longs.
Une autre possibilité serait de simuler une année complète pour laquelle le volume pompé serait équivalent au volume prélevé autorisé par la DUP, à savoir 600 000 $m^3.j^{-1}$. Cette simulation permettrait de se situer sur une période de fonctionnement maximal du site.
Pour rappel, en 2016, le volume prélevé journalier sur le site de captage était compris entre 79 000 et 281 000 $m^3.j^{-1}$ (en moyenne 210 000 $m^3.j^{-1}$).

## *CHAPITRE V – CONCLUSIONS ET IDÉES À RETENIR*

### Les choix réalisés pour la conception du modèle et la stratégie de modélisation numérique

Afin de modéliser l'écoulement à l'échelle du champ captant, il est **nécessaire de tenir compte des différentes sources d'alimentation** de ce site. Ainsi l'extension du domaine d'étude remonte à l'amont jusqu'au barrage de Jons pour la partie des alluvions fluviatiles du Rhône, et prend en compte les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines.

La simulation est tout d'abord réalisée en **régime permanent**, en considérant une pluviométrie efficace moyenne annuelle et des pompages moyens annuels sur l'ensemble des sites de captage du domaine d'étude. Se basant sur une carte piézométrique datant de 1973, **les conductivités hydrauliques des couloirs de Meyzieu et de Décines** ont pu être calées.

S'en suit alors une simulation en **régime transitoire**, pour reproduire **l'année 2016**, en se focalisant sur le champ captant de la Métropole de Lyon. L'année 2016 est une année intéressante du fait des **conditions hydrologiques extrêmes enregistrées** (périodes de crues, périodes longues soumises à des débits d'étiage, températures des eaux de surface allant de 4 °C en période hivernale et jusqu'à 26 °C au cours de l'été), mais également du fait des **conditions d'exploitation du site qui varient fortement** au cours du temps (périodes de forte et faible production d'eau, période exceptionnelle de non-fonctionnement des bassins d'infiltration pendant un mois complet).

La modélisation en régime transitoire nécessite de **renseigner les paramètres physiques et thermiques** en tout point du modèle, d'**adapter les conditions limites aux conditions d'exploitation réelles de 2016** et d'**améliorer certains points clés** tels que :

- ✓ **Condition initiale de charge hydraulique et de température** basées sur les observations de terrain à la date du 01/01/2016 à minuit (pour tenir compte de l'exploitation du site du mois de décembre 2015),
- ✓ Améliorer le **battement de nappe au droit des bassins d'infiltration 5** en modifiant la porosité et en ajoutant une complexité lithologique selon la profondeur,
- ✓ Imposer un **coefficient d'échange nappe-rivière variable dans le temps et dans l'espace pour le Canal de Miribel**, dans le but de reproduire les remontées piézométriques enregistrées lors des crues.

Les chroniques imposées pour les débits de pompage et les vitesses d'infiltration dans les bassins doivent être renseignées au **pas de temps journalier** au minimum, pour pouvoir représenter correctement les évolutions piézométriques à l'échelle du champ captant.

### L'évaluation du modèle numérique en régime transitoire, à l'échelle du champ captant

L'évaluation du modèle consiste à **comparer l'observation réalisée sur le terrain et le résultat de la simulation**, en différents points de contrôle munis de mesures de niveaux piézométriques et/ou de température de nappe.

En termes de **niveaux piézométriques**, la simulation reproduit correctement les variations de charges hydrauliques observées sur le terrain. Seules les zones aux alentours des bassins 5 et 6 (proches du Vieux-Rhône) présentent des niveaux piézométriques simulés un peu trop élevés comparé à la réalité. Mais les variations dans le temps sont bien reproduites. Un effort de calage du coefficient d''échange nappe-rivière le long du Vieux-Rhône permettrait sûrement d'améliorer le résultat de la simulation, notamment en période de crue.

En termes de **températures**, les évolutions sur le long terme sont bien reproduites dans la simulation numérique. La comparaison de l'observation et du calcul est cependant difficile à

réaliser sur des temps courts (< 15 jours) puisqu'un certain retard apparait. Ceci vient du fait que l'hypothèse de l'équilibre thermique local est faite dans la simulation numérique (on considère que l'eau et le milieu environnant sont à la même température instantanément). Du fait des résultats, tenir compte du non-équilibre thermique local permettrait de mieux reproduire l'évolution des températures, sur des temps courts, notamment à proximité des bassins d'infiltration lorsque ces derniers sont mis en eau en période estivale.

## L'interprétation du modèle numérique

L'analyse des résultats de simulation numérique permet de mettre en évidence plusieurs points clés :

✓ **Contribution de chaque source d'alimentation du champ captant** :
D'après la simulation de 2016, il s'avère que l'eau pompée sur le site du champ captant provient de **quatre sources principales** :

- Si 80 % de l'eau infiltrée par les bassins d'infiltration rejoint les ouvrages de pompages, alors **cette réalimentation artificielle représente environ 40 % de l'eau pompée** sur l'ensemble du champ captant.
- Si 80 % du volume d'eau, infiltré par les berges des cours d'eau, rejoint les ouvrages de pompage, alors **l'ensemble des cours d'eau contribuent à 14 % de l'eau pompée sur le champ captant**.
  Il est à noter que le Canal de Miribel, dont le coefficient d'échange est plus important que celui des autres bras du Rhône, représente à lui seul 12 % de cet apport.
- Si toute la pluie efficace infiltrée sur la zone du champ captant de Crépieux-Charmy rejoint les ouvrages de pompage, alors **cette source ne représenterait que 0,8 % de l'eau pompée** sur l'ensemble du site.
- D'après les estimations précédentes, **les 45 % restants seraient issus des arrivées d'eaux souterraines**. Le modèle numérique actuel ne permet pas de différencier la part de contribution de chacune des nappes souterraines.

✓ **L'efficacité de la barrière hydraulique et son rôle sur l'évolution thermique au sein de la prairie de captage** :

Le résultat de la simulation numérique permet de tracer l'**aire d'alimentation de chaque couple de bassins**. Travaillant à partir de données réelles, les aires d'alimentation ne sont pas tracées aux mêmes instants pour chaque couple de bassins (il faut que les deux bassins soient en fonctionnement). De ce fait, les aires d'alimentation sont à interpréter de manière indépendante puisque les conditions d'exploitation du champ captant ne sont pas identiques (d'autres bassins possiblement en fonctionnement ou à l'arrêt, pompages non constants au cours du temps).

Les bassins 5 et 6 voient leur aire d'alimentation franchir le Vieux-Rhône sans difficulté, ce qui illustre la présence d'écoulements sous ce bras du Rhône, déjà mis en évidence lors des observations et expérimentations menées sur le terrain.

**Tous les bassins alimentent les puits de captage. Il semblerait que l'ensemble des puits soient protégés en cas de contamination dans les eaux de surface, mise à part les ouvrages situés au Sud de l'île de Crépieux et les ouvrages les plus à l'Ouest de l'île de Charmy.**

✓ **D'où vient l'eau captée par les ouvrages de pompage ?**

Selon les conditions d'exploitation du site (pompage et bassins d'infiltration), **l'aire de captage des puits de pompage évolue**.

**Lorsque les bassins ne sont pas en fonctionnement**, alors **les bras du Rhône alimentent les puits de pompages**. Le Canal de Miribel est le plus fort contributeur pour les puits de la zone Nord de la prairie de captage de Crépieux. Le Vieux-Rhône, le Canal Sud et

le Canal de Jonage contribuent à l'alimentation de la zone Sud de l'île de Crépieux. La zone de captage de l'île de Charmy est essentiellement alimentée par le Vieux-Rhône, le Canal Sud mais également par le Canal de Miribel.

**Lorsque les bassins sont en fonctionnement**, **l'inversion des sens d'écoulement s'opère**. De ce fait, les infiltrations d'eau en provenance du Canal de Miribel sont contrées par la remontée du dôme hydraulique au droit des bassins d'infiltration 5. **Les bassins deviennent alors les fournisseurs d'eau les plus importants pour les puits de pompage**.

**Les perspectives d'amélioration et les scénarios à réaliser**

Les **perspectives d'amélioration** du modèle numérique actuel sont principalement focalisées sur les **échanges nappe-rivière** et sur le **calage des transferts thermiques**.

Pour mieux connaitre et comprendre les échanges nappe-rivière qui s'opèrent, un projet de recherches au sein de la Plateforme Recherche de Crépieux-Charmy sera dédié à cette problématique (projet 2018-2022). Le but sera de déterminer plus précisément les sens d'écoulement naturels entre les eaux de surface et la nappe, l'impact de l'exploitation du site sur les inversions des sens d'écoulement mais aussi de trouver une méthodologie pour spatialiser l'information à l'échelle du champ captant (coefficient d'échange nappe-rivière de l'amont à l'aval d'un même bras du Rhône ou évolutif selon les types de berges rencontrées ?). A terme, ces connaissances seront intégrées au modèle numérique.

Le calage des transferts thermique nécessite la prise en compte du non-équilibre thermique local pour pouvoir reproduire les évolutions thermiques dans la nappe sur du court terme (notamment lors de la mise en eau des bassins d'infiltration en période estivale).

Dès à présent, avant même d'apporter les améliorations présentées ci-dessus, il est possible d'adapter le modèle numérique pour tester des **scénarios sur des temps longs**. Deux grandes catégories de scénarios seraient intéressantes à réaliser :

- ✓ **Scénario de l'impact de l'évolution climatique sur la ressource**

En tenant compte des prévisions les plus défavorables concernant la température, la pluviométrie et les débits dans les cours d'eau, il serait possible de simuler l'impact de ces changements sur la quantité et la qualité thermique de la ressource du champ captant.
Ce scénario pourrait être réalisé en conservant les conditions d'exploitation (pompages et bassins) de l'année 2016.

- ✓ **Scénario de l'impact de l'évolution de l'exploitation de la ressource**

En conservant cette fois-ci les conditions hydrologiques de l'année 2016 (température des eaux de surface, débit du Rhône), il serait possible de modifier les conditions d'exploitation pour prédire l'évolution quantitative de la ressource en cas de production d'eau plus importante, et au cas d'arrêt de la barrière hydraulique sur des périodes prolongées.

Il serait également possible de tester une période fonctionnement du champ captant à plein régime (c'est-à-dire un prélèvement d'eau équivalent au volume prélevable autorisé par la DUP, soit 600 000 $m^3.j^{-1}$) afin de visualiser l'impact sur les niveaux de nappe sur l'ensemble du champ captant.

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES

# ET

# PERSPECTIVES

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

## Conclusions générales

La zone de captage principale, qui permet l'alimentation en eau potable de la Métropole de Lyon, est une zone très complexe. Cette complexité provient des interactions fortes qui existent entre l'exploitation de la ressource (pompages et réalimentation artificielle par les bassins d'infiltration), les eaux superficielles des différents bras du Rhône (qui contribuent à l'alimentation de la nappe alluviale), et les écoulements souterrains régionaux. La complexité lithologique 3D présente dans le sous-sol joue également un rôle non-négligeable sur le fonctionnement hydrogéologique de ce système. Comprendre les interactions entre les différents compartiments (bassins d'infiltration, nappe, cours d'eau) constitue un enjeu de grande envergure pour la pérennisation de la ressource, tant d'un point de vue quantitatif et qualitatif. Pour comprendre ces interactions, il a été nécessaire de mener des observations, des expérimentations spécifiques, mais également d'utiliser l'outil de modélisation numérique.

Le nombre de points de mesure et la diversité de données acquises en continu sur le site de captage permet de connaitre l'état de la ressource souterraine (niveaux piézométriques, température de nappe, volumes d'eau pompés et infiltrés) et des eaux superficielles (hauteurs d'eau et températures des différents bras du Rhône et des bassins d'infiltration).
Une telle base de données nécessite néanmoins la plus grande prudence : l'observation des interactions entre compartiments, fondée sur les données brutes acquises in-situ, requiert un travail d'analyse, de vérification et de validation. Cette base de données ne peut être exploitable qu'à partir du moment où les mesures sont considérées pertinentes.
L'observation permet de « dégrossir » le travail de compréhension des écoulements à l'échelle du champ captant. Il a notamment été mis en évidence, par la réalisation de cartes piézométriques et thermiques à l'échelle du champ captant, que l'exploitation de la ressource impacte fortement les chemins de l'eau sur l'ensemble du site de captage. Les bassins d'infiltration permettent d'infiltrer, annuellement, un volume d'eau qui équivaut à la moitié du volume d'eau extrait du champ captant. De plus, l'évolution des températures de nappe, au cours d'une année, sur la zone de captage, est principalement liée à la réalimentation artificielle, et non aux infiltrations par les berges des cours d'eau.
Malgré les efforts menés quant à l'acquisition de nouvelles données depuis 2012, des zones entières du champ captant restent dépourvues de mesures (zones Nord-Ouest et Est du champ captant principalement).

Pour compléter cette base de données, un dispositif expérimental a été mis en place (première phase de réalisation lors de travaux précédents *[Loizeau, 2013]* et extension du dispositif au cours des travaux de thèse actuels). Positionné de part et d'autre d'un bassin d'infiltration, et constitué de plus de 30 piézomètres, dont certains en « flûte de pan », ce nouveau dispositif a permis de lever plusieurs questionnements, à savoir :

- ✓ **De quoi le sous-sol est-il constitué ?**

Réaliser de nouveaux ouvrages a pour avantage de connaitre la position exacte du substratum imperméable, mais également de déceler la présence d'horizons plus ou moins perméables au sein des alluvions fluviatiles. La lithologie étant déjà bien connue dans la zone Sud du bassin *[Loizeau, 2013]*, l'extension du dispositif (au centre et au Nord du bassin) a permis de visualiser le plongement du substratum en direction du Nord. Ce substratum plonge d'environ 10 m entre le bassin et le Canal de Miribel. L'altitude non régulière du toit du substratum est une donnée importante puisqu'elle impacte directement les écoulements souterrains.
La zone moins perméable (contenant de l'argile) d'une épaisseur de 1 à 2 m qui avait été décelée dans certains ouvrages situés au Sud du bassin, à une profondeur d'environ 10 m, a été retrouvée au sein de tous les nouveaux ouvrages de l'extension du dispositif expérimental (au centre et au Nord du bassin). Bien qu'elle soit située dans la zone saturée du sous-sol, cette couche joue un rôle sur les écoulements et les transferts thermiques. Les ouvrages en flûte de pan présentent des différences de potentiels hydrauliques et de températures selon la profondeur du fait de la restriction des écoulements verticaux par la zone moins perméable.

- ✓ **La zone non saturée de 2 m d'épaisseur règlementaire est-elle conservée** au cours des cycles de remplissage du bassin d'infiltration ?

L'enregistrement des niveaux de nappe en continu au sein de deux piézomètres situés au centre du bassin d'infiltration a permis de lever un doute préexistant : la zone non-saturée règlementaire est toujours conservée même lors de cycles de remplissage de longue durée. Cependant, le piézomètre de référence des bassins d'infiltration 5-1 et 5-2 (piézomètre B10) ne correspond pas au maximum du dôme hydraulique : le niveau piézométrique enregistré au sein du piézomètre B10 est en moyenne inférieur de 0,7 m par rapport au niveau de nappe acquis dans les ouvrages situés au centre du bassin (P96 et P95) lors des cycles de fonctionnement du bassin d'infiltration.

L'ensemble des observations réalisées in-situ ont mis en évidence la forte contribution des bassins d'infiltration sur les évolutions piézométriques et thermiques de la nappe sur l'ensemble de la zone de captage. Pour mieux comprendre l'interaction bassin d'infiltration-nappe ainsi que le rôle et le fonctionnement de la réalimentation artificielle, des expérimentations spécifiques ont été menées.
D'une part des essais d'infiltration dans le fond d'un bassin ont permis de révéler la présence d'une couche compactée, précédemment décelée dans d'autres bassins d'infiltration *[Loizeau, 2013]*. C'est bien cette couche, d'une épaisseur de l'ordre de 50 cm (épaisseur variable), qui limite la vitesse d'infiltration de l'eau injectée dans les bassins d'infiltration. Elle présente en effet une anisotropie de conductivité hydraulique conséquente : la conductivité hydraulique à saturation est 125 fois plus élevée selon la direction horizontale *[Réfloch et al., 2017]*.
En plus de cette caractérisation des fonds de bassin, des traçages thermiques ont été menés à l'échelle du bassin d'infiltration, situé au centre du dispositif expérimental (bassin d'infiltration 5-2). La piézométrie, seule, est utile pour visualiser la création du dôme hydraulique au droit du bassin lors des cycles de remplissage, mais elle ne permet pas de mettre en évidence les chemins préférentiels de l'eau. L'utilisation de la température en tant que traceur naturel contribue à la compréhension des cheminements de l'eau du fait de la différence de température entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Il a ainsi été démontré un écoulement plus important en direction du Sud du bassin par suivi du panache thermique lors de la mise en eau de ce bassin. Ces expérimentations ont également montré les écoulements souterrains qui se produisent au droit du Vieux-Rhône, et le fonctionnement 3D des écoulements en lien avec l'exploitation de la ressource (selon les volumes pompés sur certaines zones du champ captant, alors l'écoulement régional peut être renforcé ou inhibé comparé à l'écoulement souterrain plus superficiel en provenance du bassin). L'interprétation de cette complexité de fonctionnement 3D a pu être réalisée par la présence d'ouvrages en flûte de pan au sein du dispositif expérimental, et du fait de la régularité d'enregistrement des mesures (données acquises en continu, au pas de temps horaire pour les températures).

Suite aux observations et expérimentations, un modèle numérique a été conçu. Englobant l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon, ainsi que l'amont hydraulique de la zone de captage, cet outil numérique permet de simuler les transferts d'eau et de chaleur. La réalisation de ce modèle exige de trouver un compromis entre précision / stabilité du calcul (faible pas de temps et maillage dense) et temps de calcul / taille de la mémoire / stockage des résultats. Calé d'un point de vue hydrodynamique sur l'année 2016, le modèle permet d'estimer la proportion de chacune des sources d'alimentation de la zone de Crépieux-Charmy qui contribuent au pompage. Les résultats montrent que l'apport par les écoulements souterrains est le plus conséquent (environ 45 % de l'eau pompée). S'en suivent ensuite l'apport par les bassins d'infiltration (environ 40 %), par les cours d'eau (environ 14 %) et enfin, par la pluie efficace (0,8 % au maximum).
Pour reproduire correctement les échanges nappe-rivière d'un point de vue hydrodynamique, il est nécessaire de tenir compte d'un « effet seuil » : à partir d'une certaine hauteur d'eau dans les cours d'eau (période de crue), l'échange nappe-rivière est fortement accentué du fait du colmatage moins important sur le haut des berges comparé au fond des cours d'eau.
D'après cette même simulation numérique, il semblerait que la protection de la zone de pompage par la barrière hydraulique (induite lors de la mise en eau des bassins) soit partielle,

notamment du fait que certains ouvrages de pompage qui ne semblent pas être protégés des arrivées par les cours d'eau (Est de l'île de Charmy et Sud-Ouest de l'île de Crépieux).
La réalimentation artificielle présente sur le captage de Crépieux-Charmy met en jeu un volume d'eau infiltré conséquent. Il induit donc, en période estivale, un réchauffement de la nappe non négligeable, sur l'ensemble de la zone exploitée.
Le modèle proposé est actuellement exploitable pour tester des scénarios de changement climatique ou de modifications des conditions d'exploitation, sur le long terme. L'interprétation des phénomènes sur des temps plus courts (inférieurs à 15 jours) nécessitera des améliorations concernant les échanges nappe-rivière, mais également en tenant compte du non-équilibre thermique local (différenciation de la température de l'eau et du milieu environnant nécessaire du fait des vitesses d'écoulement rapides).

***Les apports / perspectives opérationnelles***

Ce travail de thèse apporte des outils opérationnels, qui restent à mettre en œuvre auprès de l'Exploitant de la ressource en eau :

- ✓ L'automatisation du calcul de l'**indice d'infiltrabilité** de chaque bassin d'infiltration au pas de temps mensuel. Cet indice est un outil d'aide à la décision pour la priorisation des bassins d'infiltration à réhabiliter. Sa mise en place de manière automatique permettra, à tout moment de l'année, et peu importe les conditions d'exploitation des bassins, de comparer l'infiltrabilité de chaque bassin du champ captant, et ainsi pouvoir s'assurer que le renouvellement de la couche de sable de fond de bassin soit réalisé dans les bassins les plus colmatés.
- ✓ L'utilisation des **cartes de température à l'échelle du champ captant** pour mettre en évidence des « zones à risque » : en cas de température de nappe proche de 25 °C sur une zone du champ captant, le risque de contamination bactériologique est accru. Les campagnes de prélèvements dans les ouvrages de pompage de cette zone pourraient alors être accentuées.
  Il serait également judicieux d'équiper d'autres ouvrages (piézomètres et puits de pompage) de sondes de température. En effet, la température de nappe n'est pas homogène spatialement, et elle renseigne sur le fonctionnement 3D des écoulements.
- ✓ Le piézomètre créé au centre du bassin d'infiltration 5-2 (piézomètre P96) pourrait être raccordé au système de télégestion. Le rôle de **piézomètre de référence** du bassin 5-2 pourrait alors lui être conféré. Pour rappel, les bassins 5-1 et 5-2 sont gérés par le biais d'un piézomètre de référence unique (ouvrage B10) alors que l'altitude des fonds de ces deux bassins n'est pas identique (le fond du bassin 5-2 atteint la cote altimétrique de 169,35 mIGN69, alors que le bassin 5-1 atteint seulement 168,65 mIGN69). Le niveau piézométrique enregistré au sein de l'ouvrage P96 est représentatif du niveau maximum atteint par le dôme hydraulique (plus élevé que le piézomètre de référence actuel B10).
- ✓ Des volumes d'eau conséquents parviennent de l'infiltration des bassins 5 et 6 (50 % de la recharge totale) et contribuent fortement au réchauffement de la nappe en période estivale. Un **protocole de gestion de l'alimentation de ces bassins en période estivale** permettrait de limiter l'impact thermique sur la nappe. L'objectif serait ici de maintenir les bassins en fonctionnement (pour que la barrière hydraulique soit active de manière continue), tout en limitant la charge imposée dans les bassins. En effet, la hauteur d'eau présente dans les bassins influence fortement les vitesses d'infiltration. Un compromis est cependant à déterminer pour ne pas que la baisse de la hauteur d'eau dans les bassins entraine une augmentation de la prolifération algale, et ainsi entrainer un colmatage accru de la couche de sable de fond de bassin.

***Les perspectives de recherche à mener***

Bien que les capteurs de mesure aient connus un fort déploiement depuis 2012, **certaines zones du champ captant restent dépourvues de mesures en nappe**. Ces zones sont éloignées de la zone de pompage, mais elles restent importantes pour la compréhension des chemins de l'eau à l'échelle du champ captant. Citons notamment la partie Est du champ captant (amont hydraulique de la zone de captage), et la zone Nord-Ouest (zone entre le Canal de Miribel et les bassins d'infiltration). **Instrumenter ces zones** de quelques points de mesure permettrait de mieux consolider les connaissances des arrivées d'eaux souterraines mais également des échanges nappe-rivière et de la protection hydraulique créée par les bassins situés à l'Ouest (couples de bassins 2, 3 et 4). L'acquisition de ces nouvelles données devra se faire de manière continue, avec un pas de temps régulier.

A plus grande échelle, il serait judicieux d'équiper de nouveaux ouvrages de suivi de la ressource le long du Canal de Miribel. Quelques mesures du potentiel hydraulique, jusqu'au barrage de Jons, permettrait de mieux renseigner le modèle numérique actuel d'un point de vue des échanges nappe-rivière en amont du champ captant.

Une **caractérisation de la lithologie par la géophysique** permettrait d'obtenir une **meilleure connaissance du toit du substratum sur les zones dépourvues d'ouvrages**. Cette donnée est importante puisque l'altitude du toit du substratum, qui varie spatialement, impacte les cheminements des écoulements souterrains.

Au niveau du bassin d'infiltration 5-2, le dispositif expérimental a permis de déceler une couche moins perméable dans certains ouvrages. L'extension spatiale de cette couche reste cependant hypothétique entre les piézomètres. Différentes méthodes géophysiques testées n'ont malheureusement pas permis de visualiser cette couche pour deux raisons : il s'agit d'une couche d'alluvions dont la matrice comporte des argiles mais dont la résistivité reste assez semblable au reste des alluvions présents, et elle est située dans la zone saturée de l'aquifère (ce qui ne facilite pas sa détection par méthode géophysique). Connaitre l'extension 3D de cette couche moins perméable permettrait de mieux comprendre les cheminements de l'eau (puisqu'elle joue un véritable rôle sur les écoulements et les transferts thermiques), et de mieux renseigner le modèle numérique.

Des études en cours, par enregistrement des bruits sismiques de manière continue, permettent de visualiser le toit de la nappe, de manière non-intrusive. Testés à l'échelle du bassin d'infiltration 5-2, les capteurs sismiques montrent des évolutions piézométriques similaires à celles acquises au sein des piézomètres du dispositif expérimental *[Voisin et al., 2017]*. D'autres expérimentations par capteurs sismiques devraient voir le jour pour visualiser la forme 3D du dôme hydraulique créé lors de la mise en eau du bassin. La forme de ce dôme, s'il n'est pas symétrique, permettrait de mettre en évidence des zones de discontinuité de la couche moins perméable (qui entrainent des écoulements préférentiels dans certaines directions, et donc une chute du dôme hydraulique).

Les **relations nappe-rivière** sont complexes. Elles nécessitent une **étude approfondie** pour comprendre les phénomènes locaux (inversion des sens d'écoulement en lien avec les conditions d'exploitation du captage, autoépuration par les berges en cas de contamination du Rhône, …).

Par l'intermédiaire des travaux de la Plateforme-recherche (équipe du LEHNA), des mini-piézomètres sur berges ont été installés en 2016 sur trois sites du champ captant de Crépieux-Charmy (deux sites le long du Canal de Miribel, et un site sur les berges du Vieux-Rhône). Chaque site comporte trois piézomètres selon un transect transversal au cours d'eau. L'instrumentation de ces ouvrages permet de suivre l'évolution des hauteurs d'eau, des températures, du pH, de l'oxygène dissous et de la conductivité électrique de manière continue. Des campagnes de prélèvements sont également réalisées régulièrement pour comprendre les phénomènes physico-chimiques qui se produisent le long des berges des cours d'eau. Lorsque l'historique de données sera suffisant (au moins deux années d'acquisition), une analyse/interprétation de ces données permettra de mieux comprendre les

relations nappe-rivière. Une collaboration entre le laboratoire du LEHNA et celui de l'IGE sera alors nécessaire pour réaliser une **analyse pluridisciplinaire des phénomènes**. Le but étant, à termes, de mettre en évidence les capacités auto-épuratrices des berges des cours d'eau, de **quantifier les échanges nappe-rivière**, et de **spatialiser l'information tout au long des cours d'eau**.
Ces nouvelles connaissances pourront ensuite être intégrées dans le modèle numérique à l'échelle du champ captant, dans l'objectif de mieux reproduire les échanges entre les eaux e surface et les eaux souterraines. Ce travail de caractérisation des échanges nappe-rivière s'inscrit dans un projet de la Plateforme Recherche de Crépieux-Charmy, en collaboration avec la Métropole de Lyon et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.

Une dernière perspective serait la réalisation d'un **scénario de gestion de crise grandeur nature**. Le principe serait, en période de conditions optimales (c'est-à-dire un niveau de nappe assez élevé et une période de faible demande en eau), de suivre l'évolution des niveaux de nappe en tenant à l'arrêt la réalimentation artificielle.
Ce scénario grandeur nature permettrait de déterminer la durée pendant laquelle l'alimentation en eau potable de la Métropole peut subsister avant d'atteindre un niveau de nappe « critique » (qui serait défini étant supérieur au seuil d'alerte pour ne pas se retrouver en réelle gestion de crise). Dès l'atteinte de cette cote piézométrique « critique », les bassins d'infiltration seraient remis en fonctionnement et il sera possible de déterminer le temps nécessaire pour un retour à la normale (remontée significative du niveau de nappe général).
Comparer ce scénario grandeur nature au résultat d'une simulation numérique dans les mêmes conditions de fonctionnement du site de captage, permettrait de caler le modèle d'écoulement en période de crise, et ainsi pouvoir être en confiance élevée face aux résultats des simulations préconisées à la fin du Chapitre V (scénarios de changement climatique ou de changements de conditions d'exploitation).

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Abu-Taleb** M.F., 2003. Recharge of groundwater through multi-stage reservoirs in a desert basin. Environmental Geology, 44:379–390. doi: 10.1007/s00254-003-0764-7

**Anderson** M.P., 2005. Heat as a groundwater tracer. Groundwater, 43, 6, 951-968.

**Angulo-Jaramillo** R., Bagarello V., Iovino M. and Lassabatere L., 2016. Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization. Springer International Publishing Switzerland, p. 386. doi : 10.1007/978-3-319-31788-5

**Attard** G., 2017. Impacts des ouvrages souterrains sur l'eau souterraine urbaine – Application à l'agglomération Lyonnaise. Thèse de doctorat, Université de Lyon, p. 150.

**Bakalowicz** M., 1977. Etude de degré d'organisation des écoulements souterrains dans les aquifères carbonatés par une méthode hydrogéochimique nouvelle. C. R. Acad. Sci. Paris, 284-D, p. 2463-2466.

**Barat** A., Gouisset Y., 1988. Etude hydrogéologique de la molasse Miocène. Bresse-Dombes-Bas-Dauphiné- Synthèse finale. Orientations pour l'exploitation. BRGM 88 SGN 995 RHA, p. 76.

**Barthélémy** Y., 1978a. Etude hydrogéologique. Champ captant de Crépieux et de Charmy (69). Rapport préliminaire no.2. Relations entre nappe et cours d'eau. BRGM JAL 78/24, p. 52.

**Barthélémy** Y., 1979. Forages d'essai réalisés dans le champ de captage de Crépieux-Charmy (69). BRGM 79 SGN 008 RHA, p. 30.

**Barthélémy** Y., Putallaz J., 1979. Renforcement des ressources en eau potable de l'île de Crépieux. Compte-rendu des travaux et des essais réalisés sur les ouvrages F1 à F9. BRGM 79 SGN 589 RHA, p. 85.

**Barthélémy** Y., 1979. Champ captant de Crépieux-Charmy – Fluctuation piézométriques d'octobre 1977 à mars 1979 (Evolution du colmatage des berges du Rhône). Bureau de Recherches Géologique et Minières (BRGM). 79SGN262RHA

**Barthélémy** Y., 1980. Renforcement des ressources en eau potable de l'île de Crépieux-La-Pape (69). Compte rendu des travaux réalisés sur les ouvrages F 10 à F 16. Synthèse des résultats obtenus sur l'ensemble des 32 puits F1 à F16. BRGM 80 SGN 247 RHA, p. 105.

**Bigard** M., 1882. Le grand projet des eaux de Lyon. Imprimerie commerciale et administrative, p. 16.

**Bize** J., 1975. Phénomènes d'écoulement lors de l'alimentation artificielle des nappes souterraines (Cas de l'infiltration par basin). Gaz-Eaux-Eaux usées 55(12), 814-828.

**Boivin** P., 1988. Caractérisation de l'infiltrabilité d'un sol par la méthode de Müntz – Variabilité de la mesure. Cah. ORSTOM sér. Pédol., 14–24.

**Bouwer** H., 1978. Groundwater hydrology. McGraw-Hill Book Company, New York, p. 480.

**Bouwer** H., 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, 10, 121–142. doi:10.1007/s10040-001-0182-4.

**Bravard** J.P., 2004. Le façonnement du paysage fluvial de Lyon : choix urbanistiques et héritages de l'histoire hydro-morphologique. Bulletin de la A.G.E., 37, 17-32.

**Brenot** A., Nicolas J., Chrétien M., Dewandel B., Courtois N., Castagnac C., Bourgine B., Couëffe R. Martelet G., 2009. Acquisition de connaissances sur la nappe de la molasse du territoire du SAGE de l'Est Lyonnais. Rapport Final. BRGM RP-57474-FR, p. 220.

**Brochet** P., Gerbier N., 1974. L'évapotranspiration. Aspect agrométéorologique, évaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie n°65 de la Météorologie Nationale, p. 95.

**Brouyère** S., Carabin G., Dassargues A., 2004. Climate change impacts on groundwater resources: modelled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium. Hydrogeology Journal, 12, 2, 123–134.

**Burdy** J., 2002. Les aqueducs Romains de Lyon. Presses universitaires de Lyon, 204 pg.

**BURGEAP**, 1989. Etude d'une barrière hydraulique pour la protection de la zone de captage de Crépieux-Charmy – Rapport Final. R.906 – A2167/88.094

**BURGEAP**, 1990. Faisabilité pratique d'une barrière hydraulique permanente par bassins d'infiltration pour protéger les captages de Crépieux-Charmy. R.974 – A2167/90011

**BURGEAP**, 1997. Reconnaissances pour la création des bassins d'infiltration 5 et 6. Rly 363/A5584

**BURGEAP**, 1997. Protocole de suivi des opérations de remplacement du sable des bassins du champ captant de Crépieux-Charmy – Caractéristiques du mélange de sable proposé. Rly 319/A5652

**Casanova** J., Cagnimel M., Devau N., Pettenati M. and Stollsteiner P., 2013. Recharge artificielle des eaux souterraines, état de l'art et perspectives. Rapport final, BRGM/RP-61821-FR.

**Casanova** J., Devau N. and Pettenati M., 2016. Managed Aquifer Recharge : an overview of issues and options. In: Jakeman A.J., Barreteau O., Hunt R.J., Rinaudo JD., Ross A. (eds) Integrated Groundwater Management. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_16

**CEREMA**, 2003. La ville et son assainissement – Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. SKU1806112367

**C.G.D.D./SOeS/ONEMA**, 2016. Repères – L'eau et les milieux aquatiques – Chiffres clés – Edition 2016, p. 56.

**Chouteau** F.A., 1984. Protection et présentation de la qualité des eaux potables, distribuées dans la Région Grenobloise (Isère, France). Journal français d'hydrologie, 15, 3, 193-206. https://doi.org/10.1051/water/19841503193

**Collin** J.J., 1971. Plaine de l'est Lyonnais. Etude hydrogéologique du couloir de Meyzieu (Rhône). BRGM 71 SGN 130 JAL, p. 25.

**Collin** J.J., Gudefin H., Herve J.Y., Lienhardt M.J., Rousselot D., 1973. Système aquifère de l'est lyonnais (01-38-69). Synthèse des connaissances. Données hydrogéologiques quantifiées. BRGM 73 SGN 199 JAL, p. 57.

**Constantz** J., 2008. Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. Water Resource Research, Vol. 44. doi:10.1029/2008WR006996.

**Conte-Chenuc** T., Mortreau P. and Cuvier C., 2016. Rapport Géophysique Environnementale, Rapport de stage de terrain effectué sur le captage de Crépieux-Charmy, Polytech Grenoble, p. 25.

**Darcy** H.P.C., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Victor, Dalmont, Paris.

**Darmendrail** D., 1987. Filtration géochimique des métaux lors de leur transfert d'une rivière vers une nappe alluviale – application à la nappe des alluvions du Rhône (69) et de la Deule (56). Thèse de l'Université de Bordeaux 3, p. 403.

**David** L., Elmi S., Féraud J., 1979. Mont d'or lyonnais. Carte géologique de la France à 1/50 000. BRGM. XXX-31 2e ed., no. 698.

**Davis** S.N., Thompson G.M., Bentley H.W., Stiles G., 1980. Ground-Water Tracers – A short Review. Groundwater, 18, 1, 14-23. doi : 10.1111/j.1745-6584.1980.tb03366.x

**de Marsily** G., 1986. Quantitative hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press Inc., London, p. 275.

**de Montauzan** G., 1909. Aqueducs antiques de Lyon – Etude comparée d'archéologie romaine. Thèse de doctorat, Université de Paris, p. 403.

**Devine** R.S. 1995. The trouble with dams. The Atlantic Monthly. 276:64-74.

**Diersch** H.J., 2013. FEFLOW: finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media

**Dillon** P., 2005. Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal 13, 313-316.

**Dillon** P., 2009. Water recycling via managed aquifer recharge in Australia. Boletin Geológico y Minero 120 (2), 121-130. ISSN: 0366-0176.

**Dillon** P., Pavelic P., Page D., Beringen H. and Ward J., 2009. Managed aquifer recharge: an introduction. Waterlines Report Series N°13, Australian Government, National Water Commission.

**D.U.P**., 2011. Arrêté interpréfectoral n°2011-4773 du 23 septembre 2011, p. 23.

**Dusek** J., Dohnal M., Vogel T., 2009. Numerical analysis of ponded infiltration experiment under different experimental conditions. Soil and Water Research, 4, S22-S27.

**Evett** S.R., 2003. Soil water measurement by time domain reflectometry. Encyclopedia of Water Science, Marcel Dekker, Inc., New York, 894-898.

**Freeze** R.A. and Cherry J.A., 1979. Groundwater, Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall Inc.

**Freney** J., 2014. Peste, choléra… et autres calamités. Une histoire des infections à Lyon. Lyon éditions EMCC, p. 144.

**Gable** R., 1979. Le flux de chaleur en France – Déterminations et synthèse. BRGM 80 SGN 048 GTH, p. 91.

**Gette-Bouvarot** M., 2014. Rôle du compartiment vivant dans les processus de colmatage et décolmatage des bassins d'infiltration. Thèse de doctorat, École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), p. 297.

**GIEC**, 2014. Changements climatiques 2014 - Rapport de synthèse. GIEC, Genève, Suisse, 161 p. ISBN 978-92-9169-243-9

**Girard** R.F., 1966. Plan de l'an 2000 du service des eaux de Lyon. Imprimerie Molière Lyon, p. 95.

**Gleick** P. H., 1996. Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, 817-823

**Houpeurt** A., Delouvrier J. and Iffly R., 1965. Fonctionnement d'un doublet hydraulique de refroidissement. La houille Blanche n°3-1965

**Jamagne** M., Betremieux R., Begon J.C., Mori A., 1977. Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. Bulletin Technique d'Information. p. 324-325, 627- 641.

**Jonac** R., 2015**.** L'eau à Lyon, toute une histoire. L'histoire de l'alimentation en eau de Lyon, des Romains à nos jours. Guide du patrimoine Rhônalpin (n°47), 72 pg. ISBN 978-2-909692-38-8

**Keery** J., Binley A., Crook N., Smith J.W.N., 2007. Temporal and spatial variability of groundwater–surface water fluxes: development and application of an analytical method using temperature time series. Journal of Hydrology, 336, 1–2, 1–16.

**Kell** G.S., 1967. Precise representation of volume properties of water at one atmosphere. J. Chem. Eng. Data*,* 12 (1), pp 66–69. doi : 10.1021/je60032a018

**Khan** S., Mushtaq S., Hanjra M.A. and Schaeffer J., 2008. Estimating potential costs and gains from an aquifer storage and recovery program in Australia. Agric Water Manag 95(4):477–488

**Klepikova** M.V., Le Borgne T., Bour O. and Davy P., 2011. A methodology for using borehole temperature-depth profiles under ambient, single and cross-borehole pumping conditions to estimate fracture hydraulic properties. Journal of Hydrology, 407, 1-4, 145-152, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.018

**Ledoux** E., 2003. Modèles mathématiques en hydrogéologie. Cours, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, p. 133.

**Léger** A., 1885. Eaux de Lyon, un vingtième projet. Imprimerie A. Storck, p. 18.

**Levantesi** C., La Mantia R., Masciopinto C., Böckelmann U., Ayuso-Gabella M.N., Salgot M., Tandoi V., Van Houtte E., Wintgens T. and Grohmann E., 2010. Quantification of pathogenic microorganisms and microbial indicators in three wastewater reclamation and managed aquifer recharge facilities in Europe. Sci Total Environ 40(21):4923–4930

**Loizeau** S., 2013. Amélioration de la compréhension des fonctionnements hydrodynamiques du champ captant de Crépieux-Charmy. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, p. 220.

**Loizeau** S., Rossier Y., Gaudet J.P., Réfloch A., Rossier Y., Besnard K., Angulo-Jaramillo R. and Lassabatere L., 2017. Water infiltration in an aquifer recharge basin affected by temperature and air entrapment. Journal of Hydrology and Hydromecanics, 65(3), 222-233.

**Mangin** A., Molinari J. and Paloc H., 1976. Les traceurs en hydrogéologie karstique. Leur apport à la connaissance des réservoirs aquifères calcaires. La Houille Blanche. N° 3-4, p. 261-267.

**Margat** J., 1998. L'eau, développement économique et population. Revue Française de Géoéconomie, Economica (4):63-76.

**Martelat** A., Collin J.J., 1996. Ressources en eau souterraine dites « d'ultimes recours ». Phase II : agglomération de Lyon. BRGM R38801, p. 42.

**Menberg** K., Bayer P., Zosseder K., Rumohr S., Blum P., 2013. Subsurface urban heat islands in German cities. Science of the Total Environment, 442, 123–133

**Mermoud** A., 2006. Cours de physique du sol – Etat de l'eau du sol (version provisoire). Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 30 p.

**Météo-France**, 2010. Etude du changement climatique pour le SRCEA (Schéma Régional Climat Air Énergie) Rhône Alpes, p. 73.

**Météo-France**, 2017. Prévision météo et climat en France – Accès aux données. http://www.meteofrance.com/accueil [Accès le 01/02/2017]

**Métropole de Lyon**, 2016. Rapport annuel 2016 sur le prix et la qualité des services publics de l'eau potable et de l'assainissement, p. 102.

**Métropole de Lyon**, 2017. Données métropolitaines du Grand Lyon. https://data.grandlyon.com [Accès le 01.02.2017]

**Milano** M., 2010. Les impacts prévisibles du changement climatique sur les ressources en eau de quatre grands bassins versants Méditerranéens. Plan Bleu, Centre d'activités régionales, Sophia Antipolis.

**Ministère de la Santé et des Sports**, 2008. Guide technique : Protection des captages d'eau – Acteurs et stratégies. Editions Dicom, p. 82.

**Miquel** G., 2003. La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat n°215, Assemblée Nationale n°705, 2 tomes.

**Misut** P.E., Voss C.I., 2007. Freshwater–saltwater transition zone movement during aquifer storage and recovery cycles in Brooklyn and Queens, New York City, USA. Journal of Hydrology, 337:87–103. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.035

**Mualem** Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12, 513–522.

**Pasquier** J.L., 2017. Les prélèvements d'eau douce en France – les grands usages en 2013 et leur évolution depuis 20 ans, Datalab, CGDD/SOeS, p. 25.

**PCET** (**P**lan **C**limat **E**nergie **T**erritorial) **du Grand Lyon**, 2015. Adaptation au changement climatique – Socle des connaissances locales, p. 40.

**Pearce** F., 1992. The dammed. Rivers, dams, and the coming world water crisis. The Bodley Head, England. U.S. distribution by Trafalgar Square Publishing Company, North Pomfret, Vermont.

**Pehme** P., Parker B.L., Cherry J.A., Molson J.W., Greenhouse J.P., 2013. Enhanced detection of hydraulically active fractures by temperature profiling in lined heated bedrock boreholes. Journal of Hydrology, 484, 1–15

**Perrochet** P. and Tacher L., 1997a. Mathematical modelling of hydro-thermal processes in Mururoa atoll. Tech. Rep. International Geomechanical Commission (University of Minnesota), École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire de Géologie.

**Plongeron** A., Gagniere G., Beauduc P., Poncet G., 1981. Pompages d'essai dans le champ captant de la Courly à Crépieux-Charmy (69). BRGM 81 SGN 858 RHA, p. 44.

**Pomerol** C., Lagabrielle Y., Renard M., 2002 – Eléments de géologie. Dunod 12e ed., Paris, p. 776.

**Prunier** P., 1881. Eaux de Lyon. Alimentation de la ville. Projet Prunier. Association typographique, Lyon, p. 23.

**Pyne** R.D.G., 1995. Groundwater recharge and wells: A guide to aquifer storage recovery. CRC Press, Boca Raton, Florida, p. 376.

**Quintard** M., Kaviany M. and Whitaker S., 1997. Two-medium treatment of heat transfer in porous media: numerical results for effective properties. Advances in Water Resources, 20, 2-3, p. 77-94.

**Raclet** J., 1888. Etat de la question des eaux en 1888. Imprimerie A. Waltener, Lyon, 14 pg.

**Réfloch** A., Gaudet J.P., Oxarango L. and Rossier Y., 2017. Analysis of ring infiltrometer tests by direct numerical modeling - Saturated hydraulic conductivities estimation. Journal of Hydrology and Hydromecanics, 65(3), 321-324.

**Rekacewicz** P., 2008. Utilisations de l'eau. Le Monde Diplomatique.

**Rey** J., Hélali M. and Bou C., 2008. Les ressources en eau potable et leur protection dans le département du Tarn. Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales (D.D.A.S.S.) du Tarn, p. 18.

**Richards** L.A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous medium. Physics, 1, 318-333.

**Rousselot** D., Beguin D., 1975. Etude hydrodynamique du couloir fluvioglaciaire de Décines (69). Rapport no1. Possibilité d'infiltration des eaux pluviales. BRGM 75 SGN 092 JAL, p. 39.

**Rousselot** D., 1975. Etude hydrodynamique du couloir fluvioglaciaire de Meyzieu (69) – Contrôle et protection de la nappe phréatique à l'aval du bassin d'infiltration des eaux pluviales de l'aéroport de Satolas. BRGM 73 SGN 033 JAL, p. 115.

**Rousselot** D., 1980. Protection du champ captant de Crépieux-Charmy (69) – Traçages en nappe au nord et à l'ouest. BRGM 80 SGN 887 RHA, p. 94.

**Roux** G., 2015. Caractérisation géophysique de la zone non saturée du bassin d'infiltration 2-2 de Crépieux-Charmy. Rapport final. éGéos – Etudes géologiques et sédimentaires, p.110.

**Sauty** J.P., Gringarten A.C., Menjoz, Landel P.A., 1982b. Sensible energy storage in aquifers: 1. theoretical study. Water Resources Research, 18, 2, 245–252

**Schmidt** C., Conant Jr. B., Bayer-Raich M. and Schirmer M., 2007. Evaluation and field-scale application of an analytical method to quantify groundwater discharge using mapped streambed temperatures. Journal of hydrology, 347, 292-307. doi : 10.1016/j.jhydrol.2007.08.022

**Sellwood** S.J., Hart D.J., Bahr J.M., 2015. An in-well heat-tracer-test method for evaluating borehole flow conditions. Hydrogeology Journal, 23, 8, 1817-1830. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1304-8

**Sengers** J. V. and Watson J. T. R., 1986. Improved international formulations for the viscosity and thermal conductivity of water substance, J. Phys. Chem. Ref. Data, 15, 1291.

**Shiklomanov** I.A. and Rodda J.C., 2003. World water resources at the beginning of the twenty-first century. International hydrology series. ISBN 0 521 82085 5

**Stefan** C. and Ansems N., 2017. Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. Sustainable Water Resources Management. https://doi.org/10.1007/s40899-017-0212-6

**Stepanov** V.N., 1983. Oceanosphere. Mysl, Moscow, 270 p. [in Russian].

**Sprenger** C., Hartog N., Hernandez M., Vilanova E., Grützmacher G., Scheibler F. and Hannappel S., 2017. Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. Hydrogeology Journal, 25, 1909-1922. doi : 10.1007/s10040-017-1554-8

**Todd** D.K., 1961. Ground water hydrology. London (Chapman & Hall), 1959. Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society, 87: 122. doi:10.1002/qj.49708737126

**Touma** J., 1984. Etude critique de la caractérisation hydrodynamique des sols non saturés : rôle de l'air, influence de l'écoulement multidimensionnel de l'eau. Ecologie, Environnement. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG; Université Scientifique et Médicale de Grenoble. Thèse de doctorat, p. 192.

**Tribouillard** N., 2009. Champ captant de Crépieux-Charmy. Logiciel ROSALYE. Compte rendu des développements 2007 et 2008. Rapport de Synthèse BURGEAP. Rly. 3166, 47 p.

**Tribouillard** N., 2013. Plan de gestion de la nappe de l'Est Lyonnais – GESLY 4 – Actualisation du modèle NAPELY. Rapport REAUCE00662-02, p. 38.

**van Genuchten** M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892–898.

**Villard**, 1880. Eaux de Lyon. Projet Villard. Imprimerie administrative Chanoine, Lyon, p. 60.

**Vogt** T., Schneider P., Hahn-Woernle L., Cirpka O.A., 2010. Estimation of seepage rates in a losing stream by means of fiber-optic high-resolution vertical temperature profiling. Journal of Hydrology, 380, 1–2, 154–164.

**Voisin** C., Romero Guzmán M.A., Réfloch A., Taruselli M. and Garambois S., 2017. Groundwater Monitoring with Passive Seismic Interferometry. Journal of Water Resource and Protection, 9, 1414-1427. https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912091

**White** I., Sully M.J. and Perroux K.M., 1992. Measurement of surface soil hydraulic properties: disc permeameters, tension infiltrometers and other techniques. In: G.C. Topp, W.D. Reynolds and R.E. Green (editors), Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. Soil Sci. Soc. Am. Special Publication No. 30: 69-103.

**Wu** X., Pope G.A., Shook G.M., Srinivasan S., 2008. Prediction of enthalpy production from fractured geothermal reservoirs using partitioning tracers. International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, 5–6, 1453–1466

# Liste des figures

*Figure 1 : Schéma conceptuel des écoulements sur le site de Crépieux-Charmy et des questionnements liés à la compréhension des chemins de l'eau* ..... 16
*Figure 2 : Répartition de la ressource en eau sur la planète* ..... 21
*Figure 3 : L'inégale répartition des consommations mondiales de l'eau pour l'usage domestique* ..... 23
*Figure 4 : Les usages de l'eau dans le monde [Modifiée d'après Rekacewicz, 2008]* ..... 24
*Figure 5 : Schéma de délimitation des périmètres de protection autour d'un captage [Modifiée d'après Rey et al., 2008]* ..... 26
*Figure 6 : Repères hydrographiques autour de la Métropole de Lyon* ..... 29
*Figure 7 : Carte géologique simplifiée de la région Lyonnaise [Modifiée d'après Loizeau, 2013]* ..... 31
*Figure 8 : L'histoire de l'eau à Lyon en photographies.* ..... 32
*Figure 9 : Localisation des captages de production d'eau potable de la Métropole de Lyon* ..... 34
*Figure 10 : Les frontières du champ captant de Crépieux-Charmy* ..... 35
*Figure 11 : Périmètres de protection immédiat (PPI), rapproché (PPR) et éloigné (PPE) qui encadrent le champ captant de Crépieux-Charmy* ..... 36
*Figure 12 : Évolution des prélèvements d'eau de la Métropole de Lyon entre 1995 et 2017, sur le champ captant de Crépieux-Charmy et sur l'ensemble des sites de captage* ..... 37
*Figure 13 : Influence de la texture et de la structure du sol sur l'évolution de* $|h|(\theta)$ *[d'après Mermoud, 2006]* ..... 49
*Figure 14 : Exemple d'une discrétisation d'un domaine 2D par éléments finis [Modifiée de Diersch, 2013]* ..... 53
*Figure 15 : Evolution du débit journalier moyen mensuel extrait du champ captant, et de la température moyenne mensuelle en sortie d'usine de Croix-Luizet entre avril 2014 et décembre 2017* ..... 62
*Figure 16 : Carte de localisation des stations d'alerte, des points de mesure sur les cours d'eau et de la délimitation des zones de pompages sur le champ captant.* ..... 65
*Figure 17 : Carte de localisation du dispositif expérimental - première phase de réalisation [Loizeau, 2013]* ..... 67
*Figure 18 : Localisation des ouvrages de l'extension du dispositif expérimental* ..... 69
*Figure 19 : Coupes lithologiques des piézomètres de l'extension du dispositif expérimental, et localisation de la zone captante (par tubage crépiné)* ..... 70
*Figure 20 : Coupe pseudo2D au sein du dispositif expérimental, selon un axe Nord-Sud et traversant le Canal de Miribel, le bassin 5-2 et le Vieux-Rhône* ..... 71
*Figure 21 : Évolution du niveau d'eau dans le Canal de Miribel et dans les bassins d'infiltrations 5-1 et 5-2 au cours de l'année 2016* ..... 72
*Figure 22 : Localisation des 6 piézomètres de suivi pour la compréhension des écoulements au sein du dispositif expérimental* ..... 73
*Figure 23 : Suivi des niveaux piézométriques en période de crue, sans fonctionnement des bassins (juin 2016)* ..... 74
*Figure 24 : Suivi des niveaux piézométriques en période d'étiage, avec fonctionnement des bassins (mars 2016)* ..... 74
*Figure 25 : Evolution des températures de nappe dans quelques ouvrages du dispositif expérimental entre juin et novembre 2016, et cycles de remplissage/vidange des bassins d'infiltration 5-1 et 5-2..* 76
*Figure 26 : Evolution des températures de nappe au Sud du bassin 5-2, dans les ouvrages S20, P86 (superficiel) et P88 (profond) entre le 25/06 et le 01/08/2016* ..... 77
*Figure 27 : Evolution des niveaux piézométriques et des températures de nappe au droit du bassin 5-2 au cours des cycles de remplissage des bassins 5-1 et 5-2 (de juin à octobre 2016)* ..... 80
*Figure 28 : Localisation des quatre piézomètres stratégiques pour le suivi des niveaux piézométriques* ..... 81

*Figure 29 : Evolution piézométrique observée en 2016 au sein de quatre ouvrages stratégiques du site d'étude* ..... 82
*Figure 30 : Cartes piézométriques sans fonctionnement des bassins d'infiltration (A.) et avec la recharge artificielle par les bassins (B.)* ..... 84
*Figure 31 : Localisation des sondes de mesure de température de nappe sur l'ensemble du champ captant* ..... 87
*Figure 32 : Localisation des postes électriques et du nombre d'ouvrages de pompage associés* ..... 88
*Figure 33 : Localisation des 12 bassins d'infiltration sur le champ captant de la Métropole de Lyon* .. 89
*Figure 34 : Carte des températures du mois de janvier 2016* ..... 93
*Figure 35 : Evolution des températures de nappe, à l'échelle du champ captant, entre les mois de mai et juin 2015* ..... 95
*Figure 36 : Interprétation des cartes de températures à l'échelle du champ captant : carte du mois de juin 2015* ..... 97
*Figure 37 : Localisation de la zone d'étude des oscillations thermiques et données enregistrées entre le 20/11/2016 et le 05/01/2017* ..... 98
*Figure 38 : Coupe simplifiée des ouvrages de la flûte de pan à proximité du Vieux-Rhône et localisation des sondes de température* ..... 99
*Figure 39 : Evolution des températures de nappe dans les ouvrages de la flûte de pan à proximité du Vieux-Rhône sur une année complète* ..... 100
*Figure 40 : Comparaison des températures de nappe et des chroniques de pompage issues du poste électrique n°8 et des ouvrages de pompage de l'ile de Charmy* ..... 102
*Figure 41 : Comparaison de l'évolution de la température et de la conductivité électrique dans le piézomètre S33 en février 2017* ..... 102
*Figure 42 : Vue du dessus de l'évolution des températures de nappe suite à un remplissage du bassin 5-2, et selon les conditions de pompage sur l'île de Charmy* ..... 104
*Figure 43 : Représentation schématique 2D, selon une coupe Nord-Sud entre le bassin et les piézomètres, de l'évolution des températures de nappe, en période hivernale* ..... 105
*Figure 44 : Schéma de fonctionnement des trois principales catégories de recharge artificielle des nappes [Modifiée d'après Dillon, 2005]* ..... 115
*Figure 45 : Utilisation finale de l'eau extraite des sites de MAR par continent [Modifiée d'après Stefan and Ansems, 2017]* ..... 116
*Figure 46 : Répartition des MAR en France [Modifiée d'après Casanova et al., 2016]* ..... 117
*Figure 47 : Localisation des pré-bassins, des bassins d'infiltration et de leurs piézomètres de référence, sur le champ captant de Crépieux-Charmy* ..... 119
*Figure 48 : Coupe schématique d'un bassin d'infiltration* ..... 120
*Figure 49 : Schéma de fonctionnement de la barrière hydraulique créée par les bassins d'infiltration* ..... 122
*Figure 50 : Evolution du niveau piézométrique de l'ouvrage M12 et du volume infiltré journalier sur l'ensemble des bassins entre le 01/09/2015 et le 31/10/2015* ..... 123
*Figure 51 : Evolution des débits moyens journaliers mensuels exhaurés et infiltrés, par rapport aux débits moyens calculés sur la période avril 2014 – décembre 2017* ..... 124
*Figure 52 : Evolution des volumes infiltrés et exhaurés mensuels sur la période avril 2014 – décembre 2017* ..... 125
*Figure 53 : Evolution du rapport $V_{inf}$ / $V_{exh}$ journalier au cours du mois de juillet 2016* ..... 126
*Figure 54 : Protocole de réalisation d'un essai d'infiltration simple anneau et les données acquises en cours d'expérimentation* ..... 130
*Figure 55 : Evolution de la lame d'eau infiltrée cumulée au cours du temps ($I_t$) pour les quatre essais d'infiltration* ..... 132
*Figure 56 : Evolution de la tache d'humidité au cours du temps pour les quatre essais d'infiltration* 134
*Figure 57 : Comparaison des données expérimentales et des modèles isotropes et anisotropes pour la lame d'eau infiltrée cumulée (A.) et pour l'extension de la tache d'humidité (B.)* ..... 137

*Figure 58 : Localisation des piézomètres du dispositif expérimental exploités pour l'analyse des traçages thermiques* ..... 140
*Figure 59 : Données acquises dans les eaux de surface et dans les piézomètres du dispositif expérimental au cours du traçage thermique estival 2016* ..... 141
*Figure 60 : Données acquises dans les eaux de surface et dans les piézomètres du dispositif expérimental au cours du traçage thermique hivernal 2016* ..... 144
*Figure 61 : Représentation en coupe des traçages thermiques estivaux et hivernaux à l'état initial et au cours du fonctionnement du bassin 5-2* ..... 150
*Figure 62 : Répartition des volumes mensuels infiltrés par bassins par rapport au volume total infiltré, entre avril 2014 et décembre 2017* ..... 151
*Figure 63 : Suivi de la zone saturée au droit des bassins 3 entre avril 2014 et décembre 2017* ..... 153
*Figure 64 : Evolution des niveaux piézométriques des ouvrages de références des bassins en 2017*. 154
*Figure 65 : Coupe schématique au travers d'un couple de bassins et côtes piézométriques de référence pour le calcul du temps de relaxation du dôme hydraulique* ..... 155
*Figure 66 : Evolution du volume infiltré par rapport au pourcentage du temps de mise en eau, à la température moyenne de l'eau infiltrée et à la hauteur d'eau moyenne dans le bassin 5-2 entre avril 2014 et décembre 2017* ..... 157
*Figure 67 : Evolution de l'indice d'infiltrabilité mensuel pour le bassin 2-1 (graphique du haut) et le bassin 4-1 (graphique du bas) sur la période avril 2014-décembre 2017* ..... 159
*Figure 68 : Schéma conceptuel de la démarche de modélisation [Modifiée d'après Kiraly, 1997]* ..... 167
*Figure 69 : La réalisation d'un modèle numérique [Modifiée d'après Attard, 2017]* ..... 167
*Figure 70 : Présentation de l'extension spatiale, de la lithologie à l'affleurement et du maillage du modèle FEflow* ..... 169
*Figure 71 : Conditions aux limites de charge imposée, flux imposé et pompage pour le modèle à grande échelle, en régime stationnaire* ..... 172
*Figure 72 : Comparaison des charges hydrauliques calculées et observées avant et après calage des conductivités hydrauliques, en dissociant les points de contrôles situés dans les alluvions du Rhône et dans les couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines* ..... 173
*Figure 73 : Localisation des points de contrôle et tracé de la carte piézométrique calculée après la calibration des conductivités hydrauliques* ..... 174
*Figure 74 : Champ de conductivités hydrauliques à saturation issues des différents modèles du BRGM [Collin et al., 1973 ; Rousselot and Beguin, 1975 ; Rousselot, 1975] et après calibration de la piézométrie.* ..... 175
*Figure 75 : Evolution des principales données de terrain au cours de l'année 2016* ..... 176
*Figure 76 : Exemple de chroniques de températures imposées pour les eaux superficielles* ..... 179
*Figure 77 : Chronique de pompage du puits 01-04 au pas de temps journalier et décadaire (A.), et chronique de débit infiltré dans le bassin d'infiltration 5-2 (B.) au cours de l'année 2016* ..... 180
*Figure 78 : Evolution piézométrique observée de l'ouvrage M12 en 2016 (courbe noire), et calculée en imposant des conditions d'exploitation décadaires (courbe rouge en pointillés) ou journalières (courbe bleue en pointillés)* ..... 181
*Figure 79 : Evolutions piézométriques observées et calculées pour les ouvrages M25 (graphique du haut) et B10 (graphique du bas), sur l'année 2016, et mise en évidence des pistes d'amélioration de la simulation* ..... 182
*Figure 80 : Piézométrie et température de nappe initiales imposées dans le modèle* ..... 183
*Figure 81 : Gamme de conductivités hydrauliques à l'échelle du champ captant et extension spatiale de la couche moins perméable présente au droit du bassin d'infiltration 5-2 (vue de dessus et vue en coupe au travers du dispositif expérimental)* ..... 184
*Figure 82 : La variabilité spatiale et temporelle du coefficient d'échange nappe-rivière ($\Phi$)* ..... 185
*Figure 83 : Comparaison de l'évolution du niveau piézométrique observé et calculé au cours de l'année 2016, pour cinq ouvrages stratégiques (B10, M12, S34, S09 et C05)* ..... 187

*Figure 84 : Carte des écarts constatés entre les niveaux piézométriques calculés et observés en chaque point de contrôle, exprimés en pourcentage d'apparition sur l'année 2016 ..... 188*
*Figure 85 : Cartes des écarts absolus entre les niveaux piézométriques moyens journaliers calculés et observés à la date du 31 juillet 2016..... 189*
*Figure 86 : Comparaison de l'évolution de la température de nappe observée et calculée au cours de l'année 2016, pour cinq ouvrages : P96, S26, M03, M12 et S09. ..... 191*
*Figure 87 : Carte des écarts constatés entre les températures de nappe calculées et observées en chaque point de contrôle, exprimés en pourcentage d'apparition sur l'année 2016..... 193*
*Figure 88 : Localisation des ouvrages équipés de sondes de température dans la zone Sud-Ouest du champ captant ..... 194*
*Figure 89 : Evolution des températures de nappe observées dans les ouvrages du Sud-Ouest de la zone de captage, et de la température de nappe simulée dans l'ouvrage S09 au cours de l'année 2016.. 195*
*Figure 90 : Schématisation du système d'écoulement régional du domaine d'étude..... 196*
*Figure 91 : Estimation de la part de chaque source d'alimentation du champ captant de Crépieux-Charmy (en pourcentage d'apport par rapport au volume pompé sur le site) ..... 198*
*Figure 92 : Les aires d'alimentation de chaque couple de bassins d'infiltration du champ captant de Crépieux-Charmy ..... 200*
*Figure 93 : Suivi des trajectoires de particules en provenance des eaux superficielles, sans fonctionnement des bassins d'infiltration (A.) et avec mise en eau de certains bassins (B.) ..... 203*
*Figure 94: Suivi des trajectoires de particules en provenance des eaux superficielles, à la date du 25 mars 2016 (A.) et du 22 octobre 2016 (B.) ..... 204*
*Figure 95 : Suivi des trajectoires de particules en provenance des nappes souterraines à la date du 31 mai 2016..... 205*
*Figure 96 : Aire de captage des ouvrages du poste électrique n°12 (Nord de l'île de Charmy), selon différentes conditions d'exploitation des bassins d'infiltration..... 206*

# Liste des tableaux

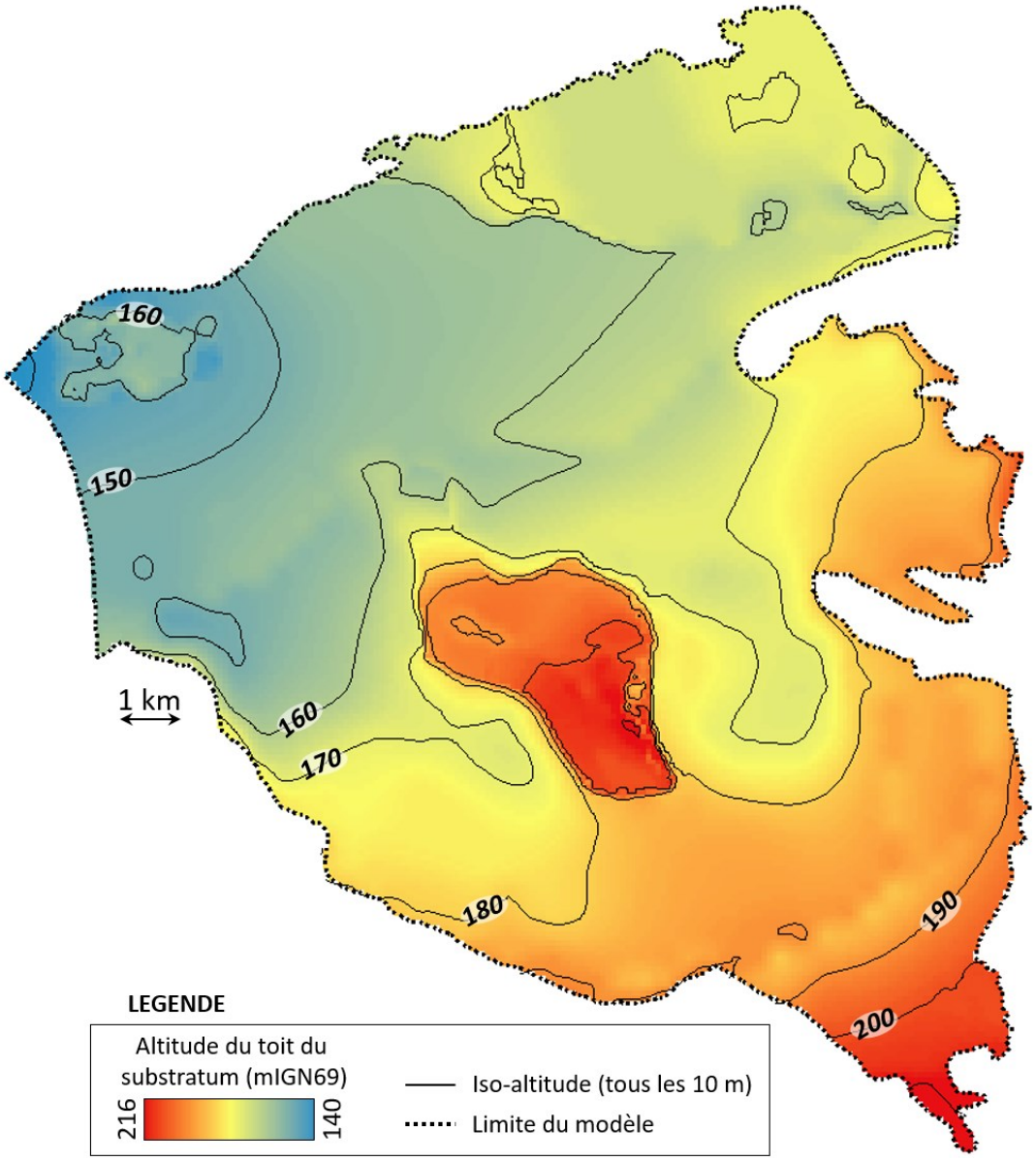
*Tableau 1 : Répartition des volumes d'eau par compartiments selon les continents ..... 22*
*Tableau 2 : Liste des captages de production d'eau potable de la Métropole de Lyon et des volumes moyens journaliers prélevables/prélevés ..... 34*
*Tableau 3 : Inventaire des données acquises en continu dans les ouvrages de pompage ..... 60*
*Tableau 4 : Inventaire des données issues des bassins d'infiltration..... 61*
*Tableau 5 : Liste des capteurs mis en œuvre pour le suivi de la ressource souterraine et de l'eau superficielle..... 64*
*Tableau 6 : Erreur maximale et gamme de valeurs acceptées pour le traitement et la validation des données brutes issues des différents types d'appareils de mesure ..... 66*
*Tableau 7 : Temps de réaction de la nappe suite au remplissage du bassin 5-2 dans certains ouvrages du dispositif expérimental ..... 75*
*Tableau 8 : Détail des données brutes prises en compte pour la réalisation d'une carte de température mensuelle..... 90*
*Tableau 9 : Détail du manque de données dans les chroniques pour la réalisation des cartes de températures de 2016 ..... 91*
*Tableau 10 : Caractéristiques générales et entretien des bassins d'infiltration du champ captant de Crépieux-Charmy ..... 118*
*Tableau 11 : Historique des opérations d'entretien des fonds de bassins d'infiltration depuis 2010 . 121*
*Tableau 12 : Fréquence d'apparition estivale et hivernale des volumes infiltrés journaliers supérieurs à 50, 75 ou 100% des volumes exhaurés sur la période avril 2014 – décembre 2017 ..... 127*
*Tableau 13 : Liste des essais d'infiltrations menés dans le bassin d'infiltration 2-2, leur localisation, ainsi que le type de sol testé..... 129*
*Tableau 14 : Résultats des analyses effectuées sur les prélèvements de la couche de sable et de la couche compactée ..... 131*
*Tableau 15 : Résultats issus de l'analyse de la lame d'eau infiltrée au cours des quatre essais d'infiltration menés dans le bassin 2-2..... 132*
*Tableau 16 : Résultats de l'analyse visuelle de l'extension de la tache d'humidité au cours du temps ($r_{(t)}$) et de l'évolution des teneurs en eau selon la distance au centre de l'anneau ($\theta_{(t)}$) au cours des quatre essais d'infiltration menés dans le bassin 2-2..... 133*
*Tableau 17 : Dimensions, choix des paramètres hydrodynamiques et des conditions initiales/limites pour la modélisation de l'essai d'infiltration GA2 ..... 136*
*Tableau 18 : Conditions de réalisation du traçage estival 2016..... 140*
*Tableau 19 : Analyse des données du traçage thermique estival 2016 ..... 142*
*Tableau 20 : Conditions de réalisation du traçage hivernal 2016 ..... 143*
*Tableau 21 : Analyse des données du traçage thermique hivernal 2016..... 145*
*Tableau 22 : Calcul du gradient hydraulique de part et d'autre du bassin 5-2 au cours du fonctionnement de ce dernier (entre le 04 et le 15 décembre 2016) ..... 147*
*Tableau 23 : Fréquence d'atteinte de la ZNS de 2 m au droit de chaque couple de bassins, calculée sur la période avril 2014 – décembre 2017 ..... 153*
*Tableau 24 : Vitesse de relaxation du dôme hydraulique par doublet de bassins entre les mois d'avril 2014 et décembre 2017..... 156*
*Tableau 25 : Valeur des indices d'infiltrabilité moyens par bassins sur la période avril 2014 - décembre 2017, ainsi que sur les deux derniers mois de l'année 2017..... 160*
*Tableau 26 : Gammes de conductivités hydrauliques retrouvées au sein des différentes lithologies avant et après calibration du modèle en régime permanent..... 174*
*Tableau 27 : Caractéristiques physiques et thermiques sélectionnées ..... 177*
*Tableau 28 : Ouvrages de suivi pour la création des bordures amont ..... 178*

*Tableau 29 : Evaluation du modèle numérique d'un point de vue thermique pour la simulation en régime transitoire (année 2016)..... 193*
*Tableau 30 : Apports par les cours d'eau – Résultats de la simulation de l'année 2016 ..... 197*

# ANNEXES

***Annexe 1*** *: Carte du toit du substratum de l'Est lyonnais et de la plaine alluviale du Rhône .....ii*
***Annexe 2*** *: Débits moyens mensuels prélevés entre 1995 et 2017, sur l'ensemble des captages de la Métropole de Lyon et sur le champ captant de Crépieux-Charmy uniquement.....iii*
***Annexe 3*** *: Profondeur totale et épaisseur captante des ouvrages de pompage du champ captant de Crépieux Charmy .....iv*
***Annexe 4*** *: Influence du tranquilisateur des bassins d'infiltration sur les mesures de température des eaux infiltrées .....vii*
***Annexe 5*** *: Les 31 ouvrages du dispositif expérimental (1ère et 2ème phase de réalisation).....viii*
***Annexe 6*** *: Le traitement des données pour la réalisation des cartes de température .....ix*
***Annexe 7*** *: Les causes de non-fonctionnement des bassins d'infiltration – Chiffres de 2016-2017.....xiii*
***Annexe 8*** *: Indices d'infiltrabilité mensuels de chaque bassin d'infiltration entre les mois d'avril 2014 et décembre 2017.....xv*
***Annexe 9*** *: Domaine d'étude des travaux de S. Loizeau [Loizeau, 2013] .....xviii*
***Annexe 10*** *: Carte piézométrique de l'Est Lyonnais issue de Collin et al., 1973.....xix*
***Annexe 11*** *: Comparaison des évolutions de températures de nappe observées et calculées de l'ensemble des piézomètres équipés de sondes au cours de l'année 2016 .....xx*

**Annexe 1** : Carte du toit du substratum de l'Est lyonnais et de la plaine alluviale du Rhône




Carte du toit du substratum sur la zone correspondant au domaine du modèle numérique réalisé (alluvions du Rhône, couloirs fluvio-glaciaires de Meyzieu et de Décines et butte glaciaire séparant les deux couloirs fluvioglaciaires).

Cette carte du substratum tient compte des données BRGM *[Collin et al., 1973]*, des données incorporées dans le modèle NAPELY du BURGEAP *[Tribouillard, 2013]* et des données d'altitudes du toit du substratum connues sur le champ captant (puits / forages et piézomètres atteignant le substratum).

**Annexe 2** : Débits moyens mensuels prélevés entre 1995 et 2017, sur l'ensemble des captages de la Métropole de Lyon et sur le champ captant de Crépieux-Charmy uniquement.

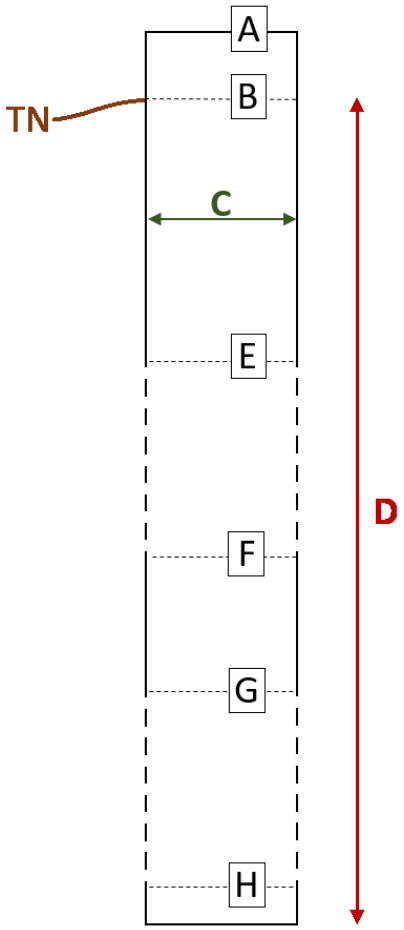
| Débit prélevé moyen ($m^3.j^{-1}$) | | *Janvier* | *Février* | *Mars* | *Avril* | *Mai* | *Juin* | *Juillet* | *Août* | *Septembre* | *Octobre* | *Novembre* | *Décembre* | *Moyenne annuelle* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1995 | 11 captages | 287 304 | 279 916 | 281 051 | 271 735 | 276 891 | 299 282 | 306 673 | 260 655 | 276 595 | 284 497 | 276 749 | 277 445 | **281 566** |
| | Crépieux-Charmy | 285 871 | 278 357 | 279 226 | 269 800 | 274 987 | 297 000 | 304 484 | 258 806 | 274 500 | 282 935 | 275 267 | 275 645 | **279 740 (99,4%)** |
| 1996 | 11 captages | 278 029 | 272 010 | 275 515 | 276 832 | 277 929 | 309 156 | 282 213 | 240 002 | 281 633 | 277 634 | 267 741 | 265 552 | **275 354** |
| | Crépieux-Charmy | 272 886 | 266 359 | 267 996 | 268 870 | 271 652 | 305 479 | 280 645 | 239 871 | 280 846 | 275 788 | 266 244 | 263 000 | **271 636 (98,6%)** |
| 1997 | 11 captages | 281 342 | 274 060 | 273 002 | 281 008 | 273 507 | 279 912 | 258 811 | 262 946 | 277 468 | 275 593 | 267 119 | 264 857 | **272 469** |
| | Crépieux-Charmy | 278 276 | 271 006 | 266 239 | 277 832 | 271 201 | 279 133 | 257 202 | 261 710 | 276 367 | 273 903 | 263 367 | 263 677 | **269 993 (99,1%)** |
| 1998 | 11 captages | 262 436 | 267 756 | 272 206 | 263 683 | 281 634 | 288 532 | 287 697 | 266 581 | 278 660 | 272 845 | 273 852 | 265 473 | **273 446** |
| | Crépieux-Charmy | 259 822 | 264 550 | 267 369 | 259 834 | 276 870 | 286 321 | 286 911 | 264 928 | 277 544 | 269 808 | 265 145 | 256 765 | **269 656 (98,6%)** |
| 1999 | 11 captages | 270 455 | 268 257 | 270 263 | 252 424 | 264 146 | 279 295 | 269 270 | 236 995 | 271 742 | 258 533 | 260 545 | 261 132 | **263 588** |
| | Crépieux-Charmy | 261 963 | 260 621 | 257 206 | 239 204 | 252 646 | 278 346 | 268 609 | 235 534 | 271 230 | 252 727 | 249 632 | 250 569 | **256 524 (97,3%)** |
| 2000 | 11 captages | 267 016 | 275 776 | 271 667 | 260 948 | 276 514 | 291 274 | 267 928 | 255 986 | 276 517 | 279 990 | 281 464 | 273 934 | **273 251** |
| | Crépieux-Charmy | 262 953 | 269 377 | 262 575 | 248 354 | 268 553 | 289 989 | 266 757 | 254 786 | 275 410 | 279 117 | 278 893 | 272 883 | **269 137 (98,5%)** |
| 2001 | 11 captages | 279 186 | 283 141 | 280 023 | 268 476 | 286 843 | 297 609 | 287 491 | 265 307 | 282 780 | 285 513 | 285 560 | 294 776 | **283 059** |
| | Crépieux-Charmy | 278 048 | 282 075 | 279 122 | 262 187 | 268 681 | 295 116 | 286 700 | 263 909 | 281 634 | 282 155 | 283 838 | 293 445 | **279 743 (98,8%)** |
| 2002 | 11 captages | 304 981 | 300 423 | 300 920 | 303 439 | 293 801 | 328 438 | 295 395 | 257 961 | 289 714 | 291 428 | 289 069 | 285 895 | **295 122** |
| | Crépieux-Charmy | 302 015 | 295 571 | 287 090 | 300 038 | 292 449 | 327 040 | 294 043 | 256 608 | 283 960 | 279 178 | 283 233 | 275 554 | **289 732 (98,2%)** |
| 2003 | 11 captages | 297 211 | 305 080 | 310 468 | 312 048 | 316 885 | 368 063 | 327 432 | 309 558 | 324 665 | 316 957 | 307 548 | 303 043 | **316 580** |
| | Crépieux-Charmy | 294 121 | 301 643 | 306 197 | 300 726 | 313 106 | 361 046 | 319 735 | 302 070 | 313 734 | 303 585 | 297 998 | 296 163 | **309 177 (97,7%)** |
| 2004 | 11 captages | 313 428 | 310 908 | 317 407 | 299 636 | 310 585 | 348 484 | 309 712 | 271 981 | 316 742 | 303 428 | 299 002 | 295 227 | **308 045** |
| | Crépieux-Charmy | 302 756 | 279 802 | 277 707 | 279 567 | 298 805 | 330 247 | 298 699 | 260 406 | 298 284 | 280 049 | 279 839 | 268 935 | **287 925 (93,5%)** |
| 2005 | 11 captages | 303 368 | 308 733 | 321 128 | 307 902 | 313 627 | 340 179 | 318 269 | 277 109 | 311 750 | 305 732 | 304 655 | 293 599 | **308 837** |
| | Crépieux-Charmy | 291 046 | 296 734 | 292 338 | 293 257 | 298 203 | 329 585 | 308 098 | 267 475 | 302 413 | 294 149 | 292 447 | 280 421 | **295 514 (95,7%)** |
| 2006 | 11 captages | 325 637 | 314 774 | 312 515 | 301 564 | 296 268 | 324 908 | 319 288 | 261 301 | 297 724 | 286 604 | 281 354 | 278 043 | **299 998** |
| | Crépieux-Charmy | 310 665 | 297 650 | 297 810 | 286 223 | 282 443 | 299 241 | 304 300 | 252 254 | 282 385 | 266 243 | 277 860 | 273 370 | **285 870 (95,3%)** |
| 2007 | 11 captages | 282 689 | 273 887 | 276 788 | 282 537 | 271 927 | 272 433 | 258 020 | 234 360 | 271 466 | 269 889 | 264 919 | 268 124 | **268 920** |
| | Crépieux-Charmy | 266 766 | 256 509 | 262 463 | 266 141 | 250 616 | 252 551 | 244 006 | 222 032 | 239 615 | 250 998 | 247 744 | 251 693 | **250 928 (93,3%)** |
| 2008 | 11 captages | 270 797 | 272 187 | 268 371 | 264 391 | 266 165 | 271 613 | 258 520 | 228 374 | 263 929 | 262 703 | 262 873 | 262 159 | **262 674** |
| | Crépieux-Charmy | 254 243 | 252 590 | 253 524 | 247 865 | 250 740 | 249 837 | 248 736 | 216 247 | 249 168 | 247 932 | 239 012 | 247 348 | **246 437 (93,8%)** |
| 2009 | 11 captages | 273 313 | 270 727 | 271 974 | 262 458 | 266 815 | 277 639 | 262 521 | 252 737 | 269 804 | 266 708 | 263 708 | 260 785 | **266 599** |
| | Crépieux-Charmy | 251 062 | 249 626 | 248 747 | 241 663 | 257 382 | 272 955 | 258 053 | 235 770 | 253 287 | 247 340 | 246 590 | 237 250 | **249 977 (93,8%)** |
| 2010 | 11 captages | 271 542 | 274 714 | 277 943 | 273 933 | 268 530 | 276 999 | 276 703 | 243 666 | 270 145 | 264 104 | 265 301 | 265 802 | **269 115** |
| | Crépieux-Charmy | 247 826 | 252 638 | 254 140 | 253 979 | 247 162 | 259 646 | 259 507 | 227 301 | 254 718 | 249 025 | 247 139 | 235 217 | **249 025 (92,5%)** |
| 2011 | 11 captages | 270 778 | 272 407 | 264 379 | 271 892 | 287 373 | 268 810 | 248 445 | 243 870 | 265 812 | 276 940 | 268 252 | 261 087 | **266 671** |
| | Crépieux-Charmy | 249 875 | 255 858 | 244 554 | 253 128 | 268 450 | 252 816 | 233 286 | 229 609 | 250 275 | 252 612 | 247 664 | 237 541 | **247 972 (93,0%)** |
| 2012 | 11 captages | 270 821 | 293 988 | 285 387 | 260 334 | 263 980 | 270 502 | 255 688 | 238 319 | 261 906 | 258 484 | 257 642 | 258 382 | **264 620** |
| | Crépieux-Charmy | 247 836 | 262 668 | 245 151 | 241 247 | 249 549 | 214 108 | 238 449 | 223 501 | 243 914 | 242 837 | 240 813 | 226 510 | **239 715 (90,6%)** |
| 2013 | 11 captages | 264 269 | 274 260 | 273 849 | 265 394 | 254 571 | 273 859 | 272 104 | 238 593 | 272 342 | 261 560 | 258 514 | 254 720 | **263 670** |
| | Crépieux-Charmy | 243 933 | 250 379 | 224 989 | 248 569 | 241 022 | 256 723 | 254 820 | 224 078 | 251 212 | 242 079 | 223 269 | 238 142 | **241 601 (91,6%)** |
| 2014 | 11 captages | 260 706 | 262 497 | 254 825 | 258 290 | 254 792 | 281 129 | 249 018 | 222 845 | 268 086 | 262 976 | 260 702 | 258 086 | **257 829** |
| | Crépieux-Charmy | 241 865 | 244 562 | 230 344 | 227 349 | 232 702 | 262 271 | 233 855 | 208 922 | 250 400 | 245 600 | 236 800 | 226 810 | **236 790 (91,2%)** |
| 2015 | 11 captages | 257 014 | 240 465 | 259 374 | 253 007 | 254 618 | 281 790 | 275 557 | 234 733 | 258 627 | 251 884 | 248 088 | 239 442 | **254 550** |
| | Crépieux-Charmy | 235 962 | 219 383 | 213 613 | 224 493 | 213 903 | 250 654 | 255 287 | 218 553 | 240 473 | 227 286 | 206 411 | 215 109 | **226 761 (89,1%)** |
| 2016 | 11 captages | 247 589 | 242 777 | 245 216 | 235 929 | 236 082 | 248 758 | 242 490 | 218 943 | 253 038 | 237 861 | 237 485 | 233 217 | **239 949** |
| | Crépieux-Charmy | 211 854 | 209 610 | 207 731 | 196 419 | 163 026 | 195 808 | 216 193 | 198 620 | 234 148 | 212 558 | 209 286 | 206 639 | **205 158 (85,5%)** |
| 2017 | 11 captages | 246 076 | 238 247 | 237 774 | 237 355 | 238 282 | 261 315 | 237 681 | 219 331 | 246 124 | 244 323 | 239 433 | 233 815 | **239 980** |
| | Crépieux-Charmy | 213 046 | 205 305 | 197 703 | 206 160 | 207 118 | 242 300 | 223 642 | 200 423 | 227 719 | 214 300 | 207 347 | 211 911 | **213 081 (88,8%)** |

| Moyenne 1995-2017 | *Janvier* | *Février* | *Mars* | *Avril* | *Mai* | *Juin* | *Juillet* | *Août* | *Septembre* | *Octobre* | *Novembre* | *Décembre* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 captages | **277 652** | **277 260** | **278 350** | **272 401** | **275 294** | **293 043** | **276 823** | **249 659** | **277 707** | **273 747** | **270 503** | **267 591** |
| Crépieux-Charmy | **263 682** | **261 864** | **257 558** | **256 213** | **258 751** | **277 748** | **267 044** | **240 148** | **265 793** | **259 661** | **255 036** | **252 374** |

**Annexe 3** : Profondeur totale et épaisseur captante des ouvrages de pompage du champ captant de Crépieux Charmy

Les ouvrages de pompage du site de Crépieux-Charmy ont tous été forés jusqu'à atteindre le substratum (argile) situé en dessous des alluvions fluviatiles du Rhône. Ainsi la profondeur de chaque ouvrage renseigne sur l'épaisseur totale de l'aquifère en présence.

Les puits et les forages sont équipés de barbacanes ou de crépines, qui permettent à l'eau de nappe de s'introduire au sein de l'ouvrage avant d'être pompée. Ces parties filtrantes peuvent parfois être divisées en 2 zones, séparées par une zone non captante (illustré sur la coupe schématique d'un puits ci-dessous).




Les deux tableaux suivants permettent de recenser, pour chaque ouvrage de pompage du site d'étude :

- ✓ L'**altitude du terrain naturel** (TN) – « B »
- ✓ Le **diamètre de l'ouvrage** – « C »
- ✓ La **profondeur de l'ouvrage** (et donc l'altitude du substratum) – « D »
- ✓ Le **nombre de barbacanes** ainsi que la (ou les) zone(s) captante(s) – « E, F, G et H »
- ✓ Si une **sonde de température** est présente, alors l'altitude de cette sonde est indiquée dans le tableau.

| Ouvrage | | Côte margelle | Côte TN | Diamètre | Profondeur/TN | Nombre de barbacanes ou crépines | Côtes arrivées d'eau | | | | Sonde de température | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | | E | F | G | H | Présence ou absence | Côte sonde |
| | | *mIGN69* | *mIGN69* | *m* | *m* | | *mIGN69* | *mIGN69* | *mIGN69* | *mIGN69* | | *mIGN69* |
| POSTE 1 | 0101-01 (dés.) | 172.38 | 169.58 | 3 | - | Crépine | 161.68 | 152.38 | - | - | Absence | |
| | 0101-02 (dés.) | 172.37 | 169.57 | 3 | - | Crépine | 156.97 | 150.97 | - | - | Absence | |
| | 0102 (dés.) | 172.42 | 168.32 | 3 | - | 200 | 156.42 | 152.92 | - | - | Absence | |
| | 0103 | 172.36 | 167.56 | 3 | 15.55 | 200 | 157.15 | 152.65 | - | - | Présence | 155.72 |
| | 0104 | 172.40 | 168.51 | 3 | 16.77 | 200 | 157.68 | 153.18 | - | - | Absence | |
| | 0105 | 172.41 | 168.90 | 3 | 16.70 | 200 | 157.92 | 153.42 | - | - | Absence | |
| | 0106 | 172.41 | 168.79 | 3 | 17.34 | 200 | 156.98 | 152.48 | - | - | Présence | 155.93 |
| | 0107 | 172.35 | 168.50 | 3 | 16.30 | 200 | 157.54 | 153.04 | - | - | Présence | 156.42 |
| POSTE 2 | 0201 | 172.31 | 168.31 | 3 | 18.66 | 200 | 155.41 | 150.91 | - | - | Absence | |
| | 0202 | 172.29 | 168.00 | 3 | 19.02 | 200 | 154.49 | 149.99 | - | - | Absence | |
| | 0203 | 172.28 | 168.58 | 3 | 19.60 | 200 | 154.86 | 150.36 | - | - | Présence | 153.73 |
| | 0204 | 172.29 | 168.55 | 3 | 19.40 | 200 | 154.79 | 150.14 | - | - | Présence | 153.66 |
| | 0205 | 172.32 | 168.64 | 3 | 20.33 | 200 | 153.42 | 149.82 | - | - | Absence | |
| | 0206 | 172.34 | 168.99 | 3 | 19.68 | 160 | 154.10 | 150.60 | - | - | Absence | |
| POSTE 3 | 0301 | 172.34 | 169.02 | 3 | 18.83 | 200 | 155.01 | 151.51 | - | - | Présence | 154.69 |
| | 0302 | 172.24 | 169.20 | 3 | 19.50 | 200 | 154.12 | 150.52 | - | - | Présence | 153.43 |
| | 0303 | 172.35 | 169.97 | 3 | 22.55 | 200 | 152.02 | 148.52 | - | - | Absence | |
| | 0304 | 172.34 | 169.51 | 3 | 17.90 | 200 | 156.46 | 152.96 | - | - | Absence | |
| | 0305 | 172.30 | 169.72 | 3 | 20.36 | 200 | 154.08 | 150.58 | - | - | Présence | 153.25 |
| | 0306 | 172.21 | 169.59 | 3 | 19.15 | 200 | 155.31 | 151.81 | - | - | Présence | 153.91 |
| | 0307 | 172.21 | 169.69 | 3 | 19.61 | 200 | 154.91 | 151.41 | - | - | Absence | |
| POSTE 4 | 0401 | 172.30 | 169.42 | 3 | 18.90 | 200 | 155.30 | 151.70 | - | - | Absence | |
| | 0402 | 172.25 | 169.62 | 3 | 18.89 | 200 | 155.15 | 152.15 | - | - | Présence | 154.54 |
| | 0403 | 172.34 | 170.03 | 3 | 19.65 | 200 | 155.54 | 151.94 | - | - | Présence | 154.27 |
| | 0404 | 172.18 | 170.23 | 3 | 20.69 | 200 | 154.38 | 150.98 | - | - | Absence | |
| | 0405 | 172.31 | 170.23 | 3 | 19.47 | 200 | 155.41 | 152.01 | - | - | Absence | |
| | 0406 (dés.) | 172.46 | 170.36 | 3 | 13.40 | 200 | 162.76 | 158.16 | - | - | Absence | |
| POSTE 5 | 0501 | 172.45 | 168.83 | 3 | 16.76 | 200 | 157.59 | 152.99 | - | - | Présence | 157.10 |
| | 0502 | 172.33 | 168.81 | 3 | 17.79 | 200 | 156.33 | 151.63 | - | - | Présence | 154.51 |
| | 0503 | 172.38 | 169.00 | 3 | 17.60 | 200 | 156.73 | 152.13 | - | - | Absence | |
| | 0504 | 172.34 | 168.71 | 3 | 17.47 | 200 | 156.93 | 152.33 | - | - | Absence | |
| | 0505 | 172.30 | 168.90 | 3 | 19.26 | 200 | 155.50 | 150.90 | - | - | Présence | 159.37 |
| | 0506 | 172.36 | 169.06 | 3 | 17.61 | 200 | 157.44 | 152.94 | - | - | Présence | 155.79 |
| | 0507 | 172.49 | 169.06 | 3 | 17.25 | 200 | 157.39 | 152.79 | - | - | Absence | |
| POSTE 6 | 0601 | 172.44 | 170.42 | 3 | 18.69 | 160 | 158.04 | 153.54 | - | - | Absence | |
| | 0602 | 172.10 | 168.80 | 3 | 16.80 | 180 | 158.10 | 153.70 | - | - | Présence | 155.63 |
| | 0603 | 172.05 | 169.15 | 3 | 16.83 | 200 | 158.16 | 153.76 | - | - | Présence | 155.61 |
| | 0604 | 172.36 | 169.31 | 3 | 19.36 | 190 | 156.16 | 151.66 | - | - | Absence | |
| | 0605 | 172.46 | 169.53 | 3 | 16.50 | 200 | 158.76 | 154.36 | - | - | Absence | |
| | 0606 | 172.36 | 169.23 | 3 | 19.28 | 190 | 155.86 | 151.26 | - | - | Présence | 154.59 |
| POSTE 7 | 0701 | 172.17 | 169.35 | 3 | 19.41 | 200 | 154.87 | 151.47 | - | - | Présence | 153.57 |
| | 0702 | 172.33 | 169.49 | 3 | 16.58 | 200 | 157.13 | 153.53 | - | - | Absence | |
| | 0703 | 172.17 | 170.09 | 3 | 22.30 | 200 | 152.24 | 148.92 | - | - | Absence | |
| | 0704 | 172.27 | 169.47 | 3 | 21.48 | 200 | 152.67 | 148.87 | - | - | Présence | 152.02 |
| | 0705 | 172.29 | 170.09 | 3 | 19.83 | 200 | 154.99 | 150.89 | - | - | Présence | 154.84 |
| | 0706 | 172.29 | 169.75 | 3 | 22.92 | 176 | 151.69 | 148.29 | - | - | Absence | |
| | 0707 | 172.32 | 170.69 | 3 | 21.02 | 200 | 155.02 | 150.12 | - | - | Absence | |
| POSTE 8 | 0801 | 172.37 | 170.43 | 3 | 19.46 | 200 | 156.97 | 151.87 | - | - | Présence | 155.80 |
| | 0802 | 172.36 | 170.09 | 3 | 19.81 | 200 | 156.36 | 151.86 | - | - | Absence | |
| | 0803 | 172.37 | 170.42 | 3 | 20.01 | 200 | 157.47 | 152.77 | - | - | Présence | 156.12 |
| | 0804 | 172.39 | 170.21 | 3 | 18.07 | 200 | 157.59 | 152.99 | - | - | Absence | |
| | 0805 | 172.18 | 170.22 | 3 | 14.39 | 190 | 161.88 | 157.38 | - | - | Présence | 157.27 |
| | 0806 | 172.37 | 170.54 | 3 | 17.26 | 200 | 159.17 | 154.37 | - | - | Présence | 157.54 |
| | 0807 (dés.) | 172.42 | 170.42 | 3 | 17.25 | 200 | 159.02 | 154.52 | - | - | Absence | |

| Ouvrage | | Côte margelle | Côte TN | Diamètre | Profondeur/TN | Nombre de barbacanes ou crépines | Côtes arrivées d'eau | | | | Sonde de température | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D | | E | F | G | H | Présence ou absence | Côte sonde |
| | | *mIGN69* | *mIGN69* | *m* | *m* | | *mIGN69* | *mIGN69* | *mIGN69* | *mIGN69* | | *mIGN69* |
| POSTE 9 | 0901-01 | 172.38 | 169.01 | 0.8 | 18.03 | Crépine | 163.18 | 151.44 | - | - | Absence | |
| | 0901-02 | 172.41 | 169.16 | 0.8 | 18.68 | Crépine | 163.71 | 151.13 | - | - | Présence | 157.93 |
| | 0902-01 | 172.54 | 169.10 | 0.8 | 17.52 | Crépine | 163.84 | 152.03 | - | - | Absence | |
| | 0902-02 | 172.50 | 168.90 | 0.8 | 18.22 | Crépine | 163.60 | 151.60 | - | - | Présence | 154.80 |
| | 0903-01 | 172.40 | 169.50 | 0.8 | 19.89 | Crépine | 159.70 | 150.40 | - | - | Absence | |
| | 0903-02 | 172.48 | 169.48 | 0.8 | 19.35 | Crépine | 162.38 | 151.88 | - | - | Absence | |
| | 0904-01 | 172.41 | 169.79 | 0.8 | 20.10 | Crépine | 162.41 | 152.31 | - | - | Présence | 155.21 |
| | 0904-02 | 172.40 | 169.78 | 0.8 | 20.25 | Crépine | 160.63 | 150.30 | - | - | Absence | |
| | 0905-01 | 172.42 | 170.10 | 0.8 | 20.48 | Crépine | 162.02 | 150.17 | - | - | Absence | |
| | 0905-02 | 172.39 | 169.85 | 0.8 | 20.81 | Crépine | 163.25 | 149.84 | - | - | Absence | |
| | 0906-01 | 172.33 | 170.28 | 0.8 | 25.17 | Crépine | 155.79 | 153.39 | 151.79 | 147.09 | Absence | |
| | 0906-02 | 172.38 | 170.22 | 0.8 | 22.74 | Crépine | 163.07 | 148.38 | - | - | Présence | 152.58 |
| | 0907-01 | 172.41 | 171.29 | 0.8 | 24.93 | Crépine | 162.61 | 147.81 | - | - | Présence | 153.16 |
| | 0907-02 | 172.41 | 170.18 | 0.8 | 22.34 | Crépine | 159.51 | 147.91 | - | - | Absence | |
| POSTE 10 | 1001-01 | 172.42 | 170.26 | 0.77 | 21.56 | Crépine | 162.62 | 149.42 | - | - | Absence | |
| | 1001-02 | 172.32 | 170.40 | 0.77 | 21.77 | Crépine | 162.82 | 149.53 | - | - | Absence | |
| | 1002-01 | 172.42 | 170.80 | 0.77 | 23.73 | Crépine | 159.61 | 147.95 | - | - | Présence | 153.32 |
| | 1002-02 | 172.42 | 171.02 | 0.77 | 23.15 | Crépine | 158.72 | 148.27 | - | - | Absence | |
| | 1003-01 | 172.45 | 171.65 | 0.77 | 24.37 | Crépine | 163,75 | 160,85 | 156.55 | 148.35 | Présence | 151.35 |
| | 1003-02 | 172.42 | 171.58 | 0.77 | 24.07 | Crépine | 163,56 | 160,72 | 156.82 | 148.02 | Absence | |
| | 1004-01 | 172.35 | 171.40 | 0.77 | 25.15 | Crépine | 161,60 | 160,10 | 159.10 | 147.15 | Absence | |
| | 1004-02 | 172.35 | 171.63 | 0.77 | 25.08 | Crépine | 160,35 | 159,00 | 158.00 | 147.59 | Absence | |
| | 1005-01 | 172.46 | 170.81 | 0.79 | 25.50 | Crépine | 161.06 | 146.56 | - | - | Absence | |
| | 1005-02 | 172.46 | 170.81 | 0.79 | 24.43 | Crépine | 160.86 | 147.56 | - | - | Absence | |
| | 1006-01 | 172.42 | 169.66 | 0.79 | 23.76 | Crépine | 162,42 | 160,52 | 156.82 | 146.92 | Absence | |
| | 1006-02 | 172.43 | 169.88 | 0.79 | 23.47 | Crépine | 160.53 | 147.40 | - | - | Présence | 152.73 |
| | 1007-01 | 172.38 | 170.22 | 0.79 | 24.54 | Crépine | 161,58 | 159,78 | 158.68 | 146.58 | Présence | 152.78 |
| | 1007-02 | 172.38 | 170.43 | 0.79 | 24.25 | Crépine | 162,13 | 160,78 | 157.68 | 147.58 | Absence | |
| | 1008-01 | 172.38 | 171.18 | 0.79 | 23.75 | Crépine | 160.23 | 148.38 | - | - | Absence | |
| | 1008-02 | 172.38 | 170.93 | 0.79 | 23.37 | Crépine | 162,28 | 160,13 | 158.68 | 148.68 | Présence | 150.88 |
| POSTE 11 | 1101-01 | 173.20 | 170.60 | 2.5 | 17.91 | 144 | 156.70 | 154.10 | - | - | Présence | 155.59 |
| | 1101-02 | 173.24 | 169.84 | 2.5 | 16.96 | 132 à 144 | 156.74 | 153.94 | - | - | Absence | |
| | 1102-01 | 173.29 | 170.29 | 2.5 | 17.82 | 144 | 156.79 | 154.09 | - | - | Absence | |
| | 1102-02 | 173.22 | 170.30 | 2.5 | 17.54 | 144 | 156.62 | 154.12 | - | - | Absence | |
| | 1103-01 | 173.19 | 170.02 | 2.5 | 17.61 | 144 | 156.29 | 153.49 | - | - | Absence | |
| | 1103-02 | 173.26 | 169.38 | 2.5 | 16.51 | 144 | 156.66 | 154.06 | - | - | Absence | |
| | 1104-01 | 173.26 | 170.11 | 2.5 | 15.45 | 48 | 157.46 | 155.06 | - | - | Absence | |
| | 1104-02 | 173.16 | 169.99 | 2.5 | 17.32 | 144 | 157.06 | 154.26 | - | - | Présence | 155.90 |
| POSTE 12 | 1201-01 | 173.28 | 169.88 | 2.1 | 16.37 | 60 | 156.28 | 154.28 | - | - | Absence | |
| | 1201-02 | 173.28 | 169.83 | 2.1 | 16.80 | 72 | 155.93 | 153.58 | - | - | Présence | 155.08 |
| | 1202-01 | 173.27 | 169.67 | 2.1 | 16.12 | 72 | 155.87 | 153.67 | - | - | Absence | |
| | 1202-02 | 173.28 | 169.68 | 2.1 | 16.45 | 72 | 156.08 | 153.88 | - | - | Présence | 155.50 |
| | 1203-01 | 173.25 | 169.65 | 2.1 | 16.24 | 72 | 156.25 | 154.05 | - | - | Absence | |
| | 1203-02 | 173.21 | 169.61 | 2.1 | 16.09 | 72 | 156.01 | 153.61 | - | - | Présence | 155.27 |
| | 1204-01 | 173.23 | 169.63 | 2.1 | 16.47 | 72 | 156.43 | 154.03 | - | - | Absence | |
| | 1204-02 | 173.30 | 170.10 | 2.1 | 16.53 | 72 | 156.60 | 154.90 | - | - | Présence | 156.11 |
| POSTE 13 | 1301-01 | 173.28 | 170.38 | 2.1 | 16.87 | 80 | 156.73 | 154.78 | 154.08 | 154.08 | Absence | |
| | 1301-02 | 173.22 | 170.62 | 2.1 | 18.36 | 95 | 158.22 | 156.12 | 153.52 | 152.62 | Présence | 157.03 |
| | 1302-01 | 173.23 | 170.79 | 2.1 | 16.92 | 85 | 157.63 | 155.03 | 154.23 | 154.23 | Absence | |
| | 1302-02 | 173.24 | 170.94 | 2.1 | 18.57 | 90 | 155.54 | 153.44 | 152.84 | 152.84 | Présence | 154.71 |
| | 1303-01 | 173.27 | 170.73 | 2.1 | 17.37 | 90 | 156.37 | 154.37 | 153.67 | 153.67 | Absence | |
| | 1303-02 | 173.27 | 170.97 | 2.1 | 17.84 | 80 à 90 | 155.87 | 153.87 | 153.17 | 153.17 | Présence | 154.90 |
| | 1304-01 | 173.24 | 171.04 | 2.1 | 17.72 | 80 | 156.64 | 154.64 | 154.04 | 154.04 | Absence | |
| | 1304-02 | 173.25 | 171.05 | 2.1 | 17.61 | 80 | 156.35 | 154.10 | 153.75 | 153.75 | Présence | 155.56 |
| POSTE 14 | 1401-01 | 173.39 | 170.89 | 2.1 | 17.53 | 144 | 156.79 | 154.39 | - | - | Présence | 155.98 |
| | 1401-02 | 173.30 | 171.10 | 2.1 | 17.50 | 144 | 156.65 | 154.05 | - | - | Absence | |
| | 1402-01 | 173.18 | 170.98 | 2.1 | 17.87 | 144 | 156.23 | 153.83 | - | - | Présence | 155.42 |
| | 1402-02 | 173.29 | 171.29 | 2.1 | 19.55 | 144 | 155.14 | 152.84 | - | - | Absence | |
| | 1403-01 | 173.24 | 171.19 | 2.1 | 17.22 | 144 | 157.19 | 154.79 | - | - | Présence | 156.21 |
| | 1403-02 | 173.32 | 171.32 | 2.1 | 19.65 | 144 | 155.67 | 153.17 | - | - | Absence | |
| | 1404-01 | 173.37 | 170.97 | 2.1 | 17.97 | 144 | 156.22 | 153.72 | - | - | Absence | |
| | 1404-02 | 173.39 | 170.94 | 2.1 | 17.69 | 144 | 156.64 | 154.34 | - | - | Présence | 155.76 |

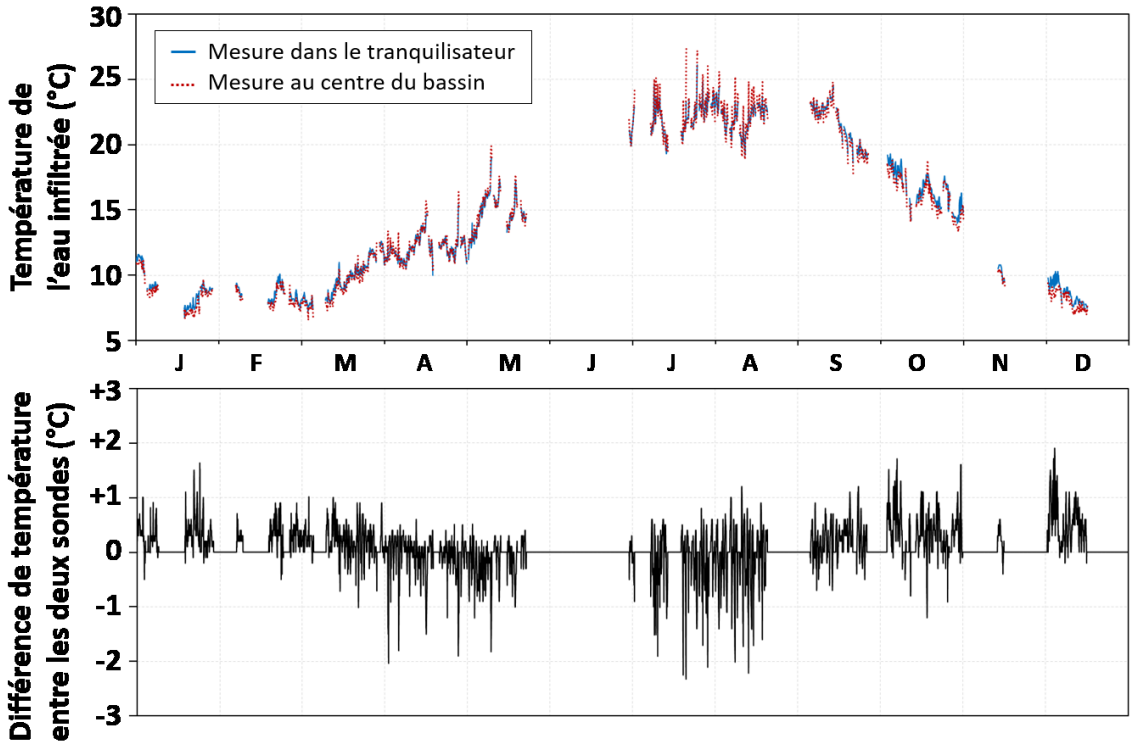
**Annexe 4** : Influence du tranquilisateur des bassins d'infiltration sur les mesures de température des eaux infiltrées

Comme expliqué dans la Section III.1.1.1.2, la mesure de température des eaux infiltrées dans les bassins d'infiltration est réalisée au sein d'un tranquilisateur, cylindre bétonné proche de la tulipe de remplissage des bassins. Dans le but de vérifier que cette mesure de température n'est pas influencée par la surface bétonnée, il a été décidé de comparer les mesures de températures du bassin 5-2 (dans le tranquilisateur) avec celles d'une nouvelle sonde installée au centre de ce bassin d'infiltration (suspendue à l'extérieur de la tête d'un piézomètre du centre du bassin).

Les mesures horaires acquises dans les deux sondes de température sont analysées sur la période du 01/01/2016 au 31/12/2016. Seules les températures enregistrées lorsque la hauteur d'eau dans le bassin est supérieure à 0,3 m sont conservées (pour s'assurer que la sonde installée au centre du bassin enregistre la température de l'eau et non celle de l'air si elle est dénoyée), ce qui explique la discontinuité des courbes de températures sur la figure ci-dessous.

Les deux sondes présentent des écarts de température peu marqués (en moyenne l'écart absolu de température constaté est de 0,4 °C ($\sigma$ = 0,3) tout au long de l'année 2016, avec un maximum de 2,3 °C d'écart en période estivale). Il est à noter que le tranquilisateur tamponne légèrement les températures : les variations journalières sont moins marquées dans le tranquilisateur :

- ✓ La température est plus élevée dans le tranquilisateur qu'au centre du bassin en période hivernale (écart positif).
- ✓ La température issue du tranquilisateur sera plus faible qu'au centre du bassin en période estivale (écart négatif).




Du fait des écarts de températures peu marqués entre les deux sondes de mesures (±1 à 2 °C en général), nous pouvons considérer que l'impact du cylindre bétonné est négligeable sur les températures enregistrées (d'autant plus lorsque nous nous intéressons aux températures moyennes mensuelles des eaux infiltrées).

**Annexe 5** : Les 31 ouvrages du dispositif expérimental (1ère et 2ème phase de réalisation)

Dans sa totalité (première phase de réalisation et phase d'extension), le dispositif expérimental englobe 31 ouvrages de suivi de la nappe. Les tubages des ouvrages, en PVC, sont de diamètre interne 90 mm, et les tubages crépinés sont en général constitués de fentes horizontales. Le tableau suivant récapitule les dénominations des 31 ouvrages, leurs localisations, l'altitude du terrain naturel et du fond de chacun des ouvrages, mais aussi l'emplacement de la sonde de mesure.

* $Z_{TN}$ : Altitude du terrain naturel
** $Z_{fond}$ : Altitude du fond de l'ouvrage
*** $Z_{sonde}$ : Altitude de la sonde

| Nom de l'ouvrage | Localisation | Date de création | Crépine | $Z_{TN}$ * mIGN69 | $Z_{fond}$ ** mIGN69 | $Z_{sonde}$ *** mIGN69 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **S03** | « Y » au sud du bassin | Avant 2010 | Classique (totale) | 170,27 | 160,60 | 161,19 |
| **S21** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 169,55 | 154,55 | 155,99 |
| **S22** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 169,96 | 153,96 | 156,12 |
| **S23** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 170,52 | 154,72 | 156,46 |
| **S24** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 169,42 | 155,42 | 158,32 |
| **S25** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 170,01 | 154,01 | 155,39 |
| **S26** | | Mars 2012 | Classique (totale) | 170,11 | 154,31 | 156,22 |
| **S30** | | Juillet 2011 | Classique (totale) | 170,41 | 154,41 | 156,00 |
| **S31** | | Juillet 2011 | Classique (totale) | 170,47 | 155,47 | 156,98 |
| **S20** | Flûte de pan au sud du bassin | Mars 2012 | Classique (totale) | 169,78 | 156,78 | 159,08 |
| **P86** | | Mars 2012 | Partielle (0,5 m) | 169,76 | 163,76 | 164,11 |
| **P87** | | Mars 2012 | Partielle (0,5 m) | 169,77 | 161,07 | 161,38 |
| **P88** | | Mars 2012 | Partielle (0,5 m) | 169,78 | 156,78 | 158,64 |
| **S32** | Flûte de pan proche du Vieux-Rhône (côté forêt) | Mars 2012 | Classique (totale) | 170,82 | 153,12 | 153,97 |
| **P80** | | Juillet 2011 | Partielle (1 m) | 170,86 | 161.36 | 161,06 |
| **P81** | | Juillet 2011 | Partielle (1 m) | 170,85 | 157,35 | 157,13 |
| **P82** | | Juillet 2011 | Partielle (1 m) | 170,85 | 152,85 | 154,00 |
| **S33** | Flûte de pan proche du Vieux-Rhône (côté berge) | Mars 2012 | Classique (totale) | 170,53 | 151,93 | 153,98 |
| **P83** | | Juillet 2011 | Partielle (1 m) | 170,58 | 161,08 | 161,50 |
| **P84** | | Juillet 2011 | Partielle (1 m) | 170,57 | 156,57 | 156,78 |
| **P85** | | Juillet 2011 | Partielle (0,5 m) | 170,57 | 152,57 | 154,00 |
| **P95** | Flûte de pan au centre du bassin | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 169,29 | 157,29 | 158,82 |
| **P96** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 169,29 | 159,26 | 161,01 |
| **M24** | Flûte de pan au nord du bassin | Octobre 2007 | Classique (totale) | 168,92 | 157,39 | 160,00 |
| **P92** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 168,91 | 156,91 | 158,48 |
| **P93** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 168,93 | 158,93 | 160,44 |
| **P94** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 168,90 | 161,90 | 162,46 |
| **S34** | Flûte de pan proche du Canal de Miribel | Juillet 2015 | Classique (totale) | 170,58 | 148,58 | 152,89 |
| **P89** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 170,57 | 148,57 | 151,88 |
| **P90** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 170,56 | 155,56 | 157,39 |
| **P91** | | Juillet 2015 | Partielle (1 m) | 170,56 | 161,56 | 163,23 |

**Annexe 6** : Le traitement des données pour la réalisation des cartes de température

Pour la réalisation des cartes de température à l'échelle du champ captant, un traitement de données conséquent est à réaliser. Pour rappel, ces cartes tiennent compte des données de nappe (température de nappe et niveau piézométrique moyen), des données d'exploitation (volumes pompés et infiltrés, température de l'eau infiltrée et en sortie d'usine) et des données sur les eaux de surface (température des cours d'eau et débit du Rhône).
Le traitement de chaque type de donnée requiert une certaine méthodologie, expliquée ci-dessous.

**Le niveau piézométrique moyen mensuel**

Le niveau piézométrique de référence du champ captant correspond au niveau enregistré dans le piézomètre **M12**. Ce piézomètre est situé au centre de la prairie de captage. Le niveau de nappe de cet ouvrage est plus faible que le niveau moyen à l'échelle du champ captant (du fait de la proximité immédiate des ouvrages de pompage), mais le battement enregistré est représentatif de la moyenne des variations piézométriques enregistrées sur la totalité du site. Intégré aux cartes de température, le niveau piézométrique moyen mensuel du M12 est indiqué sous forme de graphique, normalisé par rapport au niveau moyen enregistré dans ce même ouvrage entre avril 2014 et octobre 2017 (qui est de 162,55 mIGN69).

L'évolution du niveau de nappe moyen mensuel, normalisé par rapport au niveau moyen sur la période 2014-2017, varie de +1,61m (mai 2016) à -1,78m (septembre 2014), comme illustré sur la figure ci-dessous. De manière générale, le niveau de nappe moyen mensuel est supérieur à 162,55 mIGN69 en période estivale (d'avril à septembre), et plutôt inférieur en période hivernale. La fin de l'année 2016 déroge quelque peu à cette règle : ceci est expliqué par la forte réalimentation par les bassins d'infiltration à cette période. Les **conditions d'exploitation du site** (pompages plus ou moins importants, bassins d'infiltration plus ou moins en fonctionnement) **ont une très forte influence sur les niveaux de nappe moyens à l'échelle du champ captant**. Le niveau de nappe moyen mensuel est donc une donnée importante à intégrer aux cartes de température mensuelles.

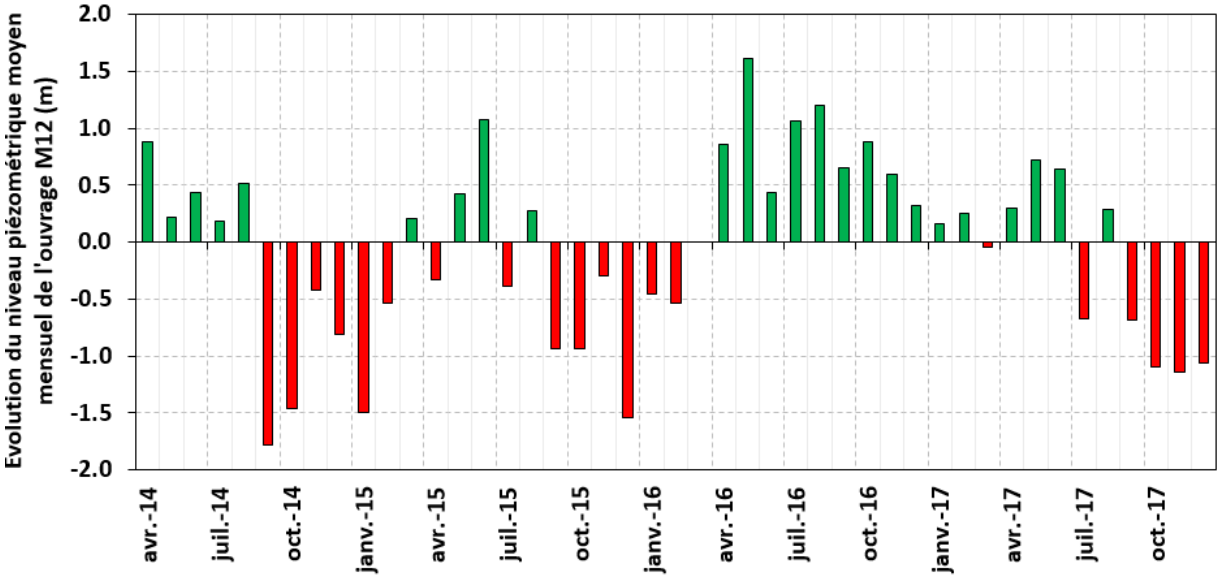



*Figure : Evolution du niveau piézométrique moyen mensuel dans le piézomètre M12 entre 2014 et 2017, par rapport au niveau moyen de 162,55 mIGN69*

**Les données d'exploitation**

Les données d'exploitation concernent aussi bien les données de pompage que les données de réalimentation par les bassins d'infiltration. L'exploitation du site joue un rôle fondamental sur les écoulements et donc sur l'évolution spatiale des panaches thermiques. Ceci explique la nécessité d'incorporer toutes ces données d'exploitation mensuelles aux cartes de température.

Les données d'exploitation sont présentes sous la forme de deux graphiques sur chaque carte de température mensuelle :

- ✓ **Un premier graphique qui concerne les données de pompage** (exemple sur la figure ci-dessous)

Dans le but de restreindre la quantité d'informations et ainsi simplifier la lecture du graphique, les données de pompage sont renseignées par poste électrique et non par ouvrage de pompage. Les graphiques de pompage correspondent **aux données du mois complet.** Ils comportent :

- Le cumul mensuel du volume pompé, tous postes électriques confondus. Cette information permet de comparer l'évolution des pompages d'un mois à l'autre.
- La température moyenne mensuelle de l'eau en sortie d'usine. Cette valeur de température est considérée comme étant la température moyenne de l'eau de nappe, même si cette dernière peut être influencée dans les conduites de transport depuis l'ouvrage de pompage jusqu'à la sortie d'usine de production, et également par le mélange avec les eaux prélevées dans le lac des Eaux Bleues.
- Le pourcentage de temps de fonctionnement moyen de chaque puits par poste électrique. Cette information permet de mettre en évidence les zones où les pompages sont plus ou moins actifs dans le temps.
- Le volume refoulé mensuel par poste électrique. Cette donnée permet de mettre en évidence des zones de la nappe soumises à une plus ou moins forte exploitation. Elle est dépendante du nombre d'ouvrages rattachés au poste électrique, du temps de fonctionnement de chaque ouvrage mais également du type de pompe présente dans l'ouvrage.

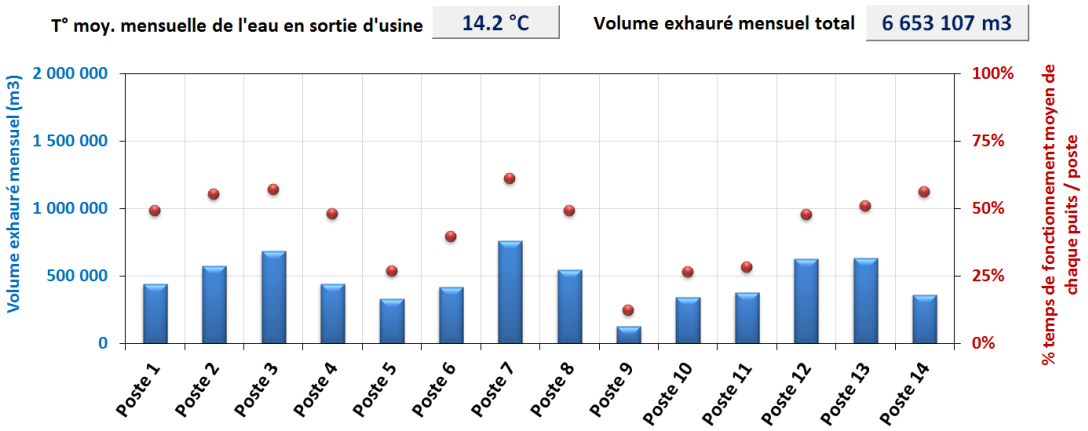



*Figure : Graphique des données de pompage du mois de janvier 2016*

Sur cet exemple du mois de janvier 2016, les pompages représentent un volume de 6 653 107 $m^3$, avec une répartition non équitable sur l'ensemble des postes électriques. Le poste n°7 est en fonctionnement 61% du temps pour un volume pompé de 760 000 $m^3$ alors que le poste n°9 est en fonctionnement seulement 12% du temps et produit un volume de 129 000 $m^3$. Le poste n°14, en fonctionnement 56% du temps ne produit que 360 000 $m^3$ : ceci est expliqué par le débit réduit des pompes présentes dans les ouvrages de ce poste électrique.

- ✓ **Un second graphique consacré aux données de réalimentation** (exemple sur la figure ci-dessous)

Les données de bassin sont renseignées **par bassin d'infiltration** et correspondent aux **données mensuelles**, tout comme pour les données de pompage. Ces graphiques comportent :

- Le cumul mensuel du volume infiltré, tous bassins confondus. Le volume mensuel infiltré par les bassins peut fortement varier d'un mois à l'autre de l'année selon l'utilisation des bassins d'infiltration.
- La température moyenne mensuelle de l'eau infiltrée. Dans le but de limiter le nombre de données sur les graphique, seule la moyenne mensuelle de la température, tous bassins confondus, est indiquée.
- Le pourcentage de temps de mise en eau de chaque bassin. Ce pourcentage est calculé en se basant sur le nombre de jours pour lesquels le débit introduit dans chaque bassin est supérieur à 0.
- La répartition des volumes mensuels infiltrés par bassins. Cette donnée permet de connaitre les zones plus ou moins réalimentées sur le mois complet. Elle est dépendante de la taille du bassin, du temps de mise en eau du bassin, de la température de l'eau infiltrée, mais également de la hauteur d'eau moyenne dans le bassin et de l'état de colmatage du sable.

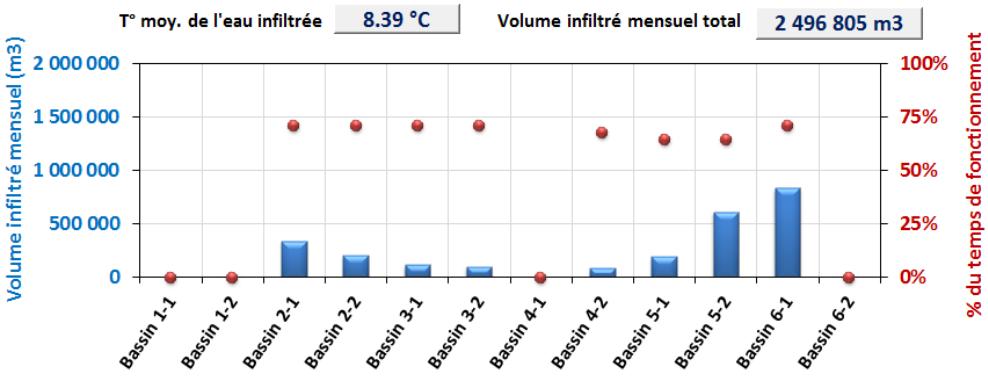



*Figure : Graphique des données de réalimentation du mois de janvier 2016*

Sur cet exemple, le volume d'eau total infiltré du mois est de 2 496 805 m$^3$. Il est à noter l'assèchement de plusieurs bassins (1-1, 1-2, 4-1 et 6-2). Ces mises en assec des bassins peuvent être liées à différentes causes (entretien de la végétation ou du sable pour les bassins 1-1, 1-2 et 4-1 ; un défaut de maintenance pour le bassin 6-2).

Pour un temps de fonctionnement semblable, les volumes infiltrés par bassins peuvent être très variables : 103 000 m$^3$ pour le bassin 3-2 et 838 000 m$^3$ pour le bassin 6-1 (en étant en eau 71% du temps et en infiltrant une eau à 8,4°C en moyenne). Cette importante différence de volume infiltré est ici expliquée par la superficie des bassins : 11 170 m$^2$ pour le bassin 3-2 et 19 576 m$^2$ pour le bassin 6-1. Le calcul des vitesses d'infiltration ($U_{inf}$) permet de tenir compte de la superficie du bassin et du temps de fonctionnement de ce dernier sur le mois analysé :

$$U_{inf} = \frac{V_{inf}}{A_b} * \frac{1}{j}$$

Avec, $U_{inf}$ la vitesse d'infiltration (en m.j$^{-1}$), $V_{inf}$ le volume mensuel infiltré (en m$^3$), $A_b$ la superficie du bassin (en m$^2$) et $j$ le temps de fonctionnement du bassin sur le mois complet (en jours).

Par le calcul, $U_{inf}$ du bassin 3-2 est de 0,42 m.j$^{-1}$ et celle du bassin 6-1 est de 1,95 m.j$^{-1}$. De ce fait, la hauteur d'eau moyenne mensuelle, qui est largement supérieure dans le bassin 3-2 comparé à celle du bassin 6-1 (1,2 m et 0,5 m respectivement), ne suffit pas à compenser les différences de superficie de ces deux bassins.

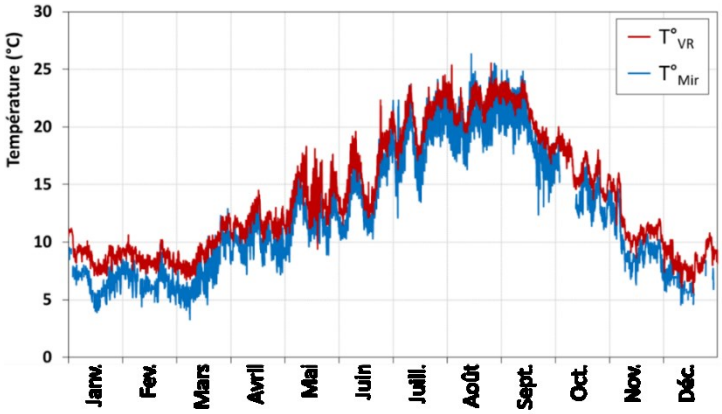
**Les données sur les eaux de surface**

Les données de cours d'eau correspondent **aux données moyennes du mois complet.** Elles comportent la température moyenne mensuelle dans le Canal de Miribel et dans le Vieux-Rhône, et le débit moyen mensuel du Rhône (issu des mesures de la station CNR de Villeurbanne, située en aval du champ captant juste après la jonction du Canal de Miribel et du Canal de Jonage).

La température du Canal Sud n'est pas indiquée sur les cartes de température du fait du manque de données trop important sur ce capteur.

Sur les cartes mensuelles, les températures des cours d'eau sont illustrées par des pastilles de couleur. Le code couleur utilisé est le même que celui des températures de nappe. Ceci permet, par analyse visuelle rapide, de comparer les températures entre les eaux superficielles et les eaux profondes (ce qui donne des renseignements sur les échanges nappe-rivière). Il est à noter que de manière générale, la température dans le vieux Rhône ($T_{VR}$) est supérieure à celle enregistrée dans le Canal de Miribel ($T_{Mir}$). En comparant l'évolution moyenne des températures de surface dans les deux bras du Rhône en 2016 (figure ci-dessous), il est possible de considérer : $T_{VR} = T_{Mir} + \mathbf{1,78}$

*Figure : Evolution des températures du Vieux Rhône et du Canal de Miribel au cours de l'année 2016*




Le débit moyen du Rhône, mesuré à la station CNR de Villeurbanne, entre avril 2014 et décembre 2017 est de 550 $m^3.s^{-1}$. La figure suivante illustre l'évolution du débit moyen mensuel, normalisé par rapport à la valeur de 550 $m^3.s^{-1}$. Les données supérieures à la norme sont illustrées en vert sur le graphique, alors que les données inférieures à la norme apparaissent en rouge.

Entre avril 2014 et décembre 2017, il semblerait que les périodes de débit moyen mensuel élevé (>550 $m^3.s^{-1}$) surviennent préférentiellement sur la première moitié de l'année (de janvier à juillet). Le débit moyen mensuel maximum (=1 157 $m^3.s^{-1}$) est enregistré en juin 2016, qui correspond aux chasses du Rhône.

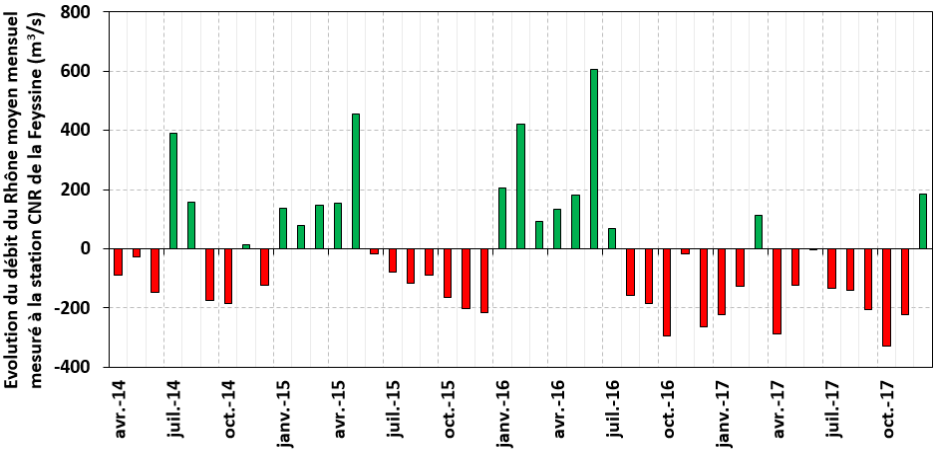



*Figure : Evolution du débit moyen mensuel du Rhône entre 2014 et 2017, par rapport au débit moyen de 550 $m^3.s^{-1}$*

**Annexe 7** : Les causes de non-fonctionnement des bassins d'infiltration – Chiffres de 2016-2017

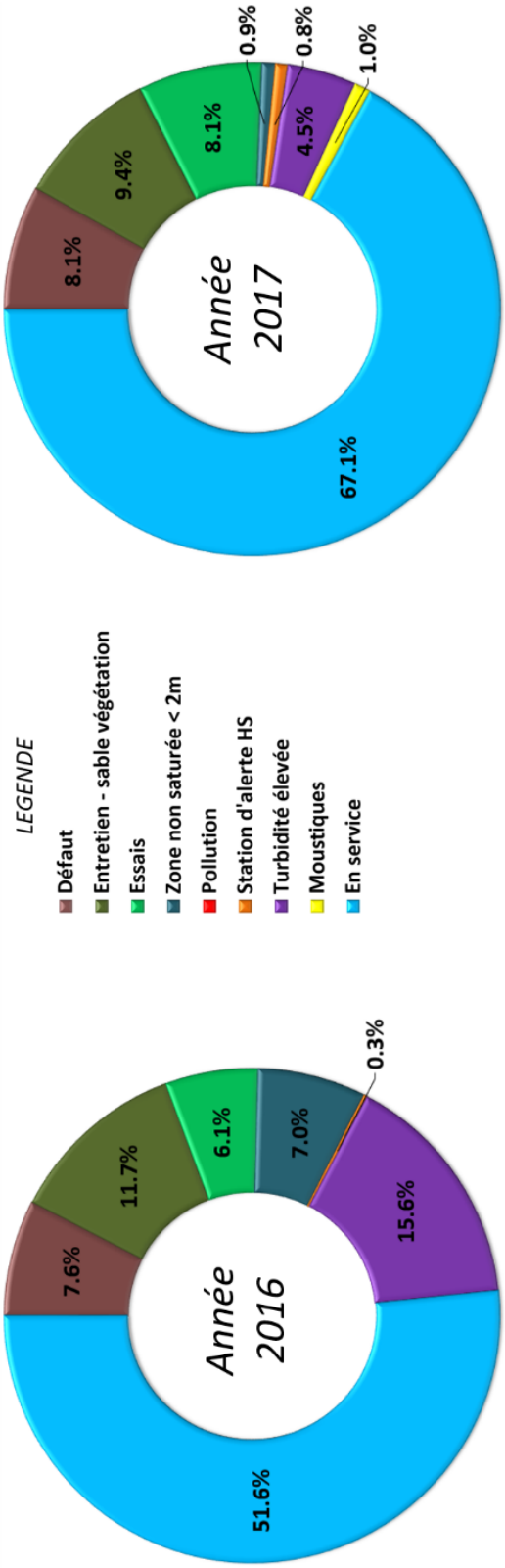
Depuis 2016, les causes d'arrêt des bassins d'infiltration sont suivies, au pas de temps journalier. Ces causes de non-fonctionnement sont divisées en trois grandes catégories, elles-mêmes divisées en sous-catégories :

- ✓ **Les arrêts contraints**
  - **Turbidité élevée** : si la turbidité dans le Rhône est supérieure à 50 NTU (Nephelometric Turbidity Unit, unité de mesure de la turbidité dans le domaine de l'eau, décrite dans la norme *NF EN ISO 7027*), l'eau est considérée comme trouble et n'est pas introduite dans les bassins (pour éviter tout colmatage de ces derniers par la présence de matière en suspension dans l'eau injectée).
  - **Zone non saturée inférieure à 2 m** : si la zone non saturée est inférieure à 2 mètres d'épaisseur par rapport à la côte de fond du bassin. Pour vérifier ce point, chaque bassin est équipé d'un piézomètre de référence, qui enregistre l'évolution du niveau piézométrique. Lorsque le seuil de 2 m par rapport à la surface du bassin est atteint, l'alimentation du bassin est arrêtée pour permettre à la nappe de redescendre. L'alimentation du bassin reprend lorsque la côte du piézomètre est redescendue de 1m en dessous du seuil.
  - **Moustiques** : cette problématique est prise en compte dans les statistiques d'arrêt des bassins depuis 2017. L'assèchement des bassins permet, quand cela est nécessaire, d'éradiquer les larves de moustiques qui prolifèrent dans l'eau stagnante.
  - **Entretien – Sable végétation** : si le sable de fond de bassin est renouvelé ou que la végétation du bassin est en cours d'entretien.
- ✓ **Les arrêts subits**
  - **Station d'alerte HS** : si la station d'alerte, située sur le Vieux Rhône en amont des pré-bassins, est hors service. Dans ce cas le suivi de la qualité du cours d'eau n'est pas opérationnel et l'alimentation des bassins n'a pas lieu pour éviter tout risque de contamination des eaux infiltrées.
  - **Pollution** : si le Rhône présente une contamination de quelque nature que ce soit.
  - **Défaut** : si un défaut quelconque est présent sur les pompes d'alimentation des bassins, ou sur l'instrumentation de suivi du bassin (piézomètre de référence, ou sondes de mesure du niveau d'eau dans le bassin).
- ✓ **Les arrêts pour cause expérimentale**
  - **Essais** : si des essais en cours nécessitent l'arrêt de l'alimentation d'un bassin (notamment pour les travaux expérimentaux menés au sein de la Plateforme Recherche)

La figure suivante présente les statistiques de non-fonctionnement des bassins au cours des années 2016 et 2017. Ces statistiques sont des moyennes de l'ensemble des bassins d'infiltration sur une année complète. Sachant que le bassin 1-1 n'est plus en fonctionnement depuis octobre 2014, (son radier étant trop bas en termes d'altitude, la zone non saturée n'est pas conservée en cas de mise en eau du bassin), ce bassin n'est pas pris en compte dans les statistiques. Rappelons également que la problématique « moustiques » n'a été recensée dans les statistiques qu'à partir de 2017.

D'après les chiffres des deux années étudiées, les principales causes d'arrêt des bassins sont : la turbidité élevée du Rhône (près de 16 % du temps en 2016 du fait des lâchers de barrages qui ont eu lieu), l'entretien du sable et de la végétation (de l'ordre de 10 % du temps), les défauts (environ 8 % du temps), les essais (environ 7 % du temps) et la zone non saturée inférieure à 2 m (7 % du temps en 2016 et 0,9 % en 2017).

Les autres causes de non-fonctionnement sont apparues moins de 1 % du temps en 2016 et 2017. Aucune pollution dans le Rhône n'est à déclarer au cours de ces deux années.
En regardant le détail des causes d'arrêt de chaque bassin séparément (tableaux de la figure suivante), des différences importantes apparaissent dans les chiffres d'un bassin à l'autre, et affectent les statistiques moyennes.

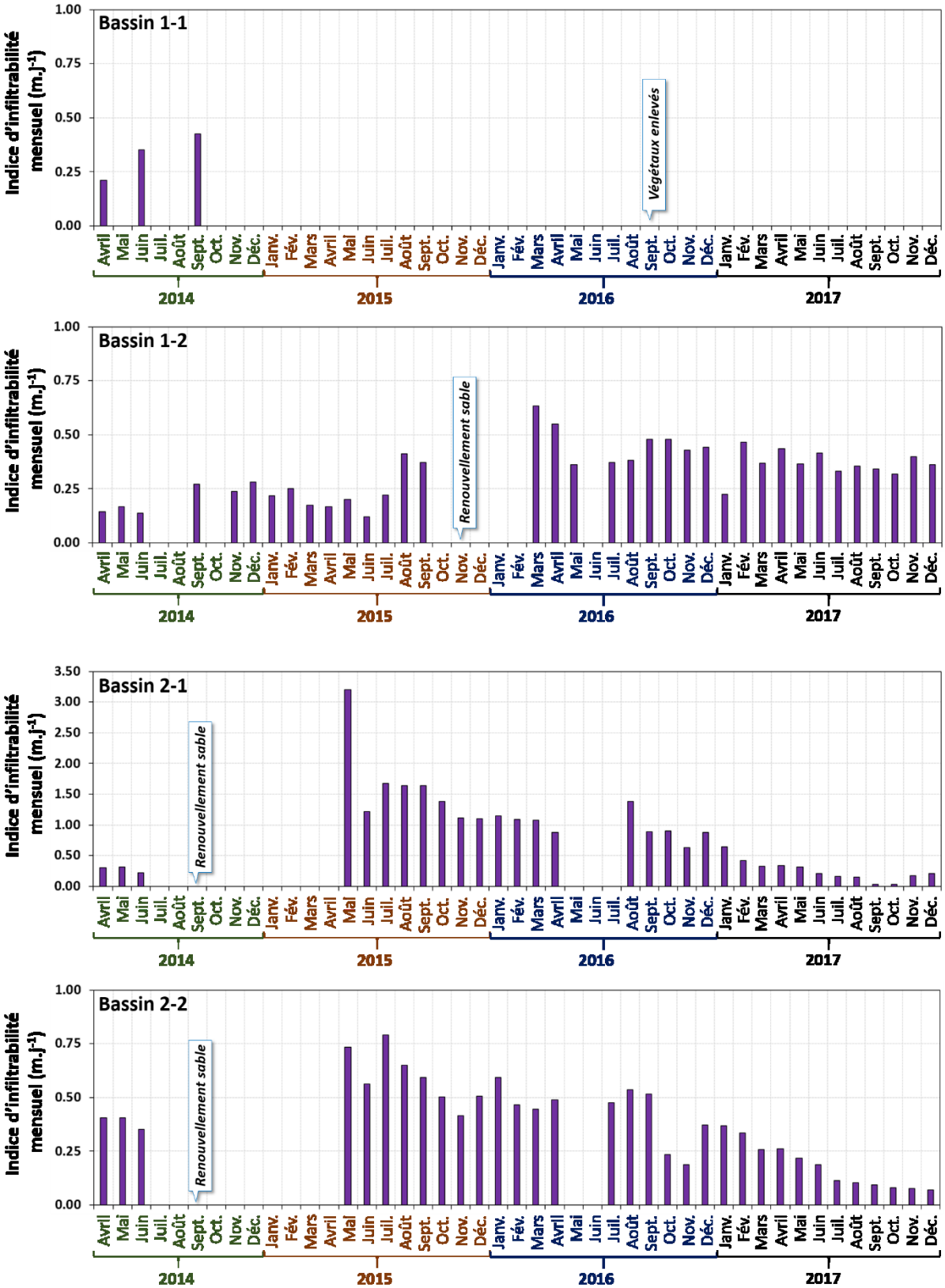


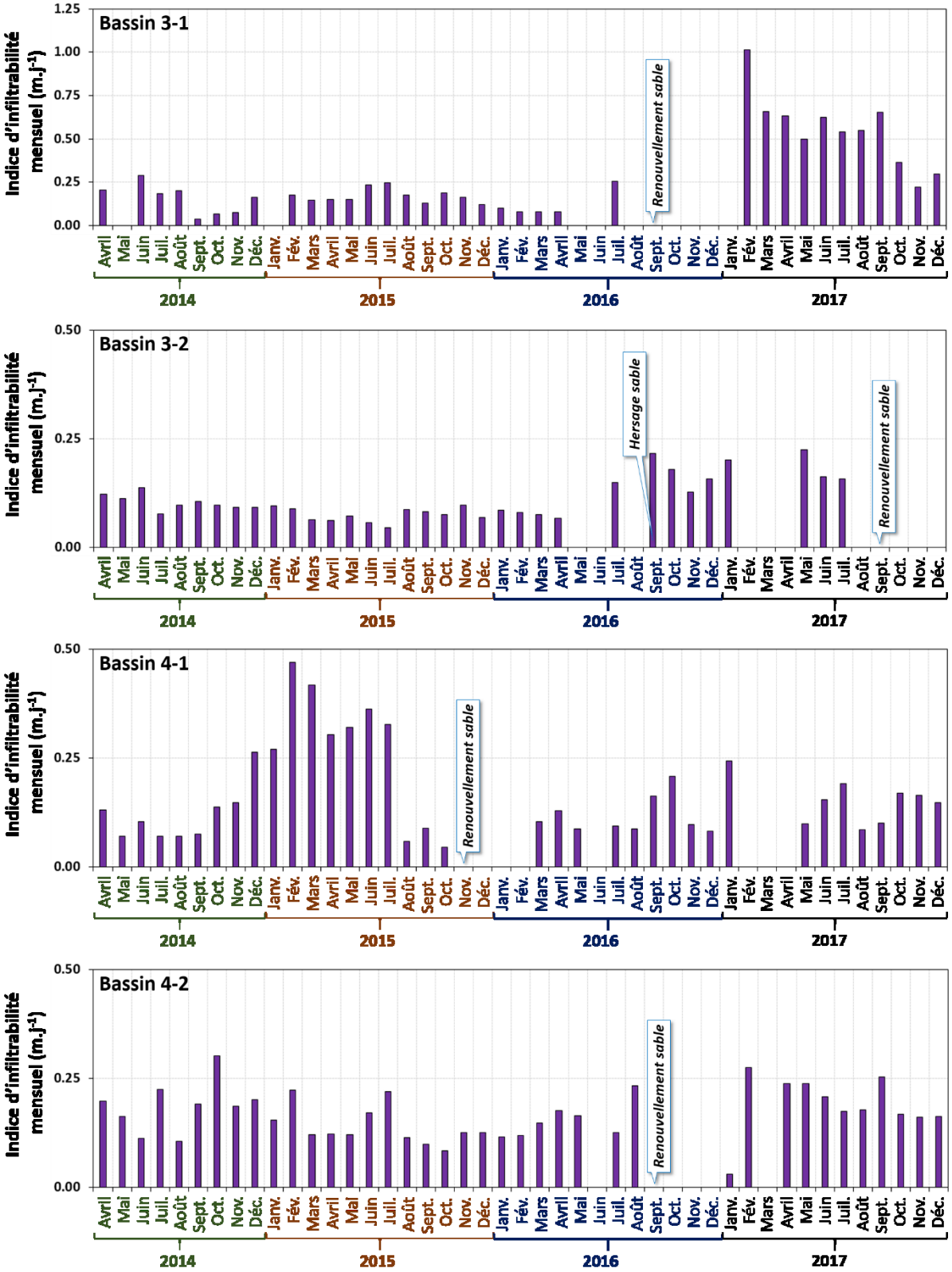

| ANNEE 2016 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 3-1 | 3-2 | 4-1 | 4-2 | 5-1 | 5-2 | 6-1 | 6-2 | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Défaut | 2% | 3% | 5% | 2% | 2% | 3% | 2% | 2% | 1% | 25% | 37% | 7.6% |
| Entretien - sable végétation | 19% | 0% | 0% | 40% | 11% | 19% | 40% | 0% | 1% | 0% | 0% | 11.7% |
| Essais | 1% | 3% | 8% | 4% | 7% | 15% | 0% | 12% | 17% | 0% | 0% | 6.1% |
| Zone non saturée < 2m | 3% | 15% | 13% | 12% | 13% | 6% | 4% | 4% | 4% | 0% | 4% | 7.0% |
| Pollution | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0.0% |
| Station d'alerte HS | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0.3% |
| Turbidité élevée | 13% | 17% | 17% | 15% | 17% | 13% | 15% | 17% | 16% | 16% | 13% | 15.6% |
| Moustiques | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| En service | 63% | 61% | 57% | 26% | 49% | 44% | 38% | 65% | 61% | 58% | 46% | 51.6% |

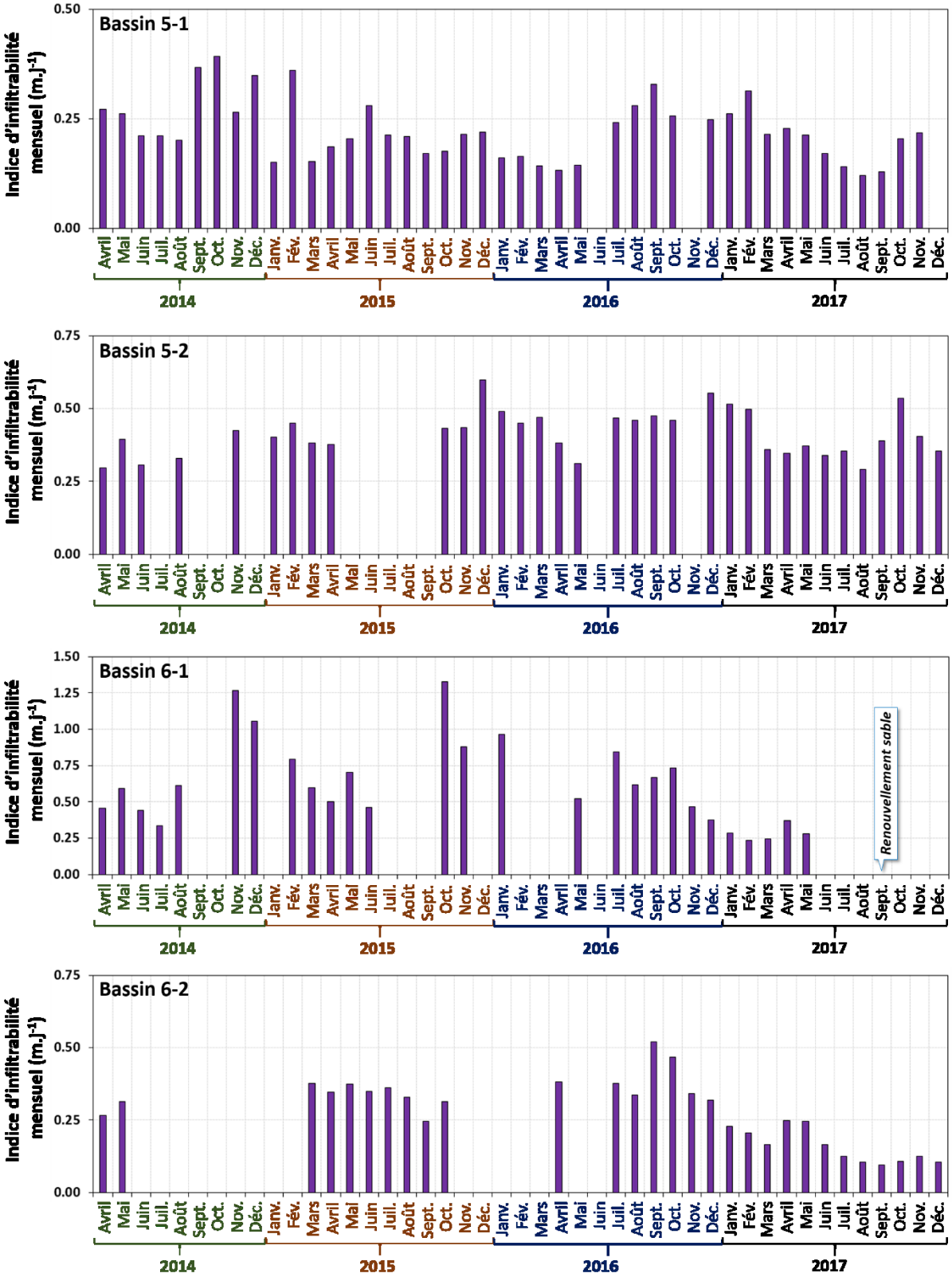
| ANNEE 2017 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 3-1 | 3-2 | 4-1 | 4-2 | 5-1 | 5-2 | 6-1 | 6-2 | Moyenne |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Défaut | 1% | 2% | 1% | 3% | 21% | 23% | 1% | 8% | 4% | 22% | 4% | 8.1% |
| Entretien - sable végétation | 2% | 4% | 4% | 11% | 38% | 2% | 12% | 0% | 0% | 30% | 0% | 9.4% |
| Essais | 2% | 5% | 9% | 6% | 8% | 2% | 17% | 15% | 17% | 4% | 3% | 8.1% |
| Zone non saturée < 2m | 0% | 0% | 0% | 3% | 2% | 0% | 0% | 4% | 1% | 0% | 0% | 0.9% |
| Pollution | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0.0% |
| Station d'alerte HS | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 1% | 0.8% |
| Turbidité élevée | 5% | 5% | 5% | 5% | 2% | 2% | 5% | 5% | 5% | 5% | 5% | 4.5% |
| Moustiques | 0% | 0% | 0% | 3% | 0% | 8% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1.0% |
| En service | 90% | 83% | 80% | 68% | 27% | 61% | 65% | 67% | 73% | 38% | 87% | 67.1% |

*Statistiques de non-fonctionnement des bassins d'infiltration au cours des années 2016 et 2017*

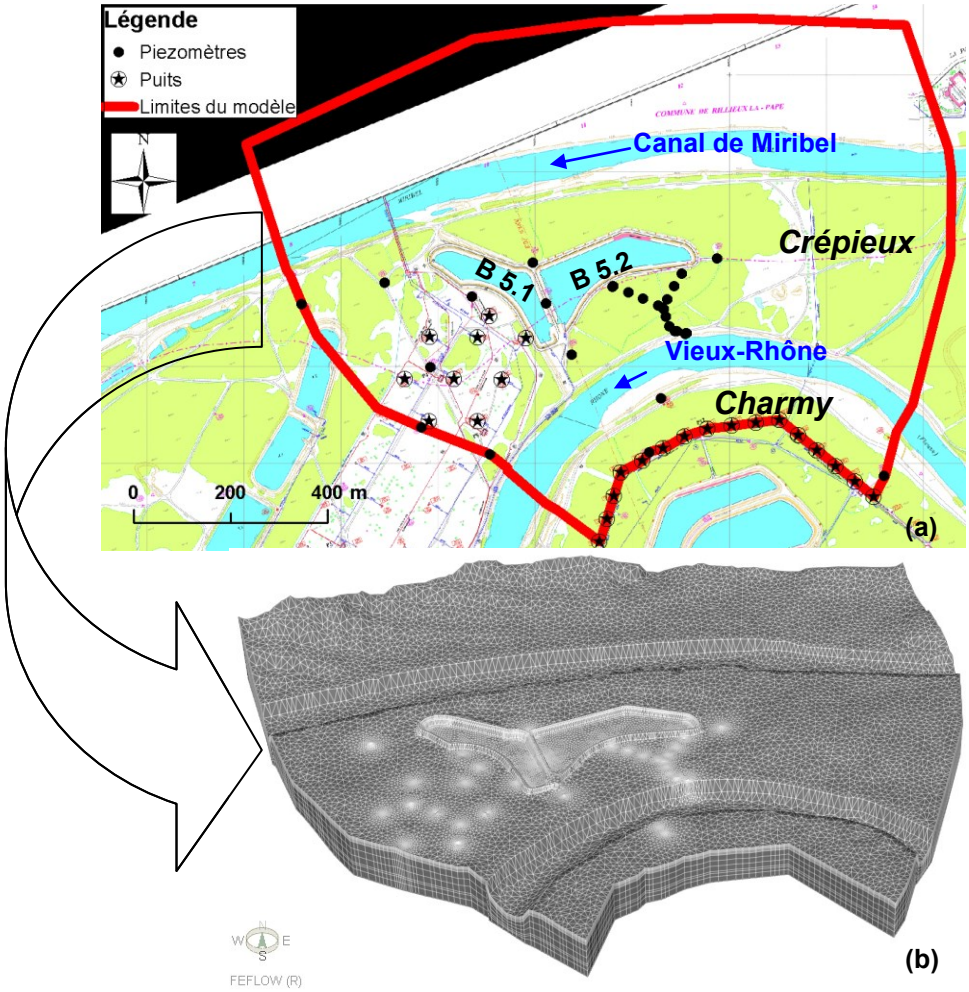
**Annexe 8** : Indices d'infiltrabilité mensuels de chaque bassin d'infiltration entre les mois d'avril 2014 et décembre 2017




Bassin 3-1
Bassin 3-2
Bassin 4-1
Bassin 4-2
Indice d'infiltrabilité mensuel (m.j-1)
Renouvellement sable
Hersage sable
2014
2015
2016
2017

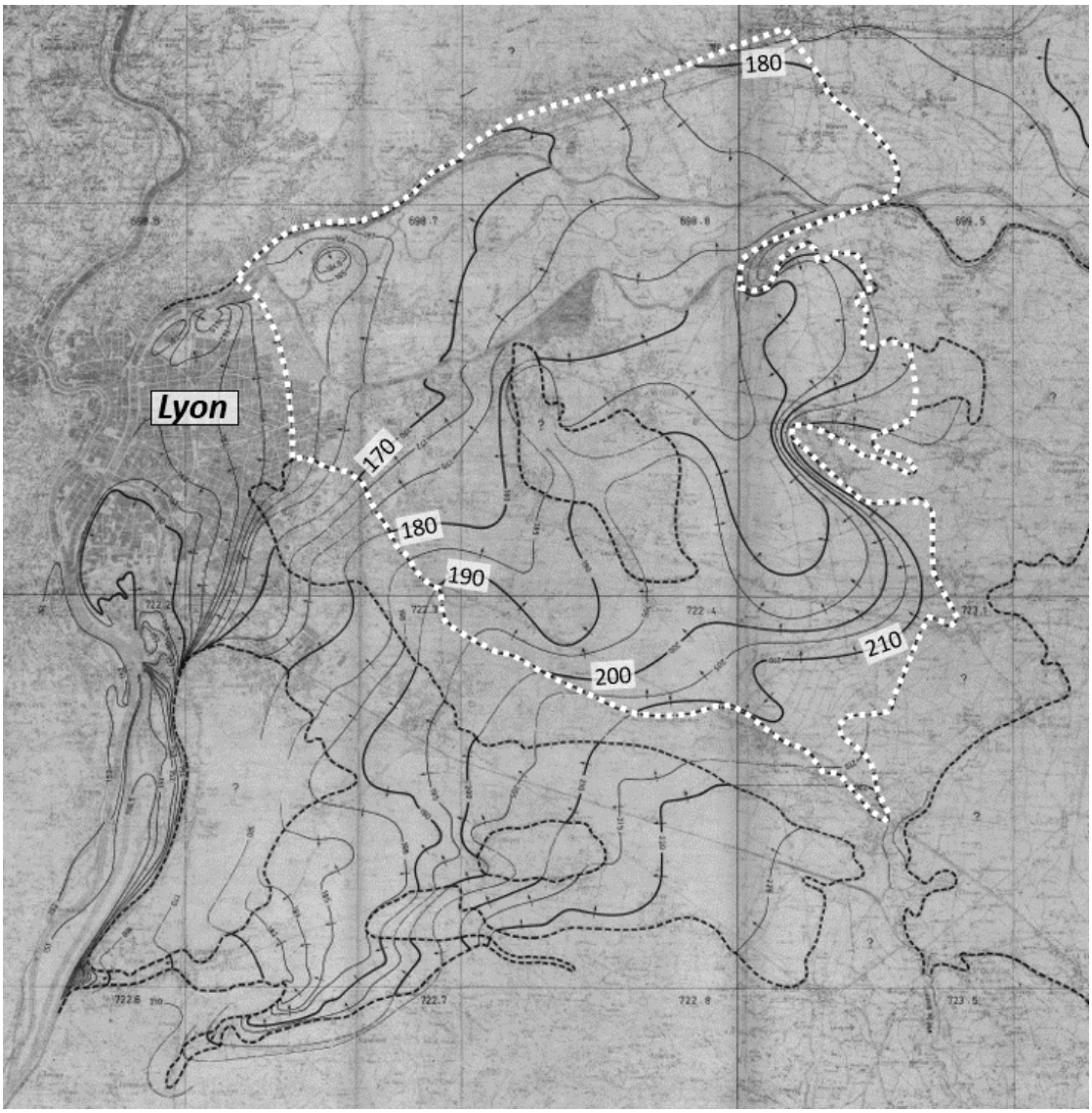

Bassin 5-1
Bassin 5-2
Bassin 6-1
Bassin 6-2
Indice d'infiltrabilité mensuel (m.j-1)
Renouvellement sable
2014
2015
2016
2017

**Annexe 9** : Domaine d'étude des travaux de S. Loizeau *[Loizeau, 2013]*




*Extension spatiale du modèle numérique proposé par S. Loizeau (a) et vue 3D du modèle numérique (b)*

**Annexe 10** : Carte piézométrique de l'Est Lyonnais issue de Collin et al., 1973

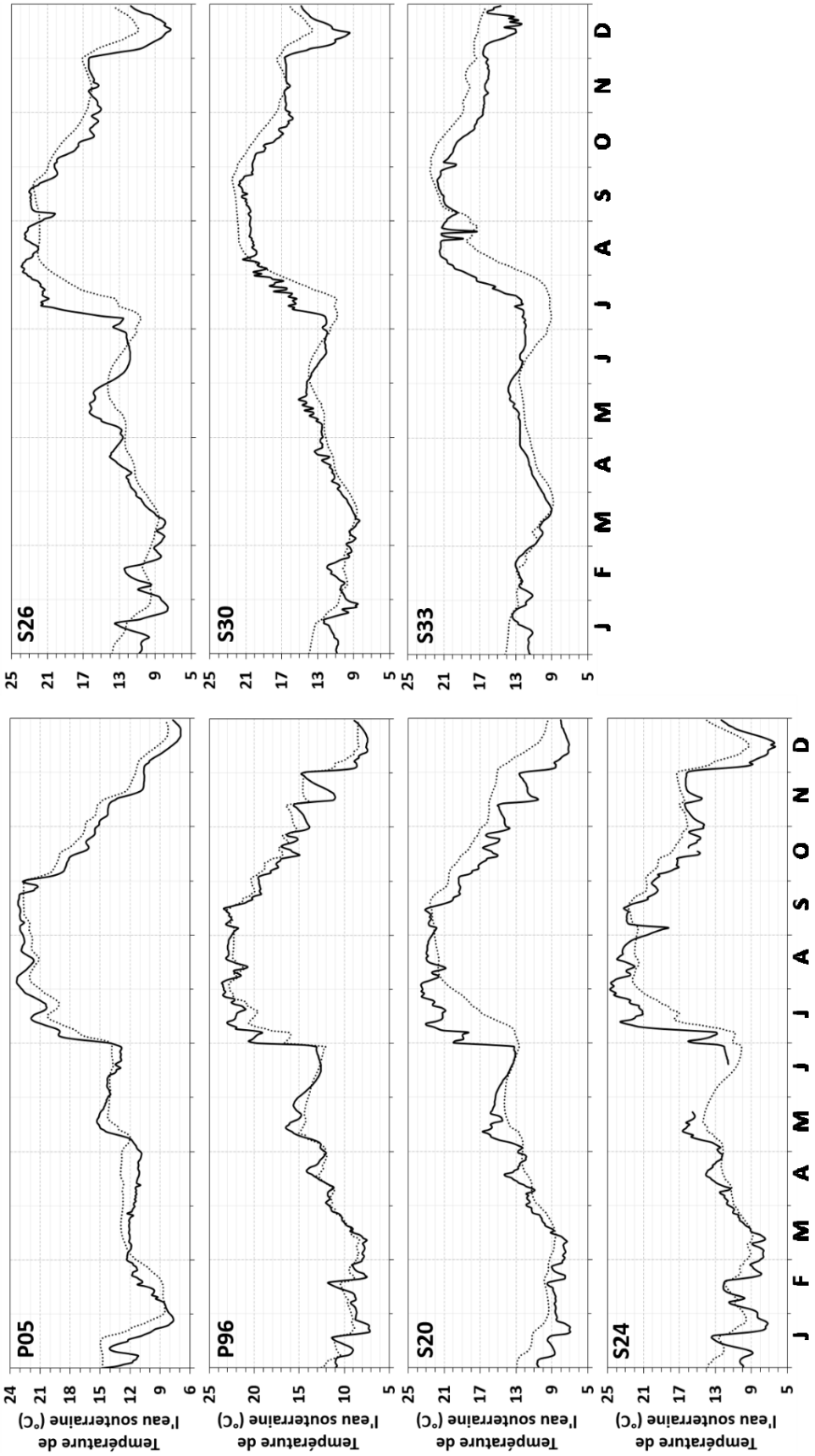


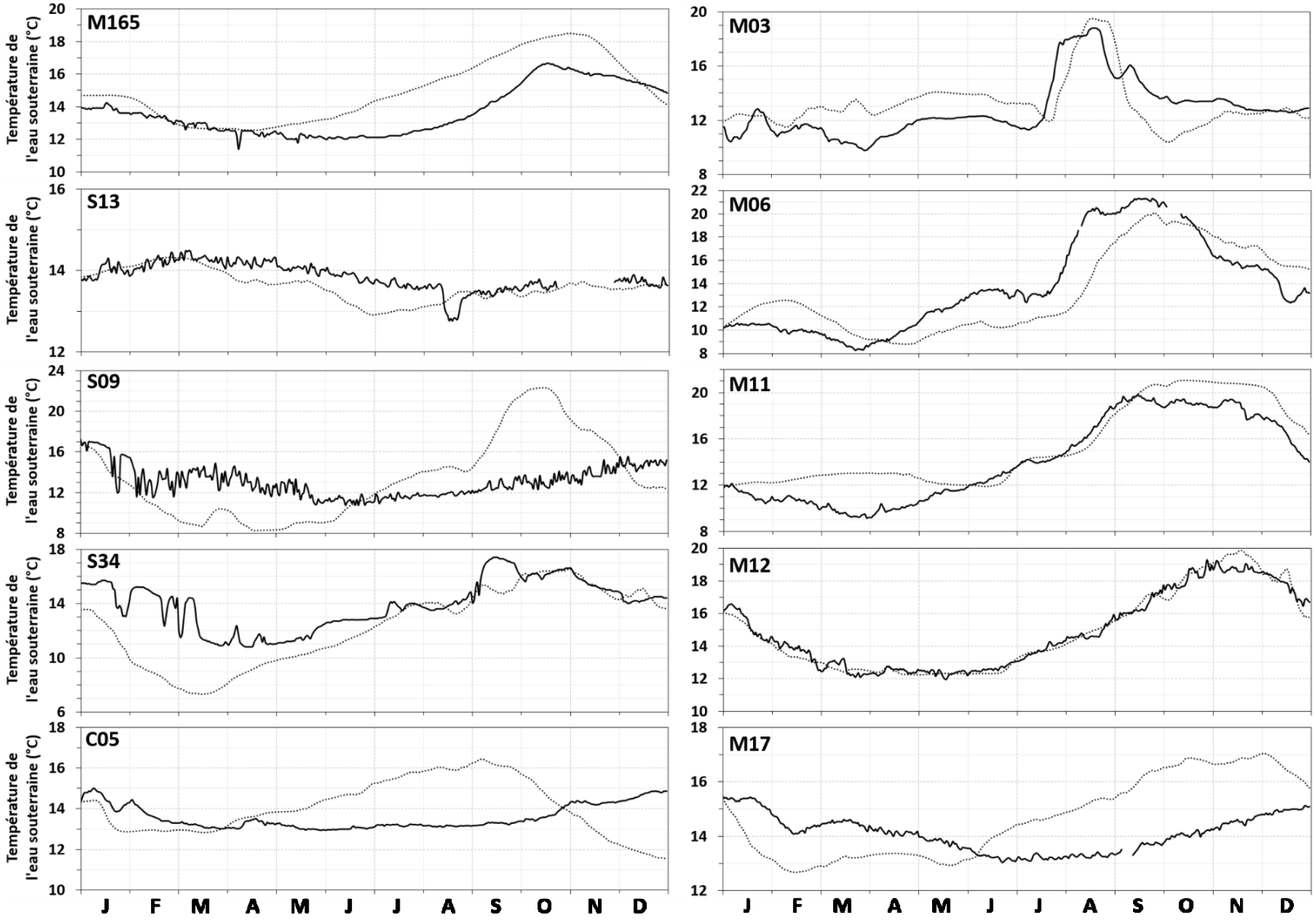

Carte piézométrique de l'Est Lyonnais issue de *Collin et al., 1973*.

*Le trait blanc en pointillés illustre l'extension du domaine d'étude du travail de thèse présenté dans ce manuscrit.*

**Annexe 11** : Comparaison des évolutions de températures de nappe observées et calculées de l'ensemble des piézomètres équipés de sondes au cours de l'année 2016

**N.B : T° observée en trait noir continu, T° calculée en trait pointillé noir**




M165
M03
S13
M06
S09
M11
S34
M12
C05
M17
Température de l'eau souterraine (°C)
J F M A M J J A S O N D

**Compréhension expérimentale et numérique des chemins de l'eau sur l'ensemble du champ captant de la Métropole de Lyon**

L'alimentation en eau potable de la Métropole de Lyon provient essentiellement du site du champ captant de Crépieux-Charmy. Ce captage est un système complexe de par sa superficie (375 ha), le nombre d'ouvrages de pompage (111 puits et forages), le système de réalimentation artificielle (12 bassins d'infiltration), la présence de différents bras du Rhône en interaction avec l'eau souterraine, mais également du fait de la complexité lithologique naturelle du sous-sol. La compréhension des interactions entre les compartiments de ce système est nécessaire pour assurer la pérennisation quantitative et qualitative de la ressource. La caractérisation des écoulements repose sur trois outils : l'observation, l'expérimentation et la modélisation numérique. L'observation, basée sur les nombreuses données acquises in-situ, met en évidence le rôle prépondérant de l'exploitation hydrique du site sur les écoulements (pompages et bassins). La réalimentation artificielle met en jeu, annuellement, un volume d'eau qui équivaut à la moitié du volume puisé sur l'ensemble du site, et entraîne un réchauffement non négligeable de la nappe en période estivale. Les cartes piézométriques et thermiques à l'échelle du champ captant permettent de visualiser les évolutions spatiales et temporelles des écoulements. D'après l'analyse de données, le dôme hydraulique créé par la réalimentation artificielle semble perdurer au maximum 1 à 2 jours après l'arrêt de l'alimentation des bassins. Un indice d'infiltrabilité est défini pour déterminer la capacité d'infiltration de chaque bassin : il reflète le colmatage progressif de la couche de sable de fond de bassin. Cet indice est de ce fait un outil d'aide à la décision pour la priorisation des bassins à réhabiliter. Le volet expérimental se décline en deux points : la caractérisation des fonds de bassins par essais d'infiltration et la caractérisation des sens d'écoulement par traçage thermique à l'échelle d'un bassin. Un dispositif expérimental, créé de part et d'autre d'un des bassins permet de suivre l'évolution piézométrique et thermique lors des cycles de remplissage. La création des 31 ouvrages de ce dispositif expérimental a permis de mieux caractériser la lithologie en présence, de valider la présence de la zone non saturée règlementaire au droit du bassin, de confirmer l'existence d'écoulements sous le Vieux-Rhône mais aussi de mettre en évidence le fonctionnement 3D des écoulements. Enfin, un modèle numérique a été créé pour simuler les transferts d'eau et de chaleur, sur l'ensemble du site de captage. Cet outil permet d'identifier et de quantifier les sources d'alimentation de la zone de captage, de mettre en évidence la protection partielle des ouvrages de pompage par les dômes hydrauliques créés par les bassins, et de montrer la complexité des relations nappe-rivière. D'ores et déjà opérationnel pour des temps longs (> 15 jours), l'outil numérique proposé est exploitable pour des scénarios d'évolutions climatiques ou d'évolutions de l'exploitation.
***Mots clés** : Hydrogéologie, réalimentation artificielle, traçages thermiques, modélisation hydro-thermique 3D.*

---

**Experimental and numerical understanding of water paths on the well field of Lyon agglomeration**

The supply of drinking water of Lyon Metropole mainly comes from the well field of Crépieux-Charmy. This well field is a complex system because of its surface area (375 ha), the number of pumping wells (111 wells), the artificial recharge system (12 infiltration ponds), the interaction between the Rhône River and groundwater, as well as its natural lithological complexity. Understanding the interactions between the compartments of this system is necessary to ensure quantitative and qualitative sustainability of the water resource. The characterization of field-scale flows is based on three tools: observation, experimentation and numerical modelling. The observations, based on a lot of operational field data, highlight the influence of site operation on the flows (pumping and basins). Annually, artificial recharge requires a volume of water which accounts for half of the volume pumped on the whole site. This also leads to a significant rise in water table temperatures during summer periods. Piezometric and water temperature maps at the well field scale allow for visualization of the spatial and temporal evolutions of the flow directions. According to the data analysis, hydraulic domes created by the artificial recharge seem to persist for a maximum of 1 to 2 days after water supply of the basins has been stopped. An infiltration index has been defined in order to determine the infiltration capacity of each basin. It illustrates the fouling of the basement sand layer. The infiltration index is also a decision support tool for the prioritization of basins to be rehabilitated. The experimental component is divided into two parts: basins characterization by infiltrometer tests and characterization of the flow direction by heat tracing at scale of an infiltration pond. An experimental system, created on both sides of one of the basins allows tracking of the evolution of piezometric and water temperature during filling cycles. The creation of the 31 piezometers of this experimental system enabled better characterization of the lithology of the ground, to validate the conservation of the unsaturated zone under the basin, to confirm the existence of flows under the Vieux-Rhône River, and to highlight the three-dimensional flows. A digital model has been created to reproduce water and heat transfer on the entire well field. This tool is used to identify and quantify the sources of water of the water catchment area, to highlight the partial protection of the pumping wells by the hydraulic domes, and to show the complexity of the groundwater-river relationship. Already operational on long periods (over 15 days), the proposed digital model is useful for scenarios of climate change or changes in operational conditions.
***Keywords**: Hydrogeology, artificial recharge, heat tracing, 3D hydro-thermal modelling.*