Document public

Appui à la GEStion quantitative des Eaux souterraines du grand Ried (GES'Eau'R)

Rapport final

BRGM/RP-69729-FR
Septembre 2020

Grand Est
ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE
L'Europe s'invente chez nous

Schéma d'Aménagement & de Gestion des Eaux
ill-nappe-rhin

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Appui à la GEStion quantitative des Eaux souterraines du grand Ried (GES'Eau'R)

Rapport final

BRGM/RP-69729-FR

Septembre 2020

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM AP19STB024

GIUGLARIS Elodie
Avec la collaboration de
PINSON Stéphanie, MANCEAU Jean-Charles, MALCUIT Eline

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Allier Delphine	Nom : Salquebre Damien
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur régional délégué
Date : 21/09/2020	Date : 25/09/2020
Signature :	Signature :

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

Grand Est ALSACE CHAMPAGNE-ARDENNE LORRAINE
L'Europe s'invente chez nous

Schéma d'Aménagement & de Gestion des Eaux ill-nappe-rhin

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots-clés : Hydrogéologie, Relations nappes-rivières, Pompage, Eau, Sécheresse

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

Giuglaris E. (2020) – Appui à la GEStion quantitative de l'eau souterraine du grand Ried (GES'Eau'R'). Rapport final. BRGM/RP-69729-FR, 287p., 99 fig., 22 tabl., 10 ann.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans la région du Grand Ried en Alsace, de nombreux assecs ont été observés ces dernières années sur les ruisseaux dits « phréatiques », ruisseaux directement alimentés par la nappe rhénane via des résurgences naturelles et de ce fait très sensibles aux variations des niveaux de la nappe.

Après une première étude centrée sur les impacts des prélèvements en eau souterraine sur le Grand Ried, la Commission Locale de l'Eau du SAGE Ill-Nappe-Rhin a souhaité poursuivre les travaux engagés en créant le projet GES'EAU'R : appui scientifique pour la GEStion quantitative des EAUx souterraines dans le grand Ried. Ce projet, cofinancé par la Région Grand Est et le brgm s'est déroulé ainsi :

- une phase d'acquisition de données sur les eaux souterraines et les cours d'eau, sur toute la période d'étiage 2019 (suivi piézométrique et hydrométrique, suivi des assecs, réalisation de pompages d'essais) ;
- une phase d'interprétation des données, à l'aide d'analyses croisées sur les niveaux de la nappe, les débits ou l'état des cours d'eau et les prélèvements ;
- la mise en place d'outils de gestion, sous la forme de cartes synthétiques, de sectorisations, d'indicateurs piézométriques et d'abaques.

Sur cette base, le projet GES'EAU'R a permis d'améliorer la connaissance des relations nappe-rivières et de préciser les impacts anthropiques sur les ressources en eau du secteur du Grand Ried. Il a aussi permis, en proposant des outils de gestion spatialisés, de fournir des éléments techniques nécessaires à une meilleure gestion quantitative des ressources en eau.

Les principaux enseignements issus du projet sont :

Concernant les eaux souterraines :

- la nappe d'Alsace sur le secteur du Grand Ried a globalement atteint au cours des dernières années les plus bas niveaux observés depuis la sécheresse historique de 1976 ;
- la baisse de la nappe est moindre sur les zones où les rivières apportent une contribution à la nappe. C'est notamment le cas pour les rivières bénéficiant d'un soutien d'étiage du Rhin via le canal de Colmar : l'Ill, la Blind et la rigole de Windensholen ;
- les zones les plus fortement impactées en terme de baisse du niveau de la nappe se situent :
    - au sud de la réserve naturelle de l'Illwald,
    - sur toute la partie ouest de l'Ill, en lien avec la zone de piémont,
    - sur une bande orientée Sud-Nord entre la réserve de l'Illwald et quelques kilomètres à l'est du canal du Rhône au Rhin.

Concernant les cours d'eau :

- un apport progressif de la nappe est visible dans les cours d'eau phréatiques, le projet a permis de mieux caractériser les échanges nappe-rivière à l'échelle globale du grand Ried ;
- le rôle de l'Ill est confirmé dans l'orientation des écoulements et le niveau de la nappe ;

- le lien entre la hauteur d'eau des cours d'eau phréatiques et la profondeur de la nappe est avéré. Ce point a permis de construire une carte de sensibilité des cours d'eau, basée sur les données du niveau de la nappe mesurée en juin 2019.

Concernant l'impact des prélèvements :

- il n'y a pas de modification visible des écoulements ou de la piézométrie imputable aux principaux prélèvements liés à l'alimentation en eau potable ou à l'industrie ;
- la baisse des niveaux durant la période estivale imputable aux prélèvements agricoles a été quantifiée lorsque cela était possible : cela représente entre 30 et 70 % de la baisse observée sur les piézomètres ;
- les effets des pompages ont été analysés au niveau local, en cumulé et au niveau global. Localement, l'effet d'un prélèvement individuel en nappe à proximité d'un cours d'eau entraîne un transfert de l'eau du cours d'eau dans la nappe et, au bout d'un certain temps dans le puits de pompage. Le cumul de différents pompages a un effet à la fois sur la zone d'incidence autour des cours d'eau et sur la durée d'impact. Et plus globalement, la baisse induite du niveau de la nappe peut entrainer l'augmentation des pertes des cours d'eau vers la nappe et l'asséchement des résurgences ;
- l'ensemble des éléments hydrodynamiques (résultats des pompages d'essais et comportement global de la piézométrie) indiquent que la baisse généralisée de la piézométrie est un facteur prépondérant dans la mise en assec des cours d'eau.

Le croisement des résultats et leur analyse ont conduit à différents rendus, qui correspondent à des propositions d'éléments de gestion :

- une carte de la nappe localisant les secteurs comportant des cours d'eau sensibles aux prélèvements sur les eaux souterraines ;
- une délimitation de secteurs, associée à un réseau de suivi et à des indicateurs basés sur les eaux souterraines, préfigurant ainsi des zones potentielles de gestion collective des prélèvements ;
- des abaques et un outil informatique (Connexmin) traduisant l'impact d'un pompage en eau souterraine en fonction de la distance vis-à-vis des cours d'eau.

Tous ces éléments ont été synthétisés sous forme d'un document simplifié (chapitre 2 du présent rapport) et d'un rapport scientifique détaillé disponibles ci-après (chapitre 3).

Des pistes de travaux complémentaires et les verrous scientifiques restant à lever sont indiqués dans le document, il s'agit notamment d'améliorer la connaissance des besoins en eau des cultures et des zones forestières et de disposer de données supplémentaires pour améliorer les bilans hydrologiques.

Les travaux menés sur la région du Grand Ried permettent d'obtenir une vision spatialisée de l'interconnexion (très forte) entre les eaux souterraines et les cours d'eau et montrent un effet cumulé des prélèvements entraînant une baisse non négligeable en période estivale des ressources en eau disponibles, amplifiée dans certains secteurs. Ces problématiques, ainsi que les effets du changement climatique (fréquence accrue des phénomènes de sécheresse) renforcent le besoin d'une gestion quantitative globale, avec l'élaboration de nouvelles règles qui pourront être préparées et discutées lors d'une phase ultérieure, sous la conduite de la CLE du SAGE Ill Nappe Rhin.

Sommaire

1. Introduction générale 14

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS 14

1.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE 15
1.2.1. La région du Grand Ried 15
1.2.2. Délimitation du périmètre d'étude 15

1.3. STRUCTURATION DU PROJET 17
1.3.1. Portage et partenaires 17
1.3.2. Organisation 17
1.3.3. Découpage technique 18

2. Synthèse et proposition d'éléments de gestion 19

2.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS 19
2.1.1. Analyse de l'étiage 2019 19
2.1.2. Comportement global de la nappe 22
2.1.3. Pompage d'essais 23
2.1.4. Mécanismes de l'impact des prélèvements en eau souterraine sur les cours d'eau phréatiques 24
2.1.5. Impact des prélèvements sur l'évolution des eaux souterraines 25
2.1.6. Approfondissement de la connaissance scientifique du Grand Ried 27

2.2. ELÉMENTS DE RENDU DE L'ÉTUDE ET PROPOSITION D'ÉLÉMENTS DE GESTION 28
2.2.1. Objectifs et complémentarités des différentes propositions 28
2.2.2. Carte de sensibilité et vulnérabilité des cours d'eau phréatiques : outils d'aide à l'estimation de l'impact des prélèvements sur les cours d'eau 30
2.2.3. Sectorisation de la zone d'étude 32
2.2.4. Réseau de suivi et indicateurs 38
2.2.5. Estimation de l'impact local d'un pompage 41

2.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 45

3. Rapport détaillé 47

3.1. CONTEXTE DÉTAILLÉ 47
3.1.1. Climatologie 47
3.1.2. Situation hydrogéologique 47
3.1.3. Les cours d'eau 49

3.2. ANALYSE DE L'ÉTIAGE 2019 51
3.2.1. Conditions climatiques de l'été 2019 51

3.2.2. Méthodologie et données disponibles durant l'étiage 2019 53
3.2.3. Caractérisation de la situation en juin 2019 56
3.2.4. Évolution piézométrique et hydrométrique 70
3.2.5. Comparaison des évolutions piézométrie / cours d'eau 82
3.2.6. Estimation de la baisse piézométrique induite par les prélèvements dans l'aquifère rhénan 84
3.2.7. Interprétation des variations journalières de la piézométrie et des cours d'eau phréatiques 91

3.3. POSITIONNEMENT DE L'ÉTIAGE 2019 DANS LES ÉVOLUTIONS PIÉZOMÉTRIQUE ET HYDROMÉTRIQUE 2012 -2020 95
3.3.1. Observation des cours d'eau : réseau ONDE 95
3.3.2. l'Ill97
3.3.3. Cours d'eau phréatiques (réseau DREAL) 99
3.3.4. Eaux souterraines 99

3.4. PRÉLÈVEMENTS ET SOUTIEN D'ÉTIAGE EN LIEN AVEC LES EAUX SOUTERRAINES 109
3.4.1. Méthodologie et données disponibles 109
3.4.2. Apport extérieurs en rivières : localisation des STEP et soutien d'étiage 109
3.4.3. Prélèvements liés à l'alimentation en eau potable collective 110
3.4.4. Prélèvements liés à l'industrie 113
3.4.5. Prélèvements liés à l'irrigation 114
3.4.6. Croisement des observations sur la piézométrie et les points de prélèvements et rejets principaux 118
3.4.7. Ordres de grandeurs des débits prélevés 119
3.4.8. Pistes de réflexion sur la prise en compte de l'évapo-transpiration réelle (ETR) 121

3.5. POMPAGES D'ESSAIS : CARACTÉRISATION À UNE ÉCHELLE LOCALE DES RELATIONS NAPPES / RIVIÈRES 124
3.5.1. Objectifs et présentation des pompages d'essais 124
3.5.2. Localisation des pompages d'essais 125
3.5.3. Conditions météorologiques et niveau piézométrique statique 126
3.5.4. Description et données du pompage d'essais sur le site « Sources du Riedbrunnen » 127
3.5.5. Description et données du pompage d'essais sur le site de Muttersholtz 134
3.5.6. Interprétations 140
3.5.7. Synthèse 143

3.6. CALCUL DE L'IMPACT D'UN POMPAGE SUR UN COURS D'EAU À UNE ÉCHELLE LOCALE 144
3.6.1. Données disponibles sur les cours d'eau phréatiques 144
3.6.2. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère rhénan 145
3.6.3. Modèles analytiques 145
3.6.4. Sensibilité aux paramètres dans le cadre du modèle de Hunt (modèle comportant les échanges nappes/rivières) 147

3.6.5. Outils proposés pour l'analyse de l'impact des pompages isolés sur les cours d'eau 149
3.6.6. Intégration des zones d'influence de l'Ill et du Rhin en lien avec l'impact d'un pompage isolé 151

3.7. CARTOGRAPHIE DE LA SENSIBILITÉ DES COURS D'EAU PHRÉATIQUES À LA BAISSE DE LA PIÉZOMÉTRIE EN SITUATION D'ÉTIAGE 153
3.7.1. Notion et choix méthodologique : vulnérabilité, sensibilité et impact sur les cours d'eau phréatiques 153
3.7.2. Analyse du lien entre la profondeur de la nappe et les cours d'eau 155
3.7.3. Carte de sensibilité des cours d'eau phréatiques à la baisse de la piézométrie . 158

3.8. SECTORISATION, RÉSEAU DE SUIVI ET INDICATEURS 160
3.8.1. Sectorisation hydrogéologique et hydrologique 160
3.8.2. Caractérisation de chaque secteur : comparaison aux usages 162
3.8.3. Réseau de suivi et indicateurs 167
3.8.4. Éléments de gestion complémentaires 173

3.9. BIBLIOGRAPHIE 175

Liste des figures

Figure 1 : Localisation géographique du projet GES'EAU'R 16
Figure 2 : Structure du projet 18
Figure 3 : Baisse du niveau de la nappe à la fin du mois de juillet 2019 par rapport au mois de juin 21
Figure 4 : Baisse du niveau de la nappe pluriannuelle mesurée au niveau de Sélestat, en relation avec le Giessen 22
Figure 5 : Schéma du fonctionnement entre la nappe et la rivière lors de la mise en place d'un pompage 24
Figure 6 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : exemple sur le piézomètre 03081X0025/23 (Rossfeld) 25
Figure 7 : Localisation des piézomètres où le calcul des courbes de décharges a été réalisé 26
Figure 8 : Carte de sensibilité et vulnérabilité des cours d'eau à la baisse du niveau de la nappe 31
Figure 9 : Visualisation globale des secteurs proposés 32
Figure 10 : Sectorisation et grand types de cultures présents sur le secteur (basé sur le RPG 2015) 33
Figure 11 : Proposition de réseau de suivi 40
Figure 12 : Cours d'eau incisant intégralement le niveau superficiel de la nappe d'Alsace 42
Figure 13 : Le cours d'eau incise partiellement la nappe avec présentation d'une configuration particulière de la nappe 42
Figure 14 : Aperçu du logiciel Connexmin 44
Figure 15 : Températures et précipitations en normales mensuelles sur les stations de Colmar et Strasbourg 47
Figure 16 : Inversion entre les hautes eaux et basses eaux entre l'est de la zone d'étude (influence du Rhin) représenté en noir et l'ouest (influence de l'Ill) représenté en bleu 49
Figure 17 : Précipitations quotidiennes enregistrées sur les stations météorologiques de Colmar Meyenheim et Strasbourg Entzheim (Météo France) 52
Figure 18 : Températures enregistrées sur les stations météorologiques de Colmar Meyenheim et Strasbourg Entzheim (Météo France) 52
Figure 19 : Période d'acquisition des données complémentaires 54
Figure 20 : Cartographie des points de mesures du réseau de suivi disponible durant l'étiage 2019. Une cartographie détailée présentant les noms des piézomètres est disponible en annexe 55
Figure 21 : Carte piézométrique obtenue par interpolation des données mesurées lors de la campagne du 11 au 15 juin 2019 (carte détaillée en annexe) 58
Figure 22 : Localisation des points de mesures (observations et / ou jaugeages) sur les cours d'eau durant la campagne de reconnnaissance du 12 au 14 juin 2019 59
Figure 23 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : conductivités mesurées sur les cours d'eau 61
Figure 24 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : températures mesurées sur les cours d'eau 62
Figure 25 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : débits mesurés sur les cours d'eau 64
Figure 26 : Photographies des différents cours d'eau en juin 2019 : diversité des résurgences et de la nature du fond des cours d'eau 66

Figure 27 : Localisation de l'orgine des Modèles Numériques de Terrains (MNT) utilisées pour la carte de profondeur 67
Figure 28 : Profondeur de la nappe d'Alsace à la mi-juin 2019 69
Figure 29 : Évolution annuelle de la piézométrie en 2019 (piézomètre BSH situé à Rossfeld, données journalières validées) 70
Figure 30 : Regroupement des chroniques piézométriques de l'étiage 2019 par comportements et secteurs 75
Figure 31 : Baisse du niveau piézométrique par rapport au 1er juin à la fin du mois de juillet 2019 (23 juillet 76
Figure 32 : Baisse de la piézométrie par rapport au1er juin sur l'ensemble des points de suivi piézométriques enregistrée le 13 août (après un orage) et le 10 septembre 2019 77
Figure 33 : Chroniques des hauteurs d'eaux mesurées par les stations de la DREAL sur l'Ill (différences avec le niveau du 1 juin 2019) 79
Figure 34 : Chroniques des débits mesurés par les stations de la DREAL sur l'Ill 79
Figure 35 : Évolution des hauteurs d'eaux mesurées sur la Zembs durant l'étiage 2019 80
Figure 36 : Évolution des hauteurs d'eaux dans les cours d'eau phréatiques au sud de l'Illwald durant l'étiage 2019 80
Figure 37 : Carte de localisation des points de suivi ONDE et des suivis complémentaires 84
Figure 38 : Localisation des points de mesures permettant le calcul d'une courbe de décharge 86
Figure 39 : Exemple de calage de la courbe de décharge (Piézomètre 03078X0333/pz8) 87
Figure 40 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : exemple de lecture du graphique sur le piézomètre 03081X0025/23 (Rossfeld) 89
Figure 41 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : résultats sur les piézomètres les moins influencés 90
Figure 42 : Variations journalières régulières observées sur les piézomètres et les cours d'eau phréatiques 92
Figure 43 : Schéma du prélèvement en eau d'une forêt alluviale (extrait de Sanchez 2008) 94
Figure 44 : Indice ONDE par départements alsacien entre 2012 et 2019 95
Figure 45 : Stations ONDE du périmètre d'étude sur la période 2012 - 2019 96
Figure 46 : Photo du Neugraben en assec (05/09/2019) 97
Figure 47 : Débits journaliers centrés sur les étiages de l'Ill sur la période 2012-2019 98
Figure 48 : Débits journaliers centrés sur les étiages du Giessen et de la Fecht sur la période 2012-2019 98
Figure 49 : Cyclicité perçue sur la piézométrie par analyse statistique automatique (périodogrammes) au niveau du Grand Ried (adapté de Allier, 2019) 100
Figure 50 : Tendances piézométriques à la baisse perçues par le test de test statistique de Mann Kendall sur 03077X0238/209F et 03081X0026/224 101
Figure 51 : Piézométries à la baisse sur la bordure vosgienne, au niveau du débouché de la vallée de la Fecht et de la Weiss, (baisses non significatives par test statistique sur les niveaux moyens annuels) 102
Figure 52 : Chroniques piézométriques 1999 - 2019, secteurs centre et nord de la zone d'étude, à l'est de l'Ill : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs (données APRONA) 104

Figure 53 : Chroniques piézométriques 1999-2019, secteur sud de la zone d'étude, à l'ouest de l'Ill (données APRONA) : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs 105
Figure 54 : Chroniques piézométriques 1999 - 2019, secteurs sud et centre de la zone d'étude, à l'est de l'Ill : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs (données APRONA) 106
Figure 55 : Choniques piézométriques historiques retraçant l'évolution de la nappe d'Alsace sur le Grand Ried (données APRONA) 108
Figure 56 : Localisation des STEP et des différentes prises d'eaux entrainant un soutien d'étiage sur la zone d'étude 110
Figure 57 : Variation du débit horaire calculé sur la base de la consommation journalière sur le forage d'Obere Erlen. 111
Figure 58 : Localisation et volumes annuels prélevés par les ouvrages AEP collectifs sur la zone d'étude (cartographie à partir des données de l'AERM) 112
Figure 59 : Localisation et volumes prélevés par l'industrie sur la zone d'étude (données redevances AERM) 114
Figure 60 : Pondération de la RU des sols pour estimer le besoin en eau des cultures avec et sans pondération du critère d'hydromorphie 115
Figure 61 : Types de culture présents sur le Grand Ried sur fond open street map (données RPG 2015 et 2016) 117
Figure 62 : Croissance végétale et évolution de la profondeur de captage du besoin en eau en fonction du front d'enracinement (document normatif sur l'irrigation, BS EN 15099-1:2007) 122
Figure 63 : Visualisation de la localisation de la zone non staurée, du niveau piézométrique et du système racinaire 123
Figure 64 : Localisation des sites des pompages d'essais 126
Figure 65 : Niveau piézométrique statique durant les pompages d'essais (données du réseau piézométrique APRONA)° 127
Figure 66 : Environnement du site du pompage d'essai « sources du Riedbrunnen » (fond orthophotographique IGN) 128
Figure 68 : Localisation des ouvrages utilisés durant le pompage d'essais (fond ortho-photographique IGN) 129
Figure 69 : Synthèse des distances entre points de mesures, point de pompages et les cours d'eau principaux 129
Figure 70 : Visualisation du site de pompage : puits agricole, conduite de rejet avec débitmètre magnétique, et déversement en champignon dans la rivière pour limiter l'impact hydrodynamique sur la rivière 130
Figure 71 : Chronologie des débits utilisés lors de l'essai 131
Figure 72 : Niveau piézométrique statique enregistré à proximité de l'essai de pompage 132
Figure 73 : Exemple des effets de cyclicité sur les rabattements de pz2 et pz4 132
Figure 74 : Évolution de la température sur le piézomètre 3 durant le déroulé des essais 134
Figure 75 : Environnement du site du pompage d'essai «Muttersholtz » (fond orthophotographique IGN) 135
Figure 76 : Localisation des ouvrages utilisés durant le pompage d'essais (fond ortho-photographique IGN) 136
Figure 77 : Déroulé de l'essai de pompage sur le site de Muttersholtz 137

Figure 78 : Niveaux piézométriques enregistrés durant les différents essais sur pz1 durant les essais sur le site de Muttersholtz 138
Figure 79 : Ordres de grandeurs des rabattement obtenus sur les différents piézomètres durants les différentes phases de pompages (site de Muttersholtz) 138
Figure 80 : Schémas simplifiés des trois approches utilisées lors de l'interprétation 140
Figure 81 : Cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003). 146
Figure 82 : Comparaison de deux jeux de paramètres hydrodynamiques représentatifs de l'aquifère : cas 1 : paramètres issues des essais de pompages, cas 2 : paramètres moyens issus des forages profonds appliqués à un milieu libre 148
Figure 83 : Impact du niveau de colmatage d'un cours d'eau sur le débit prélevé sur le cours d'eau et la rapidité de la stabilisation 149
Figure 84 : Simulation OUAIP de l'impact d'une limite à potentiel imposé représentant l'Ill à différentes distances 152
Figure 86 : Comparaison du linéaire des cours d'eau et des gammes de profondeur de la nappe (11-14 juin 2019) 156
Figure 87 : Comparaison des débits des cours d'eau et des gammes de profondeur de la nappe (données mesurées lors de la campagne du 11 au 14 juin 2019) 157
Figure 88 : Cartographie des secteurs regroupant des cours d'eau phréatiques sensibles et vulnérables à la baisse de la piézométrie 159
Figure 89 : Secteurs regoupant des comportements hydrologiques et hydrogéologiques homogènes avec prise en compte de limites pratiques et physiques (routes et autoroutes, rivières) 161
Figure 90 : Périmètres des secteurs proposés et carte de la RU pondérée 162
Figure 91 : Sectorisation et grands types de cultures présents sur le secteur (basé sur le RPG 2015) 163
Figure 92 : Sectorisation et prélèvements industriels 165
Figure 93 : Sectorisation et prélèvements liés à l'AEP collectif 166
Figure 94 : Correspondance entre le piézomètre BSS003MKHM et le piézomètre 03424X0026/247 170
Figure 95 : Cartographie détaillée du réseau de suivi 179
Figure 96 : Profondeur de la nappe basée sur la piézométrie à la mi-juin 2019 180
Figure 97 : Cartographie des secteurs où les cours d'eau sont sensibles et vulnérables aux prélèvements en eau souterraine 181
Figure 98 : Cartographie de la RU regroupée par classes et pondérée par l'hydromorphie des sols/ les chiffres indiquent le pourcentage de représentativité de l'unité des sols. 183
Figure 99 : Choniques piézométriques historiques retraçant l'évolution de la nappe d'Alsace sur le Grand Ried 212

Liste des tableaux

Tableau 1 : Ordres de grandeurs des baisses piézométriques liées aux prélèvements 25
Tableau 2 : Synthèse des objectifs et portées des rendus finaux.....29
Tableau 3 : Réseau de suivi proposé et valeurs seuils associés (niveau piézométrique en m NGF) 38
Tableau 4 : Paramètres de la nappe utilisables pour le calcul de l'impact 43
Tableau 5 : Résultats selon la classification ONDE du suivi des cours d'eau dans le département du Haut Rhin 81
Tableau 6 : Résultats selon la classification ONDE du suivi des cours d'eau dans le département du Bas Rhin.....82
Tableau 7 : Données de débits ponctuelles sur les cours d'eau aux sud de l'Illwald (données OFB).....82
Tableau 8 : Ordres de grandeurs des baisses piézométriques liées aux prélèvements 88
Tableau 9 : Observations des niveaux piézométriques les plus bas (en mNGF) sur les piézomètres du réseau APRONA en lien avec les phréatiques (les piézomètres avec une tendance suspectée ou avérée ne sont pas inclus en dehors du piézomètre BSH de Rossfeld).....103
Tableau 10 : Débits de pompages potentiels sur chaque ouvrage AEP géré par le SDEA en 2019 (soit le débit pompé durant les heures de fonctionnement).....111
Tableau 11 : Comparaisons des débits horaires moyens des ouvrages AEP à un nombre de forages d'irrigation (de débit moyen) 120
Tableau 12 : Ordres de grandeurs des rabattement obtenus sur les différents piézomètres durants les différentes phases de pompages 132
Tableau 13 : Paramètres physicochimiques au niveau du bac déversoir, avant rejet en rivière 133
Tableau 14 : Données de température obtenues sur les différentes sondes de mesures 133
Tableau 15 : Synthèse des distances entre les points de mesures, le pompages et les cours d'eau principaux.....136
Tableau 16 : Paramètres physicochimiques au niveau du bac déversoir, avant rejet en rivière 138
Tableau 17 : Données de température obtenues sur les différentes sondes de mesures (site de Muttersholtz) 139
Tableau 18 : Paramètres hydrodynamiques résultants de l'essai 2 sur le site des sources du Riedbrunnen.....141
Tableau 18 : Paramètres hydrodynamiques résultants de l'essai 2 sur le site de Muttersholtz 142
Tableau 19 : Paramètres pris en compte dans le modèle.....147
Tableau 20 : Classe de vulnérabilité en l'absence de caractérisation écologique.....154
Tableau 21 : Piézomètres proposés pour constituer le réseau de suivi 171
Tableau 22 : Indicateurs associés aux piézomètres 172

Liste des annexes

Annexe 1 Cartographies détaillées 177
Annexe 2 Abaques estimant le débit prélevé indirectement sur les cours d'eaux par la méthode de Hunt....185
Annexe 3 Données des campagnes de juin 2019 : piézométrie et reconnaissance des cours d'eau....191
Annexe 4 analyse statistique pour la constitution de la carte piézométrique....197
Annexe 5 Chroniques piézométriques sur 50 ans 209
Annexe 6 Carte de la réserve utile et besoin en eau des cultures....213
Annexe 7 Essais de pompage : données brutes et interprétations....221
Annexe 8 Essais de pompage : fichiers OUAIP 237
Annexe 9 Essais de pompage : analyse géochimique....247
Annexe 10 Analyses statistiques des chroniques sur les piézomètres du réseau de suivi // résultats bruts (logiciel ESTHER) 253

1. Introduction générale

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Dans l'axe du fossé rhénan, s'écoule une nappe majeure - la nappe d'Alsace - offrant la plus grande ressource en eau souterraine européenne. Son abondance et sa relative facilité d'accès, à quelques mètres de profondeur seulement, ont entrainé son utilisation massive pour différents usages.

Dans le Grand Ried, région naturelle marquée par une multitude de cours d'eau et de zones humides, une intensification des assecs des ruisseaux « phréatiques » (dénomination locale) a été constatée ces dernières années. Ces ruisseaux « phréatiques » sont directement alimentés par la nappe via des résurgences naturelles de celle-ci.

Or dans un contexte de changement climatique, une accentuation et une récurrence de périodes de sécheresses sévères est envisagée. Ce phénomène implique une sensibilité accrue des milieux via la baisse des débits des cours d'eau en période d'étiage impactant la biodiversité des milieux aquatiques. De plus, la région du Grand Ried étant fortement agricole, une sécheresse météorologique est concomitante à une demande supplémentaire potentielle en eau souterraine liée à l'irrigation.

Suite à des assecs particulièrement longs en 2015, une première étude (RAPPORT BRGM/RP-67863-FR, Giuglaris *et al*., 2018) a été réalisée en 2016 et 2017 sur l'impact potentiel des prélèvements en eau souterraine sur les ruisseaux phréatiques dans la zone du Grand Ried.

Elle a permis d'amener les principaux résultats suivants :

- l'abaissement du niveau piézométrique est corrélable aux phénomènes des assecs observés sur le réseau ONDE entre 2012 et 2017 ;
- des impacts sur la piézométrie liée à l'irrigation sont présents sur la zone du Grand Ried ;
- il est possible de réaliser des premières estimations de débits prélevés, par tronçon sur les rivières, via des modélisations par solution analytique de pompages d'irrigation et d'AEP.

En complément, cette étude a proposé des premiers éléments de gestion de la ressource aux différentes administrations et institutions – DREAL, DDT, Agence de l'eau Rhin-Meuse, Région Grand Est, DRAAF, ainsi qu'à la CLE du SAGE Ill Nappe Rhin.

En dernier point, l'étude a montré un manque de connaissance sur :

- les ruisseaux phréatiques et la caractérisation à une échelle fine des relations locales avec les eaux souterraines ;
- les paramètres hydrodynamiques de la nappe, tels que les coefficients d'emmagasinement et la transmissivité, notamment dans la partie superficielle de l'aquifère rhénan, partie en relation avec les ruisseaux et concernée en particulier par les prélèvements agricoles ;
- les prélèvements agricoles à une échelle locale.

En 2018, le piézomètre de Rossfeld a fini la période correspondant à la saison d'irrigation avec des niveaux mesurés historiquement bas (20 à 25 ans de période de retour), imputables en majeure partie à l'irrigation.

La Commission Locale de l'Eau du SAGE a par conséquent souhaité prolonger l'analyse portée dans la première étude sur les cours d'eau phréatiques et le lien avec l'eau souterraine et la gestion de cette dernière. Plus précisément ce nouveau projet, nommé « GES'Eau'R », s'est construit autour des objectifs suivants :

- prolonger et affiner la connaissance sur les relations nappe-rivières dans le Grand Ried ;
- préciser la part de l'impact sur les cours d'eau des différents prélèvements en eau souterraine (tous les usages confondus) ;
- réaliser deux essais de pompage servant de démonstrateurs sur des secteurs représentatifs de la zone d'étude ;
- mettre en place un réseau piézométrique resserré, complémentaire au réseau existant, et ayant pour finalité particulière de suivre le niveau d'impact des prélèvements en eau souterraine dans un futur cadre de gestion collective (en réflexion).

Suite à la réalisation de ce projet, une phase d'appropriation des résultats et de concertation entre les acteurs est prévue dans le cadre du SAGE ILL-NAPPE-RHIN. **Cette phase ultérieure permettra de définir, en concertation, les objectifs à atteindre et les outils à mobiliser dans le futur. L'enjeu est de tendre vers une gestion locale et durable des prélèvements dans le secteur.**

1.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE

1.2.1. La région du Grand Ried

Le Grand Ried correspond à une région naturelle d'une grande richesse écologique de la plaine d'Alsace au Sud de Strasbourg.

Encadrée par l'Ill et le Rhin, cette entité naturelle est la plus vaste zone humide de vallée fluviale d'Europe occidentale (250 km² environ). Elle comprend notamment la présence de nombreuses zones humides, classées pour partie en Natura 2000, RAMSAR et réserve régionale. Sur la zone d'étude, l'altitude des terrains étudiés diminue progressivement du Sud vers le Nord passant d'environ 190 m à 150 m d'altitude. La topographie au sein de la zone d'étude est marquée de l'ouest à l'est par une légère dépression encadrant la rivière de l'Ill, un plateau au niveau du canal du Rhône au Rhin puis la bordure du Rhin.

1.2.2. Délimitation du périmètre d'étude

La zone d'étude correspond au Grand Ried. Elle est comprise entre Erstein au nord et Colmar au sud.

Concernant les campagnes d'acquisitions de données, les limites est/ouest ont été définies à partir de :

- à l'est, la zone d'influence du Rhin (Schomburgk, 2005) délimitant un fonctionnement particulier lié au Rhin ;

- à l'ouest, le « périmètre eau superficielle » du SAGE Ill Nappe Rhin, avec inclusion de tous les cours d'eau phréatiques. Cette délimitation rejoint globalement la délimitation ouest des alluvions de l'Ill.

Au niveau des différentes phases d'analyse de l'étude, les limites n'ont pas été utilisées dans un cadre strict. Notamment, tout élément qui pouvait alimenter la réflexion sur les cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin du Grand Ried a été intégré. Cela concerne notamment :

- l'ensemble des prélèvements majeurs à proximité des cours d'eau prioritaires ;
- tous les éléments hydrogéologiques et hydrologiques pouvant être en lien avec le fonctionnement du Grand Ried.

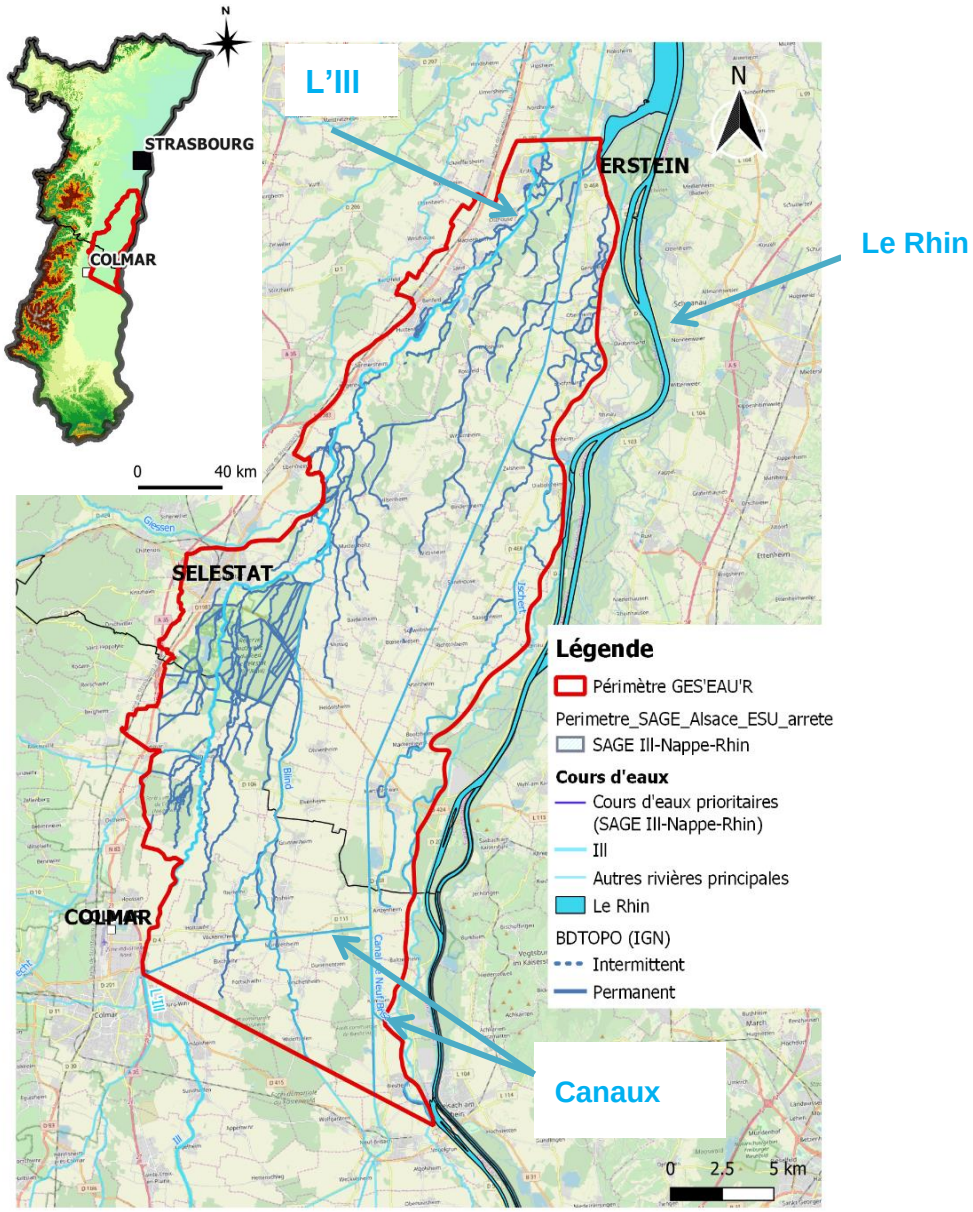


Figure 1 : Localisation géographique du projet GES'EAU'R.

1.3. STRUCTURATION DU PROJET

1.3.1. Portage et partenaires

L'étude est pilotée par la Commission Locale de l'Eau du SAGE ILL-NAPPE-RHIN. La CLE est une instance de dialogue et de débats, rassemblant les acteurs locaux de l'eau et de l'aménagement du territoire (élus, usagers, associations, représentants de l'État…). La CLE ne pouvant pas être maître d'ouvrage de l'étude, dans la mesure où elle n'est pas dotée de personnalité juridique propre, l'étude est portée par la Région Grand Est qui intervient en tant que structure porteuse du SAGE. Le financement est réalisé par la région Grand Est et le BRGM.

Le comité de pilotage (COPIL) de l'étude est constitué de membres de la CLE volontaires et a été élargi à des usagers non membres de la CLE afin d'assurer une bonne représentativité des acteurs du secteur. Le COPIL comprend donc des représentants des élus de la CLE, des usagers (producteur d'eau potable, chambre d'agriculture, chambre d'industrie…) et gestionnaires d'espaces, des services de l'État, de la Région, de l'AERM, du BRGM et de l'APRONA.

Pour rappel, le SAGE ILL-NAPPE-RHIN est un document de planification pour la préservation des ressources en eau de la plaine d'Alsace, complémentaire des différentes démarches volontaires ou règlementaires existantes dans ce domaine. **Le SAGE a notamment pour objectif de préserver les cours d'eau les plus sensibles (cours d'eau prioritaires) de tout prélèvement d'eau** ainsi que de tout rejet d'eaux usées, épurées ou non. L'enjeu est la préservation du fonctionnement écologique optimal du réseau hydrographique.

1.3.2. Organisation

De manière à concilier expertise scientifique et appropriation par le SAGE des résultats du projet, des réunions techniques et de restitution ont été réalisées à chaque étape du projet. Ces étapes intermédiaires ont permis de préciser certaines informations et d'échanger sur les données existantes.

De nombreux acteurs en dehors du cadre initial du projet ont contribué à l'avancée générale et scientifique du projet par leur connaissance locale, des éléments techniques et/ou scientifiques, des données complémentaires ou encore la mise à disposition de matériel (OFB 67 et 68, CCI, CA, DREAL, VNF, SDEA, LIVE, Domaine de l'Ill, réserve naturelle de l'Illwald) Toutes les contributions ne sont pas décrites précisément dans le présent rapport, mais elles ont été intégrées dans l'ensemble des réflexions du projet.

L'étude scientifique sera poursuivie par une phase ultérieure de concertation entre les acteurs dans le cadre du SAGE ILL-NAPPE-RHIN.

1.3.3. Découpage technique

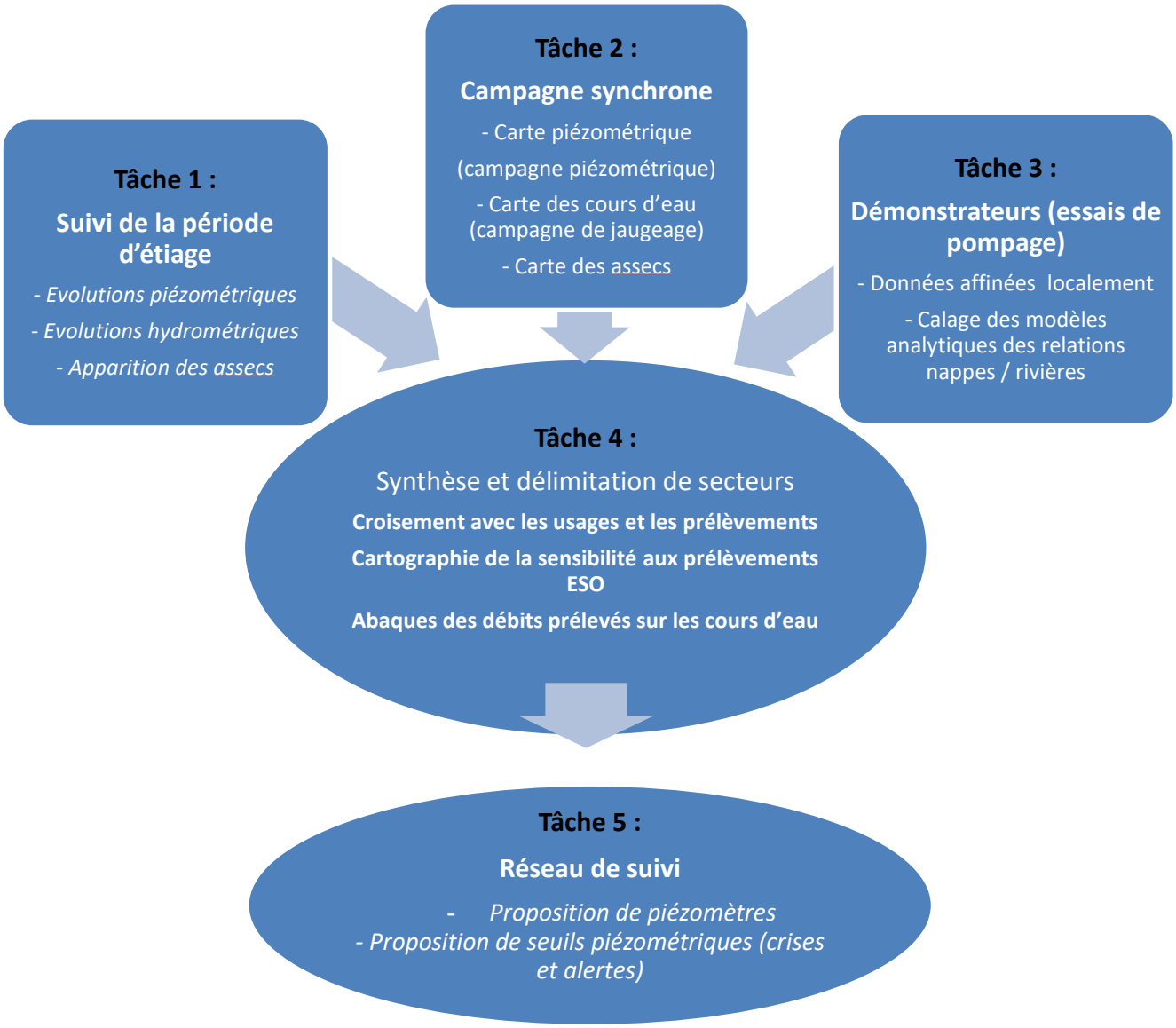


Figure 2 : Structure du projet.

De manière à répondre aux objectifs, un programme d'acquisition de données (tâches 1, 2 et 3) est venu compléter les données disponibles au sein d'ADES, ONDE et les données hydrométriques de la DREAL. Il a été structuré selon l'agencement suivant :

1. un suivi renforcé de la période d'étiage en 2019 basé sur la piézométrie, l'hydrométrie et l'observation des assecs ;
2. une vision spatiale complète en début de période d'étiage à un instant « t » synchrone de la piézométrie et de la situation des cours d'eau ;
3. la réalisation de démonstrateurs sous la forme d'essais de pompage reproduisant l'impact sur le milieu d'un prélèvement en eau souterraine. Ces essais ont été réalisés sur deux sites distincts choisis en concertation avec les partenaires en fonction des enjeux identifiés et de la pertinence de leur apport de connaissance pour l'ensemble de la zone d'étude.

2. Synthèse et proposition d'éléments de gestion

2.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Préambule

Cette partie 2. synthétique a été réalisée pour permettre l'appropriation des résultats du projet par les acteurs et partenaires du projet et ainsi apporter une aide la décision à la Commission Locale de l'EAU (CLE) du SAGE Ill Nappe Rhin. Elle est structurée selon deux axes :

- *mettre à la disposition des acteurs de l'eau (gestionnaires, usagers, services de l'État) les résultats scientifiques et leurs implications potentielles, notamment en terme de mesures de gestion ;*
- *permettre les conditions favorables à une prise en main des outils de gestion proposés, tout en rappelant la portée et la limite de chacun de ces outils.*

Dans un souci de lisibilité et de facilité de lecture, des choix ont été réalisés lors de la rédaction pour simplifier certains termes utilisés et certaines notions techniques. Cela peut entrainer des légères imprécisions du point de vue scientifique mais sans remettre en cause les résultats du projet et leurs implications. Toute personne souhaitant des précisions techniques pourra se référer à la partie correspondante dans le rapport scientifique complet.

2.1.1. Analyse de l'étiage 2019

L'étiage 2019 a été analysé au travers de deux axes :

- la situation du niveau de la nappe et des cours d'eau en juin, avant le démarrage de la principale phase d'irrigation et des périodes les plus chaudes de l'été ;
- les évolutions du niveau de la nappe et des cours d'eau entre juin et octobre.

La situation en juin a permis de discerner :

- l'absence de modification des écoulements ou de piézométrie imputable aux principaux prélèvements liés à l'Alimentation en Eau Potable (AEP) ou à l'industrie ;
- des précisions sur les relations nappe-rivières : apport progressif de la nappe dans les cours d'eau phréatiques, distinction des cours d'eau alimentés et non alimentés et confirmation du rôle de l'Ill dans l'orientation des écoulements et le niveau de la nappe ;
- la confirmation du lien entre la hauteur d'eau des cours d'eau phréatiques et la profondeur de la nappe. Ce point permet d'alimenter l'analyse des mécanismes majeurs du fonctionnement des cours d'eau phréatiques. Il a permis dans un 2ème temps la construction d'une carte de sensibilité des cours d'eau basée sur les données du niveau de la nappe mesurée en juin 2019.

L'analyse des évolutions piézométriques et hydrométriques durant l'étiage 2019, lequel s'est révélé être exceptionnellement bas, a permis de préciser et distinguer plusieurs comportements en période d'étiage. Ainsi, de manière globale :

- les cours d'eau phréatiques de la moitié nord du Grand Ried ont été moins impactés en 2019 qu'en 2015, année présentant le plus d'assecs depuis la mise en place des observations des cours d'eau. Ces observations sont corrélées avec une baisse de la nappe moindre qu'en 2015 mais restant historiquement remarquable ;

- la moitié sud et la bordure ouest du Grand Ried ont enregistré des assecs conséquents sur les cours d'eau. Ces observations sont reliées aux plus bas niveaux de la nappe sur 20 à 50 ans.

Les éléments principaux complétant cette analyse sont :

- la baisse de la nappe est moindre sur les zones où les rivières apportent une contribution à la nappe. C'est notamment le cas pour les rivières bénéficiant d'un soutien d'étiage du Rhin via le canal de Colmar : l'Ill, la Blind et la rigole de Windensholen ;
- l'Ill constitue le principal soutien de la nappe (soutien du niveau piézométrique) ;
- les zones les plus fortement impactées en terme de baisse du niveau de la nappe se situent :
    - au sud de la réserve naturelle de l'Illwald ;
    - sur toute la partie ouest de l'Ill, en lien avec la zone de piémont ;
    - sur une bande orientée Sud-Nord entre la réserve de l'Illwald et quelques kilomètres à l'est du canal du Rhône au Rhin.

Le suivi rapproché durant l'étiage et réalisé dans le cadre du projet a été utilisé pour caractériser les indicateurs piézométriques, et les relations nappe / cours d'eau. L'acquisition de ces données en 2019 a notamment été renforcée sur le secteur sud qui ne disposait pas par ailleurs de points de références proches de cours d'eau phréatiques sur le réseau ONDE.

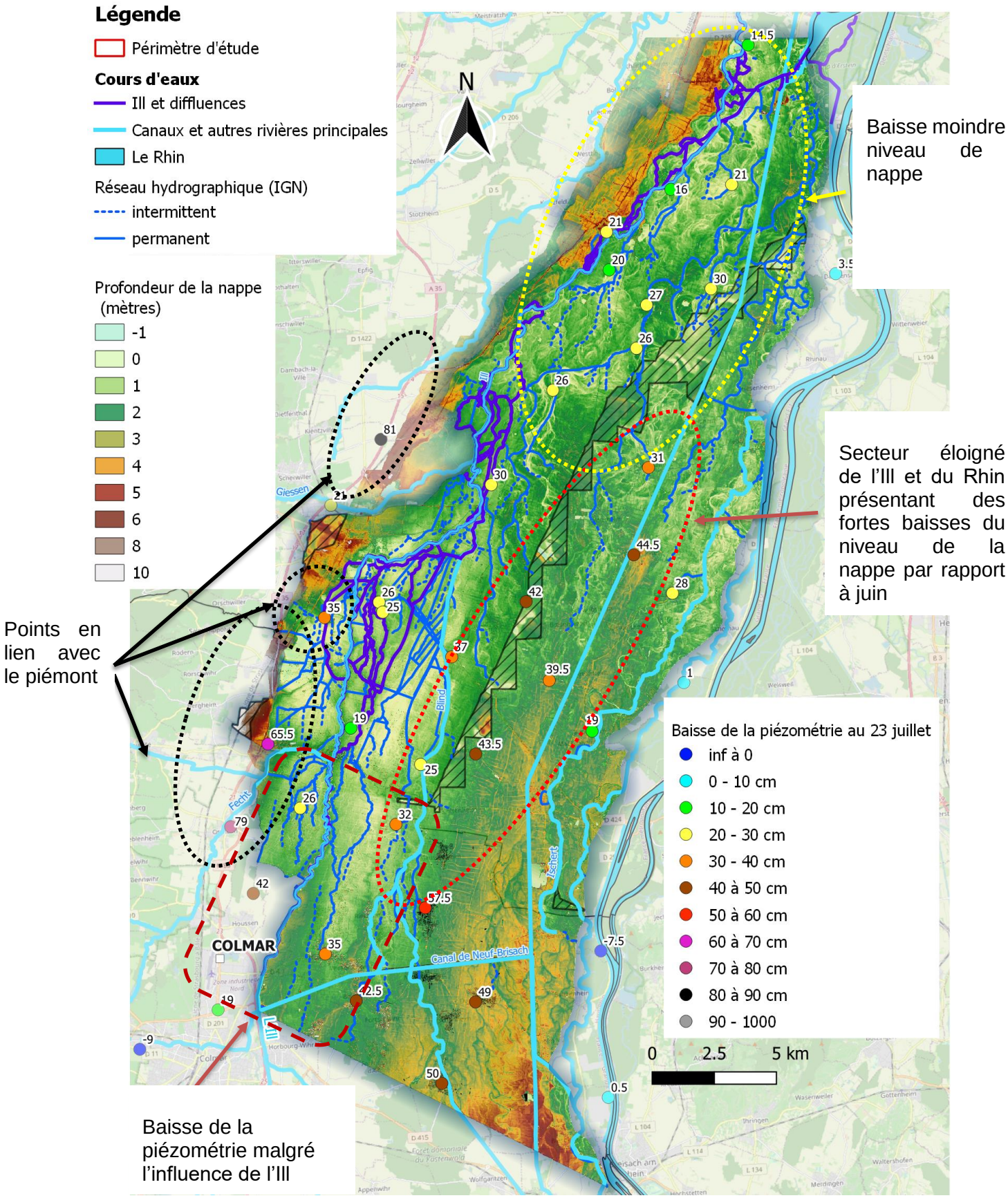


Figure 3 : Baisse du niveau de la nappe à la fin du mois de juillet 2019 par rapport au mois de juin.

2.1.2. Comportement global de la nappe

La nappe d'Alsace sur le secteur du Grand Ried a globalement atteint au cours des dernières années les plus bas niveaux observés depuis la sécheresse historique de 1976. Certains points ont atteint en 2019 des extrêmes jamais atteints depuis la mise en place du suivi piézométrique entre les années 1950 et 1960. De plus, la différence se situe dans la répétition de ces crises et dans le passage d'une situation inédite, comme celle de 1976, à une situation quasi récurrente depuis 2015.

Sur une évolution pluriannuelle, la zone d'étude a globalement deux types de comportement :

- à l'est de l'Ill, aucune baisse pluriannuelle du niveau de la nappe n'est perçue, en dehors des extrêmes en étiages. La balance annuelle peut être considérée comme n'étant pas déficitaire ;
- à l'ouest de l'Ill, en contact avec les piémonts, le niveau de la nappe présente une baisse constante d'année en année. Le cas le plus marquant est la zone du cône du Giessen, au niveau de Sélestat, atteignant 50 cm de différence en moyenne entre la période actuelle et les années 80. Cette baisse n'est pas (ou peu) visible sur le Grand Ried en raison de la protection relative apportée par l'Ill.

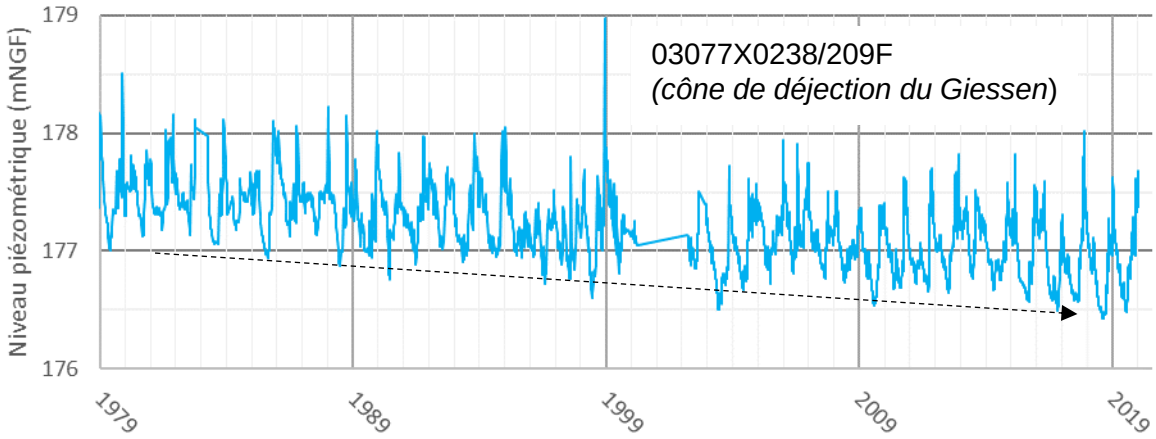


Figure 4 : Baisse du niveau de la nappe pluriannuelle mesurée au niveau de Sélestat, en relation avec le Giessen.

Au niveau de l'Ill, cette dernière absorbe le déficit, du point de vue global et pluri-annuel, en alimentant la nappe sur tout son trajet le long du Grand Ried. Toutefois, cette « barrière » relative est artificielle, car sans soutien d'étiage (barrage, retenues…), l'Ill aurait été très certainement à sec sur la partie sud du Grand Ried les dernières années et n'aurait ainsi pas pu jouer son rôle dans le maintien du niveau de la nappe. De plus, de nombreux indices semblent indiquer une augmentation des soutiens d'étiages sur les 20 à 30 dernières années. Cet effet peut masquer le déficit entre les prélèvements et la recharge naturelle de la nappe d'Alsace. Cette observation pose un questionnement fort sur la réelle capacité de la nappe d'Alsace à résister au changement climatique. De plus, la gestion de l'Ill apparait primordiale à une échelle globale.

D'autres points d'attention pourraient entrer en jeu sur la gestion de l'Ill et de ses diffluences. De manière non exhaustive, il est à noter :

- le soutien d'étiage apporté à Colmar par le canal qui semble insuffisant pour compenser l'impact des prélèvements sur les cours d'eau phréatiques au niveau de la partie sud du Grand Ried ;

- l'impact potentiel, en termes de qualité et de géochimie, de l'eau du Rhin infiltrée sur une grande portion du Grand Ried, qu'il s'agirait de caractériser ;
- les débits réels des différentes diffluences, qui peuvent contribuer à soutenir la nappe et alimenter de manière indirecte les pompages ;
- le débit réel utilisé pour soutenir la Zembs.

Au nord de la zone d'étude, la gestion de l'Ill depuis 2017 semble nettement limiter la baisse du niveau de la nappe. Toutefois, le Rhin est aussi plus proche et la zone moins soumise aux prélèvements pour l'irrigation.

2.1.3. Pompage d'essais

Les ouvrages de très faible profondeur (entre 3 et 10 mètres) captent un niveau superficiel de la nappe se différenciant de la partie plus profonde. Or, ce niveau à faible profondeur correspond actuellement au niveau capté en grande majorité par les ouvrages agricoles et/ou de petits débits (ouvrages « domestiques », petits ouvrages industriels / agricoles, AEP individuels… se situant en dessous des volumes de déclarations à l'AERM). Les captages AEP collectifs et publics atteignent généralement une plus grande profondeur.

Les deux essais de pompage réalisés fin septembre et début octobre 2019 ont permis de disposer des paramètres caractérisant le comportement sous pompage de cette partie superficielle de la nappe. Ces paramètres indiquent une grande étendue des zones d'influence de chaque pompage (> 2 km sur un milieu qui serait sans limites d'« alimentation », c'est-à-dire sans cours d'eau) ainsi qu'une propagation extrêmement rapide de l'impact par abaissement de la nappe et/ou prélèvement du débit sur les cours d'eau.

Ces résultats impliquent les points majeurs suivants :

- la transmission de l'impact du pompage est quasi immédiate aux cours d'eau environnants, en particuliers sur les cours d'eau phréatiques qui sont directement connectés à la nappe ;
- la longueur du tronçon du cours d'eau affecté par le pompage peut être grande si le pompage est relativement éloigné. Le débit prélevé par un pompage isolé sera par conséquent réparti sur tout le tronçon et peut être relativement faible comparé au débit de la rivière ;
- les zones d'influence des pompages situés à une distance comprise entre 500 m et 1 km de la rivière peuvent atteindre l'Ill très rapidement. Le débit sera alors prélevé sur l'Ill majoritairement. Toutefois, l'effet d'un pompage isolé sur le niveau de la nappe, dans la gamme des débits actuels utilisés pour l'irrigation, est faible au regard de l'impact d'un ouvrage de retenue ou de drainage sur l'Ill ;
- en raison de la largeur des zones d'influences, les impacts des pompages vont se superposer sur le niveau de la nappe et sur le débit total prélevé sur un même tronçon de cours d'eau. Cette superposition peut mener à des valeurs significatives en terme d'impact sur les cours d'eau et sur le niveau de la nappe ;
- la superposition des impacts des différents pompages se fait aussi dans la durée. En effet, malgré une nappe très réactive, le niveau de la nappe va mettre un certain temps à retrouver le niveau initial après arrêt du pompage (quelques heures à quelques jours). Les zones d'influences de chaque forage étant étendues et se superposant, un cumul va donc se faire dans la durée entre les différents pompages, même s'ils sont de relativement courtes durées ;
- les ordres de grandeur suivants peuvent être extrapolés et utilisés pour un pompage de faible profondeur situé à environ 200 mètres d'un cours d'eau :

- la zone d'influence du pompage va atteindre le cours d'eau en moins de 5 minutes. Plus proche, il est possible de considérer un impact quasi immédiat,
- l'impact va être croissant en fonction du temps de pompage,
- au bout de 8 à 12h, il est possible de considérer que la majeure partie du débit de pompage est retirée au(x) cours d'eau environnant(s).

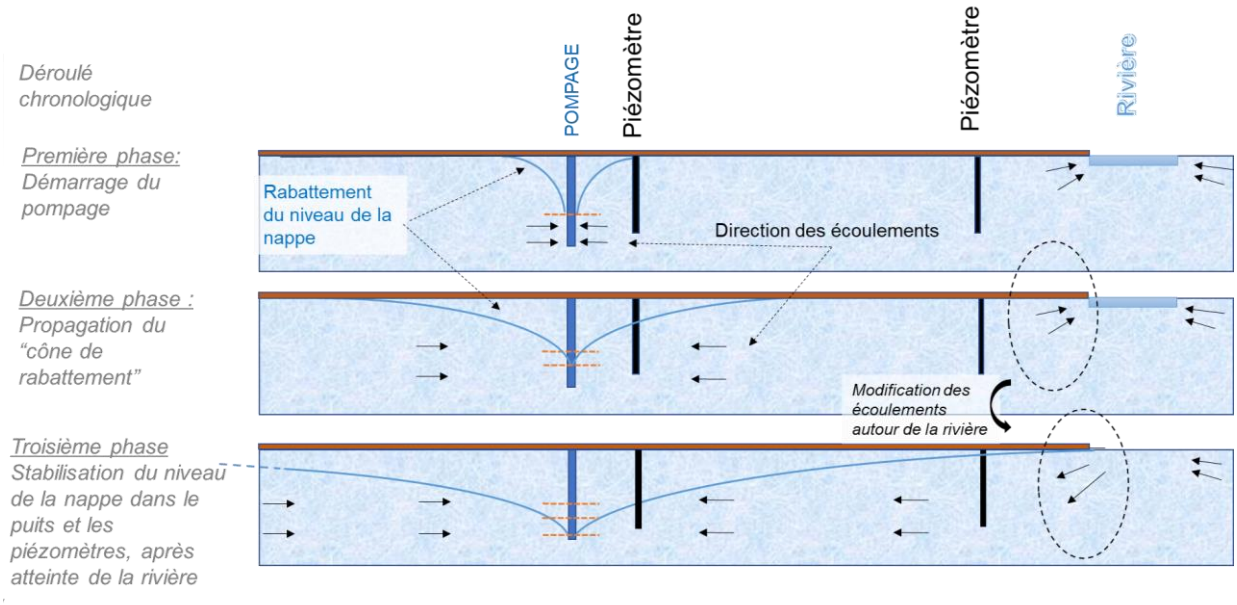


Figure 5 : Schéma du fonctionnement entre la nappe et la rivière lors de la mise en place d'un pompage.

2.1.4. Mécanismes de l'impact des prélèvements en eau souterraine sur les cours d'eau phréatiques

Sur la base des éléments présentés précédemment, l'impact des prélèvements en eau souterraine sur les cours d'eau peut être séparé en deux mécanismes sur le Grand Ried :

- localement, le pompage à proximité d'un cours d'eau, entrainant un transfert de l'eau du cours d'eau dans la nappe et, au bout d'un certain moment dans le puits de pompage ;
- globalement, la baisse généralisée du niveau de la nappe qui va entrainer :
  - l'augmentation des pertes de tous les cours d'eau vers la nappe,
  - l'asséchement des résurgences, c'est-à-dire un possible arrêt de l'apport de la nappe aux cours d'eau phréatiques.

Ces deux types d'impact se situent à des échelles très différentes et leurs effets se superposent. Les cas types suivants pourraient se différencier :

- le niveau de la nappe est haut : les impacts locaux des différents pompages seront mineurs en raison de la possibilité pour les cours d'eau de se réalimenter via la nappe ;
- le niveau de la nappe est « intermédiaire » : les impacts locaux des différents pompages doivent être analysés localement. Ils peuvent être conséquents pour les cours d'eau de faibles débits ;
- le niveau de la nappe est très bas : les impacts locaux vont être secondaires face à une situation globale déjà critique du niveau de la nappe.

De plus, l'ensemble des éléments hydrodynamiques (résultats des essais de pompage et comportement global de la piézométrie) indiquent un cumul de l'impact des prélèvements à l'échelle du Grand Ried. Ainsi, **la baisse généralisée de la piézométrie est un facteur prépondérant dans la mise en assec des cours d'eau.**

2.1.5. Impact des prélèvements sur l'évolution des eaux souterraines

Grace à la comparaison entre les évolutions observées du niveau de la nappe et les courbes théoriques de décharges naturelles, les périodes fortement influencées par les prélèvements peuvent être différenciées. La baisse des niveaux durant la période estivale imputable aux prélèvements a ainsi été estimée entre 30 et 70 % selon les piézomètres. Cette évaluation a été réalisée sur un nombre ciblé de piézomètres, représentatifs de la zone d'étude.

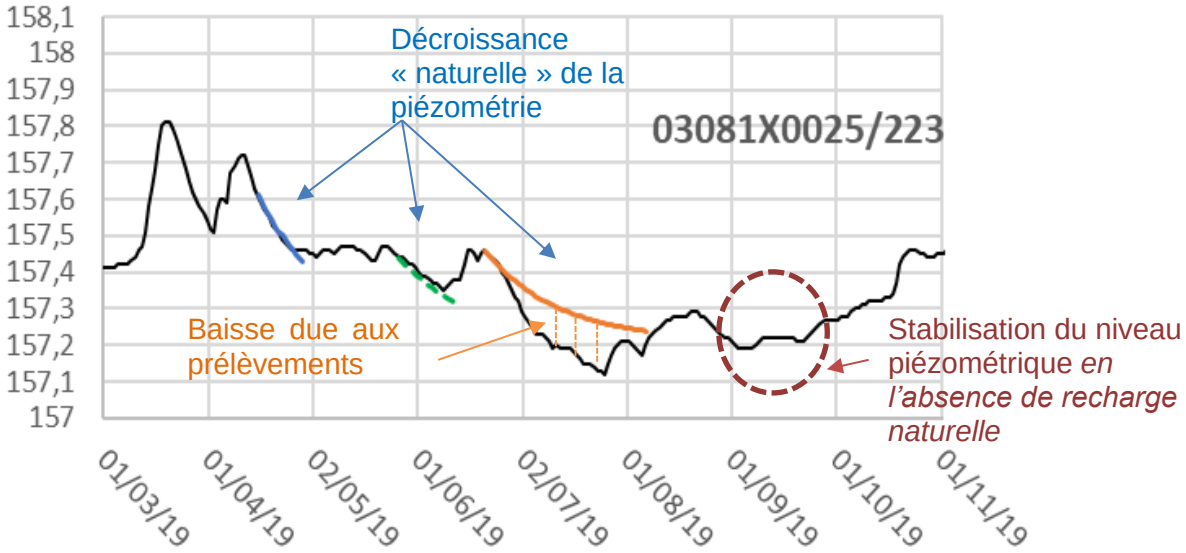


Figure 6 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : exemple sur le piézomètre 03081X0025/23 (Rossfeld).

Piézomètres	Localisation	**Baisse réelle (cm)**	**Baisse théorique naturelle (cm)**	**Ratio lié aux prélèvements**
03077X0238/209F	*Proximité du Giessen, ouest de l'Ill (hors zone étude)*	22	12	45 %
03078X0333/PZ8	*Proximité de l'Ill, rive est*	32	9	72 %
03081X0025/223	*Nord de la zone d'étude, à l'est de l'Ill (piézomètre BSH)*	30	18	40 %
03081X0038/269	*Proximité de l'Ill, rive est*	22	10,6	52 %
03085X0208/PZ7	*Proximité de l'Ill, rive est*	27	19	30 %
03422X0029/95	*Ouest de l'Ill (hors zone d'étude)*	86	24	72 %
03423X0017/209C	*Proximité de l'Ill, rive ouest*	44	27	39 %
03423X0064/94A	*Sud de la zone d'étude, à l'est de l'Ill*	32	8	75 %
03426X0254/137	*Ville de Colmar (hors zone d'étude)*	21	14	33 %

Tableau 1 : Ordres de grandeurs des baisses piézométriques liées aux prélèvements.

Figure 7 : Localisation des piézomètres où le calcul des courbes de décharges a été réalisé.

L'évolution de la piézométrie en lien avec les prélèvements a été analysée à différentes échelles temporelles :

- en juin 2019, avant la principale période d'irrigation, la carte piézométrique ne met pas en évidence une modification des écoulements à proximité des ouvrages AEP collectifs et des points industriels. Toutefois, la résolution de l'information cartographique ne permet pas de visualiser les effets locaux ;
- évolution de la piézométrie en 2019 avec analyse des périodes influencées et non influencées : pas d'influence visible des prélèvements en dehors de la période estivale ;
- évolution au long terme (tendance pluri-annuelle) de 1980 à aujourd'hui avec des comportements différents suivant les zones :
    - une stationnarité de la piézométrie moyenne sur la totalité du Grand Ried à l'est de l'Ill, voir une légère augmentation sur la bande rhénane,
    - une tendance à la baisse sur le cône de déjection du Giessen, en bordure ouest du Grand Ried. Cette baisse indique un déséquilibre constant entre recharge et prélèvements sur l'ensemble du bassin versant. L'analyse de l'ensemble du bassin versant du Giessen Liepvrette en terme d'usages et de fonctionnement hydrogéologique serait nécessaire et sort du cadre de cette étude,
    - un questionnement sur une légère baisse de la piézométrie moyenne au débouché de la Fecht mais qui n'est plus présente dès l'arrivée dans le secteur des cours d'eau « phréatiques »,
    - l'absence de tendance à la baisse au droit de la ville de Colmar.

D'un point de vue géographique, les plus fortes baisses enregistrées sont sur des zones agricoles et sans captages AEP, ni industriels. La localisation des parcelles irriguées et les débits réellement prélevés sont mal connus et difficiles à évaluer. En effet, certaines zones bénéficient d'un contexte favorable, avec notamment des sols et une proximité de la nappe permettant de ne pas ou très peu irriguer. C'est notamment le cas sur une partie des limons

de l'Ill. *A contrario*, il est très probable que les secteurs où la nappe est plus profonde nécessitent un besoin en irrigation conséquent, à typologie de sols et cultures équivalents.

Le travail réalisé par la chambre d'agriculture d'Alsace et Grand Est pour répondre à cette problématique sur la demande réelle en irrigation a par ailleurs montré la nécessite d'avancer sur la connaissance dans ce domaine, qu'elle soit théorique (compréhension des phénomènes réels en jeu) mais aussi expérimentale. Une première cartographie permet un premier aperçu sur les secteurs les plus sensibles à ce besoin d'irrigation. Mais la **connaissance des débits réellement prélevés et des localisations précises des points de prélèvements semble indispensable**, notamment pour la réalisation de modèles prévisionnels.

De manière générale, pour toute future analyse des différents prélèvements sur le secteur du Grand Ried et à l'est de l'Ill, un pas de temps adapté aux périodes critiques de l'année semble à privilégier.

À l'ouest de l'Ill, l'analyse des prélèvements serait nécessaire à deux échelles : en période critique, sur des pas de temps courts (débits instantanées, volumes journaliers) et sur des bilans plus globaux à l'échelle des bassin versants vosgiens, pour la prise en compte des tendances observées sur ces secteurs.

2.1.6. Approfondissement de la connaissance scientifique du Grand Ried

En termes de connaissances scientifiques, les résultats des pompages d'essais de longue durée ont permis de contribuer à développer une nouvelle vision de la partie superficielle de la nappe. La présence d'un niveau superficiel plus perméable était souvent évoqué, sans pour autant disposer de mesures concrètes. Grace aux résultats obtenus, cette hypothèse est confirmée.

Deux éléments forts scientifiquement sur la connaissance de la nappe d'Alsace ont complété cette avancée scientifique :

- la réalisation d'une carte des profondeurs de la nappe à une résolution très fine, rendue possible ces dix dernières années grâce aux développements de modèles numériques de terrain et à la réalisation d'une carte piézométrique à une échelle resserrée et actualisée. Cette carte permet de visualiser finement :
    - les chenaux et paléo-chenaux des cours d'eau ainsi que les zone de résurgences en lien avec la proximité immédiate de la nappe ;
    - les différents degrés de profondeur de la nappe. Elle pourrait ainsi constituer une base pour avancer sur la compréhension des interactions entre la nappe d'Alsace et les zones humides (forêts, prairies humides...) et les cours d'eau phréatiques au-delà de l'utilisation de ce projet.
- la visualisation grâce à des sondes de très haute précision des variations intrajournalières, permettant de souligner la présence d'une variation naturelle, en lien probable avec les forêts. Le mécanisme implique probablement une interaction relativement complexe avec le profil hydrique du sol et la profondeur de la nappe.

À noter que les résultats scientifiques de ce projet ont aussi nécessité des développements méthodologiques pour répondre aux attentes spécifiques de la zone d'étude et pallier au manque de données, ce dernier point ne permettant pas d'utiliser des méthodes conventionnelles (modélisation maillée et/ou boite noire). La nouveauté à ce stade ne réside pas dans les théories mêmes, qui sont anciennes et éprouvées, mais dans leur application et leur adaptation.

2.2. ÉLÉMENTS DE RENDU DE L'ÉTUDE ET PROPOSITION D'ÉLÉMENTS DE GESTION

2.2.1. Objectifs et complémentarités des différentes propositions

Le croisement des résultats et leur analyse ont conduit à différents rendus, dont certains correspondent à des propositions d'éléments de gestion :

- une carte de la nappe localisant les secteurs comportant des cours d'eau sensibles aux prélèvements sur les eaux souterraines ;
- une délimitation de secteurs, associée à un réseau de suivi et à des indicateurs basés sur les eaux souterraines, préfigurant ainsi des zones potentielles de gestion collective des prélèvements ;
- des abaques et un outil informatique (Connexmin) traduisant l'impact d'un pompage en eau souterraine en fonction de la distance vis-à-vis des cours d'eau.

Le Tableau 2 résume les objectifs, la portée et la limite des outils proposés.

Nom	Description	Utilité et cadre d'usage premier	Limites	Pour aller plus loin…
Carte de sensibilité des cours d'eau aux variations de la nappe	Estime la vulnérabilité des cours d'eau en termes de réponse hydrologique à l'ensemble des prélèvements en eau souterraine dans un contexte d'étiage	Cerner les zones en lien avec les cours d'eau phréatiques pouvant fortement réagir aux prélèvements en eau souterraine notamment en période d'étiage	Basé sur la situation d'étiage 2019	Permet de définir la vulnérabilité d'un cours d'eau en prenant en compte des critères simples liés au cours d'eau (valeur du débit d'étiage, présence de plantes ou d'écosystèmes particuliers, zone natura, etc.)
Abaques « pompage » et/ou Connexmin	Estime le débit manquant pour un cours d'eau lié à un prélèvement en nappe par pompage isolé, selon certains contextes prédéfinis.	Estimer l'impact d'un pompage à proximité d'un cours d'eau en prenant en compte le débit d'étiage et les règles usuelles des suivis hydrologiques (prélèvements globaux inférieurs à 10% du débit d'étiage) en l'absence de données plus précises sur l'hydrologie du cours d'eau	Ne prend pas en compte l'effet cumulé de plusieurs forages sauf cas très simples	[Niveau expert] Peut permettre l'estimation du débit en dehors des contextes prédéfinis en utilisant des équivalences entre paramètres. *Exemple : Résultats identiques pour un forage profond et superficiel sur la base d'une transmissivité identique*
Secteurs	Découpe la zone d'étude en secteurs homogènes hydro(géo)logiquement	Lecture facilité des enjeux du Grand Ried en matière de prélèvements et de protection des cours d'eau	Délimitation réalisée principalement sur une base hydrogéologique et hydrologique	Une première sectorisation au sein de laquelle peut s'appliquer des règles de gestion collective des prélèvements
Indicateurs (seuils piézométriques)	Éléments chiffrés permettant de situer le niveau de la nappe par rapport à des situations d'attention ou de risques sur les cours d'eau pour un secteur donné	Permet de statuer sur la baisse du niveau de la nappe en l'intégrant dans le contexte soit : - La date de l'observation ; - La situation météorologique et hydrologique - Le niveau de prélèvements attendu, notamment au niveau de l'irrigation	Ne permet pas de définir des volumes à prélever ou à ne pas dépasser	[Niveau expert] Une première approche d'anticipation pourrait être réalisée en complétant les indicateurs par les courbes de décharges et l'observation des baisses piézométriques observées les années précédentes.

Tableau 2 : Synthèse des objectifs et portées des rendus finaux.

2.2.2. Carte de sensibilité et vulnérabilité des cours d'eau phréatiques : outils d'aide à l'estimation de l'impact des prélèvements sur les cours d'eau

Après analyse de l'ensemble du comportement hydrologique et hydrodynamique, une correspondance a pu être analysée pour spatialiser la sensibilité et la vulnérabilité des cours d'eau phréatiques à la baisse du niveau de la nappe. La cartographie permet de visualiser :

- les secteurs où les cours d'eau phréatiques sont sensibles à la variation de la piézométrie (profondeur de la nappe) ;
- les secteurs où s'ajoute un critère global de vulnérabilité des cours d'eau phréatiques face à une baisse du niveau de la nappe en situation de sécheresse hydrogéologique et/ou d'étiage.

La notion de vulnérabilité est ici basée sur le critère du débit du cours d'eau (cf. paragraphe 3.7.1 page 153). Elle pourrait être complétée par la suite par des donnes locales en lien avec la baisse du débit : écosystème, températures…

La lecture de la carte proposée est la suivante :

- les zones considérées comme sensibles sont tous les secteurs en lien avec les cours d'eau phréatiques : **une baisse de la piézométrie a une incidence directe et proportionnelle sur ces cours d'eau**. ;
- les **zones vulnérables** correspondent à des zones présentant de nombreux cours d'eau phréatiques à petits ou moyens débits. L'impact d'une baisse de la piézométrie sur le bon état de ces cours d'eau sera par conséquent plus fort sur ces secteurs ;
- les zones intermédiaires correspondent à des secteurs où les cours d'eau phréatiques ne sont plus présents naturellement mais où le lien hydraulique des cours d'eau avec la nappe est encore très fort. Cette zone a notamment été dessinée pour rappeler le caractère connecté de toute la zone. Elle inclut à ce stade les cours d'eau présentant historiquement (plus de 10 ans) un écoulement (Blind avant soutien d'étiage, rigole de Widensolen). L'étendue de cette zone peut être amenée à se propager en fonction des règles de gestion discutées en CLE et de l'évolution des prélèvements.

Au final, le niveau d'impact sur un cours d'eau est déterminé via la formulation suivante :

Niveau d'impact = sensibilité x vulnérabilité x Baisse de la piézométrie[1] liée aux prélèvements x *Enjeux (= préservation des cours d'eau prioritaires du SAGE)*

Ainsi, lors de l'étiage 2019, des cours d'eau majeurs ont été impactés sur des secteurs sensibles à la variation de la nappe mais peu vulnérables car disposant d'un débit suffisant.

Il est important lors de l'utilisation de cette carte d'ajouter l'amplitude de la baisse du niveau de la nappe pour évaluer le niveau d'impact sur les cours d'eau. Notamment, à partir d'un certain niveau de baisse du niveau de la nappe, tous les cours d'eau peuvent être considérés comme impactés.

Cette carte peut être utilisée pour envisager deux axes de gestion :

- à une échelle « globale » (> zones de sensibilité), les zones comprenant des enjeux en lien avec la baisse globale de la piézométrie ;

[1] Niveau piézométrique = niveau d'eau de la nappe

- à l'échelle des zones sensibles, les cours d'eau pouvant nécessiter des mesures sur les pompages individuels (pompages dont le débit provient indirectement des cours d'eau) en fonction du comportement global du secteur. Ce travail d'optimisation à une échelle locale reste toutefois tributaire de la gestion globale à plus large échelle de la piézométrie.

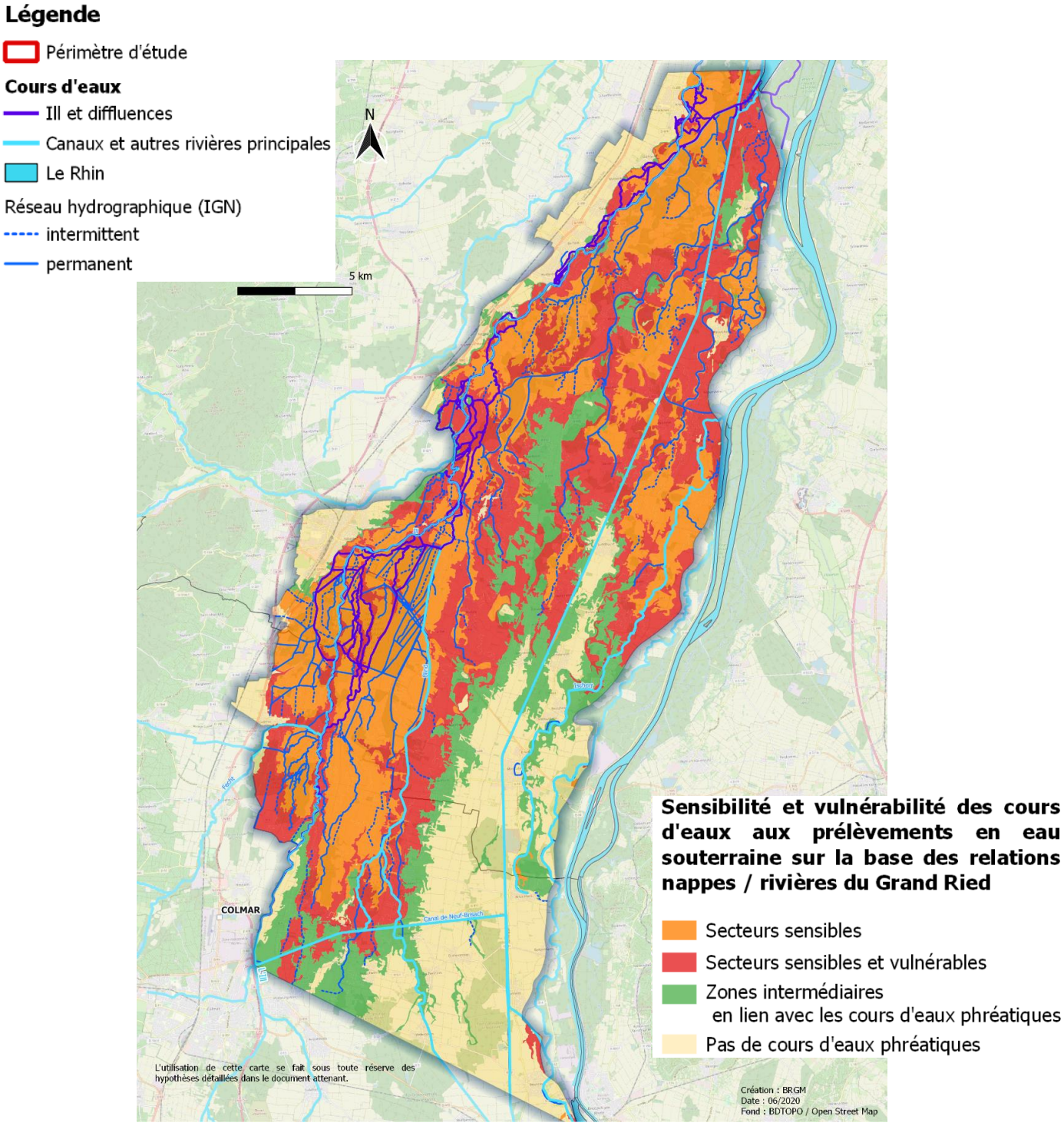


Figure 8 : Carte de sensibilité et vulnérabilité des cours d'eau à la baisse du niveau de la nappe.

Une carte en format A3 est disponible en annexe.

2.2.3. Sectorisation de la zone d'étude

Le travail de sectorisation et de constitution du réseau de suivi a pour objectif principal de proposer des éléments permettant de préparer une gestion globale et collective. La sectorisation a été réalisée principalement sur une base hydrogéologique et hydrologique. Le découpage a été fait en même temps que la détermination du réseau de suivi, de manière à disposer d'un piézomètre minimum par secteur.

Les principales caractéristiques de chaque secteur (périmètre, comportement hydrologique et hydrogéologique, usages et enjeux) sont reprises dans les paragraphes suivants.

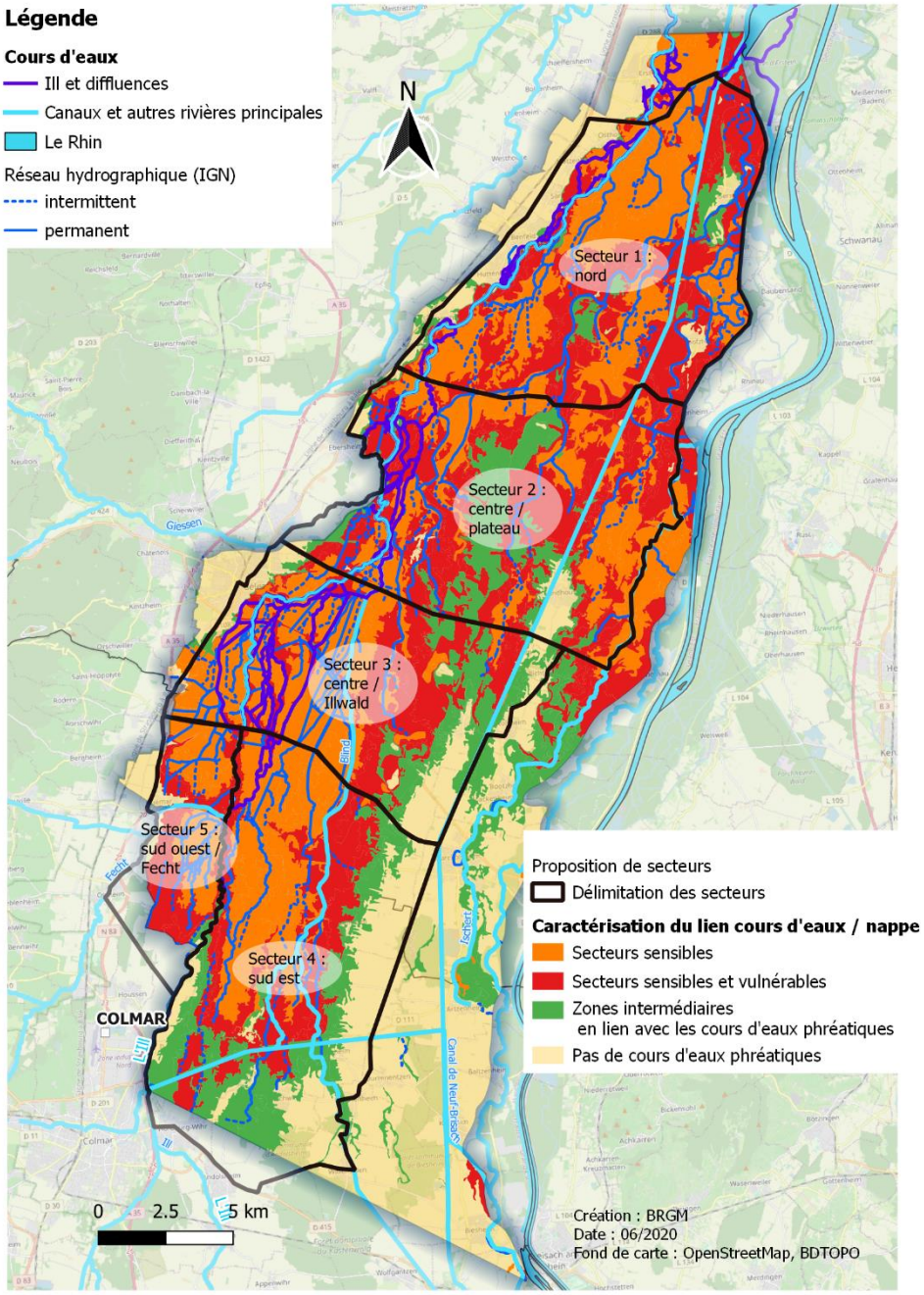


Figure 9 : Visualisation globale des secteurs proposés.

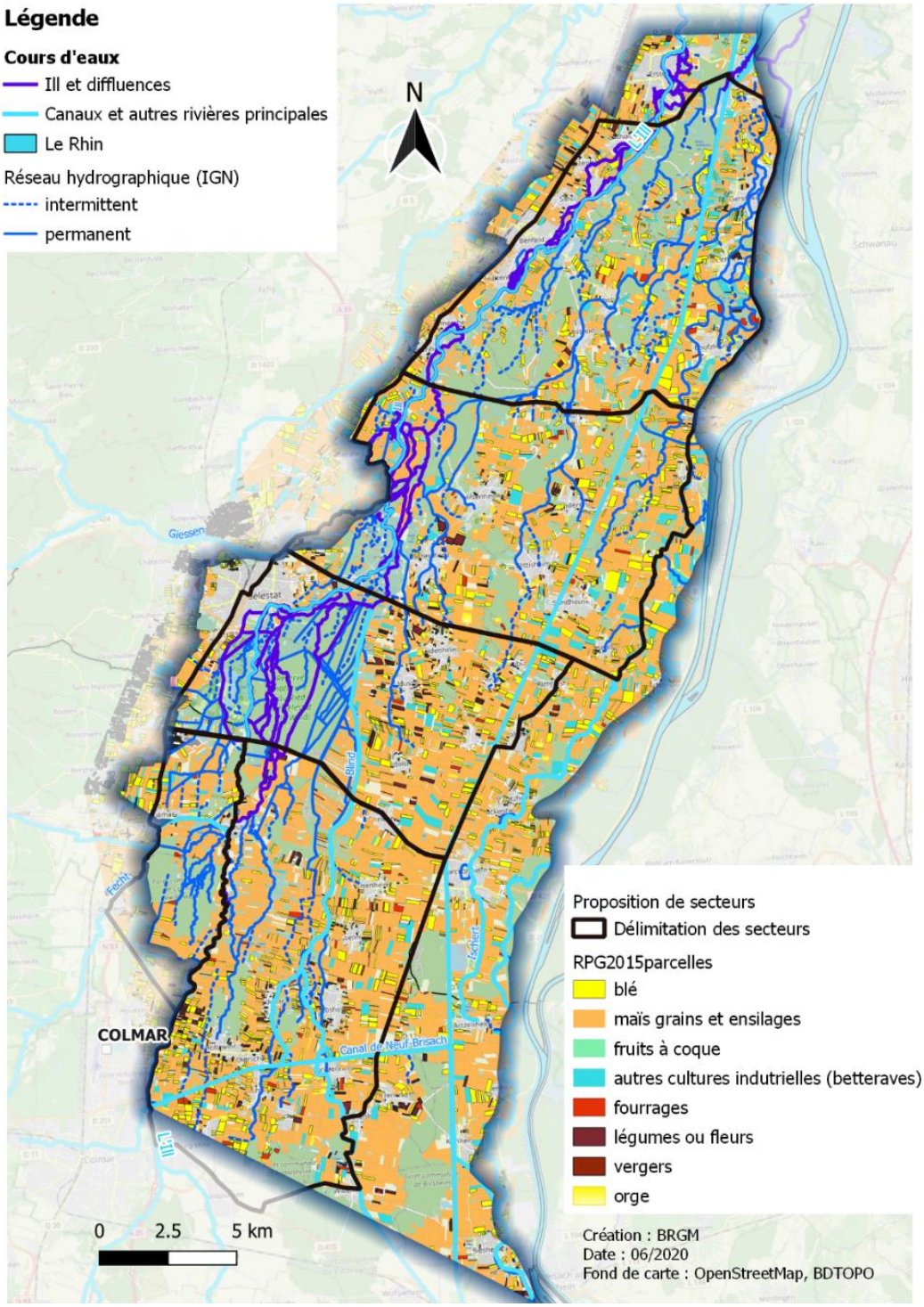


Figure 10 : Sectorisation et grand types de cultures présents sur le secteur (basé sur le RPG 2015).

Secteur 1

Périmètre

Ce secteur est délimité hydrologiquement par l'Ill, le canal de décharge de l'Ill et la bande rhénane. Au sud, la limite est marquée par l'apparition de baisses piézométriques marquées en lien avec le secteur 2. Le tracé à l'ouest de l'Ill a été étendu à l'autoroute, la délimitation des alluvions de l'Ill étant difficilement perceptible sur le terrain.

Hydrologie et hydrogéologie

Du point de vue hydrologique, ce secteur est caractérisé par :

- un rapprochement géographique de l'Ill et du Rhin ;
- la présence d'un fort soutien de l'Ill visible sur la station d'Osthouse pour une partie nord de la zone.

Ce secteur bénéficie ainsi d'un soutien via l'Ill et le Rhin sur la partie la plus au nord, notamment à proximité immédiate du canal de décharge de l'Ill et à proximité de l'Ill sur la partie allant jusqu'à Osthouse. Au sud d'Osthouse, l'effet de l'Ill diminue fortement.

Enjeux potentiels

Le secteur est intégralement couvert par des cours d'eau phréatiques sensibles et vulnérables. Toutefois, la présence de nombreuses forêts limite les pressions liées aux prélèvements pour l'irrigation. Les pressions sont concentrées :

- sur la partie ouest de l'Ill, partie sur laquelle des tendances à la baisse de la piézométrie sont observées ;
- sur le sud ou l'irrigation est plus présente.

Secteur 2

Périmètre

Ce secteur est transverse à la plaine d'Alsace. Il est délimité hydrologiquement par l'Ill puis le Giessen à l'ouest et par l'Ishert à l'est. Les limites nord et sud encadrent une zone ayant eu un comportement hydrodynamique différent durant l'étiage 2019, vraisemblablement en lien avec une demande en irrigation plus importante.

Les points de soutien de l'Ill sont relativement éloignés en amont ou en aval du secteur. Son influence pourrait être limitée, notamment en période d'étiage et de fortes sollicitations.

Hydrologie et hydrogéologie

Le secteur est caractérisé hydrologiquement par l'Ill et la présence de plusieurs diffluents sur la partie ouest. La partie centrale est marquée par l'apparition des zones de terrasses légèrement plus élevées. La partie est est influencée par le Rhin.

Enjeux potentiels

Le secteur est intégralement en lien avec des cours d'eau phréatiques dans sa globalité. Les enjeux principaux sont localisés entre l'Ill et le canal du Rhône au Rhin. En effet, la zone nécessite potentiellement un fort besoin en eau pour l'irrigation à proximité de phréatiques vulnérables en raison d'une profondeur moyenne de la nappe. L'influence de l'Ill peut de plus être limitée, même à proximité immédiate de cette dernière en cas de forts étiages de cette dernière.

Secteur 3

Périmètre

Le secteur est délimité à l'ouest par la limite entre les secteurs de « Ried » et les alluvions vosgiennes. La limite initialement basée sur l'hydro(géo)logie a été légèrement étendue pour répondre aux besoin de praticité de tracé (routes et ligne de chemin de fer). À l'ouest, la limite est globalement celle du canal du Rhône au Rhin. Les limites sud et nord sont conçues pour englober la réserve naturelle de l'Illwald.

Hydrologie et hydrogéologie

L'Ill constitue le principal moteur de la partie ouest de ce secteur. Son influence va diminuer rapidement à la sortie du Ried noir et gris (dépôts de l'Ill).

Le secteur peut être séparé en deux sous-zones :

- la partie concernant le ried noir et gris regroupant l'Ill et ses nombreuses diffluences avec à l'ouest un début d'influence de la partie vosgienne. Sur cette partie, le niveau de la nappe est en forte baisse ;
- la partie concernant la terrasse caillouteuse du Rhin, avec un approfondissement du toit de la nappe coïncidant avec la disparition des cours d'eau phréatiques.

Enjeux potentiels

Ce secteur comprend des zones humides remarquables en lien avec une multiplicité de cours d'eau phréatiques.

Les pressions se situent principalement de part et d'autres de la réserve naturelle avec :

- à l'est, des baisses fortes du niveau de la nappe en lien avec l'irrigation de juillet à Septembre ;
- sur une bande ouest, l'influence de la baisse globale de la piézométrie liée à un déséquilibre global recharge / prélèvement.

Les enjeux sont donc à priori concentrés sur les bordures de la réserve. Toutefois, l'intégralité de l'écosystème du secteur est potentiellement vulnérable, même à des amplitudes faibles du niveau de la nappe. Dans ce cadre, la présence au sein de la réserve naturelle même de l'Illwald de l'ouvrage d'alimentation en eau potable d'Obere Erlen est soulignée, même si son impact est faible sur le niveau de la nappe par rapport à la baisse enregistrée en bordure de la réserve.

Secteur 4

Périmètre

Ce secteur regroupe toute la partie sud-est du Grand Ried. Il est délimité à l'est par le canal du Rhône au Rhin, à l'ouest par l'Ill, au nord par la réserve de l'Illwald et au sud par la « disparition » des cours d'eau phréatiques.

Hydrologie et hydrogéologie

Sur ce secteur, l'Ill est de faible débit et en grande partie en perte vers la nappe. Sans soutien d'étiage au niveau de Colmar, elle se serait très probablement asséchée en 2019.

Le secteur est constitué des dépôts de l'Ill à proximité de cette dernière, puis des dépôts caillouteux du Rhin. La nappe s'approfondit vers le sud-est, coïncidant avec la disparition des cours d'eau phréatiques.

Les parties les plus au sud sont marquées par des sources asséchées depuis de nombreuses années, potentiellement en lien avec les travaux d'aménagement du Rhin ayant une influence sur ce secteur.

Enjeux potentiels

Les secteurs les plus sensibles se situent globalement entre l'Ill et la Blind avec des fortes craintes pour les cours d'eau phréatiques, même classifiés a priori comme peu vulnérables, au vu des observations des dernières années sur la baisse globale de la piézométrie.

Le secteur regroupe différents usages. La demande en irrigation semble faible à proximité immédiate de l'Ill et des cours d'eau phréatiques. Toutefois, l'enregistrement de la baisse sur le niveau de la nappe semble signaler un impact de l'irrigation. Le secteur est donc étendu de manière à bien intégrer la baisse globale de la piézométrie sur un secteur élargi.

Secteur 5

Périmètre

Ce secteur est délimité à l'est par l'Ill et à l'ouest par la Fecht avec prolongation du tracé pour englober les phréatiques du sud-est de la réserve de l'Illwald.

Hydrologie et hydrogéologie

Ce secteur a été défini pour encadrer le comportement particulier en lien avec la Fecht des alluvions vosgiennes. En effet, il se situe à un croisement entre les alluvions vosgiennes, les cours d'eau vosgiens (la Fecht) et le milieu du Grand Ried avec les cours d'eau phréatiques.

À l'ouest l'Ill est, comme pour le secteur 4, de faible débit et en grande partie en perte. Sans soutien d'étiage au niveau de Colmar, elle se serait trés probablement asséchée en 2019.

Enjeux potentiels

Ce secteur regroupe des cours d'eau phréatiques vulnérables et potentiellement fragilisés par les tendances à la baisse de la nappe du piémont vosgien.

2.2.4. Réseau de suivi et indicateurs

Le choix a été réalisé d'utiliser des valeurs seuils sur la piézométrie en lien uniquement avec une situation des cours d'eau et sans dépendance à une période de l'année. Ce choix permet d'utiliser ces indicateurs en toute situation : prévision de la période estivale et d'irrigation, mais aussi sécheresse automnale, printanière, etc.

Au niveau des indicateurs, les éléments suivants ont été retenus :

- atteinte très forte des cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin : assèchement total des cours d'eau vulnérables[2] et baisse significative du débit des cours d'eau principaux ;
- atteinte forte des cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin : assecs sur la majeure partie des cours d'eau vulnérables et baisse du débit sur les autres cours d'eau ;
- atteinte des cours d'eau vulnérables : assecs sur une partie des cours d'eau et baisse significative du débit de ces cours d'eau.

Le réseau proposé avec les indicateurs associés est le suivant (Nord au Sud) :

Secteur	Numéro BSS	Atteinte très forte des cours d'eau	Atteinte forte des cours d'eau	Atteinte des cours d'eau vulnérables	*Remarques*
1	03081X0025 /223	**157,10 m NGF**	**157,13 m NGF**	**157,19 m NGF**	*BSH Rossfeld*
2	03085X0208/PZ7	**160,65 m NGF**	**160,73 m NGF**	**160,8 m NGF**	
3	BSS033MKHM	**167,25 m NGF**	**167,35 m NGF**	**167,4 m NGF**	*Historique limité*
4	03423X0064/94A	**176,24 m NGF**	**176,32 m NGF**	**176,41 m NGF**	*Influence locale perceptible*
5	03423X0056/100	**174,7 m NGF**	**174,85 m NGF**	**175 m NGF**	*Données actuelles au pas hebdomadaire*

Tableau 3 : Réseau de suivi proposé et valeurs seuils associés (niveau piézométrique en m NGF).

Une phase complémentaire d'analyse est nécessaire en concertation avec l'APRONA pour vérifier les caractéristiques de chaque ouvrage. Si les ouvrages proposés ne peuvent pas être équipés et utilisés de manière fiable, la recherche d'un ouvrage ou sa réalisation sera nécessaire. Cette phase complémentaire est susceptible de concerner en particulier les secteurs 3 et 5.

La mise en place du réseau de suivi devra être accompagnée d'une réflexion sur :

- la pérennité du réseau (substitution, possibilité de disposer de points de secours) ;
- la fiabilité des données (correction des dérives en période critique, en raison des faibles amplitudes entre chaque seuil).

Tous les indicateurs sont basés à ce jour sur des piézomètres et non sur des stations hydrométriques. Ce choix est explicité dans le rapport scientifique. Il peut être amené à évoluer en fonction :

[2] Cf. définition vulnérabilité dans le paragraphe 2.2.2

- des enseignements des futures chroniques acquises actuellement par la DREAL sur les cours d'eau phréatiques ;
- de paramètres de gestion de l'Ill, le débit de cette dernière pouvant constituer un indicateur à part entière sous réserve de bien connaître celui-ci sur tout le linéaire de l'Ill.

Éléments de gestion complémentaires

Si une utilisation des indicateurs en dehors d'un contexte de crise est souhaité, les éléments de gestion suivants peuvent être utilisés pour anticiper l'atteinte des niveaux piézométriques :

- la recharge de la nappe est possible jusqu'en mai, ce dernier mois étant un mois avec des fortes précipitations potentielles en plaine d'Alsace. Contrairement à d'autres types d'aquifères, il ne semble donc pas possible actuellement d'anticiper sur la baisse estivale dès la fin des mois de mars/avril. Toutefois, les effets du changement climatique et la récurrence des sécheresses de ces dernières années pourraient modifier ce constat (décalage des saisons, modification des périodes de recharge). Ce point d'attention est notamment important sur les secteurs en lien avec le piémont, présentant dès maintenant des déficits globaux et pouvant nécessiter une gestion des prélèvements sur l'ensemble de l'année ;
- la période des plus bas niveaux atteints par la nappe est juillet / août, même en cas de prolongation d'une sécheresse à l'automne. En effet, à partir de juin, la baisse de la piézométrie est liée en partie aux prélèvements et à l'irrigation. Une stabilisation voir une légère remontée en septembre est observée suite à l'arrêt de l'irrigation ;
- l'Ill reste un moteur majeur de la gestion de l'eau souterraine du Grand Ried, car les pertes issues de ce cours d'eau apportent un soutien significatif de la nappe en période d'étiage.

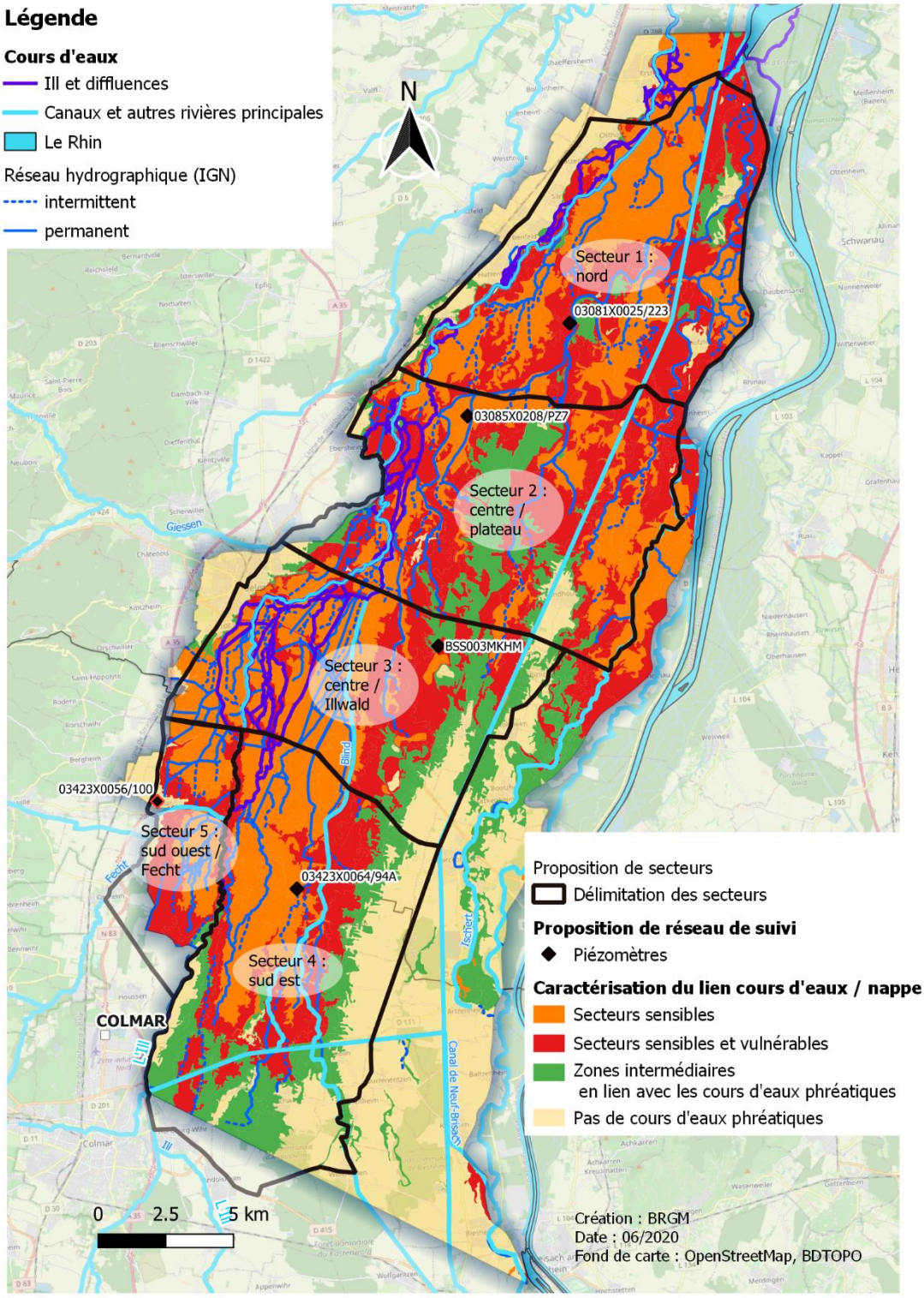


Figure 11 : Proposition de réseau de suivi.

2.2.5. Estimation de l'impact local d'un pompage

Préambule

Contrairement aux règles usuelles d'estimation d'un impact, les cas maximisant n'ont pas été privilégiés. En cas d'incertitude sur un paramètre, le cas moyen ou le plus probable a été privilégié.

Il est de plus rappelé que tout pompage aura un lien hydraulique avec un cours d'eau se situant à proximité. Tout prélèvement se traduira donc par un « manque » de débit pour le cours d'eau.

L'approche proposée ici n'a pas abordé les points suivants :

- *la répartition de l'impact entre les cours d'eau lorsque plusieurs cours d'eau sont à proximité d'un point de pompage ;*
- *l'analyse de la capacité du cours d'eau à absorber les différents prélèvements : présence d'un soutien d'étiage ou connexion à l'Ill, débit d'étiage réel au moment des pompages.*

Attention : *ne pas confondre le débit estimé ici avec le volume d'eau de la rivière qui arriverait au pompage. Ce dernier ne peut être évalué sans des données complémentaires et complexes. Une explication de la différenciation des deux mécanismes est présentée dans le rapport public* BRGM/RP-67566-FR *(disponible en ligne sur le site du BRGM[3]).*

Présentation

L'analyse locale de chaque pompage peut requérir de nombreux paramètres. Dans le cas du Grand Ried, la relative homogénéité de la nappe a permis de différencier des cas types encadrant l'impact potentiel de chaque ouvrage sur le (ou les) cours d'eau impacté(s).

L'ensemble des situations peut être analysé via deux configurations :

- le cours d'eau est facile d'accès pour le pompage (grande surface d'échange, pas de colmatage, lieu de résurgences etc..) : le cours d'eau va devenir une réserve d'eau très facilement accessible pour le pompage et sera donc plus facile à pomper que la nappe. Le cours d'eau devient à terme la principale source d'alimentation du pompage ;
- le cours d'eau est légèrement séparé de la nappe et la nappe est très perméable : la nappe et le cours d'eau peuvent alimenter conjointement le point de pompage.

Deux schémas équivalents du point de vue hydrogéologique sont proposés avec la mise à disposition d'outils associés pour réaliser les calculs :

- le cours d'eau incise intégralement le niveau superficiel de la nappe très perméable et peut être ramené à une configuration du modèle de Theis : le logiciel Connexmin permet de réaliser le calcul en intégrant les différents paramètres connus de la nappe ;
- l'incision du cours d'eau peut être considérée comme négligeable par rapport à l'épaisseur de la nappe (modèle de Hunt 2003) : des abaques ont été réalisés représentant plusieurs configurations types permettant de raisonner à l'échelle du Grand Ried.

[3] http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67566-FR.pdf

À noter, qu'en cas d'incertitude sur le choix de la configuration ou des paramètres rivières/aquifère, le modèle de Theis, via le logiciel Connexmin, peut être utilisé dans quasiment tous les cas, soit pour le calcul de l'impact réel, soit en cas maximisant.

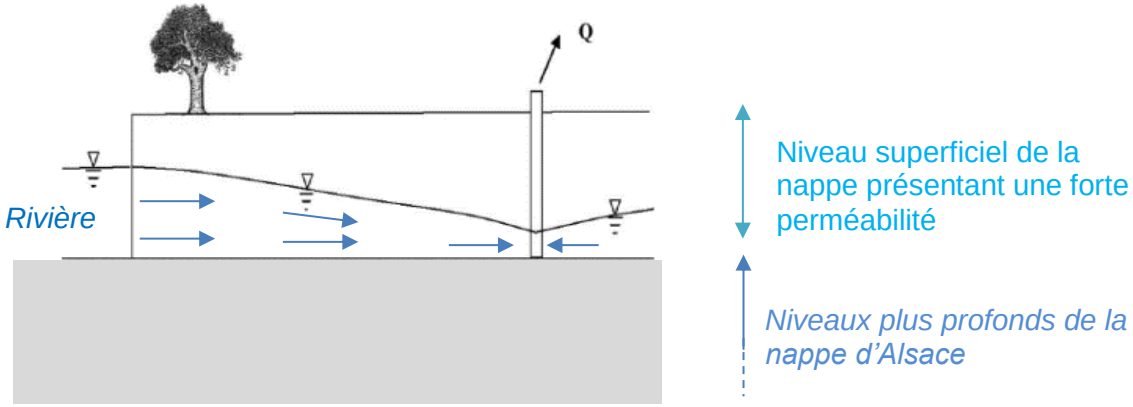


Figure 12 : Cours d'eau incisant intégralement le niveau superficiel de la nappe d'Alsace.

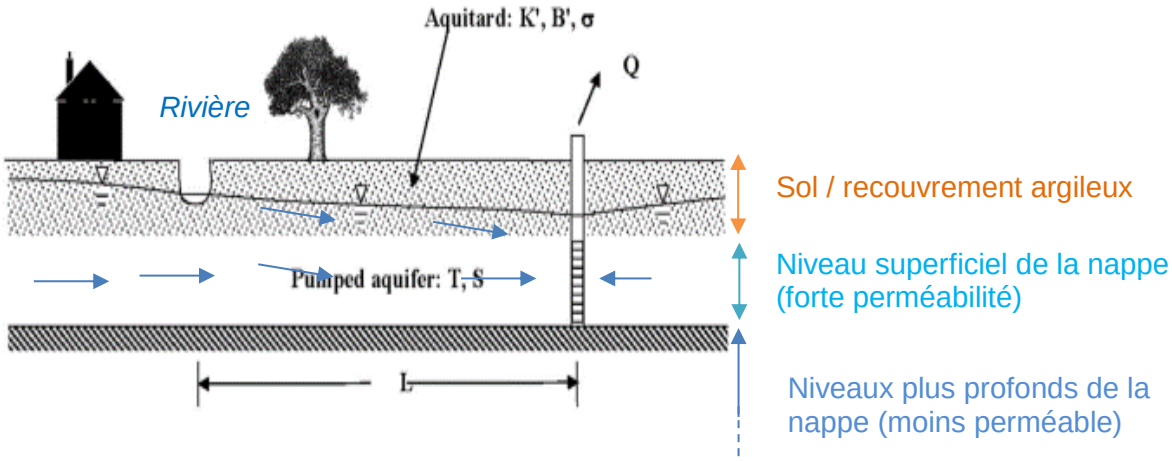


Figure 13 : Le cours d'eau incise partiellement la nappe avec présentation d'une configuration particulière de la nappe.

Connexion complète avec le cours d'eau :

- **Domaine d'utilisation**

Ce type de schéma peut être utilisé pour un forage de moins de 10 mètres de profondeur dans les conditions suivantes :

- si pompage de moins de douze heures :
  - distance de moins de 500 mètres de l'Ill ou d'un cours d'eau majeur. Le débit calculé provient de l'Ill (ou diffluence majeure),
  - distance de moins de 500 mètres des cours d'eau phréatiques les plus conséquents et profonds (Riedbrunnen, Zembs, Scheidgraben…) ;

- si pompages de plus de 12 heures : la quasi intégralité des cours d'eau se situant en zone sensible et/ou vulnérables.

Il peut être aussi utilisé pour **obtenir des valeur maximisantes sur tous les cours d'eau du Grand Ried et des pompages de courte durée.**

- **Outils proposé : logiciel Connexmin**

Le calcul est réalisable via l'outil « Connexmin » disponible en libre accès et mis à disposition par le BRGM[4] . Après intégration des paramètres des eaux souterraines, le calcul est basé sur les paramètres de distance au cours d'eau et de débit pompé, en fonction de la durée du pompage.

Les paramètres de la zone d'étude sont disponibles ci-dessous et sont utilisables en l'absence de données locales complémentaires.

Localisation	Transmissvité, (T) m^2/s	Coefficient d'emmagasinement (S)
Niveau superficiel de la nappe, Ried gris et noir	0,1	1 e $^{-3}$
Niveau superficiel, Ried sableux	0,1	1 e $^{-2}$
Premiers niveaux de la nappe (jusqu'à 30 mètres), Ried gris et noir	0,001 x épaisseur captée	1 e $^{-3}$
Premiers niveaux de la nappe (jusqu'à 30 mètres), Ried sableux	0,001 x épaisseur captée	1 e $^{-2}$

Tableau 4 : Paramètres de la nappe utilisables pour le calcul de l'impact.

[4] https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/conexmin-calcul-influence-pompage-nappe

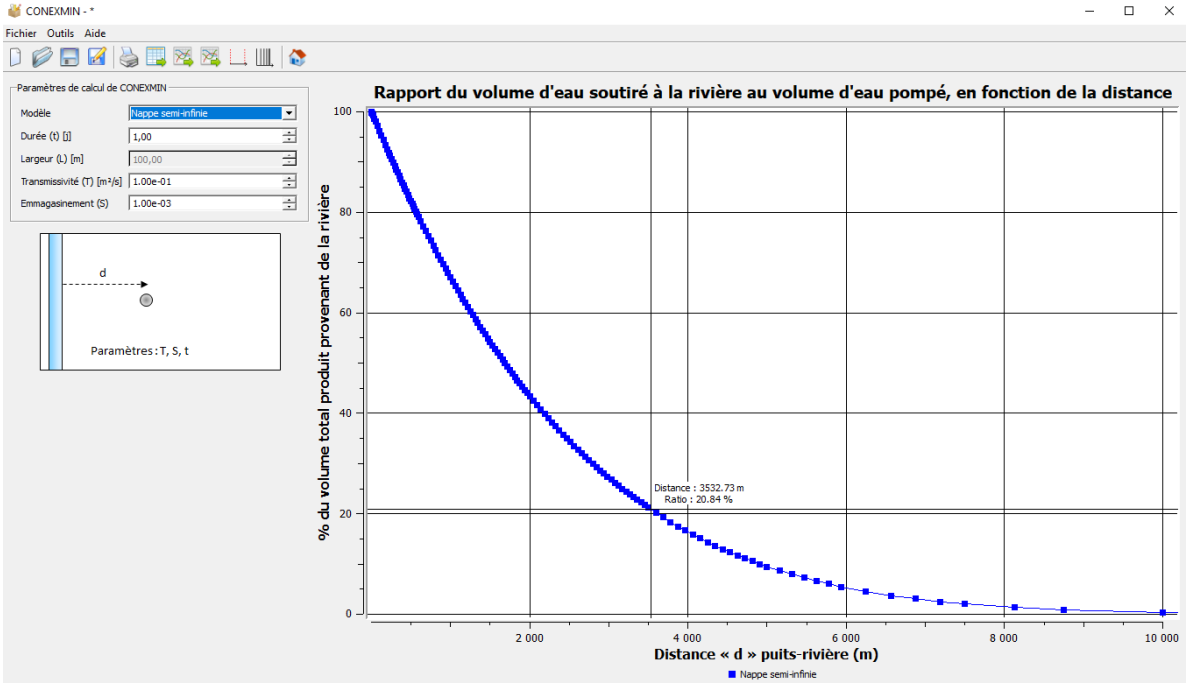


Figure 14 : Aperçu du logiciel Connexmin.

Partage du débit pompé entre la nappe et le cours d'eau : abaques

- **Domaine d'utilisation**

Dans certaines dispositions, le débit va provenir du cours d'eau et de la nappe. C'est le cas lorsque :

- les cours d'eau sont « petits » par rapport à la profondeur de la nappe captée par l'ouvrage de pompage ;
- les cours d'eau présentent un fond suffisamment colmaté (présence de limons, absences de résurgences…) ;
- les cours d'eau se différencient du comportement de la nappe (diffluence de l'Ill, cours d'eau avec soutien d'étiage, déconnexion visible entre les variations des hauteurs d'eaux du cours d'eaux et le niveau de la nappe, etc.).

Plusieurs paramètres rentrent en jeu pour représenter la connexion entre la nappe et le cours d'eau. Ces paramètres peuvent impliquer des actions inverses sur le résultat du débit prélevé sur le cours d'eau. Ainsi, la connexion sera identique pour un cours d'eau fortement colmaté mais ayant une très forte surface d'échange avec la nappe (très grande largeur du cours d'eau et faible hauteur d'eau par exemple) que pour un cours d'eau peu colmaté ayant une petite surface d'échange.

À partir de l'analyse de l'ensemble des paramètres, quatre dispositions différentes sont proposées. Elles prennent en compte deux types de cours d'eau (peu connecté et très peu connecté) en lien avec un pompage dans le niveau superficiel de la nappe situé sur :

- les secteurs du ried noir et ried gris (milieu légèrement captif, à très forte perméabilité). C'est la principale zone des cours d'eau phréatiques regroupant tout l'Illwald ;
- le secteur du ried sableux et / ou forage plus profond (perméabilité moyenne de la nappe et milieu libre). Ces secteurs présentent généralement peu de cours d'eau de types phréatiques.

Une extension aux forages profonds peut être réalisé si la *transmisivité* résultante de l'épaisseur captée peut être considérée comme équivalente à celle utilisée lors des abaques.

- **Outils proposé : abaques**

De manière à prendre en compte les dispositions proposées ci avant, quatre abaques ont été réalisées.

Les abaques, *disponibles en annexe,* représentent le débit transféré de la rivière au puits de pompage en fonction de la distance entre la rivière et le puits de pompage pour des temps de pompages différents (1 heure à 10 jours).

Le débit « manquant » pour les rivières est représenté en % du débit pompé sur le puits de pompage.

Cas particuliers : proximité de l'Ill

Dans un rayon d'environ 500 mètres autour de l'Ill, et sous réserve d'un débit suffisant dans cette dernière, il est possible de considérer que l'intégralité du débit provient de cette dernière devant tout autre effet sur les cours d'eau phréatiques.

Ce rayon peut être supérieur ou inférieur en fonction de la situation de l'Ill, mais aussi du niveau de rabattement de la nappe. Or, ces paramètres évoluent fortement au cours de l'étiage et des différentes années.

2.3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Sur la base des données disponibles et des investigations réalisées en 2019, cette étude a permis :

- d'améliorer la connaissance des relations nappe-rivières ;
- de préciser les impacts anthropiques observés sur le niveau de la nappe et sur les cours d'eau phréatiques ;
- de proposer des outils de gestion spatialisés.

L'étude met notamment en évidence des secteurs où l'influence des prélèvements agricoles est considérable durant la période estivale.

Sur la base des éléments techniques et des outils de gestion proposés, l'établissement des règles partagées par les usagers pourra être préparée et discutée lors d'une phase ultérieure, sous la conduite de la CLE du SAGE Ill Nappe Rhin.

D'un point de vue technique, l'estimation fine de volumes prélevables se heurte aux verrous suivants :

- l'estimation des volumes réellement prélevés pour l'irrigation par des méthodes indirectes. Cela nécessiterait un travail approfondi sur la cartographie des sols, les comportements de l'irrigation et les cultures. Il est à noter que les techniques actuelles d'analyse d'images satellites, si elles sont prometteuses doivent encore faire l'objet de comparaison précise sur le terrain, notamment au vu des différentes problématiques qui ont été soulevées ;
- des incertitudes fortes sur les bilans globaux hydrologiques : au niveau de l'évapotranspiration en lien avec les forêts, les prairies humides et l'agriculture mais aussi

concernant l'estimation de la recharge naturelle de la nappe en zone de piémont, et les apports réels de l'Ill en situation d'étiage marqué.

L'ensemble de ces points constitue des prérequis nécessaires, préalablement à la constitution de modèles prévisionnels adéquats. En effet, les éléments fournis apportent une vision spatialisée de la situation et des outils d'analyse de l'impact individuel des forages, sans pour autant pouvoir simuler globalement le fonctionnement de la nappe et l'impact global des prélèvements (nécessité d'un modèle global).

Un point inconnu subsiste par ailleurs concernant la recharge réelle de la nappe en provenance des Vosges, que ce soit via les rivières ou des cheminements plus profonds. À l'heure actuelle, il n'est pas possible de répondre sur l'origine du déficit global perçu sur la bordure de la nappe : hausse des prélèvements et/ou baisse de la recharge liée au changement climatique ?

Le projet a de plus soulevé le lien très fort entre les eaux souterraines et l'intégralité de l'écosystème de surface : zones humides de manière générale, forêts, prairies, sols agricoles… mais aussi un fort contraste au niveau spatial sur les apports d'eau de la nappe. Certains secteurs bénéficient d'un apport d'eau conséquent offrant la possibilité de cultiver quasiment sans irrigation (à confirmer), à l'opposé, certaines zones dans la situation actuelle pourraient voir leur apport via la nappe de plus en plus limité entrainant un besoin potentiellement sans fin en irrigation pour certaines cultures.

Au-delà de ces éléments, il reste à ce stade ; des hypothèses qu'il semble important d'aborder dans les années à venir pour permettre la mise en place d'une gestion partagée entre les différents usages et besoins en eau du secteur.

Au niveau des forêts, notamment celle de l'Illwald, un travail spécifique sur les besoins en eau et le lien avec la nappe et l'apport des rivières serait nécessaire pour consolider les bilans hydrologiques.

La mise en place de travaux interdisciplinaires en agronomie (agriculture et forêts), pédologie, hydrogéologie, hydrologie, écologie, semble donc à ce stade indispensable pour alimenter la réflexion sur la gestion optimale des ressources en eau.

Enfin, la nature particulière des cours d'eau phréatiques nécessite une adaptation des règles usuelles de gestion des cours d'eau. La dynamique liée à l'apport via les résurgences de l'eau souterraine entraine une caractérisation hydrogéomorphologique différente d'une rivière alimentée majoritairement par des apports surfaciques. De plus, l'histoire de ces cours d'eau est particulière. Elle peut même être différente suivant le positionnement dans le Grand Ried. Les travaux actuels au LIVE et au SDEA permettront probablement de disposer de pistes de réflexions complémentaires sur cet aspect en caractérisant plus finement l'histoire de ces cours d'eau : anciens lits des rivières, fonctionnement avant et après les grands travaux affectant l'hydrologie et l'hydrogéologie de la plaine d'Alsace.

3. Rapport détaillé

Les résultats synthétisés dans le chapitre 2 sont ici détaillés, une partie des résultats est fournie en annexe pour faciliter la lecture.

3.1. CONTEXTE DÉTAILLÉ

3.1.1. Climatologie

Le climat général de la plaine d'Alsace est de type subcontinental, marqué par des hivers froids et des étés chauds et orageux.

La moyenne annuelle des précipitations se situe entre 600 et 800 mm avec un minimum en hiver (février) et un maximum en mai (Figure 15). En été, les orages jouent un rôle important. Une variation de la pluviométrie est présente sur la zone d'étude entre le nord-est et le sud-ouest.

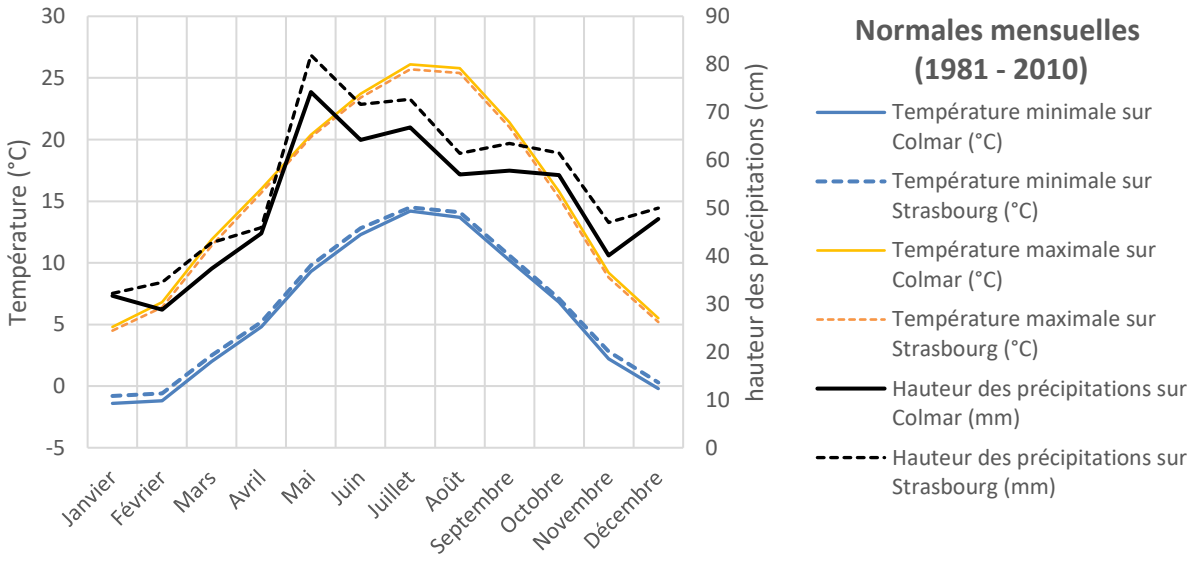


Figure 15 : Températures et précipitations en normales mensuelles sur les stations de Colmar et Strasbourg.

3.1.2. Situation hydrogéologique

L'aquifère rhénan est constitué par les alluvions quaternaires qui ont été déposées par le Rhin et ses affluents dans le fossé d'effondrement compris entre les Vosges et la Forêt-Noire. Ces alluvions sont composées de galets, graviers, sables, limons et argiles. Sur la zone d'étude, leur épaisseur est comprise entre 50 mètres en bordure ouest et plus de 100 mètres au niveau du Rhin.

La recharge se fait majoritairement par les infiltrations du Rhin, des rivières de la plaine et les apports latéraux (ruissellement des collines vosgiennes et infiltration des rivières vosgiennes au

niveau des cônes de déjection). Les précipitations assurent moins de 20 % de la recharge générale.[5]

L'axe majeur d'écoulement suit celui du Rhin et de l'Ill du sud au nord. Il est modifié à proximité du piémont vosgien pour suivre un axe ouest / est au débouché des différentes vallées vosgiennes.

La faible profondeur de la nappe et la forte productivité induisent une facilité d'exploitation en même temps qu'une forte vulnérabilité. Cette faible profondeur se retrouve dans la présence de zones humides en lien direct avec l'aquifère aux zones d'affleurement de ce dernier.

Le périmètre d'étude comporte quatre typologies de zones :

- la bande rhénane sous influence du Rhin et présentant les plus fortes épaisseurs et transmissivités. Les rabattements induits par les pompages à proximité du Rhin sont fortement limités par l'effet de ce dernier ;
- la partie centrale de la zone d'étude correspondant au plateau encadrant le canal du Rhône au Rhin correspond à une zone de nappe libre. Peu de cours d'eau sont présents. La nappe se situe en moyenne à une profondeur supérieure à 2 mètres ;
- la partie du « Ried central » qui correspond à la dépression de l'Ill. Elle correspond aux zones présentant le chevelu des phréatiques. La nappe peut y être légèrement captive. Les relations nappes/cours d'eau sont très fortes ;
- une bande étroite entre l'Ill et la bordure ouest de la zone d'étude où la nappe va rapidement s'approfondir en s'éloignant des zones humides. Dans cette zone, l'apparition des alluvions vosgiennes va aller de pair avec une légère diminution de la productivité de l'aquifère.

À cette description globale s'ajoute la rivière de l'Ill qui représente, hors périodes d'étiages sévères, une « frontière » hydraulique pour la partie supérieure de l'aquifère.

Les niveaux des hautes eaux et basses eaux s'inversent entre l'est et l'ouest en fonction des régimes de l'Ill et du Rhin :

- hautes eaux en période estivale en bordure du Rhin ;
- basses eaux en période estivale en bordure de l'Ill.

[5] http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/etat/district-rhin/page_02_02_02_a.php

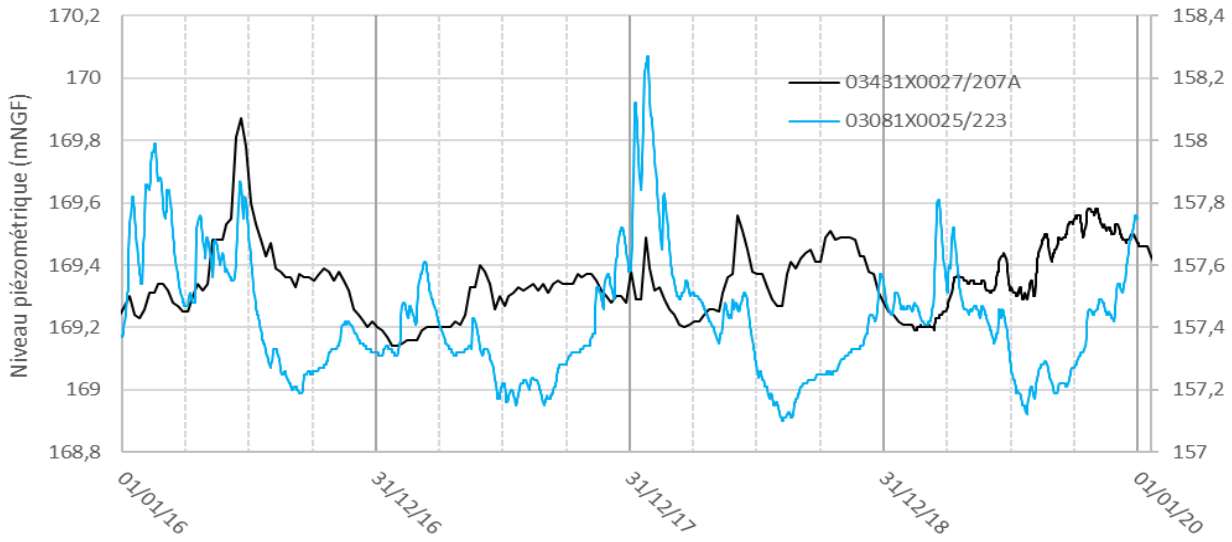


Figure 16 : Inversion entre les hautes eaux et basses eaux entre l'est de la zone d'étude (influence du Rhin) représenté en noir et l'ouest (influence de l'Ill) représenté en bleu.

3.1.3. Les cours d'eau

L'hydrographie du Grand Ried est composée des deux cours d'eau majeurs qui sont le Rhin et l'Ill, les confluences avec l'Ill de rivières vosgiennes telles que la Fecht ou le Giessen ainsi qu'un réseau hydrographique localement dense, notamment du fait de l'existence des ruisseaux phréatiques. S'ajoute à ces cours d'eau naturels la présence de deux canaux alimentés par le Rhin : le canal de Colmar et le canal déclassé du Rhône au Rhin.

Principaux cours d'eau

La zone d'étude est sous l'influence des deux cours d'eau majeurs : l'Ill et le Rhin délimitant en grande partie le périmètre d'étude.

Le Rhin, fleuve majeur et structurant du fonctionnement hydrologique du secteur présente un régime sous influence nivo-glaciaire au niveau de la zone d'étude. Cela implique notamment des hautes eaux au printemps / été et des basses eaux en hiver.

L'Ill draine la quasi-intégralité du Sud de l'Alsace en captant toutes les rivières vosgiennes en rive gauche. Par conséquent, le débit de l'Ill sans soutien d'étiage est dépendant des conditions hydro-climatiques des Vosges avec un régime pluvio-océanique. La période des hautes eaux se situent de novembre à mars-avril avec une dominante plus marquée en janvier et février. La période de plus basses-eaux se situe vers août-septembre. Toutefois, les soutiens d'étiages réalisé par les canaux au niveau de Mulhouse et Colmar permettent de conserver un écoulement significatif en été. Notamment, cela permet de compenser les pertes de débit liées à une zone de perte par infiltration en amont de Colmar.

L'Ill est rejointe par deux rivières vosgiennes :

- la Fecht à Illhaeusern, en amont de la forêt d'Illwald ;
- le Giessen entre Sélestat et Benfeld.

Les cours d'eau phréatiques

Le terme de « **cours d'eau phréatiques**[6] » est largement repris dans la littérature pour désigner un type de cours d'eau spécifique d'Alsace qui nait de résurgences de l'aquifère rhénan. Ces sources sont caractéristiques du Grand Ried d'Alsace.

Le mécanisme de leur origine est lié :

- à une légère mise en charge de la nappe sous une couche argileuse (nappe semi captive ou « pseudo-artésienne ») et à une interruption locale de celle-ci permettant l'apparition de l'exsurgence (Schmitt, 2001) ;
- d'un simple recoupement de la surface piézométrique par le chenal (Cloots-Hirsch, 1988, cité dans la thèse de Schmitt). Autrement dit, ces sources peuvent avoir pour origine l'affleurement de la nappe dans les zones topographiques basses.

En dehors de ce mécanisme atypique des cours d'eau phréatiques, et de manière plus large de la présence de ce système alluvial unique en Europe, les phréatiques sont aussi remarquables par leur biodiversité et la qualité de l'eau. En dehors de circonstances exceptionnels (tarissements, inondations…) la température d'une majorité de ces cours d'eau reste relativement constante entre 12 et 14 °C. Cette température correspond à celle de la nappe d'Alsace hors réchauffement superficiel.

À l'échelle de la zone d'étude, des critères très sommaires sur l'alimentation des cours d'eau de la zone d'étude permettent de séparer :

- les cours d'eau résultants de la seule résurgence de l'aquifère rhénan : les cours d'eau « phréatiques » ;
- les cours d'eau semi phréatiques résultant d'une alimentation mixte, cette situation pouvant évoluer dans l'année ;
- les cours d'eau liés à des apports météoriques et/ou en connexion directe avec l'Ill, la Fecht ou le Giessen ;
- les cours d'eau, phréatiques ou non, bénéficiant d'un soutien d'étiage.

À ces critères s'ajoutent de nombreuses imbrications et communications entre les différents cours d'eau (anastomoses et tresses) impliquant une complexité dans la lecture du linéaire de l'ensemble.

L'intégralité des cours d'eau phréatiques du secteur sont identifiés comme prioritaires par le SAGE ILL-NAPPE-RHIN

Influence historique du Rhin

La plaine d'alsace a été structurée par l'Ill et le Rhin. Le lit majeur séculaire du Rhin pouvait s'étaler antérieurement sur toute la largeur de la plaine, y compris sur le champs d'inondation de l'Ill (Schmitt 2001). Les éléments de datation permettent d'apprécier la migration progressive de l'Ill et du Rhin depuis l'holocène (-10 000 ans) aux temps actuels (Schmitt 2016). Cette migration se retrouve actuellement sous la forme de paléo chenaux recouvrant quasiment toute la zone du Grand Ried et en lien direct avec la structure actuelle du linéaire des cours d'eau.

[6] D'autres dénominations existent : « ruisseaux phréatiques », « rivières phréatiques », « Donnerlöcher » ou encore « Brunnenwasser »

Par la suite, les cours d'eau de la plaine d'Alsace ont profondément été modifiés par l'activité anthropique, notamment dans les 200 dernières années. Les périodes d'aménagement récentes du Rhin ayant eu un impact majeur sur la zone d'étude sont :

- la canalisation du Rhin entre 1842 et 1876. Cette dernière a entrainé une modification totale des connexions entre les cours d'eau et une réduction considérable des bras du Rhin et de l'Ill ;
- les travaux du grand canal du Rhin, entre 1932 et 1962 avec, comme dates marquantes, la mise en route de la centrale hydroélectrique de Fessenheim en 1956, de Vogelgrün en 1959 et de Marckolsheim en 1962.

Ces derniers travaux ont notamment entrainé l'abaissement du niveau piézométrique au sud de Colmar. Cet abaissement piézométrique a entrainé le tarissement de nombreux cours d'eau phréatiques en amont de Colmar tels que la source de la Blind et la rigole de Widensolen (Schmitt, 2001). Au niveau du secteur Colmar / Erstein, le niveau piézométrique moyen a été conservé, ce qui a permis de maintenir l'alimentation par les eaux souterraines des cours d'eau phréatiques (Schmitt, 2001). Toutefois, la zone d'influence du Rhin a été fortement diminuée.

Depuis les années 70, peu de modifications notables et brutales sont à noter. Plusieurs éléments distincts, dont l'impact sur les cours d'eau et, de manière induite sur les eaux souterraines, sont encore en cours d'analyse. Notamment :

- un travail conséquent de renaturation autour du Rhin depuis les années 2000, permettant de reconnecter par endroits le Rhin, les cours d'eau de la bande rhénane et l'aquifère rhénan. Ces travaux sont corrélables avec la tendance à la hausse observée sur les chroniques piézométriques dans la bande rhénane et potentiellement avec d'autres évolutions plus loin dans la plaine ;
- l'effet des sécheresses et/ou d'une possible évolution des prélèvements, notamment agricole, en corrélation avec l'observation notamment en 2003, 2015, 2017 et 2018 d'assecs sur des cours d'eau phréatiques considérés pérennes (observations qui sont à l'origine de l'étude en cours).

3.2. ANALYSE DE L'ÉTIAGE 2019

3.2.1. Conditions climatiques de l'été 2019

L'été 2019 a été marqué par un fort déficit pluviométrique de la fin juin à la fin juillet, puis de la mi-août à la fin septembre. Lors de la période orageuse de la fin juillet / début aout, la hauteur d'eau a atteint par localité en une journée l'équivalent de plus de 80 % de la normale mensuelle (39,2 mm enregistré le 27 juillet à Colmar Meyenheim et 44 mm enregistré le 7 août à Strasbourg Entzheim).

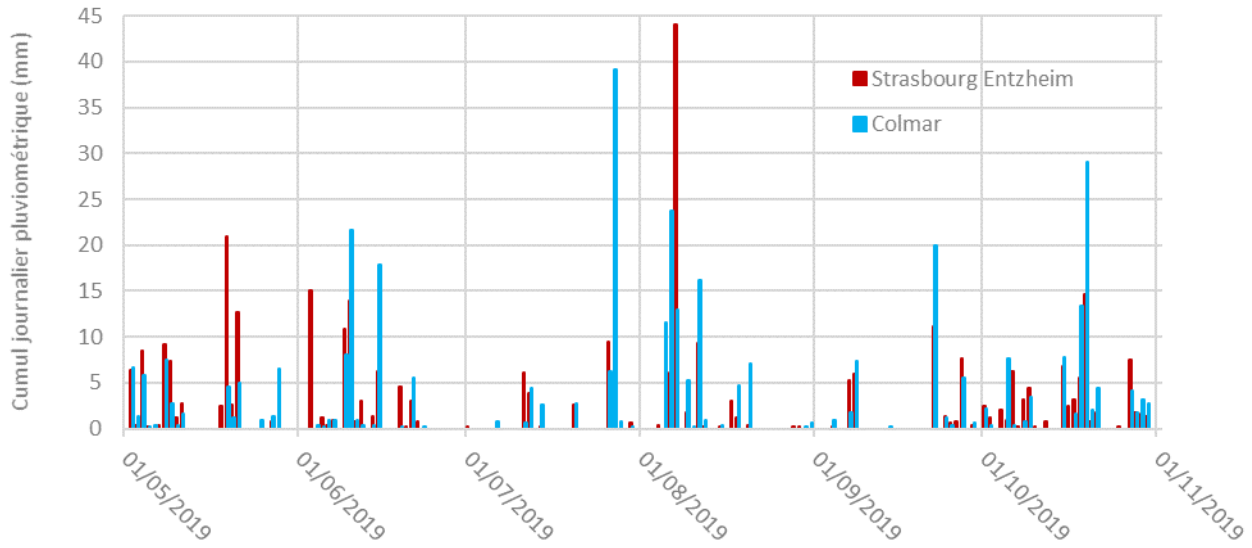


Figure 17 : Précipitations quotidiennes enregistrées sur les stations météorologiques de Colmar Meyenheim et Strasbourg Entzheim (Météo France).

Deux vagues de chaleur ont été présentes durant l'été. La première s'est déroulée entre le 25 juin et le 2 juillet et est remarquable par sa précocité dans l'année. La deuxième s'est déroulée entre le 20 et le 26 juillet avec des records de température égalant ou dépassant la canicule de 2003.

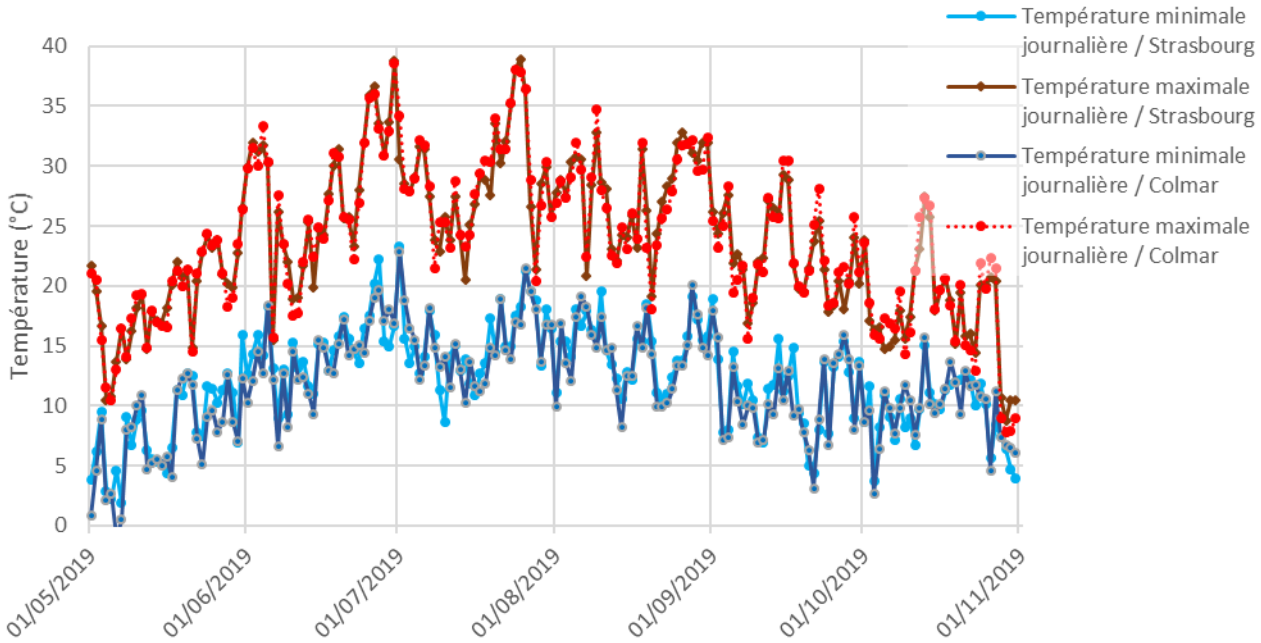


Figure 18 : Températures enregistrées sur les stations météorologiques de Colmar Meyenheim et Strasbourg Entzheim (Météo France).

3.2.2. Méthodologie et données disponibles durant l'étiage 2019

L'étiage 2019 a été analysé via l'évolution hydrologique des cours d'eau et de la piézométrie de mai à octobre 2019[7]. De manière à disposer d'une vision spatiale relativement précise, ces données ont été complétées par une campagne piézométrique et de jaugeage entre le 11 et le 14 juin 2019, soit avant les périodes les plus sèches, concomitantes avec la mise en place des prélèvements liés à l'irrigation.

Les données disponibles pour le suivi de l'étiage proviennent du réseau pérenne (APRONA /DREAL/AFB) et du réseau spécifique au projet soit :

- au niveau piézométrique :
    - le réseau usuel de l'APRONA comprenant :
        1. sur le périmètre d'étude strict : neuf centrales d'acquisitions automatiques au pas de temps horaire et douze points de suivi manuels (observateurs) au pas hebdomadaire,
        2. en bordure, et permettant le cas échéant de gérer les effets de bord des différents traitements des données : quatre centrales d'acquisitions automatiques au pas horaire et cinq piézomètres au pas hebdomadaire ;
    - le réseau complémentaire, mis en place et géré par l'APRONA, comprenant :
        1. dix sondes piézométriques au pas horaire renforçant le quadrillage de la zone d'étude,
        2. une sonde mise en place à proximité de l'AEP d'Obere Erlen dans la zone de l'Illwald pour les besoins spécifiques de l'étude de l'APRONA du secteur ;

- au niveau des cours d'eau :
    - le réseau usuel de la DREAL permettant de suivre les hauteurs d'eaux ainsi que le débit sur les stations principales, soit :
        1. trois stations sur l'Ill dont deux présentes au niveau de la zone d'étude (Kogenheim et Osthouse), et une en amont (Colmar Ladhof),
        2. des stations sur la Fecht et le Giessen localisées en dehors de la zone d'étude mais permettant de suivre l'évolution de ces cours d'eau,
        3. les stations du Mulhbach à Schoenau et de la Zembs à Herbsheim pour les cours d'eau phréatiques ;
    - un redéploiement de quatre stations de la DREAL mesurant la hauteur d'eau à partir de juillet / septembre 2019 sur des cours d'eau phréatiques (Hochgiessen, Scheidgraben, ruisseau des Erlen et Riedbrunnen);
    - le réseau de l'Observatoire National Des Etiages (ONDE[8]) géré par l'OFB et permettant de caractériser visuellement la situation d'un cours d'eau. Il comprend, six stations dont cinq sur des cours d'eau phréatiques à l'échelle de la zone d'étude ;

[7] Date d'arrêt pour l'analyse des données de l'étiage 2019. Les réseaux gérés par l'APRONA, la DREAL et l'OFB ont continué l'acquisition de données.

[8] Le réseau ONDE a été mis en place en 2012 au niveau national. L'observatoire caractérise les étiages estivaux (mai à octobre) par l'observation visuelle du niveau d'écoulement des cours d'eau aux stations d'observation, ces dernières restant fixes dans le temps. Cette information permet de compléter l'évaluation de la situation du réseau hydrique obtenu via les stations hydrométriques, ces dernières étant généralement positionnées sur les principaux cours d'eau.

- la constatation visuelle par l'OFB 67 et 68 selon le protocole ONDE de la situation des cours d'eau phréatiques sur dix-sept points d'observations complémentaires au réseau ONDE ;
- des mesures ponctuelles de débit de cours d'eau phréatiques sur le département du Haut Rhin réalisé par l'OFB68.

La Figure 19 synthétise les périodes d'acquisitions des données. La cartographie présentée sur la Figure 20 résume le dispositif de suivi.

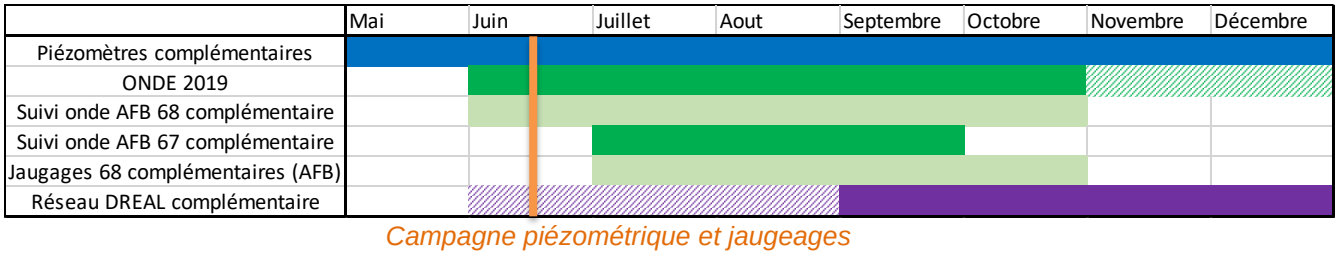


Figure 19 : Période d'acquisition des données complémentaires.

En complément, des éléments qualitatifs sur l'évolution des cours d'eau ont été suivis par le LIVE[9] (vitesse de la mise en place des assecs, la température et observations sur la biologie des cours d'eau). L'analyse de ces données est en cours à la date de ce rapport.

Chaque département est couvert par 30 stations d'observations lors de l'apparition des premières atteintes des courss d'eaux.

[9] Laboratoire Image Ville Environnement, université de Strasbourg

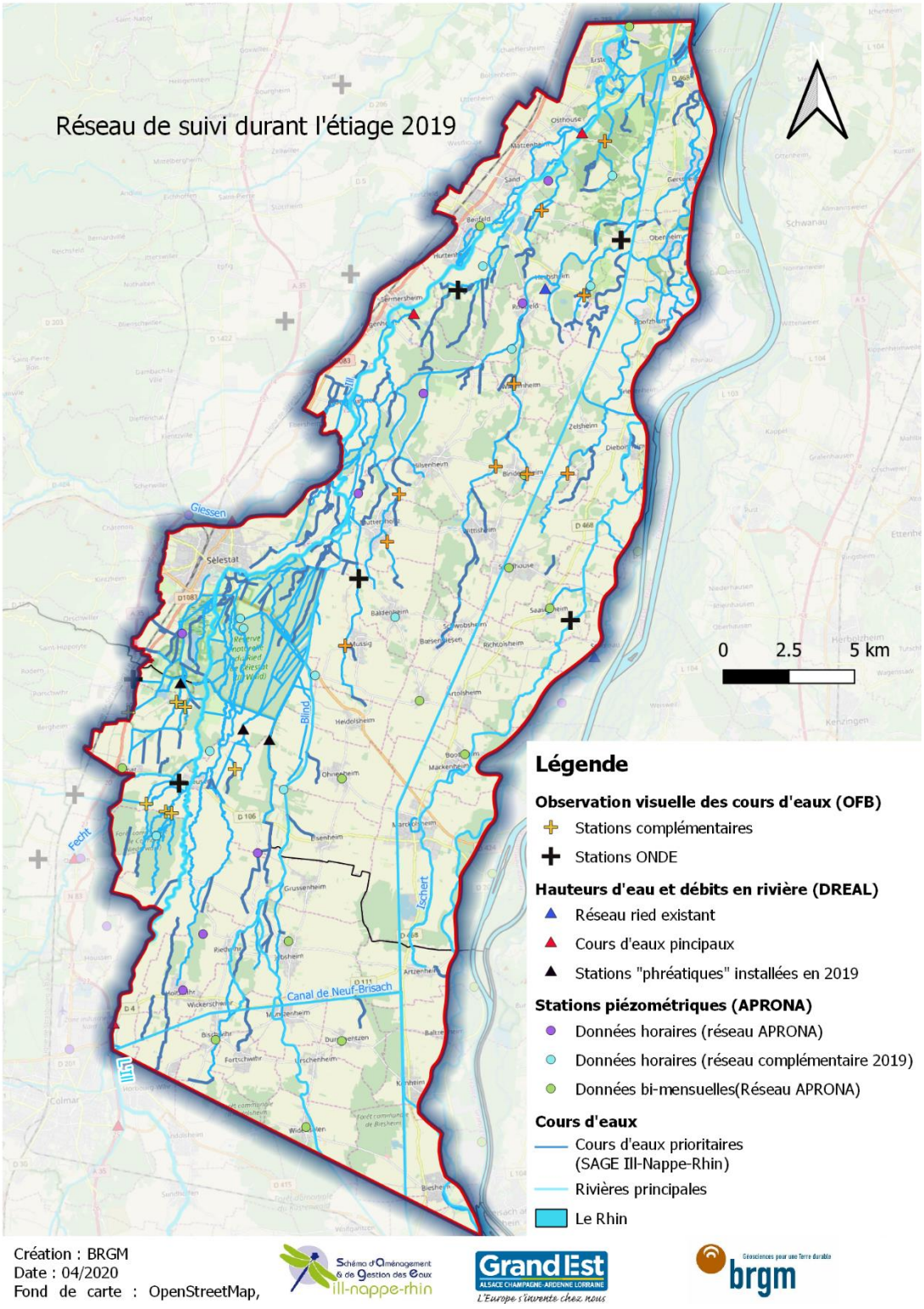


Figure 20 : Cartographie des points de mesures du réseau de suivi disponible durant l'étiage 2019. Une cartographie détaillée présentant les noms des piézomètres est disponible en annexe.

3.2.3. Caractérisation de la situation en juin 2019

Constitution de la carte piézométrique

- **Données**

La carte piézométrique a été réalisée sur la base des résultats de la campagne du 11 au 14 juin. Elle intègre :

- les relevés de la profondeur du niveau piézométrique réalisés par l'APRONA sur des piézomètres présélectionnés ;
- les relevés des hauteurs d'eaux dans les rivières phréatiques ;
- les relevés effectués à ces dates sur l'Ill par les stations hydrométriques de la DREAL.

L'ensemble des points a été reporté en altitude via :

- un nivellement réalisé soit :
    - par le BRGM dans le cas d'une hauteur d'eau dans un cours d'eau sans possibilité de réaliser un repère fiable. La présence de couvert végétal sur certains points a pu mener à une incertitude sur l'altitude qui est intégrée dans l'interprétation finale de la carte. Certains points ont été complètement exclus lorsqu'ils modifiaient la carte de manière aberrante. La mesure de la hauteur d'eau au niveau de la partie amont de l'Orbach (sud-est de la zone) a été conservée mais son niveau d'incertitude doit être prise en compte dans l'interprétation locale la carte piézométrique,
    - par un expert géomètre sur les points où le marquage d'un repère était possible (piézomètres ou cours d'eau).
- les altitudes connues des points nivelés historiquement (piézomètres du réseau de l'APRONA notamment).

En complément, une variation des conditions piézométriques est présente en raison de l'étalement de la campagne sur trois jours en raison des contraintes techniques liées aux mesures de débits en cours d'eau. De manière à la prévenir, la campagne s'est déroulée du sud au nord en conservant une temporalité équivalente entre mesures piézométriques et cours d'eau.

Certains secteurs ont été privilégiés pour analyser plus finement les relations nappes / rivières et servir de cas types.

- **Analyse et interprétation**

La carte piézométrique permet de visualiser et analyser l'état de la nappe avant la mise en place de la majeure partie des prélèvements liés à l'irrigation. Elle a été réalisée par interpolation (krigeage) après analyse statistique des données (résultats disponibles en annexe). Cette dernière a permis de faire ressortir les premiers éléments d'analyses suivants :

- la présence attendue de l'axe majeur d'écoulements N045 sur la majeure partie de la zone d'étude confortée par une homogénéité forte des données ;
- une faible interaction dans le comportement de la piézométrie suivant l'axe transversal ouest/ est ;
- des axes d'écoulements concordants entre les cours d'eau et les eaux souterraines à l'échelle de la zone d'étude ;

- l'absence d'axe majeur d'écoulement sur le secteur de la réserve naturelle de l'Illwald, certainement liée à l'Ill et à la boucle créé par les méandres du cours principal de l'Ill à ce niveau ;
- une modification de l'axe majeur d'écoulement à l'ouest de l'Ill.

Au niveau des relations nappes-rivières, l'analyse de la carte piézométrique a notamment permis d'obtenir les informations suivantes:

- l'Ishert se démarque sur les deux points où la hauteur d'eau et le niveau piézométrique ont été relevés, avec un niveau piézométrique en deçà du niveau de la rivière. Ces mesures confirment l'absence d'alimentation par les eaux souterraines de cette rivière ainsi qu'une alimentation possible localement de la nappe par l'Ishert ;
- au niveau de Muttersholtz, les cours d'eau tels que le Kesslergraben sont en situation de drainance.

L'influence de l'Ill n'a pas été analysée dans le cadre de cette carte piézométrique, cette dernière étant visible sur les rabattements et la piézométrie globale.

La comparaison entre les positionnements des prélèvements AEP et industriels ne permet pas de relever une variation de la piézométrie liée à ces derniers. La précision à l'échelle de la carte entre chaque point est potentiellement supérieure aux valeurs d'un rabattement local. Ces résultats n'excluent donc pas la possibilité d'un impact local.

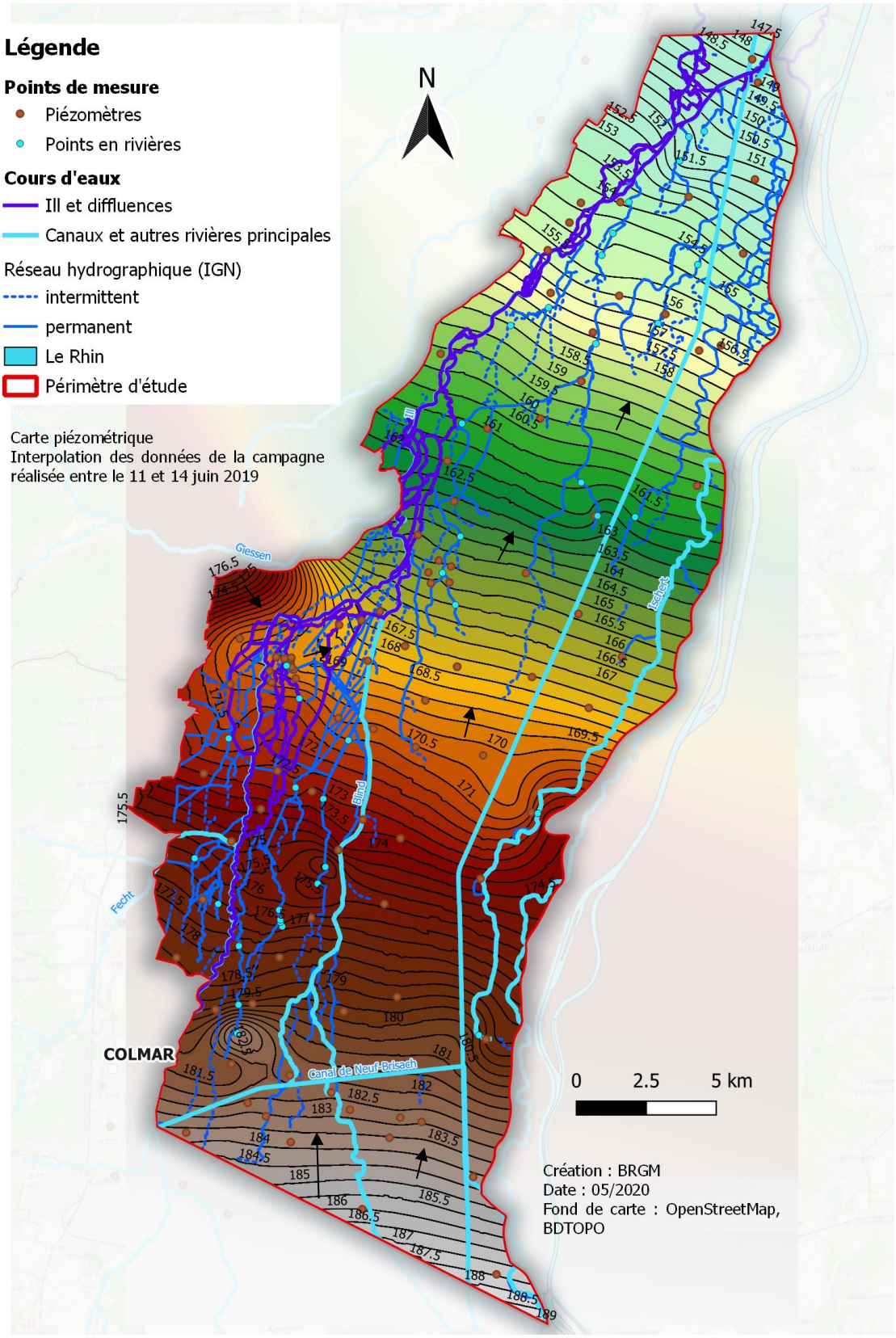


Figure 21 : Carte piézométrique obtenue par interpolation des données mesurées lors de la campagne du 11 au 15 juin 2019 (carte détaillée en annexe).

Caractérisation des cours d'eau

- **Données**

La campagne réalisée du 11 au 14 juin avait pour objectif de disposer d'une vision globale des cours d'eau phréatiques de débits intermédiaires à cette période. Elle a couvert l'intégralité de la zone d'étude. Les reconnaissances pour préparer la campagne se sont déroulées de la mi-mai à la mi-juin permettant de disposer d'une première appréciation de l'évolution de la situation des cours d'eau.

Les mesures réalisées sur chaque site (Figure 22) ont compris :

- températures et conductivités (cf. Figure 23 et Figure 24) ;
- jaugeages par micro-moulinet et réalisation du profil sur les sites le permettant;
- descriptions du lit de la rivière ;
- mesure de la hauteur d'eau (traduite en altitude après nivellement et intégrée dans la carte piézométrique).

L'ensemble des données résultantes de la campagne sont disponibles en annexe.

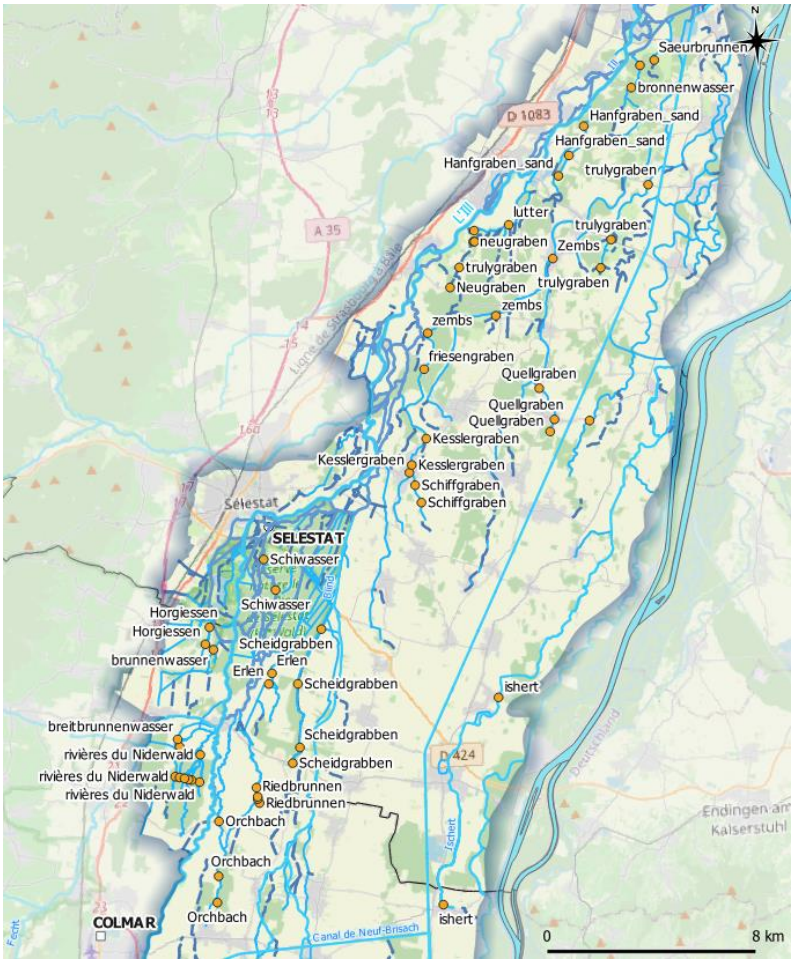


Figure 22 : Localisation des points de mesures (observations et / ou jaugeages) sur les cours d'eau durant la campagne de reconnnaissance du 12 au 14 juin 2019.

- **Analyse et interprétation**

Les mesures physico-chimiques ont mis en évidence :

Au niveau de la conductivité (cf. Figure 23) :

- les valeurs de conductivité supérieures à 600 µS/Cm représentatives d'eaux souterraines sont présentes sur la majeure partie des cours d'eau. Ces valeurs constituent un bon traceur eau souterraine / eau superficielle. On note la présence de valeurs extrêmement fortes (supérieures à 900 µS/Cm) sur la bordure sud-est de l'IllWald. Ces niveaux de conductivité sont ceux de l'eau salée ou fortement minéralisés. La localisation correspond aux panaches de chlorures et nitrates relevés dans le programme d'étude ERMES 2016 (APRONA, 2017) ;
- le Shiffwasser présente des valeurs de conductivité en dessous de 500 µS/Cm, représentatives de leur connexion avec des eaux de surface (Rhin et Ill respectivement) ;
- le Quellegraben présente des valeurs autour de 450 µS/Cm. Les mesures ont été réalisées au moment d'une averse pouvant diluer l'eau souterraine et abaisser la conductivité naturelle du cours d'eau. Toutefois la gamme de valeur est cohérente avec le niveau de pollution aux nitrates et chlorures de eaux souterraines de la zone en comparant aux résultats ERMES 2016 ;
- l'ishert présente des valeurs pouvant être soit reliée au soutien d'étiage par le Rhin, soit aux valeurs de conductivité des eaux souterraines.

⇨ *Les valeurs de conductivité relevées sur les cours d'eau phréatiques coïncident avec les valeurs correspondant aux eaux souterraines, en dehors des cours d'eau ayant une connexion avec le Rhin (via un soutien d'étiage) ou l'Ill (via une diffluence). La comparaison avec les cartes de chlorures et nitrates d'ERMES 2016 (APRONA) permet de confirmer le lien entre eaux souterraines et cours d'eau phréatiques.*

Au niveau de la température (Figure 24) :

- les températures relevées sont de l'ordre de grandeur (11 / 13 °C) usuellement discuté pour les cours d'eau phréatiques et la température de la partie superficielle de la nappe d'Alsace ;
- un phénomène de réchauffement progressif le long du cours d'eau est noté sur le Quellegraben et le Trulygraben, potentiellement représentatif de l'absence d'une alimentation par les eaux souterraines tout au long du cours d'eau ;
- les diffluences de l'Ill se différencient avec des températures supérieures à 15 °C.

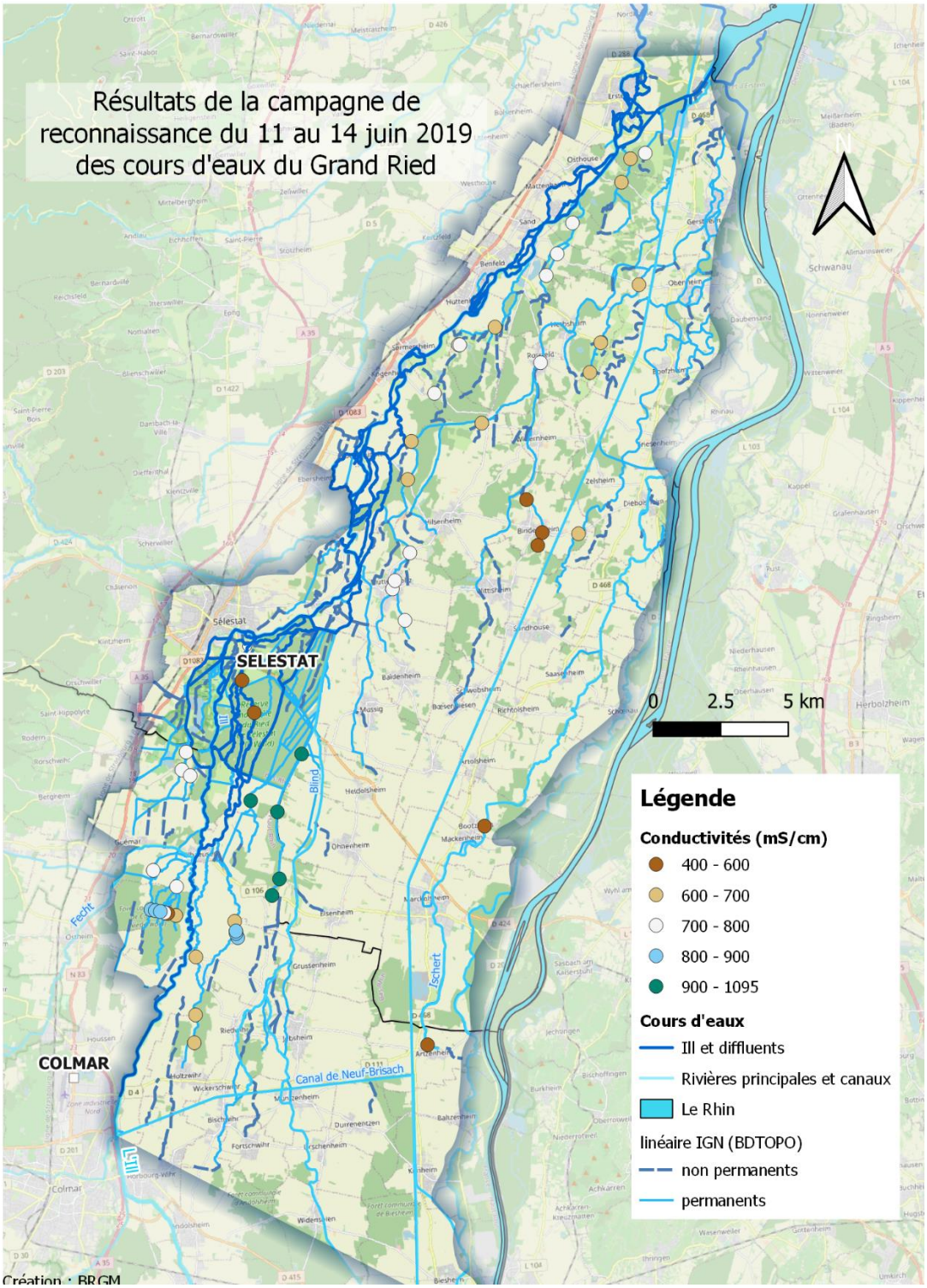


Figure 23 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : conductivités mesurées sur les cours d'eau.

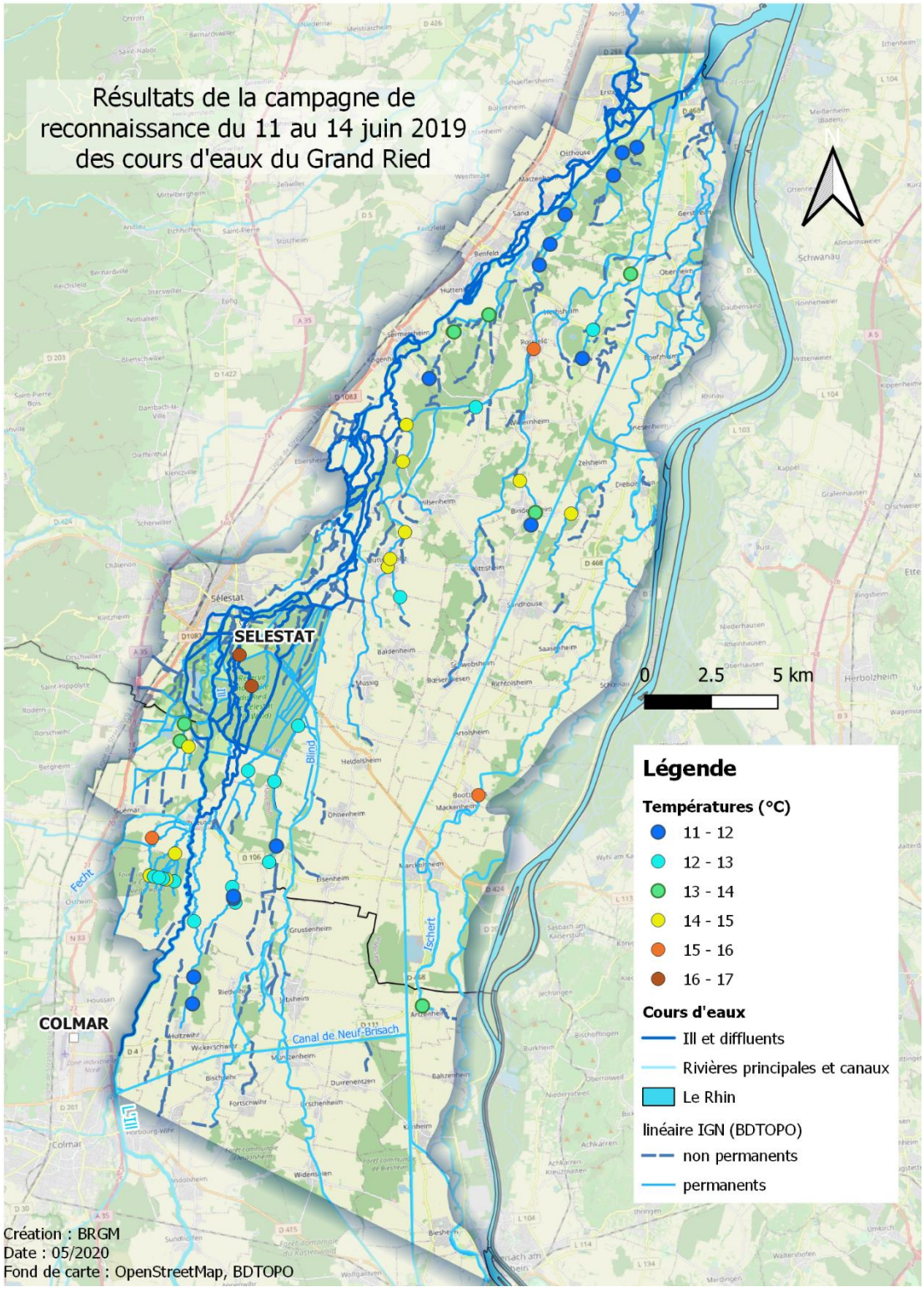


Figure 24 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : températures mesurées sur les cours d'eau

Au niveau des débits (Figure 25) :

- un certain nombre de points reconnus en mai lors des phases de préparation de la campagne ne présentaient plus d'écoulements au moment de la campagne de juin ;
- au niveau du secteur du Niederwald, de nombreux cours d'eau ne présentaient plus d'écoulements ;
- les jaugeages différentiels mettent en évidence des augmentations de débits progressives (sans apport d'autres rivières) sur la grande majorité des cours d'eau illustrant un apport continu de la nappe à ces derniers.

En complément de ces mesures, la reconnaissance des cours d'eau permet de distinguer :

- plusieurs types de nature du lit du cours d'eau (Figure 26) : limon, sables fins et galets de l'aquifère rhénan ;
- deux types de profils d'émergences pouvant alimenter un même cours d'eau en fonction de sa localisation :
    - résurgences diffuses, notamment sur les plus petits cours d'eau,
    - résurgences localisées à majorité sableuses et marquées par la présence de bulles, l'exemple le plus caractéristique étant les sources du Riedbrunnen (Figure 26).

Ces deux types d'émergences sont à relier à des mécanismes différents de résurgences : nappe légèrement artésienne ou simple recoupement topographique.

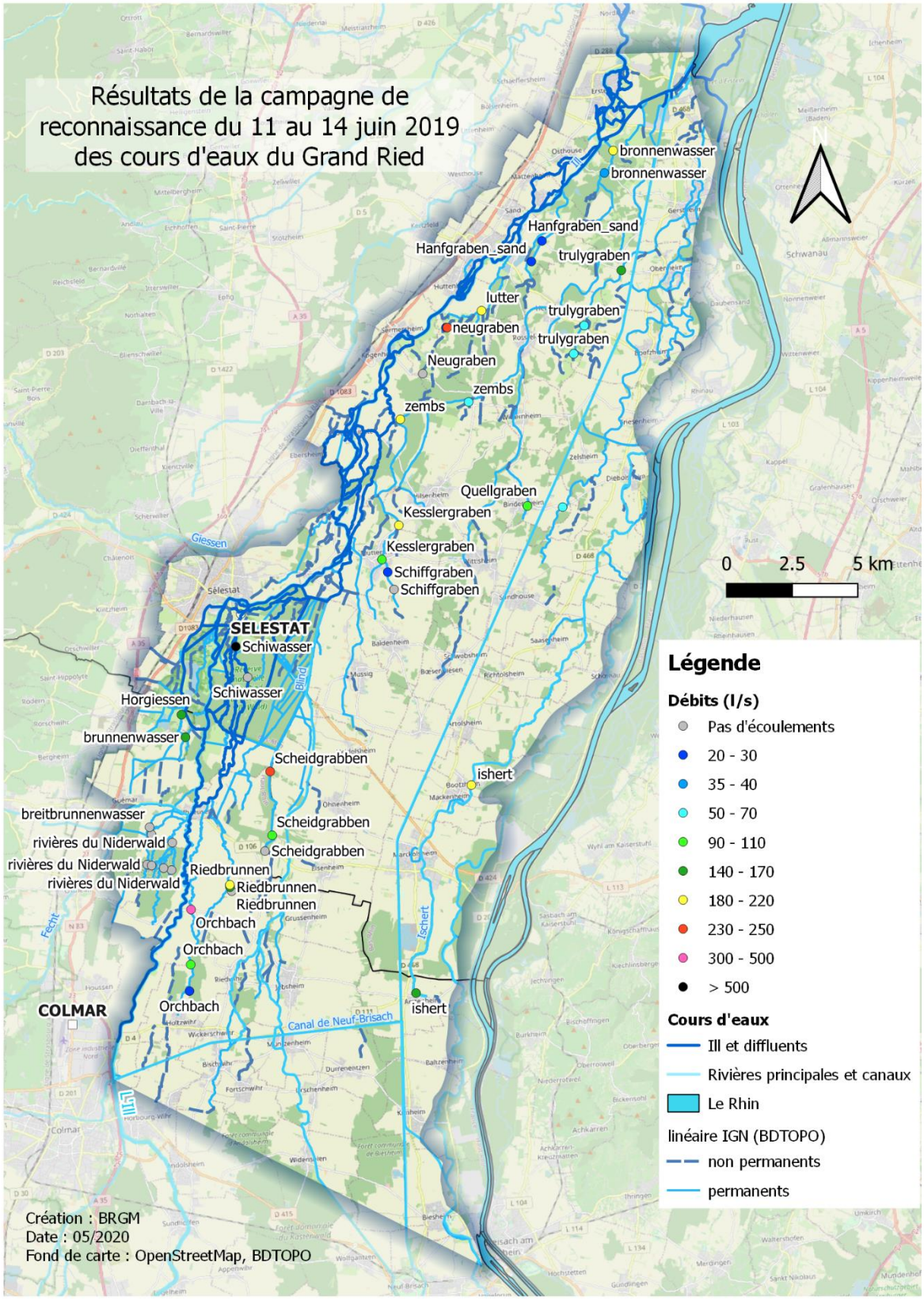
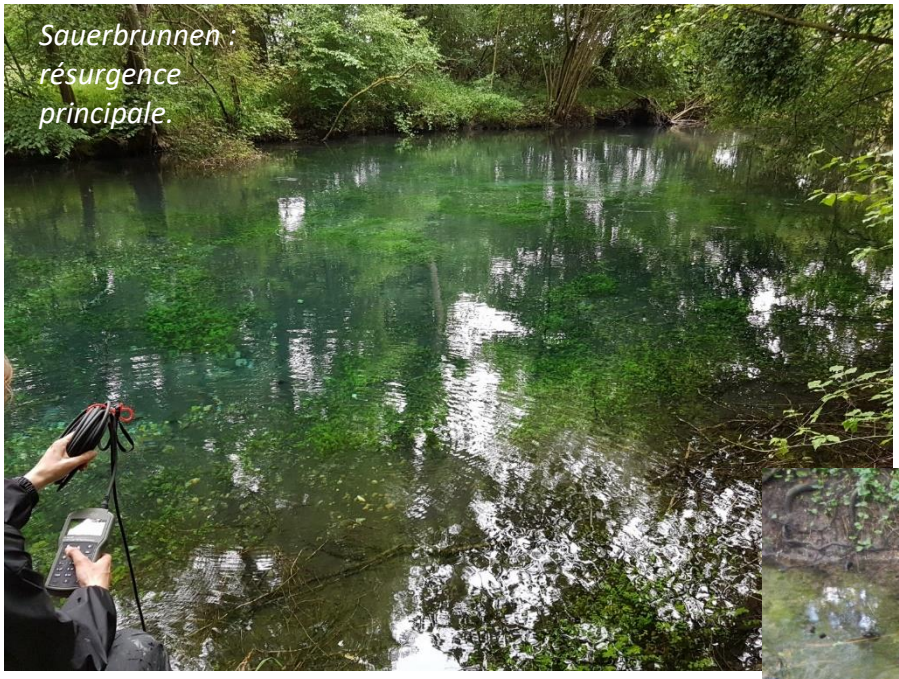


Figure 25 : Résultats de la campagne de reconnaissance du 12 au 14 juin 2019 : débits mesurés sur les cours d'eau.



Sauerbrunnen : résurgence principale.

Horgiessen : banc sableux recouvrant le lit du cours d'eaux.

Bronnenwasser: résurgence diffuse sur fond limoneux argileux.

Bronnenwasser : zone de radier avec galets de l'aquifère rhénan de taille centi à pluricentimétriques.

Riedbrunnen : vasque regroupant une multitude de résurgence sur fond sableux.

Riedbrunnen : détail de résurgences au fond du cours d'eau de types « sources limnocrene ».

Riedbrunnen : premières résurgences diffuses du cours d'eau sur fond de galets de l'aquifère rhénan.

16

Figure 26 : Photographies des différents cours d'eau en juin 2019 : diversité des résurgences et de la nature du fond des cours d'eau.

Profondeur du niveau statique de l'aquifère rhénan en moyennes eaux (mi-juin 2019)

- **Méthodologie et données**

La réalisation de la carte de la profondeur du niveau piézométrique statique a été réalisée à partir de :

- la carte piézométrique interpolée sans les points en rivières. Ce choix a pour effet de lisser la profondeur et limiter les artefacts non maitrisés d'interpolation aux abords des rivières, non représentatifs d'évolutions réelles de la piézométrie ;
- une combinaison des modèles numériques de terrains disponibles sur la région :
  - les MNT « LIDAR » du Domaine de l'Ill et du conseil départemental du Haut Rhin ;
  - le MNT de l'IGN au pas d'un mètre uniquement disponible en bordure du Rhin ;
  - le MNT de l'IGN au pas de cinq mètres venant compléter les zones non couvertes par les autres MNT.

La précision des trois premiers types de MNT est équivalente. Toutefois les traitements appliqués ne sont pas identiques et les bâtiments peuvent avoir été soit corrigées (domaine de l'Ill), soit laissés en intégralité (partie ouest du lidar CD68) soit complétement supprimés sans correction (partie est du lidar CD68).

La précision du MNT de l'IGN au pas de 5 mètres (ou des échelles supérieures) est dégradée avec des variations non représentatives de la réalité de la topographie. L'analyse et l'interprétation de ces secteurs doivent donc être réalisées avec précaution.

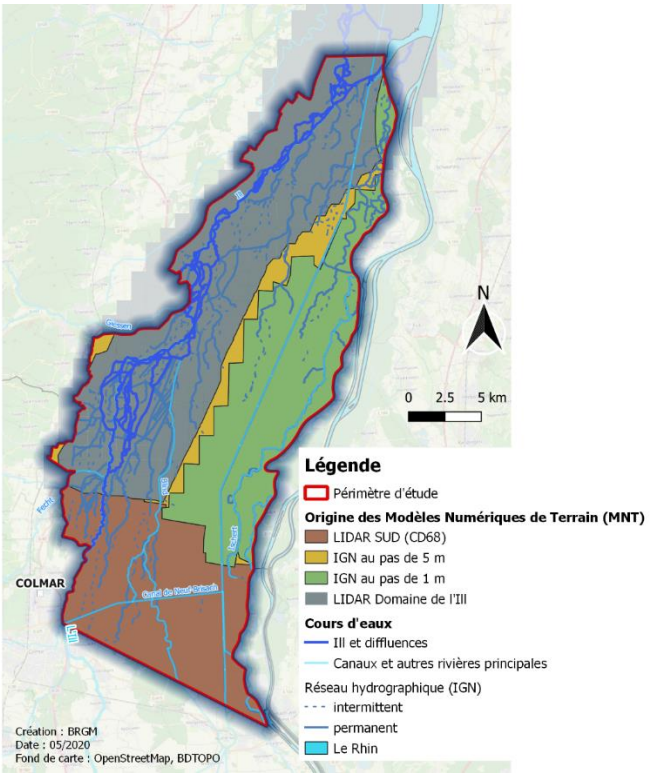


Figure 27 : Localisation de l'orgine des Modèles Numériques de Terrains (MNT) utilisées pour la carte de profondeur.

- **Carte finale et analyse**

Une cartographie en grand format est disponible en annexe 1

La carte des profondeurs permet de visualiser :

- la dépression autour de l'Ill ;
- l'approfondissement de la nappe sur le secteur sud-est et sur les zones de bordures vosgiennes ;
- la coïncidence forte entre le réseau des cours d'eau phréatiques et les zones de faibles profondeurs de la nappe ;
- la présence de paléo-chenaux.

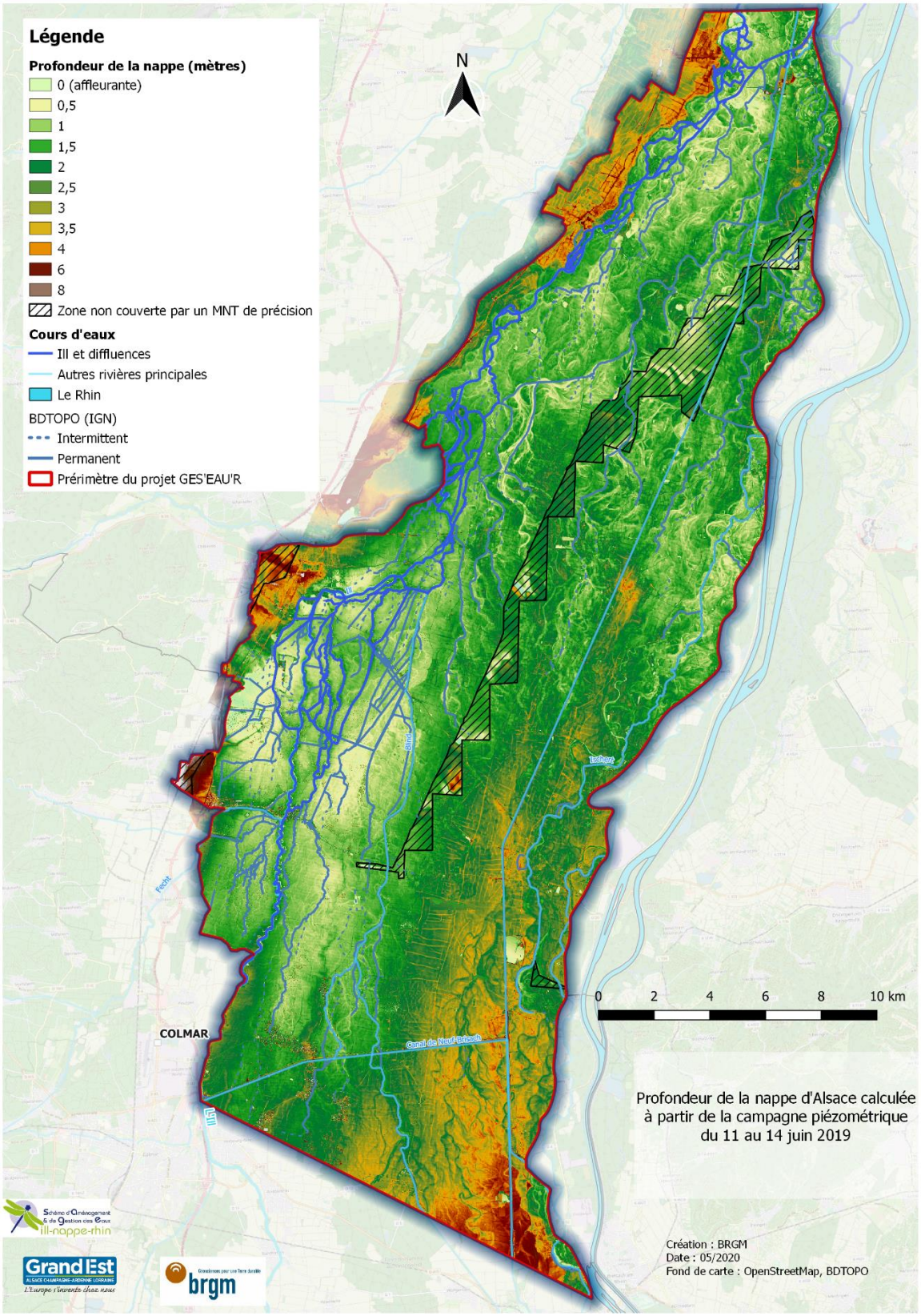


Figure 28 : Profondeur de la nappe d'Alsace à la mi-juin 2019.

3.2.4. Évolution piézométrique et hydrométrique

Piézométrie

L'analyse de la piézométrie a été réalisée au travers :

- de cartographies reportant la baisse de la piézométrie ;
- des corrélations entre chroniques piézométriques.

De manière à pouvoir comparer les différentes évolutions (amplitude et pente des courbes) durant tout l'étiage, la baisse de la piézométrie (ou rabattement) a été calculée en prenant comme point initial la piézométrie au 1er juin 2019 correspondant à une période sans précipitations et représentative d'un niveau avant étiage (cf. Figure 29).

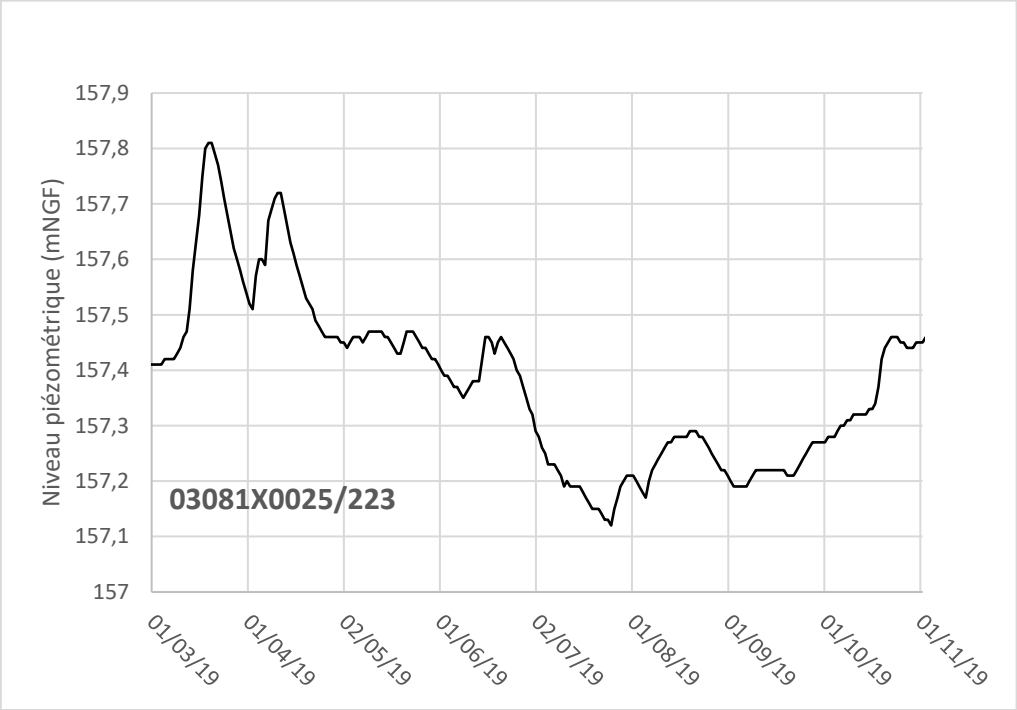
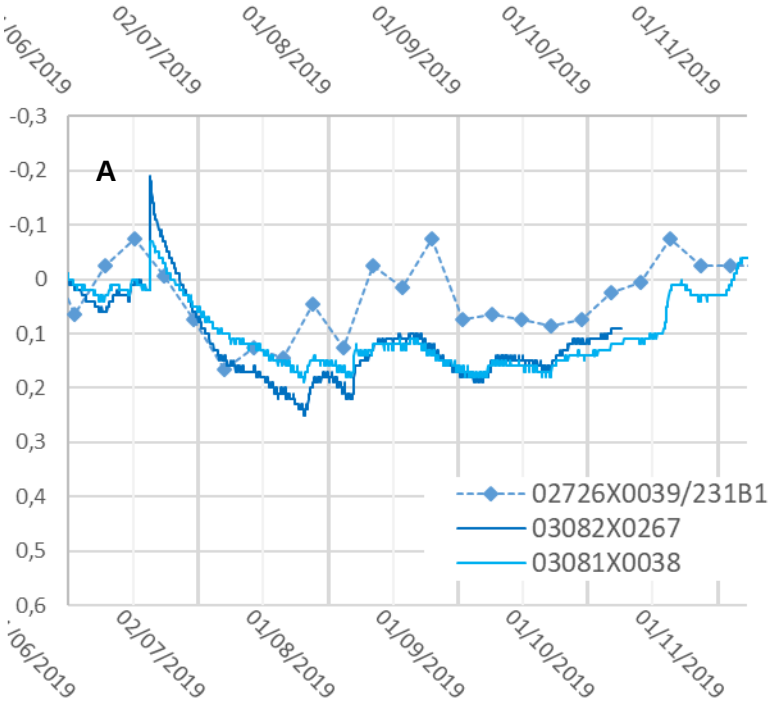


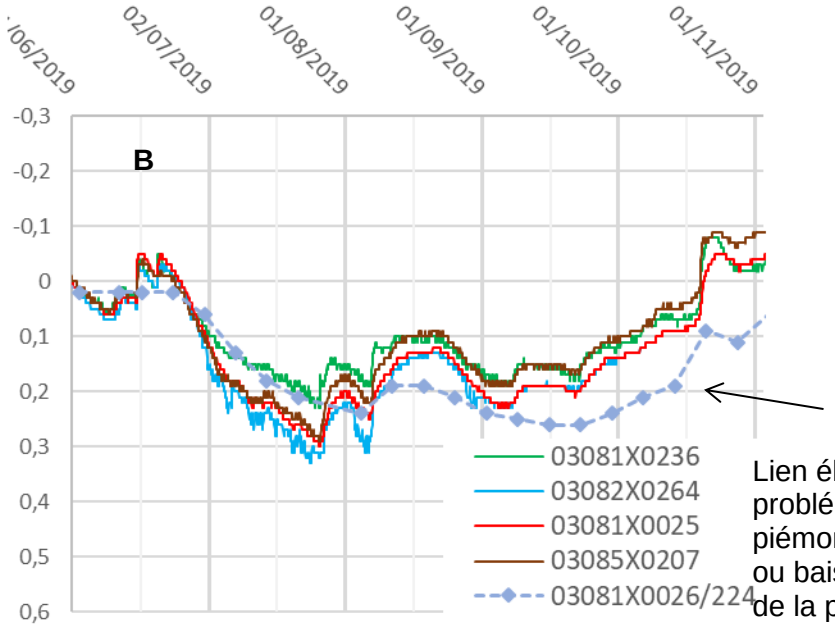
Figure 29 : Évolution annuelle de la piézométrie en 2019 (piézomètre BSH situé à Rossfeld, données journalières validées).

Les courbes piézométriques et les cartographies montrent :

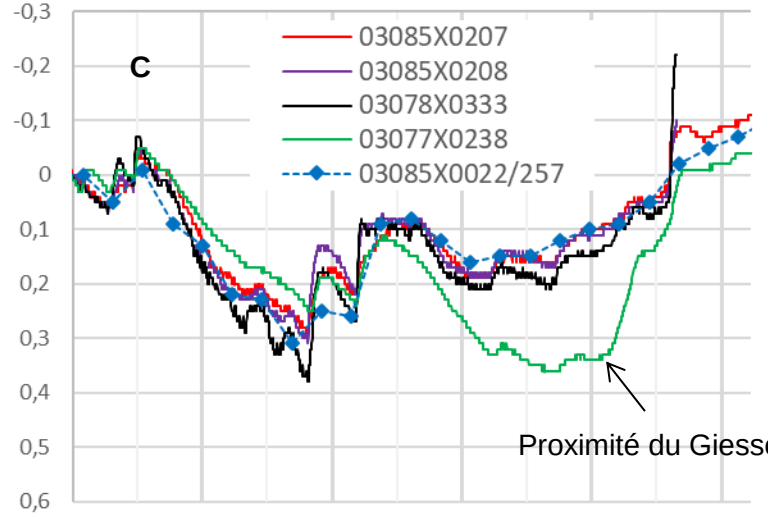
- les influences marquées du Rhin à l'est et de l'Ill à l'ouest avec une inversion des variations piézométriques au niveau du plateau central ;
- une réponse quasi immédiate des piézomètres à proximité de l'Ill aux variations de cette dernière. Les courbes de décroissance des piézomètres sont quasiment identiques à celles de l'Ill impliquant des relations nappes / rivières extrêmement perméables et rapides;
- une baisse limitée de la piézométrie à proximité de l'Ill ;
- une baisse de plus en plus marquée au fur et à mesure de l'éloignement de l'Ill et avant influence du Rhin ;
- une corrélation entre les chroniques des différents piézomètres, avec la distinction de différents secteurs complémentaires à la distinction Ill / Rhin (ouest/est) :

  - un secteur compris entre Witternheim et Erstein,
  - un secteur compris entre la réserve de l'Illwald et Witterhneim,
  - la réserve naturelle de l'Illwald,
  - la zone de plateau enregistrant les plus fortes baisses sur la zone d'étude stricte,
  - le sud de l'Illwald ;
- une forte accentuation de la baisse du niveau piézométrique de fin juin à fin juillet, concomitante avec les fortes chaleurs et la mise en place de l'irrigation pour faire face à la sécheresse ;
- une remontée rapide et de forte amplitude en lien avec les précipitations orageuses enregistrées à la fin du mois de juillet, légèrement décalées entre le sud et le nord de la zone d'étude. À noter qu'une superposition avec un arrêt temporaire de l'irrigation est fortement probable. En effet, une ressemblance forte est présente entre le signal piézométrique enregistré et le comportement typique d'une remontée de niveau après arrêt d'un pompage ;
- la présence de variations intra-journalières au niveau des forêts (Illwald et forêt de Niederwald) dont une partie du signal est régulier et cyclique. L'analyse de ce phénomène est présenté au paragraphe 3.2.7.

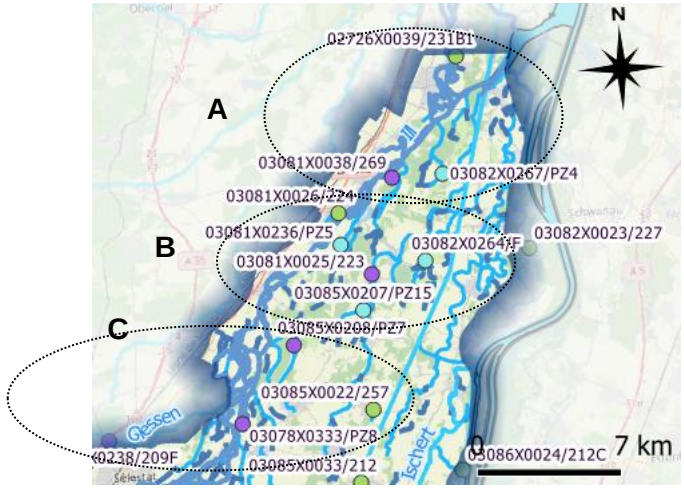


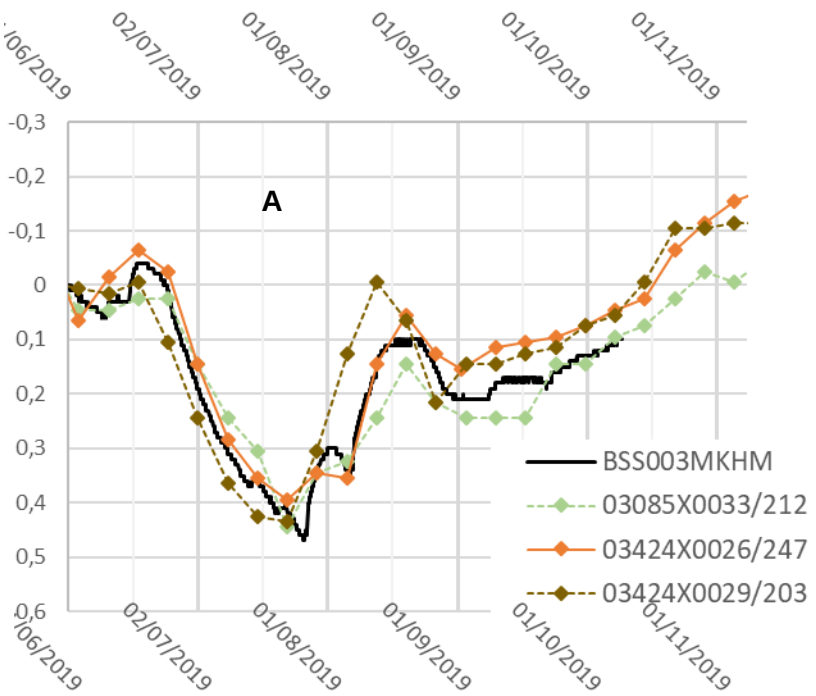


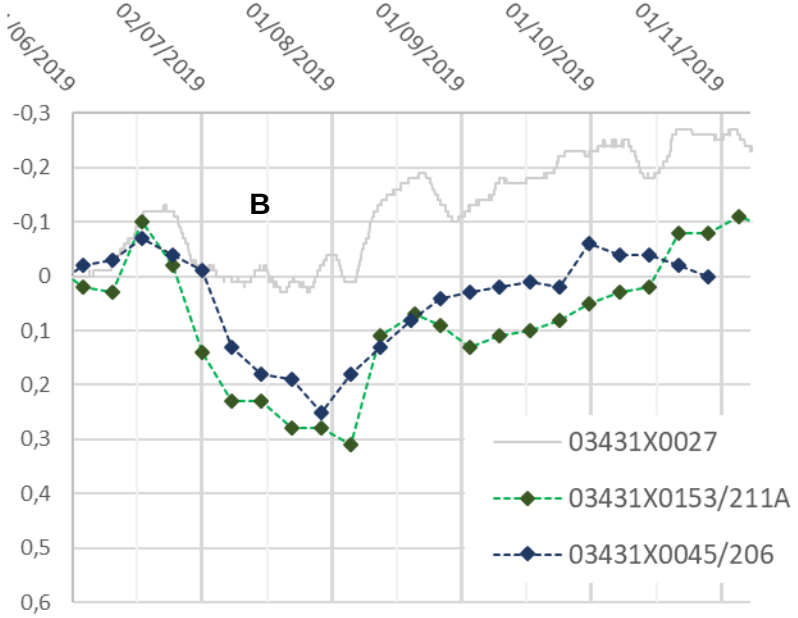
Lien éloigné avec la problématique du piémont (Giessen) ou baisse naturelle de la piézométrie sans effets de l'arrêt des pompages d'irrigation ?

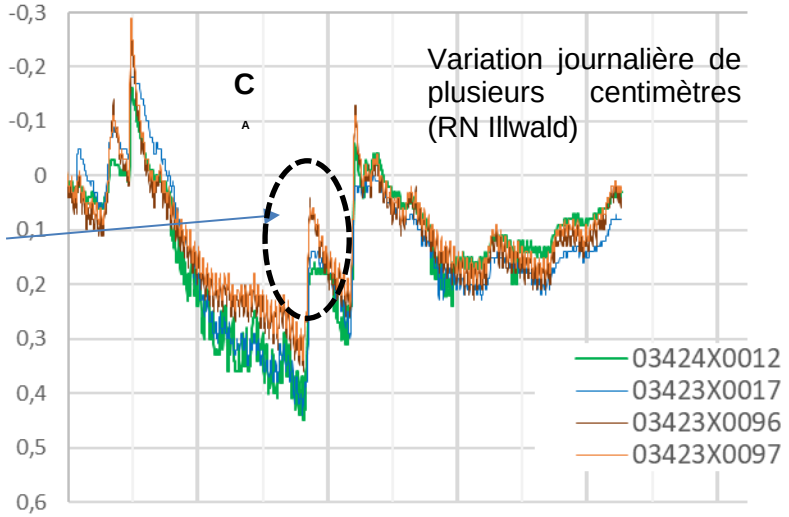


Proximité du Giessen



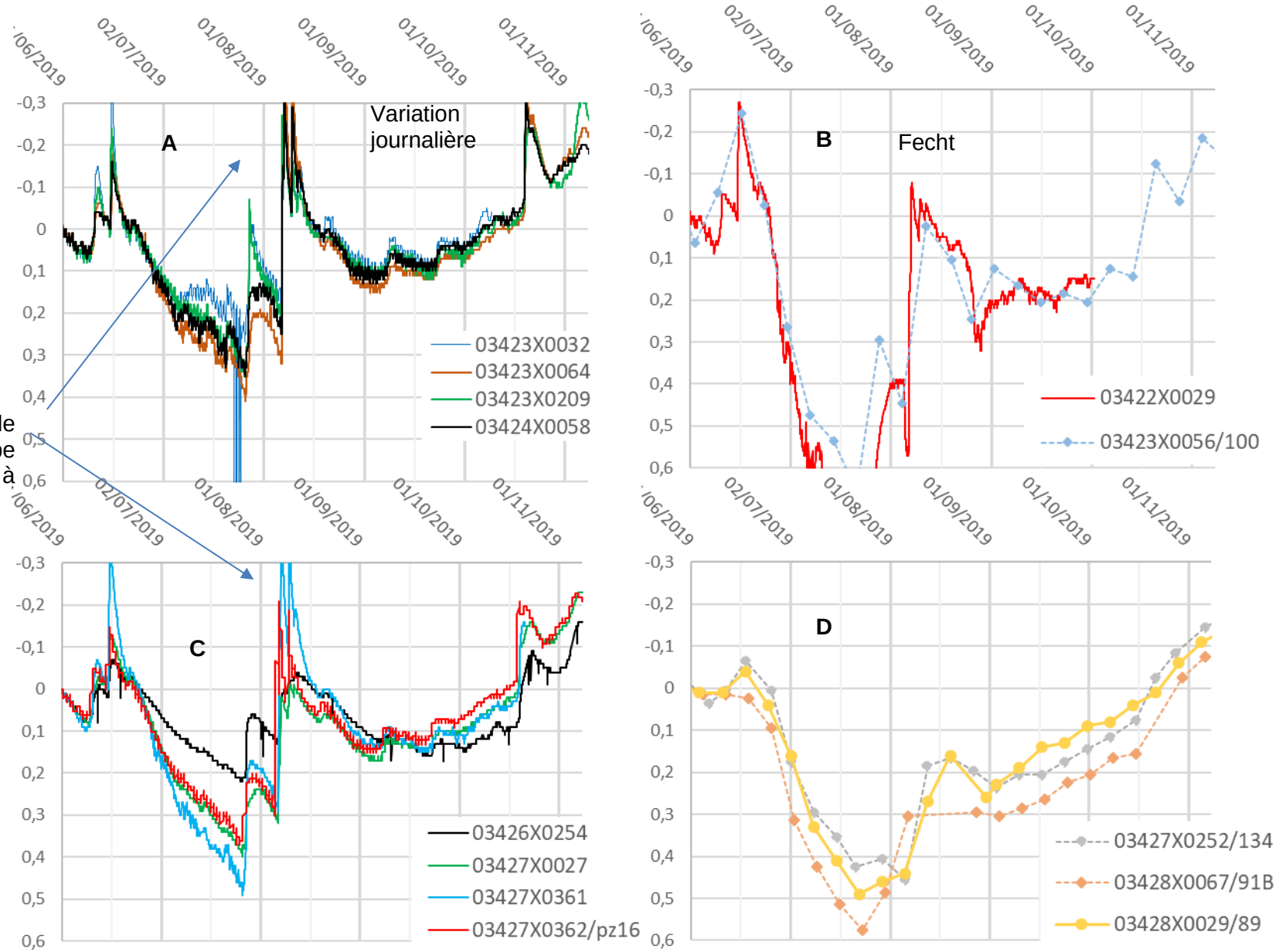






Réaction très rapide de la nappe avec pic à proximité de l'Ill, atténué sur les piézomètres éloignés

Réaction très rapide de la nappe avec pic à proximité de l'Ill



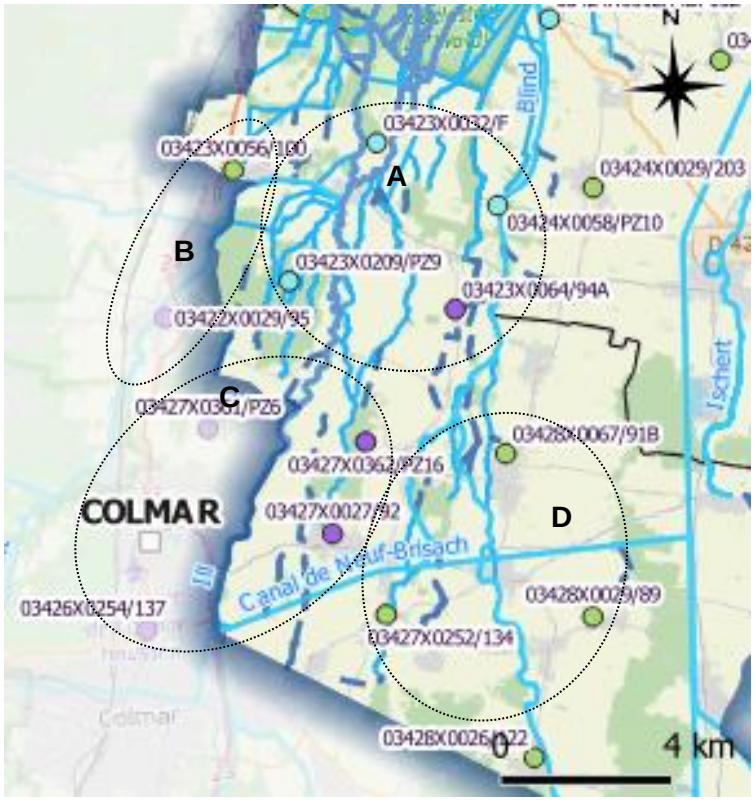


Figure 30 : Regroupement des chroniques piézométriques de l'étiage 2019 par comportements et secteurs.

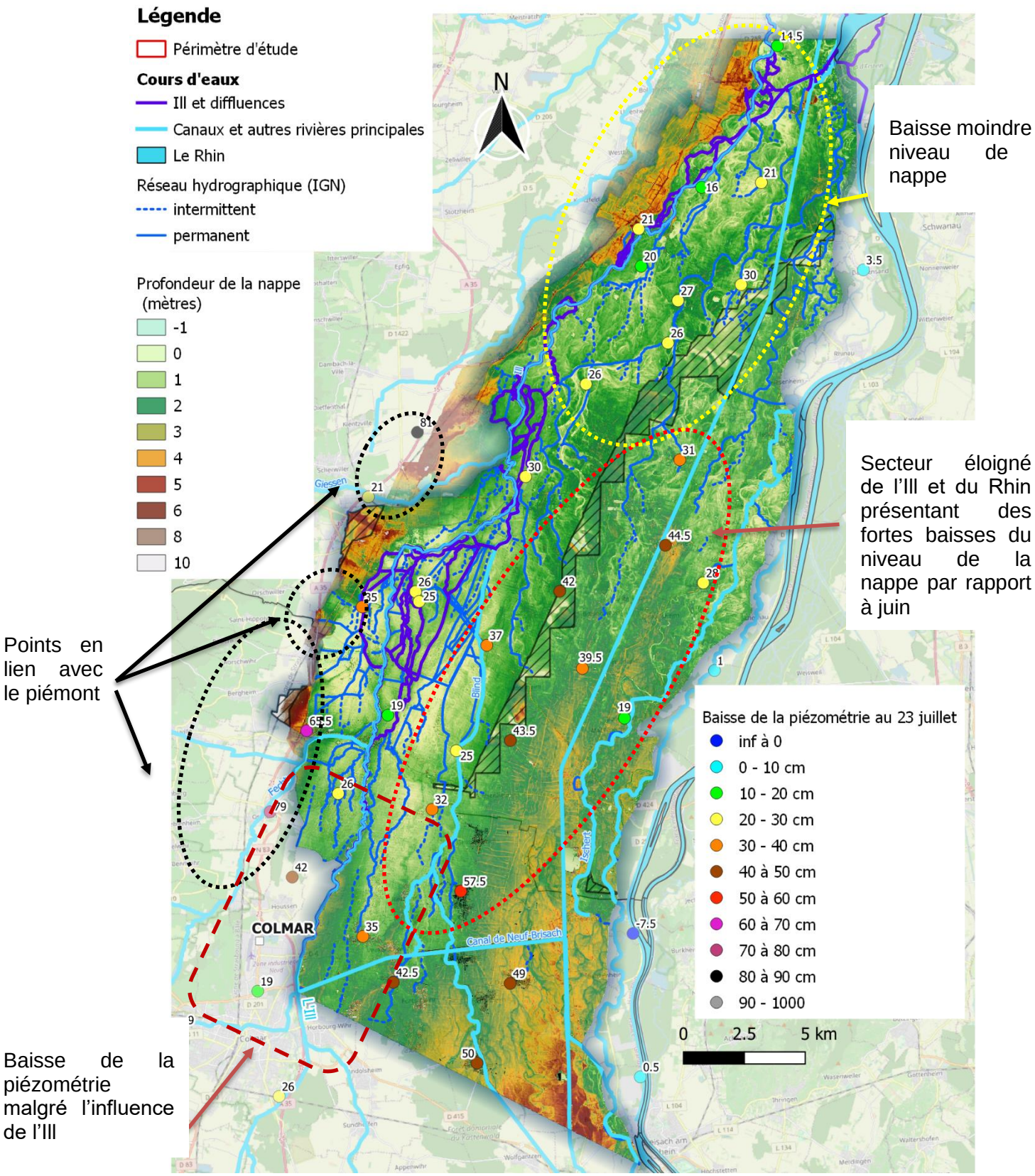
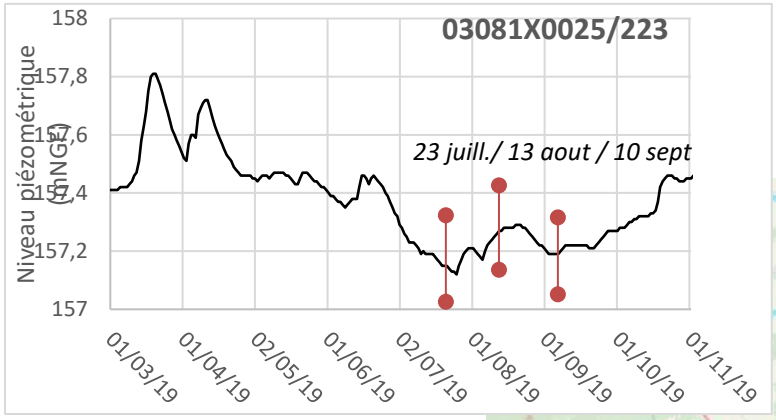


Figure 31: Baisse du niveau piézométrique par rapport au 1er juin à la fin du mois de juillet 2019 (23 juillet 2019).

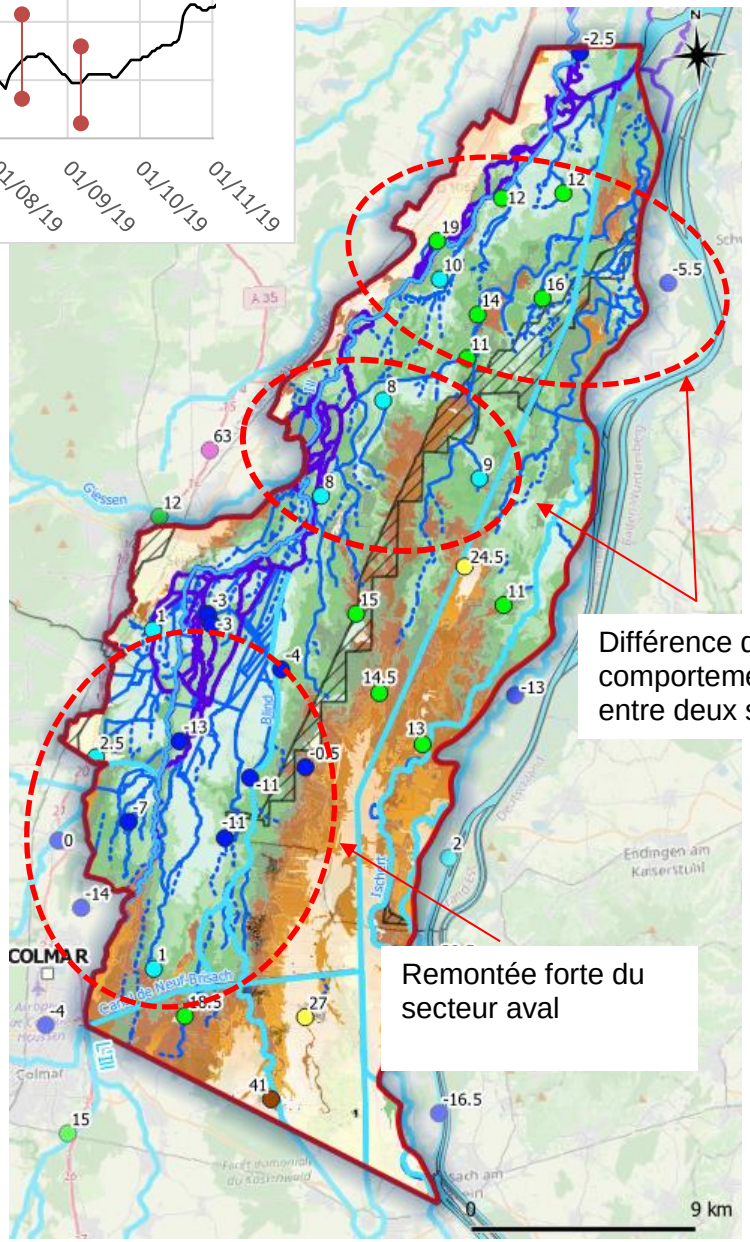


Baisse de la piézométrie

- inf à 0
- 0 - 10 cm
- 10 - 20 cm
- 20 - 30 cm
- 30 - 40 cm
- 40 à 50 cm
- 50 à 60 cm
- 60 à 70 cm
- 70 à 80 cm
- 80 à 90 cm

Figure 32 : Baisse de la piézométrie par rapport au1er juin sur l'ensemble des points de suivi piézométriques enregistrée

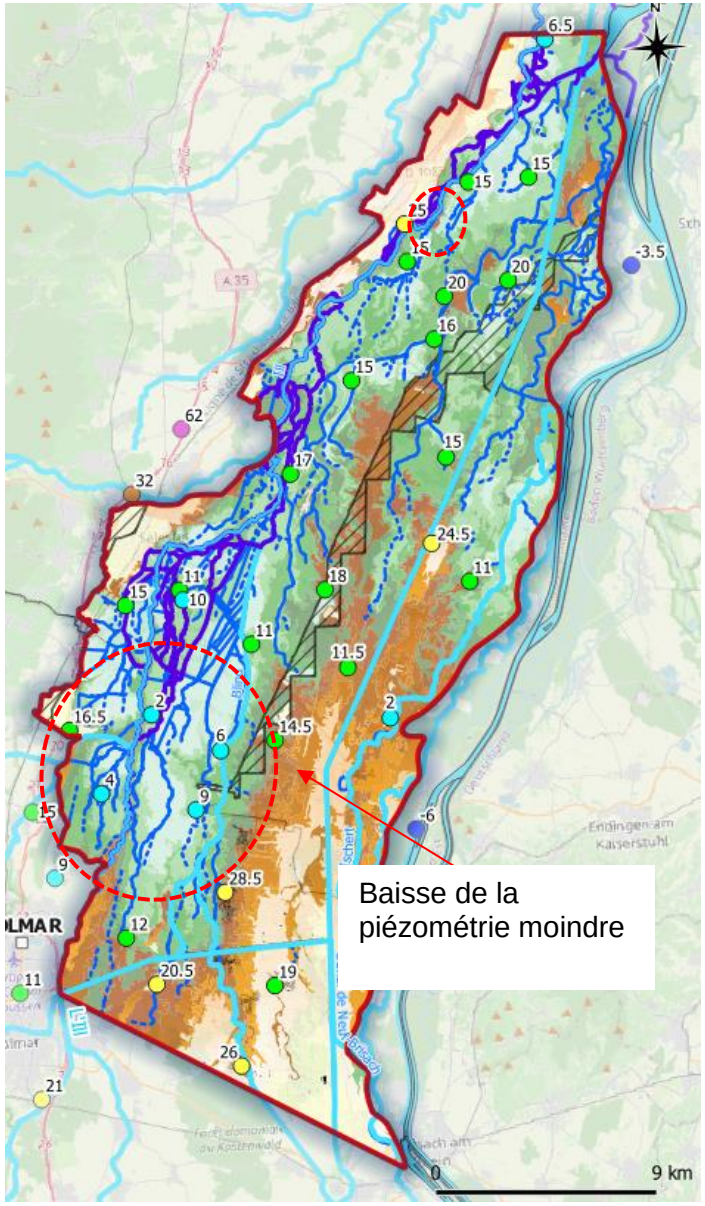
13 août



Différence de comportements entre deux secteurs

Remontée forte du secteur aval

10 septembre



Baisse de la piézométrie moindre

L'Ill

L'Ill est soutenue au niveau de Mulhouse et de Colmar, via le canal de Colmar transportant de l'eau du Rhin (prise d'eau de Bischheim sur le bief de Vogelgrun) et une partie de l'eau dérivée de la Fecht[10]. Au niveau de Colmar, le débit apporté via le canal est estimé à 3 m^3/s par VNF sur les dernières années. Il n'existe pas de précisions sur les périodes de démarrage ou d'arrêt. Les données sont disponibles depuis 2019 avec la mise en place d'une station de mesure par VNF. À noter que les anciennes propositions de conventions originelles portaient sur une valeur de 2 m^3/s, suggérant une augmentation de l'utilisation de ce débit de soutien d'étiage.

À l'aval de la confluence avec la Fecht, la diffluence du Benwasser provoque une chute du débit estimée à environ la moitié de l'écoulement du débit de l'étiage (Sogreah, 2003). Entre la Blind et le Giessen, le Bornen soustrait également du cours de l'Ill en moyenne 1 m^3/s en période d'étiage.

L'Ill est rejointe par la Fecht, la Blind et le Giessen (cours d'eau principaux). La Blind bénéficie aussi d'un soutien d'étiage via le canal de Colmar.

Les trois stations suivantes permettent de suivre l'Ill :

- station Colmar Ladhoff » se situant après le soutien d'étiage de Colmar et à l'amont de la zone d'étude ;
- station « Kogenheim » après la confluence avec les principaux cours d'eau et une grande partie du réseau des phréatiques ;
- station Osthouse, à l'aval de la zone du Grand Ried.

La localisation des trois stations présentes sur le secteur d'étude est disponible sur la Figure 93 disponible en annexe.

L'analyse des courbes sur la période 2019 montre :

- un triplement du débit de l'Ill entre Colmar et Osthouse ;
- les variations en hauteurs d'eau présentent des ordres de grandeurs identiques à celles observées sur les piézomètres ;
- les débits sur Colmar et Osthouse sont influencés par la gestion de l'Ill ;
- le débit au niveau de Colmar est majoritairement lié au soutien d'étiage ;
- le débit au niveau de Kogenheim se décorrèle du débit d'Osthouse durant le mois de juillet.

[10] Informations : DREAL Grand Est / banque hydro - MEEDDAT/DGPR/SRNH

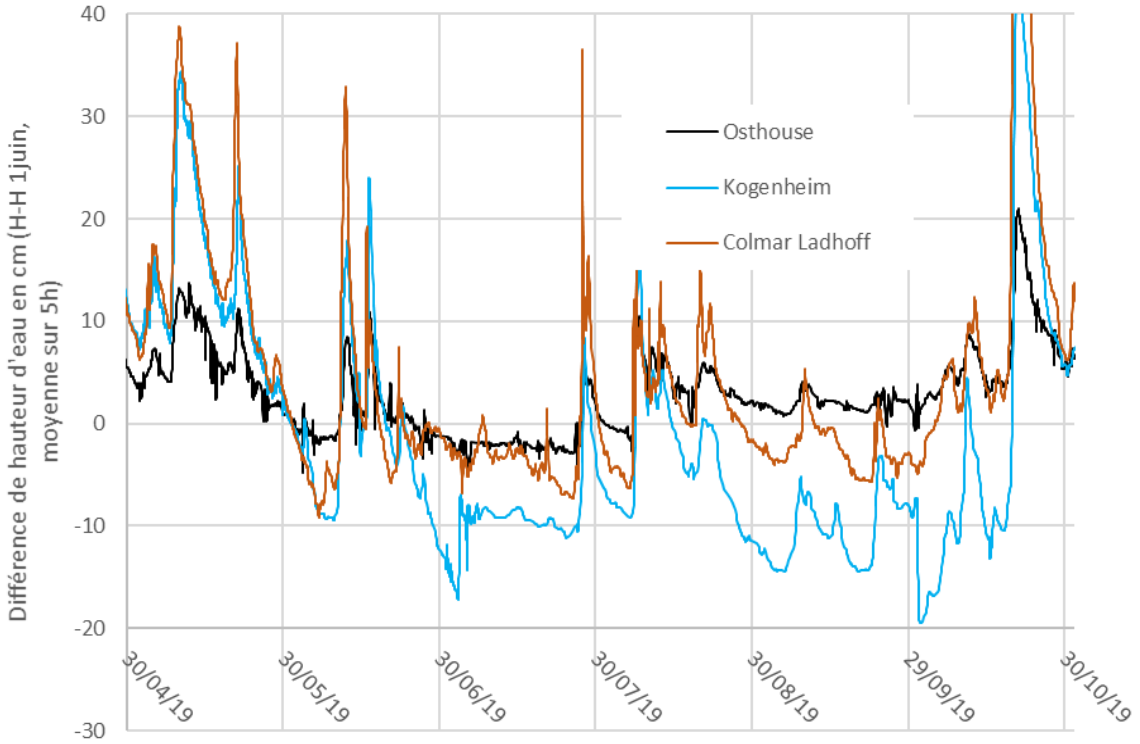


Figure 33 : Chroniques des hauteurs d'eaux mesurées par les stations de la DREAL sur l'Ill (différences avec le niveau du 1 juin 2019).

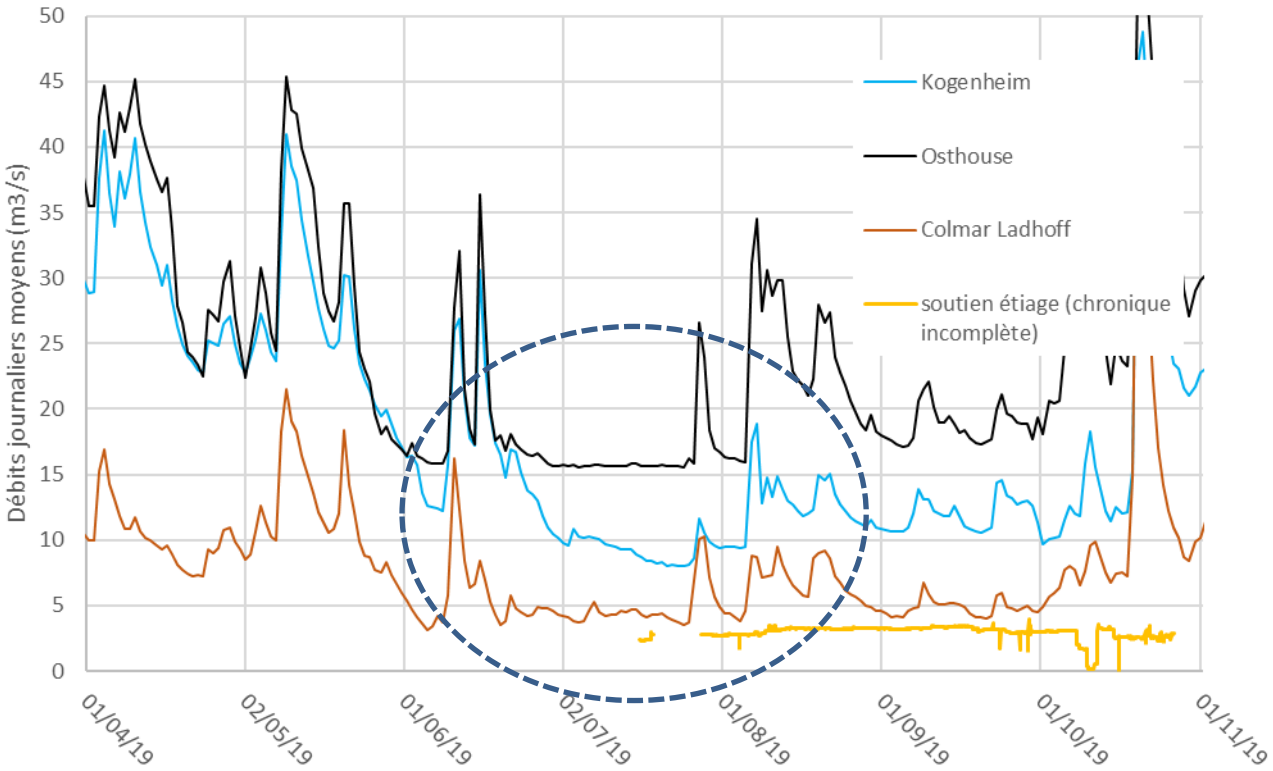


Figure 34 : Chroniques des débits mesurés par les stations de la DREAL sur l'Ill.

Cours d'eaux phréatiques

En raison de la difficulté à réaliser des courbes de tarage dans les cours d'eau phréatiques, les mesures d'hauteurs d'eaux sont privilégiées sur les cours d'eau phréatiques.

L'évolution de la Zembs est marquée par une forte baisse vers la fin juin se poursuivant jusqu'à la fin juillet et l'apparition des précipitations conséquentes de la mi-août. La période de septembre est marquée par un niveau relativement stable malgré l'absence de précipitations, et un niveau supérieur à celui de la mi-juillet.

Au niveau des sondes positionnées au sud de l'Illwald, le démarrage des enregistrements n'a pas permis l'enregistrement des phases de décharges et/ou de pompage estivales. On constate toutefois :

- une similarité forte de comportement entre le Scheidgraben et le ruisseau des Erlen ;
- des variations journalières allant jusqu'à plusieurs centimètres.

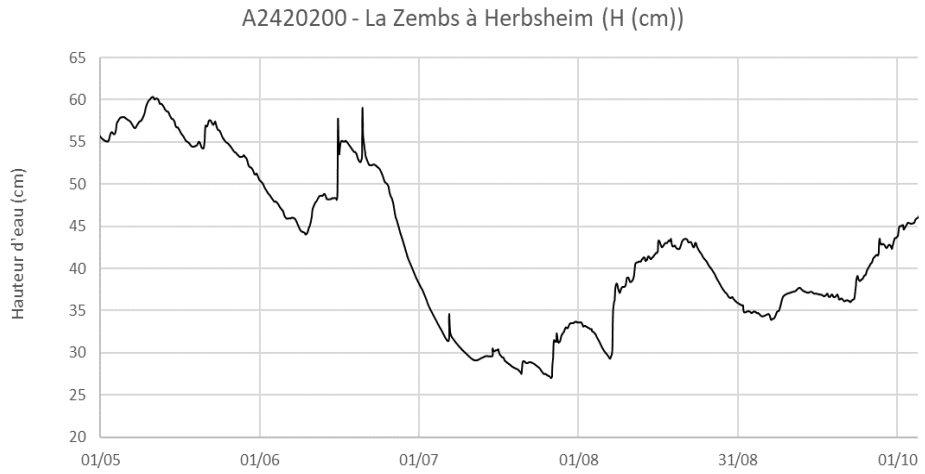


Figure 35 : Évolution des hauteurs d'eaux mesurées sur la Zembs durant l'étiage 2019.

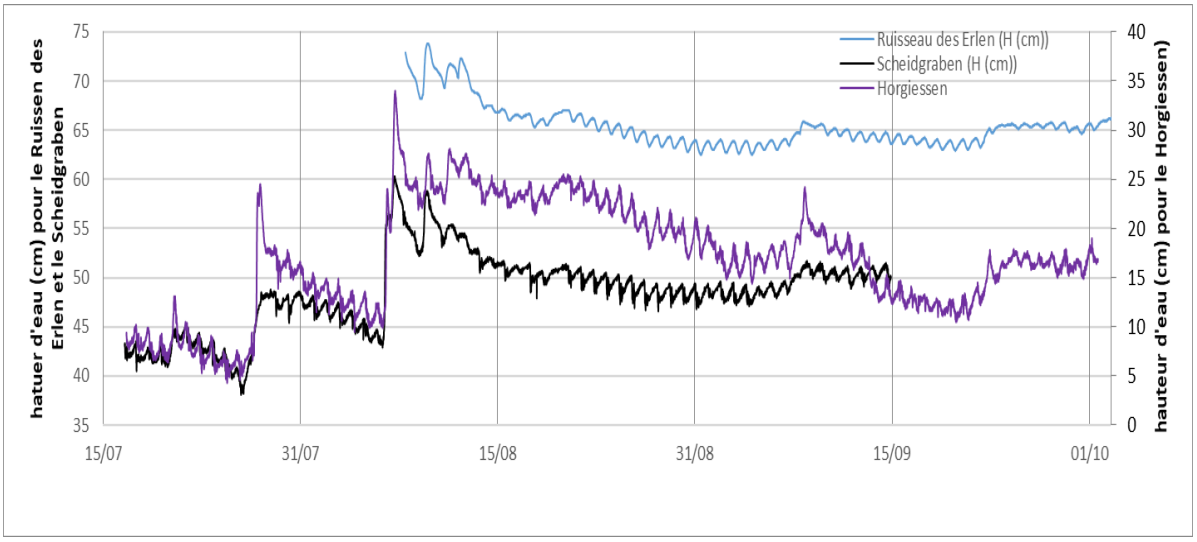


Figure 36 : Évolution des hauteurs d'eaux dans les cours d'eau phréatiques au sud de l'Illwald durant l'étiage 2019.

Réseau ONDE et observations de l'OFB

De manière à compléter le réseau ONDE, l'AFB 67 et 68 ont réalisé des observations complémentaires durant l'été 2019. La localisation des points d'observation, intitulés stations « GESEAUR », est présentée sur la Figure 37 et de manière détaillée sur les cartes en annexes. Les résultats sont reportés suivant la nomenclature ONDE dans le Tableau 5 soit :

- 1= Écoulement visible : correspond à une station présentant un écoulement continu – écoulement permanent et visible à l'œil nu ;
- 2= Écoulement non visible: correspond à une station sur laquelle le lit mineur présente toujours de l'eau mais le débit est nul. Cette modalité correspond aux situations où soit, l'eau est présente sur toute la station mais il n'y a pas de courant (grandes zones lentiques), soit il ne reste que quelques flaques sur plus de la moitié du linéaire ;
- 3= Assec: correspond à une station à sec, où l'eau est totalement évaporée ou infiltrée sur plus de 50 % de la station ;
- 4= Observation impossible: en raison de conditions exceptionnelles (accessibilité, modification des conditions environnementales propres à la station, etc.).

La localisation des stations sur le secteur d'étude est disponible sur la Figure 93, disponible en annexe.

Les observations par cours d'eau sont les suivantes :

- la majorité des cours d'eau situés dans la partie nord de la zone d'étude n'ont pas présenté de dégradation forte en dehors du Rankgraben à la fin juillet. Le Lehgraben se situe à proximité d'un étang. Il est donc soumis à une potentielle gestion de ce dernier. Sa représentativité semble donc peu fiable ;
- au niveau des points de suivi au sud de l'Illwald :
  - la quasi intégralité des cours d'eau suivis se sont asséchés début juillet,
  - les précipitations fin juillet n'ont pas permis de retrouver un écoulement dans les cours d'eau asséchés (Erlen Brunnenwasser),
  - un écoulement a été de nouveau visible sur la majorité des cours d'eau début septembre,
  - l'Orbach, le ruisseau des Erlen et le Scheidgraben, ruisseaux phréatiques correspondant à une gamme de débit moyenne à haute, ont eu soit des assecs, (Erlen amont) soit une baisse du débit conséquente en juillet. La baisse après les précipitations de la fin juillet est plus modérée.

	25/06/19	10/07/19	25/07/19	13/08/19	27/08/19	02/09/19	10/09/2019	24/09/19	30/09/19	08/10/19
Bergenbach	1a	sec	3	3	sec	3	3	3	3	3
Hochgiessen	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a	1a
Brunnwasser	1a	3	3	3	3	1a	1a	1a	1a	1a
Erlen	1a	1a	3	3	3	1a	1a	1a	1a	1a
Canardière	1a	3	3	3	3	3	1a	1a	3	1a
Brunnenwasser affluent	1a	3	3	3	3	3	3	3	3	1a
Brunnenwasser Gué	1a	3	3	3	1a	1a	1a	1a	1a	1a

Tableau 5 : Résultats selon la classification ONDE du suivi des cours d'eau dans le département du Haut Rhin.

	25/07/2019	26/08/2019	10/09/2019	26/09/2019
Bronnwasser	1A	1A	1A	1A
Hanfgraben	1A	1A	1A	1A
Trulygraben	1A	1A	1A	1A
Quellgraben	1A	1A	1A	1A
Rankgraben	1F	1A	1A	1A
Lehgraben	*3*	*3*	*3*	*3*
Laufgraben	1A	1A	1A	1A
Kesselgraben	1F	1A	1A	1A
Schiffgraben	3	1A	1A	1A
Bruchgraben	1F	1A	1A	1A

Tableau 6 : Résultats selon la classification ONDE du suivi des cours d'eau dans le département du Bas Rhin.

Les données ONDE sur le sud de l'Illwald ont été complétées par des mesures ponctuelles de débits réalisées par l'OFB68 :

Dates	Brunnenwasser	Orbach	Riedbrunnen	Scheidgraben
18 juin 2019	123 l/s	217 l/s	Non mesuré	Non mesuré
9 juillet 2019	à sec	51 l/s	228 l/s	104 l/s
23 juillet 2019	à sec	28 l/s	208 l/s	70 l/s
8 août 2019	275 l/s	184 l/s	432 l/s	434 l/s
27 août 2019	37 l/s	85 l/s	178 l/s	297 l/s
10 sept. 2019	35 l/s	89 l/s	318 l/s	196 l/s
24 sept. 2019	28 l/s	80 l/s	287 l/s	180 l/s
8 octobre 2019	45 l/s	83 l/s	318 l/s	190 l/s

Tableau 7 : Données de débits ponctuelles sur les cours d'eau aux sud de l'Illwald (données OFB).

Le laboratoire LIVE a réalisé durant l'été 2019 un suivi rapproché de certains cours d'eau phréatiques, dont notamment le Neugraben. Ce suivi permet notamment de disposer d'une temporalité plus fine de l'asséchement ou de la remise en eau des cours d'eau. Pour l'étiage 2019, trois points ont pu être observés en assecs complets sur les dates suivantes :

- Neugraben : 11 -26 juillet, 6 aout, 4 – 9 septembre ;
- Schiffgraben : 22 - 26 juillet ;
- Kesslergraben : 24 -26 juillet.

3.2.5. Comparaison des évolutions piézométrie / cours d'eau

Chaque évolution de cours d'eau a été comparée à une évolution de la piézométrie en utilisant les points de mesures les plus proches.

Ainsi, du nord au sud de la zone d'étude :

- aucun assec n'a été observé sur le Trulygraben, sur le réseau ONDE et sur le point d'observation complémentaire. Ce résultat est cohérent avec la baisse de la piézométrie dans le secteur, qui a été modérée en 2019 ;

- au niveau du Neugraben, les observations des assecs du LIVE apportent les éléments suivants :
  - une situation complexe en raison de :
    1. la proximité de l'Ill ;
    2. l'influence possible de la baisse de la piézométrie et du débit du Giessen qui pourrait s'étendre sur cette zone ;
  - une correspondance est présente avec le piézomètre (hebdomadaire) 03081X0026/224. Toutefois, le pas de temps d'acquisition de ce piézomètre ne permet pas une analyse fine du phénomène,
  - les assecs observés en septembre ne correspondent pas à la baisse globale estimée par le piézomètre de Rossfeld. Cette observation renforce l'hypothèse d'un comportement des eaux souterraines en lien avec l'Ill à différencier sur cette zone ;
- au niveau du Quellegraben et toute la partie proche du canal, aucun assec n'est observé. La période de plus bas niveau se situe à la fin juillet ;
- au niveau du Kesslergraben et du Shiffgraben, les périodes d'observations des assecs par le LIVE coïncident avec les niveaux piézométriques les plus bas observés sur le piézomètre de Rossfeld ;
- au sud de la réserve naturelle de l'Illwald :
  - les niveaux piézométriques correspondant début juillet à l'apparition des assecs ont été retrouvés après les précipitations de fin juillet. Les assecs ont donc perduré jusqu'à la fin août,
  - **le ruisseau des Erlen et le Brunennwasser, ont retrouvé un écoulement sur deux points d'observations de l'OFB tout début septembre en l'absence de toutes précipitations,**
  - la piézométrie globale est légèrement remontée à partir de début septembre, après la remise en eau du ruisseau des Erlen et du Brunnenwasser.

Figure 37 : Carte de localisation des points de suivi ONDE et des suivis complémentaires.

3.2.6. Estimation de la baisse piézométrique induite par les prélèvements dans l'aquifère rhénan

Développement de la méthodologie : contexte et hypothèse

Le manque de données précises sur les volumes prélevés, la localisation des prélèvements agricoles, mais aussi la méconnaissance des débits réels entrants dans le bassin versant via la recharge naturelle, les différents soutiens d'étiage, auquel on peut ajouter des fortes incertitudes sur l'ETP impliquent une trop forte incertitude à ce stade de connaissances, pour appliquer les méthodes usuelles de bilan (entrées/sorties) permettant de reproduire et analyser l'évolution de la piézométrie à l'échelle de la zone d'étude.

Pour pallier à cette problématique, une adaptation d'outils développés pour le suivi de la sécheresse hydrogéologique (Manceau, 2020)[11] a été testée lors de ce projet, notamment l'utilisation des courbes de décharges (courbe de décroissance piézométrique). Lors d'une première phase de tests, le travail a été réalisé avec pour objectif de réaliser des courbes prévisionnelles du comportement de la piézométrie qui aurait permis de compléter les indicateurs piézométriques. ***Ce test méthodologique a été négatif en raison du caractère trop fortement influencé en période d'étiage des chroniques piézométriques***.

Un deuxième test a consisté à repréciser les courbes de décharges et leurs caractéristiques sur la zone d'étude. L'objectif est cette fois de comparer les niveaux réels observées aux courbes théoriques de décharge des eaux souterraines. Bien que ne permettant pas de calculer le volume prélevé cette méthodologie permet d'estimer la baisse piézométrique liés aux prélèvements (non discriminés) durant l'étiage et peut constituer un outil complémentaire pour la gestion prévisionnelle des prélèvements.

Les paramètres des courbes de décharges « types » ont pu être estimés sur sept chroniques piézométriques au pas de temps journalier présentes sur la zone d'étude (Figure 38). Ces chroniques disposent des caractéristiques suffisantes au regard du traitement automatique de la donnée, soit :

- un pas de temps de la mesure suffisant au regard de la dynamique de la nappe ;
- une chronique suffisamment longue pour être représentative ;
- l'enregistrement de périodes non influencées (ou peu) permettant de caler et obtenir les paramètres de la courbe de décharge.

En raison de la dynamique rapide de la nappe dans le secteur, les chroniques basées sur des données au pas hebdomadaire ne sont pas exploitables car ce pas de temps ne permet pas de suivre les phénomènes de décharges.

De plus, la sélection automatique des périodes de décharges sur les chroniques piézométriques de la zone d'étude ne peut pas se faire sur les période estivales (Figure 39) les chroniques étant trop influencées sur cette période. Notamment, le niveau piézométrique estival n'a pas pu être calculé sur ces périodes et a été estimée pour certaines courbes à partir de l'analyse visuelle des chroniques.

Les courbes de décharges de l'étiage 2019 ont été construites en utilisant la formule et les paramètres suivants :

$$h(t) \sim h_{base} + (h_0 - h_{base}) * e^{\left(\frac{-\ln(2)}{T_{1/2}}\right) * t}$$

Avec :

$T_{1/2}$: demi période (sélection automatique)

h_{base} : niveau piézométrique de base *adapté visuellement sur la période estivale*

h_0 : niveau piézométrique au niveau de la période de décharge simulée

[11] Projet réalisé par le BRGM pour le compte de DREAL Grand Est (Manceau JC, Allier D, Buscarlet E (2020) – Analyse de la sécheresse hydrogéologique dans la région Grand-Est – Phase 2 : amélioration des indicateurs de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69867-FR, 89 p., 27 ill.,3 ann.)

Figure 38 : Localisation des points de mesures permettant le calcul d'une courbe de décharge.

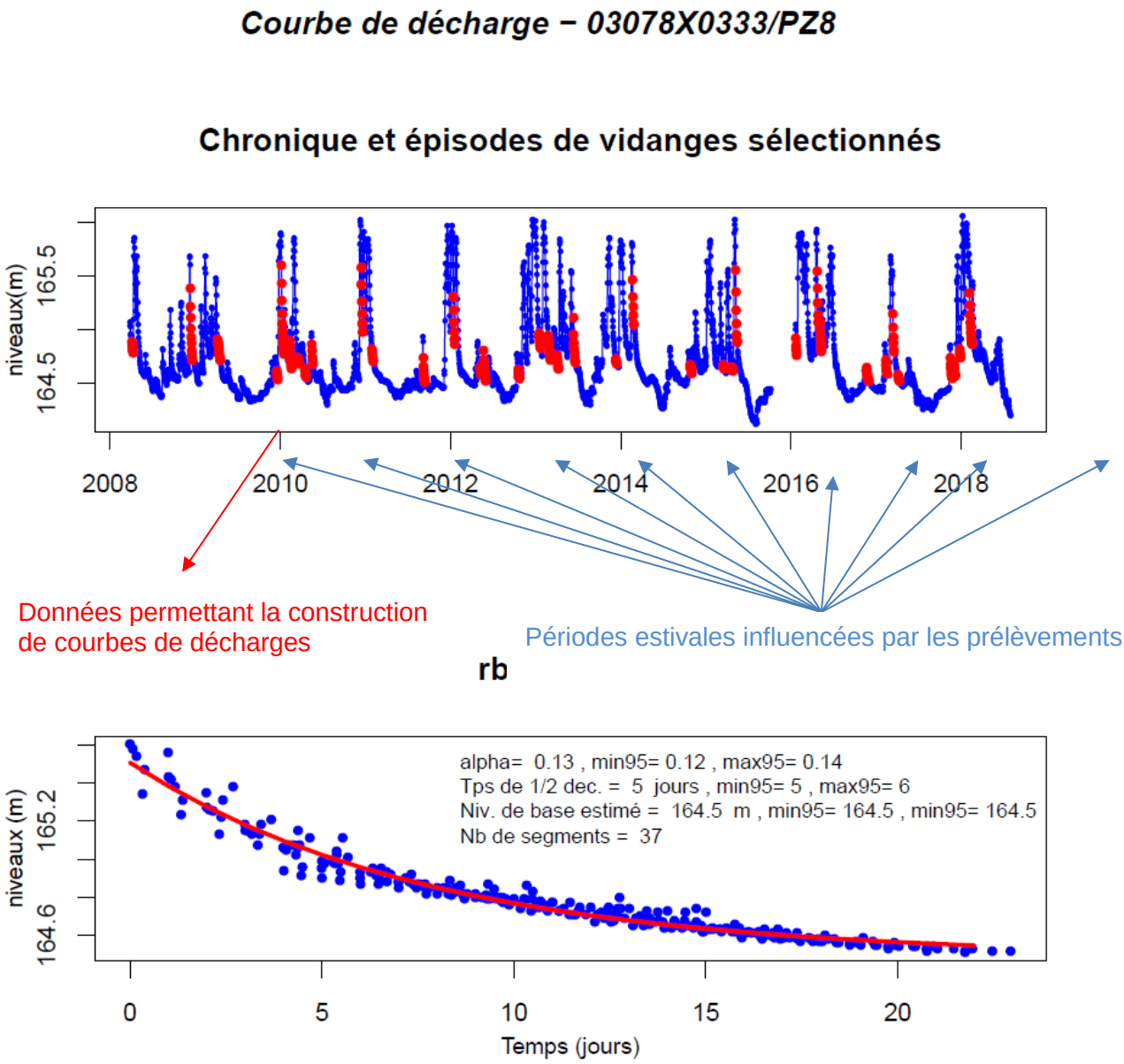


Figure 39 : Exemple de calage de la courbe de décharge (Piézomètre 03078X0333/pz8).

Résultats

La baisse du niveau piézométrique mesurée en 2019 à partir du mois de juin et sur la période estivale est due en grande partie aux prélèvements sur les piézomètres analysés sur la zone d'étude, bien que la nappe continue de se vidanger naturellement vers ses exutoires.

En effet, l'effet des prélèvements est distinct sur la période entre la mi-juin et les orages de fin juillet / début aout. La perception du début de l'irrigation se fait via une accélération de la baisse de la piézométrie qui se différencie d'une vidange naturelle de la nappe pour cette période. Bien que les conditions hydrodynamiques ne soient pas identiques (redémarrage de l'écoulement d'une partie des cours d'eaux notamment), on peut ensuite observer une stabilisation en septembre 2019, alors que ce mois est toujours en fort déficit pluviométrique. La sécheresse se prolonge (absence de recharge des eaux souterraine) jusqu'à début octobre. Le niveau obtenu à cette période a par ailleurs été utilisé sur certains piézomètres pour estimer un niveau de base dans le calage des courbes de décharge.

Cette analyse montre aussi l'absence de modification significative de l'évolution de la piézométrie en dehors de la période estivale.

Sur la période de l'irrigation, malgré l'incertitude pouvant être présente sur certains paramètres, la comparaison entre les courbes théoriques de décharge sans prélèvements et les données mesurées permet d'établir un ordre de grandeur de la part liée aux prélèvements dans la baisse de la piézométrie. Elle est systématiquement supérieure à 30 % et peut atteindre 70 % au droit de certains piézomètres sur la période comprise entre le 20 juin et le 20 juillet. Ces chiffres sont toutefois à prendre avec précaution. La détermination des courbes de décharge est encore en cours de développement et cette approche peut générer une incertitude sur les pourcentages déduits.

Le détail par piézomètre pour la période comprise entre le 20 juin et le 20 juillet est disponible ci-après.

Piézomètres	Localisation	**Baisse réelle (cm)**	**Baisse théorique naturelle (cm)**	**Ratio lié aux prélèvements**
03077X0238/209F	*Proximité du Giesen, ouest de l'Ill (hors zone étude)*	22	12	45 %
03078X0333/PZ8	*Proximité de l'Ill, rive est*	32	9	72 %
03081X0025/223	*Nord de la zone d'étude, à l'est de l'Ill (piézomètre BSH)*	30	18	40 %
03081X0038/269	*Proximité de l'Ill, rive ouest*	22	10,6	52 %
03085X0208/PZ7	*Proximité de l'Ill, rive ouest*	27	19	30 %
03422X0029/95	*Est de l'Ill (hors zone d'étude)*	86	24	72 %
03423X0017/209C	*Proximité de l'Ill, rive est*	44	27	39 %
03423X0064/94A	*Sud de la zone d'étude, à l'est de l'Ill*	32	8	75 %
03426X0254/137	*Ville de Colmar (hors zone d'étude)*	21	14	33 %

Tableau 8 : Ordres de grandeurs des baisses piézométriques liées aux prélèvements.

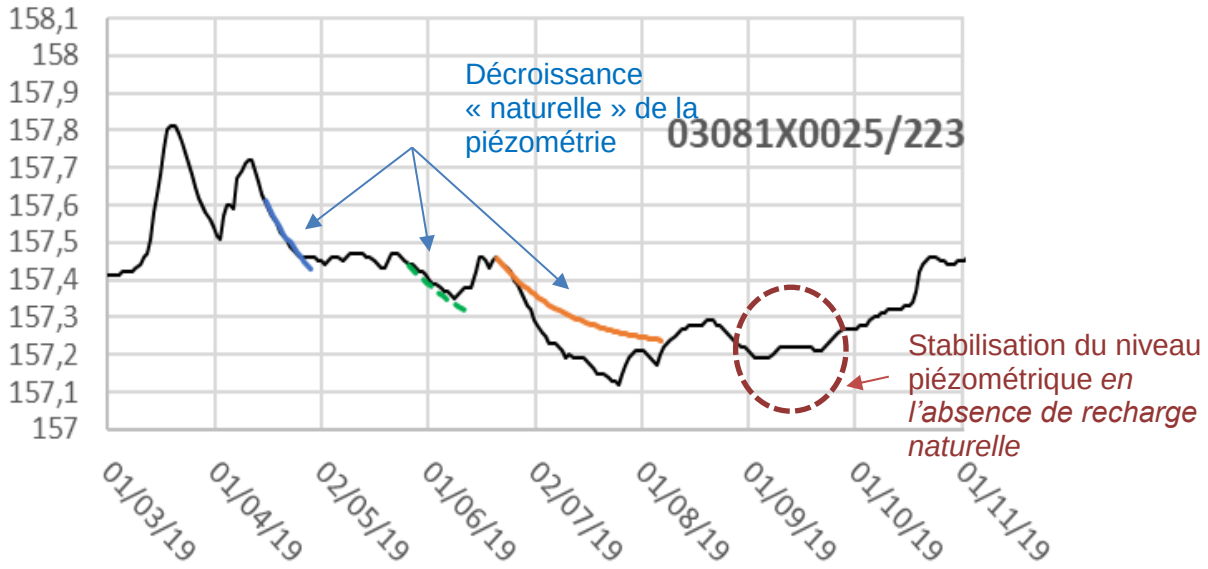


Figure 40 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : exemple de lecture du graphique sur le piézomètre 03081X0025/23 (Rossfeld).

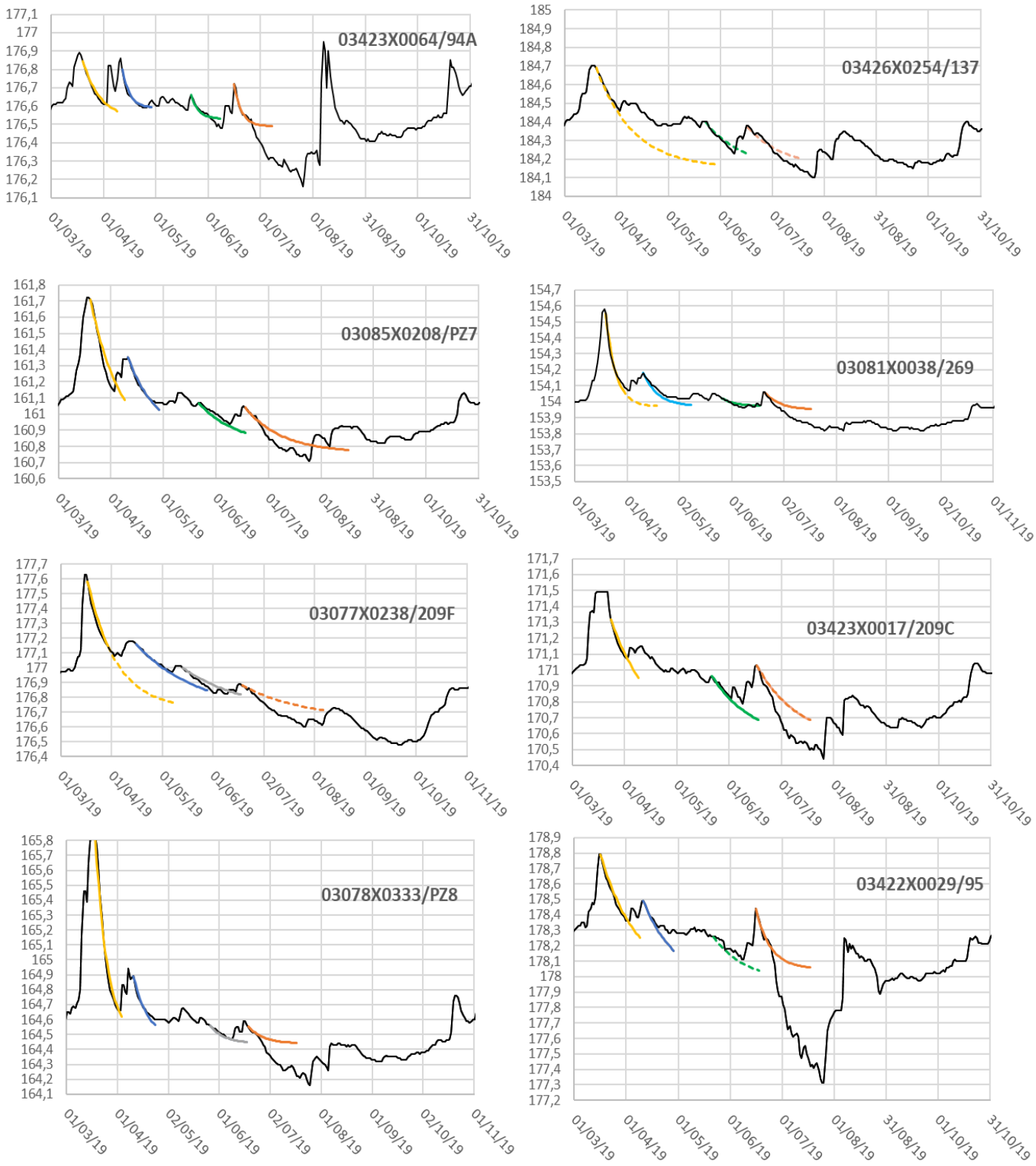


Figure 41 : Comparaison entre la baisse piézométrique théorique sans prélèvements et les données mesurées sur les piézomètres : résultats sur les piézomètres les moins influencés.

3.2.7. Interprétation des variations journalières de la piézométrie et des cours d'eau phréatiques

Observations

Des variations journalières pluri-centimétriques ont été mesurées sur une partie des chroniques piézométriques. Ces variations semblent être constituées de deux signaux :

- des variations irrégulières, certainement liés à des activités anthropiques (prélèvements, influence de gravières, travaux sur des cours d'eau, rejets journaliers …) ;
- des variations régulières, de type sinusoïdal dont l'origine est plus indirecte.

Les variations irrégulières informent du caractère influencé du piézomètre et permettent de suivre les différents impacts locaux des prélèvements. Vu leur localisation, ce sont soit des prélèvements à majorité agricole soit l'influence de canaux / étangs avec des vannes régulées très fréquemment.

Les variations régulières ont été observées et confirmées lors de la réalisation des essais de pompage fin septembre 2019 avec des sondes de précisions millimétriques. L'amplitude observée était alors de 0,5 cm à 1 cm soit en dessous de la précision mesurable par les sondes du réseau piézométrique usuel (précision centimétrique). Ce phénomène pourrait être par conséquent plus étendu dans l'année et dans la répartition géographique sans qu'il soit possible avec les données disponibles de le confirmer. Les plus fortes amplitudes sont observées dans les piézomètres situés à proximité des zones forestières : celle de l'Illwald mais aussi celle du Niederwald. Ce phénomène est aussi très nettement visible sur les mesures des hauteurs d'eau des cours d'eau phréatiques situés en bordure de la forêt de l'Illwald.

Le signal observé se décompose un peu différemment suivant les points de mesures. Toutefois la synchronicité parfaite permet de relier à une même origine les phénomènes observés.

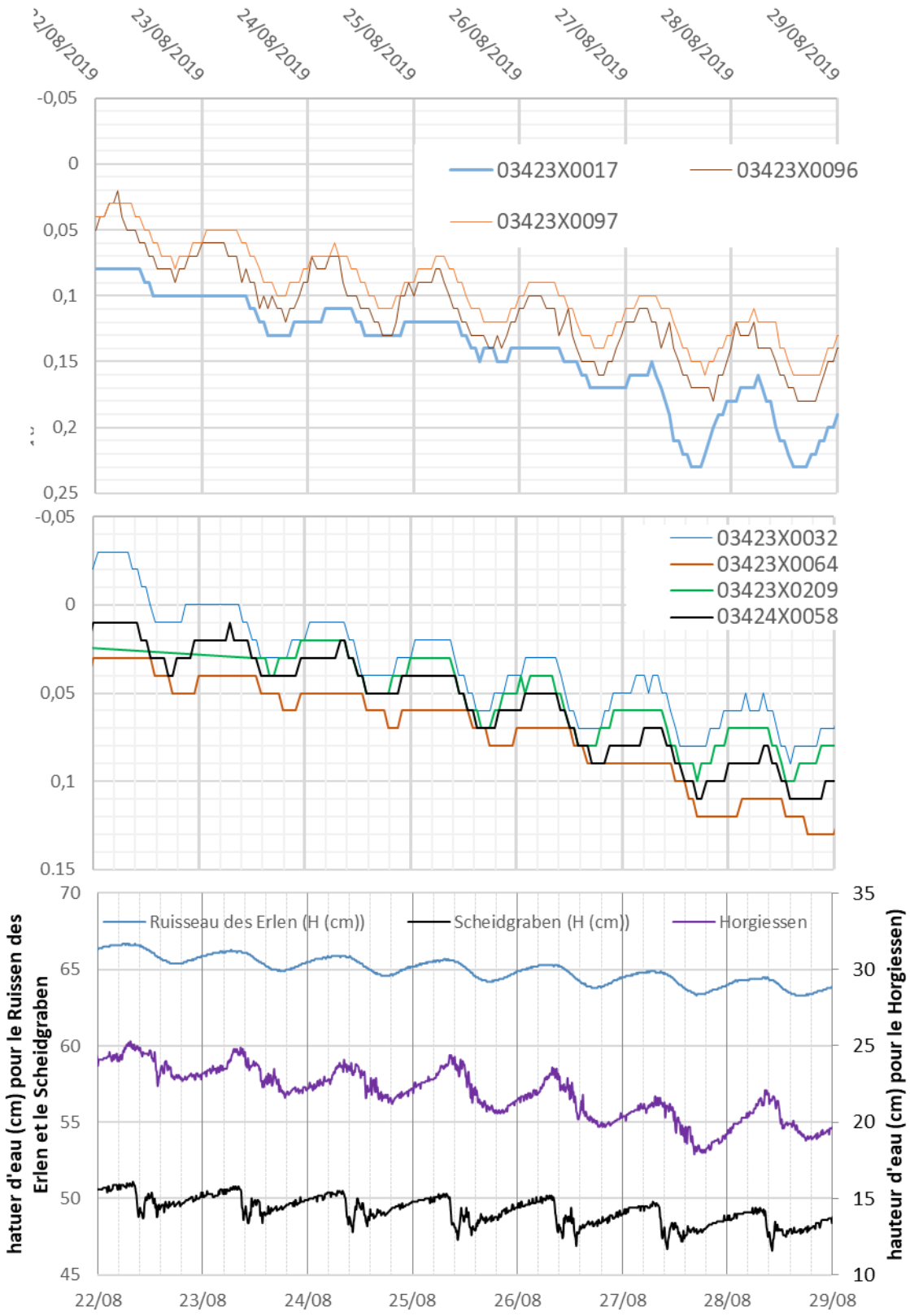


Figure 42 : Variations journalières régulières observées sur les piézomètres et les cours d'eau phréatiques.

Analyse et hypothèse

Le caractère extrêmement régulier permet d'écarter l'effet des prélèvements. En effet, l'irrigation à cette période peut se prolonger la nuit (communication orale de la CA Alsace et constatation visuelle).

Ce phénomène a déjà été analysé sur les cours d'eau sur des régions estuaires ou d'autres contextes. La principale hypothèse formulée, après avoir écarté toute influence des capteurs, est un lien avec l'évapotranspiration ou les marées terrestres. Or ; l'hypothèse d'une influence par l'évapotranspiration est privilégiée en raison de la coïncidence entre les périodes de croissance des plantes et/ou températures et l'apparition des oscillations journalières. Des oscillations liées aux marées terrestres seraient a priori visibles sur l'intégralité de l'année et leurs amplitudes indépendantes de la période estivale ou de la croissance des plantes.

Toutefois, des questionnements forts restent sur le phénomène de l'évapotranspiration. En effet :

- l'évapotranspiration réelle et potentielle ne permettrait à priori pas de reproduire la régularité observée ;
- durant les essais de pompage réalisés à l'automne à proximité des sources du Riedbrunnen, il y aurait une anticorrélation à un « prélèvement d'eau » dans l'aquifère via l'évapotranspiration : la hauteur d'eau est maximum à midi et le minimum vers minuit.

Une approche simplifiée des différents mécanismes en jeu a été réalisée de manière à analyser le phénomène réel de l'évapotranspiration et son lien potentiel avec le niveau piézométrique.

Des études ont été réalisées sur le comportement des racines et leur lieu de prélèvement. De manière générale, que ce soit pour les forêts ou les plantes, les racines se situent au-dessus du niveau de la nappe. Pour une comparaison proche, les racines de la forêt de l'ile de Rhinau se situe entre 50 et 60 centimètres (Sanchez, 2008).

En première approche, les périodes de besoins en eau des plantes à une période infra journalière dépendent en premier lieu de l'apport en lumière puis de la température, avec la possibilité lors de chaleurs excessives de fermeture des stomates entrainant un arrêt de la transpiration.

Sur les arbres, plus spécifiquement le mécanisme de transpiration et de montée de la sève correspond à :

- un flux nul la nuit ;
- un flux maximum vers la mi-journée puis une décroissance.

Cette observation pourrait coïncider avec les mesures réalisées durant les essais de pompage, mais semble en décalage sur certaines périodes d'observations sur les cours d'eau en période estivale. Sur ces derniers, le lien avec la lumière / et ou la température semblerait plus pertinent, un travail complémentaire serait à réaliser sur une corrélation plus fine avec la forme des signaux (triangulaires ou sinusoïdal) et l'amplitude.

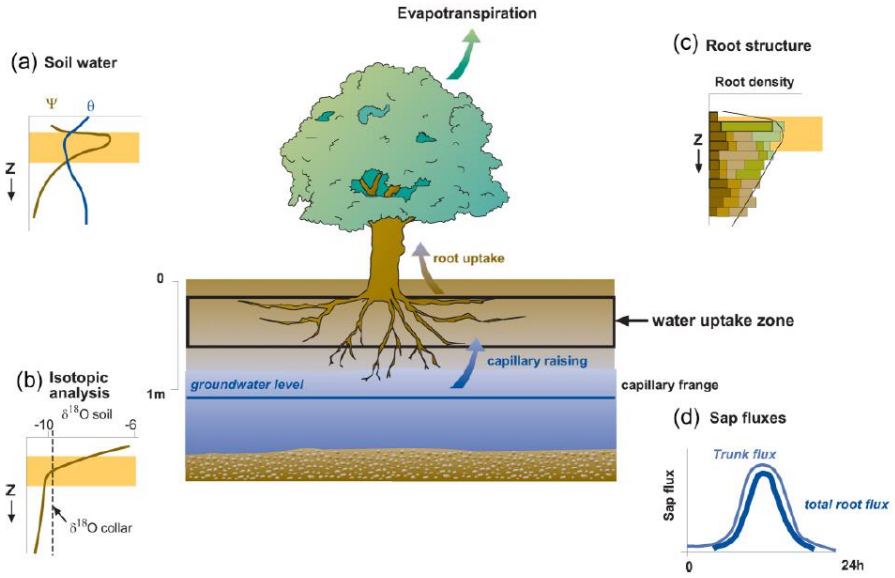


Figure 43 : Schéma du prélèvement en eau d'une forêt alluviale (extrait de Sanchez 2008).

a) profil hydrique dans le sol b) profil de la concentration isotopique en δO18 c) densité racinaire en fonction de la profondeur du sol d) flux de sève dans le tronc et les racins sur un cycle de 24 heures

En deuxième point, l'évaluation de la hauteur de la remontée capillaire estimée par les formules les plus usitées (Terzaghi et Peck, 1967 par exemple) sont entre 1 centimètre au sein de galets/graviers et peuvent aller jusqu'à des valeurs extrêmes comme 10 mètres en milieu argileux. La mise en place d'un phénomène de légère remontée de la frange capillaire semble donc possible sur la base des données observées à l'automne durant les essais de pompage. Toutefois, il reste une inconnue sur l'impact que cela pourrait engendrer sur le niveau piézométrique (remontée du niveau ?). Dans tous les cas ce phénomène va dépendre :

- la constitution de la forêt ;
- de la position du niveau piézométrique par rapport à la profondeur racinaire.

En conclusion :

- il semble exclu de relier simplement les variations piézométriques à un volume d'eau souterraine prélevé par évapotranspiration réelle en raison de la complexité des phénomènes en cours dans la zone non saturée ;
- une hypothèse sur les variations de la piézométrie pourrait être le lien avec la transpiration des forêts et la remontée induite de la frange capillaire et / ou niveau piézométrique. Cette hypothèse nécessiterait une analyse qui sort du contexte de cette étude ;
- des analyses plus poussées avec des mesures reliant le profil hydrique, des sondes piézométriques millimétriques et le besoin des plantes seraient nécessaires.

3.3. POSITIONNEMENT DE L'ÉTIAGE 2019 DANS LES ÉVOLUTIONS PIÉZOMÉTRIQUE ET HYDROMÉTRIQUE 2012 -2020

3.3.1. Observation des cours d'eau : réseau ONDE

La situation des cours d'eau de chaque période d'étiage est évaluée depuis 2012 via le réseau ONDE. Le réseau inclut par construction toute la typologie des cours d'eau de manière à disposer d'un indice global[12], sur une échelle de 0 à 10, représentatif du niveau de sécheresse des cours d'eau, 0 représentant l'asséchement total de tous les cours d'eau. Son évolution depuis 2012 et à l'échelle de chaque département est reportée sur la Figure 44.

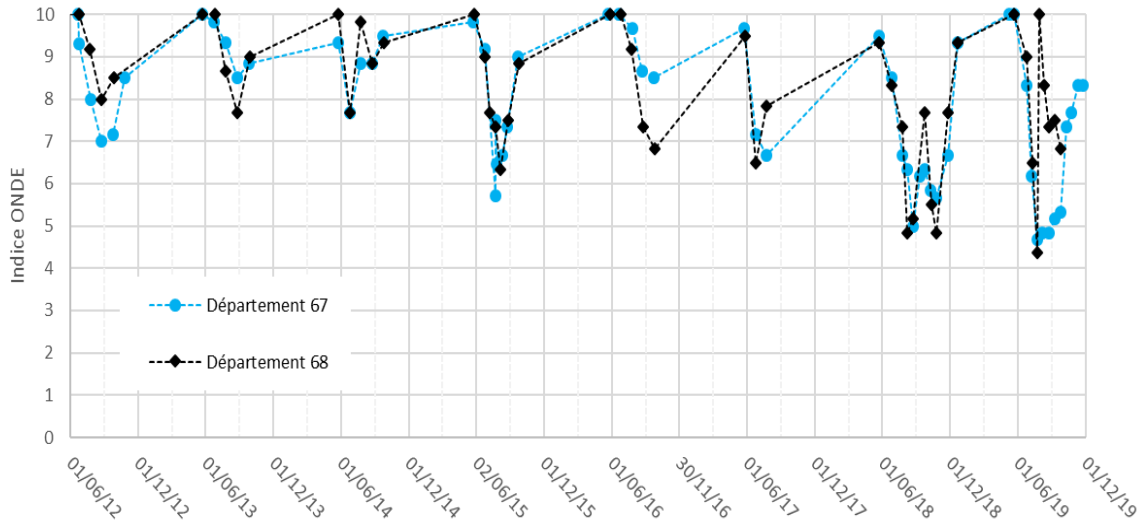


Figure 44 : Indice ONDE par départements alsacien entre 2012 et 2019.

Les modalités d'écoulements observées sur les stations de la zone d'étude à chaque campagne d'observation sont reportées sur la Figure 45.

Pour rappel, les observations sont classifiées de 1 à 4 selon les modalités suivantes :

- 1= Écoulement visible : correspond à une station présentant un écoulement continu – écoulement permanent et visible à l'œil nu ;
- 2= Écoulement non visible: correspond à une station sur laquelle le lit mineur présente toujours de l'eau mais le débit est nul. Cette modalité correspond aux situations où soit, l'eau est présente sur toute la station mais il n'y a pas de coursant (grandes zones lentiques), soit il ne reste que quelques flaques sur plus de la moitié du linéaire.
- 3= Assec: correspond à une station à sec, où l'eau est totalement évaporée ou infiltrée sur plus de 50 % de la station ;
- 4= Observation impossible: en raison de conditions exceptionnelles (accessibilité, modification des conditions environnementales propres à la station, etc.).

[12] Formule utilisée pour le calcul de l'indice (10 impliquant aucune perturbation et 0 tous les courss d'eaux en assecs) :

$$Indice\ ONDE = \frac{(nombre\ stations\ sans\ écoulements \times 5) + (Nombre\ stations\ avec\ écoulements \times 10)}{Nombre\ de\ stations\ total}$$

La localisation des stations sur le secteur d'étude est disponible sur la Figure 93, disponible en annexe.

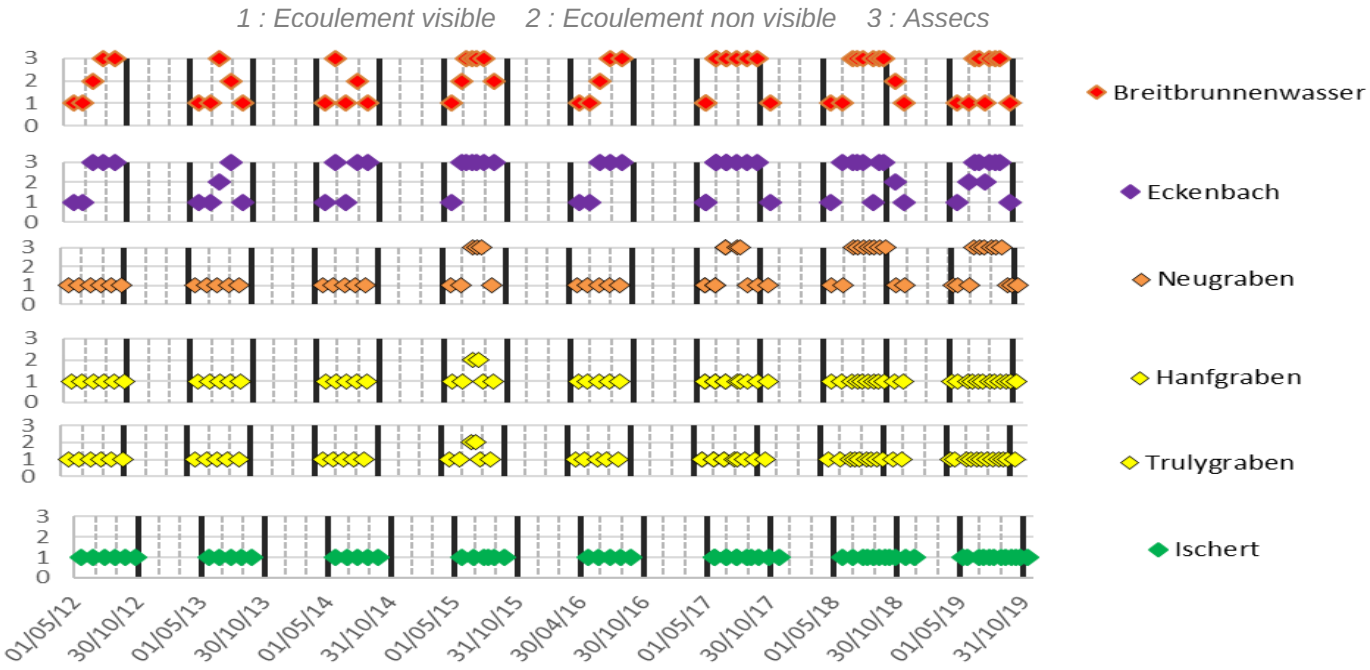


Figure 45 : Stations ONDE du périmètre d'étude sur la période 2012 – 2019.

Les résultats du réseau ONDE depuis 2012 permettent d'observer les points suivants :

- à l'échelle de l'Alsace :
  - de manière générale, les situations globales des deux départements sont semblables. La différence observée à la date du 29/07/2019 correspond à l'effet d'un très fort orage provoquant une situation locale des cours d'eau potentiellement non représentative d'une situation sur plusieurs jours,
  - l'année 2015 constitue le premier été présentant une dégradation significative des cours d'eau,
  - les années 2018 et 2019 constituent des années marquées par une forte dégradation des écoulements des cours d'eau,
  - l'année 2019 a enregistré les niveaux les plus bas de l'indice ONDE ;
- au niveau de la zone d'étude :
  - l'année 2015 constitue l'année la plus marquante avec 5 stations en assecs ou écoulements non visibles sur 6,
  - les années 2017, 2018 et 2019 sont globalement similaires, avec trois stations impactées sur 6. La durée de l'assec sur le Neugraben semble moindre en 2017,
  - aucune dégradation n'est observée sur l'Ishert ce qui concorde avec le fonctionnement de ce cours d'eau (cours d'eau de la bande rhénane avec apport du Rhin),
  - les dates d'apparition des assecs sur le Breitbrunnenwasser et l'Eckenbach sont en juillet sur les années sans sécheresses. Pour les années sèches, les assecs apparaissent dès le mois de juin comme observées en 2015, 2016, 2017, 2018, 2019. En 2014, un assec est aussi observé en juin, mais des précipitations exceptionnelles ont permis une disparition des assecs en juillet ;

- une différence importante est présente entre la situation observée à l'échelle de l'Alsace et celle du Grand Ried durant les été 2018 et 2019. En effet, alors que les plus fortes sécheresses sont enregistrées sur ces étés à l'échelle alsacienne, les cours d'eau du Grand Ried semblent moins impactés, notamment en comparaison avec l'année 2015.

Figure 46 : Photo du Neugraben en assec (05/09/2019).

3.3.2. l'Ill

L'évolution de l'Ill sur les trois stations est différente sur la période 2012-2019 :

- Osthouse : l'Ill aurait une augmentation du débit d'étiage depuis 2017 ;
- Kogenheim : les niveaux les plus bas sont atteints en 2015, puis en 2018 et 2019 sur des périodes plus courtes ;
- Colmar : le niveau d'étiage est constant depuis 2015. À noter que sans soutien d'étiage, un assec total de l'Ill en été est très fortement probable depuis 2015. Les périodes de plus basses eaux sont plus longues depuis 2015 que celles observées les années précédentes.

Les débits de la Fecht et du Giessen, les deux principaux affluents de l'Ill ont été représentés sur la même période. Le Giessen présente un débit nul en 2015, 2017, 2018 et 2019. La Fecht présente un débit d'étiage constant, certainement lié à un soutien d'étiage ou effet de barrage/retenue.

La DREAL a réalisé en parallèle un travail de comparatif sur les débits des cours d'eau entre les années 70 et la période actuelle dans le cadre du renouvellement des catalogues des débits d'étiages. Les premiers résultats indiquent une baisse du débit sur le Giessen à Sélestat (-20 à 30 %) et une augmentation de l'Ill en aval du Grand Ried (+20 à 30 %).

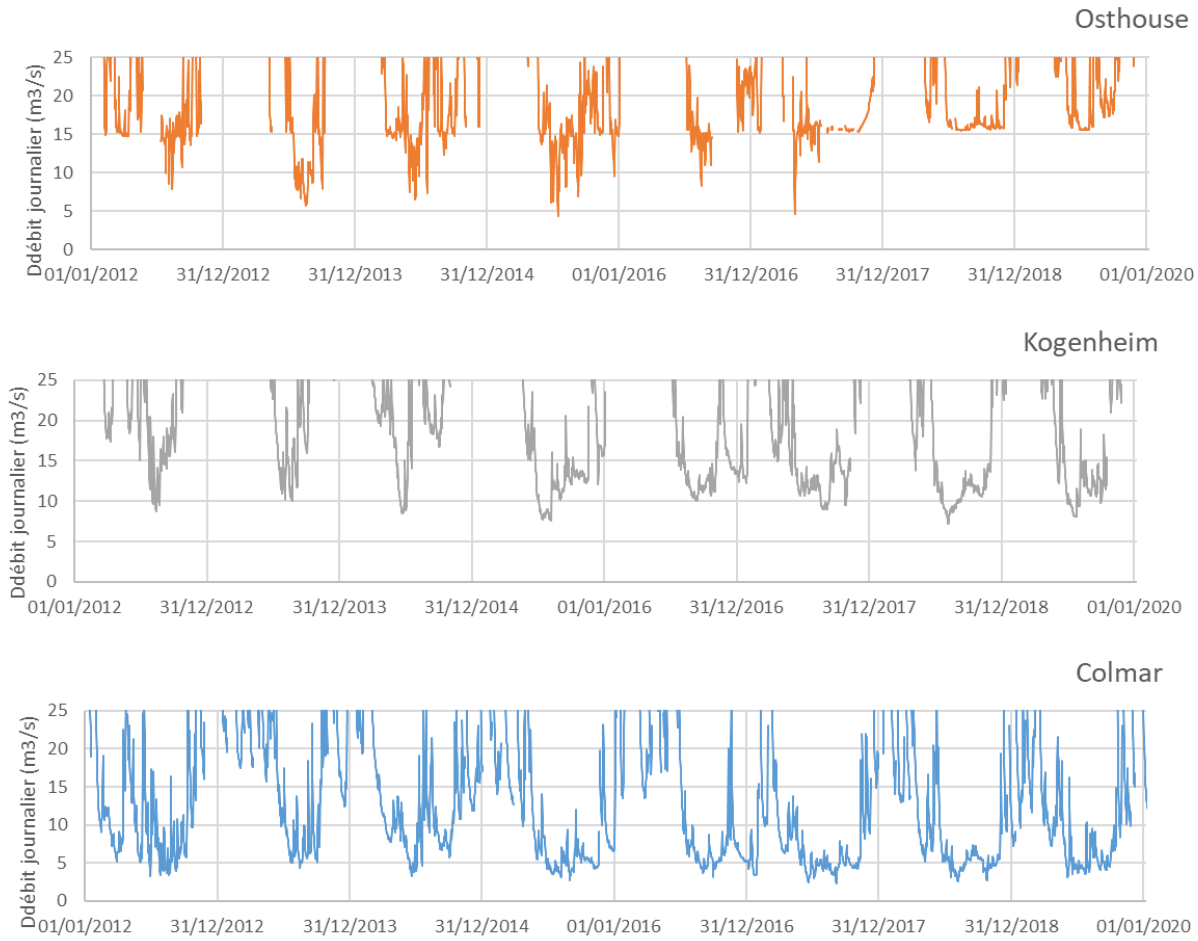


Figure 47 : Débits journaliers centrés sur les étiages de l'Ill sur la période 2012-2019.

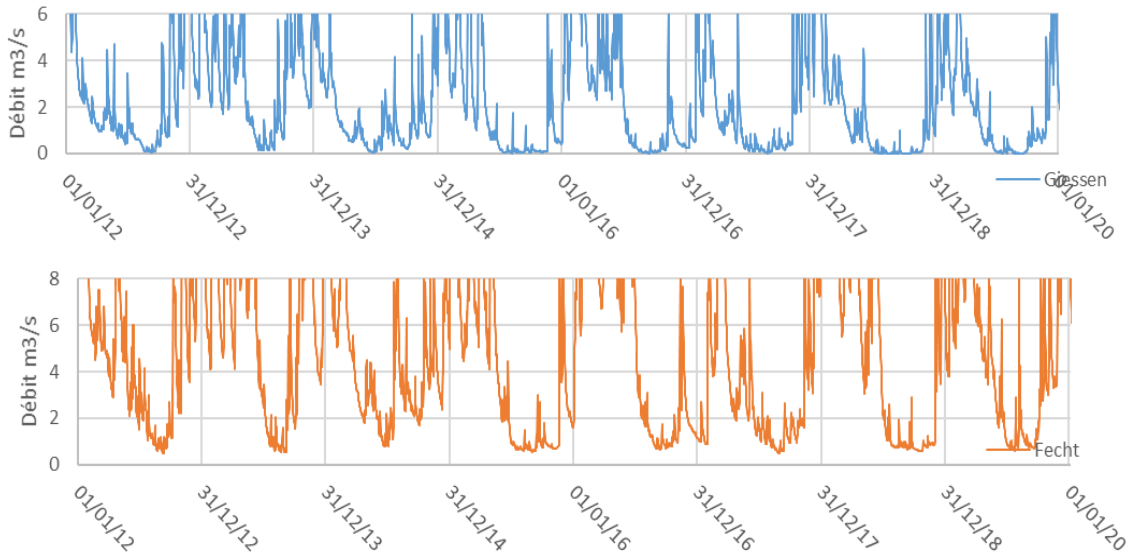


Figure 48 : Débits journaliers centrés sur les étiages du Giessen et de la Fecht sur la période 2012-2019.

3.3.3. Cours d'eau phréatiques (réseau DREAL)

Seuls la Zembs et le Mulbach disposent de chroniques longues pour une analyse comparative de l'étiage 2019.

Le Mulbach se situe en dehors de la zone d'étude.

La Zembs a été analysée lors de l'étude précédente (Giuglaris, 2018).

La Blind disposait d'un suivi jusqu'en 2018 mais n'a pas été analysée en raison du soutien d'étiage via le canal de Colmar. Ce dernier est de l'ordre de 150 l/s (*communication de la part de VNF*).

3.3.4. Eaux souterraines

Tendances piézométriques et cycles

Une analyse automatique du comportement des piézomètres a été réalisée à l'échelle de la région Grand Est (Allier, 2019).

Du point de vue de la cyclicité, deux types de fonctionnement sont présents sur la zone d'étude :

- le premier est de type annuel. Il coïncide avec la dépression de l'Ill et sa zone d'influence et peut être considéré comme homogène ;
- le deuxième correspond à la superposition du cycle annuel et de cycles pluriannuels. Il coïncide à plusieurs zones d'influences très différentes : débouchés des différents bassins versants vosgiens côté ouest et Rhin côté est.

En terme d'implication sur la gestion estivale, le niveau des eaux souterraines au niveau de la dépression de l'Ill va majoritairement dépendre de la recharge hivernale et printanière. Sur les autres zones, le signal pluriannuel va s'ajouter à la variation annuelle pouvant soit limiter soit augmenter l'étiage en cas de sécheresses estivales. Sur ce dernier point, le changement climatique ayant un impact sur les cycles météorologiques induisant les cycles pluriannuels des eaux souterraines, une modification de la récurrence des cycles semble probable dans les années à venir.

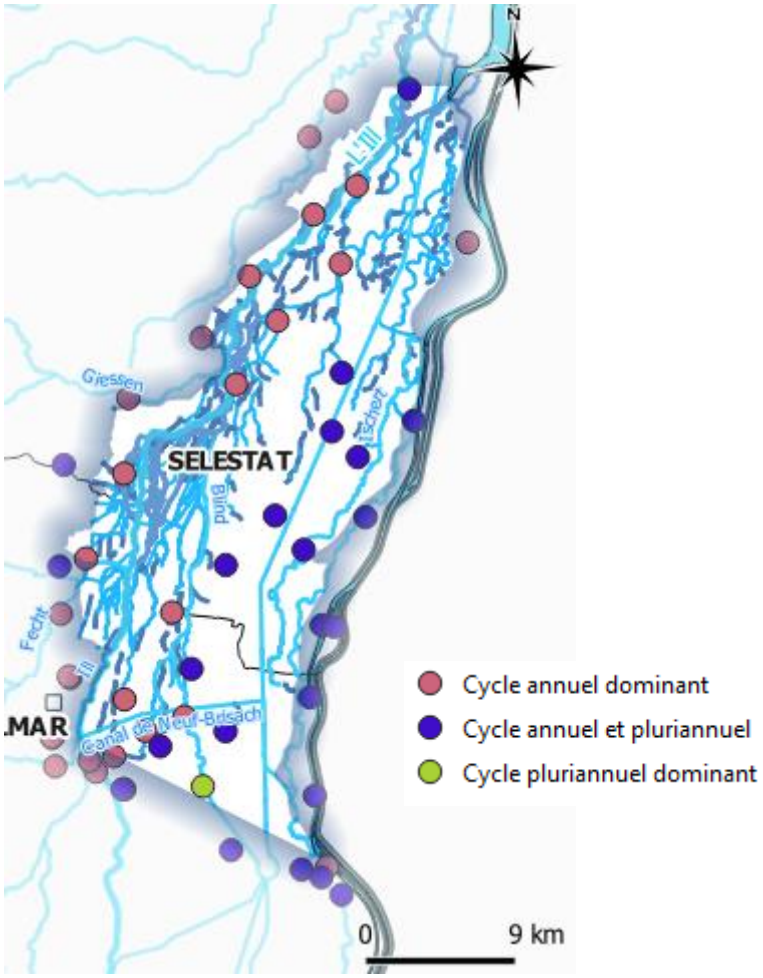


Figure 49 : Cyclicité perçue sur la piézométrie par analyse statistique automatique (périodogrammes) au niveau du Grand Ried (adapté de Allier, 2019).

Au niveau des tendances au long terme, l'analyse et l'interprétation sont complexes en raison :

- des aménagements portés au Rhin et à l'Ill ayant apporté des modifications significatives à la piézométrie globale ;
- des soutiens d'étiages multiples dont les débits et les durées ne sont pas ou très peu connus, les débits réels n'étant pas mesurés sur place. Une tendance à l'augmentation de ces derniers en terme de durée et de débit serait toutefois probable ;
- de la superposition des cycles.

En limitant l'analyse aux vingt dernières années, une dizaine de piézomètres présentent des tendances significatives (test statistique de Mann Kendall sur les moyennes annuelles). Ainsi :

- la quasi-totalité des piézomètres en bordure du Rhin présente une hausse du niveau piézométrique cohérente avec les travaux en cours de renaturation du Rhin et des différentes zones attenantes ;
- une légère hausse du niveau piézométrique sur le secteur même de l'agglomération de Colmar sud sur une partie du débouché de la Fecht. L'origine n'a pas été analysée (en dehors de la zone d'étude). À noter que sur l'intégralité des chroniques du secteur (plus de 40 ans), la tendance est à la baisse pour le même test statistique ;
- une baisse forte et significative au niveau du piézomètre 03077X0238/209F situé au niveau du cône de déjection du Giessen. Les niveaux moyen et minimum actuels se situent environ 50 centimètres en deçà du niveau observé dans les années 80 à 90. Cette baisse

implique un déséquilibre quantitatif au niveau du bassin versant du Giessen. L'analyse de l'ensemble du bassin versant du Giessen /Liepvrette en terme d'usages et de fonctionnement hydrogéologique serait nécessaire pour aller au-delà de cette constatation. Pour le Grand Ried, ce déséquilibre affecte la partie de la nappe d'alsace usuellement rechargée et soutenue par l'apport de ce bassin versant. Cela va aussi se traduire directement sur l'Ill avec une baisse d'apport par le débit du Giessen ainsi que par la nappe d'Alsace, l'Ill étant en partie alimentée par la nappe dans ce secteur ;

- une baisse modérée mais significative au niveau du piézomètre 030810026/224 situé à Benfeld (bordure de l'Ill) sur les vingt dernières années. Contrairement au Giessen des niveaux identiques avaient été mesurés dans les années 80. La situation en bordure de l'Ill exclut la présence d'un cycle naturel, même non détecté de manière automatique. Par conséquent, ces évolutions peuvent être liées à des variations des prélèvements ou de gestion de l'Ill.

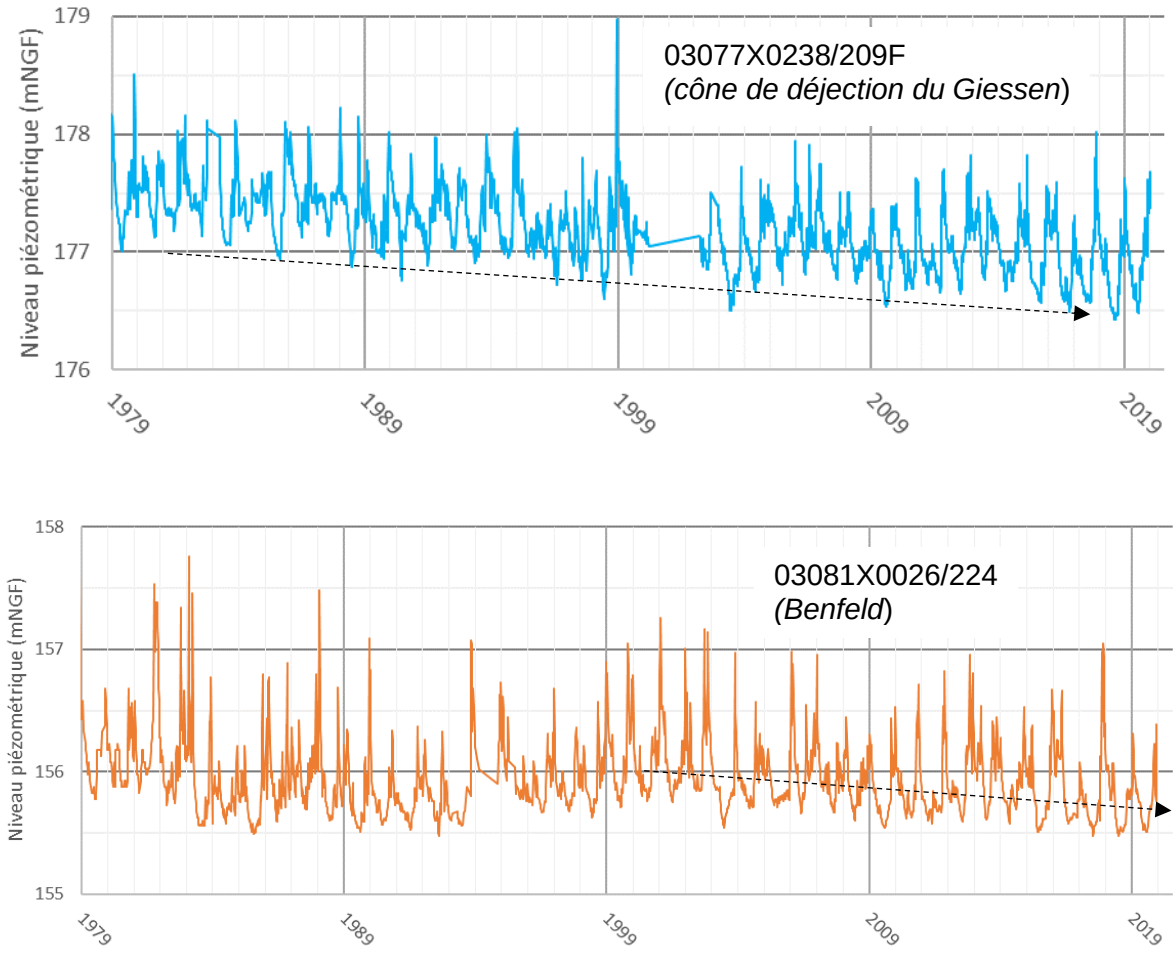


Figure 50 : Tendances piézométriques à la baisse perçues par le test de test statistique de Mann Kendall sur 03077X0238/209F et 03081X0026/224.

En complément de ces tests, le piézomètre situé sur les alluvions de la Fecht, en amont de la zone d'étude pourrait aussi présenter sur les dernières années une baisse globale de la piézométrie. Ce secteur peut présenter des cycles secondaires pluriannuels expliquant l'absence de résultat par tests automatiques. L'absence de remontée sur les dernières années semblerait indiquer une tendance à la baisse qui irait au-delà de cette cyclicité. Les niveaux les plus bas atteints sur les dernières années correspondent aux extrêmes atteints durant les années 91 et 93. La piézométrie observée sur Wintzenheim (hors zone d'étude) confirmerait cette tendance à la baisse. À l'opposé, cette baisse n'est pas visible sur le secteur de Colmar

d'après le piézomètre 03427X0361/pz6, situé au sud de la zone commerciale d'Houssen. Le déséquilibre serait donc limité aux alluvions de la Fecht et de la Weiss. De plus, il semble probable que sans intervention de soutien ou rejet, les niveaux les plus bas depuis la création de la chronique auraient été atteints sur cette zone.

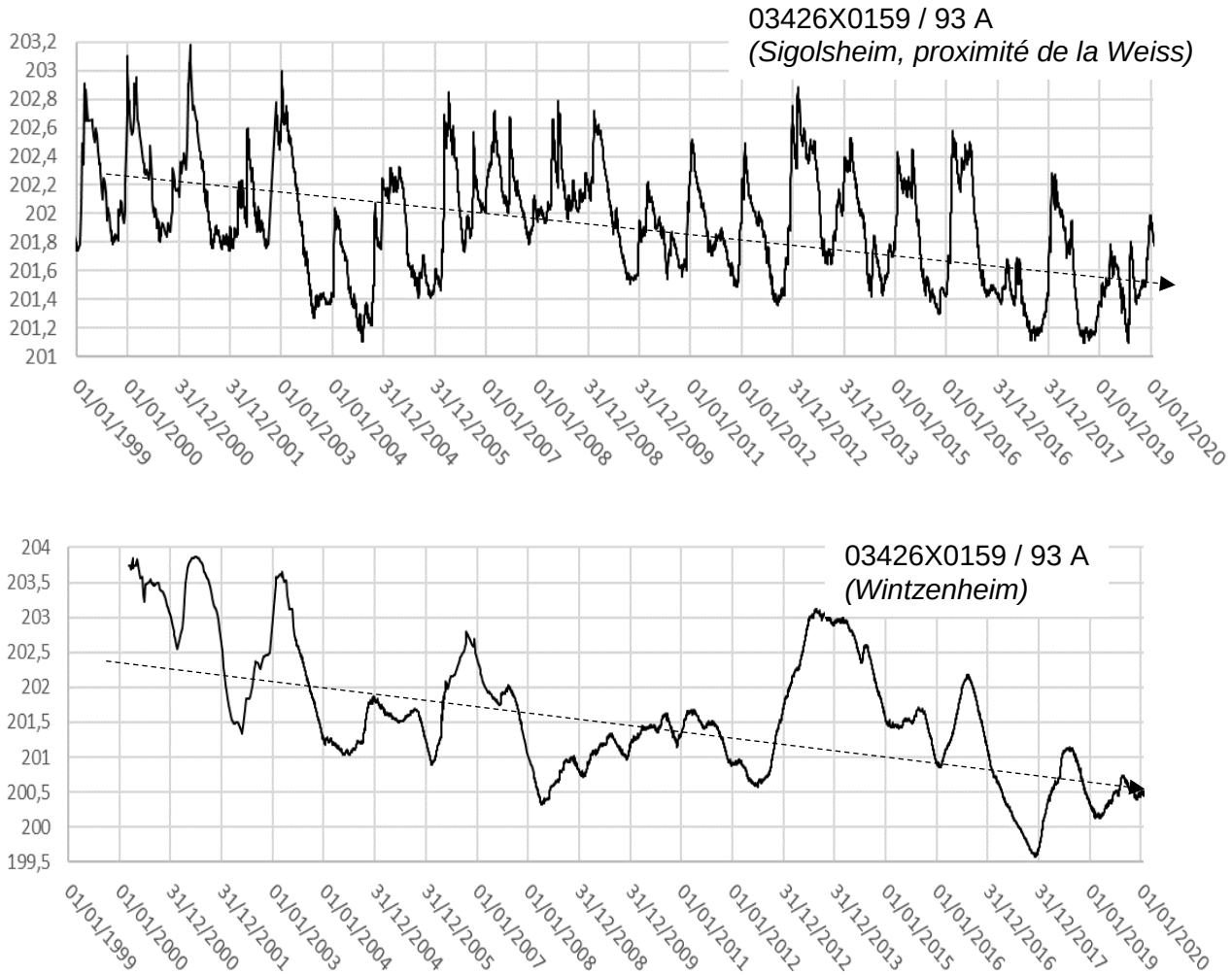


Figure 51 : Piézométries à la baisse sur la bordure vosgienne, au niveau du débouché de la vallée de la Fecht et de la Weiss, (baisses non significatives par test statistique sur les niveaux moyens annuels).

Analyse des niveaux piézométriques en étiage au cours des dernières années

En complément des analyses statistiques sur les tendances et les cycles, une analyse des évolutions des plus bas niveaux piézométriques permet de :

- comparer les années entres elles sur la période où des observations des cours d'eau phréatiques ont été réalisées ;
- compléter l'analyse statistique automatique sur les comportements globaux des piézométries.

Cette analyse est possible en raison de l'absence de cyclicité interannuelle des niveaux piézométriques de la zone d'étude. La période d'analyse a été réalisée sur les vingt dernières années, lorsque la chronique le permettait, cette durée étant jugé suffisante au regard :

- des modifications globales de la piézométrie de la nappe d'Alsace liées à des grands travaux (Rhin, canaux etc.) ;

- de la détection d'une tendance actuelle ;
- des phénomènes d'assecs et de sécheresses répétés au cours des cinq dernières années, tout en incluant l'année 2003, première année de sécheresse et canicule du XXI^{e} siècle.

Cette analyse fait ressortir et confirme :

- une problématique sur la partie sud de la zone d'étude et à l'ouest de l'Ill :
  - baisse des niveaux minimums sur les trois dernières années, avec sur deux piézomètres (03423X0017/209C, 03423X0056/100) l'atteinte du plus bas niveau observé depuis 20 ans en 2019,
  - une récurrence des niveaux les plus bas depuis 2015 ;
- toujours sur le secteur sud mais à l'est de l'Ill, la récurrence des niveaux très bas est aussi visible sur les 5 dernières années. L'année 2019 se situe au même niveau que l'année 2015 et 2003 sur une relative proximité de l'Ill (piézomètre 03423X0064/94A et 03427X0027/92). Par contre, la situation se dégrade en allant vers l'est, en enregistrant des niveaux d'étiage de plus en plus bas plus à l'est (piézomètre 03428X0067/91B, au niveau de Jebsheim avec un signal identique sur 03427X0252/134 et 03428X0029/89) ;
- à partir du nord de l'Illwald, la récurrence de bas niveau est à noter avec une très forte atténuation à proximité de l'Ill et au nord mais sans aggravation par rapport à 2015 ou 2003. Ce dernier point est à corréler avec les enregistrements de hauteurs d'eau réalisées sur Osthouse.

Les résultats et observations par piézomètre (réseau APRONA) sont récapitulés dans le Tableau 9.

	Début de la chronique	2003	2015	2017	2018	2019
03081X0038/269	1958	153,78	153,85	153,81	153,82	153,84
03081X0025/223	1955	157,09	157,1	157,17	157,12	157,14
03085X0208/pz7	2008	X	160,66	160,76	160,68	160,7
030805X0022/257	1965	161,94	161,96	162,12	161,97	162,05
03078X0333/pz8	2008	X	164,14	164,13	164,11	164,21
03423X0117/209C	1958	170,5	170,5	170,48	170,49	170,47
03424X0026/247	1964	169,66	169,66	169,93	169,76	169,86
03423X0056/100	1954	X	174,77	174,87	174,84	174,68
03423X0064/94A	1984	176,18	176,2	176,24	176,2	176,16
034222X0029/95	1955	177,54	177,27	177,45	177,44	177,34
03427X0361/PZ6	2009	X	179,12	179,22	179,15	179,11
03428X0067/91B	1980	179,38	179,39	179,21	179,15	179,12
03427X0027/92	1955	180,91	180,89	180,94	180,91	180,85

Tableau 9 : Observations des niveaux piézométriques les plus bas (en mNGF) sur les piézomètres du réseau APRONA en lien avec les phréatiques (les piézomètres avec une tendance suspectée ou avérée ne sont pas inclus en dehors du piézomètre BSH de Rossfeld)

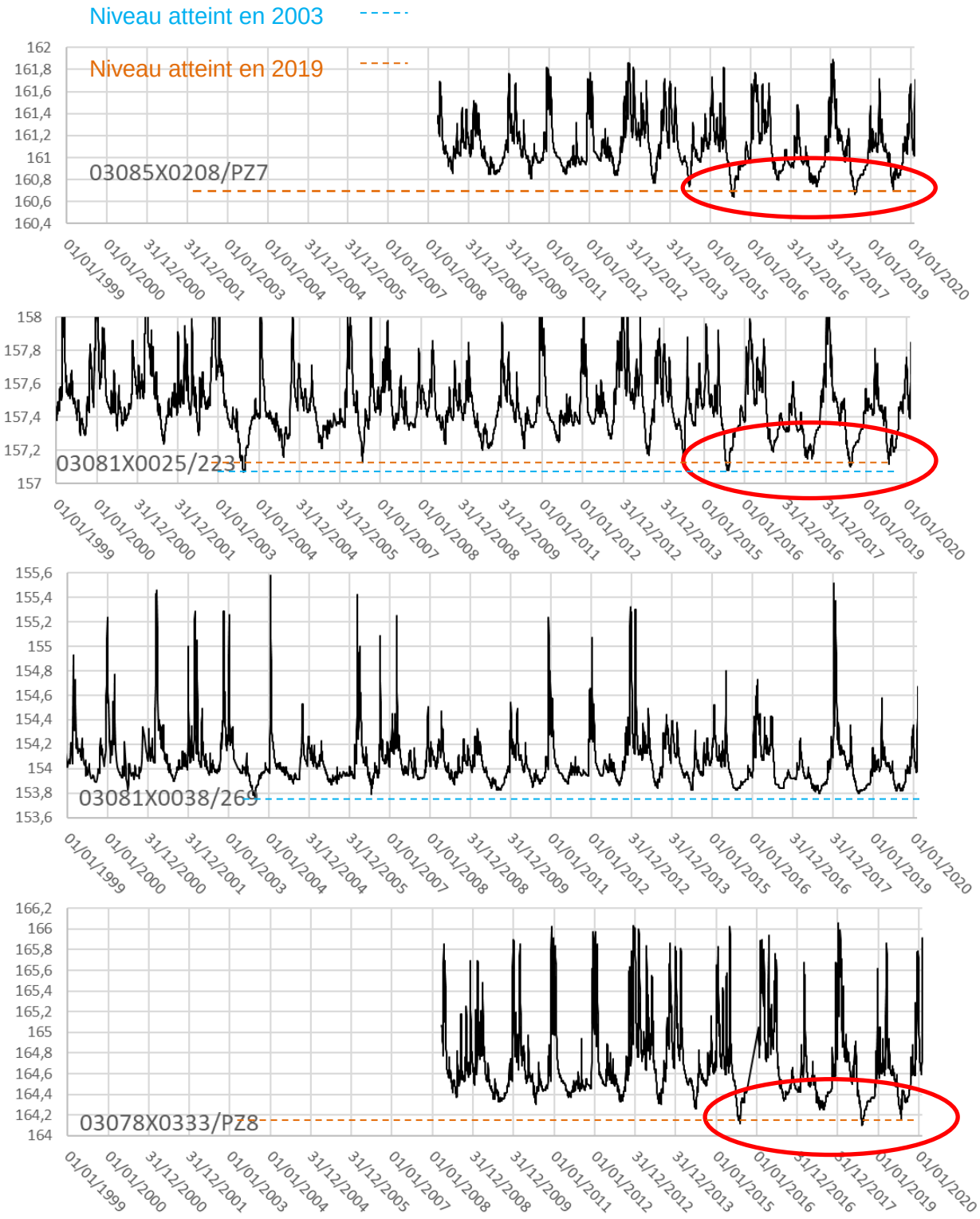


Figure 52 : Chroniques piézométriques 1999 - 2019, secteurs centre et nord de la zone d'étude, à l'est de l'Ill : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs (données APRONA).

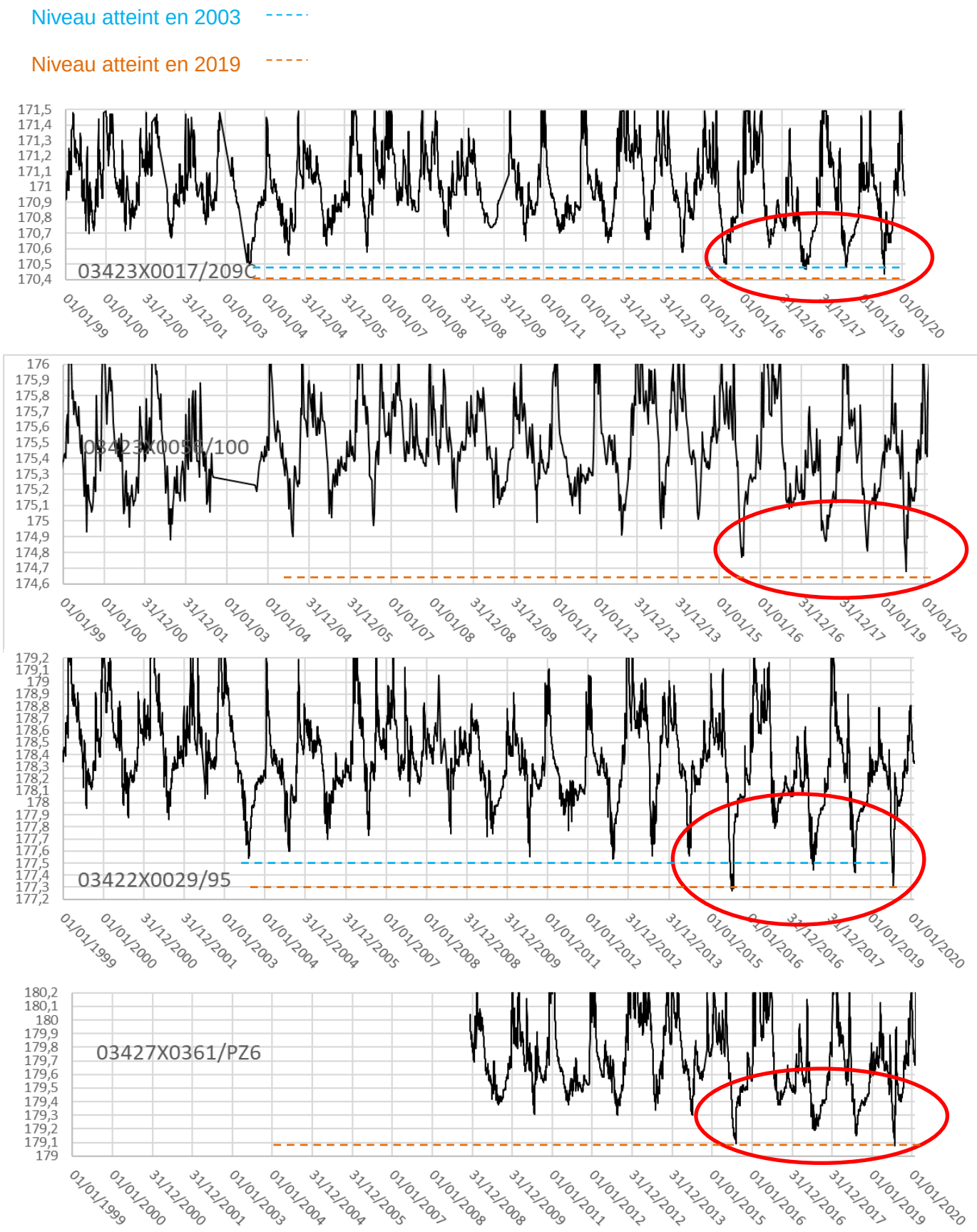


Figure 53 : Chroniques piézométriques 1999-2019, secteur sud de la zone d'étude, à l'ouest de l'Ill (données APRONA) : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs.

Niveau atteint en 2003

Niveau atteint en 2019

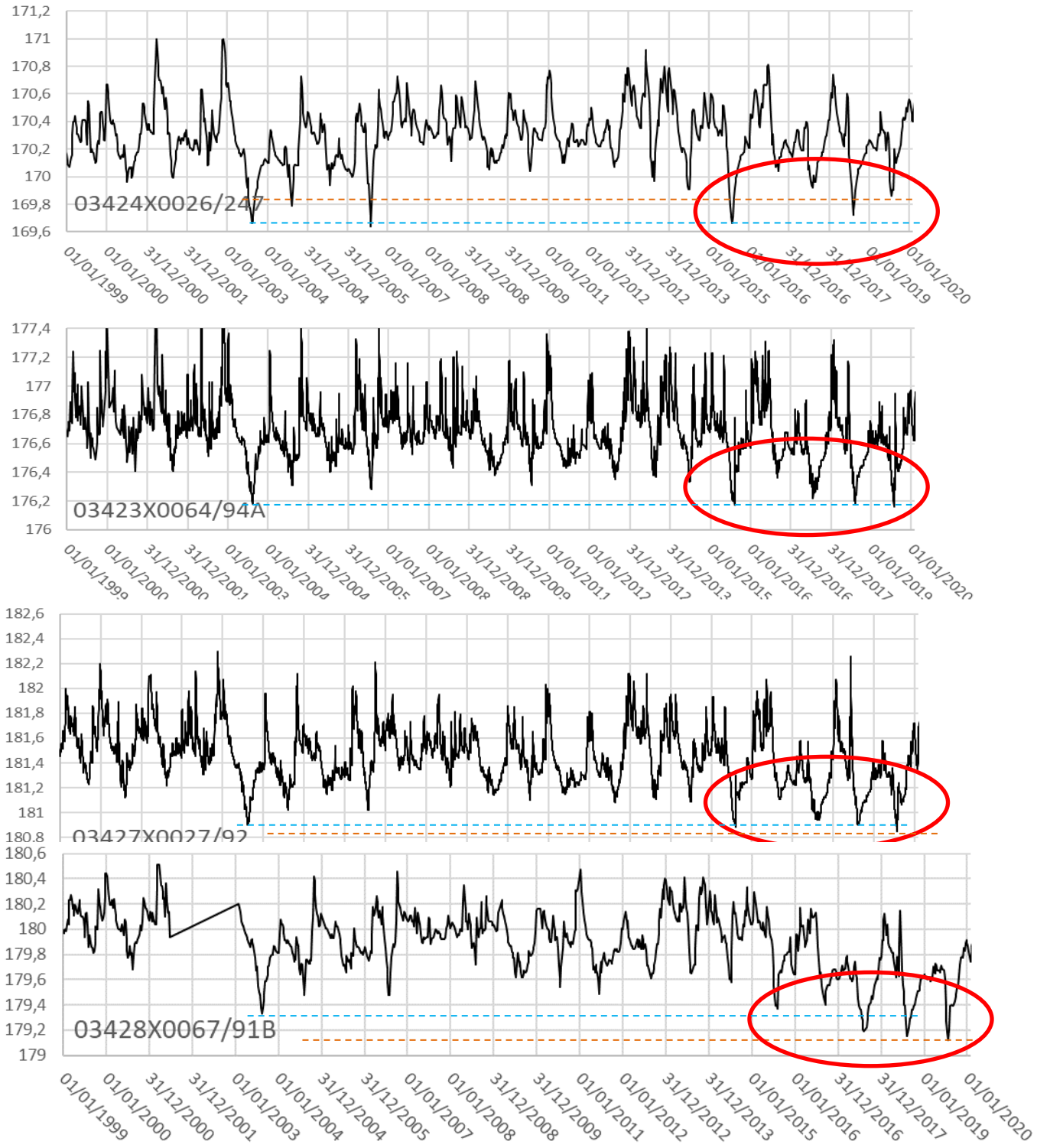


Figure 54 : chroniques piézométriques 1999 - 2019, secteurs sud et centre de la zone d'étude, à l'est de l'Ill : recherche des plus bas niveaux sur les piézomètres représentatifs (données APRONA).

Comparaison succincte aux données historiques

De manière à compléter l'analyse des niveaux d'étiages, une analyse très succincte a été réalisée sur les chroniques les plus longues existantes sur le secteur. Ces enregistrements de l'évolution de la nappe d'Alsace sont précieux car ils permettent de garder une trace factuelle des évolutions globales de la ressource, et des crises vécues antérieurement.

La sécheresse de référence historique correspondant aux périodes d'enregistrement disponibles est celle de 1976. Une deuxième période, plus diffuse se situe autour de 1990/1991, mais l'effet, au niveau des eaux souterraines n'a pas forcement été marqué par un extrême net comme en 1976.

Or, depuis 2003 et en dehors de la modification globale de la piézométrie (tendances ou variation brutale de la moyenne dues à des modifications de gestion du Rhin/soutien etc.), plusieurs piézomètres ont dépassé à plusieurs reprises les niveaux de références de 1976. Le piézomètre 03424X0029/203, situé en pleine zone agricole constitue un exemple de cette évolution.

L'analyse complète de ces courbes sort du cadre de cette étude. Toutefois, les points suivants peuvent être utilisés pour replacer le cadre des assèchements observés sur les cours d'eau et leur caractère exceptionnel :

- les niveaux en étiage atteints de manière récurrente depuis 2015 sont tous des niveaux historiquement bas depuis les années 1970 ;
- 1976 reste le niveau de référence pour certains secteurs, notamment dans la partie nord ;
- les niveaux les plus bas ont été atteints lors de ces 5 dernières années sur les piézomètres suivants : 03085X0022/257 (Bindernheim), 03424X0029/203 (Ohnenheim) et 03422X0029/95 (Ostheim) ;
- au niveau du piézomètre de Rossfeld, actuellement utilisé comme référence pour le bulletin de suivi hydrologique su la nappe d'Alsace, une différence des niveaux atteints en basses eaux est perceptible suivant les périodes considérées. Cette observation se retrouve sur les tests de tendances réalisés en fonction des périodes. Ainsi, si les niveaux sont relativement stables depuis les années 80, les niveaux observés durant la période 1965 - 1980 se situaient 20 centimètres en moyenne au-dessus du niveau observé depuis 1983 sur ce secteur. Une recherche complémentaire serait à réaliser sur les aménagements susceptibles de modifier la piézométrie et les écoulements : aménagements de l'Ill ou des cours d'eau, barrages, routes, drainages, mise en place de prélèvements, et une analyse fine de la climatologie serait à faire sur la même période.

Un exemple d'analyse de chronique historique est présenté sur la figure suivante. Toutes les chroniques sont présentes en annexe ainsi que les tests statistiques complémentaires réalisés sur certains piézomètres.

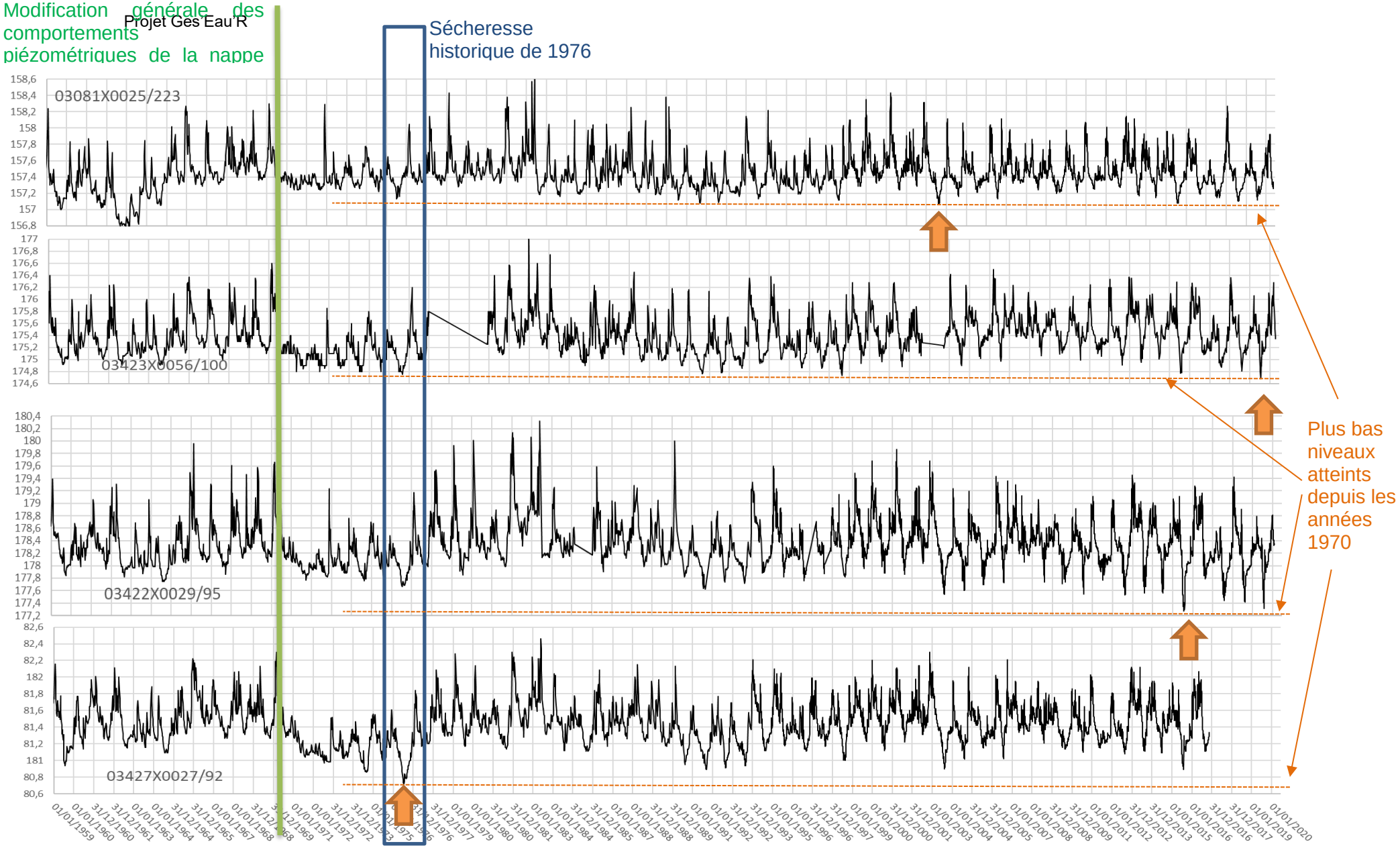


Figure 55 : Choniques piézométriques historiques retraçant l'évolution de la nappe d'Alsace sur le Grand Ried (données APRONA).

3.4. PRÉLÈVEMENTS ET SOUTIEN D'ÉTIAGE EN LIEN AVEC LES EAUX SOUTERRAINES

3.4.1. Méthodologie et données disponibles

L'analyse du comportement hydrodynamique de l'aquifère permet de localiser les zones présentant une baisse avérée de la piézométrie. À partir de ces éléments, un croisement géographique avec les prélèvements en eau souterraine est nécessaire pour finaliser la compréhension des enjeux de chaque secteur.

Toutefois, les données de prélèvements disponibles sur la zone sont hétérogènes (Giuglaris, 2018). Les principales sources d'informations sont :

- les données de l'agence de l'eau (volume annuel déclaré pour les prélèvements supérieurs à 10 000 m^3/an) ;
- les données transmises par les producteurs d'eau pour l'AEP collectif (SDEA notamment).

Les données précises sur les prélèvements pour l'irrigation étant inexistantes à une échelle locale, une approche complémentaire a été réalisée avec la chambre d'agriculture Alsace et Grand Est. Son objectif est de préciser les zones présentant un besoin en irrigation réel lié à la nature des sols.

En complément de ces données, les points de rejets des STEP et les points de soutien d'étiage aux cours d'eau ont aussi été reportés.

Les points d'apports (soutien d'étiage, rejets) sont tous situés en rivière. Leur effet sur les eaux souterraines se fait donc via les échanges nappe/rivière du secteur. Comme pour les eaux souterraines, le choix a été fait de reporter et analyser uniquement les secteurs où l'effet est visible sur les eaux souterraines. Il est ainsi considéré que l'absence d'effet visible implique un effet nul de ces apports ou trop local pour être intégré à une vision globale de la zone.

Les différentes données sur les prises d'eaux dépendent de différents organismes : VNF, DREAL, DDT. Les données utilisées ici sont celles de la DREAL complétées par les données de VNF.

En complément, une réflexion a été menée sur l'évapotranspiration et sa prise en compte dans le bilan hydrologique global du Grand Ried.

3.4.2. Apport extérieurs en rivières : localisation des STEP et soutien d'étiage

Les principaux soutiens d'étiage présents sur la zone d'étude se font via le canal de Colmar, lui-même alimenté par le Rhin.

Les STEP présentant les plus grandes capacités sont localisées à l'ouest de l'Ill.

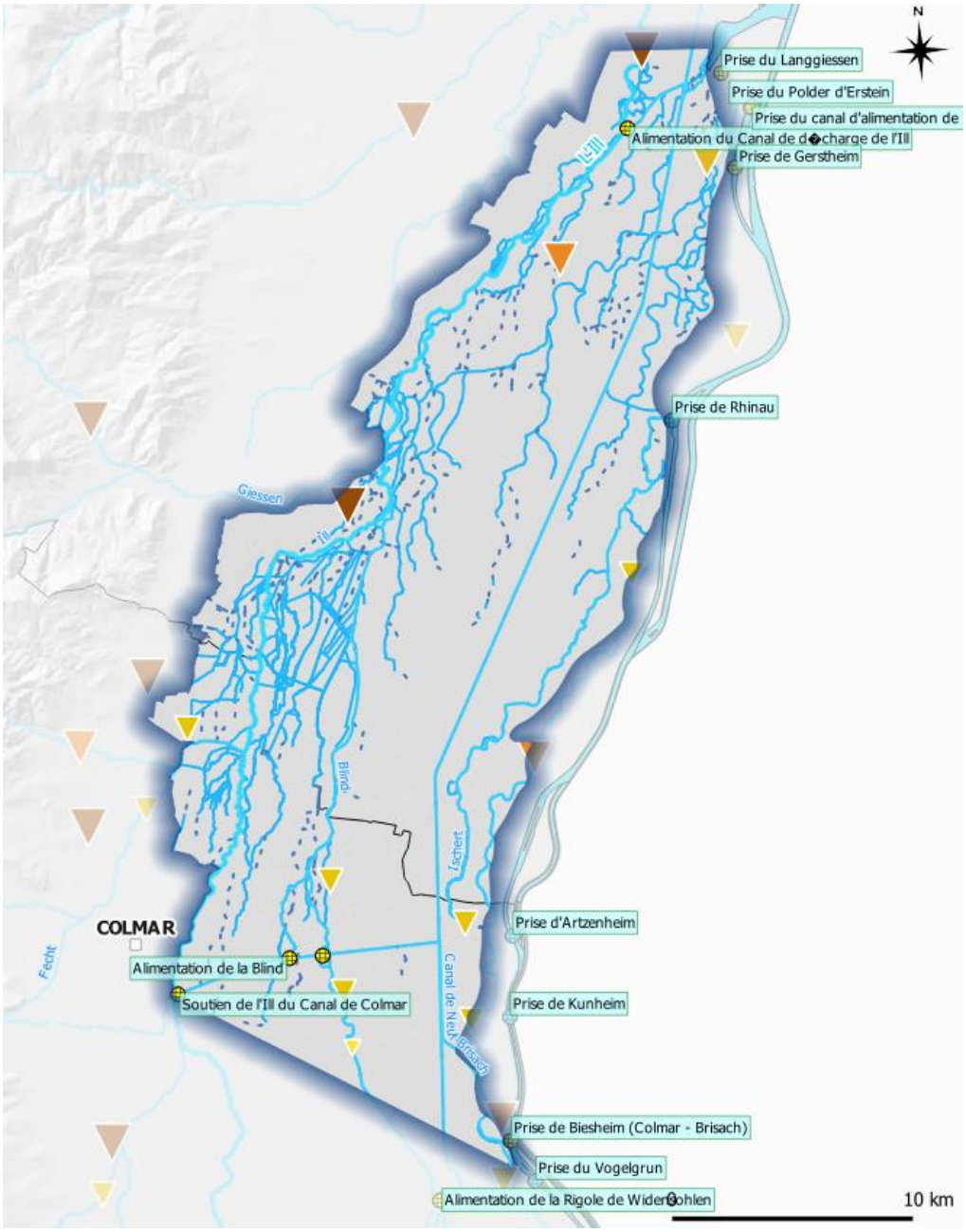


Figure 56 : Localisation des STEP et des différentes prises d'eaux entrainant un soutien d'étiage sur la zone d'étude.

3.4.3. Prélèvements liés à l'alimentation en eau potable collective

Les prélèvements liés à l'AEP sont bien localisés en raison de la connaissance précise des ouvrages de captage.

Les données disponibles sont le volume annuel déclaré au niveau de l'agence de l'eau, le débit réel en fonctionnement et les volumes journaliers sur les ouvrages les plus importants.

Les fonctionnements de chaque installation sont différents en fonction de l'organisation du circuit de distribution et des possibilités de stockage. Sur les plus petits ouvrages, une seule plage de fonctionnement est présente. Il y a donc soit aucun prélèvement, soit un prélèvement à un

débit constant. Sur les ouvrages plus conséquents, un débit de « base » est présent, sauf cas exceptionnels. Ce débit va être augmenté sur des plages de fonctionnements supérieurs, toujours à débits constants, en fonction de la demande.

Ce fonctionnement peut être vu sur l'exemple d'Obere Erlen, pré-identifié dans l'étude réalisée en 2017/ 2018. Le lecteur peut visualiser le fonctionnement et son évolution dans la journée en consultant l'étude réalisée par l'APRONA.

Au niveau du fonctionnement saisonnier, et en se basant à nouveau sur le cas d'Obere Erlen, il y a une légère augmentation de la consommation en période estivale de l'ordre de 10 à 20 % en 2014 et 2015. Toutefois ces variations sont inférieures à d'autres effets plus globaux d'évolution du réseau AEP.

Les plus petits ouvrages gérés par le SDEA présentent des débits en dessous du débit moyen d'un ouvrage d'irrigation.

Boofzheim	Ebersheim	Markolsheim	Hilsenheim	Kogenheim
100 et 150 m3/h	0 /150 / 300 m3/h	100 m3/h	90 m3/h	40 m3/h

Mussig	Rossfeld	Saasenheim	Obere Erlen	Batzenheim
30 m3/h	30 m3/h	28 m3/h	125 / 250 / 375 m3/h	45 m3/h

Tableau 10 : Débits de pompages potentiels sur chaque ouvrage AEP géré par le SDEA en 2019 (soit le débit pompé durant les heures de fonctionnement).

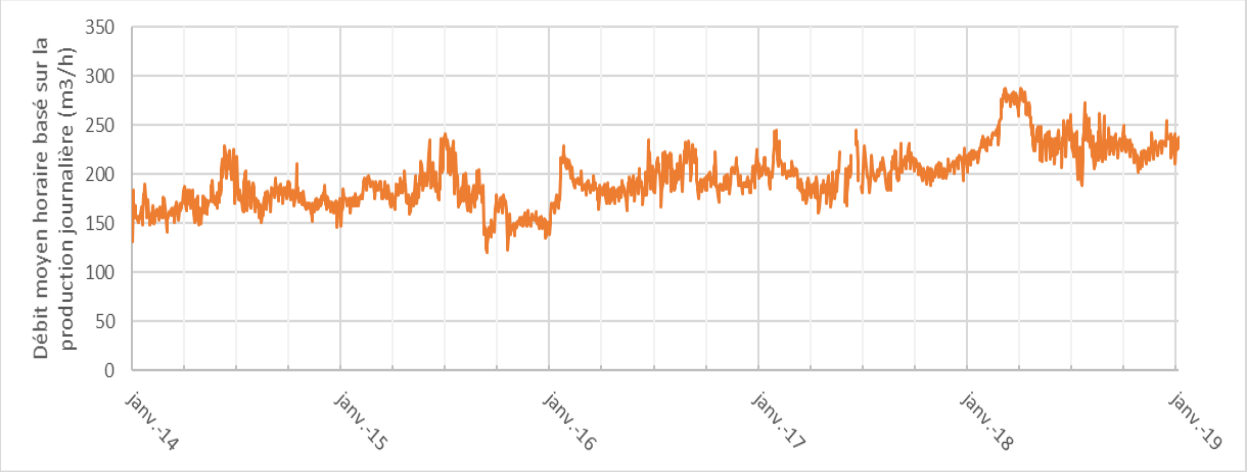


Figure 57 : Variation du débit horaire calculé sur la base de la consommation journalière sur le forage d'Obere Erlen.

Au niveau des ouvrages collectifs, les données de l'agence de l'eau permettent de distinguer comme ouvrages majeurs sur la zone d'étude et à proximité :

- le forage d'Obere Erlen sur la zone d'étude ;
- les forages d'Ebersheim et de Benfeld à l'ouest de l'Ill ;

- les forages de Kastenwald, de Neuland et de Grosser Dornig au sud ;
- le forage de Marckolsheim sur la bande rhénane.

Le forage de Niederwald est conservé pour la suite de l'analyse en raison de son positionnement sur le débouché de la Fecht.

Les volumes annuels sont disponibles dans le Tableau 11.

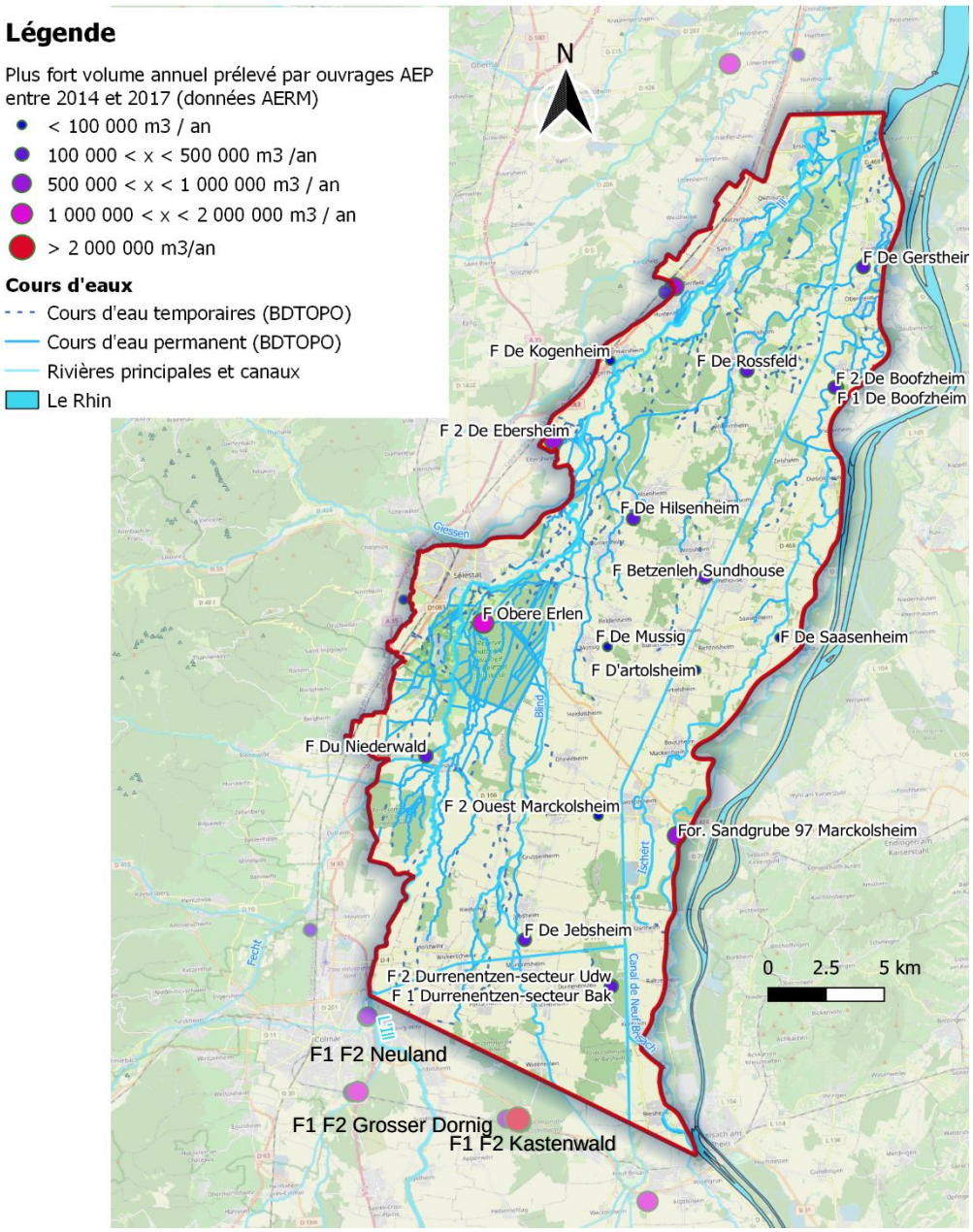


Figure 58 : Localisation et volumes annuels prélevés par les ouvrages AEP collectifs sur la zone d'étude (cartographie à partir des données de l'AERM).

3.4.4. Prélèvements liés à l'industrie

Les prélèvements annuels sont connus via les données de l'Agence de l'Eau. Leur localisation via leurs données est plus imprécise que les données AEP.

Une analyse complémentaire sur la compréhension des prélèvements liés à l'industrie a été menée par la CCI. Les principaux éléments communiqués et pouvant éclairer la compréhension globale de la zone sont les suivants :

- les données de l'agence de l'eau présentent une surestimation des volumes annuels prélevés par l'industrie sur le secteur spécifique du Grand Ried en raison de la prise en compte des gravières sans retirer la part de celles-ci restituée au milieu ;
- un report d'une partie des prélèvements industriels sur le réseau d'alimentation en eau potable explique le faible nombre de points de prélèvements déclarés en zone industrielle ;
- sur les activités listées sur la zone d'étude, aucune tendance saisonnière ne semble pouvoir être distinguée.

Au niveau des données de l'agence de l'eau sur les prélèvements industriels, des disparités fortes peuvent exister entre chaque année. Les volumes maximums annuels sur la période 2014 -2017 ont été sélectionnés pour la cartographie et la recherche des principaux prélèvements.

Les principaux points de prélèvements industriels (hors gravières) se situent sur la bande rhénane et la zone industrielle de Colmar.

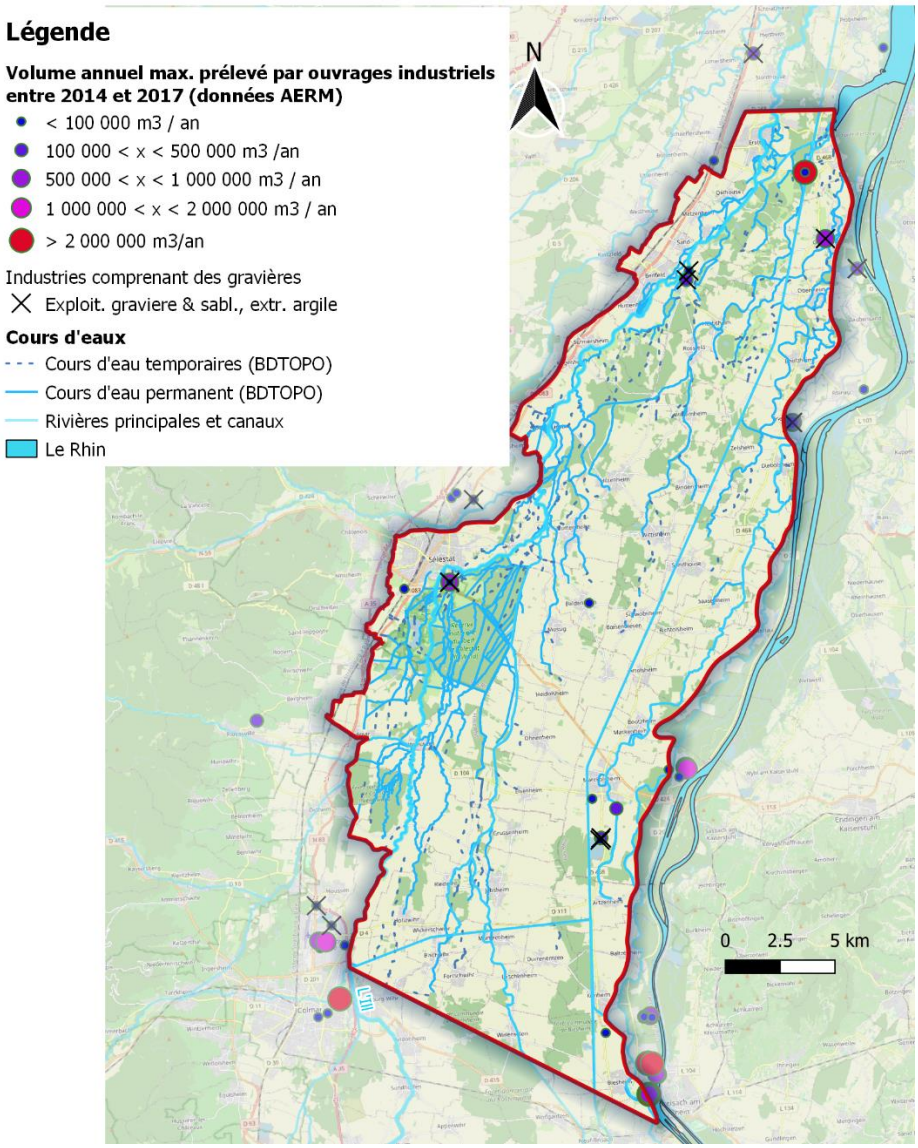


Figure 59 : Localisation et volumes prélevés par l'industrie sur la zone d'étude (données redevances AERM).

3.4.5. Prélèvements liés à l'irrigation

Les données sur l'irrigation constituent actuellement un verrou majeur pour l'analyse et la gestion des prélèvements en eau souterraine sur la zone d'étude. Pour pallier à une partie de cette problématique, des axes d'analyses complémentaires ont été testés avec la chambre d'agriculture d'Alsace pour cartographier au mieux les zones irriguées et leurs caractéristiques.

La méthodologie initiale proposait de croiser la réserve utile (RU) des sols, le type de culture et les connaissances de la chambre sur les besoins en irrigation à une échelle permettant de réaliser des moyennes sur les différents paramètres.

Le croisement avec les observations du terrain a relevé une incohérence sur cette première classification. Certaines zones comportant une RU faible ou moyenne, impliquant à priori une irrigation forte, sont peu ou pas irriguées. Elles correspondent notamment aux secteurs où la proximité de la nappe est très forte (secteur des résurgences du Riedbrunnen par exemple).

À partir de cette constatation, la chambre d'agriculture Grand Est a réalisé un travail complémentaire permettant de :

- mettre à disposition les derniers calculs de RU des sols (prise en compte des profondeurs racinaires notamment) ;
- intégrer une notion complémentaire d'hydromorphie des sols (cf. note en annexe) permettant de reproduire la réalité des besoins en irrigation observés.

La carte a ensuite été recoupée avec les classes d'irrigation proposées par la chambre d'agriculture d'Alsace.

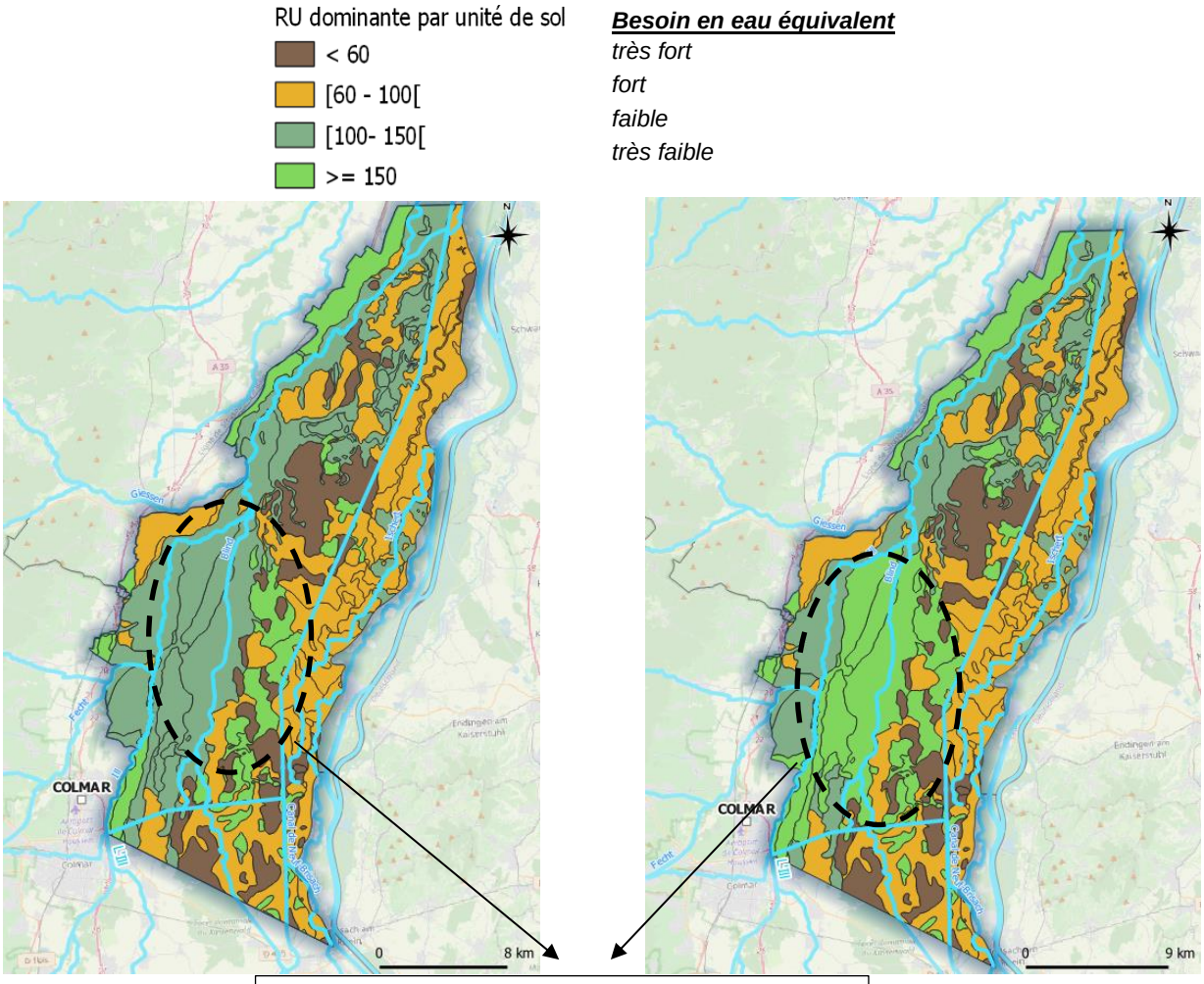


Figure 60 : Pondération de la RU des sols pour estimer le besoin en eau des cultures avec et sans pondération du critère d'hydromorphie.

Cette première approche permet de mieux représenter les besoins en irrigation pour une même culture sur la base de la connaissance du sol et d'un critère indirect sur la proximité de la nappe (hydromorphie).

Pour réaliser des chiffrages, il serait nécessaire d'ajouter les phénomènes de remontées capillaires, croisés avec la profondeur de la nappe. En effet, les ordres de grandeur de ces

phénomènes ne sont pas quantifiés à ce stade mais semblent importants au vu des observations de terrain. Il serait notamment nécessaire de disposer des profondeurs de la nappe à partir desquelles les interactions avec les cultures deviennent nulles ou marginales.

Un premier travail complémentaire sur la base des suivis réalisés par la chambre d'agriculture de la sécheresse des sols pourrait être réalisé pour comparer cette méthodologie et les observations réelles du terrain. Pour une caractérisation plus fine, il est nécessaire d'aller plus avant dans la caractérisation des remontées capillaires, critères d'hydormorphies et la compréhension générale des interactions sols / nappe pour avancer sur ce questionnement. De plus, si le lien avec la profondeur de la nappe est un élément majeur dans l'estimation du besoin en irrigation, cette dernière évolue plus ou moins fortement au cours de l'été en fonction des secteurs. Selon cette observation, le besoin en irrigation pourrait alors s'intensifier en limitant l'apport par la nappe.

En dernier point, le besoin en eau est lié au type de culture. Sur la base du RPG 2015 et 2016, le maïs représente environ 60 % de la surface cultivée sur la zone du Grand Ried. Les deux autres types de cultures prédominantes sont le blé et les prairies (non irrigués) représentant chacun entre 10 et 15 % des surfaces agricoles. Les cultures minoritaires sont ensuite la betterave (environ 2 à 3 %) puis le soja, les légumes (chou, pommes de terre) et du fourrage pour les pourcentages restants.

En dehors des zones de prairies qui sont concentrées sur la réserve naturelle de l'Illwald (centre et contour nord de la réserve) et le pourtour des forêts, les autres types de cultures majoritaires sont répartis de manière relativement homogène sur tout le grand Ried. Les cultures minoritaires de type légumes sont plutôt localisées autour des villages.

Le type de sol et la profondeur de la nappe apparaissent donc actuellement comme étant des facteurs prépondérants dans l'analyse du besoin en eau des cultures en fonction des différents secteurs.

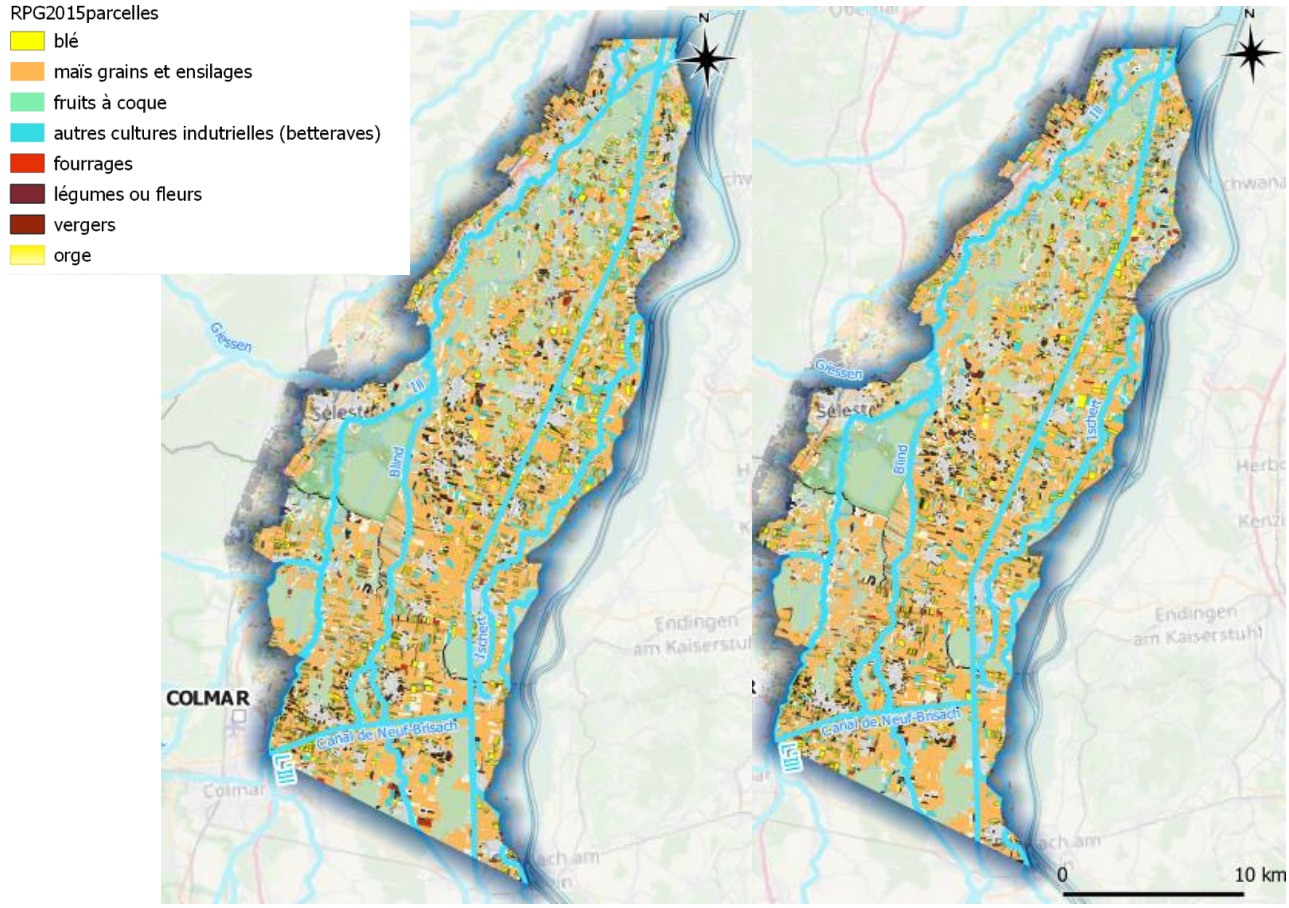


Figure 61 : Types de culture présents sur le Grand Ried sur fond open street map (données RPG 2015 et 2016).

En synthèse, les éléments suivants du fonctionnement de l'irrigation sur le secteur peuvent être listés :

- l'irrigation est liée aux types de cultures, au stade de développement des plantes. En raison de la présence majoritaire du maïs sur le secteur, la période présentant le plus de prélèvements est comprise entre la mi-juin et la fin août ;
- pour un même type de culture, le besoin en irrigation va différer en fonction du type de sol et de la profondeur de la nappe. Les paramètres sont insuffisants pour calculer l'apport direct de la nappe et/ou des limites de profondeurs sur le lien avec le besoin en eau des plantes. Toutefois, l'intégration d'un paramètre intermédiaire, l'hydromorphie des sols permet de proposer une première différenciation des besoins en irrigation pour un même type de culture ;
- pour rappel, en l'absence d'ouvrages collectifs, le fonctionnement de la majorité des ouvrages est lié à une parcelle. Leur durée d'utilisation est donc limitée dans le temps avec le passage d'un « tour d'eau » toutes les semaines ou tous les mois en fonction de la localisation. Un tour d'eau va être de quelques heures et le débit moyen est estimé à 60 m^3/h. Toutes ces valeurs sont des configurations types qui peuvent fortement varier en fonction du matériel disponible, de l'organisation, de la situation météorologique etc.

L'ensemble des documents transmis par la chambre d'agriculture Alsace et Grand-Est est disponible en annexe.

3.4.6. Croisement des observations sur la piézométrie et les points de prélèvements et rejets principaux

L'évolution de la piézométrie en lien avec les prélèvements a été analysée à différentes échelles temporelles :

- en juin 2019, avant la principale période d'irrigation, la carte piézométrique ne met pas en évidence une modification des écoulements à proximité des ouvrages AEP collectifs et des points industriels. Toutefois, la résolution de l'information cartographique ne permet pas de visualiser les éventuels effets locaux ;
- évolution de la piézométrie en 2019 avec analyse des périodes influencées et non influencées : pas d'influence visible des prélèvements en dehors de la période estivale ;
- évolution à long terme de 1980 à aujourd'hui avec des comportements différents suivant les zones :
    - une stabilité de la piézométrie moyenne sur la totalité du Grand Ried à l'est de l'Ill, voir une légère augmentation sur la bande rhénane,
    - une tendance à la baisse sur le cône de déjection du Giessen, en bordure ouest du Grand Ried. Cette baisse indique un déséquilibre constant entre recharge et prélèvements sur l'ensemble du bassin versant. L'analyse de l'ensemble du bassin versant du Giessen Liepvrette en terme d'usages et de fonctionnement hydrogéologique serait nécessaire et sort du cadre de cette étude,
    - un questionnement sur une légère baisse de la piézométrie moyenne au débouché de la Fecht mais qui n'est plus présente dès l'arrivée dans le secteur des cours d'eau « phréatiques »,
    - l'absence de tendance à la baisse au droit de la ville de Colmar.

Au niveau des principaux forages AEP, les analyses sont les suivantes :

- le forage d'Obere Erlen : il est en lien direct avec les cours d'eau phréatiques. Ce forage, pré-identifié lors de la précédente étude, a fait l'objet d'une analyse à part entière par l'APRONA. Son impact sur les niveaux piézométriques est limité par l'apport de l'Ill. Le détail du bilan hydrologique est disponible dans l'étude de l'APRONA ;
- les forages d'Ebersheim et de Benfeld : le lien avec les phréatiques est indirect par leur positionnement en rive ouest de l'Ill. Leur alimentation par l'Ill est probable et explique l'absence de signature piézométrique. Localement, ils peuvent contribuer à la baisse du niveau piézométrique et du débit de l'Ill ;
- les forages de Kastenwald (au sud et à l'extérieur de la zone d'étude): Ils sont ***sans lien direct*** avec les cours d'eau phréatiques. L'analyse piézométrique locale ne montre pas d'impact à l'année sur le sud de la zone d'étude et en aval de ces forages ;
- les forages de Neuland et Grosser Dornig (Ville de Colmar, à l'extérieur de la zone d'étude) : L'analyse piézométrique locale ne montre pas d'impact à l'année sur le sud de la zone d'étude et en aval de ces forages. En période estivale, la baisse de la piézométrie est plus forte au nord de Houssen que sur le piézomètre le plus proche des ouvrages AEP. Il ne semble donc pas y avoir d'impact sur les cours d'eau phréatiques et le Grand Ried.

Au niveau industriel :

- les plus forts prélèvements industriels se situent sur le secteur de la bande rhénane, soit sur un secteur soutenu par le Rhin en période estivale ;

- au niveau de Colmar, les prélèvements industriels sont éloignés des premiers cours d'eau phréatiques. La baisse piézométrique est moins marquée sur la zone industrielle de Houssen qu'en aval. L'impact ne va donc pas aller au-delà de la zone industrielle et n'est pas prépondérant sur une zone élargie. Il n'y a donc pas de lien direct avec les cours d'eau phréatiques et le Grand Ried.

Au niveau de l'irrigation :

- la baisse de la piézométrie imputable à des prélèvements coïncide d'un point de vue temporel avec les périodes d'irrigation, soit de la mi-juin à fin août. D'un point de vue géographique, les plus fortes baisses enregistrées se situent sur des zones agricoles et sans ouvrages pour l'AEP ;
- à une échelle plus fine, les secteurs présentant peu d'irrigation sont sous influence de la baisse globale de la piézométrie. Cette observation est cohérente avec les paramètres hydrodynamiques de la nappe, soit une transmissivité très forte et un léger effet captif entrainant une extrême rapidité de transmission du signal. Elle pointe par contre la nécessité pour la suite de l'analyse de proposer des secteurs larges et non limités à la seule zone impactée par les prélèvements.

3.4.7. Ordres de grandeurs des débits prélevés

De manière à compléter l'analyse des prélèvements et contribuer à une visibilité accrue des enjeux du secteur, des éléments de comparaison représentatifs du fonctionnement réel des forages du secteur ont été recherchés. En effet, en dehors de la problématique du manque de données sur l'irrigation, les différentes temporalités ne permettent pas de réaliser des comparaisons simples et représentatives sur la base de volumes annuels.

La proposition réalisée ici est de travailler sur un débit horaire représentatif : moyen ou de fonctionnement.

Au niveau des ouvrages AEP, le calcul est possible en calculant un débit moyen sur la base des valeurs journalières ou annuelles si le fonctionnement est relativement stationnaire. Ce calcul est notamment pertinent pour les pompages principaux disposant constamment d'un débit minimum. Sur les plus petits ouvrages AEP, les résultats sont peu utilisables à une échelle locale, car le fonctionnement est souvent (très) inférieur à 12 h par jour. Les volumes annuels pour les ouvrages AEP reportés dans le tableau suivant sont les maximums des volumes déclarés à l'agence de l'eau pour les années 2014, 2016 et 2017.

Au niveau de l'irrigation, pour un ouvrage non collectif, le débit moyen d'un ouvrage d'irrigation est estimé à 60 m^3/h d'après la chambre d'agriculture. La durée de fonctionnement est fonction du temps d'irrigation d'une parcelle soit entre 8 et 12h. Ce type d'ouvrage constitue actuellement la majorité des systèmes présents sur le Grand Ried.

La comparaison avec les pompages industriels n'a pas été réalisée en raison de l'absence de lien avec les cours d'eau phréatiques de ces derniers.

	Nom / localisation	code BSS	Volume annuel (max entre 2014, 2016 et 2017)	Débit horaire moyen (m3/h)	Nombre d'ouvrages d'irrigation équivalent (débit de 60 m3/h)
Périmètre d'étude	Niederwald	03423X0066/F1	499 580	57	1
	Marckolsheim	03431X0175/S	507 407	58	1
	Benfeld	03081X0001/F1	698 262	80	1
	Ebersheim	03078X0075/F2	961 348	110	2
	Obere Erlen	03077X0017/P2	1 695 785	194	3
	Somme des ouvrages de moins de 60 m3/h		2 922 309	333	6
	Total des ouvrages AEP		*7 284 691*	*831*	*14*
Ouvrages majeurs hors zones d'étude (secteur de Colmar et Sundhoffen)	Neuland	03427X0007/F2	879 181	100	2
	Neuland	03427X0001/F1	964 182	110	2
	Grosser Dornig	03782X0042/F2	559 106	64	1
	Grosser Dornig	03782X0059/F1	1 161 489	133	2
	Lindenkuppel (Kastenwald)	03783X0290/F	660 500	75	1
	Kastenwald	03783X0304/F	1 997 833	228	4
	Kastenwald	03783X0308/F3	2 417 496	276	5
	Total		*8 639 787*	*986*	*16*

Tableau 11 : Comparaisons des débits horaires moyens des ouvrages AEP à un nombre de forages d'irrigation (de débit moyen).

Cette comparaison permet de faire ressortir les points suivants :

- sur une photographie en instantanée des prélèvements sur le Grand Ried, le débit prélevé par l'intégralité des ouvrages AEP est égal au débit utilisé par une quinzaine d'ouvrages d'irrigation fonctionnant en simultanée. Cette comparaison peut descendre à dix ouvrages d'irrigation en excluant les zones non sensibles du Grand Ried, dont la bande rhénane ;
- les ouvrages AEP les plus conséquents sont situés à l'extérieur de la zone d'étude. Ils sont cités uniquement à titre de comparaison, leur impact sur les cours d'eau phréatiques ayant été exclu par l'analyse hydrodynamique des eaux souterraines.

Pour finaliser cette comparaison, une estimation du nombre de forages agricole en fonctionnement effectif serait nécessaire. Le nombre de forages déclarés aux DDT dépasse les 6 000 points avec une incertitude sur leur état actuel (abandonné, réalisé, exploité). De plus, l'utilisation réelle de chacun de ces forages peut varier d'un seul « tour d'eau » par période estivale dans les secteurs à faible irrigation, à plus de six sur les secteurs à forte demande en irrigation.

Par conséquent, l'utilisation et l'interprétation de ces chiffres doivent pour le moment être considérées avec précaution et ne peuvent être utilisées pour des calculs ou des projections.

3.4.8. Pistes de réflexion sur la prise en compte de l'évapo-transpiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration constitue un maillon essentiel d'un bilan hydrologique complet réalisé à l'échelle d'un bassin versant ou d'une structure hydro(géo)logique délimitée. Dans le cadre de cette analyse du Grand Ried, la part prélevée sur les eaux souterraines par les plantes et le sol via l'évapotranspiration a été questionnée. Toutefois, l'analyse de l'évapotranspiration *réelle* nécessite la prise en compte de nombreux paramètres indisponibles actuellement à l'échelle de la zone d'étude. Les estimations de volumes seraient par conséquents non fiables et sans possibilité de vérification des ordres de grandeurs avancés. Ainsi, comme pour l'irrigation, l'analyse a été axée sur la recherche de perturbations des eaux souterraines pouvant être reliées à l'ETR. Le travail a été réalisé en deux phases :

- l'analyse théorique des mécanismes du fonctionnement de l'ETR dans le cadre spécifique du Grand Ried ;
- en fonction des hypothèses résultantes de ce cadre théorique, la recherche d'indices sur des modifications de la piézométrie.

ETR et modèles théoriques

L'évapotranspiration potentielle et/ou réelle sont des paramètres fréquemment utilisés par le milieu agricole. Si l'évapotranspiration potentielle peut être relativement facilement estimée via des paramètres météorologiques pour un type de plante à un moment de son développement, l'évapotranspiration réelle prend en compte la disponibilité réelle de l'eau dans le sol.

De manière simplifiée, les différents composants usuels décrits et analysés dans la littérature sont pour le calcul de l'ETR :

- les végétaux (cf. Figure 62) : besoin en eau, période de croissance et production végétale, profondeur racinaire ;
- le sol : comportement hydrique, RU, RFU ;
- les paramètres météorologiques, pouvant être ramenés à l'ETP suivant différentes formulations : ensoleillement, températures, vents, humidité… ;
- l'environnement global de chaque végétal : isolé, plein champs, sous couvert, etc.

Dans le cadre précis de cette étude, deux groupes majoritaires et très distincts de végétaux peuvent être considérés au vu de leur surface :

- les forêts, dont l'Illwald et le Niederwald ;
- les cultures.

De nombreuses méthodes et modèles ont été développés, notamment en lien avec l'irrigation pour estimer en fonction de l'ETP, de l'état du sol et le type de culture, le besoin additionnel en eau à apporter. Les plus usités dans la vie pratique sont généralement issus de méthodes empiriques dépendant des connaissances locales : coefficient culturaux, bilan hydrique etc. en intégrant des mesures de l'état hydrique des sols (tensiomètres notamment). Les paramètres résultants de ce type d'estimation ont notamment été utilisés au paragraphe 3.4.5 pour estimer les besoins en eau en fonction des catégories de sols. Dans le même objectif opérationnel, une grille de lecture complémentaire en fonction du type de plante est aussi proposée par la chambre d'agriculture d'Alsace en annexe.

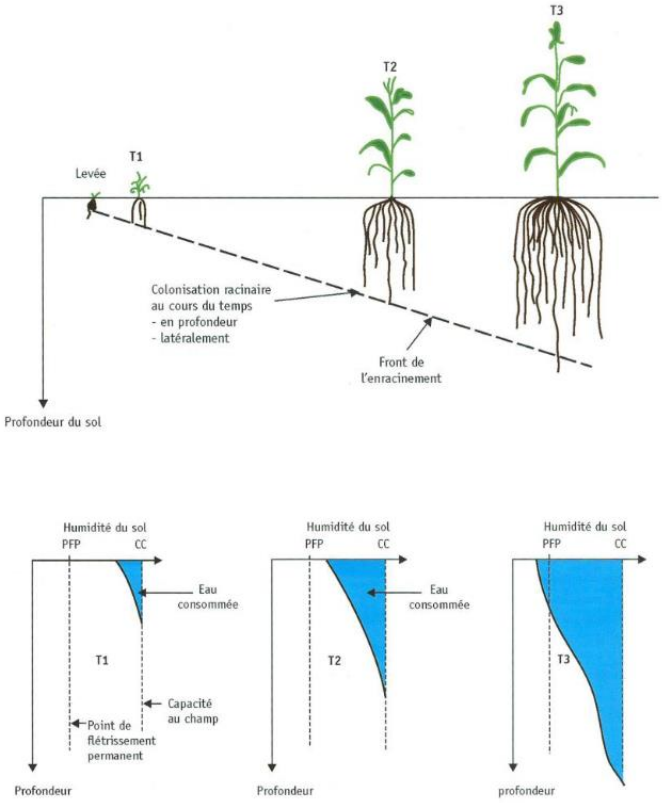


Figure 62 : Croissance végétale et évolution de la profondeur de captage du besoin en eau en fonction du front d'enracinement (document normatif sur l'irrigation, BS EN 15099-1:2007).

Au niveau des forêts, des travaux de modèle de gestion forestière sont développés notamment par l'INRAE. Ces modèles complexes nécessitent un travail à part entière intégrant le type de peuplements, l'état de développement (des bourgeons à la chute des feuilles), les paramètres météorologiques enregistrés et une caractérisation fine et détaillée du sol en lien direct avec le système racinaire.

Dans le cas du Grand Ried, la proximité de l'eau souterraine ajoute une composante sur le comportement hydrique du sol. Cette particularité a déjà été évoquée lors du travail sur la réserve utile (paragraphe 3.4.5) en lien avec l'irrigation pour permettre de faire ressortir les sols en lien très fort avec la nappe (cf. Figure 63).

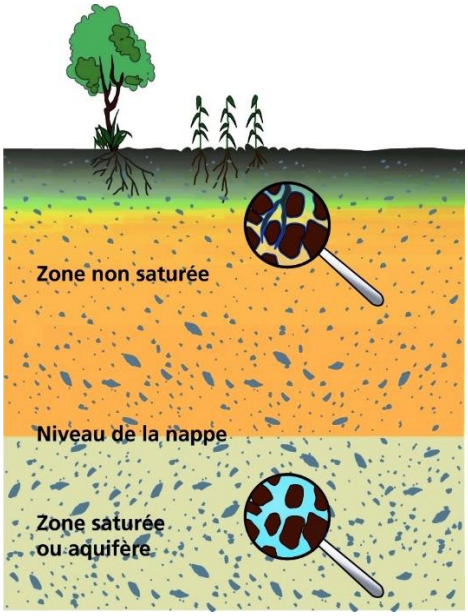


Figure 63 : Visualisation de la localisation de la zone non saturée, du niveau piézométrique et du système racinaire.

Analyse indirecte de l'action de l'ETR sur le niveau piézométrique

En raison de la difficulté à réaliser des calculs de volumes fiables, l'analyse a porté sur la recherche inverse en recherchant des indices de perturbation sur les eaux souterraines pouvant être reliés à l'ETR.

1. l'analyse des variations journalières en supposant une demande différente suivant les périodes de la journée, en lien avec les variations de l'ETP ;
2. l'évolution de l'évapotranspiration potentielle liée à la situation météorologique ;
3. les périodes de développement et de forte demande en eau dans l'année.

Les deux premiers points ont été analysés lors de l'interprétation des variations journalières en page 91. Ainsi, si un lien très probable est présent entre la transpiration des forêts et l'eau souterraine, les mécanismes sont peu connus et ne peuvent être reliés en l'état à un volume ou une baisse de la piézométrie journalière. Un travail complémentaire sur le lien entre le système racinaire/la profondeur des remontés capillaires des forêts semblerait nécessaire. Ce travail permettrait d'autre part de connaitre la résilience des forêts et des peuplements actuels à une augmentation des battements de la nappe et/ou une baisse de cette dernière.

Pour le troisième point, l'analyse du bilan et des éléments ci-dessus permet de faire ressortir les points suivants :

- la demande en eau des forêts devrait se répartir sur une période s'étalant de fin avril / début mai jusqu'à l'automne sauf lors d'un dépérissement des feuilles durant la période estivale. Dans ce cas, comme pour les prélèvements par pompage annuels, aucun signal clair ne se dégage sur la piézométrie globale ;
- les deux principales forêts se situant à proximité de l'Ill ou traversées par les diffluences de cette dernière, le prélèvement peut être masqué par l'influence de l'Ill. Il serait nécessaire d'en tenir compte dans l'analyse du soutien d'étiage et de la quantité nécessaire pour soutenir le besoin en eau des forêts ;

- le prélèvement dans les eaux souterraines des cultures dans les secteurs à très fortes proximité avec la nappe et, à priori, correspondant aux secteurs ne nécessitant pas d'irrigation. Ce prélèvement est fortement lié à la profondeur racinaire des cultures en place et à leur stade de développement.

Pistes d'analyses complémentaires

Les éléments indispensables pour prolonger les travaux d'estimation de l'évapotranspiration réelle dans un bilan hydrologique complet du Grand Ried seraient :

- une caractérisation fine de la réserve utile réelle, sur les zones agricoles et sur les zones forestières ;
- une meilleure compréhension du mécanisme de transfert de l'eau via la zone non saturée entre le niveau piézométrique et les systèmes racinaires des systèmes forestiers ou des cultures (cf. paragraphe 3.2.7) ;
- l'utilisation d'indicateurs complémentaires comme l'évolution des peuplements ou les constats de dépérissement réalisés sur ces dernières années en lien avec le stress hydrique que les forêts auraient pu subir ;
- la mise à disposition de données sur les forêts en format SIG des peuplements et de leur évolution ;
- le développement d'outils comme le modèle bijou de l'Inrae (Inra Nancy) intégrant la notion de niveau piézométrique et de transfert dans la zone insaturée.

3.5. POMPAGES D'ESSAIS : CARACTÉRISATION À UNE ÉCHELLE LOCALE DES RELATIONS NAPPES/RIVIÈRES

3.5.1. Objectifs et présentation des pompages d'essais

En raison de la facilité à exploiter l'aquifère rhénan à très faible profondeur, très peu d'essais de longue durée ont été réalisés et documentés sur la partie superficielle (0 - 10 mètres) de la nappe d'Alsace dans le Grand Ried. Or c'est ce niveau qui, d'une part, est majoritairement capté par les ouvrages de la zone, et d'autre part en connexion directe avec les cours d'eau.

Les pompages d'essais ont donc eu pour objectif premier de :

- déterminer les paramètres hydrodynamiques de la partie superficielle de l'aquifère ;
- caractériser la relation nappe / rivière sur deux cours d'eau phréatiques de typologies différentes.

Dans un second temps, ces résultats ont permis :

- le calcul par modèle analytique des débits prélevés sur les cours d'eau par pompage dans l'aquifère rhénan ;
- d'aider à la compréhension globale de la zone (limites, relations aux cours d'eau, …) ;
- de donner des éléments concrets sur la sectorisation de la zone d'étude (zone d'influence, interactions, …).

La réalisation des essais a été programmée en période d'étiage de manière à disposer de relations nappes/rivières représentatives de cette période. La nécessité de limiter les interférences liées aux pompages a resserré la fenêtre temporelle entre la fin de l'irrigation (fin

août/début septembre) et la remontée du niveau des eaux souterraines liée à la recharge automnale.

Trois types d'essais ont été programmés sur chaque site selon le protocole suivant :

- essais par paliers pour caractériser très succinctement l'ouvrage et, le cas échéant, obtenir le débit maximal utilisable ;
- un essai de 6 à 8h à débit limité représentatif d'un pompage moyen agricole, soit aux environs de 60 m^3/h selon les éléments transmis par la chambre d'agriculture d'Alsace ;
- un essai initialement prévu sur une durée de 72 h au débit maximal admissible par l'ensemble du dispositif (rejet, tuyauterie, pompe et puits de pompage) permettant de maximiser l'amplitude du signal piézométrique enregistré. Cette durée a été réduite en raison de l'atteinte de conditions aux limites avant la fin des 72 heures de pompage.

La remontée à l'équilibre a été suivie et mesurée entre chaque phase de pompage.

3.5.2. Localisation des pompages d'essais

Les localisations des deux sites utilisés pour les essais de pompage sont les suivantes (Figure 64) :

- site « sources du Riedbrunnen » : comme son nom l'indique, le site correspond aux résurgences formant ensuite le ruisseau phréatique du Riedbrunnen. Elles sont emblématiques et constituent une des plus grandes résurgences de la nappe d'Alsace dans le Grand Ried ;
- site « Muttersholtz » : ce site est situé à proximité du ruisseau phréatique « Kesslergraben » (dénomination de la BDCarthage [13]). Le débit correspond à la gamme des « petits » phréatiques. Des assecs ont été observés lors des dernières sécheresses.

[13] Par souci de cohérence, les termes de la BDCarthage sont utilisés. Toutefois, les dénominations locales peuvent différer de cette dernière ainsi que certaines bases de données notamment cartographiques

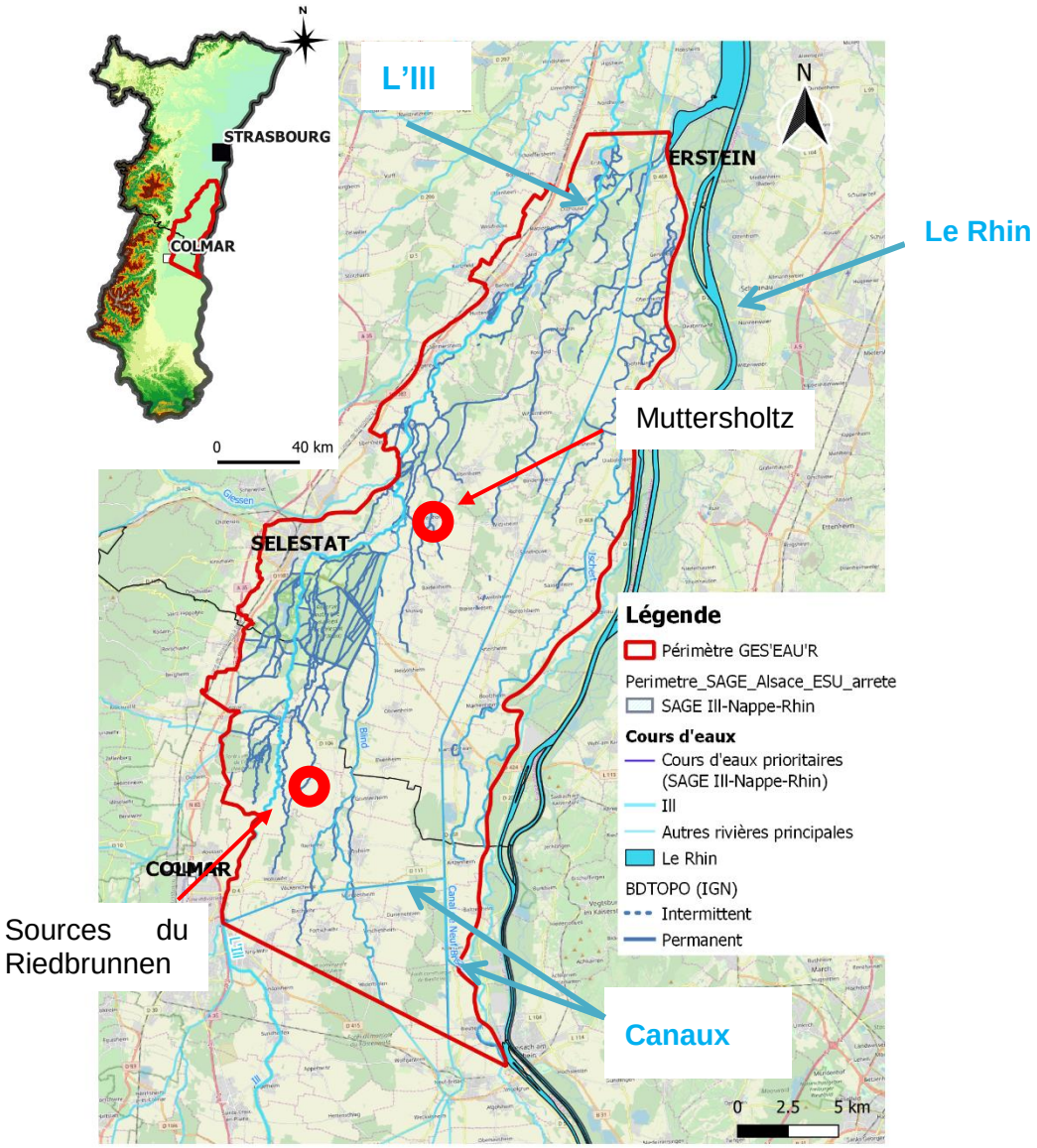


Figure 64 : Localisation des sites des pompages d'essais.

3.5.3. Conditions météorologiques et niveau piézométrique statique

La période des essais se situe à la fin de la période d'étiage (juillet à début octobre 2019). Les chroniques piézométriques du réseau APRONA se situant à proximité des deux sites indiquent une légère remontée du niveau piézométrique. Les essais ont pu être finalisés avant les fortes précipitations de la mi-octobre qui ont engendré une forte remontée du niveau piézométrique et le début de la recharge automnale.

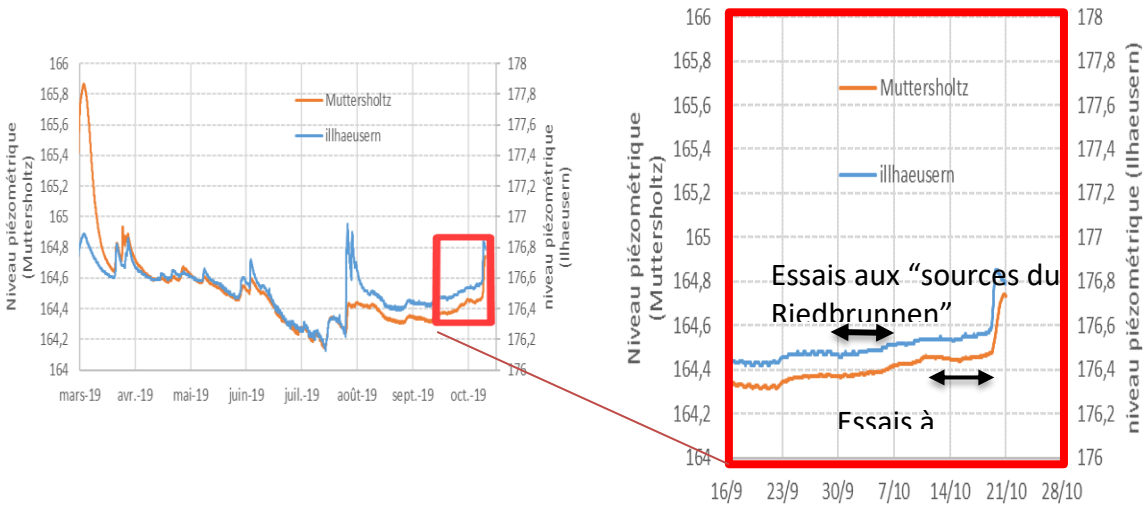


Figure 65 : Niveau piézométrique statique durant les pompages d'essais (données du réseau piézométrique APRONA).

3.5.4. Description et données du pompage d'essais sur le site « Sources du Riedbrunnen »

Dispositif

Les essais de pompage ont été réalisés sur une parcelle agricole disponible en fin d'été (accès autorisés par le propriétaire et l'exploitant entre la période de culture d'été et une période de labour).

Le point de pompage se situe à 250 mètres de la rivière Riedbrunnen. La principale partie des résurgences se situe à environ 300 m en amont du site. (cf. Figure 66). Les cours d'eau mentionnés sur la BDcarthage et la BDtopo (IGN) en amont des sources étaient à secs au moment de l'essai. L'Ill se situe à 1900 mètres à l'ouest du point de pompage.

Les ouvrages utilisés pour la réalisation des essais sont les suivants (cf. Figure 67) :

- puits de pompage : puits agricole de faible profondeur (4 mètres). Le niveau a été suivi manuellement (signal bruité) ;
- Pz1 : piézomètre temporaire de petit diamètre (40 mm) situé contre le puits de pompage (1 m) permettant de suivre le signal au puits de pompage hors bruitage lié à la pompe ;
- Pz 2, pz4 et pz5 : piézomètres temporaires de petits diamètres (40 mm) ;
- Pz3 : ouvrage agricole servant de piézomètre (profondeur d'environ 3,5 mètres).

Les piézomètres temporaires ont été réalisés une semaine avant la réalisation des essais et retirés dès l'arrêt des mesures. Ils sont crépinés sur une profondeur comprise entre 2,5 et 3 mètres. Pz1 à Pz 5 ont été équipés de sondes mesurant en continu le niveau piézométrique (capteur de pression de précision millimétrique avec compensation barométrique intégrée) et la température.

Le niveau piézométrique statique avant l'essai était compris entre 0,8 et 1,2 m de profondeur par rapport au sol sur l'ensemble des piézomètres.

L'eau pompée a été rejetée dans le Riedbrunnen[14] après passage dans un bac de décantation et la mise en place d'un dispositif limitant le surcreusement de la rivière (cf. Figure 69). Les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée (pH, conductivité électrique et température) ont été suivis en fin de ligne de conduite, avant rejet dans la rivière durant l'intégralité du pompage.

Trois sondes mesurant la hauteur d'eau et la température en continu ont été disposés dans le Riedbrunnen : la première au droit de l'essai (riv1), la deuxième au niveau d'une résurgence légèrement en amont et la troisième en aval (riv3) mais avant le point de rejet de l'eau d'exhaure résultant du pompage.

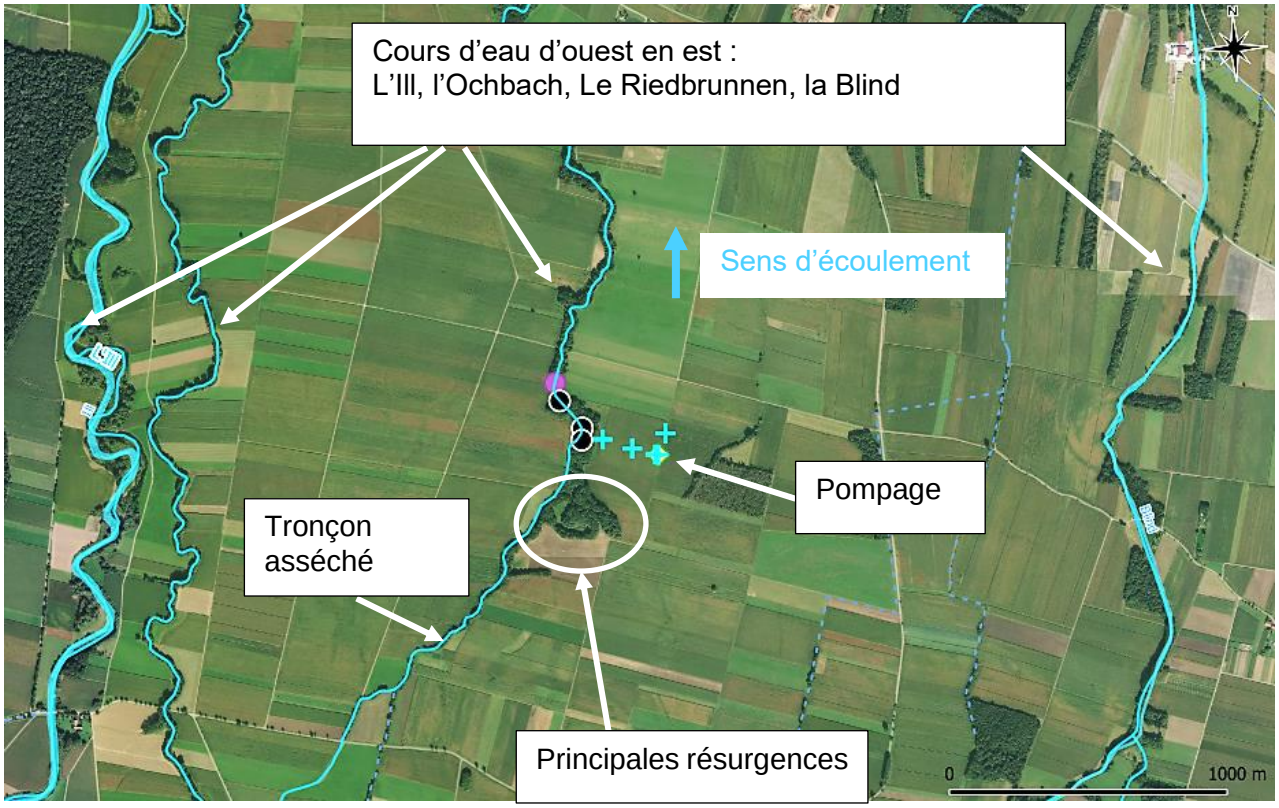


Figure 66 : Environnement du site du pompage d'essai « sources du Riedbrunnen » (fond orthophotographique IGN).

[14] Une autorisation exceptionnelle de rejet dans le Riebrunnen a été obtenu auprès de la DDT 68 au vu des conditions particulières de l'opération.

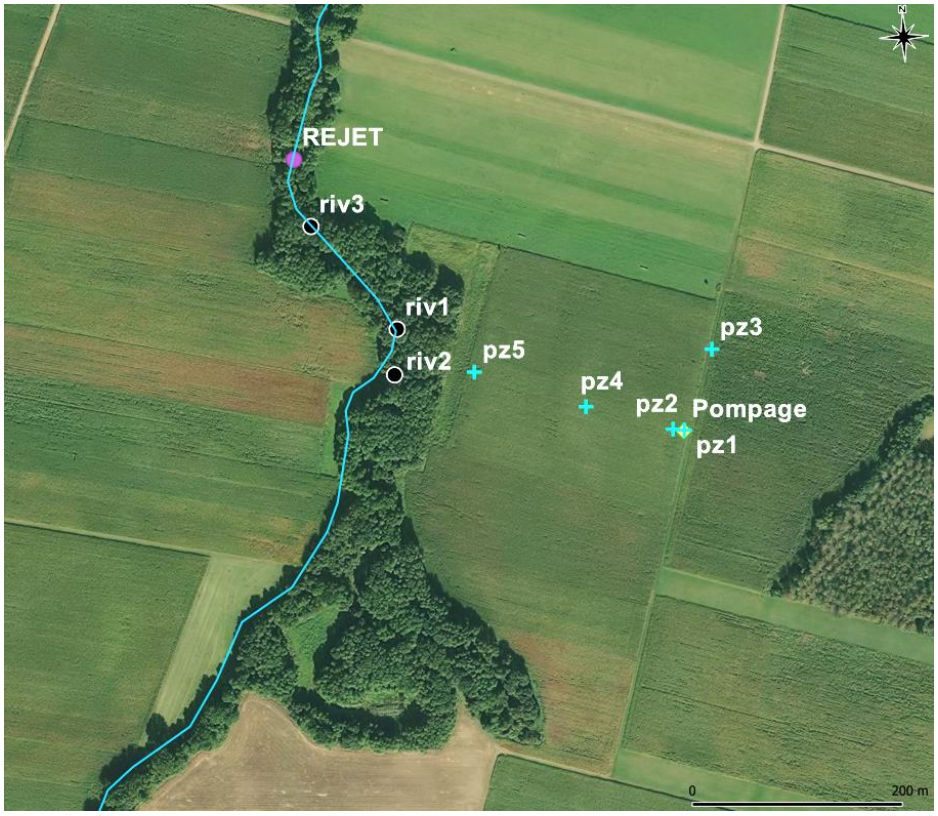


Figure 67 : Localisation des ouvrages utilisés durant le pompage d'essais (fond ortho-photographique IGN).

Les distances entre les piézomètres, le point de pompage et les cours d'eau sont résumées ci-dessous :

Distance en mètres	Puits de pompage	pz1	pz2	Pz3	Pz4	Pz5
Puits de pompage	X	1 mètre	10 mètres	80 mètres	100 mètres	210 mètres
Riedbrunnen (selon la perpendiculaire au cours d'eau)	250	250	240	270	150	40
Ill	1 900	1900	1890	1900	1800	1710
Blind	1600	1600	1610	1600	1700	1810

Figure 68 : Synthèse des distances entre points de mesures, point de pompages et les cours d'eau principaux.

Figure 69 : Visualisation du site de pompage : puits agricole, conduite de rejet avec débitmètre magnétique, et déversement en champignon dans la rivière pour limiter l'impact hydrodynamique sur la rivière.

Chronologie et déroulé

La mise en place du dispositif a été menée entre le 25 et le 27 septembre (réalisation de piézomètres et pose de la conduite).

La séquences de pompage qui s'est déroulée entre le 30 septembre et le 4 octobre (Figure 70) est la suivante:

- Essais par paliers : 3 x ½ heures
- Attente de la remontée à l'équilibre : 2 heures
- Essai « 1 » à 59 m^3/h : 7 heures
- Remontée : 7 heures
- Essai « 2 » à 85 m^3/h : 59 heures
- Remontée à l'équilibre : 12 heures

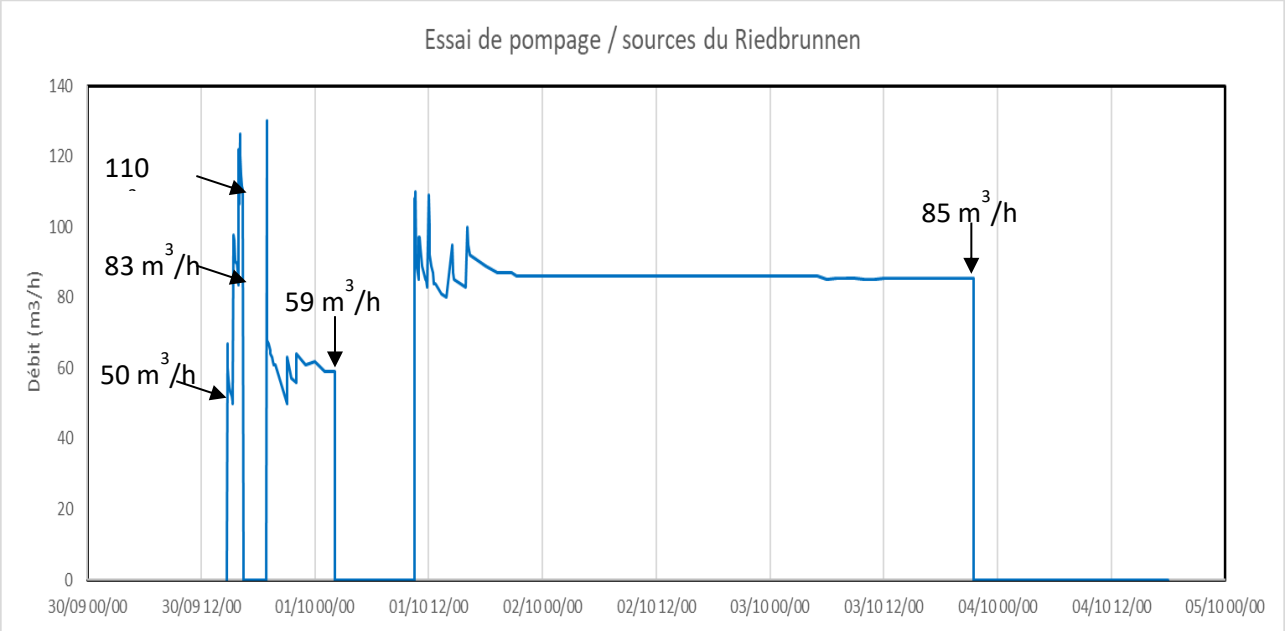


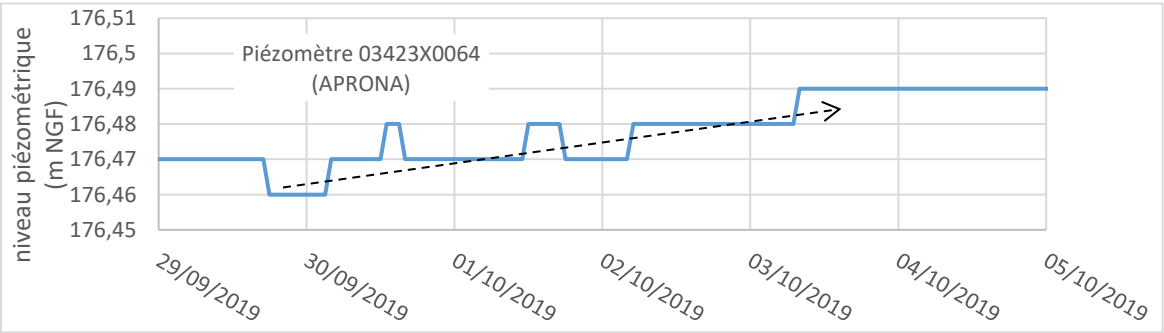
Figure 70 : Chronologie des débits utilisés lors de l'essai.

Observation et traitement des données

- **Niveaux piézométriques**

Trois signaux se superposent sur le niveau piézométrique dynamique enregistré sur chaque piézomètre :

1. une remontée globale de la piézométrie qui peut être estimée à environ 1 centimètre, enregistrée sur la base du piézomètre n° 03423X0064, géré par l'APRONA, situé à proximité de la zone de test (cf. Figure 71) ;
2. des variations cycliques d'une amplitude d'environ 1 centimètre sur 24 h présentant un maximum entre 9 et 10 heures du matin et un minimum entre 21 heure et 22 heures (cf. Figure 72) ;
3. le rabattement lié au pompage que l'on cherche à analyser. Ce dernier varie en fonction de l'éloignement au point de pompage, soit de moins d'un demi centimètre à 210 mètres, à proximité de la rivière à plus de 50 cm à proximité immédiate du point de pompage (cf. Tableau 12).



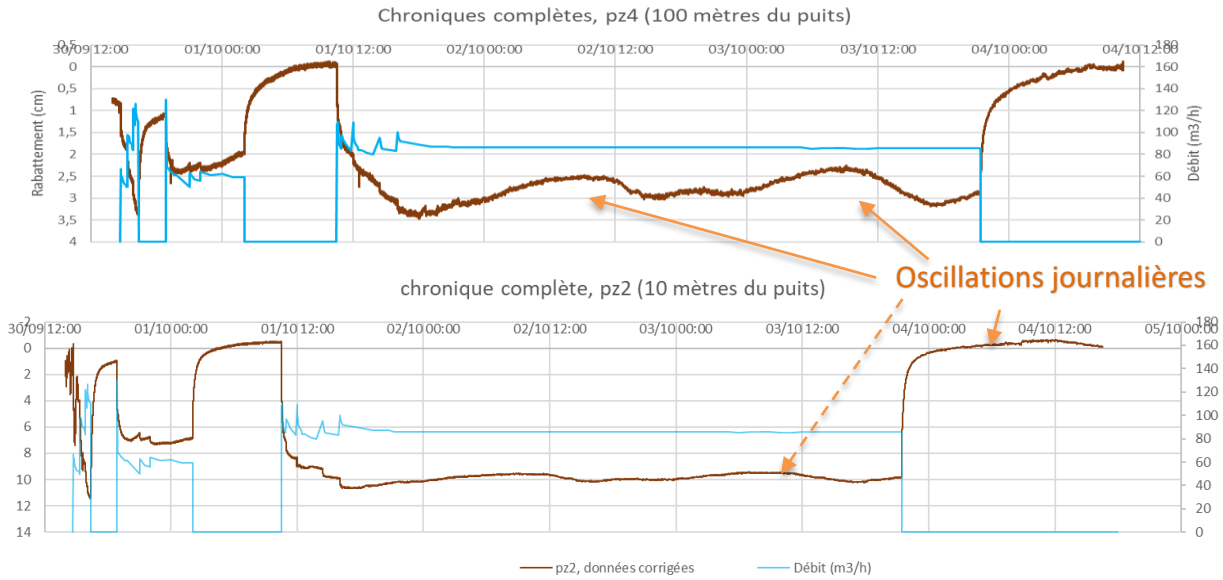


Figure 72 : Exemple des effets de cyclicité sur les rabattements de pz2 et pz4.

		Rabattement induit par le pompage (centimètres)					
		débit (m^3/h)	pz1 (1 m)	pz2 (10m)	Pz3 (80 m)	Pz4 (100 m)	Pz5 (210 m)
Essai par paliers	1er palier	50	25	4	2	1	0,1
	2ème palier	83	50	9	3,5	1,75	0,2
	3ème palier	110	62	11,5	5	2,5	0,5
Essais longs	fin essai 1	59	33	7	3	1,5	0,4
	fin essai 2	85	50	10	5	2,85	0,8

Tableau 12 : Ordres de grandeurs des rabattement obtenus sur les différents piézomètres durant les différentes phases de pompages.

Les données brutes sur les différents piézomètres sont disponibles en annexe.

- **Pré-traitement des données piézométriques**

De manière à faciliter l'interprétation du signal de l'essai, un travail de prétraitement des données a été réalisé. Notamment :

- l'évolution de la piézométrie générale a été estimée comme linéaire sur chaque période de mesure, le piézomètre de l'Aprona le plus proche ne permettant pas une précision suffisante pour aller au-delà de cette correction. La différence de niveau piézométrique a été estimée entre deux points pouvant être considérés comme à l'équilibre (niveau avant un essai et à la fin de la remontée) et à une période équivalente de la journée, pour éviter la cyclicité journalière. La correction apportée peut se révéler inférieure à la remontée réelle du niveau statique sur l'ensemble des sondes ;
- la cyclicité journalière a été analysée et quantifiée mais n'a pas été retirée des signaux mesurés. En effet, les tentatives de reproduction de ces variations via des modèles simples de type sinusoïdes ne semblent pas suffisamment reproduire les variations journalières. Par conséquent, la soustraction du signal modélisé aux données brutes entraine des distorsions de la courbe pouvant entrainer une erreur d'analyse et d'interprétation. La suite de l'interprétation a donc été réalisée sur les données non corrigées des variations journalières.

- **Hauteurs d'eau en rivières**

Malgré le positionnement du point de rejet à 250 mètres en aval et dans un bras du Riedbrunnen, le rejet a très fortement influencé les trois sondes positionnées en rivière.

Au vu de l'amplitude très faible attendue sur le signal provenant du prélèvement et de la complexité du site, les données issues de ces sondes n'ont pas été interprétées.

- **Paramètres physicochimiques**

Les paramètres du fluide pompé et mesurés avant le rejet en rivière (Tableau 13) sont constants sur l'intégralité des temps de pompages. En effet, les seules variations de températures sont uniquement liées à l'incidence de la température extérieure sur la conduite. De même, la température ayant une légère influence sur la conductivité et le pH, les variations de ces paramètres sont considérées comme négligeables.

Température	Conductivité électrique	pH
13,5°C ± 0,5	912 à 920 µS/cm	7,2

Tableau 13 : Paramètres physicochimiques au niveau du bac déversoir, avant rejet en rivière.

Les températures ([15]) relevées sur les piézomètres proches du point de pompage ont présenté des variations de l'ordre de 1,5 °C (Tableau 14), coïncidant avec les périodes de pompage ou de remontée de pression (Figure 73). Sur la rivière, des variations sont perçues mais non interprétées en raison de possibles influences de l'eau rejetée et des conditions extérieures.

Points de mesure	Pz1	Pz2	Pz3	Pz4	Pz5	Riv 1	Riv2	Riv3
Températures	15,6°C (*) 14°C (**)	15°C (*) 13,5°C (**)	16,3°C (*) 16°C (**)	16,5°C ± 0,1	14°C ± 0,1	13 °C à 12,6 °C	13,1 à 12,8°C	13,8 à 12,4 °C

Tableau 14 : Données de température obtenues sur les différentes sondes de mesures.

(*) Température initiale et finale de l'essai

(**) Température mesurée à la fin de l'essai 2

[15] La mesure a été réalisée au niveau de la sonde, immergée sous 1 à 1,5 mètres d'eau à l'intérieur du piézomètre.

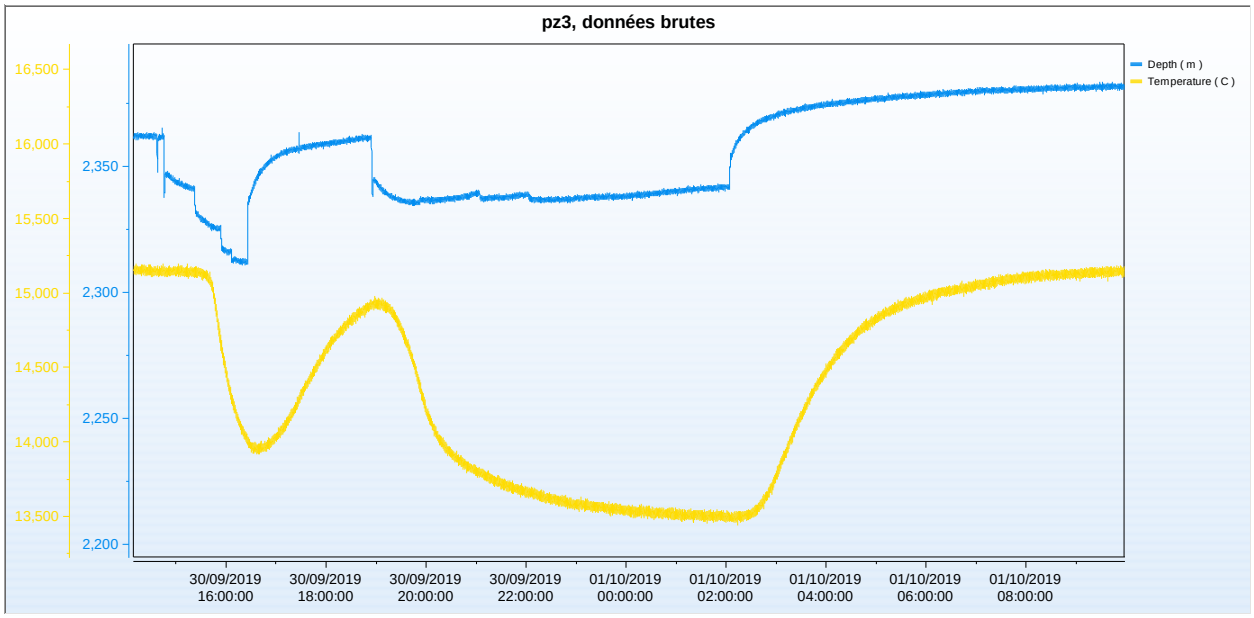


Figure 73 : Évolution de la température sur le piézomètre 3 durant le déroulé des essais.

Des mesures de conductivité complémentaires ont été réalisées en rivière. Les mesures ont été réalisées aux différents types de résurgences observées (venues latérales, auréole de sable avec présence de bulles) et en remontant le cours d'eau entre la sonde riv 2 et les premières sources amont. Les données obtenues ne permettant pas de tirer un schéma simple d'alimentation de la rivière, cela orienterait potentiellement vers une alimentation plus diversifiée que le simple niveau superficiel capté par les forages.

En complément, des suivis physico-chimiques *in situ* des prélèvements ont été réalisés pour des analyses géochimiques des éléments majeurs aux laboratoires du BRGM Orléans comprenant :

- un prélèvement de l'eau pompée en fin de pompage ;
- deux prélèvements en rivière.

3.5.5. Description et données du pompage d'essais sur le site de Muttersholtz

Dispositif

Les essais de pompage ont été réalisés sur des puits « incendies » de la commune de Muttersholtz, cette dernière ayant mis à disposition les ouvrages ainsi que des facilités d'installation sur l'ensemble de la commune.

Le point de pompage se situe à 250 mètres de la rivière Kesslergraben. L'Hoehlachgraben, utilisé pour le rejet était à sec au moment de l'essai. L'Ill se situe à 1 100 mètres à l'ouest du point de pompage, distance pouvant être considérée comme moindre au vu des connexions avec les autres cours d'eau de la localité.

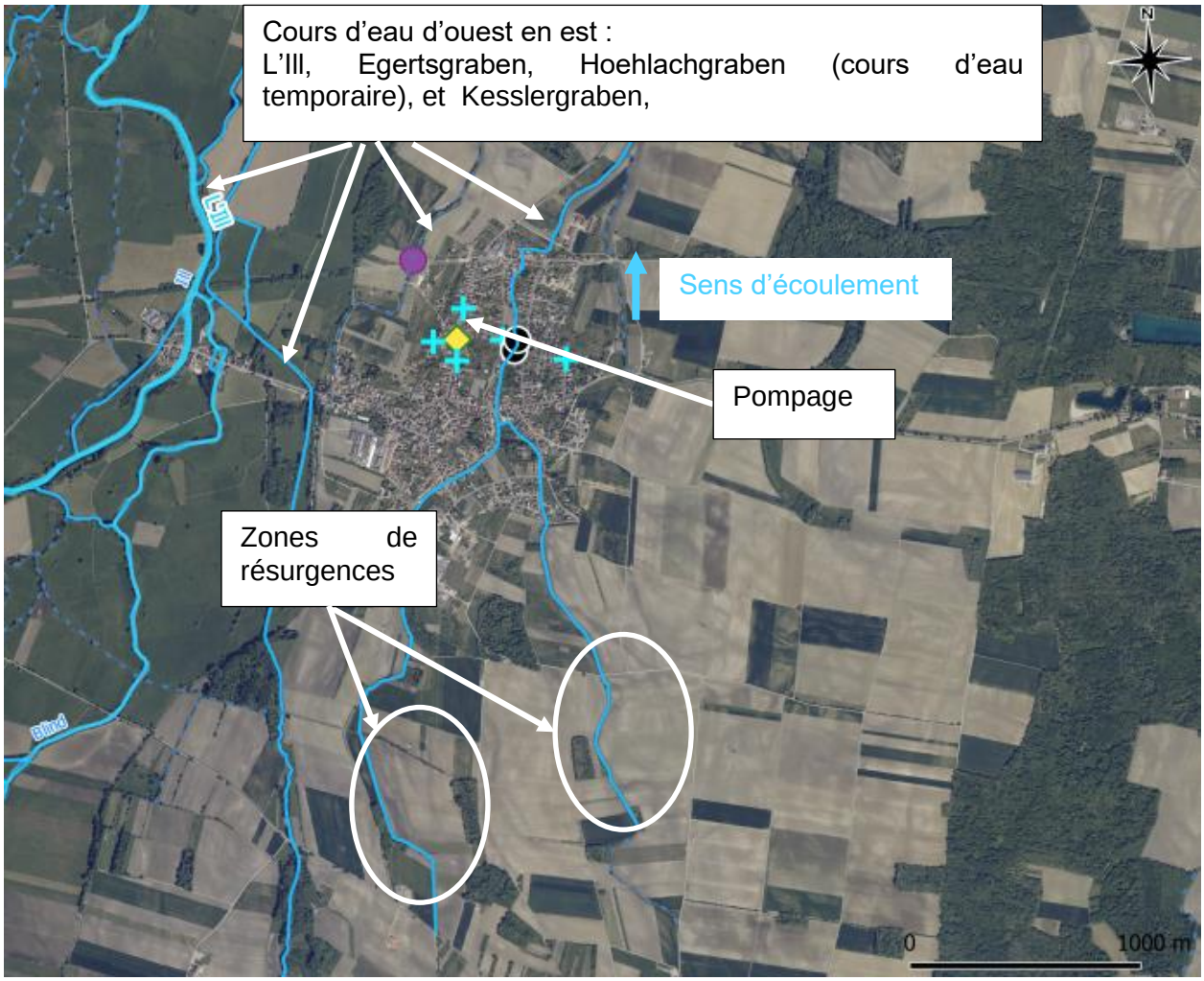


Figure 74 : Environnement du site du pompage d'essai «Muttersholtz » (fond orthophotographique IGN).

Les ouvrages utilisés pour la réalisation des essais sont les suivants :

- puits de pompage : puits industriel de large diamètre (supérieur à 1 m) et d'une profondeur suffisante (7 mètres). Le niveau a été suivi par sonde mais il est fortement bruité ;
- Pz1, pz3, pz4 et pz5 : puits incendies répartis autour du puits de pompage ;
- Pz6 : puits incendie situé de l'autre côté du Kesslergraben par rapport au point de pompage et permettant de suivre la piézométrie statique locale.

Tous les ouvrages ont été équipés de sondes mesurant en continu le niveau piézométrique (capteur de pression de précision millimétrique avec compensation barométrique intégrée) et la température. Le niveau piézométrique statique avant l'essai était compris entre 1,5 et 3 m de profondeur par rapport au sol sur l'ensemble des piézomètres.

L'eau pompée a été rejetée dans le Hoelachgraben[16] après passage dans un bac de décantation et la mise en place d'un dispositif limitant le surcreusement de la rivière. Les paramètres physico-chimiques de l'eau pompée (pH, conductivité électrique et température) ont été suivis en fin de ligne de conduite, avant rejet dans la rivière durant l'intégralité du pompage.

Deux sondes mesurant la hauteur d'eau et la température en continu ont été disposées dans le Kesslergraben : la première au droit de l'essai (sonde Kess1) et la deuxième (sonde Kess2) en répétition de la première légèrement en aval. La reconnaissance dans le cours d'eau a révélé la présence de plusieurs évacuations d'eaux pluviales pouvant fortement impacter les mesures de hauteurs d'eau.

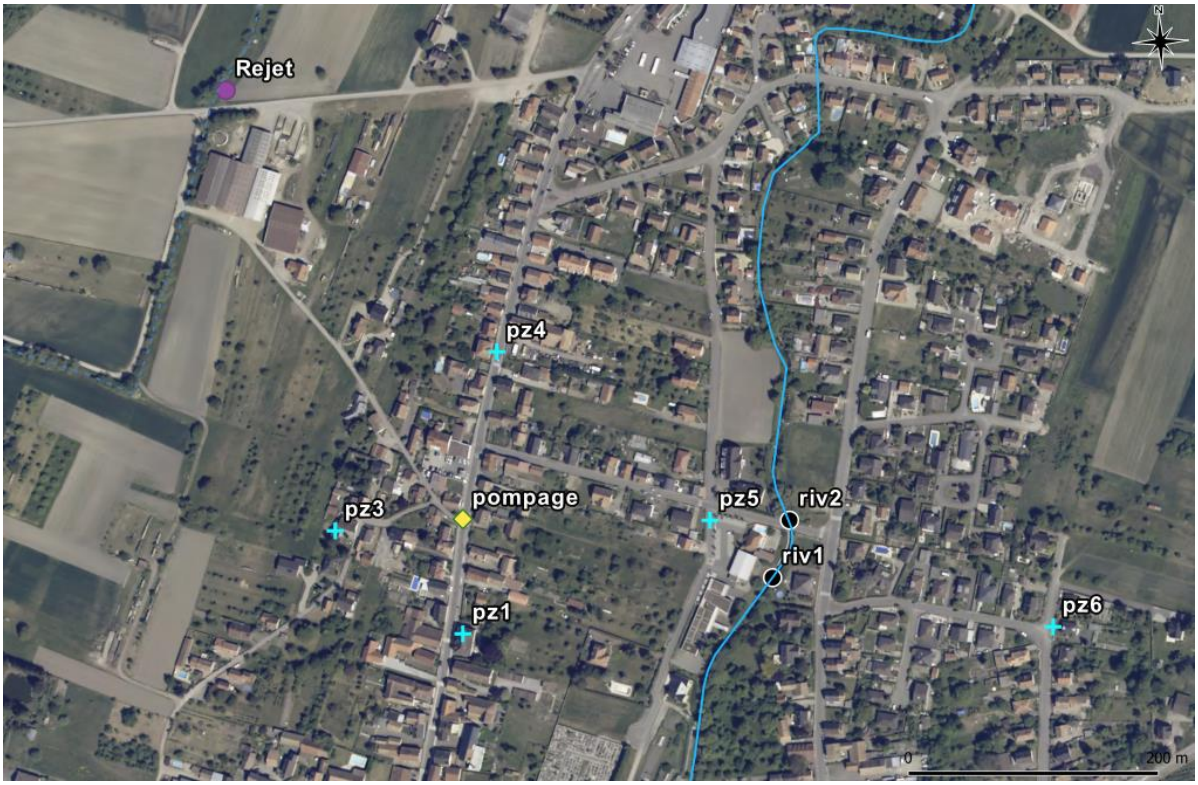


Figure 75 : Localisation des ouvrages utilisés durant le pompage d'essais (fond ortho-photographique IGN).

Les distances entre les piézomètres, le point de pompage et les cours d'eau sont résumées ci-dessous :

Distance en mètres	Puits de pompage	pz1	Pz3	Pz4	Pz5	Pz6
Puits de pompage	X	90 mètre	100 mètres	140 mètres	200 mètres	550 mètres
Kesslergraben (selon la perpendiculaire au cours d'eau)	250	200	350	250	50	350
Ill	1100	1100	1000	1100	1300	1650

Tableau 15 : Synthèse des distances entre les points de mesures, le pompages et les cours d'eau principaux.

[16] Une autorisation exceptionnelle de rejet dans le Hoelachgraben a été obtenue auprès de la DDT 67 au vu des conditions particulières de l'opération.

Chronologie et déroulé

La mise en place du dispositif a été réalisée entre le 7 et le 11 octobre (pose de la conduite avec prise en compte des habitants et des routes).

La séquences de pompage qui s'est déroulée entre le 14et le 18 octobre est la suivante:

- Essais par paliers : 3 x ½ heures
- Attente de la remontée à l'équilibre : 2 heures
- Essai « 1 » à 64 m^3/h : 8 heures
- Remontée (et attente d'une accalmie) : 24 heures
- Essai « 2 » à 160 m^2/h : 48 heures
- Remontée à l'équilibre : 12 heures

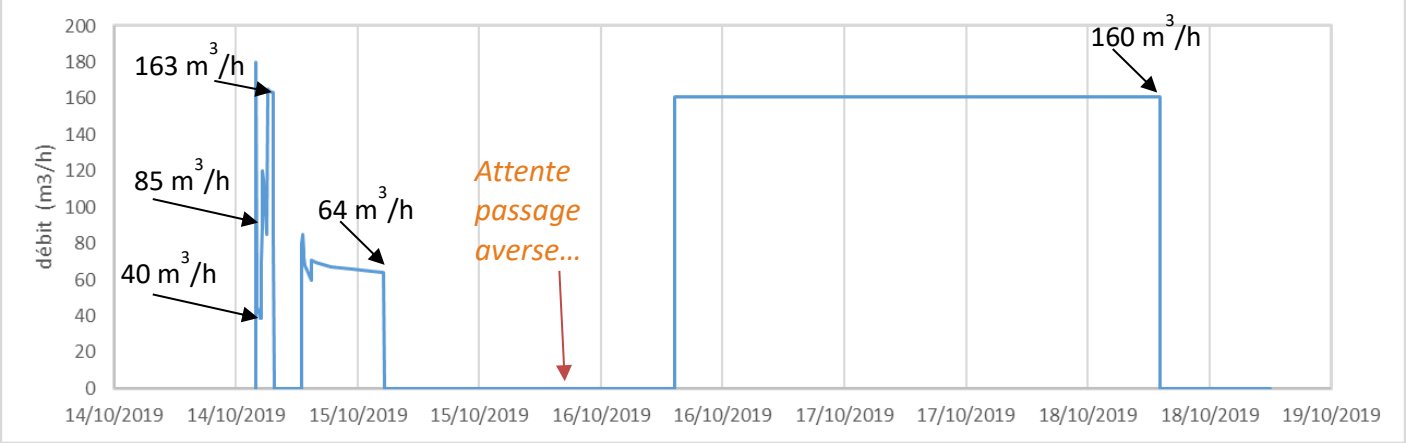


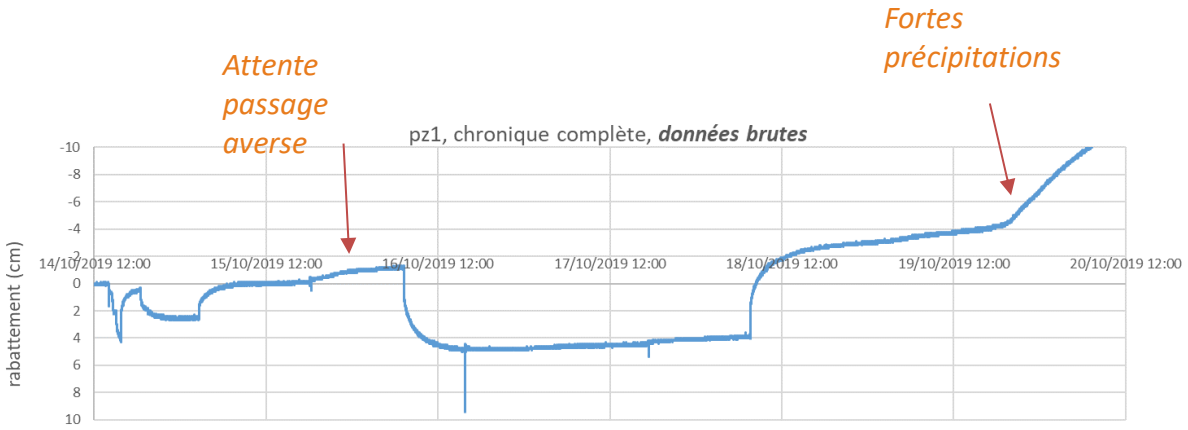
Figure 76 : Déroulé de l'essai de pompage sur le site de Muttersholtz.

Observation et traitement des données

- **Niveaux piézométriques**

Trois signaux se superposent sur le niveau piézométrique dynamique enregistré sur chaque piézomètre :

1. des évolutions de la piézométrie liées aux précipitations et enregistrées sur le piézomètre positionné à proximité ;
2. le rabattement lié au pompage que l'on cherche à analyser. Ce dernier varie en fonction de l'éloignement au point de pompage, soit de moins d'un demi centimètre à 210 mètres, à proximité de la rivière à plus de 50 cm à proximité immédiate du point de pompage.



	Rabattement induit par le pompage (centimètres)						
		débit (m^3/h)	puits (0 m(*))	Pz1 (90 m)	Pz3 (100 m)	Pz4 (140 m)	Pz5 (210 m)
Essai par paliers	1er palier	40	12	0,8	0,3	0,3	0,2
	2ème palier	90	32	2,1	0,9	0,9	0,4
	3ème palier	163	65 (stabilisé ?)	2,8 (non stabilisée)	2 (non stabilisé)	1,8 (non stabilisé)	0,8 (non stabilisé)
Essais longs	fin essai 1	65	20	2,8	1,2		0,8 à 1
	fin essai 2	160	60	6,5	4	3,5	2

(*) données influencées par les pertes de charge

Figure 78 : Ordres de grandeurs des rabattement obtenus sur les différents piézomètres durants les différentes phases de pompages (site de Muttersholtz).

- **Prétraitement des données piézométriques**

Seul l'essai 2 a été traité pour permettre une analyse poussée de cette phase de tests. La correction de la variation globale de la piézométrie a été réalisée via une simplification de la montée de la piézométrie enregistrée sur pz6.

- **Hauteurs d'eau en rivières**

Les sondes en rivières ont été impactées par les différents conduites de rejets des eaux pluviales se déversant dans le cours d'eau, ainsi que des signaux anthropiques d'origines inconnues (rejets, pompes de relevages ?).

- **Paramètres physico-chimiques**

Les paramètres de l'eau pompée, mesurés avant le rejet en rivière (Tableau 16) sont constants sur l'intégralité des temps de pompages. En effet, les seules variations de températures sont uniquement liées à l'incidence de la température extérieure sur la conduite. De même, la température ayant une légère influence sur la conductivité et le pH, les variations de ces paramètres sont considérées comme négligeables.

Température	Conductivité électrique	PH
13,5°C ± 0,5	662 ± 1	7,2

Tableau 16 : Paramètres physicochimiques au niveau du bac déversoir, avant rejet en rivière.

Les températures ([17]) relevées sur les piézomètres n'ont pas montré de variations particulières (Tableau 17). Seules les températures aux puits présentent des évolutions de températures pouvant être rapprochées des différentes phases de tests.

Points de mesure	Puits	Pz1	Pz3	Pz4	Pz5	Pz6 (éloigné)	Kess1	Kess2
Températures	15,2°C (*) 14,2°C (**)	16,3°C ± 0,1	15,9°C ± 0,05	14,95°C ± 0,05	17,55°C ± 0,05	13,85°C ± 0,5	13 °C à 12,6 °C	13,1 à 12,8°C

Tableau 17 : Données de température obtenues sur les différentes sondes de mesures (site de Muttersholtz).

(*) Température initiale et finale sur l'ensemble des essais
(**) Température mesurée à la fin de l'essai 2

Les différentes températures mesurées en eau souterraine sont supérieures aux valeurs de la rivière. Les hypothèses sur cette différence sont multiples et ne peuvent être différenciées :

- influence des ouvrages (puits incendies larges, de faibles profondeurs) ;
- réchauffement anthropique : routes, canalisations etc. ;
- différence de températures dans la partie superficielle de l'aquifère liés à une influence des conditions météorologiques : fin de la période estivale.

Sur la rivière, des variations sont perçues mais non interprétées en raison de possibles influences de l'eau rejetée et des conditions extérieures.

En complément, des suivis physico-chimiques *in situ* des prélèvements ont été réalisés pour analyses géochimiques des éléments majeurs aux laboratoires du BRGM Orléans comprenant :

- un prélèvement de l'eau pompé en fin de pompage ;
- deux prélèvements en rivière.

[17] La mesure a été réalisée au niveau de la sonde, immergée sous 1 à 1,5 mètres d'eau à l'intérieur du piézomètre.

3.5.6. Interprétations

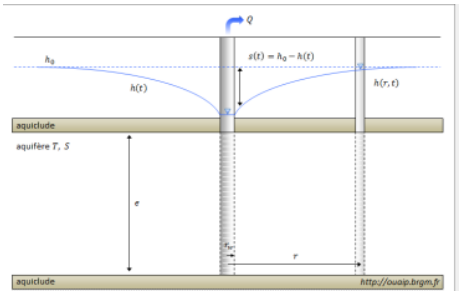
Méthodologie

La visualisation des données brutes a permis d'identifier dès la réalisation de l'essai la présence d'une ou plusieurs limites alimentées.

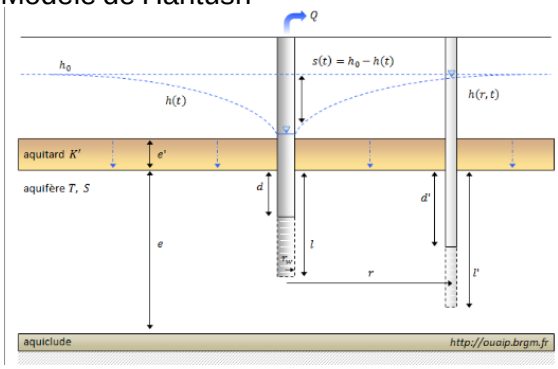
L'interprétation a ensuite été réalisée via l'outil OUAIP[18] et des tests de calage ont été réalisés avec les modèles de Hunt (feuille de calcul interne au BRGM). Plusieurs modèles ont été utilisés pour réaliser le calage des paramètres :

- modèle de Theis avec limite à potentiel imposé (perméable). Aucune correction sur le rabattement n'a été apportée en raison du caractère semi captif ;
- modèle semi captif de Hantush (possibilité d'intégrer l'effet du niveau argileux) ;
- modèle de Hunt (2003) avec prise en compte des échanges nappes-rivières.

Modèle de Theis



Modèle de Hantush



Modèle de Hunt

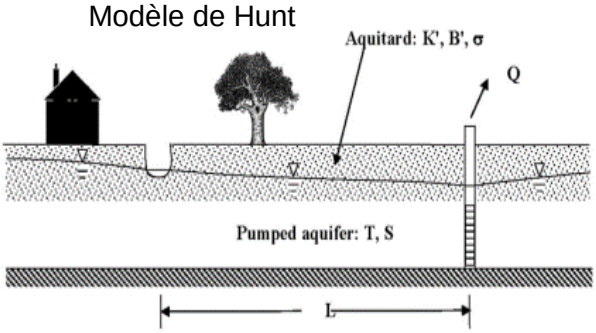


Figure 79 : Schémas simplifiés des trois approches utilisées lors de l'interprétation.

Les analyses et calages des paramètres sont disponibles en annexes.

[18] OUAIP : OUtil d'Aide à l'Interprétation des essais de Pompage.

Logiciel d'accès libre développé par le BRGM. Informations et téléchargement : https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/ouaip-outil-aide-interpretation-pompages-essais ou http://ouaip.brgm.fr/

Paramètres hydrodynamiques, structure de l'aquifère

Les interprétations détaillées avec calage des paramètres sont disponibles en annexes.

Les paramètres hydrodynamiques pour le site du Riedbrunnen sont les suivants :

	Transmissivité	Coefficient d'emmagasinement	Distance perçue // limite potentiel imposé	Type de modèle	Remarques
Pz2	0,12 à 0,2 m^2/s	2 x 10^{-3}	1300 mètres	Theis + limite imposée	Possibilité d'un limite intermédiaire à 200 mètres masquée par
Pz3	0,2 m^2/s	2x10^{-3} à 4,7x10^{-3}	600 à 800 mètres	Theis + limite imposée	Interversion possible dans l'interprétation entre distance perçue et coefficient d'emmagasinement
Pz4	0,4 m^2/s	4x10^{-3} à 5x10^{-3}	1000 mètres	Theis + limite imposée	

Tableau 18 : Paramètres hydrodynamiques résultants de l'essai 2 sur le site des sources du Riedbrunnen.

Le calage et les paramètre obtenus sur le site des sources du Riedbrunnen indiquent :

- l'effet d'une limite alimentée fortement visible avec stabilisation ***complète*** des niveaux piézométriques impliquant une connexion complète avec le(s) cours d'eau. Deux possibilités physiques sont identifiées pour l'interprétation : les résurgences du Riedbrunnen, l'Orbach en second plan mais aussi l'Ill qui se situe à environ 1,5 km de l'essai. En complément des rivières, la présence de paléo-chenaux peut aussi jouer le rôle de potentiel imposé avec des zones potentiellement très transmissives et des écoulements différents accompagnant les différents cours d'eau. L'hypothèse la plus probable semble être une perception d'un ensemble de cours d'eau non différenciables durant l'essai ;
- un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 2 à 5x10^{-3} confirmant le côté semi-captif de cette partie de l'aquifère ;
- une légère variation de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement à l'échelle du site :
    - une légère augmentation de la transmissivité en s'approchant du Riedbrunnen pouvant être indicatrice d'un phénomène d'accompagnement du cours d'eau,
    - une légère diminution du coefficient d'emmagasinement vers le Riedbrunnen, correspondant à la topographie et potentiellement un amincissement de la couche formant l'aquitard.

	Transmissivité	Coefficient d'emma-gasinement	Distance perçue (limite potentiel imposé)	Type de modèle	Remarques
Pz1	0,3 m^2/s	$7x10^{-3}$ à $9x10^{-3}$	600 à 800 mètres	Theis + limite imposée	Distance perçue intermédiaire entre Langerstgraben et l'Ill
Pz3	0,33 m^2/s	$5x10^{-2}$	400 mètres	Theis + limite imposée	
Pz4	0,3 m^2/s	$3x10^{-2}$	300 à 400 mètres	Theis + limite imposée	Effet semi captif moins présent. Limite se démarquant de l'Ill avec distance correspondant au Langertsgraben (Kesslergraben)

Tableau 19 : Paramètres hydrodynamiques résultants de l'essai 2 sur le site de Muttersholtz.

Le calage et les paramètre obtenus sur le site de Muttersholtz indiquent :

- l'effet d'une limite alimentée fortement visible avec stabilisation ***complète*** des niveaux piézométriques impliquant une connexion complète avec le(s) cours d'eau. Deux possibilités physiques sont identifiées pour l'interprétation : Le Langerstgraben puis l'Ill qui se situe à environ 1 km de l'essai. La réponse sur les deux piézomètres les plus éloignées semblent indiquer un effet de limite sur le Langertsgraben avant tout effet de l'Ill.;
- un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de $7x10^{-3}$ à $3x10^{-2}$ soit une variation entre un paramètre d'un aquifère semi captif et celui proche d'un aquifère libre ;
- une stabilité de la transmissivité sur l'ensemble des piézomètres.

Sur les deux essais, les conditions extérieures n'ont pas permis de réaliser des calculs de dérivées simples pour analyser finement la mise en place d'échanges nappes / rivières avant la stabilisation complète.

De manière plus générale, les interprétations impliquent :

- la présence de paramètres hydrodynamiques propres au niveau superficiel de la nappe d'Alsace (profondeur de 5 à 10 mètres), dont une transmissivité largement supérieure à celle de la nappe usuellement utilisée. Les paramètres sont homogènes sur les deux sites ;
- un caractère semi-captif sur le Ried noir, plus nuancé sur le site de Muttersholtz ;
- l'effet de l'Ill, probable sur le site du Riedbrunnen, et incertain sur le site de Muttersholtz ;
- à l'opposé, un lien avec le Riedbrunnen complexe sur le site du Riedbrunnen (masqué par l'Ill ?) et très probable avec le Langertsgraben sur le site de Muttersholtz ;
- dans tous les cas, une stabilisation complète des niveaux, impliquant une connexion complète avec le(s) cours d'eau.

Apport de la chimie des eaux souterraine et superficielle

Les résultats et l'analyse de la chimie des eaux souterraine sont disponibles en annexe.

L'interprétation des échantillons prélevés en rivière et en fin de pompage renforce la vision d'une connexion forte entre les eaux souterraines et les eaux de rivières des deux sites.

Le site de Muttersholtz présente des résultats quasi identiques entre les eaux souterraines et les eaux de rivières alors que les premières sources sont situées à plus de 500 mètres.

À l'opposé, les sources du Riedbrunnen présentent une très légère différence de composition par rapport à l'eau pompée. Ce comportement est certainement à rapprocher de la complexité perçue lors des reconnaissances sur sites des paramètres de conductivité et températures des différentes résurgences formant les sources du Riedbrunnen.

3.5.7. Synthèse

Les résultats obtenus à partir des deux sites sont relativement similaires : une transmissivité de l'ordre de 0,1 à 0,3 m^2/s et un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 5×10^{-3} à 5×10^{-2} traduisant un effet semi captif, notamment autour des sources du Riedbrunnen. L'atteinte des rivières avec la mise en place d'un régime permanent (soit la mise en place d'un lien complet avec les rivière environnantes) se fait en moins de douze heures.

Les résultats des deux essais, par l'atteinte rapide de limites en potentiel imposé dans toutes les configurations de modèles testés confirment l'alimentation par les rivières des pompages en nappe. Ce mode d'alimentation est même assimilable à 100 % du débit prélevé par pompage dès que la durée d'un pompage, ou groupement de pompage dépasse la demi-journée.

La différenciation des différentes rivières est difficile en raison de la très forte transmissivité et de la rapidité de la propagation du signal, liée à l'effet semi captif.

Ces paramètres sont dix fois supérieurs à ceux usuellement connus pour l'aquifère rhénan. Les données connues sont en effet toutes liées à des forages plus profonds. Or, la partie superficielle de l'aquifère rhénan, comme le montre la cartographie de la profondeur, est parcourue par de très nombreux paléochenaux. Il est donc très probable que ce niveau superficiel se différencie en terme de paramètres hydrodynamiques. Les informations communiquées par le LIVE font état d'une profondeur des paléochenaux de l'ordre de 5 à 8 mètres.

Toutefois, la sédimentation liée aux paléochenaux entraine souvent un milieu hétérogène, ce qui dans le cadre des essais n'a pas été perçu.

Le caractère semi captif perçu sur les deux essais apporte une information sur le mécanisme des sources des rivières phréatiques. En effet, cela tend à montrer que les résurgences ne sont pas uniquement liées à un recoupement topographique mais aussi à la présence d'une légère surpression, tout du moins sur la partie Ried noir et Ried gris.

Pour une utilisation généralisée de ces résultats pour analyser l'impact, des prélèvements sur les cours d'eau, et au vu des paramètres hydrodynamiques obtenus, la principale difficulté réside dans la sélection des rivières impactées par les prélèvements. En effet, la multiplicité des cours d'eau du secteur peut impliquer très rapidement une multiplicité de limites à potentiels imposés, de différentes profondeurs et niveaux d'influences, auxquelles il faudrait ajouter une hétérogénéité très locale liée aux paléo-chenaux.

Deux hypothèses sont privilégiées à ce stade pour simuler les pompages :

- le modèle de Theis, potentiellement maximisant en terme de débit prélevé sur les rivières mais correspondant sans ambiguïté à ce qui a été perçu sur les essais à des temps supérieurs à 12 heures ;
- le modèle de Hunt pour les cas où :
    - une déconnexion probable peut être déterminée par d'autres paramètres entre le(s) cours d'eau et la nappe ;
    - des temps de pompages inférieurs.

3.6. CALCUL DE L'IMPACT D'UN POMPAGE SUR UN COURS D'EAU À UNE ÉCHELLE LOCALE

3.6.1. Données disponibles sur les cours d'eau phréatiques

Cartographies et bases de données

Les cours d'eau phréatiques de la région du Grand Ried ne disposent pas actuellement de données continues et systématiques. De même, aucune base de données exhaustive sur la zone n'est disponible malgré la présence d'études scientifiques poussées. La complexité du linéaire, la diversité des cours d'eau, et le caractère très anthropisé peuvent expliquer cette absence de données synthétiques.

La cartographie des cours d'eau est disponible via :

- la donnée BDCarthage de l'agence de l'eau ;
- la cartographie officielle des cours d'eau prioritiaires du SAGE Ill-Nappe-Rhin ;
- la BD topo de l'IGN.

La BD topo a été privilégiée dans l'analyse en raison de la précision apportée sur le statut permanent ou non permanent des cours d'eau et l'indication des principales résurgences. Le caractère permanent et non permanent a été comparé aux observations réalisées sur le terrain ainsi qu'aux éléments bibliographiques.

Au niveau des sources, un croisement entre les données de la BSS eau, les données de l'IGN et les connaissances locales a été réalisé pour pallier à l'absence de relevé exhaustif à l'échelle de la zone d'étude. Il est à noter que de nombreuses résurgences secondaires sont présentes le long des cours d'eau en sus de la source principale de chaque cours d'eau.

Le réseau de l'Ill a été analysé via les données transmises par le domaine de l'Ill[19] permettant de tracer l'ensemble du linéaire.

[19] Domaine Public fluvial de l'Ill, sous la responsabilité de la Région Grand Est

Caractéristiques des cours d'eau phréatiques (disponibles)

Les caractéristiques des cours d'eau utilisées pour encadrer les paramètres à intégrer dans les modèles sont basées sur les observations réalisées lors des différentes campagnes de reconnaissance (cf. données de jaugeages et observations de la campagne de juin 2019 des cours d'eau en annexe).

En complément, une compilation a été réalisée des données disponibles au niveau de la DREAL, ainsi que des données publiées et non publiées du laboratoire LIVE, mises à disposition dans le cadre du projet.

Notamment, les études réalisés par l'université de Strasbourg et plus récemment par le laboratoire LIVE[20] permettent de disposer d'éléments complémentaires et précis sur certains cours d'eau :

- Hanfgraben et Bronnwasser en 2007 (Perez, 2007) ;
- Lutter (données transmises, pas de rapport) ;
- Synthèse des données disponibles avant 2001 (Schmitt, 2001).

Ces études vont au-delà des paramètres utilisés dans la cadre de ce projet. Elles permettent de conforter les ordres de grandeurs obtenus en juin 2019 et orienter vers les paramètres simplifiés utilisés dans les modèles ci-après, soit :

- la largeur des différents cours d'eau ainsi que son évolution ;
- la nature des fonds des cours d'eau et leur répartition ;
- le niveau de lien avec la nappe en analysant les zones de pertes et de venues d'eau souterraine ;
- une compréhension globale du fonctionnement du cours d'eau.

3.6.2. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère rhénan

Les paramètres de l'aquifère rhénan sont :

- les paramètres recensés lors de l'étude parue en 2018 synthétisant les données disponibles dans les différentes banques de données (Giuglaris, 2018) ;
- les résultats de l'essai de pompage.

3.6.3. Modèles analytiques

Les résultats des essais de pompage ont montré sur les deux sites l'adéquation du modèle de Theis pour reproduire le comportement de l'aquifère.

Toutefois, l'extrapolation à l'ensemble de la zone d'étude de ce modèle pourrait amener à maximiser l'impact des pompages simulées dans les cas où une interaction plus complexe entre l'aquifère superficiel et la rivière serait présente.

[20] Laboratoire Image Ville Environnement

Ainsi, après une analyse des modèles analytiques disponibles[21], les modèles retenus pour l'analyse sur la zone d'étude sont les suivants :

Modèle de Theis. Ce modèle, couramment utilisé, considère un aquifère homogène et isotrope. Il est valable pour les nappes captives et applicable en nappe libre si le rabattement est inférieur à 10 % de la hauteur captée. Il nécessite comme principaux paramètres la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

Dans le cadre de l'étude précédente (Giuglaris 2018), le modèle de Theis a été utilisé pour simuler l'impact sur le niveau piézométrique :

- sans effet des cours d'eau, ce qui s'apparente à la situation au centre de la zone d'étude ;
- avec prise en compte d'un cours d'eau principal.

Les simulations du niveau piézométrique ont été réalisées avec le logiciel OUAIP

Au niveau de l'impact en terme de débit prélevé sur les rivières, les simulations ont été réalisées avec le logiciel Connexmin.

Modèle de Hunt (2003). Ce modèle peut prendre en compte un aquifère multicouche avec un cours d'eau. L'aquifère pompé est toujours homogène et isotrope, mais le cours d'eau incise ici partiellement un aquitard de surface. L'aquitard de surface est de type Boulton (Boulton, 1973), c'est-à-dire peu perméable comparé à la perméabilité de l'aquifère, mais poreux. Le rabattement peut se propager de l'autre côté du cours d'eau. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que le cours d'eau a une faible incision comparée à l'épaisseur de l'aquifère, et que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales. Le lit du cours d'eau peut aussi être partiellement colmaté.

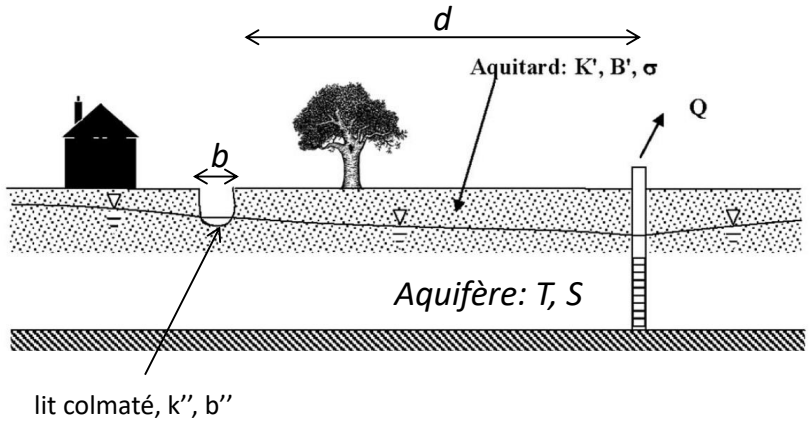


Figure 80 : Cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003).

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquitard, et l'impact sur le cours d'eau. Dans ce modèle, *K'* et *B'* sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ sa porosité, *k''* et *b''* respectivement la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau et *b* sa largeur. Le paramètre B'' peut aussi être l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau, et K'', la perméabilité de l'aquitard. Cette solution peut aussi ne pas tenir compte de l'aquitard, en prenant une épaisseur nulle.

[21] Dewandel, 2018

Dans le cadre de cette étude, ce modèle a été utilisé pour calculer l'impact sur les cours d'eau en prenant en compte différentes configurations : aquitard, typologie de cours d'eau, etc. Les calculs ont été réalisés à partir de fichiers de routines de calculs internes au BRGM. Le détail des calculs et des hypothèses sont disponibles dans la référence citée et sur le site de l'auteur (http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml).

3.6.4. Sensibilité aux paramètres dans le cadre du modèle de Hunt (modèle comportant les échanges nappes/rivières)

Les paramètres en jeux sont :

- les paramètres de la rivière moyennés sur l'intégralité du tronçon concerné ;
- les paramètres hydrodynamiques moyennés sur l'intégralité de la zone influencée par le pompage ;
- les paramètres d'exploitation : débit, temps de pompage.

Les gammes de valeurs de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement vont jouer sur :

- l'amplitude du signal piézométrique, tout en restant sur les mêmes ordres de grandeur pour les valeurs connues sur la nappe d'Alsace ;
- la rapidité de la propagation du signal et par conséquent l'atteinte des rivières.

La Figure 81 permet de visualiser l'impact en terme de débit prélevé indirectement sur le cours d'eau via les deux jeux de paramètres disponibles sur le secteur soit :

- les données issues des connaissances sur les forages plus profonds de la nappe d'Alsace, ramenées sur une épaisseur captée de 10 mètres (T=0,015 m^2/s, S = $1x10^{-2}$) ;
- les résultats moyens de l'essai de pompage réalisé sur la partie supérieure de l'aquifère (T=0,15 m^2/s, S = $1x10^{-3}$).

Pour rappel, durant les essais :

- la transmissivité interprétée sur les différents piézomètres est comprise entre 0,1 et 0,3 m^2/s ;
- le coefficient d'emmagasinement est compris entre $5x10^{-2}$ et $1x10^{-3}$.

Paramètres		**max**	**min**	unités	type
T	**Aquifère**	**1,50E-01**	**1,50E-02**	m2/s	Variables
S		1,00E-02	1,00E-03	-	variables
K'	Aquitard	1,00E-07		m/s	fixé
B'		1		m	fixé
sy		1,00E-03	1,00E-03	-	Fixé égal à S
K"	Lit du cours d'eau	1,00E-06	1,00E-06	m/s	
B"		2,00E-01	2,00E-01	m	
w (largeur cours d'eau)	Cours d'eau	5,00E+00	5,00E+00	m	

Tableau 20 : Paramètres pris en compte dans le modèle.

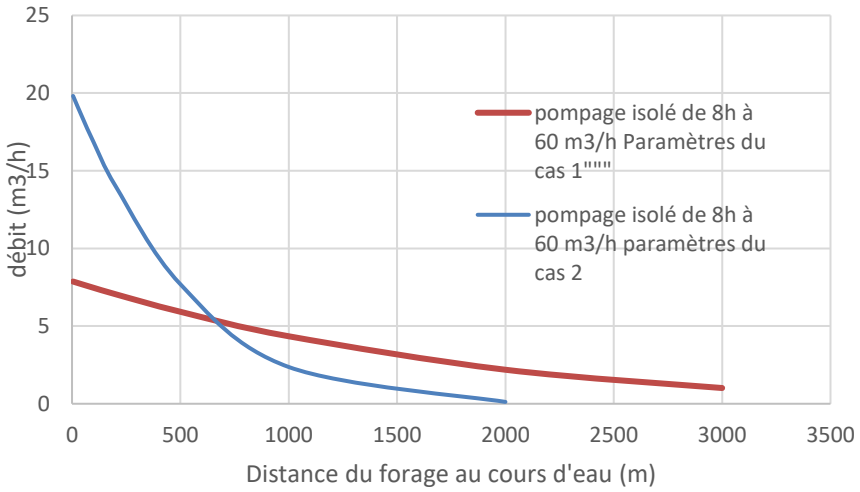


Figure 81 : Comparaison de deux jeux de paramètres hydrodynamiques représentatifs de l'aquifère : cas 1 : paramètres issues des essais de pompages, cas 2 : paramètres moyens issus des forages profonds appliqués à un milieu libre.

Les paramètres des cours d'eau peuvent fortement influencer le débit prélevé notamment via :

- la largeur du cours d'eau, qui va offrir une surface plus grande d'échange ;
- la nature du fond : limons, sables etc.

La Figure 82 permet d'illustrer l'effet de la prise en compte du colmatage sur le débit prélevé sur la rivière pour les mêmes paramètres (paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et largeur du cours d'eau).

Toutefois, les paramètres des cours d'eau vont varier fortement sur toute l'aire d'influence d'un pompage (centaines de mètres pour atteindre une distance supérieure au kilomètre dans certains cas). Ce paramètre peut donc être moyenné en prenant en compte :

- les zones d'émergences et de proximité de la nappe où la connexion est la plus directe, avec des passées sableuses et de galets. Les émergences étant elles-mêmes la preuve d'une perméabilité et d'une épaisseur très faible de l'aquitard ;
- les zones où les cours d'eau semblent se « détacher » de la nappe, soit par approfondissement de cette dernière soit par des phénomènes de colmatage du lit des cours d'eau.

Dans le cadre de cette étude, les relations nappes / rivières sont principalement gouvernées ici par le ratio entre la transmissivité de l'aquitard supportant le cours d'eau et la transmissivité de l'aquifère. Or dans le cas du Grand Ried, la partie superficielle de l'aquifère est marquée par les très fortes transmissivités de la partie supérieure de l'aquifère, qui peuvent encore augmenter à proximité des cours d'eau phréatiques à la faveur des chenaux couvrant la quasi intégralité de la zone.

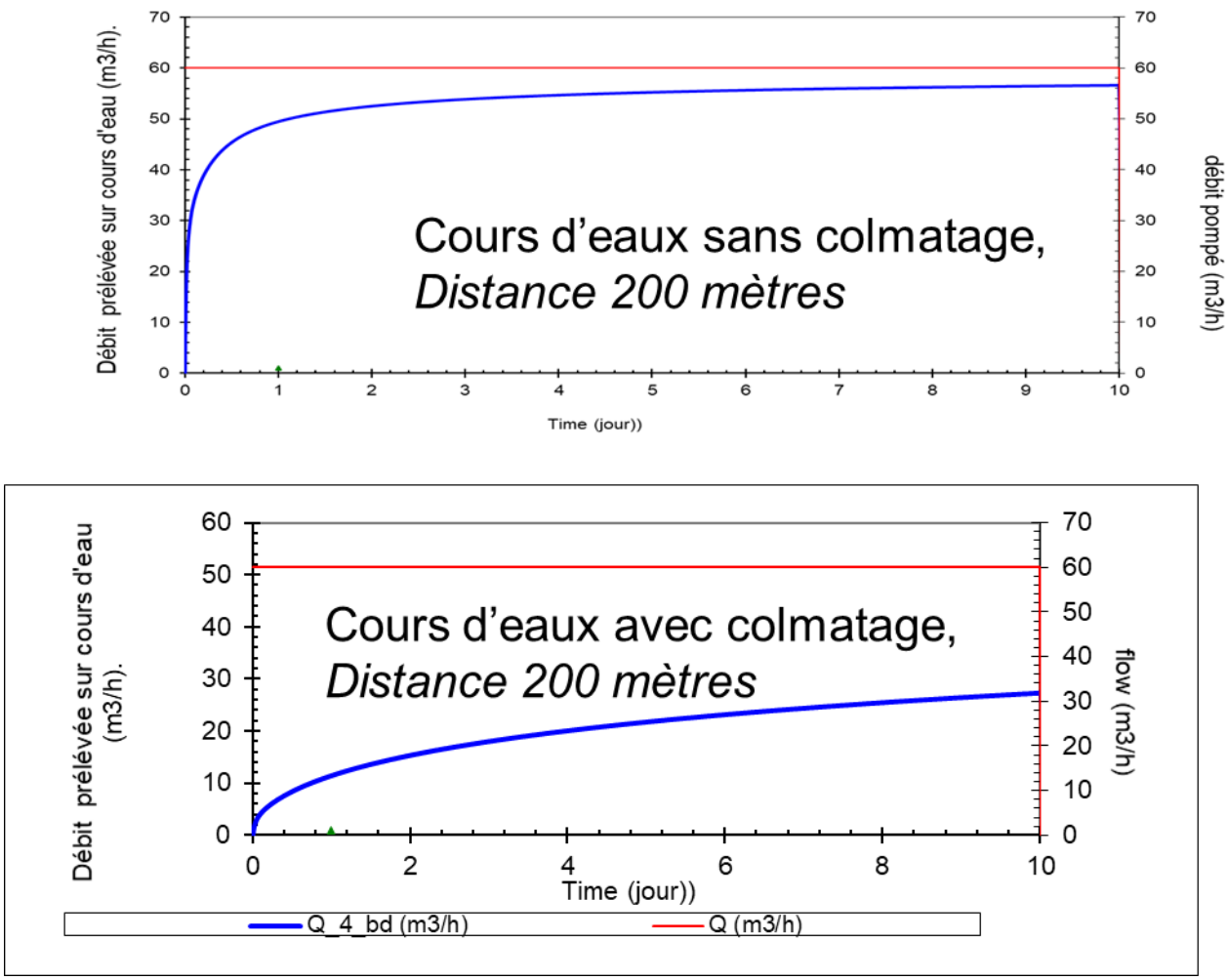


Figure 82 : Impact du niveau de colmatage d'un cours d'eau sur le débit prélevé sur le cours d'eau et la rapidité de la stabilisation.

Au niveau des paramètres d'exploitation, les éléments de fonctionnement suivants sont rappelés :

- **le débit prélevé sur le cours d'eau augmente en fonction de la durée de pompage.** Dans le cadre du Grand Ried, une stabilisation va peu à peu se produire entre 2 et 5 jours de pompage ;
- l'impact est directement proportionnel au débit pompé : une augmentation de x % du débit de pompage entrainera une augmentation du même niveau de la baisse piézométrique et du débit prélevé de manière indirecte sur les cours d'eau.

3.6.5. Outils proposés pour l'analyse de l'impact des pompages isolés sur les cours d'eau

Les résultats des essais de pompage ont indiqué la possibilité d'utiliser le modèle de Theis de manière relativement élargie.

Le calcul est réalisable via l'outil « Connexmin » disponible en libre accès et mis à disposition par le BRGM[22] . Après intégration des paramètres des eaux souterraines, le calcul est basé sur les paramètres de distance au cours d'eau et de débit pompé, en fonction de la durée du pompage.

De manière à couvrir tous les cas, le modèle de Hunt est proposé pour les situations où des éléments permettent de douter de la connexion complète entre le cours d'eau et la partie superficielle de l'aquifère : ruisseau avec un colmatage sur toute la longueur, déconnexion visible entre piézométrie et hauteur d'eau… Il peut aussi être utilisé pour évaluer une valeur basse du débit prélevé. Ainsi, à partir de l'analyse de l'ensemble des paramètres du modèle de Hunt (paragraphe 3.6.4), des abaques sont proposés représentant quatre dispositions différentes, soit deux types de cours d'eaux et deux types d'aquifères.

Les deux types de cours d'eau peuvent être ramenés au groupement des paramètres suivants:

- un cours d'eau peu connecté pouvant être modélisé avec les deux paramètres suivants :
    - environ 20 centimètre en moyenne de dépôts,
    - une largeur d'environ 5 mètres ;
- un cours d'eau très peu connecté avec les deux paramètres suivants :
    - environ 20 centimètre en moyenne de dépôts,
    - une largeur d'environ 1 mètre.

Les deux types de milieu aquifère se situe dans le niveau superficiel de la nappe et localisés dans :

- les secteurs du ried noir et ried gris. Ce sont des milieux légèrement captifs, à très forte perméabilité. Les paramètres sont ceux obtenus via les essais de pompage C'est la principale zone des cours d'eau phréatiques regroupant tout l'Illwald ;
- le secteur du ried sableux et / ou la prise en compte d'un forage plus profond. La perméabilité est ramenée à la perméabilité moyenne connue de la nappe et le milieu est considéré comme libre du fait de l'absence de la couche superficielle de limon. Ces secteurs présentent généralement peu de cours d'eau de types phréatiques.

Les abaques ont pour objectif d'encadrer les ordres de grandeurs des débits prélevés indirectement sur les rivières. La précision de l'estimation de l'impact dépendra :

- de la connaissance du cours d'eau (phréatiques purs, largeur…) ;
- de la connaissance du sol et du niveau piézométrique permettant d'estimer le côté semi captif à défaut de paramètres hydrodynamiques obtenues par mesures.

En complément :

- une extension aux forages profonds peut être réalisée si la *transmissivité* résultante de l'épaisseur captée peut être considérée comme équivalente à celle utilisée lors des abaques ;
- les quatre abaques ont été construits en faisant ressortir l'impact du temps de pompage, au vu de l'importance de ce paramètre par rapport à des considérations sur les descriptions des cours d'eau, transmissivité réelle, etc.

[22] https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/conexmin-calcul-influence-pompage-nappe

De manière générale :

- des cas intermédiaires existent entre les quatre dispositions proposées ici. Notamment, il est probable qu'en limite du ried noir et du ried sableux, le caractère libre ou semi captif soit difficile à discerner. Il peut même être amené à évoluer dans le temps, en lien avec la baisse de la piézométrie ;
- de même, il est probable que la perméabilité puisse varier légèrement sur des distances courtes (dizaines à centaines de mètres).

3.6.6. Intégration des zones d'influence de l'Ill et du Rhin en lien avec l'impact d'un pompage isolé

Le Rhin et l'Ill ont une forte influence et vont constituer des limites à potentiels imposés permettant de limiter fortement la baisse de la piézométrie ou limiter les prélèvements indirects dans les cours d'eau environnant en constituant une limite atteignable plus « facilement » que les petits cours d'eau.

La zone d'influence du Rhin a de facto été retirée de l'analyse, le secteur de la bande rhénane étant considéré comme peu sensible en raison de cet effet.

À proximité de l'Ill, l'influence a été perçue lors de la baisse de la piézométrie enregistrée durant l'étiage, la baisse étant moins marquée à proximité de l'Ill. Toutefois, elle va dépendre de l'état de la rivière et de son fonctionnement naturel (position par rapport au niveau piézométrique) et anthropique (soutien d'étiage, présence de barrage).

Suite aux essais de pompages, l'effet de l'Ill a été perçu sur les résultats à une distance de l'ordre de 1 km. Toutefois, à la période de l'essai, l'Ill était en situation relativement haute.

En reprenant les paramètres moyens obtenus via les essais de pompage, une estimation de la distance de l'Ill sur le niveau de rabattement a été calculé pour un pompage isolé.

Les simulations via OUAIP permettent d'observer que l'impact du potentiel imposé est maximal entre 0 et 500 mètres puis diminue fortement entre 500 et 1 000 mètres.

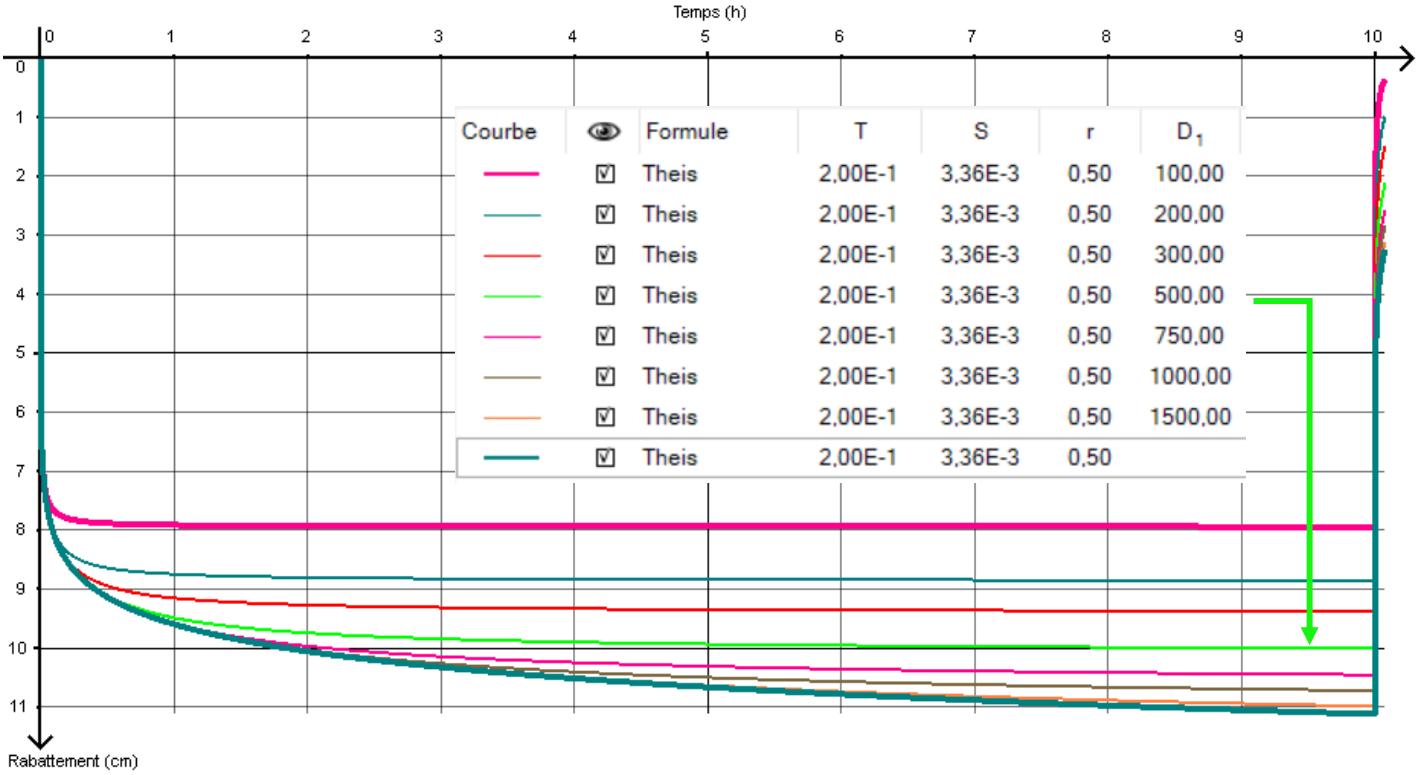


Figure 83 : Simulation OUAIP de l'impact d'une limite à potentiel imposé représentant l'Ill à différentes distances.

On peut donc noter une valeur moyenne d'environ 500 mètres constituant une zone d'influence de l'Ill, au sein de laquelle l'impact des pompages isolés sur les cours d'eau phréatiques est limité.

Cette estimation très générale va dépendre de la situation de l'Ill. Cette distance pourra être questionné pour une estimation :

- à la hausse en cas de niveaux hauts de l'Ill notamment sur la partie nord du Grand Ried où l'Ill dispose d'un fort débit ;
- à la baisse en cas de situation de très basses eaux de l'Ill, notamment dans des secteurs du sud du Grand Ried ou l'Ill est naturellement en perte. Le cas extrême d'un asséchement de l'Ill implique une annulation complète de cet effet protecteur des cours d'eau phréatiques à proximité de l'Ill.

3.7. CARTOGRAPHIE DE LA SENSIBILITÉ DES COURS D'EAU PHRÉATIQUES À LA BAISSE DE LA PIÉZOMÉTRIE EN SITUATION D'ÉTIAGE

3.7.1. Notion et choix méthodologique : vulnérabilité, sensibilité et impact sur les cours d'eau phréatiques

Un cours d'eau est un milieu complexe en évolution permanente, comprenant une biodiversité propre à chaque situation hydrologique, géochimique et géomorphologique. Le maintien d'un milieu « fonctionnel » est le garant du bon état du cours d'eau comme de la qualité de l'eau.

Le débit est généralement considéré comme le premier paramètre quantitatif ayant un impact sur l'état global du cours d'eau. En effet, de manière générale, la baisse du débit peut jouer sur :

- la qualité (concentration des polluants notamment) ;
- la température qui elle-même peut jouer sur la qualité de l'eau et de manière indirecte sur des paramètres tels que l'oxygène dissous et/ou l'eutrophisation ;
- la forme de la rivière, les vitesses de courant et les profondeurs d'eau… modifiant l'habitat des espèces aquatiques.

Dans le cas des cours d'eau phréatiques, la faible hauteur d'eau, le régime laminaire et la faible pente du lit accentue l'impact et potentiellement la rapidité de la dégradation de l'état du cours d'eau en cas de baisse des débits. Par contre, le lien avec les eaux souterraines entraine une stabilité de la température[23] à proximité des zones de résurgences, même en cas de fortes chaleurs. Le lien avec les eaux souterraines se traduit aussi par un débit moins dépendant de la pluviométrie. Les cours d'eau phréatiques sont par conséquent plus résistants à un déficit pluviométrique qu'un cours d'eau soumis aux apports pluviométrique, sous réserve du soutien via l'aquifère rhénan.

Plusieurs méthodologies et terminologies existent autour de la notion d'impact (ou de risque) en fonction des domaines d'intervention (risques naturels, pollutions…) ou cadres réglementaires. Ici, l'enjeu est de facto la préservation des cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin et l'aléa correspond à la baisse de la piézométrie, elle-même liée à la multiplicité des prélèvements et/ou une situation globale de sécheresse météorologique.

De manière plus précise, le niveau d'impact de la baisse piézométrique sur un cours d'eau phréatique dépend de :

- la *vulnérabilité du cours d'eau à la baisse de débit* qui dépend elle-même de deux facteurs principaux :
    - la gamme de débit : une baisse de débit équivalente pourra engendrer un assec sur un petit cours d'eau et une simple diminution de la qualité de l'eau sur un cours d'eau majeurs,
    - la résilience des écosystèmes (habitats et espèces végétales, animales) incluant notamment l'adaptation et la capacité à se restructurer après une crise de l'ensemble de l'écosystème ;

[23] Toutefois, si des écosystèmes se sont développés en lien avec la spécificité de cette température, tout écart, même minime, pourrait s'avérer néfaste.

- la *sensibilité du débit du cours d'eau aux variations quantitatives des eaux souterraines* qui dépend du lien quantitatif eaux souterraines / cours d'eau dont la piézométrie est le principal paramètre représentatif ;
- la présence d'un abaissement de la nappe avérée (ou non) en période d'étiage (*aléa*).

La *sensibilité* est cartographiée via un travail sur les relations nappes / rivières. La méthodologie est basée sur la profondeur de la nappe mesurée en juin 2019. La construction, les hypothèses et les résultats intermédiaires sont présentés dans les paragraphes suivants.

Au niveau de la *vulnérabilité*, le caractère non exhaustif des données (hydrodynamiques et écologiques) ne permet pas de réaliser une estimation détaillée pour chacun des cours d'eau à l'heure actuelle. De plus, du fait du comportement hydrodynamique particulier de ces cours d'eau et de la présence d'écosystèmes propres, une prudence par rapport aux règles coutumières de gestion des cours d'eau semble nécessaire, en l'absence d'indicateurs écologiques systématiques adaptés au suivi de ces cours d'eau.

La vulnérabilité est différente en fonction de l'échelle de temps, soit :

- une baisse de débit ponctuelle liée à une situation de crise (sécheresse annuelle par exemple) entrainant une dégradation de la qualité de l'eau et, dans les cas extrêmes, une mortalité du milieu ;
- une baisse de débit continue, potentiellement faible mais répétitive et sur plusieurs années entrainant des phénomènes complexes liés à la sédimentation, l'envasement et une modification de l'ensemble des caractéristiques hydro-géomorphologique du cours d'eau. Ce type de vulnérabilité n'est ici pas estimé.

L'utilisation des gammes de débit d'étiage peut constituer une première étape dans le cas de ***la vulnérabilité liée à une situation de crise***. En se basant sur les données collectées et synthétisées dans ce projet, les classes suivantes peuvent être proposées :

Niveau de vulnérabilité pour une sécheresse annuelle basé sur le débit, ***en l'absence d'autres critères sur la résilience écologique***	Gamme de débit en début d'étiage / deuxième quinzaine de juin	Exemple de cours d'eau
Fort	Inférieur à 100 l/s	Schiffgraben, Tulygraben, Kesslergraben et la partie amont de l'orbach, bronnenwasser etc.
Moyen	Compris entre 100 et 200 l/s	Scheidgraben, ruisseau des Erlen,
Faible	Supérieur à 200 l/s	Riedbrunnen, Lutter, Sauerbrunnen, dès leurs émergences ainsi que la partie aval des cours d'eau tels que la Zembs, Bronnenwasser, Orbach etc.

Tableau 21 : Classe de vulnérabilité en l'absence de caractérisation écologique.

Au final, *l'impact* sur un cours d'eau peut être estimé via un croisement entre la cartographie de la sensibilité, la vulnérabilité d'un tronçon de cours d'eau, la baisse de la piézométrie et l'enjeux de chaque cours d'eaux. Le niveau d'enjeux est caractérisé par le caractère prioritaire des cours d'eaux du SGAE Ill-Nappe-Rhin.

La formulation suivante résume cette estimation de l'impact :

Niveau d'impact = Classe de sensibilité x Classe de vulnérabilité x Baisse de la piézométrie liée aux prélèvements x *Enjeux (cours d'eau prioritaires du SAGE)*

3.7.2. Analyse du lien entre la profondeur de la nappe et les cours d'eau

Le fonctionnement particulier des cours d'eau phréatiques permet de relier directement les cours d'eau phréatique à une profondeur de la nappe. Les axes d'analyses ont porté sur une recherche de correspondance entre :

- les localisations des cours d'eau et la profondeur de la nappe ;
- les débits des cours d'eau et la profondeur de la nappe.

La correspondance entre profondeur de la nappe et la présence de cours d'eau phréatiques a été recherchée à partir du croisement du linéaire des cours d'eau et la carte des profondeurs de la nappe de juin 2019 (cf. Figure 84).

Une différenciation est disponible sur les cartographies des cours d'eau de l'IGN entre cours d'eau permanents et intermittents. Le caractère intermittent des cours d'eau correspond en grande partie à des secteurs présentant une plus forte profondeur de la nappe (proximité de la ville de Colmar, plateau central, secteurs s'éloignant des zones humides.). Sur d'autres secteurs ; des cours d'eau considérés comme intermittents et d'autres comme permanents sont situés sur des zones de profondeurs de nappe équivalentes. Cette différence peut s'expliquer par :

- la morphologie de la rivière et principalement la profondeur du lit des cours d'eau. Le fond des cours d'eau intermittent se situe probablement à une côté altimétrique plus élevée ;
- une baisse de la piézométrie plus forte en période d'étiage liée à :
    - l'éloignement de l'influence de l'Ill (Hanfgraben en amont de Wittisheim par exemple) ;
    - des modifications locales de la piézométrie potentiellement liées à des aménagements et/ou prélèvements. Le caractère intermittent relevant dans ce cas d'une action anthropique.

Sur la base de ces observations, la profondeur limite marquant la disparition du lien entre la nappe et les cours d'eau peut être définie par l'absence de cours d'eau *permanents* pour une profondeur donnée sur l'ensemble de la carte (cf. Figure 84). L'analyse du linéaire du cours d'eau situe cette profondeur entre 1,5 et 1,75 mètres. La valeur haute de **1,75 cm** pour la suite du travail cartographique a été conservée car :

- le lien entre la profondeur de la nappe et le fonctionnement des cours d'eau peut être influencé par des paramètres extérieurs (température, variations journalières, ouvrages et opérations sur les cours d'eau…) ;
- en terme d'ordre de grandeur, 25 cm correspond à une hauteur moyenne des plus petits cours d'eau phréatiques permanents.

Une correspondance entre débits des cours d'eau et profondeur de la nappe a été évaluée sur la base des débits mesurés lors de la campagne de juin 2019 (Figure 85) :

- les débits augmentent sur un même cours d'eau ;
- la concordance est notamment bien marquée sur le Shiffgraben, l'Orbach, et le Scheidgraben ;

- Lles plus forts débits aux émergences se situent sur des secteurs de très fortes proximités avec la nappe (Riedbrunnen).

En conclusion, les gammes de profondeurs de la nappe d'Alsace peuvent être utilisées pour localiser et sectoriser les secteurs d'émergences des cours d'eau phréatiques et estimer les gammes de débits potentiels dans la partie amont des cours d'eau phréatiques.

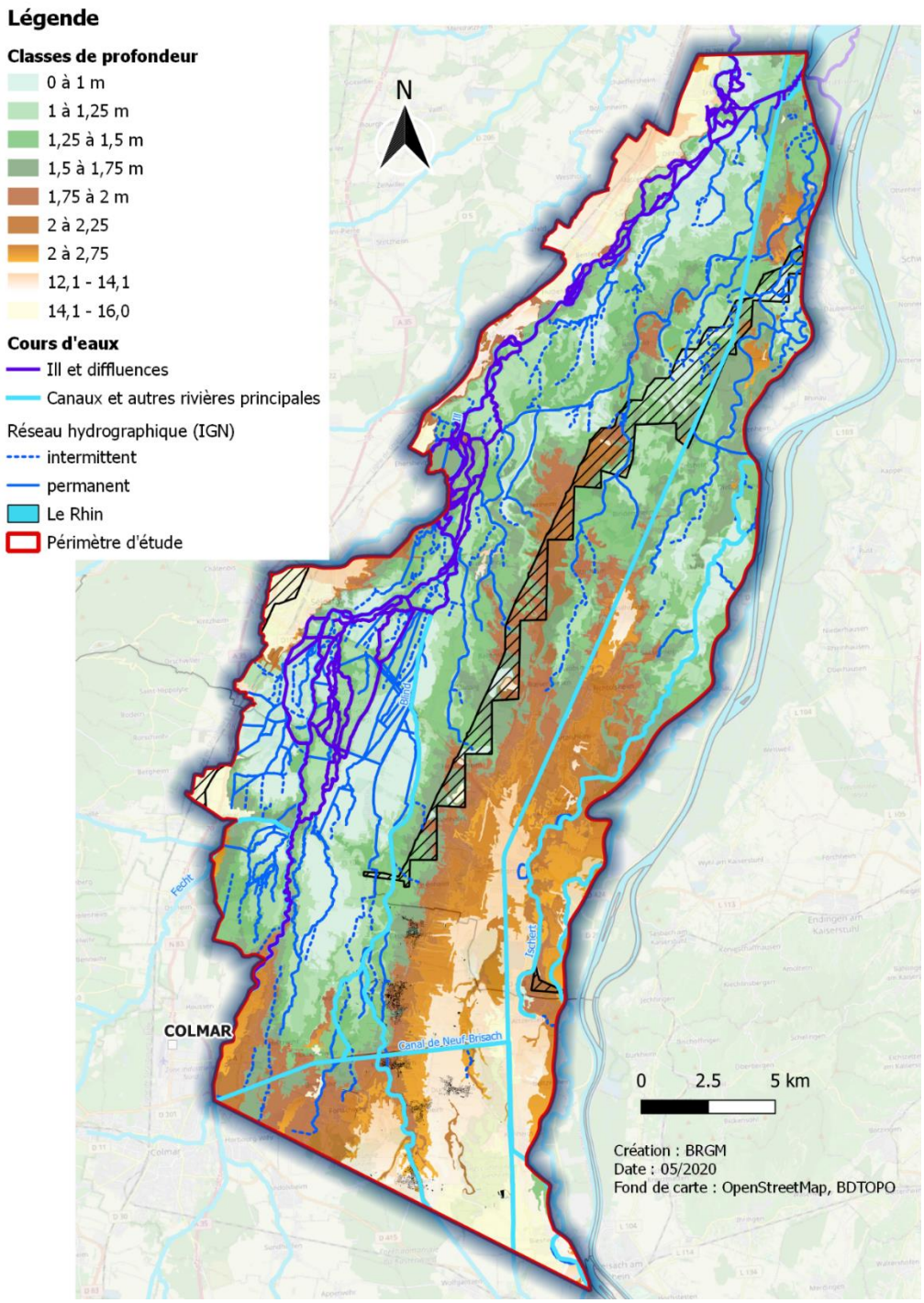


Figure 84 : Comparaison du linéaire des cours d'eau et des gammes de profondeur de la nappe (11- 14 juin 2019).

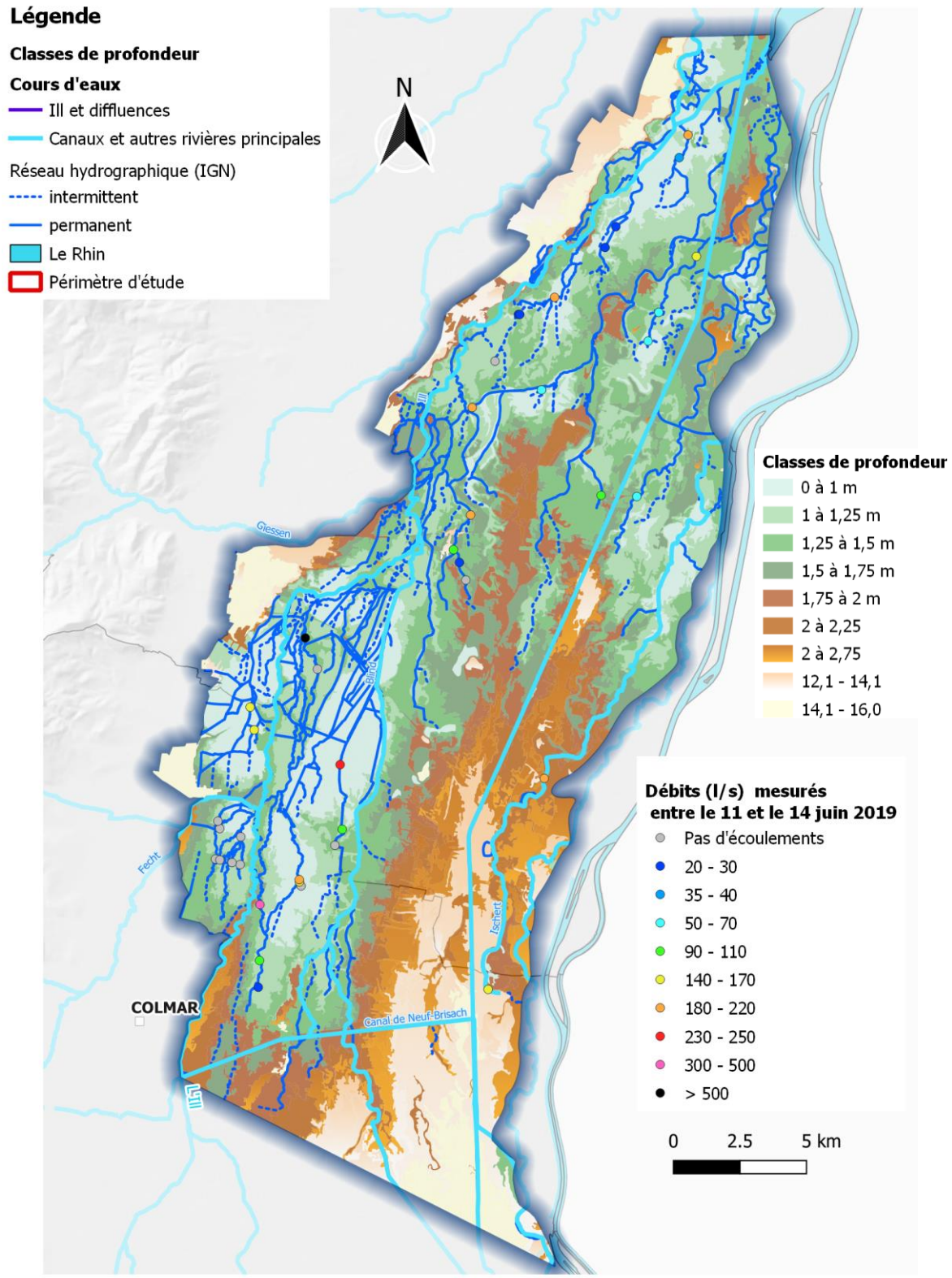


Figure 85 : Comparaison des débits des cours d'eau et des gammes de profondeur de la nappe (données mesurées lors de la campagne du 11 au 14 juin 2019).

3.7.3. Carte de sensibilité des cours d'eau phréatiques à la baisse de la piézométrie

Sur la base de l'ensemble de l'analyse hydrodynamique et des relations entre profondeur de la nappe et débit des cours d'eau, la carte suivante a été réalisée. Elle regroupe la notion de sensibilité et de vulnérabilité à la baisse du niveau piézométrique des cours d'eau phréatiques.

La lecture de la carte proposée est la suivante :

- les zones considérées comme sensibles sont tous les secteurs en lien avec les cours d'eau phréatiques : **une baisse de la piézométrie a une incidence directe et proportionnelle sur ces cours d'eau** ;
- les **zones vulnérables** sont des zones sensibles et présentant de nombreux cours d'eau phréatiques à petits ou moyens débits. L'impact d'une baisse de la piézométrie sur le bon état de ces cours d'eau sera par conséquent plus fort sur ces secteurs ;
- les zones intermédiaires correspondent à des secteurs où les cours d'eau phréatiques ne sont plus présents naturellement mais où le lien hydraulique des cours d'eau avec la nappe est encore très fort. Cette zone a notamment été dessinée pour rappeler le caractère connecté de toute la zone. Elle inclut à ce stade les cours d'eau présentant historiquement (plus de 10 ans) un écoulement (Blind avant soutien d'étiage, rigole de Widensolen). L'étendue de cette zone peut être amenée à être élargie en fonction des règles de gestion discutées en CLE et de l'évolution des prélèvements.

Limite de cette cartographie :

- la notion de vulnérabilité doit être prise avec précaution car elle est uniquement basée sur le débit du cours d'eau (cf. paragraphe 3.7.1 page 153) ;
- lors de l'étiage 2019 des cours d'eau majeurs ont été impactés sur des secteurs à priori peu vulnérables mais présentant un lien très fort avec la nappe. Il est donc important lors de l'utilisation de cette carte d'ajouter l'amplitude de la baisse piézométrique pour évaluer le niveau d'impact à défaut de classifier les niveaux d'enjeux :

  Niveau d'impact = sensibilité x vulnérabilité x Baisse de la piézométrie liée aux prélèvements x *Enjeux (cours d'eau prioritaires du SAGE)*

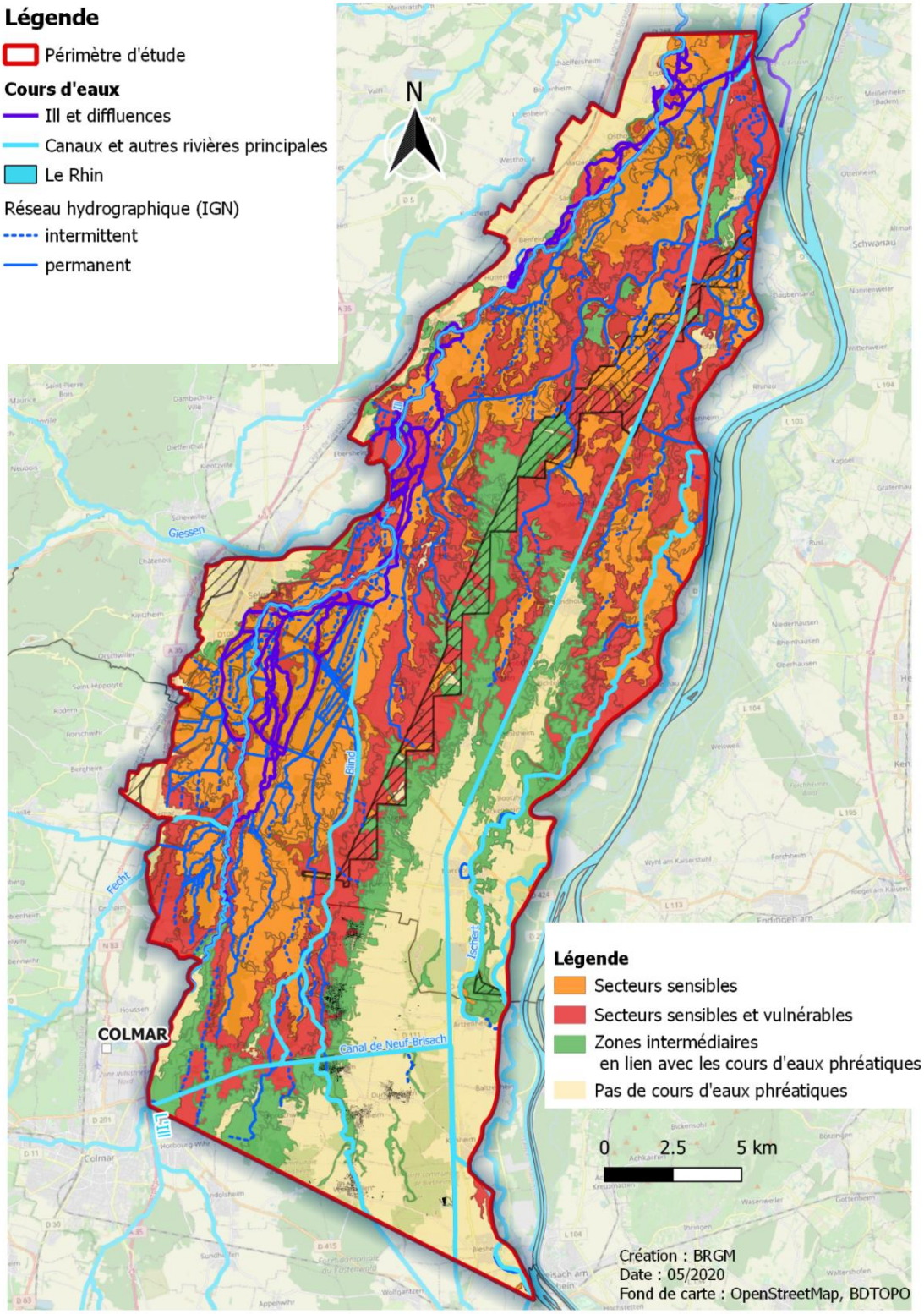


Figure 86 : Cartographie des secteurs regroupant des cours d'eau phréatiques sensibles et vulnérables à la baisse de la piézométrie.

3.8. SECTORISATION, RÉSEAU DE SUIVI ET INDICATEURS

3.8.1. Sectorisation hydrogéologique et hydrologique

Le travail de sectorisation et de constitution du réseau de suivi a pour objectif principal de donner des éléments dans la perspective d'une gestion globale et collective.

Méthodologie

La sectorisation a été réalisée principalement sur l'observation des chroniques piézométriques et de leur similarité de comportement durant toute l'acquisition en 2019. Les différents secteurs reprennent ainsi les résultats présentés au paragraphe 3.2.4 (p 70).

Le découpage a été réalisé en même temps que la détermination du réseau de suivi, de manière à disposer d'un piézomètre par secteur.

Les règles suivantes ont ensuite été appliquées pour le tracé des frontières :

- la présence de cours d'eau prioritaires sensibles et vulnérables au centre du secteur. Ce point a été intégré via la carte de sensibilité en vérifiant :
    - la présence de baisses avérées sur les eaux souterraines avec un impact sur les rivières durant les dernières années. Cela a conduit à exclure une partie de l'Ischert,
    - une distance suffisante entre les limites des secteurs et les premiers cours d'eau vulnérables pour prendre en compte les effets globaux de la baisse de la piézométrie ;
- l'intégration de baisses piézométriques similaires selon un axe transversal à l'Ill, de manière à disposer sur chaque secteur des mécanismes de soutien et de prélèvements ;
- l'intégration de l'Ill dans les secteurs : en effet, la prise en compte des prélèvements autour et dans la rivière peuvent être considérés dans une logique de prélèvement global sur l'ensemble d'un secteur. Au sud de la zone d'étude, la séparation de deux secteurs au niveau de l'Ill a été nécessaire pour différencier la zone influencée par la Fecht entrainant l'intégration de l'Ill pour chacun des secteurs. Un arbitrage basé sur les futures règles de gestion pourra donc être nécessaire ;
- l'utilisation de limite facilement identifiable en l'absence de tracé lié à l'Ill ou à une définition hydrogéologique / pédologique sur les secteurs 3 à 5.

Proposition de secteurs et discussion

Cinq secteurs regroupant les comportements hydrogéologiques et hydrologiques analysés sont proposés à ce stade des connaissances.

> ***En dehors de la présence de l'Ill, il n'existe pas ou peu de frontières hydrauliques précises. Le tracé comporte par conséquent une part d'arbitraire et peut être aménagé sur une centaine de mètres en fonction des contraintes locales et pratiques : utilisation de routes, canal etc. Sur cette base, une proposition de tracé pratique a été réalisée utilisant les tracés administratifs ou physiques disponibles.***

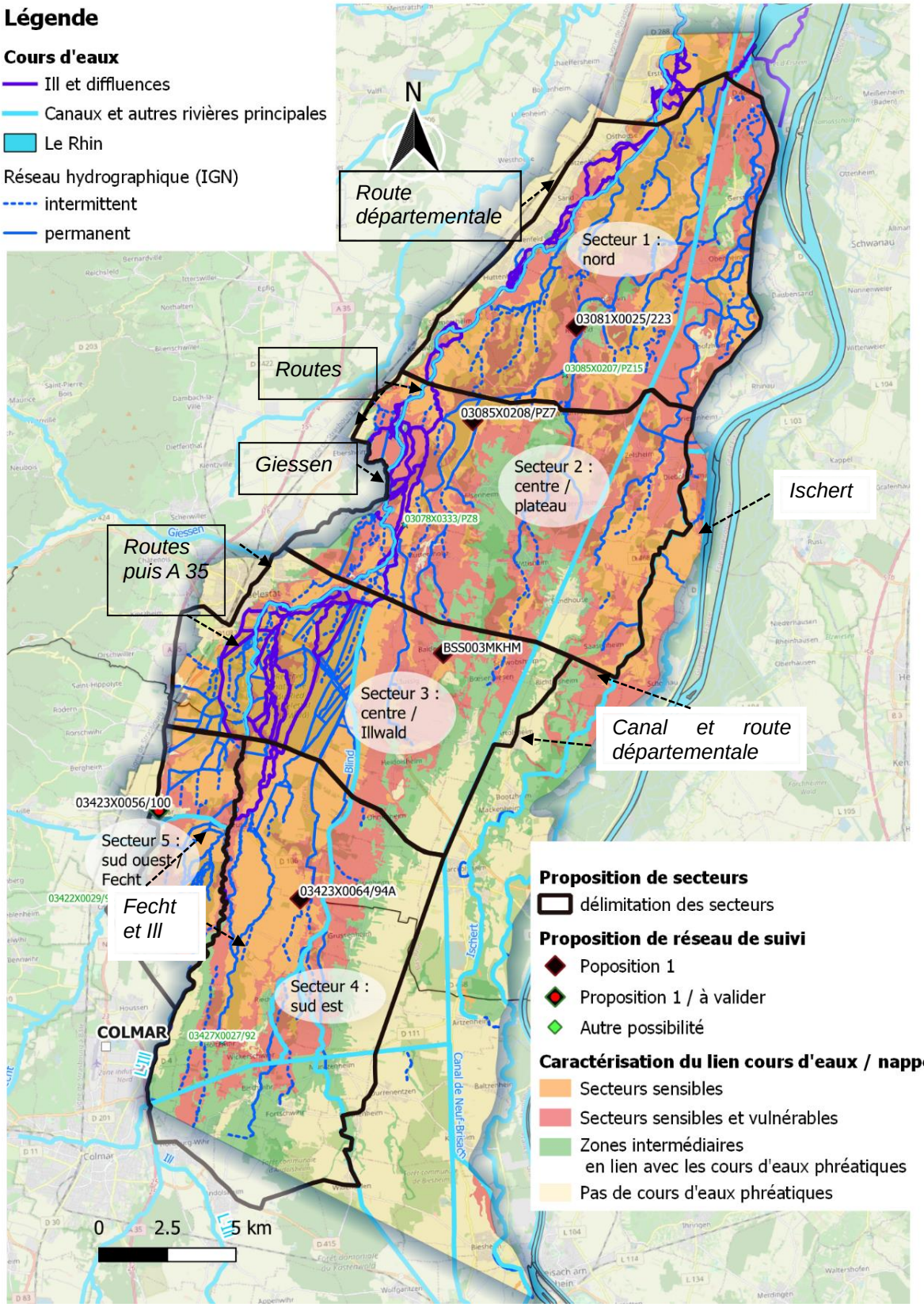


Figure 87 : Secteurs regoupant des comportements hydrologiques et hydrogéologiques homogènes avec prise en compte de limites pratiques et physiques (routes et autoroutes, rivières).

La délimitation des frontières proposée pour chaque secteur peut être appelée à évoluer en fonction de futurs paramètres de gestion. Notamment :

- un agrandissement des secteurs vers l'est ou l'ouest en fonction du type de gestion mise en place. En effet, à ce stade, il est probable qu'une diminution des prélèvements sur une zone étendue pourrait avoir autant d'influence, voire plus, qu'une restriction locale très stricte. Cette délimitation des limites est /ouest n'est donc pas basée sur des critères fixes mais une proposition au vu des observations actuelles ;
- une évolution des limites selon l'axe sud et nord en fonction notamment d'une modulation éventuelle des prélèvements. En effet, les secteurs sont basés sur des similarités de comportement hydrodynamiques eux-mêmes liés à une situation actuelle du niveau de prélèvements et de soutien via l'Ill. Une évolution des prélèvements ou des soutiens pourrait par conséquent faire légèrement évoluer les zones d'influences associées.

3.8.2. Caractérisation de chaque secteur : comparaison aux usages

Usages agricoles : réserve utile pondérée et cultures

Les secteurs proposés ont été transposés sur la cartographie des sols disponible ainsi que la carte de la réserve utile pondérée par l'hydromorphie réalisée par la chambre d'agriculture Grand Est ainsi que sur la carte issue du RPG.

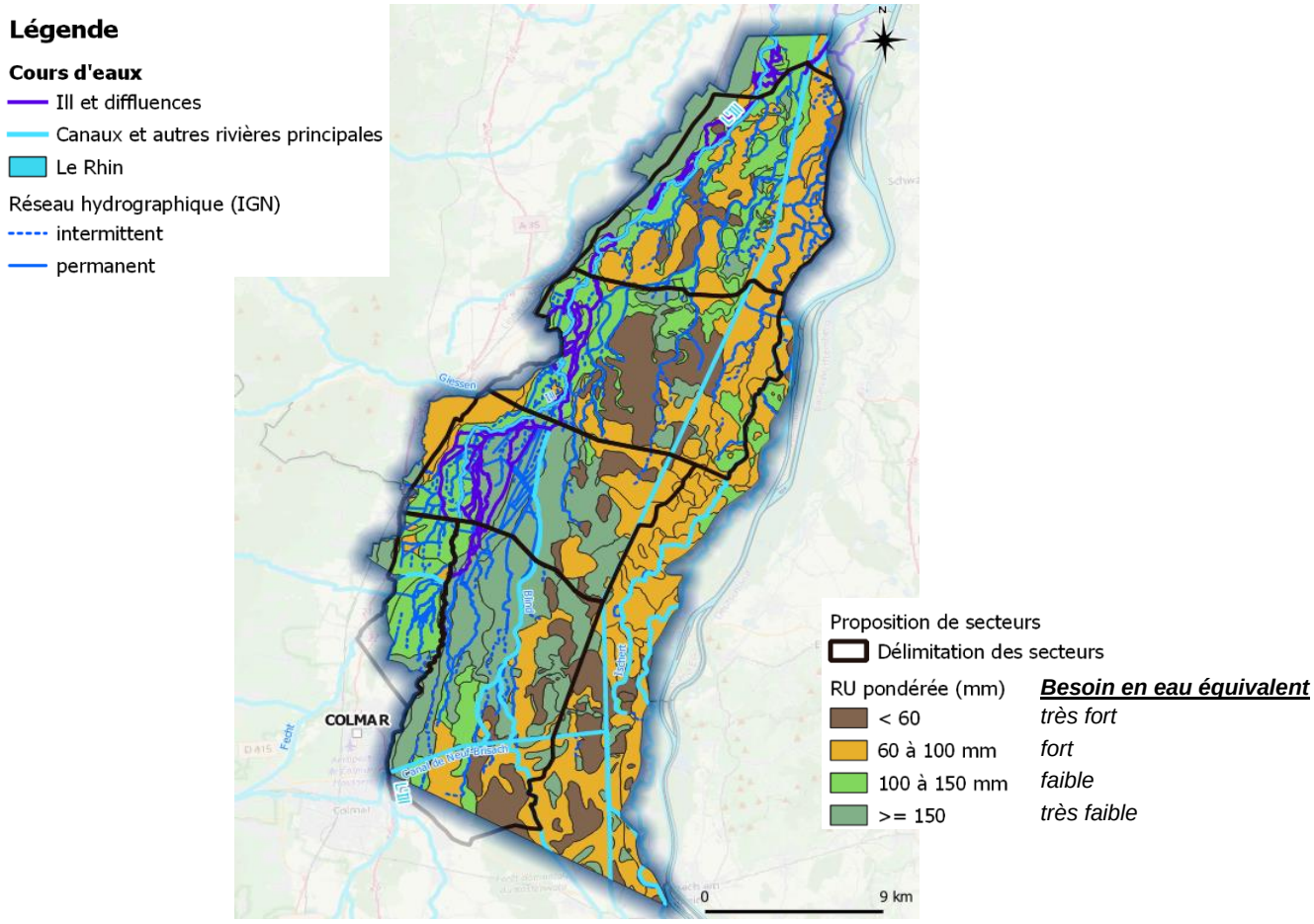


Figure 88 : Périmètres des secteurs proposés et carte de la RU pondérée.

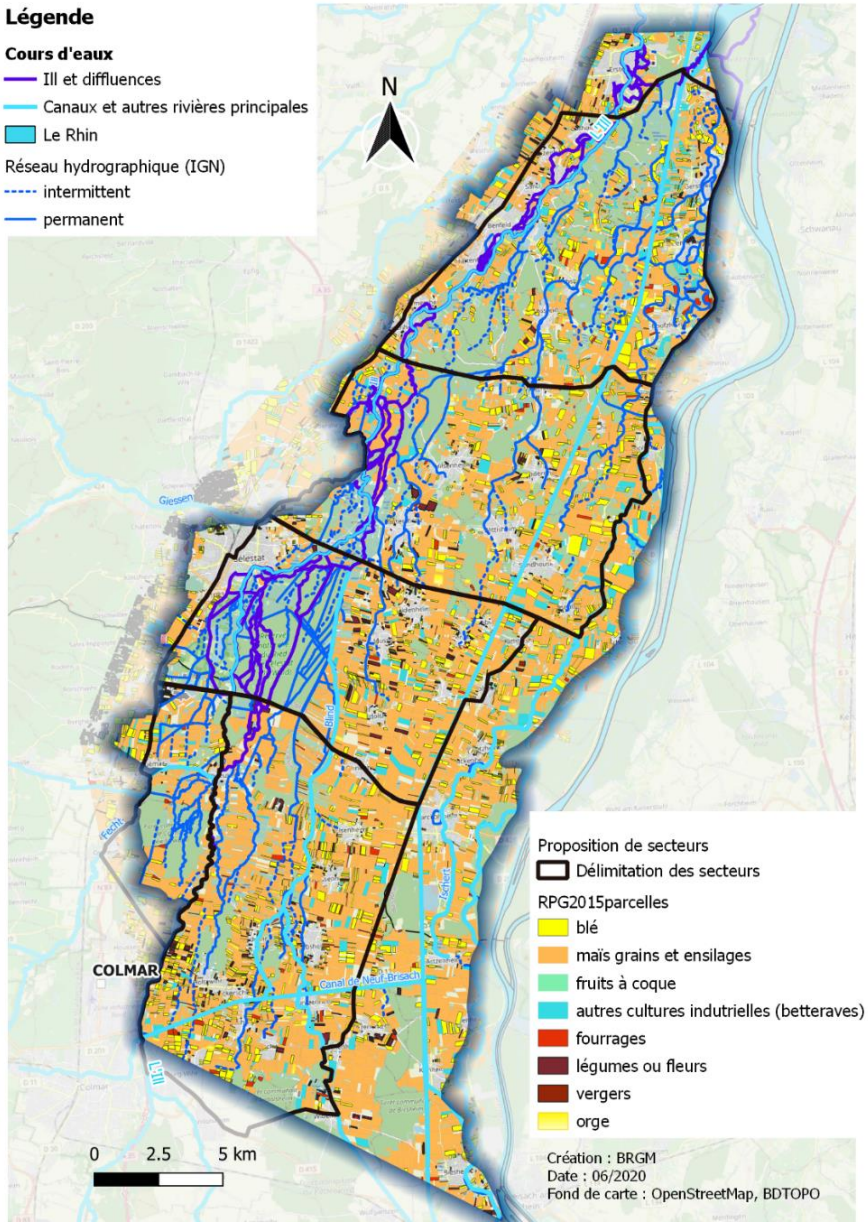


Figure 89 : Sectorisation et grands types de cultures présents sur le secteur (basé sur le RPG 2015).

Les points principaux pouvant alimenter une réflexion sur la gestion de chaque secteur sont les suivants :

- les sols présentant le plus fort besoin en irrigation sont concentrés dans les secteurs 1 et 2 ;
- le secteur 1 est recouvert en partie par des espaces non cultivées (forêts, zone humides, prairies…) ;
- le secteur 2 regroupe des sols présentant à priori un besoin en eau fort pour l'irrigation et des surfaces cultivées importantes. Or cette observation coïncide avec le découpage lié à une différence de comportement piézométrique sur ce secteur. En effet, l'amplitude du battement durant la période estivale 2019 était plus forte sur ce secteur. Cette différence de comportement pourrait être due majoritairement à un niveau de prélèvement plus élevé sur le secteur et non à une variation des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ;

- les secteurs 3, 4 et 5 semblent regrouper des secteurs moins sensibles à un besoin en eau pour l'irrigation à proximité même des cours d'eau. Toutefois les baisses constatées durant l'étiage 2019 en période d'irrigation indiquent une implication forte de cette dernière. Le plus probable serait donc un effet global des prélèvements liés à l'irrigation allant bien au-delà de la partie la plus proche des cours d'eau phréatiques.

Cartographie des prélèvements AEP et industriels (données AERM)

Les secteurs proposés ont été reportés sur les prélèvements industriels et AEP collectifs donnant lieu à une redevance à l'AERM, soit les plus gros prélèvements du secteur.

Au niveau industriel :

- le prélèvement situé au nord du secteur 1 se situe dans la zone la moins problématique en raison de l'influence du Rhin et de l'Ill se rejoignant sur cette zone ;
- les autres prélèvements majeurs identifiés sont liés à des exploitations de type gravière. La particularité de ces exploitations est une forte restitution au milieu (plus de 80%). Leur part dans le prélèvement global est donc faible. Toutefois, leur localisation à proximité des cours d'eau phréatiques nécessiterait de vérifier localement les modifications d'écoulements pour limiter tout impact local et, éventuellement étudier une optimisation des rejets.

Au niveau AEP collectif :

- les prélèvements AEP sont présents globalement dans chaque secteur ;
- le secteur 3 prend en compte l'AEP de Sélestat, soit le principal ouvrage AEP de la zone d'étude ;
- le secteur 4 comprend les deux ouvrages du Niederwald ;
- les secteurs 1 et 2 ont les principaux ouvrages AEP situés à l'ouest de l'Ill. Leur lien avec les phréatiques est donc indirect via la zone d'influence de l'Ill.

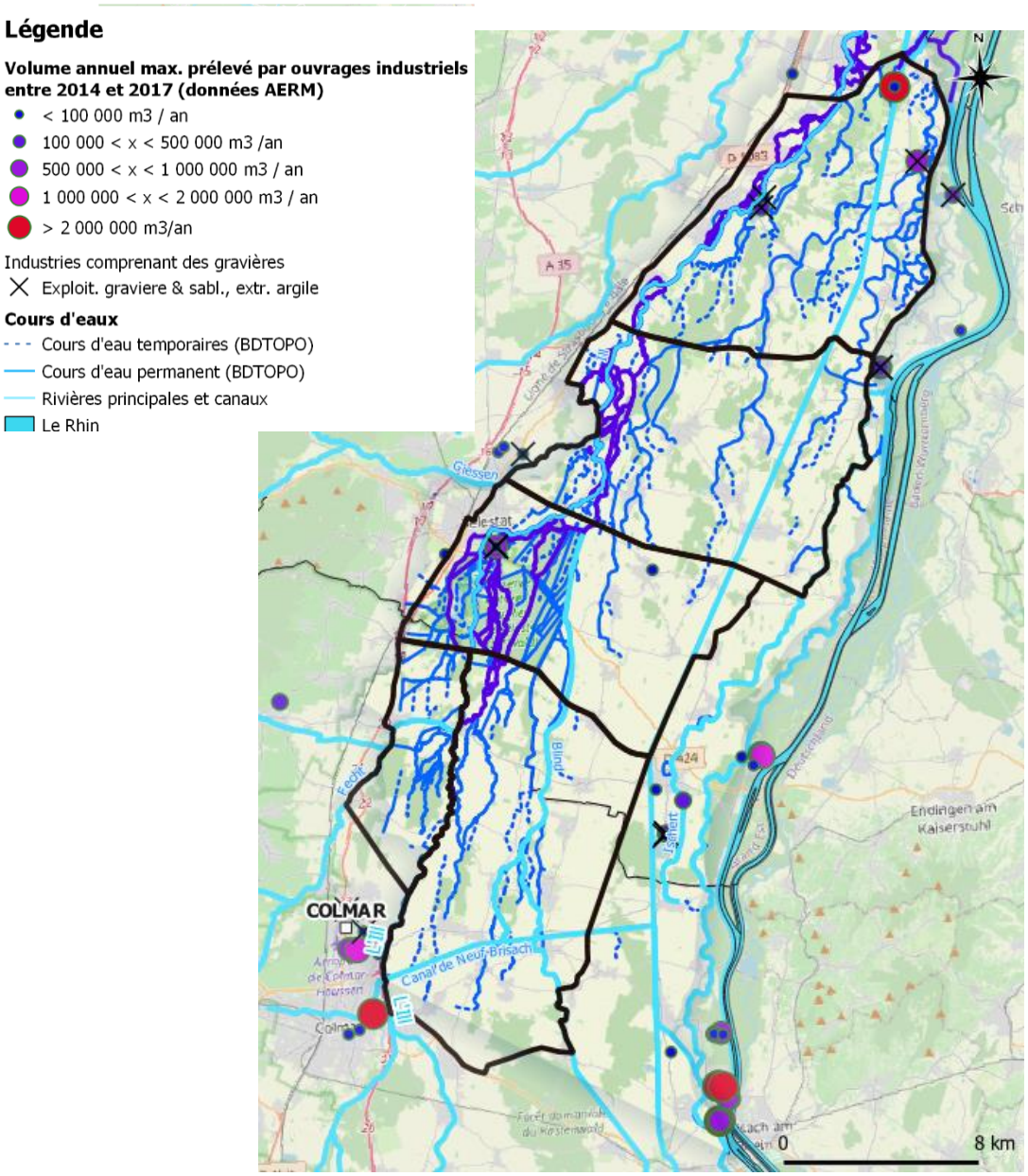


Figure 90 : Sectorisation et prélèvements industriels.

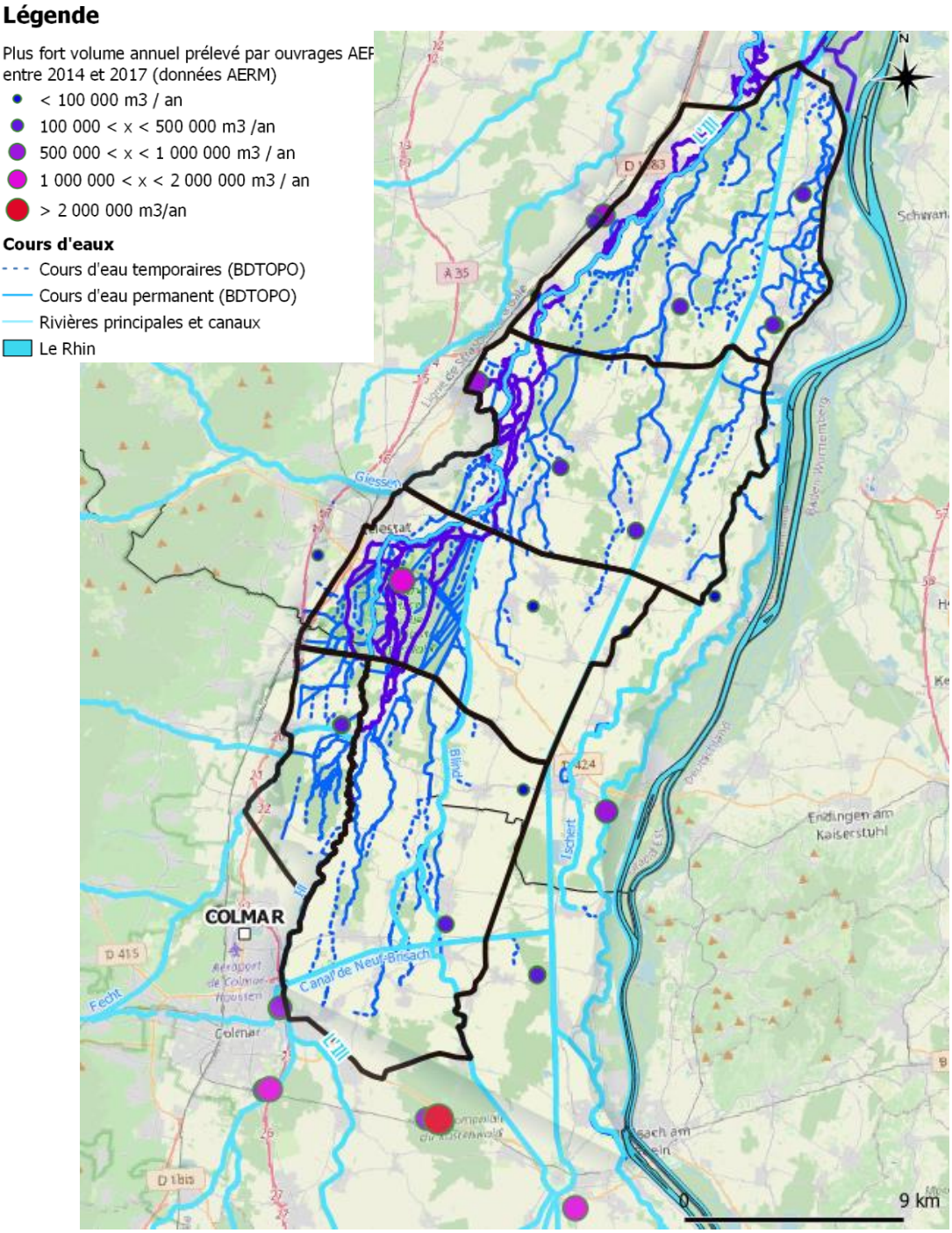


Figure 91 : Sectorisation et prélèvements liés à l'AEP collectif.

3.8.3. Réseau de suivi et indicateurs

Objectifs et méthodologie

- **Suivi des eaux souterraines et des cours d'eau**

La mise en place du suivi de la situation des cours d'eau « phréatiques » peut se faire selon plusieurs types de réseaux complémentaires :

- le suivi hydrologique (mesures du débit et de la hauteur d'eau) actuellement réalisé par la DREAL ;
- le suivi visuel des cours d'eau, comme réalisé via la méthodologie ONDE ;
- le suivi piézométrique, en raison du lien particulier entre les cours d'eau « phréatiques » et le niveau piézométrique sur la zone d'étude.

La mise en place d'indicateurs, basés à ce stade uniquement sur un suivi piézométrique, a été privilégiée pour deux raisons distinctes :

- la piézométrie est un indicateur plus global d'un point de vue spatial qu'un débit de cours d'eau, sous réserve du caractère non influencé localement du piézomètre sélectionné ;
- les chroniques hydrométriques actuellement disponibles sur les cours d'eau sont insuffisantes.

Le suivi des cours d'eau par des stations hydrométriques, complété par des observations de type ONDE est toutefois nécessaire et recommandé pour la suite de manière à :

- prévenir l'apparition de secteurs plus restreints (influence de pompage locaux, évolution de la gestion des rivières etc.) et affiner les correspondances cours d'eau / piézométrie ;
- à terme, compléter le réseau de suivi piézométrique et les seuils avec des informations qualitatives et quantitatives sur la situation des cours d'eau (débits d'étiage, évolution journalière / annuelle, caractérisation plus fine de l'hydrodynamique, suivi de nouveaux aménagements…).

- **Indicateurs piézométriques**

Dans le cas abordé lors de cette étude, le travail s'est attaché à la notion de gestion du niveau piézométrique en lien avec les cours d'eau en dehors de toute caractérisation de la sécheresse hydrogéologique. En effet, l'analyse hydrodynamique précédente a démontré l'importance des prélèvements par rapport à une baisse « naturelle » de la piézométrie. Le lien avec la notion de sécheresse est par conséquent indirect, la hausse des prélèvements estivales étant en très grande partie liée aux sécheresses agricoles et météorologiques.

Pour une discussion plus aboutie de la notion de seuils de gestion liée à la sécheresse hydrogéologique, le lecteur est invité à se référer aux travaux à l'échelle de la région Grand Est (Manceau, 2020).

Les propositions au vu des données et de la connaissance actuelle du fonctionnement de la zone d'étude sont :

- des indicateurs au pas de temps annuel associés à des seuils constants au cours de l'année et basés sur une correspondance niveau / situation des cours d'eau phréatiques ;
- des éléments complémentaires permettant d'analyser la situation avant la période d'irrigation. Il se base uniquement sur les observations de la baisse du niveau piézométrique sur la

période estivale des trois dernières années. Ces éléments étant étroitement liés aux volumes de prélèvements actuels, ils peuvent évoluer en fonction des besoins futurs et/ou de la mise en place de limitation prévisionnelle des volumes.

Sur les piézomètres sélectionnés, la comparaison pour une même date entre la situation des cours d'eau et le niveau piézométrique équivalent a été réalisée :

- sur la période 2012 / 2019 en raison de la disponibilité de l'indice ONDE sur cette période ;
- sur l'année 2019 en utilisant l'analyse croisée cours d'eau / piézométrie réalisée au paragraphe 3.2.5.

Au niveau du réseau ONDE, le relevé est effectué toutes les deux semaines ou mensuellement. La mise en place de l'asséchement du cours d'eau peut donc se dérouler avant la date précise de l'observation. Lorsqu'aucun autre élément n'a permis de préciser cette incertitude, une légère marge a donc été prise sur les niveaux piézométriques pour l'intégrer.

Trois seuils ont été établis sur une notion d'impact sur les cours d'eau. L'utilisation est complémentaire de la carte de sensibilité et de vulnérabilité. Les trois seuils sont :

- atteinte très forte des cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin : assèchement total des cours d'eau vulnérables et baisse significative du débit des cours d'eau les plus conséquents ;
- atteinte forte des cours d'eau prioritaires du SAGE Ill Nappe Rhin : assecs sur la majeure partie des cours d'eau vulnérables et baisse du débit sur les autres cours d'eau ;
- atteinte des cours d'eau vulnérables avec baisse significative du débit, voir assecs sur une partie des cours d'eau les plus petits.

Pour compléter et conforter l'établissement des seuils, une correspondance des niveaux piézométriques proposés avec la période de retour du plus bas niveau annuel observé sur l'historique disponible a été réalisée. Statistiquement, l'utilisation de cette méthode est adaptée en raison de l'absence de cyclicité interannuelle de l'ensemble des chroniques piézométriques sur le périmètre strict du Grand Ried. Les périodes de références sélectionnées pour les calculs ont été adaptées à chaque piézomètre de manière à disposer de chroniques sans tendances ou ruptures dans le temps.

- **Sélection de piézomètres représentatifs**

Sur la zone du Grand Ried, l'analyse du comportement hydrodynamique du secteur a permis de discerner les points suivants :

- des secteurs homogènes du point de vue hydrodynamique ;
- l'effet de l'Ill ;
- une bonne concordance entre les cours d'eau phréatiques et les piézométries.

Sur chaque secteur, les piézomètres disponibles ont été sélectionnés avec les critères principaux suivants :

- la représentativité du comportement hydrodynamique du secteur sur la base des courbes piézométriques observées au paragraphe 3.2.4 ;
- l'existence de points d'observations avec les cours d'eau phréatiques environnants ;

- l'absence d'influence locale faussant les variations du piézomètre : influence forte de pompages locaux, proximité immédiate avec des ouvrages/aménagements hydrauliques (barrages, retenues, étangs…) ou des points de soutien (Blind...) ;
- l'exclusion des ouvrages présentant des variations journalières importantes ;
- tous les piézomètres pouvant présenter une tendance pluriannuelle sur la piézométrie moyenne (cf. paragraphe 3.3.4) ont été exclus. Les piézomètres présentant une tendance uniquement sur les minimums annuels ont été conservés en prenant en compte leur caractère spécifique.

Dans un second temps, le nombre de piézomètres restants étant restreint, un compromis a été réalisé entre :

- un éloignement suffisant de l'Ill et une localisation centrale du piézomètre par rapport au secteur représenté ;
- la disponibilité d'un historique, avec l'utilisation de chroniques sur des piézomètres environnants ;
- une influence locale faible comparée au signal global ;
- le type d'équipement de suivi actuellement présent.

Deux types de piézomètres sont sélectionnés de manière à constituer :

- un réseau opérationnel disposant d'indicateurs chiffrés ;
- un réseau complémentaire permettant de :
    - renforcer le suivi des eaux souterraines avec des indicateurs piézométriques sur des secteurs peu suivis ou disposant d'une chronique avec peu d'historique ;
    - conforter la caractérisation des relations cours d'eau phréatiques / aquifère rhénan.

Proposition de réseaux et indicateurs attenants

Les piézomètres et les indicateurs piézométriques associés sont synthétisés dans le Tableau 22 et le Tableau 23 disponibles ci-après.

La prise en compte de tous les critères a fortement restreint le nombre de piézomètres réellement disponibles pour la mise en place d'indicateurs. Si les piézomètres proposés ne sont pas utilisables pour des raisons pratiques (installation, disponibilité, etc.), la recherche ou la réalisation de nouveaux piézomètres seraient à prévoir, avec l'établissement de corrélation sur une durée suffisante pour déterminer les seuils.

Sur le piézomètre BSS003MKHM, en raison de sa faible longueur de chronique, une correspondance a été réalisée avec le piézomètre 03424X0026/247 pour le calcul des périodes de retour sur le minimum annuel (cf. Figure 92).

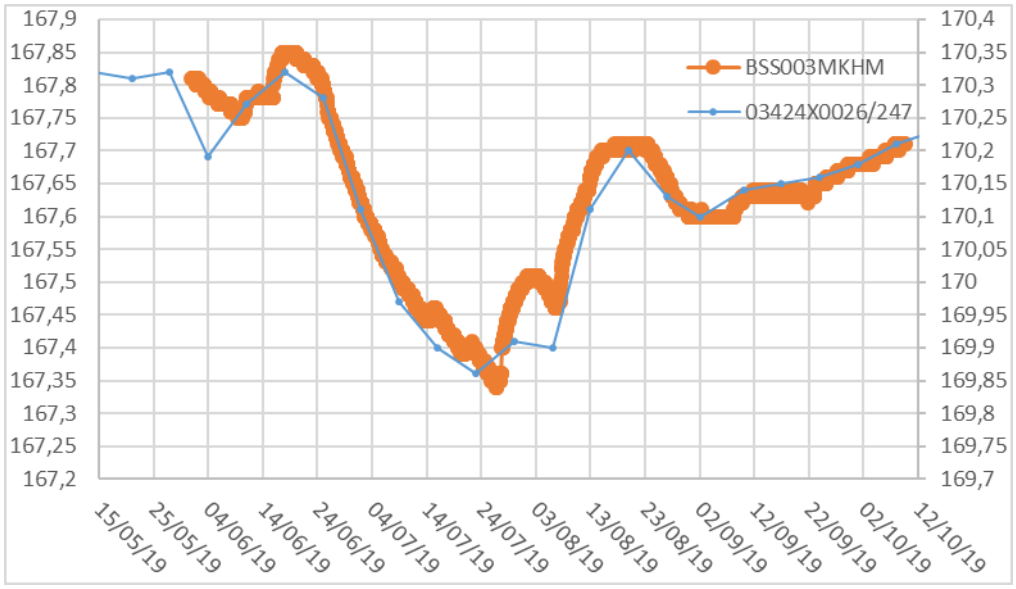


Figure 92 : Correspondance entre le piézomètre BSS003MKHM et le piézomètre 03424X0026/247.

Secteurs.	***Numéro BSS***	***Historique***	***Localisation***	***Données sur les cours d'eau utilisées pour les calages des indicateurs***	***Remarques/ points d'attention***	***Dispositifs d'acquisition actuels***
1	03081X0025/223	1955 - 2019	*Rossfeld (village)*	⇨ *Trulygraben (ONDE 2012 – 2019)* ⇨ *Neugraben (ONDE 2012 -2019)*	*Utilisé pour le bulletin de suivi hydrologique, région Grand Est*	*Centrale télétransmise au pas horaire*
2	03085X0208/PZ7	2008 - 2019	*Hilsenheim (forêt)*	⇨ *Kesslergraben + Shiffwasser : observation qualitative 2015 et 2003 + données du LIVE en 2019* ⇨ *Hanfgraben : ONDE (2012-2019)*	*Position au nord du secteur mais meilleur compromis sur la base des observations des chroniques*	*Centrale au pas horaire*
3	BSS033MKHM	2019	*Baldenheim (village)*	⇨ *Hanfgraben : ONDE (2012-2019)* ⇨ *Kesslergraben + Shiffwasser (2019)* ⇨ *Scheigraben / Erlen (2019)*	*Historique limité. Utilisation des piézomètres environnants pour reconstituer les niveaux piézométriques*	*Centrale au pas horaire*
4	03423X0064/94A	1984 - 2019	*Ilhauersen (champs,)*	⇨ *Erlen, Riedbrunnen : (2019)*	*Influence locale perceptible*	*Centrale au pas horaire*
5	03423X0056/100	1954 - 2019	*Guémar (village) + proximité de la Fecht*	⇨ *Breitbrunnenwasser (ONDE 2012-2019)* ⇨ *Hohgiessen, Brunnenwasser, (2019)*	*Incertitude sur la qualité au pas horaire ou journalier*	*Relevé manuel*

Tableau 22 : Piézomètres proposés pour constituer le réseau de suivi.

Numéro BSS	Atteinte très forte des cours d'eau « phréatiques »			Atteinte forte des cours d'eau « phréatiques »			Atteinte des cours d'eau « phréatiques » vulnérables		
	Niveau piéz. (en mNGF)	*Période de retour sur le minimum annuel*	Principaux points de calage sur les cours d'eau	Niveau piéz. (en mNGF)	*Période de retour sur le minimum annuel*	Principaux points de calage sur les cours d'eau	Niveau piéz. (en mNGF)	*Période de retour sur le minimum annuel*	Principaux points de calage sur les cours d'eau
03081X0025/223	**157,10**	*Entre 10 et 20 ans secs (*)*	Trulygraben, 23/07/15 et 10/08/15 *Campagne ONDE*	**157,13**	*Entre 1 et 5 ans secs (*)*	Kesslergraben 24/07/19 *Données du LIVE*	**157,19**	*0 à 1 an sec (*)*	Neugraben 11/07/19 *Données du LIVE*
03085X0208/PZ7	**160,65**	*Non disponible (**)°*	Hanfgraben 23/07/15 et 10/08/15 *Campagne ONDE*	**160,73**	*Non disponible (**)*	Kesslergraben 27/07/19 *Données du LIVE*	**160,8**	*Non disponible (**)*	Neugraben 06/08/19 *Données du LIVE*
BSS033MKHM *(piézomètre 03424X0026/247)*	**167,25** *(169,72)*	*Non disponible (**) (20 ans secs)*	Hanfgraben 23/07/15 et 10/08/15 *Campagne ONDE*	**167,35** *(169,83)*	*Non disponible (**) (5 ans secs)*	Kesslergraben 27/07/19 *Données du LIVE*	**167,4** *(169,9)*	*Non disponible (**) (1 an secs)*	Schiffgraben 22/07/2019 *Données du LIVE*
03423X0064/94A	**176,24**	*> 20 ans secs (****)*	Ruisseau des Erlen 23/0719 *Données OFB 68*	**176,32**	*5 ans secs (****)*	Brunnwasser/ Canardière 10/07/19 *Données OFB 68*	**176,41**	*1 an sec (****)*	Erlen 02/09/19
03423X0056/100	**174,7**	*>20 ans secs (****)*	Ruisseau des Erlen 23/0719 *Données OFB 68*	**174,85**	*5 ans secs (****)*	Bergenbach 10/07/19 *Données OFB 68*	**175**	*1 an sec (****)*	Situation 2019 au 1 juillet : observation générale sans cours d'eau spécifiques

Tableau 23 : Indicateurs associés aux piézomètres.

) Probabilité d'occurrence ou période de retour calculée **uniquement sur la chronique 1985 – 2019 en raison d'une baisse moyenne de 20 centimètre de la piézométrie par rapport aux années 1970 / 1980*

***) Chronique inférieure à 10 ans*

****) Probabilité d'occurrence ou période de retour calculée sur la chronique 1984 - 2015*

*****) Probabilité d'occurrence ou période de retour calculée sur la chronique 1965 – 2015*

Pour rappel : le minimum annuel calculé ici est lié à l'irrigation en juillet / aout.

Au niveau hydrométrique :

- l'Ill n'a pas été inclus dans la définition du réseau de suivi et des indicateurs. En effet, son comportement est influencé par les manœuvres de gestion (soutien d'étiage, barrages…) et ne permet pas de donner des indications fiables sur la situation des eaux souterraines. Il est par ailleurs recommandé de réviser toute analyse de la situation hydrologique et hydrogéologique des secteurs de l'Ill aval, basée actuellement sur la station de Sundhoffen en raison de l'évolution de la gestion de l'Ill ayant pu fortement modifier les mesures de cette station (rupture dans la série de débits) ;
- il est recommandé de maintenir le maximum de stations hydrométriques sur les cours d'eau phréatiques au vu des problématiques analysées en 2019 sur la partie sud de l'Illwald. Notamment :
    - les stations du Riebrunnen et du Horgiessen semblent indispensables par leur localisation pour encadrer le suivi des cours d'eau phréatiques sur l'ensemble du sud de l'Illwald et disposer de débits /hauteurs d'eaux alimentant des règles de gestion locale,
    - un choix entre la station disposée sur le ruisseau des Erlen et celle sur le Scheidgraben pourrait être réalisé dans un contexte de rationalisation des moyens et après acquisition de données suffisantes sur les deux stations pour caractériser les débits et l'évolution des cours d'eau ;
- la Zembs, autre station hydrométrique disponible sur le secteur, est alimentée par l'Ill. Son utilisation, comme pour l'Ill n'a pas été retenue en l'absence d'éléments précis sur la gestion des débits. Elle peut constituer pour la suite un point de suivi sous réserve d'une connaissance fine des débits provenant de l'Ill.

3.8.4. Éléments de gestion complémentaires

<u>Comportement du niveau de la nappe :</u>

- la recharge de la nappe est possible jusqu'en mai, ce dernier mois étant un mois avec des fortes précipitations potentielles en plaine d'Alsace. Contrairement à d'autres types d'aquifères, il ne semble donc pas possible actuellement d'anticiper la baisse estivale dès la fin des mois de mars/avril. Toutefois, les effets du changement climatique et la récurrence des sécheresses de ces dernières années pourraient modifier ce constat (décalage des saisons, modification des périodes de recharge). Ce point d'attention est notamment important sur les secteurs en lien avec le piémont présentant dès maintenant des déficits globaux et nécessiter une gestion des prélèvements sur l'ensemble de l'année ;

- la période des plus bas niveaux atteints par la nappe est juillet / août, même en cas de prolongation d'une sécheresse à l'automne. En effet, à partir de juin, la baisse de la piézométrie est liée en grande partie aux prélèvements et à l'irrigation. Une stabilisation voir une légère remontée en septembre est observée suite à l'arrêt de l'irrigation ;
- la baisse du niveau piézométrique s'accélère à partir du début de la période d'irrigation du maïs, soit fin juin / début juillet. Ce phénomène s'est accentué depuis 2015 ;
- la dynamique de la nappe étant fortement influencée en période estivale, il n'est pas possible de calculer une courbe de décharge prévisionnelle sur cette période. Toutefois, le franchissement du premier seuil pourrait amener à une gestion différente suivant les périodes car :
    - en juin, soit avant le démarrage de la saison d'irrigation, il entrainerait de facto l'atteinte des autres seuils durant l'été sans mesures amonts de limitations des volumes prélevés ;
    - fin août, l'impact pourrait s'aggraver, mais sous réserve d'une sécheresse hydrologique /hydrogéologique exceptionnelle.
- l'Ill reste un moteur majeur de la gestion de l'eau souterraine du Grand Ried, car les pertes issues de ce cours d'eau apportent un soutien significatif de la nappe en période d'étiage.

Bancarisation des données : en dehors du réseau préconisé, l'analyse des variations horaires a montré des fluctuations journalières pouvant être importante pour l'analyse de l'évolution de la piézométrie. Pour tenir compte de cette problématique, une attention particulière doit être portée sur le choix porté en bancarisation de la donnée journalière.

4. Bibliographie

AARA/Sol conseil (2004) - Guide des sols d'Alsace, Petite région naturelle N° 8, Plaine centre Alsace 220 p., 8 ann.

ANTEA (1998) - Recherche d'une nouvelle ressource d'eau potable, création d'un forage d'essai dans la forêt de l'Illwald à Sélestat (67) 53 p., 9 fig., 8 tab.,10 ann.

Dewandel, B.(2018) - Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques - Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 107 p., 1 ann.

Dorine Perez, 2007, Ecologie de deux anastomoses ellanes : Le Bronnwasser et le Hanfgraben. Mémoire de master 1

Giuglaris E, Manlay A, Agnus C. (2018) – Impacts des prélèvements en eau souterraine sur la zone du grand Ried ; Volet 2 de l'axe 3 du projet « Perspectives et cohabitations des usages de l'eau : de l'équilibre entre les usages agricoles à une gestion partagée des bassins versants ». Rapport final. BRGM/RP-67863-FR, 96 p., 62 fig., 3 ann., 1 Clé USB.

Irrigation techniques. (2018) Remote monitoring and control for irrigation systems. General considérations BS EN 15099-1:2007

Manceau JC, Allier D, Buscarlet E (2020) –Analyse de la sécheresse hydrogéologique dans la région GrandEst –Phase 2 : amélioration des indicateurs de gestion. Rapport final. BRGM/RP-69867-FR, 336p., 29ill.,3 tabl., 5ann., 1 CD.

Sánchez Pérez, J., Lucot, E., Trémolieres, M (2008). Water uptake by trees in a riparian hardwood forest (Rhine floodplain, France). Hydrological Processes. 22. 10.1002/hyp.6604.

Schmitt L., (2001) - Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle de cours d'eau. Recherche Méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg. 217 p., 6 ann.

Stollsteiner P., Wuillemier A., Bessiere H., J.J. Seguin (2011) – Guide méthodologique, indicateur piézométrique, débit prélevable – Rapport final. RP-61374-FR. 73 p. 36 ill., 4 ann.

Sites de références en lignes :

https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/

http://www.gissol.fr/

https://silvae.agroparistech.fr/home/?page_id=859

Annexe 1

Cartographies détaillées

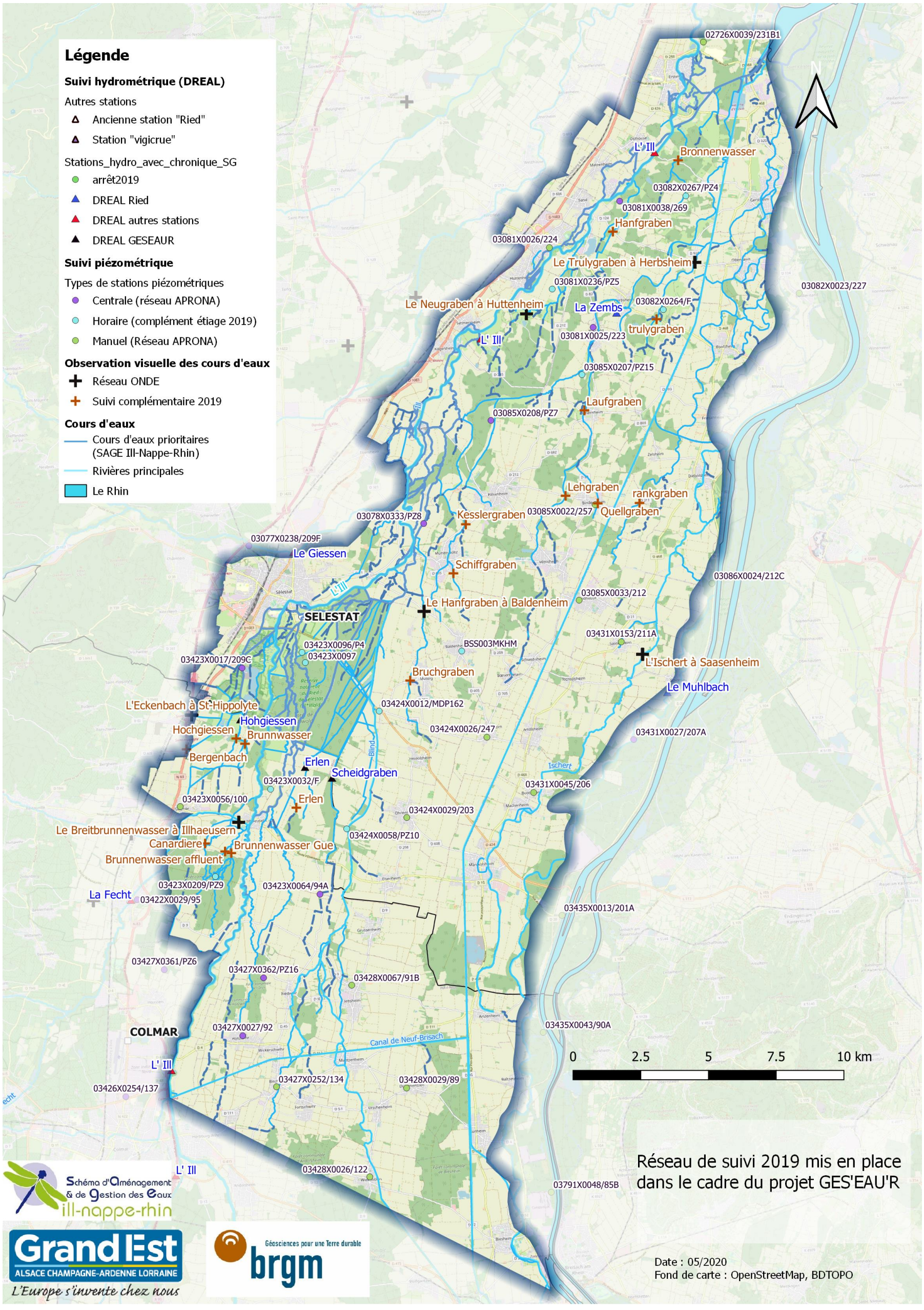


Figure 93 : Cartographie détaillée du réseau de suivi

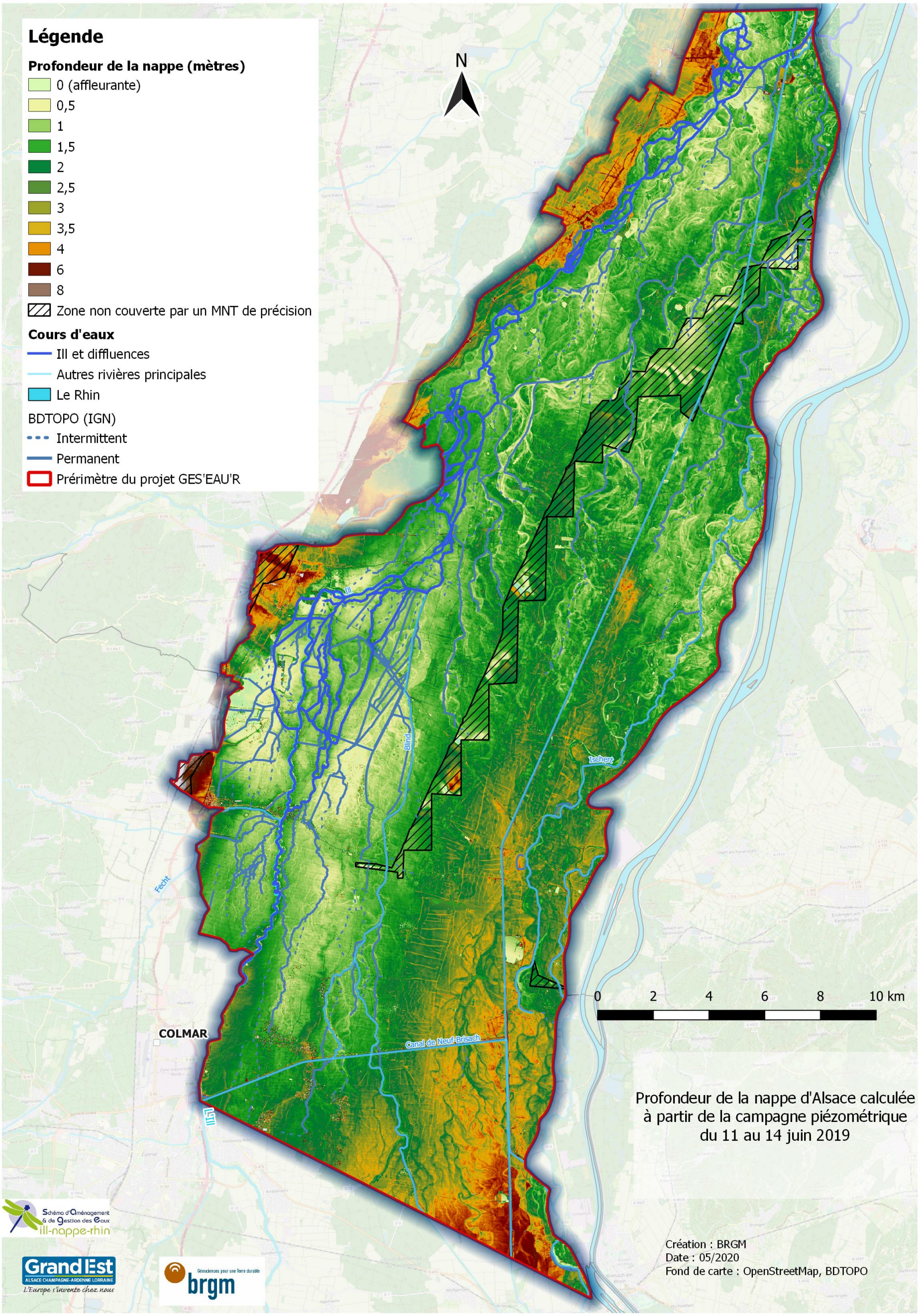


Figure 94 : Profondeur de la nappe basée sur la piézométrie à la mi-juin 2019.

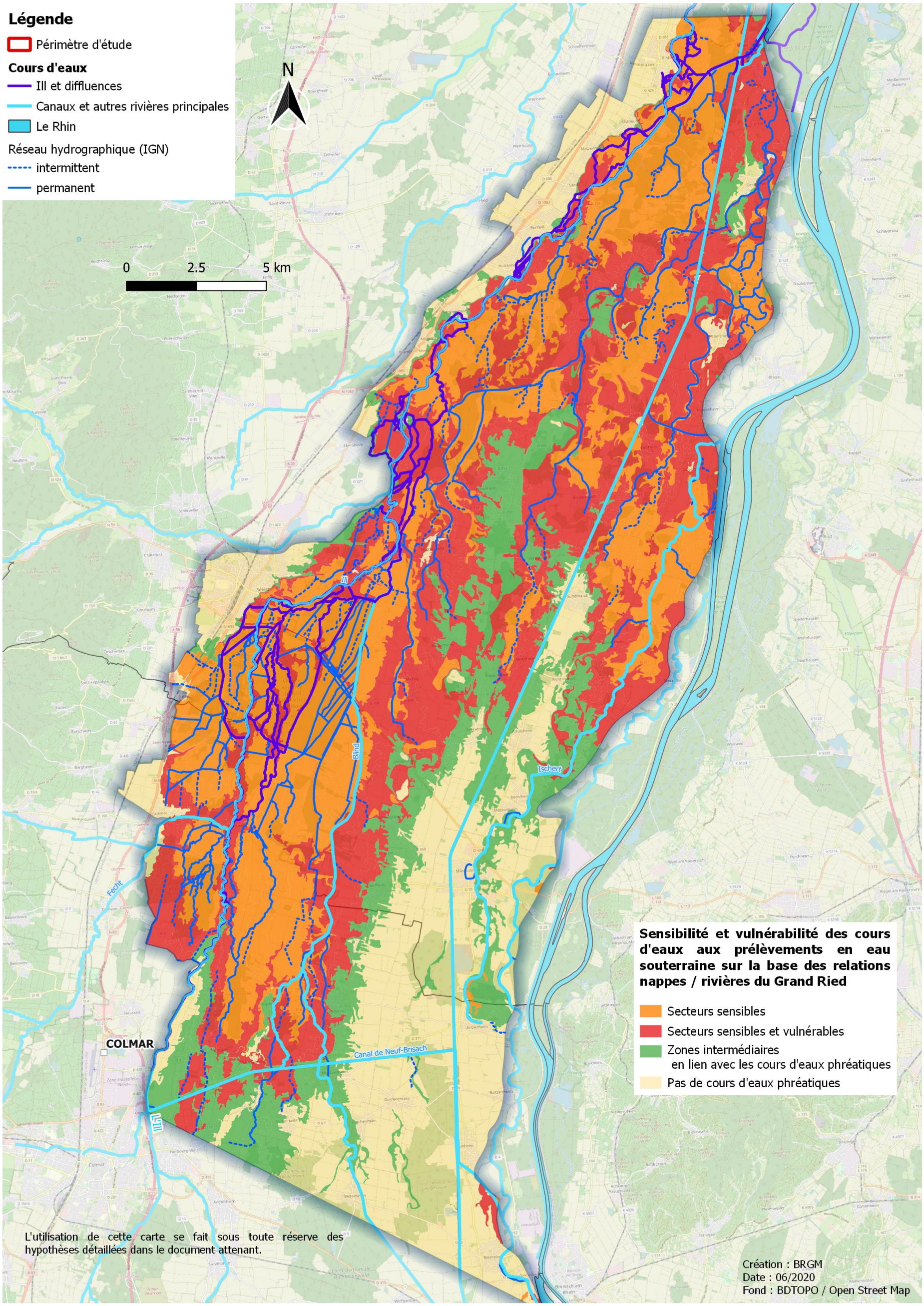


Figure 95: Cartographie des secteurs où les cours d'eau sont sensibles et vulnérables aux prélèvements en eau souterraine.

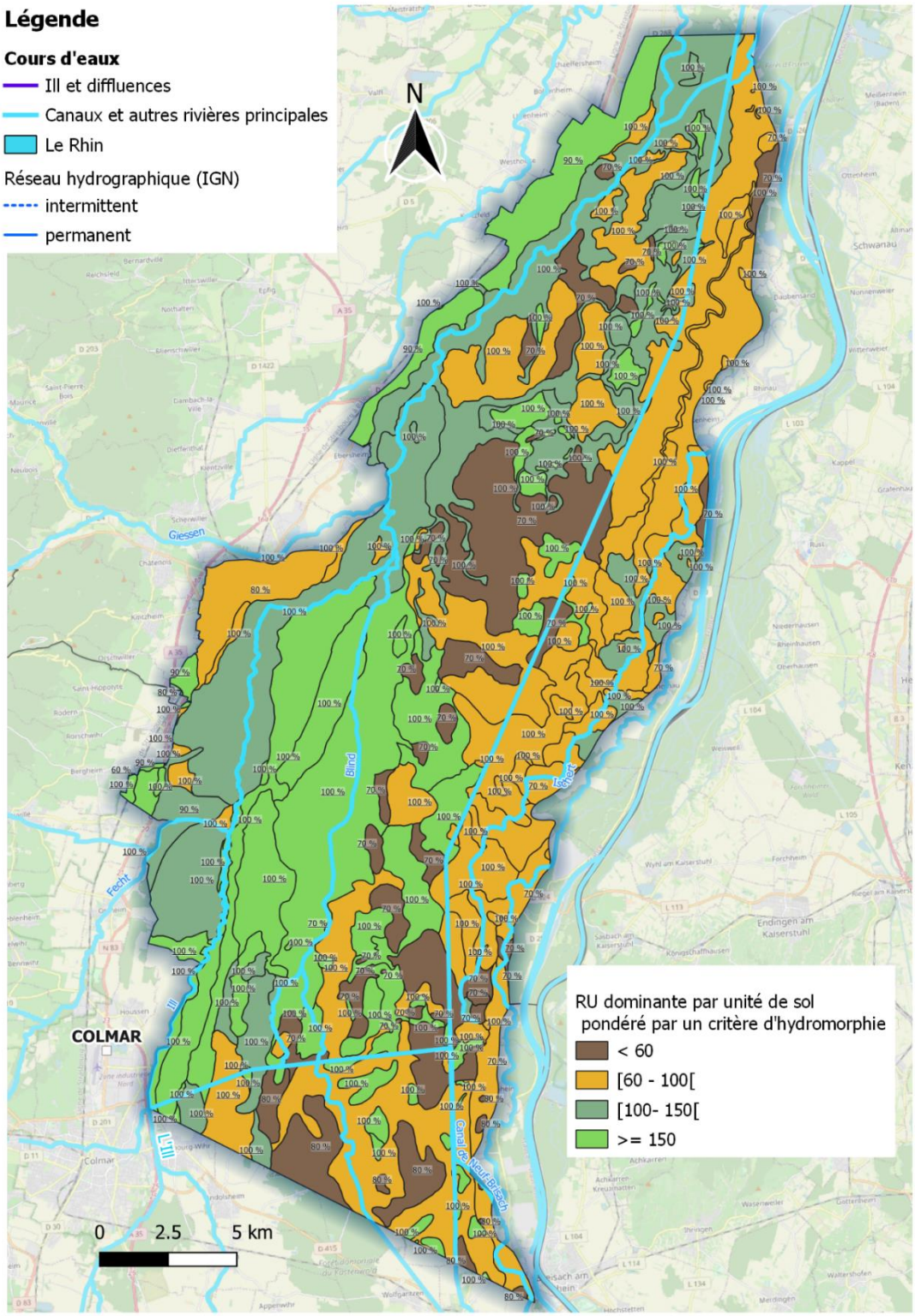
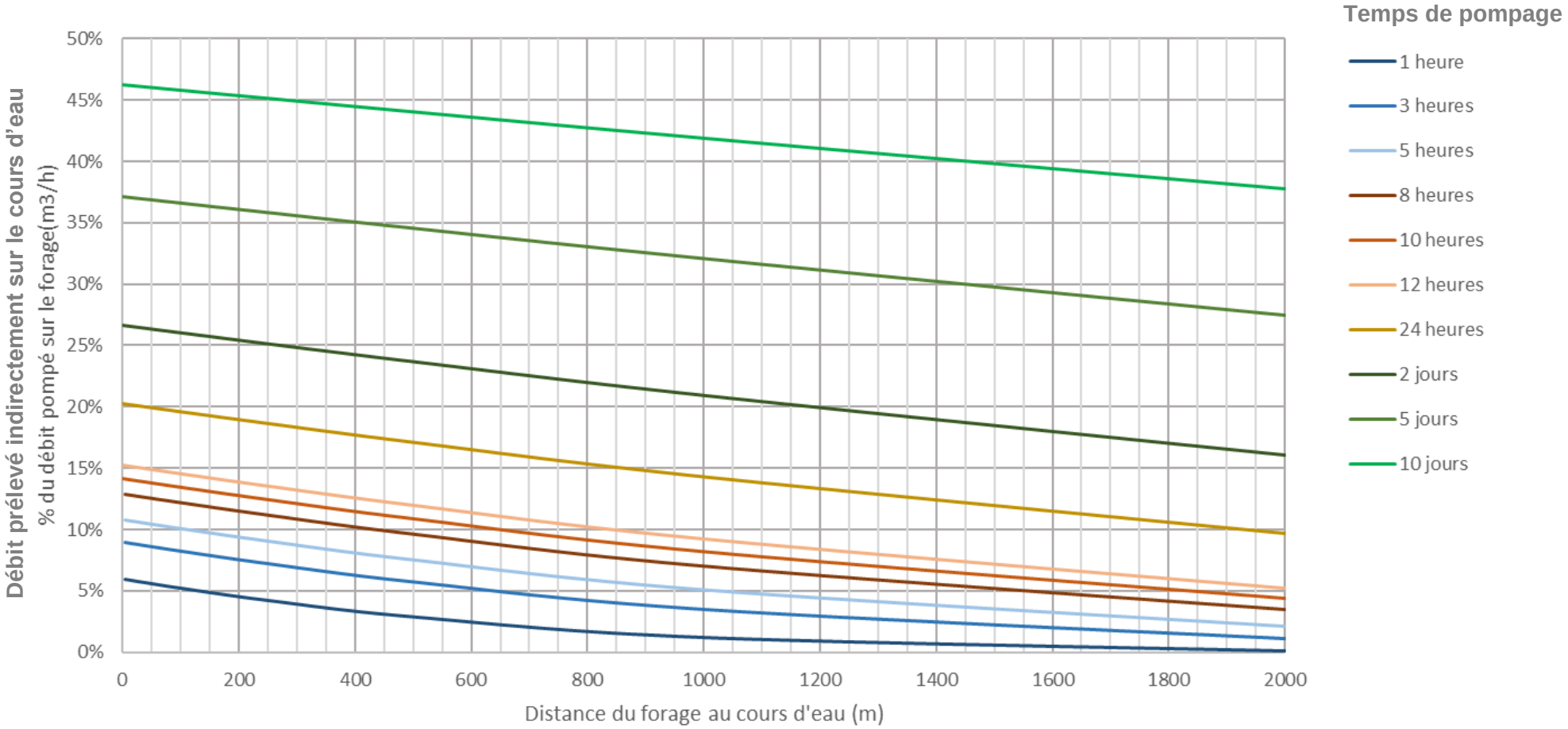


Figure 96 : Cartographie de la RU regroupée par classes et pondérée par l'hydromorphie des sols/ les chiffres indiquent le pourcentage de représentativité de l'unité des sols.

Annexe 2

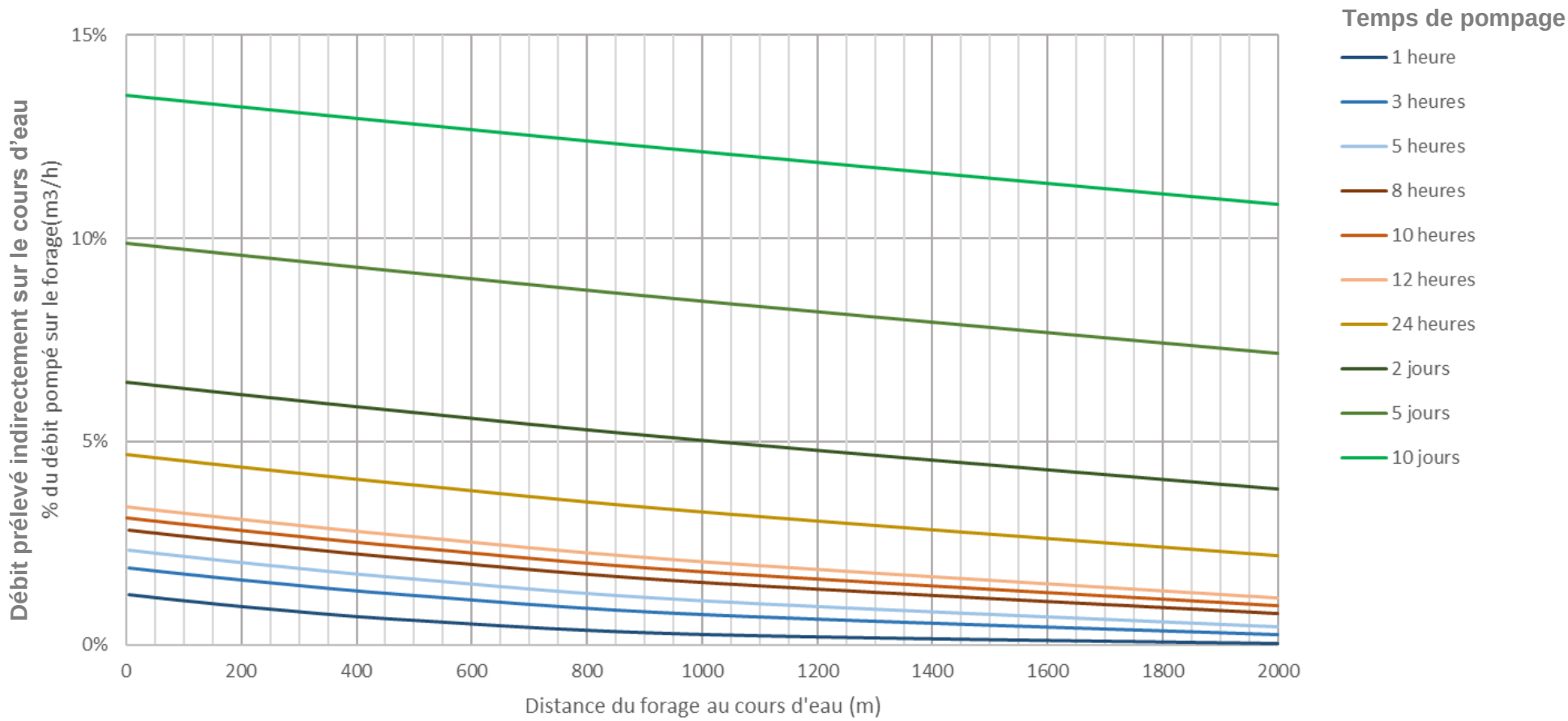
Abaques estimant le débit prélevé indirectement sur les cours d'eaux par la méthode de Hunt



Caractéristiques : Secteurs : ried noir et ried gris partie superficielle avec impact sur cours d'eau phréatiques de largeur moyenne

Paramètres hydrodynamiques moyens obtenus par essais de pompages sur la partie superficielle de la nappe ($T = 0{,}15\ m^2/s$, $s = 1x10^{-3}$)

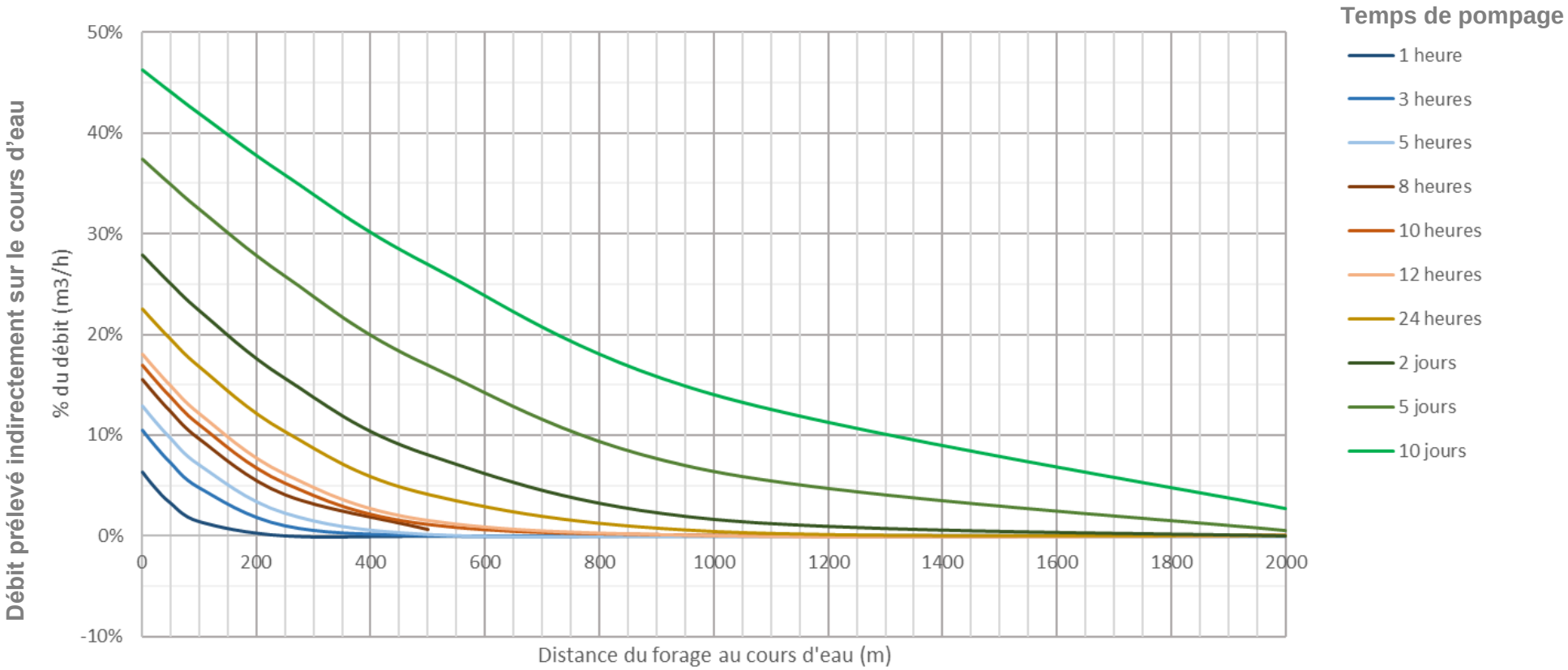
Cours d'eau : largeur moyenne de 5 mètres avec colmatage équivalent sur la largeur du cours d'eau impacté de type limon ($T=1x10^{-6}\ m^2/s$) sur 20 cm d'épaisseur



Caractéristiques : Secteurs : ried noir et ried gris partie superficielle avec impact sur les très petits cours d'eau phréatiques

Paramètres hydrodynamiques moyens obtenus par essais de pompages sur la partie superficielle de la nappe ($T = 0{,}15\ m^2/s$, $s = 1x10^{-3}$)

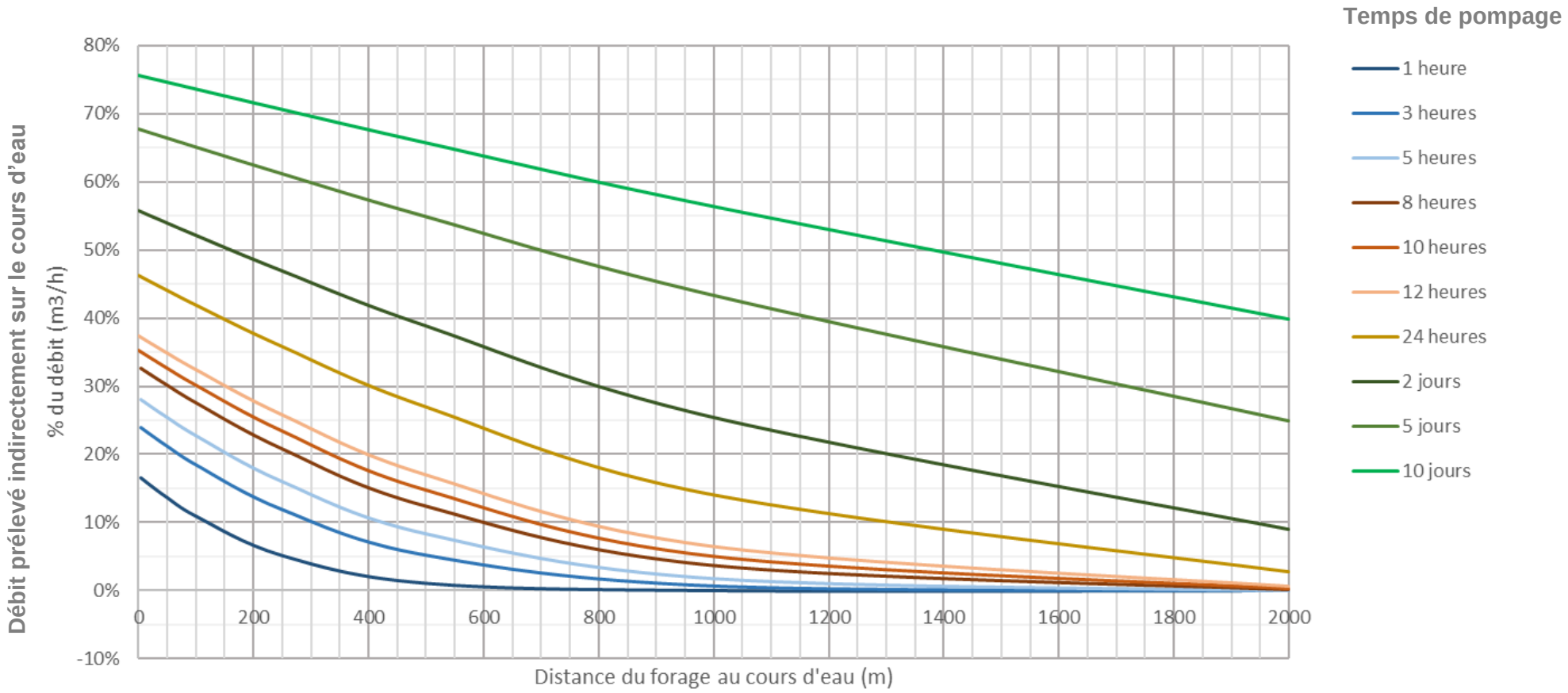
Cours d'eau : largeur moyenne de 1 mètre avec colmatage équivalent sur la largeur du cours d'eau impacté de type limon ($T=1x10^{-6}\ m^2/s$) sur 20 cm d'épaisseur



Caractéristiques : Secteurs : Ried sableux, cours d'eau phréatiques de largeur moyenne

Coefficient d'emmagasinement équivalent à un milieu non captif (absence de couche argileuse ou de limons) et prise en compte d'une transmissivité moyenne de la nappe dans le secteur ($T = 0{,}015\ m^2/s$, $s = 1x10^{-2}$)

Cours d'eau : largeur moyenne de 5 mètres avec colmatage équivalent sur la largeur du cours d'eau impacté de type limon ($T=1x10^{-6}\ m^2/s$) sur 20 cm d'épaisseur



Caractéristiques : Secteurs : bordure ouest du Ried noir, cours d'eau de largeur moyenne

Milieu légèrement captif (valeurs obtenues par essais de pompages) avec prise en compte d'une baisse de la perméabilité des niveaux captés de la nappe ($T = 0{,}015$ m^2/s, $s = 1x10^{-3}$)

Cours d'eau : largeur moyenne de 5 mètres avec colmatage équivalent sur la largeur du cours d'eau impacté de type limon ($T=1x10^{-6}$ m^2/s) sur 20 cm d'épaisseur

Annexe 3

Données des campagnes de juin 2019 : piézométrie et reconnaissance des cours d'eau

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques

Coordonnées du point de mesure (Lambert 93)		*DATE et heure*	Nom de la rivière	Paramètres physico-chimiques	
X_L93	Y_L93			Conductivité	Temperature
1029131	6790498	*11/06/2019 11:22*	Orchbach	611,00	11,00
1029085	6789490	*11/06/2019 12:43*	Orchbach	612,00	11,60
1029145	6792597	*11/06/2019 13:56*	Orchbach	615,00	12,50
1028401	6794101	*11/06/2019 15:07*	rivières du Niderwald	650,00	12,60
1028099	6794177	*11/06/2019 15:36*	rivières du Niderwald	550,00	15,00
1027982	6794201	*11/06/2019 15:50*	rivières du Niderwald	754,00	12,66
1027473	6794312	*11/06/2019 16:13*	rivières du Niderwald	811,00	14,35
1027640	6794278	*11/06/2019 16:22*	rivières du Niderwald	862,00	12,79
1027827	6794242	*11/06/2019 16:30*	rivières du Niderwald	851,00	12,41
1030580	6793889	*11/06/2019 16:54*	Riedbrunnen	613,00	12,10
1028429	6795147	*11/06/2019 17:10*	rivières du Niderwald	718,00	14,89
1030695	6793298	*11/06/2019 17:19*	Riedbrunnen	864,00	12,20
1027564	6795735	*11/06/2019 17:24*	breitbrunnenwasser	759,00	15,05
1030631	6793453	*11/06/2019 18:15*	Riedbrunnen	850,00	12,00
1030624	6793537	*11/06/2019 19:04*	Riedbrunnen	839,00	11,90
1037723	6789412	*12/06/2019 09:52*	ishert	460,00	13,78
1031963	6794827	*12/06/2019 10:11*	Scheidgrabben	1095,00	12,40
1032238	6795426	*12/06/2019 10:35*	Scheidgrabben	1087,00	11,90
1039833	6797341	*12/06/2019 11:05*	ishert	461,00	15,85
1032161	6797859	*12/06/2019 11:55*	Scheidgrabben	1084,00	12,10
1028779	6800023	*12/06/2019 13:08*	Horgiessen	776,00	13,35
1033059	6799953	*12/06/2019 14:07*	Scheidgrabben	1076,00	12,40
1028624	6799376	*12/06/2019 14:45*	Horgiessen	772,00	13,80
1031172	6798263	*12/06/2019 15:07*	Erlen	974,00	12,80
1028933	6799166	*12/06/2019 15:15*	brunnenwasser	777,00	14,45
1030852	6802620	*12/06/2019 15:48*	Schiffwasser	495,00	16,90
1031306	6801451	*12/06/2019 17:47*	Schiffwasser	485,00	17,00
1028357	6809409	*13/06/2019 08:22*	friesengraben	698,00	14,40
1037124	6811282	*13/06/2019 08:45*	zembs	695,00	14,40
1036884	6804797	*13/06/2019 10:04*	Schiffgraben	737,00	12,80
1037979	6813024	*13/06/2019 10:29*	naugraben	709,00	11,90

Coordonnées du point de mesure (Lambert 93)		*DATE et heure*	Nom de la rivière	Paramètres physico-chimiques	
X_L93	Y_L93			Conductivité	Température
1036644	6805458	*13/06/2019 10:40*	Schiffgraben		
1039729	6811944	*13/06/2019 11:12*	zembs	697,00	13,00
1036423	6805939	*13/06/2019 11:30*	Kesslergraben	721,00	14,10
1036515	6806236	*13/06/2019 12:05*	Kesslergraben	720,00	14,20
1040221	6815423	*13/06/2019 13:32*	lutter	690,00	13,50
1037066	6807243	*13/06/2019 14:00*	Kesslergraben	728,00	14,80
1038898	6815200	*13/06/2019 14:28*	lutter		
1041969	6807979	*13/06/2019 15:08*	Quellgraben	445,00	13,70
1038864	6814783	*13/06/2019 15:34*	neugraben	765,00	14,83
1041806	6807514	*13/06/2019 15:47*	Quellgraben	590,00	12,00
1041387	6809171	*13/06/2019 16:00*	Quellgraben	593,00	14,70
1038913	6814779	*13/06/2019 16:28*	neugraben	729,00	13,41
1043313	6807935	*13/06/2019 17:18*		656,00	15,00
1041909	6814136	*13/06/2019 18:39*	Zembs	701,00	15,20
1038330	6813796	*14/06/2019 09:15*	trulygraben		
1043735	6813779	*14/06/2019 09:29*	trulygraben	619,00	11,79
1042120	6817297	*14/06/2019 10:00*	Hanfgraben_sand	706,00	11,30
1044135	6814858	*14/06/2019 10:14*	trulygraben	621,00	12,27
1042523	6818081	*14/06/2019 10:44*	Hanfgraben_sand	705,00	11,80
1043089	6819200	*14/06/2019 11:20*	Hanfgraben_sand	705,00	11,70
1045551	6816961	*14/06/2019 11:22*	trulygraben	647,00	13,65
1045785	6821728	*14/06/2019 12:01*	Saeurbrunnen	722,00	11,20
1044906	6820675	*14/06/2019 12:10*	bronnenwasser	681,00	11,60
1045238	6821526	*14/06/2019 13:37*	bronnenwasser	678,00	11,60

Tableau 2 : Principaux paramètres de jaugeages réalisées.

Coordonnées du point de mesure (Lambert 93)		*DATE et heure*	Nom de la rivière	paramètres principaux du jaugeage		
X_L93	Y_L93			Q (l/sec.)	largeur	prof.
1029131	6790498	*11/06/2019 11:22*	Orchbach	101	6,55	0,59
1029085	6789490	*11/06/2019 12:43*	Orchbach	27	2,50	0,10
1029145	6792597	*11/06/2019 13:56*	Orchbach	311	12,20	0,57
1030631	6793453	*11/06/2019 18:15*	Riedbrunnen	143	5,50	0,39
1030624	6793537	*11/06/2019 19:04*	Riedbrunnen	214	6,10	0,36
1037723	6789412	*12/06/2019 09:52*	ishert	161	3,80	20,20
1032238	6795426	*12/06/2019 10:35*	Scheidgrabben	102	3,20	0,40
1039833	6797341	*12/06/2019 11:05*	ishert	186	2,60	26,00
1032161	6797859	*12/06/2019 11:55*	Scheidgrabben	232	4,00	0,61
1028779	6800023	*12/06/2019 13:08*	Horgiessen	166	4,30	34,50
1028933	6799166	*12/06/2019 15:15*	brunnenwasser	150	2,10	50,00
1030852	6802620	*12/06/2019 15:48*	Schiffwasser	1533	7,30	0,36
1037124	6811282	*13/06/2019 08:45*	zembs	212	3,80	52,30
1036644	6805458	*13/06/2019 10:40*	Schiffgraben	21	4,00	0,22
1039729	6811944	*13/06/2019 11:12*	zembs	50	1,55	####
1036423	6805939	*13/06/2019 11:30*	Kesslergraben	95	3,30	0,24
1040221	6815423	*13/06/2019 13:32*	lutter	199	7,00	49,90
1037066	6807243	*13/06/2019 14:00*	Kesslergraben	219	4,50	0,33
1041969	6807979	*13/06/2019 15:08*	Quellgraben	96	2,09	0,23
1038864	6814783	*13/06/2019 15:34*	neugraben	27	3,80	18,40
1038913	6814779	*13/06/2019 16:28*	neugraben	24	6,30	54,60
1043313	6807935	*13/06/2019 17:18*		58	3,10	0,26
1043735	6813779	*14/06/2019 09:29*	trulygraben	62	3,60	33,10
1042120	6817297	*14/06/2019 10:00*	Hanfgraben_sand	26	3,20	0,44
1044135	6814858	*14/06/2019 10:14*	trulygraben	68	3,30	27,50
1045551	6816961	*14/06/2019 11:22*	trulygraben	144	2,60	68,20
1044906	6820675	*14/06/2019 12:10*	bronnenwasser	38	4,70	20,40
1045238	6821526	*14/06/2019 13:37*	bronnenwasser	217	5,90	1,22

Annexe 4
analyse statistique pour la constitution de la carte piézométrique

Méthodologie :

Les résultats des traitements statistiques ont analysé différents cas pour analyser l'influence :

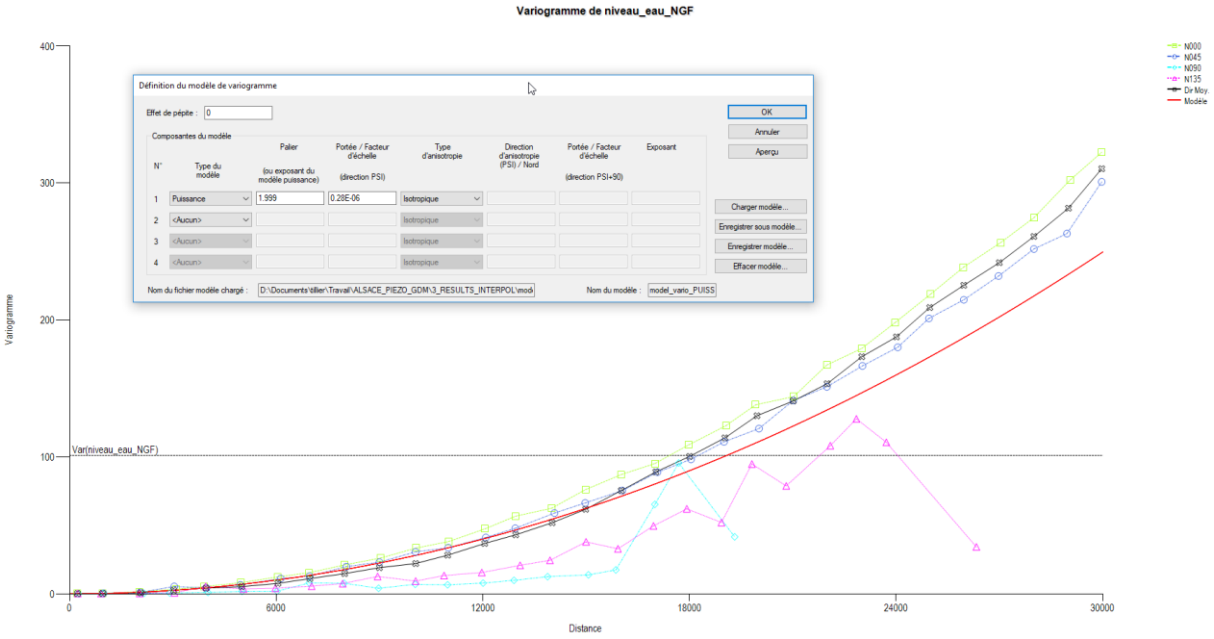
- Des données de hauteurs d'eau en rivières ;
- Des différents secteurs :
    - Intégralité de la zone ;
    - Secteur nord, sud ;
    - Zonage particulier sur Sélestat.

De manière à conserver un rendu final intégrant des zones fines intégrant les échanges nappes rivières, le rendu final a été réalisé à un pas de 2m, calqué sur un fichier MNT. Ce rendu génère un fichier conséquent.

Les résultats bruts des différents traitements réalisés sont donnés ci-après.

Interpolation 1 : Données SANS points rivières

Calcul du variogramme et choix du modèle



Validation croisée : paramètres et résultats sur l'erreur réduite

Résultats statistiques

	NB	MIN	MAX	MOY	SIGMA
Erreur brute	119	-8.8347	2.1012	-0.050505	0.8924
Erreur réduite	119	-156.301	67.936	-0.445	19.533

Coefficient de corrélation (Z* , Z) : 0.996

Coefficient de corrélation (Z* , ERR) : 0.041

Coefficient de corrélation (Z* , ERED) : 0.025

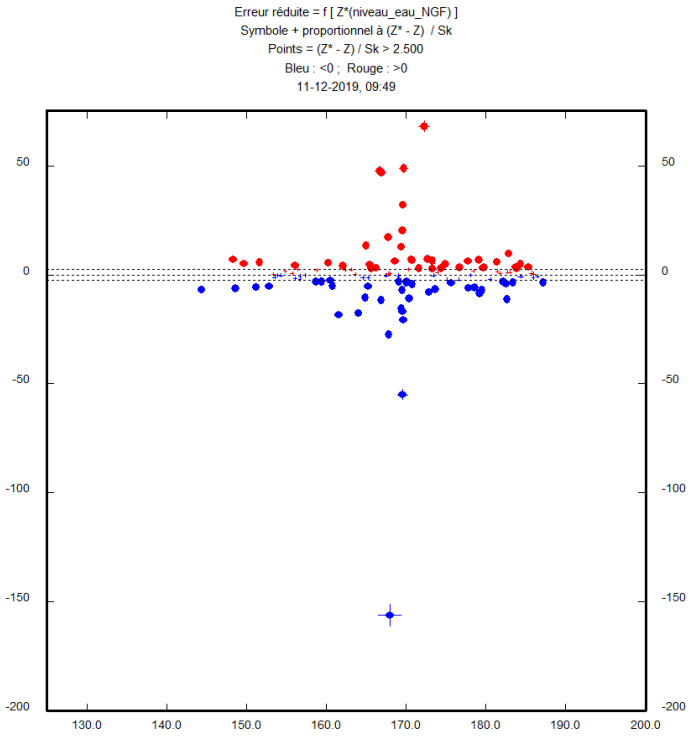
Nombre de données non robustes : 75

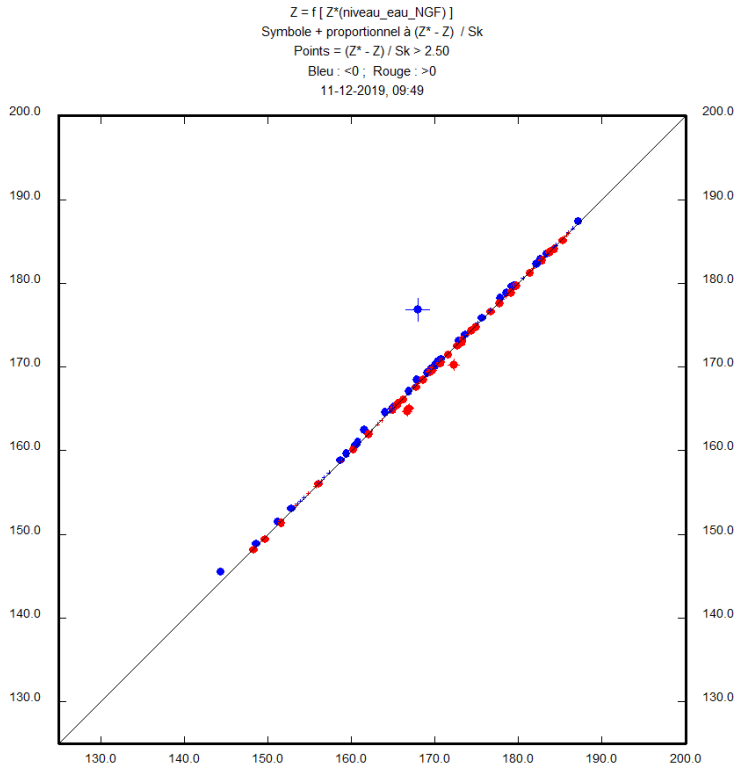
avec un seuil de : 2.5

Modifier seuil...

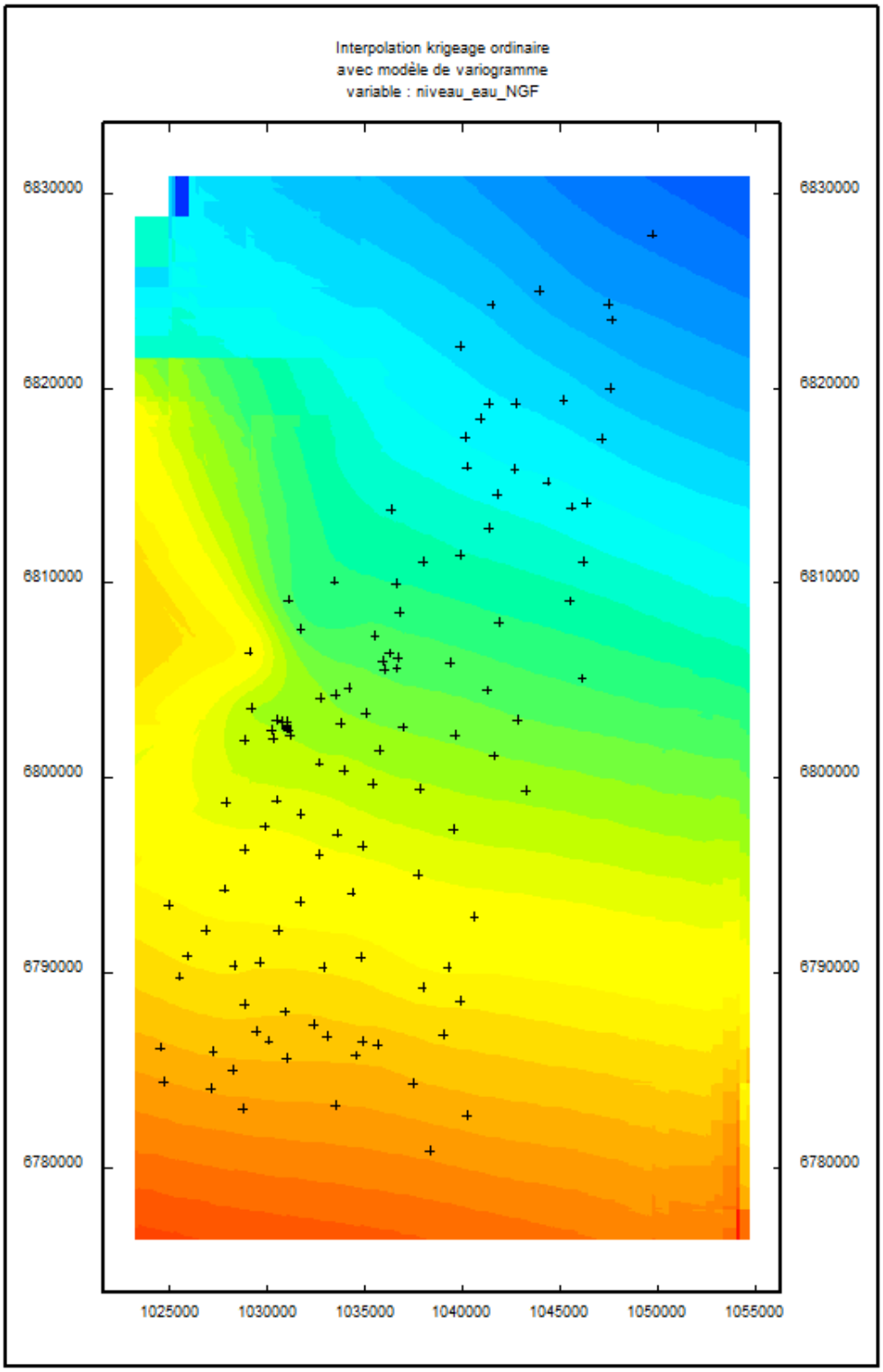
Nombre de données non estimées : 0

Exporter Statistiques...

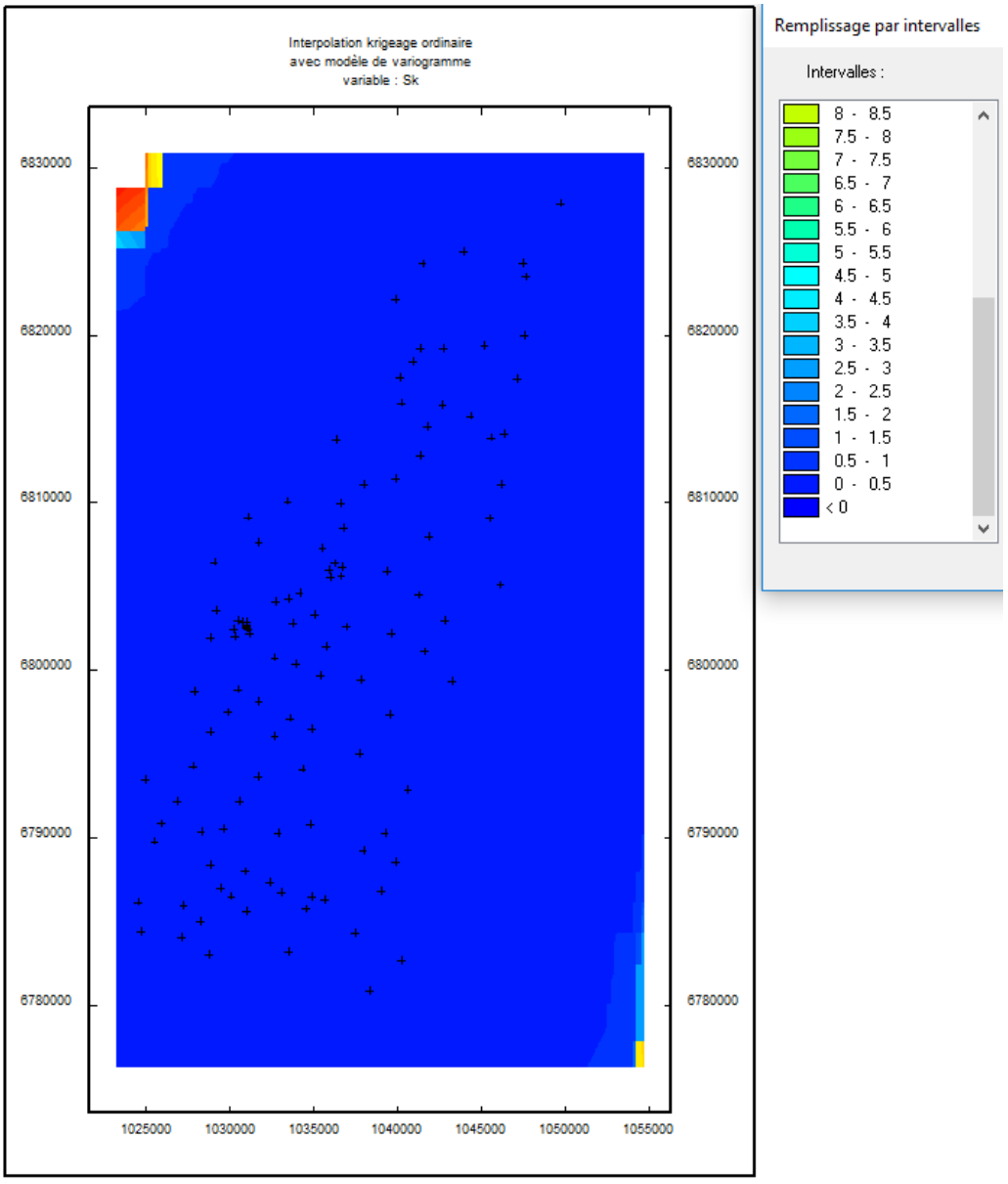




Résultat de l'interpolation intégrant l'intégralité des points :



Comparaison du résultat de l'écart-type entre interpolation et données réelles : pas de différence notable sur la zone d'étude stricte.



Statistiques sur la variable interpolée :

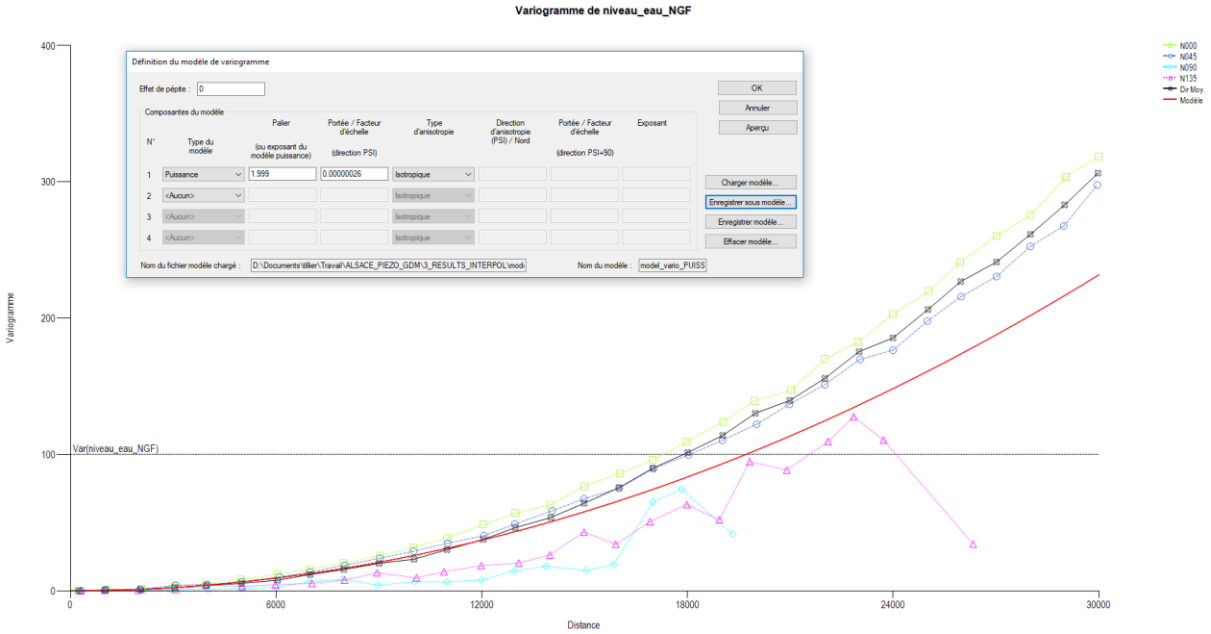
niveau_eau_NGF

	Nom	Descriptif	Usage	Unité	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
1	V1	niveau_eau_NGF	UNDF	UNDF	430 409 742	137.92500000000000	199.76300000000000	168.84200000000000	13.00700000000000
2	NP	NP	UNDF	UNDF	430 409 742	1.00000000000000	24.00000000000000	22.12820000000000	4.49414000000000
3	Sk	Sk	UNDF	UNDF	430 409 742	0.00000000005970	14.95510000000000	0.19185200000000	0.89357400000000

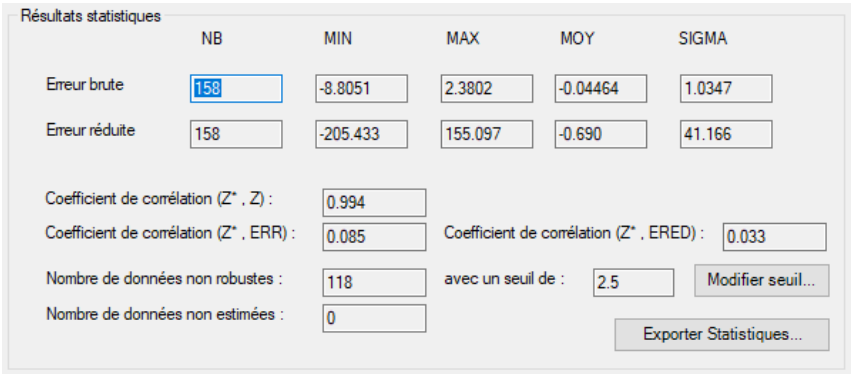
Interpolation 2 : Données AVEC points rivières

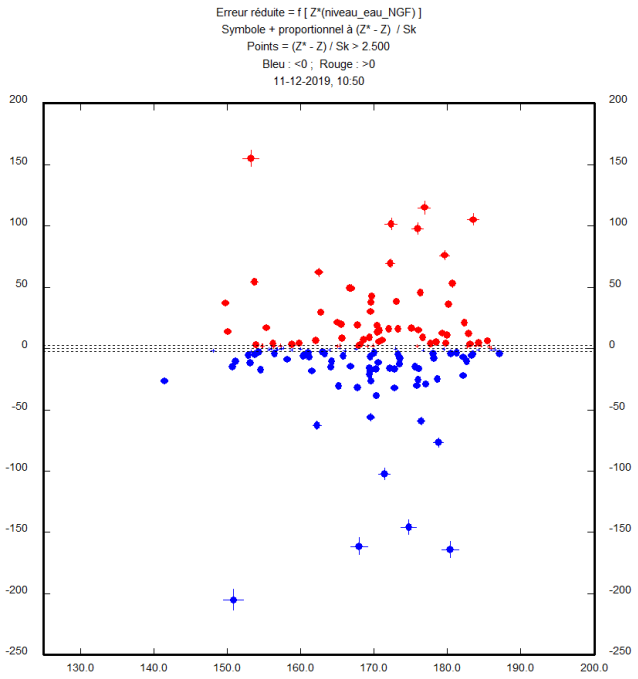
Variogramme identique.

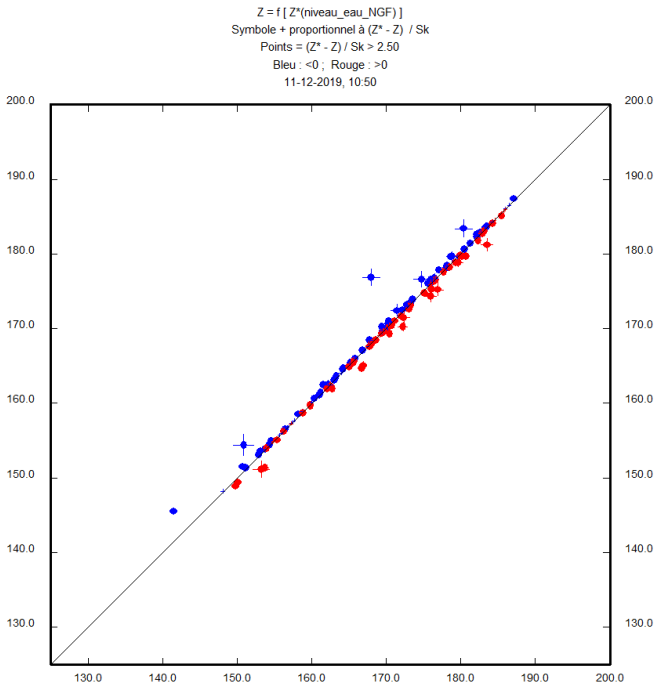
- Variogramme et modèle de variogramme



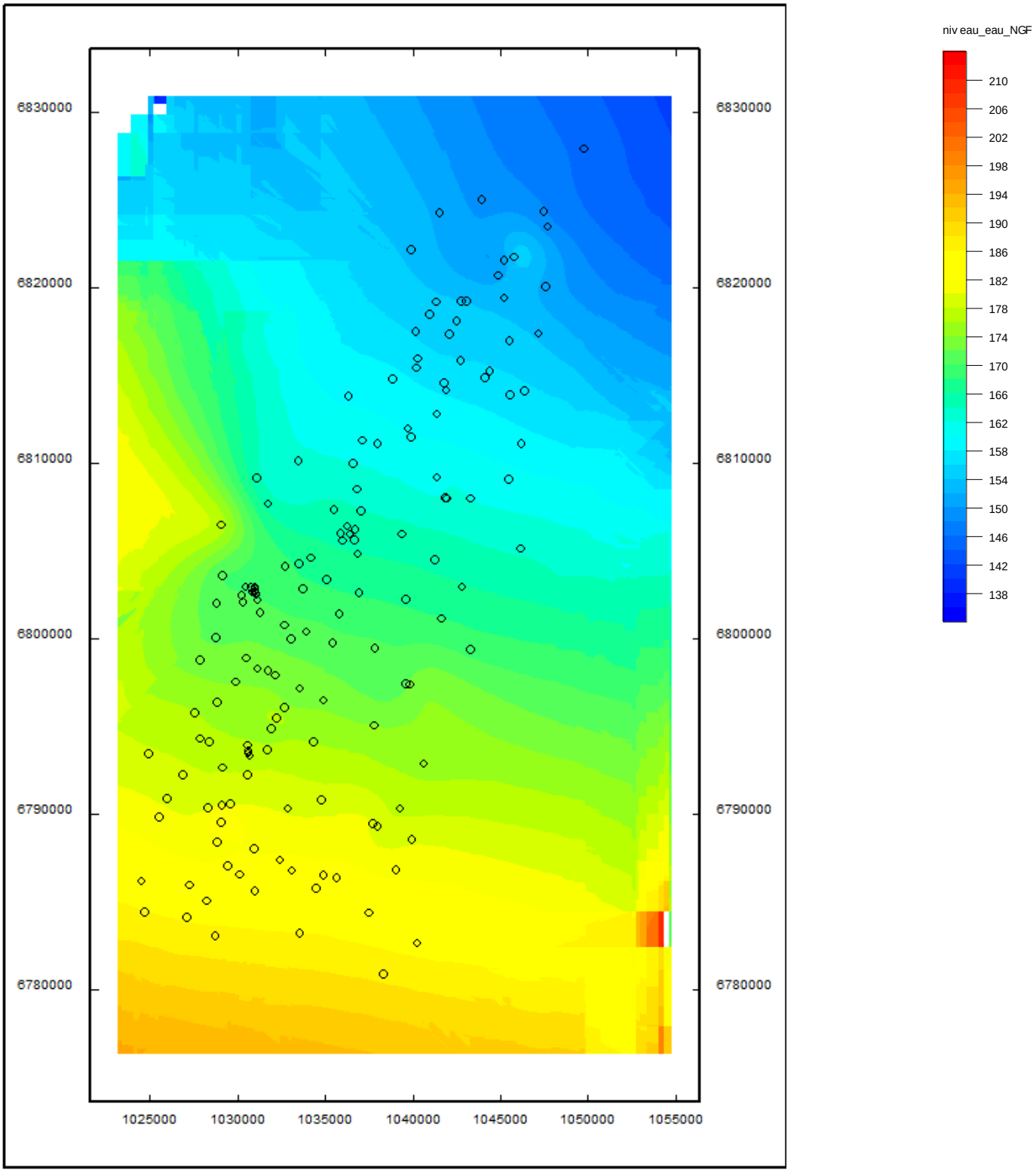
- Paramètres de la validation croisée



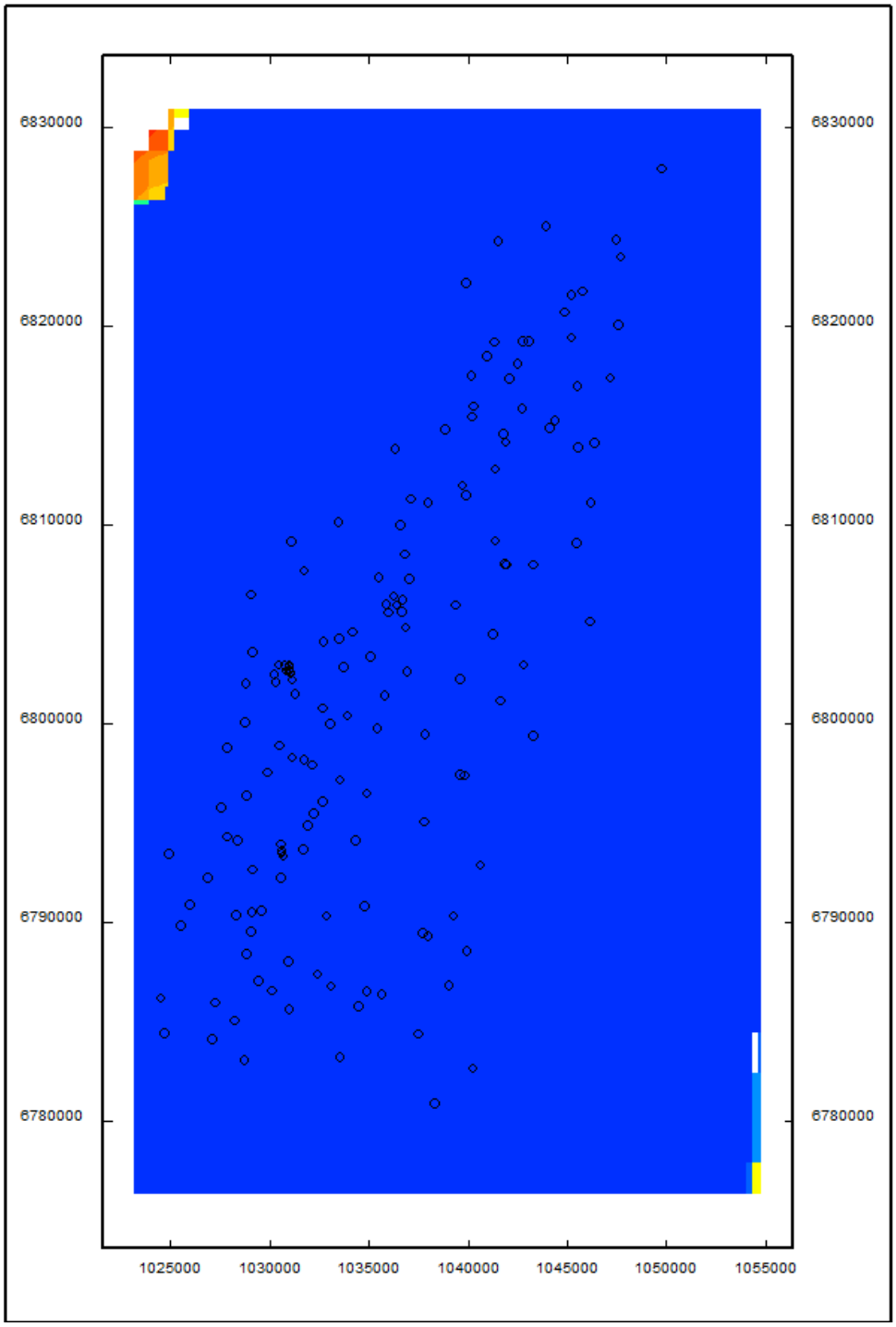

Erreur réduite = f [Z*(niveau_eau_NGF)]
Symbole + proportionnel à (Z* - Z) / Sk
Points = (Z* - Z) / Sk > 2.500
Bleu : <0 ; Rouge : >0
11-12-2019, 10:50
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
-200
-250
130.0
140.0
150.0
160.0
170.0
180.0
190.0
200.0


Z = f [Z*(niveau_eau_NGF)]
Symbole + proportionnel à (Z* - Z) / Sk
Points = (Z* - Z) / Sk > 2.50
Bleu : <0 ; Rouge : >0
11-12-2019, 10:50
200.0
190.0
180.0
170.0
160.0
150.0
140.0
130.0

- Aperçu de l'interpolation :



- Grille résultat écart-type aperçu : identique



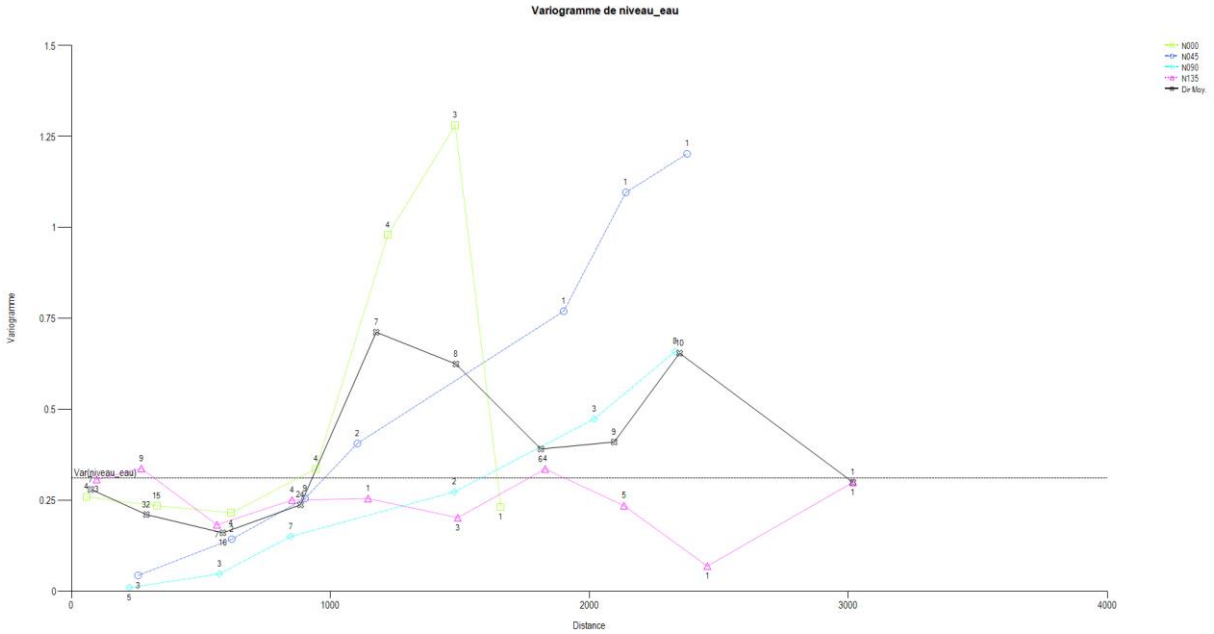
Statistiques sur la variable interpolée :

niveau_eau_NGF

	Nom	Descriptif	Usage	Unité	Effectif	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
1	V1	niveau_eau_NGF	UNDF	UNDF	430 410 080	137.9250000000000	210.17200000000	168.9269999999999	13.1043000000000
2	NP	NP	UNDF	UNDF	430 410 080	1.0000000000000	24.00000000000	22.8302000000000	3.8209600000000
3	Sk	Sk	UNDF	UNDF	430 410 080	0.0000000000574	15.22040000000	0.1752250000000	0.8273750000000

Interpolation 3 : Zoom Sélestat

- Paramètres grille à interpoler : X0Y0 : 1023600 ; 6800460 ; PAS : 2 ; 2 ; NBRE MAILLES 5735; 3275

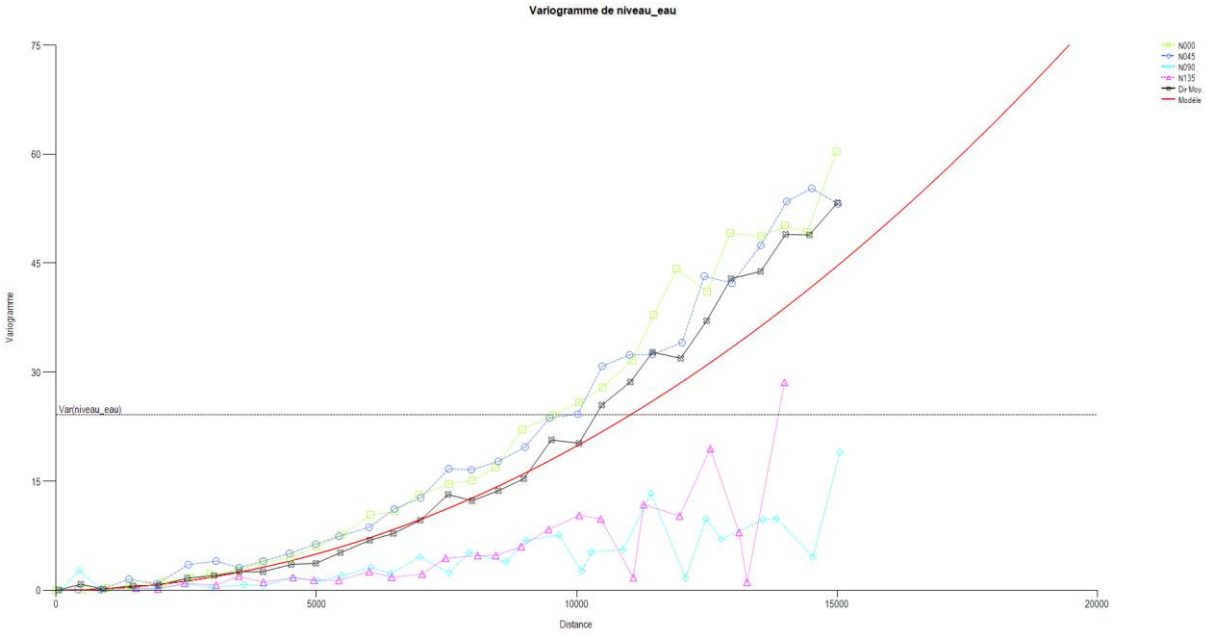


Calage difficile, avec un effet pépite prononcé : variabilité assez forte à faible distance.

Le secteur ne présente pas de tendance simple sur les directions d'écoulements

Interpolation 1 : Zoom zone nord

- Paramètres grille à interpoler : X0Y0 : 1030000 ; 6806500 ; PAS : 2 ; 2 ; NBRE MAILLES 12050; 11770
- Variogramme : identique au variogramme de l'intégralité de la zone



Résultats statistiques

	NB	MIN	MAX	MOY	SIGMA
Erreur brute	54	-3.912	2.3802	-0.047709	0.89428
Erreur réduite	54	-234.147	176.764	-0.137	44.531

Coefficient de corrélation (Z* , Z) : 0.984

Coefficient de corrélation (Z* , ERR) : 0.280

Coefficient de corrélation (Z* , ERED) : 0.089

Nombre de données non robustes : 38

avec un seuil de : 2.5

Modifier seuil...

Nombre de données non estimées : 0

Exporter Statistiques...

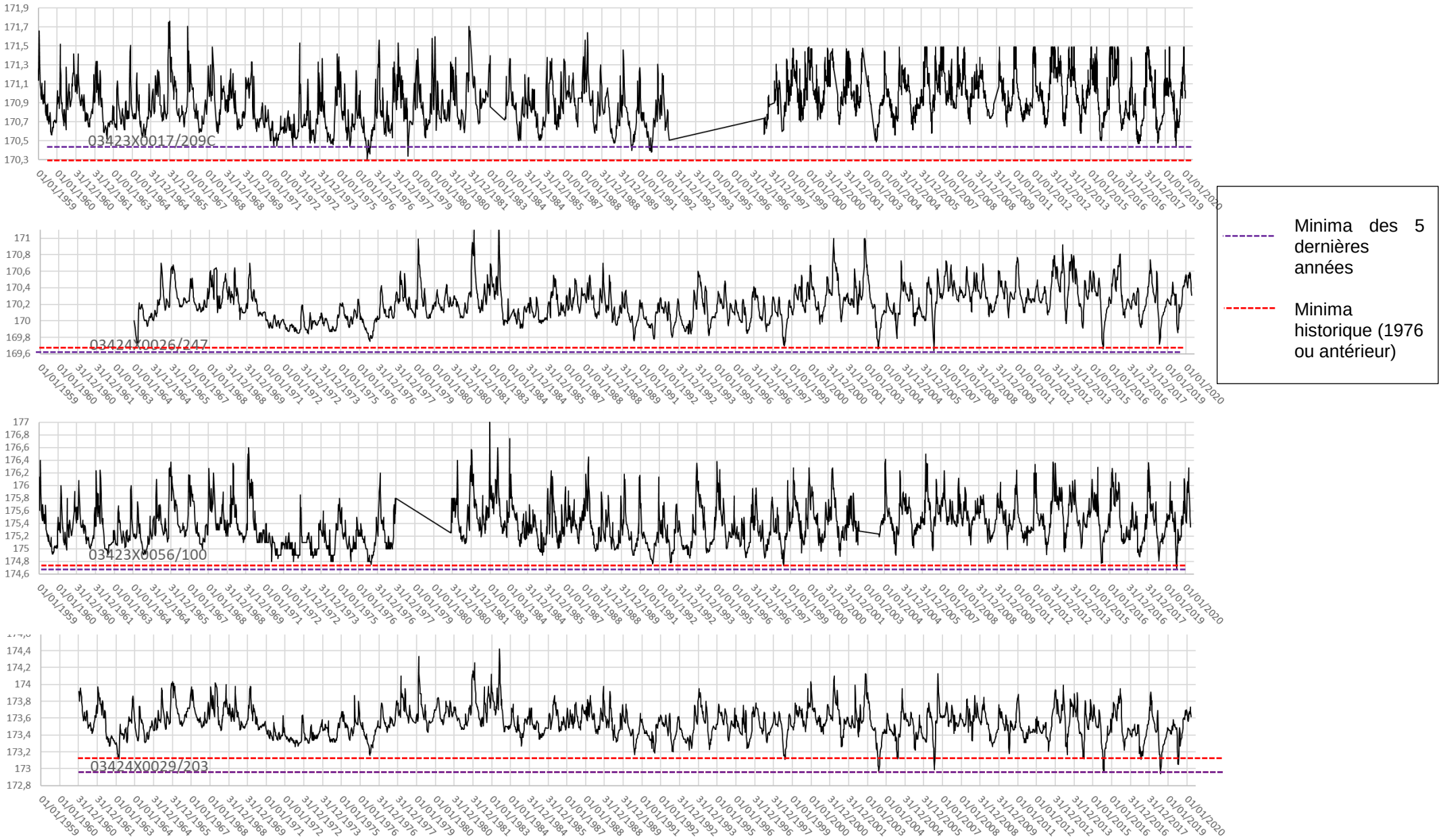
Conclusion :

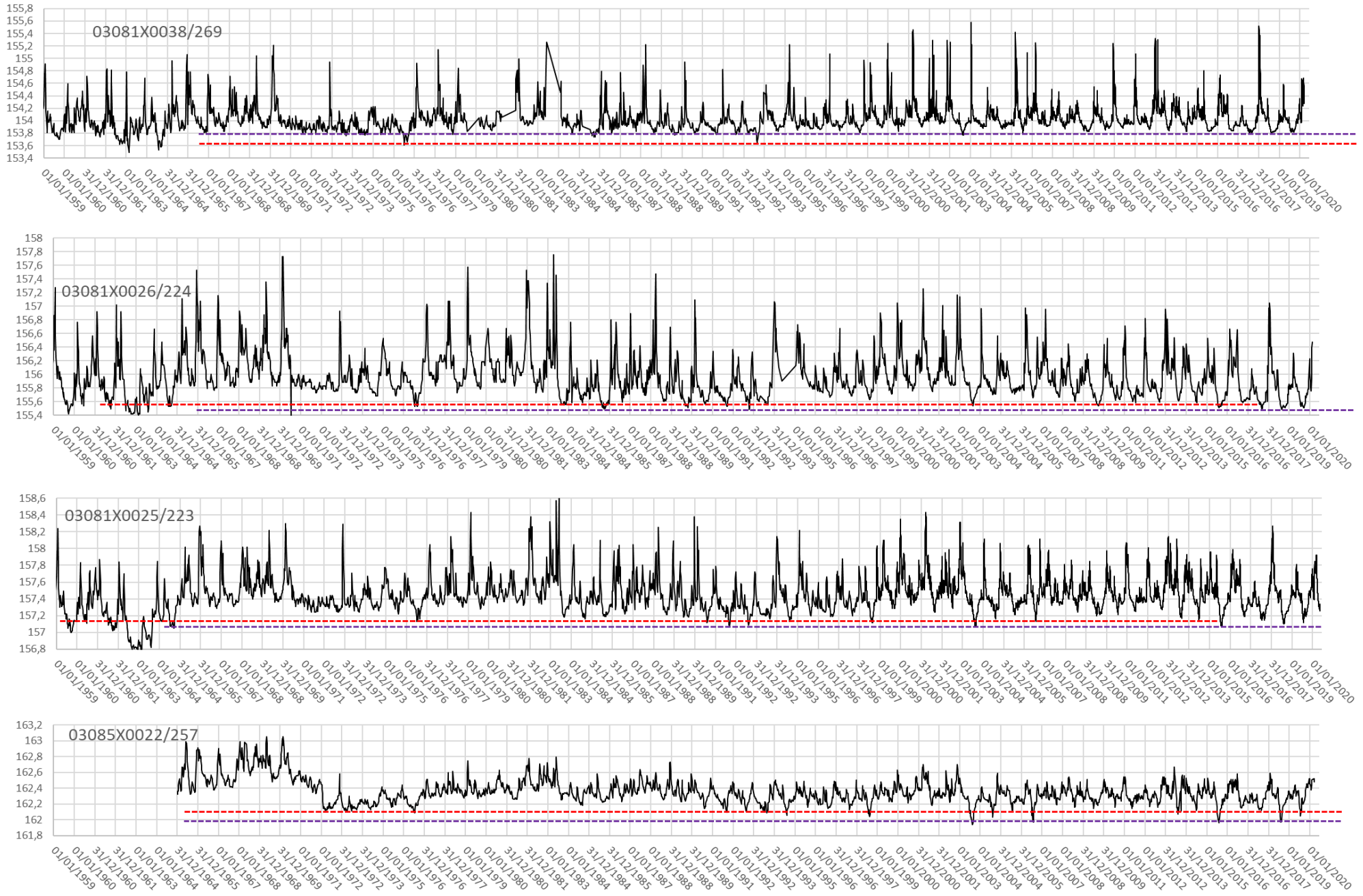
Le comportement est identique entre les deux zones. Il n'y a pas de raison d'exclure.

Même comportement que pour l'ensemble de la zone, pas de différence justifiant d'isoler cette partie.

Annexe 5

Chroniques piézométriques sur 50 ans


03423X0017/209C
03424X0026/247
03423X0056/100
03424X0029/203
Minima des 5 dernières années
Minima historique (1976 ou antérieur)


03081X0038/269
03081X0026/224
03081X0025/223
03085X0022/257

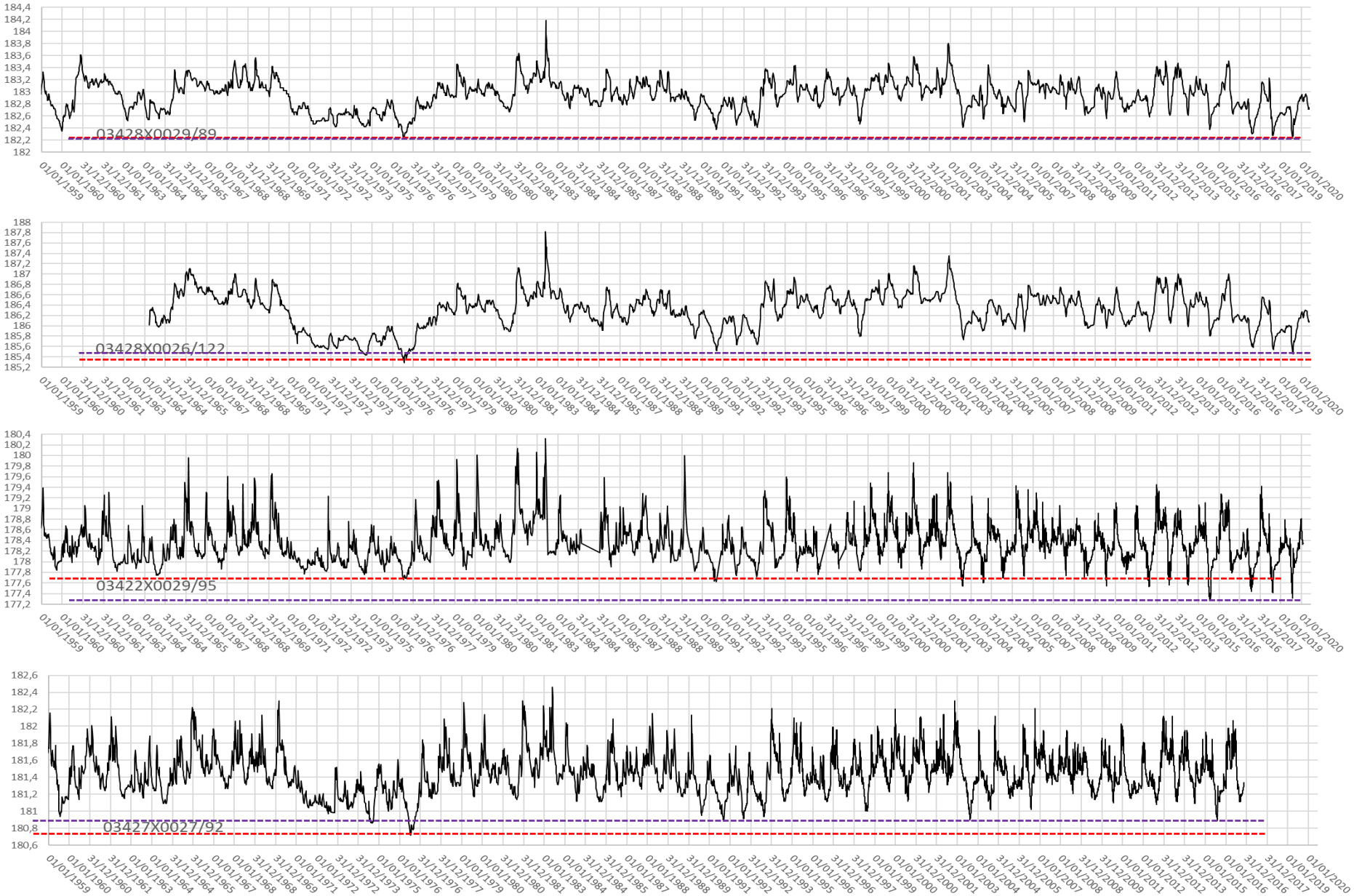


Figure 97: Choniques piézométriques historiques retraçant l'évolution de la nappe d'Alsace sur le Grand Ried

Annexe 6

Carte de la réserve utile et besoin en eau des cultures

Estimation du besoin en eau des cultures

Le tableau ci-dessous est construit avec 2 entrées :

- les sols via la RU
- les cultures avec leur période d'irrigation

Décembre 2019

Les besoins en eau des cultures sont présentés par une donnée de volume sur la saison et une notion de pilotage.

Le besoin en eau des cultures sur la période est une estimation réaliste au vu des dernières années qui sont représentatives d'années sèches. Cette valeur varie en fonction de l'année (pluviométrie). Pour les années humides (par exemple pour les années 2011 et 2012), les quantités d'irrigation pendant l'été ont été divisées par 3 ou 4 (pluviométrie plus forte).

Les règles de pilotages présentées dans le tableau ci-dessous se déclenchent quand la RU est vide (fonction du type de sols), et s'interrompent dès lors qu'il y a de la pluie (minimum 5 mm). L'irrigation reprend quand la RU est à nouveau vide. La durée d'interruption est variable et fonction de la quantité de pluie, de la météo du moment (ETP et prévions de pluies), du stade et du type de culture.

Attention, il faut aussir prendre en compte la nappe proche de la surface et les remontées de nappe (surtout dans le Ried). Dans le cas d'une RU faible, le besoin en eau est largement surestimé dans le tableau. Ces éléments seront à considérer pour la classification des sols. (cf travaux de l'ARAA). A titre d'exemple sur le secteur du Riedbrunnen un tour d'eau est suffisant pour la campagne maïs (pour une RU de 100 mm).

L'ensemble des données ci-dessous sont des estimations avec une variabilité : météo, culture, équipement matériel de l'agriculteur….

		Culture	Maïs	Soja	Betterave	Céréales à paille	Légumes plein champs (Chou)	Pomme de terre	Maraichage	Prairie	Colza
		Période	**15/06 au 31/08**	**15/06 au 31/08**	**15/06 au 31/08**	**01/05 au 31/05**	**10/07 au 20/08**	**01/05 au 30/06**	**01/07 au 31/08**		
RU	**Faible (<60 mm)**	**Volume total sur la période (variable selon la pluviométrie de l'année)**	200 mm	180 mm	200 mm	90 mm	Pas implantés dans ces sols	Pas implantée dans ces sols	180 mm	0	0
		Règle de pilotage : quand RU vide et si pas de pluie	30 mm pour 7 jours	30 mm pour 8 jours	30 mm pour 7 jours	30 mm pour 10 jours	Pas implantés dans ces sols	Pas implantée dans ces sols	3 mm par jour	0	0
	Moyenne (60 - 100 mm)	**Volume total sur la période (variable selon la pluviométrie de l'année)**	150 mm	120 mm	150 mm	0 à 30 mm	90 mm	90 mm	180 mm	0	0
		Règle de pilotage : quand RU vide et si pas de pluie	30 mm pour 10 jours	30 mm tous les 12 jours	30 mm tous les 12 jours	0 à 30 mm par mois	30 mm pour 15 jours	30 mm pour 15 jours	3 mm par jour	0	0
	Forte (100 -150 mm)	**Volume total sur la période (variable selon la pluviométrie de l'année)**	60 mm	0 mm	0 mm	0 mm	60 mm	60 mm	180 mm	0	0
		Règle de pilotage : quand RU vide et si pas de pluie	0 à 30 mm par mois	0 à 30 mm par mois	0	0	30 mm pour 20 jours	30 mm pour 20 jours	3 mm par jour	0	0
	Très Forte (>150 mm)	**Volume total sur la période (variable selon la pluviométrie de l'année)**	0 mm	0 mm	0 mm	0 mm	60 mm	60 mm	180 mm	0	0
		Règle de pilotage : quand RU vide et si pas de pluie	0	0	0	0	30 mm pour 20 jours	30 mm pour 20 jours	3 mm par jour	0	0

Classe dominante de Réservoir Utile en eau (RU), sans prise en compte des remontées capillaires, pondéré par l'hydromorphie par unité cartographique de sol

Note d'accompagnement

Cette carte est le produit de l'exploitation de la base de données régionale des sols d'Alsace et des guides des sols d'Alsace établis avec une précision de l'ordre du 1/100 000. De premiers traitements de données pour estimer le RU sans prise en compte des remontées capillaires ont été réalisés dans le cadre du projet MoNit en 2004. En 2011 pour un projet à la demande de l'AERM, les estimations de RU ont été reprises, avec des ajustements sur les profondeurs d'enracinement.

1. Caractéristiques de sols prises en compte

1.1. Définition du réservoir utile en eau (RU)

Le réservoir utile (RU) est à prendre au sens : Part accessible aux plantes du volume de porosité pouvant contenir durablement de l'eau. C'est une caractéristique relativement permanente d'un horizon ou d'un type de sol. Elle est exprimée sous forme d'une lame d'eau indépendante de la surface considérée (en mm d'eau). Elle correspond à la teneur en eau comprise entre les valeurs de la capacité au champ et du point de flétrissement.
En particulier cette estimation de la réserve utile ne prend pas en compte les remontées capillaires qui, en zone de remontées de nappe, peuvent considérablement accroître la quantité d'eau accessible aux plantes.

La plage des valeurs des réserves utiles rencontrées en Alsace est vaste ; allant de 30 mm pour les sols les plus superficiels et sableux, à plus de 250 mm pour les sols les plus profonds et de texture équilibrée.

1.2. Prise en compte de la profondeur d'enracinement

En considérant le RU comme « part accessible aux plantes » du volume de porosité pouvant contenir durablement de l'eau, le critère « profondeur d'enracinement » des cultures joue un rôle très important. La profondeur sur laquelle le RU est calculé est fonction de cette profondeur d'enracinement. Ainsi, des conditions limitant fortement l'enracinement d'une culture limiteront par la même occasion le niveau de RU. Le RU présenté est celui qui intéresse les terres labourées. Une hypothèse a ainsi été retenue pour ce travail ; à savoir pour les sols présentant une forte hydromorphie (en bordure de cours d'eau ou dans les Rieds hydromorphes) le RU est plafonné à 120 ou 160 mm du fait d'un enracinement limité des cultures.

Dans les démarches de calculs de besoins en eau, cette hypothèse doublée du fait que des remontées capillaires sont possibles lorsque le toit de la nappe phréatique est peu profond conduisent à une proposition de pondération du RU (cf plus bas) pour mieux estimer l'eau disponible pour les cultures.

2. Validité des RU représentées

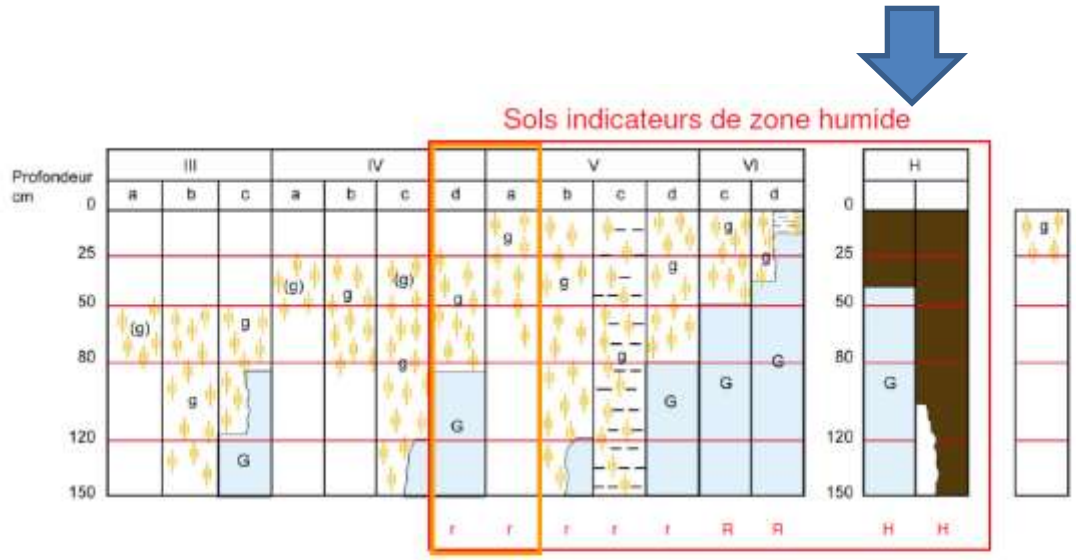
La description des sols est complexe car ils correspondent à un milieu parfois très hétérogène. Il est important de garder à l'esprit que la carte n'est qu'une représentation statistique de la réalité et que localement elle peut présenter des écarts par rapport aux caractéristiques réelles de terrain. En effet, n'est représentée sur la carte que la classe de RU dominante d'une unité cartographique de sol. Dans certaines situations, en particulier dans certains sols alluviaux, l'hétérogénéité des sols est telle qu'il est impossible de la représenter au 1/100 000. Dans ce cas une unité cartographique de sol (UC) est composée de plusieurs types de sols aux caractéristiques parfois contrastées.
Pour caractériser le niveau de confiance qui peut être attribué à la classe de RU affichée pour chaque unité cartographique de sol, une valeur de pureté est associée. Cette pureté représente le % de surface de l'unité cartographique de sol pour laquelle on peut considérer que la valeur de RU affichée est fiable, elle traduit l'hétérogénéité des sols et donc la prudence avec laquelle il faut considérer les valeurs de RU affichées.

Les classes de RU retenues sont celles en entrée du tableau de besoin en eau des cultures élaboré par la Ca Alsace (décembre 2019)

RU faible (< 60 mm)
RU Moyen [60 -100 mm[
RU fort [100- 150 mm[
RU très fort >= 150 mm

3. Pondération du RU par l'hydromorphie pour approcher l'eau disponible pour les plantes

En l'absence de modèle précis pour estimer les remontés capillaires, l'hypothèse proposée avec CA Alsace est de d'augmenter le RU d'une classe dans les sols marqués fortement par une présence d'eau mobilisable par les plantes, en l'occurrence pour les sols de classe GEPPA H (Histosols parmi lesquels se trouvent notamment les sols de Ried Noir de plaine Centre Alsace), avec un engorgement prononcé et très proche de la surface, sur lesquels l'irrigation est absente ou très peu présente.



Morphologie des sols correspondant à des "zones humides" (ZH)

(g)	caractère rédoxique peu marqué	(pseudogley peu marqué)
g	caractère rédoxique marqué	(pseudogley marqué)
G	horizon réductique	(gley)
H	Histosols	R Réductisols
r	Rédoxisols (rattachements simples et rattachements doubles)	

d'après Classes d'hydromorphie du Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA, 1981)

4. Perspectives d'amélioration.

Des améliorations des modèles d'estimation de RU ont été obtenues ces dernières années (voir notamment projet ANR RuEdesSols 2015-2019, qui vise à proposer des méthodologies interdisciplinaires d'estimation du RU c'est-à-dire de la quantité d'eau maximale utilisable par telle ou telle plante dans tel ou tel sol). Il serait intéressant de les tester pour les intégrer dans une future approche cartographique révisée du RU des sols du secteur.

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE GRAND EST

AGRICULTURES & TERRITOIRES
CHAMBRE D'AGRICULTURE ALSACE

Annexe 7

Essais de pompage : données brutes et interprétations

1) Site du Riedbrunnen

2) Site de Muttersholtz

Site du Riedbrunnen : pz1

Données

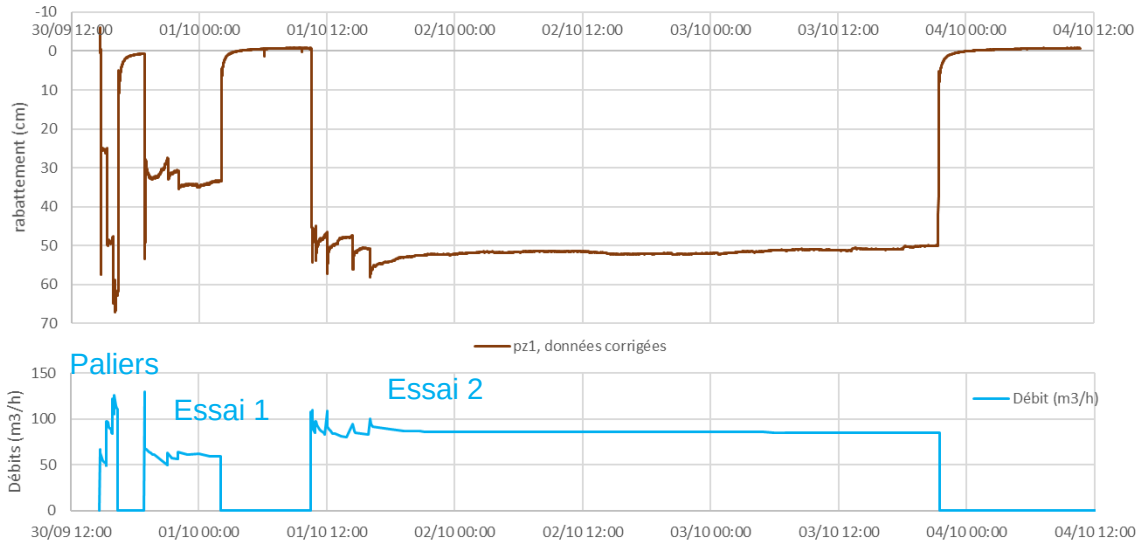


Figure 98 : Rabattement sur le piézomètre 1 durant les différentes phases d'essais. Données non corrigées des variations journalières

Interprétation et observations

Le piézomètre 1 est marqué par les « effets de puits » du fait de sa proximité immédiate avec l'ouvrage.

L'interprétation des paramètres hydrodynamiques n'a donc pas été réalisé sur cet ouvrage.

Site du Riedbrunnen : pz2

Données

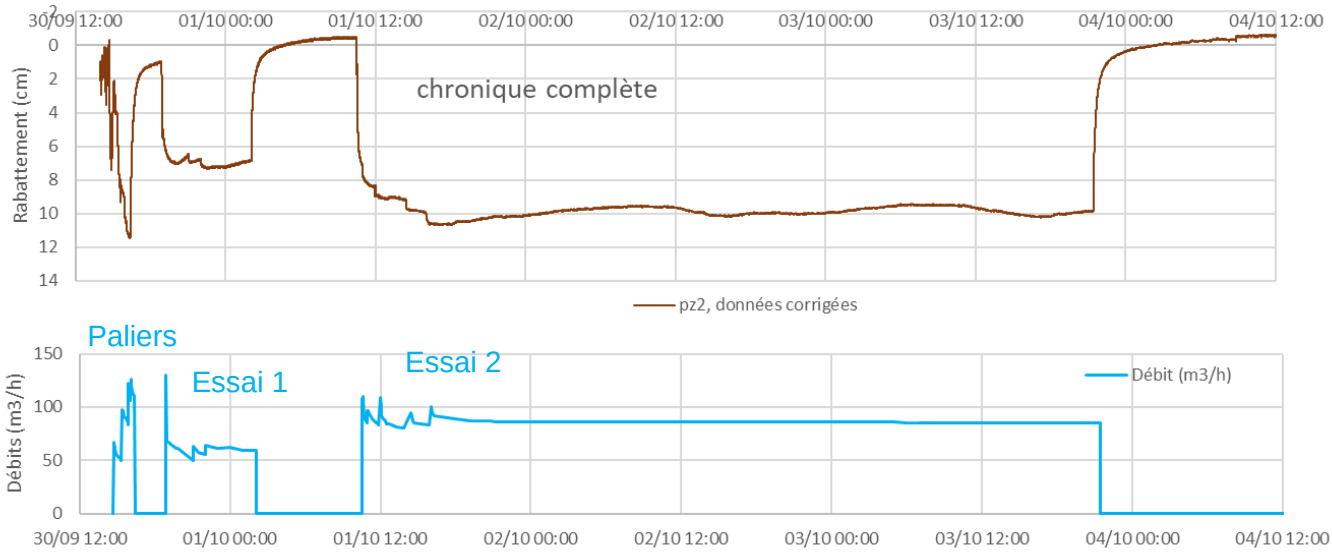


Figure 99 : Rabattement sur le piézomètre 2 durant les différentes phases d'essais. Données non corrigées des variations journalières

Interprétation et observations

L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2, en conservant les variations journalières dans les données de rabattement. Les techniques de dérivées ne sont pas utilisées, les variations journalières influençant trop fortement la courbe. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP.

La première partie de l'essai est difficile à reproduire en raison des variations de débit.

Les résultats les plus satisfaisant sont obtenues via deux solutions pour un même ordre de grandeur de transmissivité (0,12 à 0,2 m^2/s) :

- Un modèle de Theis avec limite à potentiel imposé à 200 / 250 mètres avec un coefficient d'emmagasinnement proche de $4x10^{-2}$
- Modèle de Theis avec limite à potentiel imposé à 1300 mètres avec un coefficient d'emmagasinement proche de $2x10^{-3}$

La deuxième solution semble la plus probable au vu du comportement très réactif à la remontée du niveau piézométrique. La limite serait dans ce cas attribuée à l'Ill et non au Riedbrunnen se situant à proximité immédiate du forage. Ce résultat impliquerait en première interprétation une faible importance du Riedbrunnen à côté de l'effet de l'Ill. Toutefois, la notion de distance doit être interprétée avec précaution, la distance calculée pouvant être une distance perçue hydrodynamiquement et non une distance réelle.

Site du Riedbrunnen : pz3

Données

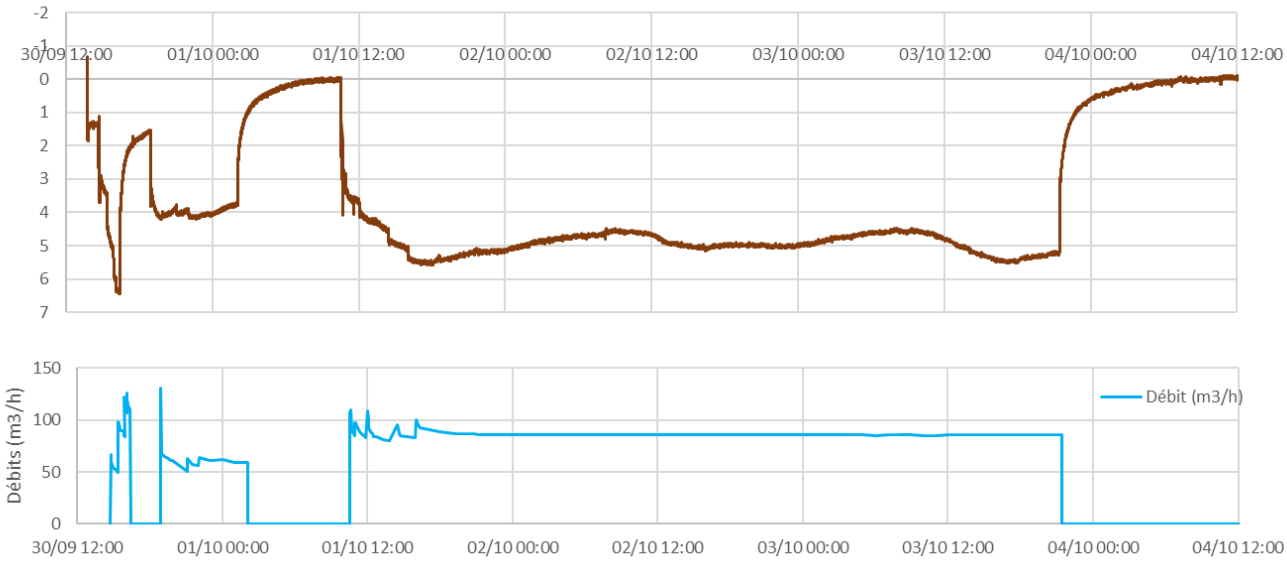


Figure 100 : Rabattement sur le piézomètre 3 durant les différentes phases d'essais. Données corrigées de la piézométrie générale sans prise en compte des variations journalières,

Interprétation et observations

L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2, en conservant les variations journalières dans les données de rabattement. Les techniques de dérivées ne sont pas utilisées, les variations journalières influençant trop fortement la courbe. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP. La première partie de l'essai est difficile à reproduire en raison des variations de débit.

Les résultats les plus satisfaisant sont obtenues via le modèle de Theis avec le jeu de pramaètres suivant :

- Transmissivité 0,2 m^2/s
- Limite à potentiel imposé à 600 /800 mètres avec un coefficient d'emmagasinnement compris entre $2x10^{-3}$ et $4,7x10^{-3}$

Contrairement à l'interprétation sur le piézomètre 2, la solution utilisant un coefficient d'emmagasinement proche d'une nappe libre ne permet pas de reproduire le comportement observé. **On retiendra donc le paramètre semi captif pour le coefficient d'emmagasinement.**

La limite à potentiel imposée est perçue à une distance inférieure à celle perçue sur le piézomètre 2, pour une distance réelle au Riedbrunnen et à l'Ill équivalente, soit 600 / 800 m pour pz3 contre 1300 mètres pour pz2.

Site du Riedbrunnen : pz4

Données

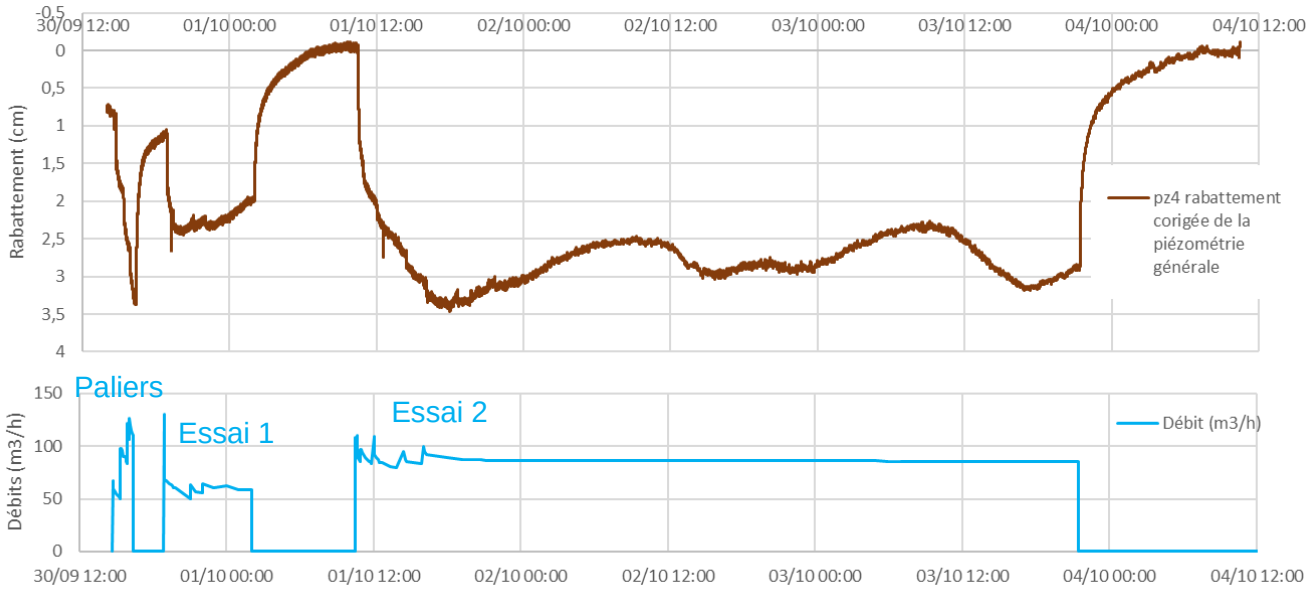


Figure 101 : Rabattement sur le piézomètre 4 durant les différentes phases d'essais. Données non corrigées des variations journalières

Interprétation et observations

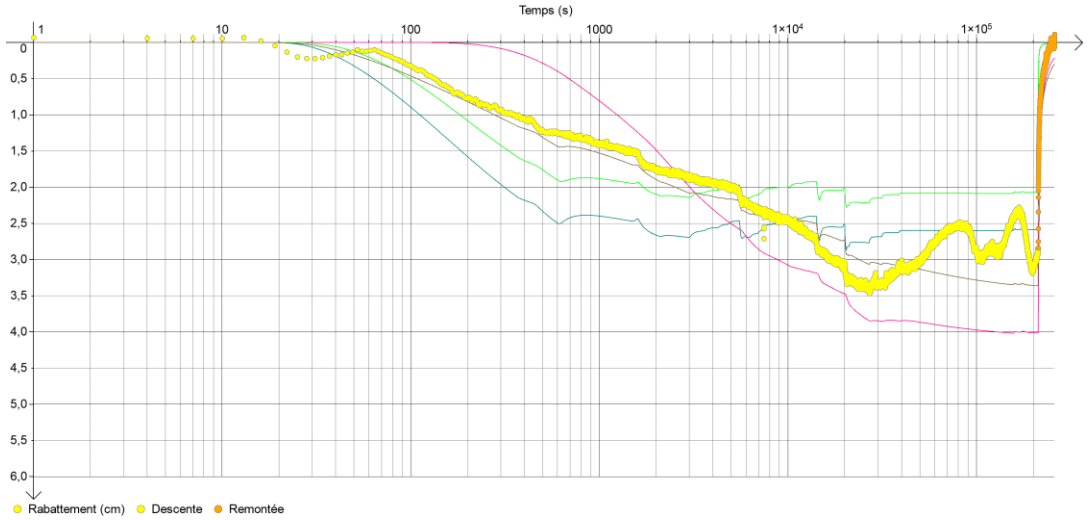
L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2, en conservant les variations journalières dans les données de rabattement. Les techniques de dérivées ne sont pas utilisées, les variations journalières influençant trop fortement la courbe. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP. La première partie de l'essai est difficile à reproduire en raison des variations de débit.

Les résultats les plus satisfaisant sont obtenues via le modèle de Theis avec le jeu de pramaètres suivant :

- Transmissivité 0,4 m^2/s, soit supérieure aux paramètres retenus sur les autres piézomètres.
- Limite à potentiel imposé à 1000 mètres avec un coefficient d'emmagasinnement compris entre $4x10^{-3}$ et $5x10^{-3}$

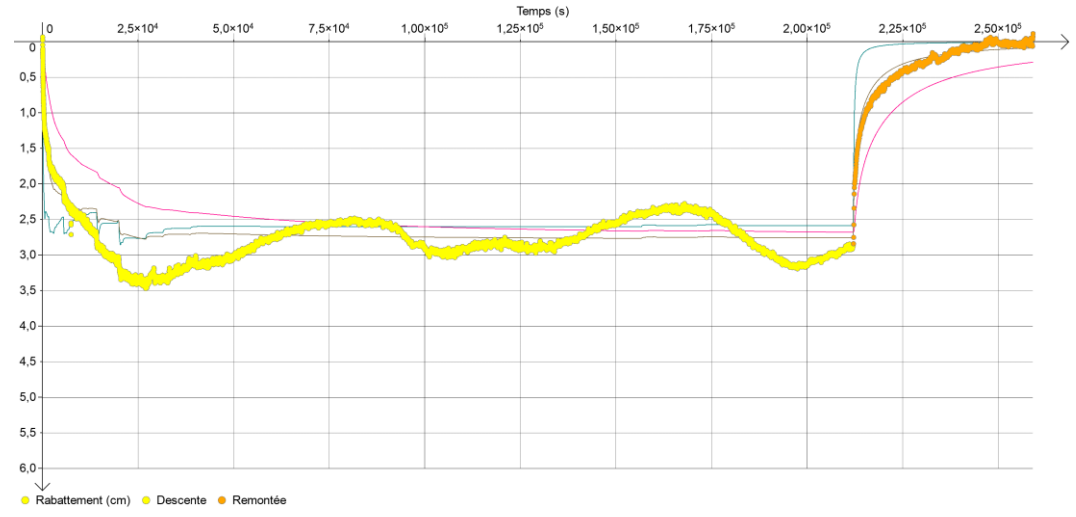
L'augmentation de la transmissivité en allant vers la rivière du Riedbrunnen irait dans le sens d'une connexion forte vers celui-ci.

Contrairement à l'interprétation sur le piézomètre 2, la solution utilisant un coefficient d'emmagasinement proche d'une nappe libre ne permet pas de reproduire le comportement observé.



0,705	☑	Theis	2,00E-1	2,60E-3	100,00	246,90		0
-0,0567	☑	Theis	1,29E-1	4,76E-2	80,00	200,00		0
0,428	☑	Theis	2,00E-1	4,37E-3	100,00	200,00	1000,00	0
0,771	☑	Theis	4,00E-1	5,00E-3	100,00			

Figure 102 : Calage de la transmisisvité sur la première partie de l'essai en graphique semi log sur le piézomètre 4



0,705	☑	Theis	2,00E-1	2,60E-3	100,00	246,90		0
0,451	☑	Theis	3,00E-1	4,76E-2	100,00	500,00		0
0,908	☑	Theis	4,00E-1	5,00E-3	100,00	1000,00		0

Figure 103 : Calage de la remontée sur la deuxième partie de l'essai sur le piézomètre 4

Pz5

Données

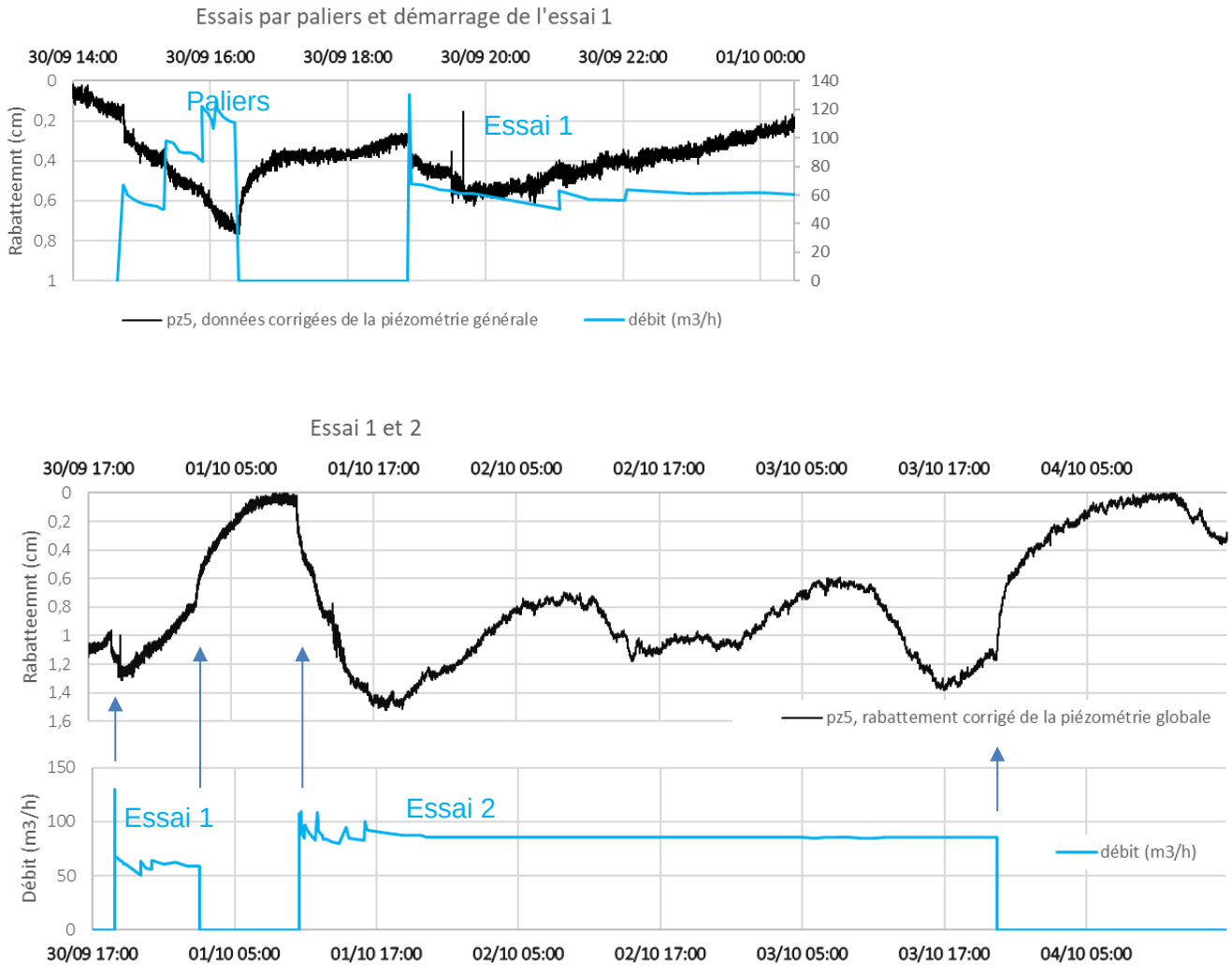


Figure 104 : Rabattement sur le piézomètre 5 durant les différentes phases d'essais. Données non corrigées des varaitions journalières.

Interprétation et observations

Les niveaux piézométriques sur pz5 ont été interprétés très sommairement via :

- Une observation des courbes sans interprétation des paramètres hydrodynamiques en raison de la distorsion trop forte du signal par les variations journalières masquant les effets de limites ou de l'apparition des échanges nappes rivières ;
- Une comparaison des ordres de grandeurs mesurées en terme de temps d'arrivée de la limite à potentiel imposé et du rabattement à des simulations utilisant les paramètres obtenues sur les autres piézomètres.

SIte du Riedbrunnen : Hauteurs d'eau en rivières

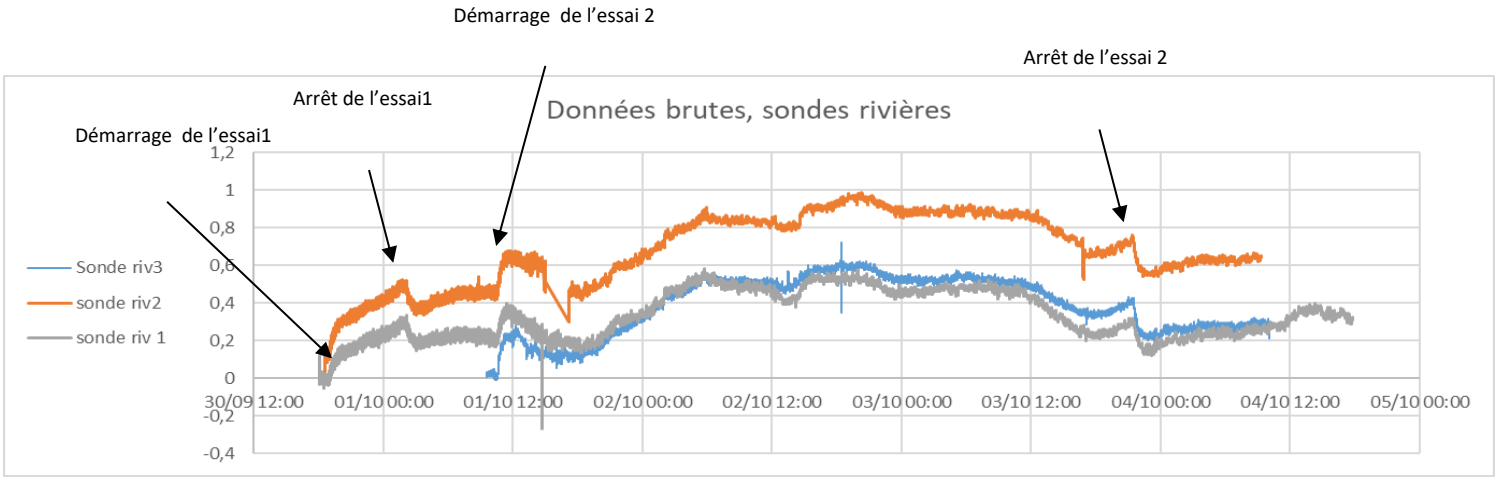


Figure 105 : hauteurs d'eau mesurées en rivières : influence du rejet en aval

Site de Muttersholtz : puits

Données

Les attaches des sondes piézométriques dans les puits incendies étant très sensibles à tout mouvement, des artefacts sont présents sur la courbe. Le travail de recalage de chaque courbe étant fastidieux et chronophage, seules les parties nécessaires à l'interprétation des paramètres hydrodynamiques ont été traités.

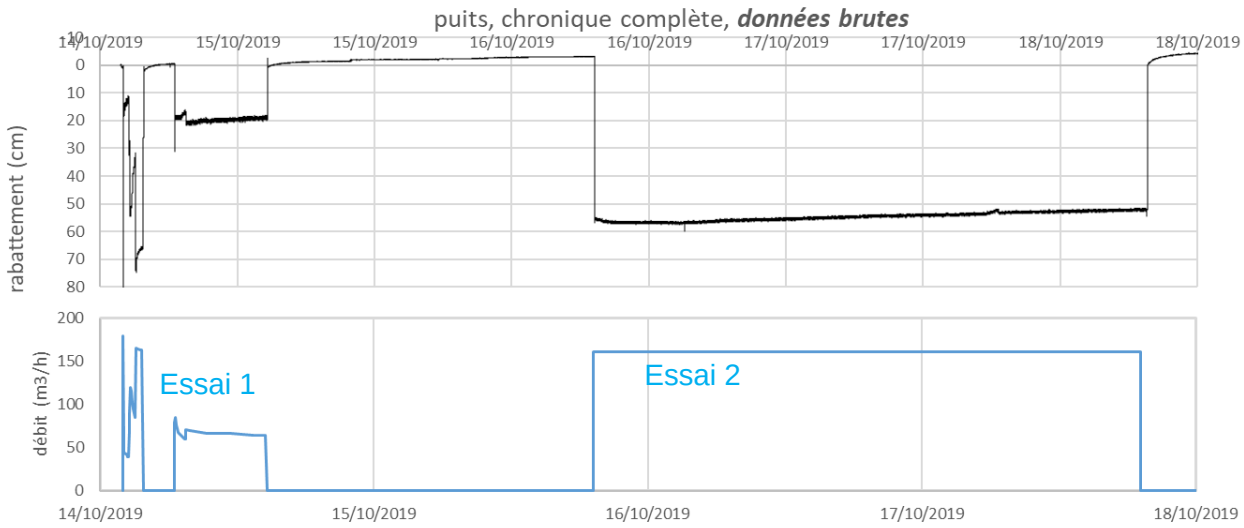


Figure 106 données brutes du rabattement sur le puits de pompage, site de Muttersholtz

Interprétation et observations

Les variations au puits de pompage sont soumises à des pertes de charges masquant le signal recherché pour les paramètres hydrodynamiques. Il n'a pas été exploité en dehors du calage des débits de pompage et des contrôles en continues lors de l'essai.

Site de Muttersholtz : pz1

Données

Les attaches des sondes piézométriques dans les puits incendies étant très sensibles à tout mouvement, des artefacts sont présents sur la courbe. Le travail de recalage de chaque courbe étant fastidieux et chronophage, seules les parties nécessaires à l'interprétation des paramètres hydrodynamiques ont été traités.

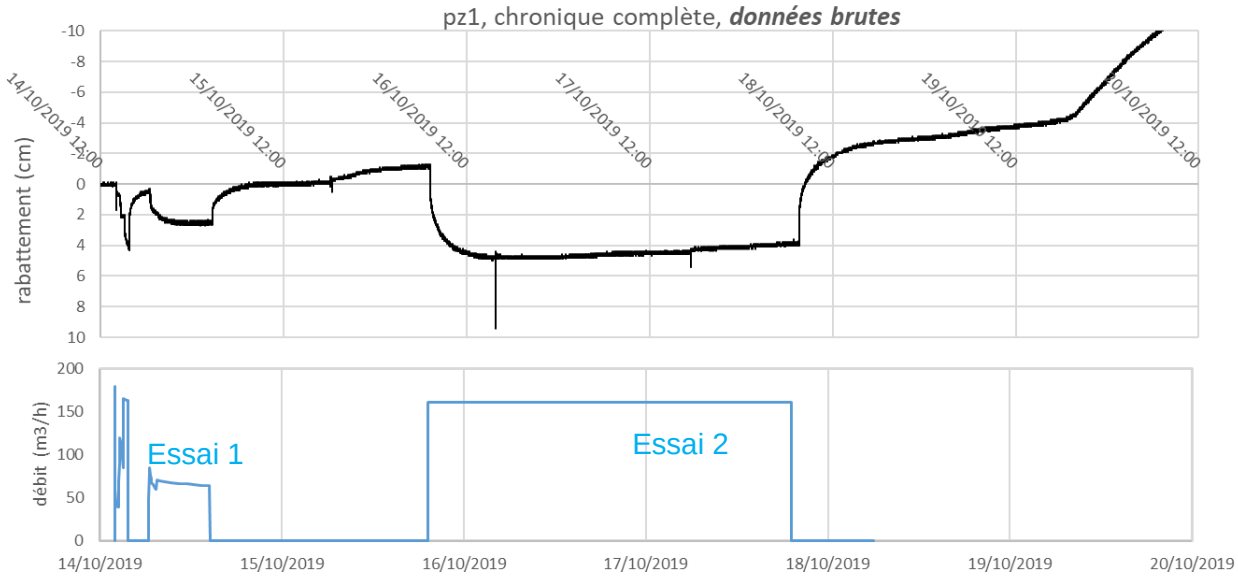


Figure 107 : Données brutes du rabattement sur pz1 durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

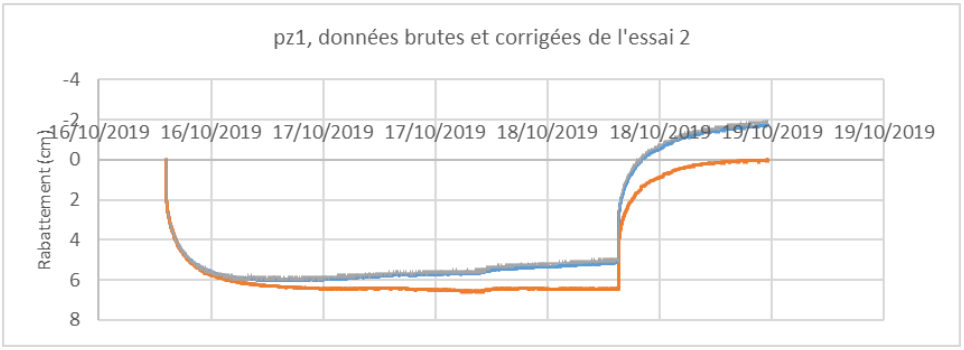


Figure 108 : Données brutes et corrigées du rabattement sur pz1 lors de l'essai 2, site de Muttersholtz

Interprétation et observations

L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP.

Les paramètres indiquent

Site de Muttersholtz : pz3

Données

Les attaches des sondes piézométriques dans les puits incendies étant très sensibles à tout mouvement, des artefacts sont présents sur la courbe. Le travail de recalage de chaque courbe étant fastidieux et chronophage, seules les parties nécessaires à l'interprétation des paramètres hydrodynamiques ont été traités.

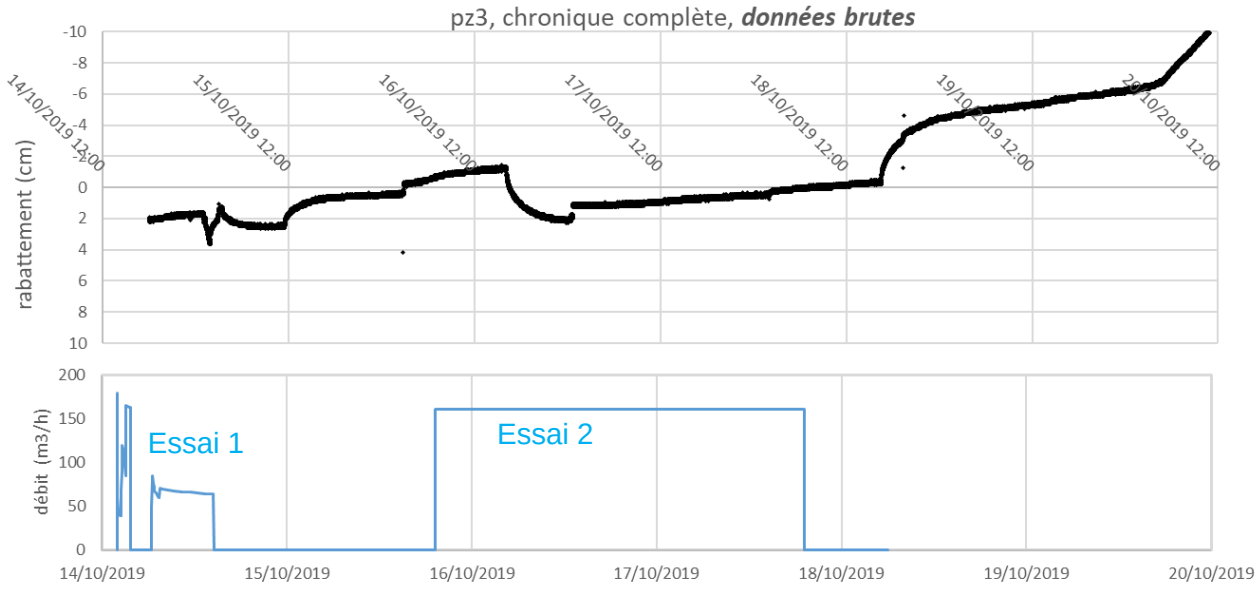


Figure 109 : Données brutes du rabattement sur pz3 durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

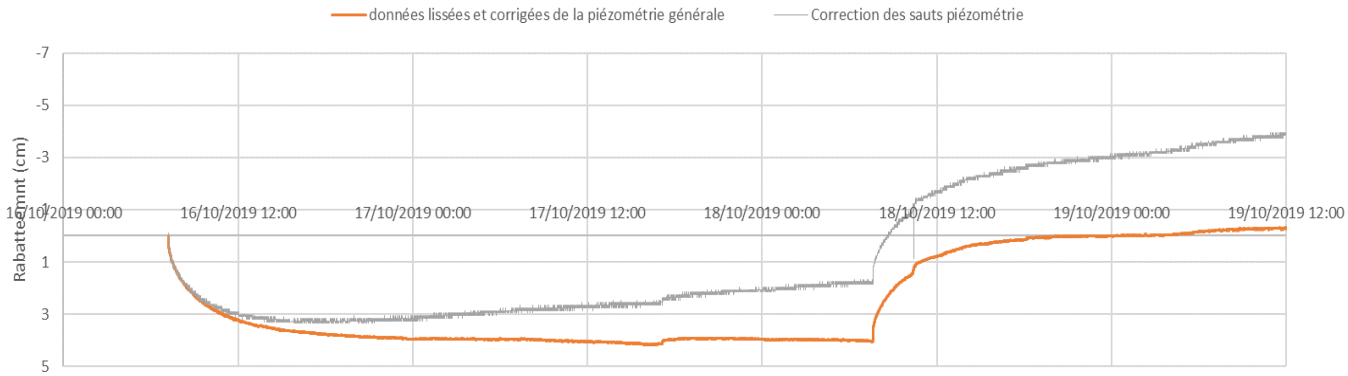


Figure 110 : Données brutes et corrigées du rabattement sur pz3 lors de l'essai 2, site de Muttersholtz

Interprétation et observations

L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP.

Site de Muttersholtz : pz4

Données

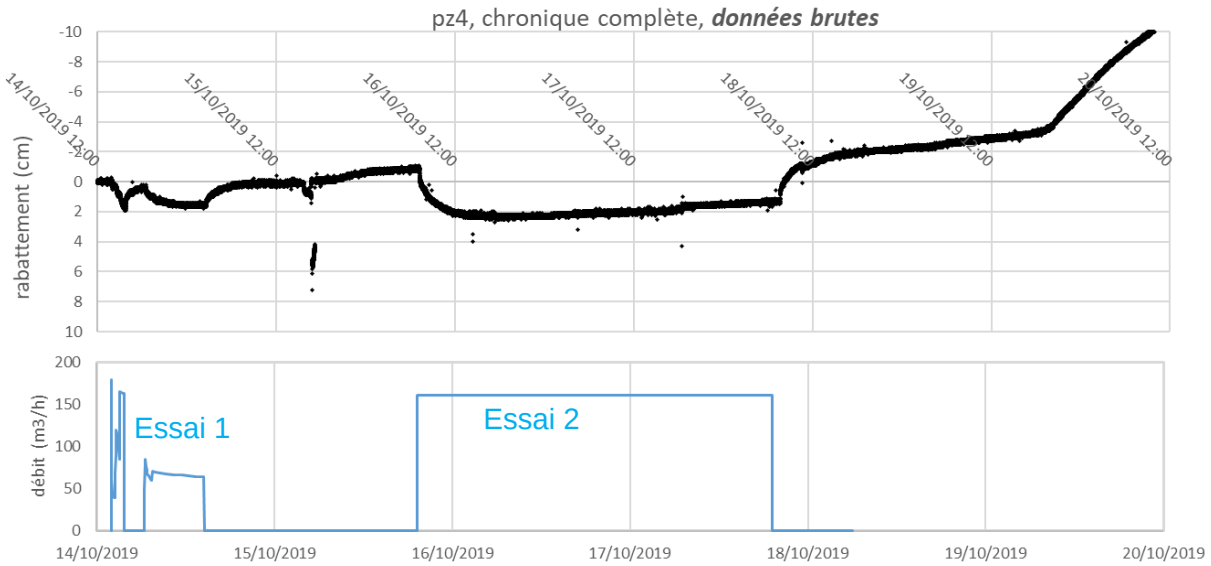


Figure 111 : Données brutes du rabattement sur pz4 durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

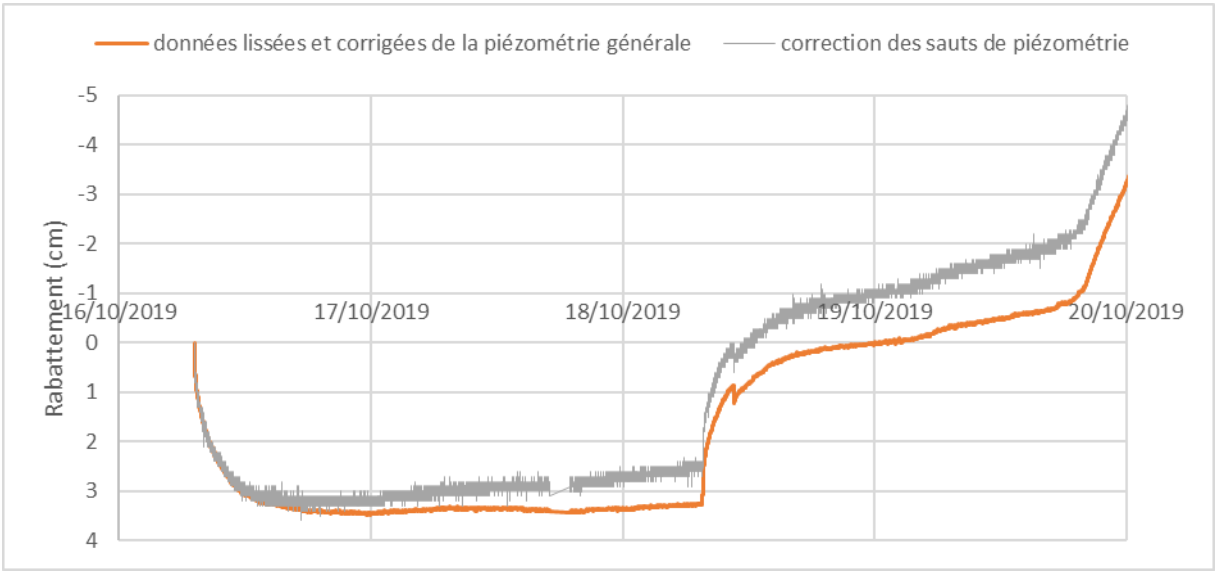


Figure 112 : Données brutes et corrigées du rabattement sur pz4 lors de l'essai 2, site de Muttersholtz

Interprétation et observations

L'interprétation a été réalisé sur l'essai 2. Le calage des paramètres et des modèles a été réalisé sous OUAIP.

Site de Muttersholtz : pz5

Données

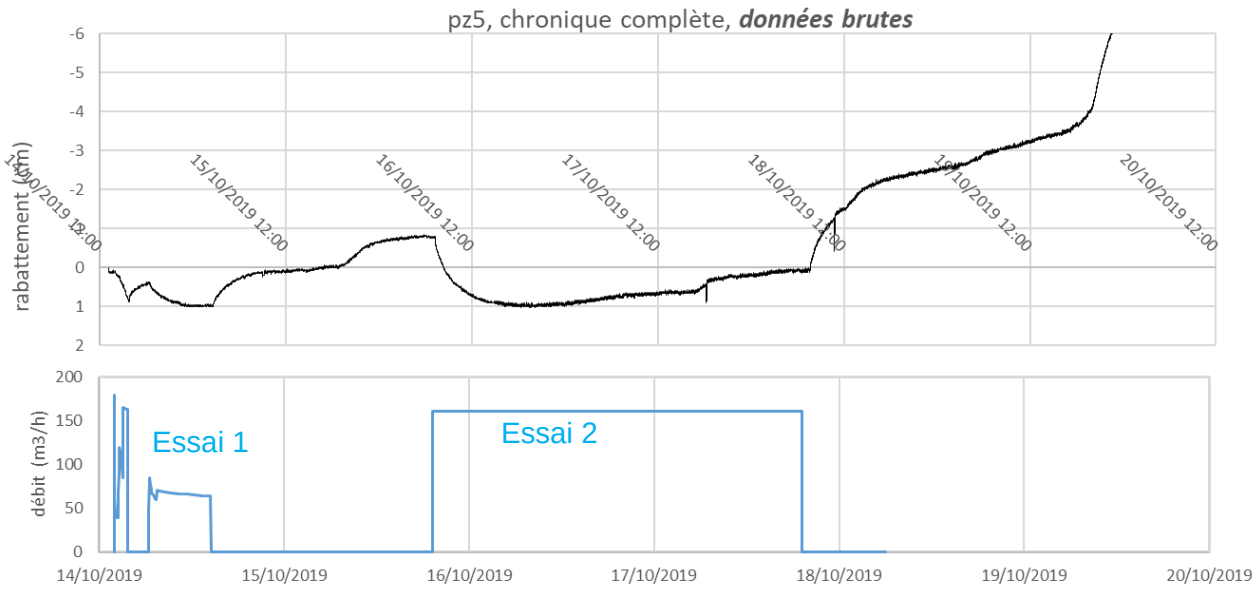


Figure 113 : Données brutes du rabattement sur pz5 durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

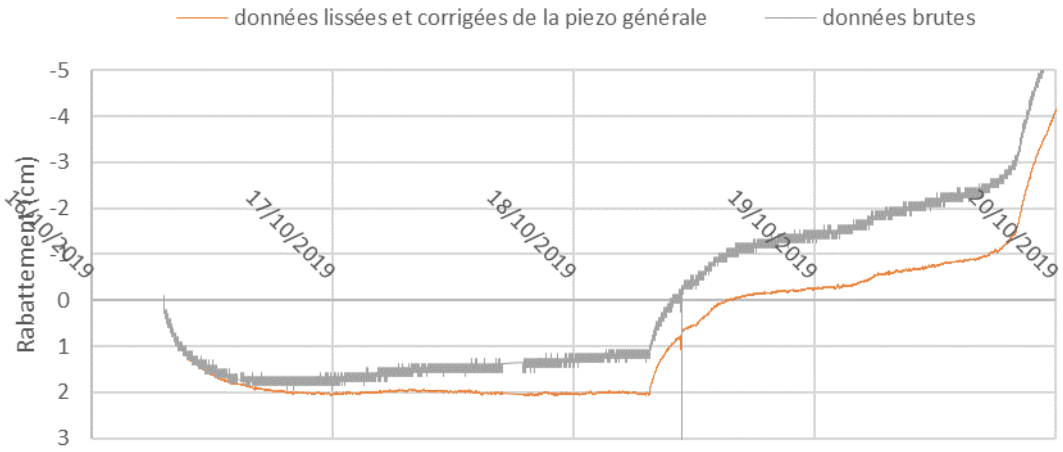


Figure 114 : Données brutes et corrigées du rabattement sur pz5 lors de l'essai 2, site de Muttersholtz

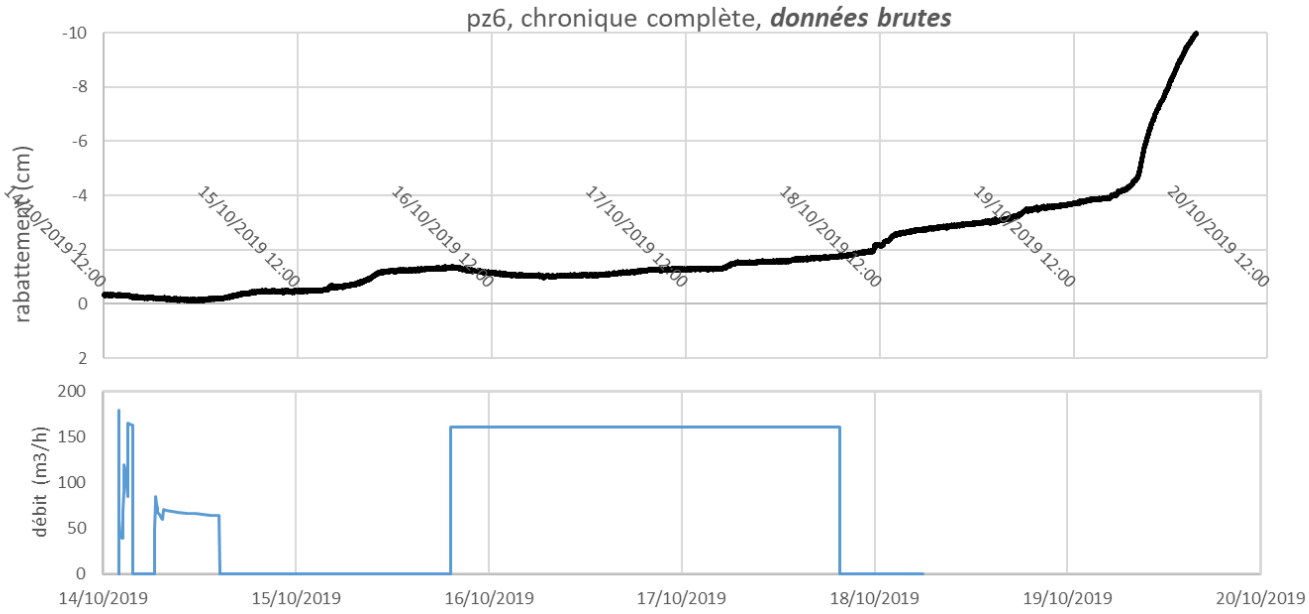
Interprétation et observations

Les niveaux piézométriques sur pz5 ont été interprétés très sommairement via :

- Une observation des courbes sans interprétation fine des paramètres hydrodynamiques en raison d'une incertitude trop forte lié à l'amplitude des variations induites par les précipitations par rapport à l'amplitude globale du rabattement mesuré;
- Une comparaison des ordres de grandeurs mesurées en terme de temps d'arrivée de la limite à potentiel imposé et du rabattement à des simulations utilisant les paramètres obtenues sur les autres piézomètres.

Site de Muttersholtz : pz6

Données



Interprétation et observations

Les variations notées sur la piézométrie sont majoritairement liées aux précipitations. On note :

- Une remontée de la piézométrie lors du déroulement des essais ;
- L'impat des légères précipitations s'étant déroulés durant la période des essais. La piézométrie est donc extrèmement réactive à toute précipitation et en parallèle augmentation de la hauteur d'eau dans les rivières.

Les données ont été utilisées pour discriminer les variations liées à l'essai de pompage et la piézométrie globale en vue d'aider l'interprétation de l'essai 2.

Une légère baisse de la piézométrie est notée peu après le démarrage de l'essai 2. Toutefois, les éléments sont insuffisants pour conclure à un lien certain avec les essais. Cet effet n'a donc pas été retenu lors de l'interprétation globale des pompages d'essais.

Site de Muttersholtz : Hauteurs d'eau en rivières

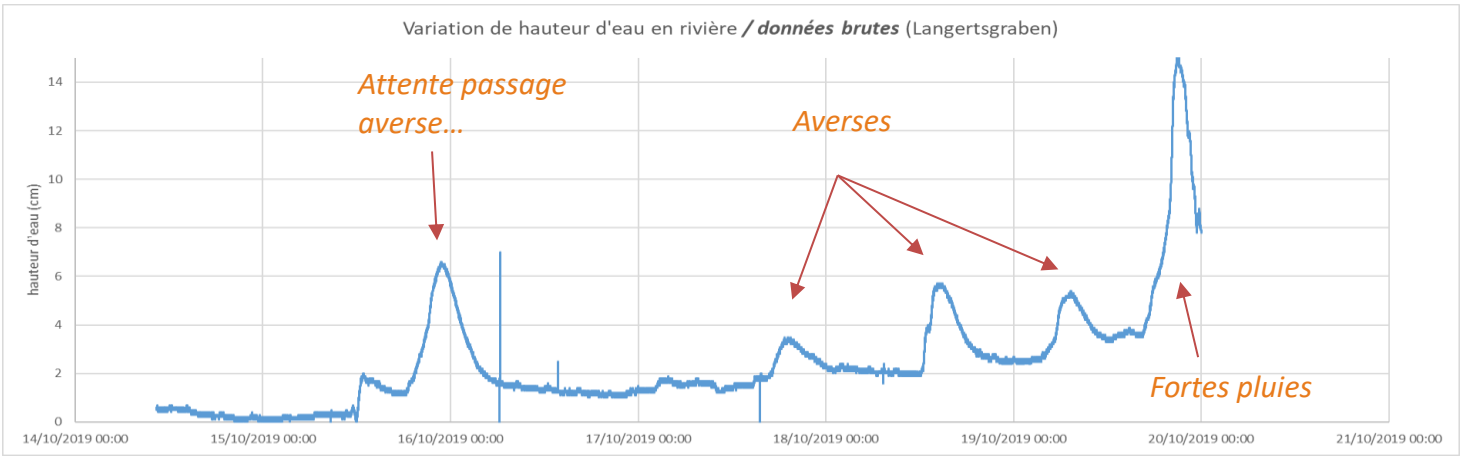


Figure 115 : Données brutes de l'évolution des hauteurs d'eau en rivière durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

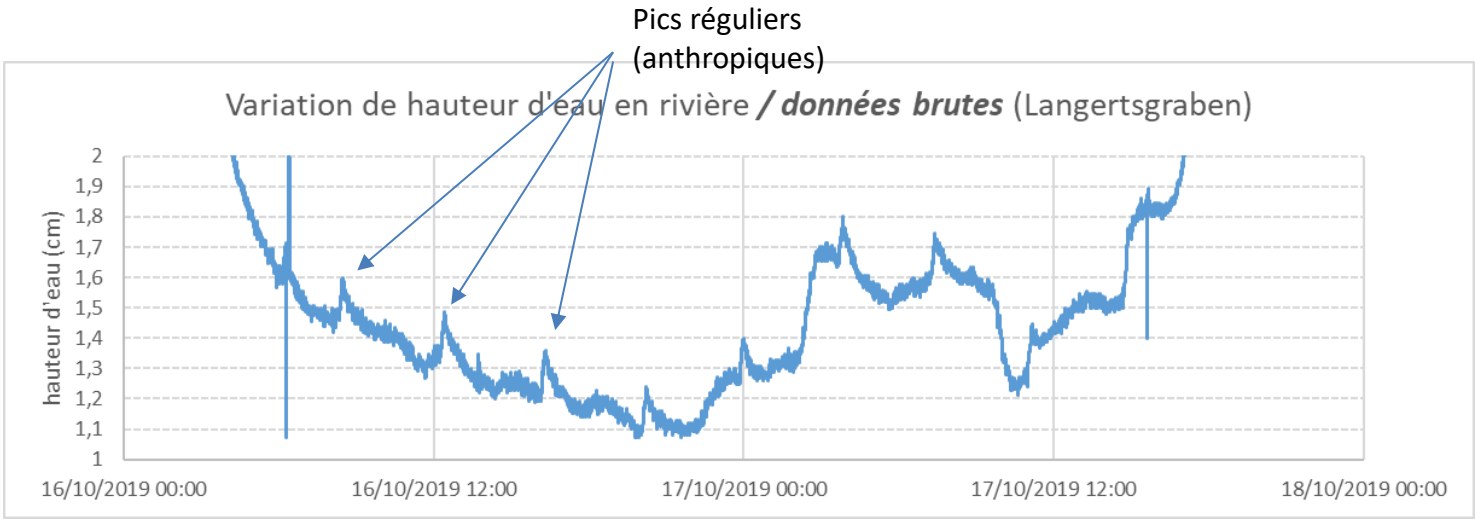


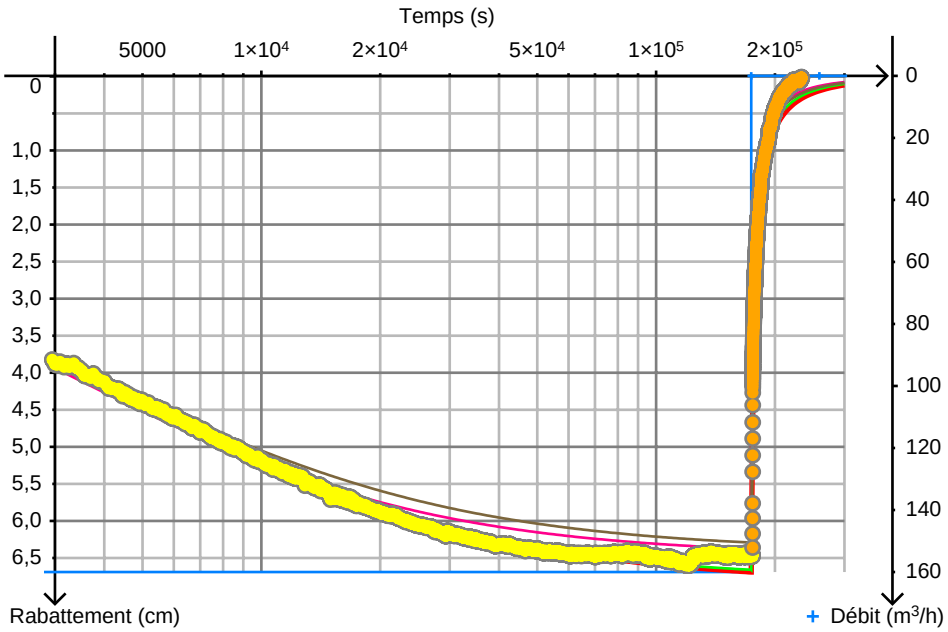
Figure 116 : Zoom sur l'impact anthropique perçue sur l'évolution des hauteurs d'eau en rivière durant l'intégralité des essais, site de Muttersholtz

Annexe 8

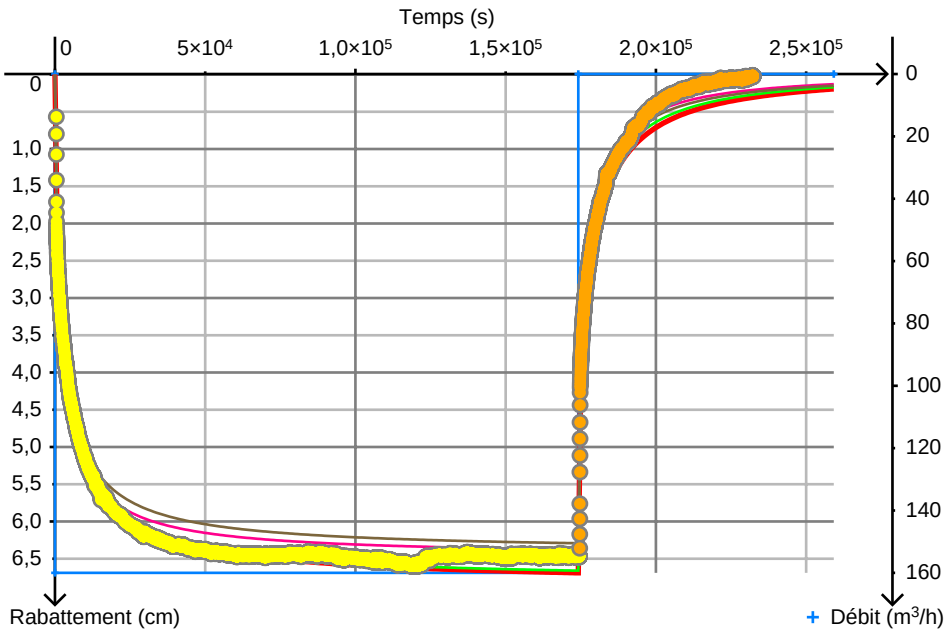
Essais de pompage : fichiers OUAIP

pz1 mutt

Type d'ouvrage	Piézomètre	Rayon d'observation	90 m



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Débit
	Courbe 1
	Courbe 2
	Courbe 3
	Courbe 4



Courbe 1	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}10\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$9{,}00\times10^{-3}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,993 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	900,00 m

Courbe 2	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}00\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$9{,}23\times10^{-3}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,995 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	800,00 m

Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}00\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$9{,}00\times10^{-3}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,995 (-∞..1)

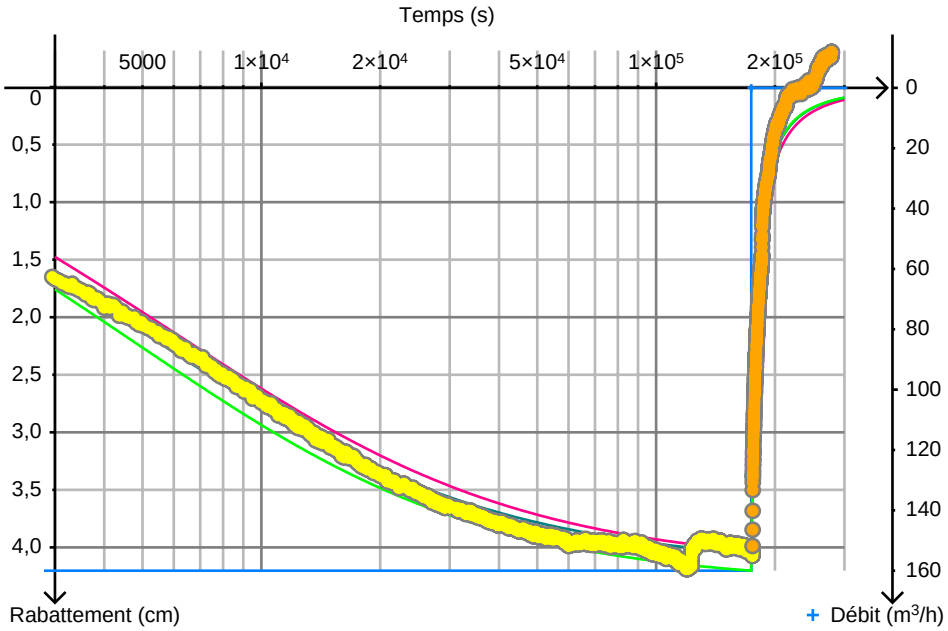
→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	700,00 m

Courbe 4	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}31\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$7{,}72\times10^{-3}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,99 (-∞..1)

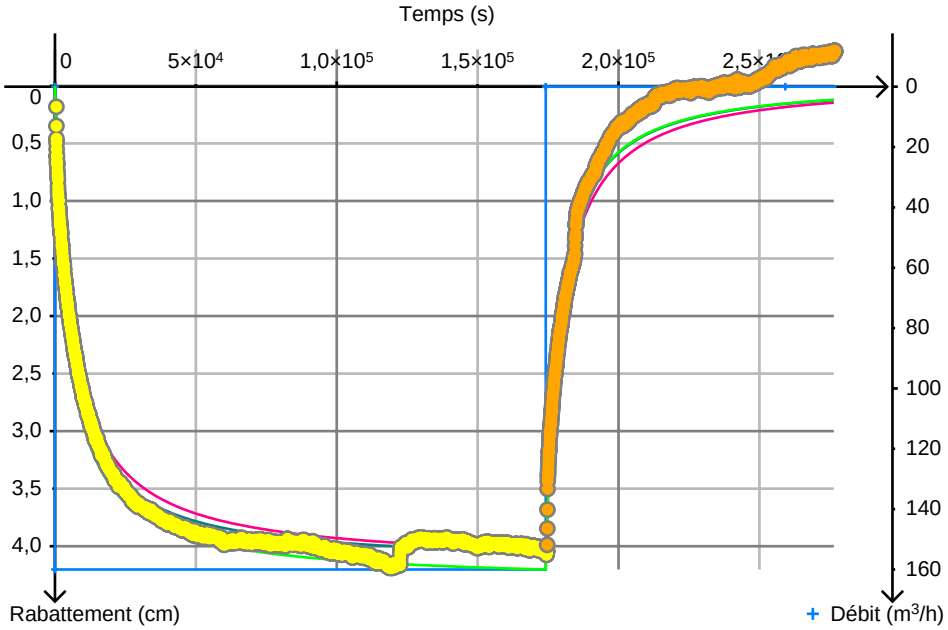
→ **Effet de limites**	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	900,00 m

pz3 mutt

Type d'ouvrage	Piézomètre	Rayon d'observation	100 m



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Débit
	Courbe 2
	Courbe 3
	Courbe 4



Courbe 2	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}30\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$6{,}57\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,985 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 2	Alimentée
Distance à la deuxième limite si présente	400,00 m

Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}30\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$5{,}50\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,99 (-∞..1)

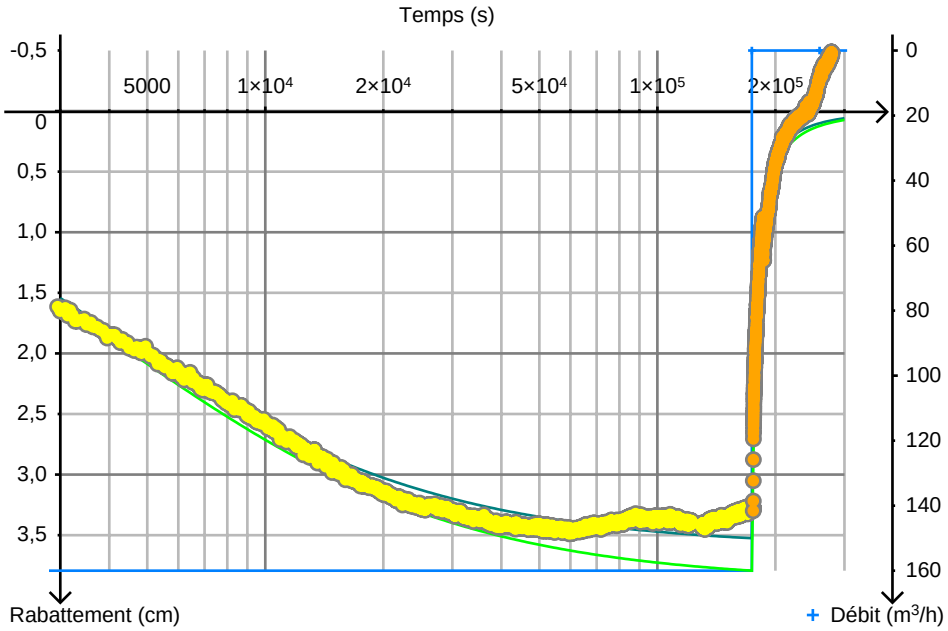
→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 2	Alimentée
Distance à la deuxième limite si présente	400,00 m

Courbe 4	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}19\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$5{,}00\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,987 (-∞..1)

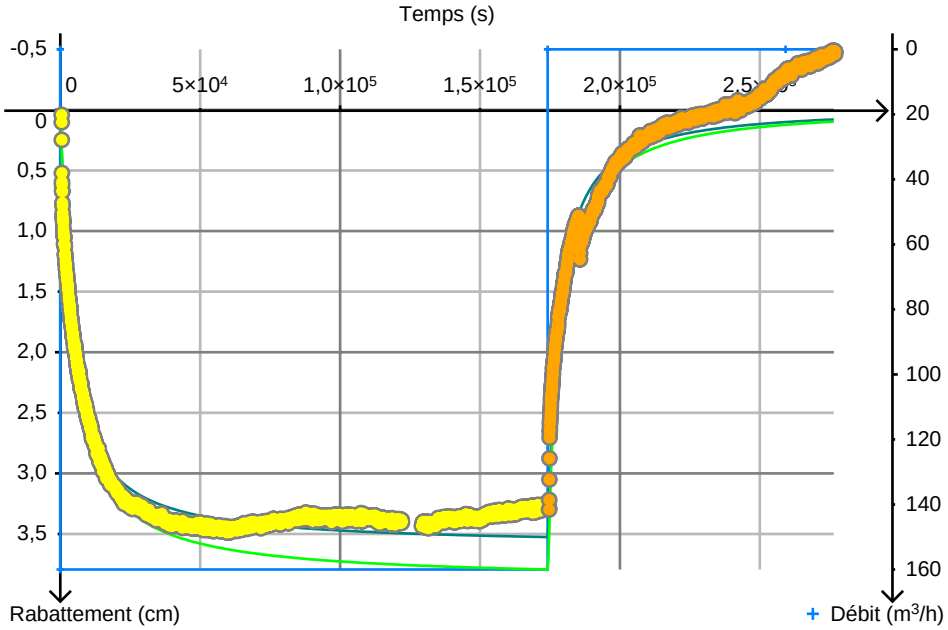
→ **Effet de limites**	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 2	Alimentée
Distance à la deuxième limite si présente	400,00 m

pz4 mutt

Type d'ouvrage	Piézomètre	Rayon d'observation	140 m



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Débit
	Courbe 3
	Courbe 4



Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}20\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$3{,}17\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,984 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	350,00 m

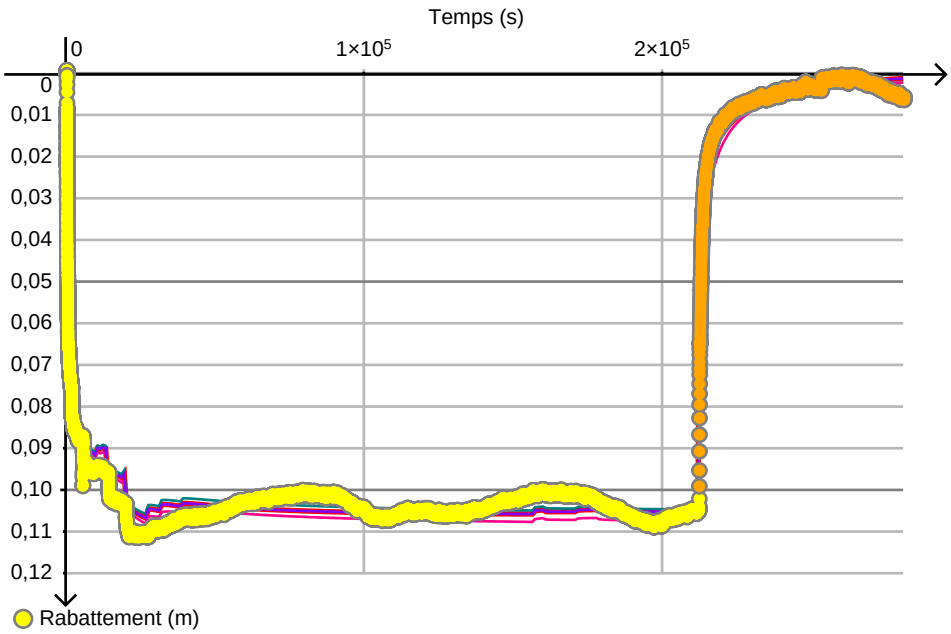
Courbe 4	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}20\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$3{,}00\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,959 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	400,00 m

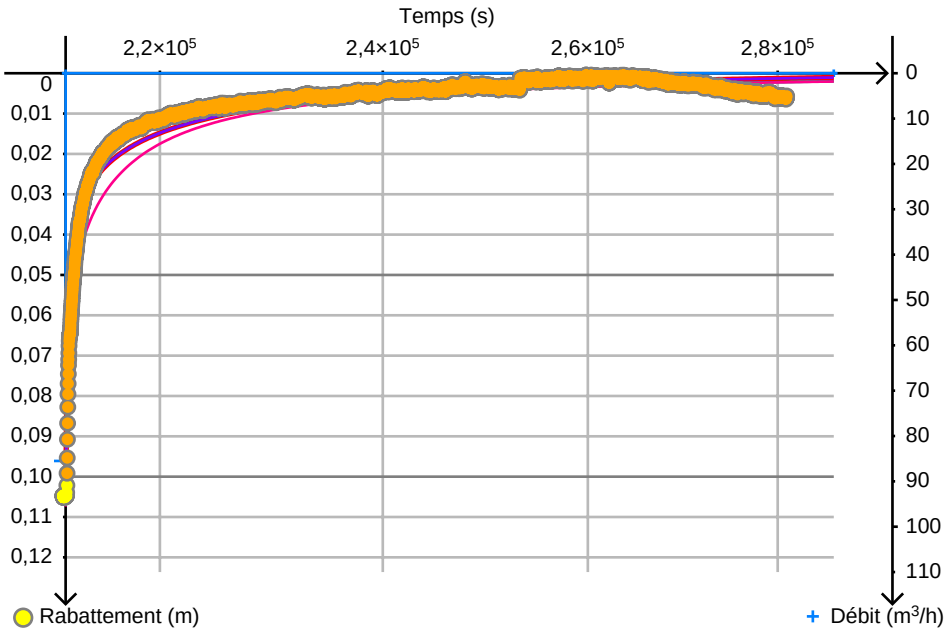
pz2

Site	sources du Riedbrunnen
Type d'ouvrage	Piézomètre

Rayon d'observation	10 m



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Courbe 1
	Courbe 2
	Courbe 3
	Courbe 6
	Débit



Courbe 1	Hantush
Type aquifère de la solution	Semi-captif
Transmissivité	$1{,}80\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$5{,}00\times10^{-3}$ (-)
Facteur de drainance	1 340,00 m
Epaisseur de l'aquitard	1,00 m
Perméabilité de l'aquitard	$1{,}00\times10^{-7}$ m/s
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,985 (-∞..1)

Courbe 2	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$2{,}00\times10^{-1}$ m²/s
Coefficient d'emmagasinement	$2{,}60\times10^{-3}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,982 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	1350,00 m

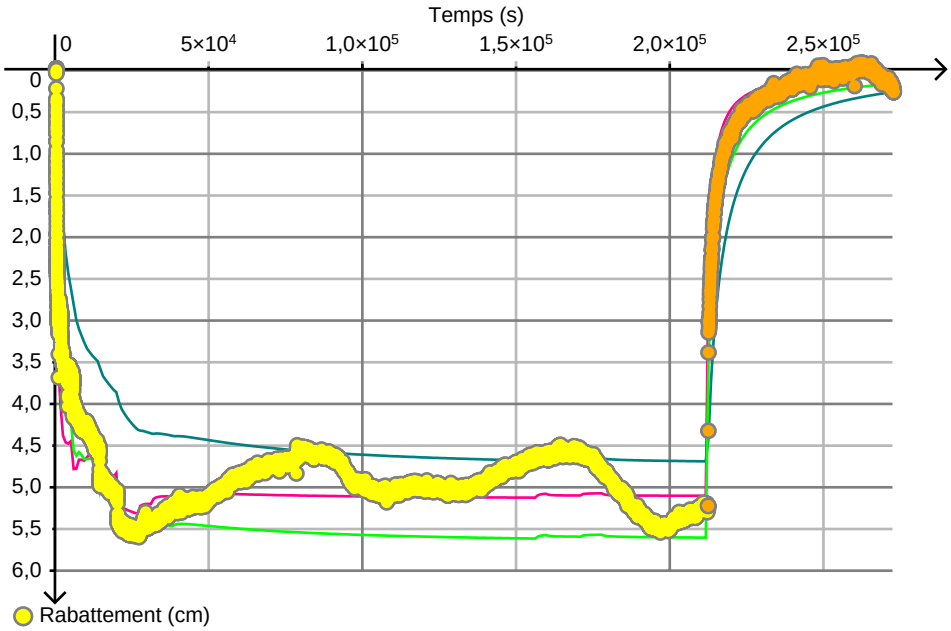
Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$1{,}29\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$4{,}76\times10^{-2}$ (-)
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,989 (-∞..1)

→ **Effet de limites**	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	200,00 m

Courbe 6	Hantush
Type aquifère de la solution	Semi-captif
Transmissivité	$1{,}80\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$5{,}00\times10^{-3}$ (-)
Facteur de drainance	1 340,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,985 (-∞..1)

pz3

Site	sources du Riedbrunnen	Type d'ouvrage	Piézomètre



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Courbe 2
	Courbe 3
	Courbe 4

Courbe 2	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$2{,}00\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$2{,}60\times10^{-3}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	80,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	+∞ (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	600,00 m

Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$1{,}29\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$4{,}76\times10^{-2}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	80,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	+∞ (-∞..1)

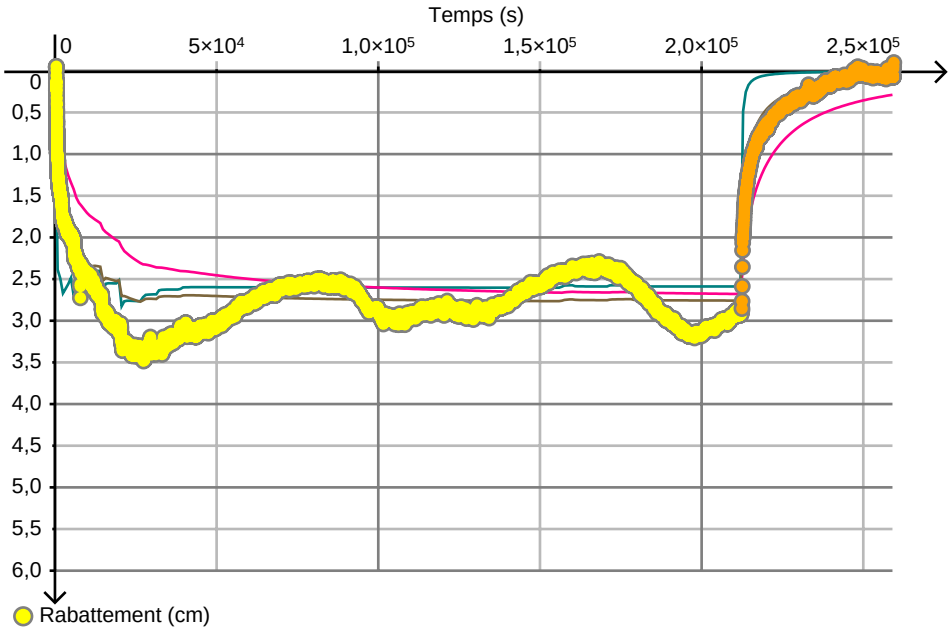
→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	200,00 m

Courbe 4	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$2{,}00\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$4{,}37\times10^{-3}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	80,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	+∞ (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	90,00 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	800,00 m

pz2

Site	sources du Riedbrunnen	Type d'ouvrage	Piézomètre



Légende	
	Rabattement mesuré
	Remontée mesurée
	Courbe 2
	Courbe 3
	Courbe 4

Courbe 2	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$2{,}00\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$2{,}60\times10^{-3}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	100,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,705 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	247,00 m

Courbe 3	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$3{,}00\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$4{,}76\times10^{-2}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	100,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,451 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	500,00 m

Courbe 4	Theis
Type aquifère de la solution	Captif
Transmissivité	$4{,}00\times10^{-1}$ m^2/s
Coefficient d'emmagasinement	$5{,}00\times10^{-3}$ (-)
Distance entre le piézomètre et le puits	100,00 m
Coefficient d'ajustement de Nash-Sutcliffe	0,908 (-∞..1)

→ Effet de limites	
Angle entre la normale à la limite et le piézomètre	0 °
Limite 1	Alimentée
Distance à la première limite	1000,00 m

Annexe 9

Essais de pompage : analyse géochimique

Résultats d'analyse géochimique des échantillons d'eau prélevés et interprétation

- **Résultats d'analyses des laboratoires du BRGM Orléans**

			ESO_Ried1	ESU_Ried R1	ESU_Ried R2	ESO_Mutt puits	ESU_Mutt riv
Elément	Unité	LQ	ESO	ESU	ESU	ESO	ESU
Ca	mg/L	0.5	90,9	87,9	67,9	78,5	100,8
Cl	mg/L	0.5	121,7	93,9	88,6	36,5	33,5
CO_3	mg/L	10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
F	mg/L	0.1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Fe	mg/L	0.02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
HCO_3	mg/L	10	212	230	198	243	223
K	mg/L	0.5	2,2	3,5	2,8	2,3	3,1
Mg	mg/L	0.5	7,4	7,1	5,5	10	11,9
Na	mg/L	0.5	40,60	43,90	34,30	9,10	10,90
NH_4	mg/L	0.05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	<0,05
NO_2	mg/L	0.01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
NO_3	mg/L	0.5	27,1	26,1	24,4	34,4	33,5
PO_4	mg/L	0.05	<0,05	<0,05	<0,05	0,1	<0,05
Si	mg/L	0.5	7,3	7,9	5,9	9,9	9,7
SO_4	mg/L	0.5	32	29,9	30	38,9	42,3

Figure 117 : Résultats des analyses sur les prélèvements en rivières et en fin d'essais

- **Qualité des analyses**

Vérification des balances ioniques

Afin notamment de s'assurer de la qualité d'une analyse physico-chimique réalisée au laboratoire, il est nécessaire de calculer la balance ionique de l'analyse ; afin d'éviter toute erreur d'analyse, ou de s'assurer de toute absence d'un ou plusieurs éléments majeurs dans la composition géochimique d'une eau.

La balance ionique a été calculée pour toutes les analyses à partir de la formule suivante :

$$Balance\ ionique\ = 100 \times \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions}$$

Les sommes sont exprimées en meq.L^{-1}.

La fiabilité de l'analyse au regard de la balance ionique est considérée comme :

- excellente pour une balance entre - 1 et + 1 % ;

- acceptable pour une balance entre - 5 et + 5% ;

- médiocre pour une balance entre - 10 et + 10 % ;

- mauvaise pour une balance inférieure à - 10 et supérieure à + 10 %.

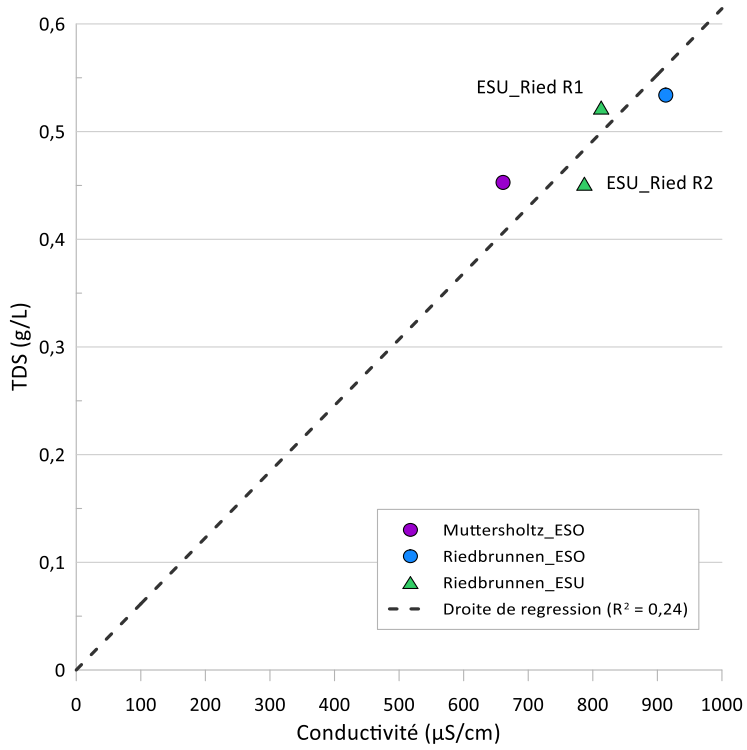
Les prélèvements d'eau réalisés ont une balance ionique comprise entre -12 et + 5 %, dans le détail, leur répatition est la suivante :

- Balance ionique comprise entre -5 et 5 % : Mutt riv et Ried R1
- Balance ionique comprise entre -5 et -10 % : Ried 1
- Balance ionique comprise entre -10 et -12 % : Muut Puits et Ried R2

Conductivité électrique in situ et éléments dissous totaux

La somme des éléments dissous (Total Dissolved Solid : TDS) a été calculée pour l'ensemble des analyses géochimiques.

En comparant les valeurs de conductivités mesurées sur le terrain et les valeurs de TDS, cela apporte une deuxième vérification du jeu de données. La droite de corrélation avec un coefficient de corrélation de 0,24 permet de valider également la qualité des prélèvements réalisés.



- **Faciès hydrochimiques des eaux échantillonnées**

La localisation des points d'eau dans le diagramme de Piper, selon leurs concentrations en éléments majeurs, renseigne sur leur faciès hydrochimique.

Les échantillons d'eau souterraine (ESO) et d'eau superficielle (ESU) de Muttersholtz ont un faciès hydrochimique bicarbonaté-calcique.

Les échantillons d'eau souterraine (ESO) et d'eau superficielle (ESU) de Riedbrunnen ont un faciès hydrochimique bicarbonaté-calcique à sulfaté calcique ; cette évolution est en partie due à des concentrations plus importante en Cl et Na que les échantillons de Muttersholtz.

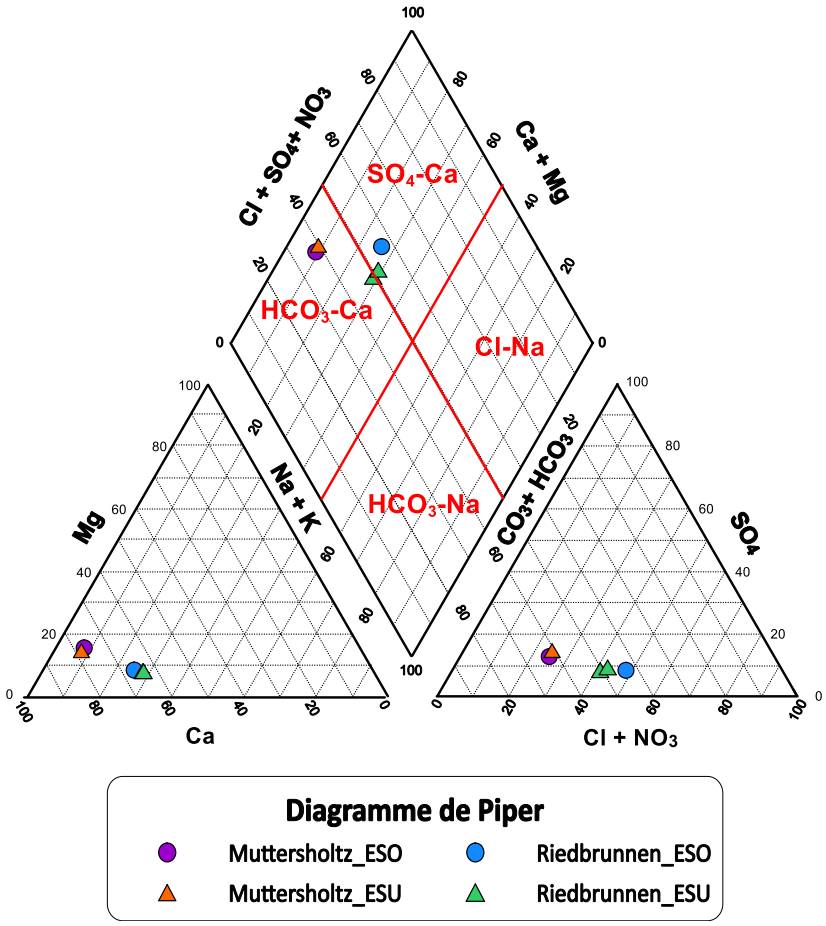


Illustration 1 : Diagramme de Piper des eaux souterraines et superficelles échantillonnées.

- **Relations inter-éléments : Diagrammes binaires**

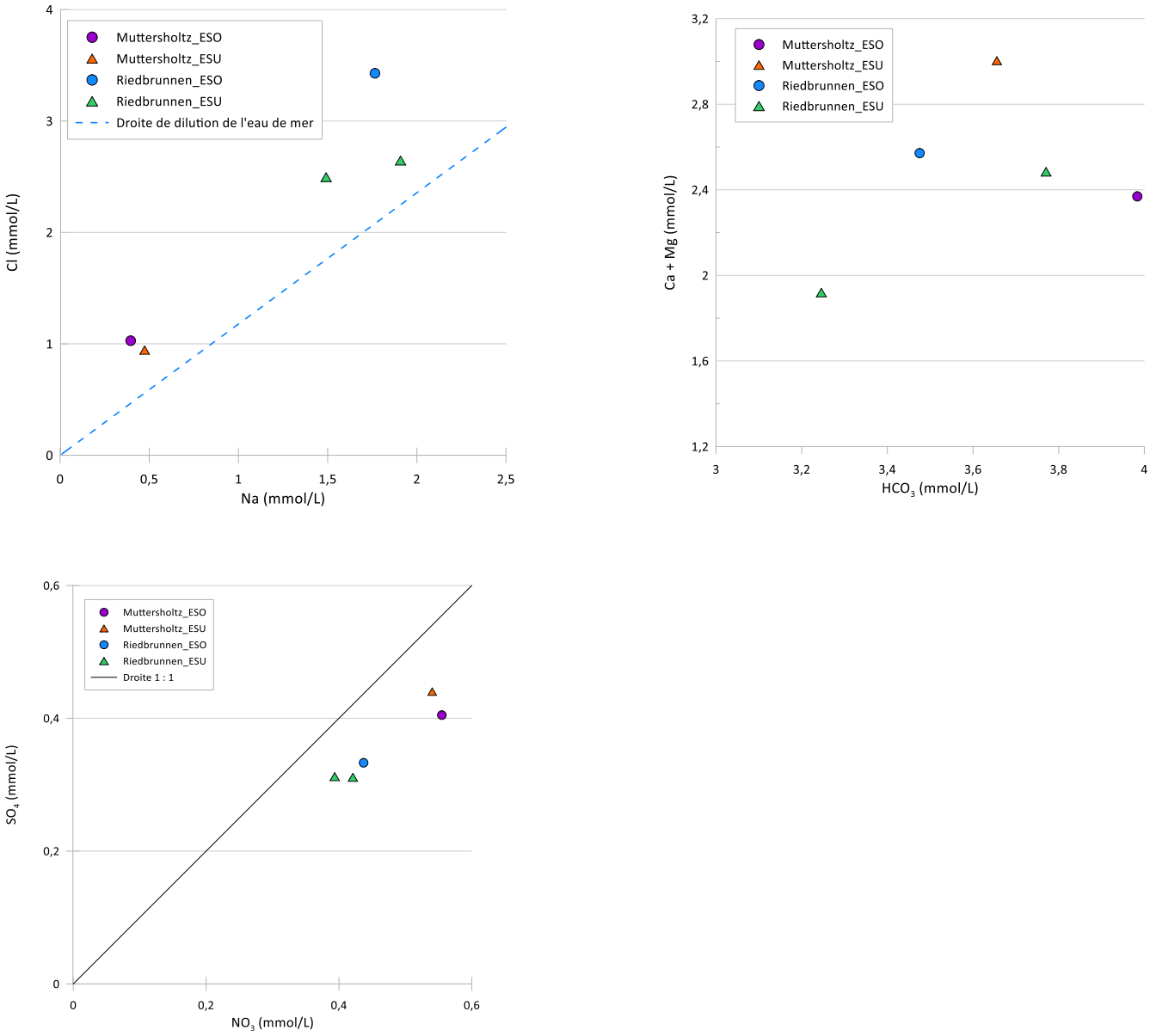


Figure 118 : diagramme binaire : Cl vs Na, Ca+Mg vs HCO3 et SO_4 vs NO_3

Les eaux des 2 secteurs indiquent un enrichissement en chlorures.

Les points d'eau ESO et ESU du site des sources de Riedbrunnen ont des concentrations plus élevées en Cl et Na que les points d'eau du site de Muttersholtz. Les 2 sites indiquent des variabilités relativement faibles pour les concentrations en nitrate et en sulfates, avec des valeurs médianes en nitrate de 27,1 mg/L (0,44 mmol/L) et en sulfates de 32,0 mg/L (0,33 mmol/L). Néanmoins, on peut constater que les points d'eau ESO et ESU du site de Muttersholtz ont des concentrations plus élevées en SO4 et NO3 que les points d'eau du site des sources de Riedbrunnen.

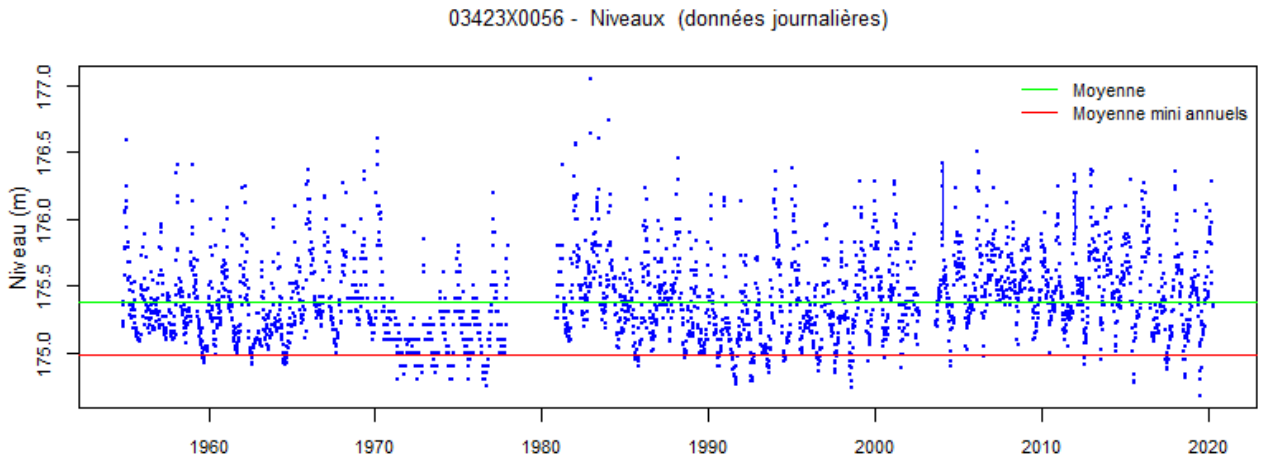
Autrement dit il existe un lien ESO-ESU pour chacun de ces deux sites sur la base des digarmmes binaires Ca+Mg vs HCO3 et SO_4 vs NO_3 .

Annexe 10

Analyses statistiques des chroniques sur les piézomètres du réseau de suivi // résultats bruts (logiciel ESTHER)

Piezo 03423X0056 –

Statistique préliminaire sur l'intégralité de la chronique



Période de mesures : du 1954-11-08 au 2020-04-20

Nombre d'années avec mesures : 65 sur un total de 67

Nombre de jours lus avec mesures: 3170 sur un total de 23906 jours,soit 13.3 %

Moyenne : 175.38

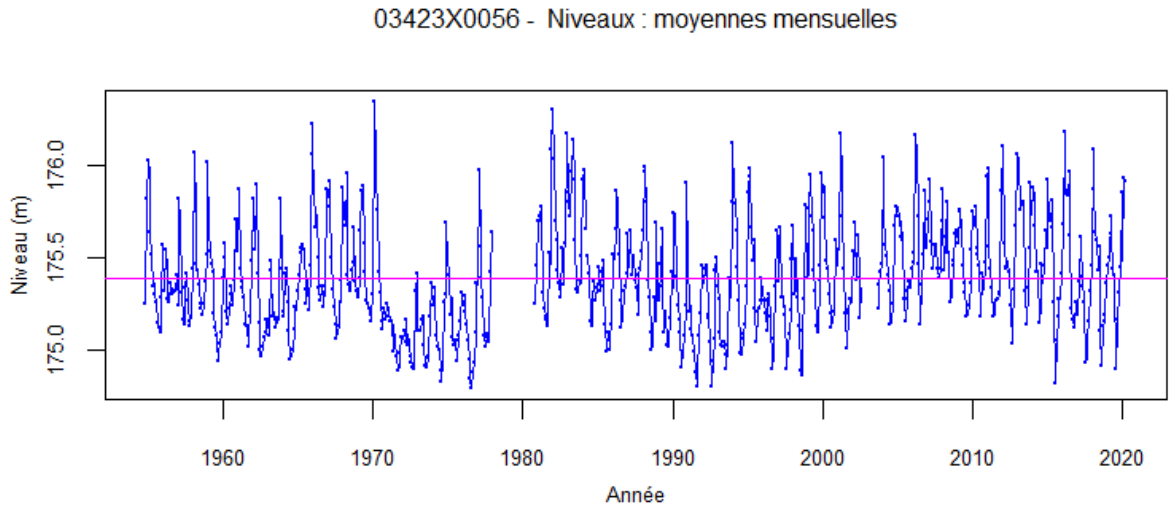
Ecart-type : 0.32

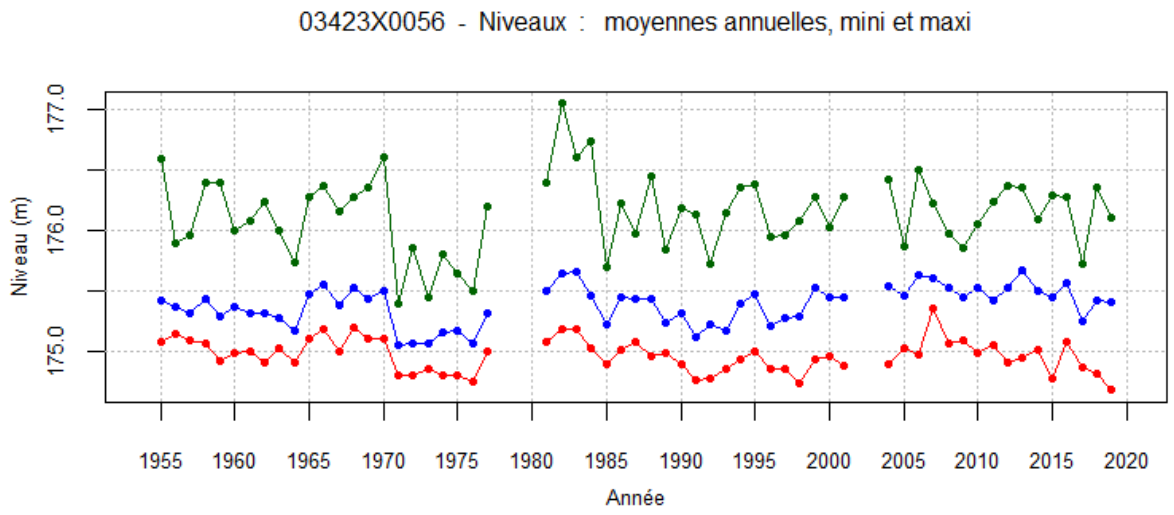
Maximum : 177.05 à la date : 1982-12-28

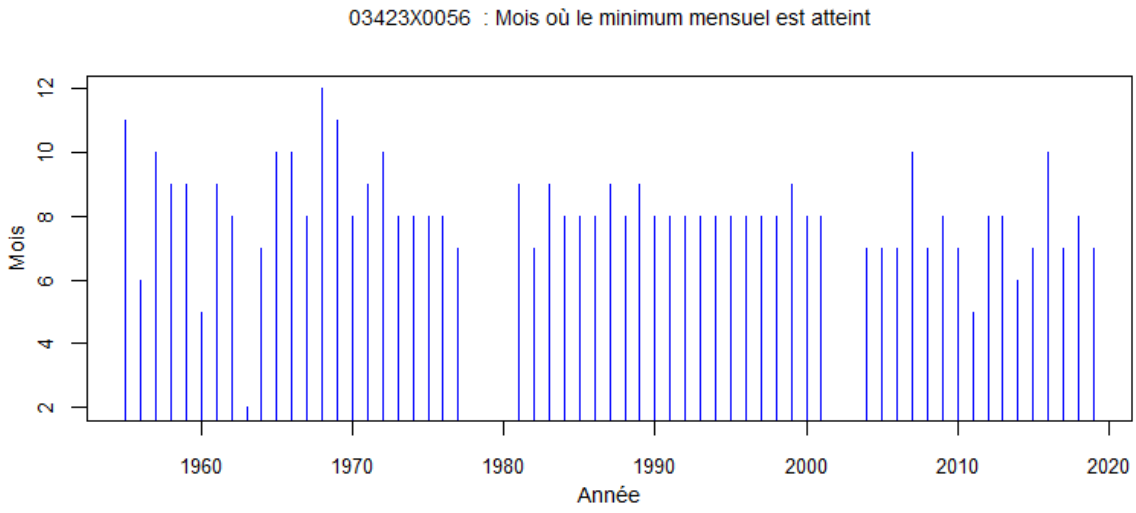
Minimum : 174.68 à la date : 2019-07-22

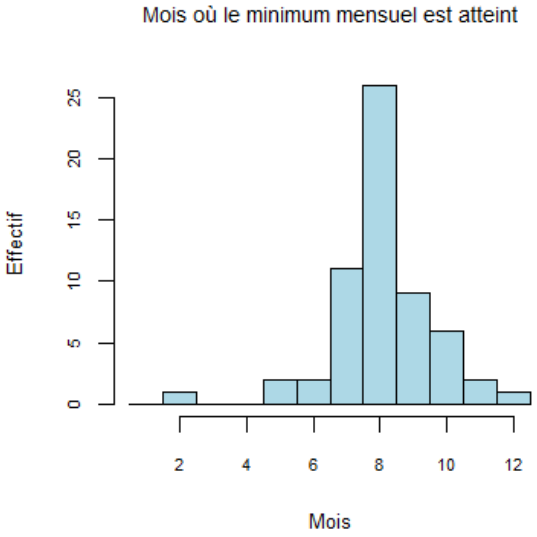
Nombre de mesures chaque année :

1954 8	1964 50	1974 53	1984 48	1994 52	2004 55	2014 52
1955 52	1965 42	1975 52	1985 53	1995 52	2005 52	2015 48
1956 51	1966 42	1976 52	1986 52	1996 53	2006 53	2016 50
1957 53	1967 41	1977 52	1987 52	1997 52	2007 52	2017 53
1958 52	1968 47	1978 0	1988 52	1998 52	2008 53	2018 53
1959 52	1969 52	1979 0	1989 52	1999 52	2009 52	2019 52
1960 52	1970 52	1980 7	1990 52	2000 52	2010 53	2020 16
1961 52	1971 52	1981 51	1991 53	2001 52	2011 53	
1962 51	1972 52	1982 52	1992 52	2002 35	2012 56	
1963 50	1973 52	1983 52	1993 52	2003 18	2013 53	

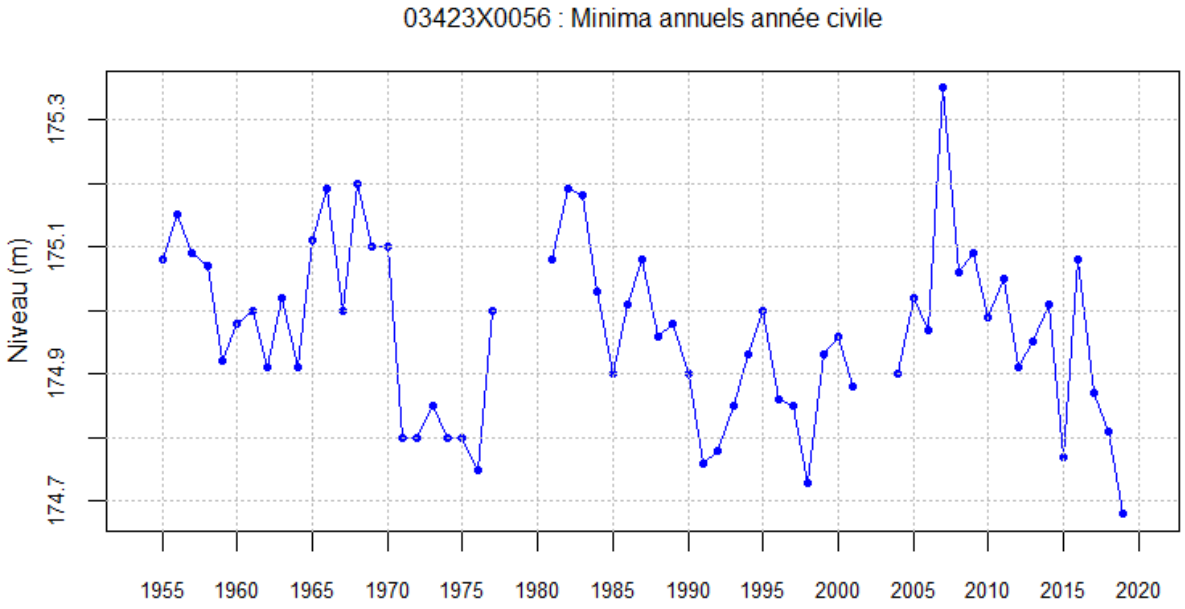

03423X0056 - Niveaux : moyennes mensuelles
Niveau (m)
175.0
175.5
176.0
1960
1970
1980
1990
2000
2010
2020
Année


03423X0056 - Niveaux : moyennes annuelles, mini et maxi
Niveau (m)
175.0
176.0
177.0
1955
1960
1965
1970
1975
1980
1985
1990
1995
2000
2005
2010
2015
2020
Année





Mois	Effectif	%
1	0	0
2	1	1.7
3	0	0
4	0	0
5	2	3.3
6	2	3.3
7	11	18.3
8	26	43.3
9	9	15
10	6	10
11	2	3.3
12	1	1.7



Nombre d'années : 67 de 1954 à 2020

Nombre d'années manquantes (ou éliminées) : 7

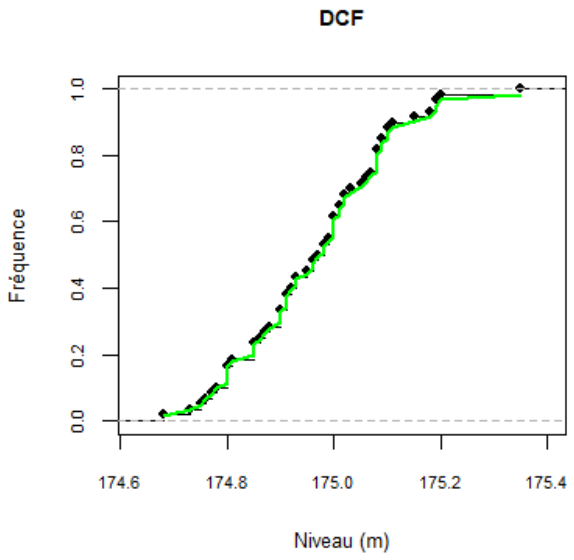
Moyenne : 174.966

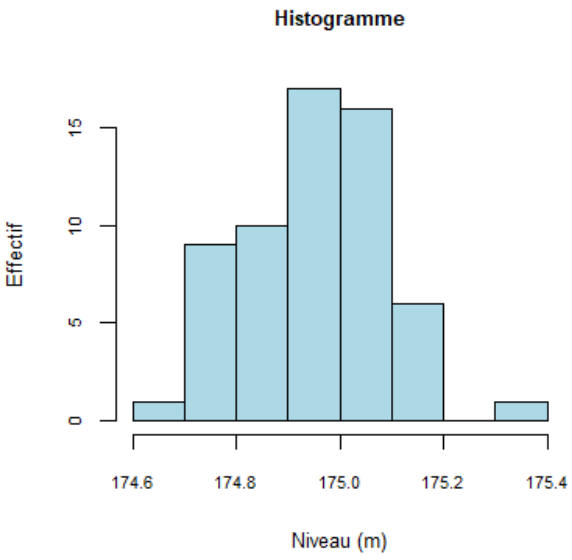
Médiane : 174.975

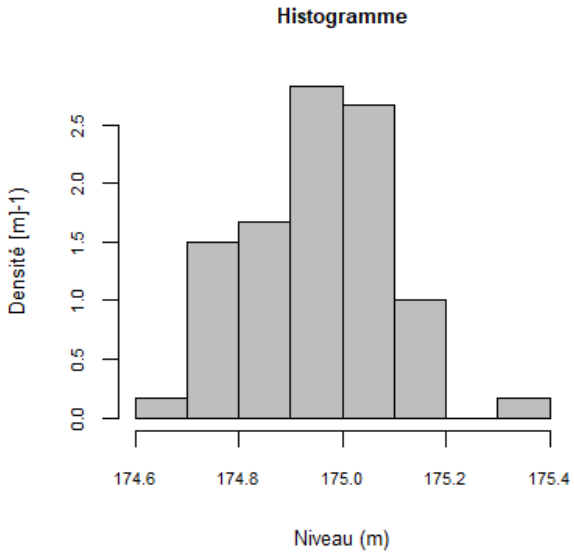
Ecart-type : 0.136

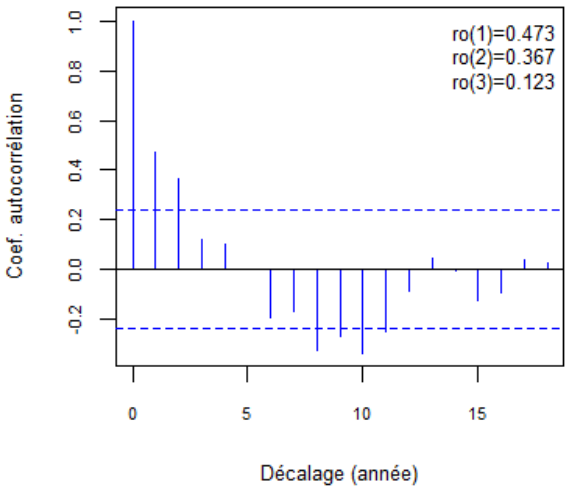
Minimum : 174.68

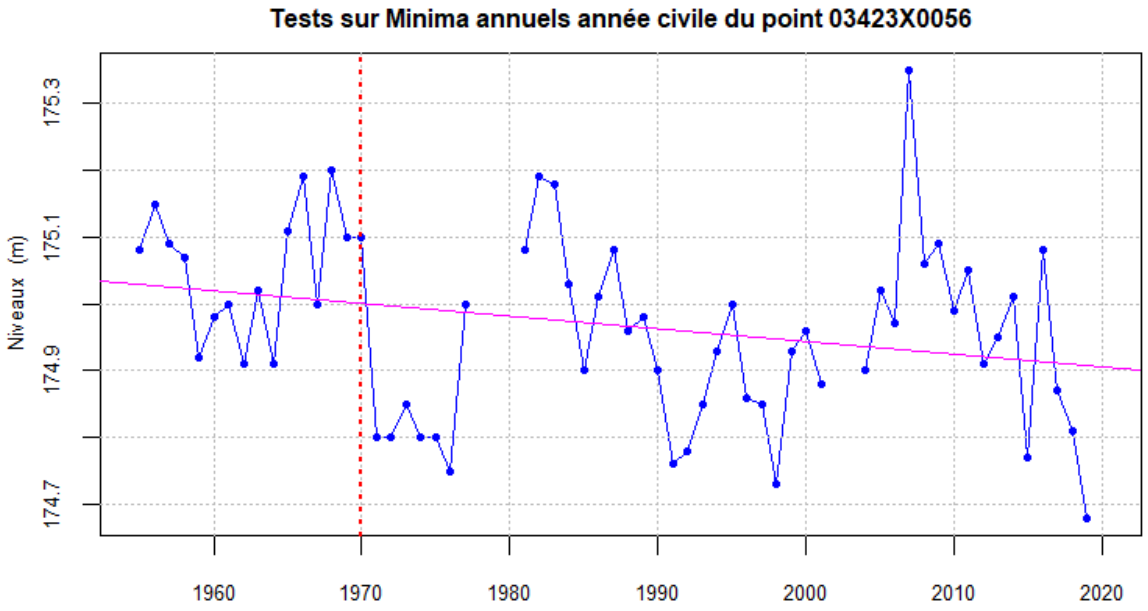
Maximum : 175.35


DCF
Fréquence
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
174.6
174.8
175.0
175.2
175.4
Niveau (m)


Histogramme
Effectif
0
5
10
15
174.6
174.8
175.0
175.2
175.4
Niveau (m)


Histogramme
Densité [m]-1)
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
174.6
174.8
175.0
175.2
175.4
Niveau (m)


ro(1)=0.473
ro(2)=0.367
ro(3)=0.123
Coef. autocorrélation
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0
5
10
15
Décalage (année)



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 4.107e-02 corrigée (Hamed-Rao) : 6.676e-02

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 1.150e-01 et selon méthode Zhang 1.181e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.2

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.022 à la date 1970

Test d'homogénéité de Wilcoxon

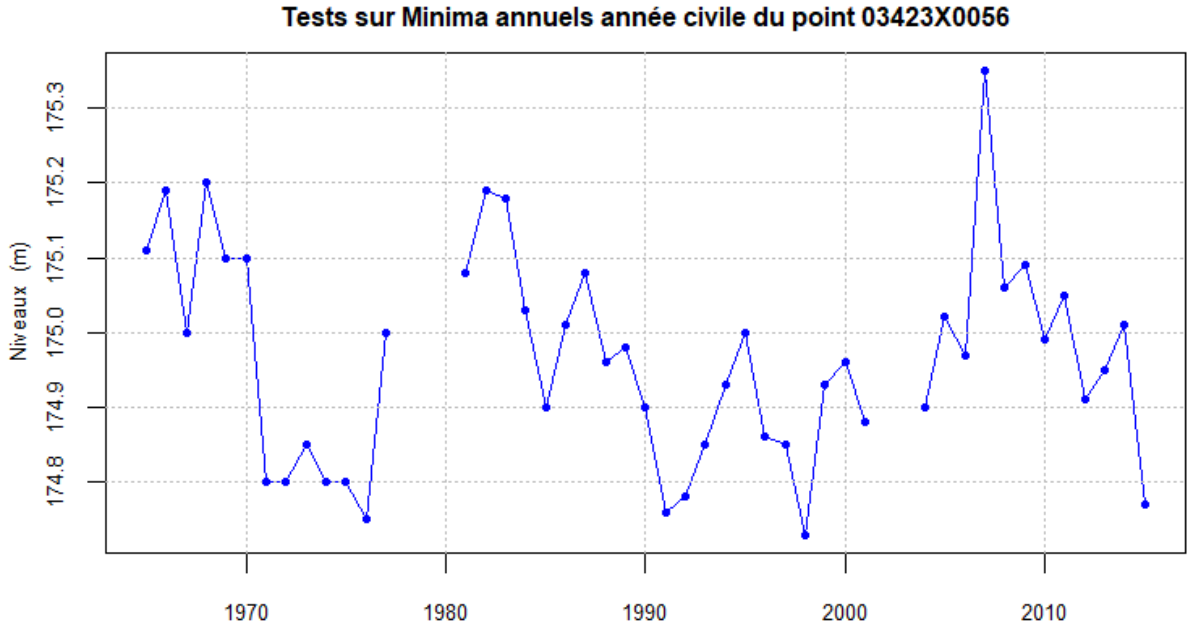
pvalue : 3.483e-01

Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 3.416e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.473

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%

Piezo 03423X0056 – analyse fréquentielle sur la Période 1965 – 2015



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 4.314e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 5.605e-01

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 5.704e-01 et selon méthode Zhang 5.704e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.1

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.206

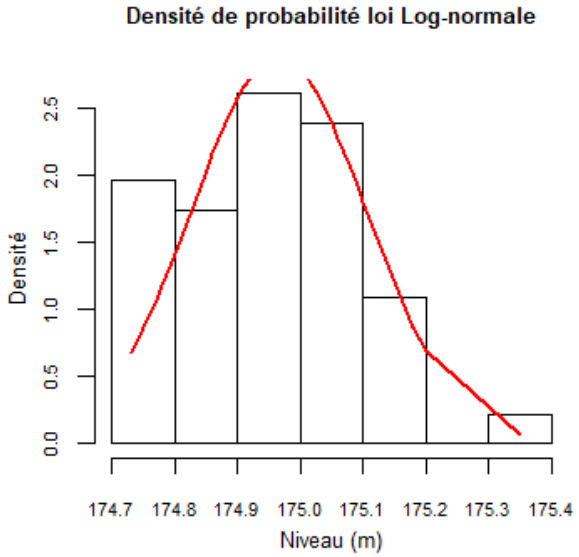
Test d'homogénéité de Wilcoxon

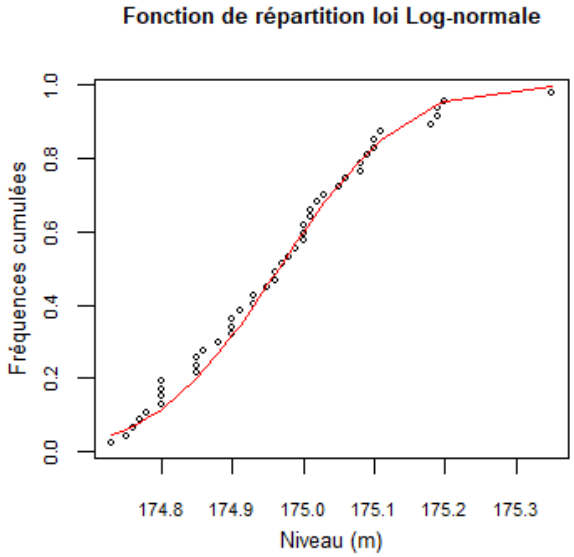
pvalue : 1.349e-01

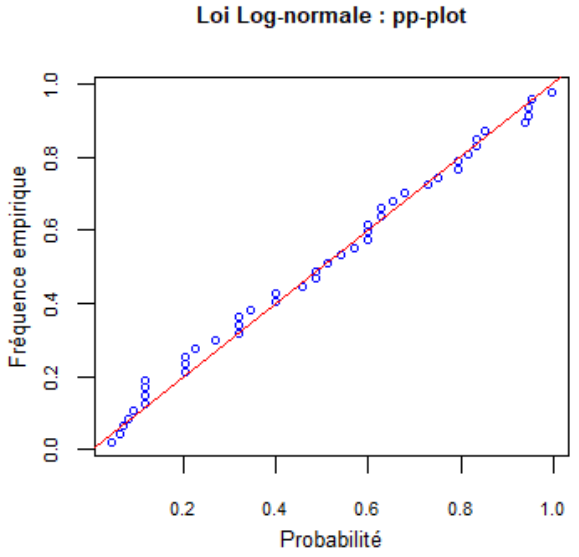
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

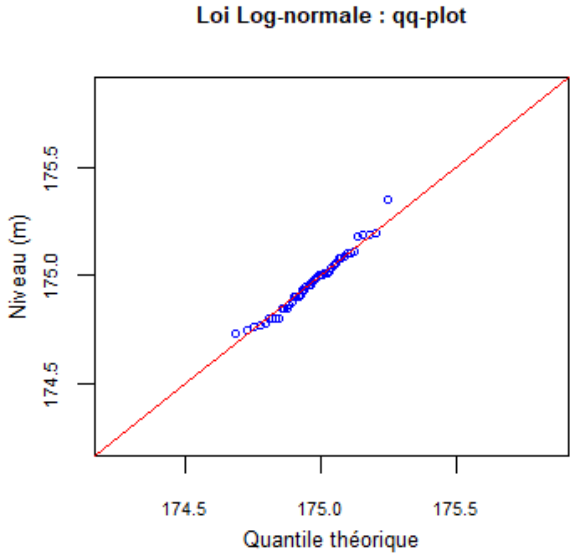
pvalue : 1.431e-03 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.521

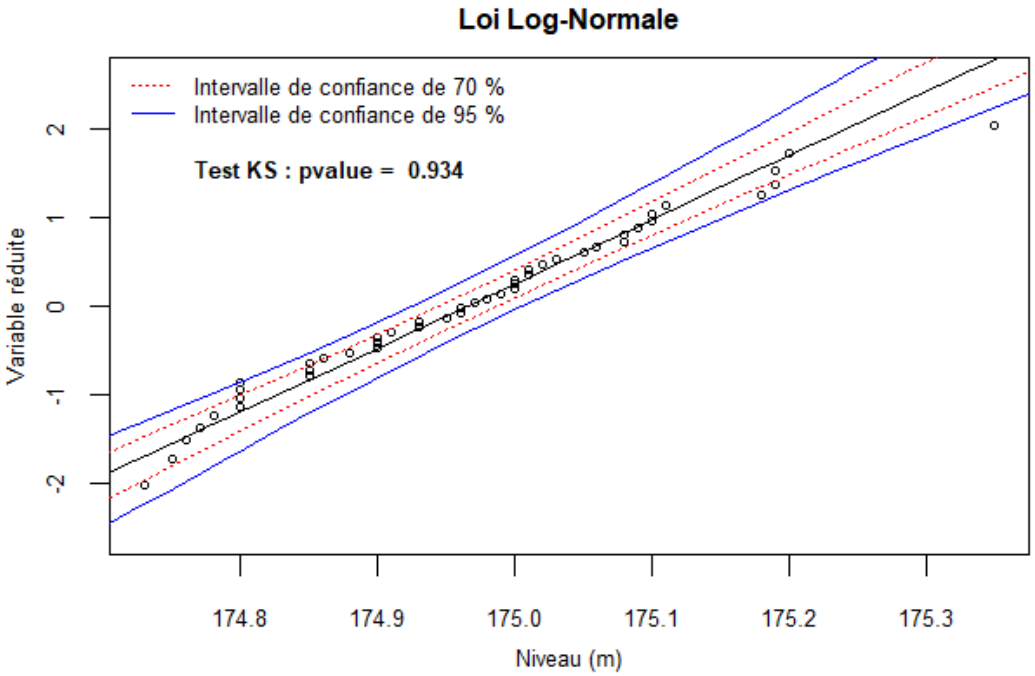
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
174.7
174.8
174.9
175.0
175.1
175.2
175.3
175.4
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
174.8
174.9
175.0
175.1
175.2
175.3
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Probabilité

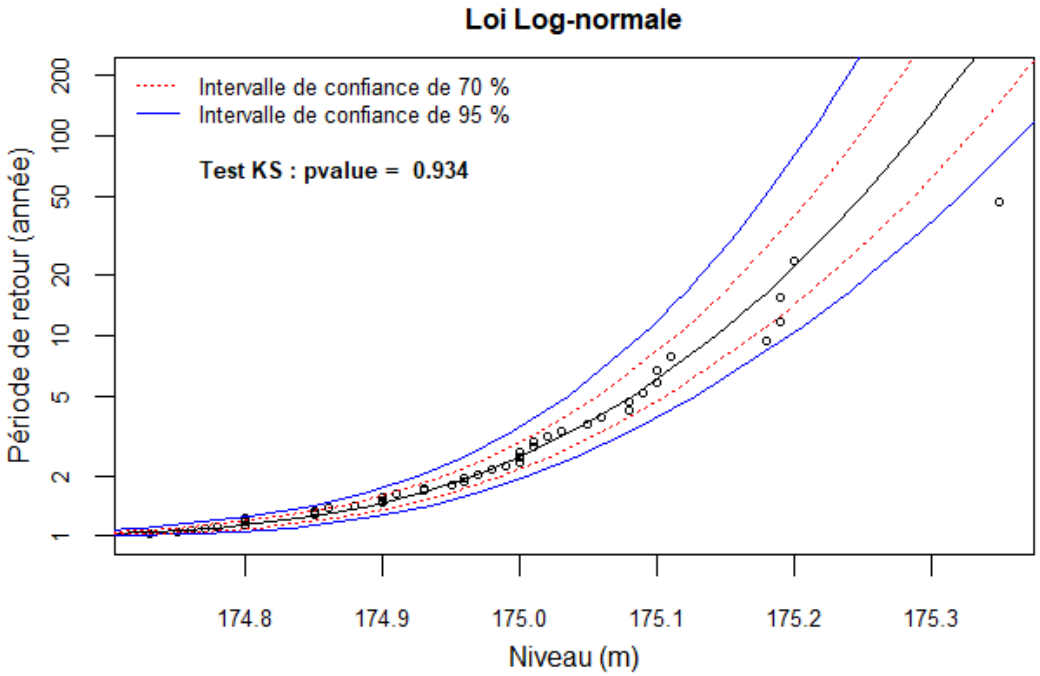

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
174.5
175.0
175.5
174.5
175.0
175.5
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 174.74	**5 ans humide : 175.08**
10 ans sec : 174.79	**10 ans humide : 175.14**
5 ans sec : 174.85	**20 ans humide : 175.19**
	50 ans humide : 175.25
	100 ans humide : 175.29

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

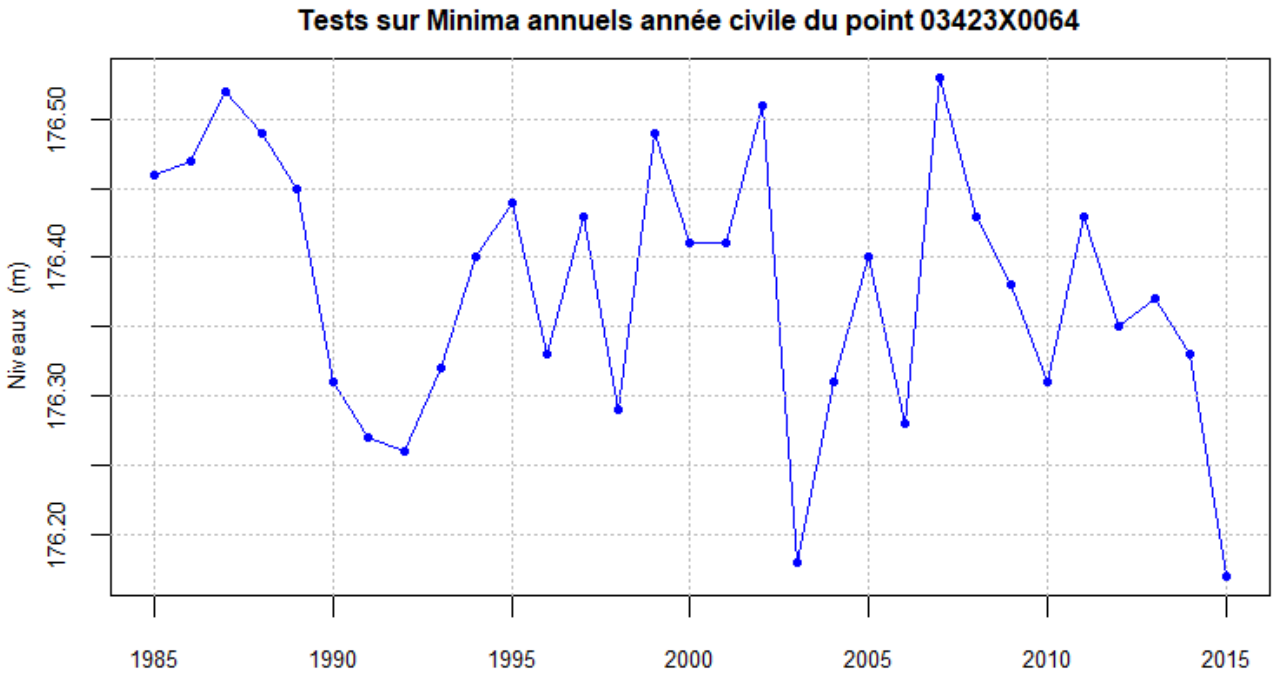


Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 174.74	**5 ans humide : 175.08**
10 ans sec : 174.79	**10 ans humide : 175.14**
5 ans sec : 174.85	**20 ans humide : 175.19**
	50 ans humide : 175.25
	100 ans humide : 175.29

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

Piezo 03423X0064– analyse fréquentielle sur la Période 1965 – 2015



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 1.095e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 2.472e-02

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 2.117e-01 et selon méthode Zhang 2.117e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.3

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.223

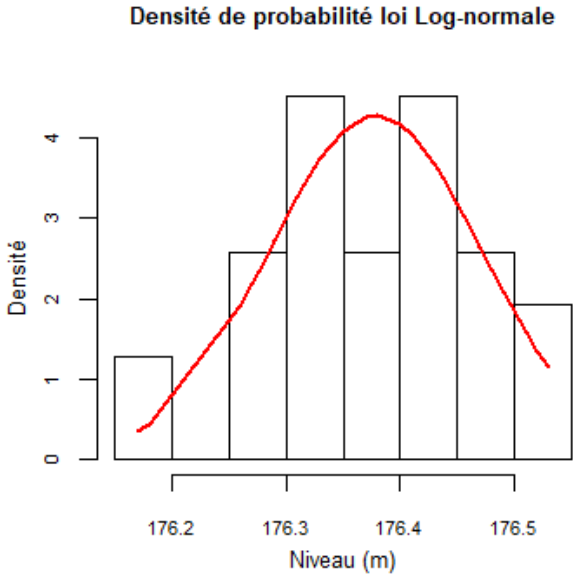
Test d'homogénéité de Wilcoxon

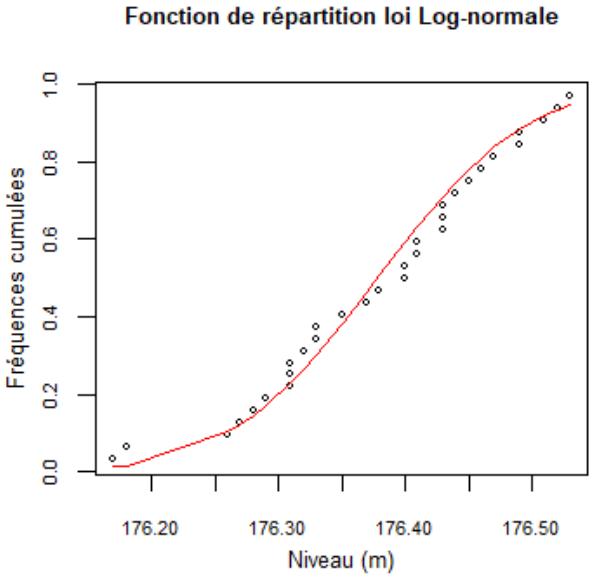
pvalue : 3.225e-01

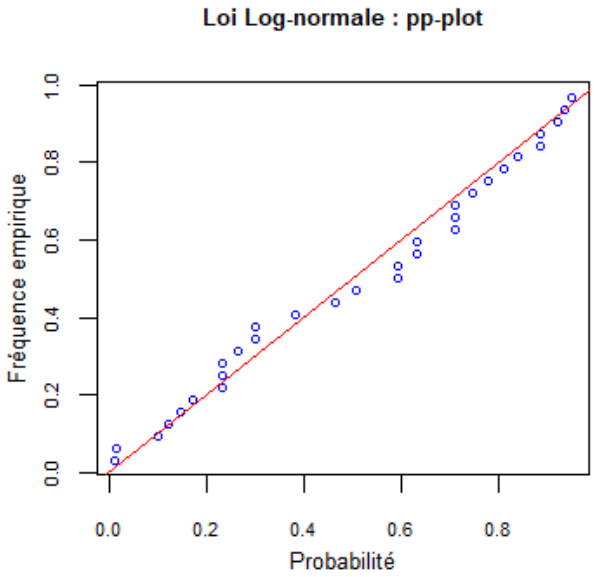
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

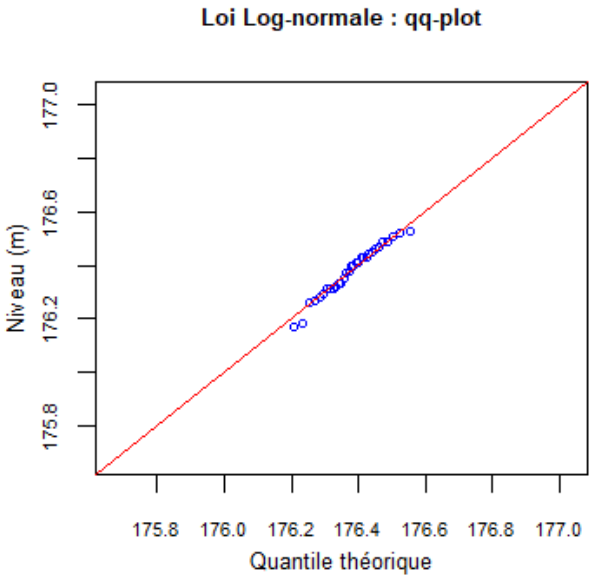
pvalue : 9.361e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.141

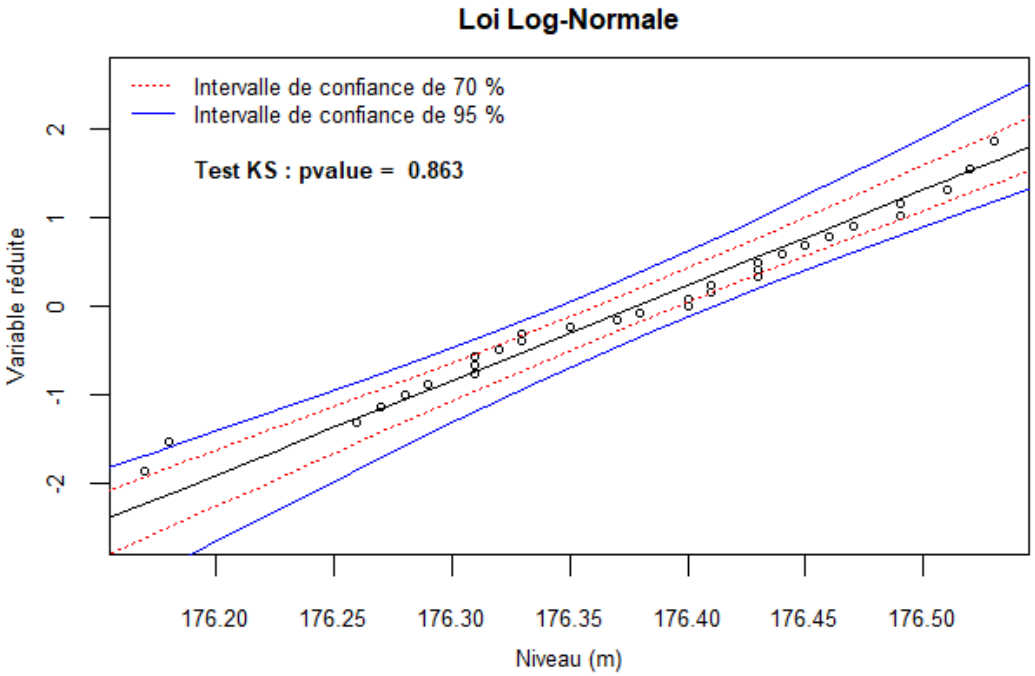
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0
1
2
3
4
176.2
176.3
176.4
176.5
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
176.20
176.30
176.40
176.50
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
Probabilité

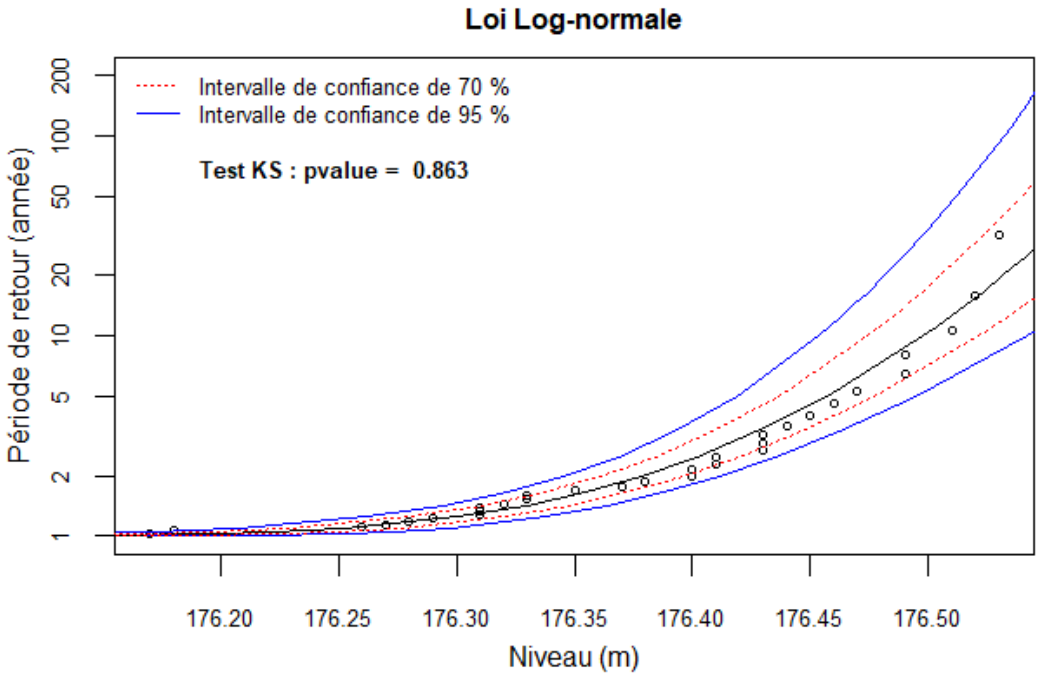

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
175.8
176.2
176.6
177.0
175.8
176.0
176.2
176.4
176.6
176.8
177.0
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 176.23	**5 ans humide : 176.46**
10 ans sec : 176.26	**10 ans humide : 176.5**
5 ans sec : 176.3	**20 ans humide : 176.53**
	50 ans humide : 176.57
	100 ans humide : 176.6

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

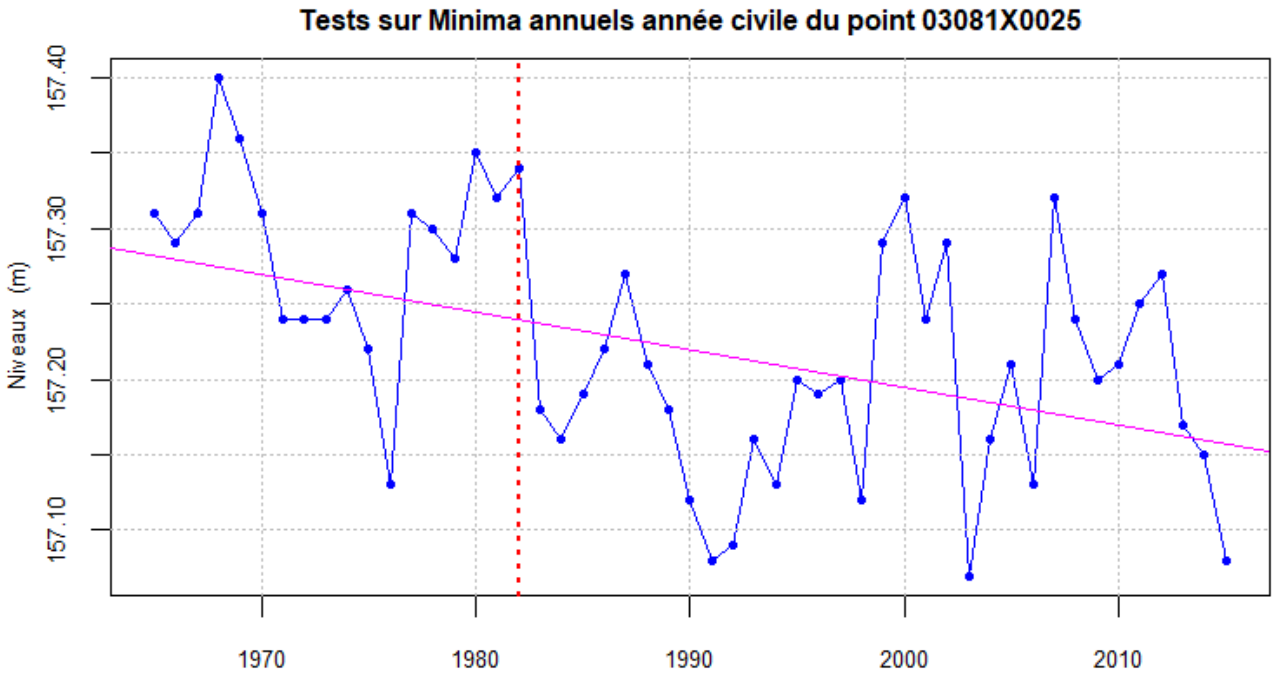


Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 176.23	**5 ans humide : 176.46**
10 ans sec : 176.26	**10 ans humide : 176.5**
5 ans sec : 176.3	**20 ans humide : 176.53**
	50 ans humide : 176.57
	100 ans humide : 176.6

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

Piezo 03081X0025– statistiques préliminaires



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 1.883e-03 corrigée (Hamed-Rao) : 1.555e-02

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 2.497e-02 et selon méthode Zhang 2.497e-02

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.3

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0 à la date 1982

Test d'homogénéité de Wilcoxon

pvalue : 2.857e-01

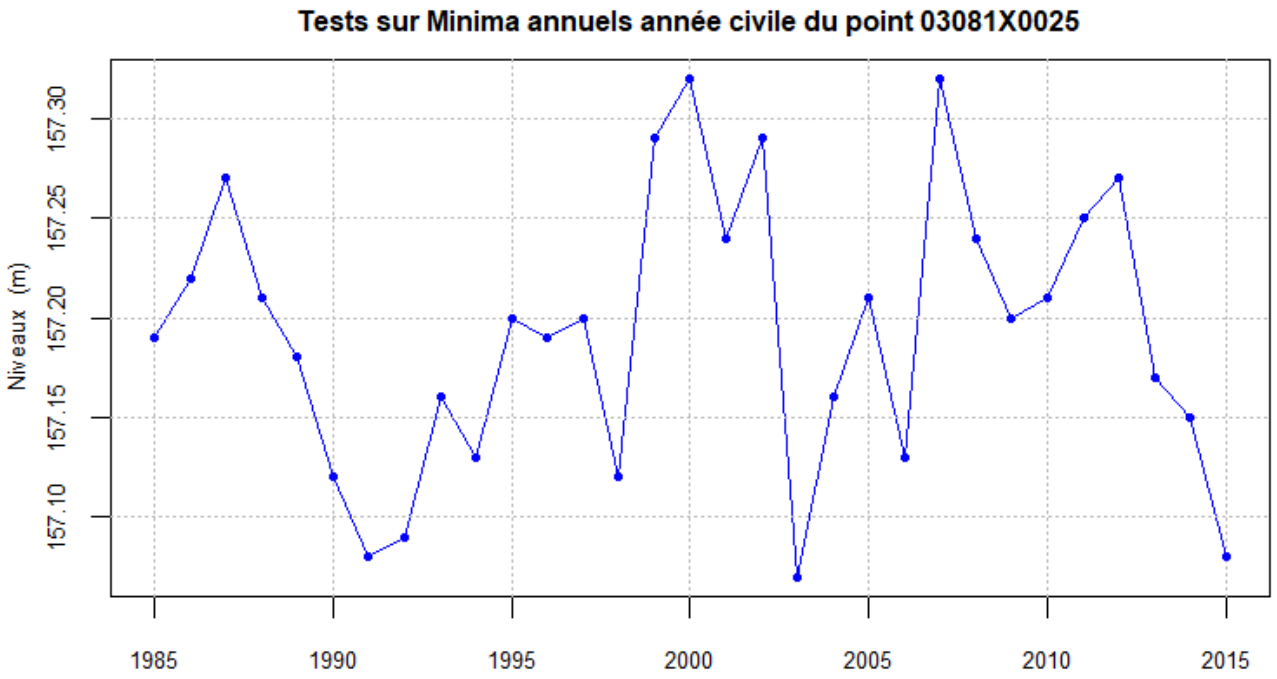
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 4.876e-05 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.511

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%

Pas d'analyse fréquentielle possible sur la période 1965 – 2019 (intégralité de la chronique)

Piezo 03081X0025 – analyse fréquentielle sur la Période 1985 – 2015



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 6.213e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 6.213e-01

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 8.166e-01 et selon méthode Zhang 8.166e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): 0.1

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.574

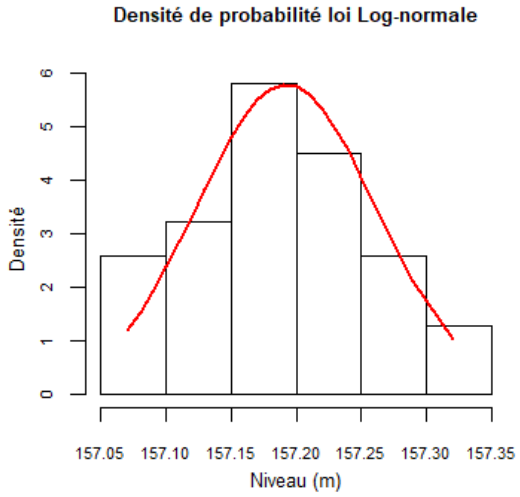
Test d'homogénéité de Wilcoxon

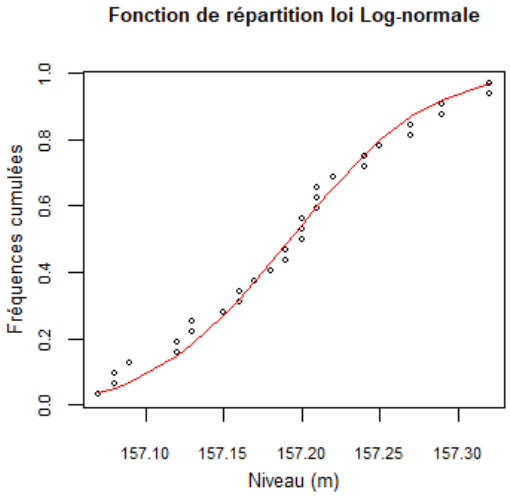
pvalue : 5.135e-01

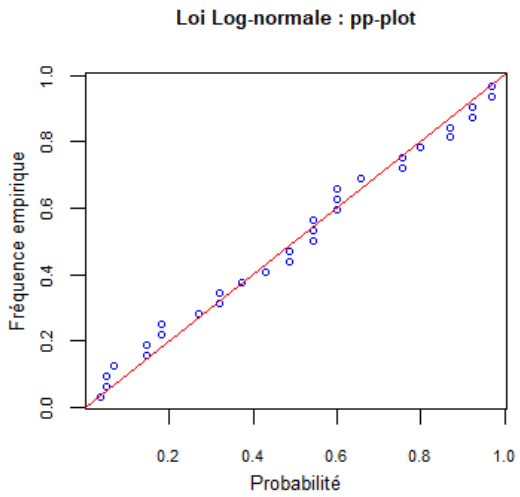
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

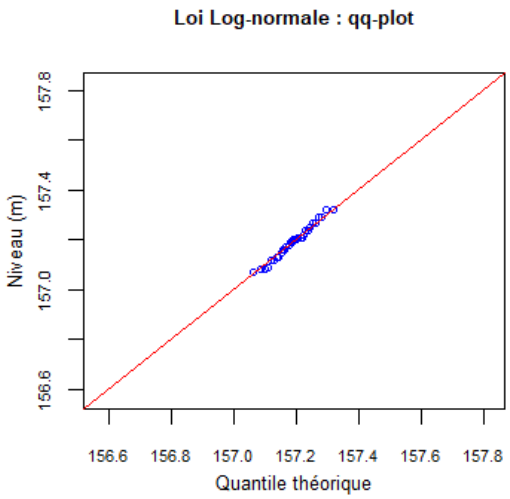
pvalue : 1.085e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.29

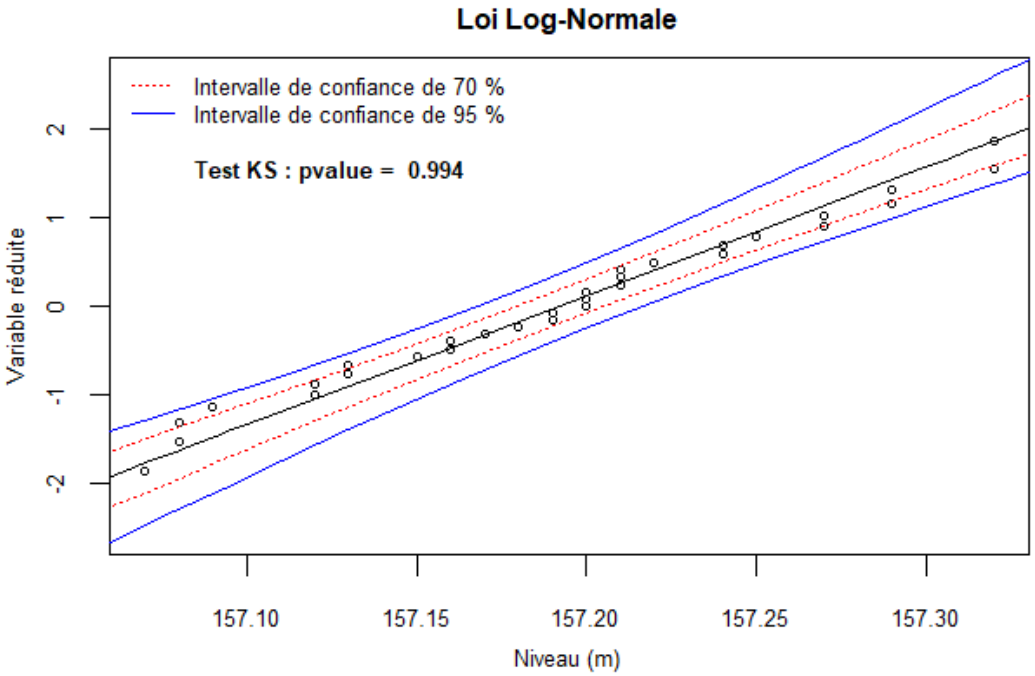
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0
1
2
3
4
5
6
157.05
157.10
157.15
157.20
157.25
157.30
157.35
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
157.10
157.15
157.20
157.25
157.30
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Probabilité

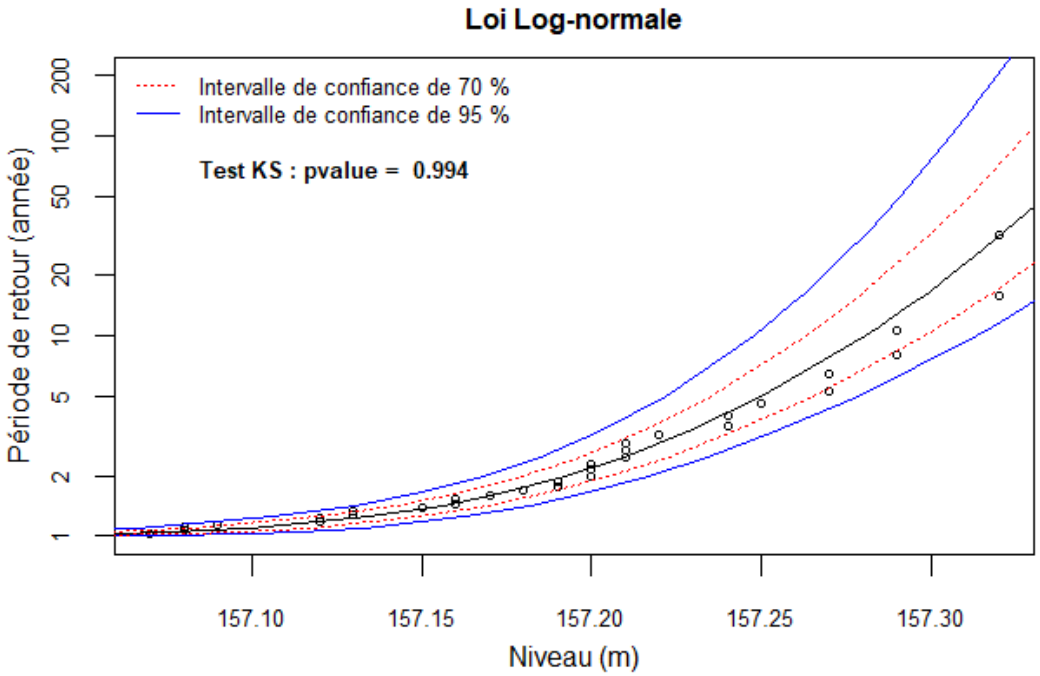

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
156.6
157.0
157.4
157.8
156.6
156.8
157.0
157.2
157.4
157.6
157.8
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 157.08	**5 ans humide : 157.25**
10 ans sec : 157.1	**10 ans humide : 157.28**
5 ans sec : 157.13	**20 ans humide : 157.31**
	50 ans humide : 157.33
	100 ans humide : 157.35

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

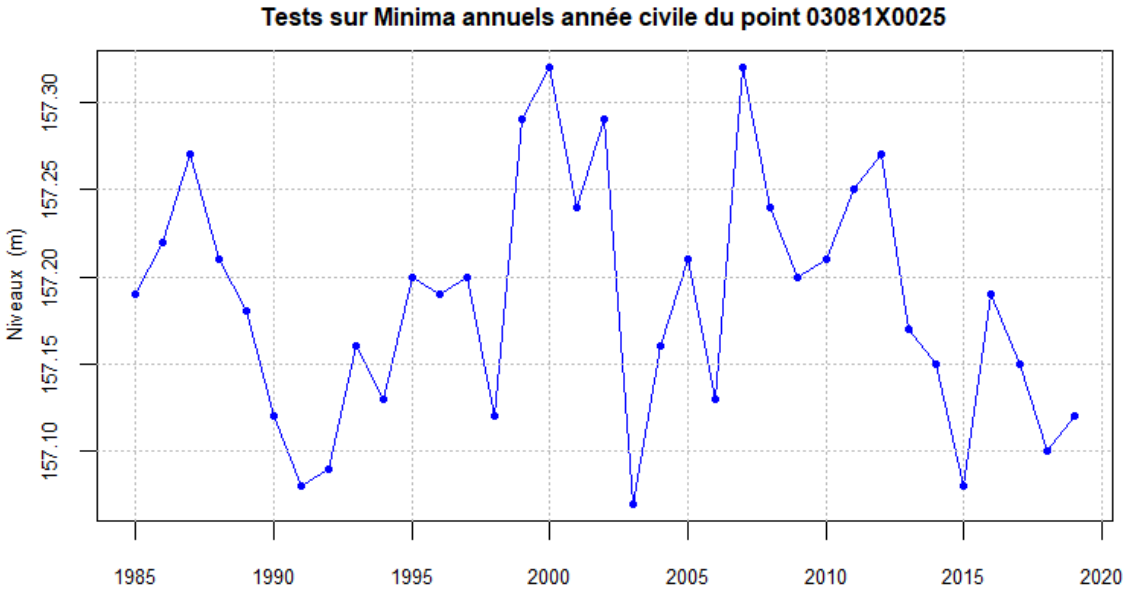


Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 157.08	**5 ans humide : 157.25**
10 ans sec : 157.1	**10 ans humide : 157.28**
5 ans sec : 157.13	**20 ans humide : 157.31**
	50 ans humide : 157.33
	100 ans humide : 157.35

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

Piezo 03081X0025– analyse fréquentielle sur la Période 1985 – 2019



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 6.284e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 7.104e-01

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 7.555e-01 et selon méthode Zhang 7.555e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): 0

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.321

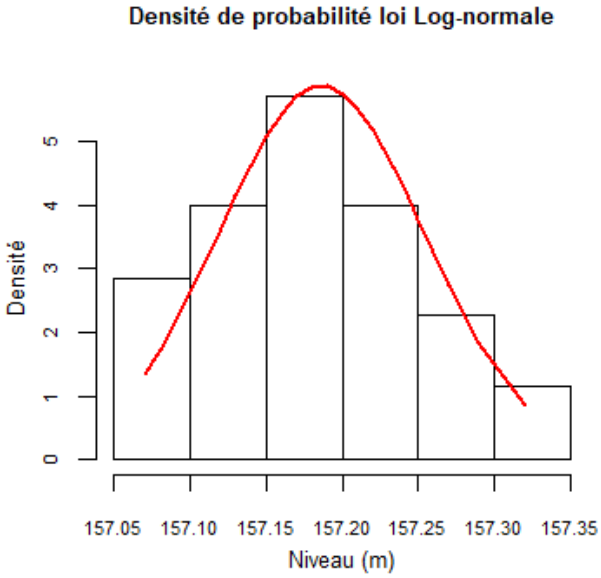
Test d'homogénéité de Wilcoxon

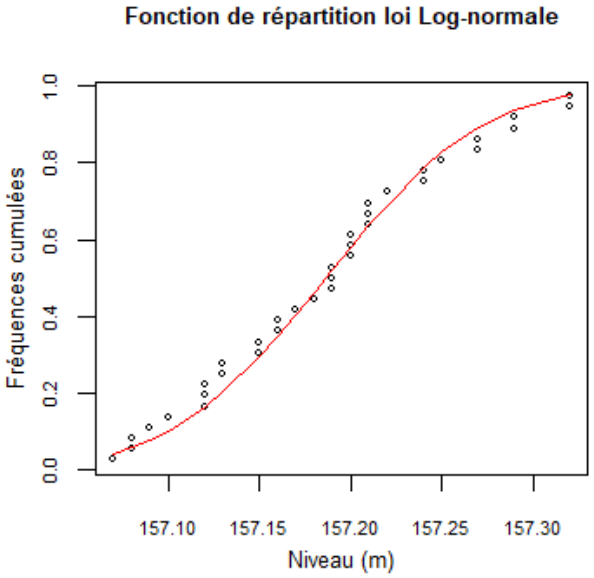
pvalue : 4.979e-01

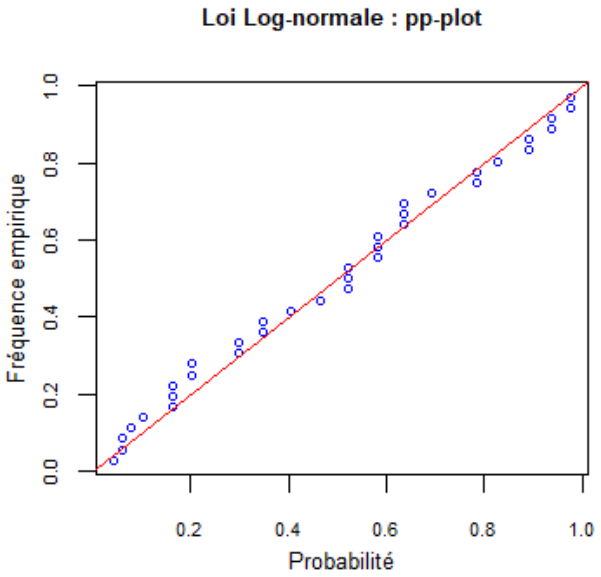
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

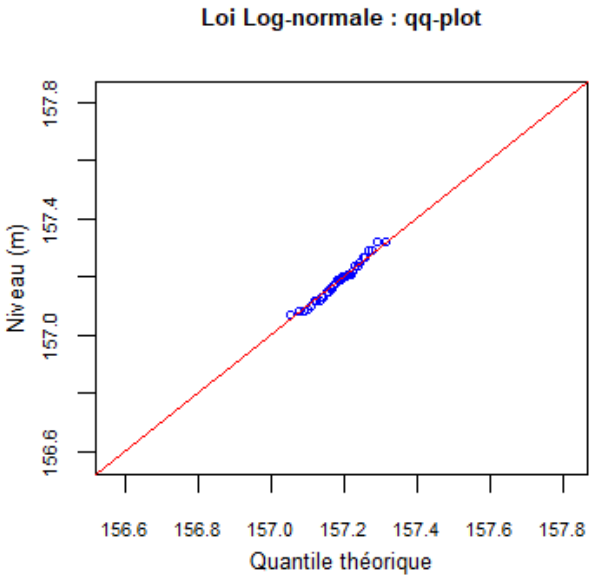
pvalue : 5.938e-03 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.327

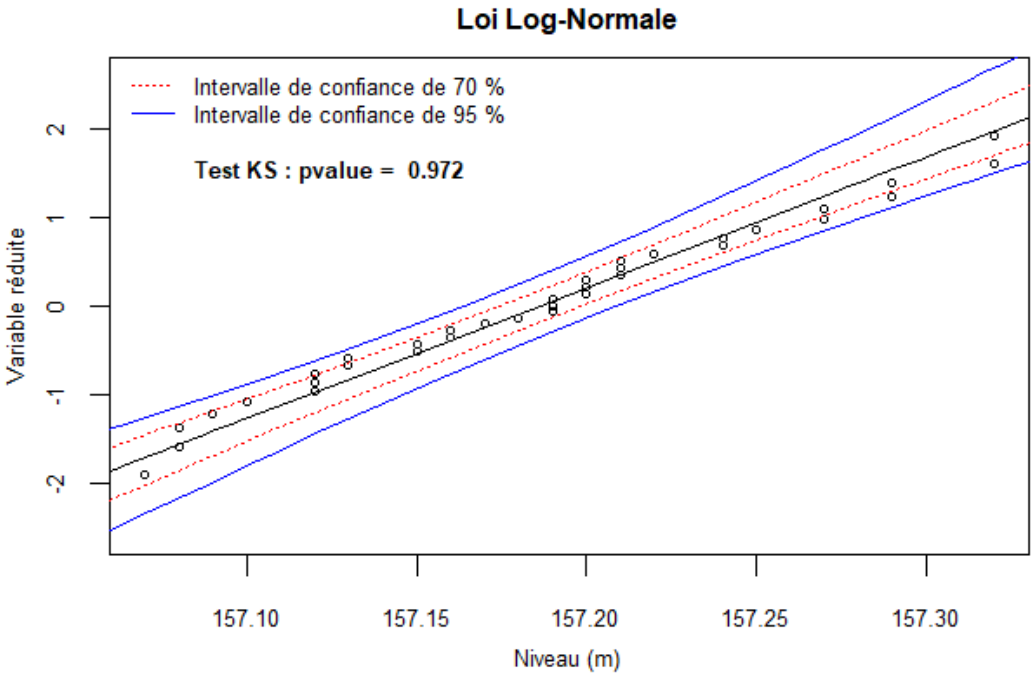
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0
1
2
3
4
5
157.05
157.10
157.15
157.20
157.25
157.30
157.35
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
157.10
157.15
157.20
157.25
157.30
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Probabilité

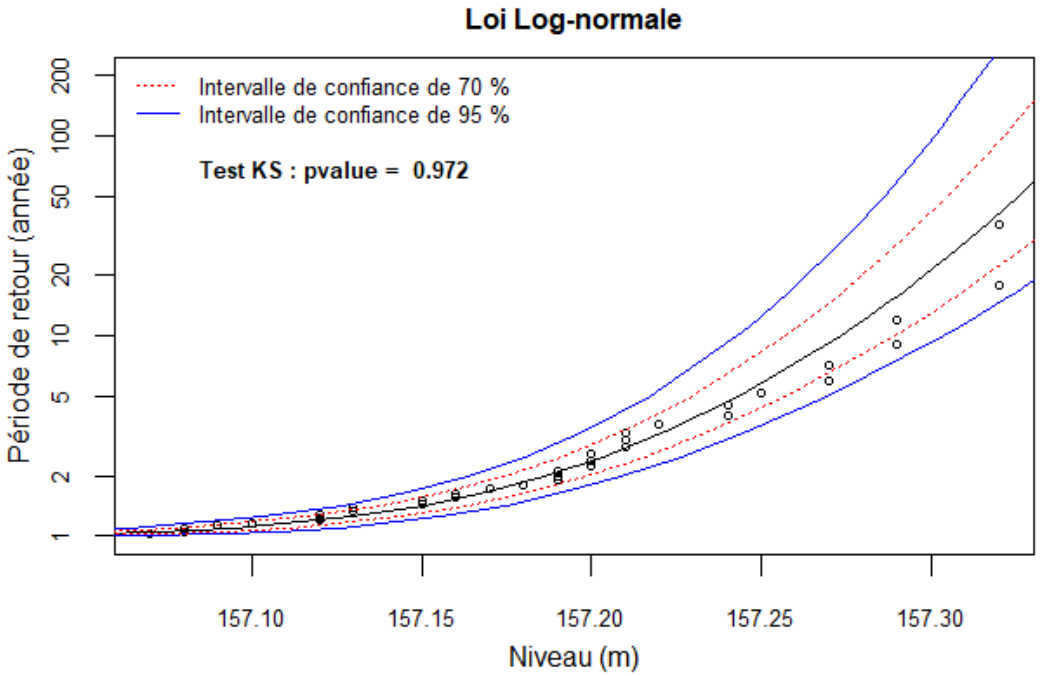

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
156.6
157.0
157.4
157.8
156.6
156.8
157.0
157.2
157.4
157.6
157.8
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 157.07	**5 ans humide : 157.24**
10 ans sec : 157.1	**10 ans humide : 157.27**
5 ans sec : 157.13	**20 ans humide : 157.3**
	50 ans humide : 157.33
	100 ans humide : 157.34

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation



Périodes de retour et quantiles correspondant

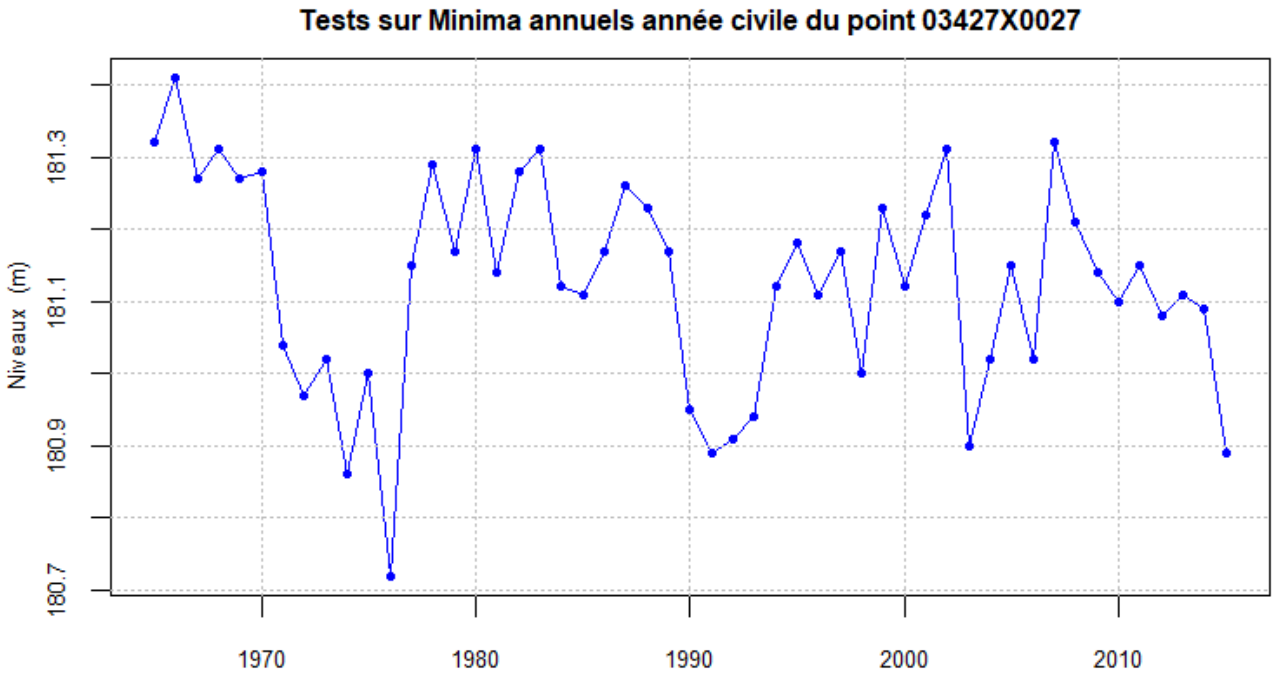
20 ans sec : 157.07	**5 ans humide : 157.24**
10 ans sec : 157.1	**10 ans humide : 157.27**
5 ans sec : 157.13	**20 ans humide : 157.3**
	50 ans humide : 157.33
	100 ans humide : 157.34

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

---

Pas d'influence sur les statistiques des années 2015 -2019 sur une tendance.

Piezo 03427X0027– analyse fréquentielle sur la Période 1965 – 2015



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 5.392e-02 corrigée (Hamed-Rao) : 1.516e-01

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 3.035e-01 et selon méthode Zhang 2.957e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.3

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.114

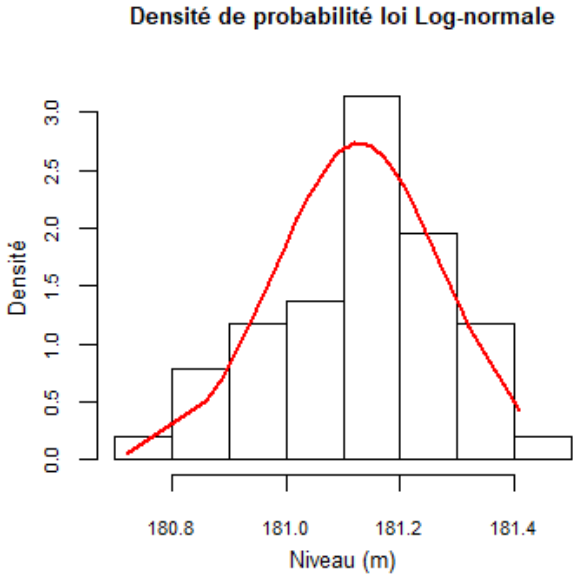
Test d'homogénéité de Wilcoxon

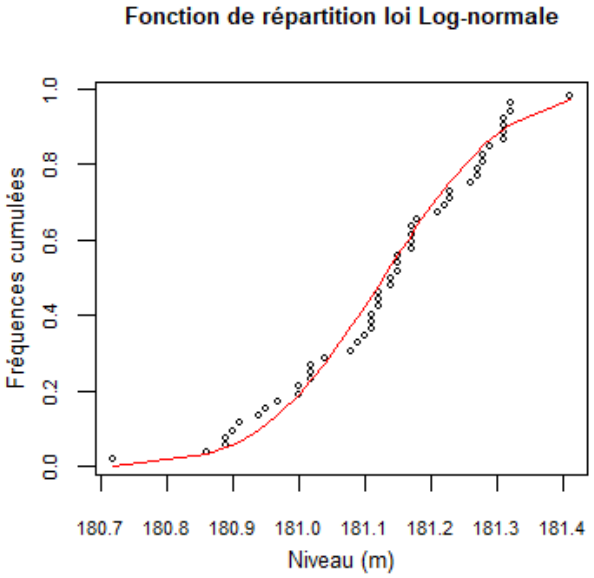
pvalue : 6.060e-02

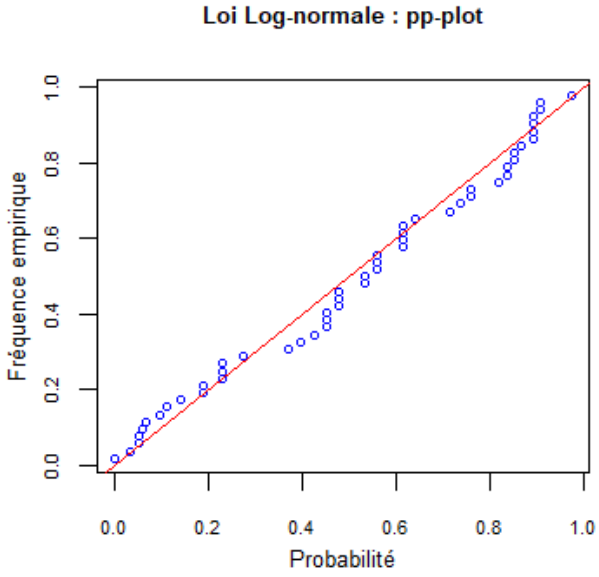
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

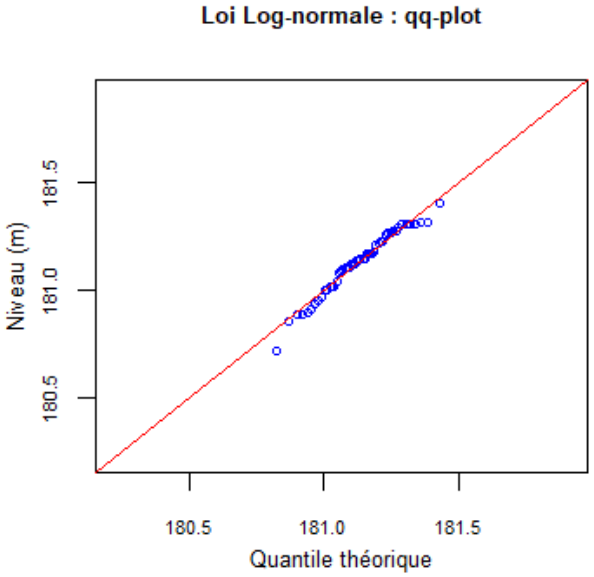
pvalue : 5.639e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.431

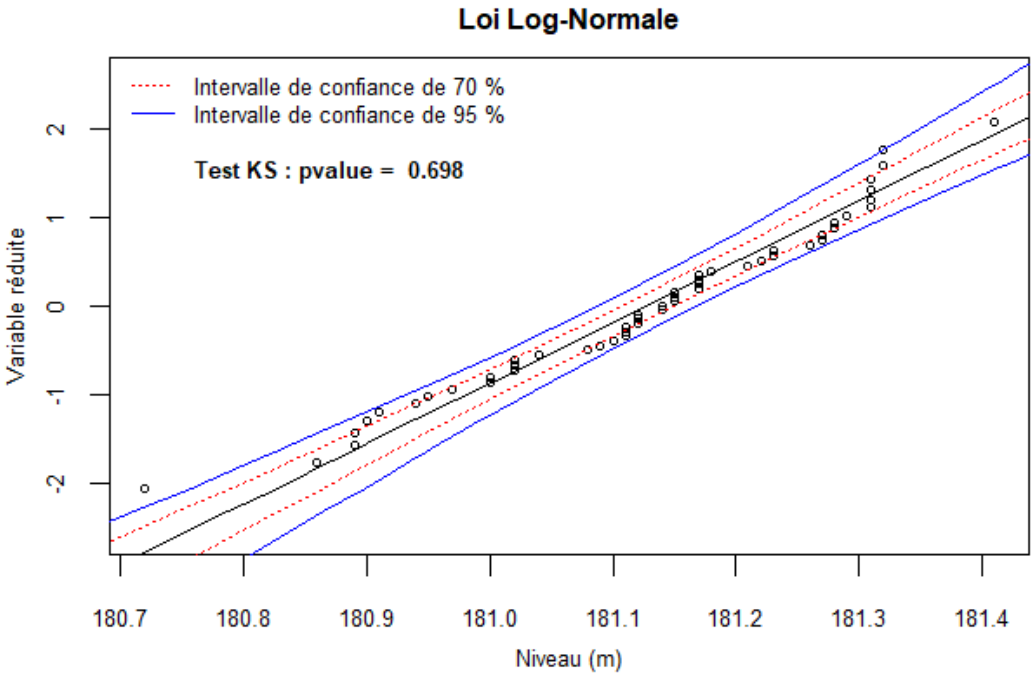
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
180.8
181.0
181.2
181.4
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
180.7
180.8
180.9
181.0
181.1
181.2
181.3
181.4
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Probabilité

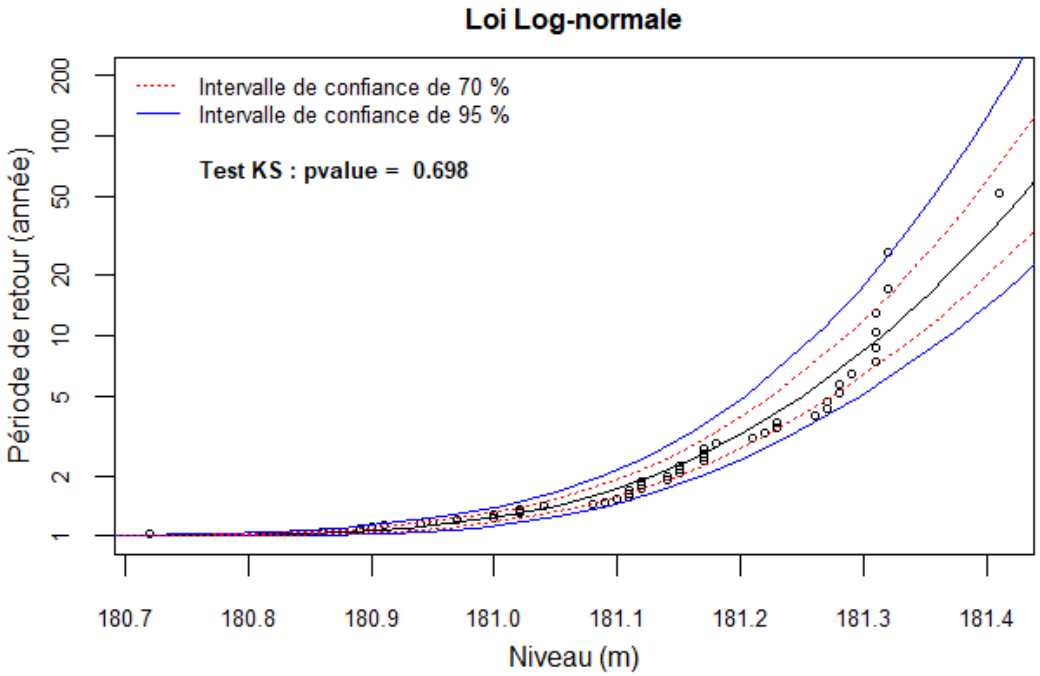

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
180.5
181.0
181.5
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 180.89	**5 ans humide : 181.25**
10 ans sec : 180.94	**10 ans humide : 181.31**
5 ans sec : 181	**20 ans humide : 181.37**
	50 ans humide : 181.43
	100 ans humide : 181.47

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

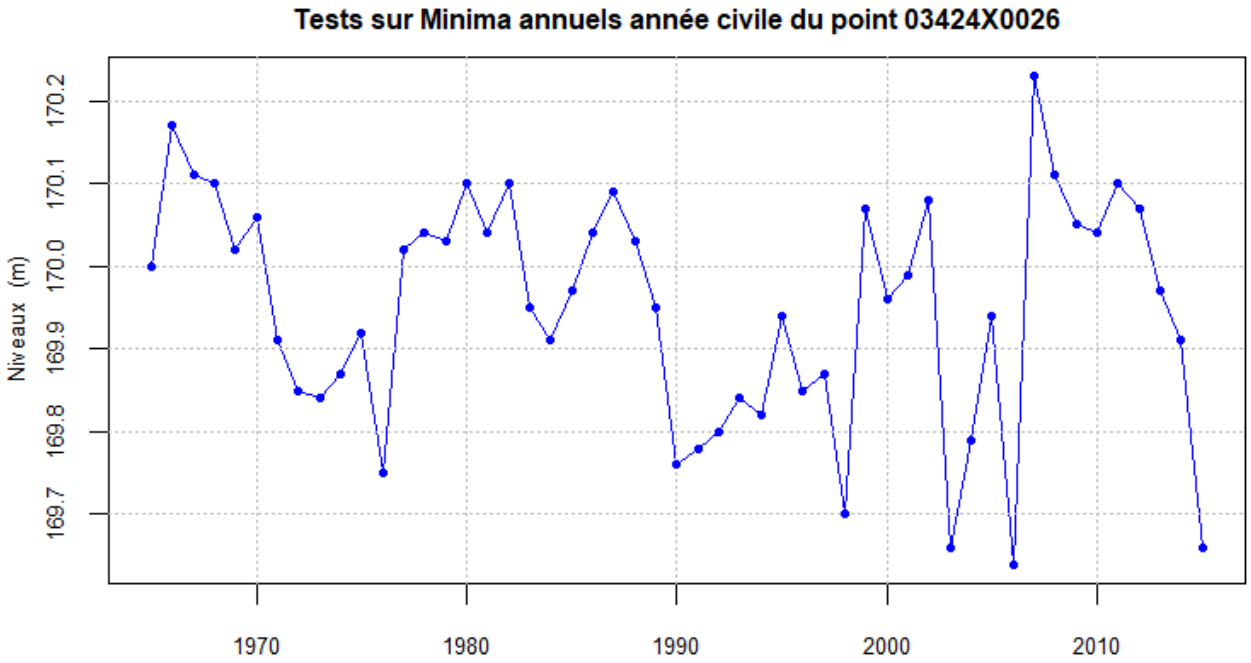


Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 180.89	**5 ans humide : 181.25**
10 ans sec : 180.94	**10 ans humide : 181.31**
5 ans sec : 181	**20 ans humide : 181.37**
	50 ans humide : 181.43
	100 ans humide : 181.47

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

Piezo 03424X0026– analyse fréquentielle sur la Période 1965 – 2015



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 2.905e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 4.282e-01

pvalue selon méthode Yue-Pilon : 3.277e-01 et selon méthode Zhang 3.277e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -0.2

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.207

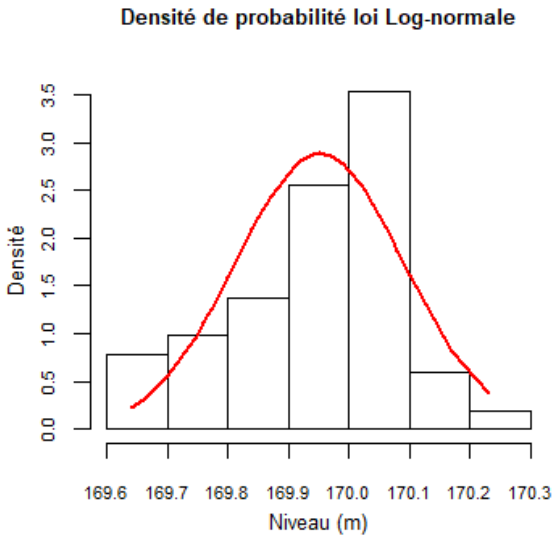
Test d'homogénéité de Wilcoxon

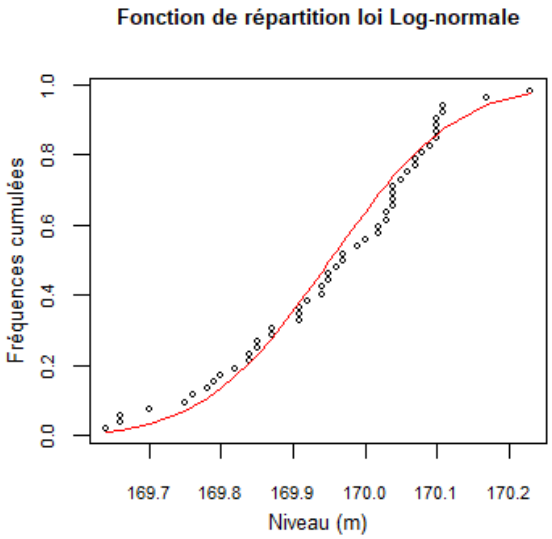
pvalue : 1.175e-01

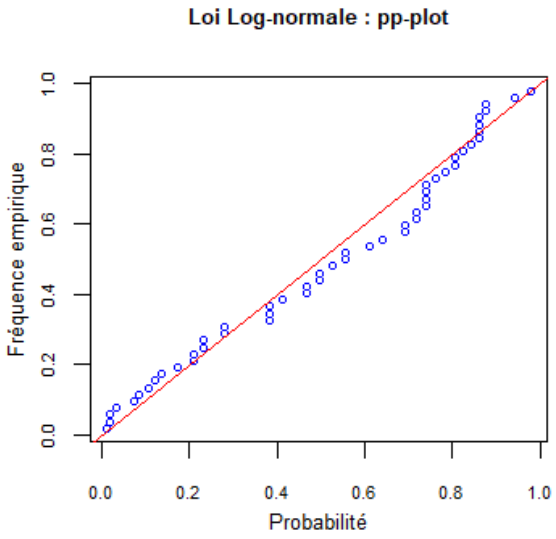
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

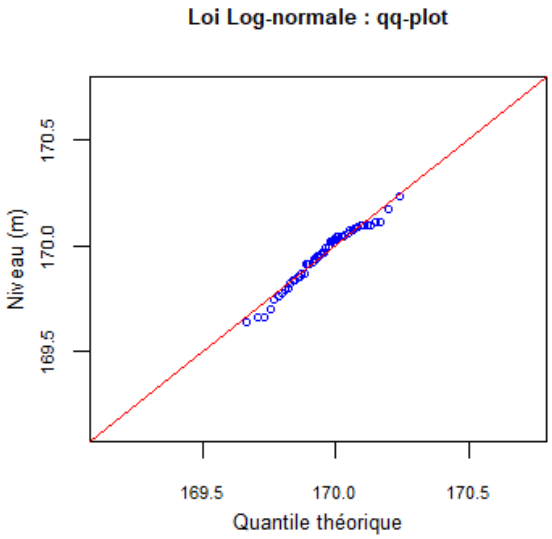
pvalue : 4.876e-05 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.324

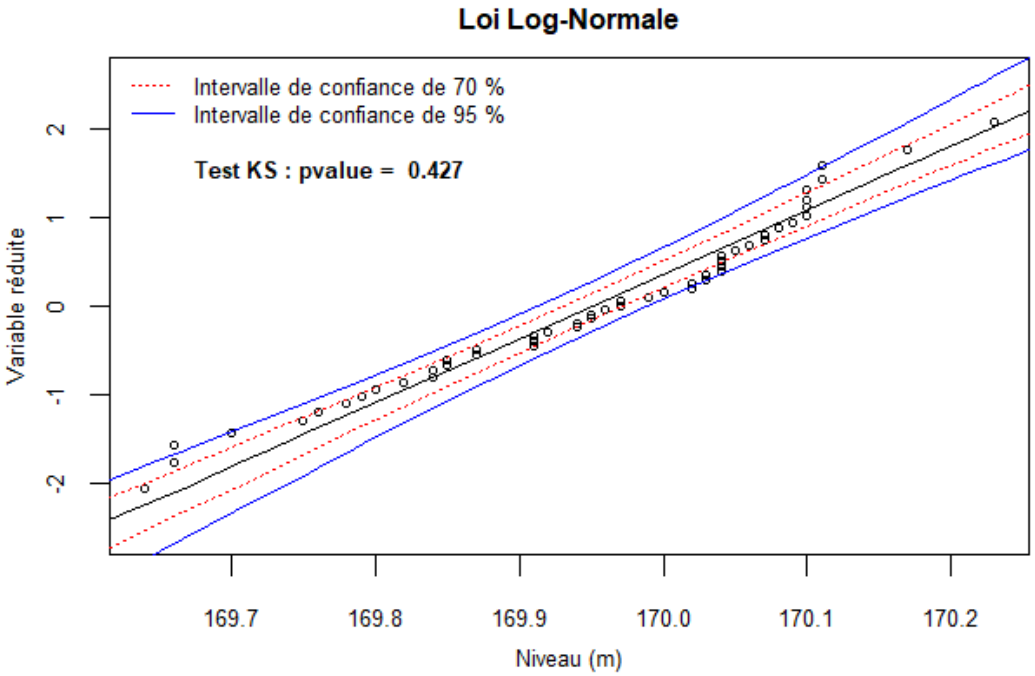
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettit sont rejetés au seuil de 5%


Densité de probabilité loi Log-normale
Densité
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
169.6
169.7
169.8
169.9
170.0
170.1
170.2
170.3
Niveau (m)


Fonction de répartition loi Log-normale
Fréquences cumulées
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
169.7
169.8
169.9
170.0
170.1
170.2
Niveau (m)


Loi Log-normale : pp-plot
Fréquence empirique
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
Probabilité

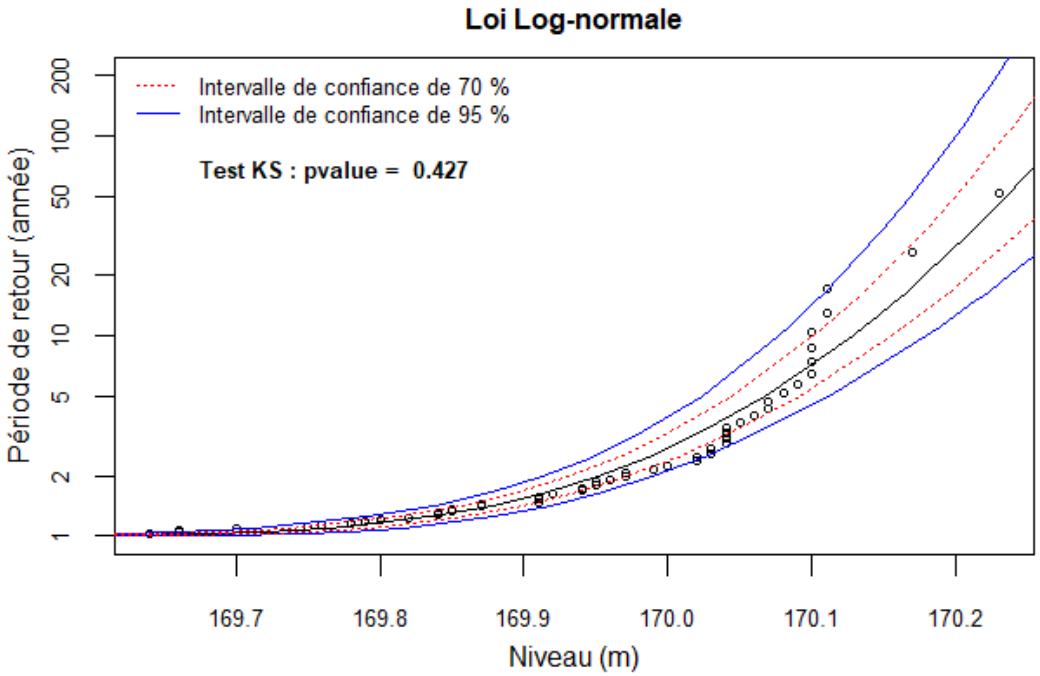

Loi Log-normale : qq-plot
Niveau (m)
169.5
170.0
170.5
Quantile théorique



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 169.72	**5 ans humide : 170.07**
10 ans sec : 169.77	**10 ans humide : 170.13**
5 ans sec : 169.83	**20 ans humide : 170.18**
	50 ans humide : 170.24
	100 ans humide : 170.27

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation



Périodes de retour et quantiles correspondant

20 ans sec : 169.72	**5 ans humide : 170.07**
10 ans sec : 169.77	**10 ans humide : 170.13**
5 ans sec : 169.83	**20 ans humide : 170.18**
	50 ans humide : 170.24
	100 ans humide : 170.27

En italique, périodes de retour > au nombre d'années d'observation

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

Direction régionale Grand Est
Délégation de Strasbourg
Parc Activités Porte Sud
Rue Pont du Péage – Bâtiment H1
67118 – GEISPOLSHEIM – France
Tél. : 03 88 77 48 90