

Document public

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
Mai 2018



PRÉFET
DE LA RÉGION
GRAND EST

DIRECTION RÉGIONALE
DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DU LOGEMENT
GRAND EST



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
Mai 2018

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2016-RGH-04

Élodie Giuglaris et Adrien Manlay
Avec la collaboration de
Christopher Agnus

Vérificateur :

Nom : Luc Arnaud

Fonction : Hydrogéologue

Date : 22/05/2018

Signature :



Approbateur :

Nom : Kevin Samyn

Fonction: Directeur régional délégué

Date : 21/09/2018

Signature :



PRÉFET
DE LA RÉGION
GRAND EST

DIRECTION RÉGIONALE
DE L'ENVIRONNEMENT,
DE L'AMÉNAGEMENT
ET DU LOGEMENT
GRAND EST

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Prélèvements, Impacts, Débit, Piézométrie, Phréatiques, Irrigation, AEP, Ried.

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

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, 93 p., 62 fig., 3 ann., 1 clé USB.

Synthèse

Dans l'axe du fossé rhénan, s'écoule une nappe majeure - la nappe d'Alsace - d'un intérêt patrimonial certain et offrant la plus grande ressource en eau souterraine européenne. Son abondance et sa relative facilité d'accès, à quelques mètres de profondeur seulement, ont entraîné son utilisation massive pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et les processus industriels.

Au niveau du Grand Ried, espace écologique remarquable, une intensification potentielle des assecs des ruisseaux « phréatiques » (dénomination locale) est présente ces dernières années. Ils ont été particulièrement observés durant l'été 2015. Or ces ruisseaux « phréatiques » sont directement alimentés par la nappe (d'où leur nom), elle-même influencée par les prélèvements majoritairement à usage agricole avec une densité très importante de puits de pompage dans cet espace.

Une récurrence de périodes de sécheresses sévères est envisagée avec le changement climatique sur les prochaines années. Cela provoquerait une baisse des débits des cours d'eau et entraînera de facto une sensibilité accrue des cours d'eau en particulier en période d'étiage.

Dans ce contexte, les différents acteurs, le SAGE III Nappe Rhin et les différentes administrations et institutions - DREAL, DDT, Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM), Région Grand Est, DRAAF - ont besoin de disposer d'éléments techniques pertinents sur les impacts des prélèvements existants et futurs sur les ressources en eaux souterraines en relation avec les assecs.

Cette étude fait partie du projet global « perspectives et cohabitations entre les différents usages de l'eau : de l'équilibre entre les usages agricoles à une gestion partagée des bassins versants » porté par la Région Grand Est, l'AERM et le BRGM. Ce projet comporte 3 axes réalisés respectivement par la chambre d'agriculture, la Région Grand Est et le BRGM.

Au niveau du Grand Ried, les travaux se sont organisés autour des objectifs suivants :

- dresser un état des lieux des connaissances relatives au fonctionnement de l'hydrosystème du Grand Ried ;
- quantifier l'impact des prélèvements dans la zone d'étude sur l'aquifère rhénan et les ruisseaux phréatiques ;
- à partir des éléments disponibles, proposer la mise en place d'indicateurs de gestion comme premier outil d'aide à la gestion collective des prélèvements. Ces derniers pouvant dans un second temps servir à optimiser les prélèvements en termes de répartition spatiale et temporelle.

L'analyse globale des données disponibles sur la zone d'étude a permis d'avancer les conclusions suivantes :

- les prélèvements sur la zone du Grand Ried sont majoritairement liés à l'irrigation lors de la période estivale. Cette période correspond dans le même temps à la période d'étiage des cours d'eau ;
- les données de prélèvements liés à l'irrigation sont globales et leur disparité tant du point de vue de la localisation que des débits et des volumes prélevés ne permettent de réaliser que des calculs d'ordres de grandeur ;

- l'analyse des chroniques piézométriques supérieures à 10 ans disponibles sur la nappe d'Alsace indique :
 - une stabilité globale de la piézométrie, notamment dans les zones humides,
 - des tendances à la baisse ou à la hausse plus locales,
 - un effet inertiel global de l'ordre d'un an,
 - la possibilité localement d'un effet inertiel plus conséquent, notamment en bordure de piémont.
- les variations piézométriques journalières liées à l'irrigation sont visibles sur les enregistrements réalisés par l'APRONA. En 2015 et 2017, on observe que les périodes d'irrigation peuvent engendrer selon les cas des baisses de niveaux piézométriques de 5 à 40 cm, selon que la période d'irrigation se soit poursuivie sans ou avec interruptions au cours de la saison. Ces valeurs permettent d'encadrer par la suite les simulations d'impacts sur le niveau piézométrique et sur les débits ;
- le repérage du démarrage des périodes d'irrigation sur les chroniques piézométriques a permis de mettre en lumière des changements de pente globale de la piézométrie lors des périodes d'irrigation. Un impact global de l'irrigation est donc présent sur le niveau piézométrique de la nappe ;
- une relation directe est présente entre le niveau piézométrique et les phréatiques. Un abaissement du niveau piézométrique a donc pour conséquence d'accroître la sensibilité des cours d'eau les plus vulnérables ;

Les simulations réalisées par modèle analytique indiquent :

- des rabattements du niveau piézométrique journaliers de l'ordre de 4 à 20 cm en fonction de la distance aux points d'irrigation et des milieux utilisés ;
- les niveaux de rabattement obtenus par ces simulations analytiques sont cohérents avec les rabattements réellement observés, en 2015 et en 2017 et sont du même ordre de grandeur que la différence de niveau piézométrique relevée sur le piézomètre de Rossfeld entre 2015 et 2017, et qui permet le passage d'une situation d'assec partiel en 2017 en assec généralisé des stations du réseau Onde de la zone d'étude ;
- les impacts simulés sur les cours d'eau phréatiques sont compris entre 1 et 5 m³/h sur quelques jours sur un tronçon de l'ordre de 500 mètres du cours d'eau ;
- il apparaît que dans le cas le plus pessimiste, les valeurs modélisées de débits prélevés sur un cours d'eau isolé peuvent atteindre 10 % du débit étiage minimum de cours d'eau tels que la Zembs, le Hanfgraben ou Bindernheim. Il est à noter qu'il existe par ailleurs de plus petits cours d'eau que ceux mentionnés, mais pour lesquels il n'existe pas de valeurs de référence du débit étiage minimum ;
- le déplacement entre forages, les estimations des volumes des prélèvements fournis par la chambre d'agriculture et les impacts piézométriques ne permettent pas de créer des scénarii réalistes à des échelles locales sur l'ensemble de la saison d'irrigation ;
- les effets cumulés sur le court terme étant réalistes, il est très fortement probable que sur l'ensemble de la période d'irrigation il y ait une multiplication sur un même cours d'eau des débits prélevés localement par tronçons.

En fonction de l'ensemble des résultats obtenus, les éléments suivants peuvent être avancés concernant la gestion des prélèvements et les indicateurs potentiels sur la nappe d'Alsace :

- la prise en compte du niveau piézométrique de la nappe d'Alsace en début de saison d'irrigation. En effet, la nappe d'Alsace fonctionnant avec une inertie globale de quelques mois à 1 an, la situation en début de saison d'irrigation doit permettre d'alerter en amont sur les risques d'assecs des cours d'eau, en dehors de la situation hydrologique de surface. Des premiers seuils piézométriques ont été proposés sur le piézomètre de Rossfeld (Piézomètre DCE) à partir des observations du réseau ONDE.

Concernant ce suivi piézométrique, Le piézomètre de Rossfeld permet d'estimer des premiers seuils piézométriques en cohérence avec les observations ONDE.

Les données utilisées sont les suivantes :

- amplitude journalière moyenne de 2 à 5 cm entraînant une incertitude autour des valeurs journalières de + ou moins 2,5 centimètres,
- seuil 1 = Niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 2 stations ONDE (sur 5) : 157,34 (soit une profondeur de 1,9 mètres),
- seuil 2 = Niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 3 stations ONDE : 157, 21 mNGF (soit une profondeur de 2,03 mètres),
- seuil 3 = Niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur les 5 stations ONDE : 157,10 (soit une profondeur de 2,14 mètres).

La date d'apparition du premier seuil est déterminante dans son interprétation. En effet, si ce niveau est atteint avant la mi-juillet, les niveaux piézométriques ne seront a priori pas suffisant pour couvrir la période de l'été (sauf événement exceptionnel comme les précipitations en juillet 2014). Il peut par conséquent constituer un seuil d'alerte ou de vigilance dès les mois de mai/juin au démarrage de la période d'irrigation.

Le seuil 2 correspond à un début d'impact sur les cours d'eau.

Le seuil 3 correspond aux assecs généralisés observés en 2015.

L'analyse de la chronique piézométrique du piézomètre de Rossfeld entre mars et septembre 2018 permet d'apporter des premiers éléments de fiabilité concernant les seuils piézométriques ainsi définis :

- la limitation des pompages en simultané sur une même zone, notamment à proximité des cours d'eau, devrait limiter les débits prélevés localement sur ces derniers. Un travail cartographique a ainsi été proposé englobant l'ensemble des cours d'eau prioritaires du SAGE III Nappe Rhin de la zone d'étude. Toutefois, cette gestion locale ne permettra a priori pas d'influer sur l'impact global de la piézométrie de la nappe d'Alsace. Or cette dernière peut être essentielle pour le maintien des cours d'eau les plus vulnérables liés à une simple dépression ou une résurgence de la nappe comme les ruisseaux phréatiques ;
- le renforcement potentiel du réseau d'observation des assecs, ONDE, qui ne dispose que de 6 stations de suivi sur l'ensemble de la zone d'étude. Le réseau ONDE, à vocations départementale et nationale, ne permet pas de suivre de manière précise l'évolution locale des zones humides, notamment en lien avec les prélèvements de l'irrigation qui peuvent être irréguliers ;

- au niveau de l'acquisition de données complémentaires, il est recommandé :
 - de réaliser un suivi des cours d'eau par jaugeages sur l'ensemble de la période d'irrigation en notant les différents pompages en cours. Seule cette acquisition permettra d'affiner les impacts sur les différents cours d'eau et d'aller au-delà des ordres de grandeur donnés dans le cadre de cette étude,
 - de mettre en place un suivi des prélèvements liés à l'irrigation permettant de relier les débits aux puits d'irrigation ;
- la mise en place de modèles de gestion, de types modèles maillés, pourrait constituer une phase ultérieure et un outil opérationnel permettant de piloter les différents types de prélèvements en fonction des usages (AEP, irrigation, et industriels). Toutefois, ce type de modèles ne pourra pas répondre à des objectifs de gestion locale (commune, cours d'eau ou zones humides) sans une acquisition de donnée poussée, tant du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques que des données de prélèvements. En effet, les données de l'agence de l'eau, axées sur les sièges sociaux des entreprises et limitées à des volumes annuels répartis potentiellement sur plusieurs points de prélèvements non identifiés, ne sont pas représentative à une échelle locale de la réalité des prélèvements. Or ce sont les seules données disponibles actuellement sur la zone d'étude.

Sommaire

1. Introduction	13
1.1. CONTEXTE	13
1.2. OBJECTIFS	13
1.3. PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE.....	14
2. Contexte de l'étude	15
2.1. LA RÉGION DU « GRAND RIED»	15
2.2. ASPECTS EAUX ET MILIEUX AQUATIQUES.....	16
2.2.1. Cours d'eau prioritaire (SAGE III Nappe Rhin)	16
2.2.2. Zones humides	17
2.2.3. Les zones humides remarquables du Ried Centre plaine	17
2.2.4. Les zones humides remarquables de la Bande Rhénane :	18
2.3. CLIMAT.....	19
2.4. SÉCHERESSES	20
2.4.1. Définitions.....	20
2.4.2. Caractéristiques climatiques et hydrologiques des dernières sécheresses sur la zone d'étude.....	21
2.5. HYDROGRAPHIE	26
2.5.1. L'III et ses affluents	26
2.5.2. Cours d'eau phréatiques	27
2.6. GÉOLOGIE ET PÉDOLOGIE.....	28
2.7. HYDROGÉOLOGIE : L'AQUIFÈRE RHÉNAN.....	31
3. État des lieux : prélèvements, évolutions quantitatives et observation des assecs ...	33
3.1. ÉLÉMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU GRAND RIED.....	33
3.1.1. Paramètres hydrodynamiques	33
3.1.2. Battements et profondeurs de la nappe	36
3.1.3. Influence des cours d'eau et recharges.....	38
3.1.4. Synthèse du fonctionnement de l'hydrosystème de la zone d'étude	38
3.2. PRÉLÈVEMENTS EN EAUX SOUTERRAINES.....	39
3.2.1. Les usages de l'eau souterraine dans la région du Grand Ried	39
3.2.2. Données disponibles.....	41
3.2.3. Prélèvements industriels dans la zone du Grand Ried	43
3.2.4. Prélèvements pour l'AEP dans la zone du Grand Ried	43

3.2.5. Prélèvements agricoles (irrigation) dans la zone du Grand Ried	44
3.2.6. Comparaison des débits prélevés pour l'AEP et l'irrigation sur le Ried Centre plaine (hors bande rhénane)	46
3.3. ANALYSE DES ASSECS SUR LES RUISSEAUX PHRÉATIQUES	47
3.3.1. Observation des assecs via le réseau ONDE (Observatoire National des Étiages)	47
3.3.2. Comparaison du niveau piézométrique et des assecs sur la période 2012/2017	49
3.3.3. Observations complémentaires	53
3.4. ANALYSE DES CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES : COMPORTEMENT DE LA NAPPE EN GÉNÉRAL ET EN PÉRIODE D'IRRIGATION	53
3.4.1. Analyses statistiques : tendances piézométriques et analyse du comportement général de la nappe	53
3.4.2. Analyse des chroniques piézométriques en période d'irrigation	57
4. Simulation de l'impact des pompages en eau souterraine	63
4.1. MÉTHODOLOGIE	63
4.1.1. Démarche générale	63
4.1.2. Modèles analytiques	63
4.1.3. Choix des simulations	64
4.1.4. Calage des paramètres et sensibilité des modèles	64
4.2. SCÉNARII DE POMPAGES	66
4.2.1. Prise en compte de l'irrigation	66
4.2.2. Prise en compte de l'AEP	68
4.3. RÉSULTATS	69
4.3.1. Aquifère homogène, sans effet des phréatiques ou autres cours d'eau	69
4.3.2. Aquifère homogène avec effet des phréatiques ou autres cours d'eau	71
4.3.3. Superposition des effets des forages et tableau de synthèses des débits prélevés sur les cours d'eau	76
4.3.4. Impact d'un forage AEP sur le débit des cours d'eau	78
5. Éléments de gestion des prélèvements	81
5.1. CARTE DE SYNTHÈSE DES IMPACTS HYDRAULIQUES	81
5.1.1. Précautions d'utilisation	81
5.1.2. Les différents impacts hydrauliques cartographiés	81
5.2. INDICATEURS PIÉZOMÉTRIQUES	84
5.2.1. Réseau piézométrique : perspectives et pré-propositions	84
5.2.2. Indicateurs piézométriques	85
5.2.3. Mise en perspective avec l'année 2018	86
6. Conclusions et perspectives	87
7. Bibliographie	91

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du périmètre d'étude et du Grand Ried (source : SAGE III Nappe Rhin).	14
Figure 2 : Topographie de la zone d'étude du Grand Ried.	15
Figure 3 : Cartographie de l'occupation du sol (d'après Corine Land Cover 2012).	16
Figure 4 : Cours d'eau prioritaires (SAGE III Nappe Rhin) et zones humides remarquables présents sur la zone d'étude.	18
Figure 5 : Températures et précipitations en normales mensuelles sur les stations de Colmar et Strasbourg.	19
Figure 6 : Cartographie de la pluviométrie normale annuelle (sources : modèles Aurelhy météo France).	20
Figure 7 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (période 1991-2010) entre septembre 2010 et juin 2012 sur la station de Colmar (Giuglaris et al. 2017, données : Météo-France).	22
Figure 8 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2015 sur la station de Colmar (données : Météo-France).	23
Figure 9 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2015 sur la station de Strasbourg (données : Météo-France).	23
Figure 10 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2017, sur la station de Colmar (données : Météo-France).	25
Figure 11 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2017, sur la station de Strasbourg Entzheim (données : Météo-France).	25
Figure 12 : Caractéristiques de l'III à son entrée et à sa sortie du Grand Ried (BANQUE HYDRO).	26
Figure 13 : Données de débits disponibles sur les ruisseaux phréatiques disponibles dans la banque hydro. Les valeurs comportent une incertitude de 10 à 30 %.	28
Figure 14 : Carte géologique des dépôts de surface du secteur d'étude (1/250 000). RGF démonstrateur Vosges-Fossé Rhénan.	29
Figure 15 : Cartographie des principales unités morphologiques de la petite région naturelle centre plaine Alsace (AARA, Sol conseil, 2004).	30
Figure 16 : Coupes ouest-est des unités morphologiques du Grand Ried du piémont au canal du Rhône au Rhin (extrait de Schmitt, 2001).	30
Figure 17 : Principaux paramètres hydrodynamiques disponibles dans la BRAR et la bibliographie sur la zone d'étude.	35
Figure 18 : Profondeur moyenne de la nappe calculée au droit des piézomètres présents sur la zone d'étude et profondeur en période de basses eaux par soustraction de la piézométrie régionale et d'un modèle numérique de terrain.	36
Figure 19 : Battement maximal du niveau statique sur la zone d'étude calculé à partir des chroniques piézométriques disponibles.	37
Figure 20 : Cartographie des volumes moyens annuels prélevés pour l'AEP et l'industrie sur les eaux souterraines entre 2008 et 2013 (sources : données redevances AERM)	39
Figure 21 : Cartographie des volumes moyens annuels prélevés pour l'irrigation entre 2008 et 2013 (sources : données redevances AERM).	40
Figure 22 : Répartition des prélèvements en eau souterraine entre les différents usages sur un période annuelle et en période d'irrigation (données BNPE, période 2008-2013).	41
Figure 23 : Données disponibles et utilisées pour l'analyse des prélèvements.	42

Figure 24 : Localisation des forages AEP.	43
Figure 25 : Profondeur des forages AEP présents sur la zone d'étude.	44
Figure 26 : Localisation des puits d'irrigations (DDT).	45
Figure 27 : Ordre de grandeur des débits horaires moyens prélevés pour l'AEP et l'irrigation par communes de la zone d'étude.	46
Figure 28 : Localisation des stations ONDE et occurrences des assecs sur la zone d'étude via le réseau ONDE.	48
Figure 29 : Synthèse des observations sur les stations ONDE de la zone d'étude durant la période 2012/2017.	49
Figure 30 : chroniques piézométriques des piézomètres du BSH à Rossefeld et Holtzwirh sur la période 2012/2017.	50
Figure 31 : Comparaison des campagnes d'observations ONDE et des niveaux piézométriques sur les étés 2015 et 2017.	53
Figure 32 : Chronique piézométrique au niveau de Sélestat.	54
Figure 33 : Tableau et cartographie des résultats des tests de tendances significatifs sur les chroniques piézométriques.	55
Figure 34 : Autocorrélogramme montrant une possible cyclicité sur 12 ans sur le piézomètre 03077X0026_249.	56
Figure 35 : exemples d'autocorrélogrammes montrant des inerties supérieures à 2 ans.	57
Figure 36 : Liste et localisation des piézomètres possédant des chroniques horaires (données APRONA)	58
Figure 37 : Chronique piézométrique au pas de temps horaire du 01/01/10 au 01/06/12 : piézomètre 03424X0552/F96-F (données ARPONA).	59
Figure 38 : Période d'irrigation de l'année 2010 perçue sur le piézomètre 03424X0552/F96-F.	59
Figure 39 : Exemple de chronique piézométrique : période d'irrigation de l'année 2011 et zoom sur le démarrage de l'irrigation du piézomètre 03424X0552/F96-F	60
Figure 40 : Périodes d'irrigations de 2015 et 2017 visibles sur le piézomètre 03423X0064/94A à Illhaeusern.	62
Figure 41 : Cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003). ..	64
Figure 42 : Comparaison des débits Q prélevés sur les cours d'eau dans deux cas de simulation : courbe verte = débit moyen constant de 40 m ³ /h ; courbe bleu = pompage de 80 m ³ /h durant 12 h et arrêt durant 12 h.	66
Figure 43 : Exemple de vue aérienne des surfaces cultivées et irriguées au sud de Mussig (Orthophotographie IGN).	68
Figure 44 : Synthèse des rabattements en cm.	69
Figure 45 : Courbes des rabattements à différentes distances du puits de pompage dans le cas d'un pompage isolé sans influence d'un cours d'eau.	70
Figure 46 : Simulations sur une période d'un mois d'un équivalent forage.	71
Figure 47 : Localisation du piézomètre 03424X0552/P96-F par rapport aux forages d'irrigation.	71
Figure 48 : Configuration de la simulation et résultat de la simulation du niveau piézométrique (W_4) à 200 mètres avec prise en compte d'un cours d'eau de type phréatique au milieu (100 mètres). Q correspond au débit au puits d'irrigation.	72
Figure 49 : Configuration de la simulation et résultats de la simulation du niveau piézométrique (W_4) à 1000 mètres avec prise en compte d'un cours d'eau de type phréatique au milieu (500 mètres). Q correspond au débit au puits d'irrigation.	73
Figure 50 : Simulation du débit prélevé (Q_4) sur un cours d'eau situé à 20 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.	74

Figure 51 : Simulation du débit prélevé (Q ₄) sur un cours d'eau situé à 500 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.	74
Figure 52 : Simulation du débit prélevé (Q ₄) sur un cours d'eau situé à 1 000 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.	74
Figure 53 : Exemple de simulation du débit prélevé sur un cours d'eau situé à 20 mètres d'un forage d'irrigation, dans le cas d'un débit moyen.	75
Figure 54 : Tableau des résultats des débits prélevés sur les cours d'eau.	75
Figure 55 : Tableau des résultats des débits moyens prélevés sur les cours d'eau au bout d'un mois.	76
Figure 56 : Tableau des résultats des débits moyens prélevés sur les cours d'eau en fonction de différents scénarii de pompage.	76
Figure 57 : Visualisation des pompes situées au bord d'un phréatique.	77
Figure 58 : Simulation du débit prélevé sur l'Hanfgraben par le forage AEP d'Obere Erlen.	78
Figure 59 : Simulation du débit prélevé sur l'Hanfgraben par le forage AEP de Mussig.	79
Figure 60 : Modélisation du rabattement piézométrique (haut) et du débit prélevé sur un cours d'eau isolé (bas) en fonction de la distance d'un point de prélèvement au cours d'eau, pour différentes durées de pompage.	82
Figure 61 : Carte de synthèse des sensibilités aux prélèvements en eaux souterraines dans le Grand Ried.	83
Figure 62 : Chronique du piézomètre 03081X0025-23 à Rossfeld, sur la période de mars à septembre 2018.	86

Liste des annexes – Clé USB

Annexe 1 : Comptes rendus des visites de terrain.	93
Annexe 2 : Analyses statistiques.	93
Annexe 3 : Chroniques piézométriques au pas horaires sur la période 2015/2017.	93

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Dans l'axe du fossé rhénan, s'écoule une nappe majeure - la nappe d'Alsace - d'un intérêt patrimonial certain et offrant la plus grande ressource en eau souterraine européenne. Son abondance et sa relative facilité d'accès, à quelques mètres de profondeur seulement, ont entraîné son utilisation massive pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture et les processus industriels.

Au niveau du Grand Ried, espace écologique remarquable, une intensification potentielle des assecs des ruisseaux « phréatiques » (dénomination locale) est présente ces dernières années. Ils ont été particulièrement observés durant l'été 2015. Or ces ruisseaux « phréatiques » sont directement alimentés par la nappe (d'où leur nom), elle-même influencée par les prélèvements majoritairement à usage agricole avec une densité très importante de puits de pompage dans cet espace.

Une récurrence de périodes de sécheresses sévères est envisagée avec le changement climatique sur les prochaines années. Cela provoquerait une baisse des débits des cours d'eau et entraînera de facto une sensibilité accrue des cours d'eau en particulier en période d'étiage.

Dans ce contexte, les différents acteurs le SAGE III Nappe Rhin et les différentes administrations et institutions - DREAL, DDT, Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM), Région Grand Est, DRAAF - ont besoin de disposer d'éléments techniques pertinents sur les impacts des prélèvements existants et sur les ressources en eaux souterraines.

Cette étude fait partie du projet global « perspectives et cohabitations entre les différents usages de l'eau : de l'équilibre entre les usages agricoles à une gestion partagée des bassins versants » porté par la Région Grand Est, l'AERM et le BRGM. Ce projet comporte 3 axes réalisés respectivement par la chambre d'agriculture, la Région Grand Est et le BRGM.

1.2. OBJECTIFS

Les objectifs du projet sont de :

- dresser un état des lieux des connaissances relatives au fonctionnement de l'hydrosystème du Grand Ried ;
- quantifier l'impact des prélèvements dans la zone d'étude sur l'aquifère rhénan et les ruisseaux phréatiques ;
- à partir des éléments disponibles, proposer la mise en place d'indicateurs de gestion comme premier outil d'aide à la gestion collective des prélèvements. Ces derniers pourront dans un second temps servir à optimiser les prélèvements en termes de répartition spatiale et temporelle.

Une réorientation des axes de travail initiaux a été réalisé en fonction de l'évolution du projet. Ainsi, l'analyse des données existantes à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude a été privilégié pour quantifier l'impact des prélèvements sur les ruisseaux phréatiques.

Toutefois, la qualité et le nombre de données, notamment de prélèvements, n'ont pas permis de traiter certains aspects initialement prévu, notamment la mise en place d'indicateurs piézométriques et/ou hydrométriques précis. D'autres perspectives d'indicateurs ont été proposés pour répondre aux besoins de gestion des phréatiques.

1.3. PÉRIMÈTRE D'ÉTUDE

Le périmètre géographique de l'étude correspond à une partie de la région du Grand Ried - centre plaine (Figure 1). Il s'étend :

- depuis le nord du Haut-Rhin (Riedwihr, Jebnheim) jusqu'à Erstein ;
- du Rhin jusqu'à la route nationale 86 (RN83).

Le périmètre géographique comprend deux zones globalement séparées par le canal du Rhin au Rhône :

- le Ried Centre Alsace qui correspond à la dépression encadrant l'III sur laquelle est concentrée la majorité des investigations de cette étude ;
- la « bande rhénane », dont l'hydrologie est contrôlée par le Rhin et une forte anthropisation (gestion des canaux, barrages,...).

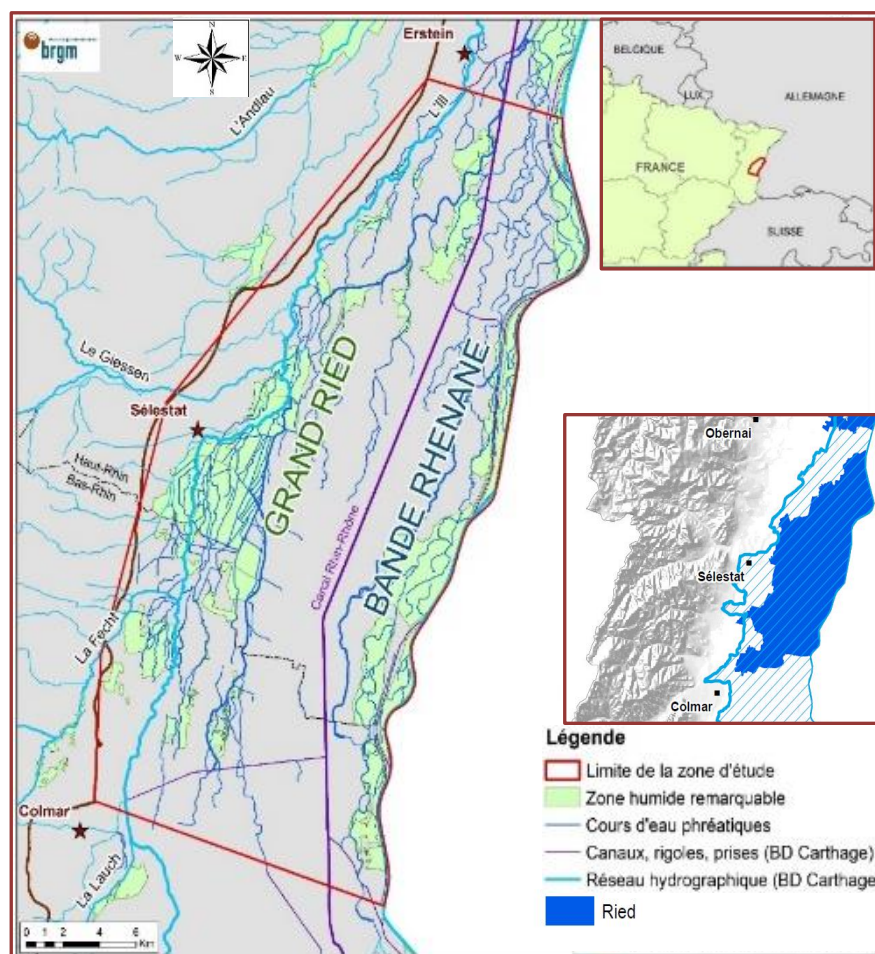


Figure 1 : Localisation du périmètre d'étude et du Grand Ried
(source : SAGE III Nappe Rhin).

L'intégralité de la zone d'étude se situe dans le SAGE III-Nappe-Rhin.

2. Contexte de l'étude

2.1. LA RÉGION DU « GRAND RIED »

Encadrée par l'Il et le Rhin, l'entité naturelle du Grand Ried est la plus vaste zone humide de vallée fluviale d'Europe occidentale (250 km² environ). Elle correspond à un secteur alluvial très complexe, s'étendant largement sur la rive gauche du Rhin. 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 (cf. Figure 2).

La topographie au sein de la zone d'étude est marquée par une relativement vaste dépression encadrant la rivière de l'Il et un plateau au niveau du canal du Rhône au Rhin.

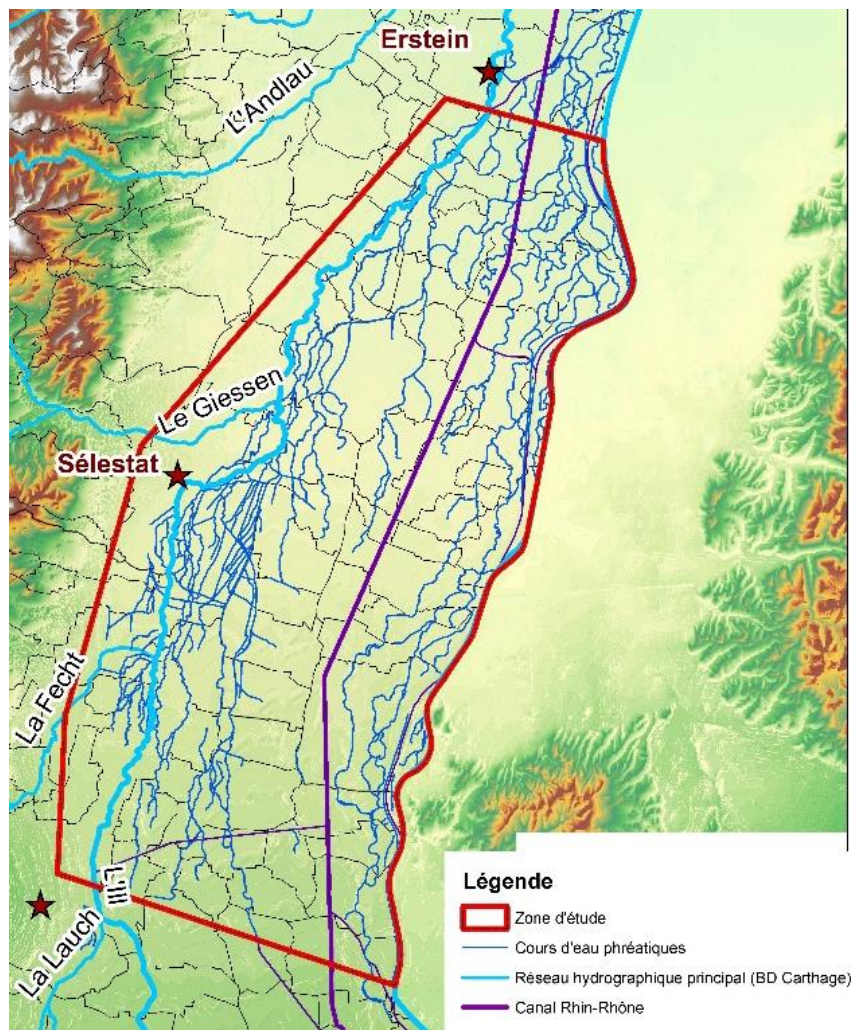


Figure 2 : Topographie de la zone d'étude du Grand Ried.

La zone est marquée par une occupation du sol à majorité de surfaces agricoles. La répartition des différents types de surfaces est visible sur la cartographie disponible ci-après (Figure 3).

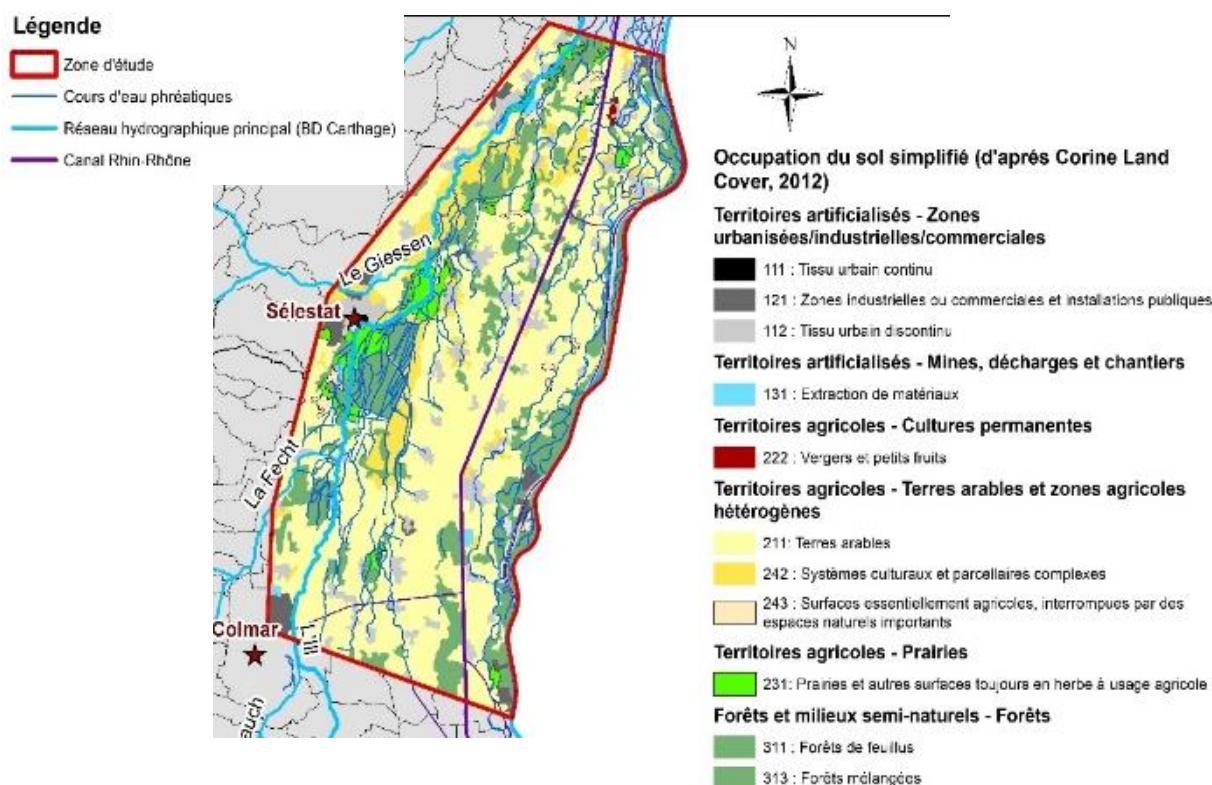


Figure 3 : Cartographie de l'occupation du sol (d'après Corine Land Cover 2012).

2.2. ASPECTS EAUX ET MILIEUX AQUATIQUES

L'intégralité du Grand Ried appartient aux SAGE suivants :

- Ill-Nappe-Rhin pour la zone du Grand Ried et la bande rhénane ;
- la partie aval du SAGE Giessen-Lièpvrette pour une partie ouest du Grand Ried.

2.2.1. Cours d'eau prioritaire (SAGE III Nappe Rhin)

Le SAGE fixe un objectif de préservation des cours d'eau les plus sensibles (cours d'eau prioritaires) de tout prélèvement d'eau ainsi que de tout rejets d'eaux usés, épurés ou non. L'enjeu est la préservation du fonctionnement écologique optimal du réseau hydrographique.

Ainsi la disposition ESUP-D11 du SAGE INR (disposition de mise en compatibilité) impose de : « Protéger les cours d'eau à préserver prioritairement de tout prélèvement d'eau ainsi que de tout rejet d'eaux usées, épurées ou non. Toute intervention dans ces cours d'eau doit avoir comme objectif l'amélioration de la fonctionnalité du cours d'eau et des milieux alluviaux associés [...] ».

Et l'article 6 du règlement du SAGE interdit les rejets polluants dans les cours d'eau à préserver en priorité.

La zone d'étude comporte une forte densité de cours d'eau prioritaire du SAGE III Nappe Rhin (cf. Figure 4).

L'ensemble des cours d'eau prioritaires du SAGE III Nappe Rhin correspondent aux ruisseaux phréatiques du périmètre géographique de cette étude.

2.2.2. Zones humides

Des zones à dominantes humides sont présentes sur la quasi intégralité du secteur d'étude. Elles regroupent des forêts et fourrés, terres arables et prairies.

Pour le SDAGE Rhin-Meuse 2016-2021 (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux), les **zones humides remarquables** « *abritent une biodiversité exceptionnelle et présentent un état écologique préservé a minima. Elles correspondent aux zones humides intégrées* :

- dans les réserves naturelles nationales ou régionales ;
- dans les Espaces Naturels Sensibles (ENS) ou les Zones Humides Remarquables (ZHR) désignés par les Départements ;
- ou dans les Zones naturelles d'intérêt floristique et faunistique (ZNIEFF), dans les sites Natura 2000 ou dans les sites concernés par un arrêté de protection de biotope pour les départements non dotés d'ENS ou de zones humides remarquables désignés.

« *Leur appartenance à ces zones ou à ces inventaires leur confère leur caractéristique de zone humide remarquable* ».

Au niveau du SAGE III Nappe Rhin (article 3 du règlement du SAGE), les objectifs sont de :

- préserver les zones humides remarquables et dans la mesure du possible les zones humides ordinaires ;
- maîtriser l'occupation des sols dans les zones humides remarquables.

La zone d'étude compte ainsi 44 zones humides remarquables recensés dans le SAGE III Nappe Rhin (cf. *Figure 4*), aux typologies différentes et réparties entre le Ried centre plaine et la bande rhénane. Ces secteurs sensibles sont prioritaires en terme de préservation des milieux (plan de gestion du SAGE III Nappe Rhin).

2.2.3. Les zones humides remarquables du Ried Centre plaine

Le Ried Centre plaine comporte 33 zones humides remarquables qui s'étendent sur 12 360 ha, soit environ 123 km².

Ces zones humides remarquables peuvent être regroupées en trois secteurs : le **Ried Nord**, le **Ried Centre/Ilwald** et le **Ried Sud**.

Le secteur Nord comprend 9 zones humides remarquables situées entre Osthause et Muttersholtz. C'est le secteur qui comprend le plus de parties boisées, malgré la dominance des surfaces cultivées.

Le secteur Centre/Ilwald s'étend de Hilsenheim à Guémar et contient 8 zones humides remarquables dont l'Ilwald. La Forêt d'Ilwald est la plus grande zone humide remarquable du Grand Ried. Elle se situe au sud-est de Sélestat, en rive droite de l'Il et couvre 1 482 ha.

Le secteur Sud du Grand Ried s'étend de Guémar à la zone industrielle de Colmar et possède 13 zones humides remarquables de petite taille. Son paysage est principalement composé d'étendues agricoles, mis à part la forêt communale de Colmar.

2.2.4. Les zones humides remarquables de la Bande Rhénane :

La Bande Rhénane compte 5 437 ha de zones humides remarquables, soit environ 54,3 km².

Il s'agit principalement de forêts alluviales établies sur la rive gauche du Rhin telles que la forêt de Marckolsheim, la forêt de Marckolsheim et Schoenau, la forêt de Daubensand. Des îles boisées sont également classées comme zones humides remarquables : l'île de Marckolsheim, l'île de Rhinau et l'île de Gerstheim.

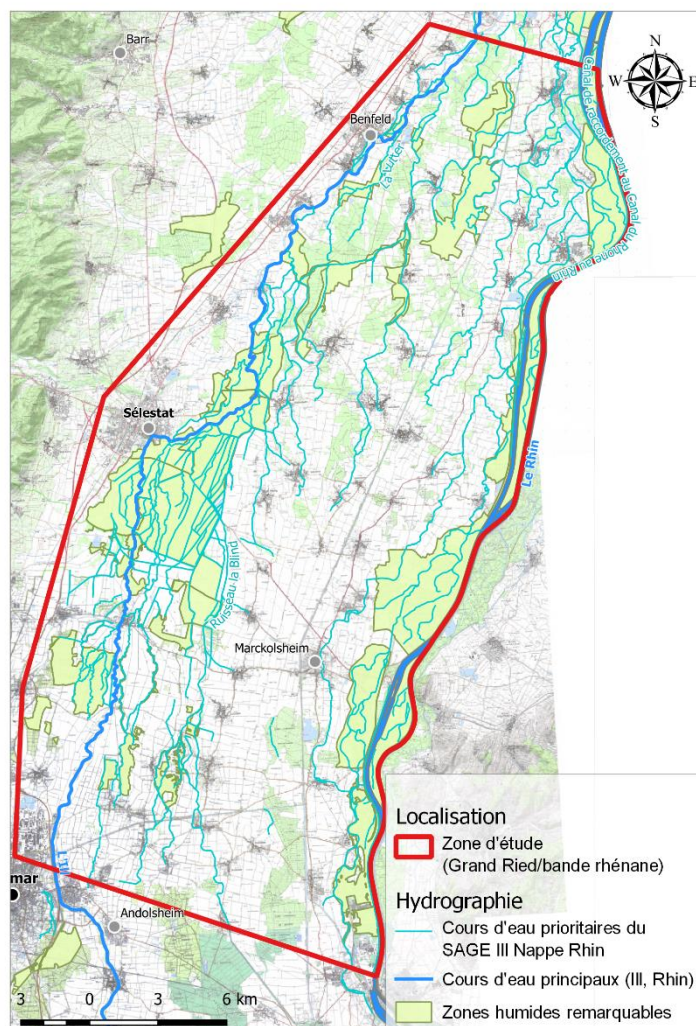


Figure 4 : Cours d'eau prioritaires (SAGE III Nappe Rhin) et zones humides remarquables présents sur la zone d'étude.

2.3. CLIMAT

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 5 et 6). 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 (cf. Figure 6)

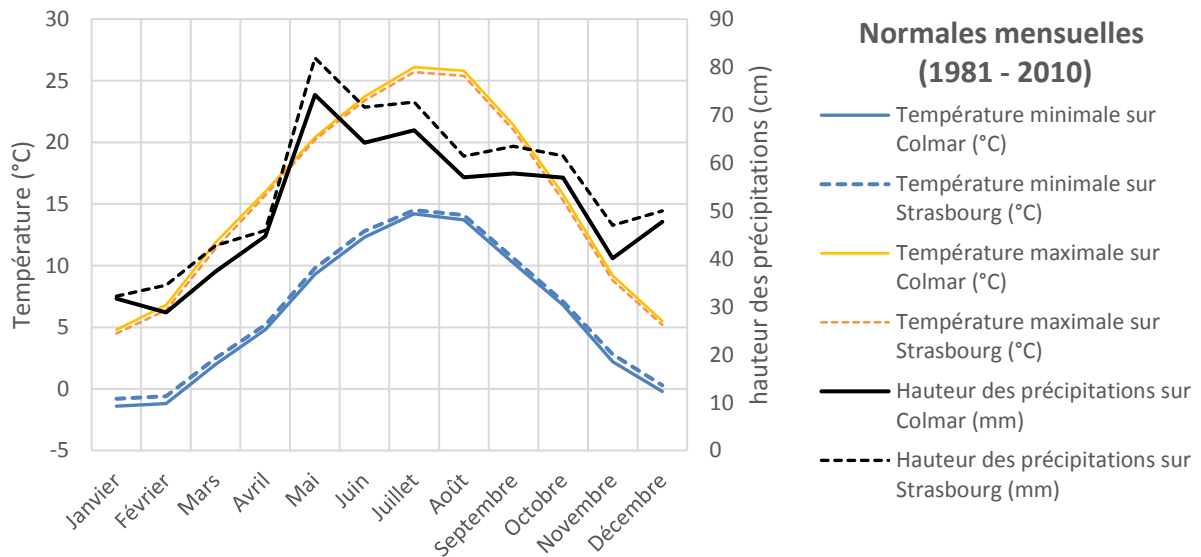


Figure 5 : Températures et précipitations en normales mensuelles sur les stations de Colmar et Strasbourg.

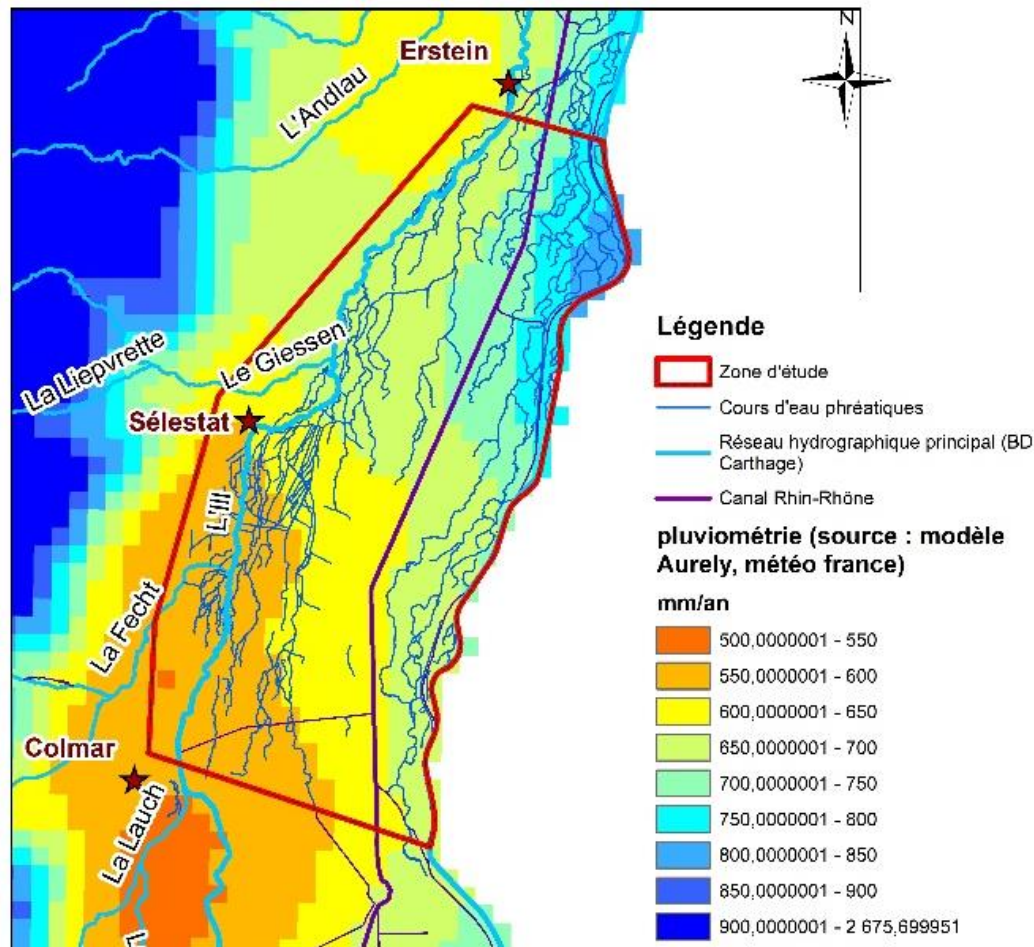


Figure 6 : Cartographie de la pluviométrie normale annuelle (sources : modèles Aurelhy météo-France).

La température moyenne annuelle est d'environ 11 °C sur l'ensemble de la zone d'étude. La température minimale mensuelle moyenne est située en janvier (1 °C) tandis que la température maximale moyenne mensuelle est atteinte en juillet (20 °C).

2.4. SÉCHERESSES

2.4.1. Définitions

En fonction du type de ressource affectée ou de l'activité économique impactée, plusieurs définitions peuvent être données au terme de sécheresse. Celle-ci peut notamment évoluer sous l'augmentation de la pression démographique et des activités humaines.

Dans le cadre de cette étude, trois types de sécheresses peuvent être abordés :

- la sécheresse agricole : elle correspond à un déficit d'eau dans le sol utilisable par les plantes, notamment aux périodes de croissances de ces dernières. Ce phénomène de déficit d'ordre saisonnier est lié à la pluviométrie locale, auxquelles peuvent s'ajouter des fortes chaleurs ou des vents asséchants le sol ;

- la sécheresse des eaux de surface : elle correspond à un déficit des débits des cours d'eau par rapport aux normales saisonnières jusqu'au cas extrême où se produit l'assèchement des rivières pérennes. Ce phénomène est lié à un déficit pluviométrique local ou régional sur des durées saisonnières. Il peut être renforcé par des fortes chaleurs et/ou un déficit d'apport des eaux souterraines si la sécheresse affecte cette dernière partie ;
- la sécheresse des eaux souterraines : elle correspond à un déficit de recharge (annuel ou pluriannuel) qui se traduit sur le régime naturel des nappes, jusqu'aux cas extrêmes de l'assèchement des sources pérennes ou l'assèchement des forages dû à l'abaissement des niveaux piézométriques. Le déficit de la recharge peut avoir des origines complexes liées à la nature de l'aquifère analysé.

Les différents types de sécheresses peuvent être interconnectés. Toutefois l'inertie des différents niveaux du système hydrologique peut entraîner des différences de perception sur une même période en fonction de la partie étudiée.

2.4.2. Caractéristiques climatiques et hydrologiques des dernières sécheresses sur la zone d'étude

Les périodes de sécheresses hydrologiques remarquables sur les dix dernières années sont 2011, 2015, 2017. L'analyse des éléments climatiques et hydrologiques remarquables de chaque sécheresse sont repris ci-dessous. Les données hydrométriques sont extraites des bulletins de suivi d'étiage et des communications de la DREAL Grand Est.

a) En 2011

Du point de vue climatique (Figure 7) :

- l'année a été structurée par un printemps chaud et sec, un mois de juillet frais et pluvieux et un épisode de chaleur fin septembre début octobre. En effet, l'année 2011 a commencé de manière déficitaire avec un mois de janvier marqué par un déficit moyen sur l'Alsace de 25 %. Celui-ci est plus important au niveau de la zone de Colmar avec un déficit de 44 %. Ce déficit s'est prolongé jusqu'au mois de mai soit sur la période potentielle de recharge des aquifères ;
- sur la station de Colmar, le déficit annuel (janvier à janvier) est de 27 % ;
- les caractéristiques de cette sécheresse sont :
 - le nombre de mois en continu déficit pluviométrique sur la période janvier à mai,
 - les déficits pluviométriques importants de janvier à mai, de 44 %, 42 %, 10 %, 83 % et 42 % respectivement. Cette période s'enchaîne sur un été pluvieux permettant un apport lors des périodes de fortes demandes agricoles et touristiques.

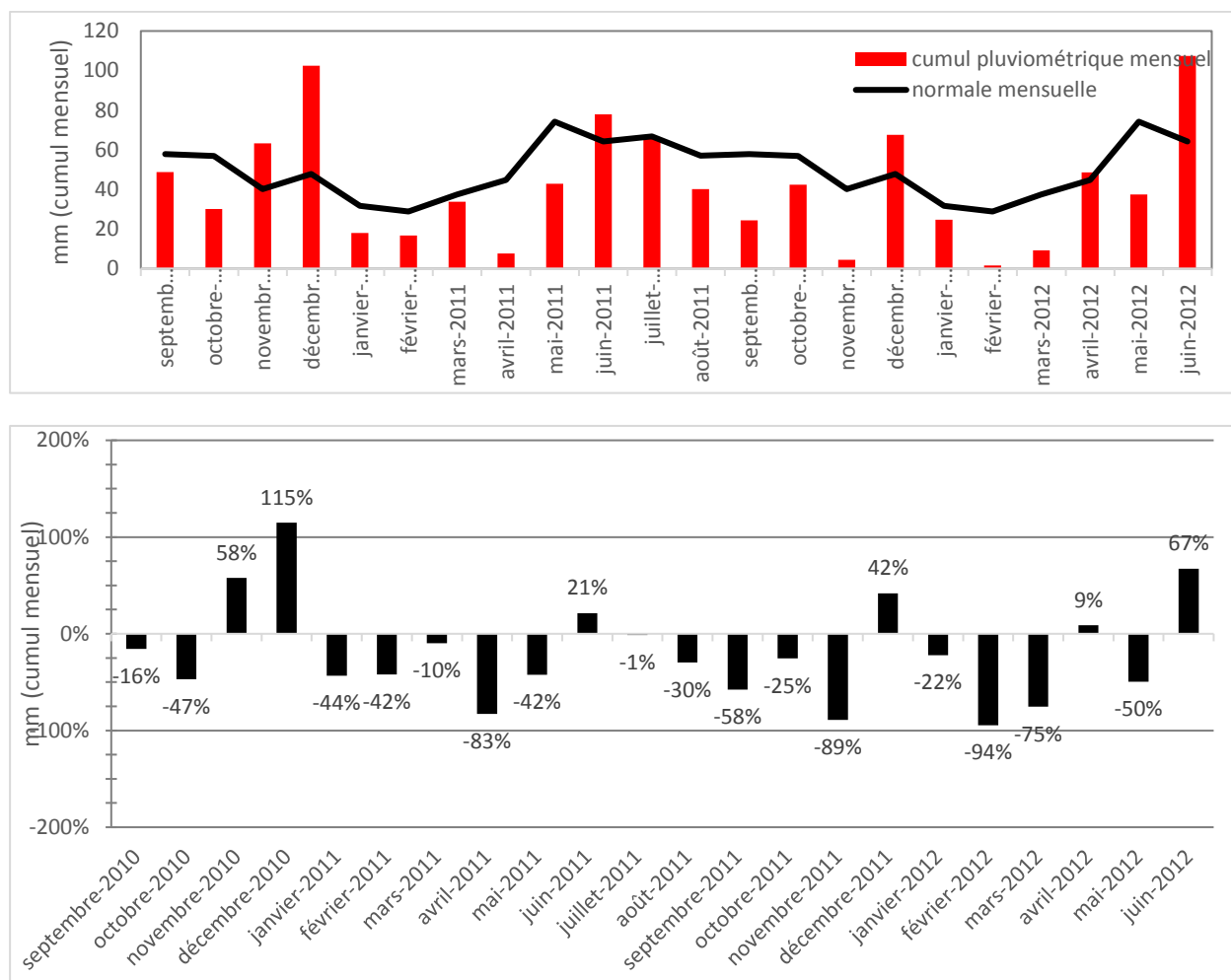


Figure 7 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (période 1991-2010) entre septembre 2010 et juin 2012 sur la station de Colmar (Giuglaris et al. 2017, données : Météo-France).

Du point de vue hydrologique :

- le déficit a été ressenti dès le mois de février 2011 avec un déficit de 70 % des volumes sur les rivières vosgiennes. Ce déficit se prolonge sur mars avec l'atteinte localement de débits inférieurs aux niveaux atteints en 1976 (référence historique en terme d'étiage). Cette tendance se poursuit en avril et mai ;
- l'arrivée des pluies en juin a permis de stabiliser les baisses de débit sans toutefois permettre un retour à la normale. Le déficit a repris à l'automne.

b) En 2015

Du point de vue climatique (Figures 8 et 9) :

- l'année 2015 a été marquée par deux vagues de chaleur en juillet et une faible pluviométrie (déficit de 20 % en moyenne) ;
- sur la station de Colmar, le déficit pluviométrique annuel (janvier à janvier) est de 22 % :
 - un déficit sur les mois de février à avril,
 - le déficit très important à l'automne/hiver avec un mois de décembre comprenant un déficit de 89 %.

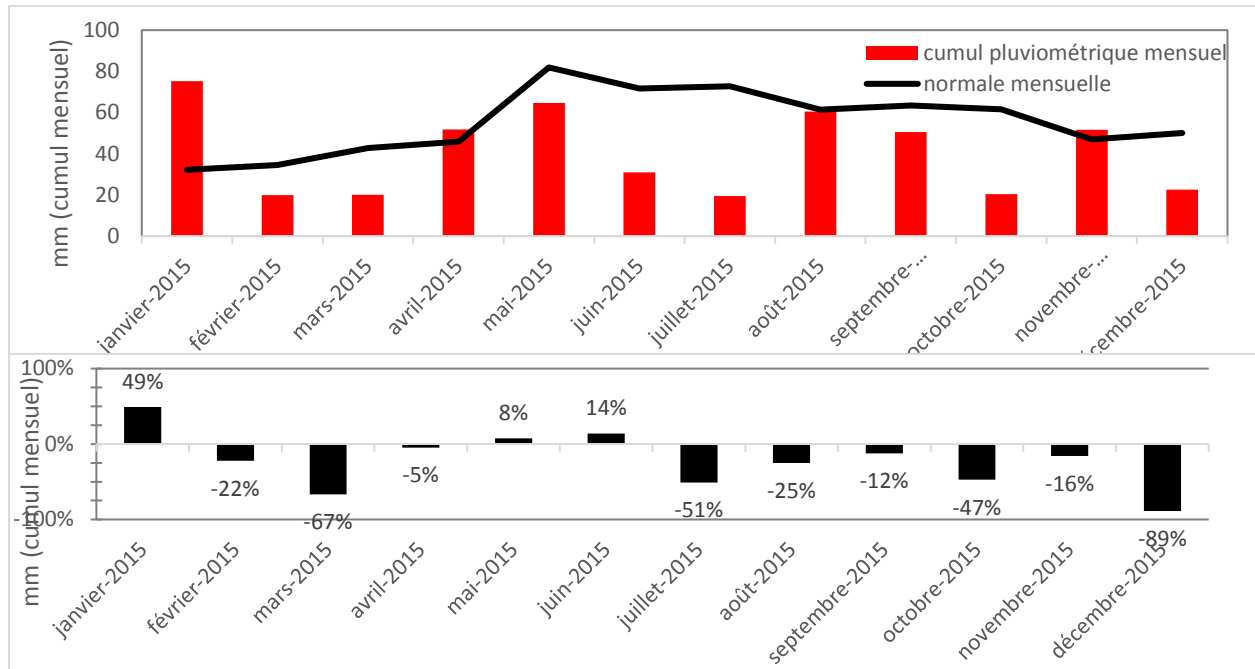


Figure 8 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2015 sur la station de Colmar (données : Météo-France).

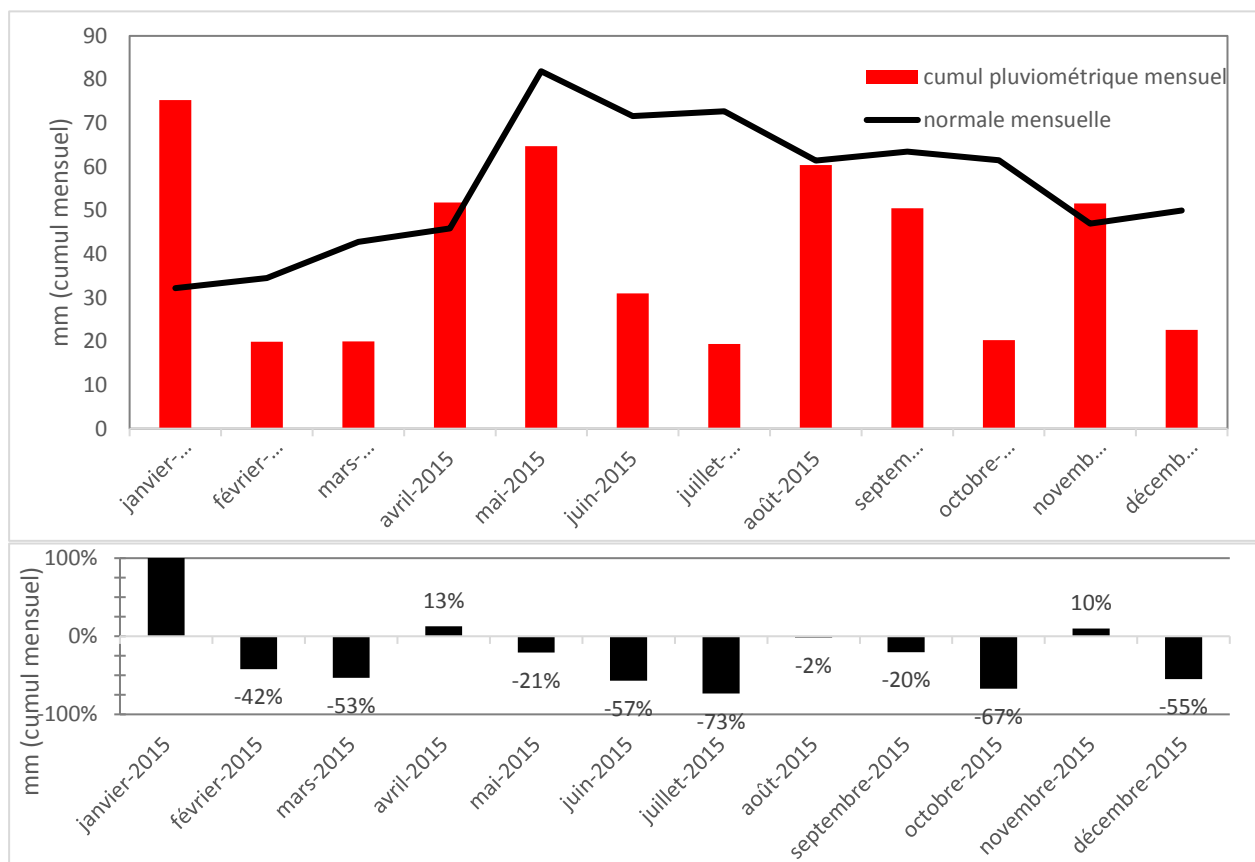


Figure 9 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2015 sur la station de Strasbourg (données : Météo-France).

Du point de vue hydrologique :

- l'année 2015 est marquée par neuf mois déficitaires (février, mars et de juin à décembre) dont certains mois sont très déficitaires (- 70 % en octobre et décembre) et autour des - 40 % durant l'été (BSH annuel, DREAL) ;
- l'étiage a démarré dès février en raison de l'absence de manteau neigeux. Le déficit hydraulique au niveau du mois de mars est en moyenne de - 20 %. Le mois d'avril a permis un retour à la normale. À partir du mois de juin, un fort déficit en précipitations et des températures au-dessus des normales ont provoqué un déficit constant et généralisé. Les pluies n'ont eu aucun effet en raison des températures élevées favorisant l'évapotranspiration ;
- la situation a continué à se dégrader et s'est accentué sur le dernier trimestre, la sécheresse s'étant poursuivie jusqu'à fin décembre (déficit compris le plus souvent entre - 30 et - 70 % mais jusqu'à 90 % sur le Giessen fin Novembre).

c) En 2017

Du point de vue climatique (Figures 10 et 11) :

- l'année 2017 a été marqué par quasiment 1 an de déficit pluviométrique entre septembre 2016 et octobre 2017 ;
- le démarrage de la période d'irrigation de l'année 2017 a été précédé par un déficit pluviométrique de l'ordre de 25 à 50 % sur 8 mois consécutif de septembre 2016 à avril 2017, avec notamment une quasi absence de précipitation en décembre 2016 et en avril 2017. Seul le mois de février dispose de valeurs proches de la normale ;
- le déficit pluviométrique s'est prolongé sur la période estivale avec des valeurs de 10 à 25 % avec toutefois la présence de précipitations sous la forme d'averses orageuses locales plus ou moins importantes pouvant ponctuellement atteindre des valeurs excédentaires par rapport à la normale pluviométrique. Une différence est ainsi présente entre les données enregistrées entre la station de Colmar et de Strasbourg notamment sur le mois de juillet. Colmar présente ainsi un déficit de précipitation mensuelle de - 26 % tandis que Strasbourg présente un excès de + 15 % ;
- les mois de septembre et octobre ont encore accusés des déficits pluviométriques de - 20 à - 50 %, notamment sur la plaine haut-rhinoise.

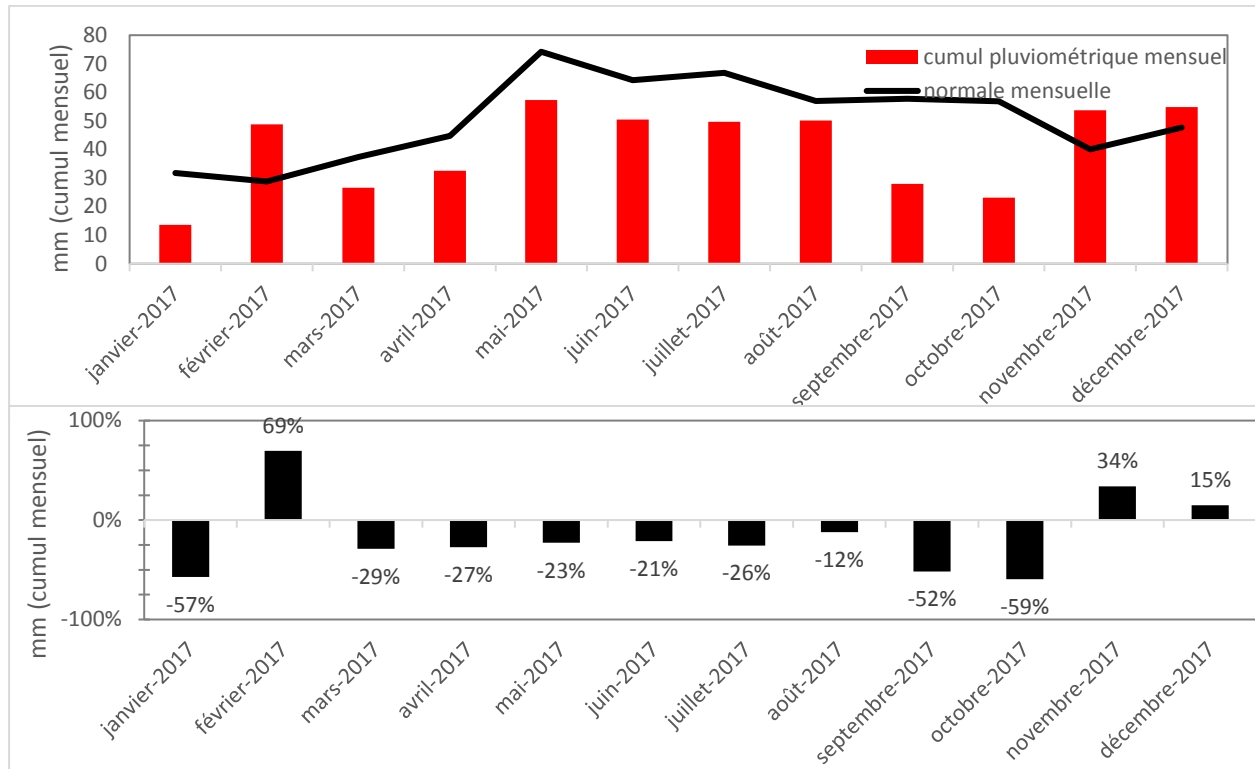


Figure 10 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2017, sur la station de Colmar (données : Météo-France).

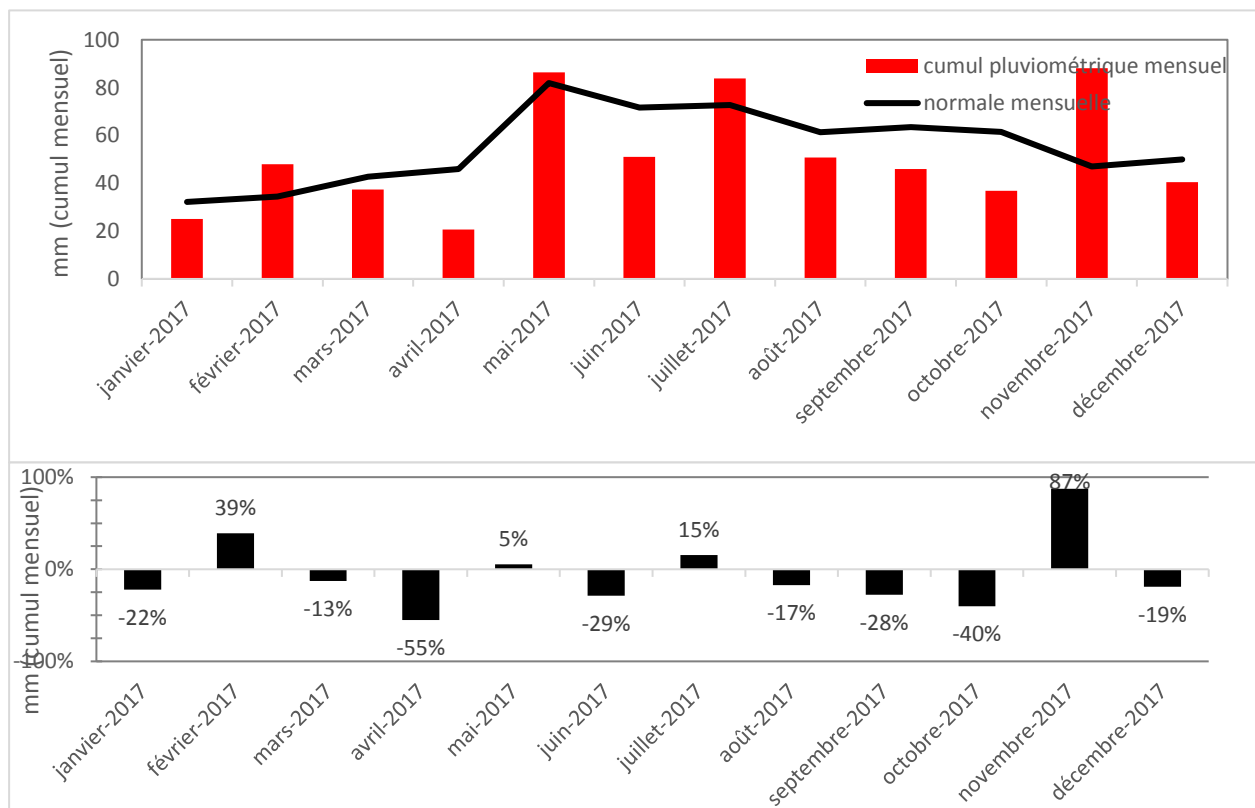


Figure 11 : Cumul de précipitations mensuel et rapport à la normale (1991-2010) année 2017, sur la station de Strasbourg Entzheim (données : Météo-France).

Du point de vue hydrologique :

- les débits hivernaux 2016-2017 sont restés extrêmement bas, en dessous de valeurs décennales sèches. Les précipitations de février 2017 ont permis un retour en mars à des débits moyens mensuels proches de la normale ;
- les débits mensuels sont ensuite restés bas sur l'ensemble des principaux cours d'eau, montrant un déficit hydrique continu jusqu'en octobre 2017 et oscillants sur des périodes de retour de 5 à 20 ans secs.

2.5. HYDROGRAPHIE

L'hydrographie du Grand Ried est marquée par la rivière de l'Ill, les confluences 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.

2.5.1. L'Ill et ses affluents

L'Ill est un des principaux affluents en rive gauche du Rhin. Elle prend sa source dans le Sundgau à 500 m d'altitude et conflue avec le Rhin en aval de Strasbourg, après avoir traversé successivement Mulhouse, Colmar et Sélestat sur un parcours de près de 217 km.

Elle draine la quasi-intégralité du sud de l'Alsace puisqu'elle capte toutes les rivières vosgiennes en rive gauche jusqu'à la Souffel, au nord-ouest de Strasbourg.

Juste en amont du Grand Ried, la Lauch se jette dans l'Ill au niveau de Colmar. Ensuite, au sein du Grand Ried, la Fecht, un affluent en rive gauche de l'Ill, conflue dans cette dernière à Illhaeusern, en amont de la forêt d'Illwald. Puis, entre Sélestat et Benfeld, l'Ill reçoit les eaux du Giessen.

L'Ill, caractérisée par un régime pluvio-océanique, connaît une période de crue de novembre à mars-avril avec une dominante plus marquée en janvier et février (période de hautes eaux) et une période de basses eaux vers août-septembre. Les débits de l'Ill ne sont pas uniquement dépendants des conditions hydro-climatiques des Vosges mais également des échanges nappe-rivière en plaine. Les différences entre le régime de l'Ill pendant les périodes de crue et d'étiage peuvent être très importantes (rapport de 100).

Le tableau ci-dessous (Figure 12) présente les caractéristiques de l'Ill au niveau du Grand Ried.

Situation	Altitude (m)	Superficie du BV (km ²)	Débit moyen annuel (m ³ /s)
Entrée dans le Grand Ried (Colmar)	181	1784	19,6 (période 1958-2017)
Sortie du Grand Ried (Osthause)	151	3160	35,7 (période 2001-2017)

Figure 12 : Caractéristiques de l'Ill à son entrée et à sa sortie du Grand Ried (BANQUE HYDRO).¹

¹ Banque Hydro, stations A2240310 (Osthause) et A1350310 (Colmar)

2.5.2. Cours d'eau phréatiques

a) *Présentation générale*

Le terme de « **cours d'eau phréatiques**² » est largement repris dans la littérature pour désigner un type de cours d'eau spécifiques d'Alsace qui naissent de résurgences de la nappe d'Alsace. La plupart des rivières phréatiques prennent naissance au niveau d'exurgences de la nappe, notamment au niveau du Ried centrale. Ces sources sont caractéristiques du Grand Ried d'Alsace.

Le mécanisme de leur origine peut être 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'exurgence (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.

Les variations hydrologiques saisonnières des rivières à alimentation exclusivement phréatique suivent les variations piézométriques de la nappe de la plaine d'Alsace et présentent une absence de régime hydrologique élevé en période de crue (absence ou faiblesse des débits à pleins bords, L. Schmitt 2001).

Parmi les nombreux ruisseaux phréatiques du Grand Ried, les plus remarquables sont l'Hanfgraben, la Lutter, le Trulygraben ou encore l'Ergelsenbach. Le chevelu de ruisseaux phréatiques est particulièrement dense dans la forêt d'Illwald au sud-est de Sélestat.

La cartographie des ruisseaux phréatiques (ou semi phréatiques) coïncide avec la cartographie des cours d'eau prioritaire du SAGE III Nappe Rhin (Figure 4).

En effet, ces cours d'eaux ont la particularité de présenter une eau généralement limpide et de très bonne qualité. Par contre, leur faible écoulement et hauteur d'eau (lié à des faibles débits et/ou un faible rapport largeur/hauteur), entraînent une grande fragilité de ces cours d'eau aux phénomènes de sécheresses.

b) *Débits et données de suivi*

Les débits des ruisseaux phréatiques sont très variables (Figure 13) allant de quelques dizaines de litres par secondes à quelques mètres cubes par secondes (Schmidt 2001). Il n'existe pas de données complètes disponibles à ce jour sur l'ensemble du réseau des ruisseaux phréatiques en dehors de valeurs ponctuelles de campagnes de jaugeages (Schmidt 2001).

Peu de stations de suivi du débit sont disponibles sur les ruisseaux phréatiques ou semi phréatiques. De plus, les courbes de tarage de la plupart de ces stations sont peu précises pouvant entraîner une incertitude sur les débits calculés de 10 à 30 %.

² D'autres dénominations existent : « ruisseaux phréatiques », « rivières phréatiques », « Donnerlöcher » ou encore « Brunnenwasser ».

	Débit d'étiage minimum observé (m3/s)	Débit moyen (m3/s)
Atweil	0,2	1
Blind baldenheim	1	6
blind riedwhir	0,19	0,36
Hanfgraben à Sad	0,0382	0,13
Hanfgraben à witherhneim	0,113	0,5
Ischert (diebolsheim)	0,21	0,38
Ischert (sundhouse)	0,65	0,91
Mulhbach (batzhneim)	1	1,65
Muhlbach-Schoenau	0,23	1,56
Neuergraben-Boofzheim	0,57	0,74
Zembs	0,03	1,76
Bindernheim	0,05	0,3

Figure 13 : Données de débits disponibles sur les ruisseaux phréatiques disponibles dans la banque hydro. Les valeurs comportent une incertitude de 10 à 30 %.

2.6. GÉOLOGIE ET PÉDOLOGIE

Le sous-sol du Grand Ried est essentiellement constitué d'alluvions déposées par le Rhin et ses affluents dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres (Figure 14).

Du Rhin (Est) au piémont (Ouest) les principales formations sont :

- **les dépôts alluviaux rhénans** : ils occupent les 2/3 du secteur étudié (côté Est). Ils ont été mis en place par le Rhin au cours du Quaternaire. Leur origine est principalement alpine et jurassienne. Ils sont constitués de matériaux à la granulométrie et la nature diverses : limons, sables, graviers et galets, siliceux ou calcaires ;
- **les dépôts alluviaux ellans** : le long de l'III, de part et d'autre et sur toute sa longueur. Ces alluvions limoneuses recouvrent les alluvions du Rhin en plusieurs endroits ;
- **les dépôts alluviaux vosgiens** : situés au sein des cônes de déjection vosgiens, entre le piémont et la dépression de l'III, notamment le long de la Fecht et du Giessen jusqu'à leur confluence avec l'III. Ces alluvions peuvent être interstratifiées dans les alluvions rhénanes mais sont le plus souvent redistribuées dans celles-ci. Elles proviennent principalement du socle vosgien (galets et sables de granite, de gneiss, de schistes, etc.).

Des dépôts tourbeux (dépôts organiques), en centre plaine, en particulier entre Sélestat et Colmar ainsi qu'au niveau sont présents à l'affleurement. Ils se développent sur les limons d'inondation holocènes du Rhin.

C'est, entre autres, sur ces dépôts tourbeux que s'établissent des zones humides remarquables telles qu'une partie de l'Illwald, le Trulygraben ou encore la Forêt communale de Colmar.

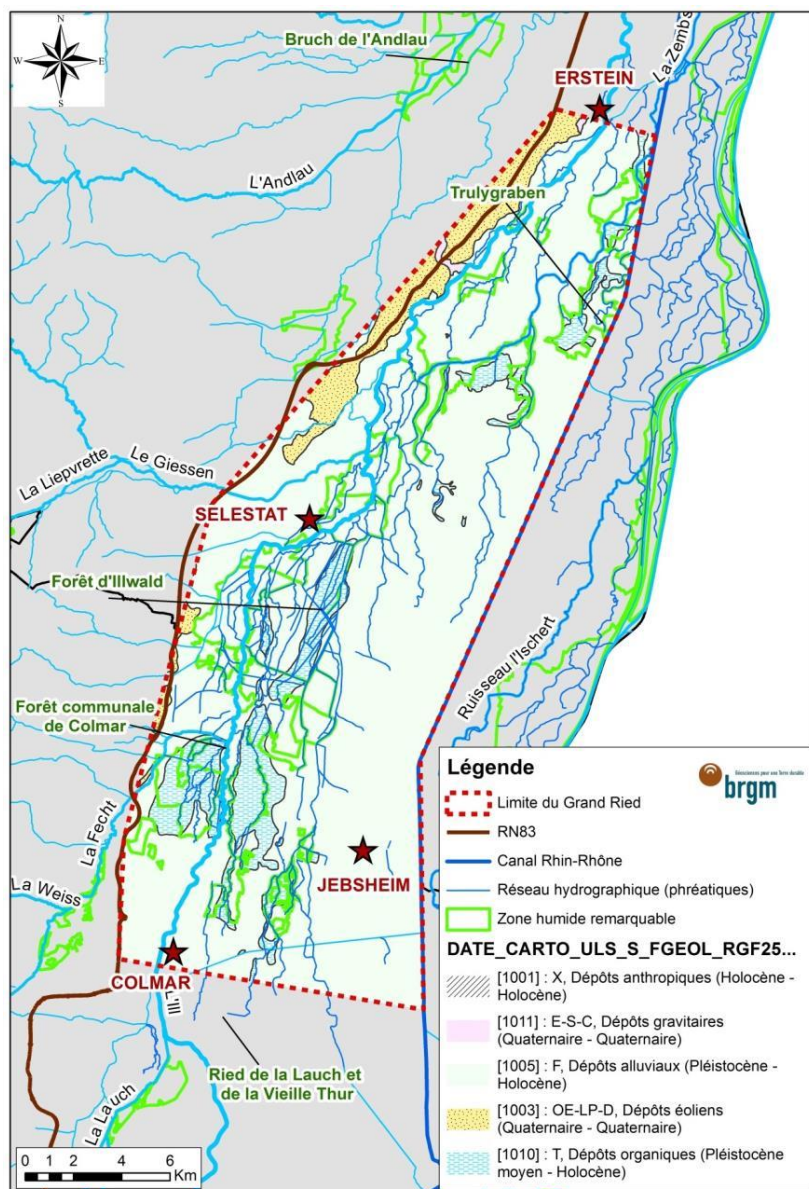


Figure 14 : Carte géologique des dépôts de surface du secteur d'étude (1/250 000).
RGF démonstrateur Vosges-Fossé Rhénan.

Les dépôts éoliens (levées lœssiques), présents sur la frange nord-ouest, d'Erstein à Sélestat constituent la limite géologique nord-ouest de la zone d'étude.

D'un point de vue pédologique, plusieurs unités forment des bandes nord-sud sur la zone d'étude avec 3 unités dominantes (Figures 15 et 16) :

- les Rieds du domaine de l'III regroupant différentes typologies de sols (Ried brun et Ried gris qui se prolongent par la plaine de l'III) ;
- les terrasses caillouteuses du Rhin ;
- la plaine sableuse du Rhin qui s'entremêle avec des zones de Ried rhénan.

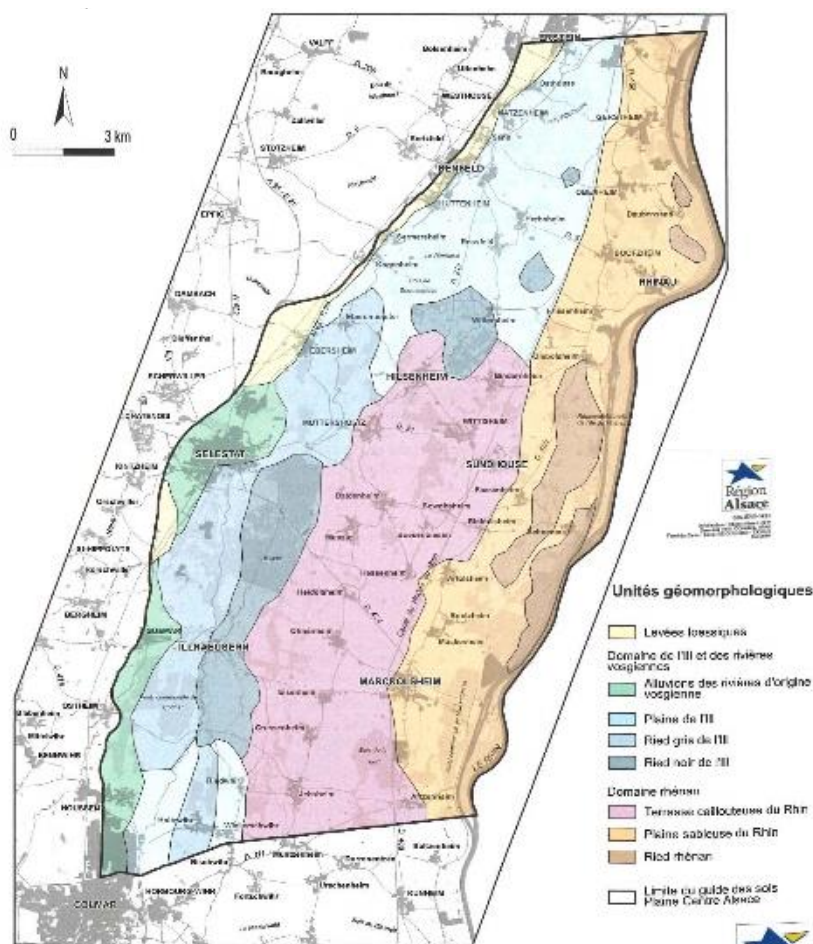


Figure 15 : Cartographie des principales unités morphologiques de la petite région naturelle centre plaine Alsace (AARA, Sol conseil, 2004).

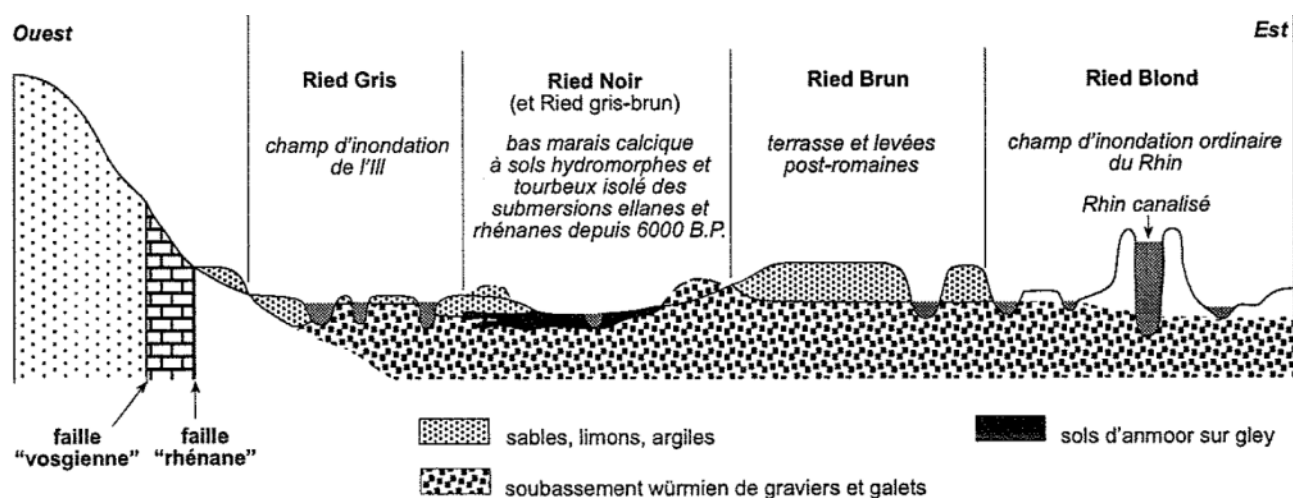


Figure 16 : Coupes ouest-est des unités morphologiques du Grand Ried du piémont au canal du Rhône au Rhin (extrait de Schmitt, 2001).

2.7. HYDROGÉOLOGIE : L'AQUIFÈRE RHÉMAN

L'aquifère rhéman 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 nappe contenue dans ce réservoir s'étend sur environ 3 000 km² et est limitée au sud par les collines du Sundgau et à l'ouest par le piémont vosgien. Son volume en Alsace est estimé à 35 milliards de m³ hors pliocène.

L'aquifère rhéman s'écoule globalement du sud au nord. Cet axe d'écoulement est modifié à proximité du piémont vosgien pour suivre un axe ouest-est au débouché des différentes vallées vosgiennes.

La faible profondeur de son niveau statique et sa forte productivité induisent une facilité d'exploitation en même temps qu'une forte vulnérabilité. Sur la zone d'étude, la nappe est affleurante dans les zones humides. Le niveau statique va jusqu'à une profondeur d'environ 5 mètres aux alentours du canal du Rhône au Rhin ou sur la bordure ouest en direction du piémont.

L'aquifère rhéman est majoritairement alimenté 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.³

³ http://www.eau2015-rhin-meuse.fr/fr/etat/district-rhin/page_02_02_02_a.php

3. État des lieux : prélèvements, évolutions quantitatives et observation des assecs

L'état des lieux a été réalisé sur la base d'une étude bibliographique et de l'analyse de l'ensemble des données bancarisées.

Quatre axes ont été retenus pour réaliser l'état des lieux quantitatifs de la ressource en eau souterraine sur la zone du Grand Ried :

- les éléments principaux de fonctionnement hydrogéologique du Grand Ried ;
- la situation des prélèvements en eau souterraine et leur dynamique ;
- l'évolution des niveaux piézométriques et des chroniques hydrométriques ;
- les observations des assecs présents sur le réseau hydrographique du Grand Ried ;
- le croisement de ces axes permet d'une part de visualiser à une échelle globale la situation quantitative de la ressource en eau souterraine et d'autre part de découper par secteurs géographiques la zone d'étude.

3.1. ÉLÉMENTS SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU GRAND RIED

3.1.1. Paramètres hydrodynamiques

La majorité des données disponibles sur les paramètres hydrodynamiques de la zone d'étude sont répertoriées dans la banque régionale de l'aquifère rhénan (BRAR). Ils ont été complétés par les données sur les essais de pompages disponibles en archives au BRGM ainsi que par les résultats de l'essai de pompage réalisé par ANTEA en 1998 lors de la réalisation du forage AEP de Sélestat dans la forêt de l'Illwald.

Peu de données de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement sont disponibles. Or ils sont nécessaires aux calculs hydrodynamiques et notamment aux simulations de pompage. Par conséquent, les valeurs disponibles ont été complétées ou extrapolées à partir :

- d'une analyse des débits spécifiques disponibles ;
- d'une analyse des variations lithologiques sur les coupes géologiques disponibles ;
- de tous les indices susceptibles d'orienter les paramètres hydrodynamiques (variations de courbes d'essais de pompage, positionnement des rivières, analogies de sites, ...).

a) Débits spécifiques

Les débits spécifiques⁴ calculés sur l'ensemble des ouvrages vont de 30 à 1 000 m³/h/m pour une soixantaine d'ouvrages disposant de données. Ils sont tous globalement représentatifs d'un aquifère de très bonne productivité.

Toutefois, la large gamme de valeur n'est pas représentative d'une variation des caractéristiques hydrodynamiques. En effet, deux phénomènes sont prépondérants sur les variations des caractéristiques hydrodynamiques :

- les ouvrages en bordure du Rhin ou, dans une moindre mesure, de l'III, sont réalimentés par ces derniers. Cette situation a pour effet de maximiser le débit spécifique qui va être représentatif de la réalimentation de la rivière en sus de la bonne perméabilité de l'aquifère.

Par exemple, ces effets sont particulièrement visibles sur les données des ouvrages testés sur le site industriel Jungbunzlauer à Marckosheim. Ces ouvrages, situés entre 300 et 500 mètres du Rhin, captent les alluvions entre 20 et 50 mètres de profondeur (Buar, 1993) pour un débit spécifique de 175 à 340 m³/h/m. Une stabilisation complète du niveau piézométrique est présente au bout d'une ½ heure pour des essais réalisés dans une gamme de débit de 100 à 200 m³/h ;

- la coupe technique des ouvrages est extrêmement variable, notamment la profondeur des ouvrages. En effet, le secteur d'étude comprend des ouvrages allant de 2 à 100 mètres de profondeur et captant les différents niveaux producteurs des alluvions de l'aquifère rhénan. Le débit « disponible » sera d'autant plus grand que la hauteur captée sera grande. De plus, un même ouvrage peut recouper des alluvions ne représentant pas les mêmes caractéristiques.

b) Transmissivités⁵ et perméabilités

Les valeurs de transmissivité obtenues à partir de pompages d'essai sur la zone d'étude sont comprises entre 0,013 m²/s sur la commune de Houssen en bordure ouest 0,58 m²/s en zone centrale du Ried de l'III (forage AEP de Sélestat situé dans la forêt de l'IIIwald).

Rapportées à leurs épaisseurs captées, les valeurs de perméabilités sur ces deux sites sont respectivement comprises entre 4,19.10⁻⁴ m/s et 7,8.10⁻³ m/s⁶.

La différence de perméabilité est représentative de la différence de lithologies entre les alluvions rhénanes captées au sein de l'IIIwald et le mélange alluvions vosgiens/alluvions rhénanes capté sur le forage de Houssen.

Les deux forages 03424X0016/F2 et 03424X0004/F, situés sur la commune d'Elsenheim, captent deux niveaux différents des alluvions rhénanes : de 20 à 40 mètres pour F2 et de 2 à 24 mètres pour le forage F indiquant des perméabilités de 7,5.10⁻³ m/s et 1,45.10⁻² m/s. Les perméabilités seraient donc légèrement supérieures dans la partie supérieure de l'aquifère.

Les données hydrodynamiques disponibles sur les autres sites, captant les alluvions rhénanes, restent globalement dans les mêmes ordres de grandeur.

⁴ Rapport entre le débit du puits et le rabattement induit par ce même débit à un instant donné.

⁵ La transmissivité correspond à la multiplication de la perméabilité et de la hauteur des niveaux productifs de l'aquifère.

⁶ La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide. Les ordres de grandeur sont considérés comme différents à partir d'une différence de facteur de 10 minimum. Par exemple, la distinction entre roche perméable et roche imperméable est souvent arbitrairement choisie à 10⁻⁹ m/s (valeurs hautes de la perméabilité de l'argile).

Pour élément de comparaison, les perméabilités utilisées dans le modèle LOGAR sur la zone d'étude sont comprises entre 1.10^{-3} m/s 1.10^{-2} m/s ce qui correspond aux valeurs présentes sur l'Illwald et Elsenheim.

c) Coefficient d'emmagasinement et analyse du fonctionnement en nappe libre ou captive

Très peu de données de coefficient d'emmagasinement sont disponibles sur la zone d'étude (Figure 17). Ils sont globalement représentatifs d'un aquifère libre ou très légèrement captif.

Toutefois les éléments suivant peuvent compléter les valeurs disponibles :

- la présence potentielle par endroits d'une couche d'argile entre 20 et 30 mètres de profondeur pouvant indiquer une légère séparation des alluvions rhénanes entre un aquifère supérieur libre et une partie profonde plus captive. Cette observation géologique est confirmée par endroits par des différences de niveaux statiques perçues sur des piézomètres captant les niveaux différents des alluvions tels qu'à Ostheim (SGAL, 1985), en bordure ouest de la zone d'étude. À l'opposé, la lithologie recoupée sur Elsenheim, Marckolsheim ou sur le forage Obere Erlen dans l'Illwald, ne semble pas présenter d'épaisseurs d'argiles suffisamment importantes pour créer une différence de comportement ;
- les zones situées sous les tourbières ou limons, recouvrant les zones humides, semblent présenter un niveau piézométrique légèrement moins profond que la profondeur des premières alluvions (ANTEA, 1998). Il y aurait donc une légère suppression de l'ordre de 1 à 2 mètres. Les limons et tourbières formeraient ainsi un aquitard de faible épaisseur, notamment sur les zones humides. À l'opposé, la nappe serait donc complètement libre en l'absence de ce recouvrement.

Commune	Localisation	Profondeur du forage	Emmagasinement	Transmissivité (m ² /s)	Débits spécifiques (m ³ /h/m)	Niveau statique (m)	Date essai	Durée de l'essai (h)	Type d'essai	Code_bss
Guemar	NIEDERWALD	46	0,0001	0,07		1,7	02/06/1987	56	longue durée	03423X0066/F1
Guemar	FORET DE NIEDERWALD	50,2		0,077		1,8	06/07/1993		longue durée	03423X0080/F
Elsenheim	MARCKOLSHEIM ?	24	0,127	0,32	720	2	25/09/1941	198,5	paliers	03424X0004/F
Elsenheim	F2	40		0,15		2,98	17/08/1971	48	paliers	03424X0016/F2
Houssen	FECHT WALD F2	59	0,00017	0,013	17,64	6,04	26/10/1966	126	paliers	03426X0006/F2
Houssen	PRES DU F2 SI DE LA WEISS	30		0,013		5,99	26/10/1966	126	paliers	03426X0015/F2
Marckolsheim	ECLUSE (FILTRANT 1)	20,2		0,2	396	1,8	16/10/1956	10	paliers	03431X0082/F
Marckolsheim	ECLUSE (FILTRANT 2)	20		0,33	720	2,1	05/09/1956	12	paliers	03431X0084/F
Marckolsheim	USINE (FILTRANT)	15,6		0,15	540	1,5	22/08/1956	12	paliers	03431X0089/F
Marckolsheim	HINTERGRUEN Z.I.	40		0,075	180	2,21	06/10/1981	72	longue durée	03431X0157/F
Schoenau	BARRAGE RHINAU (7)	30,5		0,26	576		16/02/1959	24	paliers	03432X0030/P7
Schoenau	BARRAGE RHINAU (2)	35		0,19	936	3	22/12/1958	18	paliers	03432X0031/P2
Volgelsheim	EDF (VOLGELBRUN)	50		0,4	1116	3,1	13/12/1952		paliers	03791X0051/S1
Selestat	ILLWALD OBERE ERLIN	95	0,014	0,58	953	0,5		168	longue durée	03077X0164/F

Figure 17 : Principaux paramètres hydrodynamiques disponibles dans la BRAR et la bibliographie sur la zone d'étude.

3.1.2. Battements et profondeurs de la nappe

Le niveau piézométrique de la nappe dans le secteur étudié est situé à une faible profondeur, comprise en moyenne entre 0 et 2 m. Les zones où la profondeur moyenne de la nappe est la plus faible sont situées au sein des zones humides remarquables où elle est généralement inférieure à 1 m. Elle est en revanche plus profonde en bordure ouest du Grand Ried ainsi qu'à l'est de la Blind jusqu'au Rhin au niveau de Marckolsheim et Artolsheim (3 à 4 m de profondeur sur 6 ouvrages). La soustraction de la piézométrie régionale en période de basses eaux et d'un modèle numérique de terrain précis (modèle « LIDAR » mis à disposition par le domaine de l'ILL/Région Grand Est) confirme les profondeurs calculées sur les piézomètres et met en évidence de manière évidente la zone dépressionnaire encadrant l'ILL (Figure 18). Toutefois, la précision des données piézométriques disponibles ne permet pas de descendre la résolution et l'interprétation des profondeurs de la nappe au-delà de la visualisation proposée dans ce rapport.

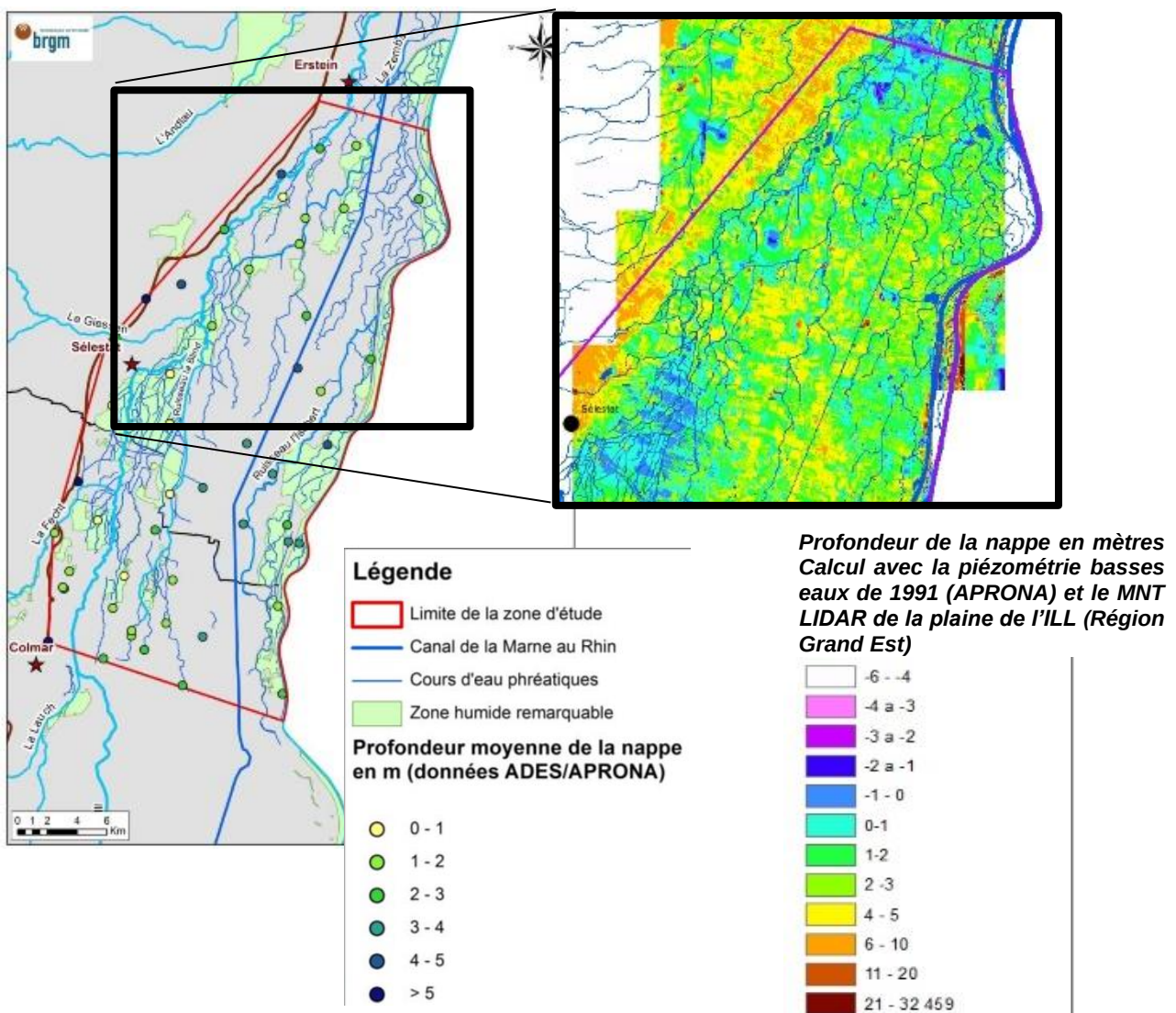


Figure 18 : Profondeur moyenne de la nappe calculée au droit des piézomètres présents sur la zone d'étude et profondeur en période de basses eaux par soustraction de la piézométrie régionale et d'un modèle numérique de terrain.

L'amplitude du battement de la nappe d'Alsace dans le Grand Ried est inférieure à 2,5 m pour la majeure partie du secteur étudié. Notamment :

- le battement de la nappe est inférieur à 1 m en rive droite de l'Ill, le long de la Blind et de la Zembs ;
- la zone dépressionnaire encadrant l'Ill est marquée par les plus faibles battements de nappe ;
- de manière générale, l'amplitude du battement de la nappe ne dépasse pas 2 m au droit des zones humides remarquables, sauf au niveau de l'île de de Marckolsheim, en bordure du Rhin. Cette dernière zone pourrait être représentative d'influences d'origines anthropiques et non d'un fonctionnement « naturel » de la nappe.

Les battements de la nappe augmentent en allant vers la bordure ouest de la zone d'étude (supérieur à 2 m) (Figure 19).

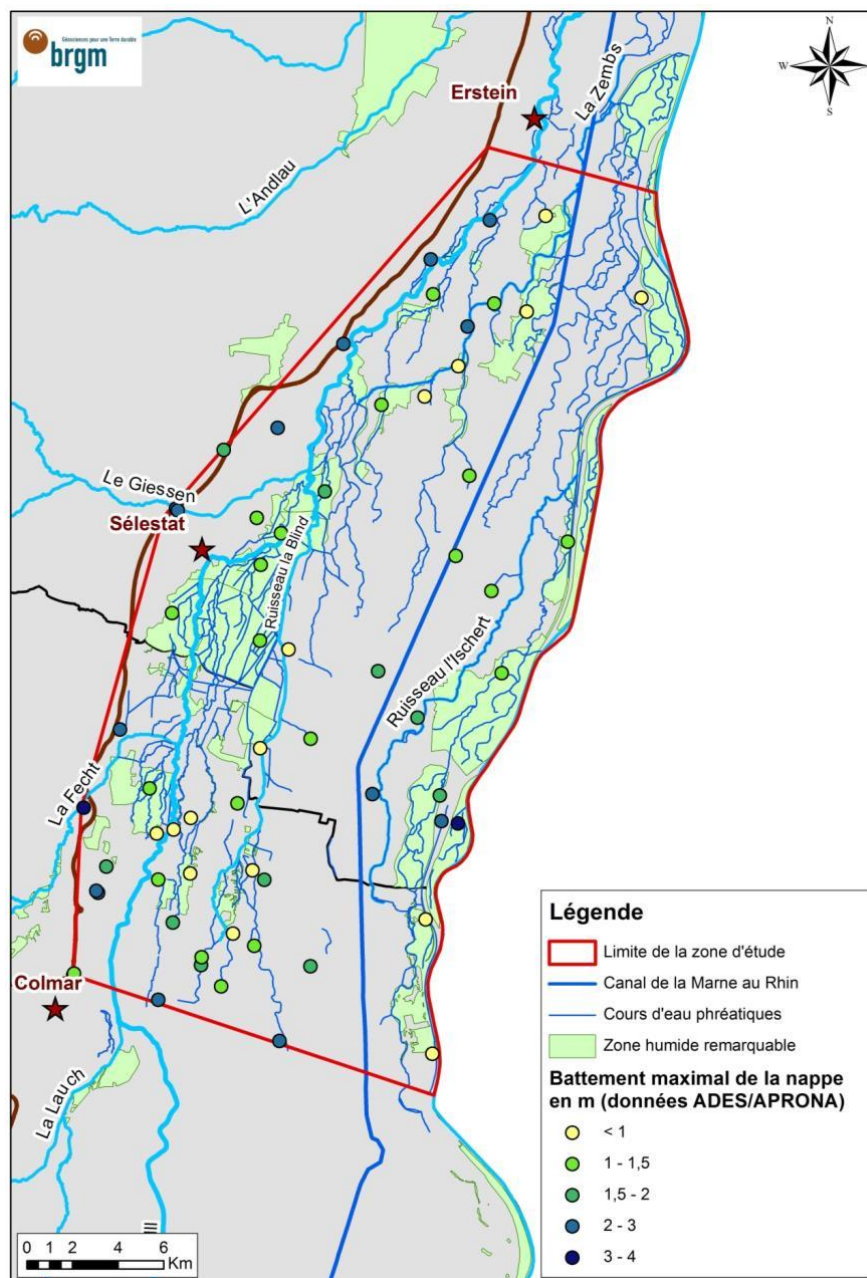


Figure 19 : Battement maximal du niveau statique sur la zone d'étude calculé à partir des chroniques piézométriques disponibles.

3.1.3. Influence des cours d'eau et recharges

Une analyse statistique par ACP (analyse par composantes principales) a été réalisée sur l'ensemble de l'Alsace en 2004 (Schomburgk *et al.*, 2005).

Les résultats synthétiques sur la zone d'étude montrent une influence différente suivant les secteurs :

- la bordure rhénane où la contribution du Rhin à la recharge est prédominante en bordure du Rhin puis diminue jusqu'au canal du Rhône au Rhin avec une influence de l'ordre de 10 à 30 % pour ensuite n'atteindre plus que 10 % sur la partie du Ried centre plaine ;
- une contribution des rivières vosgiennes de l'ordre de 20 à 40 % sur le secteur du Ried centrale ;
- la contribution de la pluie efficace dépasse les 20 % dans la partie du Ried centrale. Elle est plus élevée à l'ouest, le long de l'Ill qu'à l'est au niveau du canal Rhône-Rhin où la contribution est évaluée entre 10 et 20 %. L'extrémité sud-est présente les valeurs les plus faibles, comprises entre 0 et 10 %.

D'un point de vue piézométrique, l'Ill et le Rhin sont les deux principales influences sur leur zone respective. Une corrélation claire sur les séries piézométriques et hydrométriques du secteur est en effet visible (cf. annexe 2).

3.1.4. Synthèse du fonctionnement de l'hydrosystème de la zone d'étude

La zone d'étude présente quatre typologies de zones :

- la bande rhénane sous influence du Rhin et présentant de fortes transmissivités. Les rabattements induits par les pompes 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 de 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 ce découpage s'ajoute la rivière de l'Ill qui va représenter, hors périodes d'étiages sévères, une séparation hydraulique de la zone du pourtour de l'Ill. Le comportement sur les deux rives de l'Ill peut donc être analysé séparément.

3.2. PRÉLÈVEMENTS EN EAUX SOUTERRAINES

3.2.1. Les usages de l'eau souterraine dans la région du Grand Ried

L'analyse des données de prélèvements réalisée par la Région Grand Est ⁷ (Manlay, 2017) a permis de mettre en évidence la présence des trois principaux usages suivants sur la zone du Grand Ried :

- l'irrigation (incluse dans les usages agricoles suivant les classifications) présente sur l'ensemble de la zone du Grand Ried ;
- l'alimentation en eau potable, AEP, (incluse dans les usages domestiques suivant les appellations) présente majoritairement à proximité des zones urbaines ;
- l'industrie, présente notamment sur la zone de Sélestat, de Colmar et en bordure du Rhin.

Les cartographies disponibles (Figures 20 et 21) permettent de visualiser la répartition et la localisation des volumes annuels prélevés pour les trois types d'usages, sur la base d'une moyenne des données de la période 2008-2013 disponibles auprès de l'AERM.

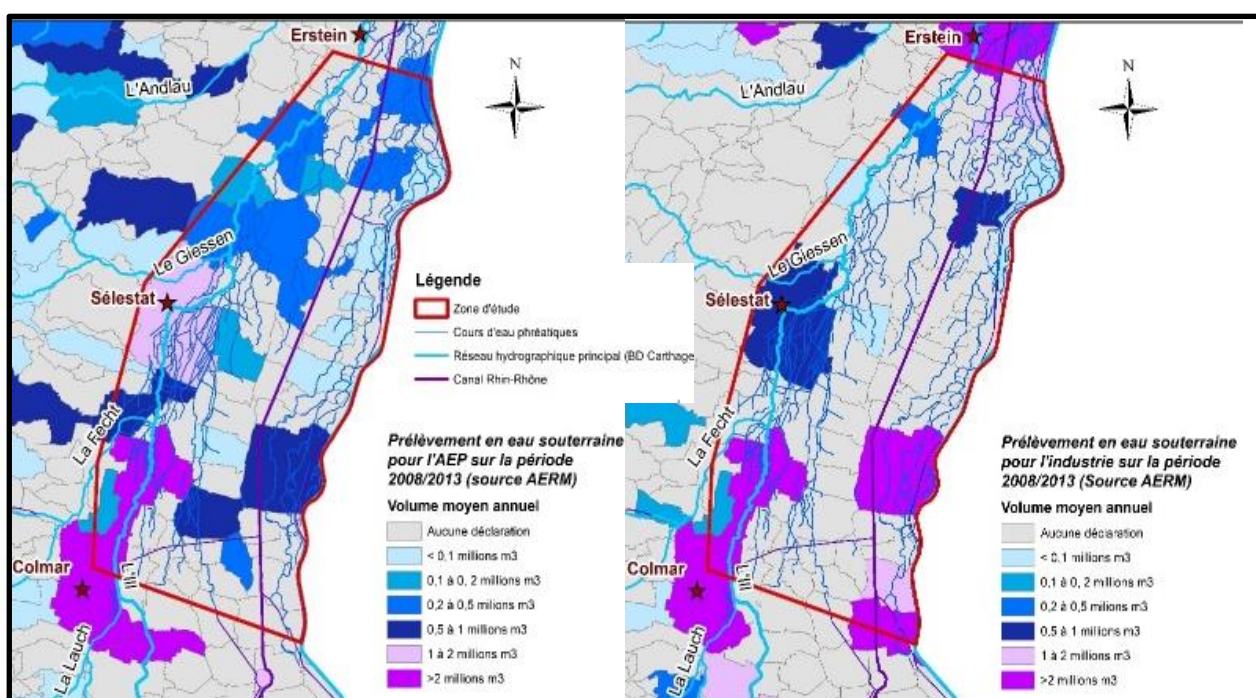


Figure 20 : Cartographie des volumes moyens annuels prélevés pour l'AEP et l'industrie sur les eaux souterraines entre 2008 et 2013 (sources : données redevances AERM).

⁷ Travaux réalisés par la Région Grand Est dans l'axe 2 du projet « perspectives et cohabitation entre les différents usages de l'eau : de l'équilibre entre les usages agricoles à une gestion partagée des bassins versants ».

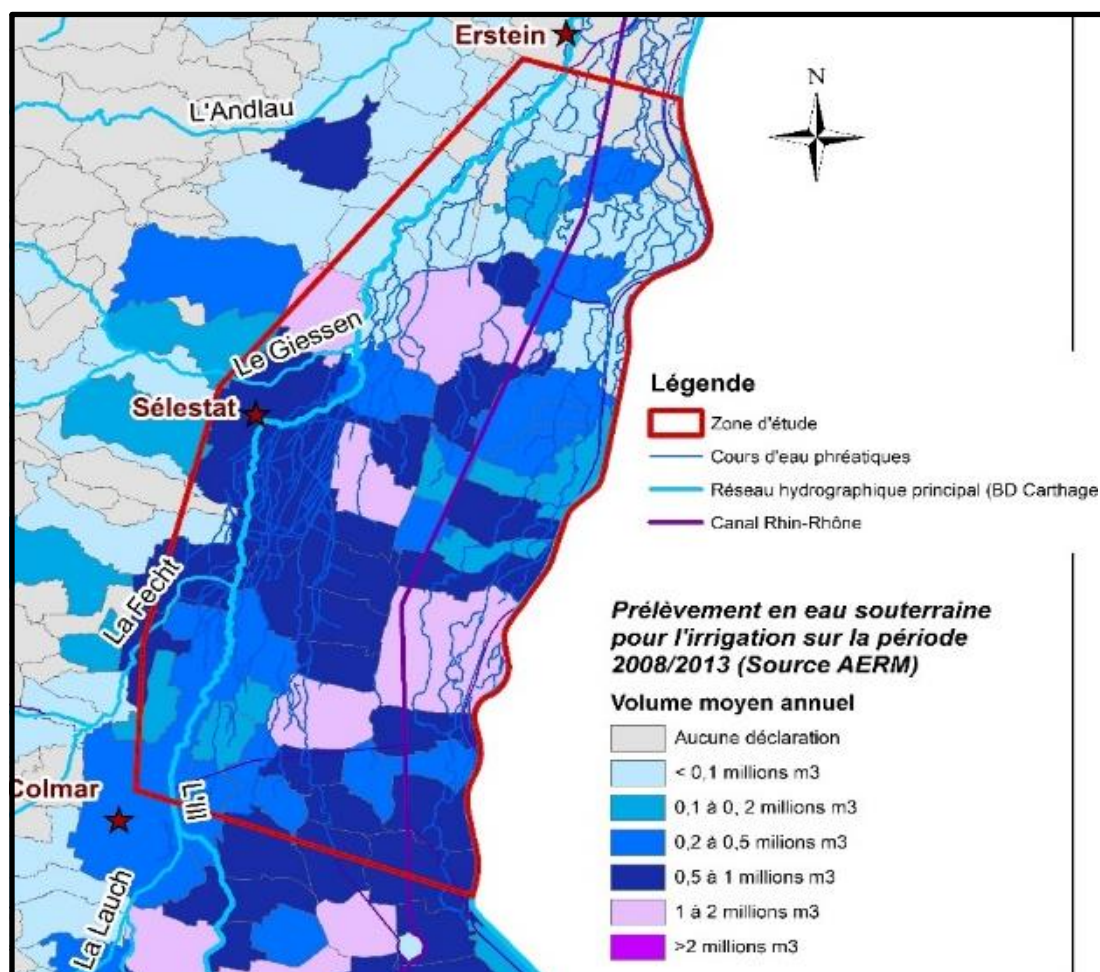
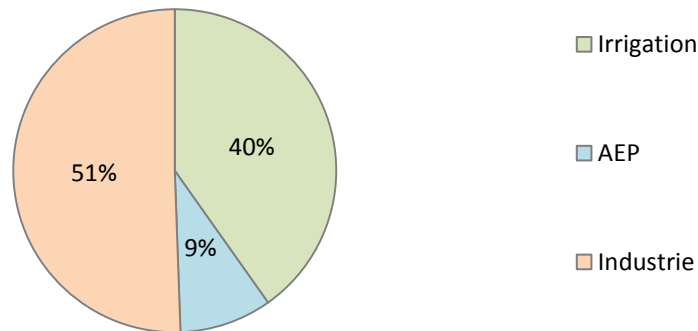


Figure 21 : Cartographie des volumes moyens annuels prélevés pour l'irrigation entre 2008 et 2013 (sources : données redevances AERM).

L'industrie représente le plus grand volume prélevé annuellement (figure 22). Toutefois, en rapportant à la période d'irrigation (5 mois), le plus fort volume de prélèvement est l'irrigation.

Répartition des prélèvements annuels en eau souterraine entre les différents usages (données BNPE, période 2008-2013)



Répartition des prélèvements en eau souterraine entre les différents usages en période d'irrigation (données BNPE, période 2008-2013)

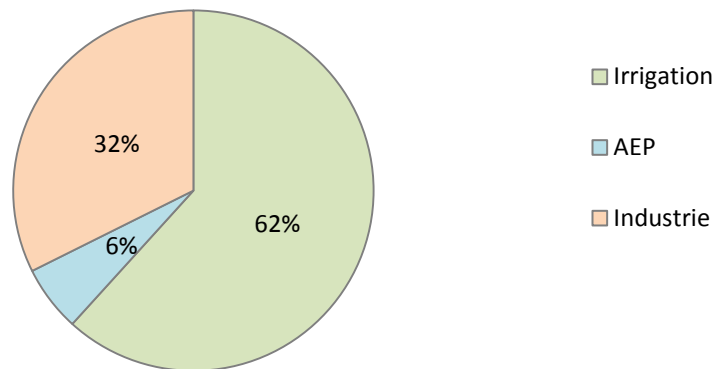


Figure 22 : Répartition des prélèvements en eau souterraine entre les différents usages sur une période annuelle et en période d'irrigation (données BNPE, période 2008-2013).

3.2.2. Données disponibles

Le recensement des données de prélèvements est hétérogène suivant :

- le type d'activité visé (AEP, agricole, industrie, autres) ;
- le système de bancarisation des différents services ou collectivités (DDT, mairies, chambre d'agriculture, SAGE,...) ;
- le niveau d'attention porté aux différentes zones analysées (zones protégées demandant des dossiers d'impacts plus complets par exemple).

Les différentes sources de données sur les prélèvements en eaux souterraines consultées lors du projet sont résumées dans le tableau ci-dessous par type d'activité (Figure 23).

Sources	Types de données disponibles	Types de fichiers	Remarques et données complémentaires
AEP			
ARS via : ARS 68 et ARS 67 Base SISEAUX (nationale)	Localisation et principaux paramètres des forages : code BSS, profondeur, ... Date de mise en service et état de l'ouvrage (actif, abandonné, prévu) Débit réglementaire et débit maximum	Base de données (Excel) Fichiers SIG (périmètres de protection)	L'ARS ne dispose pas d'un suivi des débits exploités. Les débits réglementaires sont souvent égaux aux débits maximums exploitables par ouvrage. Ce débit peut être très supérieur à la demande en AEP de la localité. Données complémentaires : périmètres de protection (éloigné/rapproché)
Agence de l'eau Rhin Meuse via : Transmission directe BNPE	Volume annuel <i>déclaré</i> auprès de l'agence de l'eau Rhin Meuse sur la période 2008 - 2013 et entraînant une redevance. La localisation de la déclaration est rattachée à la commune en charge de l'exploitation.	Base de donnée (Excel)	La localisation par commune des volumes prélevés peut ne pas être suffisante pour l'analyse des impacts, notamment lors de la présence de plusieurs ouvrages ou d'une commune étendue. Le volume annuel ne permet pas de suivre les éventuelles évolutions journalières et saisonnières.
Prélèvements pour l'irrigation (agricoles⁸)			
Agence de l'eau Rhin Meuse BNPE	Volume annuel exploité <i>déclaré</i> auprès de l'agence de l'eau Rhin Meuse sur la période 2008 - 2013 et entraînant une redevance. La localisation est rattachée à la commune du siège social de l'exploitant agricole.	Base de donnée (Excel)	La localisation des prélèvements par siège social des exploitants ne permet pas d'interpréter la répartition géographique des volumes prélevés sans éléments complémentaires. Le volume annuel ne permet pas de suivre les éventuelles évolutions journalières et saisonnières.
DDT 67	Localisation des forages d'irrigation et des volumes prévisionnels d'exploitation <i>déclarés</i> auprès des services de la DDT 67. Volume annuel par bassin versant.	Fichiers SIG	Pas de suivi par forage des volumes prélevés.
DDT 68	Localisation des forages d'irrigation	Fichiers SIG	Pas de suivi par forage des volumes prélevés. Pas de déclaration des volumes prévisionnels d'exploitation par ouvrages. Forte différence entre les données SIG de la DDT 68 et celles observées sur les campagnes de terrain en 2017.
Prélèvements industriels			
Agence de l'eau Rhin Meuse BNPE	Volume annuel exploité <i>déclaré</i> auprès de l'agence de l'eau Rhin Meuse sur la période 2008 - 2013. La localisation est rattachée à la commune.	Base de données AERM	

Figure 23 : Données disponibles et utilisées pour l'analyse des prélèvements.

⁸ Dans le cas de la zone du Grand Ried, les prélèvements agricoles peuvent être assimilés à ceux de l'irrigation.

3.2.3. Prélèvements industriels dans la zone du Grand Ried

Les prélèvements industriels sont localisés en bordure du Rhin et sur les zones industrielles de Sélestat et le nord de Colmar.

Les profondeurs de captages sont extrêmement variables : de quelques mètres pour un forage « d'appoints » à 50 ou 100 mètres pour les plus gros captages en bordure du Rhin.

3.2.4. Prélèvements pour l'AEP dans la zone du Grand Ried

Les forages utilisés pour l'alimentation en eau potable sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude (Figure 24 et 25). Les profondeurs de forage sont comprises entre 16 et 100 mètres. Les forages les plus profonds captent généralement les alluvions en dessous de 20 mètres de profondeur.

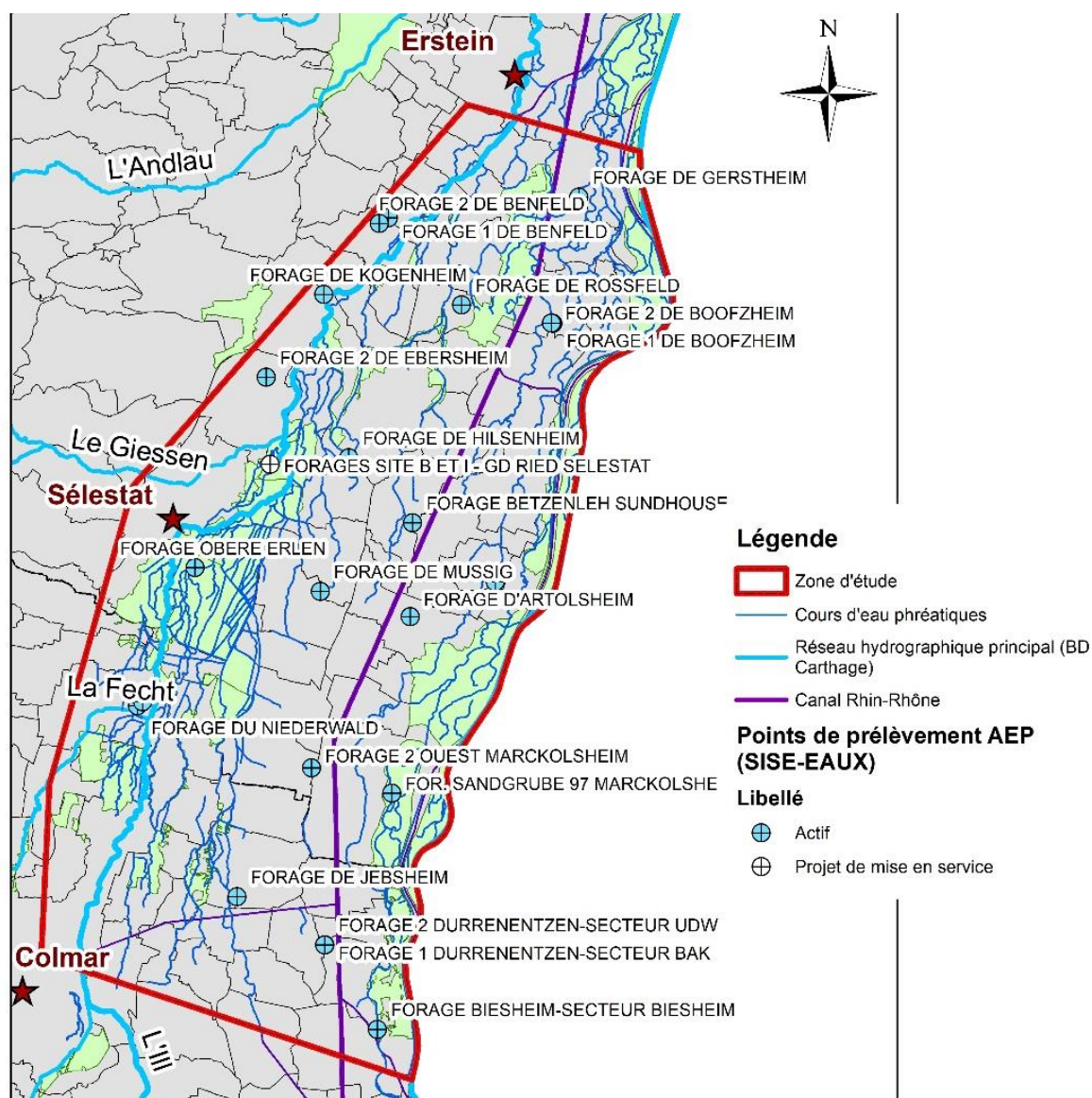


Figure 24 : Localisation des forages AEP.

Nom de l'installation	Code BSS	Commune	Profondeur	Date de la DUP
FORAGE D'ARTOLSHEIM	03431X0011/F	ARTOLSHEIM	20.2	03/02/2003
FORAGE 1 DE BENFELD	03081X0001/F1	BENFELD	29.5	28/05/1975
FORAGE 2 DE BENFELD	03081X0045/F2	HUTTENHEIM	42.2	28/05/1975
FORAGE 1 DE BOOFZHEIM	03086X0002/F	BOOFZHEIM	20	10/05/2000
FORAGE 2 DE BOOFZHEIM	03086X0057/P2	BOOFZHEIM	46.2	10/05/2000
FORAGE 2 DE EBERSHEIM	03078X0075/F2	EBERSHEIM	50	27/11/2014
FORAGE 2 OUEST MARCKOLSHEIM	03424X0016/F2	ELSENHEIM	40	10/12/1985
FORAGE DE GERSTHEIM	03082X0001/F	GERSTHEIM	16	18/12/1975
FORAGE DE HILSENHEIM	03078X0002/F	HILSENHEIM	25.5	06/03/1987
FORAGE DE KOGENHEIM	03074X0010/F	KOGENHEIM	20.4	02/09/1986
FORAGE DE MUSSIG	03424X0009/F	MUSSIG	30	20/03/1985
FORAGE DE ROSSFELD	03081X0002/F	ROSSFELD	20	02/09/1986
FORAGE DE SAASENHEIM	03431X0013/F	SAASENHEIM	20.2	11/12/1998
FOR. SANDGRUBE 97 MARCKOLSHEIM	03435X0138/F3	MARCKOLSHEIM	101	06/11/2000
FORAGE OBERE ERLÉN	03077X0164/F	SELESTAT	95	09/10/2000
FORAGE BETZENLEH SUNDHOUSE	03085X0186/F	SUNDHOUSE	40	06/03/2003
FORAGES SITE B ET I - GD RIED SELESTAT		SELESTAT		
FORAGE DU NIEDERWALD	03423X0066/F1	GUEMAR	46	26/06/1998
FORAGE 1 DURRENTZEN-SECTEUR BAK	03428X0013/F1	DURRENTZEN	25	25/06/2010
FORAGE DE JEBSHEIM	03428X0002/F	JEBSHEIM	25.5	14/11/1972
FORAGE 2 DURRENTZEN-SECTEUR UDW	03428X0069/F2	DURRENTZEN	27	25/06/2010
FORAGE BIESHEIM-SECTEUR BIESHEIM	03784X0016/F	BIESHEIM	20	06/12/1974
FORAGE NIEDERWALD BERGHEIM (SIEB)	03423X0080/F	GUEMAR	50.2	10/05/1999

Figure 25 : Profondeur des forages AEP présents sur la zone d'étude.

3.2.5. Prélèvements agricoles (irrigation) dans la zone du Grand Ried

Les forages d'irrigation se répartissent sur l'ensemble des zones agricoles de la zone d'étude (Figure 26). Ils se caractérisent par :

- une profondeur inférieure à 10 mètres en raison de la forte productivité de l'aquifère et de la faible profondeur de la nappe ;
- une multiplication des forages, notamment **sur la partie centrale de la zone d'étude** liée :
 - à une forte présence de parcelles irriguées sur le secteur avec une culture de maïs prépondérante,
 - au moindre coût des forages.

Le nombre de forage sur le département du Haut Rhin disponible auprès de la DDT ne semble pas représentatif. En effet, les campagnes de terrain réalisées avec l'AFB en juillet et août 2017 ont permis de relever de très fortes divergences entre les ouvrages déclarés à la DDT 68 et les ouvrages présents sur le terrain. De plus, des erreurs de localisation sur l'ensemble des ouvrages est présente (cf. compte rendu de terrain en annexe).

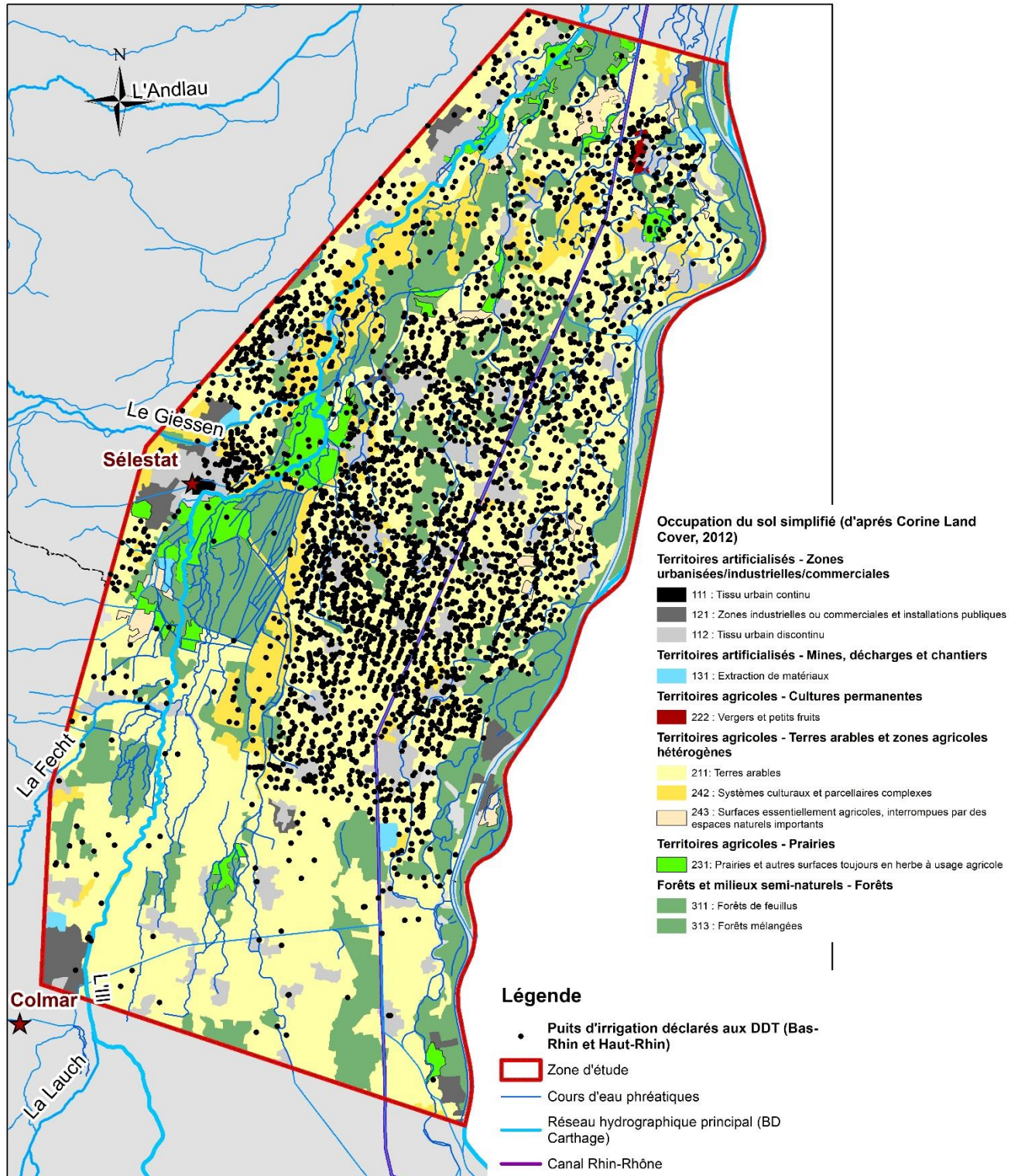


Figure 26 : Localisation des puits d'irrigations (DDT).

3.2.6. Comparaison des débits prélevés pour l'AEP et l'irrigation sur le Ried Centre plaine (hors bande rhénane)

De manière à comparer les ordres de grandeur des débits prélevés en période d'étiage, les volumes annuels déclarés à l'agence de l'eau ont été ramenés à un débit horaire *moyen sur la base de 12 h par jour*. Les débits liés à l'irrigation ont été rapportés à une durée de prélèvements de 5 mois (mi-avril à mi-septembre). Les valeurs sont présentées dans le tableau ci-après (Figure 27).

Nom de la commune	Débit horaire moyen des forages AEP	Débit horaire moyen lié à l'irrigation en période d'irrigation
Selestat	209,2	201,6
Guémar	108,6	252,6
Jebsheim	58,2	327,7
Ebersheim	53,2	544,7
Benfeld	52,7	
Hilsenheim	43,7	529
Huttenheim	42,9	0,9
Ebermunster	35,5	4,5
Wittisheim	26,7	175,2
Mussig	17,6	322,5
Rosfeld	12,9	12,1
Kogenheim	12,4	11,5
Elsenheim	2,3	213,8
Diebolsheim	0,4	10,1

Figure 27 : Ordre de grandeur des débits horaires moyens prélevés pour l'AEP et l'irrigation par communes de la zone d'étude.

Les débits horaires moyens obtenus confirment la prépondérance de l'irrigation en période d'étiage. Seuls les captages AEP de Sélestat et Guémar semblent susceptibles de présenter des débits non négligeables face aux prélèvements liés à l'irrigation.

Toutefois, les données des prélèvements liés à l'irrigation sont reliées au siège social et non aux points de prélèvements. Des biais peuvent par conséquent être présents sur certaines communes (C'est par exemple le cas des exploitations agricoles ayant leur siège social sur les communes de la zone d'étude et irriguant sur la commune de Dambach la ville, hors zone d'étude). Un minimum de vérification de cohérence avec la réalité a par conséquent été réalisé avec une simple comparaison des surfaces agricoles apparentes par vue satellite.

En complément, les remarques suivantes peuvent être reportées :

- l'analyse des tendances des prélèvements réalisés par la Région Grand Est (Manlay, 2017) présente une évolution à la hausse du nombre de forages d'irrigation. Cette tendance pourrait concorder avec l'augmentation progressive des surfaces irriguées notée depuis les années 70/80 mais aussi avec la volonté de prévenir les périodes de sécheresses agricoles par des prélèvements en eau souterraine ;
- les données de débits et volumes étant indisponibles aux points de prélèvement, il est difficile d'interpréter des phénomènes locaux comme l'influence du climat (différence de pluviométrie entre le nord et le sud de la zone d'étude).

3.3. ANALYSE DES ASSECS SUR LES RUISSEAUX PHRÉATIQUES

3.3.1. Observation des assecs via le réseau ONDE (Observatoire National des Étiages)

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 la vision du réseau hydrique de surface donnée par les stations hydrométriques, généralement postés sur les principaux cours d'eau.

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 courant (grandes zones lenticques), 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.).*

Au niveau de la zone d'étude, 6 stations d'observation sont présentes (Figure 28). Les données pour chaque La chronique couvre une période de 6 ans à la date de l'étude, ce qui ne permet pas de disposer d'une analyse représentative statistiquement des périodes de retour des étiages, en corrélation avec les périodes de retour de débits des cours d'eau.

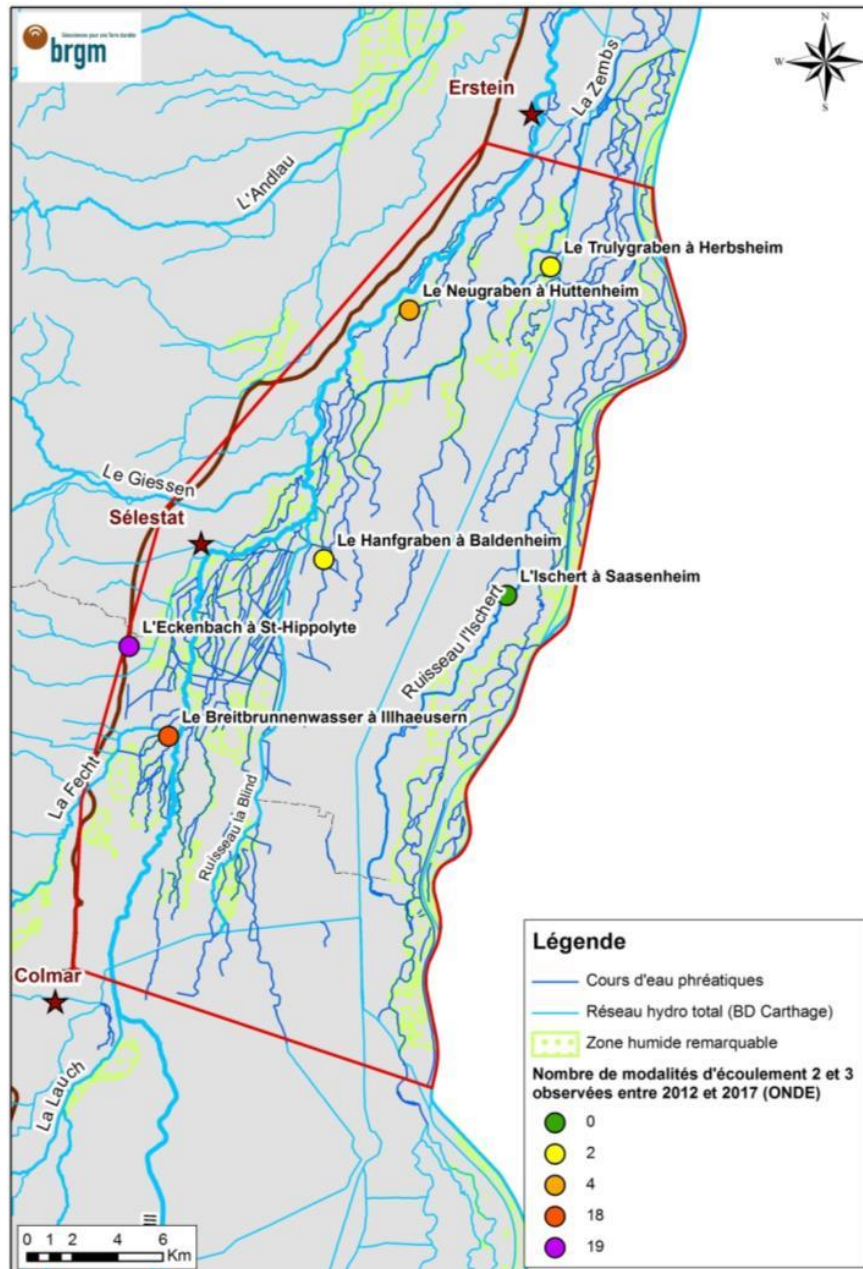


Figure 28 : Localisation des stations ONDE et occurrences des assecs sur la zone d'étude via le réseau ONDE.

Les résultats des observations du réseau ONDE ont permis de distinguer les assecs de l'année 2015 et de l'année 2017 (Figure 29), notamment :

- le nombre d'assecs observé via le réseau ONDE est moins important lors de la période estivale de 2015 par comparaison à celle de 2017 ;
- la période d'assec sur le breitbrunnenwasser s'est prolongée en 2017 par comparaison à 2015.
- les dates d'apparition des assecs sur le breitbrunnenwasser et l'Eckenbach sont en juillet sur les années normales et en juin pour 2015 et 2017. En 2014, un assec est aussi observé en juin, mais il y a eu une disparition des assecs en juillet.

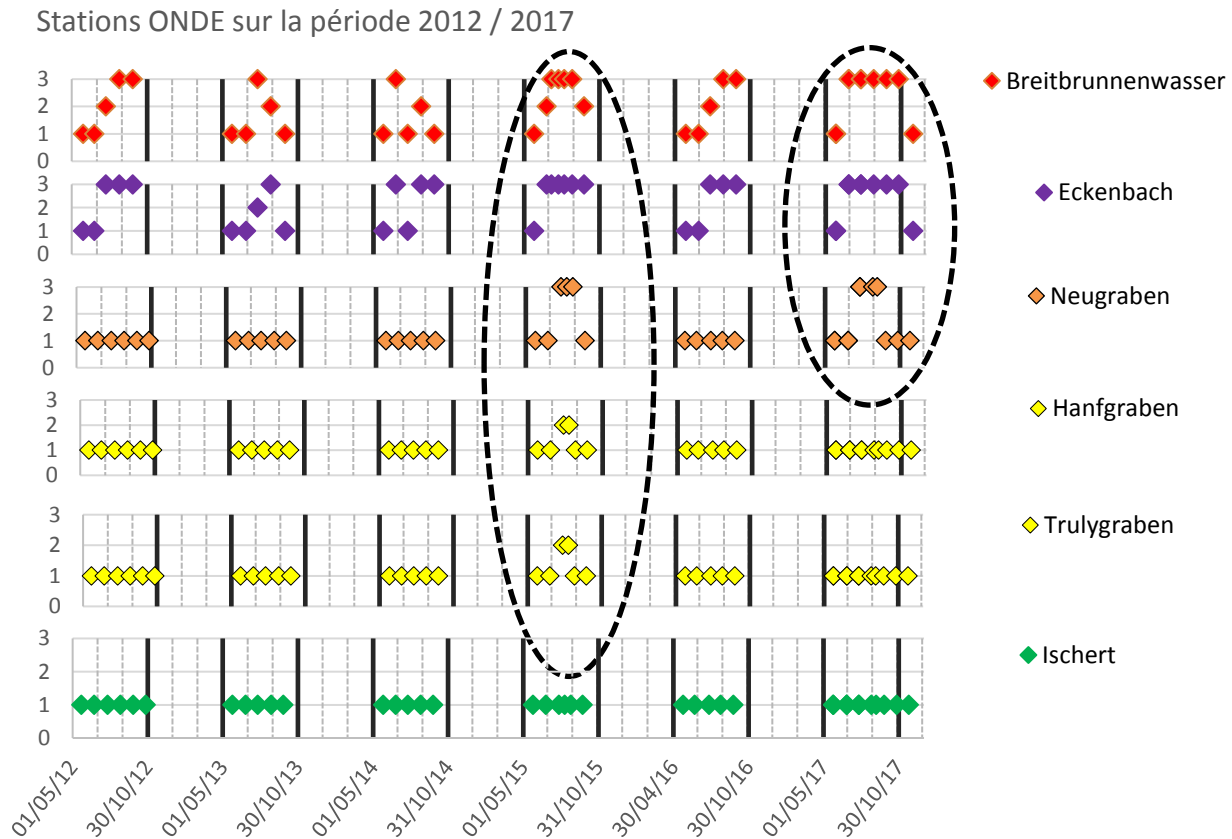


Figure 29 : Synthèse des observations sur les stations ONDE de la zone d'étude durant la période 2012 / 2017.

3.3.2. Comparaison du niveau piézométrique et des assecs sur la période 2012 /2017

Un comparatif sur la période 2012/2017 des niveaux piézométriques et des assecs a été réalisé en utilisant :

- les données d'observations des assecs du réseau ONDE (présentés au paragraphe 3.3.1) ;
- les piézomètres DCE du réseau du suivi sécheresse du bassin Rhin Meuse situés à Rossfeld (03081X0025/223) et Holtzwihr (03427X0027/92).

La comparaison permet de mettre en relation les observations des assecs réalisés entre 2012 et 2017 avec les niveaux piézométriques mesurés (cf. figures 29 à 31 et annexe 3 pour des figures plus précises des courbes piézométriques) Ainsi :

- en 2015 :
 - la présence d'assecs sur toutes les stations ONDE, hors bande rhénane correspond à une période de décennal sec au niveau piézométrique. De plus, cela correspond au plus bas niveau piézométrique observé sur la période 2012 / 2017 soit :
 - 180,9 m NGF à Holtzwihr le 8 août 2015,
 - 157,08 m NGF à Rossfeld le 23 juillet 2015 ;
 - l'écoulement n'était plus visible sur les stations du Trulygraben et du Hanfgraben sur une période englobant le 27 juillet et le 10 août 2015.

- en 2017, la présence d'assecs sur 3 stations ONDE correspond à une période de quinquennals secs pour Rossfeld et décennal sec pour Holtzwirh. Cela correspond à :
 - 180,14 m NGF à Holtzwirh le 7 août 2017,
 - 157,14 m NGF à Rossfeld le 28 juillet 2018 ;
- en 2012, 2013, 2014 et 2016, les valeurs minimales piézométriques estivales sont proches de la normale. Les dates d'apparition des assecs sur les stations de l'Eckenbach et du Breitbrunnenwasser correspondent à la période des plus bas niveaux sur chaque année soit :
 - Août / septembre pour 2012, 2013 et 2016,
 - Juillet pour 2014.

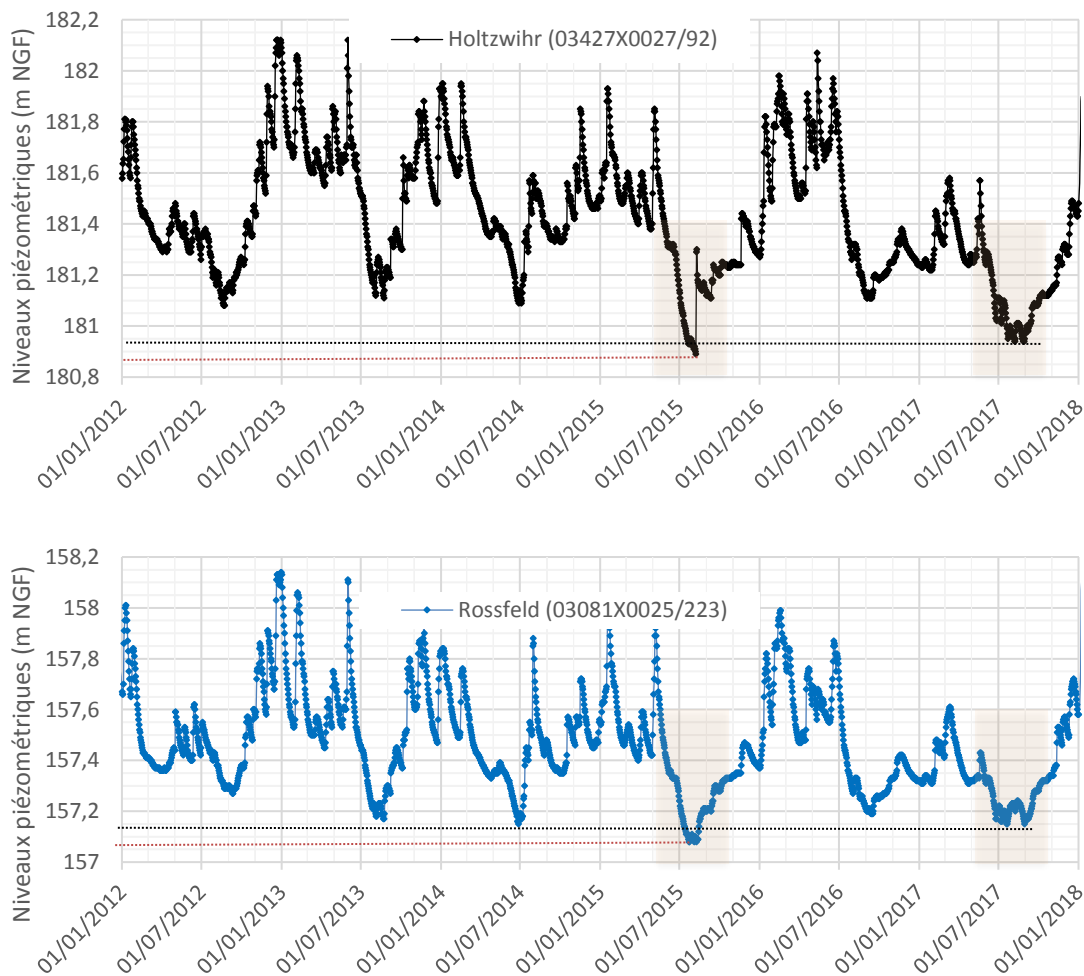


Figure 30 : chroniques piézométriques des piézomètres du BSH à Rossfeld et Holtzwirh sur la période 2012/2017.

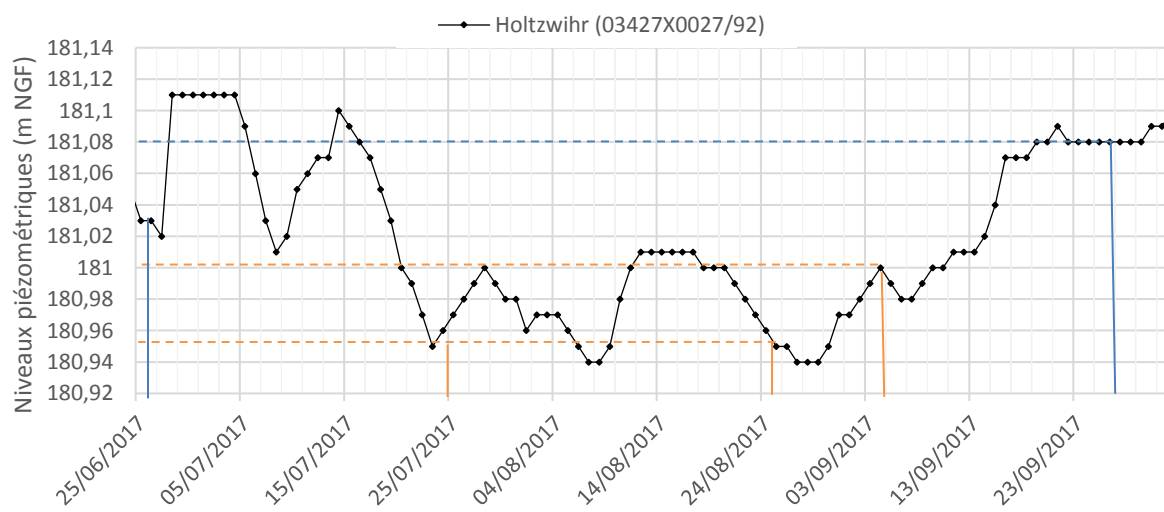
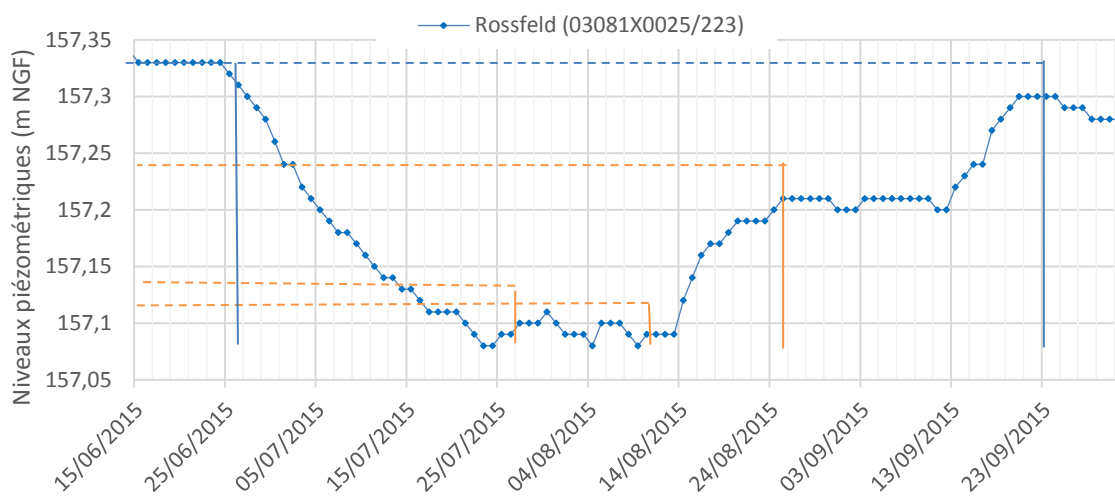
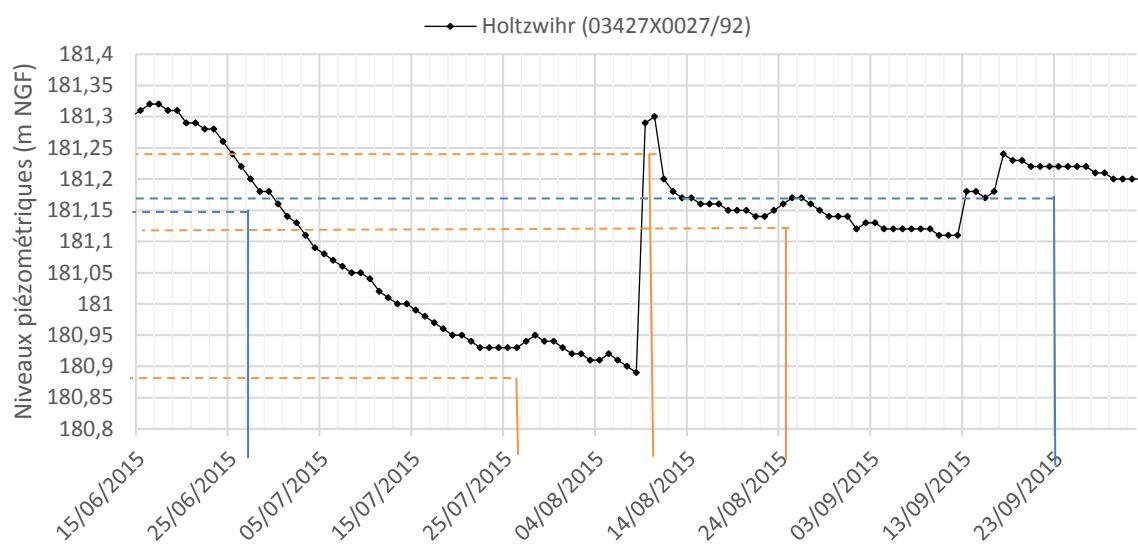
En utilisant les dates des observations des assecs sur la période de 2015 et 2017 sur les stations du Trulygraben, de l'Hanfgraben et du Neugraben, les correspondances entre écoulements non visibles ou assecs et les valeurs des piézométries peuvent être précisés. Les valeurs relevées sont précisées dans le tableau ci-dessous.

La comparaison précise des campagnes et des niveaux piézométriques a mis en évidence :

- la moins bonne corrélation avec les assecs observés par le réseau ONDE et les niveaux relevés sur le piézomètre Holtzwirh. Cette observation est conforme à l'éloignement de ce piézomètre aux trois stations ONDE utilisées et disponibles sur la zone ;
- une sous-estimation potentielle des assecs en 2017 au vu des dates d'observations mensuelles et des niveaux piézométriques sur Rossfeld et Holtzwirh. Cela concorde avec les observations de terrains réalisées en 2017 avec l'AFB en dehors des dates de campagnes officielles ONDE ;
- une « incertitude » à 3 - 4 cm près entre les différents niveaux d'assecs observés et les niveaux piézométriques. Ainsi, les assecs sur le Neugraben en aout 2015 se situent à un niveau piézométrique supérieur aux valeurs de juin 2017 (soit 157,21 et 157,17 respectivement) où aucun assec n'est noté.

Date des campagnes ONDE	Observations sur les stations ONDE			Niveau piézométrique (mNGF)	
	Trulygraben	Neugraben	Hanfgraben	Rossfeld	Holtzwirh
25/06/2015	écoulement visible	écoulement visible	écoulement visible	157,32	181,2
27/07/2015	écoulement non visible	assecs	écoulement non visible	157,10	180,94
10/08/2015	écoulement non visible	assecs	écoulement non visible	157,09	181,3
25/08/2015	écoulement visible	assecs	écoulement visible	157,21	181,17
23/09/2015	écoulement visible	écoulement visible	écoulement visible	157,3	181,22
26/06/2017	écoulement visible	écoulement visible	écoulement visible	157,17	181,03
25/07/2017	écoulement visible	assecs	écoulement visible	157,19	180,97
25/08/2017	écoulement visible	assecs	écoulement visible	157,20	180,95
05/09/2017	écoulement visible	assecs	écoulement visible	157,17	180,99
25/09/2017	écoulement visible	écoulement visible	écoulement visible	157,28	181,08

Date d'observation des assecs sur le breitbrunnenwasser	Niveau piézométrique (mNGF)	
	Holtzwirh (03427X0027/92)	Rossfeld (03081X0025/223)
23/07/2012	181,27	157,44
25/07/2013	181,20	157,23
25/06/2014	181,11	157,16
25/06/2015	181,24	157,32
25/07/2016	181,33	157,34
26/06/2017	181,03	157,17



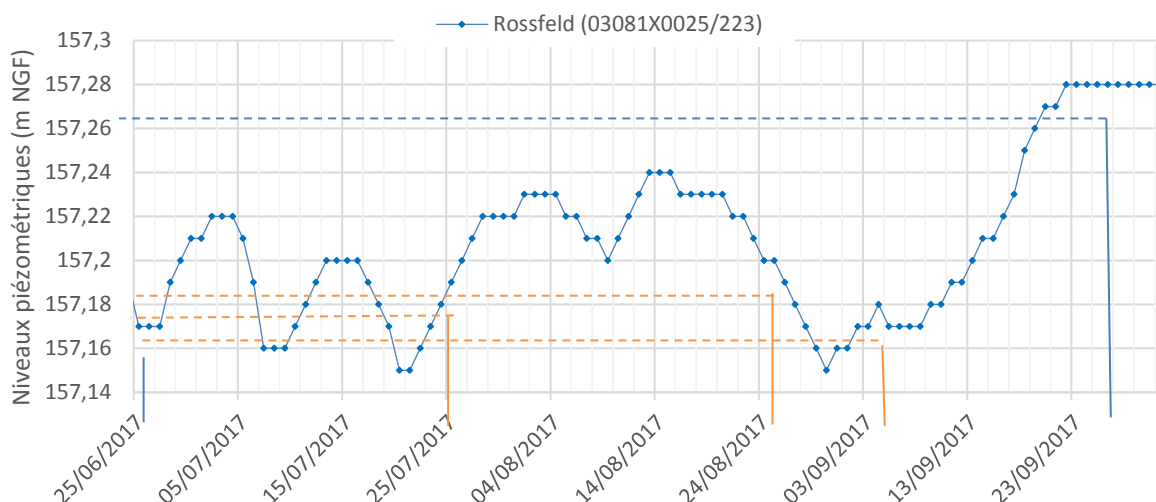


Figure 31 : Comparaison des campagnes d'observations ONDE et des niveaux piézométriques sur les étés 2015 et 2017.

3.3.3. Observations complémentaires

Des campagnes de terrain ont été réalisées conjointement entre l'AFB et le BRGM durant l'été 2017.

Les compte rendu de ces campagnes sont disponibles en annexe 1.

Ils ont permis de mettre en évidence :

- la difficulté de suivre les assecs, qui sont des phénomènes pouvant être locaux et courts dans le temps. En effet, le positionnement des campagnes de relevés après un orage peut par exemple masquer un assec ;
- la diversité des cours d'eau sur la zone d'étude et la nécessité en cas de volonté d'un suivi complet des ruisseaux phréatiques d'augmenter le nombre de points de suivi par rapport au réseau ONDE.

3.4. ANALYSE DES CHRONIQUES PIÉZOMÉTRIQUES : COMPORTEMENT DE LA NAPPE GÉNÉRAL ET EN PÉRIODE D'IRRIGATION

3.4.1. Analyses statistiques : tendances piézométriques et analyse du comportement général de la nappe

Une analyse statistique des chroniques piézométriques sur le long terme (10 à 30 ans) permet d'analyser le comportement hydrodynamique de la nappe. Dans le cadre de cette étude, les analyses se sont focalisées sur les résultats permettant de :

- analyser les évolutions potentielles de niveaux piézométriques de la nappe d'Alsace qui induiraient une évolution soit de la recharge, soit des prélèvements à l'échelle de la nappe ;
- déceler des comportements hydrodynamiques de la nappe indépendants de l'activité anthropique ou des variations climatiques, soit une potentielle inertie de la nappe d'Alsace et la présence de cycles hydrodynamiques.

L'ensemble du traitement brut, via le logiciel Esth'er des statistiques des cinquante-deux chroniques des piézomètres présents sur la zone d'étude (tests de tendances et de ruptures représentativités des tests, moyennes journalières/mensuelles et annuelles, analyses corrélatoires, ...) est disponible en annexe numérique.

a) Tendances piézométriques

L'analyse des tendances⁹ a été réalisée sur les trente-huit chroniques supérieures à 10 ans. Seuls les résultats des chroniques disposant de données sur les 15 dernières années ont été représentés.

Les résultats sont :

- l'absence de variation générale représentative statistiquement sur les piézomètres disponibles à l'échelle de la zone d'étude ;
- des tendances à la baisse et à la hausse a priori sous des influences locales. Les évolutions peuvent des fois se comporter « en marche d'escaliers ». Les valeurs les plus remarquables se situent au niveau de Sélestat (pz 03077X0238/209F) avec une baisse de l'ordre de 30 centimètres depuis les années 90 (Figures 32 et 33). Toutefois, la fin de la chronique ne permet pas de se prononcer sur la persistance de cette tendance ;
- une absence de données due à l'absence de suivis piézométriques de longues durées dans la zone de terrasses entre la dépression de l'III et la bande rhénane.

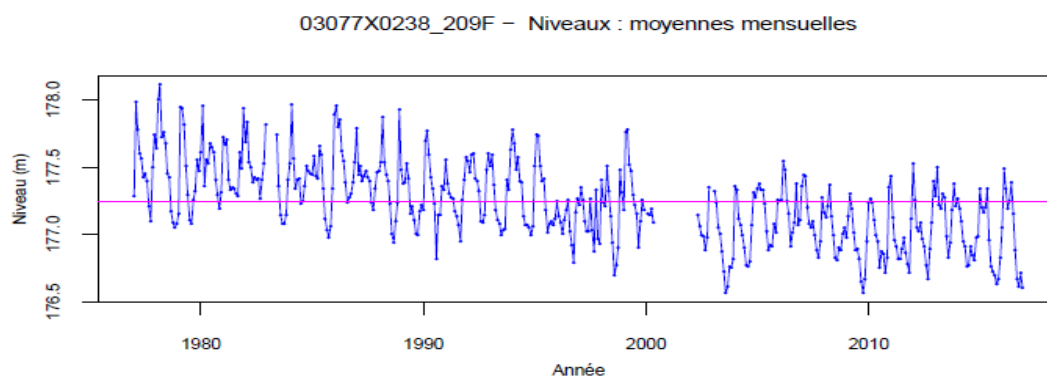


Figure 32 : Chronique piézométrique au niveau de Sélestat.

⁹ Résultats via les tests de Mann-Kendall et Pettit avec un seuil statistique fixé à 5 % de risque de non représentativité

Code_BSS	Commune	Évolution en cm/an à partir de la date de démarrage de l'évolution	Date statistique de démarrage de l'évolution	Début chronique*	Fin chronique ou arrêt	Durée de l'évolution (an)
03077X0238/209F	Selestat	-1,5	1995	1976	2017	41
03078X0014/214	Ebersheim	-0,5	1983	1955	2017	62
03082X0023/227	Daubensand	0,2	1998	1967	2017	50
03086X0024/212C	Sundhouse	0,2	1998	1967	2017	50
03423X0017/209C	Selestat	0,4	1997	1958	2017	59
03423X0056/100	Guemar	0,3	1998	1954	2017	63
03424X0026/247	Hessenheim	0,4	1998	1964	2017	53
03426X0159/93A	Sigolsheim	-0,7	1989	1978	2017	39
03427X0028/83A	Horbourg-Wihr	0,5	1978	1963	2017	54
03427X0029/86	Horbourg-Wihr	0,4	1993	1955	2013	58
03435X0014/201B	Marckolsheim	-0,5	1988	1965	2013	48

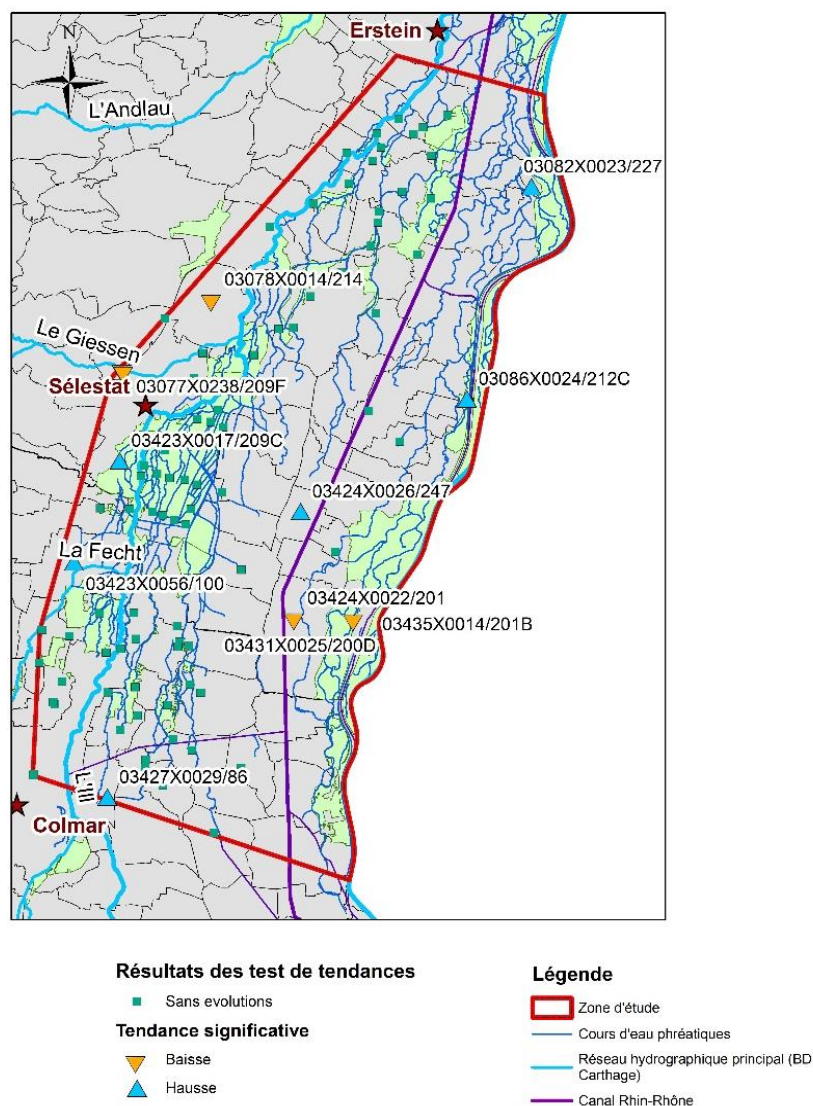


Figure 33 : Tableau et cartographie des résultats des tests de tendances significatifs sur les chroniques piézométriques.

b) Comportement général de la nappe : homogénéité, cycles pluriannuels et inerties de la nappe

- **L'homogénéité du comportement hydraulique**

L'analyse de l'ensemble des séries piézométriques de la zone d'étude a permis de confirmer le comportement homogène de la piézométrie sur l'ensemble de la zone d'étude hors bande rhénane (cf. annexe 2).

- **Cycles pluriannuels**

L'analyse statistique générale ne semble pas montrer de cycles pluriannuels clairement définis sur l'ensemble des piézomètres.

Toutefois, des pseudos cycles sur 12 ans pourraient être présents sur plusieurs piézomètres, notamment le piézomètre 03074X0015_263 (Epfig), 03077X0026_249 (Orschwiller) (Figure 34), 03081X0038_269 (Matzenheim) et le 03424X0022_201 (Marckolsheim).

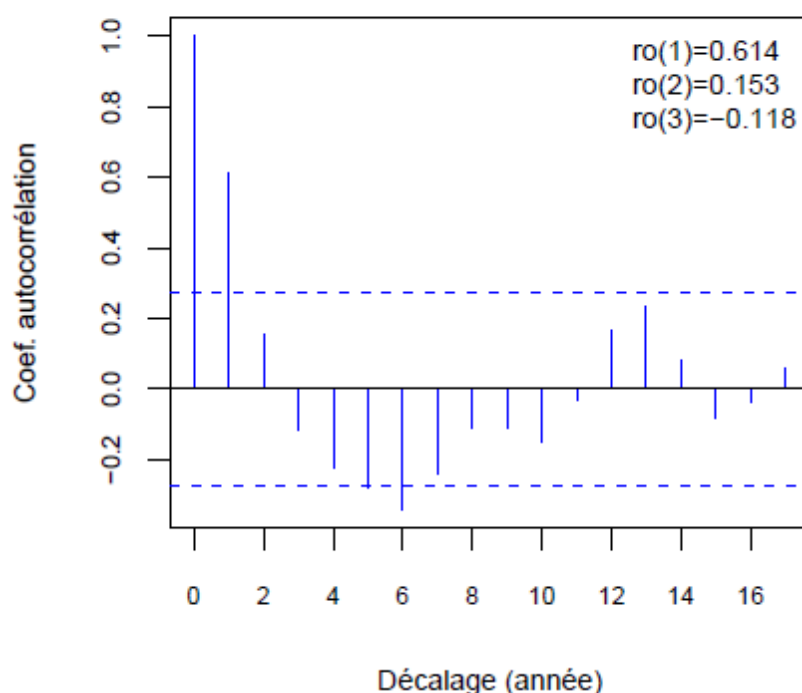


Figure 34 : Autocorrélogramme montrant une possible cyclicité sur 12 ans sur le piézomètre 03077X0026_249.

- **Inertie de la nappe**

La quasi-totalité des piézomètres présentent une inertie sur 1 à 2 ans (Figure 35).

Toutefois, très localement, les chroniques piézométriques présentent des corrélations représentatives d'une inertie plus forte en dehors des cycles abordés précédemment. C'est notamment le cas des piézomètres 03423X0017_209C et 03077X0238_209F présents sur Sélestat.

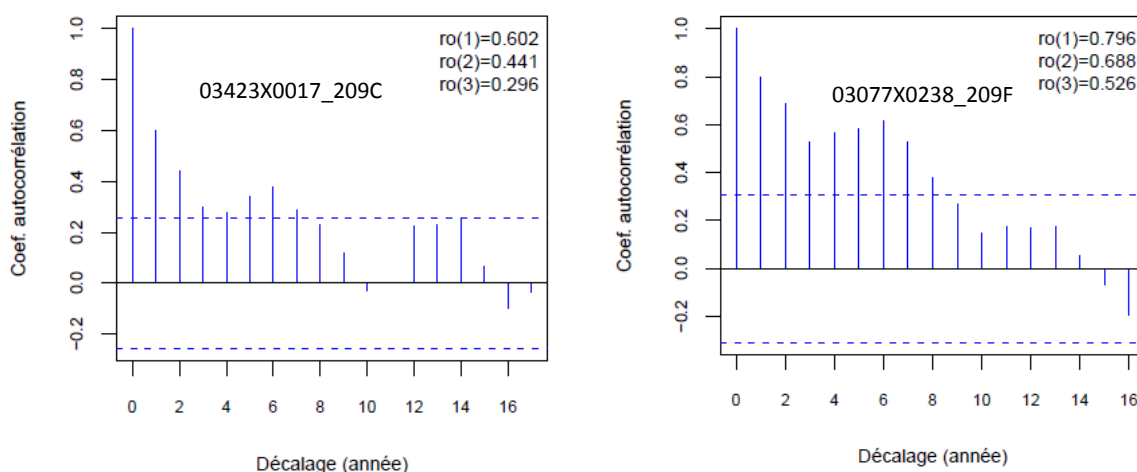


Figure 35 : exemples d'autocorrélogrammes montrant des inerties supérieures à 2 ans.

3.4.2. Analyse des chroniques piézométriques en période d'irrigation

a) Méthodologie et données disponibles

Au contraire des prélèvements AEP qui sont présents sur l'ensemble de l'année et donc difficilement décorrélables du signal global de la nappe, l'irrigation peut être différenciée en raison de ses applications plus ponctuelles.

L'impact potentiel de l'irrigation a été relevé lors des analyses piézométriques via des modélisations globales de type « boîte noire » avec le logiciel TEMPO, développé par le BRGM (Chabart *et al.*, 2004). Pour certains ouvrages, la piézométrie simulée par le modèle ne permettait pas de reproduire de manière satisfaisante la piézométrie mesurée lors des périodes estivales. Dans ces cas, le modèle surestimait de quelques centimètres la piézométrie observée ; la principale hypothèse étant l'impact des prélèvements pour l'irrigation effectués à partir de pompages dans la nappe. L'absence de données précises de prélèvements n'avait pas permis d'intégrer l'irrigation dans les modèles.

Cette hypothèse a été confirmée lors de la réalisation des essais de pompage de longue durée du forage Obere Erlen. En effet, une variation de 3 cm journalière est notée sur les données de pression mesurées dans les piézomètres. Cette variation est imputée directement aux puits d'irrigation sauf le jour où l'absence d'irrigation a été notée (ANTEA, 1998).

Suite à ces observations, une analyse complémentaire a été menée sur les données piézométriques au pas de temps horaire disponibles sur la zone d'étude et suivi par l'APRONA (Figure 36) en ciblant :

- les périodes de forte irrigation ;
- les périodes de tensions sur la ressource en eau souterraine, soit les années sèches les plus récentes ;
- les zones de plus fortes irrigations.

Une partie des données disponibles sont liées au suivi des zones humides réalisé par l'APRONA et mis en place en 2008. Le suivi horaire a été arrêté sur une partie des piézomètres en 2012/2013 et 2014. En dehors du piézomètre situé en bordure de la zone humide remarquable de la forêt d'Illwald, ces données n'ont pas été analysées en raison de l'absence d'observations des assècs concomitants. Les années sèches 2015 et 2017 ont été privilégiées pour leur aspects particuliers et leur lien avec l'apparition des assècs. L'observation des chroniques piézométriques au pas horaire peut permettre de percevoir :

- la mise en route des forages en début de période d'irrigation avec l'apparition de perturbations inférieures au pas journalier sur les chroniques horaires. Ces variations ne sont pas perceptibles au pas journalier ;
- les variations étant de faibles amplitudes (ordre du centimètre) ; elles peuvent être difficilement analysables et décelables sur l'ensemble des piézomètres. En effet, par endroits la précision des capteurs est du même ordre que les variations attendues. Le phénomène peut donc être noyé dans le bruit de la donnée. Toutefois, une augmentation du « bruit » semble correspondre sur tous les capteurs aux mêmes périodes et correspond à la période d'irrigation ;
- une augmentation de la pente globale (sur plusieurs jours/semaines) de l'abaissement de la piézométrie est présente dans ces périodes de variations journalières suggérant un impact plus global de l'irrigation sur la piézométrie de la nappe. Il est donc fortement probable que l'impact des forages d'irrigation se cumulent en amplitudes, mais aussi dans le temps sur l'ensemble de la saison d'irrigation.

Numéro BSS	Commune de localisation	Date de démarrage de l'enregistrement de la chronique (pas horaire ou journalier)	Arrêt de l'enregistrement au pas horaire ou dernière date de donnée transmise par l'APRONA
03082X0267/PZ4	Osthouse	10/12/2008	13/06/2012
03081X0236/PZ5	Huttenheim	10/12/2008	13/06/2012
03085X0207/PZ15	Rosfeld	10/12/2008	13/06/2012
03427X0362/PZ16	Riedwihr	11/12/2008	13/06/2012
03078X0327/P14W	Selestat	10/12/2008	12/07/2012
03423X0209/PZ9	Colmar	11/12/2008	03/07/13 08
03424X0552/P96-1F	Selestat	17/12/2008	23/07/2014
03424X0058/PZ10	Elsenheim	11/12/2008	23/07/2014
03085X0208/PZ7	Hilsenheim	26/03/2008	06/12/2017
03078X0349/PZ7	Ebersheim	30/09/2015	20/12/2017
03077X0238/209F	Selestat	29/12/1976	20/12/2017
03423X0017/209C	Selestat	13/10/1958	24/01/2018
03423X0064/94A	Illhaeusern	03/01/1984	31/01/2018
03081X0038/269	Matzenheim	07/10/1958	31/01/2018
03078X0333/PZ8	Muttersholtz	26/03/2008	14/02/2018
03422X0029/95	Ostheim	15/03/1955	21/03/2018
03427X0361/PZ6	Houssen	11/12/2008	28/03/2018
03426X0254/137	Colmar	22/12/2003	28/03/2018
03081X0025/223	Rosfeld	01/03/1955	29/03/2018
03427X0027/92	Holtzwihr	04/01/1955	29/03/2018

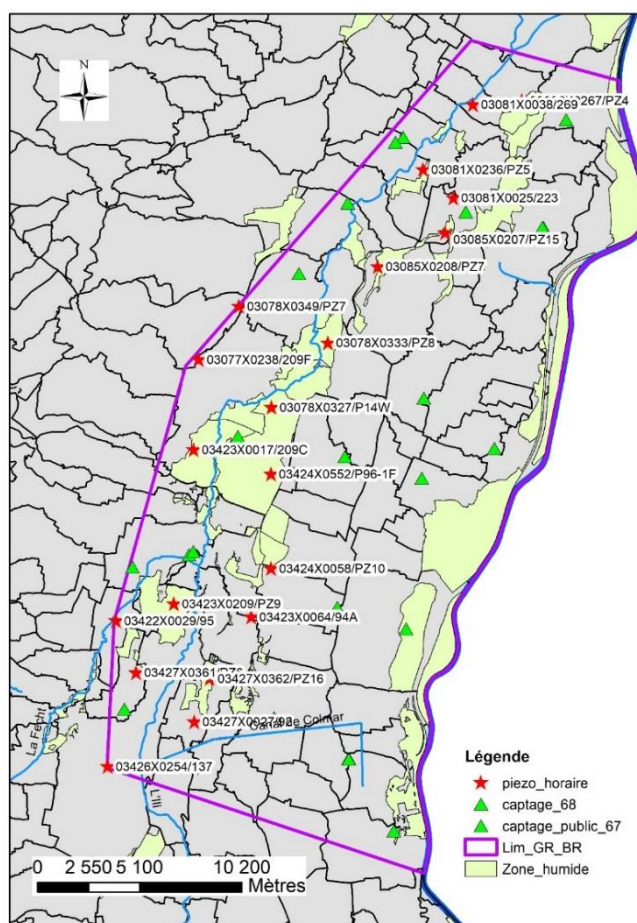


Figure 36 : Liste et localisation des piézomètres possédant des chroniques horaires (données APRONA).

b) Période 2010/2011 : bordure de la zone humide remarquable de la forêt de Illwald

Le piézomètre 03424X0552/-96-F, en bordure de la zone humide de Illwald permet d'illustrer les observations présentées auparavant sur les chroniques disponibles durant l'année 2011 et l'année 2010 (cf. Figure 37, Figure 39 et Figure 38) .

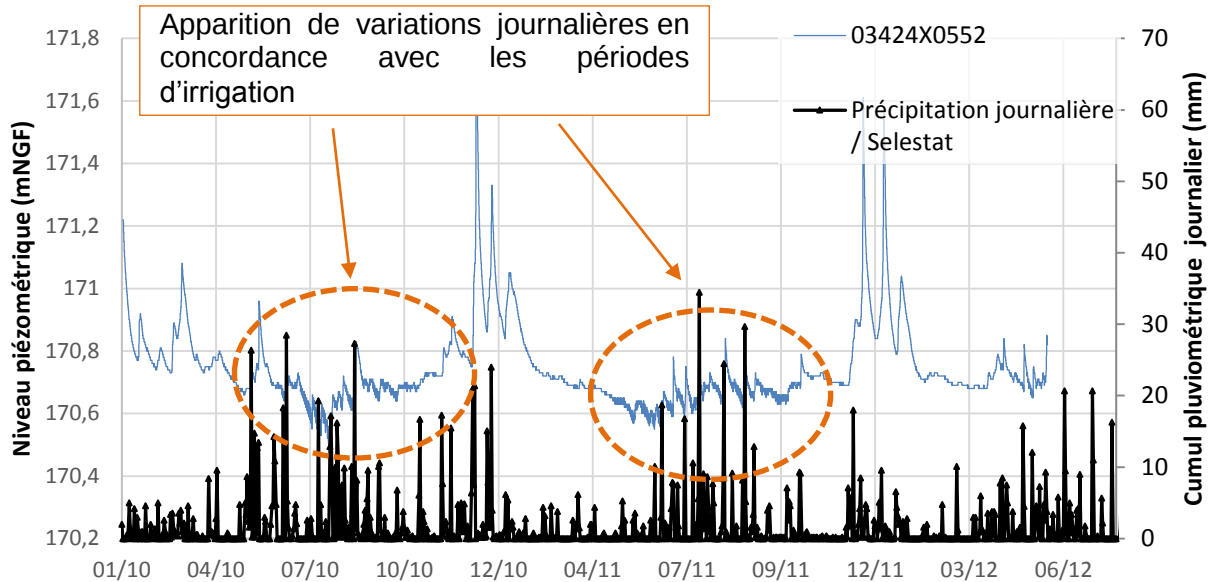


Figure 37 : Chronique piézométrique au pas de temps horaire du 01/01/10 au 01/06/12 : piézomètre 03424X0552/F96-F (données ARPONA).

Ce phénomène est visible en 2010, à partir de début juin. Le phénomène s'amplifie en juillet avec des variations journalières atteignant 5 à 6 cm. Cette période correspond à une période d'absence de précipitation qui entraîne une continuité de l'irrigation.

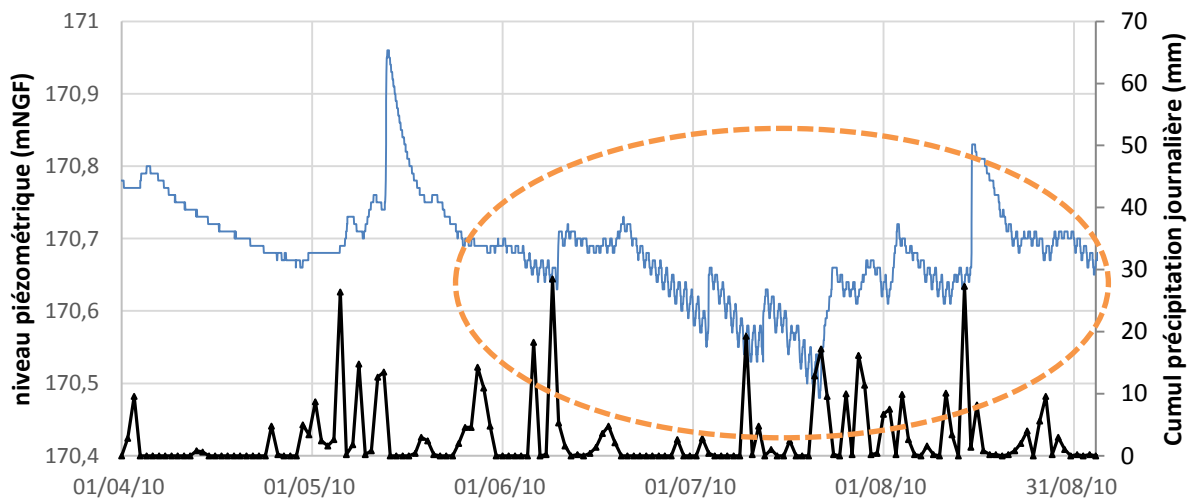


Figure 38 : Période d'irrigation de l'année 2010 perçue sur le piézomètre 03424X0552/F96-F.

Sur l'année 2011, le démarrage de la période d'irrigation se situerait vers début mai, ce qui correspond au démarrage d'une irrigation anticipée dans l'année en raison du déficit pluviométrique enregistrée lors du printemps 2011, notamment en avril et mai correspondant au début des cultures. Les variations journalières sont comprises entre 2 cm (en début de période d'irrigation) et 4 à 5 cm.

L'absence de précipitation durant la période d'avril/mai permet de bien observer l'augmentation des pentes moyennes de décroissance (multiplication par 3 à 4) du niveau piézométrique se mettant en place lors du démarrage de l'irrigation.

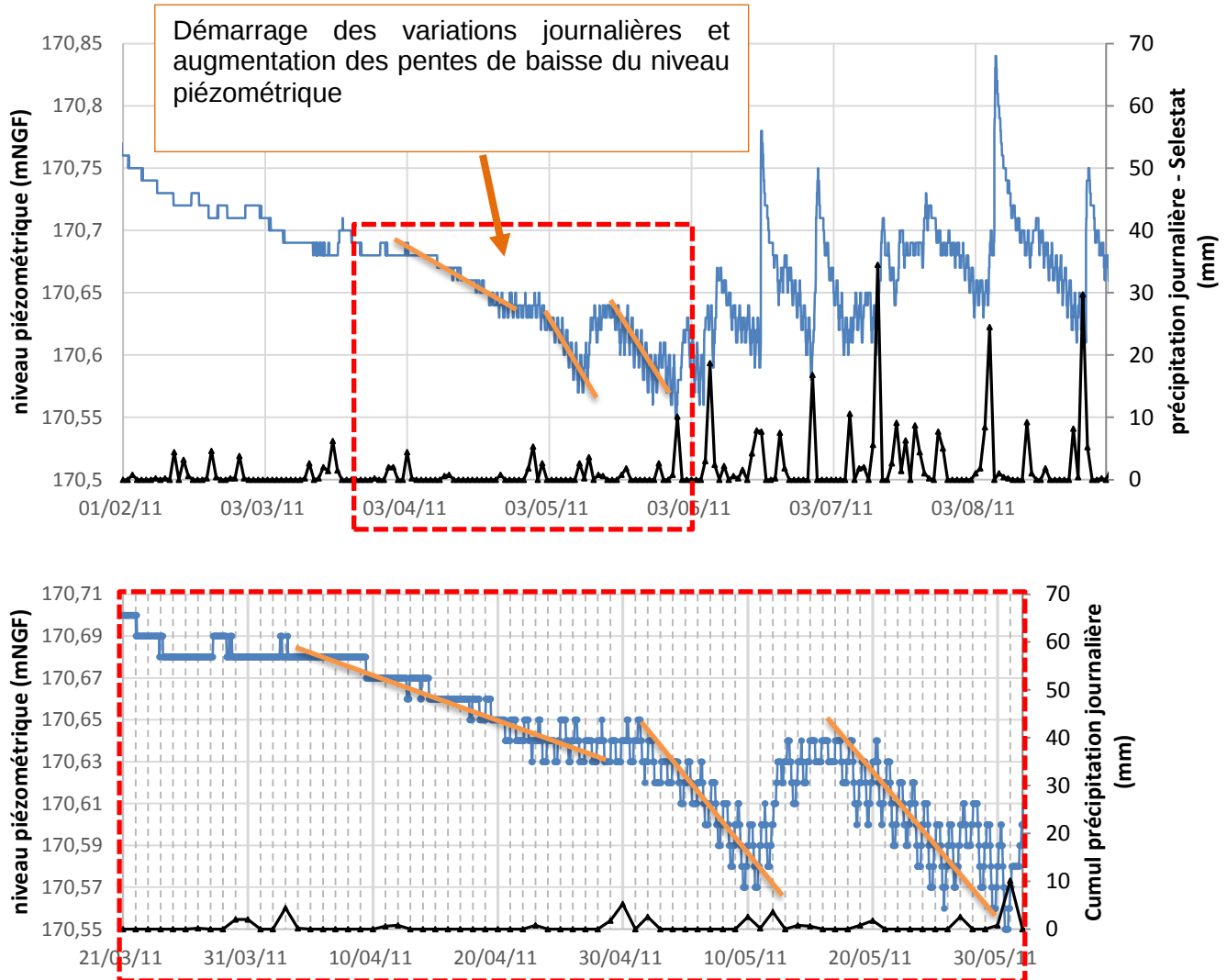


Figure 39 : Exemple de chronique piézométrique : période d'irrigation de l'année 2011 et zoom sur le démarrage de l'irrigation du piézomètre 03424X0552/F96-F.

Le démarrage des périodes d'irrigation est donc visible sur les chroniques piézométriques. Elles se traduisent par une accélération de la baisse du niveau piézométrique. Les changements de pente indiquent une anthropisation car l'allure de la courbe ne correspond alors pas à une courbe de décharge « naturelle ».

c) Période d'irrigation de 2015 et 2017

Toutes les données horaires des piézomètres disposant de chroniques sur la période 2015/2017 sont représentés en annexe 3.

Les années 2015 et 2017 ont été marquées comme des périodes de sécheresses hydrologiques et climatiques. Au niveau des eaux souterraines, l'année 2015 a présenté sur la zone d'étude globalement des niveaux piézométriques plus bas qu'en 2017. Cette tendance est vérifiée sur toute la zone centrale du Ried jusqu'au Rhin. Par contre, dans certaines zones particulières à l'est de l'III, le niveau piézométrique a été localement plus bas en 2017 qu'en 2015. C'est notamment le cas sur :

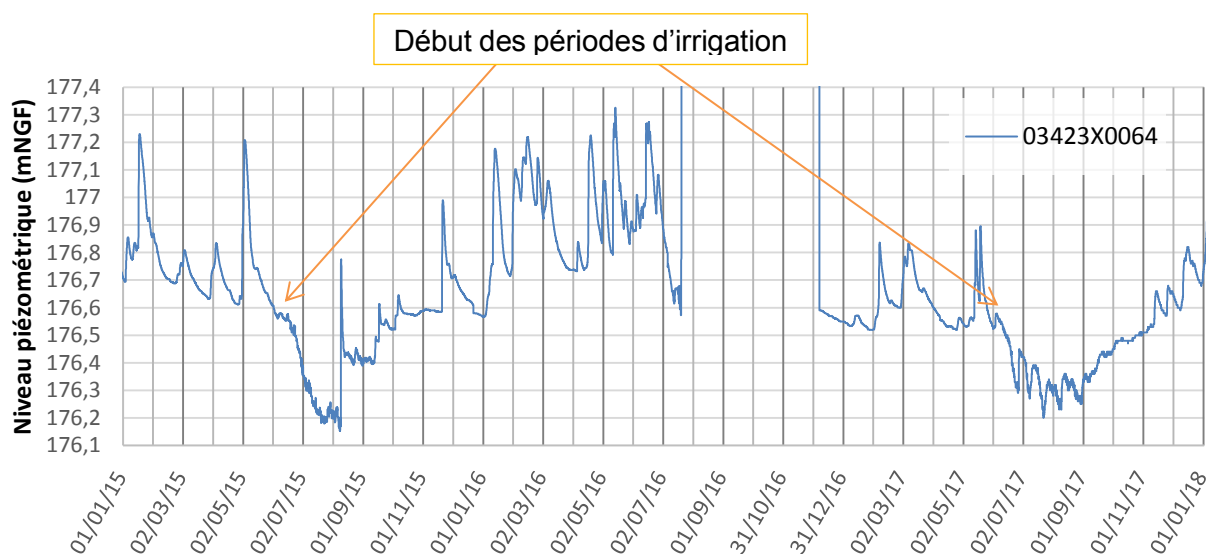
- le point 03423X0017/209C sur la commune de Sélestat et situé à proximité du Giessen ;
- le point 03426X0254/137 situé à Colmar.

Les chroniques piézométriques permettent de percevoir les débuts des périodes d'irrigation de 2015 et 2017 sur l'ensemble des points à partir des changements de pentes induits sur le comportement naturel de décharge d'une nappe libre. Les variations journalières sont visibles nettement sur seulement quelques piézomètres (Ilhauerssen, Muttersoltz, Selestat, Houssen).

La concordance entre les deux phénomènes permet de confirmer l'analyse des évolutions des deux types de baisses piézométriques (Figure 40) :

- la période d'irrigation de 2015 démarre début juin et se prolonge sans interruption ni phénomène de recharge durant toute le mois de juin et juillet. La prolongation de l'irrigation sans interruption semble être le principal moteur de la baisse du niveau piézométrique observée sur les piézomètres ;
- la période d'irrigation de 2017 démarre sensiblement à la même période. Toutefois, courant juillet, des interruptions concomitantes avec des phénomènes de recharge permettent un maintien tout le long de la saison d'irrigation et limitent la baisse continue du niveau piézométrique.

Dans les deux cas, on observe donc que les périodes d'irrigation peuvent engendrer selon les cas des baisses de niveaux piézométriques de 5 à 40 cm.



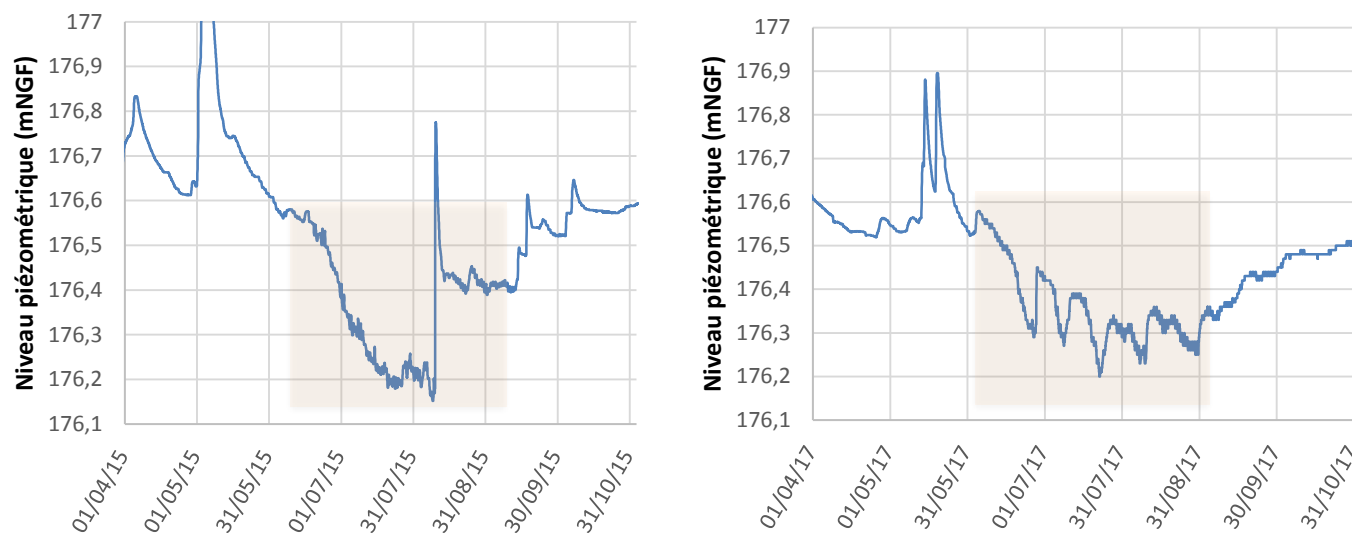


Figure 40 : Périodes d'irrigations de 2015 et 2017 visibles sur le piézomètre 03423X0064/94A à Illhaeusern.

4. Simulation de l'impact des pompages en eau souterraine

4.1. MÉTHODOLOGIE

La simulation des pompages présents dans le secteur d'étude a été réalisée à partir de plusieurs modèles analytiques.

4.1.1. Démarche générale

La démarche suivie est la suivante :

- choix du modèle analytique correspondant aux situations hydrogéologiques rencontrées et adapté aux données disponibles ;
- choix de jeux de paramètres déduits de l'état des lieux ;
- simulation pour un forage isolé ;
- superposition des effets des forages par addition des rabattements sur la nappe ou des débits soutirés aux rivières.

4.1.2. Modèles analytiques

Après une analyse des modèles analytiques disponibles¹⁰, les modèles retenus pour l'analyse sur la zone d'étude sont les suivants :

a) *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'emménagement.

Dans le cadre de cette étude, 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. Les simulations ont été réalisées avec le logiciel OUAIP.

b) *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 (Figure 41). 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.

¹⁰ 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, 106 p.

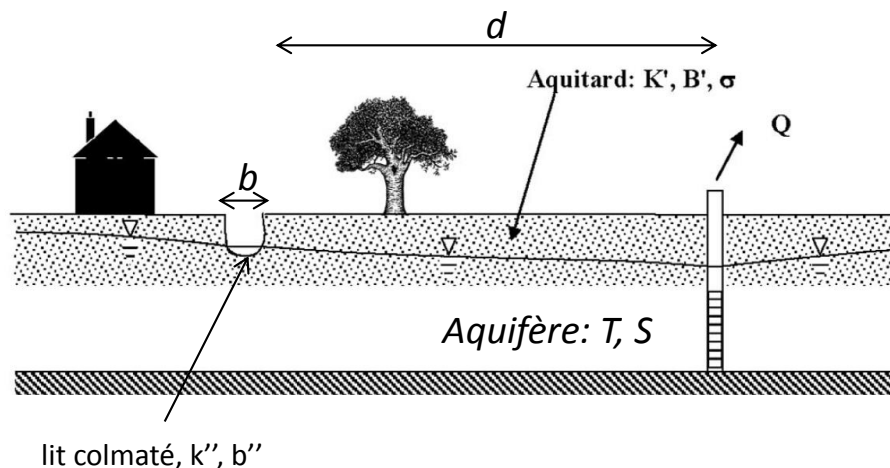


Figure 41 : Cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003).

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. b'' peut aussi être l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau, et k'' , de l'aquitard. Cette solution peut aussi ne pas tenir compte de l'aquitard en prenant une épaisseur nulle.

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>).

4.1.3. Choix des simulations

Les simulations réalisées se sont concentrées sur les zones présentant :

- une concentration de forages d'irrigation et/ou de forages AEP ;
- une différenciation des paramètres hydrogéologiques impliquant une différence potentielle d'impact sur la nappe ou les cours d'eau.

Seuls les forages AEP représentant un débit journaliers conséquents au regard des volumes prélevés par l'irrigation ont été simulés.

Pour les forages d'irrigation, l'homogénéité des paramètres permet d'utiliser un même jeu de paramètres pour plusieurs secteurs ou scénarii d'irrigation.

4.1.4. Calage des paramètres et sensibilité des modèles

L'ensemble des paramètres hydrogéologiques a été fixé à partir des éléments de l'état des lieux.

De manière à encadrer l'incertitude liés aux paramètres, une courte analyse de sensibilité sur les deux types de modèles a été réalisé sur les paramètres les moins contraints par les données.

a) **Transmissivités de l'aquifère**

Forages AEP : lorsque la donnée est disponible, la valeur de transmissivité obtenue via l'interprétation de l'essai est utilisée (cas du forage d'Obere Erlen). Sur les autres forages, la transmissivité est calculée à partir de l'épaisseur d'alluvions captées en appliquant une perméabilité de 8×10^{-3} m/s.

Forages d'irrigation : la valeur de transmissivité a été fixée pour l'ensemble des forages à $0,06 \text{ m}^2/\text{s}$ en se basant sur une perméabilité de 8×10^{-3} m/s et une épaisseur d'alluvions captés de 7/8 mètres. En effet, l'épaisseur des alluvions captée par les forages est supposée inférieure à 8 mètres en respectant l'épaisseur des aquitards, la profondeur de la nappe et la profondeur maximale de 10 mètres des forages.

La sensibilité des modèles analytiques à ce paramètre implique les résultats des impacts est :

- rabattement de la nappe : une surestimation de la transmissivité va *sous-estimer* le rabattement occasionné par un pompage ;
- prélèvement sur les cours d'eau : une surestimation de la transmissivité va *sur-estimer* le débit prélevé sur le cours d'eau.

b) **Coefficient d'emmagasinement**

Le coefficient d'emmagasinement est fixé à 0,014. Son influence étant relativement limitée au regard des autres paramètres du modèle, la valeur a été gardée constante pour l'ensemble de la zone (nappe libre et nappe semi captive).

c) **Paramètres spécifiques au modèle de Hunt : aquitard et cours d'eau**

Les paramètres spécifiques liés au modèle de Hunt et ne présentant pas d'influences majeures sur les calculs sont :

- le colmatage du cours d'eau qui peut être inexistant (ruisseaux phréatiques en contacts directs avec la nappe) ou de faible épaisseur ;
- les paramètres de l'aquitard dans les zones humides et de Ried (pour rappel, aucun aquitard n'est présent en dehors de ces zones) :
 - aucune valeur de perméabilité n'est disponible. Elle a été arbitrairement fixée à « inconnue » mais peut être estimée comme « imperméable » avec une valeur de 10 (perméabilité et épaisseur),
 - l'épaisseur maximale relevée dans la zone de l'Illwald est de deux mètres.

La largeur du cours d'eau est un paramètre qui peut influencer fortement le calcul du débit prélevé sur le cours d'eau. En raison des variations fortes de largeur des cours d'eaux (phréatiques ou rivières) une valeur arbitraire a été fixée à 1 mètre qui correspond à la largeur des petits phréatiques. **Si la largeur du cours d'eau est fortement supérieure à cette valeur, l'impact des pompages sur le cours d'eau sera minimisé.**

d) Débits moyens et débits horaires

La comparaison d'une simulation de l'impact sur un cours d'eau (modèle Hunt) avec l'utilisation d'un débit moyen de pompage et d'un débit « instantané » horaire permet de conclure les deux points suivants (Figure 42) :

- le comportement final simulé sur un cycle de pompage est identique. La moyenne des débits soutirés aux cours d'eau sur un « cycle » de pompage est égale à la valeur du débit calculé à partir d'un débit moyen de pompage ;
- l'utilisation d'un débit moyen lisse les pics de débits maximums soutirés aux cours d'eau. L'utilisation du débit moyen pourrait donc avoir pour conséquence de minimiser les impacts ponctuels des pompages.

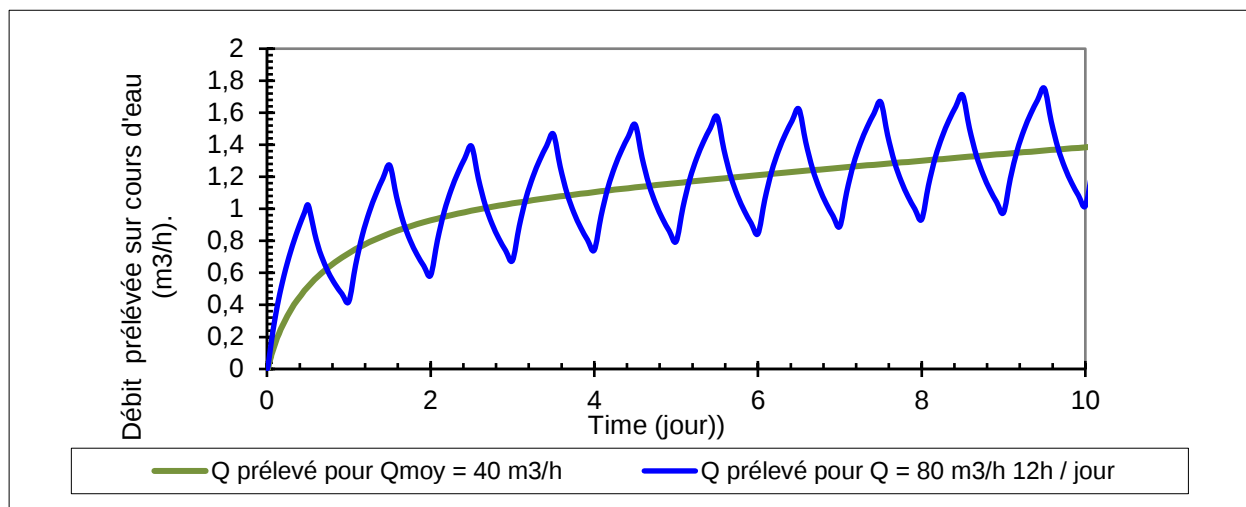


Figure 42 : Comparaison des débits Q prélevés sur les cours d'eau dans deux cas de simulation : courbe verte = débit moyen constant de $40 \text{ m}^3/\text{h}$; courbe bleue = pompage de $80 \text{ m}^3/\text{h}$ durant 12 h et arrêt durant 12h.

4.2. SCÉNARIIS DE POMPAGES

Les scénariis et les paramètres d'exploitation des forages sont différents en fonction de l'usage AEP et de l'irrigation. Les hypothèses utilisées pour les débits, les temps de pompages et les superpositions dans les cas des forages d'irrigation sont présentées ci-après.

4.2.1. Prise en compte de l'irrigation

Les pompages liés à l'irrigation vont capter la zone supérieure de l'aquifère. La durée des pompages et le débit sont dépendants de la climatologie, des cultures de l'année et du type d'équipement employé. De plus les pompages ne sont pas constants sur un même ouvrage et sur une même période.

Au niveau de la zone d'étude :

- l'équipement est majoritairement composé d'enrouleur avec un débit de fonctionnement compris entre 50 et $100 \text{ m}^3/\text{h}$ (Chambre d'agriculture, 2017) ;
- le débit moyen est estimé à $80 \text{ m}^3/\text{h}$ par la chambre d'agriculture d'Alsace (*communication lors du comité technique de projet*) ;
- les durées de fonctionnement ont été fixées à 10 h par jour ;

- l'espacement entre chaque point de pompage est de l'ordre de 250 mètres, ce qui correspond à la distance maximale atteignable par le matériel d'irrigation ;
- le même matériel d'irrigation sera déplacé entre les différents forages pour un irrigant. Ce phénomène est lié au faible coût des forages par comparaison au coût du matériel d'irrigation proprement dit ;
- en l'absence de données de débits par forages, une vérification de la cohérence globale entre les débits et les temps de pompages rapportés à un volume par hectares de cultures a été réalisé, soit :
 - une hauteur d'eau de 60 mm/ha pour une année humide,
 - une hauteur d'eau de 120 mm/ha pour une année sèche ;

Ce calcul ne permet pas de descendre à une échelle d'investigation locale pour chaque tronçon des cours d'eau ou chaque disposition des villages/cultures. Toutefois les ordres de grandeur ne sont pas affectés par les approximations réalisées dans les modèles.

Le tableau suivant permet de suivre les ordres de grandeur des équivalences entre (Figure 43) :

- le volume et hectare de surface pour les débits pompés sur un seul forage (isolé ou forage équivalent à plusieurs forages situés dans une même zone) suivant le nombre de jour de pompage, en ayant pour hypothèse 80 m³/h pendant 10 heures ;
- le volume et le nombre de « bandes de surfaces irriguées » par jour en supposant qu'une bande de surface irriguée soit en moyenne de l'ordre de 250 x 100 mètres, soit 2,5 ha (distance maximale de l'enrouleur x distance d'aspersion du jet). Une visualisation d'un exemple de bandes de champs est visible sur les Figures 43.

Nombre de jour d'irrigation (10h / jour)	Volume pompé sur un point (m ³)	Mm/ha appliqué	Nombre d'hectare couvert	Nombre d'équivalent bande irriguée en simultané
1	800	30	2,7	1,1
2	1600	30	5,3	2,1
3	2400	30	8,0	3,2
4	3200	30	10,7	4,3
5	4000	30	13,3	5,3
3	2400	60	4,0	1,6
4	3200	60	5,3	2,1
5	4000	60	6,7	2,7
6	4800	60	8,0	3,2
7	5600	60	9,3	3,7
8	6400	60	10,7	4,3
9	7200	60	12,0	4,8
10	8000	60	13,3	5,3
5	4000	90	4,4	1,8
6	4800	90	5,3	2,1
7	5600	60	9,3	3,7
8	6400	60	10,7	4,3
9	7200	60	12,0	4,8
10	8000	60	13,3	5,3
30	24000	60	40,0	16,0
30	24000	120	20,0	8,0



Figure 43 : Exemple de vue aérienne des surfaces cultivées et irriguées au sud de Mussig (Orthophotographie IGN).

De manière à différencier les différentes composantes de l'impact des pompages, les simulations ont intégrés plusieurs scénarii :

- 1) simulation de l'impact sur le cours d'eau et sur le niveau piézométrique pour un forage « isolé » sur une courte durée ;
- 2) simulation de l'impact sur le cours d'eau et sur le niveau piézométrique pour un « équivalent forage » de plusieurs forages rapprochés dont les mises en route se succèderaient à une même distance sur des périodes de temps de 10 jours à 1 mois. La simulation ramène en un même point la mise en route de plusieurs pompages à une distance équivalente du cours d'eau ;
- 3) calcul de la superposition des effets de plusieurs forages.

4.2.2. Prise en compte de l'AEP

L'alimentation en eau potable (AEP) va capter entre 15 et 95 mètres de profondeur les alluvions rhénanes. Le nombre d'ouvrages présentant un débit significatif au regard de l'ensemble des pompés est restreint. Par conséquent chaque forage AEP pouvant induire un impact a été simulé séparément en fonction de ses paramètres.

4.3. RÉSULTATS

4.3.1. Aquifère homogène, sans effet des phréatiques ou autres cours d'eau

a) Forage d'irrigation isolé

Ce cas correspond à la situation dans le Ried caillouteux, soit un secteur éloigné des zones humides et des zones de phréatiques.

La simulation est réalisée avec :

- modèle de Theis sur 5 jours ;
- pompage à 80 m³/h, 10h par jour ;
- évaluation du rabattement (soit l'abaissement du niveau piézométrique par rapport à son niveau initial) à une distance r de 20, 50, 100, 250 et 1 000 mètres.

Les courbes simulées montrent (Figures 44 et 45) :

- la présence d'un impact jusqu'à une distance éloignée (2 cm à 1 km de distance) ;
- l'absence d'un retour à l'équilibre complet au bout d'un arrêt de 14 heures du pompage ;
- la superposition dans le temps des différents cycles de pompage.

Distance au puits de pompage	20 mètres	50 mètres	100 mètres	250 mètres	1 000 mètres
1 jour (10h)	19,94	14,55	10,50	5,339	2,47E-01
2 jours (34h)	20,96	15,57	11,52	6,330	8,28E-01
5 jours	22,20	16,80	12,75	7,544	1,798

Figure 44 : Synthèse des rabattements en cm.

On remarque donc que les niveaux de rabattement obtenus par ces simulations sont cohérents avec les rabattements réellement observés au paragraphe 3.4.2. en 2015 et en 2017, par exemple (Figure 40), et sont du même ordre de grandeur que la différence de niveau piézométrique relevée au paragraphe 3.3.2. sur le piézomètre de Rossfeld entre 2015 et 2017 (Figure 30), et qui permet le passage d'une situation d'assec partiel en 2017 en assec généralisé des stations du réseau Onde de la zone d'étude.

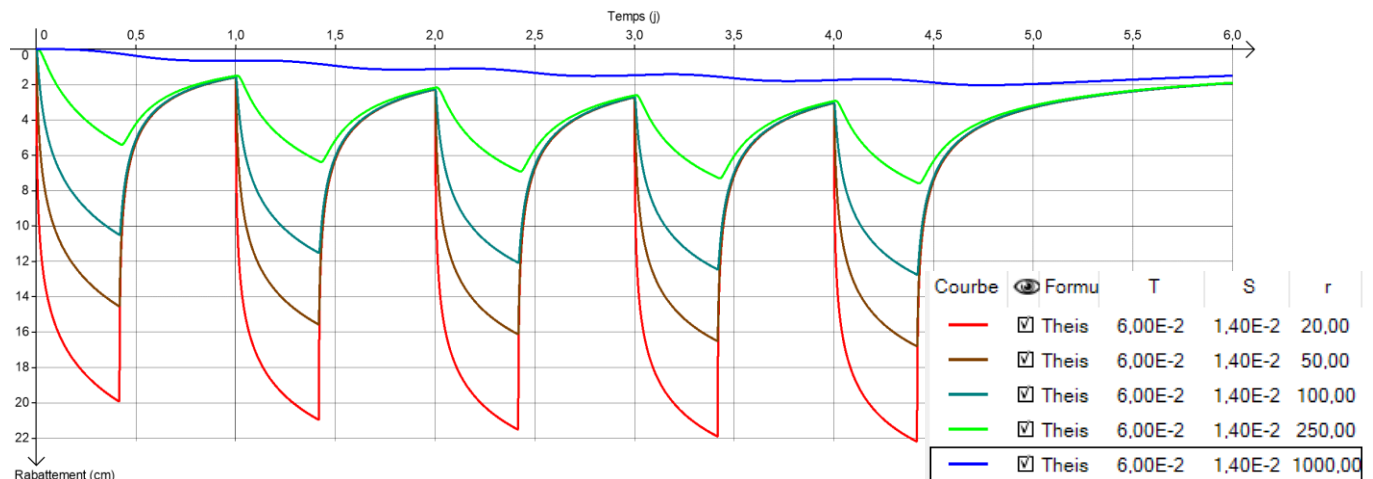


Figure 45 : Courbes des rabattements à différentes distances du puits de pompage dans le cas d'un pompage isolé sans influence d'un cours d'eau.

b) « Équivalent forage » de plusieurs forages sur 1 mois

La simulation est réalisée avec :

- modèle de Theis sur 1 mois ;
- pompage à 80 m³/h, 10h par jour ;
- évaluation du rabattement (soit l'abaissement du niveau piézométrique par rapport à son niveau initial) à une distance r de 250, 500 et 1 000 mètres.

Ce cas correspond à la situation dans le Ried caillouteux, soit un secteur éloigné des zones humides et des zones de phréatiques.

L'analyse des résultats indique (Figure 46) :

- les variations journalières simulées à 200 et 500 mètres de distance des forages sont de l'ordre de 2 à 5 centimètres. Pour un puits situé à 1 000 mètres la variation journalière est inférieure à 0,5 mm ;
- pour comparaison et rappel (cf. paragraphe sur l'état des lieux), l'ordre de grandeur des variations perçues sur le piézomètre 03424X0552/P96-F (Figure 47) situé dans l'Illwald à une distance d'environ 1 400 mètres des premiers puits d'irrigation est de 2 à 3 cm. L'assimilation à un seul puits est donc trop restrictive pour une distance équivalente ;
- la courbe globale piézométrique ne semble pas reproduire la pente observée sur le piézomètre 03424X0552/P96-F.

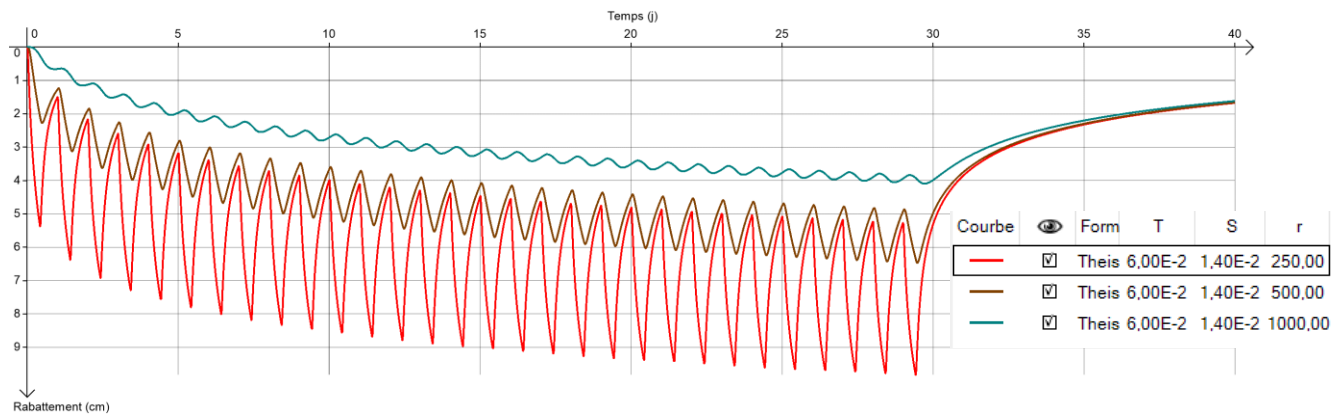


Figure 46 : Simulations sur une période d'un mois d'un équivalent forage.

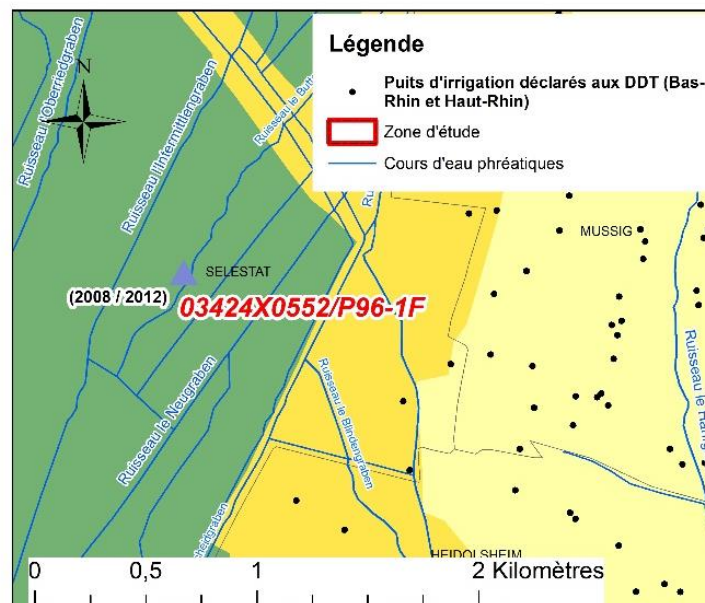


Figure 47 : Localisation du piézomètre 03424X0552/P96-F par rapport aux forages d'irrigation.

4.3.2. Aquifère homogène avec effet des phréatiques ou autres cours d'eau

a) Forage d'irrigation isolé, simulation du niveau piézométrique

La simulation est réalisée avec :

- modèle de Hunt sur 8 jours ;
- pompage à 80 m³/h, 10h par jour.

De manière à évaluer le comportement du niveau piézométrique lors de la présence d'un cours d'eau une simulation a été réalisée dans la configuration suivante :

- distance entre le cour d'eau et le pompage : 100 et 500 mètres ;
- distance entre le point d'observation (piézomètre) et le puits d'irrigation 200 et 1 000 mètres.

Les résultats indiquent (Figure 48 et 49) :

- une variation journalière de l'ordre de 5 cm ;
- un abaissement progressif de la piézométrie malgré la présence du cours d'eau.

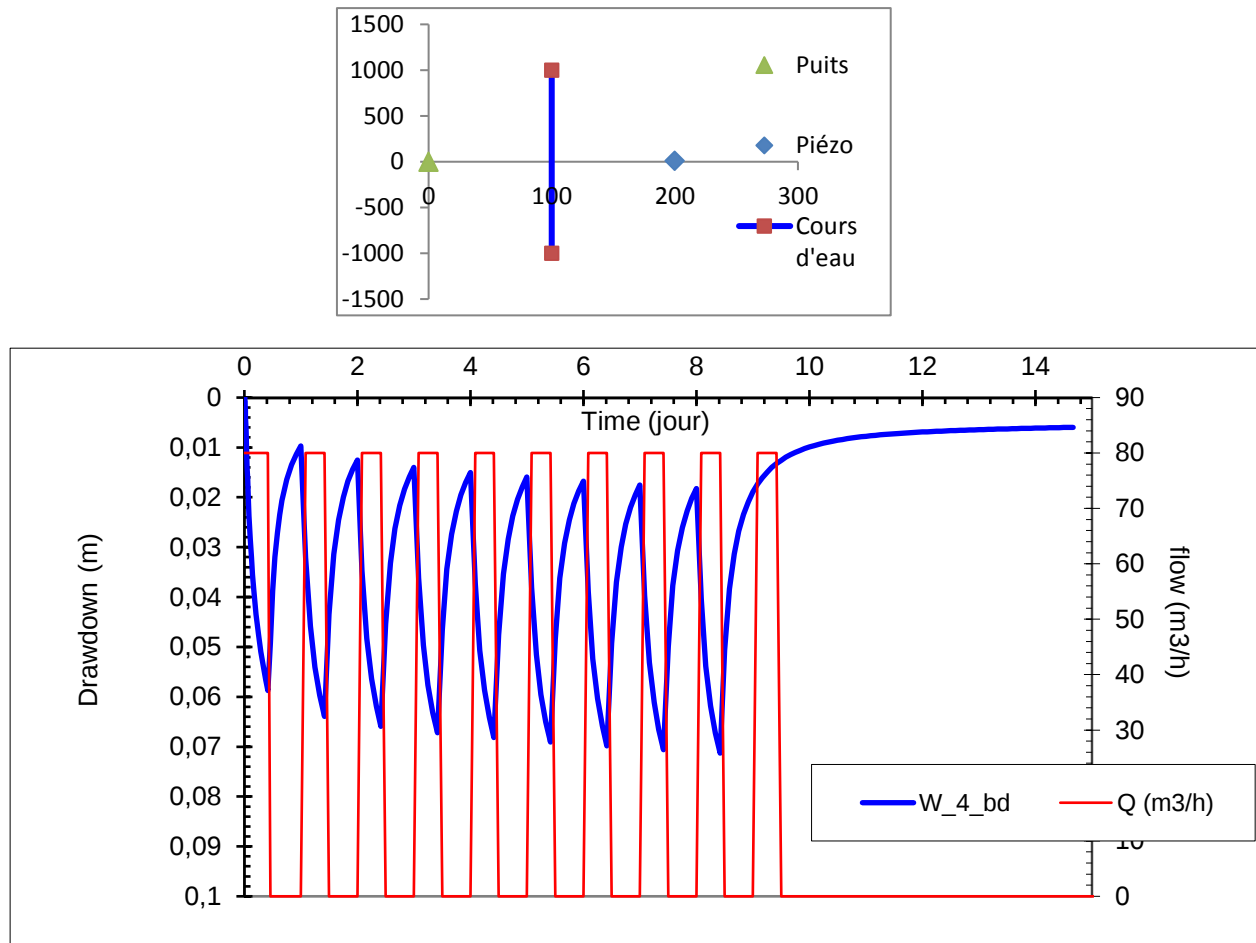


Figure 48 : Configuration de la simulation et résultat de la simulation du niveau piézométrique (W_4) à 200 mètres avec prise en compte d'un cours d'eau de type phréatique au milieu (100 mètres).
Q correspond au débit au puits d'irrigation.

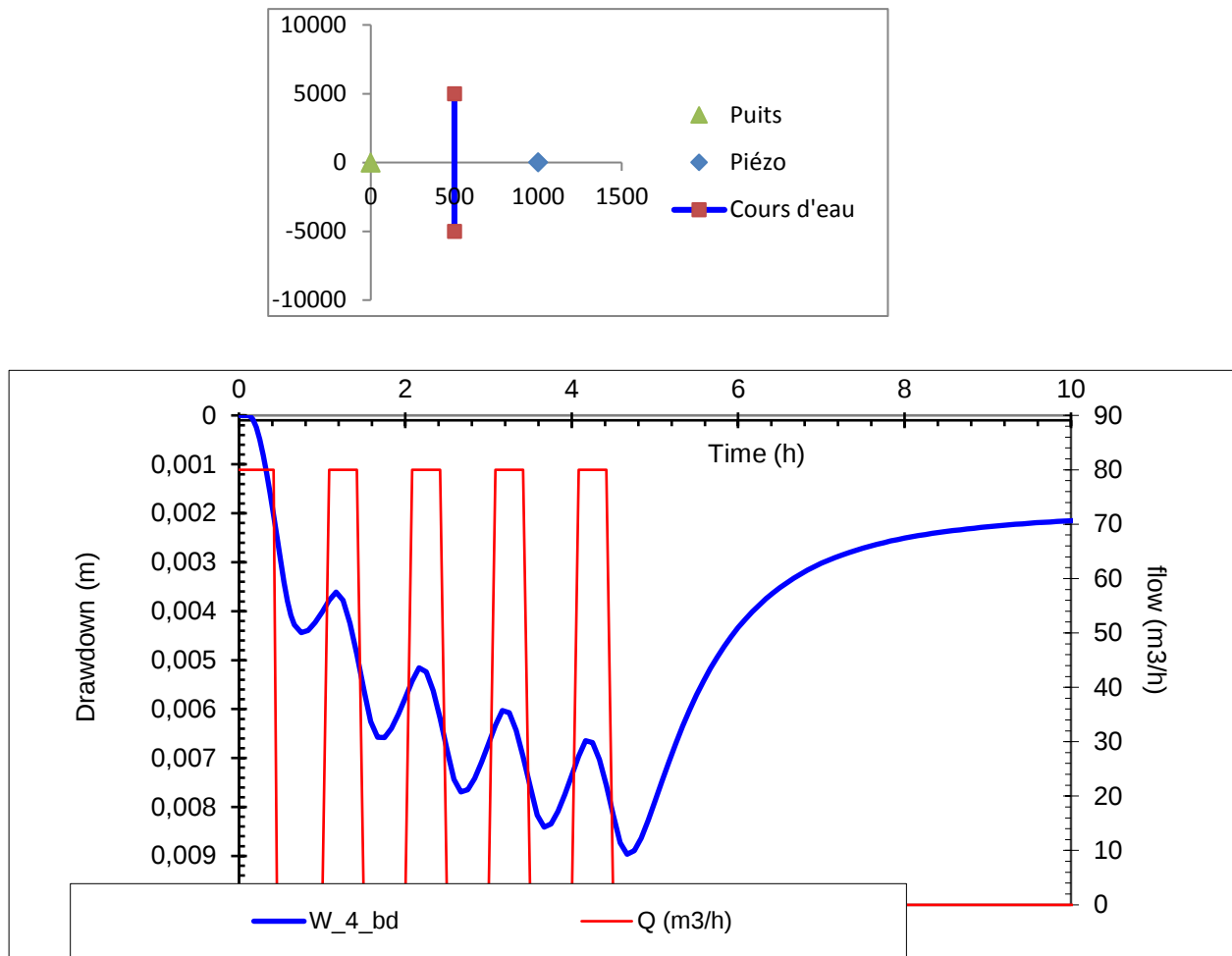


Figure 49 : Configuration de la simulation et résultats de la simulation du niveau piézométrique (W_4) à 1 000 mètres avec prise en compte d'un cours d'eau de type phréatique au milieu (500 mètres). Q correspond au débit au puits d'irrigation.

b) Forage d'irrigation isolé, simulation des débits prélevés sur le cours d'eau

La simulation est réalisée avec :

- modèle de Hunt sur 10 jours ;
- pompage à 80 m³/h, 10h par jour ;
- distance au cours d'eau impacté : 20, 500 et 1 000 mètres (Figures 50 à 52).

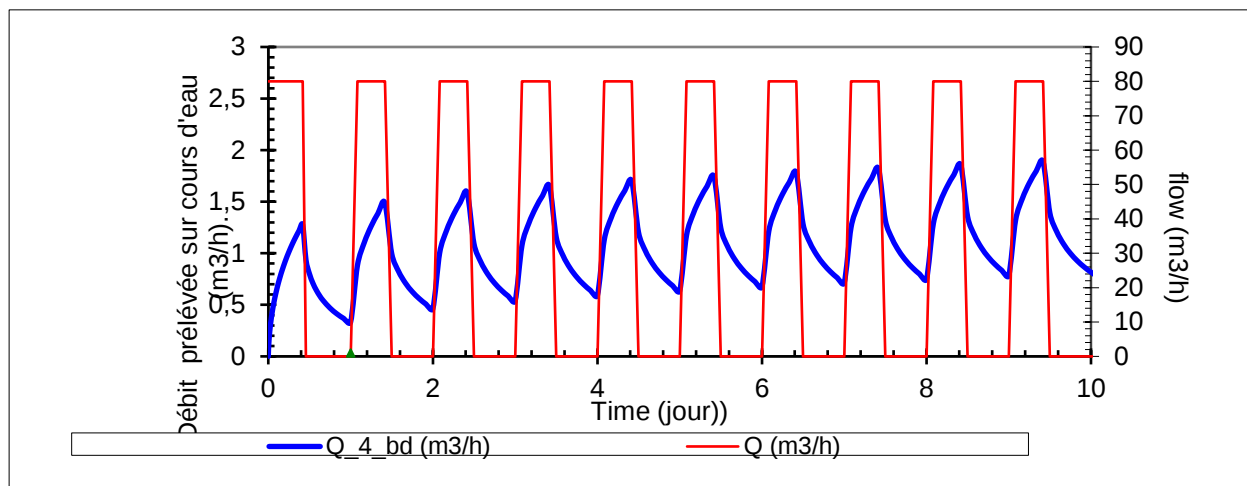


Figure 50 : Simulation du débit prélevé (Q_4) sur un cours d'eau situé à 20 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.

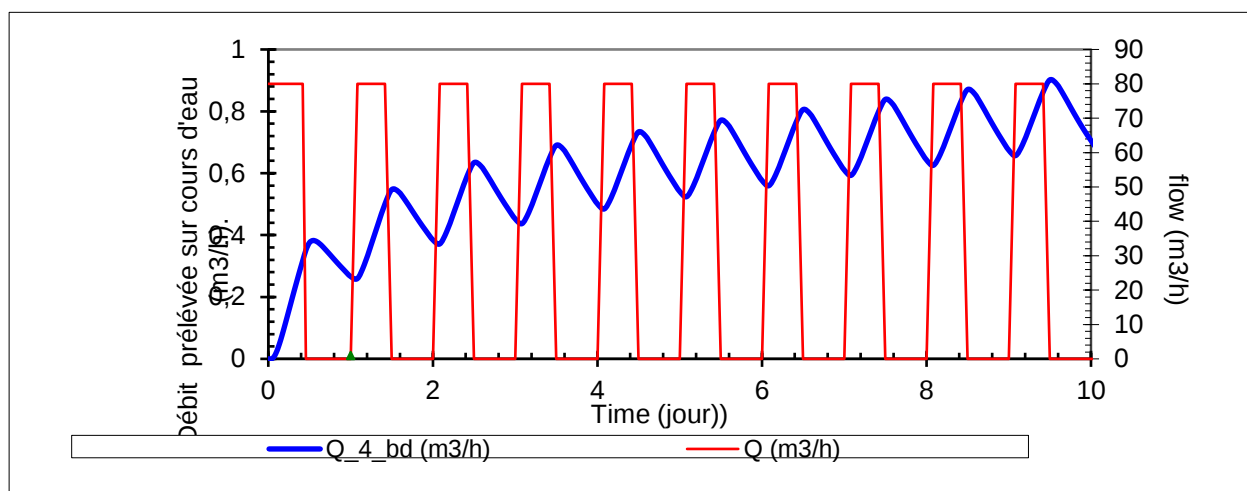


Figure 51 : Simulation du débit prélevé (Q_4) sur un cours d'eau situé à 500 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.

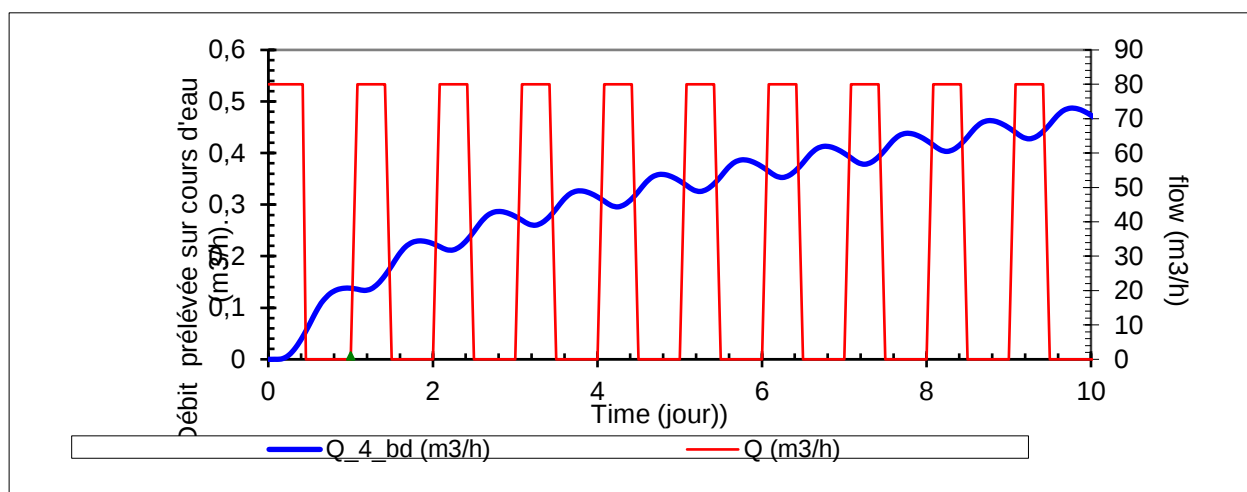


Figure 52 : Simulation du débit prélevé (Q_4) sur un cours d'eau situé à 1 000 mètres d'un forage d'irrigation. Q correspond au débit au puits d'irrigation.

Par la suite, les simulations ont été réalisées sur des débits moyens pour faciliter les calculs et la lecture des résultats (Figure 53) :

- modèle de Hunt sur 5 jours ;
- pompage à 80 m³/h, 10h par jour ;
- distance au cours d'eau impacté : 20, 50, 100, 250, 500 et 1 000 mètres.

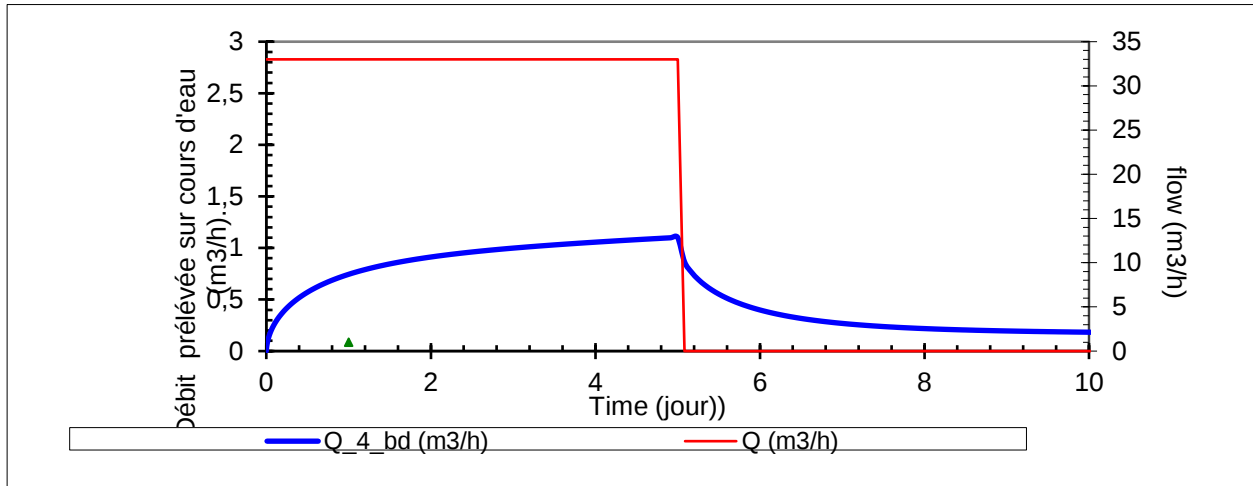


Figure 53 : Exemple de simulation du débit prélevé sur un cours d'eau situé à 20 mètres d'un forage d'irrigation, dans le cas d'un débit moyen.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau suivant (Figure 54) :

Distance au cour d'eau (mètres)	Débit moyen (m ³ /h) prélevé au bout de 2 jours	Débit moyen prélevé au bout de 5 jours
20	0,91	1,102
50	0,87	1,064
100	0,81	1,002
250	0,65	0,83
500	0,45	0,61
1000	0,19	0,33

Figure 54 : Tableau des résultats des débits prélevés sur les cours d'eau.

c) « Équivalent forage » de plusieurs forages, simulation des débits prélevés sur 1 mois

Les simulations ont été réalisées sur des débits moyens pour faciliter les calculs et la lecture des résultats (Figure 55).

Distance au cours d'eau (mètres)	Débit moyen prélevé au bout de 30 jours
20	1,86
50	1,82
100	1,75
250	1,57
500	1,31
1000	0,9

Figure 55 : Tableau des résultats des débits moyens prélevés sur les cours d'eau au bout d'un mois

4.3.3. Superposition des effets des forages et tableau de synthèses des débits prélevés sur les cours d'eau

Les effets des pompages se superposent et se cumulent dans l'espace.

Ainsi sur une ou deux journées plusieurs puits d'irrigation sont exploités dans le même temps. Les impacts vont se superposer. Cet effet va être d'autant plus forts que les forages sont rapprochés.

Le tableau suivant résume les impacts cumulés sur un ou deux jours en fonction des différents scénarii, du nombre de forages et de leur distance au point d'impact évalué (Figure 56).

scénarii	Durée du prélèvement aux différentes distances	Débit moyen (m3/h) prélevé au bout de 2 jours	Débit moyen prélevé au bout de 5 jours	Débit moyen prélevé au bout de 30 jours
Cas « moyen » : 4 pompages Pompage à 20, 250, 500 et 1 000 mètres		2,2	2,872	5,64
Cas pessimiste: 5 pompages Pompage à 20, 100, 250, 500 et 1 000 mètres		3,88	4,938	9,21
Cas optimiste : 3 pompages Pompage à 100, 500 et 1 000 mètres		1,45	1,942	3,96

Figure 56 : Tableau des résultats des débits moyens prélevés sur les cours d'eau en fonction de différents scénarii de pompage.

Il apparaît donc que dans le cas le plus pessimiste, les valeurs modélisées de débits prélevés sur un cours d'eau isolé peuvent atteindre 10 % du débit étiage minimum de cours d'eau tels que la Zembs, le Hanfgraben ou Bindernheim (Figure 13). Il est à noter qu'il existe par ailleurs de plus petits cours d'eau que ceux mentionnés, mais pour lesquels il n'existe pas de valeurs de référence du débit étiage minimum.

Discussion sur les scénarii de pompage :

- il est fortement probable que sur une courte durée (1 à 5 jours) des superpositions de forages puissent se faire. L'utilisation de l'impact simulé à deux jours pour évaluer l'impact des pompages d'irrigation semble la plus « réaliste » ;
- sur des durées supérieures à quelques jours, la répartition des points d'irrigation devient trop complexe pour être simulée dans ce cadre sans des données plus précises. En effet, les volumes seraient à priori trop importants pour un espace donné pour respecter les répartitions en mm/ha/an estimés par la chambre d'agriculture ;
- dans le cadre d'une optimisation des prélèvements d'irrigation, une répartition homogène des pompages pourrait limiter les cumuls d'impacts sur les cours d'eau au niveau local. Toutefois, il ne limitera à priori pas l'impact généralisé sur le niveau piézométrique.

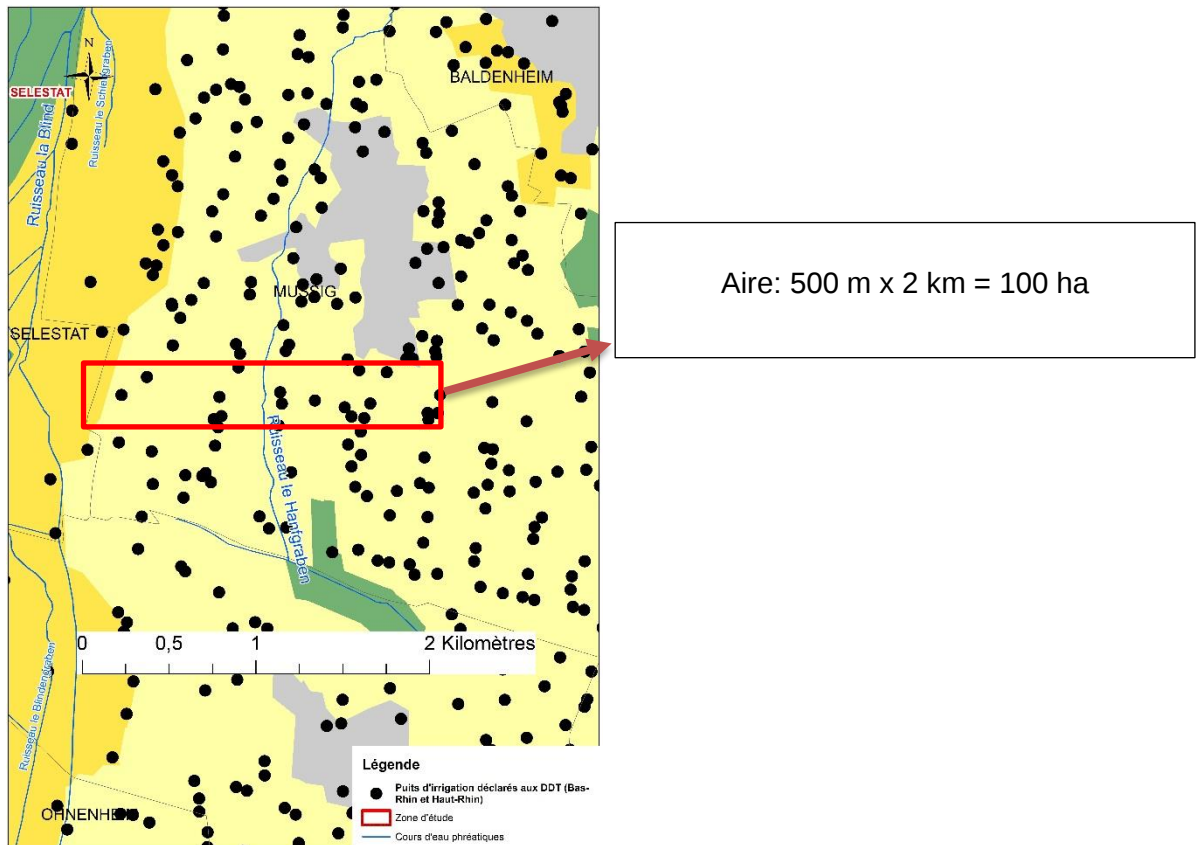


Figure 57 : Visualisation des pompages situés au bord d'un phréatique.

4.3.4. Impact d'un forage AEP sur le débit des cours d'eau

La simulation des forages s'est concentrée sur le cas du forage Obere Erlen en raison de son fort débit au regard de la zone et de sa situation en zone humide et du forage de Mussig, situé à proximité d'un cour d'eau phréatique (Figures 58 et 59).

La simulation du forage d'Obere Erlen atteint les limites du modèle.

En effet, l'impact sur des très longues durées va au-delà d'une simulation prenant en compte un seul cours d'eau. Le prélèvement va être réparti sur l'ensemble des cours d'eau présents sur la zone de captage, dont notamment l'III.

De plus, le comportement de la zone humide est très différent suivant les périodes hivernales et estivales. Cela induit donc un changement de modèle conceptuel hydrogéologique qu'il n'est pas possible de simuler dans le cadre de cette étude.

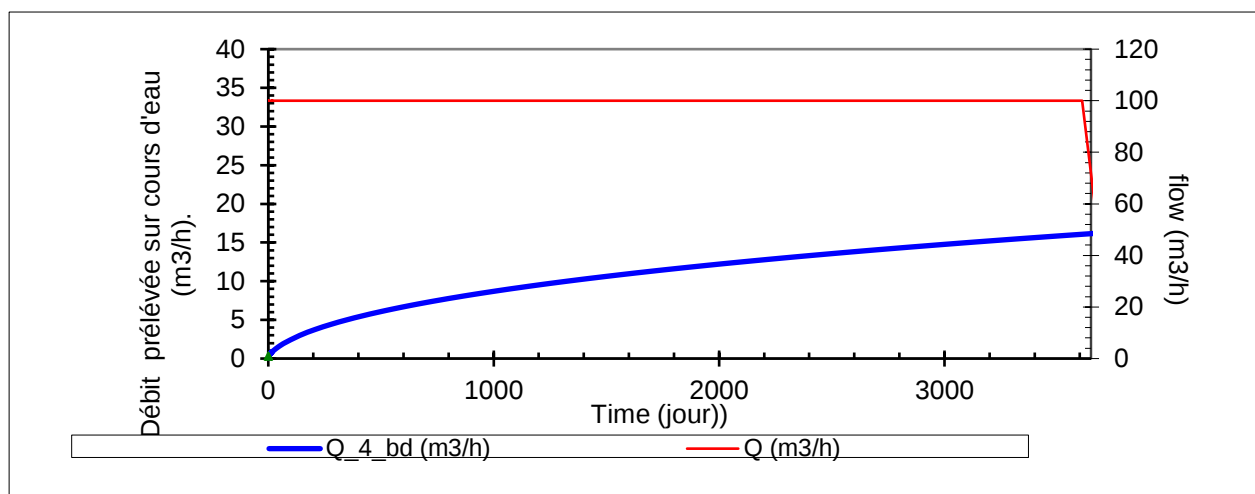
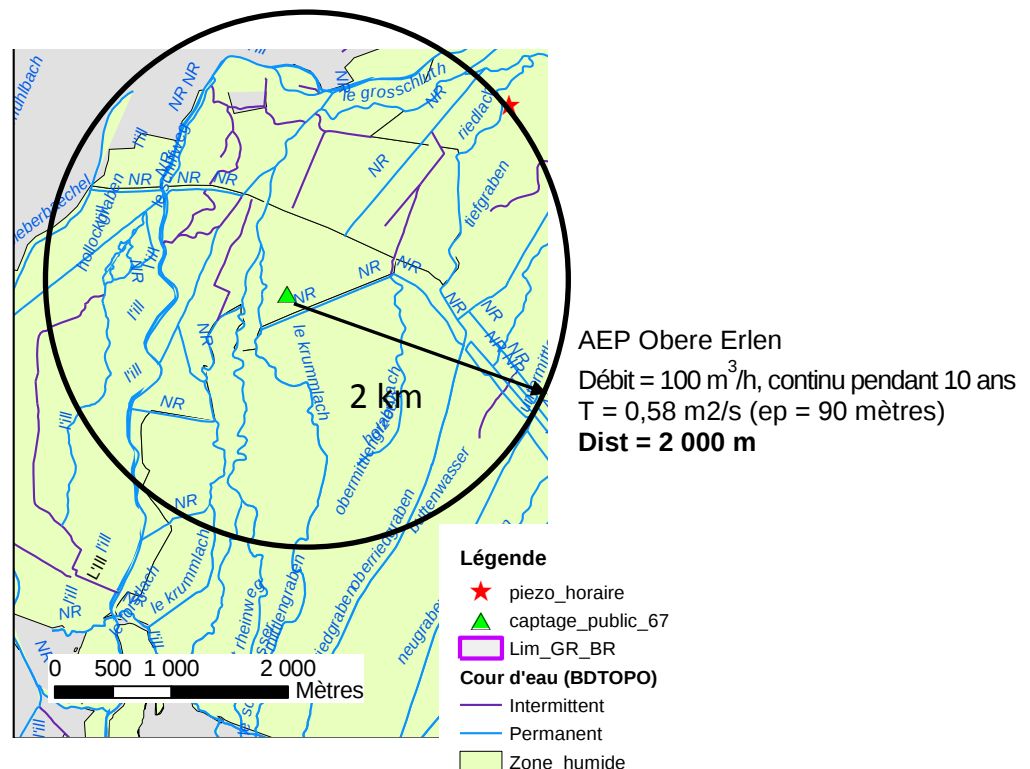


Figure 58 : Simulation du débit prélevé sur l'Hanfgraben par le forage AEP d'Obere Erlen.



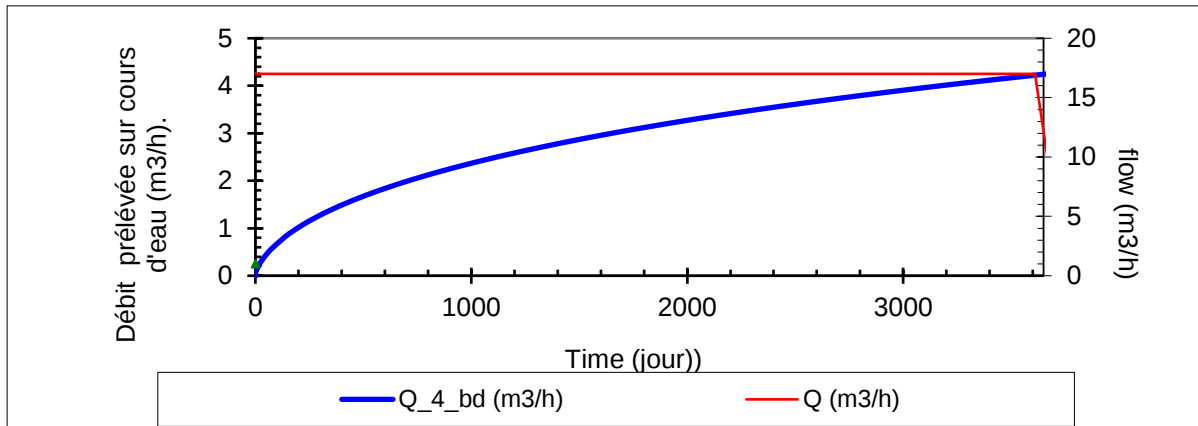


Figure 59 : Simulation du débit prélevé sur l'hanfgraben par le forage AEP de Mussig.



AEP de la ville de Mussig :
 Débit = $17 \text{ m}^3/\text{h}$, continu pendant 10 ans
 $T = 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ (ep = 20 mètres)
Dist = 1 300 m du premier phréatique

5. Éléments de gestion des prélèvements

5.1. CARTE DE SYNTHÈSE DES IMPACTS HYDRAULIQUES

Le travail de synthèse cartographique (Figure. 61) réalisé a pour objectif de répondre aux attentes de l'administration et du SAGE III Nappe Rhin sur la disponibilité d'un outil de visualisation des impacts hydrauliques, notamment sur les cours d'eau prioritaire du SAGE III-Nappe-Rhin sur la zone d'étude.

Elle permet de donner des premières indications sur une optimisation géographique des prélèvements en mettant en valeur les zones de plus fortes sensibilités à proximité des cours d'eau phréatiques.

5.1.1. Précautions d'utilisation

Les données et la diversité des échelles des différents impacts ont nécessité d'utiliser des hypothèses fortes pour la réalisation de cette carte. Notamment des phénomènes simplifiés et homogènes ont été appliqués sur l'ensemble de la zone d'étude sans tenir en compte des paramètres locaux.

De manière générale cette carte de synthèse des sensibilités aux prélèvements dans le Grand Ried ne peut se dissocier du présent rapport et des explications associées. Il est important de rappeler qu'il s'agit d'une carte globale, le niveau de précision n'est pas suffisant pour une utilisation à échelle fine.

5.1.2. Les différents impacts hydrauliques cartographiés

a) Sensibilité à un abaissement global du niveau piézométrique dû aux prélèvements en eau souterraine

La sensibilité à l'abaissement du niveau piézométrique des cours d'eau a été estimée à partir de la profondeur du niveau piézométrique de la nappe.

Cette dernière a été calculée en faisant la différence entre la topographie et la piézométrie. Les données ayant servi de base à ce travail sont la piézométrie de basses eaux régionales de 1991 et le modèle Numérique de terrain (MNT) de la zone.

La sensibilité liée à un abaissement piézométrique de l'ordre de 10 à 20 cm (ordre de grandeur induit observé en 2015 et 2017 due aux prélèvements en période d'irrigation) a été divisée en plusieurs classes :

- faible, niveau piézométrique situé 0,5 à 1 mètre en dessous de la topographie ;
- moyenne, niveau piézométrique situé 0,5 m au-dessus de la topographie ;
- forte, niveau piézométrique situé entre - 0,5 et + 0,5 m autour de la topographie.

Une zone tampon a été ajoutée autour des zones humides remarquables en raison de la particularité de ces milieux.

Certains phénomènes peuvent de plus compenser, voir annuler, l'effet du prélèvement en eau souterraine. C'est notamment le cas des cours d'eau avec un soutien d'étiage suffisant pour alimenter la nappe de manière conséquente (à proximité de l'III par exemple) ou de la bordure du Rhin, ce dernier étant le principal contributeur de la piézométrie dans une majeure partie de la bande rhénane.

Ainsi, en complément des classes de sensibilité, la zone sous influence du Rhin a été reporté sur la carte. Les contours de cette zone ont été dessinés d'après l'analyse ACP de la contribution du Rhin aux variations du niveau de la nappe rhénane (Schomburgk *et al.*, 2005). L'interpolation de ces données piézométriques ne donne cependant pas un résultat suffisant pour obtenir un zonage à échelle fine. De fait, les ordres de grandeurs calculés ne permettent qu'une sectorisation globale de la zone.

b) Impact sur les ruisseaux phréatiques

- **Zone de maximisation de l'impact hydraulique (débit et rabattement piézométrique)**

Au vue des données de simulation de l'impact hydraulique des pompes sur les ruisseaux phréatiques, la zone de maximisation moyenne de l'impact retenue correspond à une bordure de 200 m de part et d'autre du cours d'eau qui correspond au point de courbure maximum des courbes d'impacts hydraulique et piézométrique en fonction de la distance (Figure 60).

Il apparaît donc raisonnable de dire dans ce cas qu'à une distance inférieure à 200 m entre le cours d'eau et les points de prélèvement, les effets sont les plus conséquents.

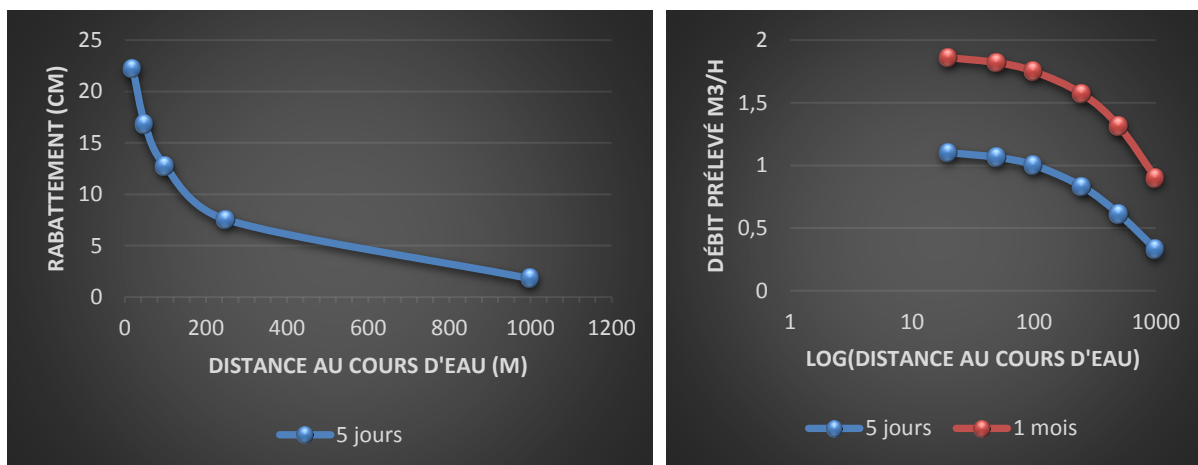


Figure 60 : Modélisation du rabattement piézométrique (haut) et du débit prélevé sur un cours d'eau isolé (bas) en fonction de la distance d'un point de prélèvement au cours d'eau, pour différentes durées de pompage.

- **Répartition de l'impact hydraulique**

L'impact sur le débit du cours d'eau sera d'autant plus concentré si ce dernier est isolé. La répartition de l'impact hydraulique d'un pompage a alors été représentée en fonction de la densité de cours d'eaux phréatiques présents.

La densité a été calculée sur un maillage de la zone du Grand Ried de 1 km x 1 km. La classification obtenue permet d'analyser la répartition de l'impact au sein de la zone de maximisation.

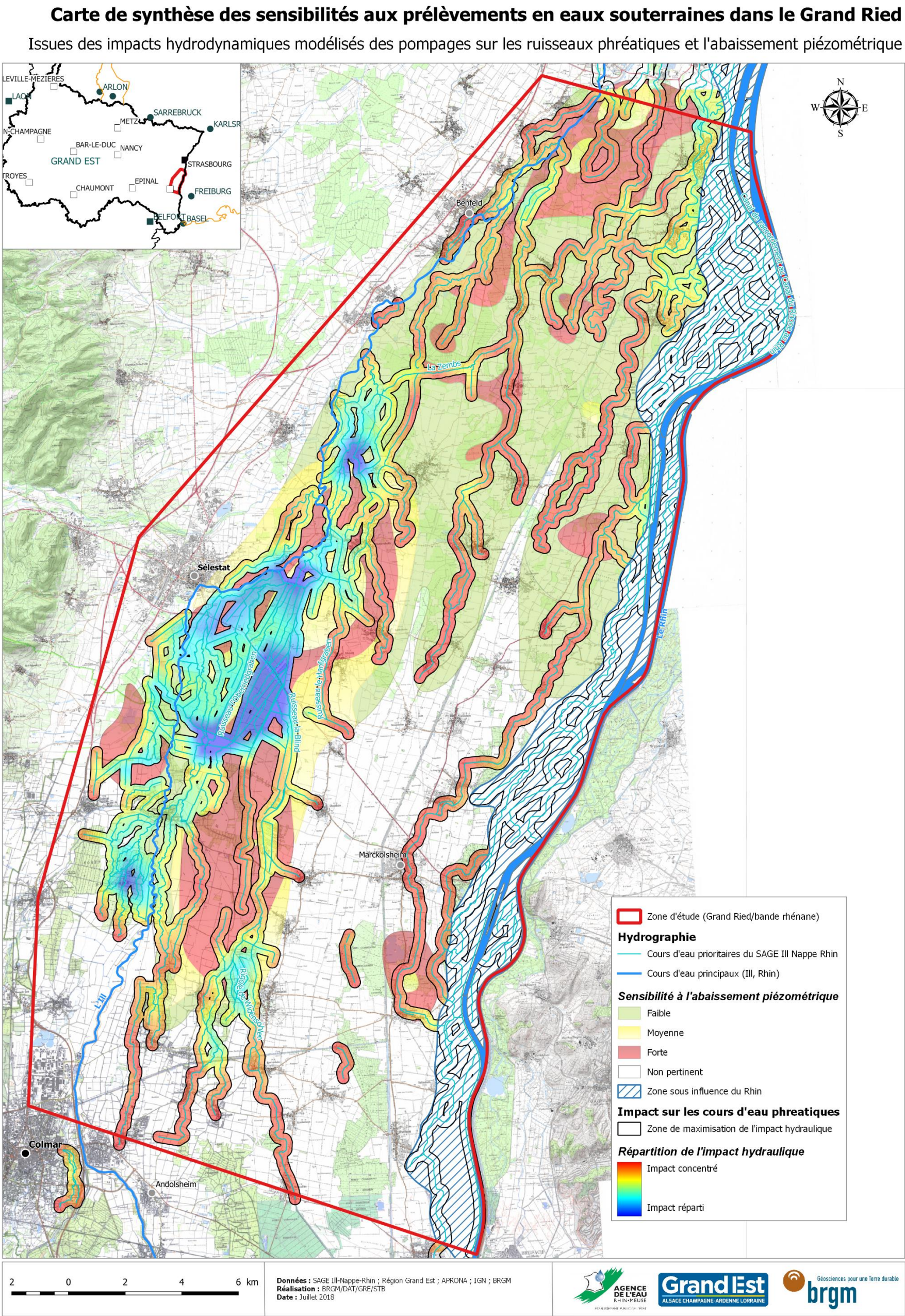


Figure 61 : Carte de synthèse des sensibilités aux prélèvements en eaux souterraines dans le Grand Ried.

5.2. INDICATEURS PIÉZOMÉTRIQUES

5.2.1. Réseau piézométrique : perspectives et pré-propositions

À partir du lien analysé entre l'observation des assecs du réseau ONDE et les niveaux piézométriques, des premiers indicateurs piézométriques, sous la forme de valeurs et de fréquences de retours peuvent être proposés pour la partie du Ried central, notamment dans la partie nord de la zone d'étude. En effet, cette zone est relativement homogène et dispose des trois stations ONDE les plus significatives pour caractériser les assecs exceptionnels liés aux périodes de sécheresse.

Le piézomètre de référence proposé pour cette zone est le point DCE situé à Rossfeld (piézomètre 03081X0025/223), utilisé par ailleurs pour l'édition du bulletin de suivi de la nappe de l'APRONA.

En complément, le point DCE situé à Holtzwhir (piézomètre 03427X0027/92) permettrait de disposer d'un point de suivi au sud de la zone. Bien qu'il soit moins contraint au niveau des corrélations avec le suivi des assecs, il permettrait de tenir compte des différences potentielles de variation du niveau piézométrique de la nappe liée aux différences de volumes prélevés ou aux variations climatiques locales, tout en restant suffisamment proche dans le comportement hydrogéologique du piézomètre Rossfeld.

En complément de ces piézomètres, il est nécessaire de disposer de suivi plus locaux. Pour ce travail, les axes d'analyse et de choix des piézomètres dépendent de plusieurs composantes :

- l'objectif : connaissance du milieu, gestion de la ressource, suivi sécheresse, suivi d'une exploitation particulière,...
- le comportement de la nappe (influence, battement, gradient, ...)
- le niveau d'exploitation du milieu ou son hétérogénéité (faible ou forte concentration de prélèvement pour engendrer des déséquilibres locaux notamment).

Au vu de ces axes, les perspectives pour le choix de piézomètres complémentaires de suivi dans le Ried central sont :

- pour la gestion des prélèvements liés à l'irrigation : un ajout de piézomètres complémentaires sur les zones comportant un fort taux de forage serait nécessaire, avec un focus sur les zones présentant une augmentation du nombre de forage. À ce stade des connaissances, et en se basant sur le réseau existant, des indicateurs piézométriques pourraient être appliqués aux piézomètres suivants :
 - 03085X0022 / 257 à Bindernheim (réseau APRONA,
 - 03423X0064 / 94A à Ilhauersen (réseau APRONA),
 - 03078X0333 / PZ8 à Muttersholtz (réseau APRONA).
- pour la protection des zones protégées : la disposition de piézomètre en bordure des zones protégées (zones humides remarquables) permettrait d'analyser l'extension et l'intensité de l'impact piézométrique dans ces zones au fonctionnement hydrodynamique particulier. Le réseau du suivi des zones humides mise en place en 2009 pourrait être réutilisé.

En dehors de la zone du Ried central, une corrélation pertinente à la situation des cours d'eau locaux ne peut se faire sans des données complémentaires de suivi.

Entre l'III et la limite ouest de la zone d'étude, le choix de piézomètre est plus contraint par les contextes hydrogéologiques. Ces derniers sont plus complexes, auxquels s'ajoutent localement une mauvaise connaissance des processus en jeux. Ainsi, tous les piézomètres suivis par le réseau APRONA en bordure ouest de la zone d'étude sont un minimum nécessaire pour suivre les comportements de la nappe dans ces secteurs.

Il peut être proposé en première approche d'indicateurs piézométriques l'utilisation des périodes de retour calculée sur Rossfeld. Toutefois, ces valeurs peuvent ne pas être suffisantes pour répondre à des objectifs de gestion locale. C'est notamment le cas du cône de déjection du Giessen présentant à la fois une tendance globale à la baisse au niveau piézométrique et hydrométrique, des problématiques fortes d'assecs et des prélèvements multiples (AEP, irrigation, industriel).

Sur la bordure est de la zone d'étude, 2 à 3 piézomètres situés entre la zone d'influence du Rhin et le canal du Rhône au Rhin pourraient être sélectionnés pour répondre aux enjeux sur les cours d'eaux non soutenu par le Rhin. Toutefois, l'absence de donnée sur les assecs potentiels des cours d'eau sur cette zone ne permet pas de proposer de seuils à ce stade des connaissances.

5.2.2. Indicateurs piézométriques

Le piézomètre de Rossfeld permet d'estimer des premiers seuils piézométriques en cohérence avec les observations ONDE.

Les données utilisées sont les suivantes :

- amplitude journalière moyenne de 2 à 5 cm entraînant une incertitude autour des valeurs journalières de + ou moins 2,5 centimètres ;
- seuil 1 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 2 stations ONDE (sur 5) : 157,34 (soit une profondeur de 1,9 mètres) ;
- seuil 2 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 3 stations ONDE : 157,21 mNGF (soit une profondeur de 2,03 mètres) ;
- seuil 3 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur les 5 stations ONDE : 157,10 (soit une profondeur de 2,14 mètres).

La date d'apparition du premier seuil est déterminante dans son interprétation. En effet, si ce niveau est atteint avant la mi-juillet, les niveaux piézométriques ne seront à priori pas suffisant pour couvrir la période de l'été (sauf événement exceptionnel comme les précipitations en juillet 2014). Il peut par conséquent constituer un seuil d'alerte ou de vigilance dès les mois de mai/juin au démarrage de la période d'irrigation.

Le seuil 2 correspond à un début d'impact sur les cours d'eau.

Le seuil 3 correspond aux assecs généralisés observés en 2015.

En 2015, l'irrigation massive et continue durant le mois de juillet a été la principale contributrice à l'atteinte de niveau piézométrique historiquement bas.

5.2.3. Mise en perspective avec l'année 2018

Lors des comités sécheresse du Bas-Rhin du 17 et 30 août 2018, l'AFB a rendu compte de la situation d'étiage sévère des cours d'eau phréatiques observée lors des campagnes usuelles de juillet et août, ainsi que des campagnes complémentaires (Compte rendu du comité sécheresse 67 du 17 août 2018).

L'état alarmant des cours d'eau phréatiques : Neugraben à sec et Truli en baisse (pour la première fois), ainsi que la décroissance de l'indice ONDE de 6.33 au 17 août à 5 (sur 10) au 30 août ont notamment été rapportés.

L'analyse de la chronique piézométrique du piézomètre de Rossfeld (Figure 62) indique une morphologie monotone de la courbe de décroissance similaire à celle de 2015, traduisant une possible période d'irrigation ininterrompues à partir du milieu du mois de Juin 2018.

Les 3 seuils précédemment décrits ont été franchis progressivement, jusqu'à atteindre le seuil 3 le 8 août 2018. Le niveau piézométrique est par la suite resté proche de ce seuil pendant plusieurs jours. Le rapport de l'AFB en comités sécheresse du 17 et 30 août 2018 fait donc état de la situation des cours d'eau phréatiques, consécutive à l'atteinte de ce seuil piézométrique.

Ce point permet donc d'apporter des premiers éléments de fiabilité concernant les seuils piézométriques définis dans cette étude.



Figure 62 : Chronique du piézomètre 03081X0025-23 à Rossfeld, sur la période de mars à septembre 2018.

6. Conclusions et perspectives

L'analyse globale des données disponibles sur la zone d'étude a permis d'avancer les conclusions suivantes :

- les prélèvements sur la zone du Grand Ried sont majoritairement liés à l'irrigation lors de la période estivale. Cette période correspond dans le même temps à la période d'étiage des cours d'eau ;
- les données de prélèvements liées à l'irrigation sont globales et leur disparité tant du point de vue de la localisation que des débits et des volumes prélevés ne permettent pas de réaliser des calculs locaux représentatifs ;
- le réseau ONDE a permis de mettre en lumière les assecs des années 2015 et 2017 permettant de disposer de premiers éléments d'analyse quantitatifs. Toutefois la durée des observations (5 ans) ne permet pas pour l'instant de disposer d'une chronique analysable statistiquement ;
- l'analyse des chroniques piézométriques supérieures à 10 ans disponibles sur la nappe d'Alsace indique :
 - une stabilité globale de la piézométrie, notamment dans les zones humides,
 - des tendances à la baisse ou à la hausse plus locale,
 - un effet inertiel global de l'ordre d'un an,
 - la possibilité localement d'effets inertiels plus conséquents, notamment en bordure de piémont ;
- les variations piézométriques journalières liées à l'irrigation sont visibles sur les enregistrements réalisés par l'APRONA. En 2015 et 2017, on observe que les périodes d'irrigation peuvent engendrer selon les cas des baisses de niveaux piézométriques de 5 à 40 cm, selon que la période d'irrigation se soit poursuivie sans ou avec interruptions au cours de la saison. Ces valeurs permettent d'encadrer par la suite les simulations d'impacts sur le niveau piézométrique et sur les débits ;
- le repérage du démarrage des périodes d'irrigation sur les chroniques piézométriques a permis de mettre en lumière des changements de pente globale de la piézométrie lors des périodes d'irrigation. Un impact global de l'irrigation est donc présent sur le niveau piézométrique de la nappe ;
- une relation directe est présente entre le niveau piézométrique et les phréatiques. Un abaissement du niveau piézométrique a donc pour conséquence d'accroître la sensibilité des cours d'eau les plus vulnérables.

Les simulations réalisées par modèle analytique indiquent :

- des rabattements du niveau piézométrique journaliers de l'ordre de 4 à 20 cm en fonction de la distance aux points d'irrigation et des milieux utilisés ;
- les niveaux de rabattement obtenus par ces simulations analytiques sont cohérents avec les rabattements réellement observés, en 2015 et en 2017 et sont du même ordre de grandeur que la différence de niveau piézométrique relevée sur le piézomètre de Rossfeld entre 2015 et 2017, et qui permet le passage d'une situation d'assec partiel en 2017 en assec généralisé des stations du réseau Onde de la zone d'étude ;
- les impacts simulés sur les cours d'eau phréatiques sont compris entre 1 et 5 m³/h sur quelques jours sur un tronçon de l'ordre de 500 mètres du cours d'eau ;

- il apparaît que dans le cas le plus pessimiste, les valeurs modélisées de débits prélevés sur un cours d'eau isolé peuvent atteindre 10 % du débit étiage minimum de cours d'eau tels que la Zembs, le Hanfgraben ou Bindernheim. Il est à noter qu'il existe par ailleurs de plus petits cours d'eau que ceux mentionnés, mais pour lesquels il n'existe pas de valeurs de référence du débit étiage minimum.
- le déplacement entre forages, les estimations des volumes des prélèvements fournis par la chambre et les impacts piézométriques ne permettent pas de créer des scénarii réalistes à des échelles locales sur l'ensemble de la saison d'irrigation.
- les effets cumulés sur le court terme étant réalistes, il est très fortement probable que sur l'ensemble de la période d'irrigation il y ait une multiplication sur un même cours d'eau des débits prélevés localement par tronçon.

En fonction de l'ensemble des résultats obtenus, les éléments suivants peuvent être amenés concernant la gestion des prélèvements et les indicateurs potentiels sur la nappe d'Alsace :

- la prise en compte du niveau piézométrique de la nappe d'Alsace en début de saison d'irrigation. En effet, la nappe d'Alsace fonctionnant avec une inertie globale de quelques mois à 1 an, la situation en début de saison d'irrigation doit permettre d'alerter en amont sur les risques d'assecs des cours d'eau, en dehors de la situation hydrologique de surface. Des premiers seuils piézométriques ont été proposés sur le piézomètre de Rossfeld (Piézomètre DCE) à partir des observations du réseau ONDE.

Concernant ce suivi piézométrique, Le piézomètre de Rossfeld permet d'estimer des premiers seuils piézométriques en cohérence avec les observations ONDE.

Les données utilisées sont les suivantes :

- amplitude journalière moyenne de 2 à 5 cm entraînant une incertitude autour des valeurs journalières de + ou moins 2,5 centimètres,
- seuil 1 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 2 stations ONDE (sur 5) : 157,34 (soit une profondeur de 1,9 mètres),
- seuil 2 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur 3 stations ONDE : 157, 21 mNGF (soit une profondeur de 2,03 mètres),
- seuil 3 = niveau piézométrique correspondant à l'apparition des assecs sur les 5 stations ONDE : 157,10 (soit une profondeur de 2,14 mètres).

La date d'apparition du premier seuil est déterminante dans son interprétation. En effet, si ce niveau est atteint avant la mi-juillet, les niveaux piézométriques ne seront à priori pas suffisant pour couvrir la période de l'été (sauf événement exceptionnel comme les précipitations en juillet 2014). Il peut par conséquent constituer un seuil d'alerte ou de vigilance dès les mois de mai/juin au démarrage de la période d'irrigation.

Le seuil 2 correspond à un début d'impact sur les cours d'eau.

Le seuil 3 correspond aux assecs généralisés observés en 2015.

L'analyse de la chronique piézométrique du piézomètre de Rossfeld entre mars et septembre 2018 permet d'apporter des premiers éléments de fiabilité concernant les seuils piézométriques ainsi définis :

- la limitation des pompages en simultané sur une même zone, notamment à proximité des cours d'eau devrait limiter les débits prélevés localement sur ces derniers. Un travail cartographique a ainsi été proposé englobant l'ensemble des cours d'eau prioritaires du SAGE III Nappe Rhin de la zone d'étude. Toutefois, cette gestion locale ne permettra a priori pas d'influer sur l'impact global de la piézométrie de la nappe d'Alsace. Or, cette dernière peut être essentielle pour le maintien des cours d'eau les plus vulnérables liés à une simple dépression ou une résurgence de la nappe comme les ruisseaux phréatiques ;
- le renforcement potentiel du réseau d'observation des assecs, ONDE, qui ne dispose que de 6 stations de suivi sur l'ensemble de la zone d'étude. Le réseau ONDE, à vocations départementale et nationale ne permet pas de suivre de manière précise l'évolution locale des zones humides, notamment en lien avec les prélèvements de l'irrigation qui peuvent être irréguliers ;
- au niveau de l'acquisition de données complémentaires, il est recommandé :
 - de réaliser un suivi des cours d'eau par jaugeages sur l'ensemble de la période d'irrigation en notant les différents pompages en cours. Seule cette acquisition permettra d'affiner les impacts sur les différents cours d'eau et d'aller au-delà des ordres de grandeur donnés dans le cadre de cette étude,
 - de mettre en place un suivi des prélèvements liés à l'irrigation permettant de relier les débits aux puits d'irrigation ;
- la mise en place de modèles de gestion, de types modèles maillés, pourrait constituer une phase ultérieure et un outil opérationnel permettant de piloter les différents types de prélèvements en fonction des usages (AEP, irrigation, et industriels). Toutefois, ce type de modèle ne pourra pas répondre à des objectifs de gestion locale (commune, cours d'eau ou zones humides) sans une acquisition de donnée poussée, tant du point de vue des caractéristiques hydrodynamiques que des données de prélèvements. En effet, les données de l'agence de l'eau, axées sur les sièges sociaux des entreprises et limitées à des volumes annuels répartis potentiellement sur plusieurs points de prélèvements non identifiés, ne sont pas représentatives à une échelle locale de la réalité des prélèvements. Or ce sont les seules données disponibles actuellement sur la zone d'étude.

7. 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.

Chambre d'agriculture d'Alsace (2017) - Diagnostic des pratiques de l'irrigation sur différents bassins versants alsaciens. Perspectives et cohabitation entre les différents usages de l'eau. Volet 1-axe 1., 72 p.

Comptes rendus des comités sécheresse du Bas-Rhin des 17 et 30 août 2018.

Buard C. (1993) - Rapport BRGM Alsace N 0253 ALS 4S 93, usine d'acide citrique à Marckolsheim (Bas Rhin) création de trois forages de captage 8 p., 1 fig et 6 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, 106 p.

Giuglaris E., Baierer C., Mesquita Muniz J. et al (2017) - Étude de la sensibilité à la sécheresse des ressources en eau dans les Vosges (versant alsacien). Rapport final. BRGM/RP-66696-FR, 163 p., 60 ill., 6 tab, 9 ann., CD.

Manlay A. (2017) - Analyse et cartographie des besoins et ressources en eaux souterraines et superficielles en Alsace, 84p., 47 fig., 2 ann.

Stollsteiner P., Wuillemier A., Bessiere H. et al (2011) - Guide méthodologique, indicateur piézométrique, débit prélevable - Rapport final. RP-61374-FR. 73 p., 36 ill., 4 ann.

SGAL (1985) - Alimentation en eau potable d'Ostheim ; Mise en place de 3 piézomètres de reconnaissance, rapport de fin de travaux 1985.

Chabart M., Ladouche B., Raharivolamalala C. et al (2004) - Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Application sur le secteur du Grand Ried. Rapport BRGM/RP-52743-FR, 70 p., 34 fig., 7 tab., 1 ann.

SAGE III-Nappe-Rhin. (2015) - Plan d'aménagement et règlement.

SDAGE Rhin-Meuse (2016) - Documents du SDAGE pour la période 2016-2021.

Schomburgk S., Elsass Ph., Weng Ph. et al (2005) - Note de réflexion sur les zones humides étudiées entre 2001 et 2005 en Alsace. Rapport BRGM/RP 54081-FR, 61 p., 21 fig.

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.

Schomburgk S., Pinault J.-L., Longuevergne L. (2005) - Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport BRGM/RP-53579-FR, 82 p.

Urban S., Geneviev M., Guignat S., (2010) - Optimisation du réseau piézométrique de la Nappe d'Alsace. Rapport final BRGM/RP-58670-FR. Octobre 2010.

Sites internet de consultation des données

ADES. <http://www.ades.eaufrance.fr/>

AERM. www.eau-rhin-meuse.fr

APRONA. <http://www.aprona.net/>

Banque Hydro. www.hydro.eaufrance.fr

BNPE. <http://www.bnpe.eaufrance.fr/>

GéoGrandEst. <https://www.cigalsace.org/portail/>

Infoterre. <http://infoterre.brgm.fr/>

SANDRE. <http://www.sandre.eaufrance.fr/>

SIGES Rhénan. <http://sigesar.brgm.fr/>

Annexes sur clé USB

Annexe 1

Comptes rendus des visites de terrain

Annexe 2

Analyses statistiques

Annexe 3

Chroniques piézométriques au pas horaires sur la période 2015/2017



Géosciences pour une Terre durable

brgm

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 d'Activité Porte Sud - Bât H1

Rue du Pont du Péage

67118 - Geispolsheim - France

Tél. : 03 88 77 48 90