

Caractérisation de la ressource en eau souterraine sur le site de la mine de Claray à Sion-les-Mines

Etudes complémentaires

NOTE FINALE

Caractérisation de la ressource en eau souterraine sur le site de la mine de Claray à Sion-les-Mines – Études complémentaires

Note finale

VERSION	DESCRIPTION	ÉTABLI(E) PAR	APPROUVÉ(E) PAR	DATE
V1	Intégration des pluies journalières historiques et des remarques du MO	GGR	GGR	26/05/2023
V0	Études complémentaires	OHN	GGR	28/03/2023
ARTELIA Saint Herblain – TEL : 02 28 25 28 34				

Note finale

CARACTERISATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE SUR LE SITE DE LA MINE DE CLARAY A SION-LES-MINES

SOMMAIRE

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	3
2. REPRISE DE L'INTERPRETATION DES DONNEES PIEZOMETRIQUES ACQUISES PENDANT L'ESSAI DE POMPAGE ..	4
2.1. LOGICIEL D'INTERPRETATION AQTESOLV.....	4
2.2. INTERPRETATION DES COURBES POUR LE FORAGE SR1	6
2.3. DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES ET DES LIMITES ETANCHES.....	7
3. BILAN HYDRIQUE SIMPLIFIE DE LA RESSOURCE EN EAU A L'HORIZON 2075	12
3.1. DONNEES EXPLOITEES	12
3.2. EVOLUTION DES DONNEES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2075 AU DROIT DE L'AIRE D'ALIMENTATION DU FORAGE	14
3.2.1. <i>Evolution annuelle</i>	14
3.2.2. <i>Evolutions saisonnière et journalière des précipitations totales</i>	17
3.3. CALCUL DE LA RECHARGE DIRECTE AU DROIT DE L'AIRE D'ALIMENTATION DU FORAGE	21
3.3.1. <i>Méthode appliquée</i>	21
3.3.2. <i>Calcul de la recharge sur la période historique</i>	22
3.3.3. <i>Calcul de la recharge sur la période 2023 à 2075</i>	24
3.3.4. <i>Incidence du pompage sur la ressource en eau souterraine</i>	27
4. INCIDENCE DU FUTUR POMPAGE SUR LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE	28
5. CONCLUSION ET PRECONISATIONS	32
6. REFERENCES	34
ANNEXE 1 CALCUL DU BILAN HYDRIQUE POUR LES PLUIES HISTORIQUES MENSUELLES DE JANVIER 2003 A	
DECEMBRE 2022	35

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Dans le cadre du projet d'exploitation future du forage SR1 recoupant l'ancienne galerie minière de Sion-les-Mines, un test de pompage à 60 m³/h de 6 mois (juin à décembre) a été entrepris en 2021-2022 afin de caractériser la ressource en eau et d'observer le comportement de la nappe en situation d'exploitation.

La carte en Figure 1 reprend des éléments de cette étude : la position des ouvrages étudiés et l'aire d'alimentation du pompage déduite de l'ensemble des données acquises pendant l'essai. En 2022, un premier traitement au moyen du logiciel OUAIP des données de suivi piézométrique pendant le pompage a mis en évidence :

- Des valeurs de transmissivité comprises entre $7.5.10^{-4}$ et 4.10^{-3} m²/s ;
- Des valeurs de coefficient d'emménagement de l'ordre de $1.6.10^{-5}$ à 1.10^{-2} ;
- Un aquifère fracturé et compartimenté où plusieurs limites étanches ont été identifiées sans pouvoir préciser leurs positions.

A l'issue de ce 1^{er} travail, le syndicat Atlantic'Eau a souhaité poursuivre ces réflexions en approfondissant plusieurs points :

- Positionnement des limites étanches précédemment identifiées grâce à l'utilisation d'un nouveau logiciel d'interprétation des données piézométriques ;
- Calcul d'un bilan hydrique simplifié de la nappe à l'horizon 2075 dans un contexte de changement climatique pour apprécier l'évolution possible concernant la disponibilité de la ressource ;
- Esquisse de l'incidence potentielle du futur pompage sur les écoulements superficiels à partir des données bibliographiques disponibles.

L'ensemble de ces éléments sont repris et détaillés dans cette note finale.

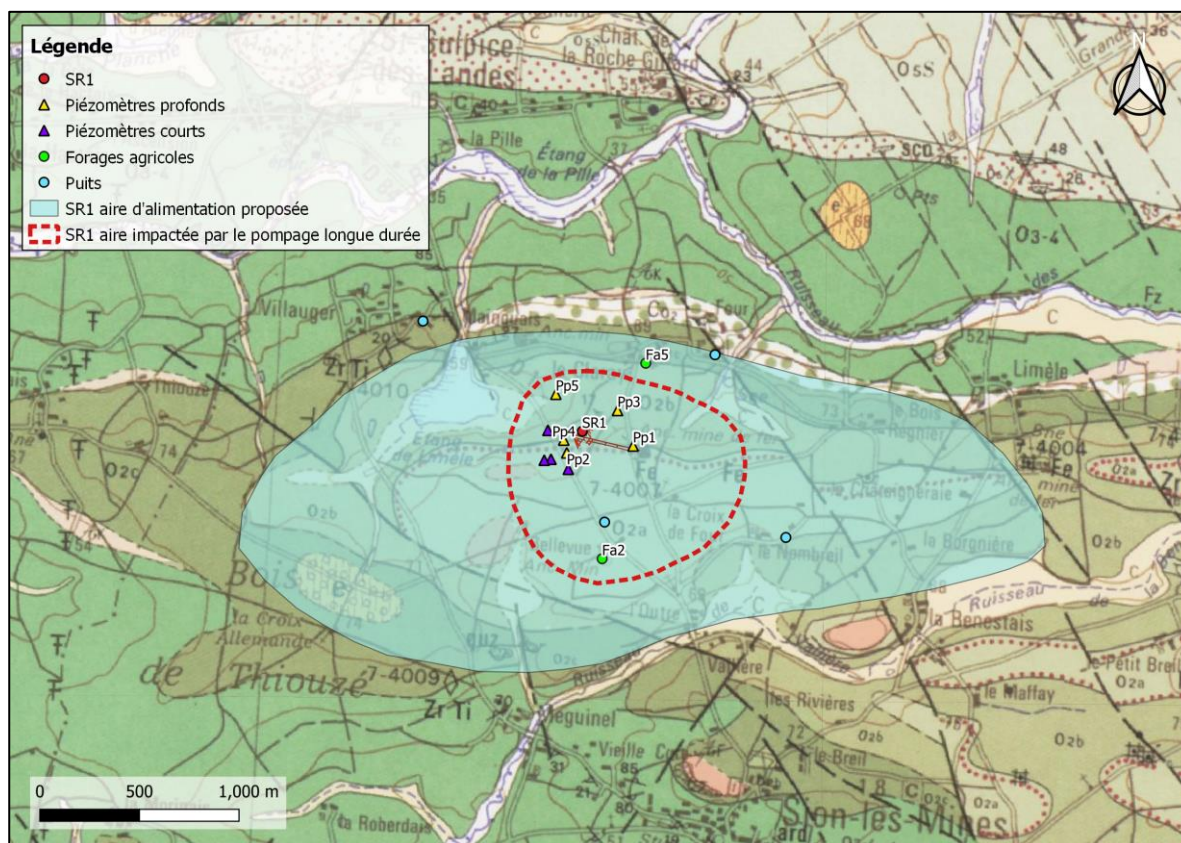


Figure 1 : Limite de l'aire d'alimentation du captage de SR1 et localisation du réseau de suivi

2. REPRISE DE L'INTERPRETATION DES DONNEES PIEZOMETRIQUES ACQUISES PENDANT L'ESSAI DE POMPAGE

2.1. LOGICIEL D'INTERPRETATION AQTESOLV

Suite aux limites soulevées lors de la 1^{ère} interprétation de l'essai de pompage avec le logiciel OUAIP, il a été décidé de reprendre cette analyse avec un autre logiciel. Pour cela, le logiciel Aqtesolv a été choisi car :

- C'est un logiciel répertoriant une trentaine de solutions analytiques donc autant de configurations schématiques hydrogéologiques possibles ;
- Ce logiciel permet une localisation intégrée des piézomètres d'observation et des limites définies (limites étanches, limites d'alimentation) dans un référentiel choisi par rapport au forage testé.

Pour le pompage du Claray, une analyse de la courbe de rabattement de SR1 et de sa dérivée en fonction du temps, a permis dans un 1^{er} temps de préciser la configuration hydrogéologique du système étudié (Figure 2).

Pour cette interprétation, nous nous sommes aussi appuyés sur les données bibliographiques existantes ainsi que l'étude BRGM (ANALYSE multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagnE, 2020) qui présente quelques exemples de configurations graphiques qu'il est possible d'observer pour cette typologie d'aquifère (Figure 3 & Figure 4).

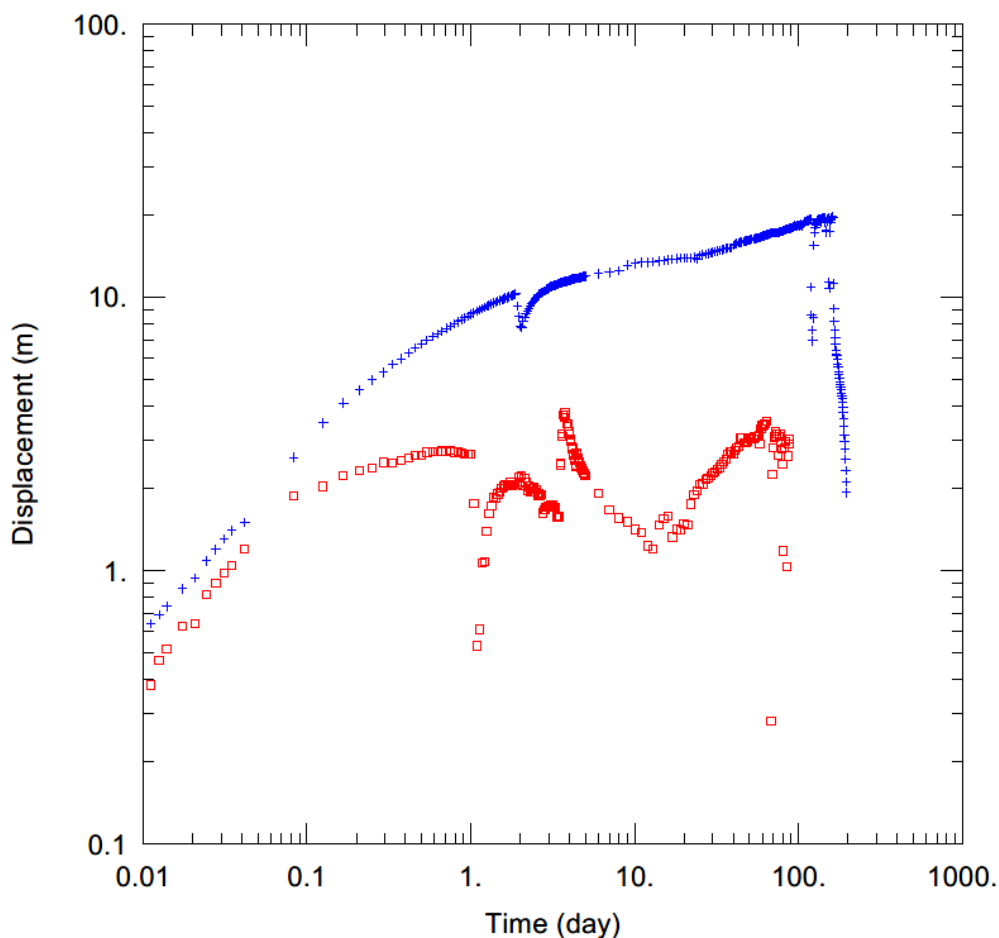


Figure 2 : Courbe de rabattement mesurée dans SR1(bleu) au cours du pompage et sa dérivée (rouge)

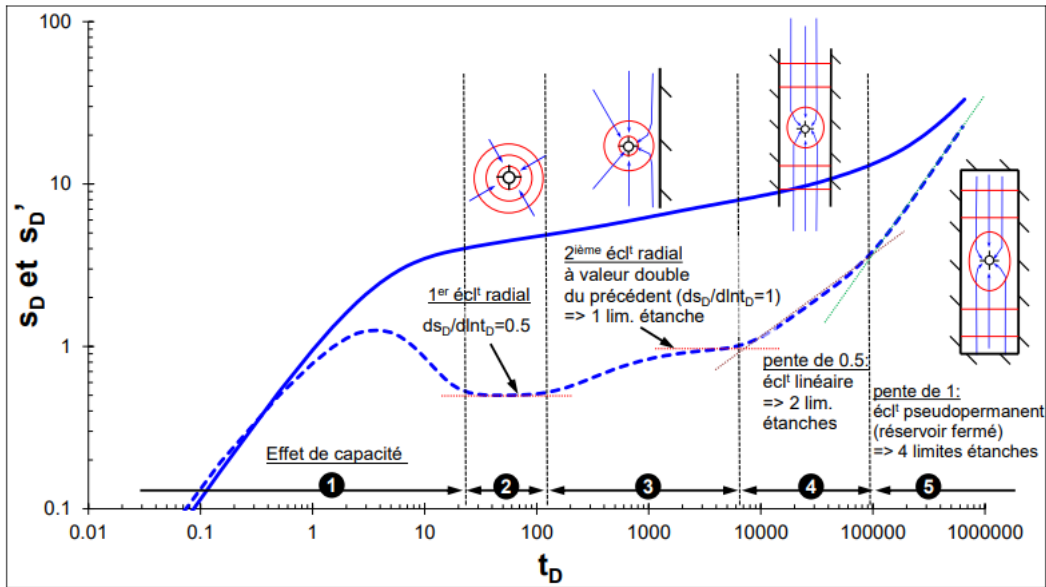


Figure 3 : Exemple de succession des régimes d'écoulement dans un aquifère de socle (Dewandel, 2019)

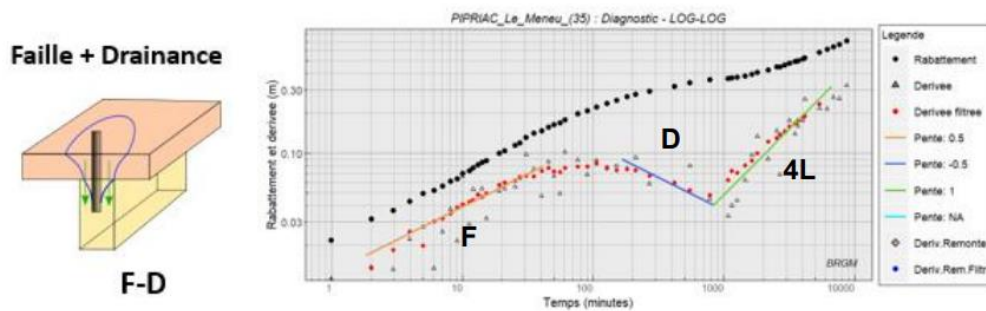


Figure 4 : Courbe de rabattement et sa dérivée correspondant à un système de faille + drainance (BRGM, 2020)

2.2. INTERPRETATION DES COURBES POUR LE FORAGE SR1

Pour les données acquises au droit du forage SR1, la solution analytique retenue est finalement celle de Moench (1984). Celle-ci correspond à un système fracturé à double porosité supposant un aquifère isotrope et un forage captant la nappe sur toute sa hauteur.

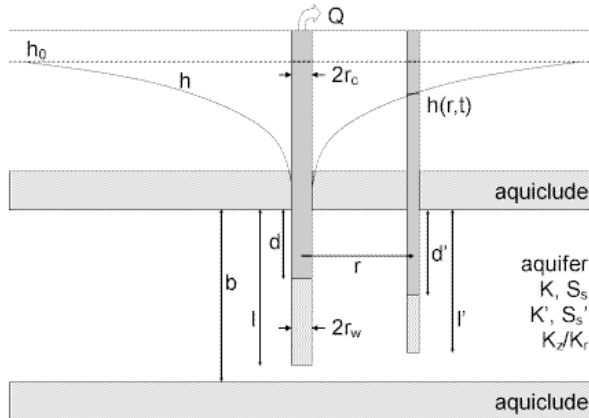


Figure 5 : Illustration du modèle hydrogéologique supposé pour la solution de Moench – 1984 (extrait de Contents & Index – Aqtesolv)

Les paramètres estimés par la solution sont les suivants (Figure 5) :

- K (perméabilité fracture),
- S_s (coefficient d'emmagasinement spécifique de la fracture),
- K' (perméabilité de la matrice),
- S_s' (coefficient d'emmagasinement spécifique de la fracture),
- Sw (effet de peau du puits), *paramètre qui influence peu le calage des courbes*
- Sf (effet de peau de la fracture), *paramètre qui influence peu le calage des courbes*
- $R(w)$ (rayon du puits),
- $R(c)$ (rayon nominal du tubage).

L'analyse conjointe du rabattement et de la dérivée sur SR1 indique un écoulement de type faille pour le premier jour de pompage, puis de drainage pour les 15 jours suivants et enfin l'influence de 2 limites étanches avec une pente de la dérivée comprise entre 0.5 et 1.

Des tests d'amélioration du calage lors des derniers jours de pompage ont été réalisés en augmentant le nombre des limites étanches mais cette approche n'a pas permis d'améliorer la calibration pour l'ensemble des ouvrages.

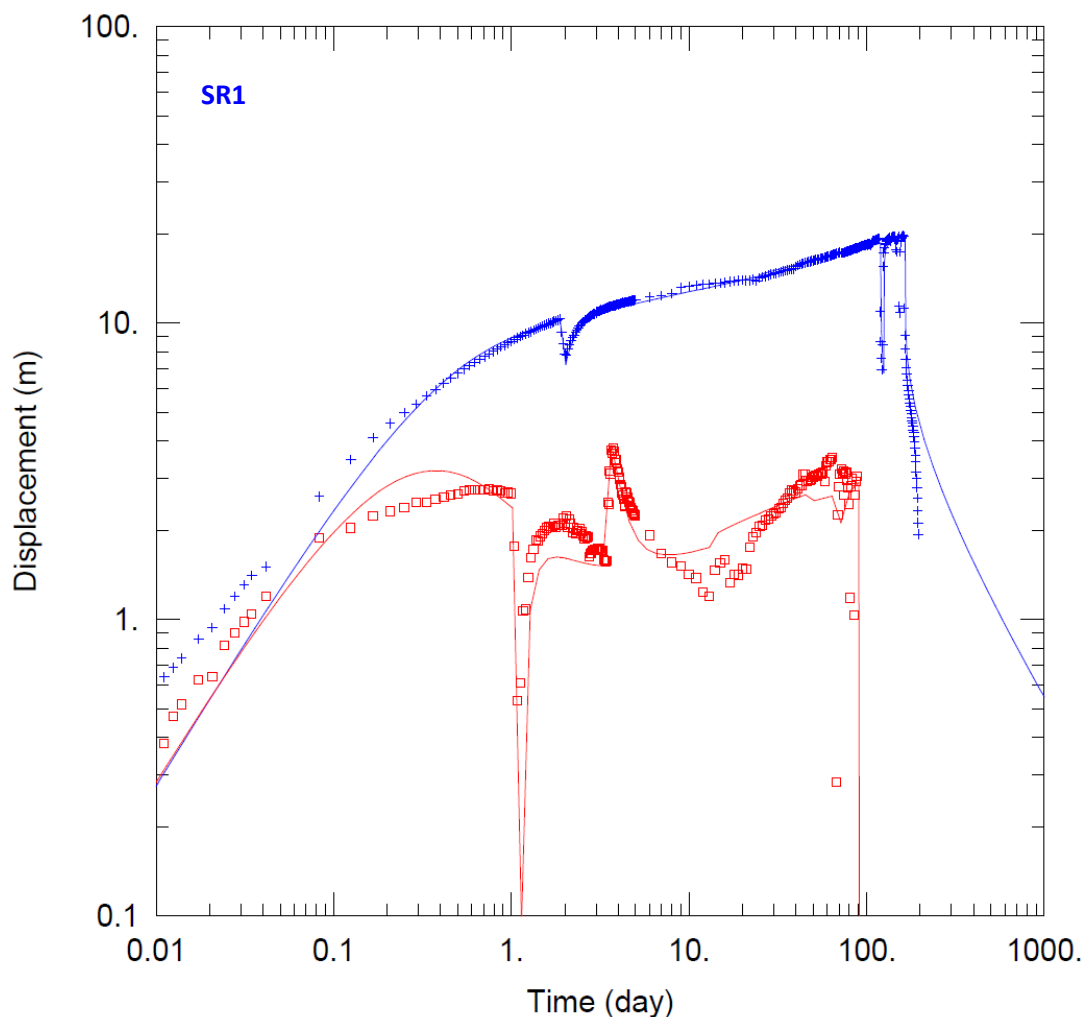


Figure 6 : SR1 – Rabattement (bleu) et dérivée (rouge) observés et calculés d'après la solution de Moench en présence des 2 limites étanches

2.3. DETERMINATION DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES ET DES LIMITES ETANCHES

Le Tableau 1 reprend l'ensemble des paramètres hydrodynamiques déterminés par la solution de Moench (1984) pour les 5 ouvrages mesurés (forage SR1 et 4 piézomètres profonds d'observation).

Les graphiques en Figure 6 à Figure 11 montrent les courbes de rabattement et leur dérivées calculées avec ces paramètres.

La perméabilité de fracture du système aquifère est ainsi comprise entre $1.4 \cdot 10^{-5}$ (PP2) et $2.6 \cdot 10^{-5}$ m/s (PP1) et la perméabilité de matrice a été fixée à $1 \cdot 10^{-7}$ m/s car elle n'avait que peu d'influence sur les courbes. Ces valeurs sont cohérentes avec la gamme présentée dans l'étude de 2011 sur le système de socle (Wyns, et al., 2011).

Les coefficients d'emménagement spécifiques ont été estimés de $1 \cdot 10^{-6}$ à $1 \cdot 10^{-7}$ m⁻¹ pour celui de fracture et entre $5.5 \cdot 10^{-7}$ et $3 \cdot 10^{-4}$ m⁻¹ pour celui de la matrice.

La solution de Moench permet aussi de représenter l'effet de capacité dû à la galerie minière. Ce dernier a une influence sur le début de la courbe de rabattement, en atténuant celui-ci. Le rayon du puits a ainsi été estimé à 4 mètres.

Remarque : le début du calage de la courbe sur PP5 n'a pas pu être correctement estimé car ce piézomètre était artésien au début de l'essai et le rabattement mesuré a ainsi été sous-estimé.

Tableau 1 : Perméabilités et coefficients d'emmagasinement spécifiques estimés à partir de l'interprétation de l'essai

Ouvrage	Distance à la limite étanche 1 (m)	Distance à la limite étanche 2 (m)	K fracture (m/s)	Ss fracture (m ⁻¹)	K matrice (m/s)	Ss matrice (m ⁻¹)
SR1	330	1080	$1.67.10^{-5}$	$1.0.10^{-7}$	$1.0.10^{-7}$	$3.3.10^{-5}$
PP1	400	1300	$2.65.10^{-5}$	$1.0.10^{-7}$	$1.0.10^{-7}$	$5.5.10^{-7}$
PP2	450	980	$1.40.10^{-5}$	$1.0.10^{-7}$	$1.0.10^{-7}$	$3.4.10^{-5}$
PP3	210	1300	$2.10.10^{-5}$	$1.0.10^{-6}$	$1.0.10^{-7}$	$1.2.10^{-5}$
PP5	160	1020	$1.75.10^{-5}$	$1.0.10^{-7}$	$1.0.10^{-7}$	$3.0.10^{-4}$

Grâce à un pompage suffisamment long, il a été possible de positionner les 2 limites étanches les plus proches de SR1. La présence de ces limites confirme donc que l'aquifère est compartimenté. Celles-ci sont localisées sur la carte en Figure 7.

À noter que le forage agricole Fa5 et les puits situés au Nord du forage SR1 se trouvent au-delà de la limite étanche au Nord. Ceci est cohérent avec les observations faites lors de l'essai qui ont mis en évidence une absence d'influence du pompage sur le forage Fa5. Cette limite pourrait correspondre à la bordure nord de l'anticlinal où la géologie des terrains change.

La limite tracée à l'Ouest suit l'orientation de la famille de failles de direction NO/SE tracées sur la carte géologique régionale et se situe au-delà de l'étang de Limèle.

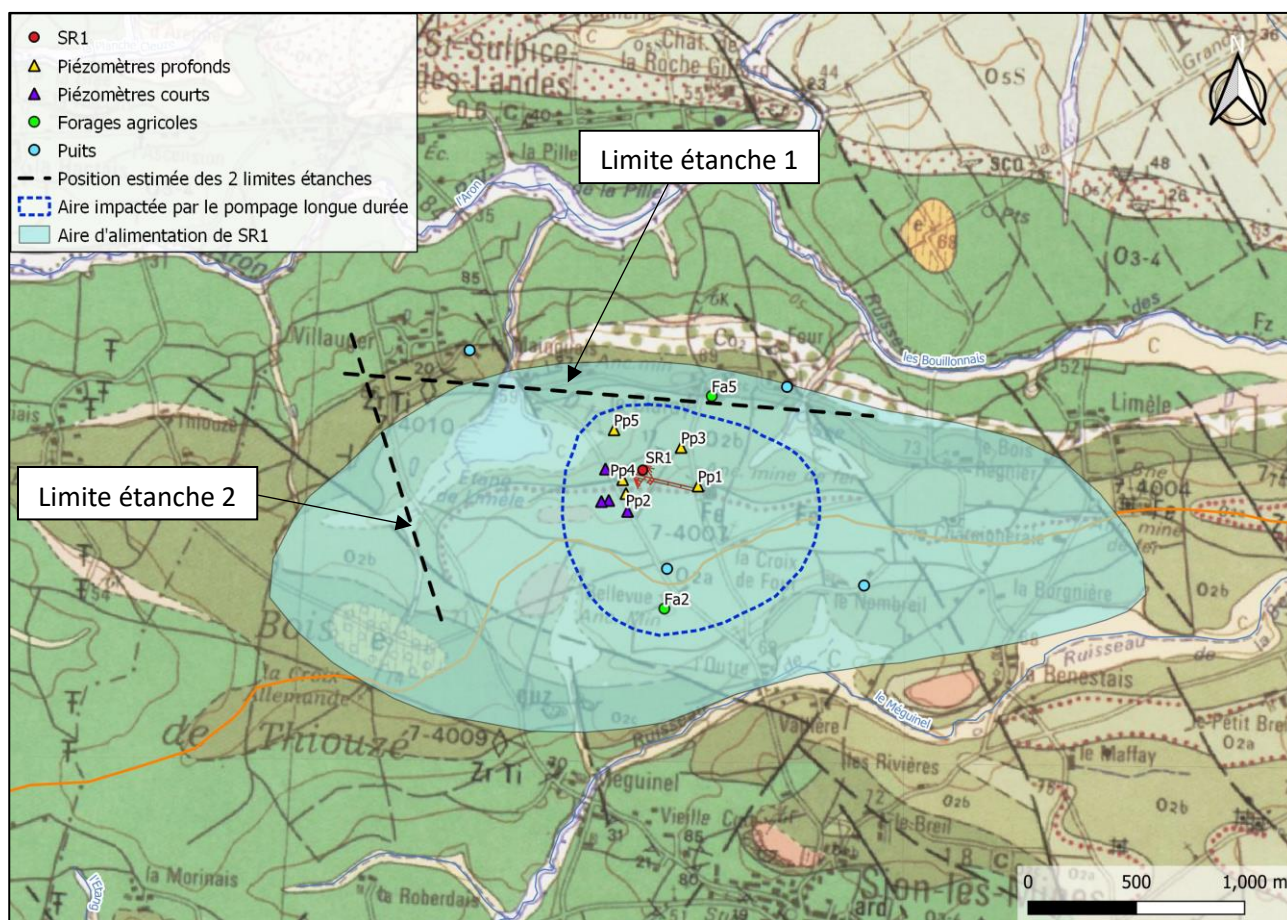


Figure 7 : Position estimée des 2 limites étanches les plus proches de SR1

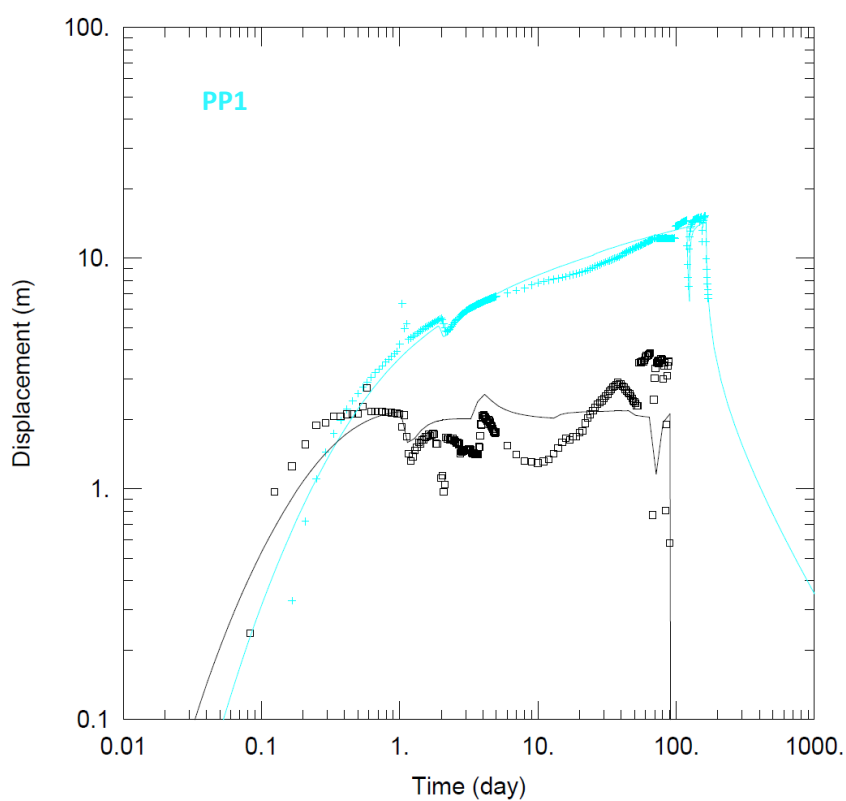


Figure 8 : PP1 – Rabattement (bleu) et dérivée (noir) observés et calculés d'après la solution de Moench en présence des 2 limites étanches

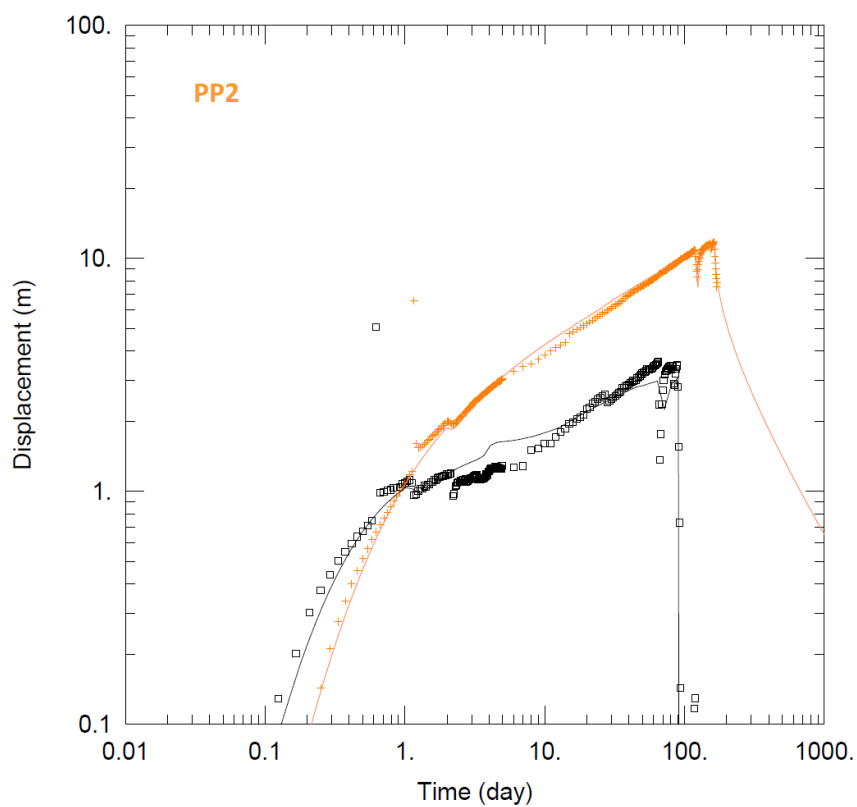


Figure 9 : PP2 – Rabattement (orange) et dérivée (noir) observés et calculés d'après la solution de Moench en présence des 2 limites étanches

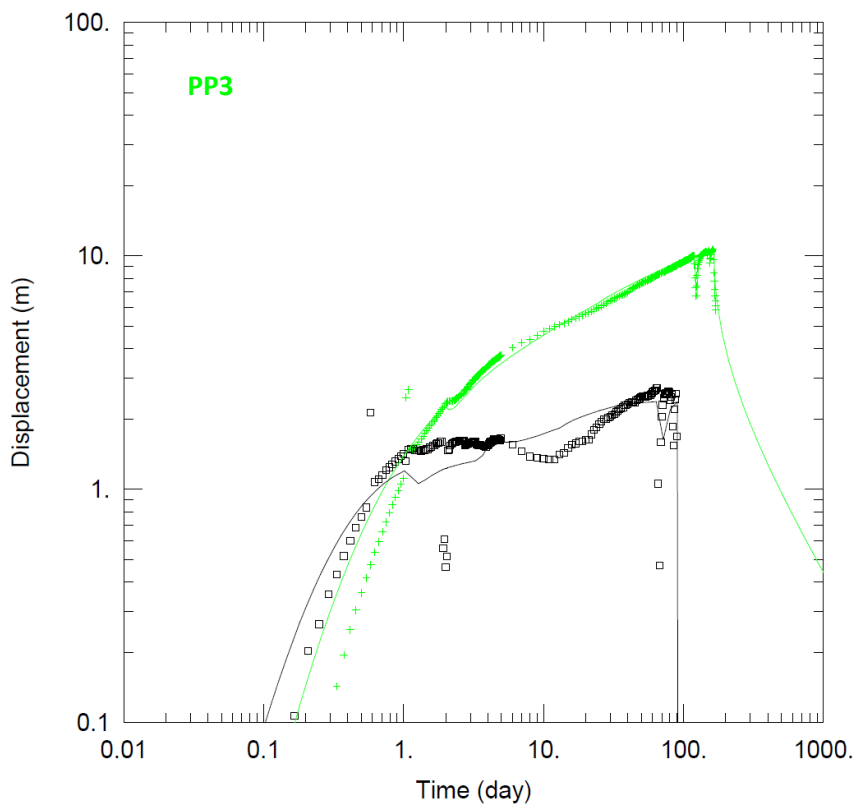


Figure 10 : PP3 – Rabattement (vert) et dérivée (noir) observés et calculés d'après la solution de Moench en présence des 2 limites étanches

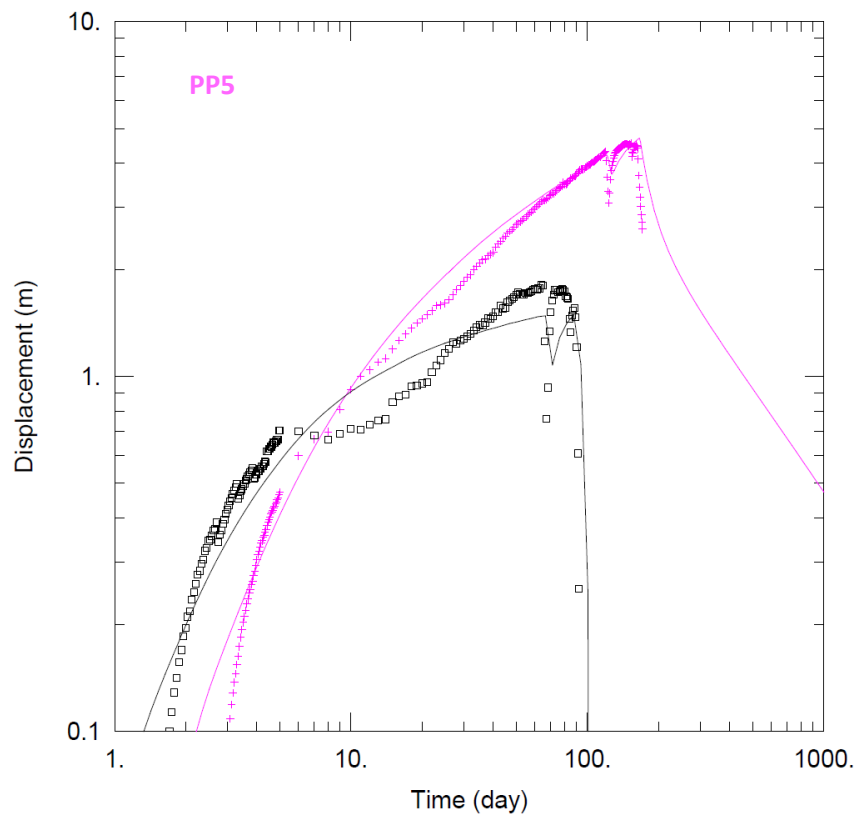


Figure 11 : PP5 – Rabattement (rose) et dérivée (noir) observés et calculés d'après la solution de Moench en présence des 2 limites étanches

3. BILAN HYDRIQUE SIMPLIFIE DE LA RESSOURCE EN EAU A L'HORIZON 2075

3.1. DONNEES EXPLOITEES

Les données climatiques suivantes ont été récupérées au droit du site d'étude :

- Données climatiques historiques du 01/01/2003 au 31/12/2022 :
 - Les précipitations totales journalières extraites du point de la grille de résolution 8km de la modélisation hydrométéorologique SAFRAN (*données payantes Météo France*) ;
 - L'évapotranspiration potentielle décadaire interpolée qui est calculée à partir de la formule de Penman en un point de la grille régulière à l'aide des 5 stations de mesures les plus proches (*données payantes Météo France*).
- Données climatiques prédictives du 01/01/2022 au 31/12/2075 pour les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5¹ :
 - Les précipitations totales journalières extraites du point de la grille de modélisation régionale le plus proche du site (*données gratuites DRIAS*) ;
 - Les évapotranspirations potentielles journalières calculées selon la méthode de Hargreaves extraites du point de la grille de modélisation régionale le plus proche du site (*données gratuites DRIAS*).

Le scénario climatique RCP4.5 décrit une trajectoire des émissions de gaz à effet de serre dans lesquelles le seuil des 2°C est franchi au milieu du siècle et précède ensuite une stabilisation, voire une réduction, des émissions de GES avant la fin du siècle (Figure 12).

Le scénario climatique RCP8.5, le plus pessimiste, estime, quant à lui, une évolution continue des températures en l'absence de toute politique de réglementation climatique et projette une hausse de la température mondiale moyenne de 2 °C dès 2060 et même de 5 °C d'ici à 2100.

¹ Les pluies et l'ETP du modèle climatique régional ALADIN63 développé par Météo France ont été considérées pour cette étude.

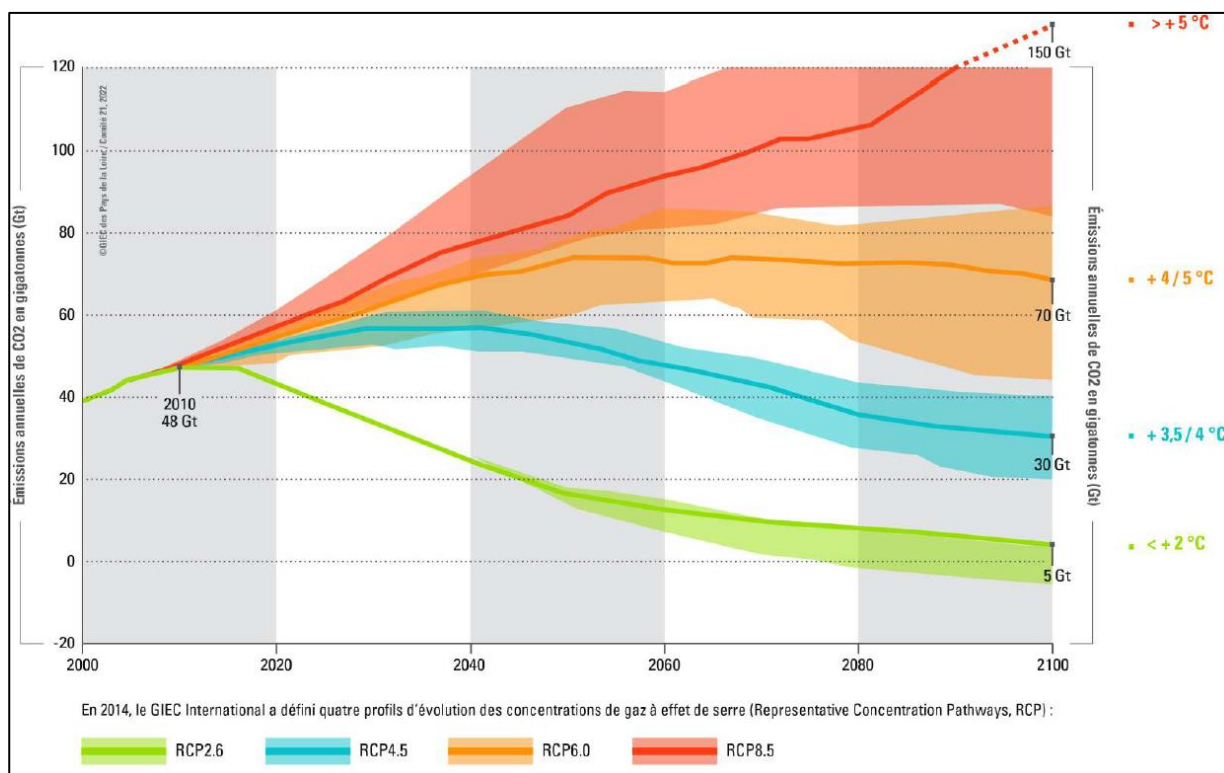


Figure 12 : Scénarii d'évolution des températures mondiales (extrait GIEC des Pays de la Loire, 2021)

3.2. EVOLUTION DES DONNEES CLIMATIQUES A L'HORIZON 2075 AU DROIT DE L'AIRE D'ALIMENTATION DU FORAGE

3.2.1. Evolution annuelle

L'évolution annuelle de 2003 à 2075 de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle est présentée sur la Figure 13.

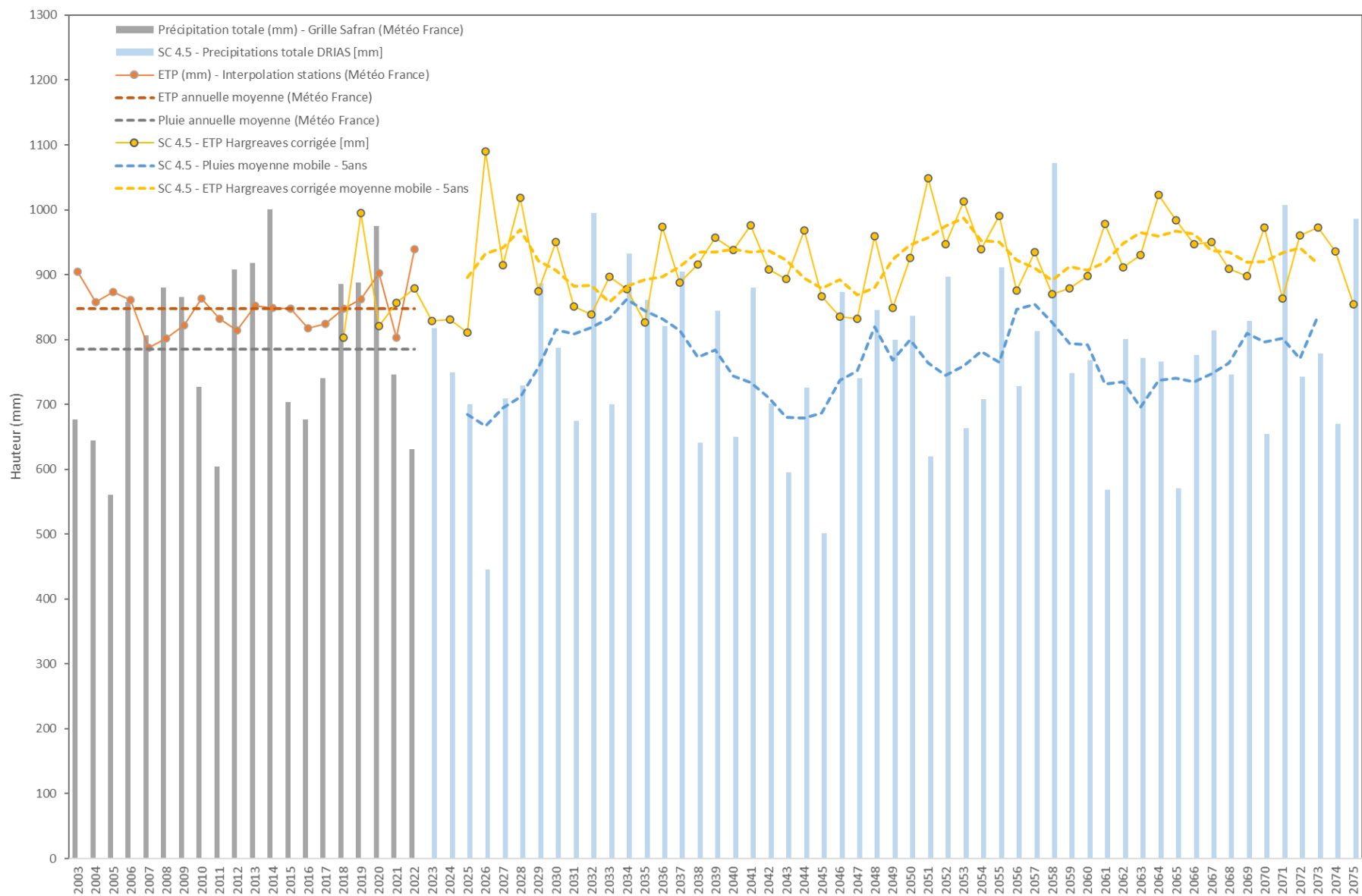
Les données d'ETP n'étant pas déterminées selon la même formule pour les données historiques et celles projetées, il a été constaté un décalage entre les valeurs antérieures à 2022 et celles postérieures. En effet, sur une période de recouvrement allant de 2018 à 2022², les projections climatiques sous-estiment de plus de 130 mm l'ETP, soit une dépréciation de l'ordre de 15%, par rapport aux mesures interpolées entre les stations. Pour corriger cet écart, une translation définie comme la différence entre la moyenne historique et la moyenne des données simulées a été appliquée pour les ETP annuelles après 2022 pour les 2 scénarii (courbes nommées ETP Hargreaves corrigée).

Pour les données historiques de 2003 à 2022, la pluviométrie moyenne est de 785 mm et l'ETP moyenne de 848 mm. Concernant les pluies, la variabilité interannuelle est prononcée avec des années à faible pluviométrie en 2005, 2011 et 2022 (écart à la moyenne > -20%) et des années particulièrement humides en 2014 et 2020 (écart à la moyenne > +20%). Pour l'ETP, les valeurs annuelles sont plus stables et il n'est pas observé de tendance à la hausse ces dernières années.

Les projections climatiques sur le secteur de Sion Les Mines montrent :

- pour le scénario RCP4.5 : la pluviométrie moyenne est de 769 mm de 2023 à 2075, soit légèrement inférieure à la moyenne actuelle (<5%), et il n'est pas mis en évidence de baisse des hauteurs au cours du temps. L'ETP moyenne est de 920 mm, donc supérieure à celle historique (+8%), mais celle-ci ne progresse pas, non plus, au cours du temps ;
- pour le scénario RCP8.5 : la pluviométrie moyenne reste proche de celle actuelle de 782 mm mais une tendance à la baisse est marquée après 2045. L'ETP moyenne est de 950 mm avec une augmentation mise en évidence aussi après 2045 (>10%). Au-delà de cette date, les prédictions pour l'ETP annuelle dépassent régulièrement une demande en eau de 1 000 mm.

² Il est possible d'extraire des données simulées sur une période historique à partir des modèles de projection climatique sur le site DRIAS permettant ainsi la comparaison des valeurs simulées avec les valeurs fournies par Météo France.



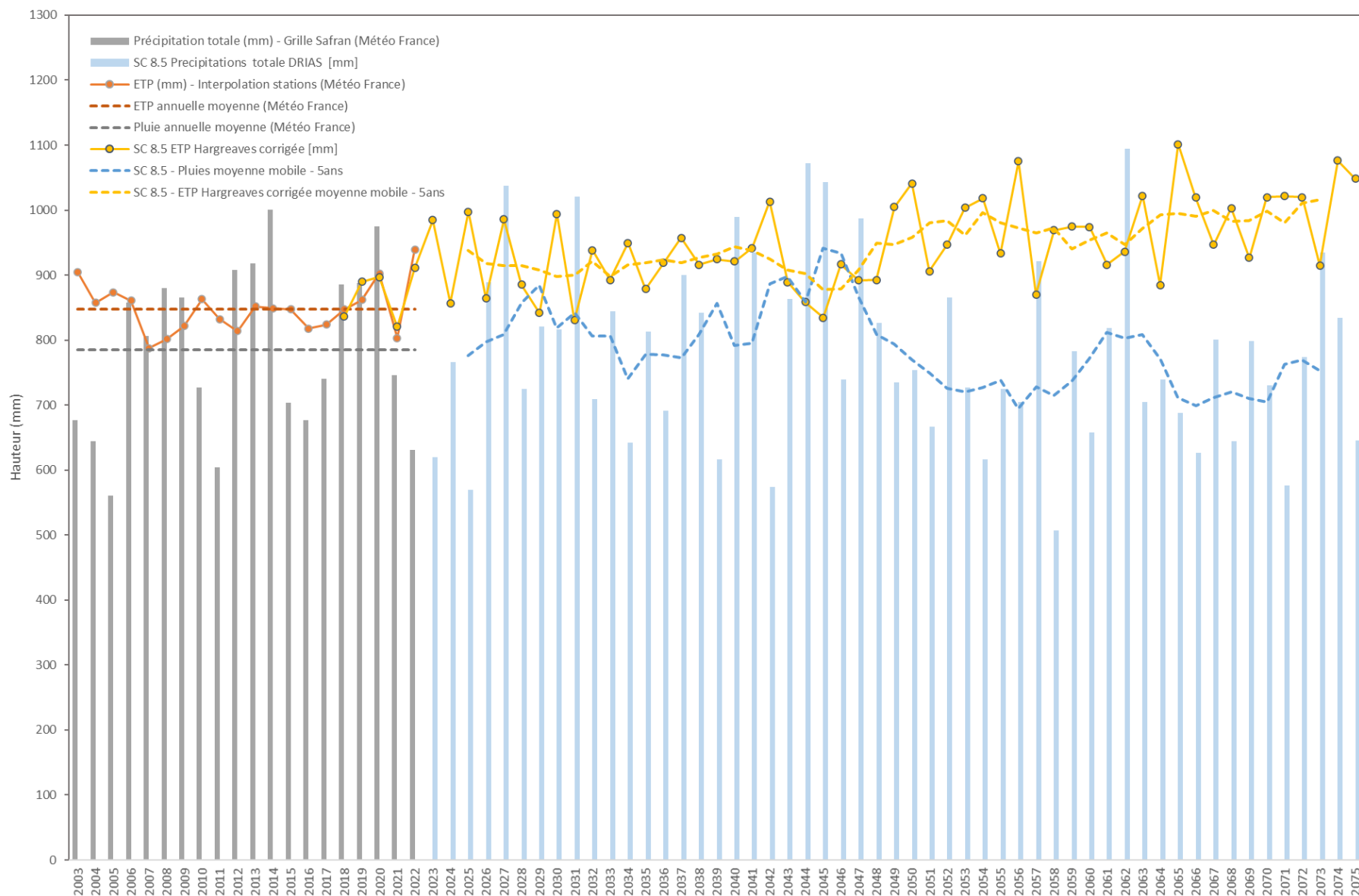


Figure 13 : Evolution de 2003 à 2075 des précipitations totales et de l'ETP au droit du site pour les 2 scénarii climatiques étudiés.

Note finale

CARACTERISATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE SUR LE SITE DE LA MINE DE CLARAY A SION-LES-MINES

ARTELIA / MAI 23 / 8777717

PAGE 16 / 36

3.2.2. Evolutions saisonnière et journalière des précipitations totales

3.2.2.1. Evolution saisonnière

Sachant que la recharge des aquifères est effective dans la région en période hivernale, la répartition saisonnières des pluies a été étudiée pour identifier une possible modification dans le futur du régime des pluies journalières qui pourrait avoir des répercussions à hauteurs équivalentes sur le processus de recharge de l'aquifère.

La distribution saisonnière des précipitations de 2003 à 2075 est présentée sur la Figure 14. A titre de repère, la moyenne des précipitations saisonnières pour les données historiques est aussi figurée sur chaque graphique. L'analyse des 4 saisons montre :

- Une stagnation des hauteurs des pluies hivernales ainsi que printanières jusqu'en 2075 pour les 2 scénarii ;
- Une baisse des hauteurs de pluies estivales sous la moyenne historique pour les 2 scénarii surtout visible après 2045 ;
- Une diminution modérée des pluies automnales après 2045 uniquement pour le scénario RCP8.5.

Ce raisonnement n'a pas été effectué pour les valeurs d'ETP en raison de l'incertitude sur ce paramètre et du décalage mis en évidence entre les données historiques (méthode Penman) et les données projetées (méthode Hargreaves).

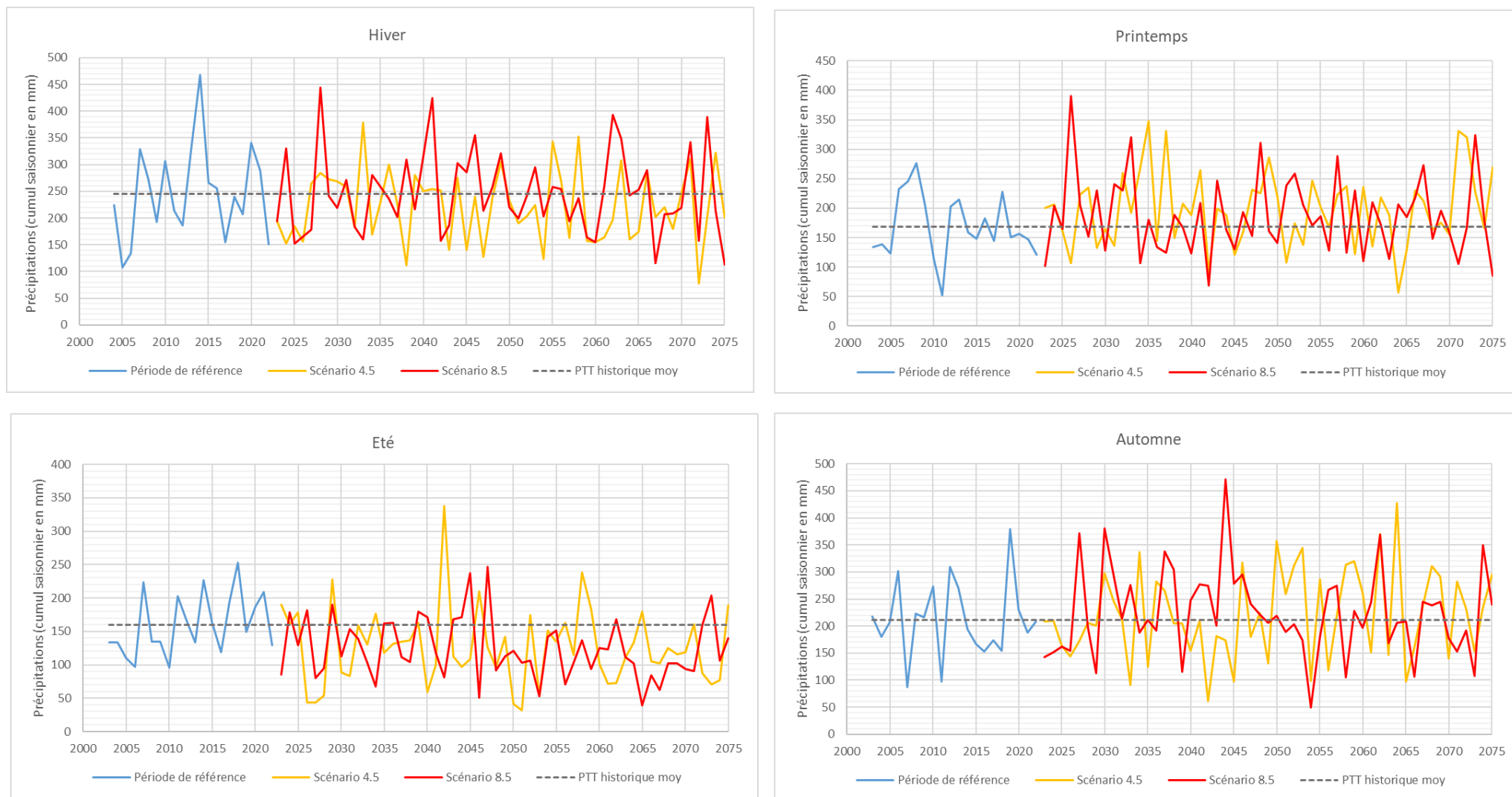


Figure 14 : Répartition saisonnière des précipitations totales pour les 2 scénarii climatiques

3.2.2.2. Evolution journalière de l'intensité des pluies

La distribution de l'intensité des pluies journalières a été regardée pour les pluies historiques de 2003 à 2022 ainsi que les projections climatiques. En effet, l'intensité des événements est un autre facteur important dans la proportion d'eau qui ruisselle et celle qui s'infiltre vers la nappe.

Le Tableau 2 classe les pluies journalières du 01/01/2003 au 31/12/2022 selon leurs intensités. Dans ce tableau, il a aussi été distingué une période plus ancienne de 2003 à 2012 et une plus récente de 2013 à 2022.

La distribution des pluies montre qu'une part très élevée des pluies, presque 80%, est inférieure à 5 mm. La comparaison des pluies anciennes (2003 à 2012) avec celles récentes (2013 à 2022) met en évidence une baisse du nombre total d'événements pluvieux cette dernière décennie. Au contraire, les pluies de moyenne intensité (5 à 20 mm) sont plus nombreuses ces 10 dernières années avec une augmentation de 6.3% pour les pluies de 5 à 10 mm et de 16.4% pour les pluies de 10 à 20 mm.

Tableau 2 : Classification selon la hauteur des pluies journalières du 01/01/2003 au 31/12/2022

STATISTIQUES	Pluies 01/01/2003 au 31/12/2022	Pluies 01/01/2003 au 31/12/2012	Pluies 01/01/2013 au 31/12/2022
Pluie journalière moyenne (mm)	3.18	3.15	3.22
Pluie journalière min (mm)	0.1	0.1	0.1
Pluie journalière max (mm)	67.600	58.100	67.600
Nbre jour de pluie	4610	2243	2380
Nbre de pluie journalière 0 à 5 mm	3675	1793	1891
Nbre de pluie journalière 5 à 10 mm	583	284	302
Nbre de pluie journalière 10 à 20 mm	276	128	149
Nbre de pluie journalière 20 à 50 mm	73	37	36
Nbre de pluie journalière 50 à 100 mm	3	1	2

La classification de l'intensité des pluies pour les scénarii 4.5 et 8.5 est détaillée dans le Tableau 3 en distinguant l'horizon moyen (2023 à 2050) et l'horizon lointain (2051 à 2075).

La comparaison des 2 scénarii de pluies n'indique pas de différence marquée dans la distribution des événements. On peut tout de même noter que la proportion d'événement plus intense (supérieure à 20 mm) sera plus élevée pour le scénario RCP8.5, le plus pessimiste. La progression de ces événements pluvieux pourrait donc entraîner une baisse de la recharge vers la nappe au profit du ruissellement superficiel.

Tableau 3 : Classification selon la hauteur des pluies journalières pour les 2 scénarii climatiques 4.5 et 8.5

STATISTIQUES 2023 à 2075	Scénario 4.5	Scénario 8.5
Pluie journalière moyenne (mm)	4.26	4.26
Pluie journalière min (mm)	0.1	0.1
Pluie journalière max (mm)	68.576	77.590
Nbre jour de pluie	9127	9164
Nbre de pluie journalière 0 à 5 mm	6674	6751
Nbre de pluie journalière 5 à 10 mm	1463	1401
Nbre de pluie journalière 10 à 20 mm	762	744
Nbre de pluie journalière 20 à 50 mm	220	266
Nbre de pluie journalière 50 à 100 mm	7	2

HORIZON MOYEN (2023 à 2050)

Nbre de pluie journalière 0 à 5 mm	3546	3646
Nbre de pluie journalière 5 à 10 mm	777	767
Nbre de pluie journalière 10 à 20 mm	400	421
Nbre de pluie journalière 20 à 50 mm	112	142
Nbre de pluie journalière 50 à 100 mm	4	2

HORIZON LOINTAIN (2051 à 2075)

Nbre de pluie journalière 0 à 5 mm	3129	3105
Nbre de pluie journalière 5 à 10 mm	686	634
Nbre de pluie journalière 10 à 20 mm	362	323
Nbre de pluie journalière 20 à 50 mm	108	124
Nbre de pluie journalière 50 à 100 mm	3	0

Pour permettre la comparaison entre les données historiques et les projections climatiques, la classification de l'intensité des pluies a été déterminée à l'échelle annuelle. Pour ce traitement, seules les pluies hivernales, de novembre à mars, ont été traitées sachant qu'elles seules contribuent à la recharge de la nappe. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.

La répartition de l'intensité des pluies journalières hivernales montre que le nombre de jours de pluies par an sera nettement inférieure à l'avenir, de l'ordre de 25% par rapport aux 20 dernières années, pour les 2 scénarii climatiques. La fréquence des pluies faibles (< 5mm) est la plus impactée par cette diminution tandis que les pluies intenses, de 10 à 50 mm, sont stables à légèrement plus élevées pour le scénario 8.5.

Tableau 4 : Comparaison de l'intensité pour les pluies historiques et les projections climatiques en période hivernale (novembre à mars) rapportée à l'échelle annuelle

Moyenne rapportée par année	Pluies 2003 à 2022	Scénario 4.5 (2023 à 2075)	Scénario 8.5 (2023 à 2075)
Nbre jour de pluie / an	110.1	80.3	82.0
Nbre de pluie journalière 0 à 5 mm / an	86.6	56.8	58.5
Nbre de pluie journalière 5 à 10 mm / an	14.9	15.1	13.9
Nbre de pluie journalière 10 à 20 mm / an	6.9	6.5	7.2
Nbre de pluie journalière 20 à 50 mm / an	1.6	1.9	2.3
Nbre de pluie journalière 50 à 100 mm / an	0.1	0.0	0.0

3.3. CALCUL DE LA RECHARGE DIRECTE AU DROIT DE L'AIRE D'ALIMENTATION DU FORAGE

3.3.1. Méthode appliquée

Pour estimer la recharge directe de la nappe des grès, un calcul des pluies efficaces a tout d'abord été réalisé à partir d'un bilan hydrique (Figure 15). Le bilan hydrique est une méthode simple qui détermine la part d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration dans le sol. Cette méthode a été appliquée à l'échelle mensuelle sur la période 2003 à 2075.

Pour le calcul, les paramètres nécessaires sont :

- La pluie totale mensuelle,
- L'ETP mensuelle,
- R.U. : la capacité de stockage du sol (appelée Réserve Utile) dont la capacité maximale a été fixée à 175 mm en s'appuyant sur les données bibliographiques (BRGM, 1994),
- Kc : le coefficient cultural qui permet de corriger l'ETP suivant une culture donnée et son stade de développement. La valeur d'ETP est ainsi multipliée par un coefficient cultural Kc variant selon le stade et le type de culture : $ETM = ETP \times Kc$. Cette valeur a été fixée à 0.6 sur le site de Sion Les Mines (prairie).

Seules les pluies et l'ETP varient chaque mois tandis que les autres paramètres sont fixés. La somme des pluies efficaces est ensuite calculée pour chaque année hydrologique, définie comme la période entre le mois de septembre de l'année (n-1) au mois d'août de l'année n.

Il a ensuite été considéré que la recharge vers la nappe représentait 80% des pluies efficaces, le reste ruisselant en surface. Etant donné l'échelle temporelle 'macro' de ce calcul (mensuelle), ce pourcentage n'a pas été modifié quelques soient les hauteurs pluviométriques. Les résultats ainsi obtenus sont présentés en annexe 1 pour les pluies historiques mensuelles.

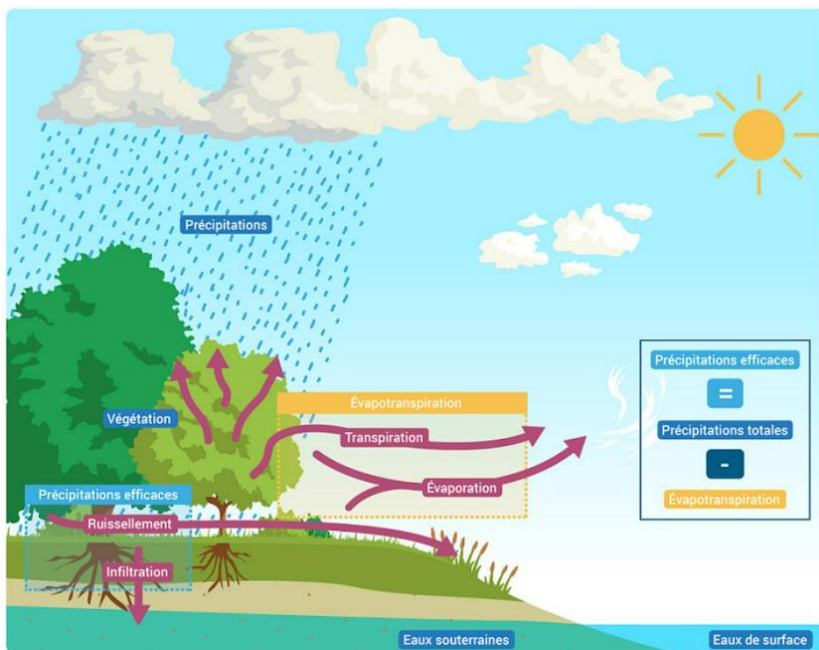


Figure 15 : Schéma simplifiée de la représentation des pluies efficaces (source EauFrance)

3.3.2. Calcul de la recharge sur la période historique

Dans un premier temps, les bilans hydriques ont été calculés sur la période historique de 2003 à 2022 (Tableau 5). Pour valider la méthode et les paramètres de calage R.U. et Kc, ces valeurs ont été comparées avec les données de la bibliographie (rapports BSH annuel) et les données piézométriques disponibles dans le secteur.

Tableau 5 : Calculs des pluies efficaces et répartition entre le ruissellement et la recharge sur la période historique

	Peff annuelle (mm)	Ruissel. annuel (mm)	Recharge annuelle (mm)	Peff - rapport BSH (mm)
09/2003 - 08/2004	182.2	36.4	145.7	
09/2004 - 08/2005	46.0	9.2	36.8	
09/2005 - 08/2006	178.7	35.7	143.0	
09/2006 - 08/2007	452.9	90.6	362.4	
09/2007 - 08/2008	374.3	74.9	299.5	
09/2008 - 08/2009	283.3	56.7	226.6	
09/2009 - 08/2010	338.3	67.7	270.7	
09/2010 - 08/2011	210.6	42.1	168.5	
09/2011 - 08/2012	115.3	23.1	92.2	
09/2012 - 08/2013	519.4	103.9	415.5	
09/2013 - 08/2014	503.0	100.6	402.4	
09/2014 - 08/2015	341.9	68.4	273.5	200 à 300
09/2015 - 08/2016	285.9	57.2	228.7	100 à 300
09/2016 - 08/2017	58.4	11.7	46.7	50 à 100
09/2017 - 08/2018	447.6	89.5	358.1	300 à 400
09/2018 - 08/2019	166.8	33.4	133.4	100 à 200
09/2019 - 08/2020	507.2	101.4	405.8	500 à 750
09/2020 - 08/2021	305.7	61.1	244.5	non disponible
09/2021 - 08/2022	203.7	40.7	163.0	100 à 200

Les valeurs calculées sur les 6 dernières années ont été appréciées avec les cartes de pluies efficaces éditées chaque année dans le bulletin national de situation hydrologique (Figure 16). Les résultats obtenus sont cohérents avec les gammes proposées dans ces rapports.

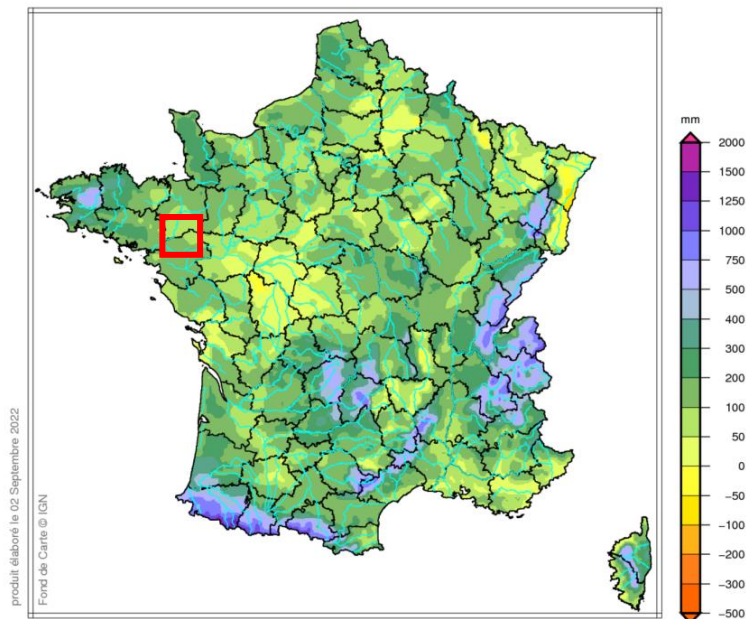


Figure 16 : Cumul des précipitations efficaces de septembre 2021 à août 2022 présenté dans le bulletin national de situation hydrologique

Les 2 graphiques ci-après comparent les pluies efficaces calculées de 2003 à 2022 avec la chronique piézométrique observée à proximité de Sion Les Mines où le comportement hydrodynamique est jugé *a priori* proche de celui de la nappe des grès capté par SR1. Il est ainsi mis en évidence la bonne concordance entre les pluies efficaces les plus faibles (2005, 2011 et 2007) et les étiages de nappe les plus marqués. *A contrario*, les niveaux de plus hautes eaux observés correspondent aux pluies efficaces les plus importantes calculées à partir du bilan hydrique (2012 à 2014).

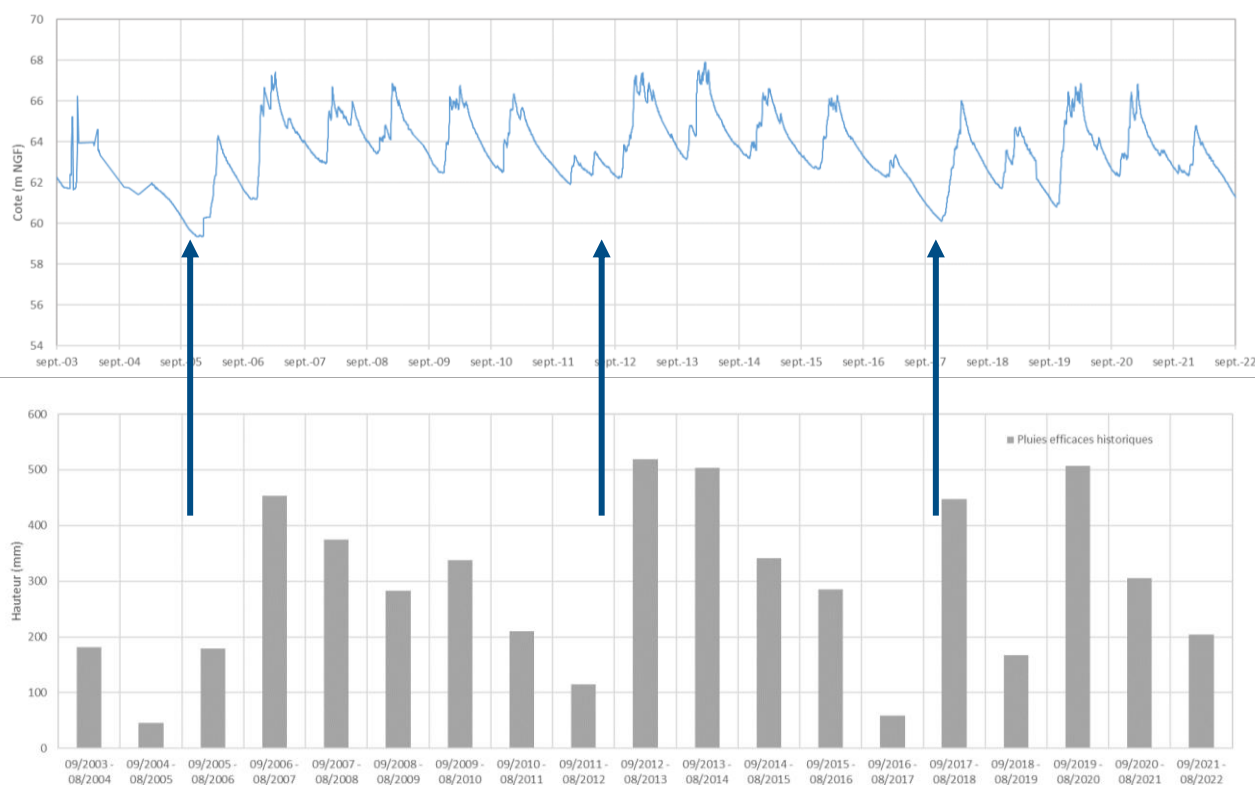


Figure 17 : Comparaison des pluies efficaces calculées avec les variations piézométriques du point 03884X0021/TF1PR situé à proximité du site de Sion les Mines (données ADES)

3.3.3. Calcul de la recharge sur la période 2023 à 2075

Les paramètres calés pour le bilan hydrique de 2003 à 2022 permettent donc d'obtenir des valeurs de recharge cohérentes avec le comportement hydrogéologique observé dans cette région. Ces paramètres ont été conservés pour les projections à l'horizon 2075. La recharge déduite est présentée sur la Figure 18.

De 2003 à 2022, la recharge moyenne annuelle est ainsi estimée à 232 mm, soit 29% des pluies totales. Cette valeur de recharge est plus élevée que les références publiées. Bien que le calcul des pluies efficaces soit cohérent avec les valeurs présentées dans le bulletin national de situation hydrologique, le choix des paramètres de calcul du bilan hydrique et la recharge déduite doivent donc être exploitées avec prudence³.

Pour les deux scénarii, à l'horizon 2045, les résultats prévoient une baisse modérée de la recharge directe de l'aquifère :

- Pour le scénario RCP4.5, la recharge moyenne est de 202 mm (-12%) ;
- Pour le scénario RCP8.5, la recharge moyenne est de 216 mm (-7%).

Pour un horizon plus lointain, au-delà de 2050, les scénarii divergent : le scénario RCP4.5 permet de maintenir ces valeurs tandis que pour le scénario RCP8.5 on observe une diminution de la recharge de l'ordre de 20% où la part d'eau disponible pour l'infiltration n'est plus que de 182 mm de 2050 à 2075. Il faut noter que les incertitudes associées à ces calculs ne sont pas négligeables ce qui oblige donc à exploiter ces résultats comme des valeurs tendanciennes.

³ Les pluies efficaces sont estimées à 150 mm.an⁻¹ d'après la carte Margat (1946-1976) ou 200 à 250 mm.an⁻¹ d'après le SIGES Bretagne (1946-2001).

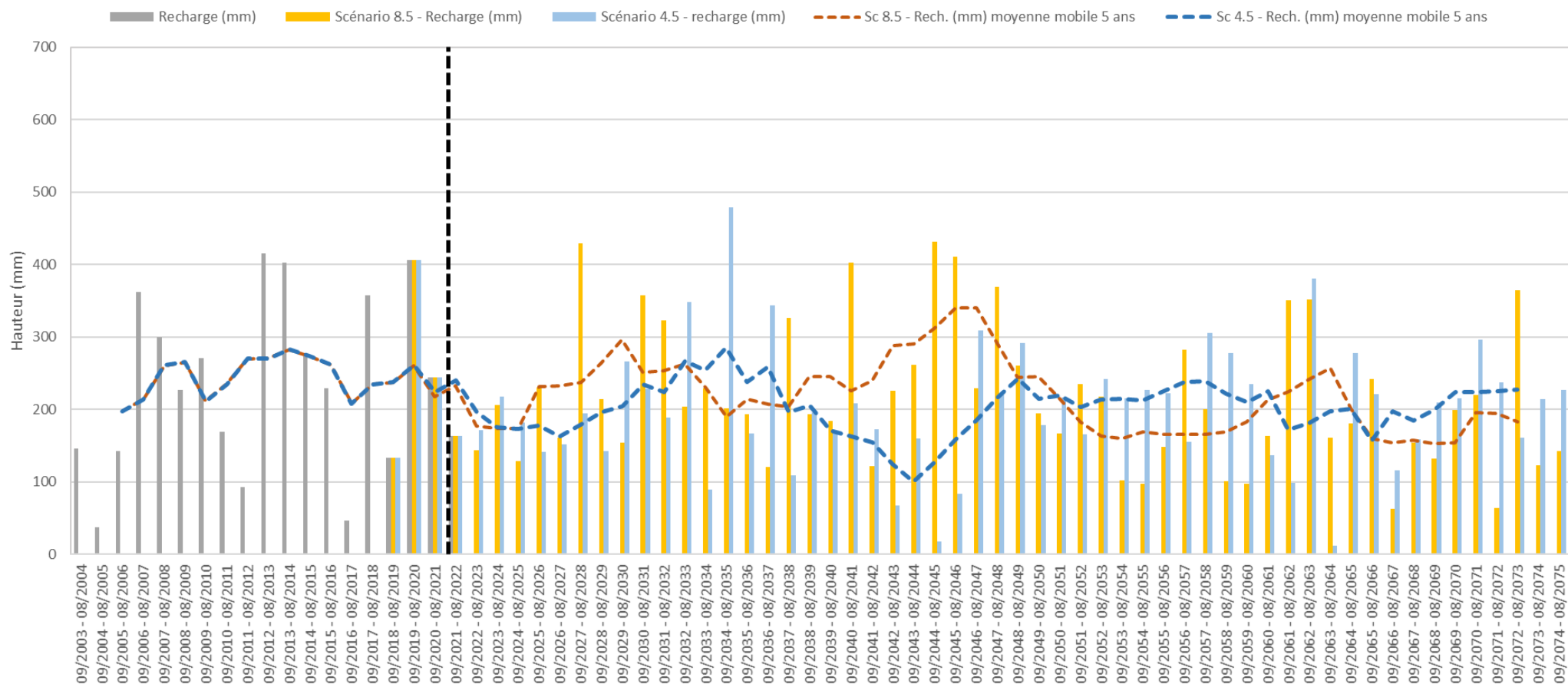


Figure 18 : Recharges directes calculées pour les 2 scénarii à l'horizon 2075

3.3.4. Incidence du pompage sur la ressource en eau souterraine

A l'aide de ce bilan hydrique, l'incidence du pompage sur la ressource en eau souterraine a été évaluée. Pour cela, un bilan volumétrique a été calculé à l'échelle de la surface d'alimentation estimée du futur pompage.

Les hypothèses considérées pour le projet de pompage sont les suivantes :

- Aire d'alimentation du forage SR1 estimée pour un débit de $60 \text{ m}^3/\text{h}$: $5\,000\,000 \text{ m}^2$;
- Volume annuel estimé prélevé dans l'aquifère : $525\,600 \text{ m}^3$ en considérant 24/24h de pompage toute l'année.

A partir de lame d'eau infiltrée déduite grâce au bilan hydrique et présentée dans le paragraphe précédent, le volume d'eau que représente la recharge directe annuelle par infiltration a été comparé avec le volume annuel prélevé. Si le solde annuel est positif, cela signifie que le pompage SR1 n'a prélevé qu'une fraction de la part renouvelable de la ressource en eau souterraine. Dans le cas contraire, si le solde est négatif, il a été nécessaire de déstocker une partie de la ressource pour répondre aux besoins de prélèvement. Cette démarche simplifiée présuppose que toute l'eau disponible chaque année est consacrée au pompage de SR1 et qu'il n'y a pas d'autre sollicitation de la nappe.

Sur ce principe, la Figure 19 présente le bilan calculé entre 2003 et 2075. Sur la période étudiée, le bilan est majoritairement positif. Pour les années excédentaires, le volume prélevé annuellement dans la nappe représente en moyenne 50% (scénario 8.5) à 55% (scénario 4.5) de la recharge annuelle : le prélèvement SR1 ne surexploite donc pas la ressource en eau souterraine. Ponctuellement lorsque la pluviométrie est faible (ex. années 2005, 2012 et 2017), il est alors nécessaire de déstocker une partie des réserves de l'aquifère sollicité. Il faut noter qu'à partir de 2045, la tendance est à une diminution du stockage annuel et à une fréquence d'années déficitaires plus élevée.

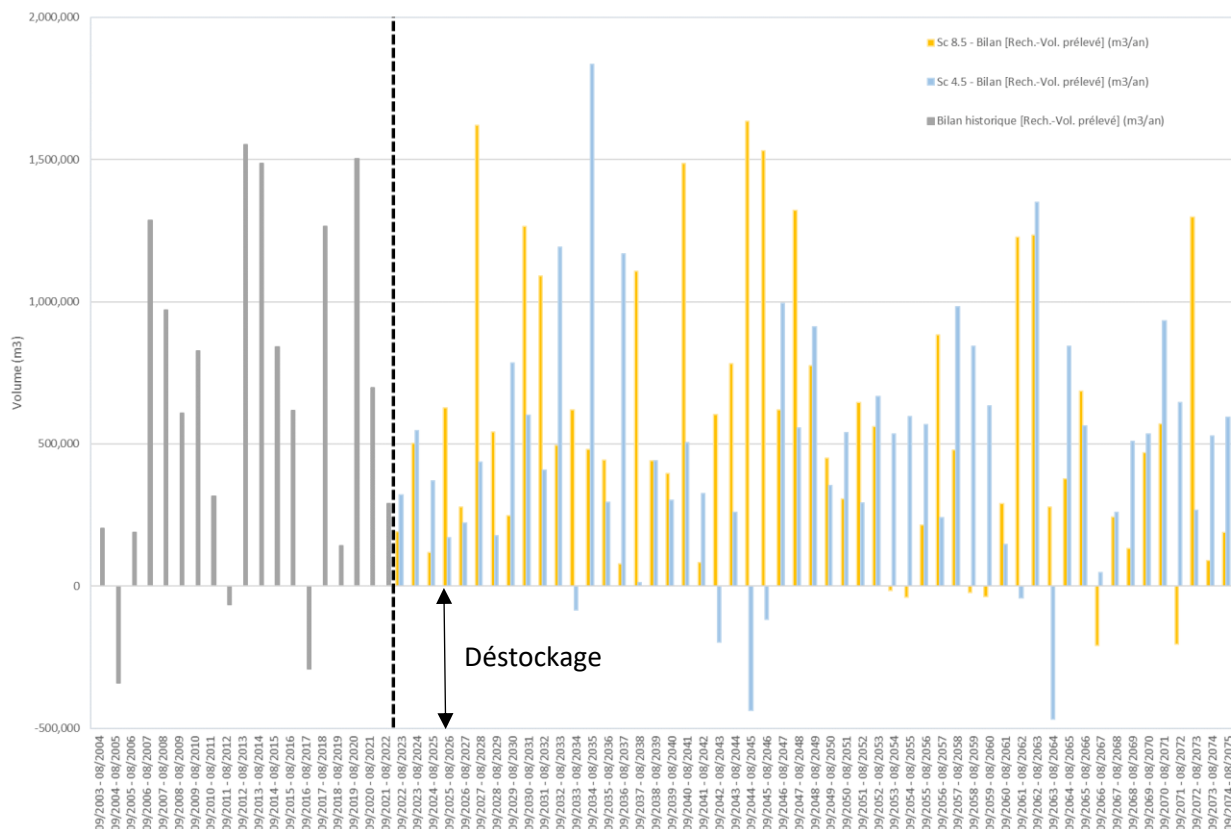


Figure 19 : Bilan annuel de 2003 à 2075 du [volume recharge annuelle – volume prélevé]

4. INCIDENCE DU FUTUR POMPAGE SUR LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Afin d'évaluer l'incidence du futur pompage sur les écoulements de surface, les bassins versants des rivières situées au droit de l'aire d'alimentation du forage SR1 ont été dessinés. L'aire d'alimentation du forage SR1 est découpée en 4 sous-bassins drainés par les cours d'eau à proximité, dont le ruisseau de Méguinel au sud et celui des Bouillonnais au nord-est (Figure 21).

Il n'existe aucune station hydrométrique au droit de ces rivières. Les stations les plus proches se situent respectivement à 13 et 16 km en aval de SR1 sur les rivières Aron et la Chère. Du fait de cet éloignement conséquent au pompage, il ne semble pas pertinent de les considérer comme station de référence dans le cadre de cette étude.

En l'absence de suivi, le manque de données ne permet donc pas une estimation quantitative de l'influence du pompage sur ces tributaires, ainsi, une estimation qualitative a été menée, à l'aide d'une approche par ratio surfacique.



Figure 20 : Bassins versants des rivières disposant de stations hydrométriques en aval du site de Sion Les Mines

Le Tableau 6 indique la surface de chacun des sous-bassins et la part concernée par l'aire d'alimentation du forage SR1 à 60 m³/h. Cette proportion peut s'interpréter comme la proportion du débit du cours d'eau possiblement influencée par le pompage (considérant une alimentation homogène sur tout le bassin versant).

Le bassin qui pourrait être le plus influencé est celui sur lequel se trouve l'étang de Limèle (BV n°2) où plus de 80% de sa surface est potentiellement impacté par le pompage. Bien que l'étang soit en partie alimenté par 2 sondages artésiens captant la nappe des grès, le suivi limnimétrique pendant le pompage de 6 mois, n'a pas mis en évidence de baisse du niveau suggérant plutôt des échanges limités. Pour rappel, les formations au-dessus des horizons captés par le forage SR1 sont des terrains d'altération à matrice argileuse, laissant a priori peu passer l'eau.

Afin d'affiner ce point, une surveillance *a minima* sur un cycle hydrologique de l'étang doit être envisagé pour préciser son fonctionnement hydrologique : surveillance du niveau d'eau, de sa superficie, des écoulements superficiels en distinguant la part de ruissellement et la part due aux sondages artésiens.

Tableau 6 : Surface des bassins versants des tributaires et proportion concernée par l'aire d'alimentation de SR1

	Surface du bassin versant (ha)	Part de l'aire d'alimentation dans le BV (%)	Part du BV comprise dans l'aire d'alimentation (%)
Bassin versant n°1	1 071	41	19
Bassin versant n°2	205	34	81
Bassin versant n°3	654	21	16
Bassin versant n°4	355	4	6

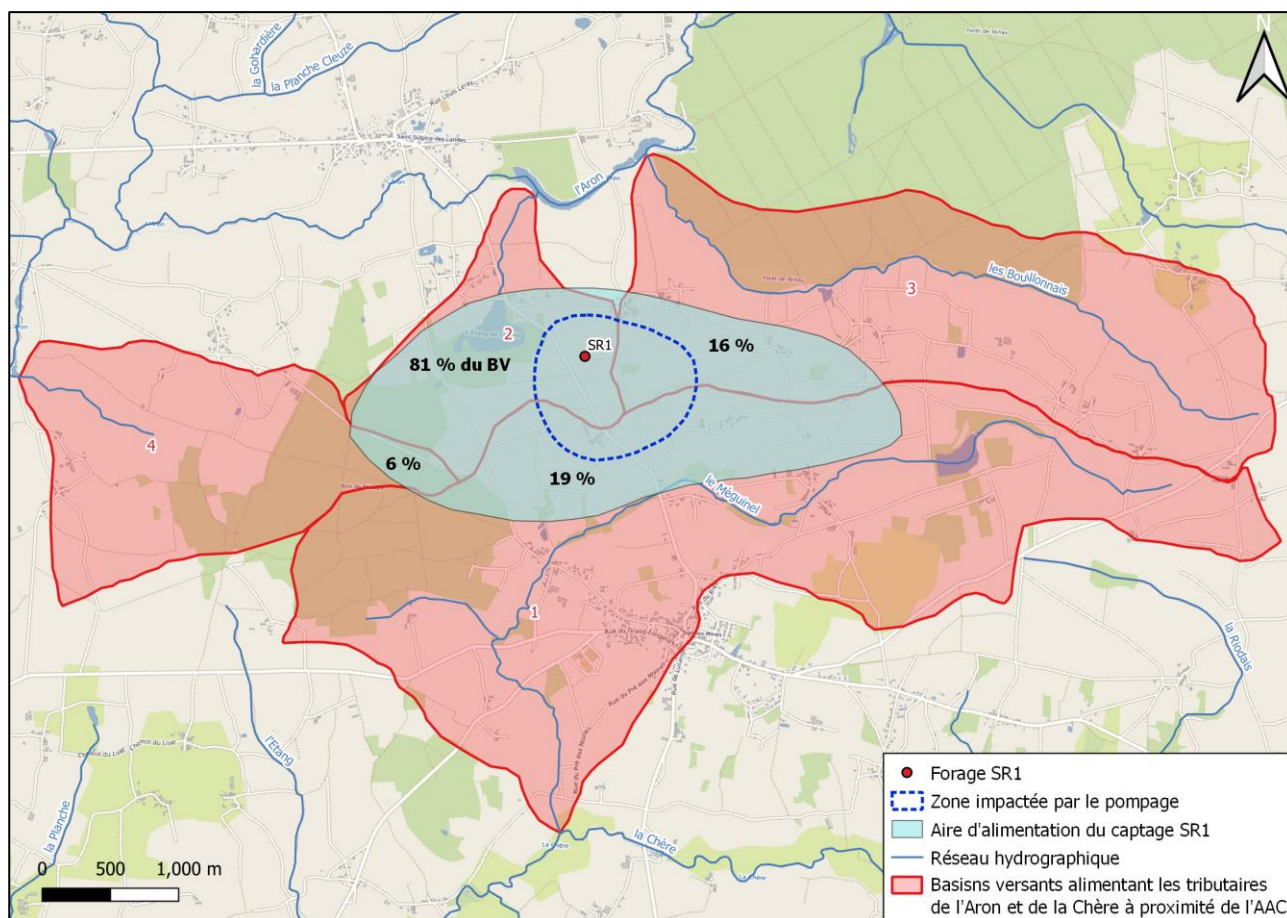


Figure 21 : Bassins versants alimentant les tributaires de l'Aron et de la Chère à proximité de l'aire d'alimentation – parts comprises dans l'aire d'alimentation de SR1

Pour compléter cette approche, les sources recensées d'après les cartes IGN et BRGM ont été figurées pour les 4 sous-bassins. Les sources répertoriées lors de la reconnaissance de terrain dans le cadre de l'étude ont aussi été ajoutées (Figure 22). Ces sources n'ayant pas été suivies pendant le pompage, il n'est pas possible de mesurer la présence et l'intensité d'un potentiel impact du pompage sur leurs débits.

L'intérêt de cette carte était de pouvoir visualiser la densité des sources pour chaque bassin versant et ainsi évaluer la proportion de source concernée par l'aire d'influence du pompage. D'après la bibliographie, peu de sources sont cartographiées. A ce jour, cet état des lieux semble incomplet et peut sous-estimer le nombre de source. Ce recensement doit être complété par un travail de reconnaissance sur le terrain pour définir quelles zones de chaque bassin versant seront les plus contributives au débit des cours d'eau en période d'étiage.

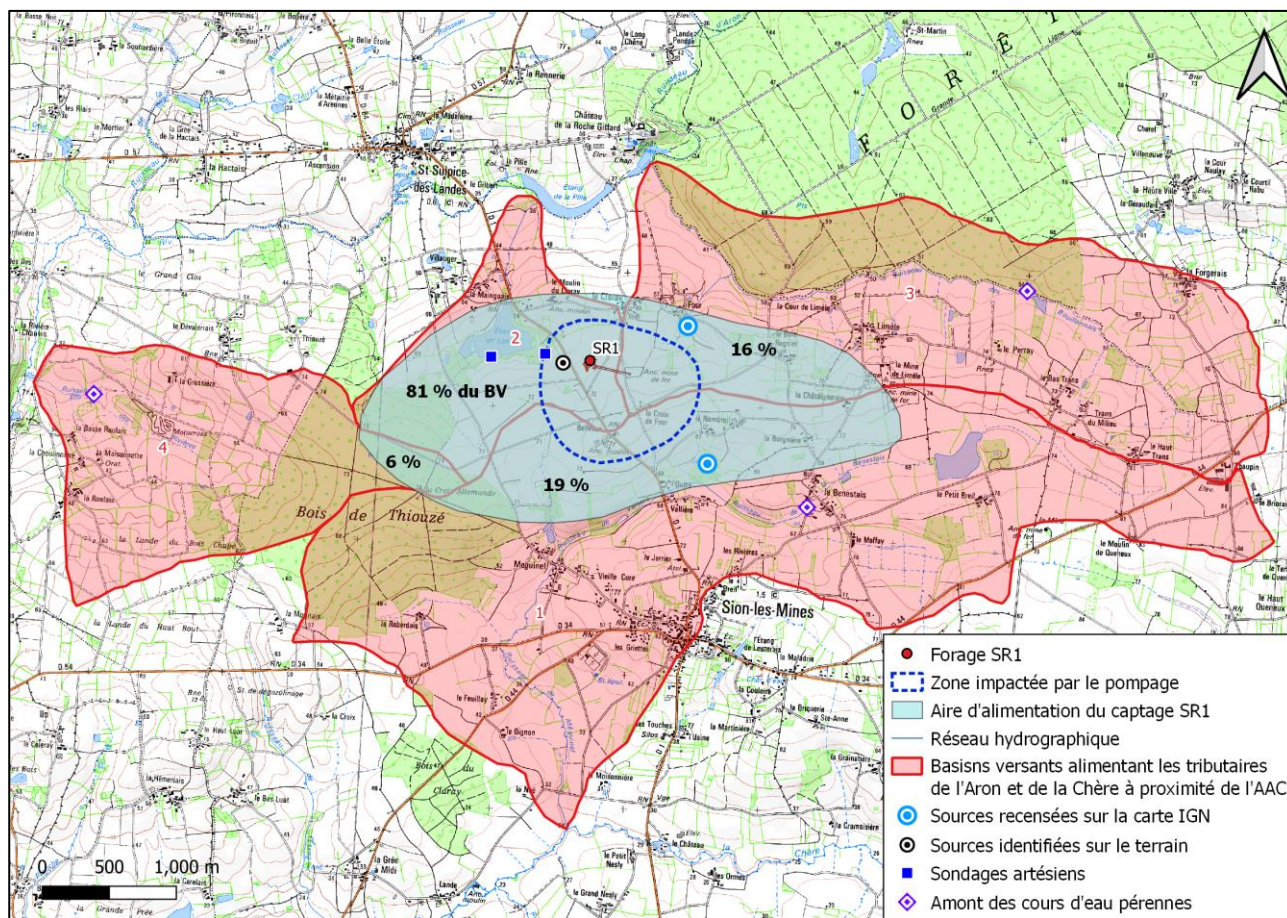


Figure 22 : Sources recensées sur la carte topographique de l'IGN et identifiées sur le terrain

5. CONCLUSION ET PRECONISATIONS

La nouvelle interprétation des données acquises pendant le pompage longue durée dans le forage SR1 à Sion Les Mines a permis d'affiner le schéma structural local de l'aquifère exploité. En accord avec le contexte géologie (bordure ouest de l'anticlinal de Chateaubriand) et les observations acquises pendant l'essai, la position des limites étanches a pu être précisée : une 1^{ère} limite est proposée à plus de 300 m au Nord du forage et une 2^{ème} limite à plus de 1 000 m à l'Ouest.

Face au changement climatique et aux tensions hydriques présumées sur les ressources en eau dans les décennies à venir, une évaluation de la disponibilité en eau de la nappe des grès a été traitée à partir des données climatiques mises à disposition par le DRIAS. Deux scénarii de projection climatique ont été regardés le scénario RCP 4.5 (scénario moyen) et le scénario RCP8.5 (scénario pessimiste). En se basant sur les données météorologiques projetées à l'horizon 2075 et à l'aide d'un calcul de bilan hydrique, l'évolution de la recharge de nappe montre que le futur pompage, envisagé à 60 m³/h, ne surexploitera pas durablement la ressource. On note cependant, pour le scénario le plus pessimiste, qu'au-delà de 2045 la tendance est à une baisse de cette disponibilité en raison de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle. D'autre part, sachant l'incertitude inhérente à ce type de calcul et aux hypothèses simplificatrices de certains paramètres, ces résultats doivent être exploités comme des ordres de grandeurs.

Enfin concernant les interactions entre le futur pompage et les écoulements superficiels, il a été mis en évidence le manque de données locales sur les 4 rivières qui pourraient être potentiellement impactées par le projet. Pour quantifier les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, il est recommandé de mettre en place *a minima* sur un cycle hydrologique et avant le démarrage du projet :

- Une reconnaissance de terrain des 4 bassins versants pour cartographier les sources (carte importante en période estivale où le débit de base des rivières est essentiellement alimenté par les écoulements souterrains et la contribution du ruissellement est minimal) ;
- Un suivi de l'étang de Limèle dont le bassin versant est particulièrement concerné par l'aire d'influence du pompage. Il est recommandé d'établir un bilan des entrées / sorties de l'étang pour affiner la contribution des sondages artésiens. Il est donc nécessaire d'évaluer :
 - Les apports de pluies par ruissellement au droit du bassin versant d'alimentation ;
 - Les apports des sources naturelles en cartographiant précisément leurs positions et cotes altimétriques puis en mesurant le débit d'écoulement sur un cycle hydrologique à fréquence mensuelle (voir bimensuelle en période estivale) ;
 - Les apports des sondages 2 artésiens dont l'emplacement est connu en mesurant le débit d'écoulement sur un cycle hydrologique à fréquence mensuelle (voir bimensuelle en période estivale) ;
 - Le débit de fuite à l'aval de l'étang comme une sortie additionnelle à l'évaporation directe. Pour permettre une interprétation plus aisée de flux entrant et sortant de l'étang (la cote du seuil de déversement devra alors être fixée).
- Au droit des rivières les plus exposées (le Méguinel et les Bouillonnais) par le futur pompage, il pourra être réalisé :
 - Des jaugeages différentiels en période d'étiage pour évaluer la contribution des eaux souterraines aux écoulements superficiels. La localisation de 3 stations de jaugeage pour chaque rivière est proposée sur la figure suivante. Celles-ci ont été positionnées en amont et en aval de l'aire d'alimentation estimée du futur pompage et aussi selon l'accessibilité supposée d'après la carte IGN.

-
- La carte topographique illustre le territoire de Sion-les-Mines et de Thiouzé. Elle met en évidence le captage SR1, marqué par un point rouge, et son aire d'alimentation, délimitée par une zone hachurée. Le réseau hydrographique est représenté par des lignes bleues, et les points de jaugeage prévus sont indiqués par des triangles orange. La carte inclut également une échelle (0 à 1 000 m) et une rose des vents.

Note finale

CARACTERISATION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE SUR LE SITE DE LA MINE DE CLARAY A SION-LES-MINES

6. REFERENCES

GIEC Pays de la Loire 1^{er} rapport – Juin 2022

BRGM ANAFORE : ANALyse multicritère des données de FORage les plus productifs de bretagnE - RP7028FR [Rapport]. - 2020.

Dewandel Benoît Aquifères de socle : schémas conceptuels, essais par pompage et régionalisation des propriétés hydrodynamiques [Rapport]. - [s.l.] : Université de Montpellier, 2019.

Wyns Robert et Dewandel Benoît Réservoirs non conventionnels en domaine de socle fracturé : Synthèse des connaissances du BRGM Première partie : les réseaux de fractures induits par l'altération supergène. RP-59196-FR [Rapport]. - [s.l.] : BRGM, 2011.

BRGM Précipitations efficaces moyennes annuelles en France (1969-1994) - R38975 - février 1996

Deruyck Bruno, Ehlig-Economides Christine et Jeffrey Joseph. 1992 Testing design and analysis. Oilfield and analysis [Rapport]. - 1992.



ANNEXE 1

CALCUL DU BILAN HYDRIQUE POUR LES PLUIES HISTORIQUES MENSUELLES DE JANVIER 2003 A DECEMBRE 2022

Un calcul des pluies efficaces a été réalisé à partir d'un bilan hydrique permettant ensuite de déduire la recharge directe vers la nappe.

Le bilan hydrique est une méthode simple qui détermine la part d'eau disponible pour le ruissellement et l'infiltration dans le sol. Cette méthode a été appliquée à l'échelle mensuelle sur la période 2003 à 2075.

Les paramètres considérés nécessaire au calcul de la recharge directe au droit de la zone d'étude sont :

Kc	0.6		<i>paturage, pas de culture spécifique</i>
RFUmax	175	mm	<i>180 et 300mm - BRGM/ 150 et 200mm - carte INRAE/ 100 et 200mm à Rennes</i>
Ruissellement	20	%	<i>% Pluie</i>
RFU antérieure	0		

Le calcul de la recharge à l'échelle mensuelle sur la période du 01/01/2003 au 31/12/2022 est présenté dans le tableau ci-après.

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETP_végétation (mm)	ETR (mm)	RU (mm)	Peff (mm)	Ruissel. (mm)	Recharge (mm)
janv.-03	63.900	11.2	6.7	6.7	57.2	0.0	0.0	0.0
févr.-03	54.500	11.5	6.9	6.9	47.6	0.0	0.0	0.0
mars-03	27.400	72.6	43.6	27.4	0.0	0.0	0.0	0.0
avr.-03	49.200	94.7	56.8	49.2	0.0	0.0	0.0	0.0
mai-03	56.800	112.5	67.5	56.8	0.0	0.0	0.0	0.0
juin-03	35.800	150.3	90.2	35.8	0.0	0.0	0.0	0.0
juil.-03	82.100	147.8	88.7	82.1	0.0	0.0	0.0	0.0
août-03	15.700	144.5	86.7	15.7	0.0	0.0	0.0	0.0
sept.-03	31.700	95.2	57.1	31.7	0.0	0.0	0.0	0.0
oct.-03	76.000	38.8	23.3	23.3	52.7	0.0	0.0	0.0
nov.-03	110.600	13.8	8.3	8.3	155.0	0.0	0.0	0.0
déc.-03	73.500	11.6	7.0	7.0	175.0	46.6	9.3	37.3
janv.-04	135.000	15.1	9.1	9.1	175.0	125.9	25.2	100.8
févr.-04	15.300	19.4	11.6	11.6	175.0	3.7	0.7	2.9
mars-04	42.400	60.7	36.4	36.4	175.0	6.0	1.2	4.8
avr.-04	49.300	86.9	52.1	52.1	172.2	0.0	0.0	0.0
mai-04	47.500	123.3	74.0	74.0	145.7	0.0	0.0	0.0
juin-04	26.600	151.3	90.8	90.8	81.5	0.0	0.0	0.0
juil.-04	30.400	134.0	80.4	80.4	31.5	0.0	0.0	0.0
août-04	77.100	116.9	70.1	70.1	38.5	0.0	0.0	0.0
sept.-04	46.000	87.6	52.6	52.6	31.9	0.0	0.0	0.0
oct.-04	98.800	42.4	25.4	25.4	105.3	0.0	0.0	0.0
nov.-04	35.500	13.4	8.0	8.0	132.7	0.0	0.0	0.0
déc.-04	40.900	6.6	4.0	4.0	169.7	0.0	0.0	0.0
janv.-05	48.600	10.0	6.0	6.0	175.0	37.3	7.5	29.8
févr.-05	17.700	15.0	9.0	9.0	175.0	8.7	1.7	7.0
mars-05	29.300	58.9	35.3	35.3	169.0	0.0	0.0	0.0
avr.-05	45.100	75.5	45.3	45.3	168.8	0.0	0.0	0.0
mai-05	49.100	116.9	70.1	70.1	147.7	0.0	0.0	0.0
juin-05	43.400	153.6	92.2	92.2	99.0	0.0	0.0	0.0
juil.-05	26.400	149.1	89.5	89.5	35.9	0.0	0.0	0.0
août-05	41.000	135.2	81.1	81.1	0.0	0.0	0.0	0.0
sept.-05	21.300	85.5	51.3	21.3	0.0	0.0	0.0	0.0
oct.-05	122.100	49.5	29.7	29.7	92.4	0.0	0.0	0.0
nov.-05	63.700	15.6	9.4	9.4	146.7	0.0	0.0	0.0
déc.-05	53.000	8.7	5.2	5.2	175.0	19.5	3.9	15.6
janv.-06	35.800	10.4	6.2	6.2	175.0	29.6	5.9	23.6
févr.-06	45.400	12.2	7.3	7.3	175.0	38.1	7.6	30.5
mars-06	124.800	55.4	33.2	33.2	175.0	91.6	18.3	73.2
avr.-06	30.400	81.6	49.0	49.0	156.4	0.0	0.0	0.0
mai-06	77.000	112.9	67.7	67.7	165.7	0.0	0.0	0.0
juin-06	10.900	147.4	88.4	88.4	88.2	0.0	0.0	0.0
juil.-06	36.700	170.1	102.1	102.1	22.8	0.0	0.0	0.0
août-06	49.300	122.8	73.7	73.7	0.0	0.0	0.0	0.0
sept.-06	94.000	83.2	49.9	49.9	44.1	0.0	0.0	0.0
oct.-06	117.200	41.2	24.7	24.7	136.6	0.0	0.0	0.0
nov.-06	90.400	14.6	8.8	8.8	175.0	43.2	8.6	34.6
déc.-06	145.200	9.1	5.5	5.5	175.0	139.7	27.9	111.8

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETP_végétation (mm)	ETR (mm)	RU (mm)	Peff (mm)	Ruissel. (mm)	Recharge (mm)
janv.-07	55.700	14.7	8.8	8.8	175.0	46.9	9.4	37.5
févr.-07	127.600	18.5	11.1	11.1	175.0	116.5	23.3	93.2
mars-07	79.900	61.9	37.1	37.1	175.0	42.8	8.6	34.2
avr.-07	50.100	98.6	59.2	59.2	165.9	0.0	0.0	0.0
mai-07	115.900	107.3	64.4	64.4	175.0	42.5	8.5	34.0
juin-07	77.400	120.2	72.1	72.1	175.0	5.3	1.1	4.2
juil.-07	90.400	123.8	74.3	74.3	175.0	16.1	3.2	12.9
août-07	55.500	103.5	62.1	62.1	168.4	0.0	0.0	0.0
sept.-07	18.200	74.9	44.9	44.9	141.7	0.0	0.0	0.0
oct.-07	29.600	36.0	21.6	21.6	149.7	0.0	0.0	0.0
nov.-07	39.000	13.4	8.0	8.0	175.0	5.6	1.1	4.5
déc.-07	67.100	14.5	8.7	8.7	175.0	58.4	11.7	46.7
janv.-08	135.900	13.9	8.3	8.3	175.0	127.6	25.5	102.0
févr.-08	70.000	15.2	9.1	9.1	175.0	60.9	12.2	48.7
mars-08	78.600	62.1	37.3	37.3	175.0	41.3	8.3	33.1
avr.-08	81.300	80.7	48.4	48.4	175.0	32.9	6.6	26.3
mai-08	116.000	113.9	68.3	68.3	175.0	47.7	9.5	38.1
juin-08	37.300	134.4	80.6	80.6	131.7	0.0	0.0	0.0
juil.-08	50.500	133.4	80.0	80.0	102.1	0.0	0.0	0.0
août-08	46.400	109.5	65.7	65.7	82.8	0.0	0.0	0.0
sept.-08	56.700	74.9	44.9	44.9	94.6	0.0	0.0	0.0
oct.-08	76.500	35.8	21.5	21.5	149.6	0.0	0.0	0.0
nov.-08	89.700	15.3	9.2	9.2	175.0	55.1	11.0	44.1
déc.-08	40.600	12.5	7.5	7.5	175.0	33.1	6.6	26.5
janv.-09	112.700	11.5	6.9	6.9	175.0	105.8	21.2	84.6
févr.-09	40.100	12.7	7.6	7.6	175.0	32.5	6.5	26.0
mars-09	45.300	63.1	37.9	37.9	175.0	7.4	1.5	6.0
avr.-09	87.200	73.4	44.0	44.0	175.0	43.2	8.6	34.5
mai-09	75.400	115.4	69.2	69.2	175.0	6.2	1.2	4.9
juin-09	63.100	135.7	81.4	81.4	156.7	0.0	0.0	0.0
juil.-09	58.300	129.6	77.8	77.8	137.2	0.0	0.0	0.0
août-09	12.900	123.5	74.1	74.1	76.0	0.0	0.0	0.0
sept.-09	20.900	89.5	53.7	53.7	43.2	0.0	0.0	0.0
oct.-09	46.700	41.0	24.6	24.6	65.3	0.0	0.0	0.0
nov.-09	149.200	19.5	11.7	11.7	175.0	27.8	5.6	22.3
déc.-09	153.700	6.7	4.0	4.0	175.0	149.7	29.9	119.7
janv.-10	57.000	8.8	5.3	5.3	175.0	51.7	10.3	41.4
févr.-10	96.400	12.4	7.4	7.4	175.0	89.0	17.8	71.2
mars-10	60.100	66.6	40.0	40.0	175.0	20.1	4.0	16.1
avr.-10	26.300	97.7	58.6	58.6	142.7	0.0	0.0	0.0
mai-10	27.900	115.9	69.5	69.5	101.0	0.0	0.0	0.0
juin-10	39.500	145.6	87.4	87.4	53.2	0.0	0.0	0.0
juil.-10	23.100	161.7	97.0	97.0	0.0	0.0	0.0	0.0
août-10	32.800	112.4	67.4	32.8	0.0	0.0	0.0	0.0
sept.-10	66.000	83.5	50.1	50.1	15.9	0.0	0.0	0.0
oct.-10	89.800	38.5	23.1	23.1	82.6	0.0	0.0	0.0
nov.-10	117.100	12.8	7.7	7.7	175.0	17.0	3.4	13.6
déc.-10	90.800	7.2	4.3	4.3	175.0	86.5	17.3	69.2

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETP_végétation (mm)	ETR (mm)	RU (mm)	Peff (mm)	Ruissel. (mm)	Recharge (mm)
janv.-11	62.000	10.8	6.5	6.5	175.0	55.5	11.1	44.4
févr.-11	60.800	15.3	9.2	9.2	175.0	51.6	10.3	41.3
mars-11	16.000	57.9	34.7	34.7	156.3	0.0	0.0	0.0
avr.-11	7.500	101.4	60.8	60.8	102.9	0.0	0.0	0.0
mai-11	28.400	132.7	79.6	79.6	51.7	0.0	0.0	0.0
juin-11	45.500	125.3	75.2	75.2	22.0	0.0	0.0	0.0
juil.-11	46.600	126.1	75.7	75.7	0.0	0.0	0.0	0.0
août-11	110.800	110.8	66.5	66.5	44.3	0.0	0.0	0.0
sept.-11	36.000	79.0	47.4	47.4	32.9	0.0	0.0	0.0
oct.-11	25.400	45.0	27.0	27.0	31.3	0.0	0.0	0.0
nov.-11	36.000	14.7	8.8	8.8	58.5	0.0	0.0	0.0
déc.-11	129.600	13.0	7.8	7.8	175.0	5.3	1.1	4.2
janv.-12	39.300	13.5	8.1	8.1	175.0	31.2	6.2	25.0
févr.-12	17.900	12.7	7.6	7.6	175.0	10.3	2.1	8.2
mars-12	28.700	68.5	41.1	41.1	162.6	0.0	0.0	0.0
avr.-12	128.700	79.7	47.8	47.8	175.0	68.5	13.7	54.8
mai-12	45.900	118.8	71.3	71.3	149.6	0.0	0.0	0.0
juin-12	84.800	117.8	70.7	70.7	163.7	0.0	0.0	0.0
juil.-12	61.900	128.2	76.9	76.9	148.7	0.0	0.0	0.0
août-12	21.000	129.9	77.9	77.9	91.8	0.0	0.0	0.0
sept.-12	90.000	76.7	46.0	46.0	135.8	0.0	0.0	0.0
oct.-12	153.900	33.4	20.0	20.0	175.0	94.6	18.9	75.7
nov.-12	65.100	18.7	11.2	11.2	175.0	53.9	10.8	43.1
déc.-12	170.200	15.8	9.5	9.5	175.0	160.7	32.1	128.6
janv.-13	93.900	9.1	5.5	5.5	175.0	88.4	17.7	70.8
févr.-13	62.300	14.5	8.7	8.7	175.0	53.6	10.7	42.9
mars-13	73.300	55.6	33.4	33.4	175.0	39.9	8.0	32.0
avr.-13	59.900	86.5	51.9	51.9	175.0	8.0	1.6	6.4
mai-13	81.500	102.2	61.3	61.3	175.0	20.2	4.0	16.1
juin-13	55.600	119.8	71.9	71.9	158.7	0.0	0.0	0.0
juil.-13	66.500	161.1	96.7	96.7	128.6	0.0	0.0	0.0
août-13	11.000	139.3	83.6	83.6	56.0	0.0	0.0	0.0
sept.-13	32.400	85.5	51.3	51.3	37.1	0.0	0.0	0.0
oct.-13	127.600	47.2	28.3	28.3	136.4	0.0	0.0	0.0
nov.-13	110.300	18.1	10.9	10.9	175.0	60.8	12.2	48.6
déc.-13	143.700	12.6	7.6	7.6	175.0	136.1	27.2	108.9
janv.-14	165.600	13.3	8.0	8.0	175.0	157.6	31.5	126.1
févr.-14	158.800	20.7	12.4	12.4	175.0	146.4	29.3	117.1
mars-14	40.500	66.2	39.7	39.7	175.0	0.8	0.2	0.6
avr.-14	52.400	85.2	51.1	51.1	175.0	1.3	0.3	1.0
mai-14	66.500	116.3	69.8	69.8	171.7	0.0	0.0	0.0
juin-14	54.900	147.6	88.6	88.6	138.1	0.0	0.0	0.0
juil.-14	57.800	141.2	84.7	84.7	111.1	0.0	0.0	0.0
août-14	114.000	105.6	63.4	63.4	161.8	0.0	0.0	0.0
sept.-14	18.000	85.1	51.1	51.1	128.7	0.0	0.0	0.0
oct.-14	59.800	42.2	25.3	25.3	163.2	0.0	0.0	0.0
nov.-14	117.000	15.1	9.1	9.1	175.0	96.1	19.2	76.9
déc.-14	95.700	10.5	6.3	6.3	175.0	89.4	17.9	71.5

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETP_végétation (mm)	ETR (mm)	RU (mm)	Peff (mm)	Ruissel. (mm)	Recharge (mm)
janv.-15	99.400	10.4	6.2	6.2	175.0	93.2	18.6	74.5
févr.-15	71.500	13.8	8.3	8.3	175.0	63.2	12.6	50.6
mars-15	30.400	57.0	34.2	34.2	171.2	0.0	0.0	0.0
avr.-15	49.900	92.4	55.4	55.4	165.7	0.0	0.0	0.0
mai-15	67.600	107.4	64.4	64.4	168.8	0.0	0.0	0.0
juin-15	27.000	150.4	90.2	90.2	105.6	0.0	0.0	0.0
juil.-15	41.100	143.3	86.0	86.0	60.7	0.0	0.0	0.0
août-15	95.600	118.3	71.0	71.0	85.3	0.0	0.0	0.0
sept.-15	66.400	80.7	48.4	48.4	103.3	0.0	0.0	0.0
oct.-15	32.300	41.3	24.8	24.8	110.8	0.0	0.0	0.0
nov.-15	68.500	18.8	11.3	11.3	168.0	0.0	0.0	0.0
déc.-15	54.000	13.6	8.2	8.2	175.0	38.9	7.8	31.1
janv.-16	125.800	14.1	8.5	8.5	175.0	117.3	23.5	93.9
févr.-16	75.700	17.2	10.3	10.3	175.0	65.4	13.1	52.3
mars-16	102.800	64.2	38.5	38.5	175.0	64.3	12.9	51.4
avr.-16	44.400	75.5	45.3	45.3	174.1	0.0	0.0	0.0
mai-16	35.500	112.5	67.5	67.5	142.1	0.0	0.0	0.0
juin-16	81.300	104.3	62.6	62.6	160.8	0.0	0.0	0.0
juil.-16	10.000	141.1	84.7	84.7	86.2	0.0	0.0	0.0
août-16	27.200	132.9	79.7	79.7	33.6	0.0	0.0	0.0
sept.-16	43.000	87.4	52.4	52.4	24.2	0.0	0.0	0.0
oct.-16	34.500	41.2	24.7	24.7	34.0	0.0	0.0	0.0
nov.-16	75.300	20.3	12.2	12.2	97.1	0.0	0.0	0.0
déc.-16	21.200	7.0	4.2	4.2	114.1	0.0	0.0	0.0
janv.-17	53.600	10.0	6.0	6.0	161.7	0.0	0.0	0.0
févr.-17	79.900	14.6	8.8	8.8	175.0	57.8	11.6	46.3
mars-17	41.400	68.1	40.9	40.9	175.0	0.5	0.1	0.4
avr.-17	26.900	86.0	51.6	51.6	150.3	0.0	0.0	0.0
mai-17	76.300	119.7	71.8	71.8	154.8	0.0	0.0	0.0
juin-17	99.100	151.3	90.8	90.8	163.1	0.0	0.0	0.0
juil.-17	43.700	138.4	83.0	83.0	123.8	0.0	0.0	0.0
août-17	51.100	117.8	70.7	70.7	104.2	0.0	0.0	0.0
sept.-17	82.700	62.1	37.3	37.3	149.6	0.0	0.0	0.0
oct.-17	32.400	34.6	20.8	20.8	161.3	0.0	0.0	0.0
nov.-17	58.600	11.5	6.9	6.9	175.0	38.0	7.6	30.4
déc.-17	95.200	9.9	5.9	5.9	175.0	89.3	17.9	71.4
janv.-18	97.100	11.1	6.7	6.7	175.0	90.4	18.1	72.4
févr.-18	47.300	12.5	7.5	7.5	175.0	39.8	8.0	31.8
mars-18	125.300	56.0	33.6	33.6	175.0	91.7	18.3	73.4
avr.-18	72.400	78.3	47.0	47.0	175.0	25.4	5.1	20.3
mai-18	29.800	124.7	74.8	74.8	130.0	0.0	0.0	0.0
juin-18	197.800	132.9	79.7	79.7	175.0	73.0	14.6	58.4
juil.-18	20.700	154.7	92.8	92.8	102.9	0.0	0.0	0.0
août-18	34.500	121.0	72.6	72.6	64.8	0.0	0.0	0.0
sept.-18	9.000	88.7	53.2	53.2	20.6	0.0	0.0	0.0
oct.-18	27.400	44.0	26.4	26.4	21.6	0.0	0.0	0.0
nov.-18	118.100	14.9	8.9	8.9	130.7	0.0	0.0	0.0
déc.-18	105.900	8.5	5.1	5.1	175.0	56.5	11.3	45.2

Date	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETP_végétation (mm)	ETR (mm)	RU (mm)	Peff (mm)	Ruissel. (mm)	Recharge (mm)
janv.-19	43.400	12.2	7.3	7.3	175.0	36.1	7.2	28.9
févr.-19	58.000	12.2	7.3	7.3	175.0	50.7	10.1	40.5
mars-19	61.400	68.0	40.8	40.8	175.0	20.6	4.1	16.5
avr.-19	52.400	82.5	49.5	49.5	175.0	2.9	0.6	2.3
mai-19	37.300	114.8	68.9	68.9	143.4	0.0	0.0	0.0
juin-19	70.300	130.6	78.4	78.4	135.4	0.0	0.0	0.0
juil.-19	19.200	170.5	102.3	102.3	52.3	0.0	0.0	0.0
août-19	59.800	121.8	73.1	73.1	39.0	0.0	0.0	0.0
sept.-19	55.300	86.8	52.1	52.1	42.2	0.0	0.0	0.0
oct.-19	141.100	38.1	22.9	22.9	160.4	0.0	0.0	0.0
nov.-19	183.300	13.0	7.8	7.8	175.0	160.9	32.2	128.8
déc.-19	106.000	11.2	6.7	6.7	175.0	99.3	19.9	79.4
janv.-20	136.400	10.5	6.3	6.3	175.0	130.1	26.0	104.1
févr.-20	98.300	20.4	12.2	12.2	175.0	86.1	17.2	68.8
mars-20	73.900	71.8	43.1	43.1	175.0	30.8	6.2	24.7
avr.-20	58.300	99.7	59.8	59.8	173.5	0.0	0.0	0.0
mai-20	23.900	150.5	90.3	90.3	107.1	0.0	0.0	0.0
juin-20	133.700	122.5	73.5	73.5	167.3	0.0	0.0	0.0
juil.-20	8.700	152.5	91.5	91.5	84.5	0.0	0.0	0.0
août-20	44.400	123.5	74.1	74.1	54.8	0.0	0.0	0.0
sept.-20	63.500	84.1	50.5	50.5	67.8	0.0	0.0	0.0
oct.-20	121.800	41.4	24.8	24.8	164.8	0.0	0.0	0.0
nov.-20	45.200	16.2	9.7	9.7	175.0	25.3	5.1	20.2
déc.-20	166.400	9.6	5.8	5.8	175.0	160.6	32.1	128.5
janv.-21	79.000	10.8	6.5	6.5	175.0	72.5	14.5	58.0
févr.-21	43.600	17.6	10.6	10.6	175.0	33.0	6.6	26.4
mars-21	19.800	65.8	39.5	39.5	155.3	0.0	0.0	0.0
avr.-21	29.200	93.8	56.3	56.3	128.2	0.0	0.0	0.0
mai-21	98.000	114.6	68.8	68.8	157.5	0.0	0.0	0.0
juin-21	101.800	116.8	70.1	70.1	175.0	14.2	2.8	11.4
juil.-21	70.200	132.9	79.7	79.7	165.5	0.0	0.0	0.0
août-21	37.400	106.1	63.7	63.7	139.2	0.0	0.0	0.0
sept.-21	29.800	86.9	52.1	52.1	116.9	0.0	0.0	0.0
oct.-21	119.900	38.7	23.2	23.2	175.0	38.5	7.7	30.8
nov.-21	38.600	11.9	7.1	7.1	175.0	31.5	6.3	25.2
déc.-21	79.200	7.3	4.4	4.4	175.0	74.8	15.0	59.9
janv.-22	44.600	8.6	5.2	5.2	175.0	39.4	7.9	31.6
févr.-22	27.500	13.4	8.0	8.0	175.0	19.5	3.9	15.6
mars-22	30.700	71.7	43.0	43.0	162.7	0.0	0.0	0.0
avr.-22	43.900	92.3	55.4	55.4	151.2	0.0	0.0	0.0
mai-22	45.800	131.4	78.8	78.8	118.2	0.0	0.0	0.0
juin-22	59.200	146.4	87.8	87.8	89.5	0.0	0.0	0.0
juil.-22	3.300	175.4	105.2	105.2	0.0	0.0	0.0	0.0
août-22	66.500	143.7	86.2	66.5	0.0	0.0	0.0	0.0
sept.-22	42.500	81.6	49.0	42.5	0.0	0.0	0.0	0.0
oct.-22	56.800	46.3	27.8	27.8	29.0	0.0	0.0	0.0
nov.-22	109.300	18.5	11.1	11.1	127.2	0.0	0.0	0.0
déc.-22	100.700	10.0	6.0	6.0	175.0	46.9	9.4	37.5