

Document public



Analyse complémentaire à l'état quantitatif des masses d'eau souterraine en RNAOE. Adaptation méthodologique des évaluations des volumes prélevables – Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-69710-FR
Septembre 2020

Analyse complémentaire à l'état quantitatif des masses d'eau souterraine en RNAOE. Adaptation méthodologique des évaluations des volumes prélevables - Phase 1

Rapport final

BRGM/RP-69710-FR

Septembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP18SDN026

Henriot A., Reboul K., Aunay B.

Vérificateur :

Nom : Yvan Caballero

Fonction : Hydrogéologue

Date : 21/08/2020

Signature :



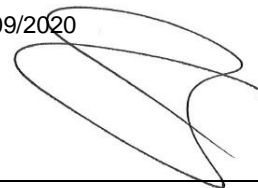
Approbateur :

Nom : Kévin Samyn

Fonction: Directeur régional

Date : 07/09/2020

Signature :



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



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : volume prélevables, piézométrie, conductivité électrique, traitement du signal, intrusion saline, La Réunion

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

Henriot A., Reboul K., Aunay B. (2020) – Analyse complémentaire à l'état quantitatif des masses d'eau souterraine en RNAOE. Adaptation méthodologique des évaluations des volumes prélevables – Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-69710-FR.

Synthèse

Le SDAGE 2016-2021 a mis en évidence un état quantitatif médiocre, associé à un risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) pour trois masses d'eau souterraine (MESO) de l'Ouest de La Réunion : FRLG112 (secteurs Etang Saint Paul et Plaine des Galets), FRLG110 (secteur de la Planèze Ouest) et FRLG109 (secteur de l'Etang Salé) et FRLG108 (secteur du Gol).

Afin de résorber les déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau, la DEAL et l'Office de l'eau souhaitent bénéficier de l'appui technique du BRGM afin de réaliser des études d'évaluation des volumes prélevables (EVP) sur trois masses d'eau : FRLG112, FRLG110 et FRLG109. La masse d'eau FRLG108 (secteur du Gol) a déjà bénéficié d'une EVP récemment (Lanini et Petit, 2015; Petit et al., 2013) et n'est pas traitée dans le présent projet.

En raison du contexte particulier du territoire de La Réunion (intrusion saline, hétérogénéité, forte transmissivité, absence de suivi historique sur plusieurs décades...) et suite à l'expérience menée sur la masse d'eau du Gol, il convient de bénéficier, dans un premier temps, d'un diagnostic permettant de mieux caractériser le contexte de connaissances spécifiques à chacune des trois masses d'eau restantes (qualité des données disponibles, interprétation préliminaire, mise en place de suivis spécifiques...). L'objectif de la première phase du présent projet se limite à la phase de « diagnostic hydrogéologique ».

Concrètement, cette phase de diagnostic consiste à :

- (i) compiler des données disponibles sur les trois masses d'eau ;
- (ii) interpréter des données en vue de la réalisation de tests méthodologiques ;
- (iii) proposer des suivis ou l'acquisition de données complémentaires pour la réalisation d'une EVP.

En terme de résultats, l'analyse des données disponibles pour les masses d'eau FRLG109, 110 et 112 a montré qu'il existe de nombreuses données, mais dont l'intégration et l'interprétation nécessite une rigueur sous forme d'approche numérique relativement poussée. Le format de stockage et d'échange des données est un point critique, notamment pour les données de prélèvements. Une proposition d'amélioration consisterait à établir un référentiel de stockage homogène pour les différentes entités qui produisent ces données de prélèvements.

Par ailleurs, l'analyse des données de piézométrie et de conductivité a été conduite de manière à s'affranchir des nombreuses influences enregistrées par les signaux de piézométrie et de conductivité. Toutefois, le signal recharge (c'est-à-dire la part de la pluie qui contribue à alimenter l'aquifère, donc qui engendre une hausse de la charge hydraulique) est quelquefois trop masqué par d'autres facteurs pour bénéficier de résultats pertinents. En effet, bien qu'il soit possible d'identifier les périodes de 'recharge' (hausse de piézométrie conjuguée à une baisse de conductivité), de nombreux faux positifs¹ restent présents dans l'analyse. En conséquence, les signaux sont sous l'influence de la variation du niveau océanique. Il apparaît donc nécessaire de mettre en œuvre des solutions pour filtrer l'influence du niveau océanique afin de ne travailler que

¹ périodes de baisse de conductivité identifiées pour lesquelles aucun signal de pluie ne semble à associer

sur le signal de la recharge, avant toute approche d'adaptation méthodologique d'évaluation d'EVP.

Sur la base du traitement numérique des données, la réponse de la piézométrie à la recharge apparaît souvent comme bimodale, c'est-à-dire qu'une réaction rapide est observée, suivi d'une ou plusieurs réponses, différées dans le temps. Ce mécanisme est interprété comme une réponse rapide en terme de pression (la pression augmente quasiment immédiatement dans l'aquifère en réponse à la pluie) suivie d'une réponse en terme de flux (le flux de recharge parvient à l'aquifère de manière décalée dans le temps).

Il ressort par ailleurs de la présente analyse le besoin de continuer et de consolider le suivi des eaux souterraines. A ce titre, de nombreux ouvrages disposent de périodes de suivi trop courtes au regard des phénomènes qu'il est pertinent d'étudier. Il est en effet nécessaire que soient disponibles, sur une même période, les 3 principaux paramètres à traiter : piézométrie, conductivité et prélèvement. Ce point est une contrainte forte. Par ailleurs, afin de décrire la recharge, il est nécessaire de disposer d'une profondeur d'observation suffisante, c'est-à-dire d'un nombre significatif d'observations. Le plus souvent, le nombre d'épisodes de 'recharge' est évalué à une dizaine, au cours de 2 à 3 année hydrologiques disponibles. De manière générale, il convient donc de poursuivre le suivi en piézométrie et conductivité, pour atteindre 4 à 5 années de suivi au minimum.

Enfin, il apparaît que l'influence océanique sur les signaux de piézométrie et de conductivité électrique rend complexe le traitement numérique des données. Afin de répondre à cette problématique, un projet en cours de réalisation « *Déconvolution, filtrage et analyse des variations piézométriques et de conductivité des aquifères côtiers de La Réunion* » cofinancé par l'Office de l'eau et le BRGM, vise à traiter cette problématique afin de bénéficier de chroniques exploitables pour concevoir une adaptation méthodologique d'évaluation d'EVP.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIF	9
1.3. PROGRAMME TECHNIQUE	10
2. Synthèse des études sur les potentialités des ressources en eau souterraine	11
2.1. ETANG SAINT-PAUL – PLAINE DES GALETS (FRLG112)	14
2.2. LITTORAL PLANEZE OUEST (FRLG110)	17
2.3. LITTORAL ETANG-SALE (FRLG 109)	17
2.4. BILAN DES DONNEES DISPONIBLES	17
3. Synthèse des données numériques disponibles	19
3.1. PISTES D'AMELIORATIONS SUR L'INTEGRATION DES DONNEES	19
3.2. SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES PAR PARAMETRE	22
3.2.1. Pluie	22
3.2.2. Piézométrie	23
3.2.3. Conductivité électrique (CE)	24
3.2.4. Volumes prélevés	25
3.3. SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES PAR MASSES D'EAU	27
4. Analyse et exploration des signaux enregistrés	30
4.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE ET METHODOLOGIE ADOPTEE	30
4.2. ANALYSE EN FREQUENCE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	31
4.3. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE PLUIE, PIEZOMETRIE ET CONDUCTIVITE	35
4.3.1. Etapes préliminaires, traitements mis en œuvre	35
4.3.2. Analyse de la relation de la pluie à la piézométrie et la conductivité électrique	39
4.4. SYNTHESE PAR PIEZOMETRE	48
5. Conclusions et perspectives	53
6. Bibliographie	55

Liste des illustrations

Illustration 1 : masse d'eau souterraines (contours orange) et communes (contours noir) de La Réunion.....	13
Illustration 2 : Répartition des débits potentiellement mobilisables par unités hydrologiques (Frissant et al., 2006)	15
Illustration 3 : Schéma du bilan global annuel sur le cycle hydrogéologique de 2001 (Antea, 2009)	16
Illustration 4 – Exemple d'une structure de tableur	20
Illustration 5 – Données disponibles pour la masse d'eau FRLG110	27
Illustration 6 - Données disponibles pour la masse d'eau FRLG109	28
Illustration 7 - Données disponibles pour la masse d'eau FRLG112	29
Illustration 8 - Conductivité électrique (en bleu, graphe du haut) et tendance sur la période (en jaune), et périodogrammes associés (3 graphes du bas).	32
Illustration 9 - Conductivité électrique (en bleu, graphe du haut) et tendance sur la période (en jaune), et périodogrammes associés (3 graphes du bas)	33
Illustration 10 - Autocorrélogramme calculé sur le signal piézométrique pour le forage 12283X0066/P3.	35
Illustration 11 - Identification des périodes de hausses piézométrique, piézomètre 12283X0066/P3.	36
Illustration 12 - Distribution des valeurs de hausses piézométrique pour chaque période identifiée, et répartition au cours des mois de l'année (mois 1 = janvier, mois 12 = décembre).	37
Illustration 13 - Distribution des valeurs des hausses	38
Illustration 14 - Corrélogramme croisée pluie/piézométrie	39
Illustration 15 - Matrice de corrélation entre différents signaux de pluie cumulée (x) et valeurs du décalage temporel de l'effet de la recharge (y) pour les périodes de hausses identifiées au sein de la chronique.....	41
Illustration 16 - Relation entre valeur de la hausse de piézométrie (en m) et signal de pluie (pluie cumulée + décalage) en mm.	42
Illustration 17 - Identification automatique des périodes de baisse de la conductivité électrique pour le piézomètre 12262X0162	43
Illustration 18 - Distribution au cours de l'année des périodes de baisses de conductivité.	44
Illustration 19 - Exemple de corrélogramme croisé Pluie / Conductivité électrique/ pour le piézomètre 12262X0162.....	45
Illustration 20 - Recherche d'un lien entre période de baisse de la conductivité électrique (graphe du bas) et période de hausse de la piézométrie (graphe du haut).	46
Illustration 21 - Matrice de corrélation entre périodes de hausse du signal piézométrique et période de baisse du signal de conductivité.	46
Illustration 22 - Exemple de relation permettant de relier la baisse du signal de conductivité électrique à la hausse du signal piézométrique.	Erreur ! Signet non défini.
Illustration 23 – Combinaison des différentes informations disponibles sur un point.....	47

Liste des annexes

Annexe 1 – Détails des illustrations par piézomètre	57
---	----

Lexique

DCE	Directive-cadre sur l'eau (2000/60/CE),
EVP	Evaluation des volumes prélevables
MESO	Masse d'eau souterraine
RNAOE	Risquent de non atteinte des objectifs environnementaux
SDAGE	Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Le SDAGE 2016-2021 (Comité de Bassin de La Réunion, 2015) a mis en évidence un état quantitatif médiocre, associé à un risque de non atteinte des objectifs environnementaux (RNAOE) pour quatre masses d'eau souterraine (MESO) de l'Ouest de La Réunion :

- FRLG112 - Formations volcaniques et volcano-sédimentaires du littoral de l'étang Saint Paul – Plaine des Galets ;
- FRLG110 - Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de la Planète Ouest ;
- FRLG109 - Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de l'Etang Salé ;
- FRLG108 - Formations volcaniques et volcano-sédimentaires littorales du Gol.

Afin de résorber les déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau, il est nécessaire de réaliser des études d'évaluation des volumes prélevables (EVP) sur ces masses d'eau.

Pour mémoire, la masse d'eau FRLG108 (secteur du Gol) a déjà bénéficié d'une EVP récemment (Lanini et Petit, 2015; Petit et al., 2013) et cette masse d'eau souterraine n'est pas spécifiquement abordée dans le cadre du présent rapport.

La circulaire du 30 juin 2008 fixe le cadre des études d'EVP. Toutefois, en raison du contexte particulier du territoire de La Réunion (intrusion saline, hétérogénéité, forte transmissivité, absence de suivi historique sur plusieurs décades...) et suite à l'expérience menée sur la masse d'eau du Gol, il convient de réaliser, dans un premier temps, un diagnostic permettant de mieux caractériser le contexte de connaissances spécifiques à chacune des trois masses d'eau restantes (qualité des données disponibles, interprétation préliminaire, mise en place de suivis spécifiques...).

Cette phase de diagnostic devra permettre :

- i. de formuler des recommandations sur le choix de la méthode la plus apte à pouvoir évaluer les volumes prélevables, sur la base des recommandations de l'étude EVP de la masse d'eau FRLG108 notamment, ou
- ii. de formuler des recommandations de suivis complémentaires, dans le but de rendre possible *in-fine* l'EVP.

1.2. OBJECTIF

L'objectif de la phase 1 du présent projet se limite à la phase de « diagnostic hydrogéologique ». Il s'agit principalement des étapes de recueil, compilation, interprétation des données, et de tests méthodologiques préliminaires, préalables à la phase d'évaluation des volumes prélevables (EVP). La phase d'EVP en elle-même devant faire l'objet d'une approche ultérieure, précédée ou non d'une phase d'acquisition de données complémentaires.

1.3. PROGRAMME TECHNIQUE

Pour la réalisation du « diagnostic hydrogéologique » et pour le contexte particulier des masses d'eau FRLG112, FRLG110, FRLG109 citées précédemment, le programme technique suivant a été déterminé :

1. Compilation des données disponibles sur les trois masses d'eau FRLG112, FRLG110 et FRLG109 (prélèvements, recharge, suivi piézométrique, conductivité électrique, modèles numériques, données de géométries et d'architecture des aquifères, études antérieures...);
2. Interprétation des données et réalisation de tests méthodologiques afin de déterminer la meilleure approche pour réaliser les EVP en fonction des spécificités de La Réunion ;
3. Proposition de suivi ou d'acquisition de données complémentaires pour la réalisation d'une EVP ultérieurement ou, dans le cas où les données disponibles seraient suffisantes, détermination des volumes prélevables.

Nota bene

Les volumes prélevables sont les volumes d'eau qui peuvent être prélevés annuellement dans les masses d'eau sans entraîner une baisse interannuelle des niveaux d'eau, ni une dégradation de sa qualité (y compris par la menace d'intrusion saline, prépondérante sur la côte ouest de La Réunion). Les volumes prélevables doivent également permettre d'assurer le bon état des eaux superficielles qu'elles alimentent, le cas échéant.

La détermination des volumes prélevables est un élément de départ pour la mise en place d'une gestion concertée et équilibrée de la ressource.

Les EVP fournissent les éléments qui doivent permettre un ajustement des autorisations de prélèvement d'eau dans les nappes concernées, en conformité avec les ressources disponibles et sans perturber le fonctionnement des milieux naturels. Les résultats de ces études ne sont pas indiscutables. D'une manière générale, il est nécessaire de tenir compte des incertitudes sur les données recueillies, en fonction des méthodologies adoptées, ainsi que sur les résultats des calculs réalisés.

2. Synthèse des études sur les potentialités des ressources en eau souterraine

Afin de bénéficier de l'expérience acquise dans le passé, une synthèse des études sur les potentialités des ressources en eau souterraine est présentée ci-dessous. De façon générale, ces potentialités ont été définies à partir de modélisations numériques ou de bilans hydrologiques.

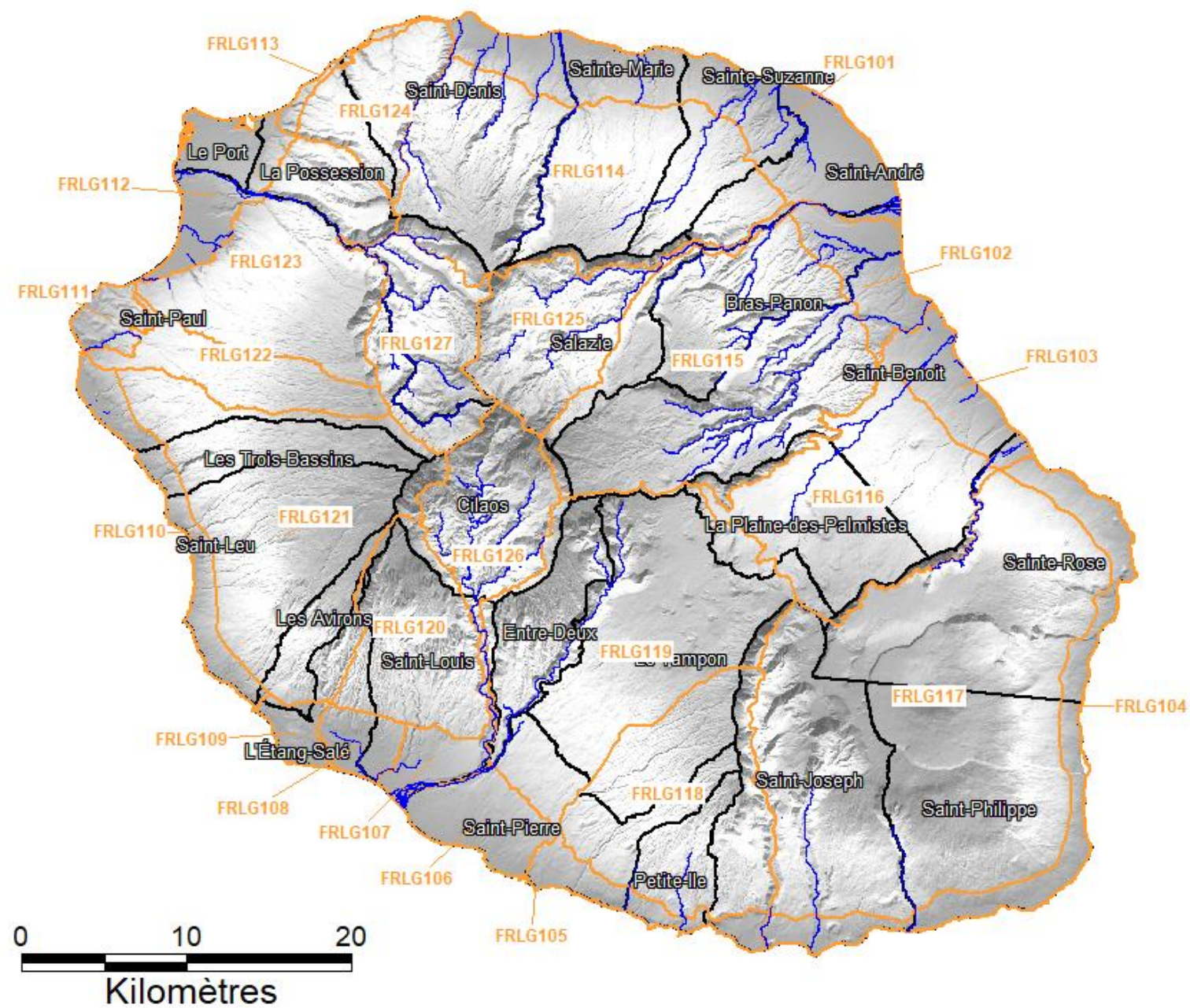
Des modélisations numériques hydrogéologiques sont réalisées depuis une trentaine d'années sur La Réunion. Ces simulations cherchent à répondre à des questions variées : exploiter la ressource à un débit défini, quantifier la recharge des aquifères, établir des modèles de quantification de la ressource en eau souterraine disponible, établir des bilans hydrogéologiques ou encore estimer les volumes potentiellement prélevables (cas se rapprochant le plus de cette présente étude). Deux études de synthèses recensent l'ensemble de ces simulations depuis 1985 (Frissant et al., 2006; Gombert, 2000). Les simulations concernant les masses d'eau étudiées dans le présent rapport sont recensées dans le tableau 1 (les références ne sont pas reprises en bibliographie).

Les simulations les plus récentes prennent en compte des entités hydrogéologiques différentes des masses d'eau définies dans cette présente étude. En effet, le rôle des zones amont en termes d'alimentation des MESO du littoral est non négligeable. Par ailleurs, les volumes potentiellement prélevables sont souvent déduits d'un calcul de bilan hydrogéologique (recharge / prélèvements / drainage), qui ne tient pas compte des phénomènes d'intrusion saline.

Les masses d'eau souterraines (MESO) sont cartographiées sur l'illustration 1.

Projet	Référence bibliographique	Secteur	Type de Simulation
Cône alluvial de la Rivière des Galets	Antea 2009 Rapport_54084_B_PHASE_1	Plaine des Galets	Modèle mathématique Marthe Régime permanent
	Antea 2010a Rapport_55794_E_PHASE_2		
	Antea 2010b Rapport_60176_B_PHASE_3		
Modélisation mathématique du système aquifère de la Plaine des Galets	Office de l'eau 1996 - ETUDE_00055 Jérôme TOARD - Stagiaire ENSG. Rapport de stage de 3 ^e année Juin 1996	Plaine des Galets	Modélisation mathématique à partir du modèle ARMINES (1995) Régime permanent et transitoire
Modélisation de la nappe de la Plaine des Galets	Office de l'eau 1998 ETUDE_00060	Plaine des Galets	Modélisation mathématique Régime transitoire
Modèle mathématique de l'aquifère inférieur de la plaine des galets	Office de l'eau 1999 ETUDE_00510	Plaine des Galets (nappe inférieure)	Modélisation mathématique Régime permanent et transitoire
Redéfinition d'un modèle de nappe multicouche pour la prévision des niveaux piézométriques d'étiage des aquifères de la Plaine des Galets	Office de l'eau 2002 ETUDE_00524 Rapport de stage de fin de troisième année de l'ENSG option Aménagement des Eaux effectué à l'ORE par Guillaume BOISSET en mai-août 2002	Plaine des Galets	Modélisation sous GMS/Modflow en Approche «True Layer» préliminaire au calage au pas de temps mensuel de décembre 1991 à novembre 1997 (6 années hydrologiques) Régime permanent
Modélisation hydrogéologique du système aquifère de la Plaine des Galets	Office de l'eau 2012 - ETUDE_00678	Plaine des Galets	Reprise du modèle d'Antea 2010 FEFLOW-FM3 Régime permanent
Etude de faisabilité hydrogéologique d'un pôle d'activités nautiques sur la commune de Saint-Paul	BRGM 2016 - BRGM/RC-65867-FR	Planèze Ouest	Modélisation numérique : MARTHE Régime permanent et transitoire
Méthode de quantification spatiale des ressources en eau souterraine de l'île de La Réunion (MQS)	BRGM 2011 - BRGM/RP-59682-FR	Toute l'île	Modèle hydrologique global pluie-débit (GARDENIA) Régime transitoire – Bilan mensuels ou annuels
Adéquation des ressources et des besoins en eau sur le secteur de Trois-Bassins	BRGM 2012 (Trois-Bassins) BRGM/RP-60331-FR	Planèze Ouest	Modèle hydrologique global pluie-débit (GARDENIA) Régime transitoire – Bilan annuels
Bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche	Hydroexpert P. Gombert. 2000. RP0H018	Toute l'île	
Modélisation des aquifères de la Plaine des Galets	BRGM 1985 M. Daesslé et M. Delorme 85REU24	Plaine des Galets	Modèle mathématique en régime permanent et transitoire
Etude des ressources en eau souterraine de la région de St-Paul. Construction et exploitation du modèle mathématique.	ARMINES 1992 P. Combes et E. Ledoux LHM/RD/92/09	St-Paul	Modèle mathématique Régime transitoire
Actualisation du modèle mathématique du système aquifère de la Plaine des Galets	ARMINES 1995 P. Combes et E. Ledoux LHM/RD/92/09	Rivière des Galets	Modèle mathématique NEWSAM Régime transitoire
Synthèse des ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables à La Réunion	BRGM, 2006 N. FRISSANT, L. BARTHELEMY, V. PETIT BRGM/RP-55035-FR 06EAUF08	St Leu/Trois bassin	Modélisations hydrodynamiques maillées (SOGREAH gde ravine/BRGM)
		Etang St-Paul	Modélisation hydrodynamique spatialisée (ARMINES, 1993)
		Nappe des Galets (rive droite)	BRL / ARMINES et BRGM estimation

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des simulations numériques effectuées depuis 1985



Code EU	Nom de la masse d'eau	Surface (km2)
FRLG101	Formations volcaniques du littoral Nord	111.7
FRLG102	Formations volcaniques du littoral de Bras Panon - Saint Benoit	36.6
FRLG103	Formations volcaniques du littoral Sainte Anne - Sainte Rose	35.3
FRLG104	Formations volcaniques du littoral de La Fournaise	69
FRLG105	Formations volcaniques du littoral de Petite Île – Saint Pierre	24.5
FRLG106	Formations volcaniques et volcano-sédimentaires du littoral de Pierrefonds – St-Pierre	35.1
FRLG107	Formations volcaniques et volcano-sédimentaires littorales des Cocos	19.2
FRLG108	Formations volcaniques et volcano-sédimentaires littorales du Gol	17
FRLG109	Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de l'Etang Salé	12.4
FRLG110	Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de la Planèze Ouest	36.7
FRLG111	Formations aquitardes des brèches de Saint Gilles	14.4
FRLG112	Formations volca. et volcano-sédimentaires du littoral de l'étang St-Paul – Pl. des Galets	43.6
FRLG113	Formations volcaniques du littoral de La Montagne	6.1
FRLG114	Formations volcaniques de la Roche Ecrite – Plaine des Fougères	212.7
FRLG115	Formations volcaniques de Bébou-Bélouve - Plaine des Lianes	216.8
FRLG116	Formations volcaniques de la Plaine des Palmistes	135.9
FRLG117	Formations volcaniques du Massif sommital de La Fournaise	389.7
FRLG118	Formations volcaniques de la Plaine des Grègues – Le Tampon	132.2
FRLG119	Formations volcaniques de la Plaine des Cafres - Le Dimitille	227.1
FRLG120	Formations volcaniques des Makes	80.3
FRLG121	Formations volcaniques de la Planèze du Maïdo – Grand Bénare	202.2
FRLG122	Formations volcaniques et volcano-sédimentaires de la Ravine Saint Gilles	47.9
FRLG123	Formations volcaniques de Bois de Nèfles – Dos d'Âne	128.3
FRLG125	Formations volcano-détritiques du Cirque de Salazie	77.8
FRLG126	Formations volcano-détritiques du Cirque de Cilaos	69.4
FRLG127	Formations volcano-détritiques du Cirque de Mafate	69.9
FRLG124	Formations volcaniques sommitales de La Montagne	50.9

Illustration 1 : masse d'eau souterraines (contours orange) et communes (contours noir) de La Réunion.

2.1. ETANG SAINT-PAUL – PLAINE DES GALETS (FRLG112)

En 1985, le BRGM, grâce à des simulations numériques, conclut qu'un prélèvement de 9 000 m³/j (\approx 400 m³/h) génèrerait des rabattements importants, ce qui induit une certaine prudence en raison d'un possible impact sur les autres entités connectées. D'après le modèle, le pompage de 3 000 m³/j dans le secteur de la zone industrielle du Port est acceptable, mais il reste important de surveiller la salinité.

ARMINES en 1992 utilise un modèle mathématique afin de simuler une augmentation d'exploitation. Grâce aux conclusions du modèle, il est proposé d'augmenter le débit de pompage (170 l/s au moment de l'étude) à 470 l/s.

En 1995, Armines actualise le modèle. Les simulations effectuées conduisent à préciser de ne pas dépasser les préconisations de gestion de l'exploitation de 1992 pour ne pas provoquer un abaissement de la piézométrie dans la nappe inférieure et, de ce fait, augmenter le risque d'une intrusion saline. L'étude conclut qu'il n'est pas possible de calculer le débit maximal mobilisable à cause des incertitudes liées à la complexité du système hydrogéologique.

En 2006, le BRGM estime les volumes potentiellement mobilisables (Illustration 2) à 14.8 Mm³/an pour l'étang / baie de Saint-Paul et à 13.2 Mm³/an pour la Nappe des Galets (rive droite).

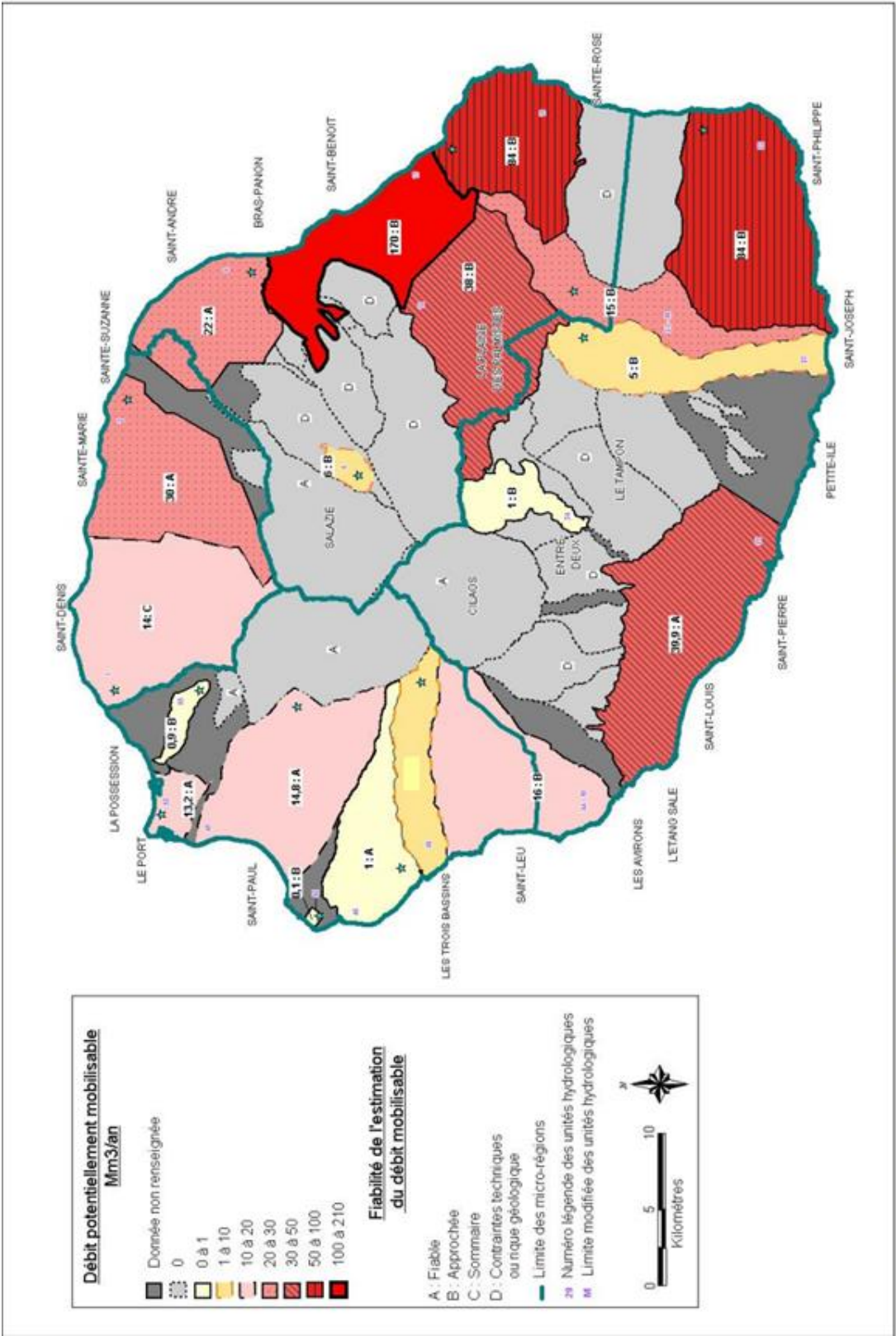


Illustration 11 - Répartition des débits potentiellement mobilisables par unités hydrologiques

Illustration 2 : Répartition des débits potentiellement mobilisables par unités hydrologiques (Frissant et al., 2006)

Les simulations d'Antea en 2009-2010, ne permettent pas d'estimer des volumes prélevables mais concluent sur le fait qu'englober les nappes amonts est primordial pour prendre en compte la forte dépendance de la recharge aux précipitations des bassins amonts de la Plaine des Galets. Cela permet d'améliorer la compréhension du bilan hydrogéologique de ce secteur et d'affiner le modèle conceptuel (Illustration 3).

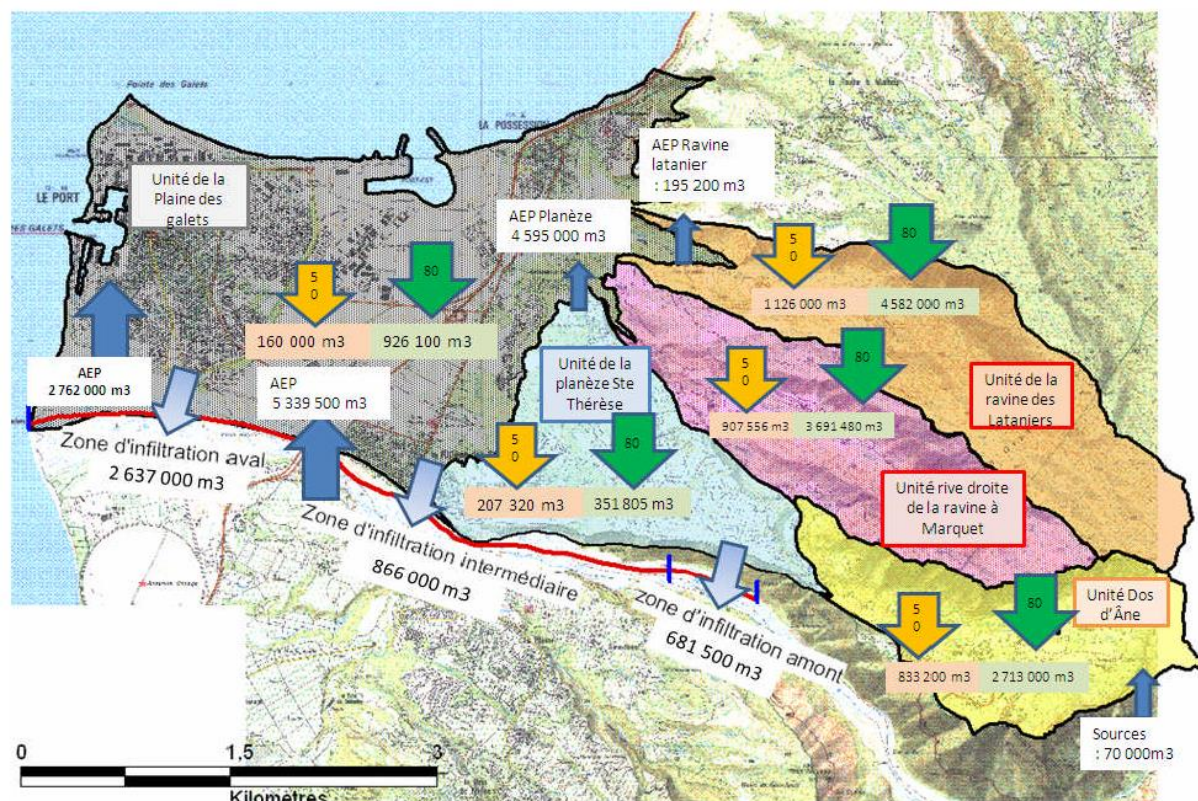


Illustration 3 : Schéma du bilan global annuel sur le cycle hydrogéologique de 2001 (Antea, 2009)

L'Office de l'eau entre 1996 et 2012 propose des modélisations du système multicouche de la Plaine des Galets perfectionnées au fil des études. En 1996, les conclusions du modèle (repris d'ARMINES) sont que le volume d'exploitation peut être augmenté. En 2012, le modèle (repris du modèle précédent d'Antea) permet de préciser le modèle conceptuel de la plaine alluviale de la Rivière des Galets. Il permet également de simuler l'impact de certains scénarii comme par exemple une augmentation des prélèvements ou une diminution de la recharge et ainsi être capable d'alerter le public des conséquences encourues. Il n'est, cependant, pas fourni d'estimation quantitative des volumes prélevables.

Le BRGM en 2011 propose une simulation permettant de construire des cartes de la recharge pouvant constituer une première approche de l'estimation de la ressource disponible au sein de l'aquifère Saint-Paul (environ 200 mm/an en moyenne) et celui du Port/La Possession (environ 390 mm/an en moyenne). Il est important de préciser que cette démarche reste limitée par le nombre restreint d'informations disponibles et du peu de modélisations longues durée effectuées.

2.2. LITTORAL PLANEZE OUEST (FRLG110)

En 2006, le BRGM estime les volumes potentiellement mobilisables du secteur Saint-Leu/Trois-Bassins à 16 Mm³/an.

En 2012, le BRGM souligne que l'estimation des volumes prélevables sur la base d'un bilan hydrique de la masse d'eau de Trois-Bassins n'est pas réaliste, car les prélèvements annuels sont largement inférieurs à la recharge annuelle alors que la masse d'eau est localement en déséquilibre quantitatif.

Le BRGM en 2011 propose une simulation permettant de construire des cartes de la recharge pouvant constituer une première approche de la ressource disponible au sein de l'aquifère de Trois-Bassins (environ 180 mm/an en moyenne) et celui de Saint-Leu/Les Avirons (environ 210 mm/an en moyenne). Il est important de préciser que cette démarche reste limitée par le nombre restreint d'informations disponibles et du peu de modélisations longues durée effectuées.

De manière plus locale, le BRGM en 2016, conclut sur le fait que la baisse des charges hydrauliques dans la nappe des sables (secteur Ermitage) va induire une remontée de l'interface eau douce / eau salée, aussi bien dans la nappe des sables que dans la nappe des basaltes. Les simulations sont cependant centrées sur le creusement d'un bassin localisé et non sur les prélèvements de volumes d'eau.

2.3. LITTORAL ETANG-SALE (FRLG 109)

Le BRGM en 2011 propose une simulation permettant de construire des cartes de la recharge pouvant constituer une première approche de la ressource disponible au sein de l'aquifère Etang-Salé/Saint-Louis (environ 220 mm/an en moyenne). Il est important de préciser que cette démarche reste limitée par le nombre restreint d'informations disponibles et du peu de modélisations longues durée effectuées.

Les volume potentiellement mobilisables (Frissant et al., 2006) pour ce secteur ne sont pas précisément défini pour en raison d'un regroupement avec l'aquifère du Gol.

2.4. BILAN DES DONNEES DISPONIBLES

La Plaine des Galets est, à ce jour, la mieux caractérisée du point de vue quantitatif en raison d'une part, de l'existence de plusieurs générations de modèles régulièrement améliorées et, d'autre part, de données de suivi des prélèvements et de la piézométrie.

Bien que des volumes potentiellement mobilisables² aient pu être calculés sur une grande partie du territoire à un pas de temps annuel (Frissant et al., 2006), la plupart des simulations numériques réalisées ces 30 dernières années ne permettent pas de bénéficier d'une estimation des volumes prélevables à un pas de temps mensuel. Ce pas de temps est en effet nécessaire afin d'intégrer les variations intra-annuelles de stock de la ressource en eau souterraine (Bredehoeft, 2002; Petit et al., 2012).

² La méthodologie de calcul des volumes potentiellement mobilisables (Frissant et al., 2006) ne correspond pas à la méthodologie actuelle de calcul des volumes prélevables (Arnaud, 2016)

A l'issue de ces diverses modélisations mises en œuvre, les bilans hydrogéologiques, les schémas conceptuels des aquifères et les délimitations des bassins versants contribuant à la recharge ont pu être précisés. Il est mis en évidence la nécessité de bénéficier de jeux de données plus importants au niveau spatial et temporel afin de déterminer la variation temporelle du stock des aquifères.

3. Synthèse des données numériques disponibles

Les données disponibles lors de la réalisation de la présente étude sont recensées ci-après. Elles ont été collectées auprès de différents producteurs : DEAL (prélèvements), Office de l'eau (piézométrie, conductivité électrique), Météo-France (pluviométrie), ou sont issus de travaux précédents (Charlier et Aunay, 2017; Dumont et Aunay, 2017).

Il convient de noter que ces données sont acquises et stockées à des formats différents, ce qui ne facilite pas leur intégration et leur traitement numérique (voir § 3.1, ci-dessous). Pour les différents secteurs d'étude, les données disponibles sont majoritairement de bonne qualité, mais il existe des différences importantes dans les pas de temps d'acquisition ainsi que dans la continuité des signaux mesurés (présence de lacunes) entre les différents ouvrages.

Ces différences contribuent à rendre inhomogène le jeu de données, et complique de fait les traitements et les possibilités de calcul d'EVP.

3.1. PISTES D'AMELIORATIONS SUR L'INTEGRATION DES DONNEES

Il convient de noter que la stratégie adoptée dans le cadre du présent projet consiste en l'automatisation du traitement des données afin d'optimiser les temps de traitement des différents tests à réaliser. Cette stratégie repose sur un formatage rigoureux des données.

La tâche de collecte ayant été réalisée au préalable auprès des différents organismes producteurs, une étape d'intégration des données a été réalisée au cours du projet. Cette étape s'est avérée chronophage pour les raisons suivantes :

- format de stockage complexe, notamment au regard de la volumétrie de la donnée ;
- absence/manque de table de référence permettant de lier les différents objets entre eux par des identifiants partagés par tous les producteurs de données.

A cela s'ajoute le problème supplémentaire de la gestion de l'information de la conductivité électrique disponible suivant différentes profondeurs à un même point. Ce point peut être aisé à prendre en charge, mais doit être considéré comme une particularité supplémentaire dans le cadre du traitement de ces données.

Concernant les données de prélèvement en eau souterraine, le format des données qui a été mis à disposition ne permet pas la prise en charge automatique.

En effet, les données sont stockées dans différentes feuilles de tableur (lisibles grâce à Excel par exemple, Illustration 4), chaque feuille correspondant à un secteur géographique. Au sein de chaque feuille, les données sont stockées sous forme de plages de données au sein d'une même feuille de calcul. Les informations descriptives sont stockées à différents endroits : nom de l'onglet (secteur concerné), en-tête de tableau (nom du point d'eau), sans qu'il soit possible d'identifier ces informations facilement. Différentes informations sont rapportées dans ce tableau, mais elles ne sont pas toujours libellées de façon identiques (volumes prélevés, vol. prelev., somme débits, etc.) ni dans le même ordre. Enfin, aucun code BSS n'est associé à ces points de prélèvements. Il est préférable d'utiliser en pareil cas le code ouvrage national (code BSS), ou à défaut, de pouvoir y faire référence à l'aide d'une table d'appariement. Cette table n'existant pas, elle a été créée pour les points concernés par l'étude. Le fichier communiqué semble donc remplir des fonctions de suivi, par ouvrages probablement, mais reste difficile à exploiter en tant que stockage de données.

BRGM/RP-69710-FR – Rapport final

Une amélioration possible de ce point serait de travailler à l'élaboration d'un référentiel de stockage et de partage de la donnée. Il conviendrait pour cela de séparer l'information en trois volets distincts :

- De futurs travaux d'exploitation et de valorisation des volumes prélevés s'appuieraient alors sur les objets contenus dans les volets 1 et 2.

En ce qui concerne le volet 1 - informations relatives à l'identification et aux caractéristiques des ouvrages, les points suivants pourraient y être référencés :

Identification et caractéristiques de l'ouvrage
Code national BSS (ancien et/ou nouveau)
Nom de l'ouvrage en BSS
Identifiant office de l'eau
Identifiant DEAL
Nom de l'ouvrage (DEAL)
Secteur
Masse d'eau
X,Y
Nom de l'exploitant

Tableau 2 - Informations nécessaire à l'identification est aux caractéristiques des ouvrages

D'autres informations peuvent par la suite venir enrichir ce référentiel (numéro d'autorisation d'exploitation, actif/inactif...).

En ce qui concerne le volet 2 - stockage de la donnée, le format préconisé est un stockage « à plat », c'est-à-dire où l'ensemble des enregistrements sont stockés dans un même fichier, dont les attributs sont fixes. Chaque ligne du fichier correspond à une observation (une mesure). Chaque nouvelle observation s'ajoute à la fin du fichier (Tableau 3). Ce fichier sert au stockage, et non à une quelconque valorisation.

Stockage de la donnée
Code BSS
Date (JJ/MM/AAAA HH:MM:SS)
Paramètre (débit moyen journalier, débit max. journalier, cumul journalier, cumul mensuel,...)
Valeur
Paramètre de qualité (mesure manuelle, capteur, estimation,...)

Tableau 3 – Stockage de la donnée « à plat »

Dans l'idéal, il convient par ailleurs de rédiger, dans un fichier à part, une description (ou définition) des paramètres attendus dans ce fichier de stockage. A titre d'exemple, le débit moyen mensuel pourrait y être décrit comme la moyenne arithmétique des débits journaliers par mois calendaire, affecté au jour numéro 15 du mois concerné.

Si différents producteurs doivent contribuer à l'alimentation de ce fichier, une trame d'échange pourrait être élaborée, de sorte à clarifier ce qui est demandé au producteur et faciliter ainsi l'intégration des données collectées au fichier de stockage.

Enfin, en ce qui concerne le volet 3 - suivi et valorisation de la donnée, le type de fichier et les formats seront fonction de l'usage et de l'utilisateur. Le principe est que ces outils de valorisation (tableaux de suivis, graphiques par ouvrage, par secteur, par masse d'eau) consomment les

données depuis le fichier de stockage mais ne viennent pas les modifier. Les valorisations et l'exploitation des données étant fonction de l'usage, il n'y a pas lieu de fournir des préconisations sur le format de ces outils.

3.2. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES PAR PARAMÈTRE

La synthèse des données disponibles est fournie sous forme de tableaux pour chacun des paramètres, ainsi que sous forme d'illustrations au paragraphe suivant, permettant de montrer les différents niveaux d'informations disponibles en fonction des paramètres et des masses d'eau.

3.2.1. Pluie

Station Météo-France	Nombre de mesure	Début de la chronique (date min)	Fin de la chronique (date max)
avirons_cirad	2434	01/01/2005	31/08/2011
bdn_saint_paul	2434	01/01/2005	31/08/2011
colimaon_cirad	9282	01/01/1991	30/05/2016
ermitage_cirad	1339	01/01/2008	31/08/2011
le_guillaume	1461	01/01/2011	31/12/2014
le_port	2434	01/01/2005	31/08/2011
piton_maido	1461	01/01/2011	31/12/2014
piton_saitn_leu	1606	01/01/2005	31/12/2009
plateau_caillou	1584	01/05/2007	31/08/2011
pointe_trois_bassins	2069	01/01/2008	31/12/2014
saint_paul_cirad	2434	01/01/2005	31/08/2011
tan_rouge	3600	01/01/2005	11/03/2019

Tableau 4 – Données de pluie utilisées

3.2.2. Piézométrie

Masse d'eau souterraine	Code BSS	Nom	Indice	Nombre de mesures	Début de la chronique (date min)	Fin de la chronique (date max)	Piezométrie médiane (m NGR)	Piezométrie minimum (m NGR)	Piezométrie maximum (m NGR)
FRLG112 Formations volcaniques et volcano-sédimentaires du littoral de l'étang Saint Paul – Plaine des Galets	12262X0053	PIEZOMETRE S2 PLAINE DES GALETS	S2	10216	15/11/2001	20/02/2019	2.49	2.17	3.17
	12262X0056	FORAGE P3-A (NIVEAU SUPERIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	P3	1607	26/09/2013	20/02/2019	2.89	2.06	3.65
	12262X0064	FORAGE FT5 (NAPPE INFERIEURE) PLAINE DES GALETS	FT-5A	6164	11/08/2010	20/02/2019	1.66	1.46	2.09
	12262X0157	PROJET CENTRALE A CHARBON EDF BAIE POSSESSION	F3	1860	12/11/2014	12/07/2017	0.66	0.47	1
	12262X0162	PROJET CENTRALE THERMIQUE EDF BAIE DE SAINT-PAUL	S3	6146	08/07/2010	20/02/2019	1.5	0.97	3.11
	12262X0170	PIEZOMETRE P13 CAMBAIE	P13	16998	25/09/1989	12/11/2018	2.83	2.42	3.73
	12262X0172	PIEZOMETRE P1-2 (NAPPE SUPERIEURE) CHEMIN DES ANGLAIS	P1-2A	14612	13/12/1997	26/12/2018	42.03	37.92	42.88
	12262X0174	PIEZOMETRE CHEMIN DES ANGLAIS (NAPPE INFERIEURE)	P3	13570	22/07/1998	11/11/2018	2.36	2.08	3.01
	12262X0176	CHEMIN DE LA TOUR DES ROCHES	SP1	17998	01/06/1992	26/12/2018	2.5713	2.1385	3.38
	12262X0186	FORAGE P18 CAMBAIE	F	3674	17/11/1994	12/07/2017	2.3	1.96	2.8
	12262X0337	PIEZOMETRE P2 SACRE COEUR	P2-B	14540	24/08/1990	11/11/2018	5.44	4.52	5.95
	12262X0524	FORAGE P3-B (NIVEAU MOYEN), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	P3_B	1954	26/09/2013	20/02/2019	2.6	2.19	3
	12262X0525	FORAGE P3-C (NIVEAU INFERIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	P3_C	1503	26/09/2013	20/02/2019	3.26	3.04	3.53
FRLG110 Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de la Planète Ouest	12265X0027	PIEZOMETRE HERMITAGE	P6	9892	18/04/1991	02/01/2019	0.75	0.44	1.3
	12266X0038	SONDAGE RECONNAISSANCE SALINE LES BAS TROU D'EAU	S2	1072	14/12/2011	19/11/2017	0.64	0.38	0.94
	12266X0080	PIEZOMETRE P5 GRANDE RAVINE	P5	4316	12/08/1989	19/11/2017	0.51	0.13	2.49
	12266X0081	PIEZOMETRE RAVINE FOND JARDIN	P9	3408	21/02/2008	12/11/2018	0.52	0.28	0.8
FRLG109 Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de l'Etang Salé	12283X0066	PIEZOMETRE 3 ETANG SALE - P3 PONT NEUF FORET DOMANIALE	P3	3014	01/09/2010	18/02/2019	1.92	1.74	2.22

Tableau 5 – Données de piézométrie disponibles

3.2.3. Conductivité électrique (CE)

Masse d'eau souterraine	Code BSS	Indice	Nom	Code Office de l'eau	Profondeur de la mesure (m)	Nombre de mesures	Début de la chronique (date min)	Fin de la chronique (date max)	CE médiane (µS/cm)	CE minimum (µS/cm)	CE maximum (µS/cm)
FRLG112 Formations volcaniques et volcano-sédimentaires du littoral de l'étang Saint Paul – Plaine des Galets	12262X0056/P3	P3	FORAGE P3-A (NIVEAU SUPERIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	12056-A	19	177548	06/11/2014	21/02/2019	578	480	637
					25	176509	06/11/2014	21/02/2019	565	478	626
	12262X0524/P3_B	P3_B	FORAGE P3-B (NIVEAU MOYEN), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	12056-B	64	156946	06/11/2014	21/02/2019	302	84	355
					69	165388	14/05/2015	21/02/2019	346	51	381
	12262X0525/P3_C	P3_C	FORAGE P3-C (NIVEAU INFÉRIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	12056-C	128	120252	28/04/2015	21/02/2019	41 016	248	49 464
	12262X0064/FT-5A	FT-5A	FORAGE FT5 (NAPPE INFÉRIEURE) PLAINE DES GALETS	12064	2	174682	05/11/2014	21/02/2019	1 511	3	1 812
	12262X0157/F3	F3	PROJET CENTRALE A CHARBON EDF BAIE POSSESSION	12157	1	184548	05/11/2014	21/02/2019	1 818	3	12 652
	12262X0162/S3	S3	PROJET CENTRALE THERMIQUE EDF BAIE DE SAINT-PAUL	12162	11	186792	17/11/2014	21/02/2019	420	320	586
	12262X0170/P13	P13	PIEZOMETRE P13 CAMBAIE	12170	42	176904	06/11/2014	14/02/2019	429	314	465
					62	114975	06/11/2014	14/02/2019	2 830	1 548	3 474
	12262X0174/P3	P3	PIEZOMETRE CHEMIN DES ANGLAIS (NAPPE INFÉRIEURE)	12174	64	155703	30/10/2014	21/02/2019	12 204	0	12 824
	12262X0186/F	F	FORAGE P18 CAMBAIE	12186-2	103	184823	13/11/2014	21/02/2019	13 340	12 869	13 921
					84	168356	13/11/2014	21/02/2019	8 521	6 504	10 551
					94	142979	13/11/2014	19/02/2018	9 944	8 438	16 109
	12262X0339/P21-B	P21-B	PIEZOMETRE P21-B	12188-2	135	168093	17/11/2014	14/02/2019	36 972	33 708	38 404
					65	185935	17/11/2014	14/02/2019	15 953	15 543	16 281
					95	185914	17/11/2014	14/02/2019	22 384	21 444	40 104
FRLG110 Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de la Planète Ouest	12265X0022/ZBS-5	ZBS-5	LOT_DAYOT	15022	2	156560	29/07/2013	23/02/2017	3 760	2 084	6 548
	12265X0027/P6	P6	PIEZOMETRE HERMITAGE	15027	28	241095	18/07/2012	14/02/2019	4 548	56	19 072
					34	222635	01/08/2012	14/02/2019	41 144	4	48 170
	BSS003TACW	-	PIEZOMETRE_AVAL_FRH5	15800	14	22789	25/07/2017	14/03/2018	2 928	0	3 868
		-			19	27384	25/07/2017	14/03/2018	18 900	12 088	19 372
	12266X0038/S2	S2	SONDAGE RECONNAISSANCE SALINE LES BAS TROU D'EAU	16038	0	69789	09/01/2017	13/11/2018	792	664	1 108
	12266X0041/PIEZO	PIEZO	PETITE_RAVINE	16041	1	325697	13/06/2012	17/05/2018	1 582	1 520	1 731
	12266X0080/P5	P5	PIEZOMETRE P5 GRANDE RAVINE	16080	0	60259	14/01/2012	23/06/2015	654	83	713
					14	30945	04/12/2014	19/08/2015	634	66	744
					29	8876	04/12/2014	16/02/2015	50 548	32	51 328
					2	86744	22/11/2016	14/02/2019	661	3	717
	12282X0045/F8	F8	FORAGE STELLA - LE PORTAIL	32045	4	206414	16/09/2013	20/08/2018	3 096	2 870	3 192
FRLG109 Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de l'Etang Salé	12283X0066/P3	P3	PIEZOMETRE 3 ETANG SALE - P3 PONT NEUF FORET DOMANIALE	33066	20	148900	09/07/2015	19/02/2019	6 415	4 844	7 061
					35	89611	09/07/2015	20/08/2018	14 268	11 956	15 072
					3	49852	29/07/2013	28/04/2015	5 284	4 244	5 432

Tableau 6 – Données de conductivité électriques disponibles

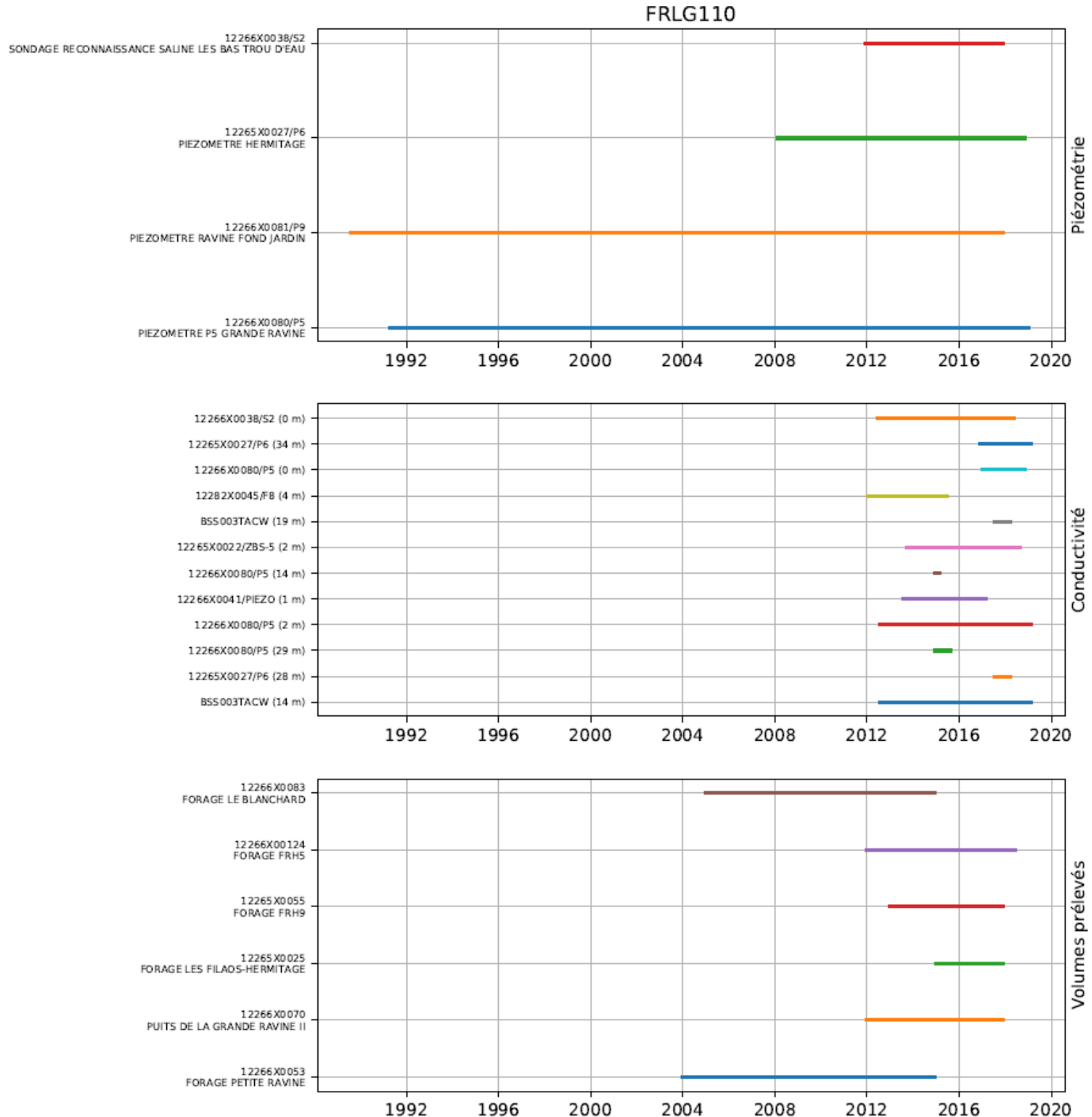
3.2.4. Volumes prélevés

Code BSS	Nom	Nom DEAL	NOM ZRE (voir rapport BRGM/RP- 65956-FR)	Nombre de données	Nombre de données manquantes	Début de la chronique (date min)	Fin de la chronique (date max)	Volume prélevé minimum (m³/mois)	Volume prélevé maximum (m³/mois)	Volume prélevé médian (m³/mois)
12263X0087	FORAGE BALTHAZAR	forage_balthazar		36	0	01/01/2015	01/12/2017	73 259	94 098	83 593
12262X0068	FORAGE DES TROIS CHEMINS F5	forage_trois_chemins_f5_f5bis_f5ter	TROIS_CHEMINS	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	219 471	121 217
12262X0089	FORAGE DES TROIS CHEMINS F5 BIS	forage_trois_chemins_f5_f5bis_f5ter		36	0	01/01/2015	01/12/2017	79 291	164 304	113 302
12262X0166	FORAGE DES TROIS CHEMINS F5 TER	forage_trois_chemins_f5_f5bis_f5ter		36	0	01/01/2015	01/12/2017	79 291	164 304	113 302
12262X0087	FORAGE F1 MOUNIEN	FORAGE F1	F1_MOUNIEN	216	0	01/01/2000	01/12/2017	0	142 632	30 320
12262X0135	FORAGE F2	FORAGE F2	F2	216	0	01/01/2000	01/12/2017	0	76 046	34 417
12262X0136	FORAGE F3	FORAGE F3	F3	216	24	01/01/2000	01/12/2017	0	168 061	122 300
12262X0048	FORAGE F4	FORAGE F4	F4	216	24	01/01/2000	01/12/2017	0	136 515	69 653
12262X0168	FORAGE F5	FPRAGE F5	F5	216	24	01/01/2000	01/12/2017	0	98 580	64 936
12262X0175	FORAGE F6	FORAGE F6	F6	200	24	01/05/2001	01/12/2017	0	101 870	67 924
12262X0417	FORAGE FR1	FORAGE FR1	FR1	45	24	01/04/2014	01/12/2017	16 168	59 901	47 636
12263X0174	FORAGE FR2	forage_fr2		36	0	01/01/2015	01/12/2017	0	44 239	31 513
12262X0271	FORAGE FRH13	forage_frh13	FRH13	120	0	01/01/2008	01/12/2017	0	63 929	21 314
12262X0272	FORAGE FRH15	forage_frh15	FRH15	120	0	01/01/2008	01/12/2017	0	166 481	66 981
12262X0269	FORAGE FRH16	forage_frh_16	FRH16	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	169 085	102 190
12266X00124	FORAGE FRH5		FRH5	120	0	01/01/2005	01/12/2014	0	130 775	615
12265X0055	FORAGE FRH9		FRH9	132	0	01/01/2004	01/12/2014	0	5 920	5
12263X0040	FORAGE LATANIER	forage_lataniers		36	0	01/01/2015	01/12/2017	2 874	18 097	10 434
12266X0083	FORAGE LE BLANCHARD	forage_le_blanchard	P30_BLANCHARD	72	0	01/01/2012	01/06/2018	4 064	27 919	14 239
12283X0060	FORAGE LE BRULE	Forage Le Brûlé	P1_BRULE	60	0	01/01/2013	01/12/2017	0	16 557	7 366
12265X0025	FORAGE LES FILAOS-HERMITAGE	forage_f1_hermitage_r27_filaos		36	0	01/01/2015	01/12/2017	6 357	45 242	31 946
12262X0189	FORAGE OMEGA	forage_omega	OMEGA	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	124 345	52
12262X0070	FORAGE P11	FORAGE P11	P11	216	24	01/01/2000	01/12/2017	22 737	194 666	130 200
12262X0069	FORAGE P11 BIS	FORAGE P11bis		36	24	01/01/2015	01/12/2017	61 244	77 535	67 718
12283X0058	FORAGE PACIFIC 1	FORAGE PACIFIC 1 et 2 (alternance)		36	1	01/01/2015	01/12/2017	3 744	115 969	83 796
12283X0059	FORAGE PACIFIC 2	FORAGE PACIFIC 1 et 2 (alternance)		36	1	01/01/2015	01/12/2017	3 744	115 969	83 796
12266X0053	FORAGE PETITE RAVINE	forage_petite_ravine	P9_PETITE_RAV	60	0	01/01/2013	01/12/2017	5 830	47 751	19 472
12262X0267	FORAGE RENAUD	forage_renaud	RENAUD	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	229 610	123 935
12262X0146	PUITS BOUILLON	puits_bouillon	BOUILLON	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	300 570	204 530
12266X0070	PUITS DE LA GRANDE RAVINE II	forage_grande_ravine_2	P1_GDE_RAV	144	0	01/01/2012	01/12/2017	69 060	166 314	107 595
12266X0040	PUITS GRANDE FONTAINE	puits_de_la_grande_fontaine_r16	PUITS_GDE_FONTAINE	168	0	01/01/2004	01/12/2017	0	150 087	61 118
12263X0050	PUITS SAMY	puits_samy		36	0	01/01/2015	01/12/2017	127 928	191 150	166 957

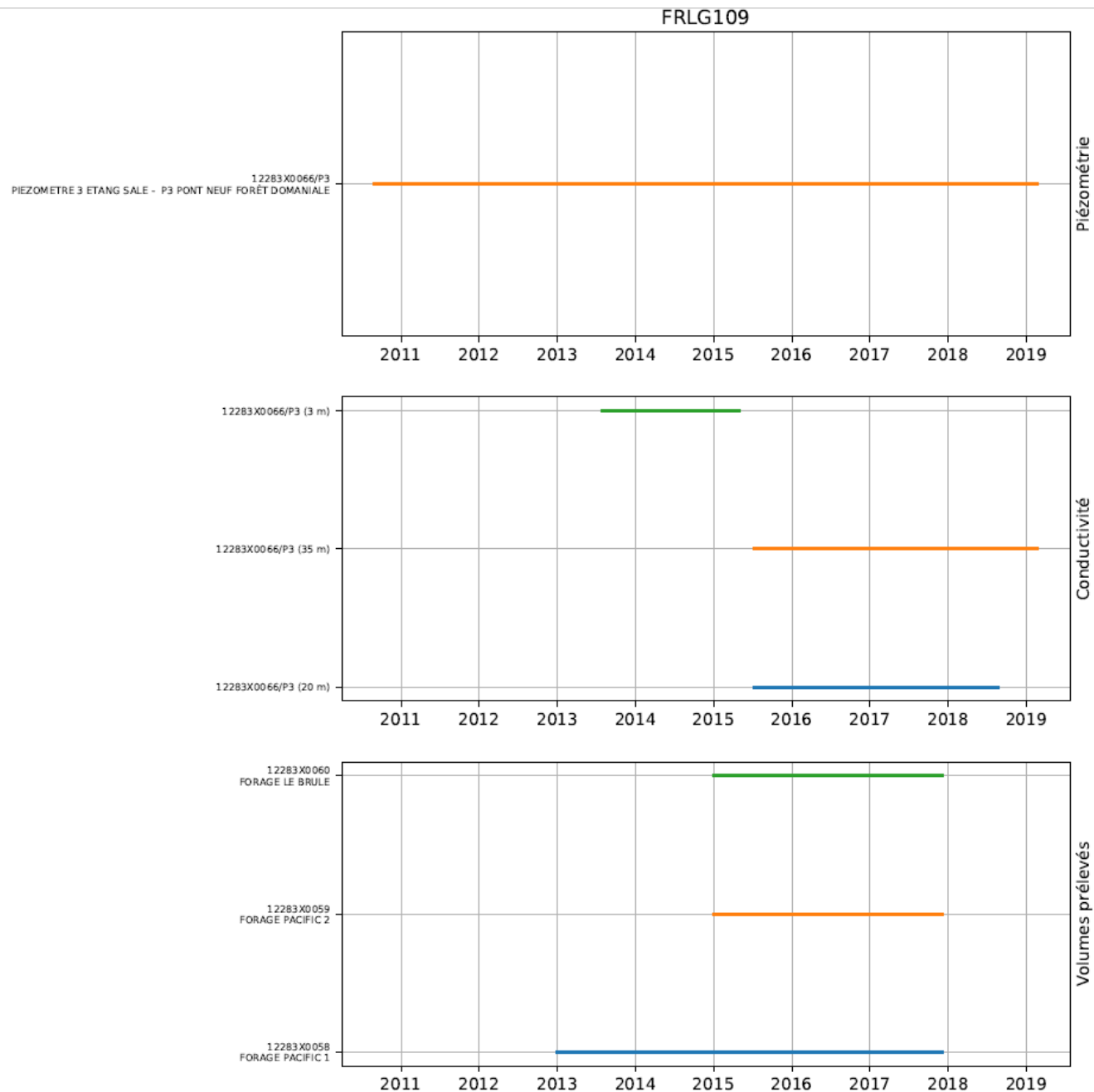
Tableau 7 – Données de volumes prélevées disponibles

3.3. SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES PAR MASSES D'EAU

Les illustrations suivantes (Illustration 5 à Illustration 7) visent à illustrer la disponibilité des données selon la dimension temporelle.



*Illustration 5 – Données disponibles pour la masse d'eau FRLG110
Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de la Planète Ouest*



*Illustration 6 - Données disponibles pour la masse d'eau FRLG109
Formations volcaniques et sédimentaires du littoral de l'Etang Salé*

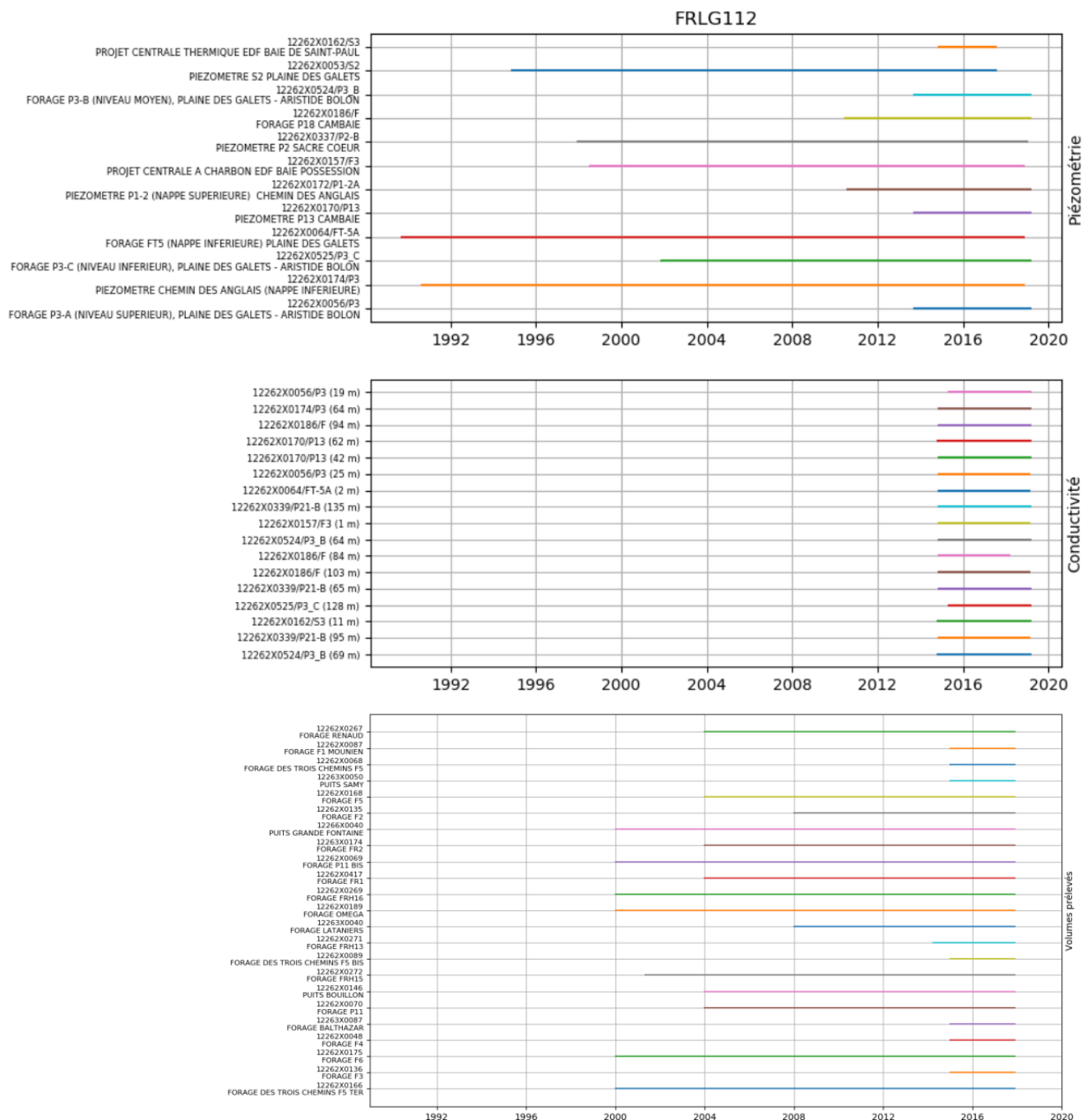


Illustration 7 - Données disponibles pour la masse d'eau FRLG112

Formations volcaniques et volcano-sédimentaires du littoral de l'étang Saint Paul – Plaine des Galets

4. Analyse et exploration des signaux enregistrés

Les relations entre pluie, piézométrie, conductivité électrique et volumes prélevés sont analysées dans ce chapitre.

4.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE ET METHODOLOGIE ADOPTEE

La définition de volumes prélevables repose sur l'identification d'un flux naturel à travers l'aquifère, dont il est possible de prélever une partie pour des usages anthropiques, sans dégrader les fonctions naturelles de l'aquifère au-delà d'un certain point. Pour les aquifères de la côte ouest de La Réunion, il s'agit principalement de limiter / les phénomènes de salinisation des aquifères (intrusion saline).

Dans le contexte de l'île de La Réunion, plusieurs particularités sont relevées pour réaliser l'exercice du calcul des volumes prélevables :

- Estimation de la recharge - la part des précipitations ruisselées (qui échappe à l'infiltration) est difficile à estimer en raison de la faible disponibilité des données de débit des ravines de la côte ouest. Au-delà de l'absence de points de calage, il existe probablement des phénomènes de ré-infiltration au sein des ravines (part d'eau d'abord ruisselée dans le bassin versant amont, mais qui participe à la recharge plus en aval) ;
- Influence de la variation du niveau océanique sur la piézométrie, qui impose des modulations du niveau piézométrique sans rapport avec les apports liés à la recharge, ni aux prélèvements ;
- La très forte perméabilité des aquifères (T de l'ordre de 10^{-1} à 10^{-2} m/s) et le fait qu'ils soient, pour nombre d'entre eux, en connexion hydraulique avec l'océan, masque un certain nombre d'effets qu'il est possible d'observer de façon usuelle sur d'autres aquifères : effet des pompages autour des puits, recharge, stockage (charge hydraulique qui augmente de façon durable au cours des mois pluvieux), etc ;
- Nécessité d'intégrer la conductivité électrique (CE) comme un moyen d'introduire une information objective et supplémentaire pour le calcul du volume prélevable.

Pour ce qui concerne cette dernière particularité, une première analyse du signal de CE (§ 4.2 – p. 31) a montré qu'il s'agissait d'un signal complexe, soumis à de nombreuses influences. Une description détaillée des signaux de la CE a donc été conduite, de sorte à identifier les influences qui s'exercent sur ce signal et à envisager des moyens de s'en affranchir. Ces moyens sont potentiellement complexes à mettre en œuvre, et ne font pas l'objet de la présente étude.

Une stratégie visant à contourner la complexité de ces signaux est étudiée (§ 4.3 – p. 35). Elle consiste à isoler dans les chroniques des périodes pendant lesquelles l'influence de la recharge doit, en théorie, se manifester. Il s'agit ainsi de s'intéresser aux périodes pendant lesquelles le signal piézométrique est à la hausse et inversement, aux périodes pendant lesquelles le signal de conductivité électrique est à la baisse.

L'approche développée ici vise donc à simplifier le problème, en ne considérant qu'un sous-ensemble des données. Ce sous-ensemble est documenté, afin de mettre en évidence les mécanismes de transfert de pression et de transfert de masse.

4.2. ANALYSE EN FREQUENCE DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

Dans le contexte particulier de l'île de La Réunion, l'évaluation des volumes disponibles pour être exploités repose sur le fait de pouvoir s'assurer que la sollicitation des aquifères n'engendre pas une amplification du phénomène d'intrusion saline. Dans cette perspective, il convient d'inclure la conductivité électrique à l'analyse de la piézométrie seule.

Pour cette raison, la description du signal de conductivité électrique est une étape essentielle de la démarche, de sorte à quantifier ses facteurs de contrôle. Pour cela, une analyse en fréquence, à l'aide de périodogrammes a été conduite. Le périodogramme vise à identifier les périodes (inverse des fréquences) qui expliquent le mieux le signal observé dans un signal temporel continu (eg : la variation piézométrique en fonction du temps),

Compte tenu du fait que la conductivité électrique est mesurée au pas de temps de 12 minutes, trois périodogrammes ont été calculés et exploités :

- pour l'analyse des hautes fréquences (inférieures à 4 jours, soit 96 heures), le périodogramme a été calculé sur la donnée horaire (valeur médiane de la conductivité électrique calculée sur une période de 1 heure) ;
- pour l'analyse des fréquence intermédiaires (entre 1 jour et 1 mois), le périodogramme a été calculé sur la donnée journalière (valeur médiane de la conductivité électrique sur une période de 24 heures) ;
- pour l'analyse des basses fréquences (au-delà de 1 mois, mais limitée à 2 ans vu la profondeur temporelle des chroniques), le périodogramme a été calculé sur la données mensuelle (valeur médiane de la conductivité électrique sur une période de 30 jours).

Cette analyse a été réalisée sur l'ensemble des ouvrages où la conductivité électrique est disponible. L'analyse des signaux repose sur une détection automatique des pics dans les trois périodogrammes (Illustration 8).

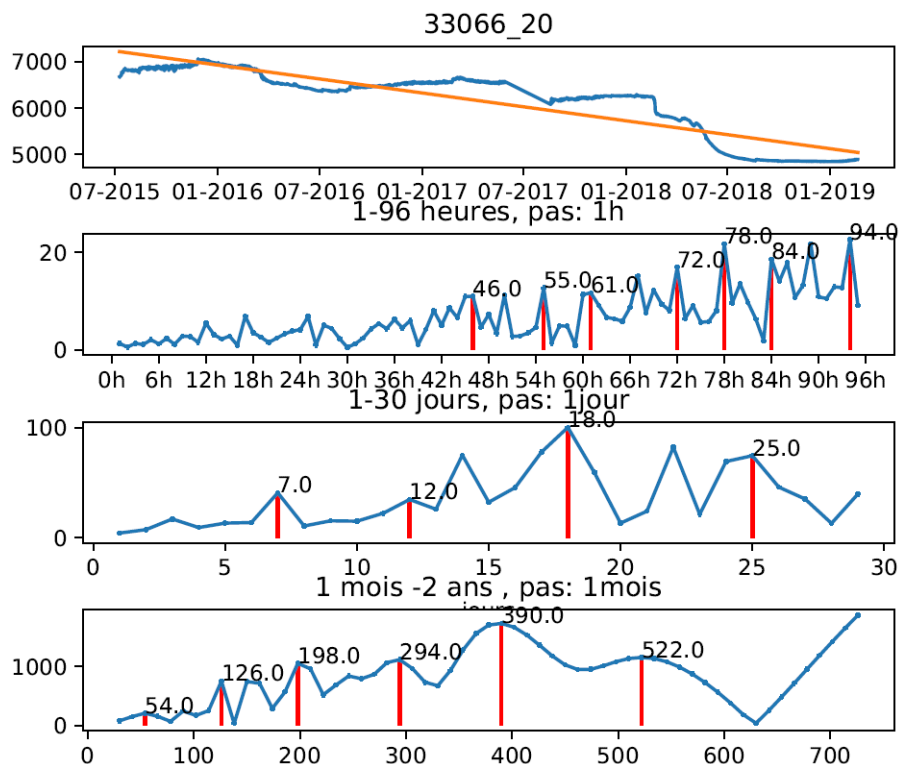


Illustration 8 - Conductivité électrique (en bleu, graphe du haut) et tendance sur la période (en jaune), et périodogrammes associés (3 graphes du bas).

Les traits rouges verticaux représentent les pics détectés et la valeur des fréquences associées (abscisses exprimées en heures pour les deux graphiques du haut, et en **en jours pour les deux graphiques du bas**). L'axe des ordonnées est exprimé dans l'unité du signal : ici en μS

A titre d'exemple, l'illustration 8 présente les périodogrammes calculés pour le forage 12283X0066 (code Office 33066 – piézomètre P3 Pont Neuf forêt domaniale - Etang Salé) et pour la conductivité électrique mesurée à la profondeur de 20 mètres.

Cette figure est composée de quatre encarts. Du haut vers le bas, le premier représente l'évolution temporelle de la conductivité électrique « brute » (en bleu) et la tendance (en rouge) calculée sur la période d'observation. Les trois encarts en dessous représentent les périodogrammes calculés avec la donnée horaire, journalière et mensuelle.

Pour ce forage, le signal de conductivité au pas de temps horaire et pour les hautes fréquences (de 0 à 96 heures) montre la présence de signaux dont les périodes sont de 46, 55, 61, 72, 78, 84 et 94 heures.

Pour les fréquences intermédiaires (de 1 jour à 30 jours), des signaux dont les périodes sont de 7, 12, 18 et 25 jours sont identifiés. Des signaux intermédiaires peuvent être visibles, mais une séparation minimale entre les pics est imposée lors de la détection des pics (ici 5 jours).

Enfin, pour les basses fréquences (de 1 mois à 2 ans), des signaux dont les périodes sont de 54, 126, 198, 294, 390 et 522 jours sont identifiés.

L'analyse de détail de ces différents signaux est hors du champ de cette étude, mais le but de cette analyse est de montrer les différents types d'influences auxquels la conductivité est soumise. Ces différentes influences sont synthétisées sous la forme d'un tableau (Tableau 8). Une colonne dédiée permet d'identifier les chroniques pour lesquelles l'influence de la marée est bien décelable. Cette analyse est réalisée en se servant des pics identifiés dans les périodogrammes, complétée par une analyse visuelle des chroniques. Un exemple typique de l'influence de la marée est présenté à l'illustration 9.

Dans la majorité des cas, le signal de conductivité est sous l'influence de la marée (pic à 12 heures), éventuellement de ses harmoniques ou de signaux à hautes fréquences (inférieurs à 96 heures). Toutes les chroniques sauf cinq montrent des influences à moyennes fréquences (entre 1 et 30 jours), et toutes les chroniques sauf une présentent des influences de signaux basse fréquence (au-delà de 30 jours).

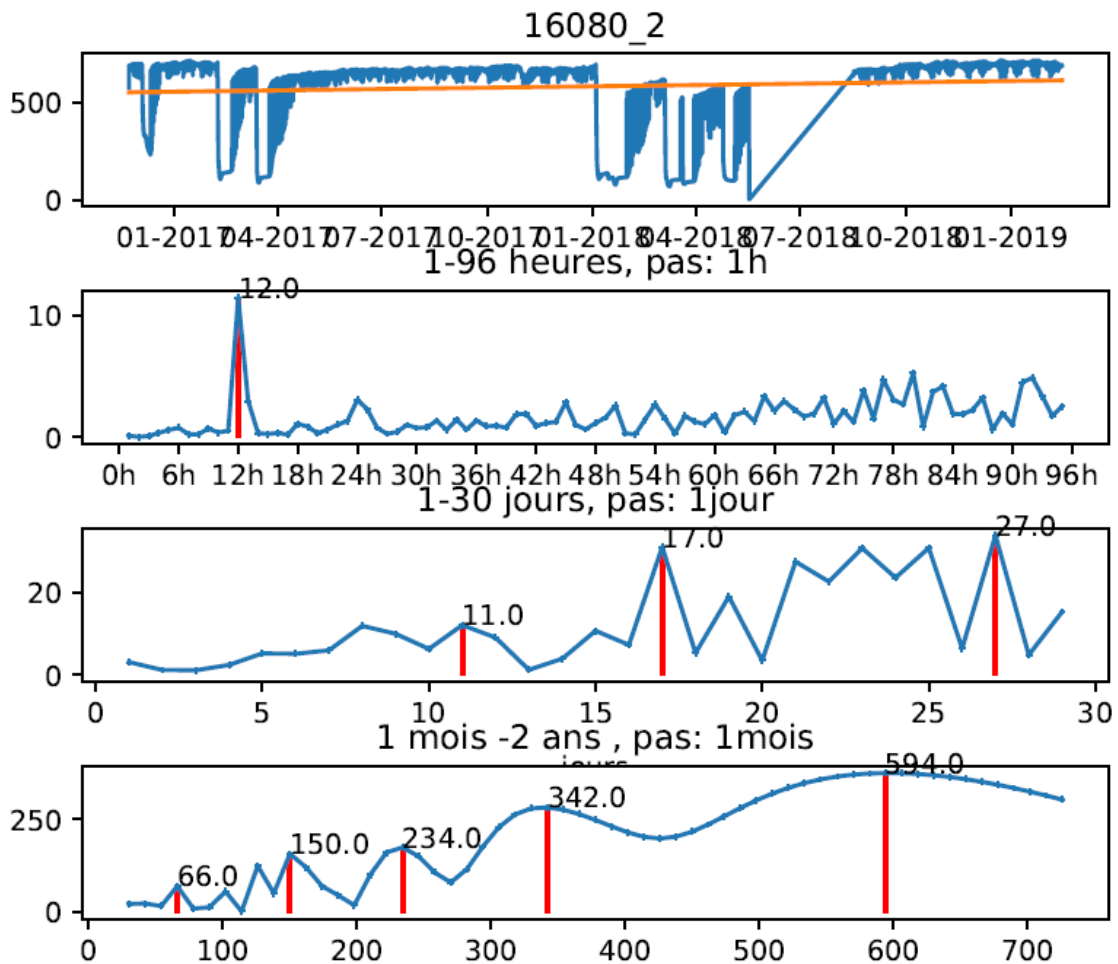


Illustration 9 - Conductivité électrique (en bleu, graphe du haut) et tendance sur la période (en orange), et périodogrammes associés (3 graphes du bas) pour le forage 12283X0066/P3, piézomètre P3 Pont Neuf forêt domaniale - Etang Salé), illustrant la présence du signal du marée (pic à 12 heures), facilement observable sur le signal brut (figure du haut).

MESO	Code Office de l'eau et profondeur de la mesure de CE	Pente ($\mu\text{S}/\text{an}$)	Hautes fréquences	Fréquences intermédiaires	Basses fréquences	Influence de la marée
FRLG112 Etang Saint Paul Plaine des Galets	12056-A_19	-18	non	non	oui	
	12056-A_25	-14	non	oui	oui	
	12056-B_64	7	non	non	oui	
	12056-B_69	12	non	non	oui	
	12056-C_128	-3069	oui	oui	oui	oui
	12064_2	-24	non	oui	oui	
	12157_1	60	oui	oui	oui	oui
	12162_11	-28	non	non	oui	oui
	12170_42	11	non	non	oui	
	12170_62	-299	oui	oui	oui	
	12174_64	48	oui	oui	oui	oui
	12186-2_103	-122	oui	oui	oui	
	12186-2_84	-55	oui	oui	oui	
	12186-2_94	443	oui	oui	oui	
FRGL110 Littoral de la Planète Ouest	12188-2_135	-121	oui	oui	oui	oui
	12188-2_65	-10	oui	oui	oui	oui
	12188-2_95	1787	oui	oui	oui	oui
	15022_2	-141	non	oui	oui	
	15027_28	-2109	oui	oui	oui	oui
	15027_34	-3534	oui	oui	oui	
	15800_14	-2032	oui	oui	oui	
	15800_19	-2739	oui	oui	oui	
	16038_0	-138	non	oui	oui	
	16041_1	27	oui	oui	oui	
FRLG109 Etang Salé	16080_0	4	oui	oui	oui	oui
	16080_14	123	oui	oui	oui	oui
	16080_2	27	oui	oui	oui	oui
	16080_29	-20585	oui	oui	non	
	32045_4	-15	non	oui	oui	
	33066_20	-599	oui	oui	oui	
	33066_3	755	oui	oui	oui	
	33066_35	-607	oui	oui	oui	

Tableau 8 - Synthèse de l'analyse des périodogramme, identifications des influences s'exerçant sur la conductivité électrique. La colonne 'influence de la marée' correspond à l'analyse des fréquences, complétées par une analyse visuelle des chroniques.

Cette analyse montre qu'un travail spécifique de déconvolution de ces signaux serait à entreprendre. Il s'agirait d'un traitement préliminaire des données de conductivité électrique de manière à pouvoir poursuivre l'analyse de façon fine et adapté à la caractérisation des processus. En effet, l'analyse de détail de ces signaux bruts n'a de sens que s'il est possible de comprendre la part de variation du signal de conductivité qui est directement imputable aux effets de la recharge, ou aux pompages. Cette démarche n'a de sens que si l'on dispose d'un signal de conductivité électrique débarrassé du signal océanique.

Cette étape de déconvolution devra faire l'objet d'une étude spécifique et n'a pas été entreprise ici. Dans le cadre de la présente étude et pour disposer d'un signal de conductivité utilisable, des moyennes glissantes ont été calculées (périodes paramétrables) sur une période de 15 jours, cette fenêtre de temps permettant à la fois d'éliminer tout ou partie des signaux de très haute fréquence, tout en conservant suffisamment de signal exploitable. Cette méthode étant simple à mettre en œuvre est apparue comme assez robuste à ce stade. Elle reste cependant perfectible car cela ne retranche pas le signal 'bruit' (ici la marée) du signal que l'on cherche à étudier, mais suppose que la moyenne du signal 'bruit' sur période de 15 jours est proche de zéro. Cela suppose donc la stationnarité du signal bruit.

4.3. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE PLUIE, PIEZOMETRIE ET CONDUCTIVITE

Pour proposer une méthodologie adaptée à l'évaluation des volumes prélevables, la présente étude s'est d'abord attachée à décrire les liens qui existent entre pluie, piézométrie et conductivité et explorer différents traitements à opérer sur les données « brutes ».

Cette approche vise à : décrire le lien entre les différents signaux, explorer les traitements utiles à améliorer le lien entre les signaux en vue de pouvoir envisager de construire dans le futur des modèles permettant de simuler ces différents signaux. Ces traitements ont été conduits sur tous les ouvrages où il existe à la fois des données de piézométrie et de conductivité.

4.3.1. Etapes préliminaires, traitements mis en œuvre

a) Description du signal piézométrique brut

Dans un premier temps, deux informations simples ont été recherchées, dans le but de qualifier i) l'évolution temporelle du signal piézométrique et ii) la relation entre le signal piézométrique et la pluie 'brute'.

Pour cela, l'autocorrélogramme de la piézométrie a été calculée. Il permet de caractériser le type de fluctuations qui s'exprime dans le signal piézométrique (Illustration 10). Une détection automatique des pics a été mise en œuvre, permettant (le plus souvent) d'identifier les pics bien individualisés. Dans le cas pris en exemple, (piézomètre 12283X0066/P3), une cyclicité annuelle bien marqué est mise en évidence (présence de pics aux temps 356 j ~1 an et 730j ~2 ans).

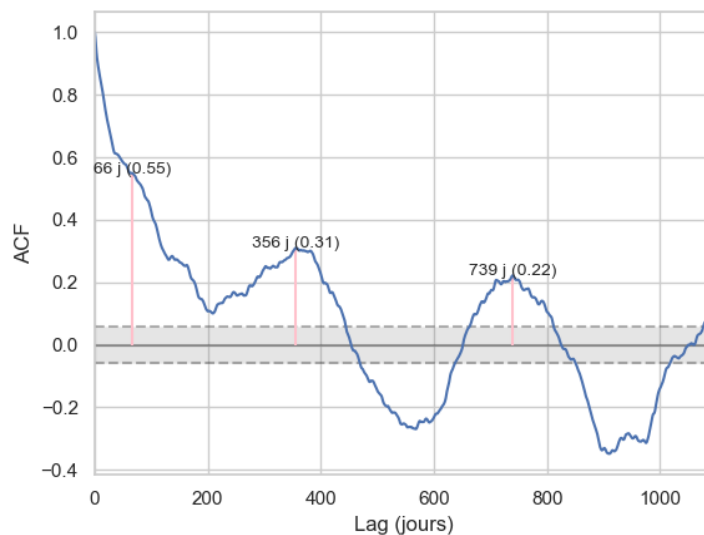


Illustration 10 - Autocorrélogramme calculé sur le signal piézométrique pour le forage 12283X0066/P3. La zone grisée correspond à l'intervalle de confiance (seule les valeurs en dehors de cette plage sont significatives).

b) Identification des périodes de hausses piézométriques

La variation du signal piézométrique montre, tout comme la conductivité, d'importantes fluctuations tout au long de l'année, y compris à des périodes éloignées de périodes de pluies.

Différents phénomènes peuvent expliquer ces variations :

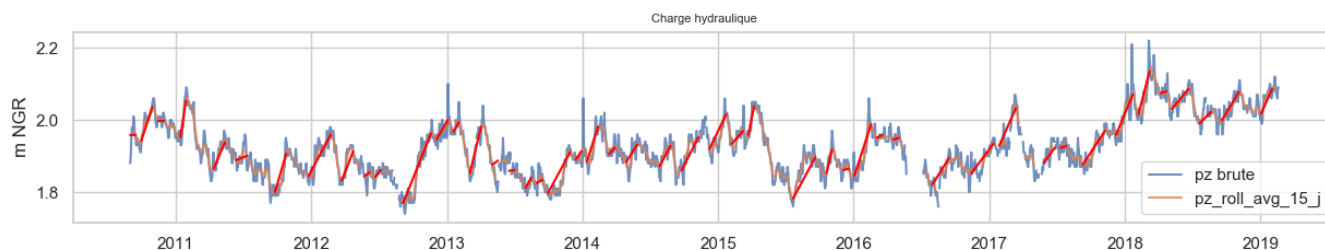
- la connexion au niveau océanique dont les variations peuvent influencer le niveau piézométrique ;
- l'effet d'une forte épaisseur de zone non saturée, entraînant un délai entre le moment où la pluie est enregistrée et le moment où le flux de recharge rejoint la nappe (Petit et al., 2013).

Pour essayer de s'affranchir de l'effet induit par les variations du niveau de l'océan, la démarche suivante a été entreprise :

- identification des périodes de hausses piézométriques
- recherche et documentation du lien entre ces périodes de hausses et le signal de la pluie

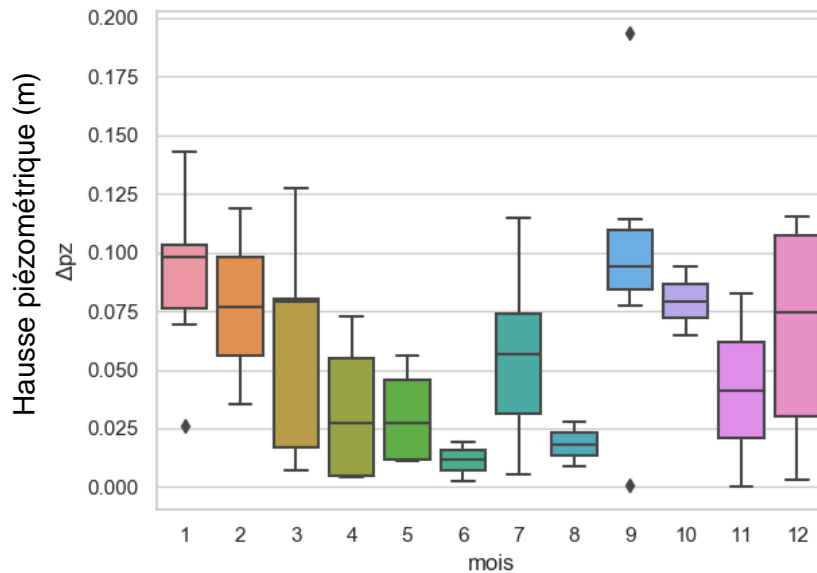
L'identification des périodes de hausses piézométriques a été conduite en utilisant la moyenne mobile centrée (fenêtre 15 jours) du niveau piézométrique. Il est d'abord calculé une différentielle d'ordre 1 (différence entre la mesure à t et celle à $t-1$) puis la somme des différences est calculée, sous condition que le signe ne change pas (somme des différences négatives/ somme des différences positives). Des périodes de baisses/hausses continue sont obtenues. Pour chaque période, différentes métriques peuvent être calculées : date de début, date de fin, date moyenne, valeur piézométrique de départ, et valeur de la hausse/de la baisse.

Pour ce travail, les périodes montrant un signe positif, c'est-à-dire les périodes montrant un niveau piézométrique à la hausse ont été sélectionnées. En effet, le but est de pouvoir lier ces périodes à un signal perturbateur du signal piézométrique, notamment un signal climatique (pluie ou signal dérivé de la pluie, engendrant une recharge des eaux souterraines).



*Illustration 11 - Identification des périodes de hausses piézométrique, piézomètre 12283X0066/P3.
Le signal piézométrique est représenté en bleu, la moyenne mobile sur une période de 15 jours en jaune.
Les périodes de hausses identifiées sont représentées en rouge.*

Ainsi, il est possible d'identifier au sein de la série les périodes marquées par des augmentations de piézométrie (Illustration 12), et de calculer la distribution de ces valeurs (Illustration 13). Ces informations ont été extraites et analysées de sorte à constituer une base d'informations pour l'élaboration de traitement futurs.



*Illustration 12 - Distribution des valeurs de hausses piézométrique pour chaque période identifiée, et répartition au cours des mois de l'année (mois 1 = janvier, mois 12 = décembre).
Représentation en box-plot : le trait noir au milieu des boîtes colorées marque la médiane. Les limites inférieures et supérieures de la boîte marquent les 1^{er} et 9^{ème} déciles.*

Dans le cas présenté en exemple (Illustration 12), les hausses les plus importantes (7.5 cm à 10 cm) sont observées entre les mois de septembre et février, à l'exception du mois de novembre. A l'inverse, les mois d'avril à août présentent des variations à la hausse limitée, de l'ordre de 1 à 3 cm, de l'ordre de la précision de mesure du capteur.

Le graphe des distributions montre quant à lui une information similaire (Illustration 13), mais qui ne détaille pas l'impact de la période de l'année (les mois). L'analyse de la distribution montre une distribution bimodale : une grande proportion des hausses sont d'une faible intensité (inférieures à 3 cm), mais une proportion assez grande sont d'une intensité comprise entre 8 et 11 cm.

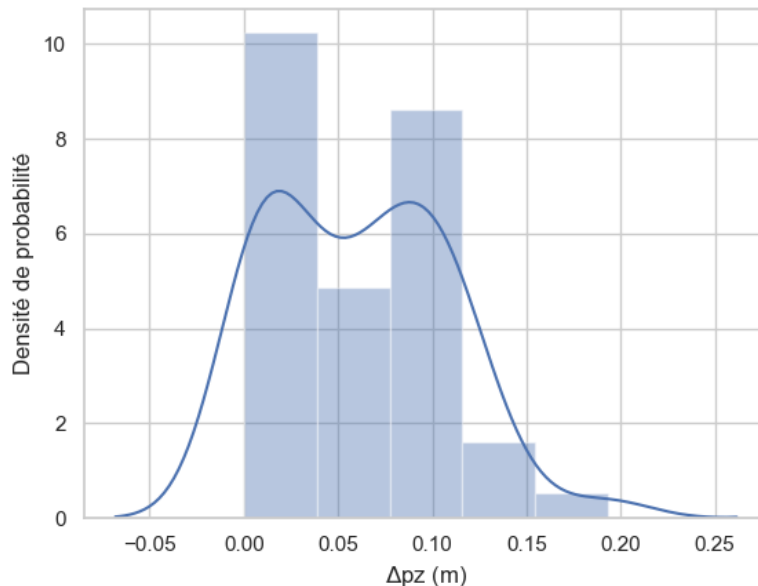


Illustration 13 - Distribution des valeurs des hausses

Trait plein : densité de probabilité ; barres verticales : histogramme (en valeurs normées sur la densité de probabilité).

Les deux représentations fournissent une information similaire, équivalent d'une probabilité de trouver une valeur comprise dans un intervalle

4.3.2. Analyse de la relation de la pluie à la piézométrie et la conductivité électrique

La relation entre la pluie et la piézométrie a été explorée au moyen de différentes méthodes.

Dans un premier temps, un corrélogramme croisé entre la pluie et le signal piézométrique (moyenne glissante sur 15 jours) a été calculé (Illustration 14). Cette approche est souvent peu instructive en raison de la multiplicité des signaux s'exprimant sur la piézométrie. En conséquence, le corrélogramme présente des plages de valeurs dont beaucoup sont inférieures à l'intervalle de confiance. Pour les valeurs considérées comme significatives, les coefficients de corrélations sont en général assez faibles (20/24 inférieurs à 0.3, 4/24 entre 0.3 et 0.5) et toujours inférieurs à 0.5..

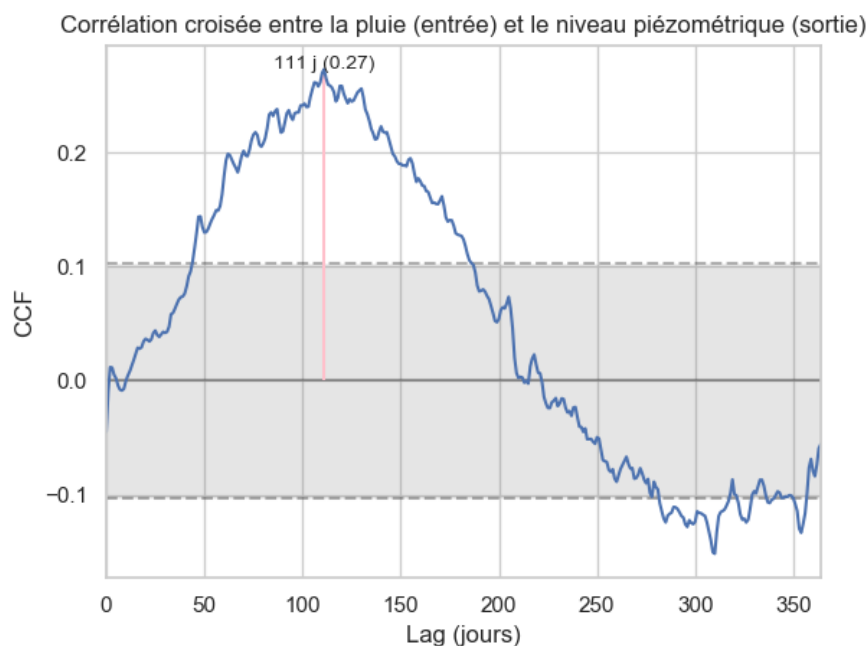


Illustration 14 - Corrélogramme croisée pluie/piézométrie
Intervalle de confiance en grisé
CCF – Cross correlation function

Par ailleurs, une approche complémentaire a été développée. Elle vise comprendre la relation entre du signal de pluie sur la hausse piézométrique. Il s'agit :

- de ne s'intéresser qu'aux périodes de hausses du signal piézométrique (voir § b) p. 36) ;
- d'explorer le lien entre ces périodes de hausses et différents signaux issus de la pluie :
 - la pluie cumulée sur des périodes que l'on laisse varier (pluie cumulée sur 1,3,5,7,9,12,15,30,60,90,120,150,180,210,240,270,300 et 365 jours) ;
 - la même pluie cumulée (même périodes de cumul) plus un délai, c'est-à-dire la pluie d'il y a n jours (décalage de 0 à 185 jours, incrément 5 jours).

Le but de cette démarche est d'explorer différents signaux de pluie (666 signaux calculés pour les paramètres exposés ici), et leur relation aux hausses piézométrique. Pour cela, pour chaque

signal de pluie cumulée (ou cumulée et décalée dans le temps), la corrélation entre le signal pluie et la valeur des hausses de piézométrie a été calculée (à la fin de la 'période de hausse'). La valeur de la corrélation a été conservée et une matrice de corrélation est construite (Illustration 15).

Dans cette figure, les coefficients de corrélation (coefficient de Pearson³) sont figurés par une couleur rouge lorsqu'ils traduisent une anticorrélation (-1 au maximum), et par une couleur bleue lorsqu'ils traduisent une corrélation (1 au maximum). Le maximum des corrélations (signes positifs) a été recherché de façon automatique. Par la suite, les valeurs de la profondeur de la période utile pour le cumul et le décalage temporel ont été extraits.

A titre d'exemple le signal de pluie qui semble le mieux expliquer les variations à la hausse du signal piézométrique (Illustration 15) serait la pluie cumulée sur 3 jours (décalage = 0 : pas de décalage).

³ Voir par exemple <https://numpy.org/doc/1.18/reference/generated/numpy.corrcoef.html> et https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient

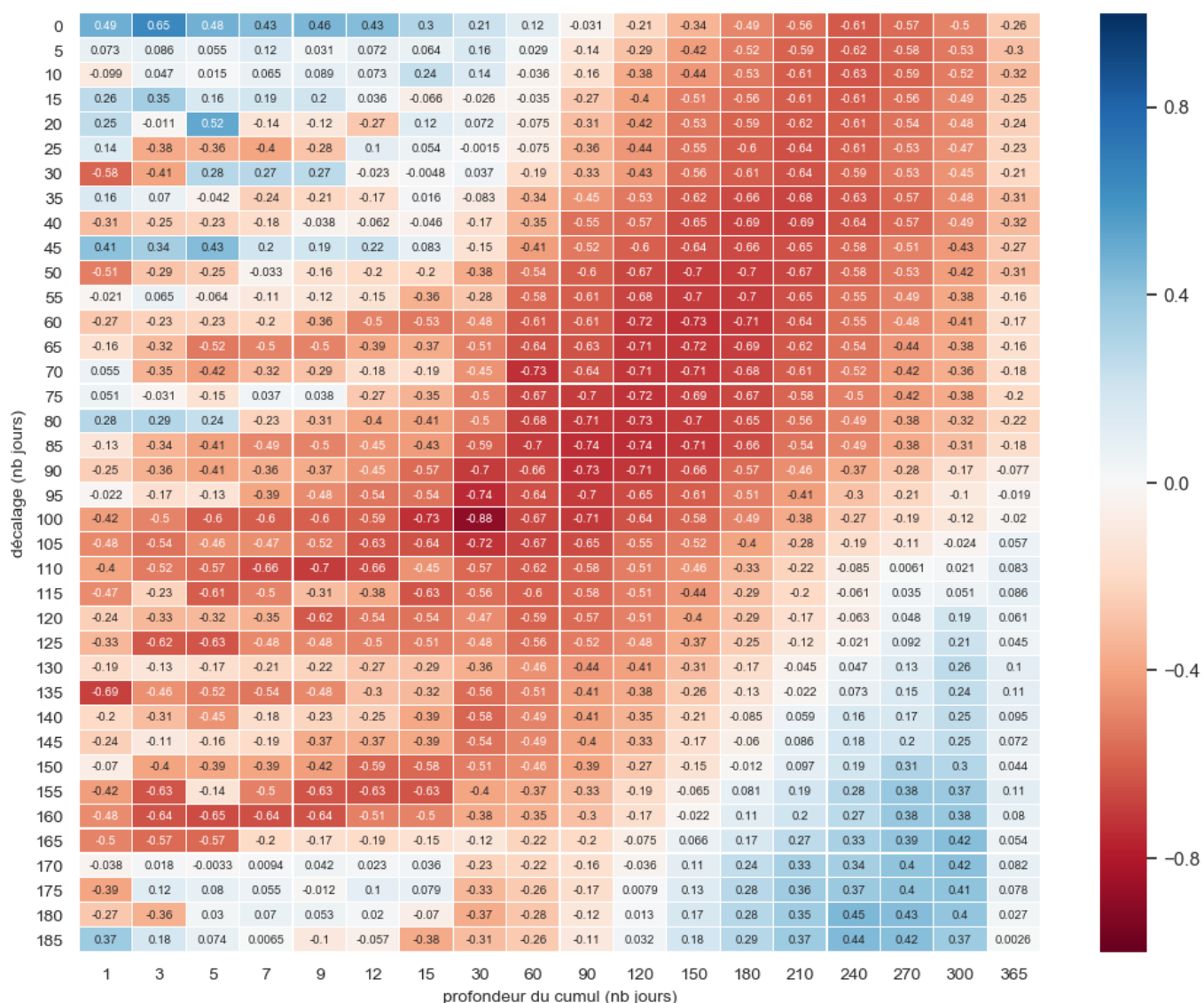


Illustration 15 - Matrice de corrélation entre différents signaux de pluie cumulée (x) et valeurs du décalage temporel de l'effet de la recharge (y) pour les périodes de hausses identifiées au sein de la chronique.

Pour ce couple de paramètres (profondeur du cumul et valeur du décalage), la relation entre la valeur du signal pluie et la valeur de la hausse de piézométrie peut être explorée (Illustration 16).

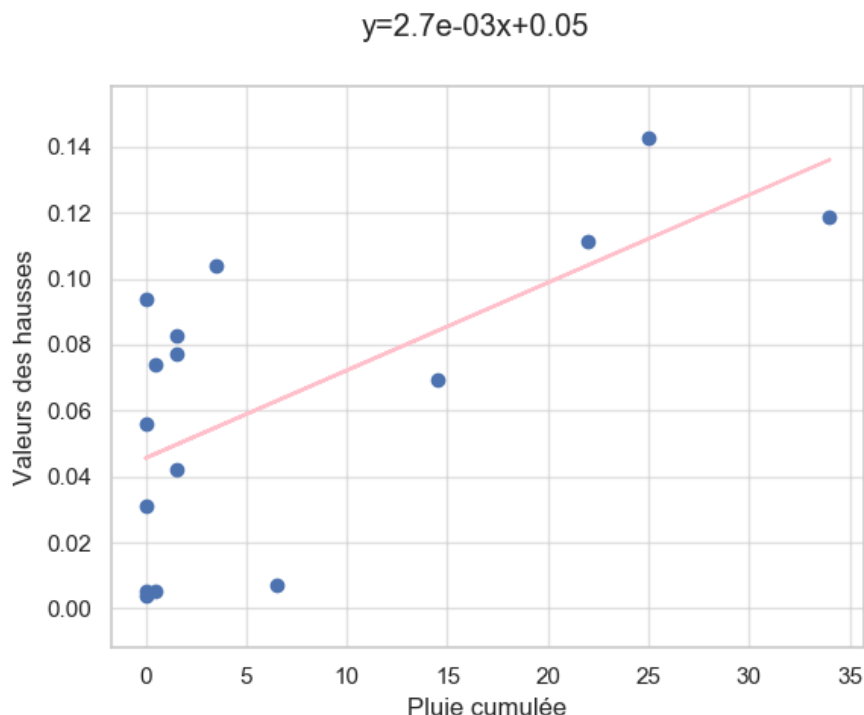


Illustration 16 - Relation entre valeur de la hausse de piézométrie (en m) et signal de pluie (pluie cumulée + décalage) en mm. Un point sur le graphique correspond à une valeur de 'hausse piézométrique', tel que décrit au § 4.3.1.b, et illustration 11.

Dans cette représentation, il est facile d'illustrer que : une partie des hausses de piézométries montre des valeurs non nulles, et mêmes parfois importantes (de l'ordre de la dizaine de centimètres) sans qu'un signal de pluie ne puisse y être associé (valeurs de pluie cumulée entre 0 et 5 mm). Ces moments où la piézométrie est à la hausse sans qu'un événement de pluie (cumulée) puisse être associé pourraient correspondre à l'influence d'un forçage externe, notamment la variation du niveau océanique, en connexion avec l'aquifère.

La méthode présente la limite évidente que les épisodes de hausses du signal piézométriques sont limités en nombre dans la fenêtre d'intérêt. En revanche, elle permet d'estimer l'existence d'un lien entre deux signaux mesurés en continu et est facile à exploiter ou à mettre en œuvre.

Une démarche analogue a été conduite pour i) identifier les périodes de baisses du signal de conductivité électrique et ii) chercher un lien à la piézométrie.

a) Identification des périodes de baisses du signal de la conductivité électrique

De façon analogue à ce qui a été conduit sur le signal piézométrique, l'identification des périodes de baisse du signal de conductivité électrique a été réalisée. La méthodologie est identique à celle décrite au § b) ci-dessus.

Ce traitement a été réalisé sur toutes les chroniques de conductivité électrique, c'est-à-dire selon toutes les profondeurs documentées. Afin de bénéficier d'éléments de comparaisons, les périodes de baisse de piézométrie sont juxtaposées à la chronique de hausse de piézométrie (Illustration 17).

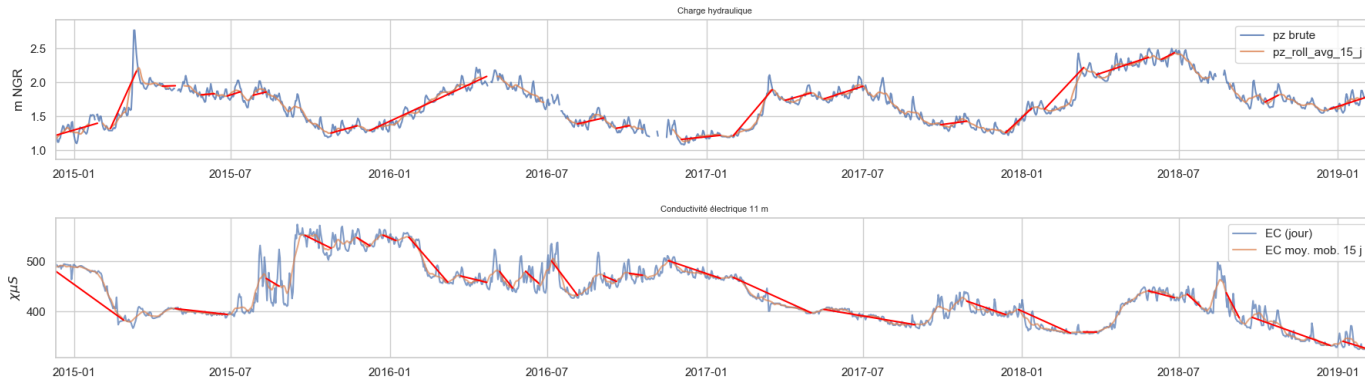


Illustration 17 - Identification automatique des périodes de baisse de la conductivité électrique pour le piézomètre 12262X0162

Projet centrale thermique EDF baie de Saint-Paul, profondeur de la sonde de CE à 11 m

Figure du haut : signal piézométrique lissé sur 15 jours (moyenne glissante) et périodes de hausses identifiées.

Figure du bas : signal de conductivité lissé sur 15 jours (moyenne glissante) et périodes de baisses identifiées.

b) Distribution dans le temps des épisodes de baisses de la conductivité électrique

Une fois les périodes de baisses du signal de conductivité identifiées, l'analyse de leur distribution au cours de l'année a été réalisée au moyen d'un box-plot (Illustration 18), de façon similaire à l'approche utilisée ci-dessus en p. 37 (Illustration 12). L'objectif est de pouvoir appréhender les moments dans l'année où la conductivité électrique marque une baisse, qu'il serait possible d'attribuer à un effet de la recharge (dilution par arrivée d'eau douce).

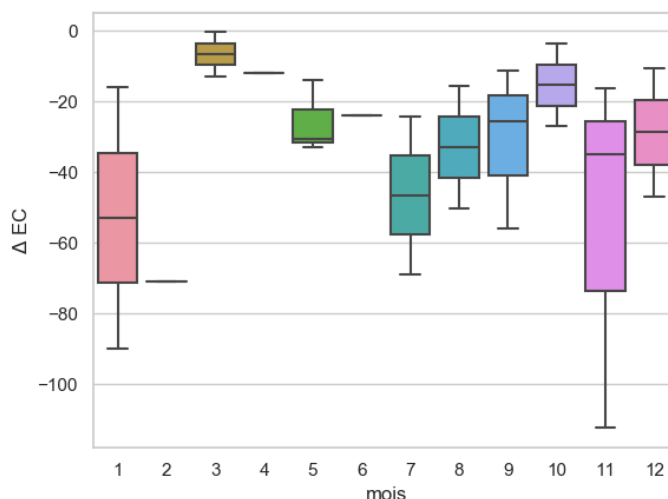


Illustration 18 - Distribution au cours de l'année des périodes de baisses de conductivité (puits 12262X016 à la profondeur de 11m).

Chaque boîte de couleur représente la distribution statistique des valeurs de baisses pour chacun des mois représentés en abscisses (mois 1 = janvier, mois 12 = décembre).

Représentation en box-plot : le trait noir au milieu des boîtes colorées marque la médiane. Les limites inférieures et supérieures de la boîte marquent les 1er et 9ème déciles

Pour le cas du puits présenté ci-dessus, la distribution des valeurs de baisses piézométriques montre des valeurs de baisses plutôt importantes entre les mois de juillet (mois 7) et janvier (mois 1). Au contraire, des valeurs plus faibles sont observées entre février et juin. Pour ce cas particulier, cela pourrait suggérer que les baisses de conductivités capturées par l'approche d'analyse du signal adoptée ici sont déphasées par rapport à la saison humide, et trahisse l'existence de flux (transfert de masse) relativement lents. Cependant, il convient de garder à l'esprit que les statistiques calculées ici le sont sur des échantillons relativement petits (population de l'ordre de 20 à 30 'individus', c'est-à-dire 20 à 30 épisodes de baisses de conductivité électrique). La validation d'une telle hypothèse reposerait sur l'accroissement de la taille de l'échantillon, donc en poursuivant le suivi.

c) Approche corrélatoire de la CE / Pluie

L'analyse de la relation du signal brut de conductivité au signal de pluie a été opérée à l'aide d'un corrélogramme croisé, dans l'optique de fournir une information complémentaire à l'analyse. Il est nécessaire de rappeler qu'il s'agit d'une approche complémentaire, réalisée dans un cadre exploratoire. Toutefois, en raison de l'absence de corrélation significative (Illustration 19), il apparaît que cette démarche ne permet pas de bénéficier d'informations exploitables pour une EVP.

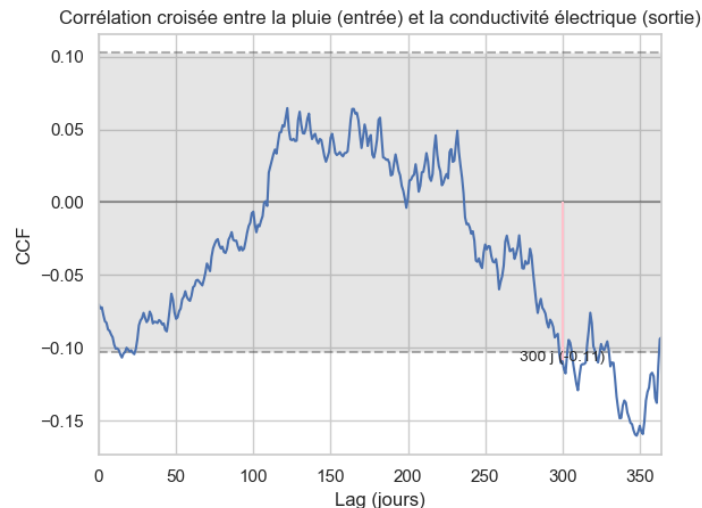


Illustration 19 - Exemple de corrélogramme croisé Pluie / Conductivité électrique/ pour le piézomètre 12262X0162

d) Analyse de la relation aux hausses de piézométrie

Une approche complémentaire au corrélogramme croisé a consisté à chercher une relation entre la hausse du niveau piézométrique et la baisse de la conductivité électrique (Illustration 17 – p. 43). Pour ce faire chaque période de baisse de la conductivité a été comparée i) au cumul des hausses de piézométrie sur une période donnée (la période étant variable), ce paramètre étant décrit comme la *profondeur* du cumul et ii) au même cumul, mais sur une période dans le passé, ce paramètre étant décrit comme le *décalage*.

L'illustration 20 montre le principe de cette mise en relation entre une période de baisse de conductivité électrique et des périodes de hausses de piézométrie. Pour une période de baisse donnée (ici au début de l'année 2017), les épisodes de hausses de la piézométrie sont recherchés sur plusieurs profondeurs (ici, deux périodes, identifiées par les flèches horizontales bleues). La même opération est réalisée en introduisant un délai, permettant de chercher des épisodes de hausse piézométrique dans le passé (ici, deux périodes, identifiées par les flèches horizontales oranges, en pointillé). Une fois identifié, le coefficient de corrélation entre les séries de baisses de la CE et des hausses de la piézométrie associées est calculé, et rapporté dans la matrice de corrélation (Illustration 21). Dans cette matrice, plus la corrélation est forte (les valeurs espérées ici sont négatives, ce sont des anti corrélations qui correspondent à l'occurrence simultanée d'une hausse de la piézo et d'une baisse de la CE) plus la couleur est intense. Le maximum de corrélation est extrait, ainsi que les paramètres associés (profondeur du cumul, et décalage).

Cette approche vise deux objectifs :

- identifier si c'est l'effet d'une hausse, ou l'effet cumulé de plusieurs hausses qui peuvent expliquer la baisse de conductivité observé ;
- identifier s'il existe un délai entre la hausse de piézométrie (réponse en pression du système) et la baisse de conductivité (réponse en transfert de masse).

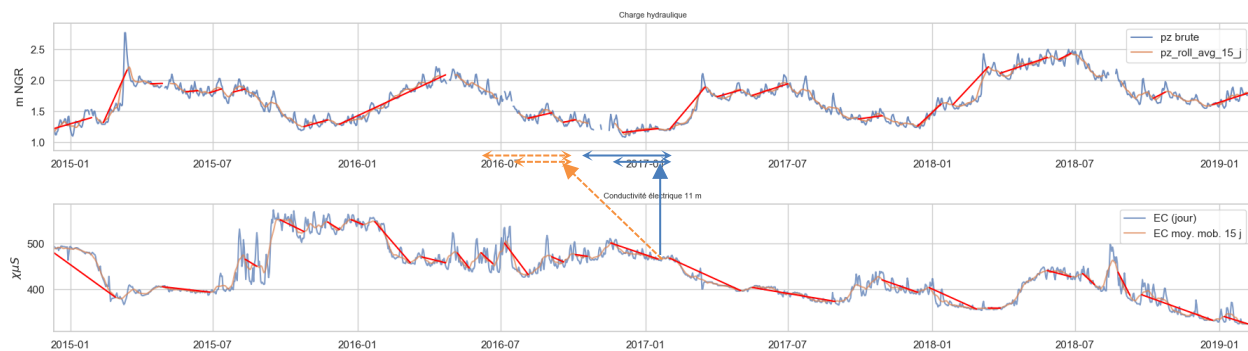


Illustration 20 - Recherche d'un lien entre période de baisse de la conductivité électrique (graphe du bas) et période de hausse de la piézométrie (graphe du haut).

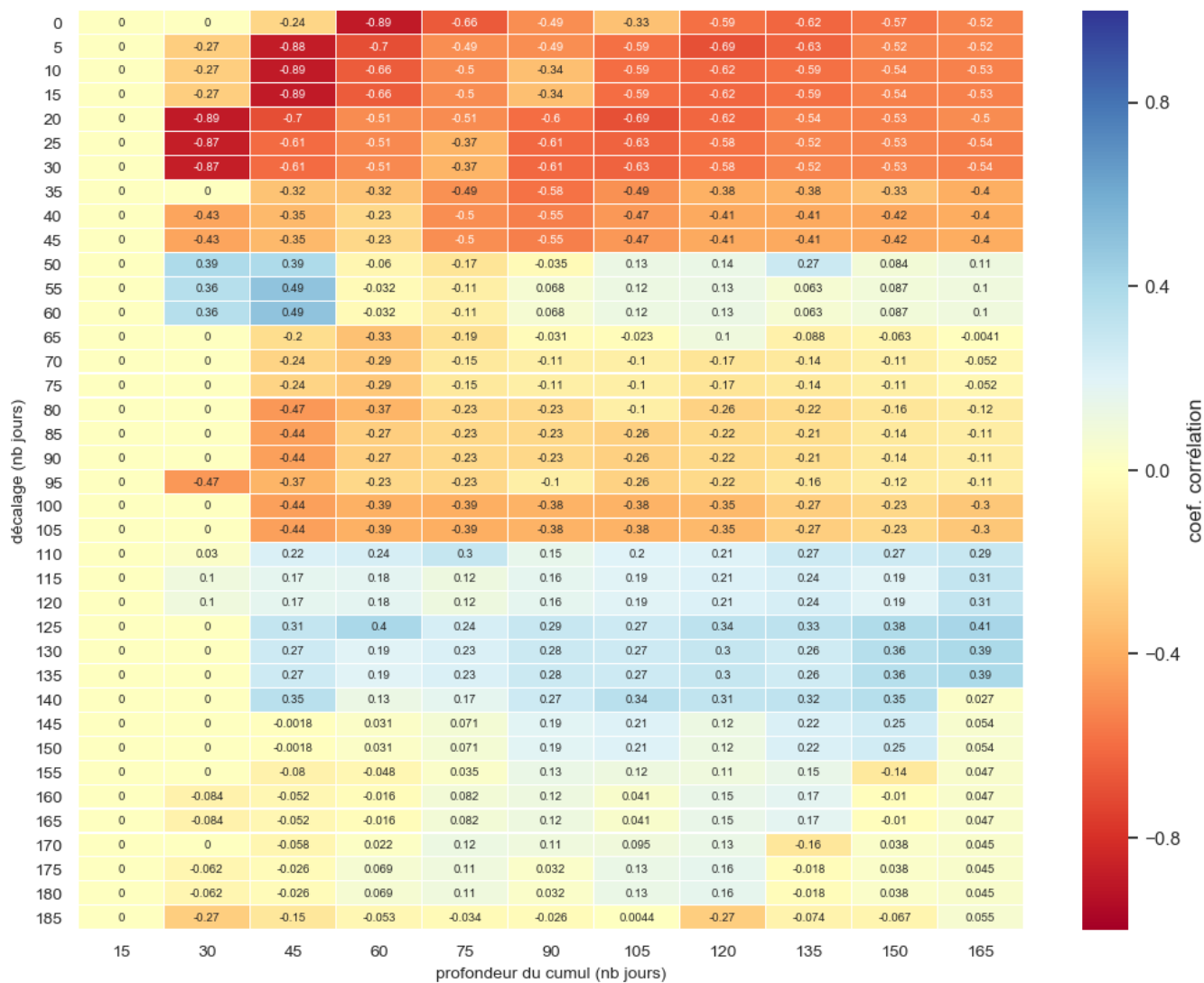


Illustration 21 - Matrice de corrélation entre périodes de hausse du signal piézométrique et période de baisse du signal de conductivité.

e) Comparaison des signaux entre eux et analyse qualitative

Enfin, une analyse graphique des données disponibles, des périodes de hausses/baisses identifiées et des volumes prélevés aux alentours des ouvrages a été réalisée. Cela permet d'ajouter des appréciations qualitatives sur les relations entre les signaux de piézométrie, de conductivité et de volumes prélevés.

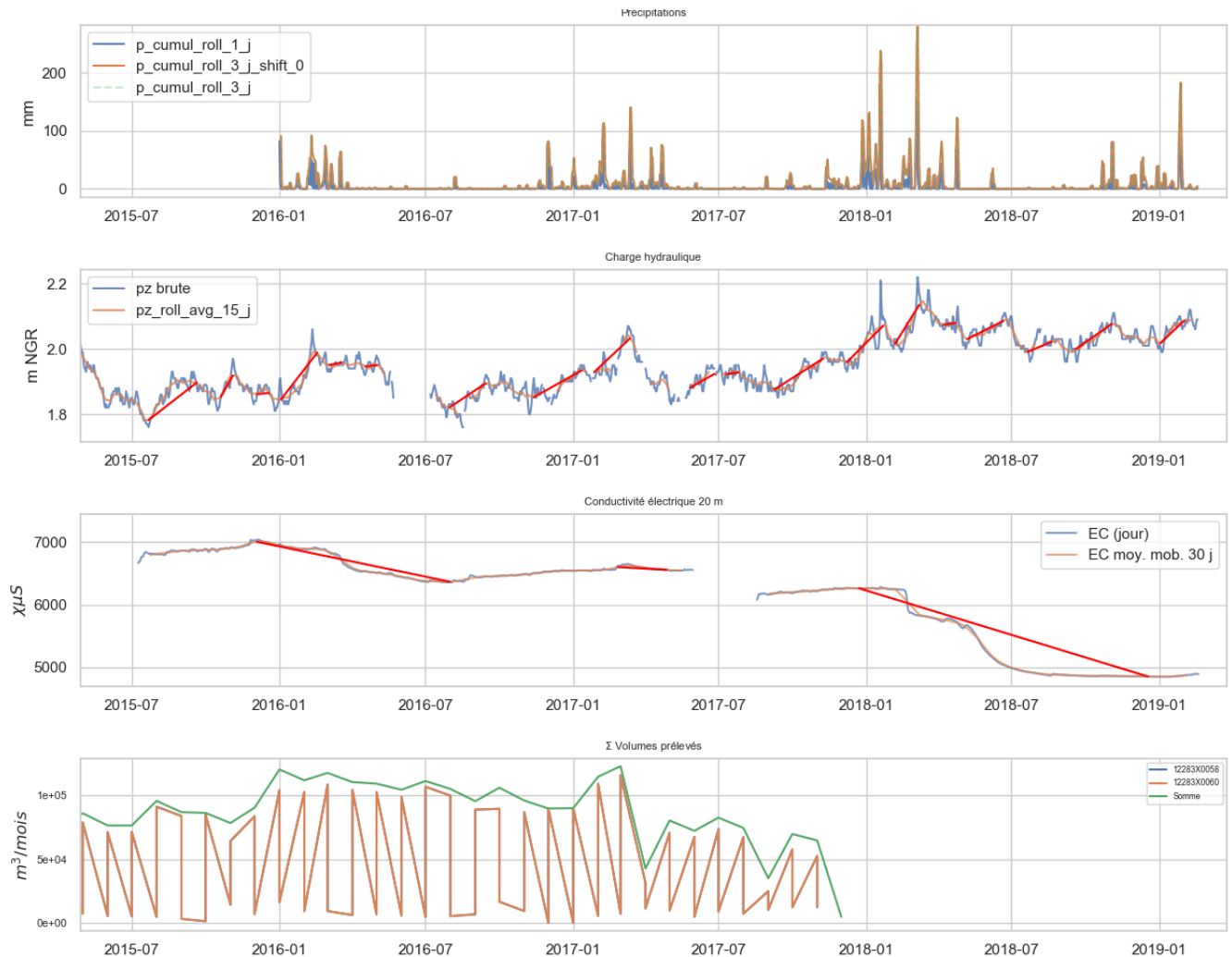


Illustration 22 – Combinaison des différentes informations disponibles sur un point : pluviométrie en haut, puis : piézométrie brute, moyennée sur 15 jours, et périodes de hausses identifiées, conductivité journalière, moyennée sur 15 jours, et périodes de baisses identifiées, et volumes prélevés. Les légendes (encarts sur chacun des graphiques) rappellent les données qui ont été recherchées et affichées (si la donnée n'existe pas : pas de courbe, mais une trace dans la légende). Note : pour ce cas particulier, la base de données ne comportait pas de valeur pour l'année 2018.

4.4. SYNTHÈSE PAR PIEZOMETRE

L'ensemble des éléments méthodologiques présentés dans les paragraphes précédents ont permis d'élaborer le tableau de synthèse présenté au tableau 9. L'ensemble des graphiques sur la base desquels le tableau a été renseigné est présenté dans l'annexe 1.

De cette analyse il ressort les points suivants :

- Pour de nombreux piézomètres, le manque de simultanéité des chroniques est un frein à une analyse plus avancée. En effet, le nombre d'événements de baisses de conductivités qu'il est possible de comparer à des événements de pluie constitue un ensemble de petite taille (quelques individus, quelques dizaine d'individus). ;
- Il est possible d'identifier des périodes pendant lesquelles la recharge semble prendre place : hausse de piézométrie, accompagnée d'une baisse de conductivité, mais la méthode développée ici provoque aussi la sélection de nombreux 'faux positifs', c'est-à-dire des épisodes de hausse piézométrique sans lien avec la pluviométrie, et des épisodes de baisse de conductivité électrique sans lien avec une hausse de la piézométrie. Cela est dû, de manière assez probable, à l'existence à des signaux 'parasites', notamment liés à la connexion avec l'océan, qui perturbent le signal piézométrique et de conductivité pour une partie des puits. Pour le reste, il apparaît que l'approche consistant à travailler sur des signaux moyens puisse masquer une partie du signal recherché, mais reste néanmoins nécessaire au regard de la structure des signaux (additions de plusieurs composantes).
- Pour de nombreuses périodes de 'recharge' identifiées (hausse de piézométrie), il n'est pas possible de les mettre en relation le signal de la pluie. Il semble nécessaire de déconvoluer le signal piézométrique pour retirer notamment l'influence de la marée et des variations océaniques (houle, marée, effet du vent ou d'une dépression...).
- Les épisodes de hausses piézométriques (assimilés à de la recharge) sont retrouvés à des périodes variables suivant les ouvrages entre septembre et février. Ces épisodes sont en général d'une longueur de quelques semaines, ou de l'ordre du mois
- Les points 12262X0064(forage FT5 - nappe inférieure - Plaine des Galets) et 12265X0027 (piézomètre Ermitage) présentent des chroniques de bonne qualité et un suivi sur une durée importante. Ces points pourraient faire l'objet d'une analyse en particulier, pour essayer de mettre en place une méthode quantitative. Il s'agirait d'évaluer plus en détails les flux (Pluie, ETP, recharge) en lien avec les différents épisodes de recharge identifiés (hausse de piézométrie liée à une baisse de conductivité).
- L'analyse de la relation entre la pluie et la piézométrie montre très souvent un comportement bimodal. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse de ces relations, afin de faire la part de ce qui est relatif au transfert de pression, de ce qui est relatif au transfert de masse délayé dans le temps (à travers la ZNS par exemple), ou à la possible réinfiltration de la lame d'eau ruisselée ('pertes' dans les ravines).

MESO	Codex	Nom	Remarque signal piézométrique	Interprétation Acf Pz	Station pluie	CCF Pluie/Pz	Cumul de pluie à considérer d'après la matrice corrélation pluie/pz	Nb épisodes recharge pz.	Période recharge	Profondeur mesure CE	Description signal EC	CCF P/EC	Cumul de hausses piézo à considérer d'après la matrice de corrélation	Nb épisodes basses conductivité	Période des pics aux basses	Evolution des volumes	remarque volumes	Recommandation conductivité	recommandation données prélèvements	Remarque générale
109	12283X0066	PIEZOMETRE 3 ETANG SALE - P3 PONT NEUF FORĂȘT DOMANIAL		Cyclicité annuelle	Tan rouge	réponse complexe de la piézométrie, suivant plusieurs modalités : réponse rapide + différée (pics à 15, 70, 100 jours)	Pluie cumulée sur 5 jours	48	sept à février	3	très peu donnée, seulement en 2014, 2015, et lacunaires							ne pas considérer ce signal		
										20	Petite lacune en 2017, mais signal continu sinon	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 200 jours)	cumul sur 30 à 45 jours, avec un délai de 25 à 45 jours	5	pas interprétable, trop peu de données	orientés à la baisse entre 2016 et 2018	pas de données en 2018	poursuivre le suivi pour disposer d'une dizaine d'épisodes de recharge	poursuivre l'acquisition	manque de données synchrones P/P/EC/Volume, peu d'épisodes de recharge documentés. Poursuivre le suivi
										35	nombreuses lacunes, notamment en 2017							poursuivre le suivi pour disposer 3 années complètes au moins		
110	12266X0080	PIEZOMETRE P5 GRAND E RAVINE		cyclicité annuelle	piton maido	Réponse rapide (1j), puis aux alentours de 30 jours	Pluie cumulée sur 5 jours + délai 15 jours	70	nov à février	0	signal très continu, mais s'arrête en 2015	réponse bi-modale : très rapide (qq jours) + plus lente (env. 30 jours)	cumul sur 75 jours, sans décalage	18	nov-février	très forte hausse entre 2013 et 2014, puis retour aux valeurs passées				données uniquement entre 2012 et 2015
										2	données à partir de 2017, mais lacunes + pas de données en 2018									poursuivre le suivi
										14	données uniquement en 2015									ne pas considérer
										29	3 mois de données en 2015									ne pas considérer
	12266X0038	SONDAGE RECONNAISSANCE SALINE LES BAS TROU D'EAU	signal très lacunaire à partir de 2014, pas de données en 2015, pas de données en 2018	pas interprétable	tan rouge	réponse rapide (1j) + plus lente (30j)	pluie cumulée 7 jours + décalage 10 jours	15	janvier ? - très peu de données	0	à partir de 2017 uniquement, mais lacunaire en 2017	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 200 jours)	pas assez de données de conductivité	1	pas interprétable, trop peu de données	pas de volumes associés		poursuivre le suivi pour disposer 3 années complètes au moins	poursuivre l'acquisition	manque de données synchrones P/P/EC/Volume, peu d'épisodes de recharge documentés. Poursuivre le suivi
	12265X0027	PIEZOMETRE HERMITAGE	très long suivi depuis 1992	Cyclicité annuelle + interannuelle (inertiel)	tan rouge	réponse rapide (1j)	pluie cumulée 5 jours + décalage 5 jours	161	décembre-janvier	28	signal très continu depuis 2013, sauf lacune en 2014	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 150 jours)	cumul sur 45 jours, décalage 35 jours	17	décembre	en légère hausse	manque 2018		poursuivre l'acquisition	jeu de donnée de bonne qualité pour approfondir l'analyse

M E S O	C o d e B S S	Nom	Remarque signal piézométrique	Interprétation Acf Pz	Station pluie	CCF Pluie/Pz	Cumul de pluie à considérer d'après la matrice corrélation pluie/pz	Nb épisodes des recharges pz.	Période de recharge	Profondeur mesure CE	Description signal EC	CCF P/EC	Cumul de hausse piézo à considérer d'après la matrice de corrélation	Nb épisodes des basses conductivité	Période des propagations aux basses	Evolution des volumes	remarque volumes	Recommandation conductivité	recommandation données prélèvements	Remarque générale
										34	présence de plusieurs lacunes	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 150 jours)	cumul sur 30 à 45 jours décalé de 5 à 35 jours	13	février, novembre	en légère hausse	manque 2018			
1 2 2 6 2 X 0 1 7 0	PIEZOMETRE P13 CAMBAIE	très long suivi depuis 1992, avec quelques lacunes	Cyclicité annuelle + interannuelle (inertiel)	tan rouge	réponse lente et tamponnée	pluie cumulée 1 jours + décalage 35 jours	104	décembre- février	42	depuis 2015, petite lacune en 2018	réponse lente et différée dans le temps (pic à 30 jours env.)	pas interprétables, de nombreuses périodes de baisses de EC ne peuvent pas être expliquées	22	décembre- février	en hausse depuis 2015	manque 2018		poursuivre l'acquisition	relation pz/EC plus complexe que sur les masses d'eau 110	
									62	présence de nombreuses lacunes	réponse lente et différée dans le temps (pic à 30 jours env.)	pas interprétables, de nombreuses périodes de baisses de EC ne peuvent pas être expliquées	9	pas interprétable, trop peu de données				s'appuyer sur la conductivité à 42 mètre dont le signal est plus robuste		
									1 2 2 6 2 X 0 1 6 2	PROJET CENTRALE THERMIQUE EDF BAIE DE SAINT-PAUL	Cyclicité annuelle	tan rouge	réponse lente et tamponnée	pluie 1 jour	46	janvier- février	11		non interprétable, dans la limite de confiance	cumul sur 45 jours, sans délai
1 2 2 6 2 X 0 5 2 5		FORAGE P3-C (NIVEAU INFÉRIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON	Très inertiel, décroit lentement jusqu'à 300 jours	tan rouge	pic entre 50 et 120 jours	pluie cumulée 3 ou 5 jours + décalage 50/55 jours	23	octobre- février	128	entre 2015 et 2017, au moment où il existe des lacunes en piézométrie	non interprétable, dans la limite de confiance	cumul 90 jours + délai 40 jours, mais sans doute à la limite de l'interprétation	13	février, mars ? Peu de données	pas de volumes associés				plus de données actuelles. Peu de moment où les données sont raccord (Pz/EC). Soit poursuivre le suivi, soit à ne pas considérer	
1 2 2 6 2 X 0 1 7 4		PIEZOMETRE CHEMIN DES ANGLAIS (NAPPE INFÉRIEURE)	Cyclicité annuelle	Tan rouge	pic à 4 jours puis décroît lentement jusqu'à 40 jours	Pluie cumulée sur 3 ou 15 jours, décalage 5 jours	98	décembre- février	64		Réponse lente et différée dans le temps (pic à 200 jours)	cumul 60 jours, décalage 5 à 15 jours	9	janvier - février	hausse en 2017 ? Effet de l'intégration de nouvelles données uniquement a priori	2018				

M E S O	C o d e B S S	Nom	Remarque signal piézométrique	Interprétation Acf Pz	Station pluie	CCF Pluie/Pz	Cumul de pluie à considérer d'après la matrice corrélation pluie/pz	Nb épiso des recharge pz.	Période de recharge	Profondeur mesure CE	Description signal EC	CCF P/Ec	Cumul de hausse piézo à considérer d'après la matrice de corrélation	Nb épisodes basses conductives	Période des propagations aux basses	Evolution des volumes	remarque volumes	Recommandation conductivité	recommandation données prélèvements	Remarque générale
	12262X0157	PROJET CENTRALE A CHARBON EDF BAIE POSSESSION	plusieurs lacunes en 2015, 2016, s'arrête en 2017	cyclicité annuelle	Tan rouge	réponse bimodale avec réponse rapide (qq jours) puis plus lente (40 jours)	pluie cumulée 1 jours, décalage 15 jours/ ou cumul sur 30 jours, sans décalage	11	pas assez de données pour interpréter	1	présence de deux forts pics fin 2015 et début 2016, au même moment que des lacunes en piézo. Signal vrai ou artéfact ?	réponse rapide à 19 jours	difficile à interpréter, très peu de correspondance entre les hausses pz et les baisses de conductivité	11	pas interprétable, trop peu de données	stable a priori	manque données entre 2015 et 2017, puis après 2018			éclaircir les raisons de l'existence des pics en 2015, 2016. Si pas de suivi pz, actuel, l'analyse ne peut pas être conduite plus loin.
	12262X0064	FORAG E FT5 (NAPPE INFÉRIEURE) PLAINE DES GALETS	continu depuis 2011	cyclicité annuelle	tan rouge	pluri-modale, avec réponse rapide à qq jours, puis autour de 30 jours, puis autour de 70 jours	pluie cumulée 1 à 3 jours, décalage 35-40 jours	46	décembre-février + octobre ?	2	continu depuis 2015	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 150 jours)	45 à 60 jours, décalage de 20 à 60 jours, mais interprétation soumise à caution car nb de baisses est faible	15	à la limite de l'interprétation. Février-mars ?	légère hausse depuis 2015	pas de données en 2018			jeu de donnée de bonne qualité pour approfondir l'analyse
	12262X0056	FORAG E P3-A (NIVEAU SUPÉRIEUR), PLAINE DES GALETS - ARISTIDE BOLON		cyclicité annuelle	tan rouge	très forte dépendance à la pluie, autour de 100 jours : réponse tamponnée	pluie cumulée entre 5 et 12 jours sans décalage + même signal avec un décalage de 100 jours	16	décembre, janvier	19	pic en 2017 suivi d'une longue baisse depuis	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 200 jours)	pas interprétable, trop peu d'épisodes de baisses	8	pas interprétable, trop peu de données	réduction 2004-2012, stable depuis	pas de données en 2015, 2016 alors que forte hausse de la conductivité.		essayer de documenter l'année 2015 et 2016 + poursuivre le suivi	investiguer la baisse continue de conductivité depuis 2017, rare chronique à présenter ce comportement
										25	signal très similaire à 19 mètres									
	12262X0186	FORAG E P18 CAMBAIE	données historiques en 1996, puis à nouveau à partir de 2015, mais s'arrête en 2017	cyclicité annuelle	tan rouge	réponse très tamponnée	pluie cumulée 12-30 jours sans décalage	20	novembre-février	84	à partir de 2015, lacune en 2018	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 200 jours)	pas interprétable, trop peu d'épisodes de baisses	6	pas interprétable, trop peu de données		pas de volumes associés	poursuivre le suivi		poursuivre le suivi conducti + piézométrie
										94	signal très différent de 84 mètres	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 300 jours)	cumul 90 à 100 jours+ décalage 20 j, mais nb de baisses très faibles	14	pas interprétable, trop peu de données					expliquer les différences entre 84 et 94 mètre, ou ne cibler qu'une seule profondeur, en fonction du niveau exploité
										103	signal plus similaire à 94 mètres que 84 mètres	Réponse lente et différée dans le temps (pic à 300 jours)	cumul 90 à 135 jours sans décalage, mais nb de baisses très faibles	13	pas interprétable, trop peu de données					expliquer les différences entre 103 et 84/94 mètre, ou ne cibler qu'une seule profondeur, en fonction du niveau exploité

M E S O	C o d e B S S	Nom	Remarque signal piézométrique	Interprétation Acf Pz	Station pluie	CCF Pluie/Pz	Cumul de pluie à considérer d'après la matrice corrélation pluie/pz	Nb épiso des recharge pz.	Période de recharge	Profondeur mesure CE	Description signal EC	CCF P/Ec	Cumul de hausse piézo à considérer d'après la matrice de corrélation	Nb épisodes basses conductivité	Période des propagations aux basses	Evolution des volumes	remarque volumes	Recommandation conductivité	recommandation données prélèvements	Remarque générale
1 2 2 6 2 X 0 5 2 2 4	FORAG E P3-B (NIVEAU MOYEN)	PLAINES DES GALETS - ARISTIDE BOLON	signal continu depuis 2014 + synchrone à EC	cyclicité annuelle	tan rouge	réponse très tamponnée (70 jours)	pluie cumulée 15 jours, décalage 5 jours	22	octobre- février	64	difficilement interprétable, à la limite de la significativité	cumul 45 jours, sans décalages	13	pas interprétable, trop peu de données		pas de volumes associés				jeu de données de bonne qualité pour approfondir l'analyse, en poursuivant le suivi au moins 1 à 2 ans
										69										

Tableau 9 - Synthèse de l'analyse de i) l'identification des périodes de hausses de piézométrie, ii) de baisse de conductivité et des relations entre ces signaux.

5. Conclusions et perspectives

L'analyse des données disponibles pour les masses d'eau FRLG109, 110 et 112 a montré qu'il existe de nombreuses données, mais dont l'intégration et l'interprétation nécessite une rigueur numérique relativement poussée.

Le format de stockage et d'échange des données est un point critique de l'approche développée ici, notamment pour les données de prélèvements. Une proposition d'amélioration consistant à adopter un référentiel de stockage et de partage de la donnée est faite pour éliminer ce problème pour les travaux futurs.

La démarche adoptée pour l'analyse des données a visé la description des signaux disponibles, première étape avant d'envisager des méthodes plus avancées d'évaluation des flux. La compréhension de la dynamique liant les différents signaux (pluie, piézométrie, conductivité) permet de proposer une approche comparative quantifiée.

L'analyse des données de piézométrie et de conductivité électrique a été conduite de manière à intégrer les forçages externes telles que les variations océaniques. Toutefois, le signal recharge est quelquefois trop masqué par d'autres facteurs pour bénéficier de résultats pertinents. En effet, bien qu'il soit possible d'identifier les périodes de 'recharge' (hausse de piézométrie conjuguée à une baisse de conductivité), de nombreux faux positifs restent présents dans l'analyse. En conséquence, les signaux sont sous l'influence de la variation du niveau océanique. Il apparaît donc nécessaire de mettre en œuvre des solutions pour filtrer l'influence de niveau océanique afin de ne travailler que sur le signal de la recharge, avant toute chose. Dans cette perspective, un projet orienté vers la 'déconvolution' des signaux semble une étape complémentaire à mettre en œuvre. Il s'agirait i) d'étudier finement les forçages qui s'expriment dans le signal de conductivité, ii) cela en perspective du contexte géographique et géologique (distance de l'océan et nature de l'aquifère), climatique et hydrogéologique ; iii) de proposer des familles (ou classes) de comportements homogènes et enfin iv) par famille, de chercher, concevoir et appliquer des méthodes numériques capables de retrancher tout ou partie de la composante océanique. A l'issue, la poursuite des approches proposées ici semblerait plus fructueuse, le signal résiduel pouvant alors être attribué avec certitude à l'effet de la pluie (ou pluie efficace).

Il ressort par ailleurs de la présente analyse le besoin de continuer et consolider le suivi des ressources en eau souterraine. A ce titre, de nombreux ouvrages disposent de périodes de suivi trop courtes au regard des phénomènes d'intérêt. Il est en effet nécessaire que soient disponibles, sur plusieurs cycles hydrologiques, les 3 principaux paramètres à traiter : piézométrie, conductivité et prélèvement. Ce point est une condition nécessaire au calcul des EVP. Par ailleurs, afin de décrire la recharge, il est nécessaire de disposer d'un nombre d'observations suffisantes sur celle-ci. Le plus souvent, le nombre d'épisodes de 'recharge' est évalué à une dizaine, au cours de 2 à 3 années hydrologiques disponibles. De manière générale, il convient donc de poursuivre le suivi en piézométrie et conductivité, pour atteindre 4 à 5 années de suivi au minimum.

La réponse de la piézométrie à la recharge apparaît souvent comme bimodale, c'est-à-dire qu'une réaction rapide est observée, suivi d'une ou plusieurs réponses, différées dans le temps. Ce mécanisme peut être interprété comme une double dynamique de transfert de pression : une dynamique rapide de la pluie à proximité du point d'observation (la pression augmente quasiment immédiatement dans l'aquifère en réponse à la pluie) et une dynamique plus lente (la pression

augmente suite à un transfert à travers une zone saturée épaisse ou en raison d'une recharge éloignée du point d'observation). Il est probable que ce caractère bimodal soit en relation avec les mécanismes de ruissellement/ré-infiltration au sein du bassin versant. Il serait d'intérêt de documenter plus finement l'existence/absence et d'évaluer des flux liés à de la réinfiltration dans les ravines.

Deux jeux de données (12262X0064 - Forage FT5 - nappe inférieure - Plaine des Galets) et 12265X0027 (piézomètre Ermitage) ont été identifiés comme étant des sujets pertinents à étudier la perspective d'approfondir les points d'intérêts.

Pour ces jeux de données, il serait possible d'envisager plusieurs méthodes pour parvenir à des flux de recharge et appréhender une méthode permettant une évaluation des volumes prélevables :

- Modèles multivariés, qui visent à simuler l'évolution de la conductivité électrique en prenant en compte les paramètres d'entrée suivant : pluie, piézométrie, prélèvement ;
- Une approche similaire avec le logiciel de modélisation globale TEMPO pourrait être envisagée ;
- Modèles globaux du type réservoir, capable de simuler la conductivité électrique (dilution, ou position de l'intrusion saline) ou code spécifique à développer.

Pour cela, il sera par ailleurs nécessaire de considérer plus finement le signal de pluie, notamment évaluer le besoin de spatialiser le signal de pluie et l'élimination des pluies de faible importance, ou des pluies très intenses.

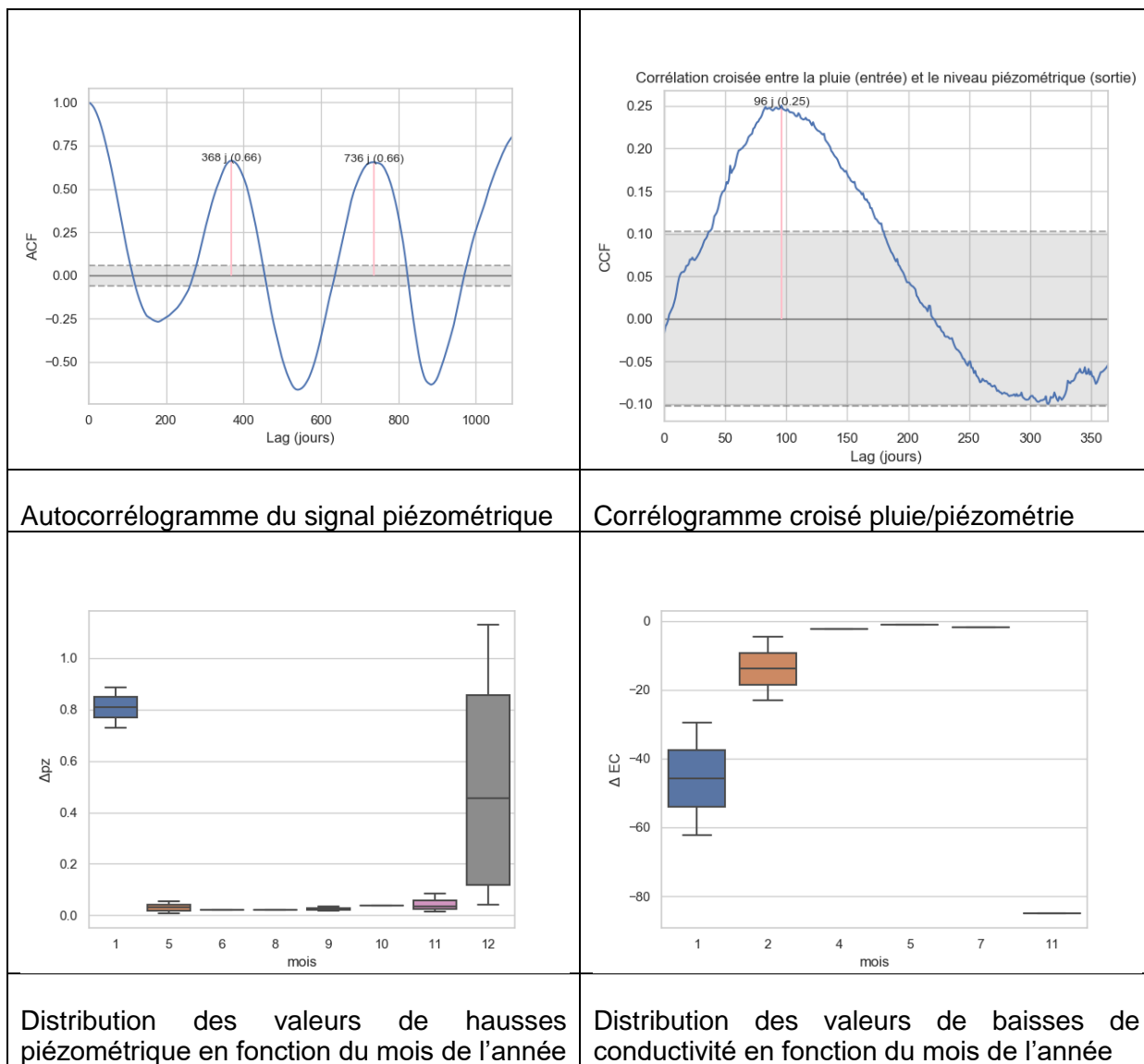
Enfin, les données relatives aux volumes prélevés doivent être bancarisées dans un format exploitable (base de données). Faute de données fournies, l'accent n'a pas été mis sur la valorisation de ces données, mais il apparaît au regard des autres signaux qu'un signal mensuel est un minimum, et que toute donnée plus précise contribuerait à une meilleure analyse.

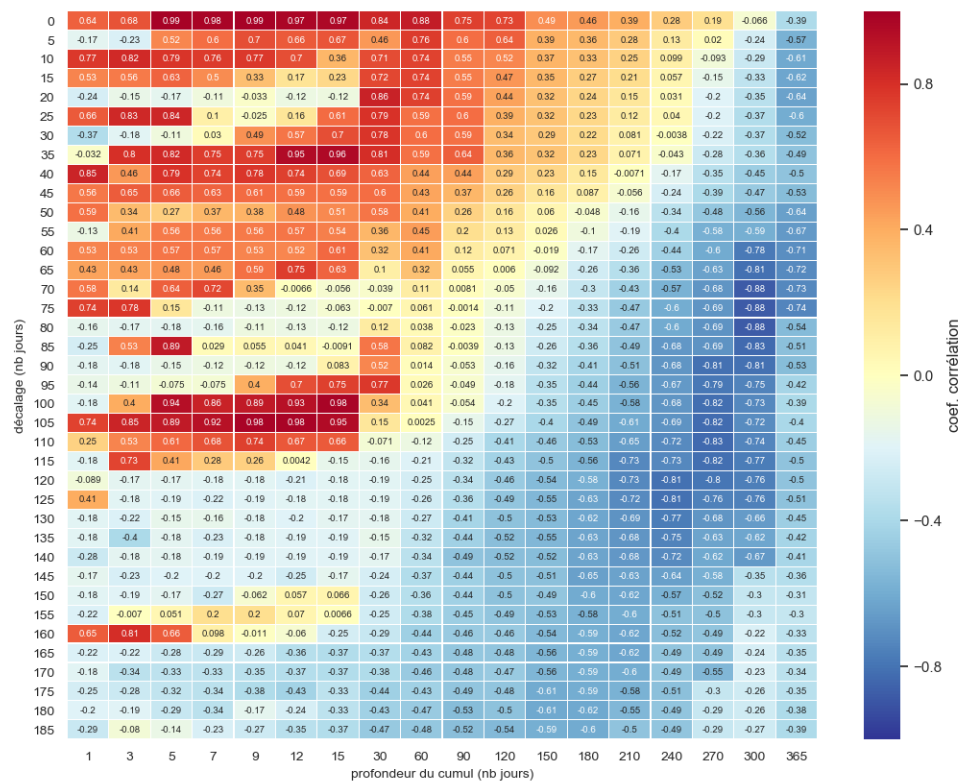
6. Bibliographie

- Antea, 2009. Cône alluvial de la rivière des galets (No. Rapport_54084_B_PHASE_1). La Réunion.
- Arnaud, L., 2016. Estimation des volumes prélevables dans les aquifères à nappe libre : retour d'expériences sur les méthodes utilisées, identification des problèmes rencontrés, recommandations. (No. BRGM/RP-64615-FR).
- Bredehoeft, J.D., 2002. The Water Budget Myth Revisited: Why Hydrogeologists Model. Ground Water 40, 340–345. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02511.x>
- Charlier, J.-B., Aunay, B., 2017. Proposition de délimitation de secteurs sensibles en vue de déterminer les Zones de Répartition des Eaux (ZRE) à La Réunion. (No. Rapport BRGM/RP-65956-FR).
- Comité de Bassin de La Réunion, 2015. SDAGE 2016-2021 - Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.
- Dumont, M., Aunay, B., 2017. Atlas des résistivités issues du levé électromagnétique hélicoptère de La Réunion : apport à la connaissance de l'intrusion saline côtière (No. Rapport BRGM/RP-66629-FR).
- Frissant, N., Barthelemy, L., Petit, V., 2006. Synthèse des ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables à La Réunion (No. BRGM/RP-55035-FR). La Réunion.
- Gombert, P., 2000. Bilan et synthèse hydrogéologique de quinze années de recherche (No. RP0H018). Hydroexpert, La Réunion.
- Lanini, S., Petit, V., 2015. Définition par modélisation des recommandations de pompage pour les puits du Gol. (Rapport final No. BRGM/RP-62893-FR). BRGM, <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62893-FR.pdf>.
- Petit, V., Aunay, B., Charlier, J.B., Dufrenoy, R., Surdyk, N., 2013. Référentiel Hydrogéologique Français BDLISA. Délimitation des entités hydrogéologiques de la Réunion. Rapport final Mise à jour BDLISA Version 0 (No. BRGM/RP-63052-FR).
- Petit, V., Aunay, B., Stollsteiner, P., 2012. Adéquation des ressources et des besoins en eau sur le secteur de Trois-Bassins. (No. BRGM/RP-60331-FR). BRGM.
- Petit, V., Dewandel, B., Charlier, J.-B., Olivier, P., Lucas, C., Olivia, Z., 2013. Amélioration de la connaissance hydrogéologique de l'aquifère côtier du Gol. Rapport intermédiaire. (No. BRGM/RP-61834-FR).

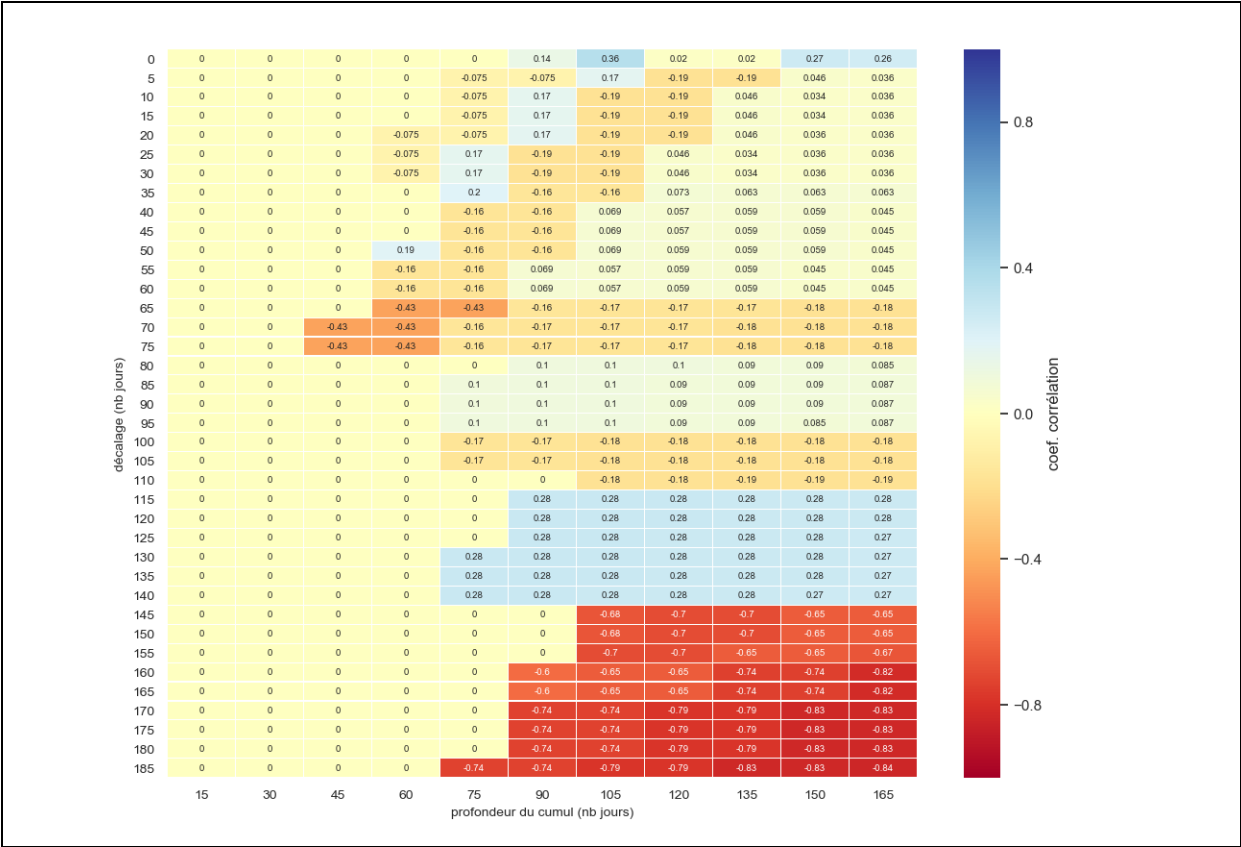
Annexe 1 – Détails des illustrations par piézomètre

12262X0056_19m

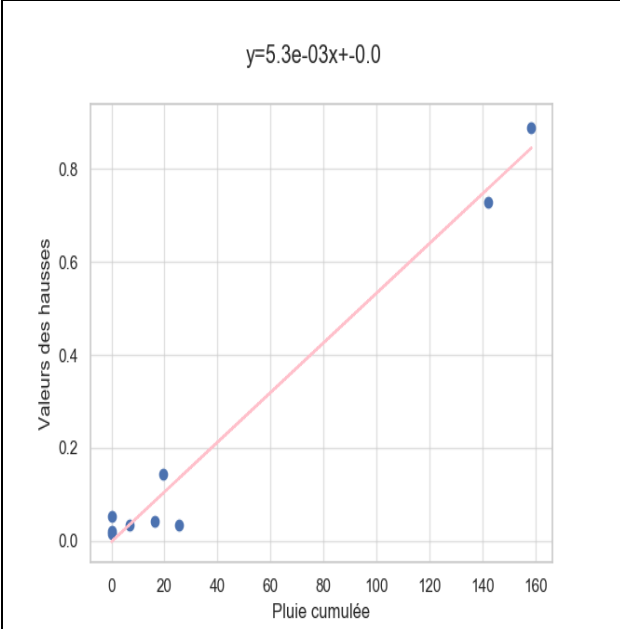




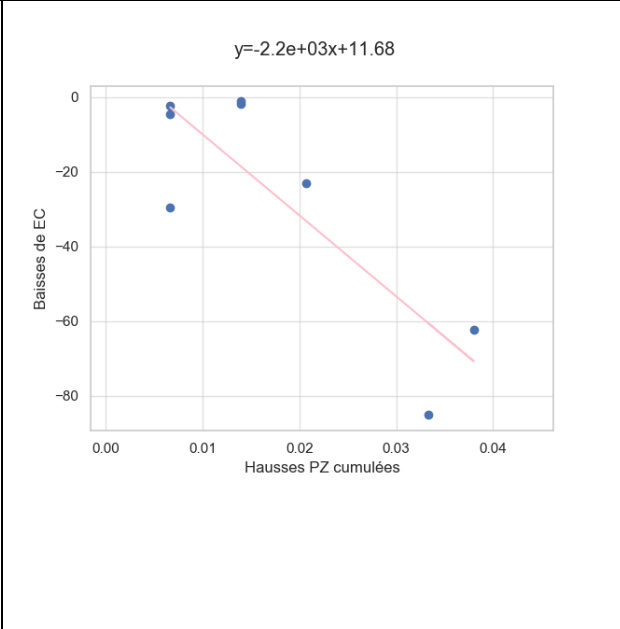
Matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



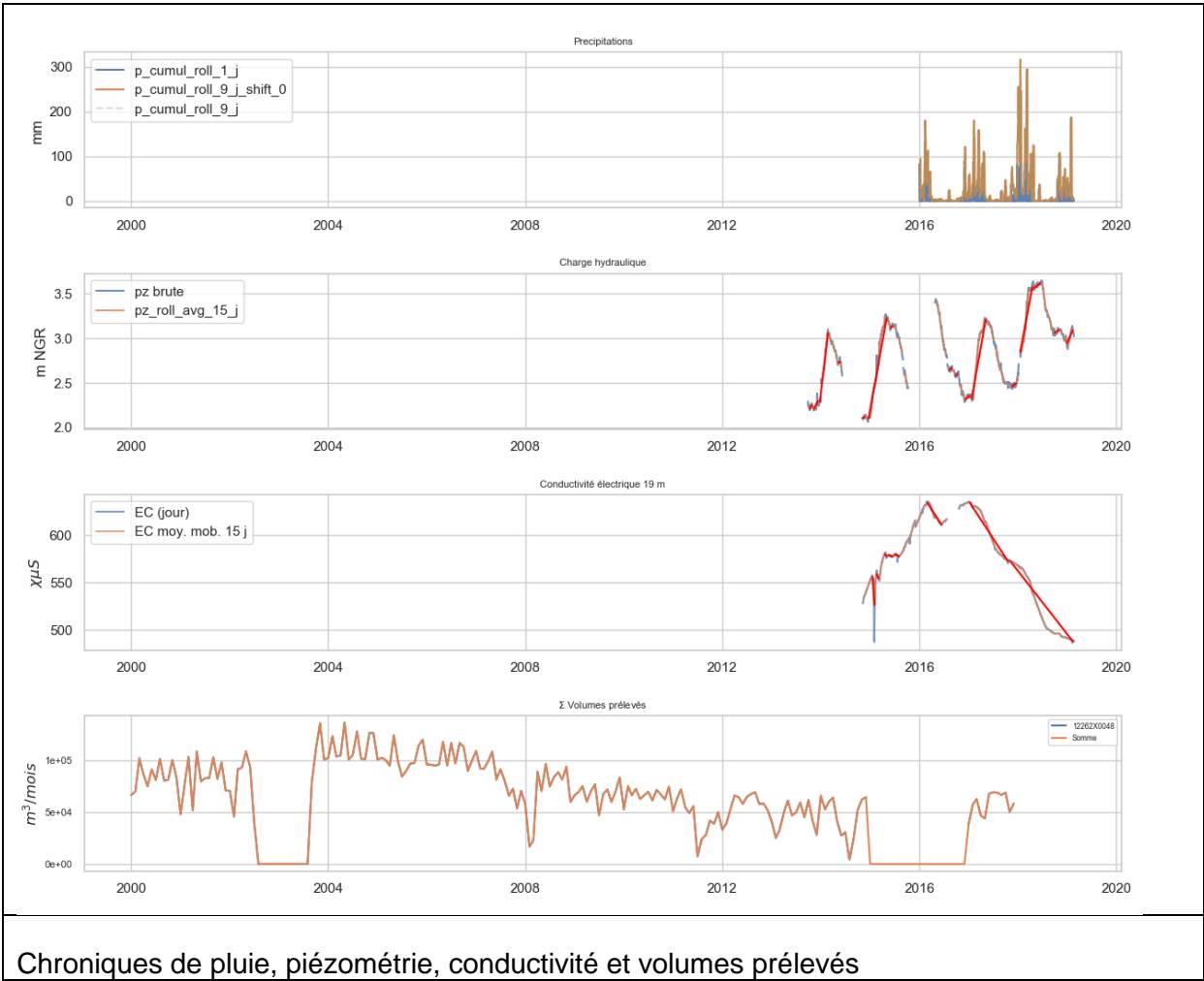
Matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



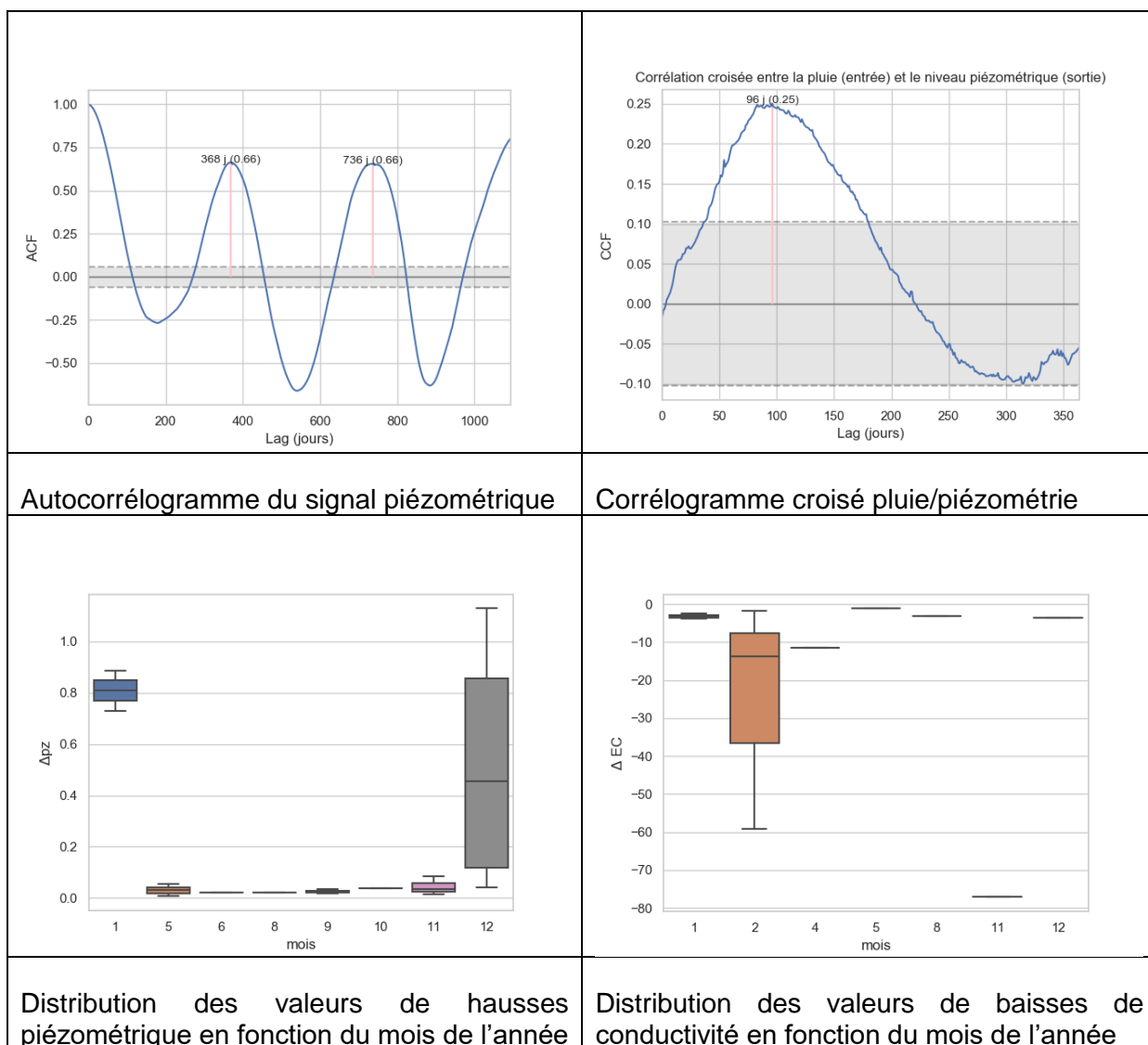
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

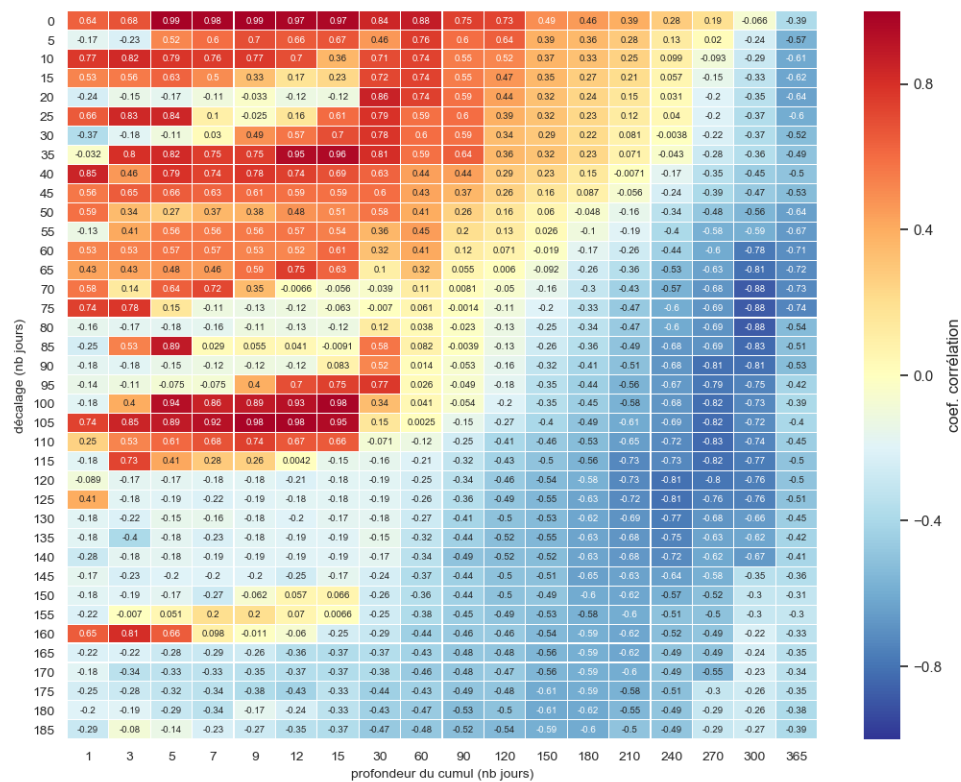


Relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

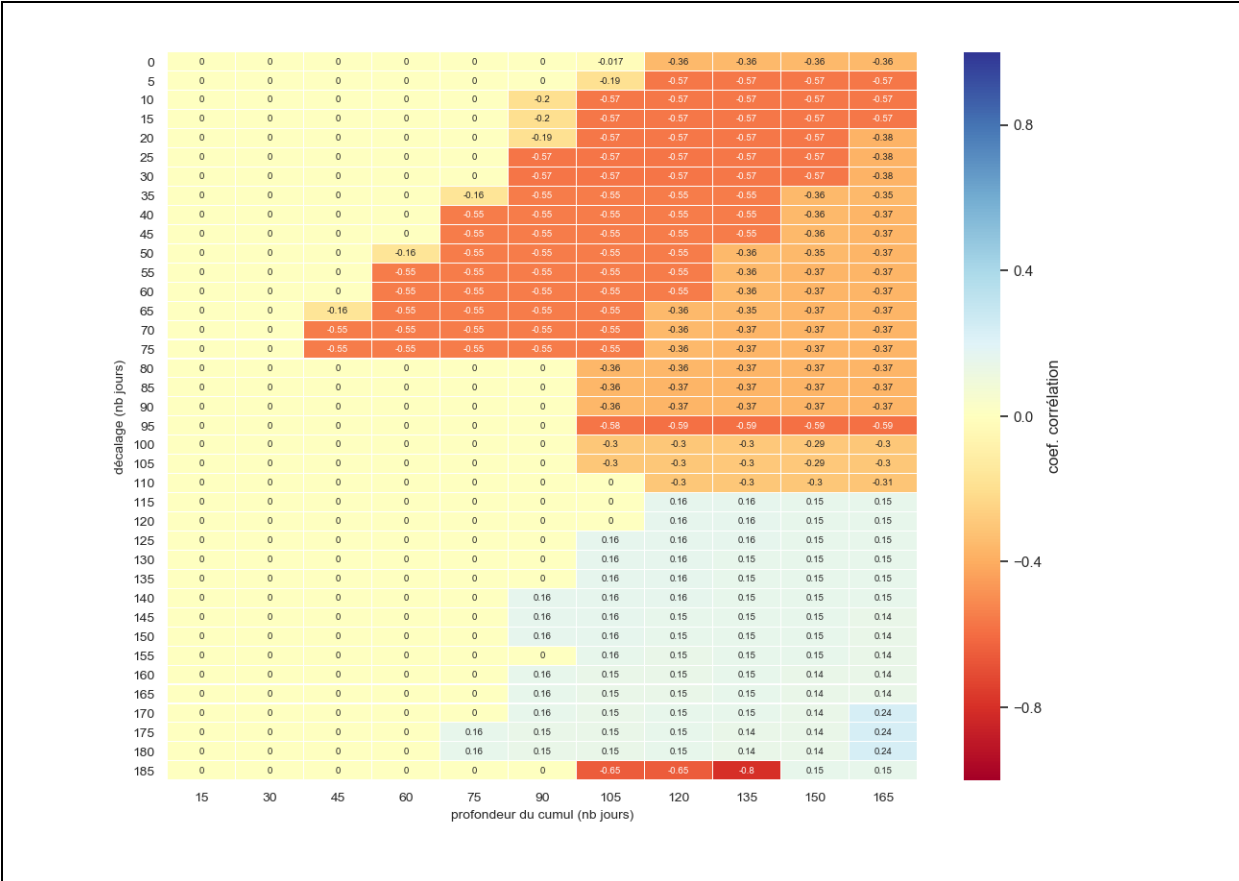


Chroniques de pluie, piézométrie, conductivité et volumes prélevés

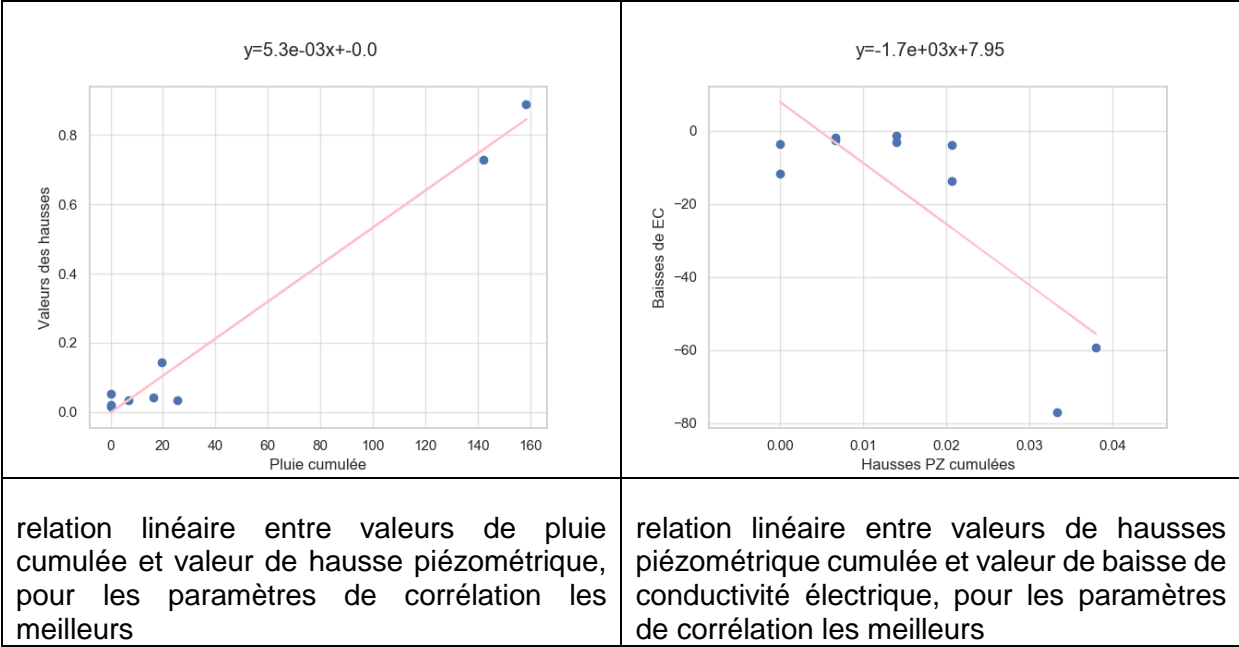
12262X0056_25m

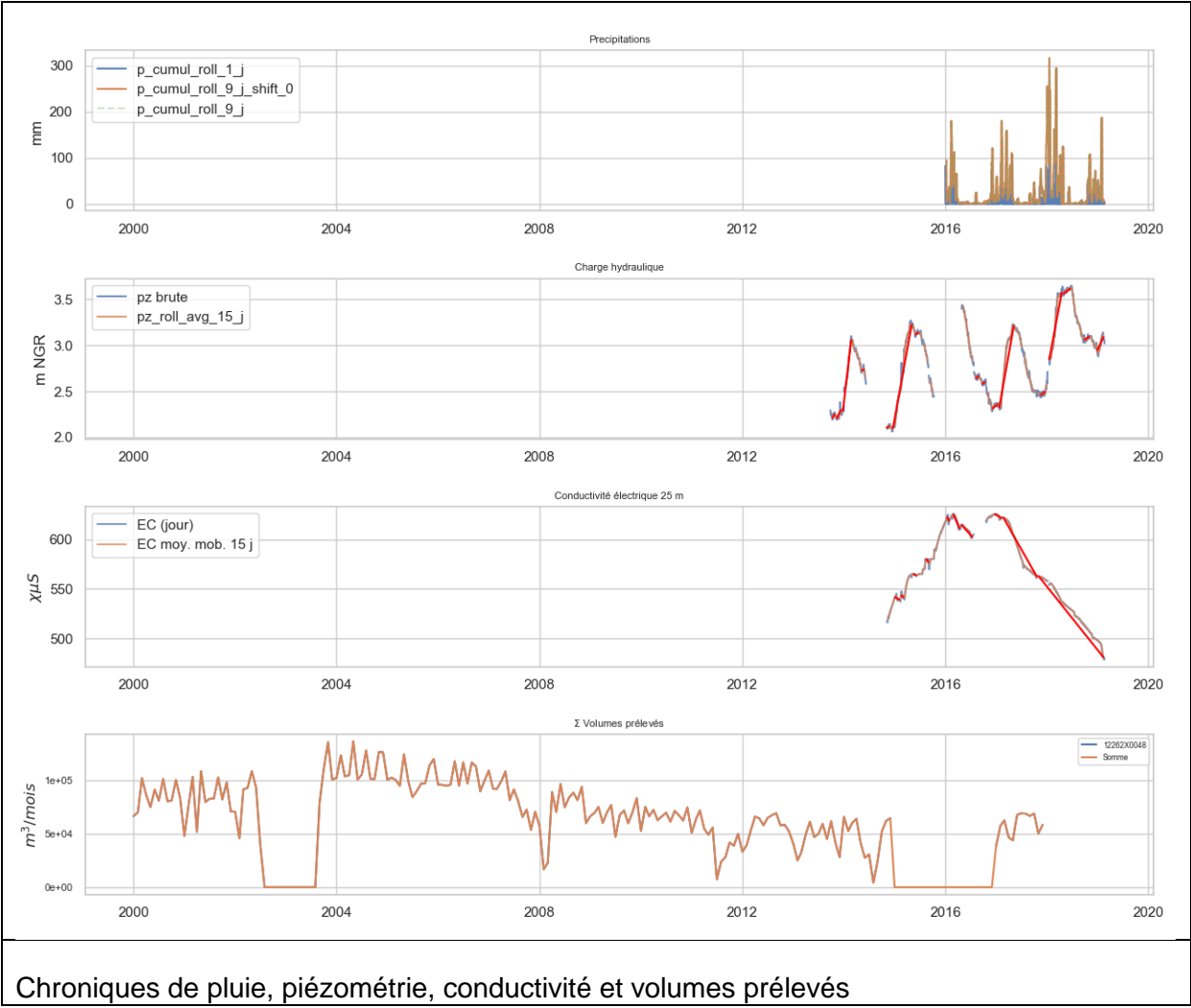


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

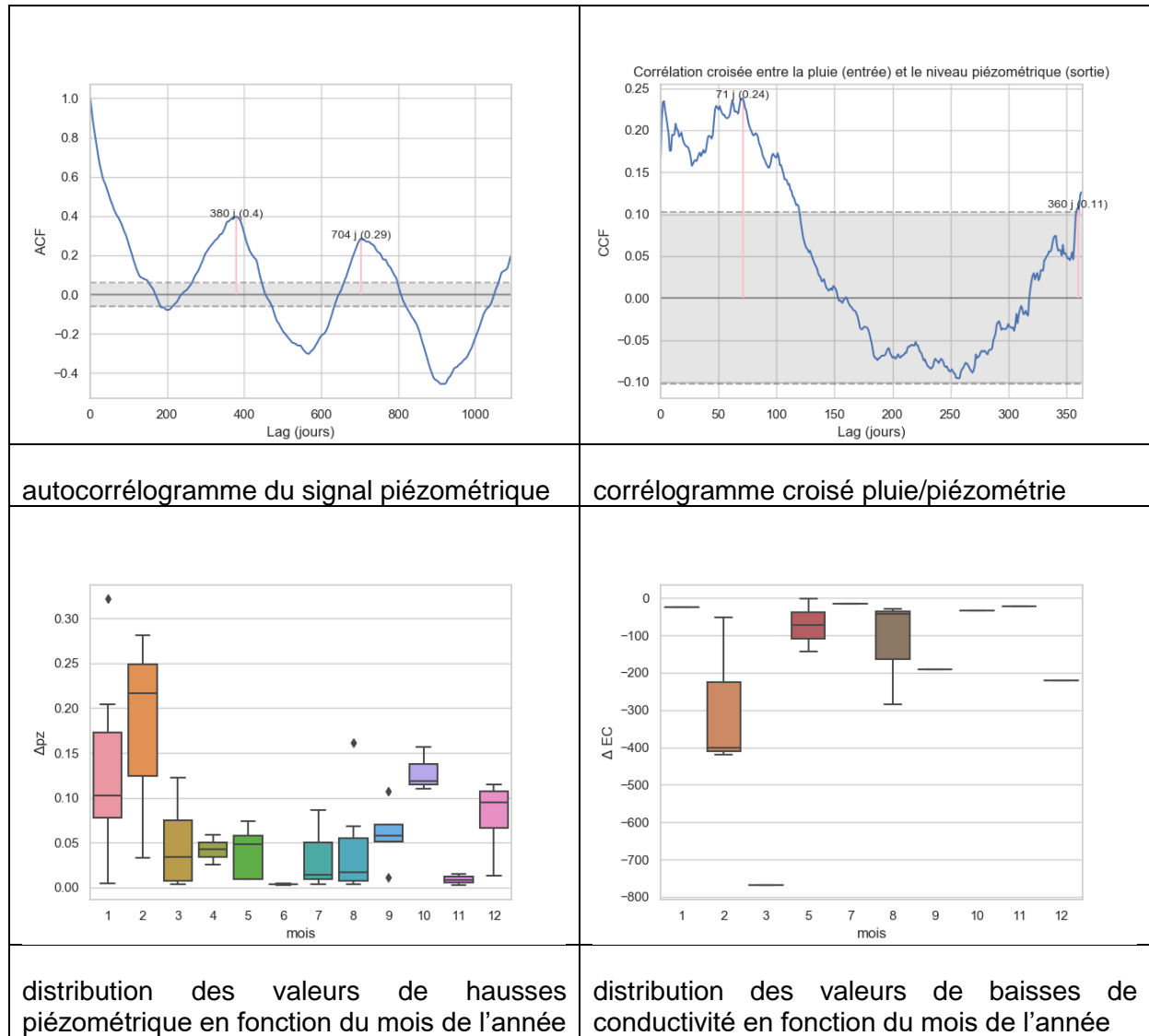


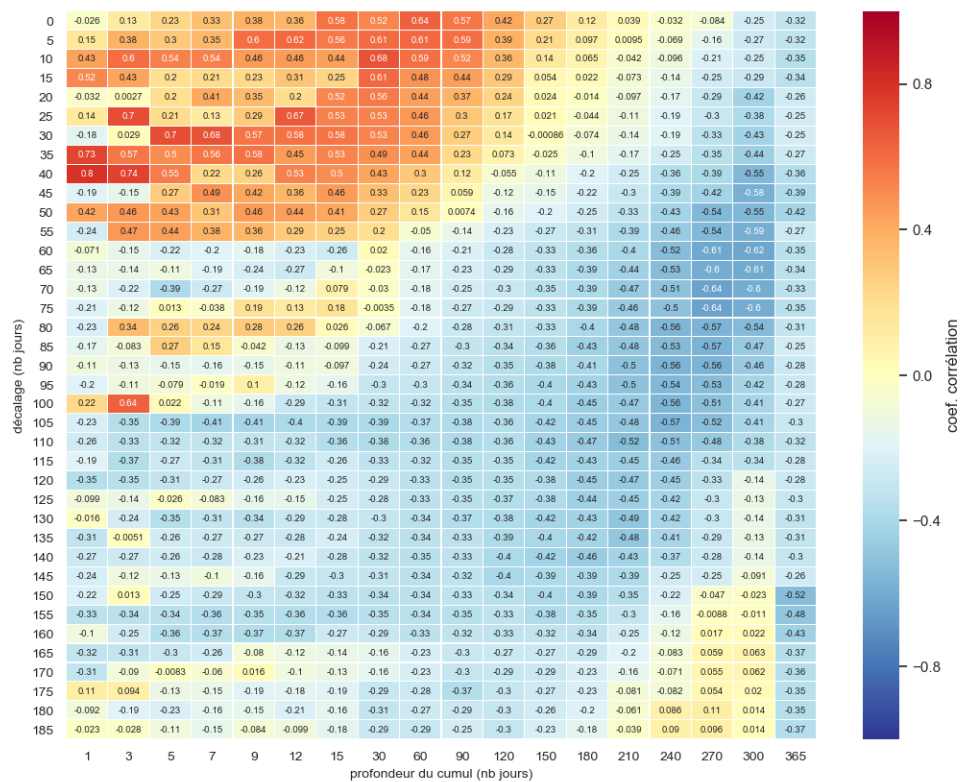
Matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



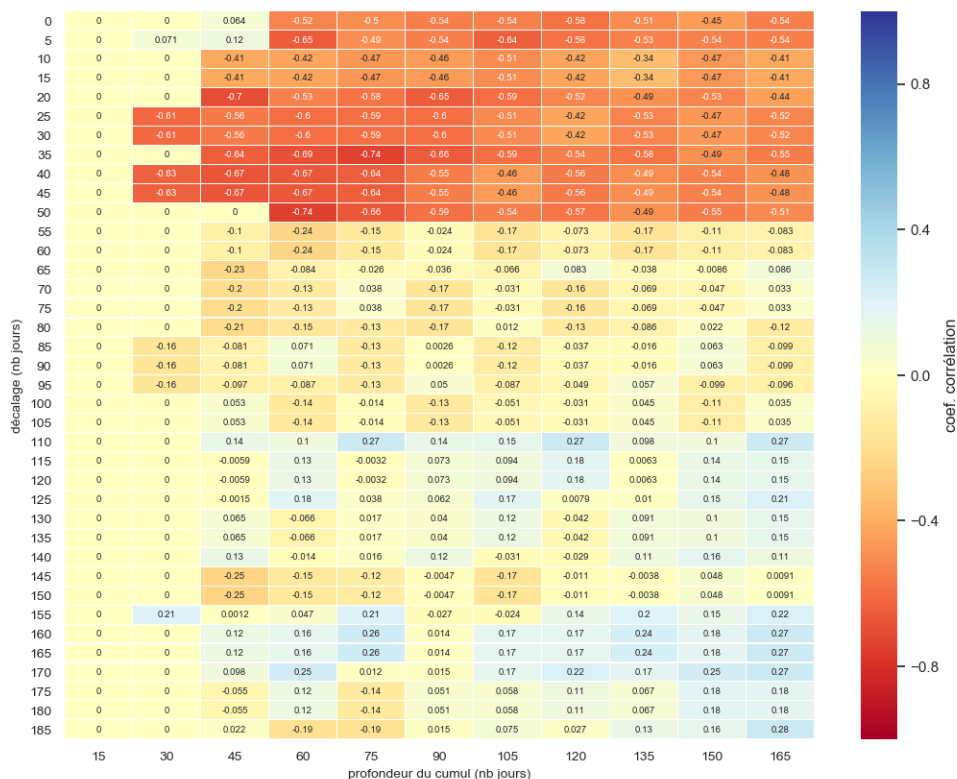


Chroniques de pluie, piézométrie, conductivité et volumes prélevés

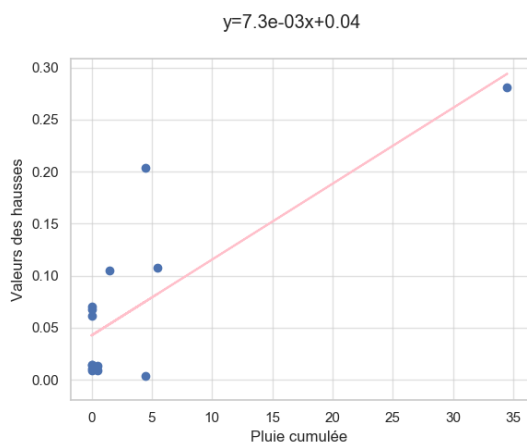
12262X0064_2m



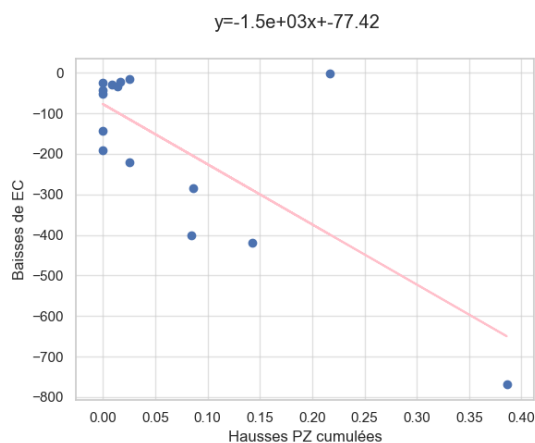
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



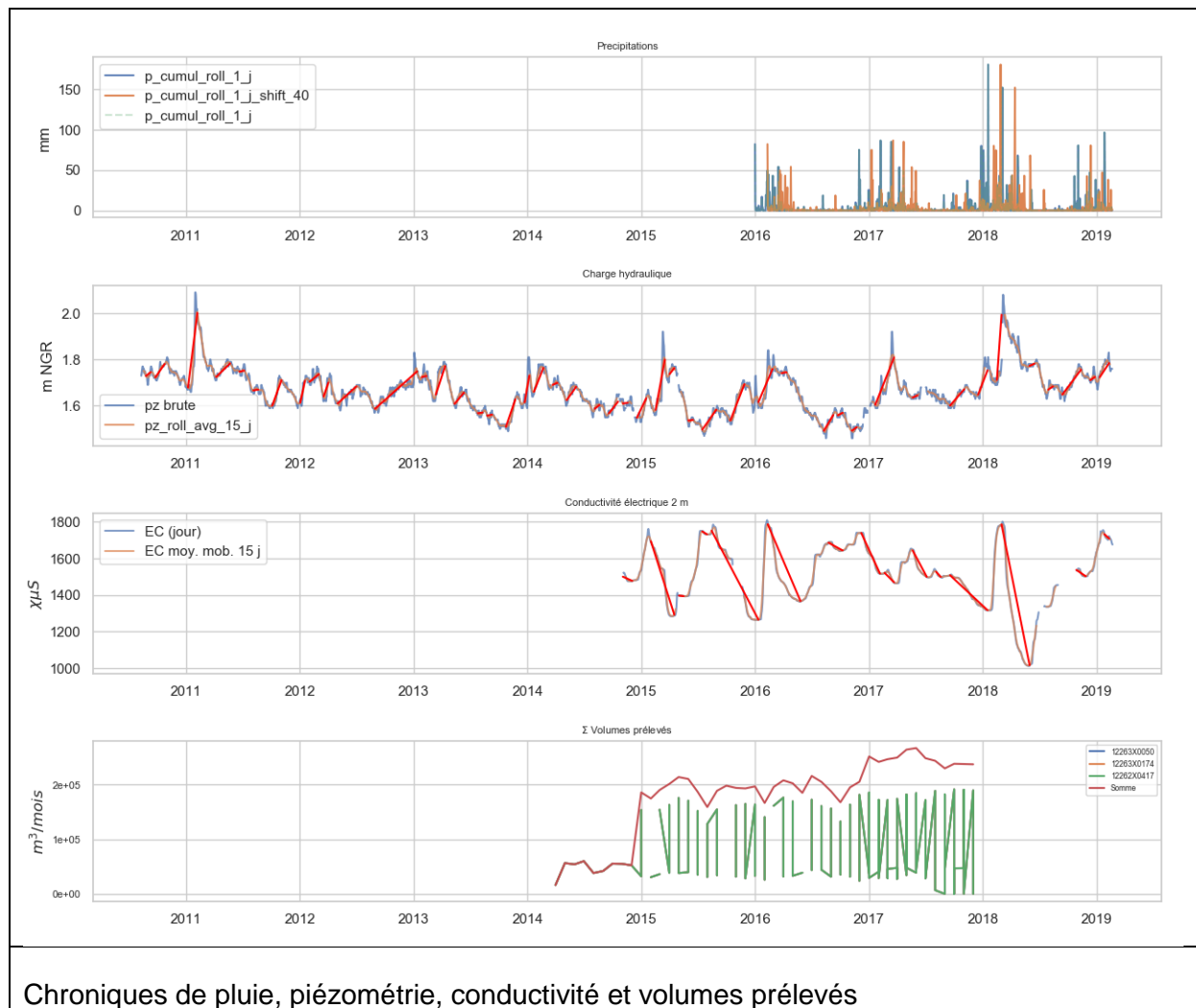
Matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



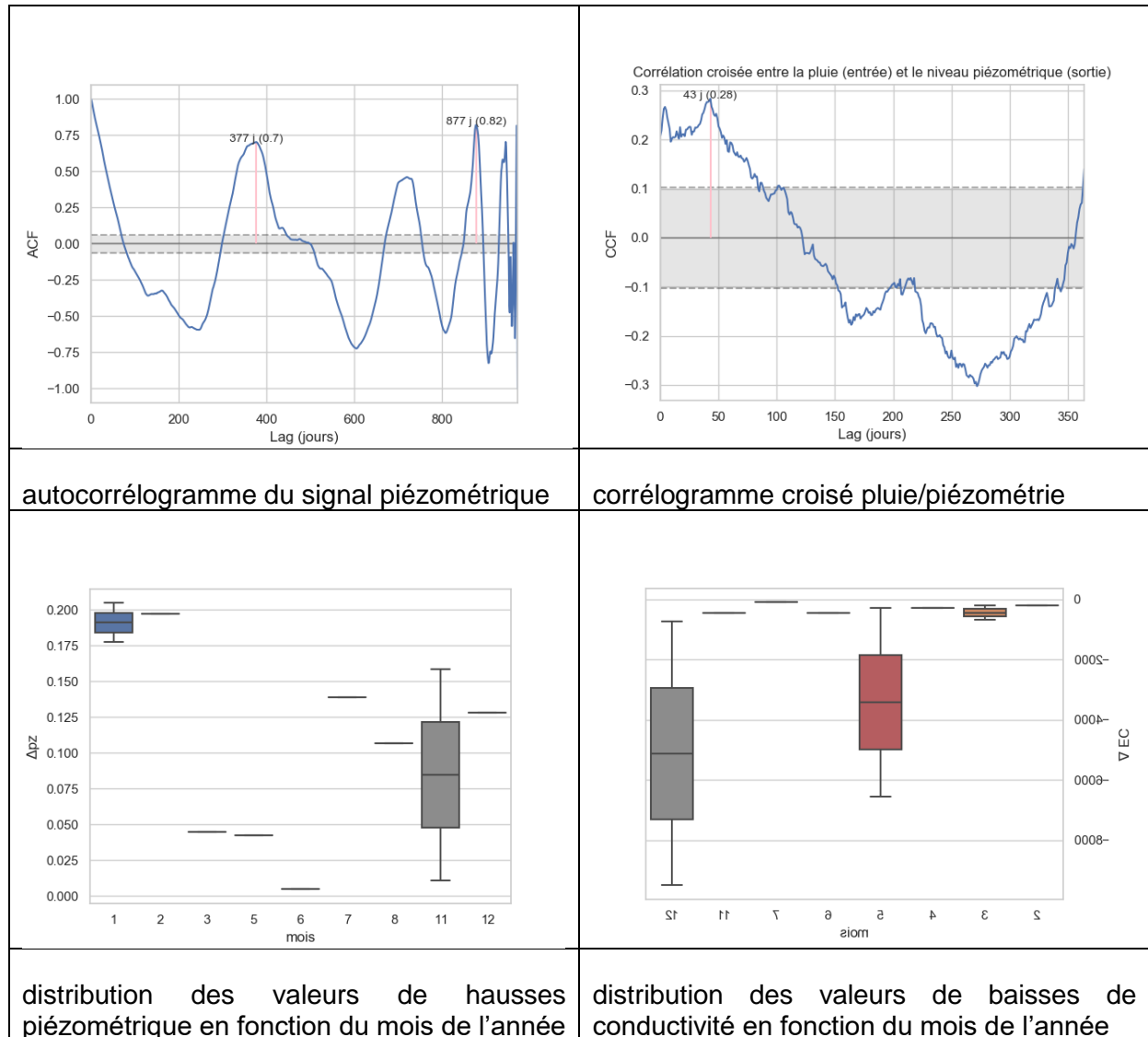
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

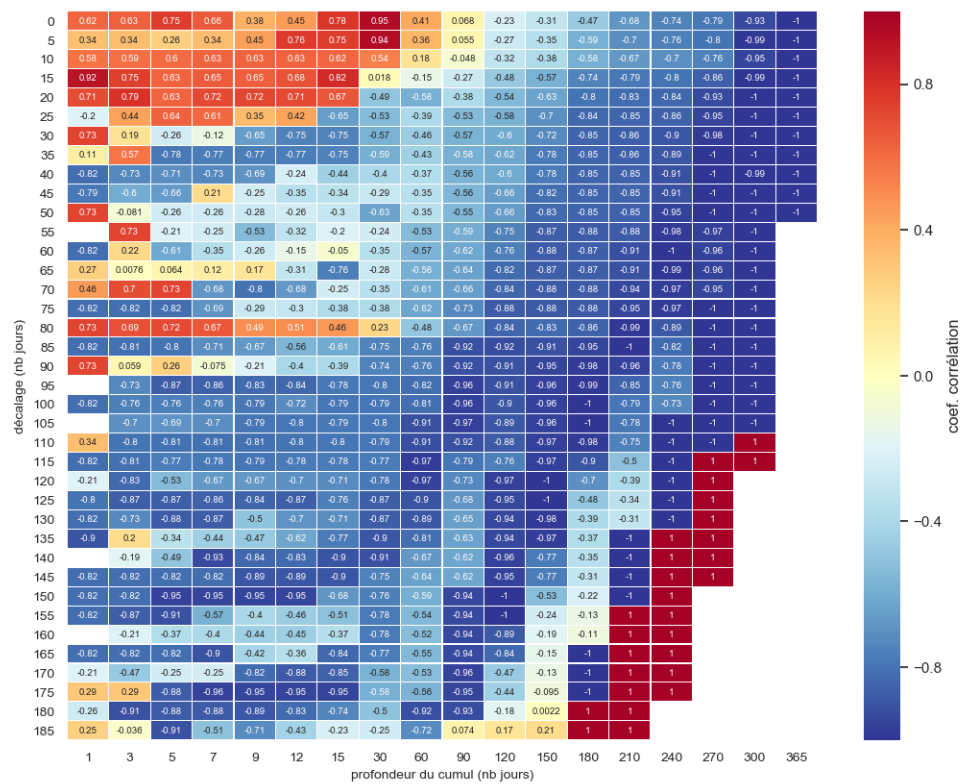


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

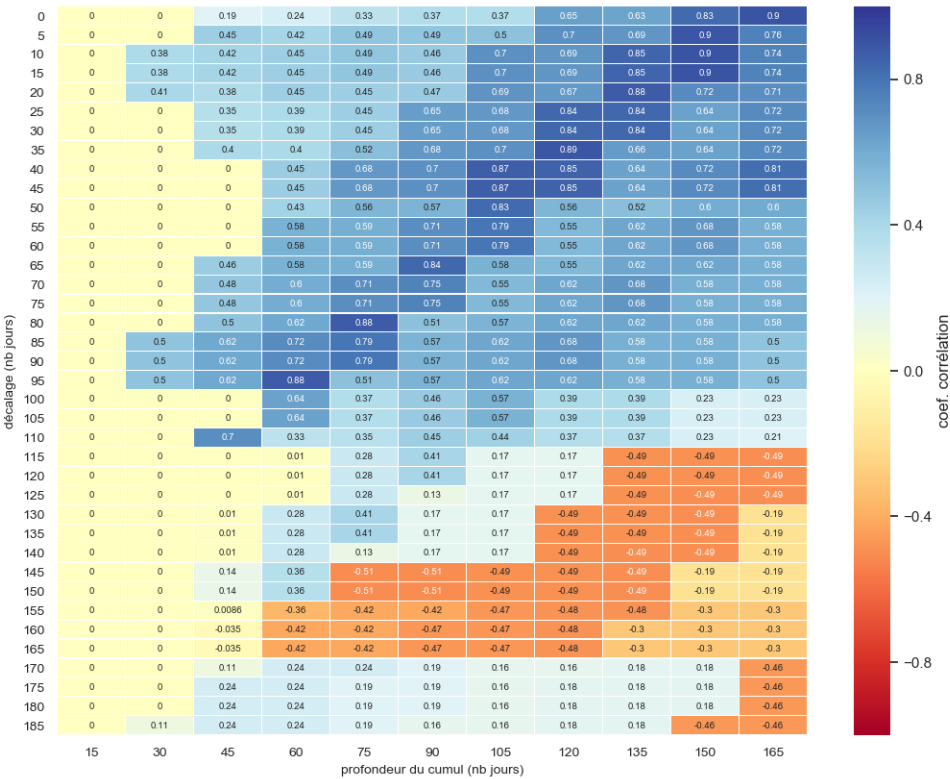


12262X0157_1m

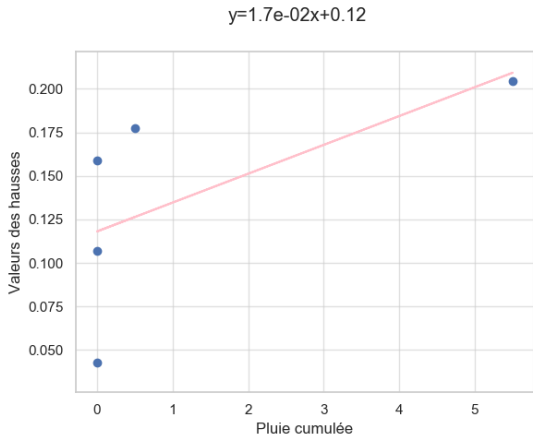




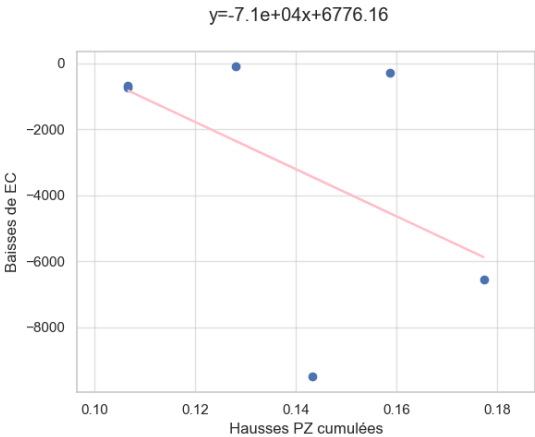
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



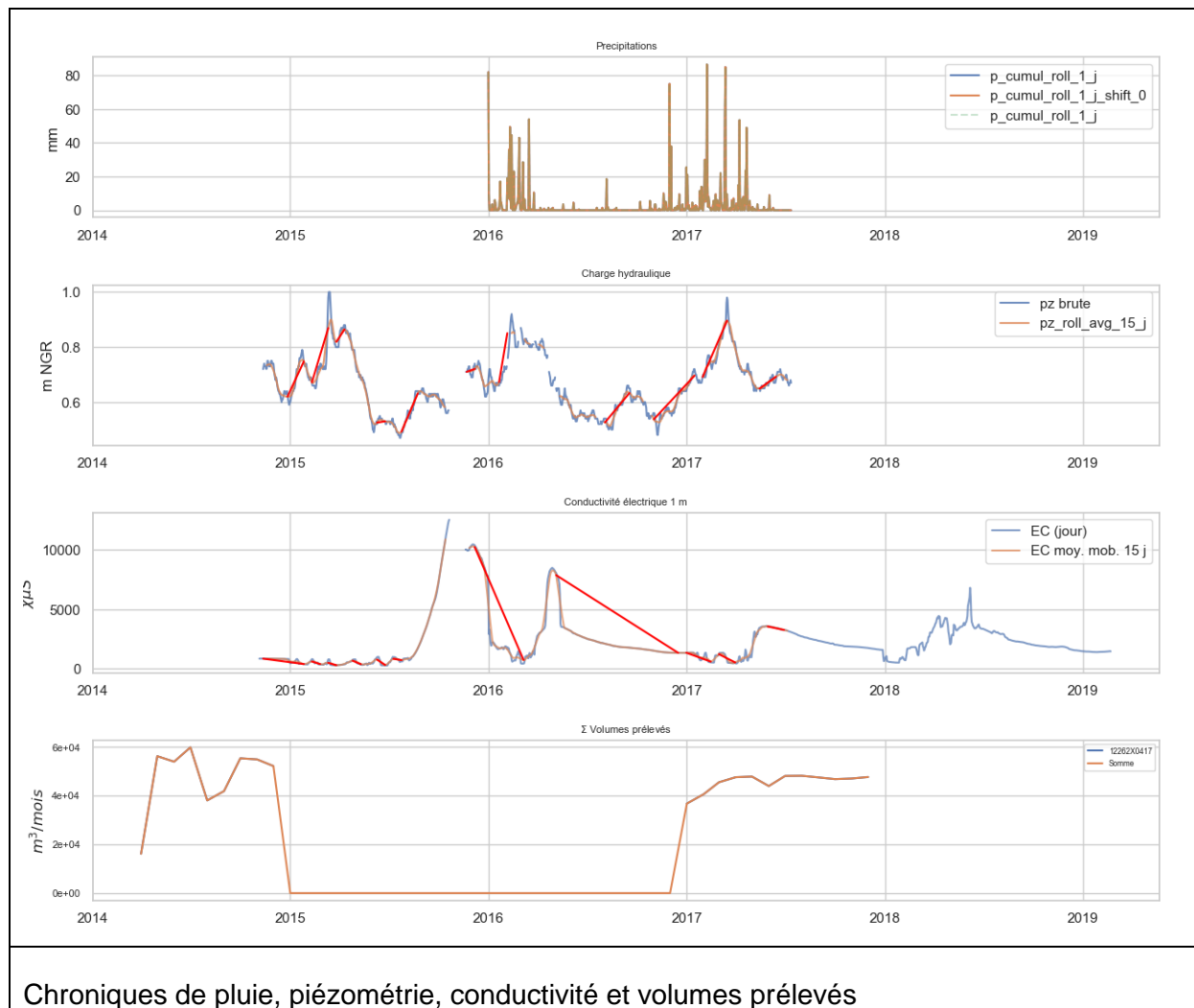
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



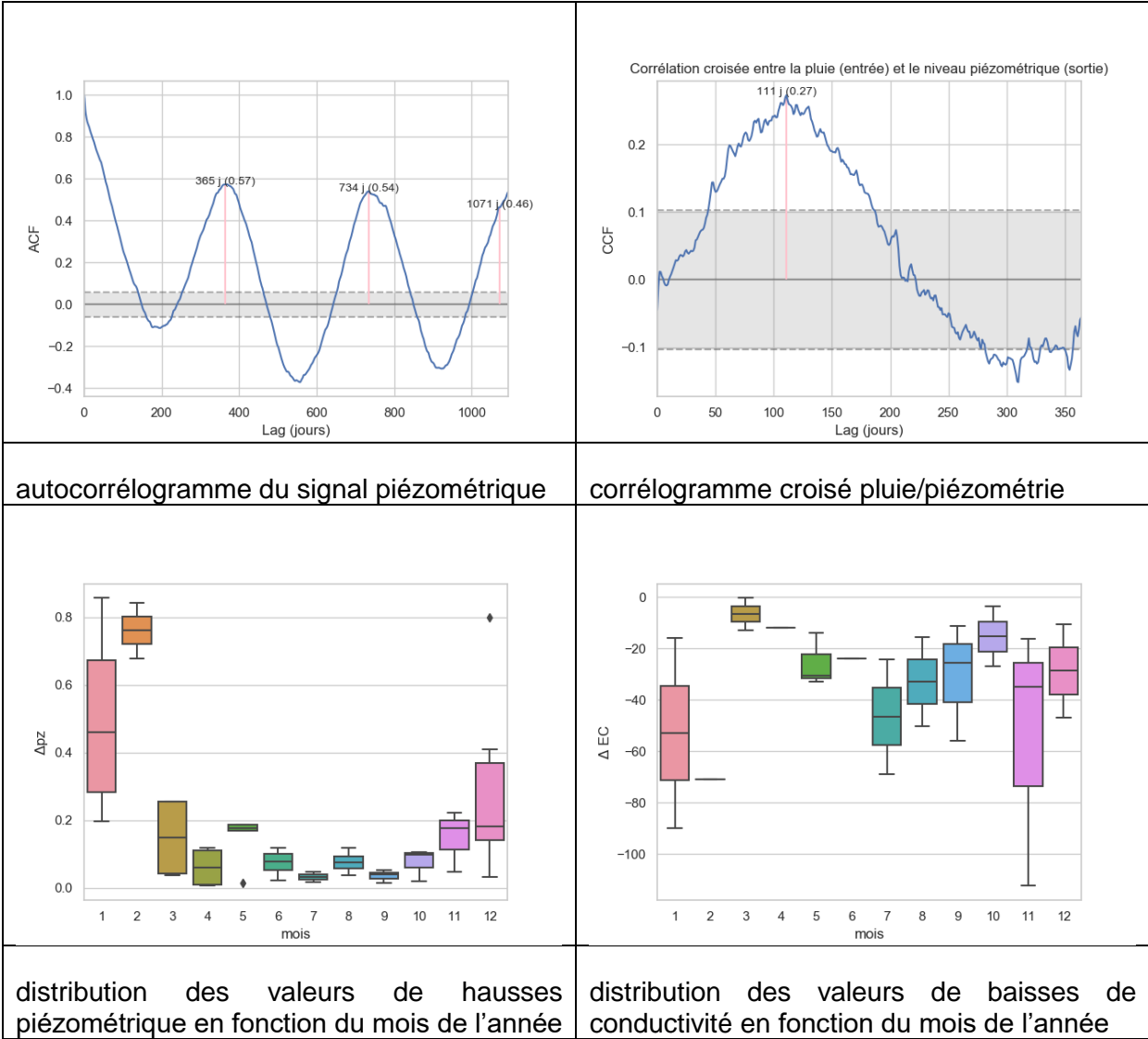
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

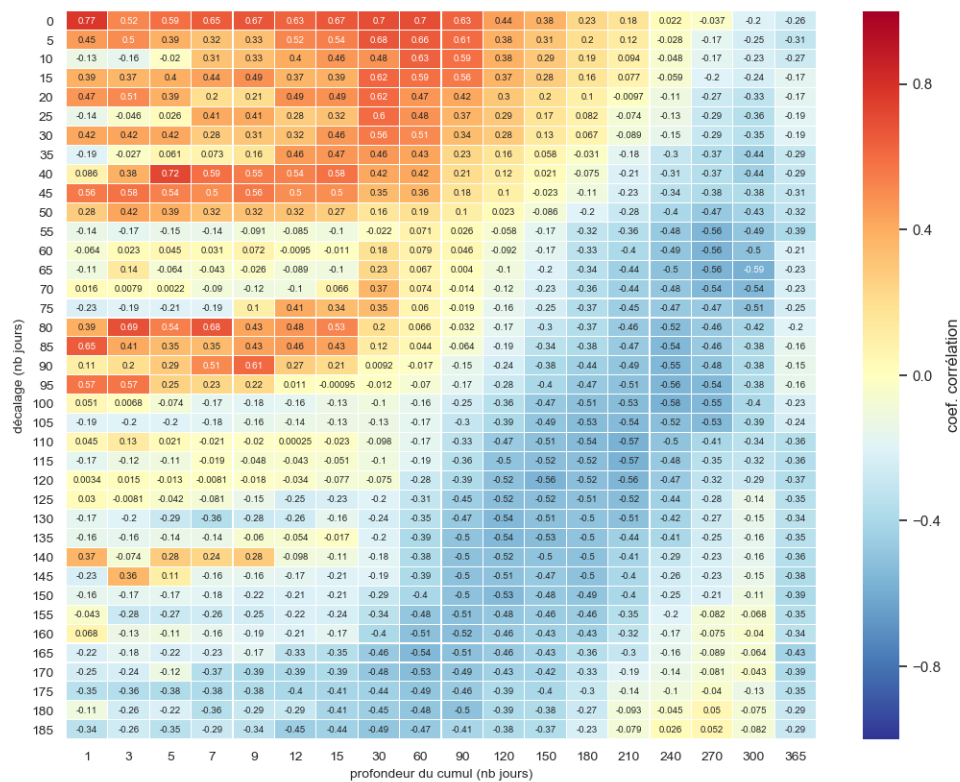


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

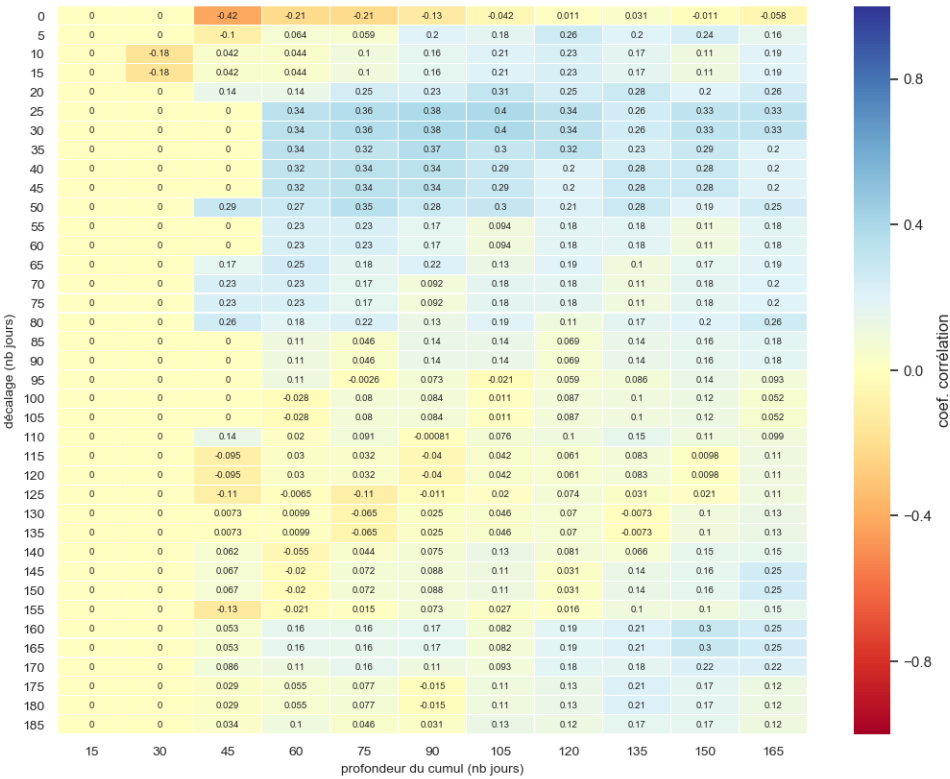


12262X0162_11m

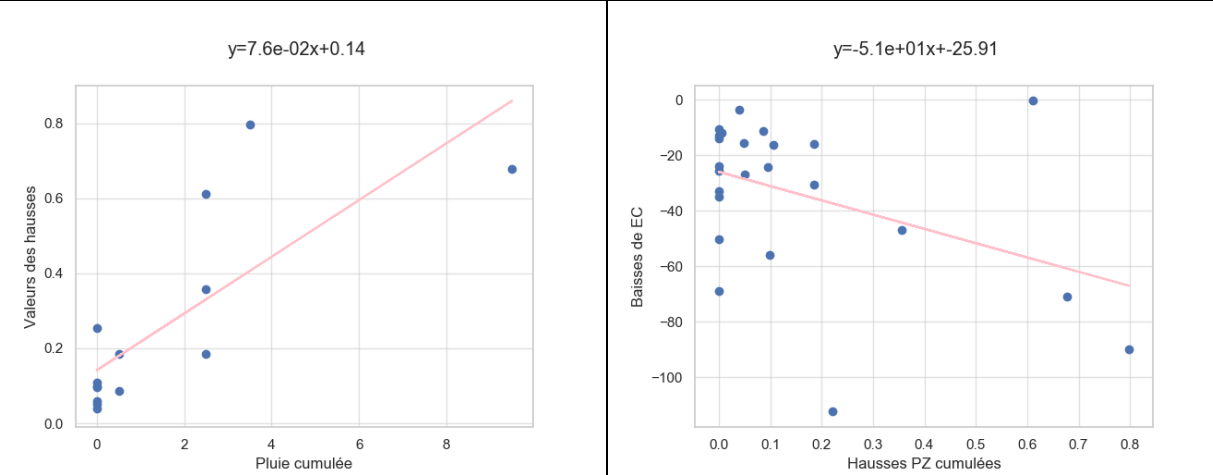




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

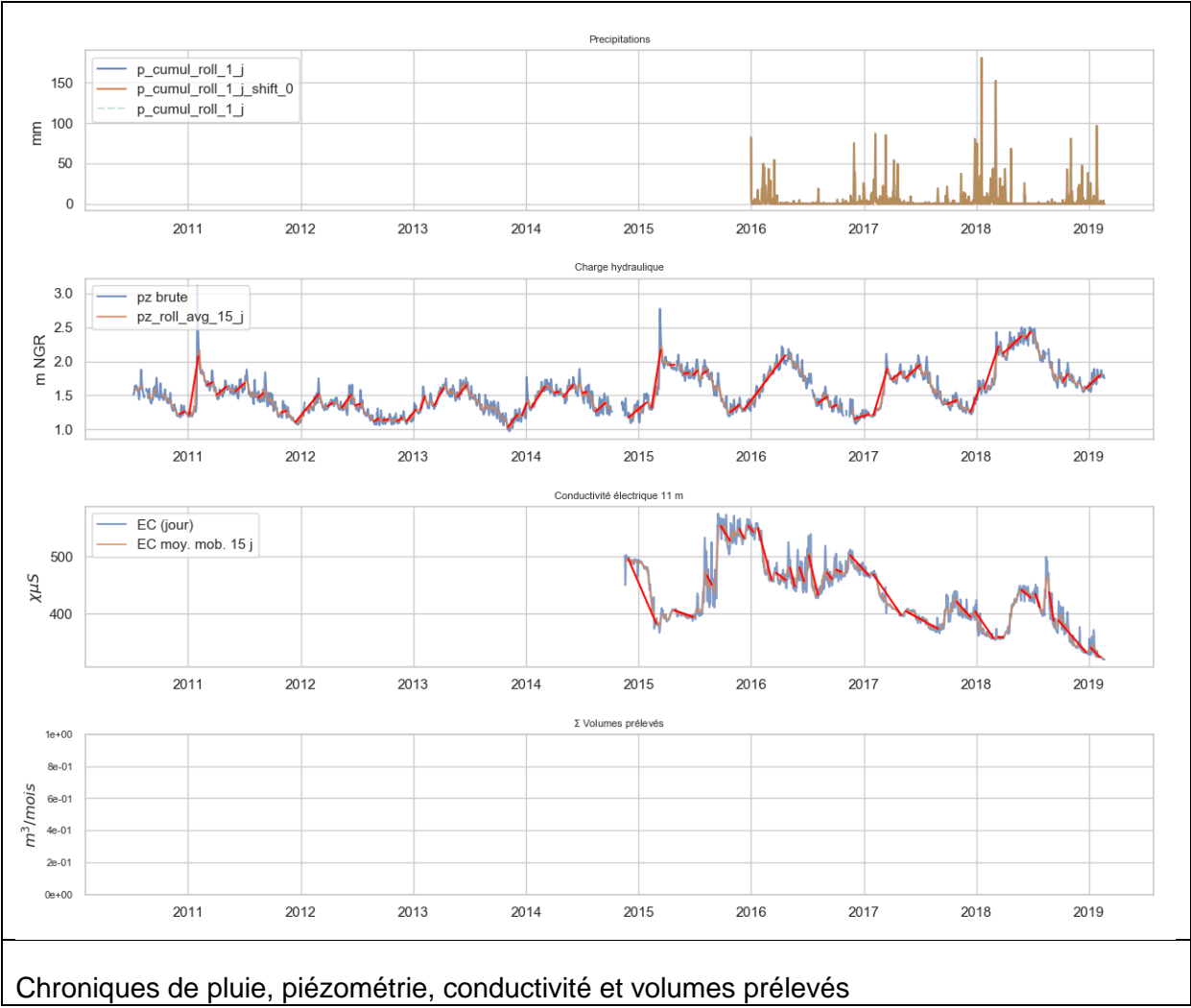


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

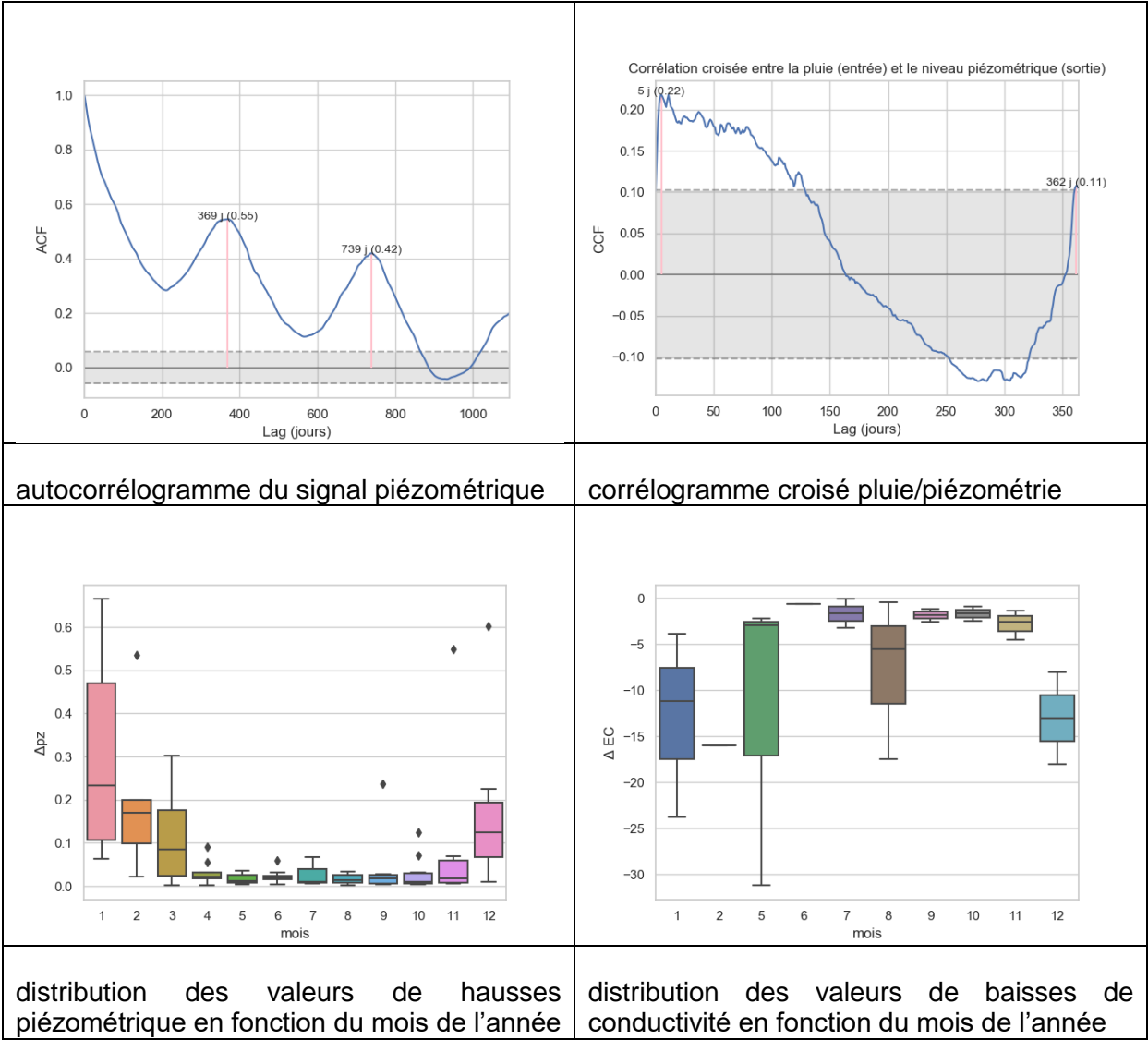


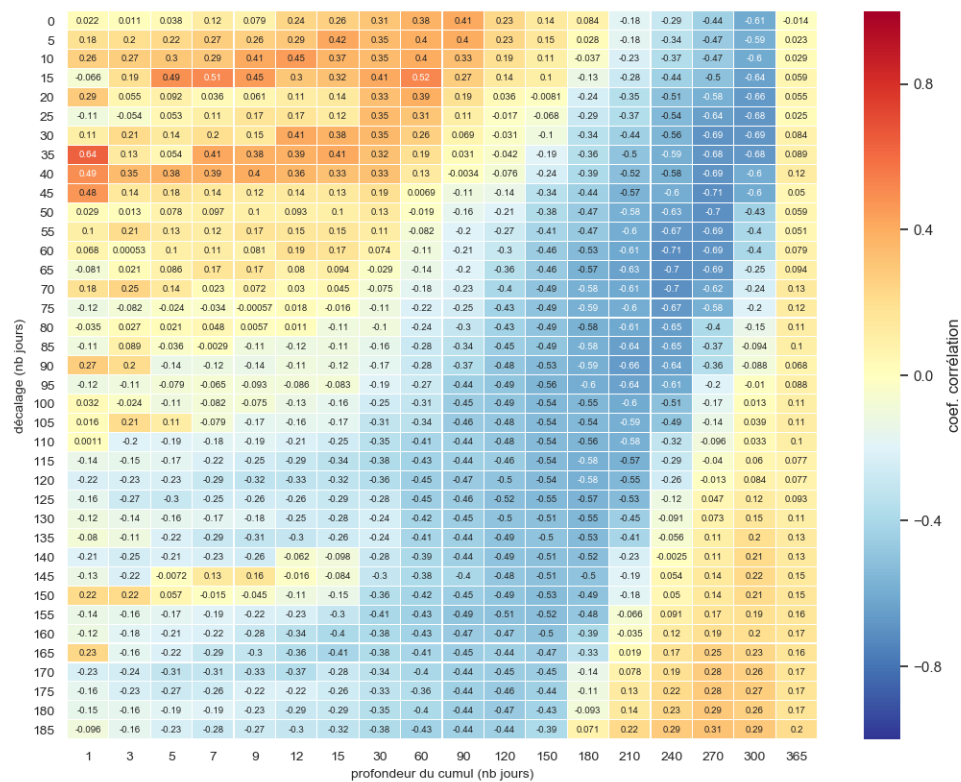
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

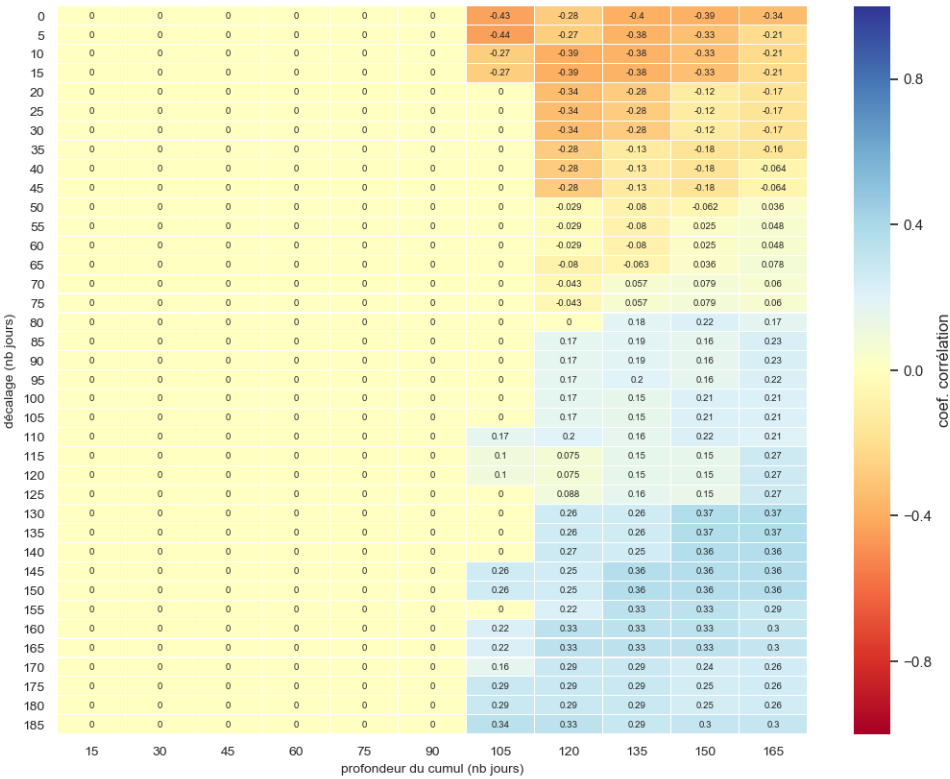


12262X0170_42m

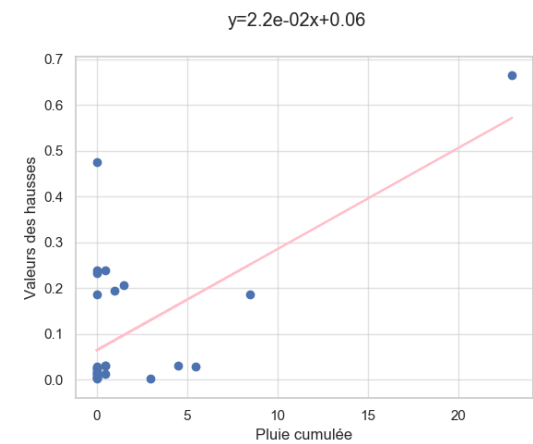




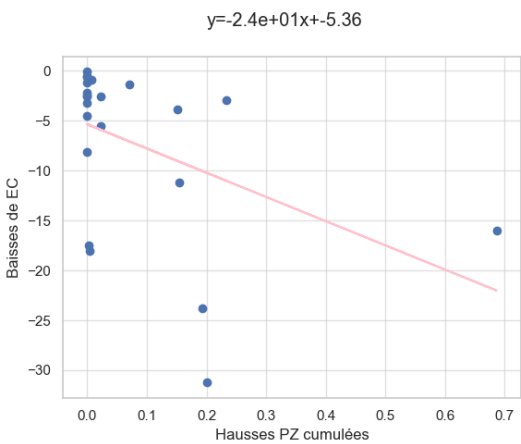
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



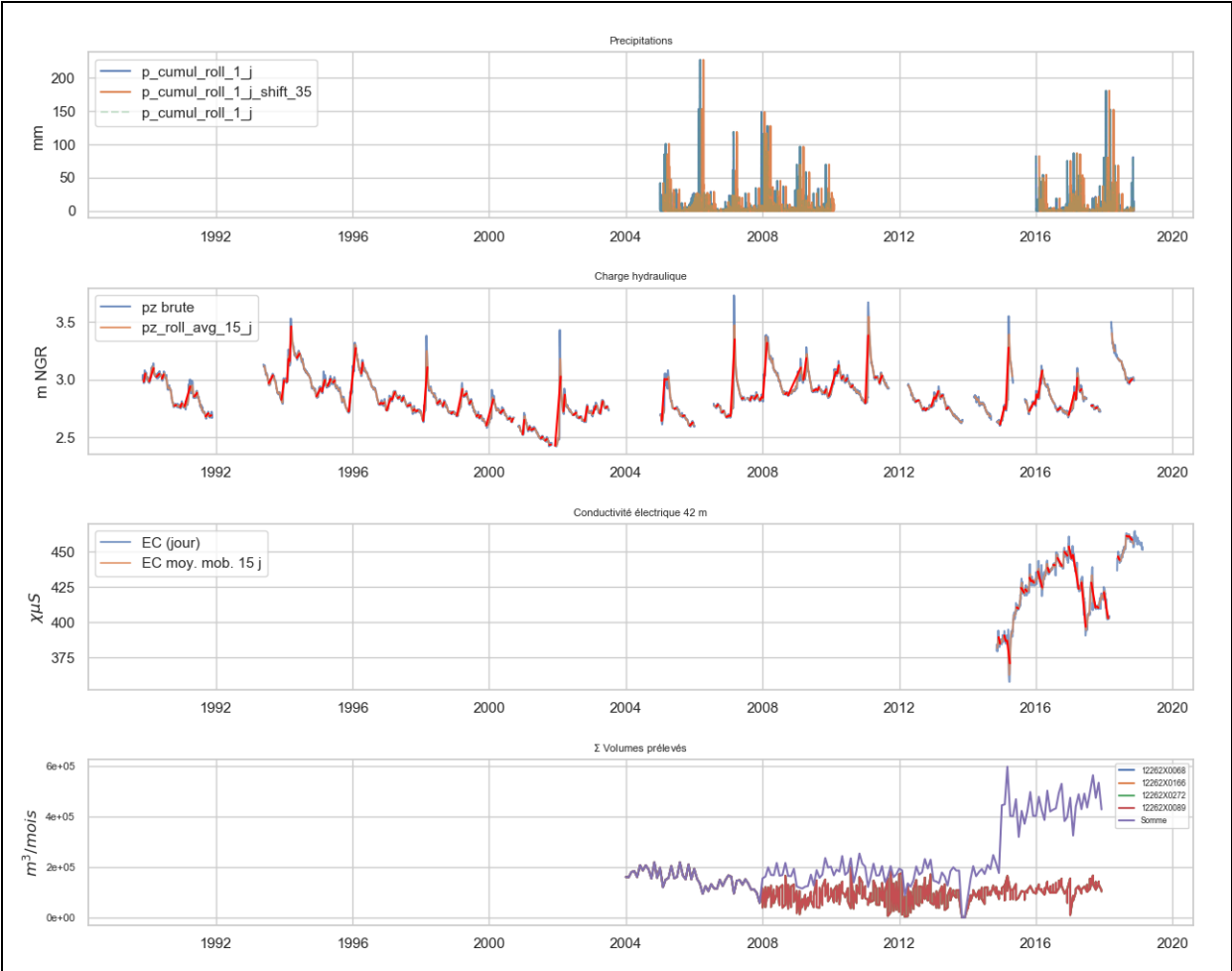
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

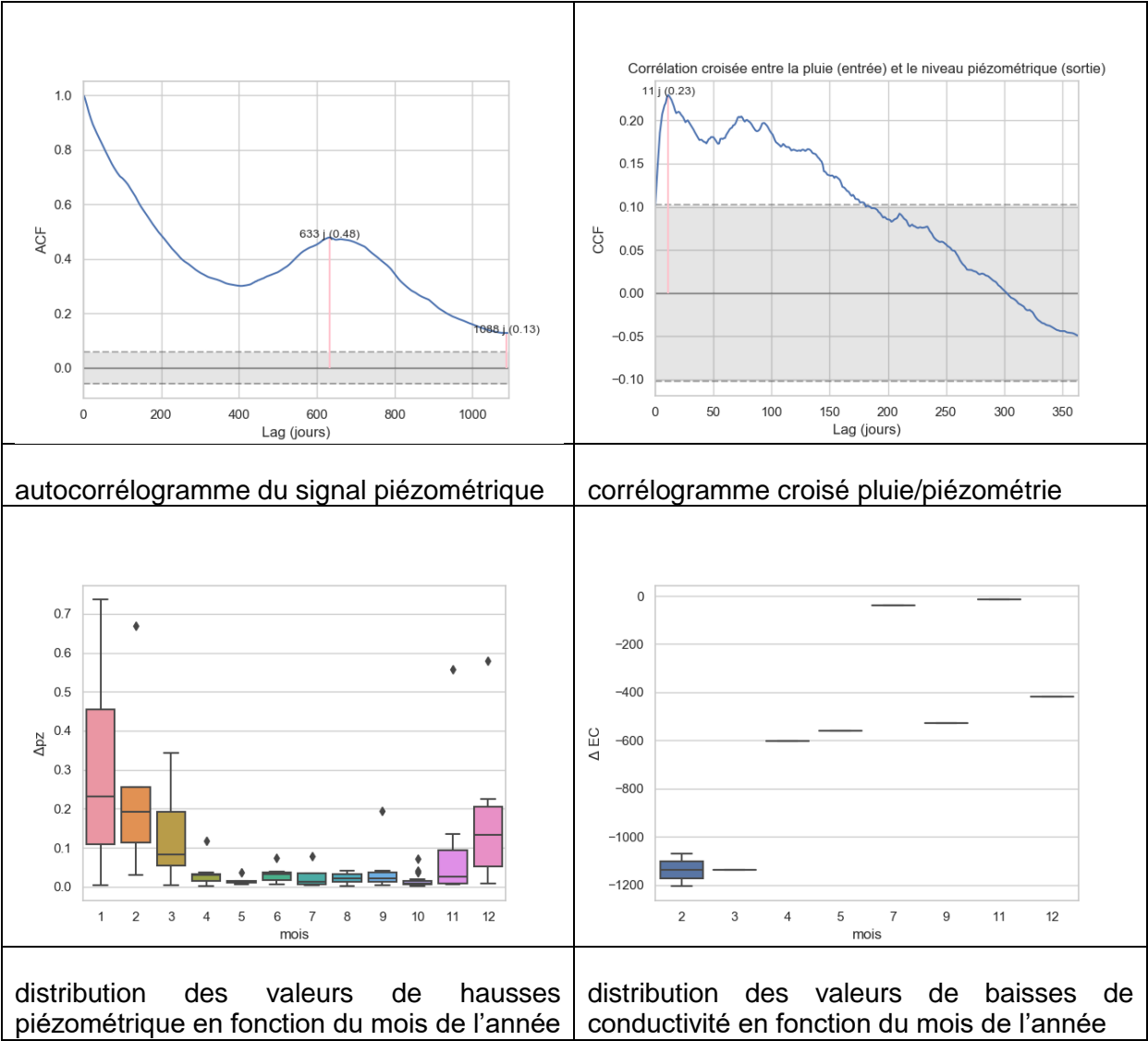


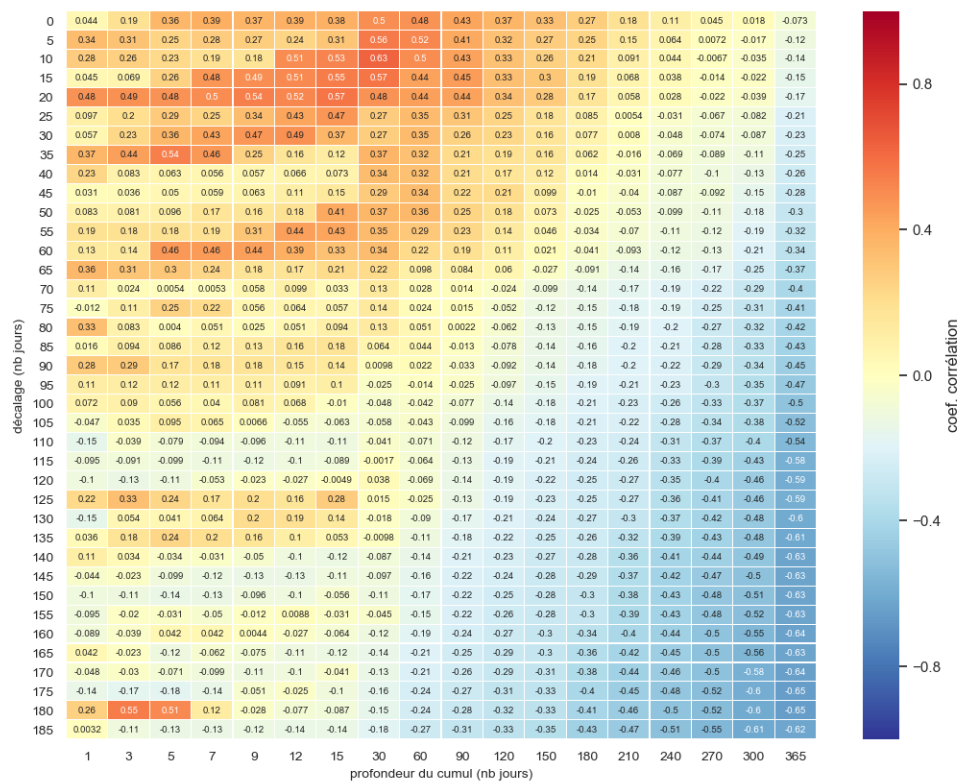
relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs



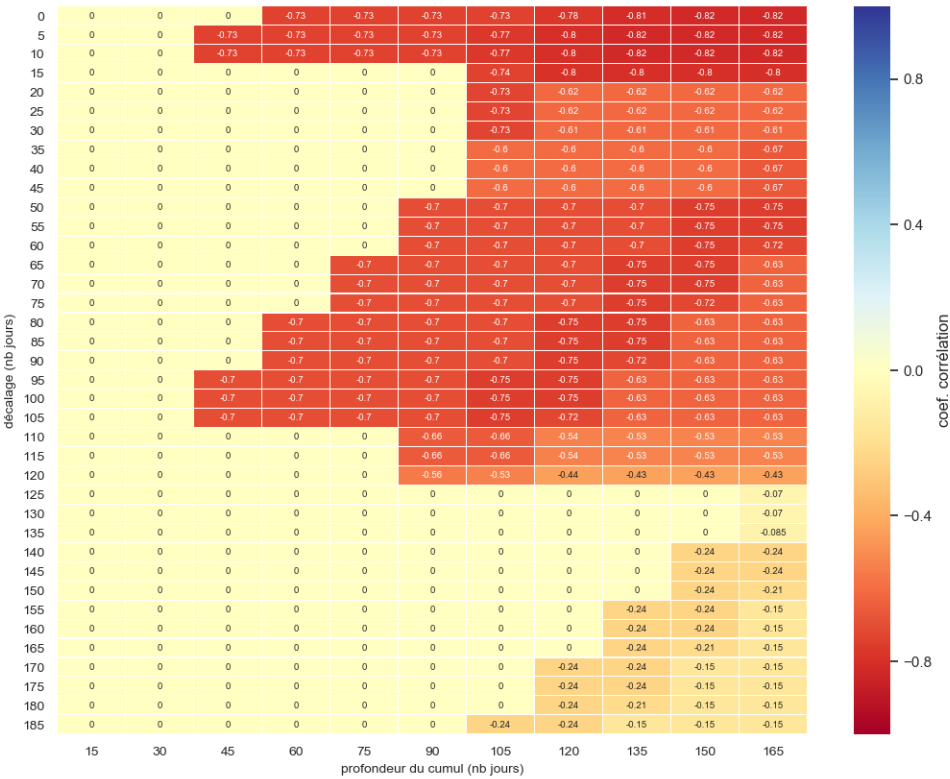
Chroniques de pluie, piézométrie, conductivité et volumes prélevés

12262X0170_62m

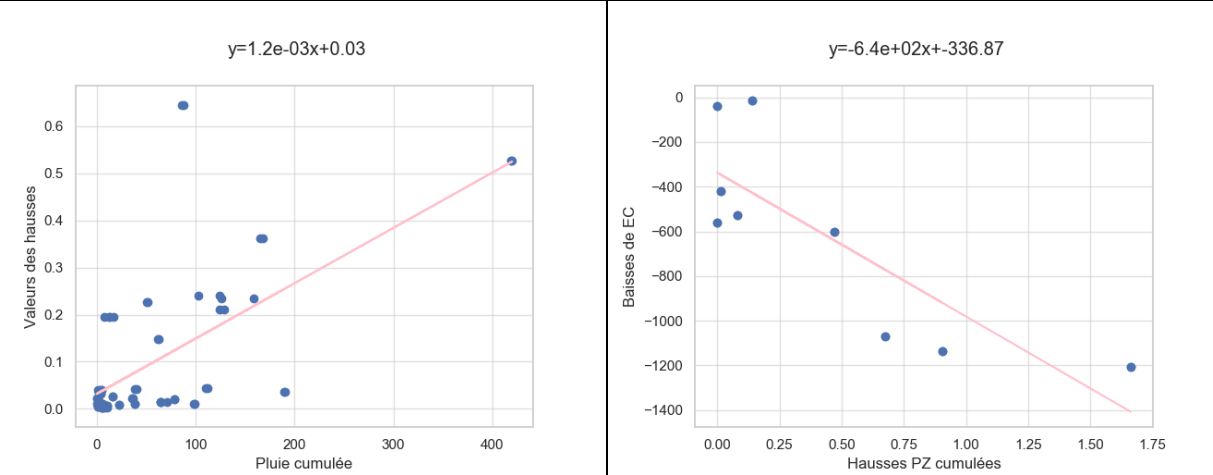




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

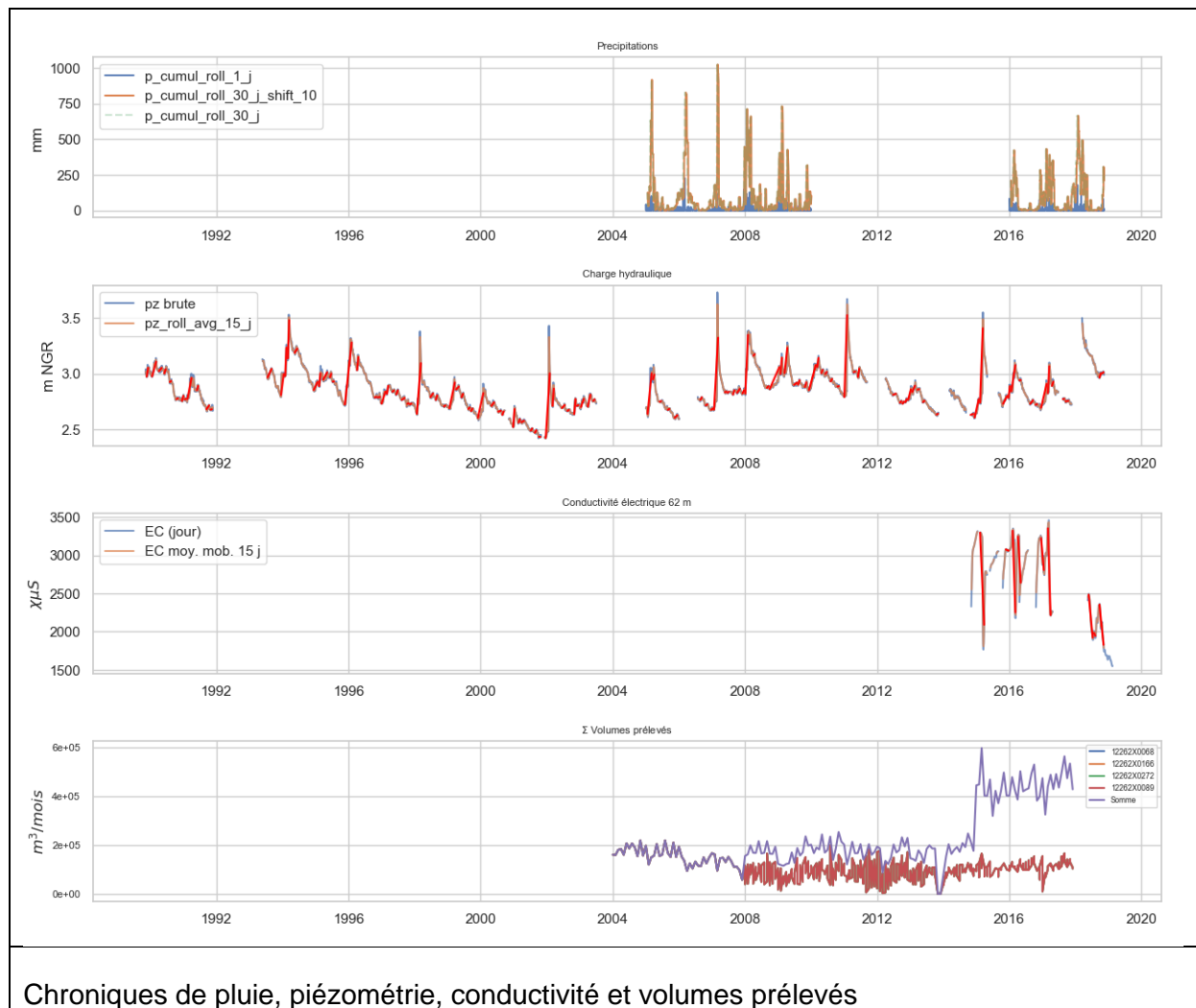


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

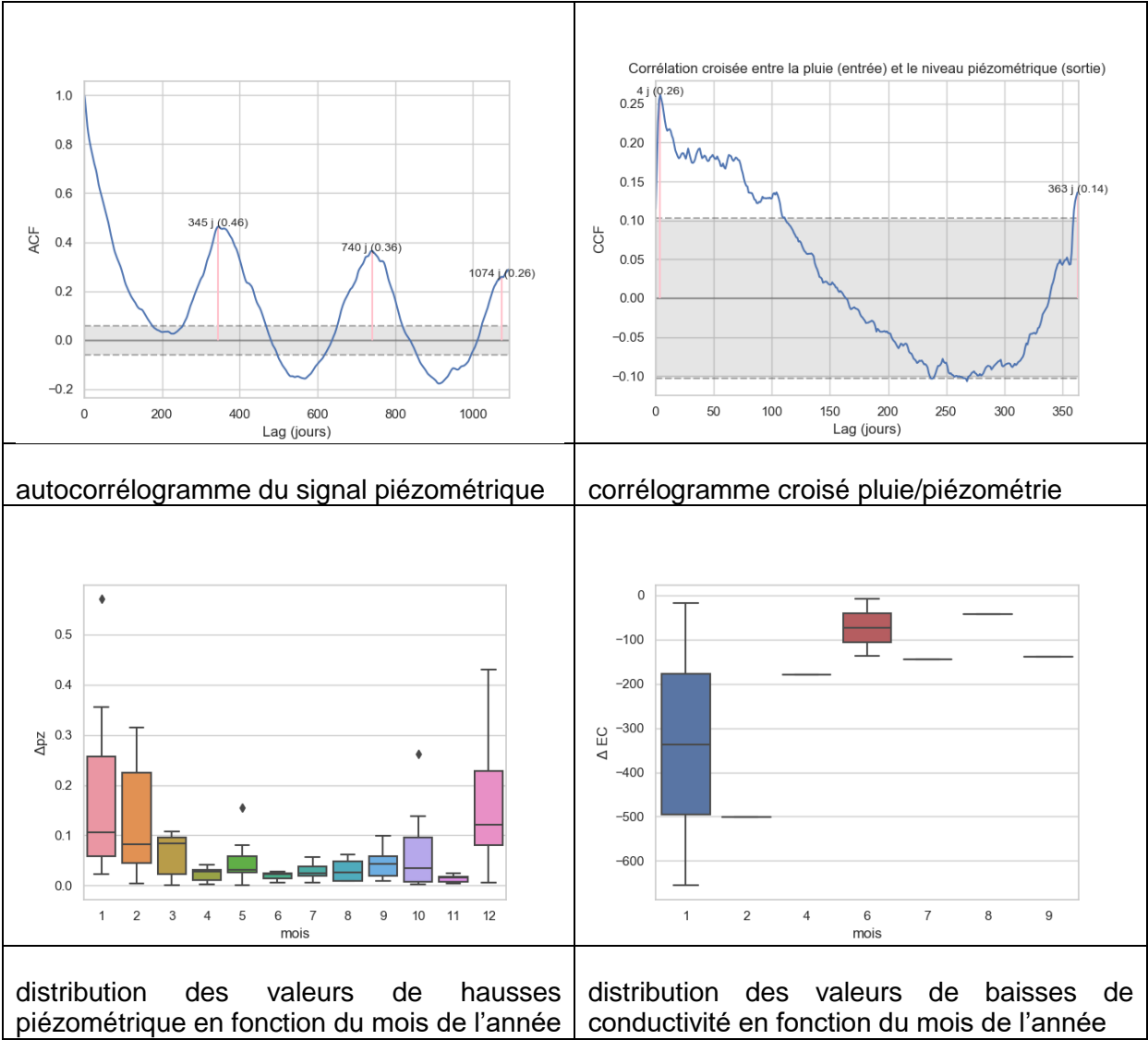


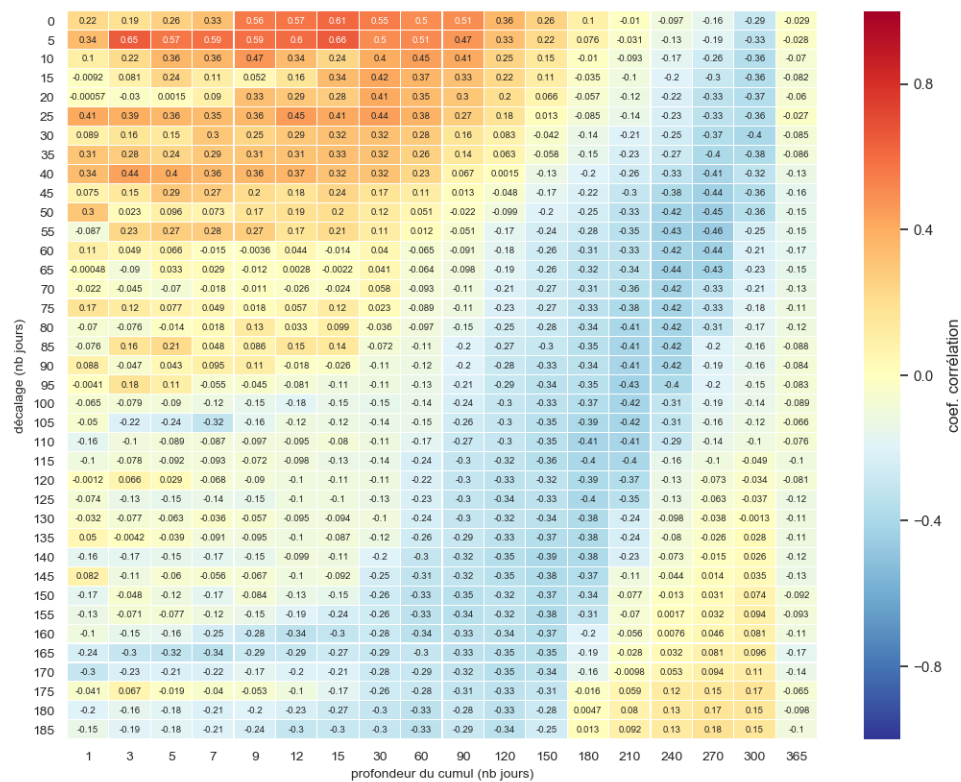
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

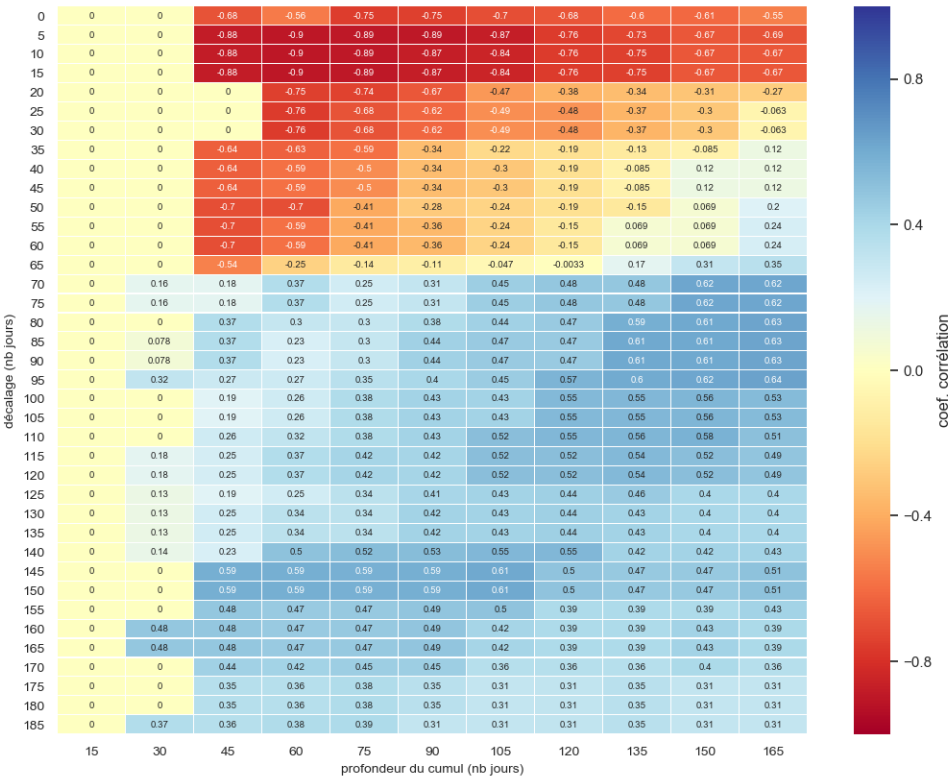


12262X0174_64m

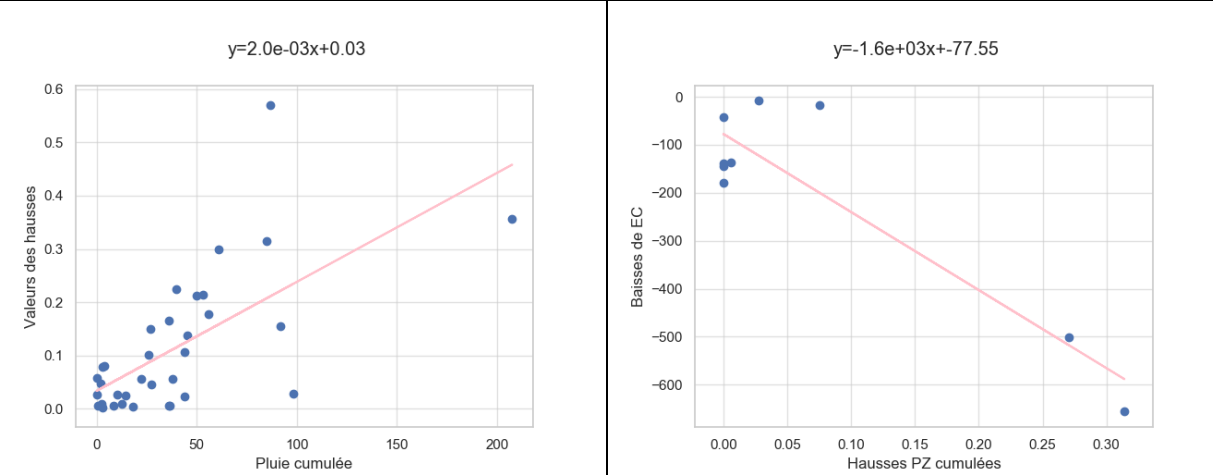




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

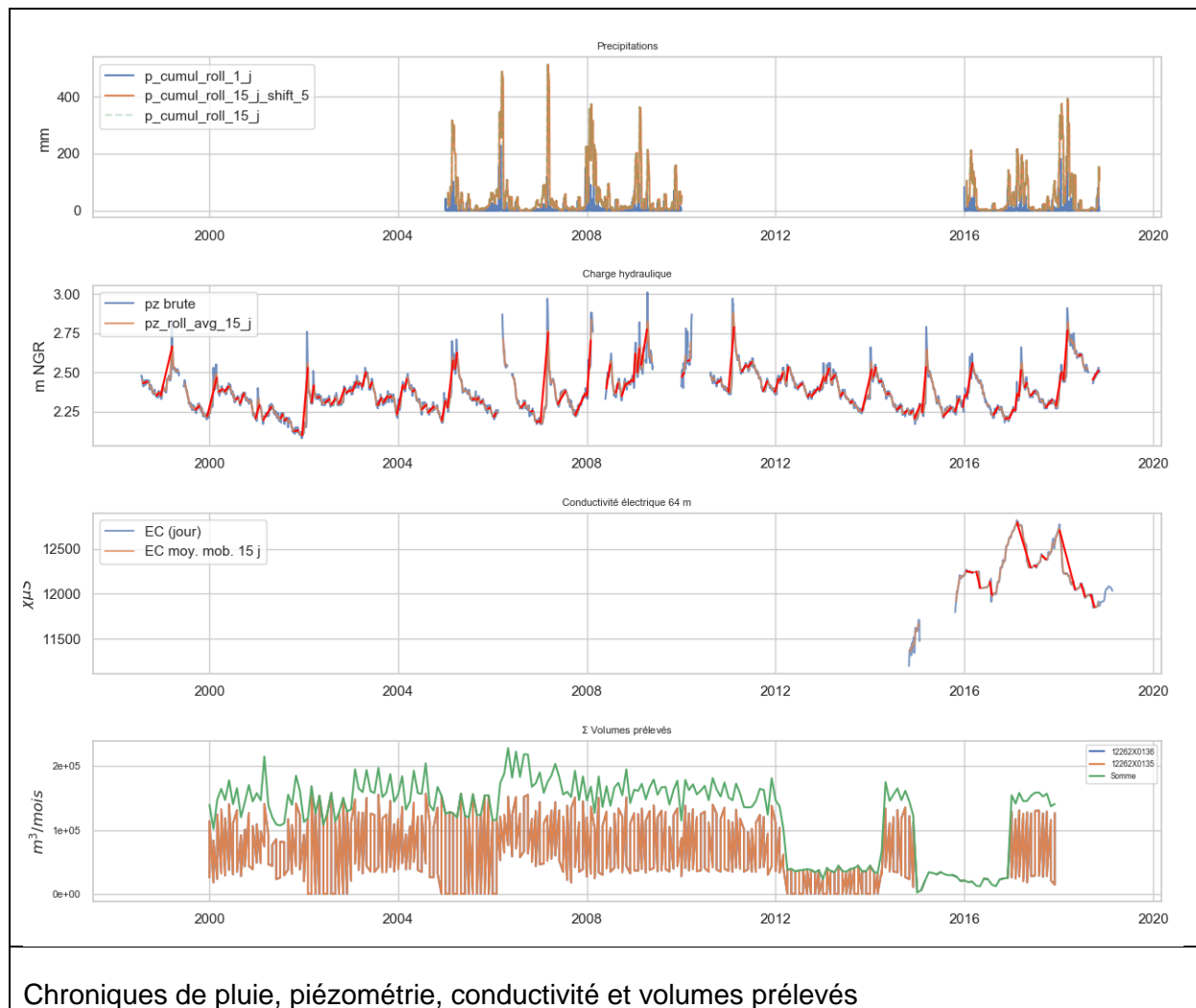


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

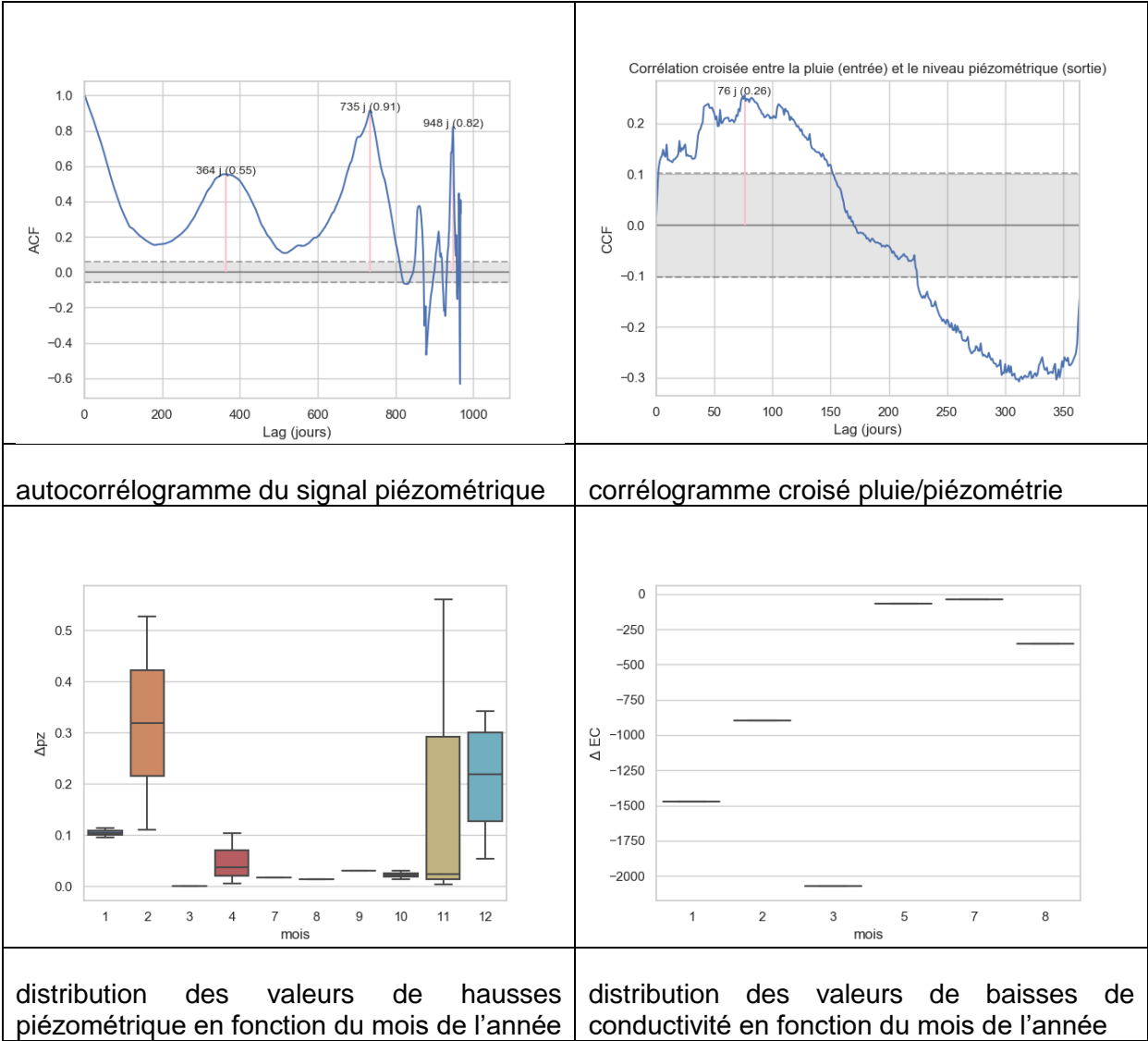


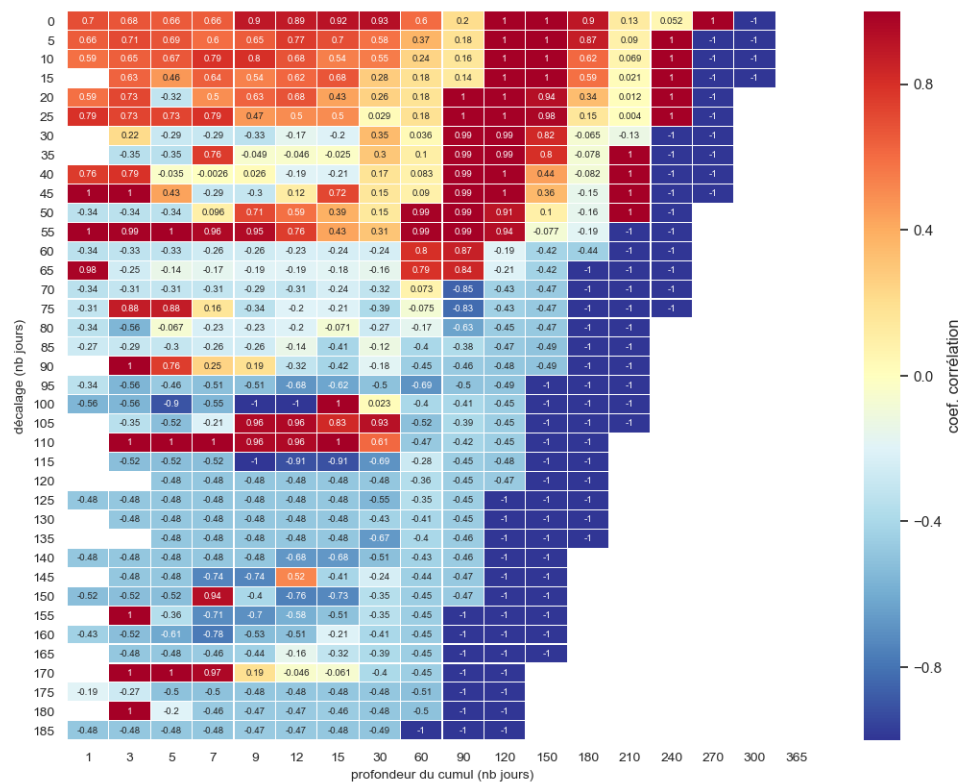
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

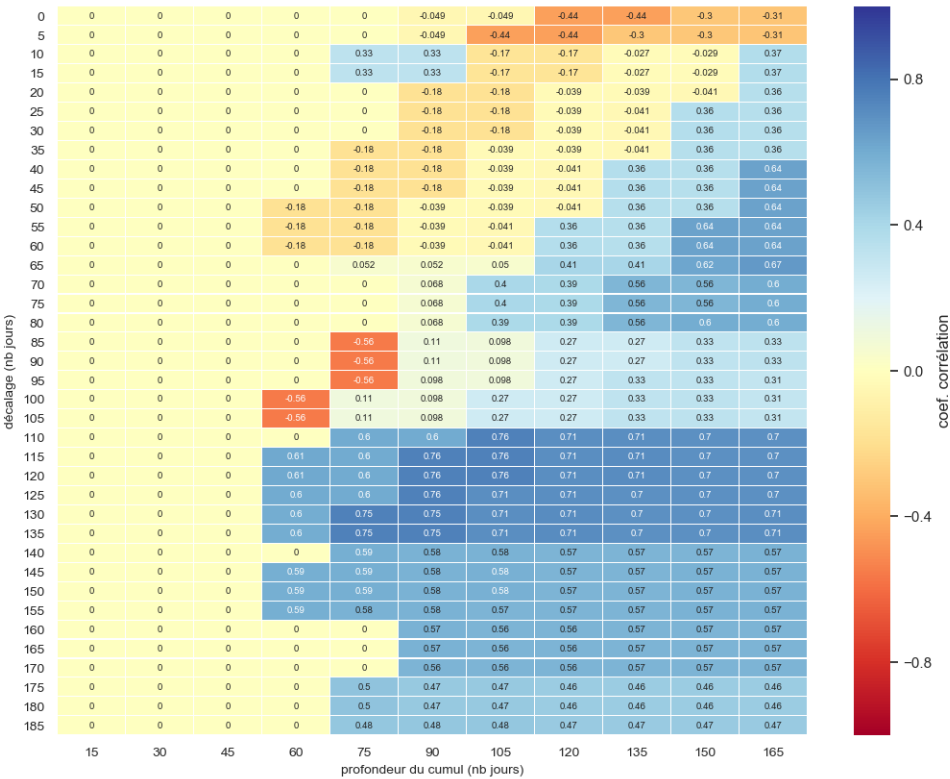


12262X0186_84m

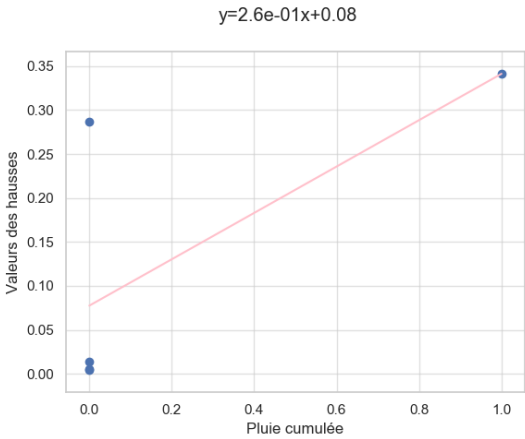
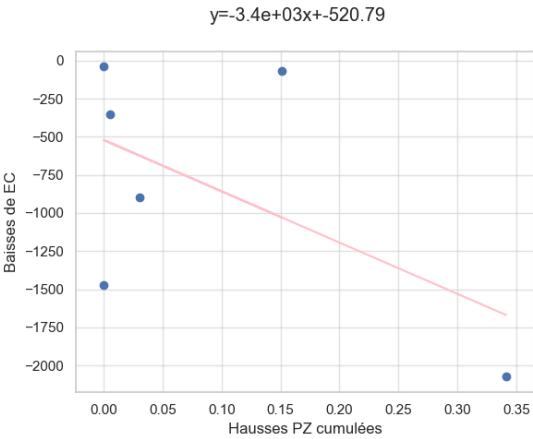




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

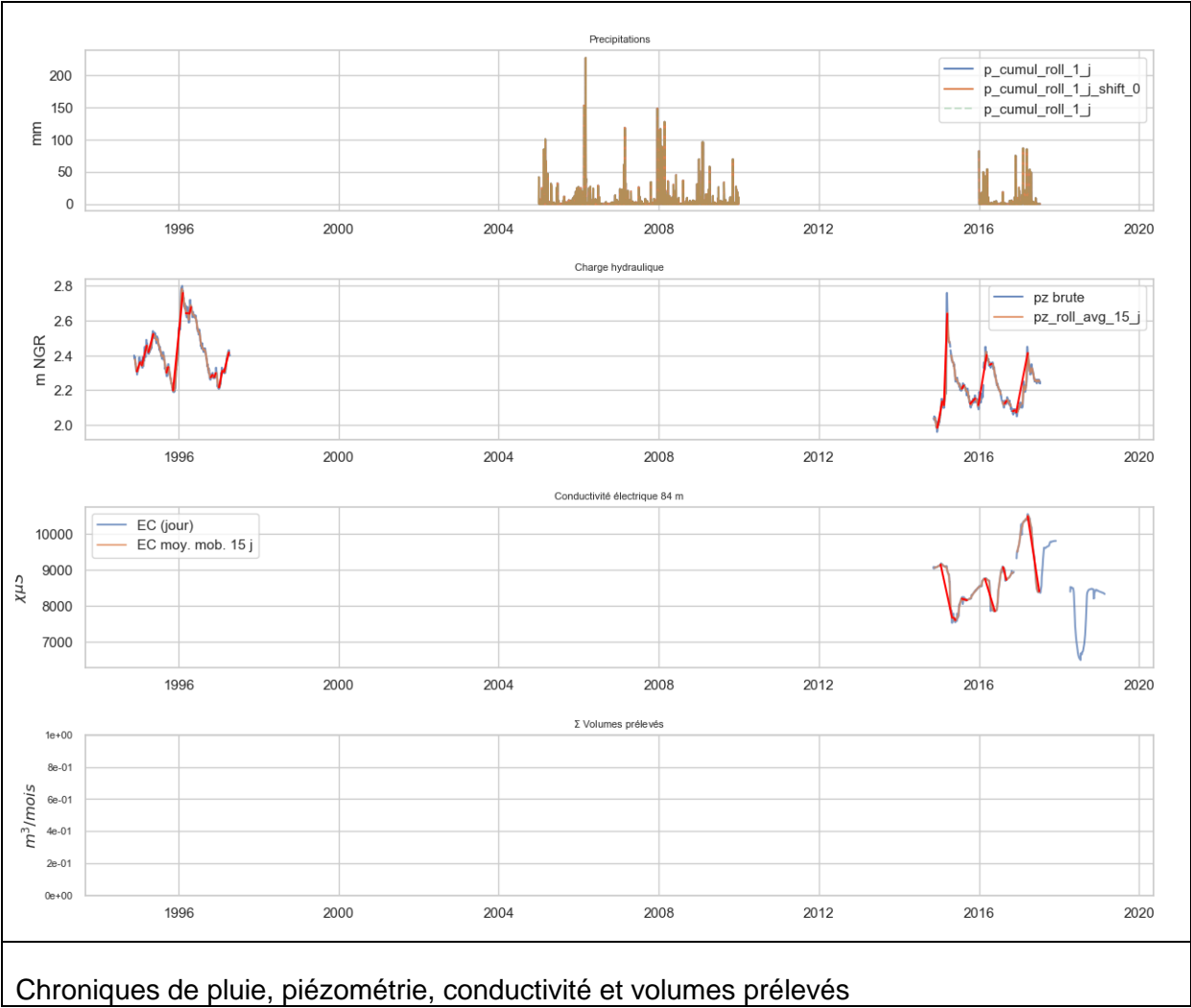


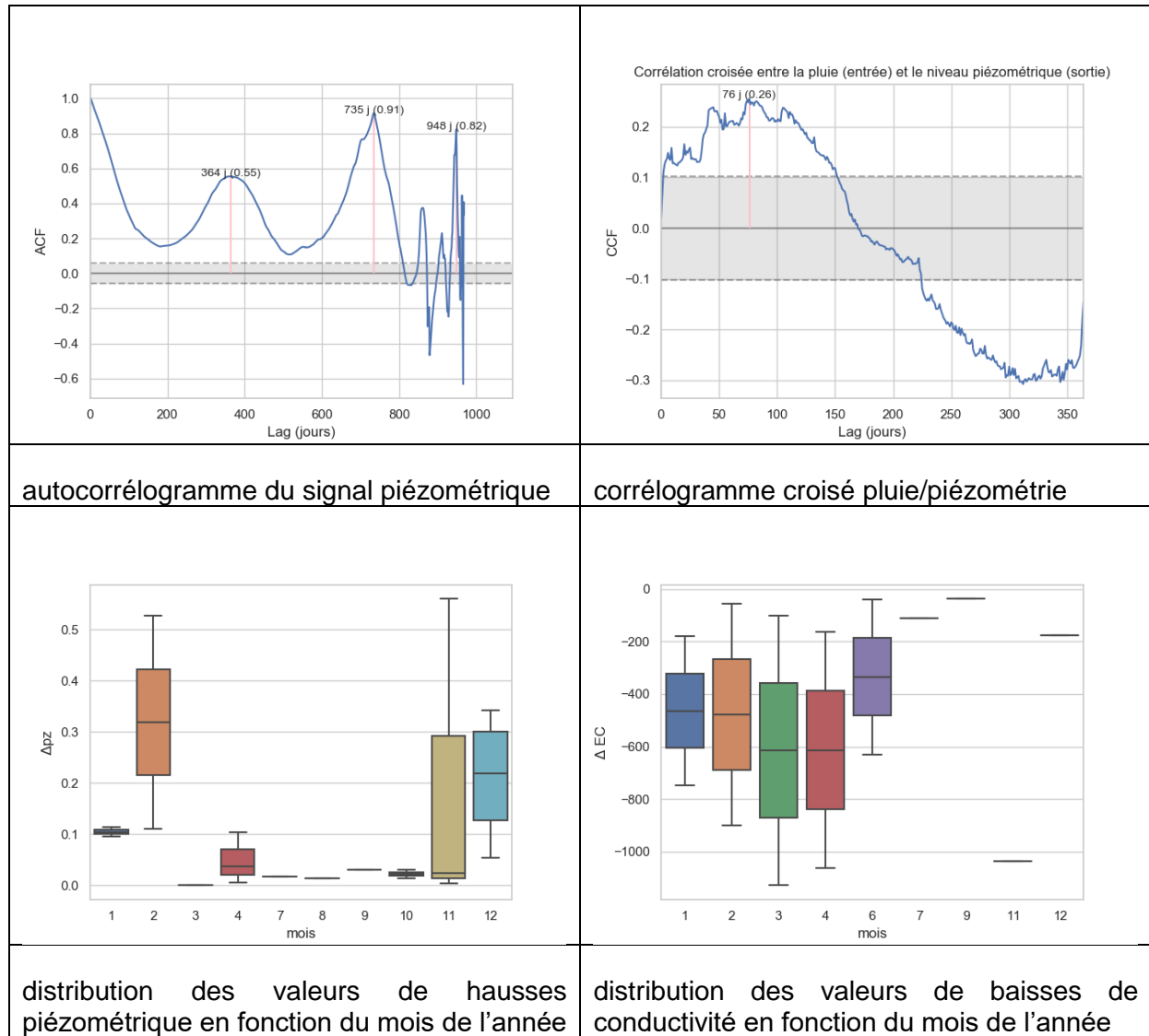
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

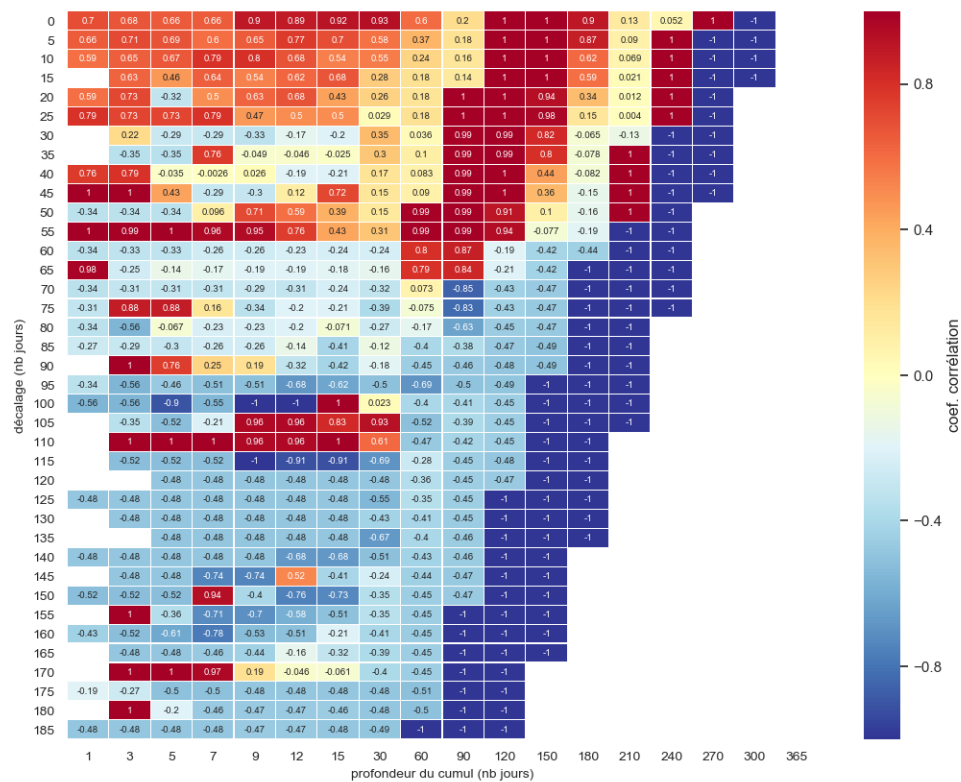


relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

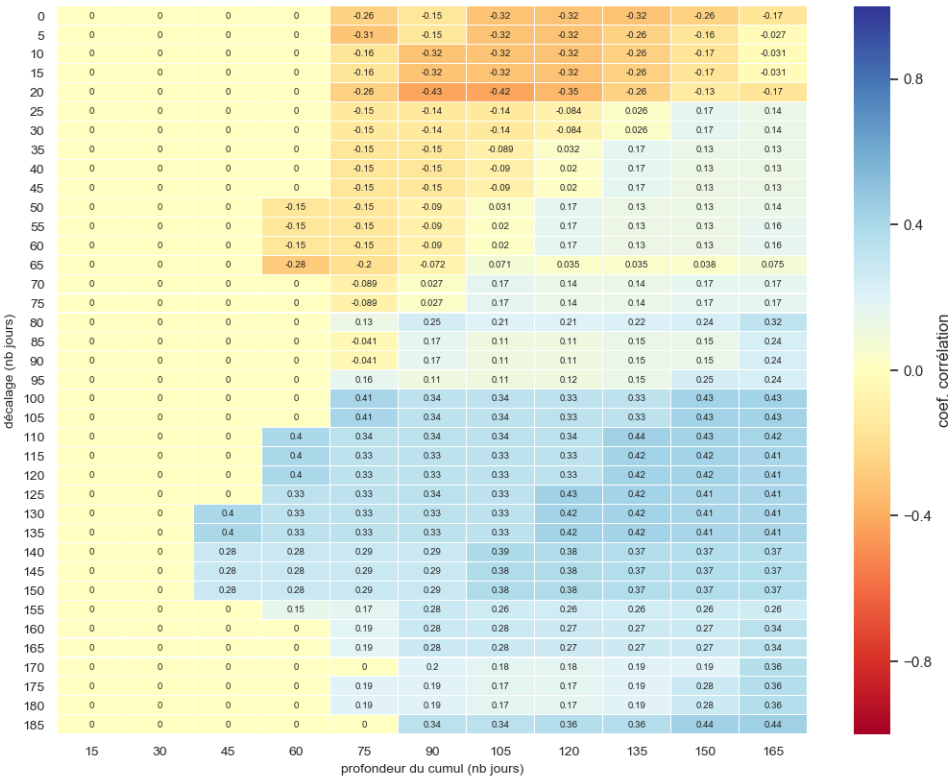
relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs



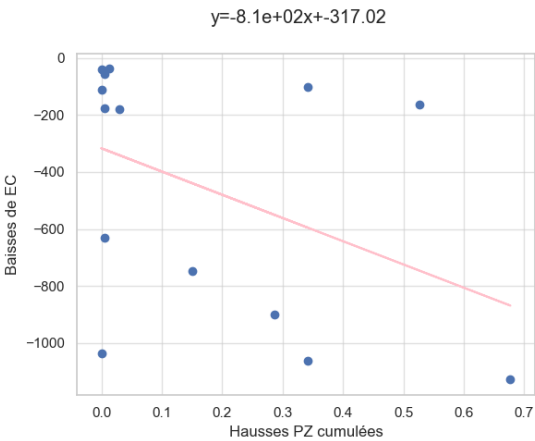
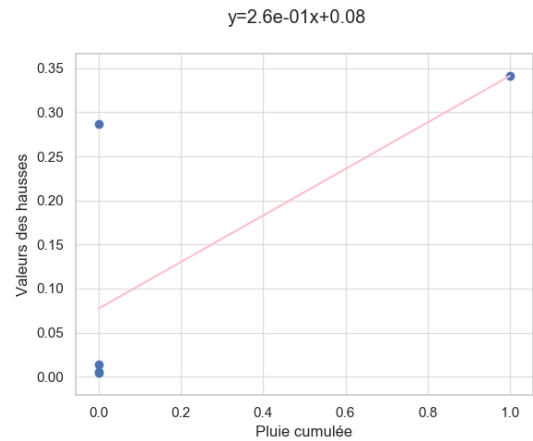
12262X0186_94m



matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

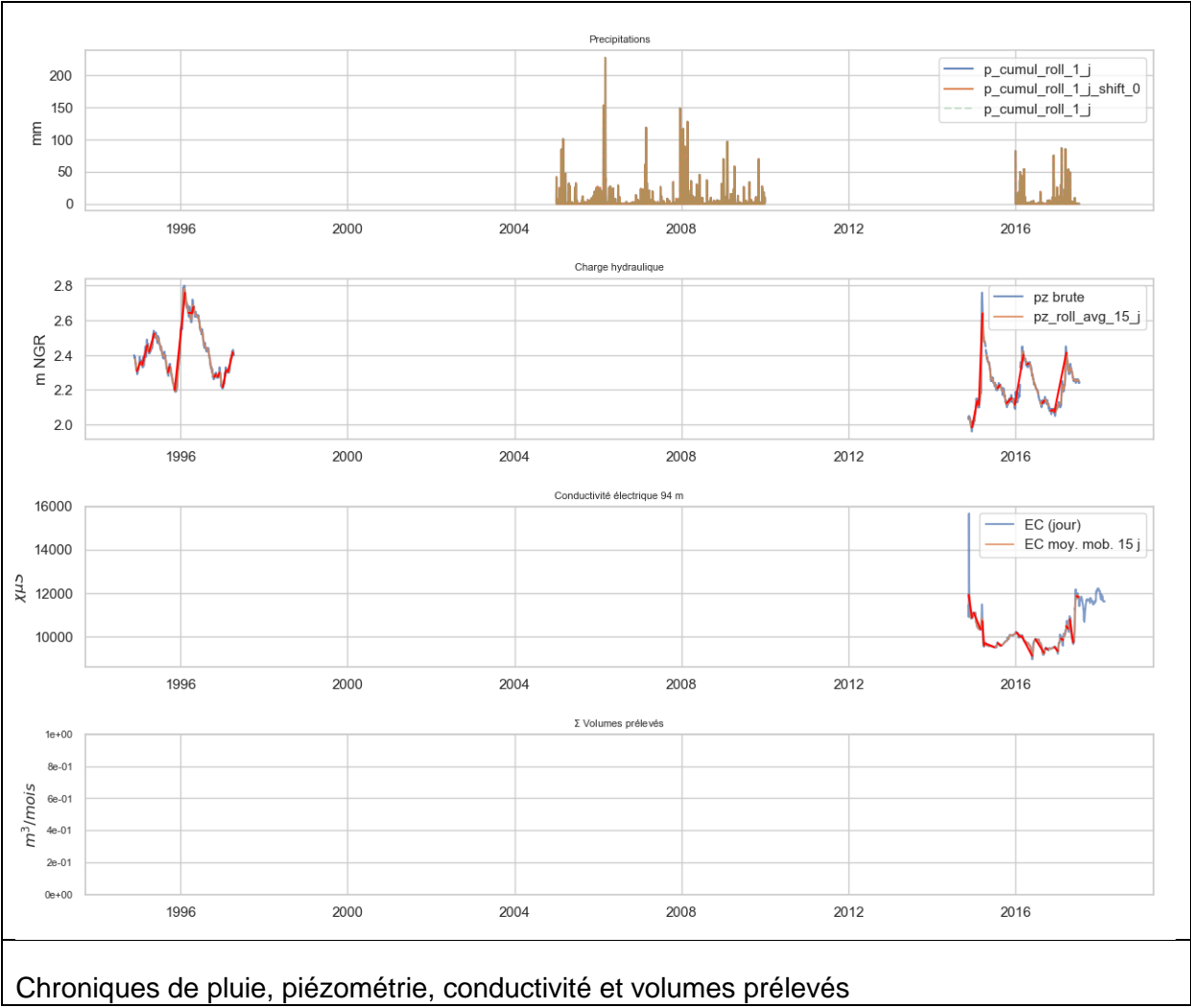


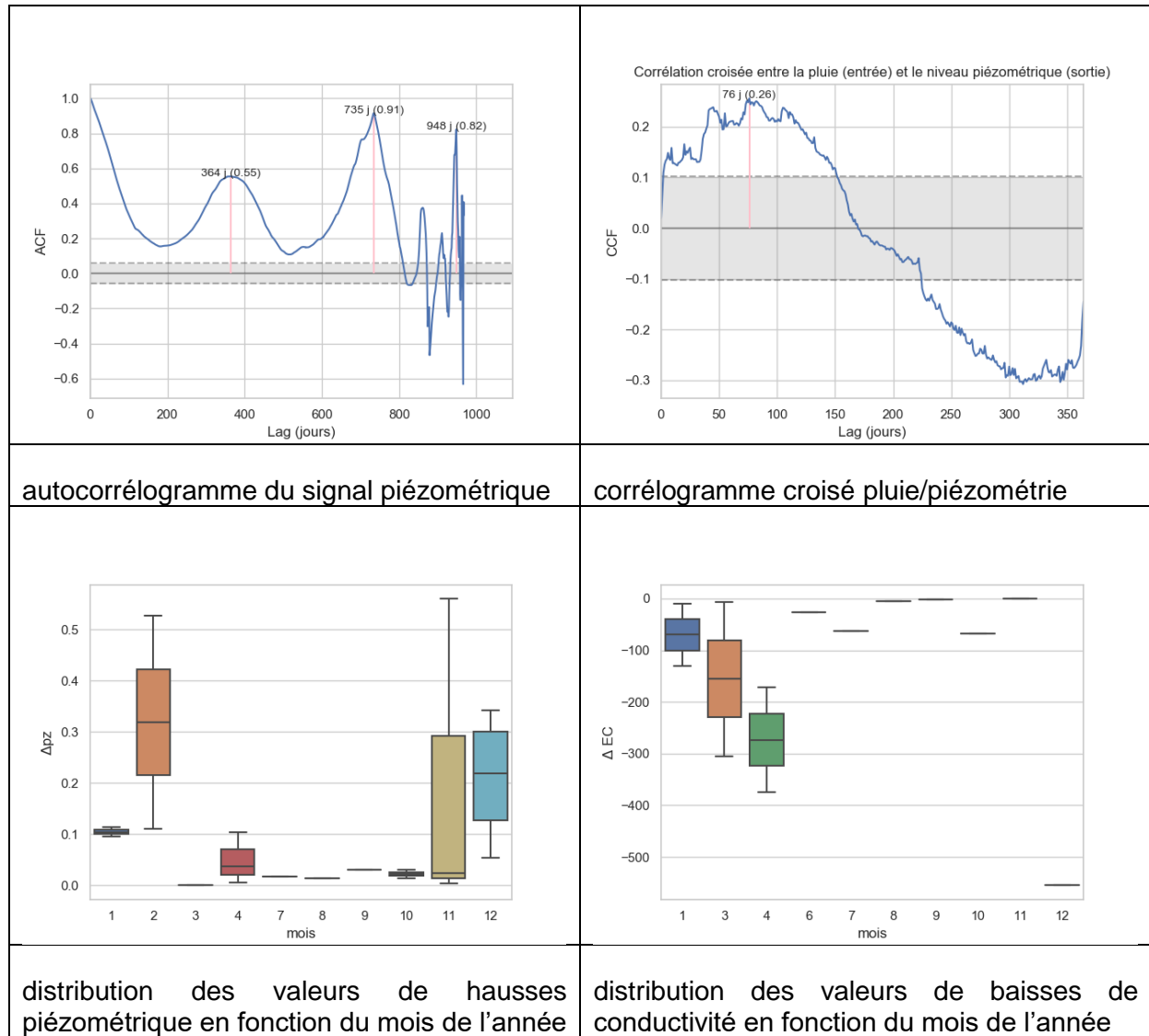
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

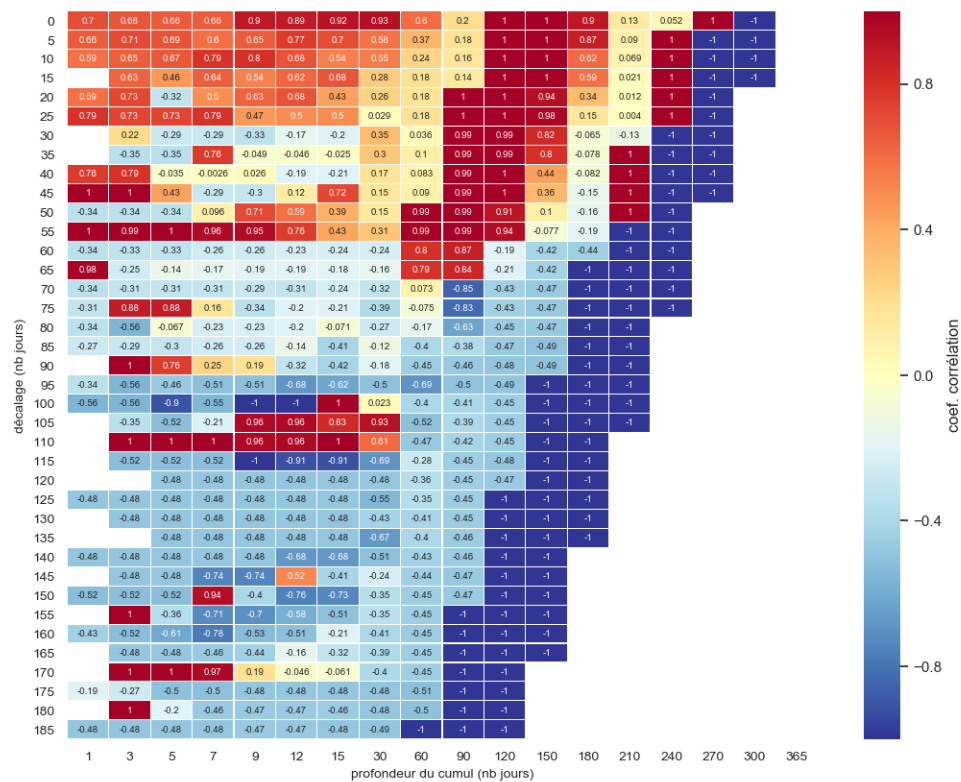


relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

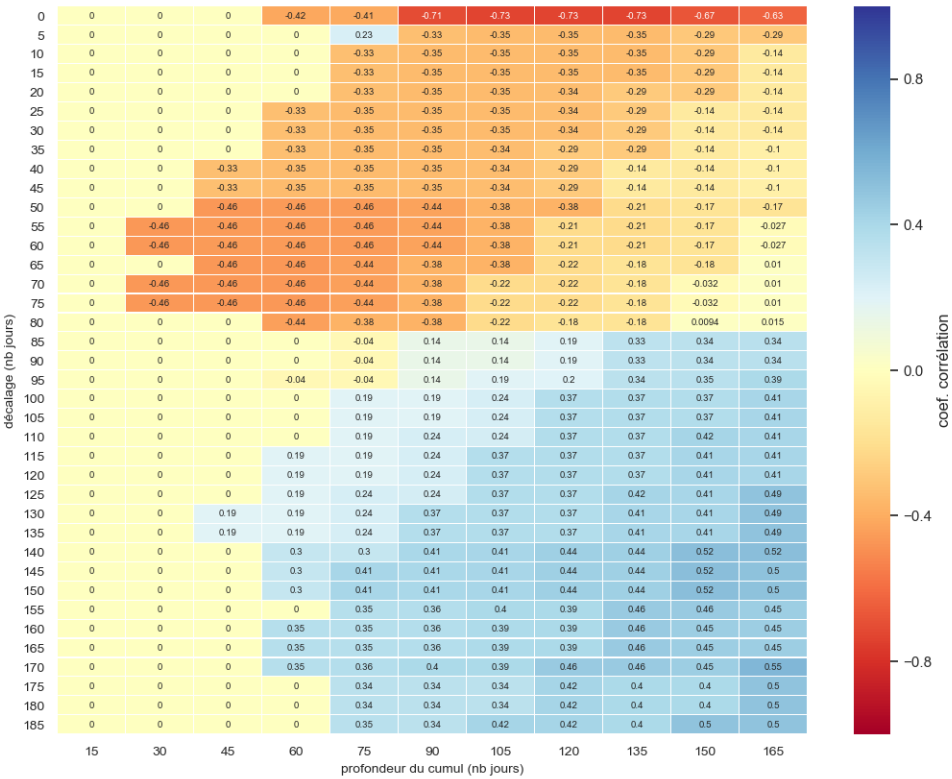
relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs



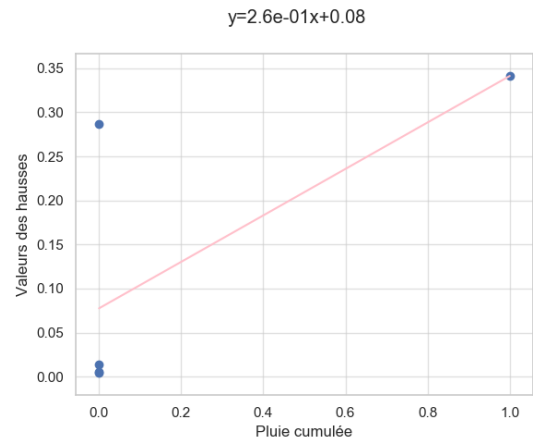
12262X0186_103m



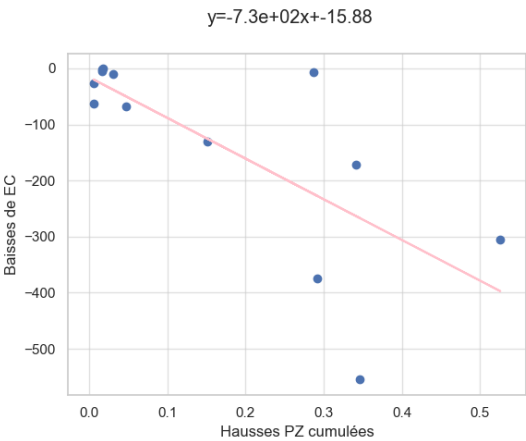
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



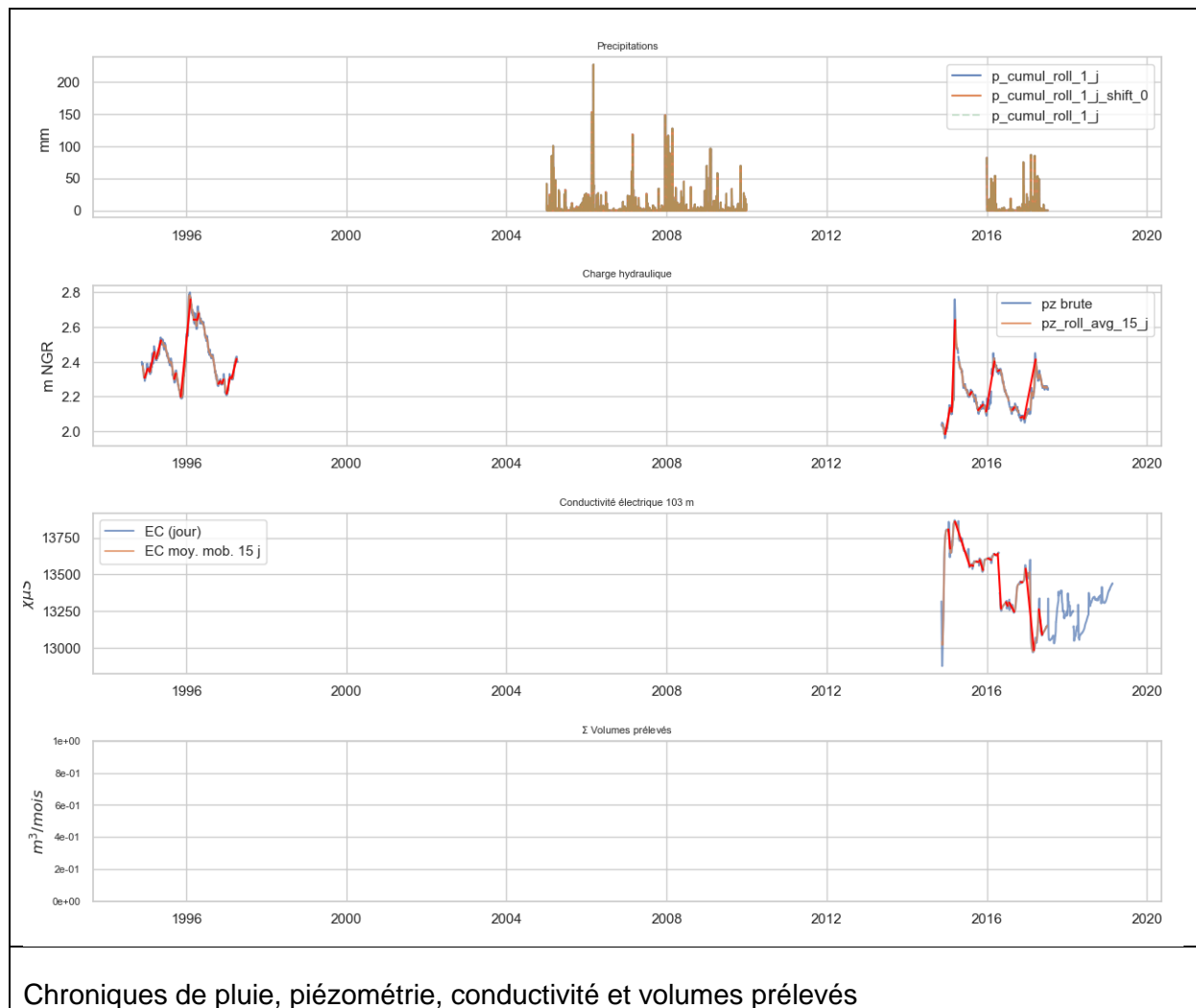
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



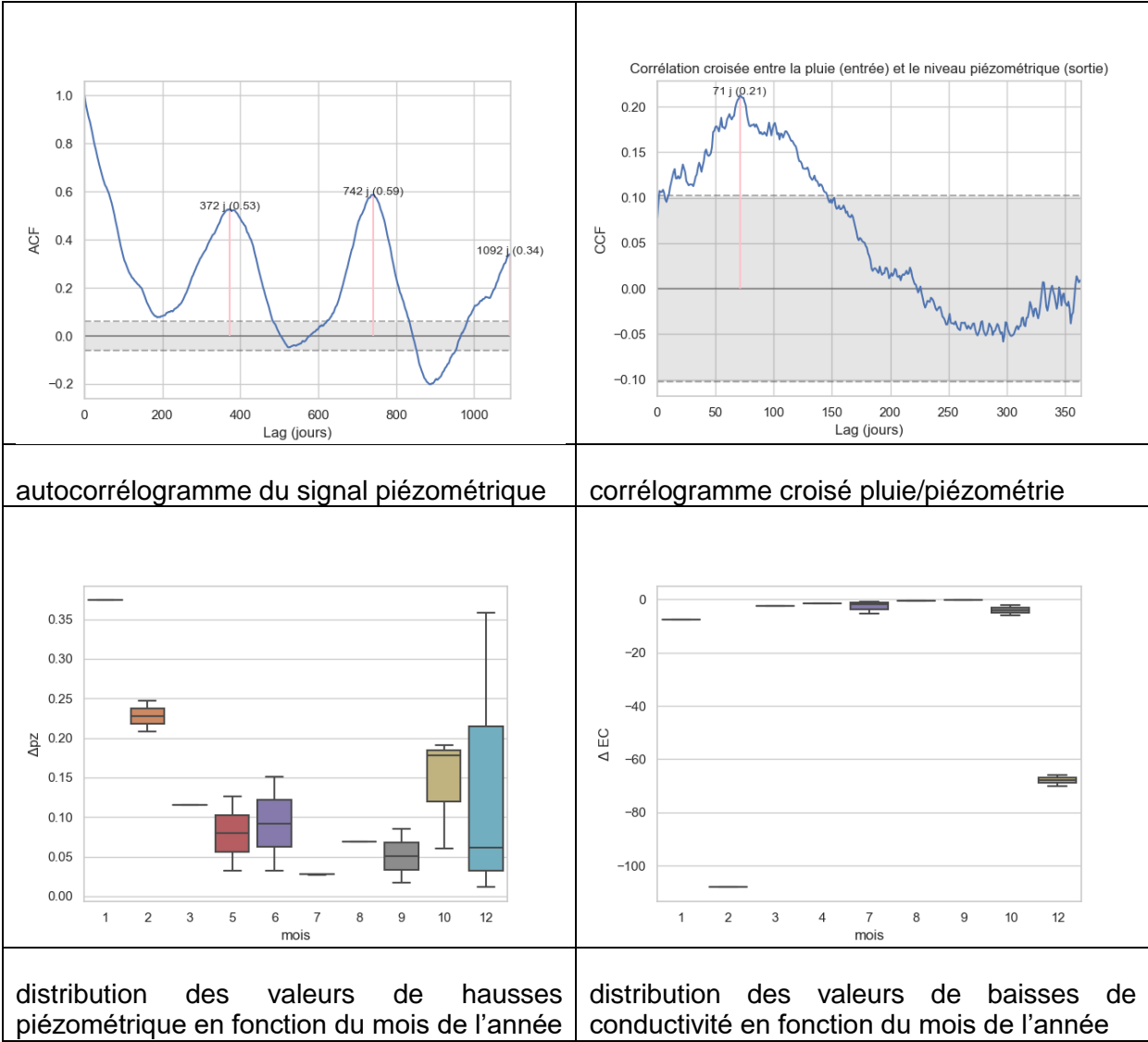
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

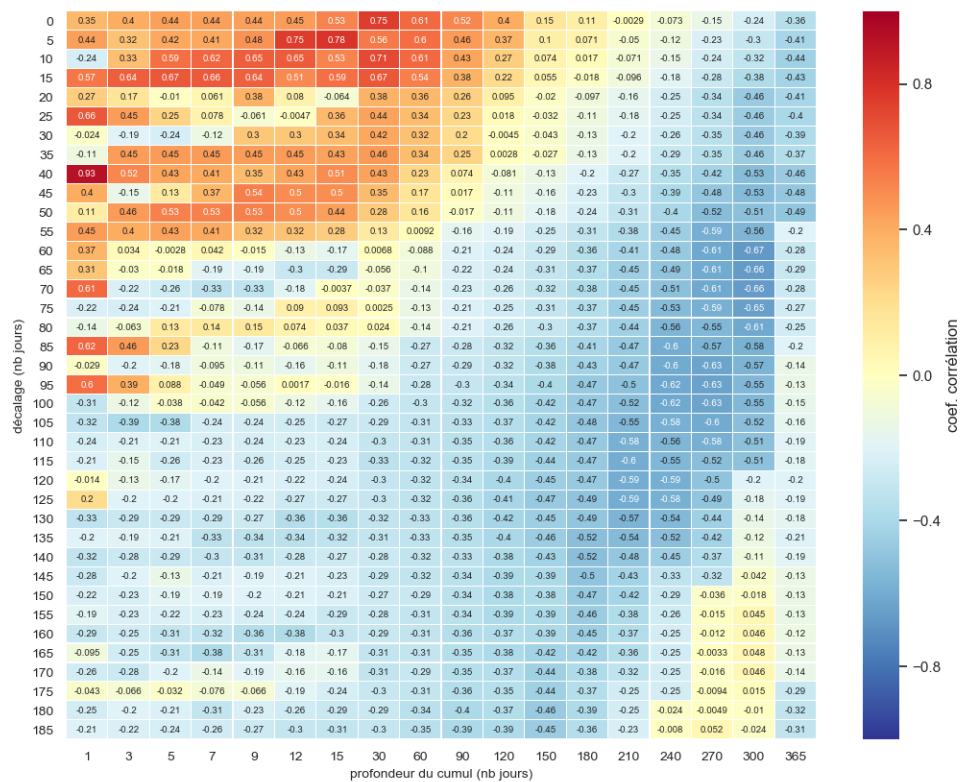


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

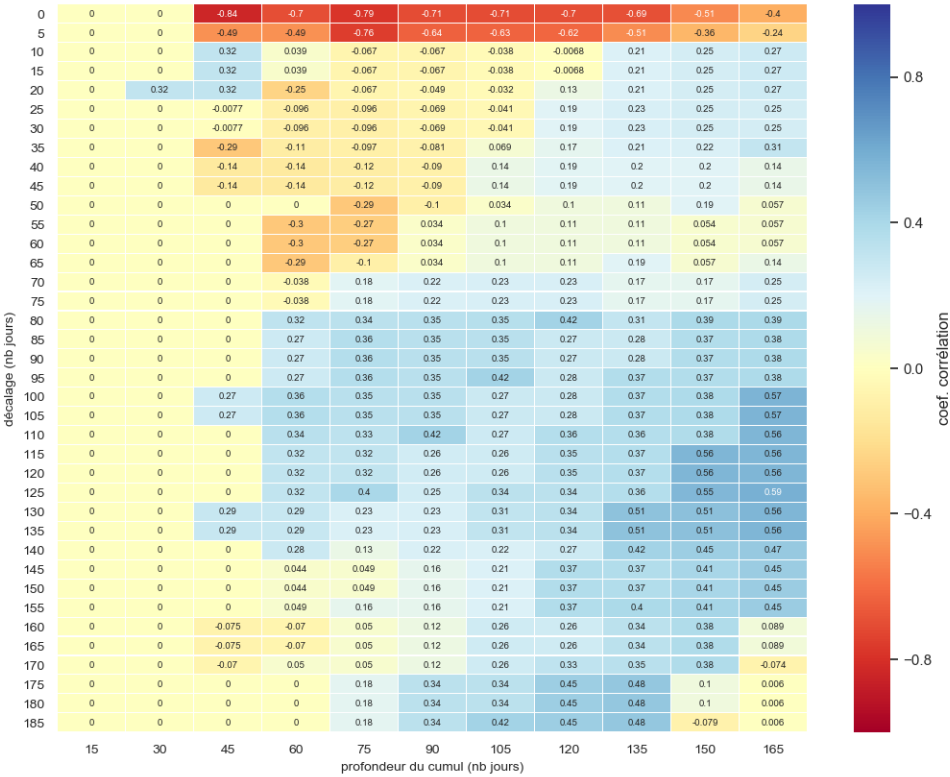


12262X0524_64m

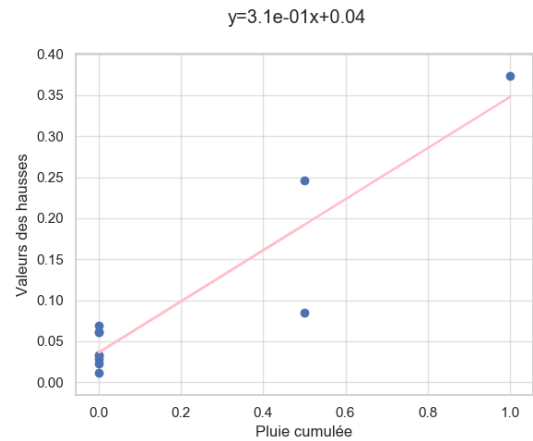




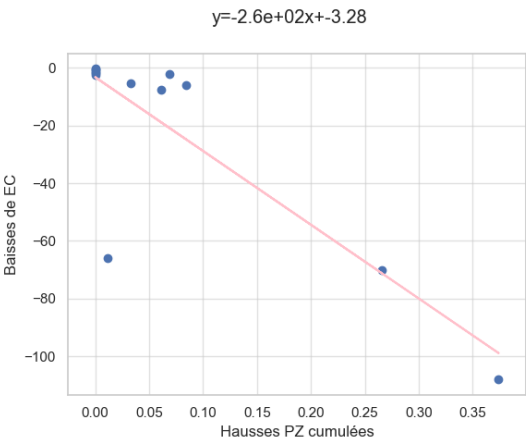
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



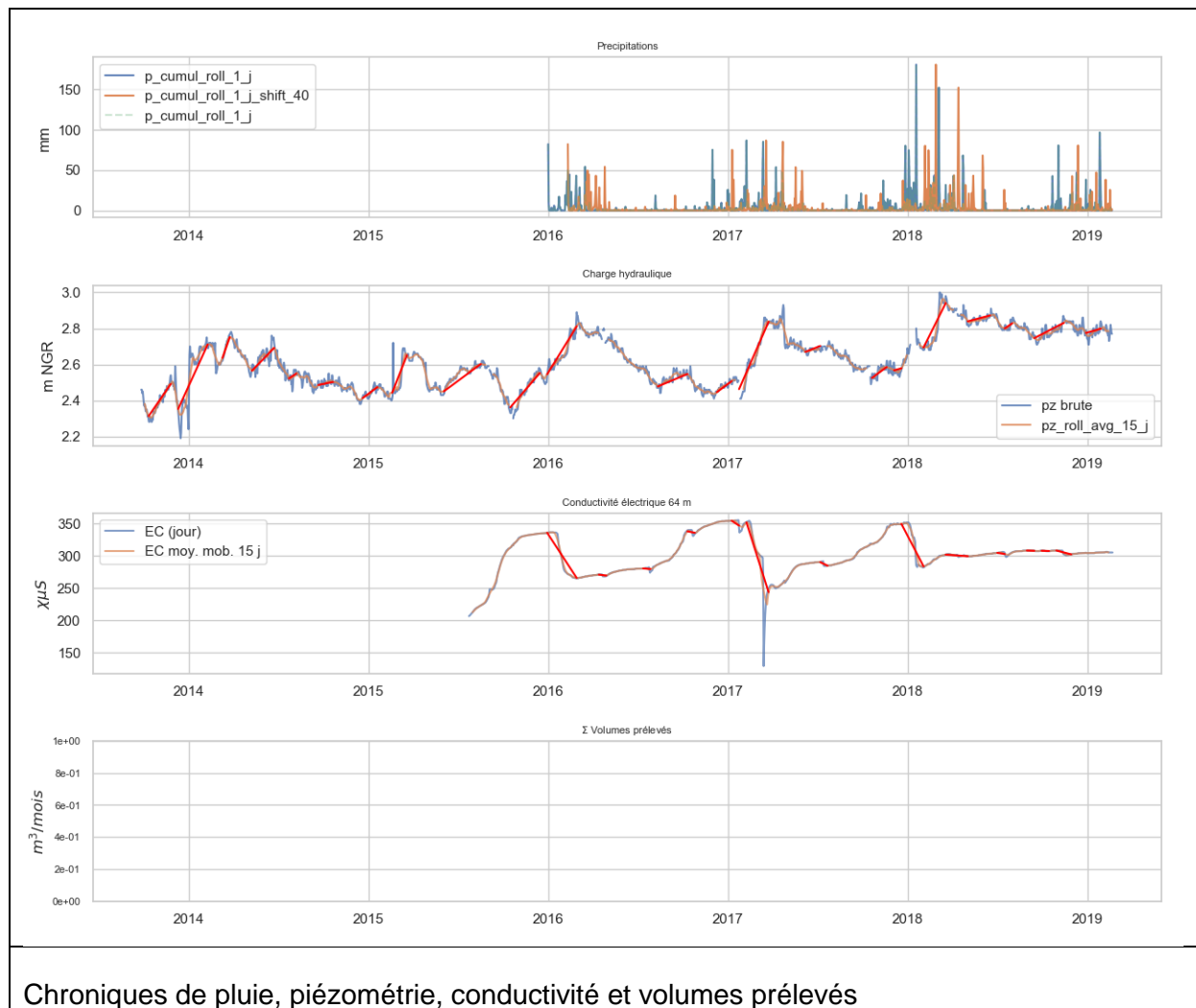
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



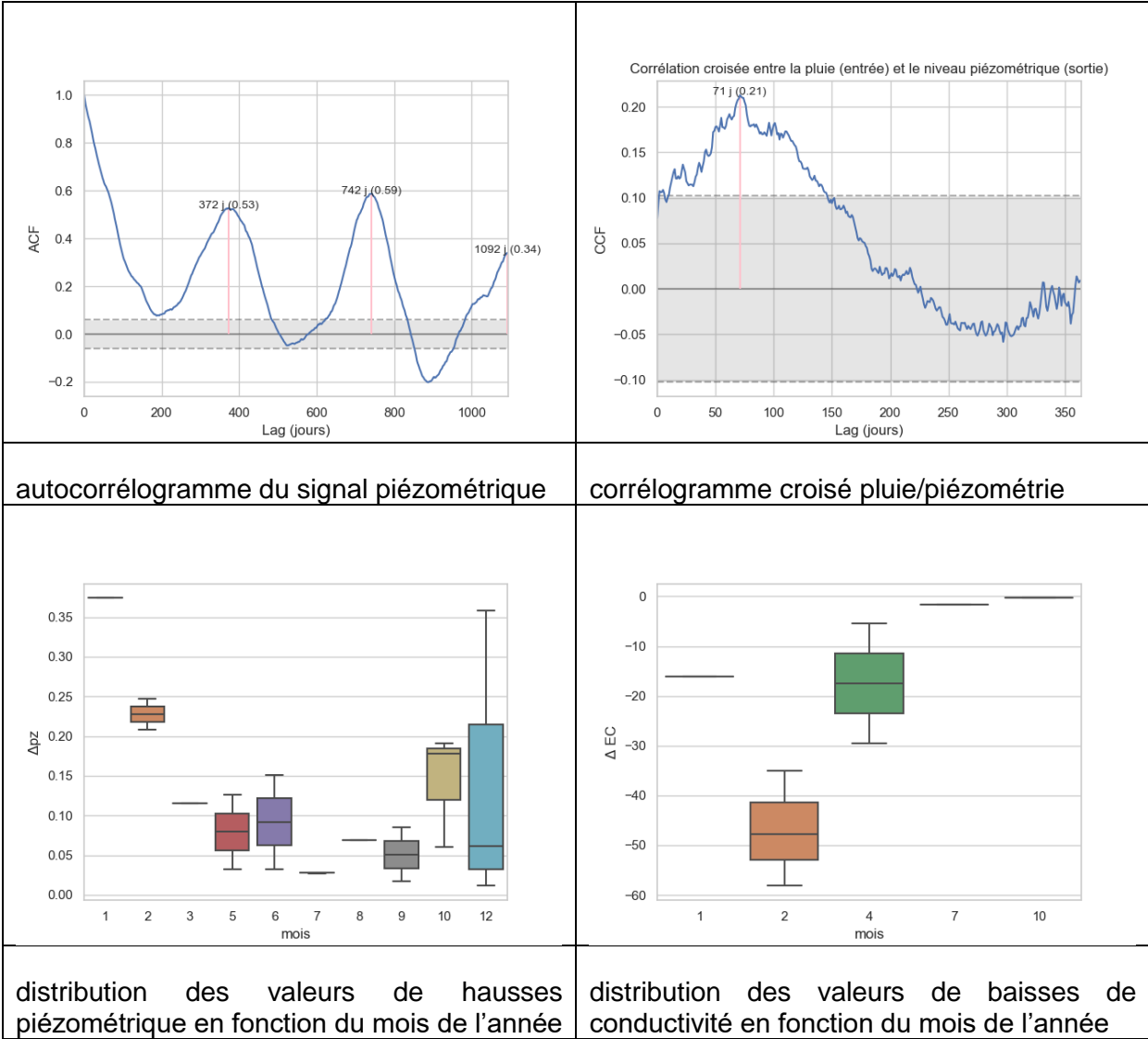
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

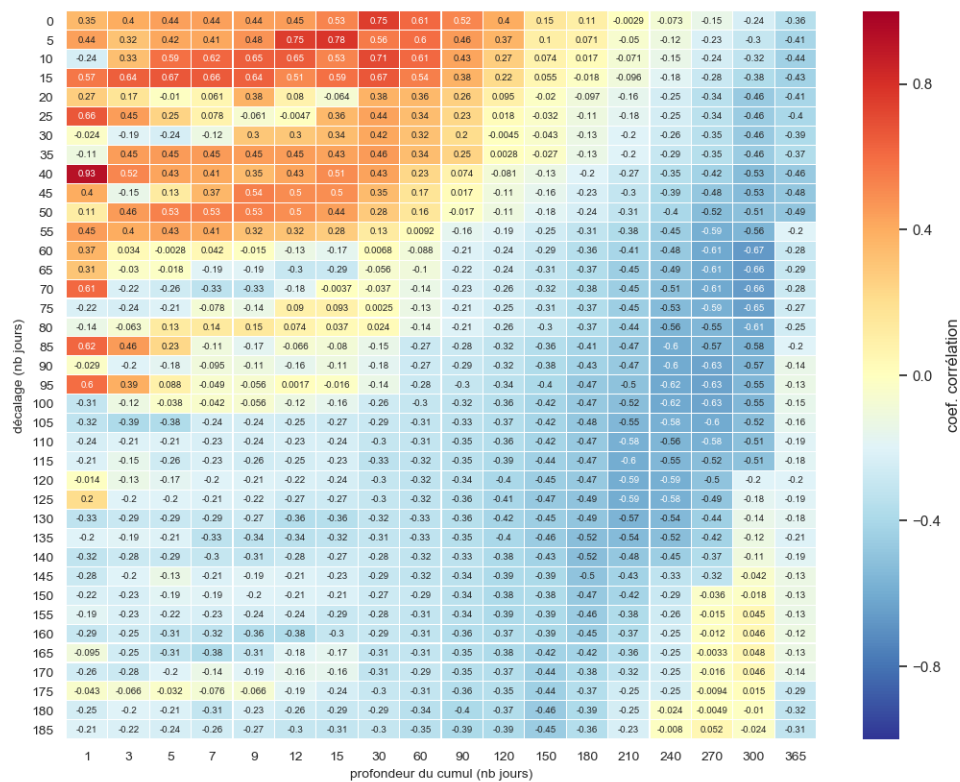


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

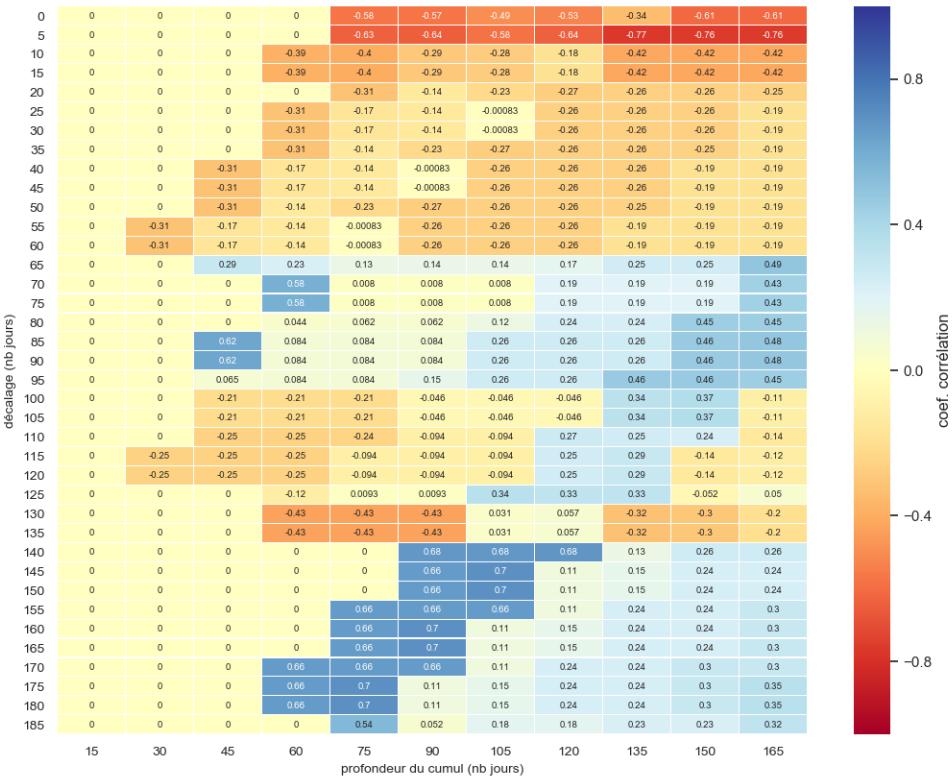


12262X0524_69m

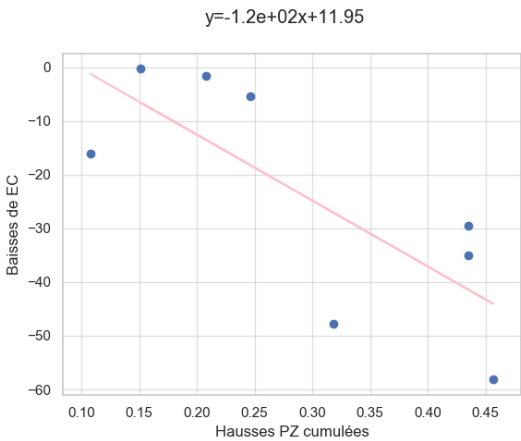
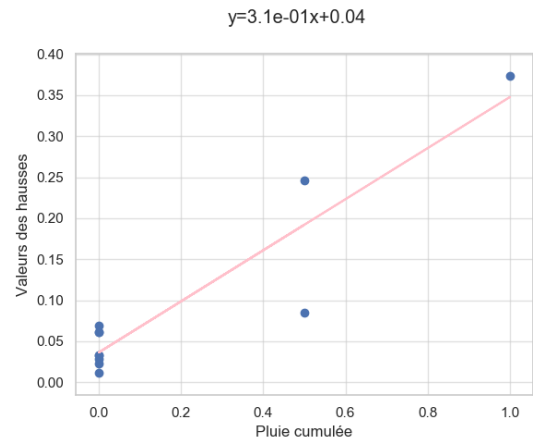




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

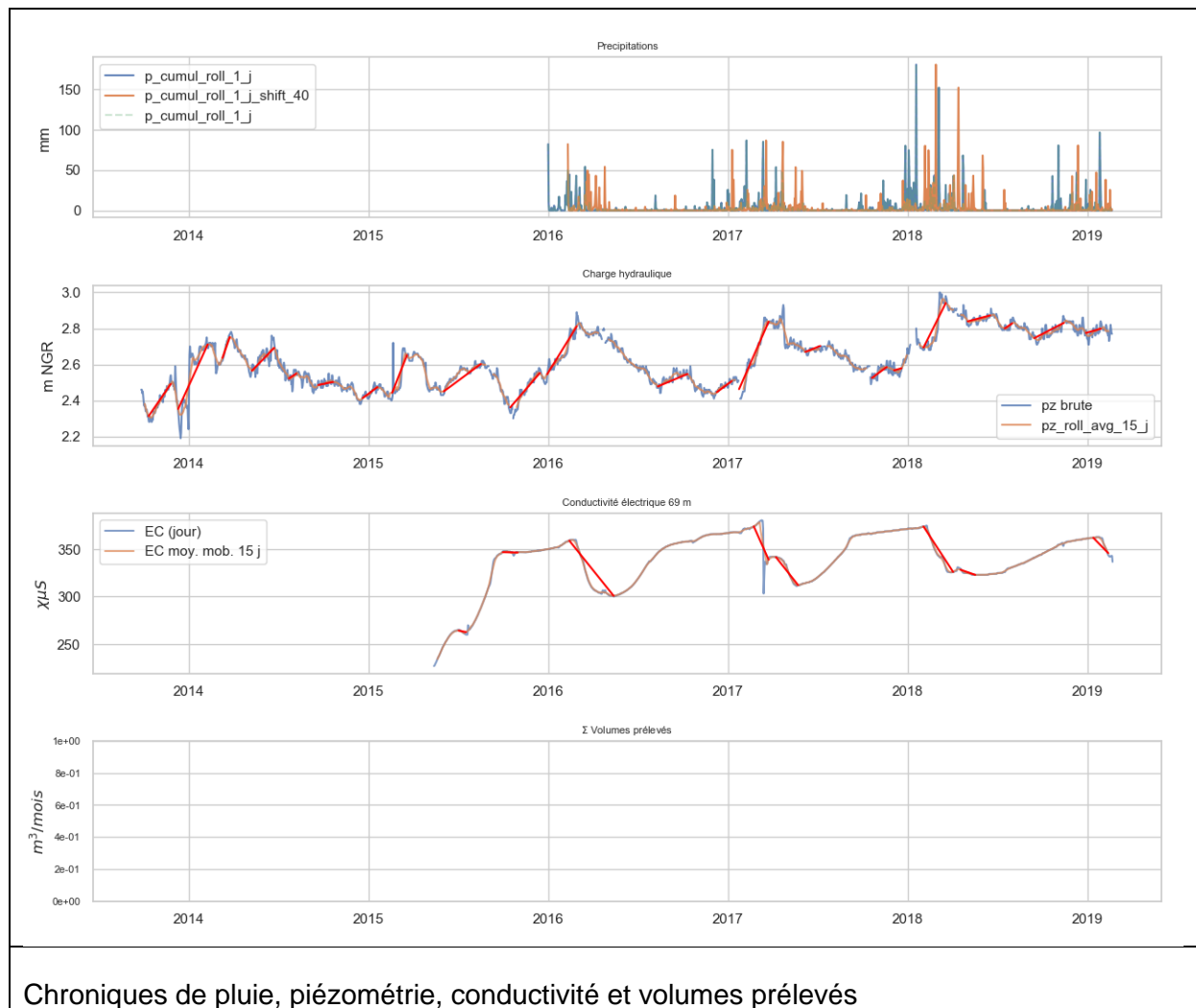


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

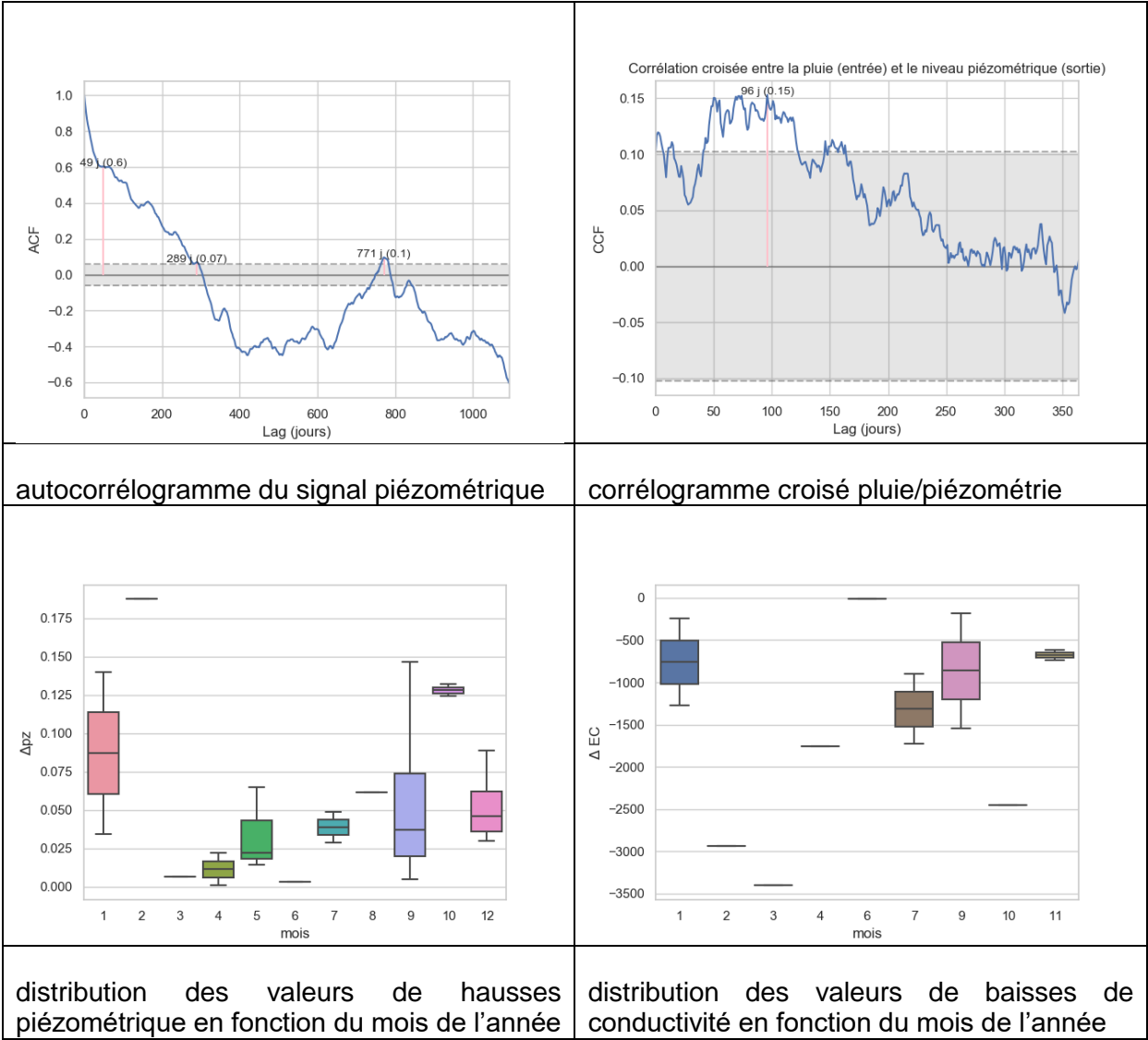


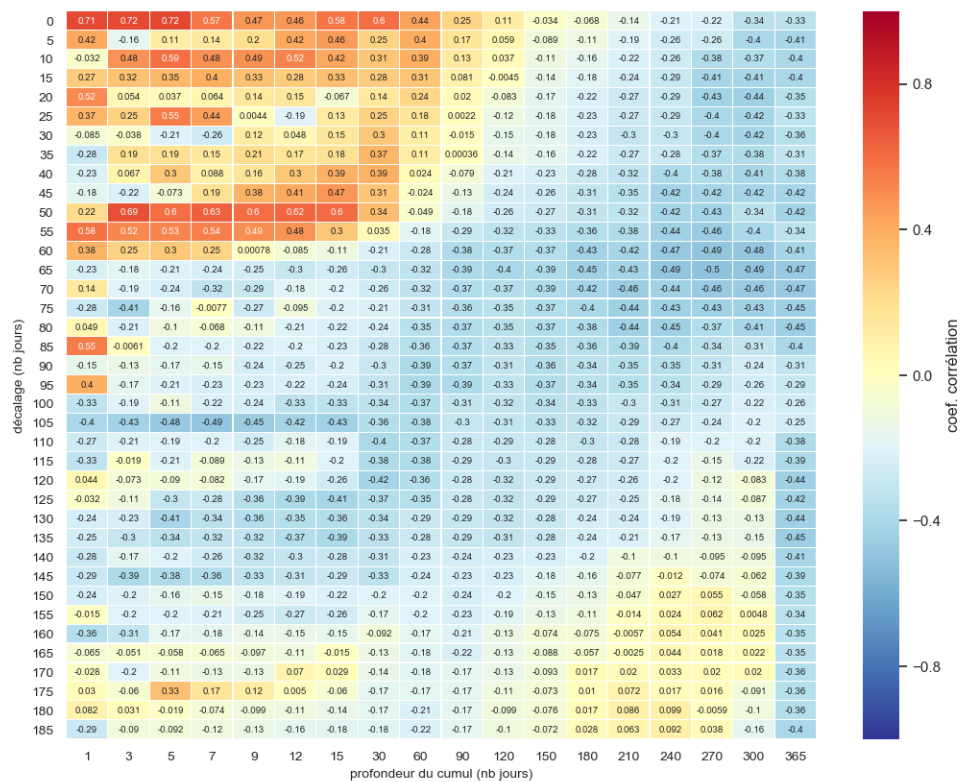
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

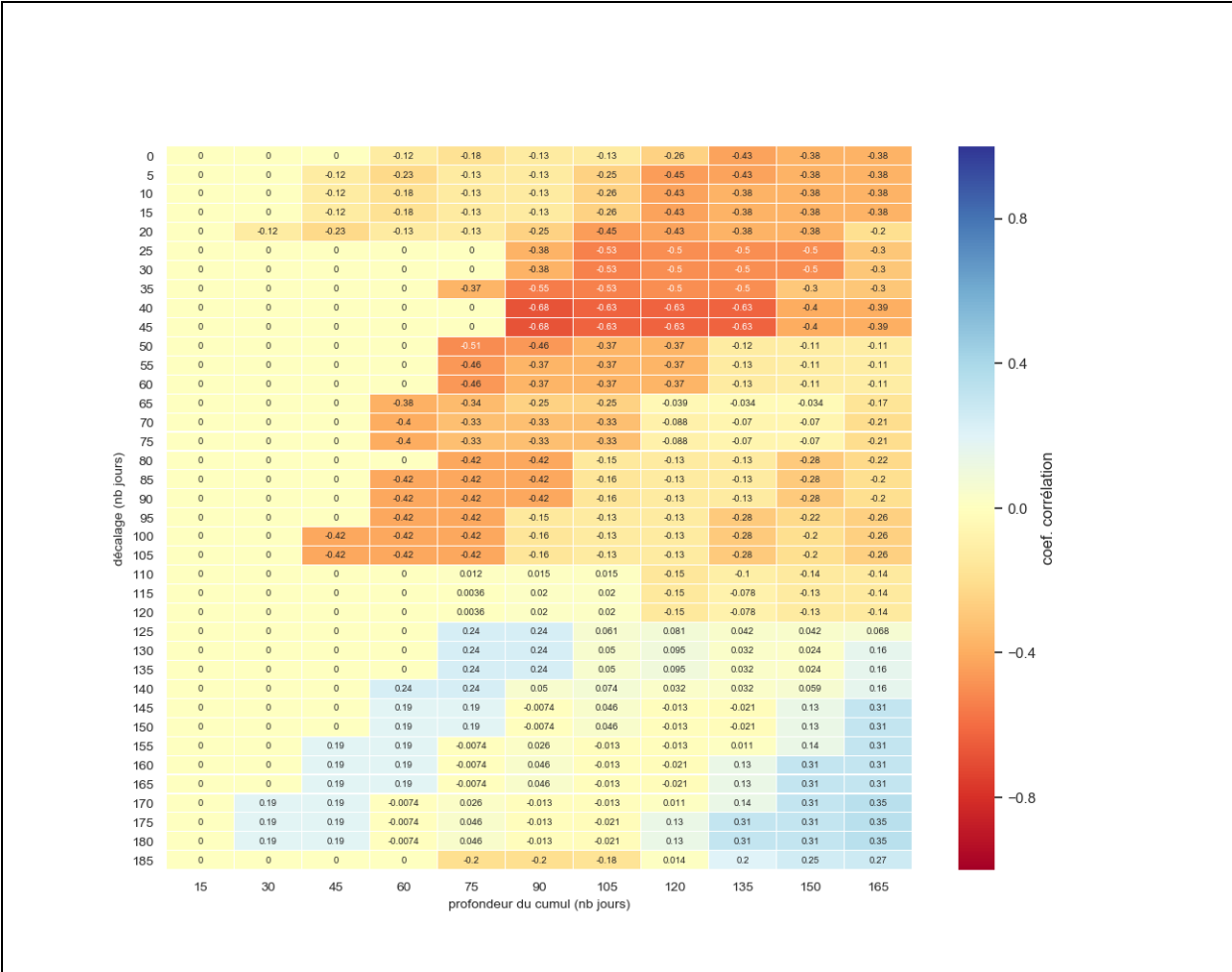


12262X0525_128m

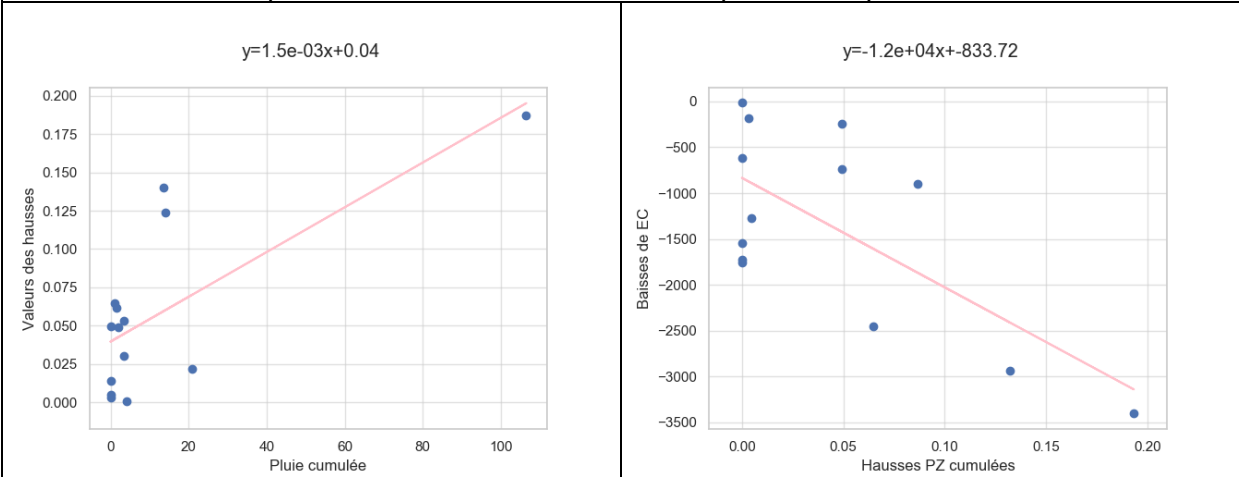




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

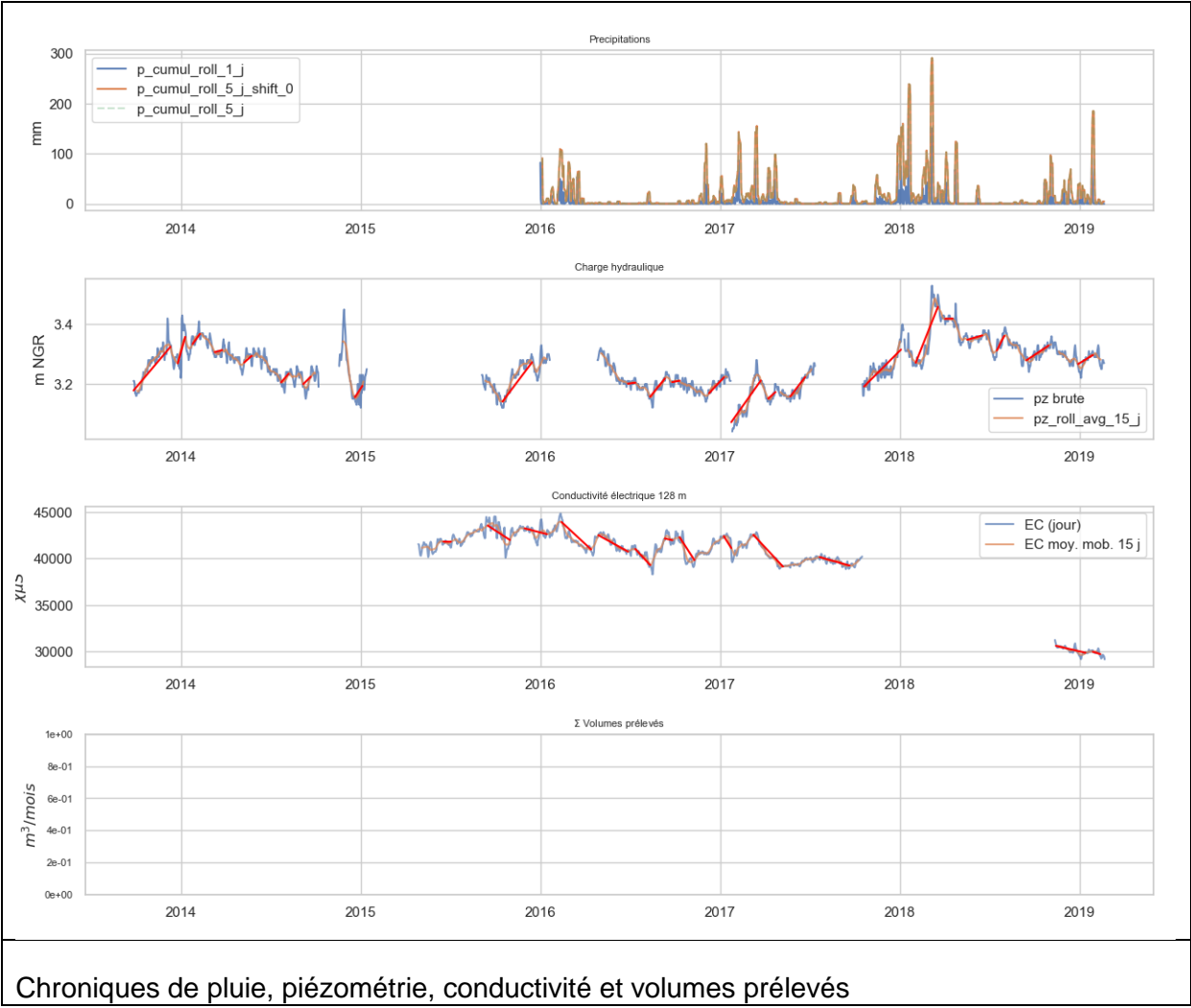


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

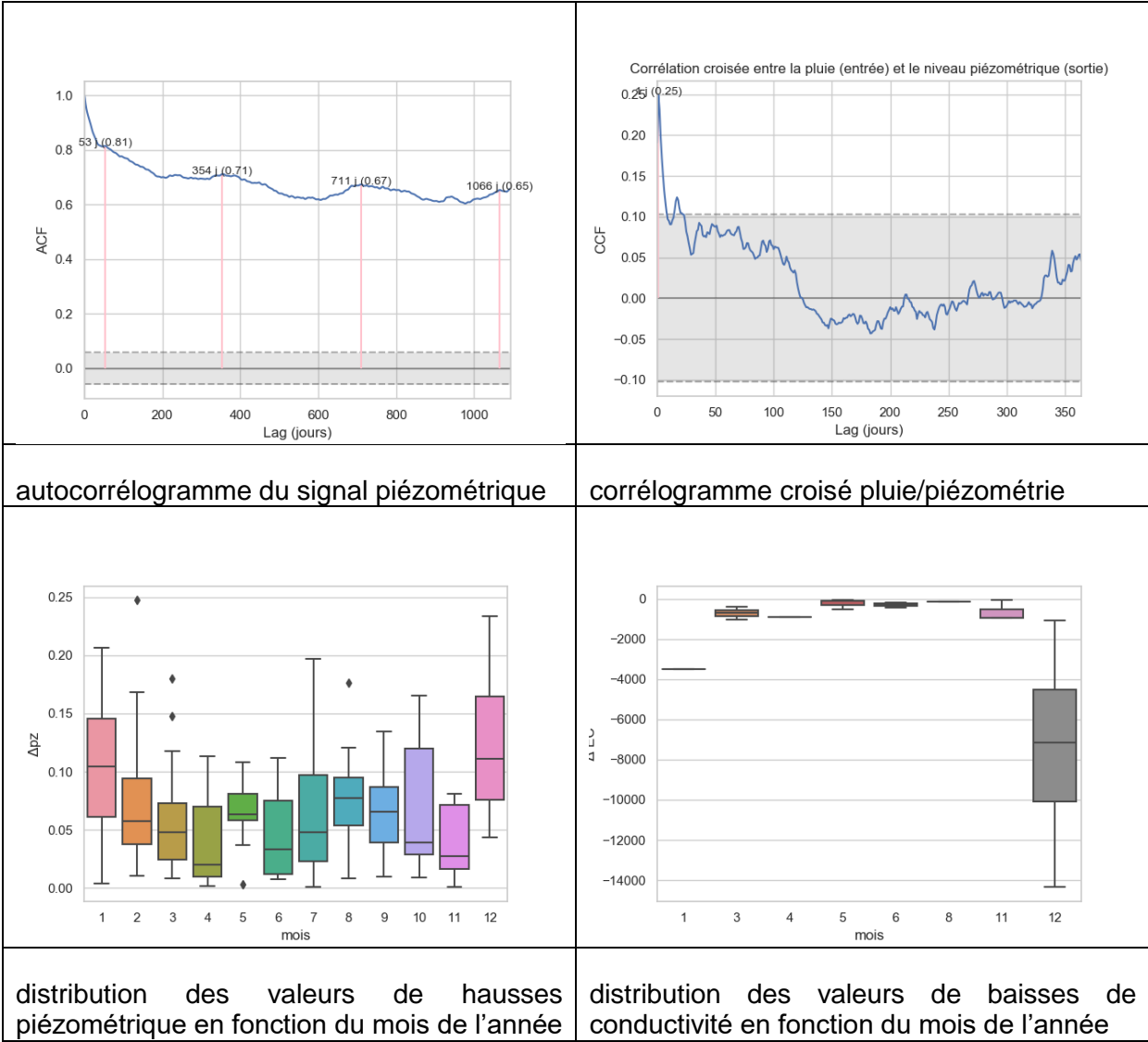


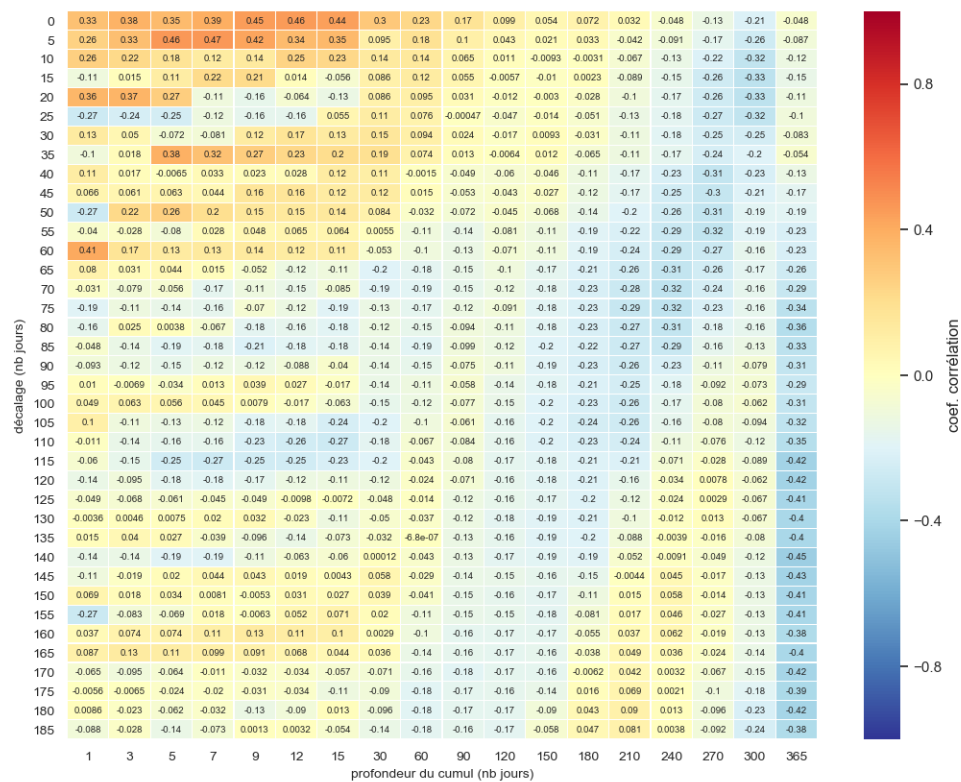
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

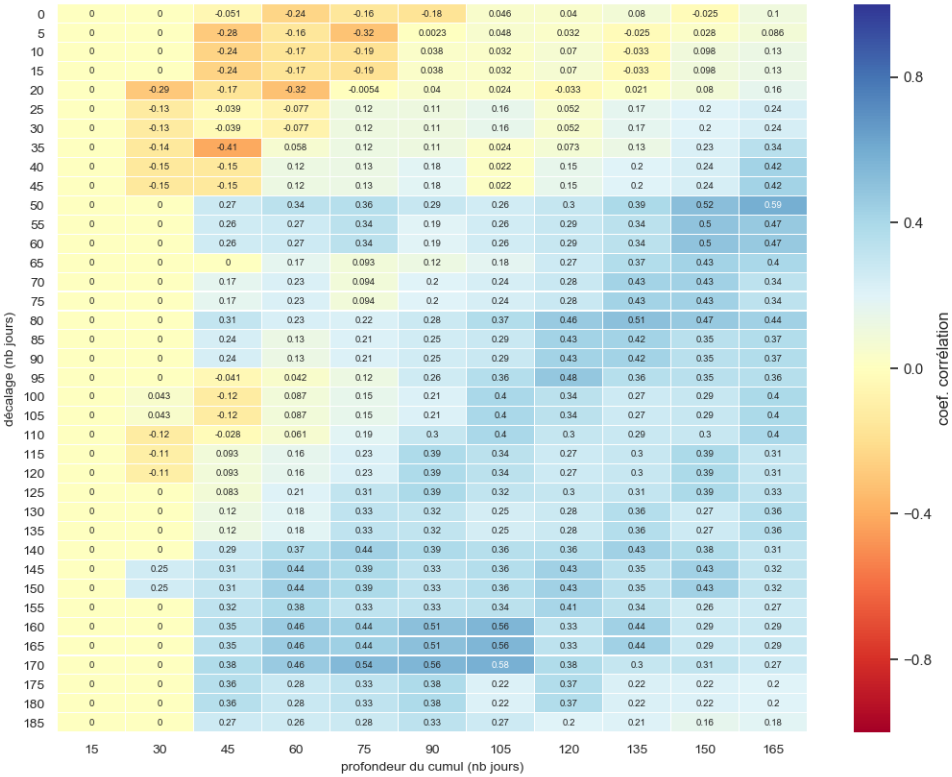


12265X0027_28m

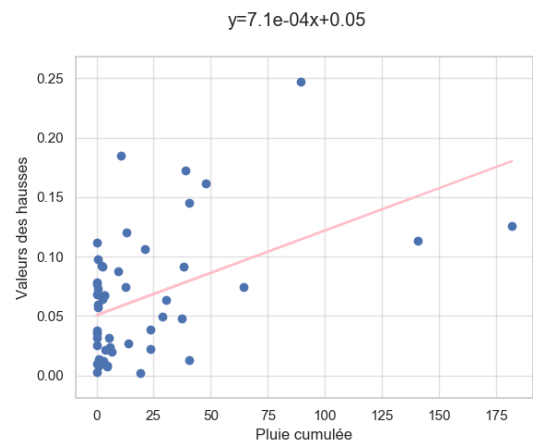




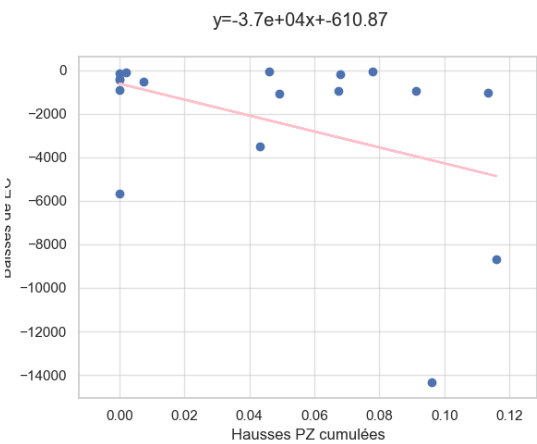
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



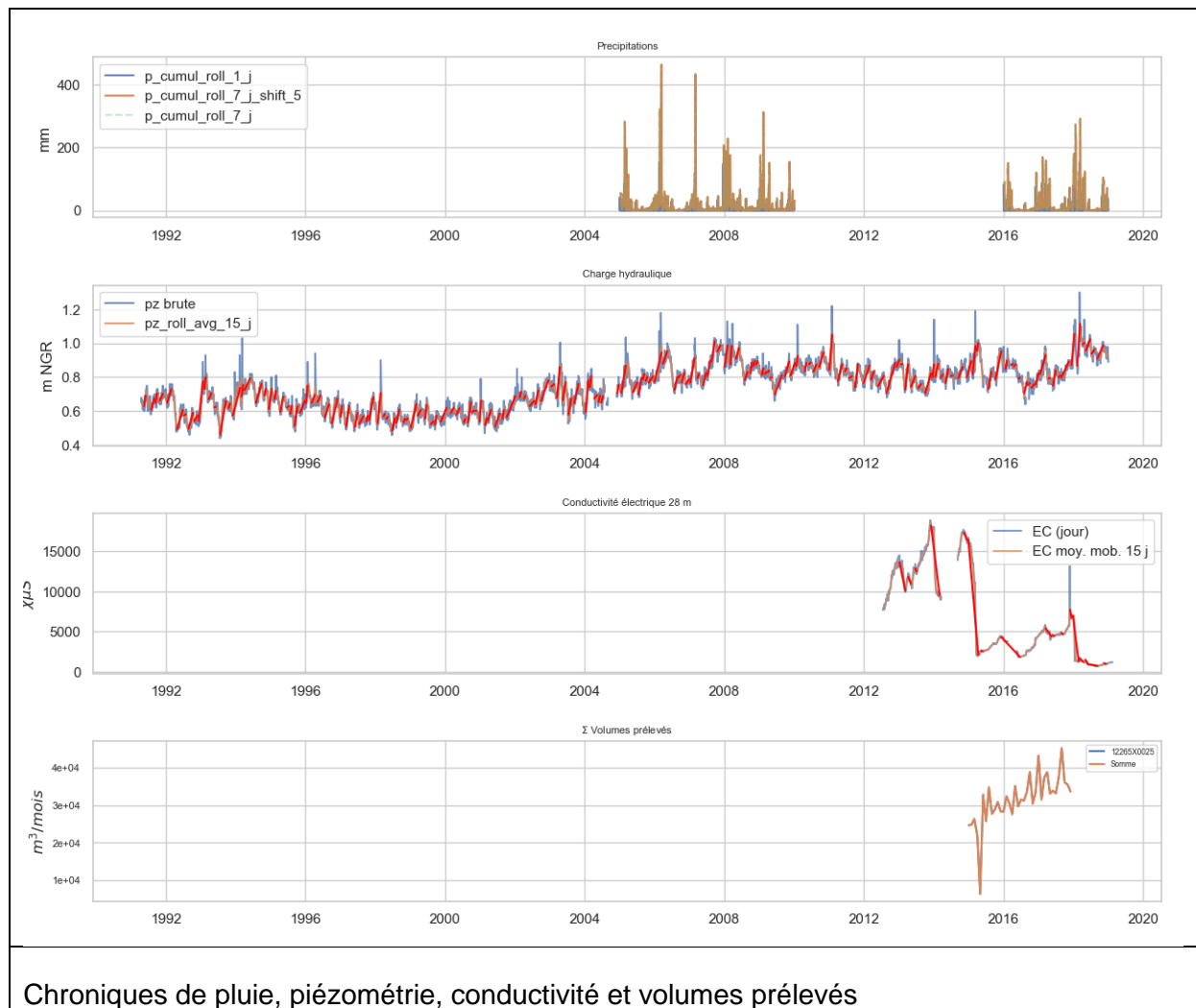
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



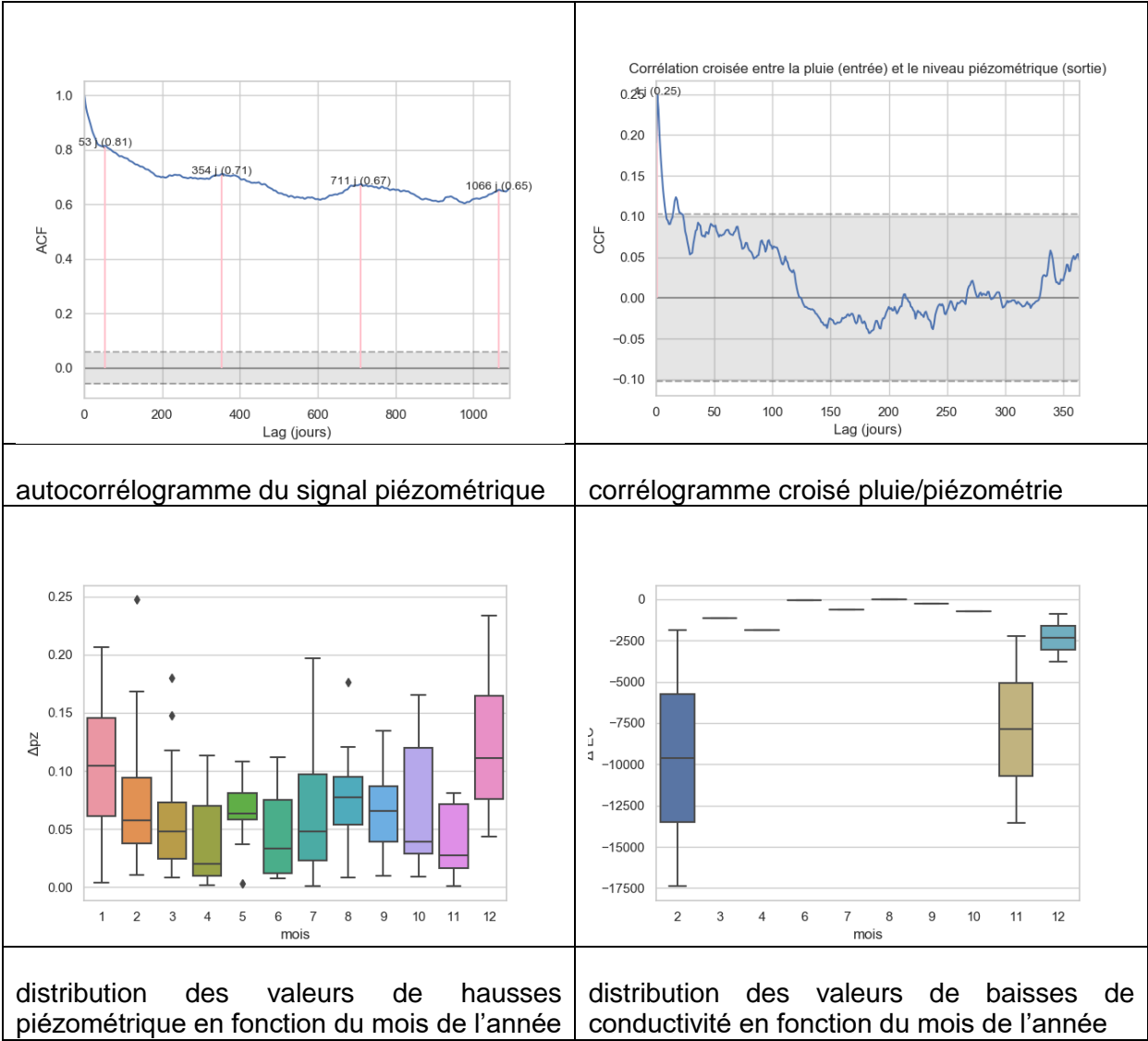
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

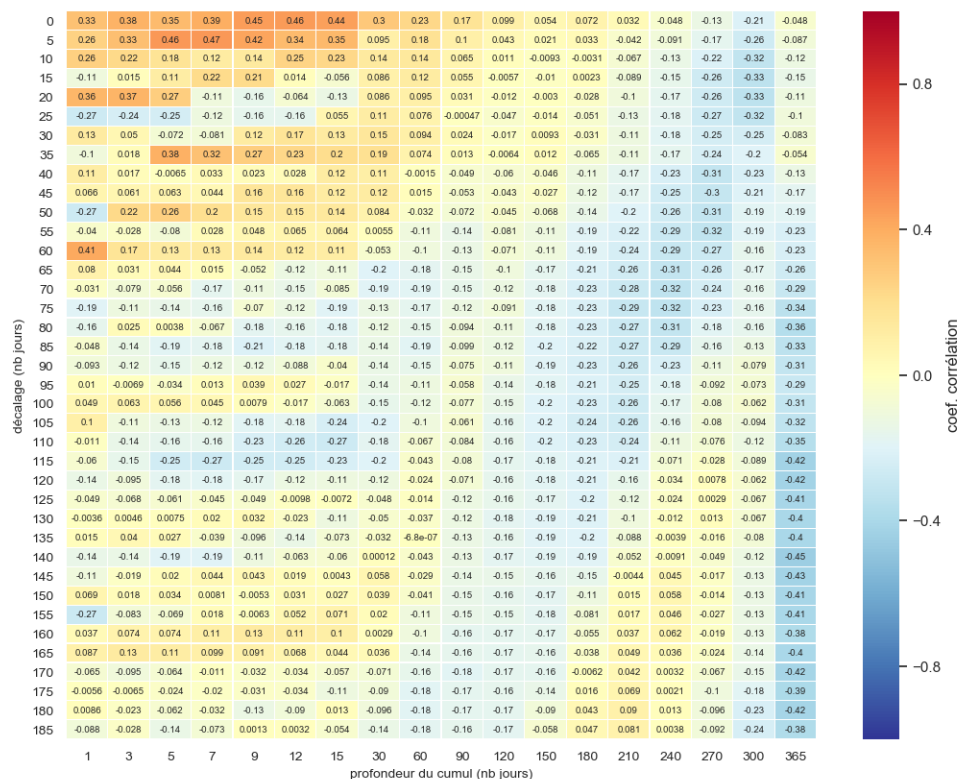


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

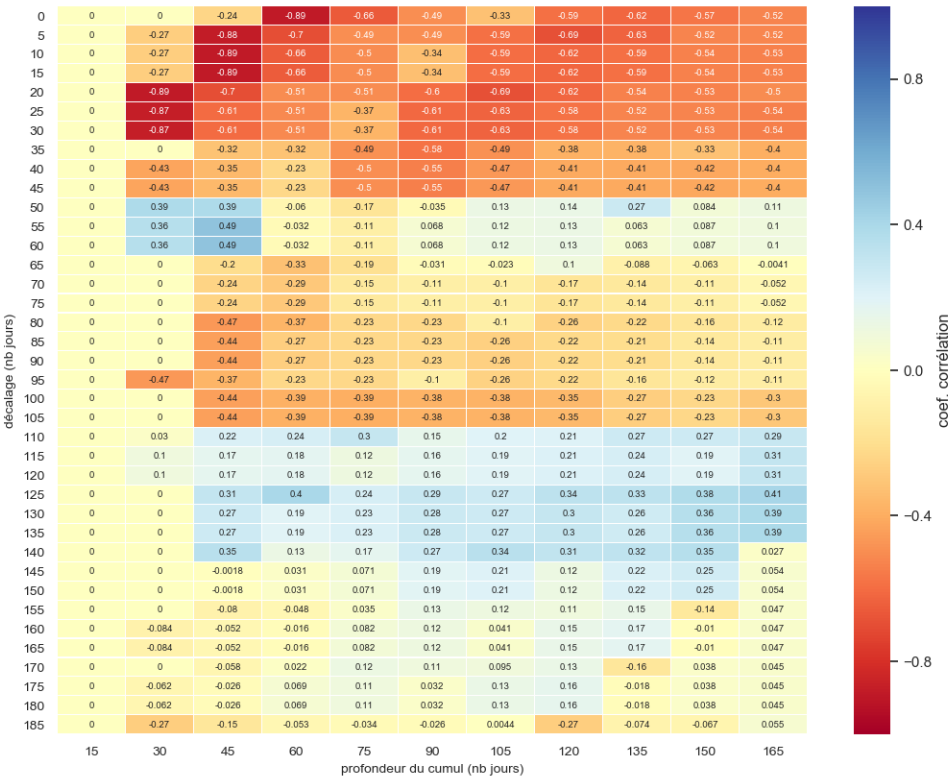


12265X0027_34m

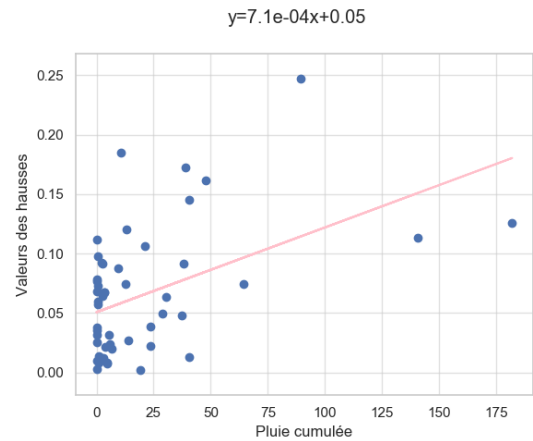




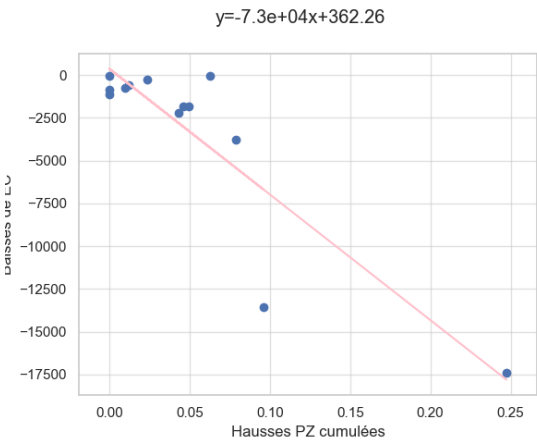
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



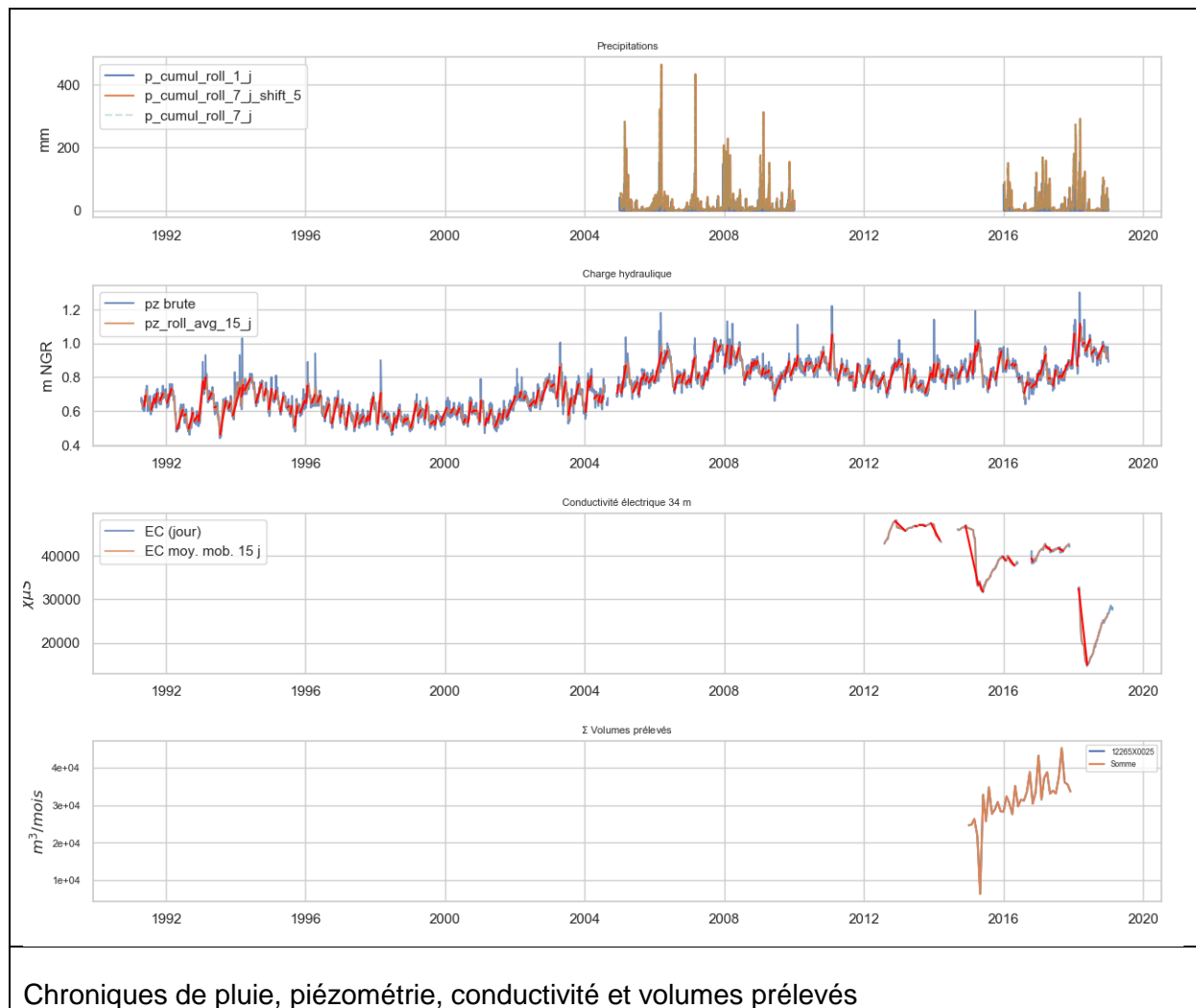
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



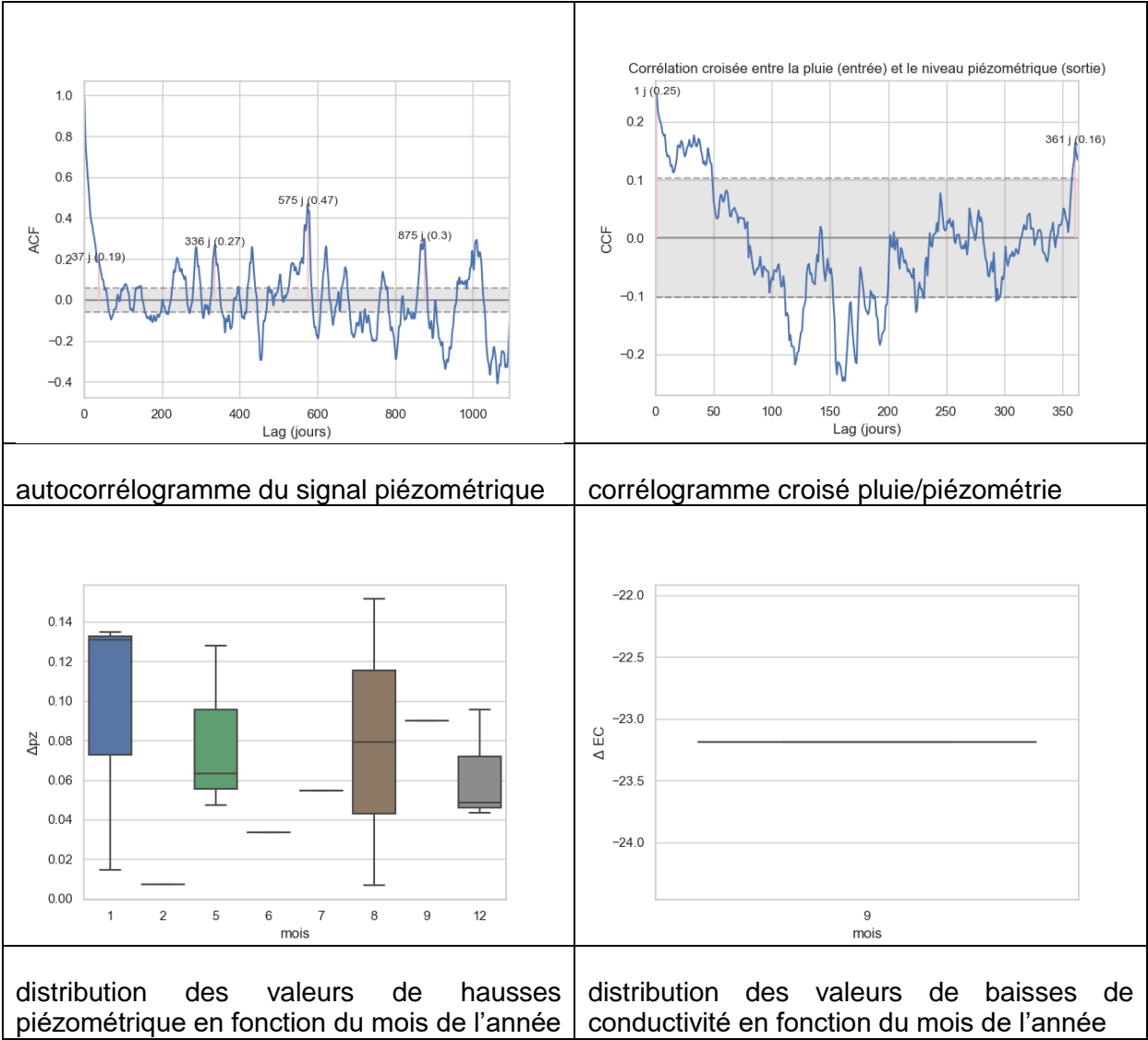
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

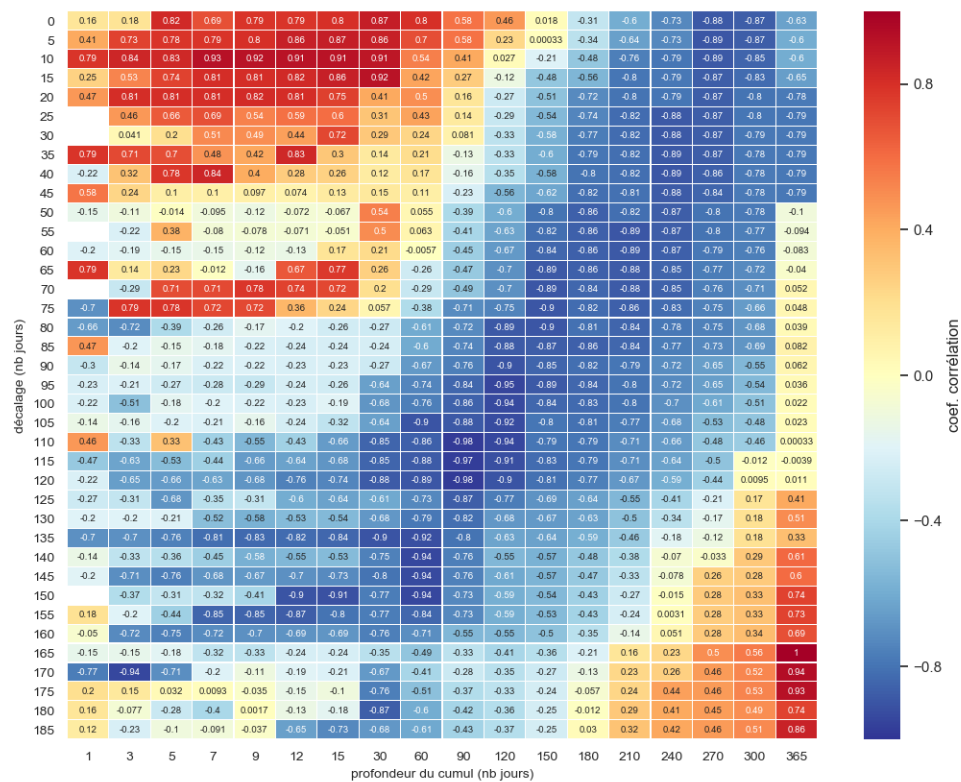


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

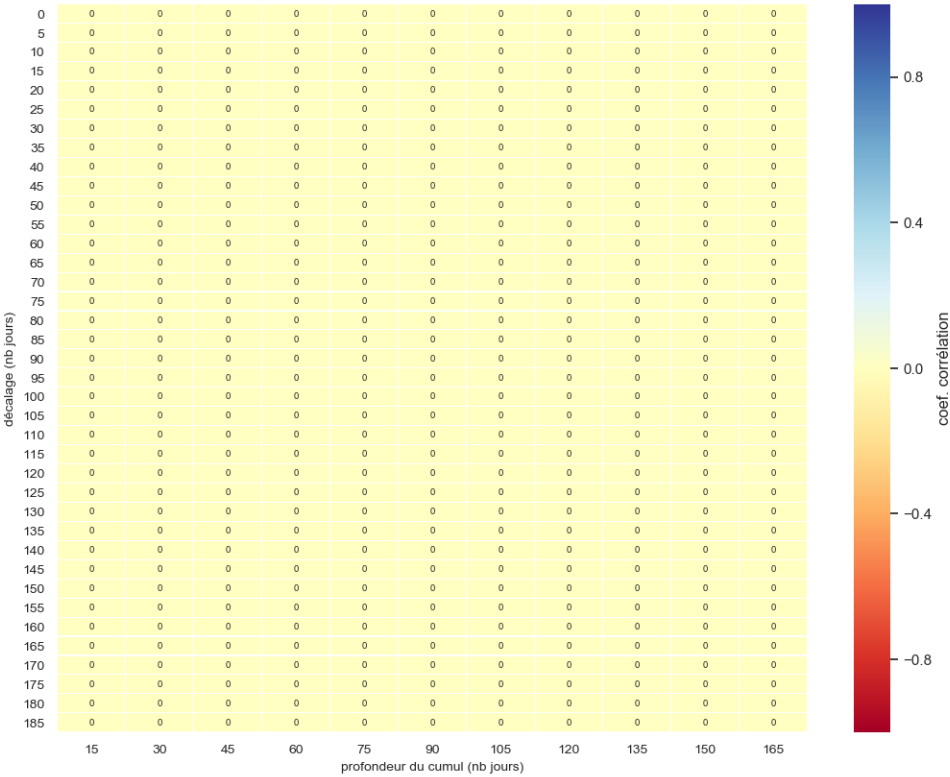


12266X0038_0m

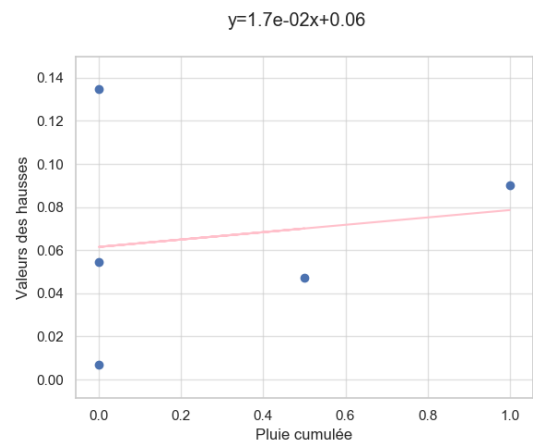




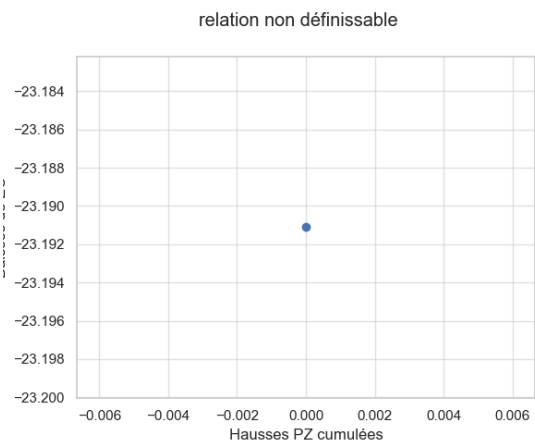
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



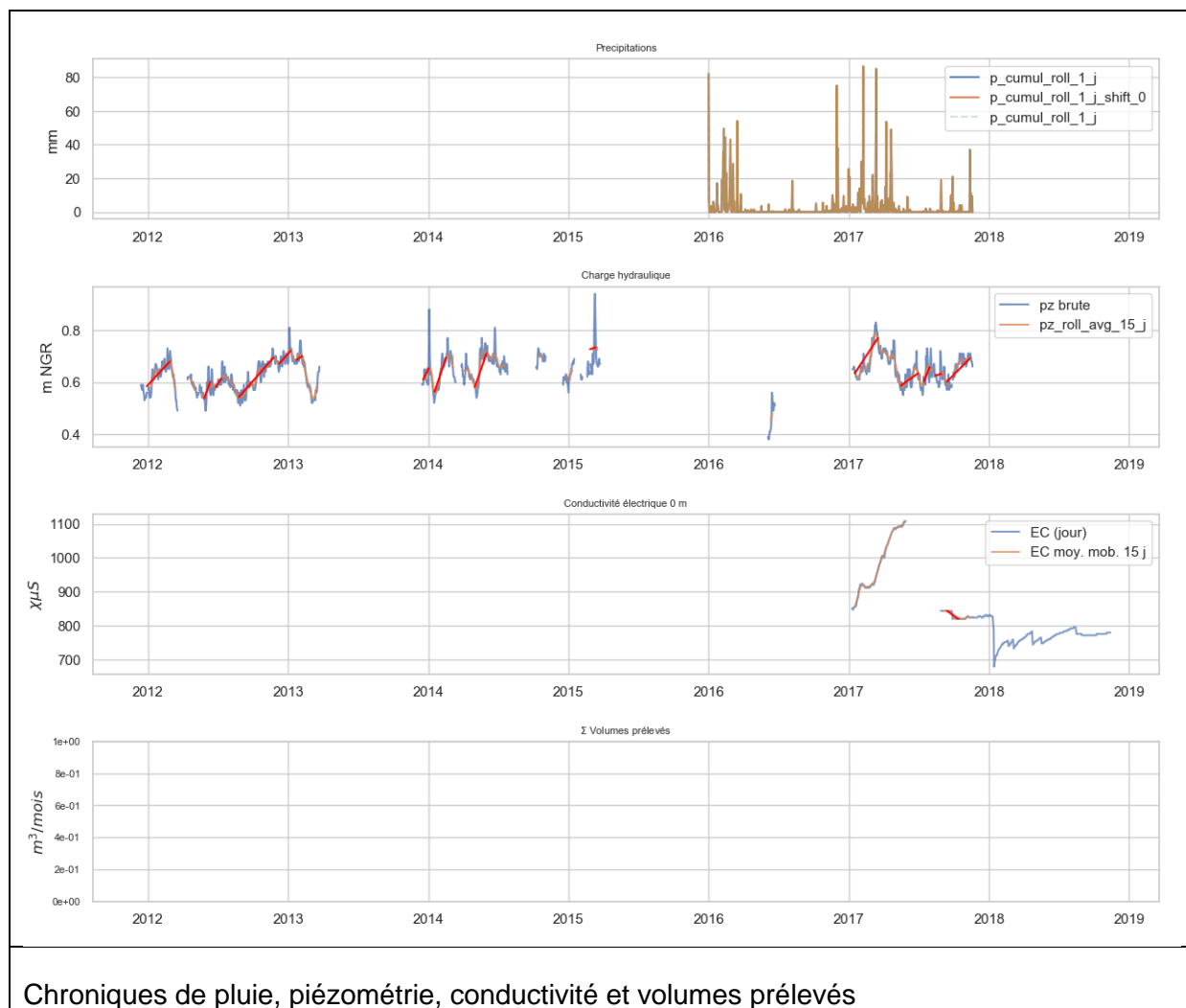
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



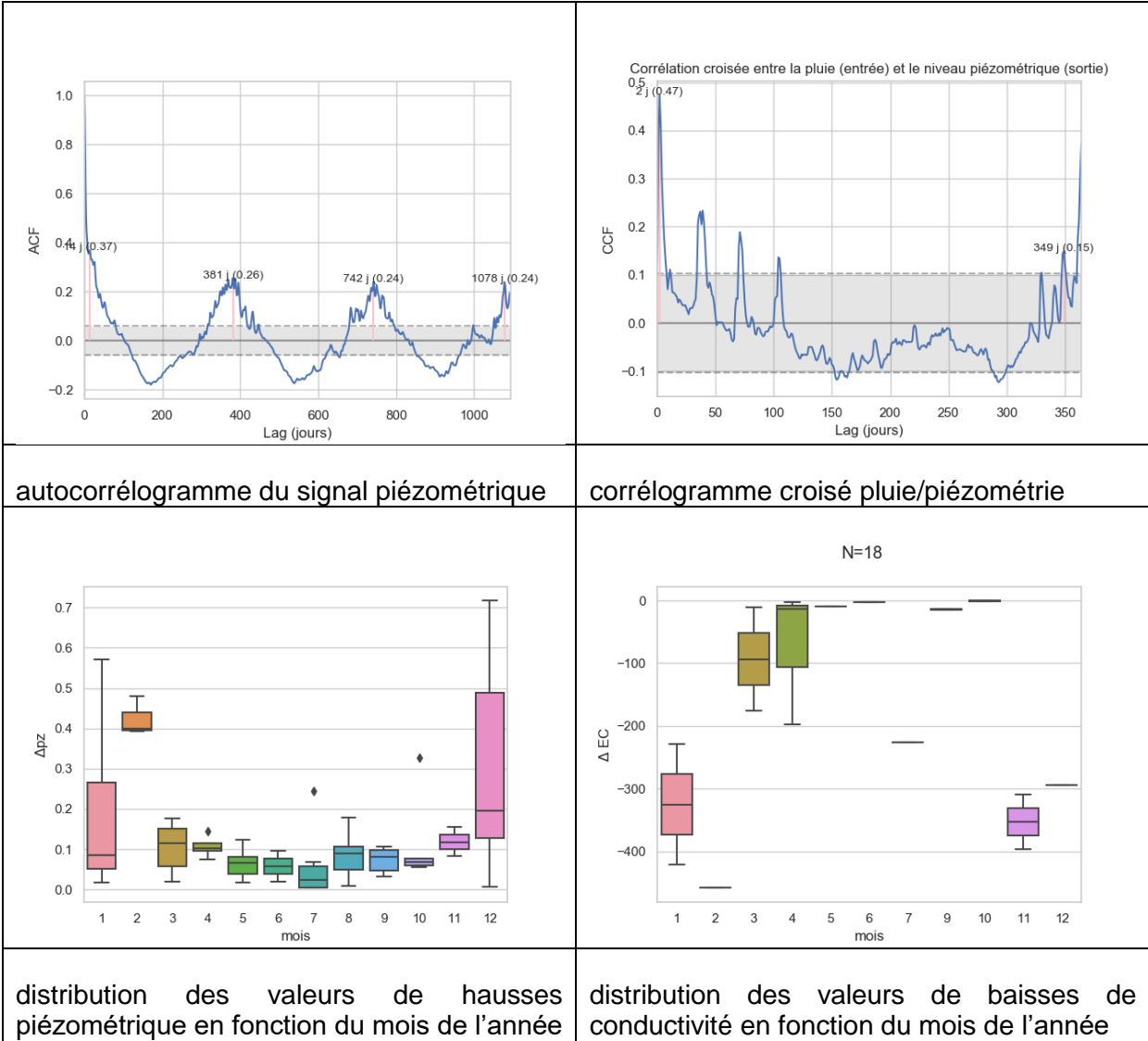
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

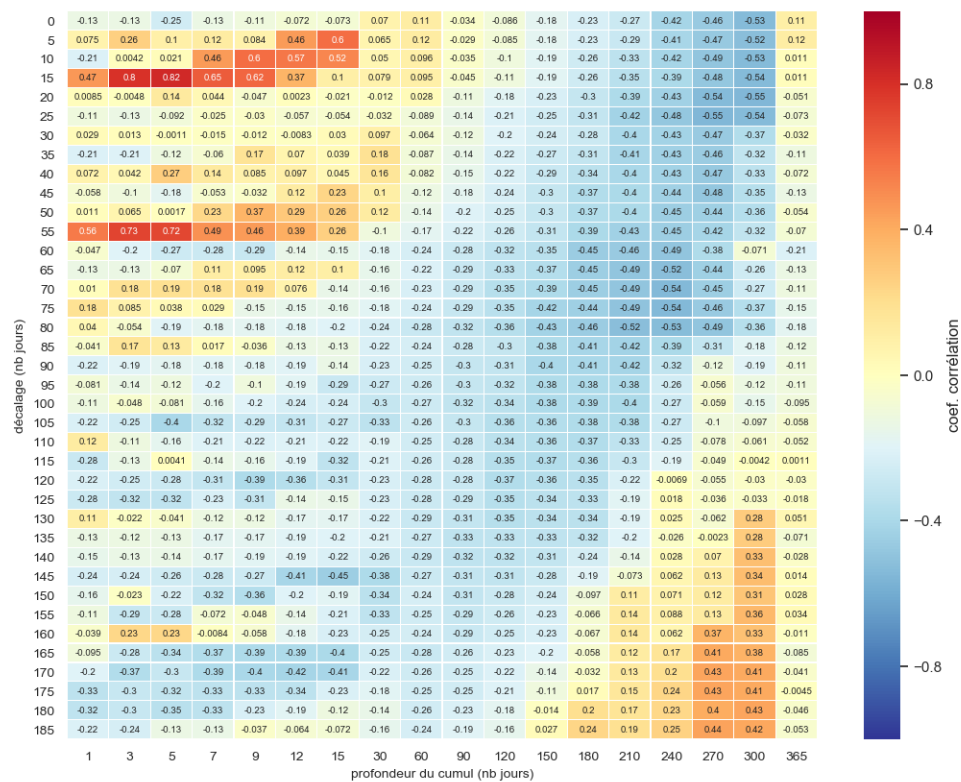


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

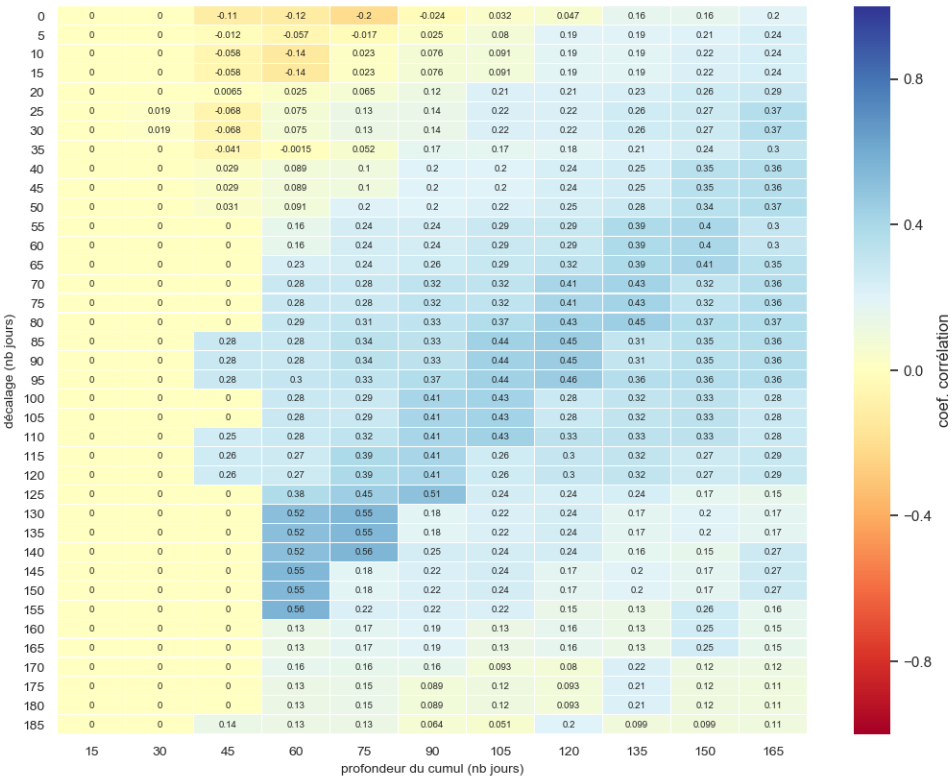


12266X0080_0m

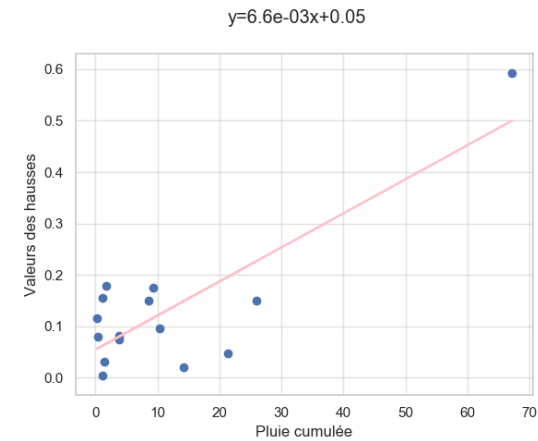




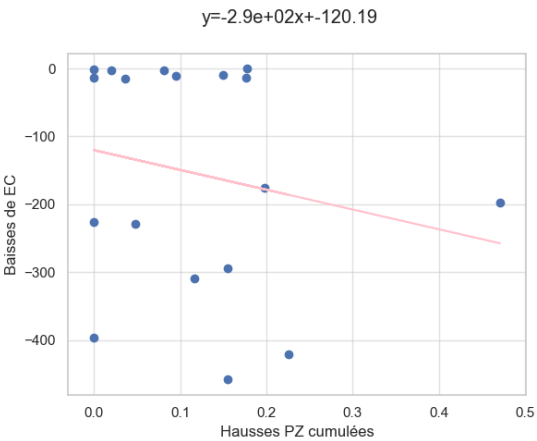
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



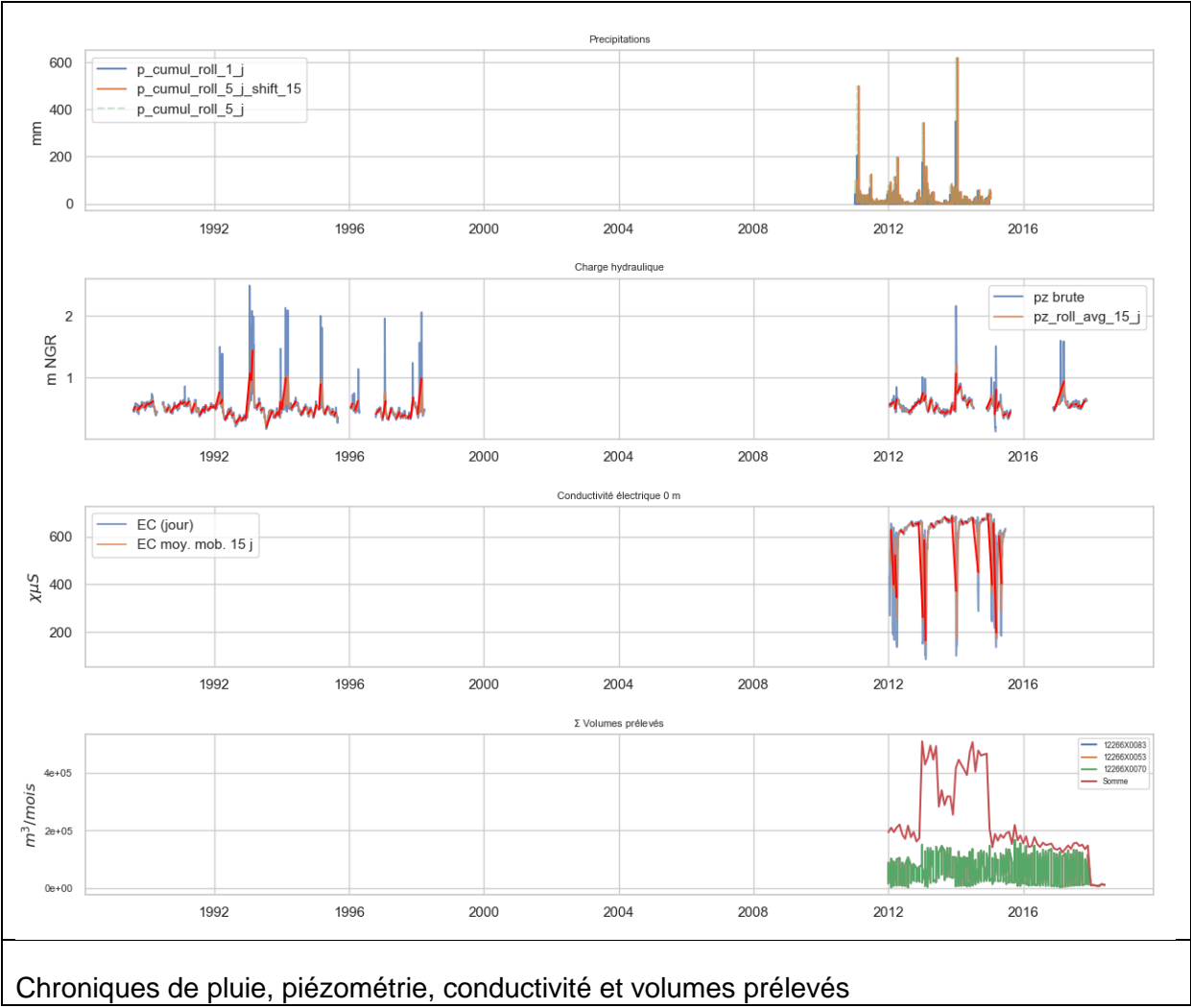
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



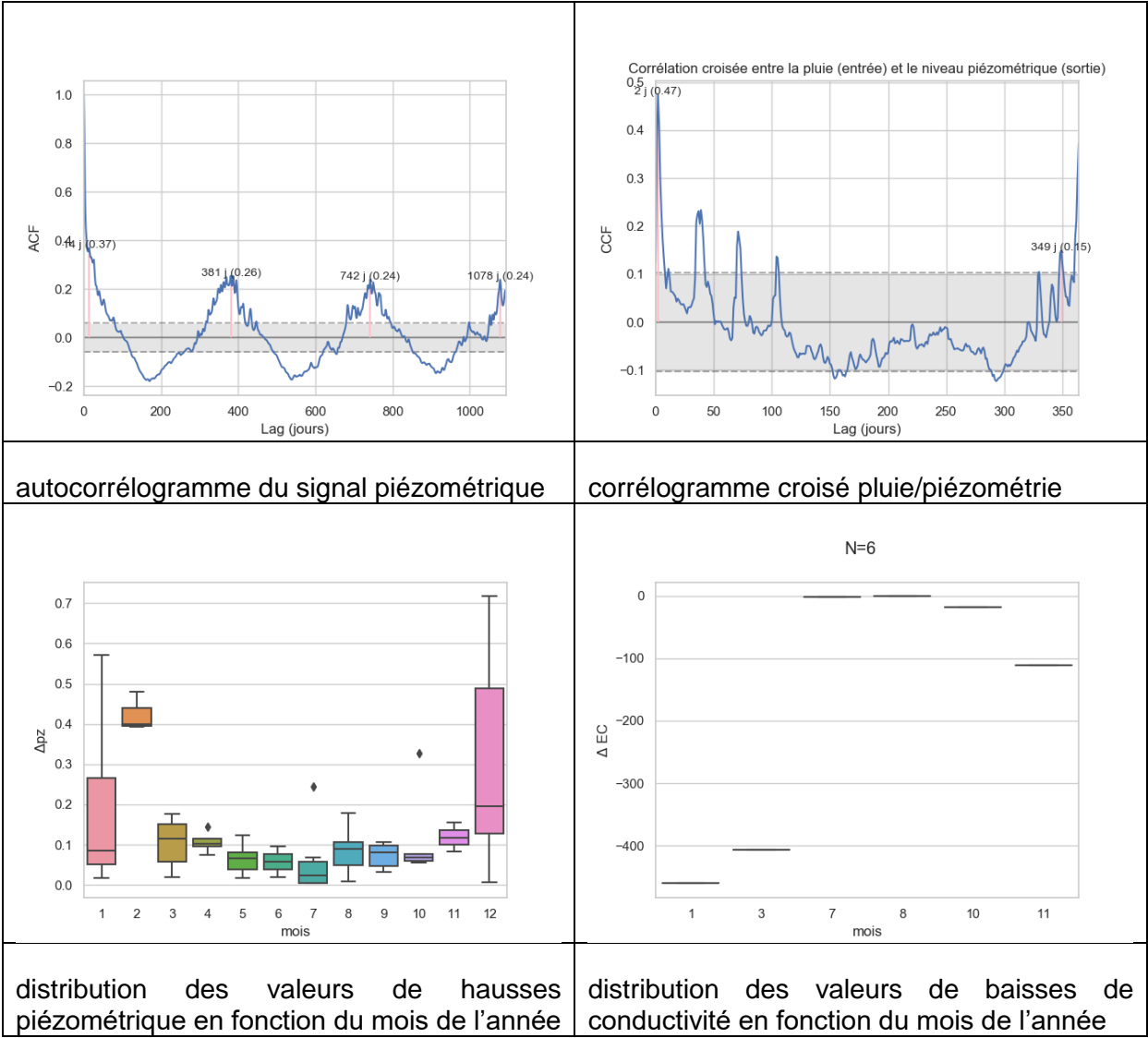
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

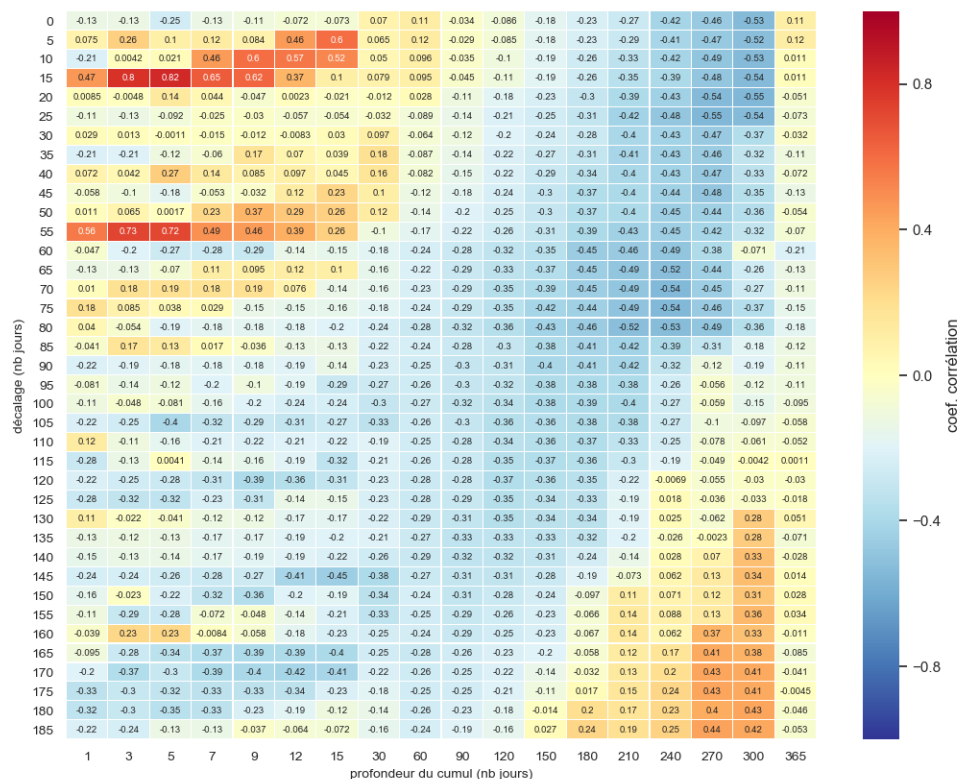


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

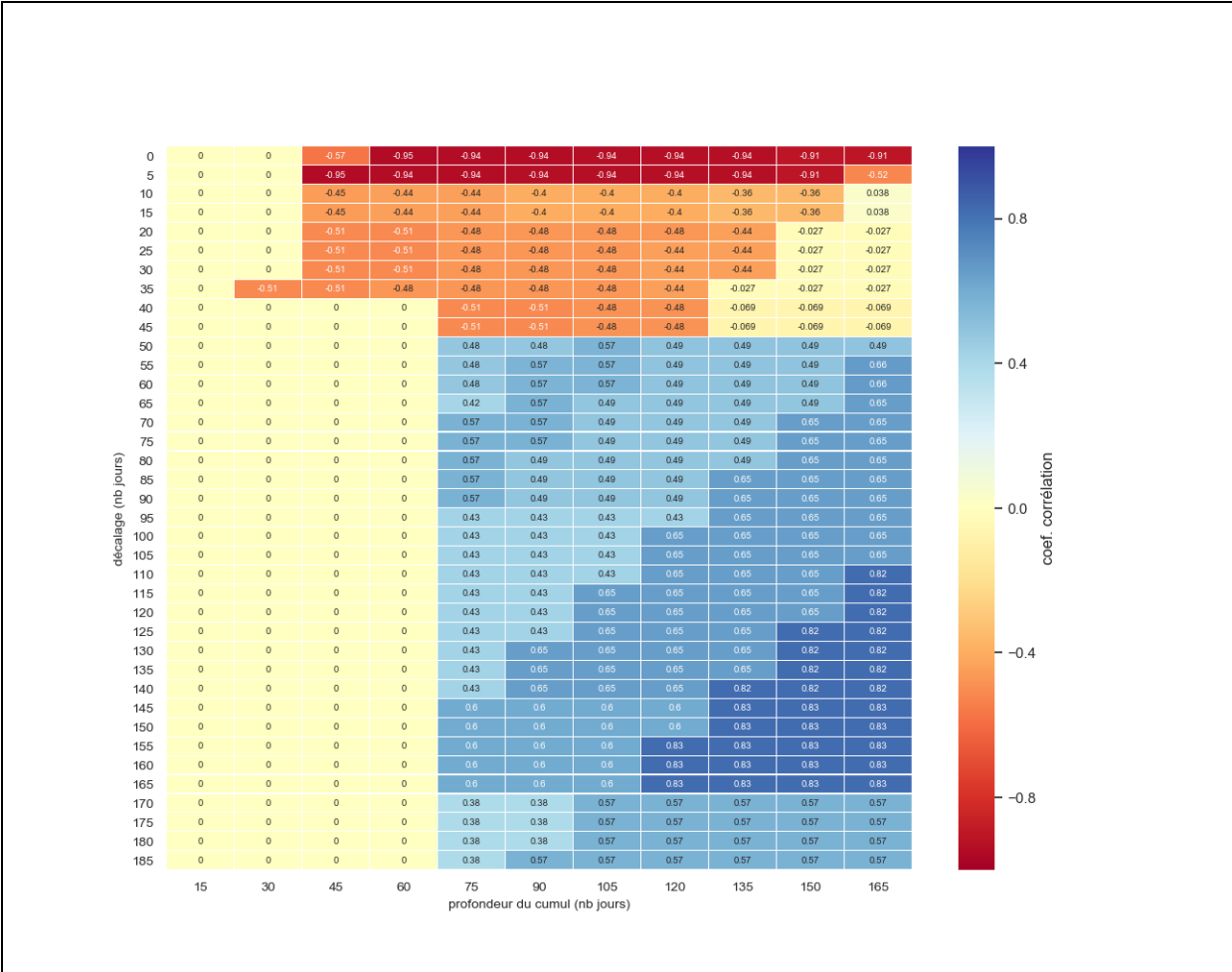


12266X0080_2m

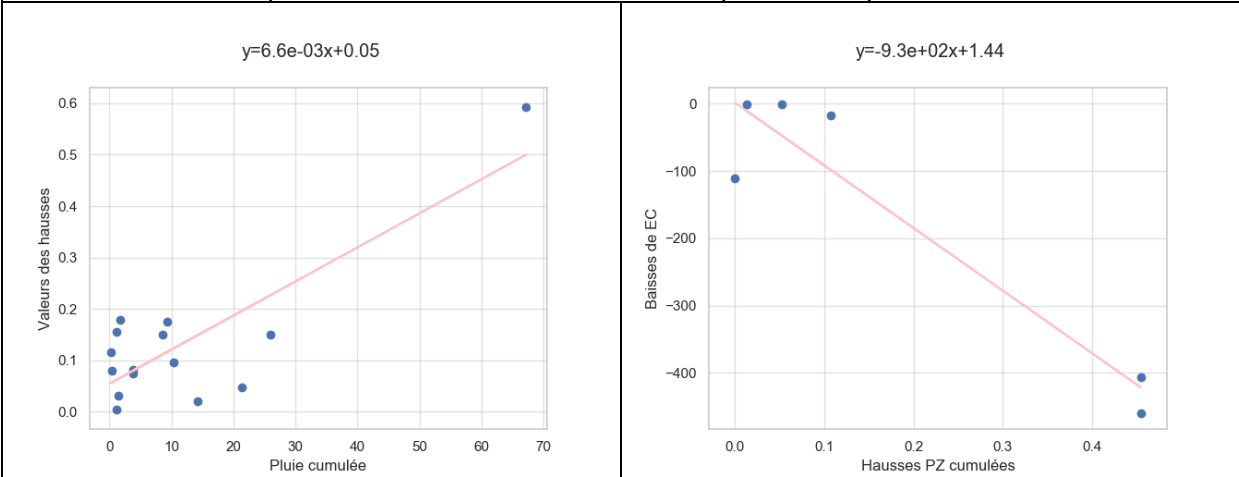




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

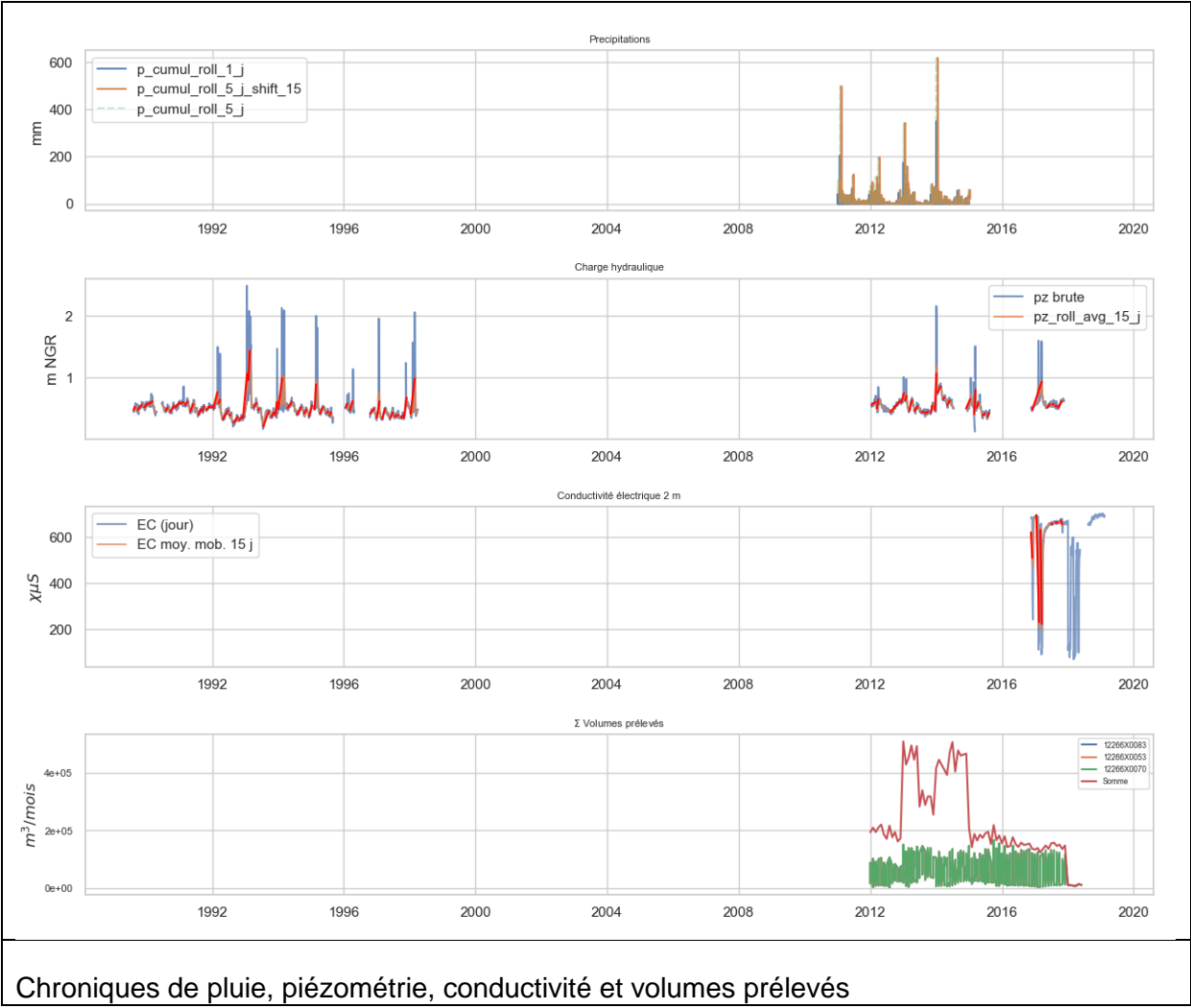


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

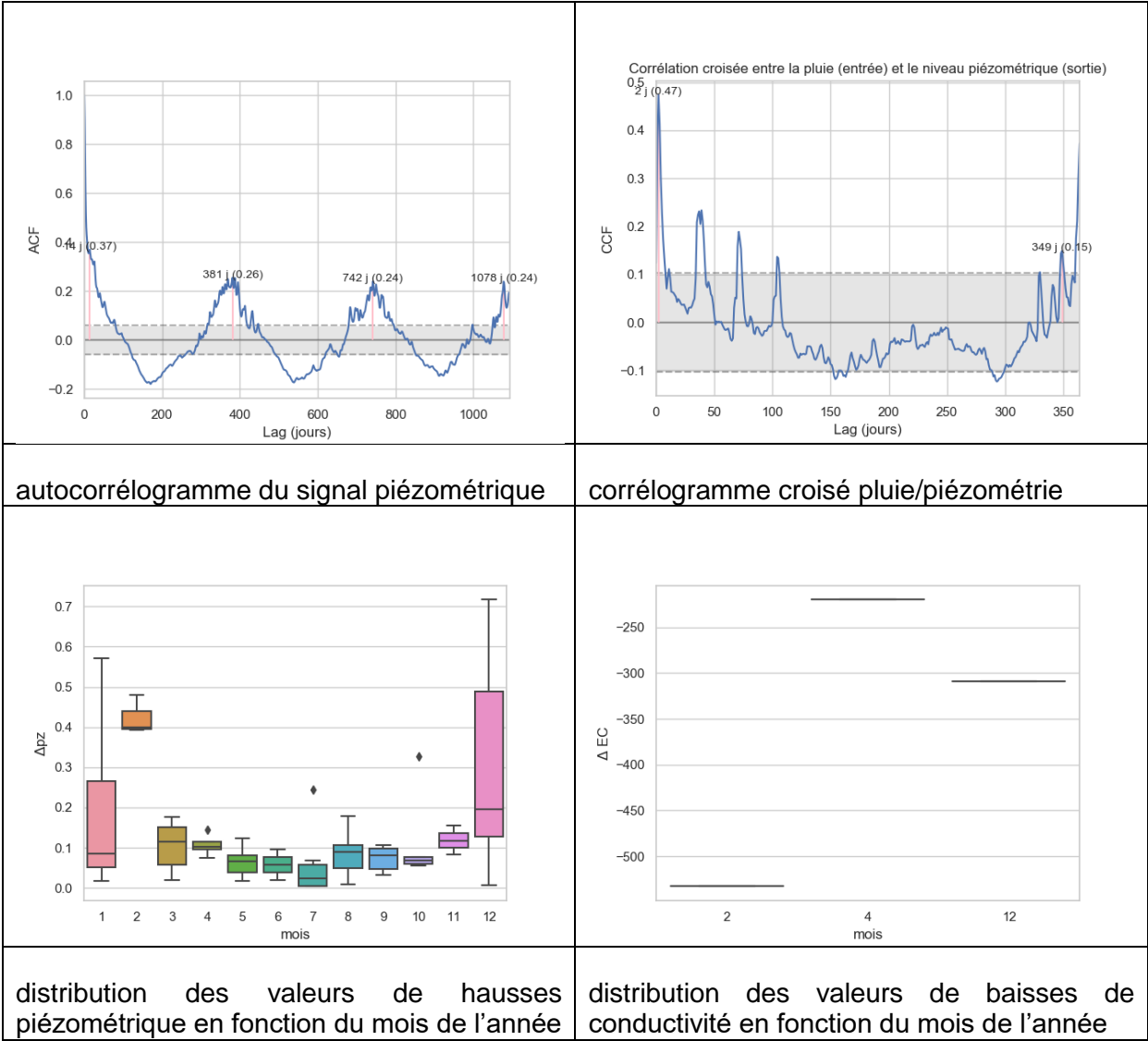


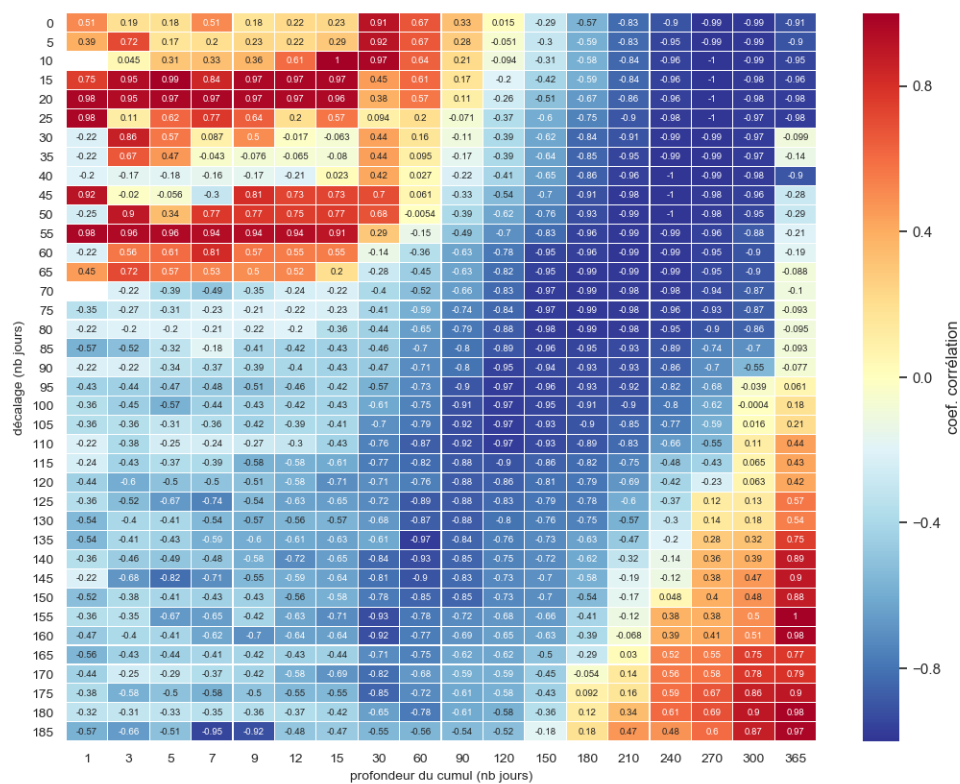
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

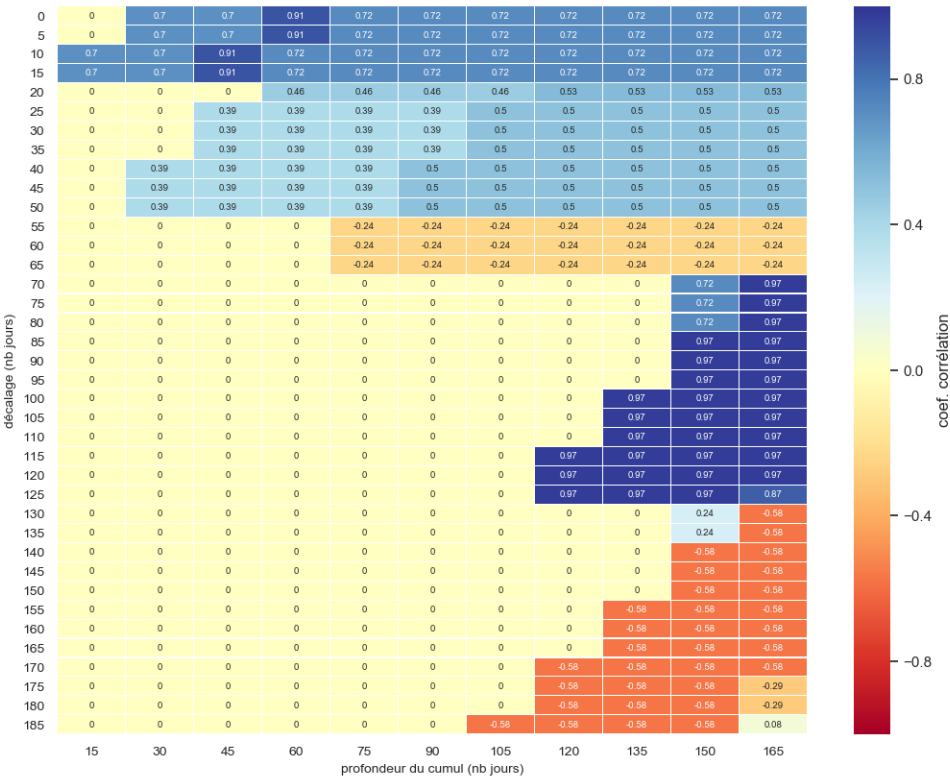


12266X0080_14m

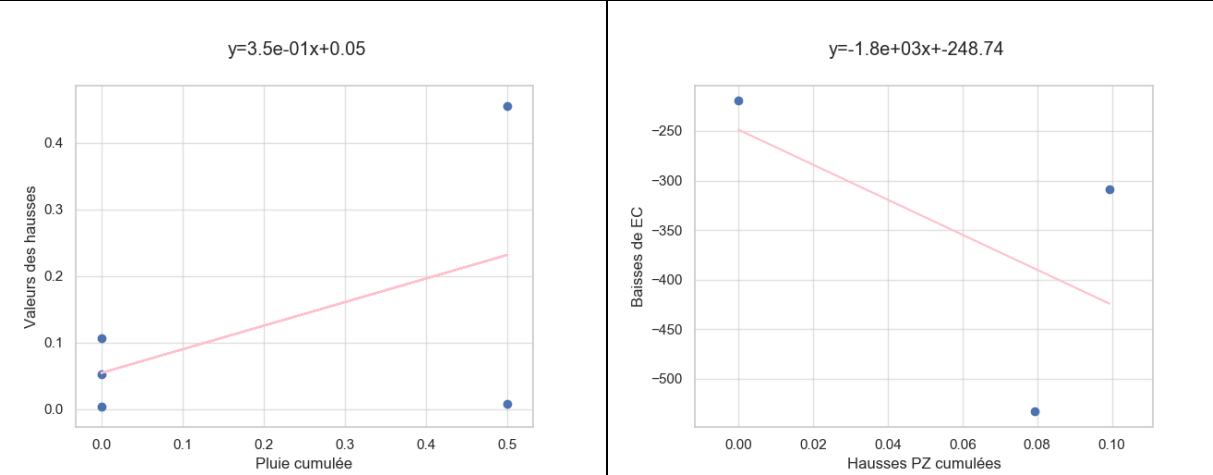




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées

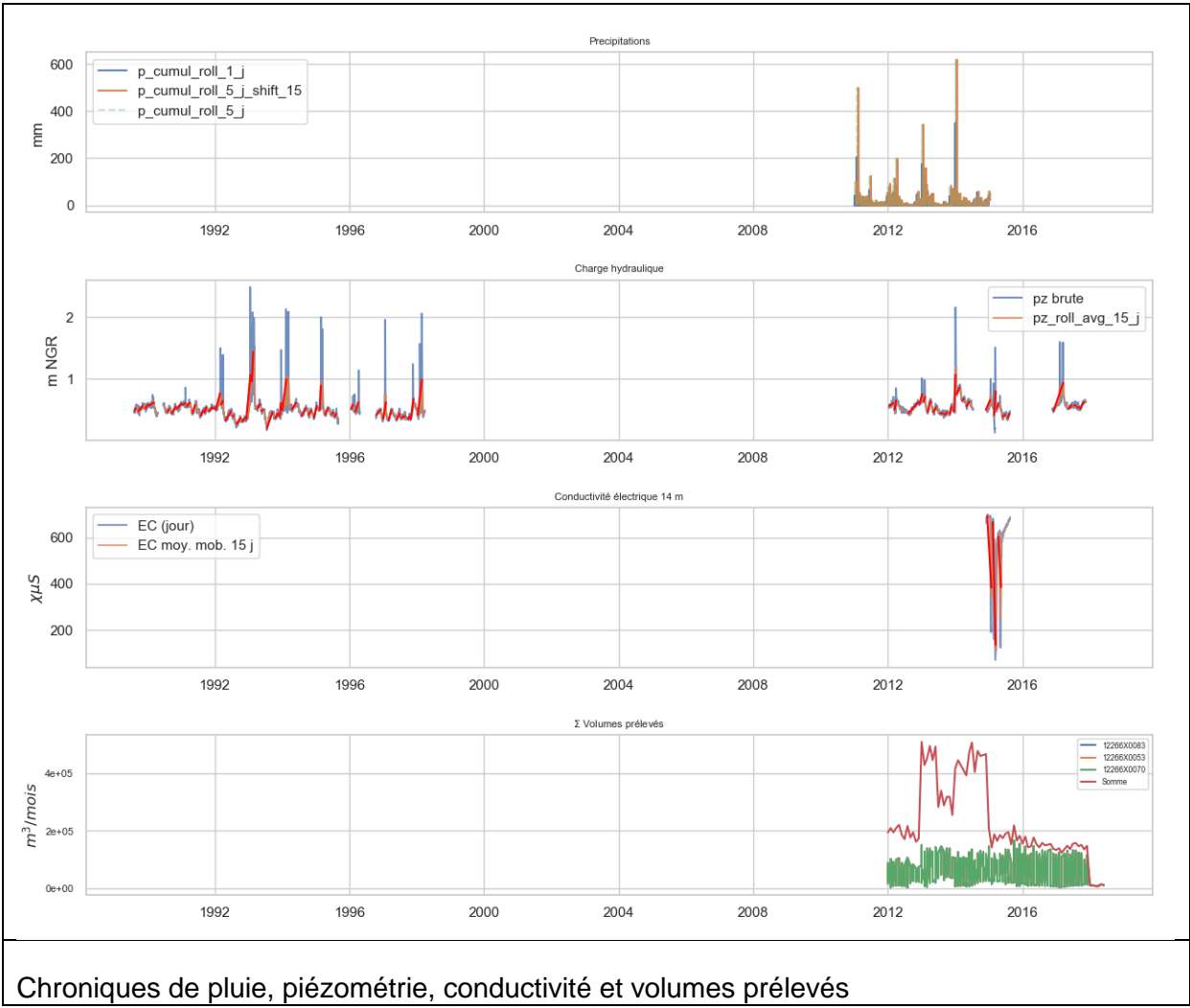


matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

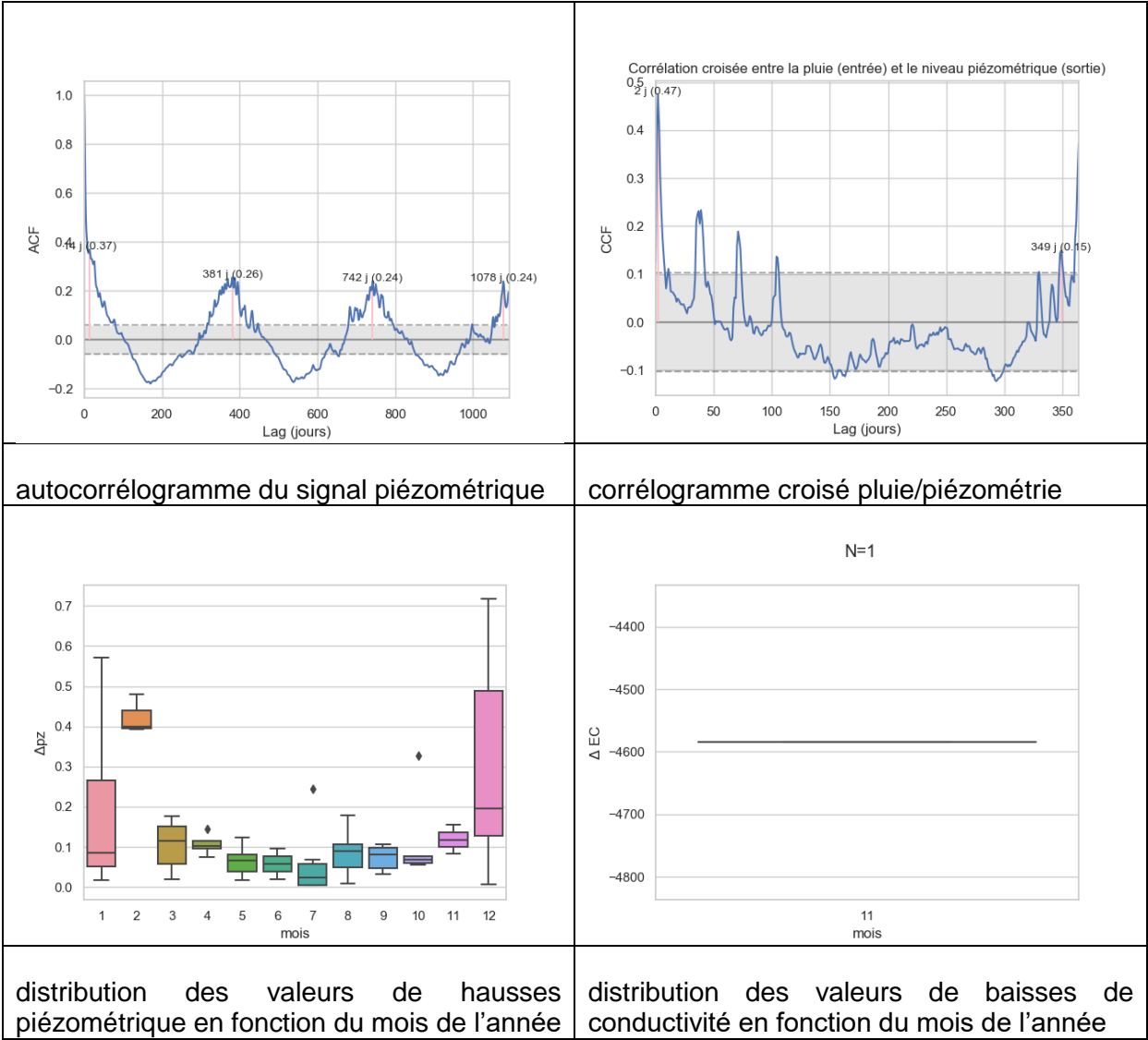


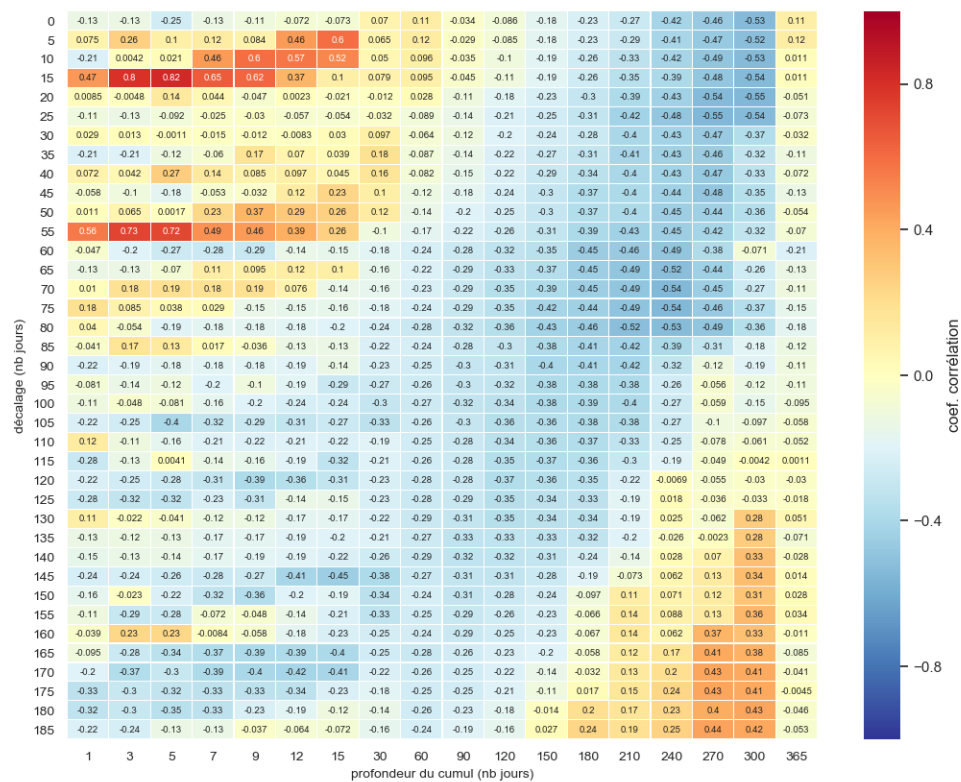
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

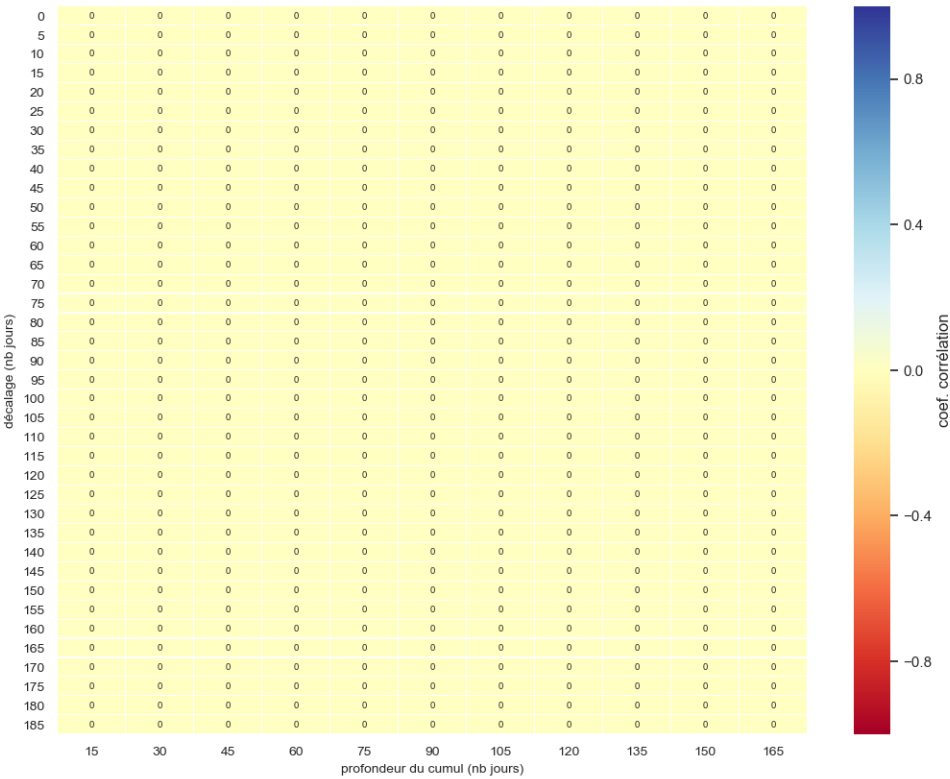


12266X0080_29m

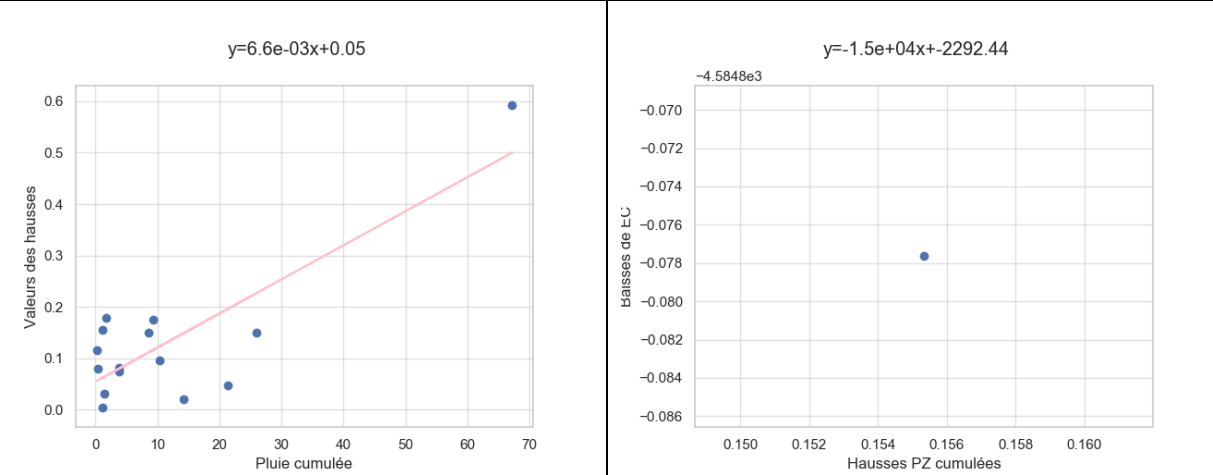




matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques

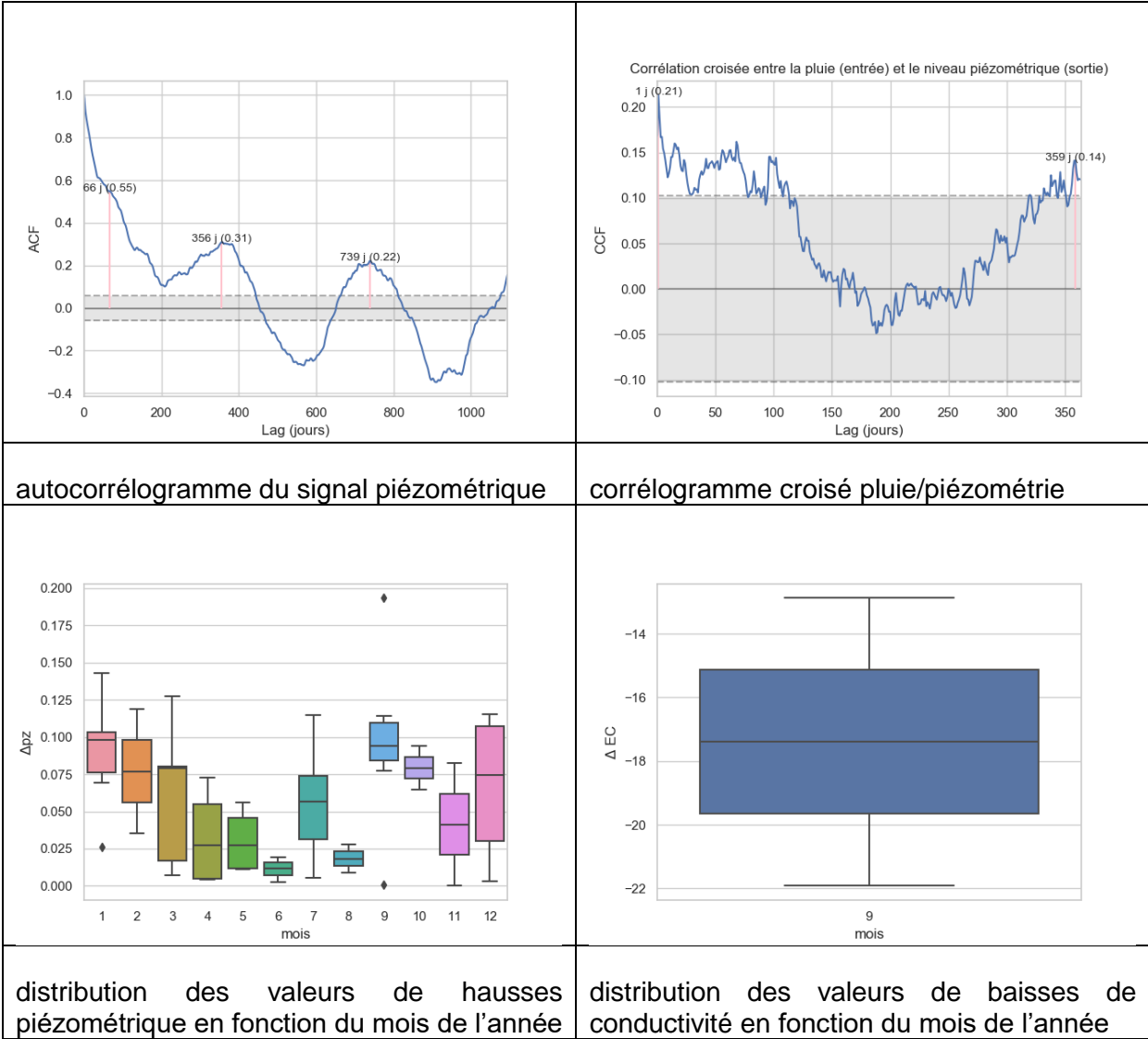


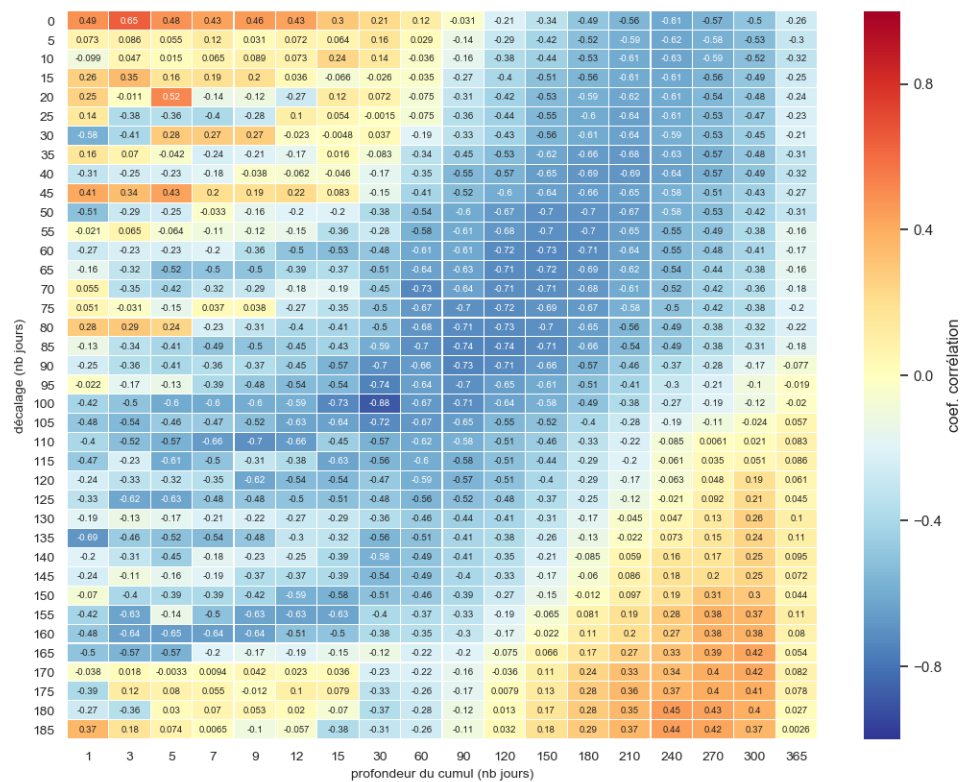
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

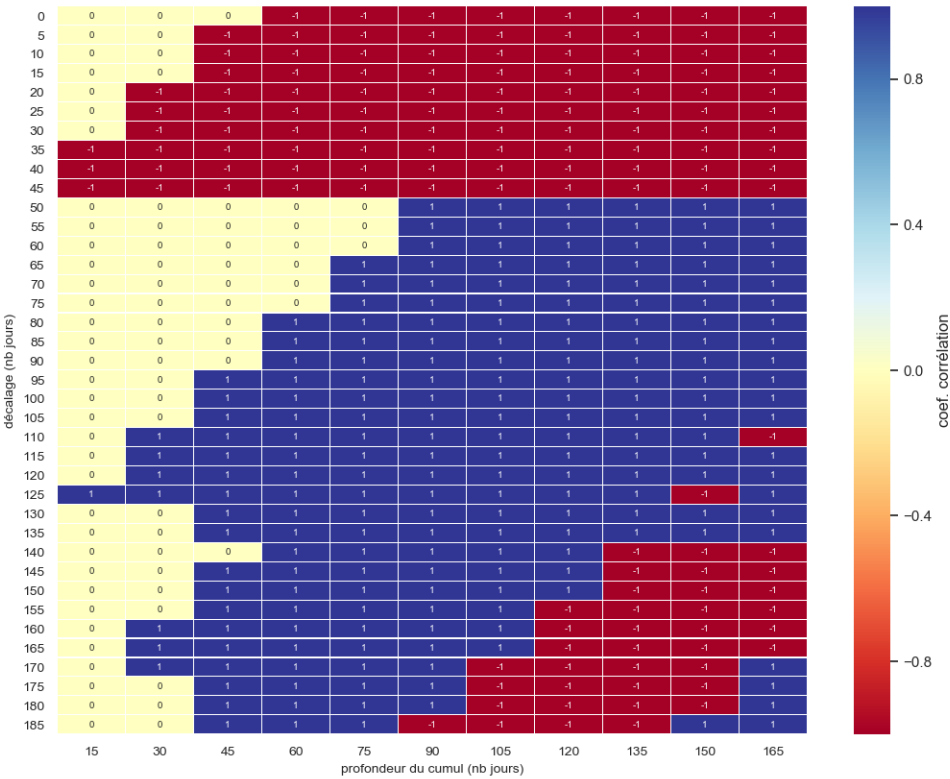


12283X0066_3m

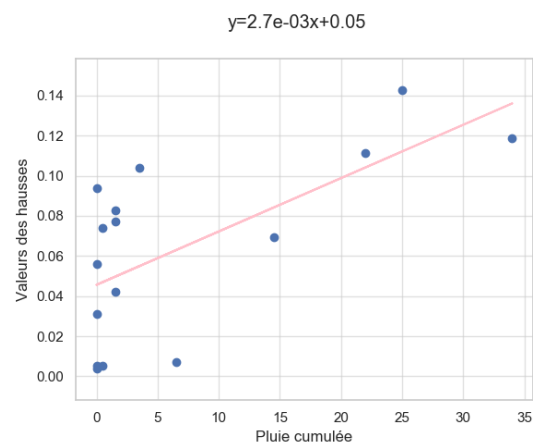




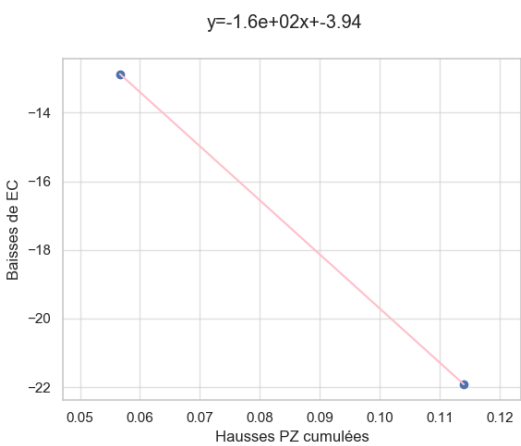
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



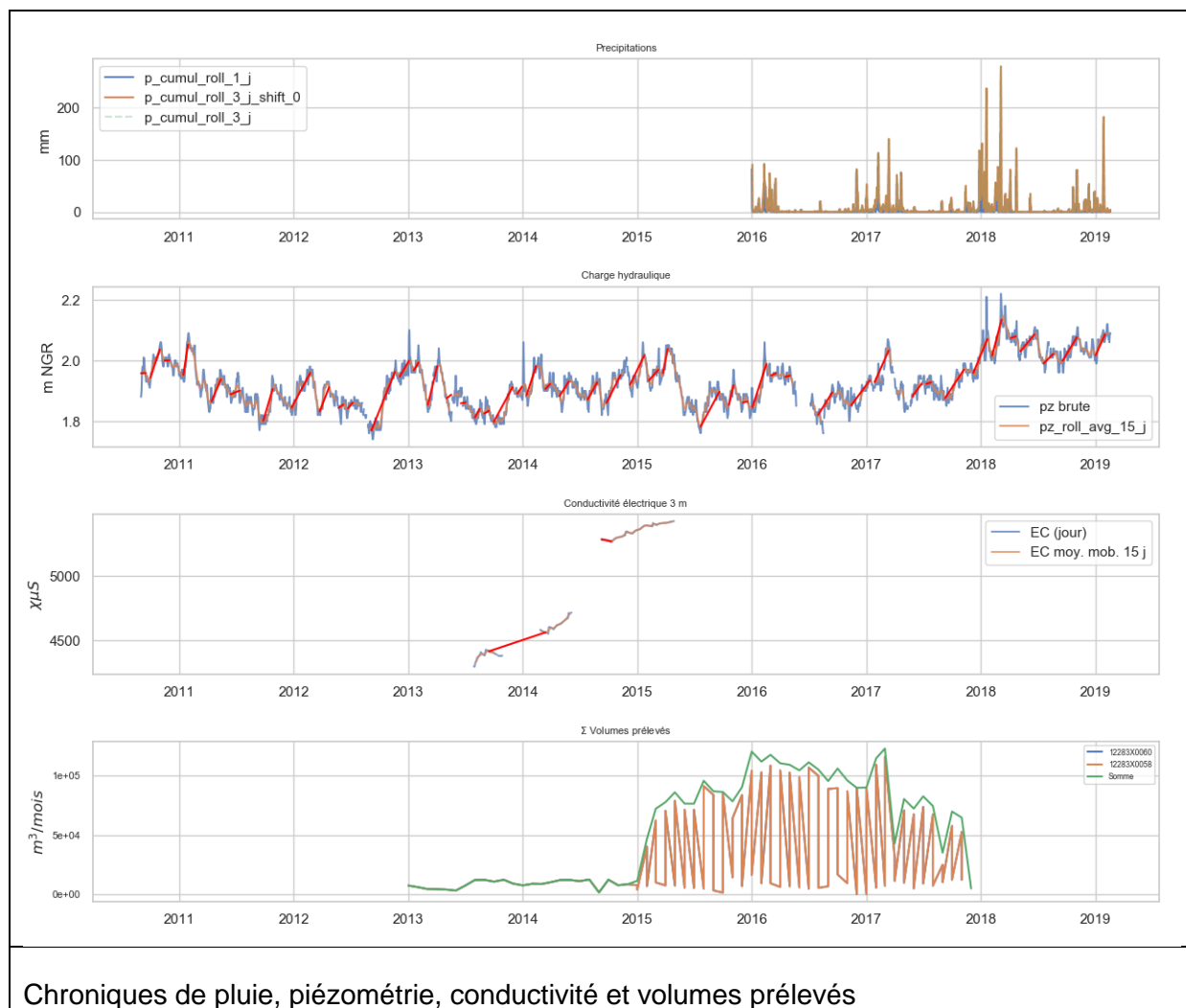
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



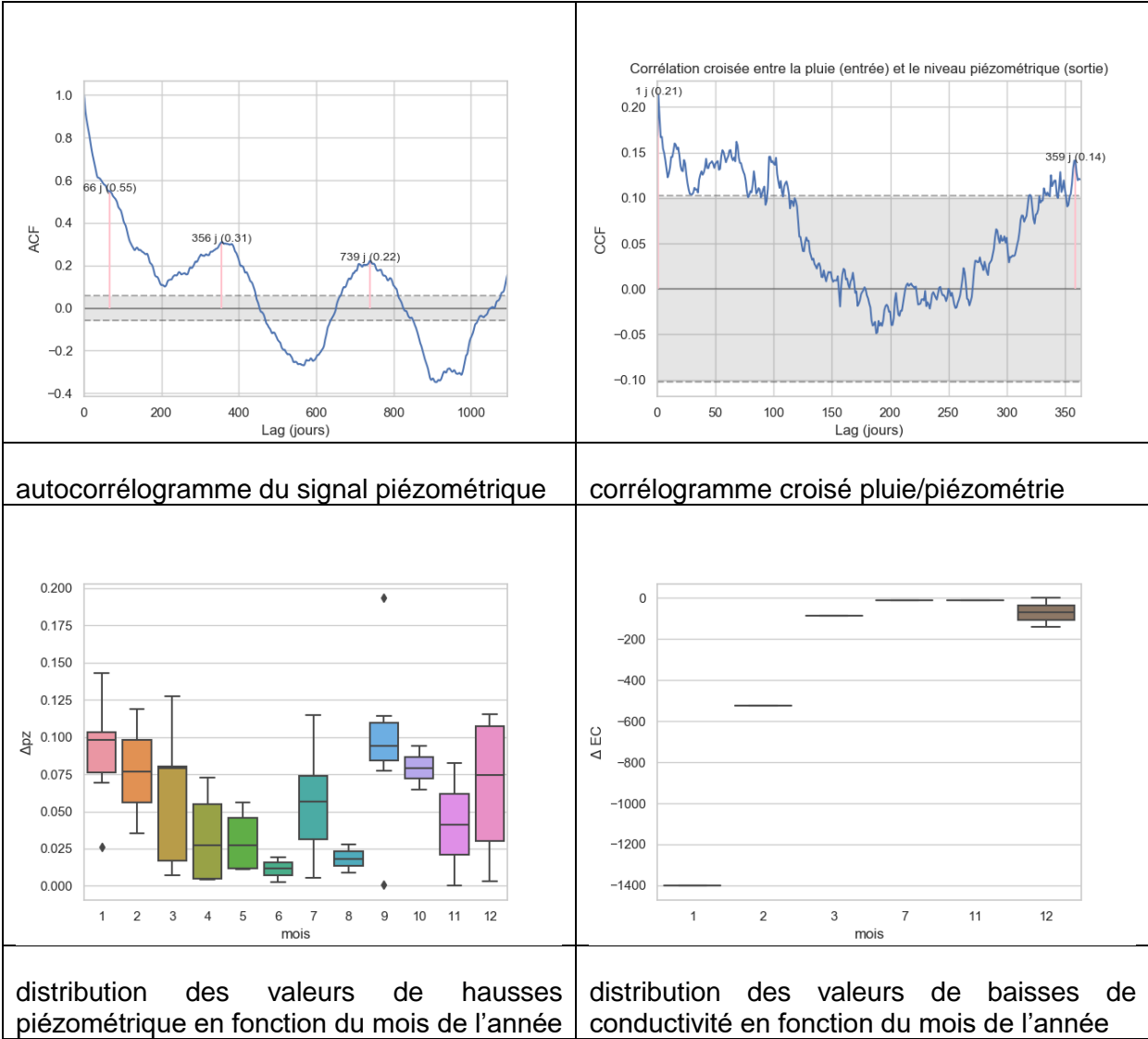
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

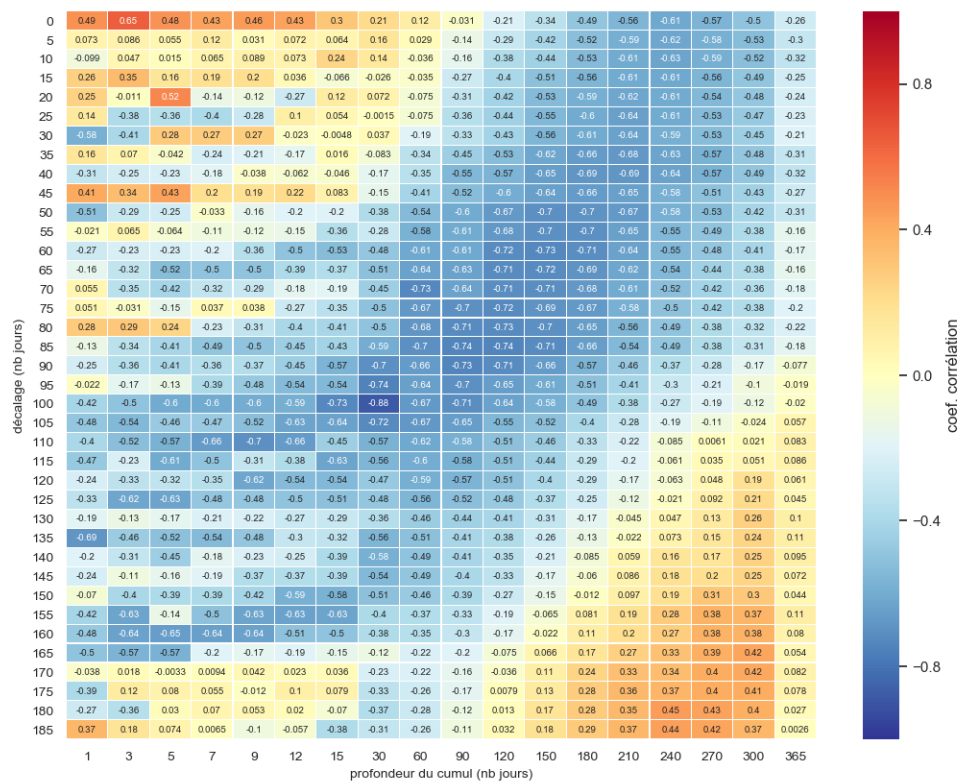


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

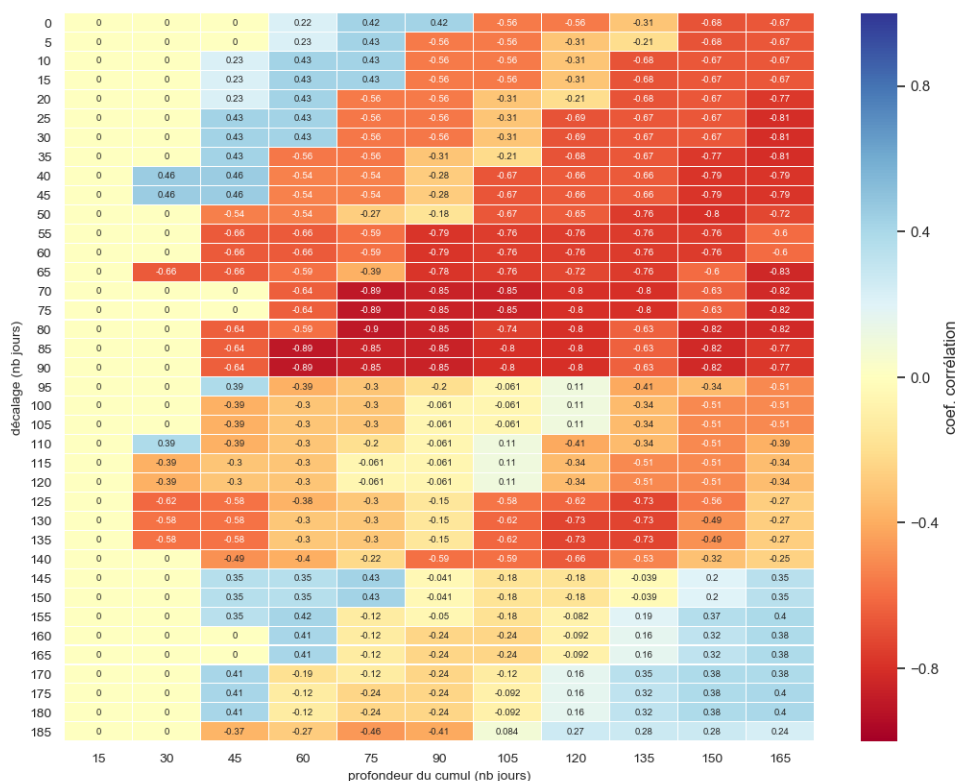


12283X0066_20m

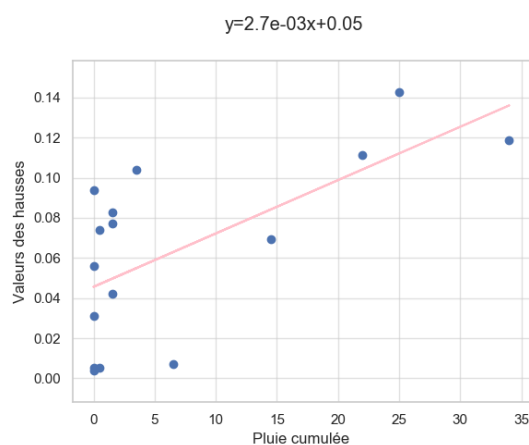




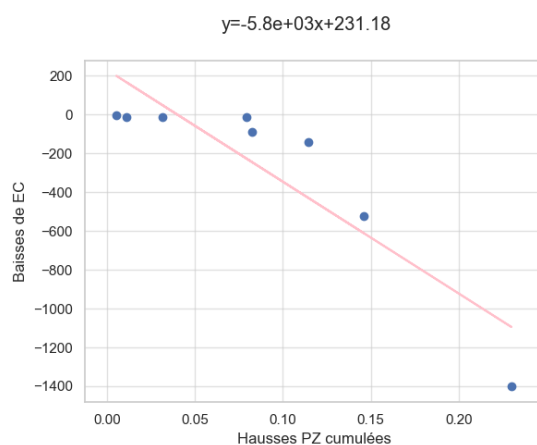
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



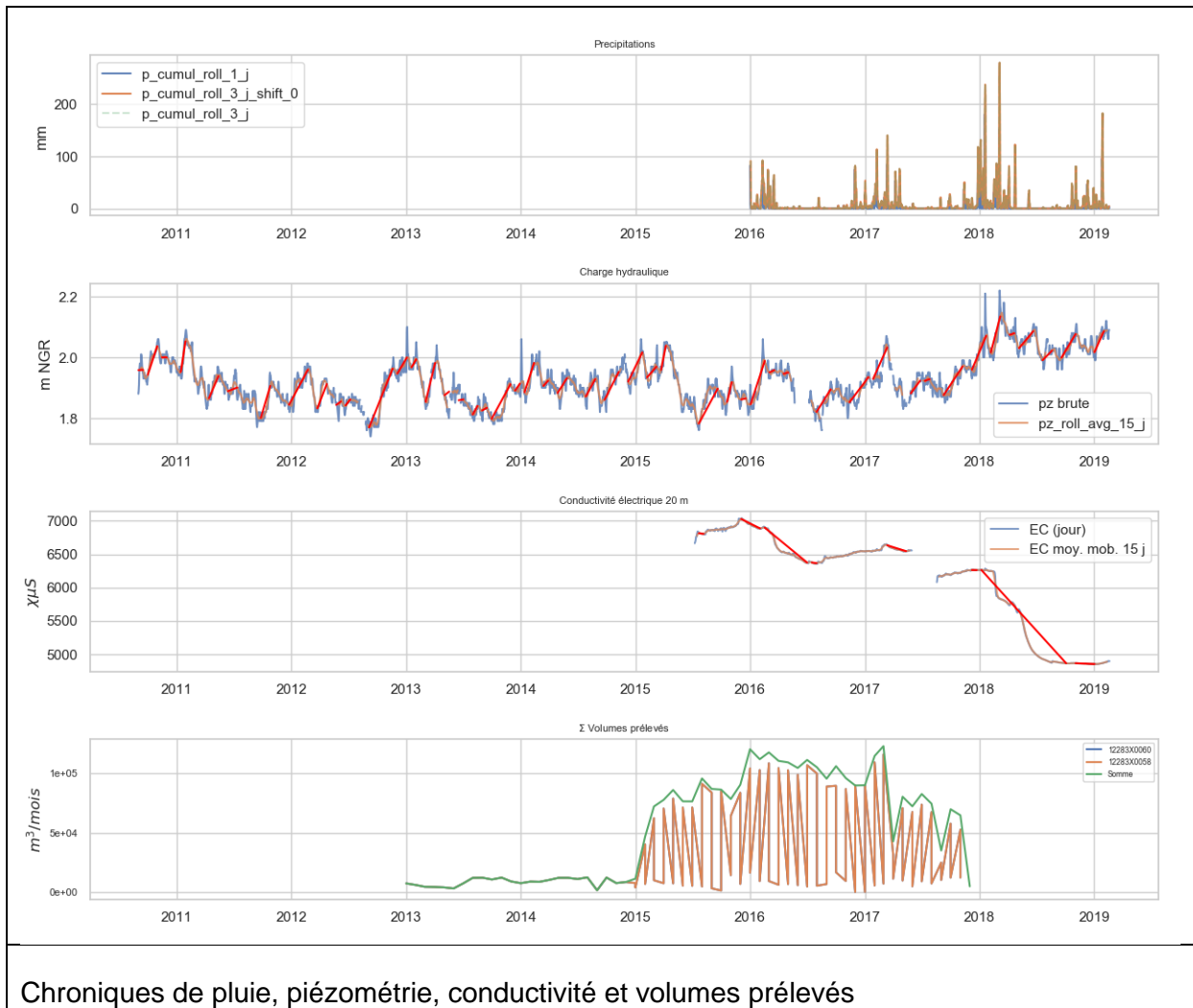
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs basses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



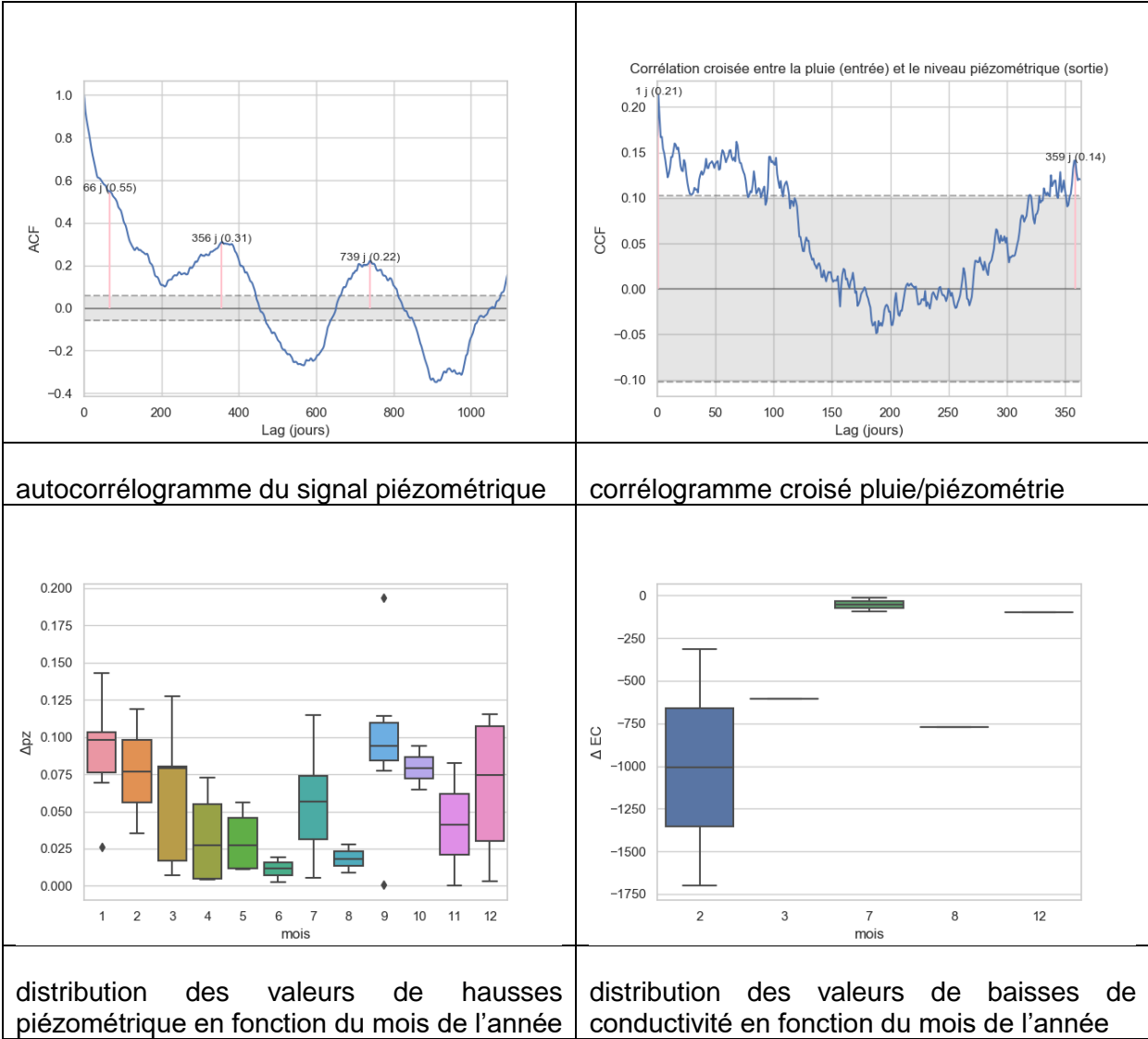
relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

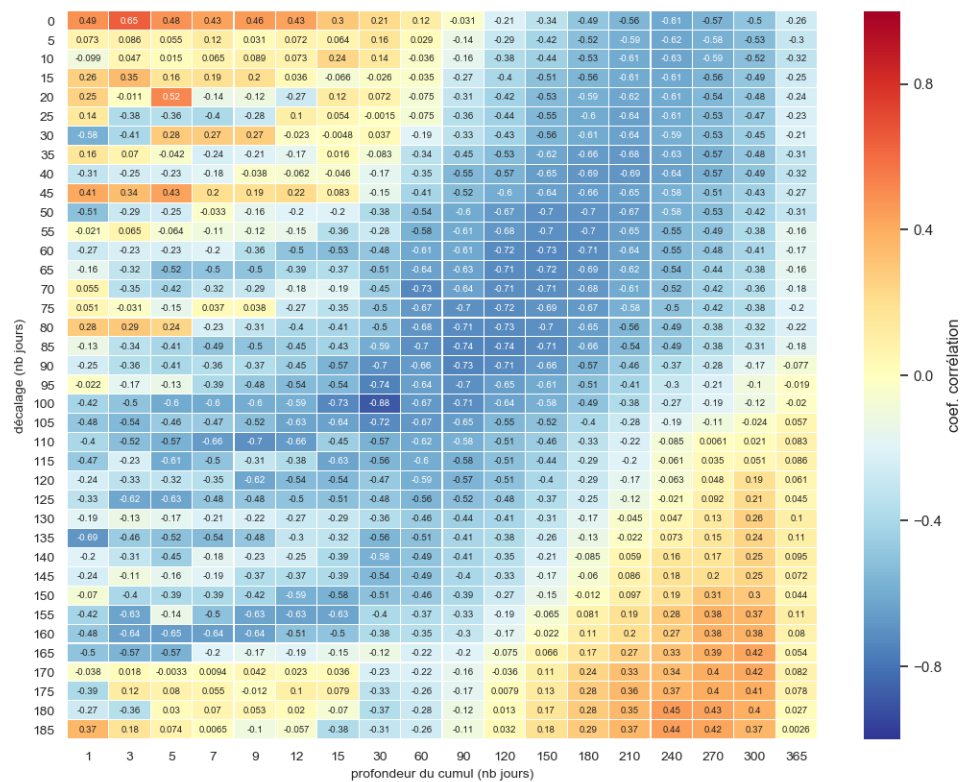


relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs

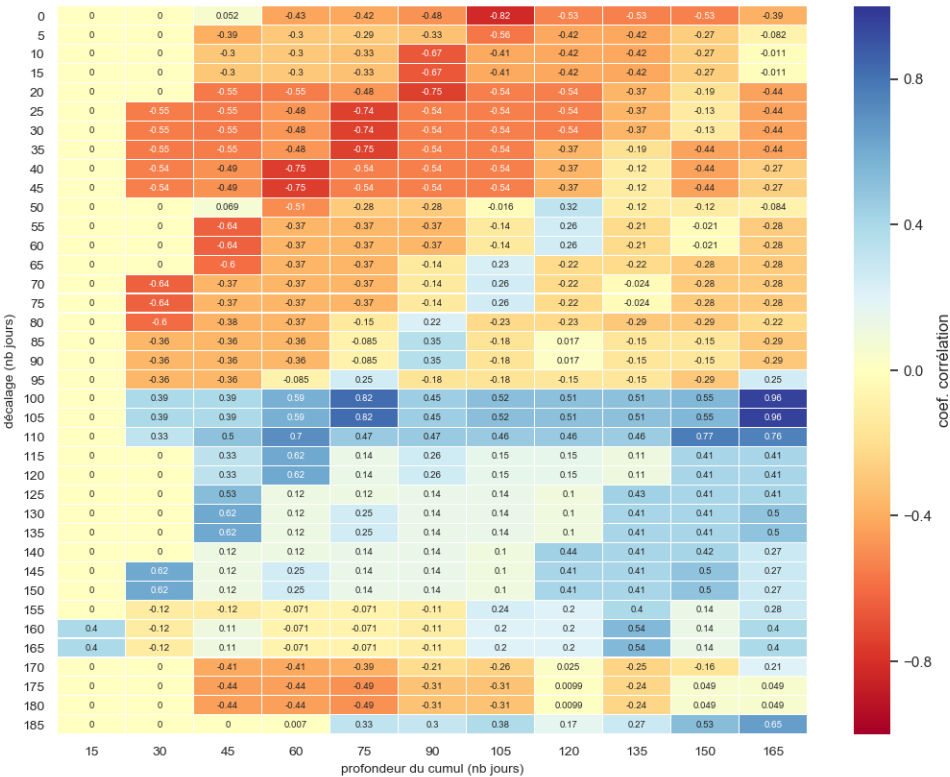


12283X0066_35m

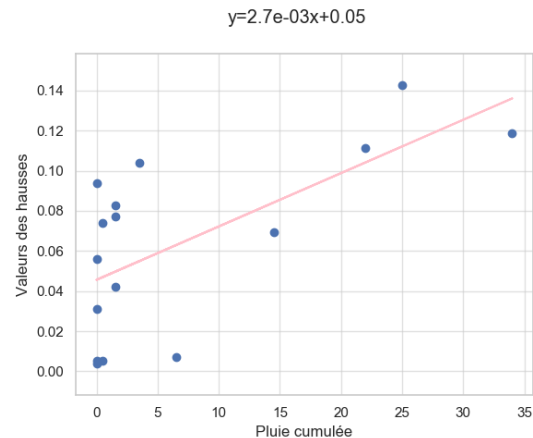




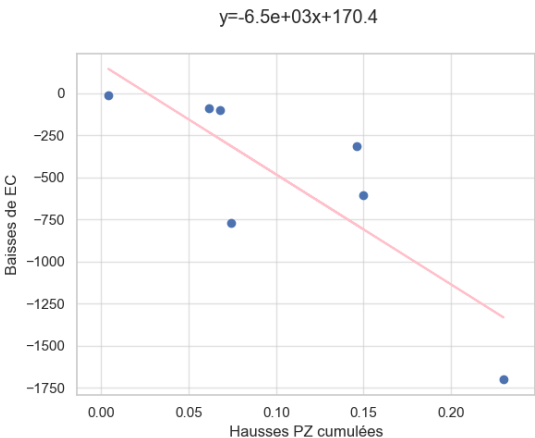
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs de hausses piézométriques et différents signaux de pluies cumulées



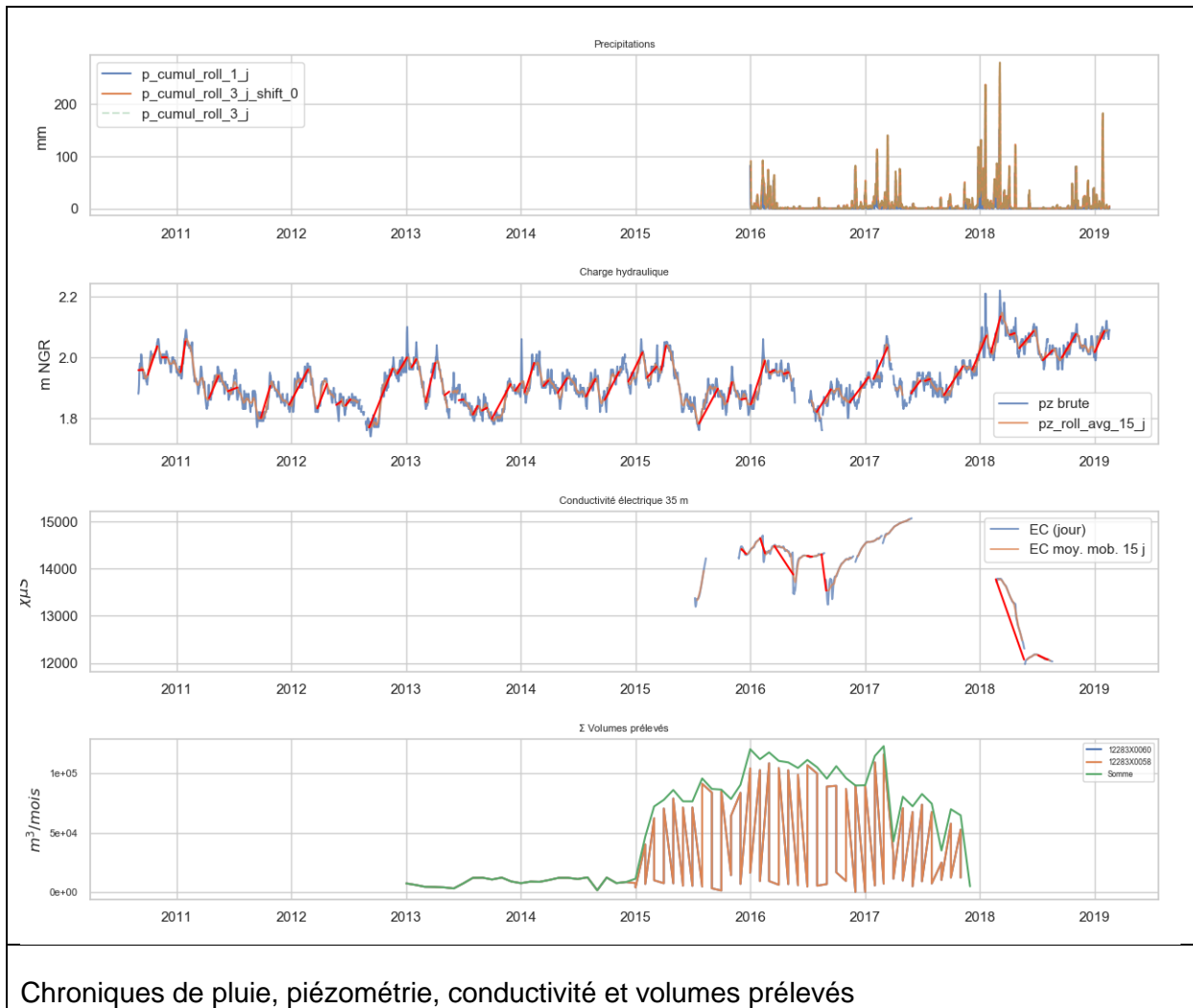
matrice de corrélation montrant l'intensité de la relation entre les valeurs baisses de conductivité électrique et différents cumul de hausses piézométriques



relation linéaire entre valeurs de pluie cumulée et valeur de hausse piézométrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs



relation linéaire entre valeurs de hausses piézométrique cumulée et valeur de baisse de conductivité électrique, pour les paramètres de corrélation les meilleurs





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 La Réunion

5, rue Sainte Anne
CS 51016

97404 Saint-Denis Cedex – La Réunion

Tél. : 02 62 21 22 14