

Rapport final

BRGM/RP-66488-FR
Mai 2017



Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020
Module 3.1 - Année 1

Rapport final

BRGM/RP-66488-FR
Mai 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM AP15AQI020

O. Cabaret, J. Perrin et A. Wuilleumier
Avec la collaboration de **G. Nougaret**



Vérificateur :

Nom : B. LADOUCHE
Fonction : Hydrogéologue D3E/NRE
Date : 16/05/2017
Signature :

Approbateur :

Nom : N. PEDRON
Fonction : Directeur du BRGM
Nouvelle-Aquitaine
Date : 17/05/2017
Signature :

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

Mots-clés : Nappe, Aquifère, source, débit, karst, bassin d'alimentation, jaugeage, Crétacé, Jurassique, Dordogne.

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

Cabaret O., Perrin J., Wuilleumier A. avec la collaboration de Nougaret G. (2017) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne - Module 3.1 - Année 1. Rapport final. BRGM/RP-66488-FR, 80 p., 79 ill., 6 ann.

Synthèse

En Dordogne, les aquifères carbonatés du Jurassique et du Crétacé répondent largement aux besoins pour l'alimentation en eau potable. Toutefois, la nature plus ou moins karstique des réservoirs rend difficile la gestion des ressources en eau. Les gestionnaires sont en effet confrontés à la variabilité des débits et de la qualité des eaux, aux difficultés de protection liées notamment à l'identification des bassins d'alimentation et à la vulnérabilité vis-à-vis de pollutions.

Le travail présenté dans ce rapport est réalisé dans le cadre de l'année 1 du module 3.1 de la convention régionale « Gestion des Eaux souterraines en région Aquitaine » pour la période 2015-2020 concernant la connaissance générale des karsts aquitains avec pour objet d'étude spécifique les karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne. Cette année 1 de la convention correspond cependant à la quatrième année de ce module démarré lors de la précédente convention. Cette étude est financée par le BRGM, le Conseil Régional Aquitaine, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, et le Conseil Général de la Dordogne.

L'objectif du projet est double. Il doit d'une part, répondre aux besoins de connaissances sur le fonctionnement général des aquifères carbonatés de Dordogne et d'autre part, mettre en place une méthodologie d'étude des systèmes karstiques qui puisse être transposable à d'autres aquifères carbonatés du Bassin aquitain et appropriable par les acteurs locaux. Cette compréhension du fonctionnement des aquifères carbonatés de manière générale et plus spécifiquement leur fonctionnalité karstique nécessite une approche pluridisciplinaire qui repose sur la conjonction de plusieurs méthodes pour mettre en évidence l'existence d'un comportement et d'une structure karstique. Ainsi, ce module de la convention régionale s'organise autour de deux axes de travail que sont :

- **l'acquisition de données** ayant trait à la géomorphologie, à la géologie, à l'hydrogéologie ou encore à la géochimie sur les réservoirs carbonatés nord-aquitains et en particulier ceux de Dordogne,
- **le développement d'approches méthodologiques et l'exploration de pistes d'interprétation** pour la compréhension du fonctionnement des aquifères carbonatés.

La quatrième année de travail (année 1 de la nouvelle convention), objet du présent rapport, s'inscrit dans la continuité directe des travaux précédents menés lors des trois dernières années de la précédente convention, et propose la finalisation de l'inventaire des sources de Dordogne engagée l'année précédente. 3244 sources sont ainsi recensées, chiffre qui sera affiné sur le long terme à la suite de vérifications de terrain et l'apport de travaux futurs (thèses, rapports de bureaux d'étude). Des données de débits et de physico-chimie ont également été acquises afin d'appuyer les réflexions sur le fonctionnement des réservoirs. L'ensemble de ces données a ensuite été valorisé au travers de fiches descriptives mises en ligne sur le SIGES Aquitaine via l'espace cartographique. Ces fiches constituent à l'heure actuelle, le seul espace de stockage actuellement disponible permettant disposer à la fois des mesures de débits des sources avec la méthode utilisée et le lieu de mesure. De la même manière, une grande partie des données de traçage collectées depuis le début du projet ont été bancarisées dans la base dédiée BD Traçages également relayée par le SIGES Aquitaine via l'espace cartographique.

En parallèle, une première réflexion a été menée sur la structure et le fonctionnement du système karstique par le biais des analyses (ACP et analyses corrélatoires). Malgré un nombre de chronique exploitable restreint avec une répartition géographique limitée, les premières analyses ont permis de faire ressortir des groupes de piézomètres aux comportements

différents, que ce soit pour le Jurassique et le Crétacé, en Dordogne et dans les autres départements sans pour autant identifier les raisons de ces différences de manière évidente. Ces premières analyses ont permis, au-delà de permettre un inventaire exhaustif des chroniques piézométriques pertinentes à l'échelle du Bassin nord-aquitain, de cibler les travaux futurs qui passeront par la remise en contexte hydrogéologique de l'ouvrage, par la densification de données (intégration des suivis de sources par exemple et utilisation d'outils permettant de s'affranchir de forçages (prélèvements, baisse ou hausse piézométrique continue sur le long terme)) et la mise en œuvre d'autres outils permettant notamment d'évaluer les relations pluie-niveaux piézométriques voire suivis physico-chimiques pour approcher la fonctionnalité des hydrosystèmes.

Enfin, une seconde réflexion a porté sur l'analyse des conditions d'infiltration à l'échelle départementale qui a montré la cohérence d'ensemble offerte par la typologie du karst (karst nu, sous couverture, de contact) laissant envisager au travers d'une cartographie départementale de cette typologie une approche intéressante pour caractériser la vulnérabilité de la ressource en eau.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Acquisition et valorisation des données hydrogéologiques de Dordogne	13
2.1. CONNAISSANCES SUR LES SOURCES DE DORDOGNE.....	13
2.1.1. Inventaire finalisé des sources.....	13
2.1.2. Poursuite de l'acquisition de mesures hydrogéologiques sur les sources	14
2.1.3. Fiche de valorisation des données de sources.....	17
2.2. BANCARISATION DES DONNEES DE TRAÇAGE	23
3. Approche fonctionnelle des aquifères basée sur les analyses statistiques	25
3.1. SELECTION DES DONNEES.....	25
3.2. DEMARCHE ET METHODES MISES EN ŒUVRE.....	27
3.3. TRAITEMENT DES CHRONIQUES DE DORDOGNE	28
3.3.1. Jurassique	28
3.3.2. Crétacé	33
3.3.3. Forages géographiquement proches	40
3.4. TRAITEMENT DES CHRONIQUES DES AUTRES DEPARTEMENTS	43
3.4.1. Jurassique	46
3.4.2. Crétacé	50
3.4.3. Forages géographiquement proches	54
3.5. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES 2009-2016	57
3.6. QUE RETENIR DE CES ANALYSES PIEZOMETRIQUES ?	58
4. Karsts de Dordogne : drainage karstique et conditions d'infiltration	61
4.1. RESEAU DE DRAINAGE EN CONTEXTE KARSTIQUE : THEORIE ET CONCEPTS..	61
4.2. APPLICATION AU DEPARTEMENT DE LA DORDOGNE.....	63
4.2.1. Cadre méthodologique.....	63
4.2.2. Délimitation des zones karstiques et typologie des karsts.....	64
4.2.3. Cartographie des conditions d'infiltration.....	66
4.2.4. Corrélation statistique entre typologie de karsts et conditions d'infiltration/ruissellement.....	67
4.2.5. Comparaison avec les débits spécifiques des cours d'eau.....	68
4.2.6. Analyse de bassins d'alimentation de sources	70
4.3. PERSPECTIVES SUR LA VULNERABILITE ET LA RECHARGE.....	75
5. Conclusion.....	77
6. Bibliographie	79

Liste des figures

Illustration 1 - Tableau synthétique des travaux réalisés au cours des 3 premières années du module...	11
Illustration 2 - Carte de répartition des 3244 sources recensées en Dordogne en avril 2017	14
Illustration 3 - Carte de répartition des jaugeages recensés dans l'inventaire des sources de Dordogne et localisation des jaugeages effectués à l'été 2016 (en rouge), en fonction du débit mesuré.....	15
Illustration 4 - Nombre de sources jaugées par classe de débit mesuré ponctuel.....	15
Illustration 5 - Tableau récapitulatif des résultats des analyses physico-chimiques des 23 sources du bassin d'alimentation de la Glane (impluvium karstique au sein du jurassique)	16
Illustration 6 - Tableau récapitulatif des résultats des analyses physico-chimiques des 19 sources du bassin d'alimentation des Moulineaux (impluvium karstique au sein du crétacé)	16
Illustration 7 - Graphique montrant la répartition des valeurs de concentration en silice des eaux des sources situées sur les BA de la Glane et des Moulineaux.....	17
Illustration 8 - Première page de la fiche descriptive des sources « identification, description et localisation du site » (exemple du 07592X0001/HY).....	19
Illustration 9 - Seconde page de la fiche descriptive des sources « mesures ponctuelles complémentaires aux bases nationales »	20
Illustration 10 - Seconde page de la fiche descriptive des sources « mesures en continu complémentaires aux bases nationales »	21
Illustration 11 - Extrait de l'espace cartographique du SIGES Aquitaine avec les sources pour lesquelles les fiches descriptives sont disponibles	22
Illustration 12 - Cartographie des 56 traçages intégrés à la BD Traçages.....	23
Illustration 13 - Répartition des pas de temps des 137 ouvrages d'ADES captant les aquifères du Jurassique et du Crétacé sur la période 1964-2016.....	26
Illustration 14 - Répartition géographique des 71 ouvrages retenus (fond géologique au 1/1 000 000) ...	27
Illustration 15 - Répartition géographique des 6 chroniques piézométriques jurassiques de Dordogne sur (fond géologique au 1/1 000 000).....	29
Illustration 16 - Jurassique de Dordogne - statistiques descriptives des chroniques piézométriques	29
Illustration 17 - Jurassique de Dordogne - Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles)	30
Illustration 18 - Jurassique de Dordogne - Positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP.....	30
Illustration 19 - Jurassique de Dordogne - autocorrélogrammes	31
Illustration 20 - Jurassique de Dordogne - résultats des auto-corrélations	31
Illustration 21 - Jurassique de Dordogne - corrélogrammes croisés avec le piézomètre 07107X0039	31
Illustration 22 - Jurassique de Dordogne - résultats des corrélogrammes croisés	32
Illustration 23 - Répartition géographique des 19 chroniques piézométriques crétacées de Dordogne (fond géologique au 1/1000000)	33
Illustration 24 - Crétacé de Dordogne – statistiques descriptives des chroniques piézométriques utilisées pour l'ACP	34

Illustration 25 - Crétacé de Dordogne - matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles).....	34
Illustration 26 - Crétacé de Dordogne - positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP.....	34
Illustration 27 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques non corrélées	35
Illustration 28 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07584X0002 et 07823X0007	35
Illustration 29 - Crétacé de Dordogne - résultats des auto-corrélations. En jaune, les chroniques non traitées, en gris les chroniques regroupées et en orange les 3 chroniques décorrélées suite à l'analyse par ACP.....	36
Illustration 30 - Crétacé de Dordogne - autocorrélogrammes	36
Illustration 31 - Crétacé de Dordogne - autocorrélogrammes - zoom sur les décalages 0-200 jours.....	37
Illustration 32 - Crétacé de Dordogne - résultats des corrélogrammes croisés	37
Illustration 33 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07345X0023 et 07346X0017	38
Illustration 34 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07583X0018, 07595X0006, 07595X0009, 07827X0006 et 08071X0026	39
Illustration 35 - Crétacé de Dordogne - chronique piézométrique 07835X0003	39
Illustration 36 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 08075X0013 et 08087X0022	40
Illustration 37 - Répartition géographique des doublets et triplets de piézomètres voisins en Dordogne	41
Illustration 38 - Piézométries des forages 08071X0024 et 08071X0026	42
Illustration 39 - Chroniques piézométriques de l'aquifère crétacé en vallée de l'Isle.....	42
Illustration 40 - Auto-corrélogrammes de chroniques piézométriques de la vallée de l'Isle	43
Illustration 41 - Triplet de la vallée de l'Isle - résultats des corrélogrammes croisés	43
Illustration 42 - Répartition géographique des chroniques piézométriques jurassiques et crétacées de Charente, du Lot et du lot-et-Garonne (Les croix indiquent les ouvrages n'ayant pas été retenus pour les analyses).....	45
Illustration 43 - Jurassique du Lot et de Charente * statistiques descriptives des chroniques piézométriques.....	46
Illustration 44 - Jurassique du Lot et de Charente – Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles) - Carré rouge (chroniques du Lot) et Carré bleu (chroniques de Charente)	46
Illustration 45 - Jurassique du Lot et de Charente - chroniques piézométriques non corrélées	47
Illustration 46 - Jurassique du Lot et de Charente - séries piézométriques 08233X0206 et 08807X0011	47
Illustration 47 - Jurassique du Lot et de Charente - résultats des auto-corrélations. Les chroniques regroupées sont en gris et les chroniques différenciées sont en italique	48
Illustration 48 - Jurassique du Lot et de Charente - Autocorrélogrammes.....	48
Illustration 49 - Jurassique du Lot et de Charente - Autocorrélogrammes - zoom sur les décalages 0-200 jours	49
Illustration 50 - Jurassique du Lot et de Charente - résultats des corrélogrammes croisés	49
Illustration 51 - Crétacé du Lot et de Charente - statistiques descriptives des chroniques piézométriques.....	50

Illustration 52 - Crétacé du Lot et de Charente - Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP.....	50
Illustration 53 - Crétacé du Lot et de Charente - Positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP	50
Illustration 54 - Crétacé du Lot et de Charente - résultats des auto-corrélations.....	51
Illustration 55 - Crétacé du Lot et de Charente – autocorrélogrammes	51
Illustration 56 - Crétacé du Lot et de Charente - résultats des corrélogrammes croisés	52
Illustration 57 - Crétacé du Lot (en bas) et de Charente (haut et milieu) - chroniques piézométriques.....	53
Illustration 58 - Répartition géographique des doublets et quadruplets de piézomètres voisins en Charente et Lot	54
Illustration 59 - Piézométries des forages 08323X0205 et 08323X0206	55
Illustration 60 - Corrélogramme croisé entre les chroniques 08323X0205 et 08323X0206.....	55
Illustration 61 - Piézométries des forages 06853X0053 et 06854X0051	56
Illustration 62 - Autocorrélogrammes des chroniques 06616X0068, 06617X0042, 06617X0056 et 06617X0057	56
Illustration 63 - Corrélogramme croisé des chroniques 06617X0056 (en entrée) et 06617X0057	57
Illustration 64 - Chroniques piézométriques de longues durées : corrélations identifiées	58
Illustration 65 - Modèle conceptuel de la réorganisation du drainage par karstification (Ford & Williams, 2007)	62
Illustration 66 - Carte des formes karstiques de Dordogne (Cabaret et al., 2014) sur fond géologique ne représentant que les formations carbonatées (Jurassique en bleu, Crétacé en vert, Tertiaire en violet)	65
Illustration 67 - Typologie des karsts de Dordogne	65
Illustration 68 - Densité du réseau de drainage superficiel calculé à partir de la BD Carthage (sans les cours d'eau d'ordre 1 illustré en traits larges sur la carte) par zone hydrologique (à gauche) et selon la découpage de la grille SAFRAN (à droite).....	66
Illustration 69 - Cartographie de la densité d'indices karstiques (dolines, gouffres, pertes, autres cavités naturelles) (à gauche) et de la densité de vallées sèches (à droite)	67
Illustration 70 - ACP sur les variables typologies de karst (karst nu, sous couvertures, de contact) et indices de ruissellement/infiltration (densité d'indices karstiques, de vallées sèches, de drainage superficiel, IDPR) sur les 118 bassins versants (à gauche) et les 134 mailles SAFRAN (à droite).....	68
Illustration 71 - Stations hydrologiques (Banque Hydro) retenues pour le calcul des débits spécifiques	69
Illustration 72 - Débits spécifiques en fonction de la taille du bassin versant et du contexte géologique.....	70
Illustration 73 - Situation des bassins d'alimentation des sources étudiées	71
Illustration 74 - ACP portant sur les facteurs caractérisant les bassins d'alimentation et le débit spécifique des sources (FALG : Falguyret, TOU : Toulon, MOUL : Moulineaux, FOCHAU : Font Chaude, SMC : Ste Marie de Chignac, FON : Fongauffier).....	72
Illustration 75 - ACP portant sur les facteurs caractérisant les bassins d'alimentation et des paramètres chimiques mesurés aux sources (concentrations en nitrates et chlorures, coefficient de variation en chlorures, nitrates et magnésium)	73
Illustration 76 - Classification des sources en quatre catégories et superficie respective des différentes typologies de karst au sein de leurs bassins d'alimentation respectifs	74

Illustration 77 - Diagramme de classification des sources karstique proposée par Mangin avec report de la source du Toulon et de la Doux de Coly (modifié de Lorette 2014)	74
Illustration 78 - Profils d'altitude des cours d'eau principaux (à l'exception de la Dordogne) projeté sur un plan N60E passant à proximité du cours de l'Isle. Les cotes et la localisation approximative des sources principales situées dans la vallée de l'Isle sont également représentées (ronds oranges)	76
Illustration 79 - Tableau synthétique des travaux réalisés au cours des 4 années du module.....	77

Liste des annexes

Annexe 1 Tableau du nombre de mesures piézométriques disponible par an pour chacun des 87 ouvrages sur la période 1984-2016.....	81
Annexe 2 Chroniques piézométriques par groupes constitués des 6 piézomètres jurassiques de Dordogne	85
Annexe 3 Chroniques piézométriques du Crétacé de Dordogne écartées de l'analyse.....	89
Annexe 4 Évolution des 11 chroniques piézométriques du Lot-et-Garonne	93
Annexe 5 Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP des 27 chroniques piézométriques longues (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en bleu, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles)	97
Annexe 6 Couples piézométriques obtenus des corrélations sur les longues chroniques piézométriques	101

1. Introduction

Dans le cadre de la convention régionale « Gestion des Eaux souterraines en région Aquitaine » signée entre le BRGM, la Région Aquitaine et l'Etat pour la période 2015-2020 avec le soutien financier de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, de l'Europe (fonds FEDER) et des Conseils Départementaux de la Gironde, de la Dordogne, le BRGM a entrepris des actions de recherche et de mise en valeur des ressources en eaux souterraines. Sur la période 2016-2017 (année 1 de la convention), le module 3.1 concerne l'amélioration des connaissances sur les karsts aquitains. Le Département de Dordogne s'est positionné afin que soient menés des travaux sur les karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne. Cette étude, qui s'inscrit dans le cadre des actions de Service Public du BRGM, a été cofinancée par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne, le BRGM, le Conseil Régional Aquitaine et le Département de la Dordogne.

La compréhension du fonctionnement des aquifères carbonatés de manière générale et plus spécifiquement leur fonctionnalité karstique nécessite une approche pluridisciplinaire qui repose sur la conjonction de plusieurs méthodes pour mettre en évidence l'existence d'un comportement et d'une structure karstique. Ces différentes méthodes nécessitent de nombreuses données ayant trait à la géomorphologie, à la géologie, à l'hydrogéologie ou encore à la géochimie (Dorfliger et al., 2010). Ainsi, ce module de la convention régionale s'organise autour de deux axes de travail :

1. L'acquisition de données diverses sur les réservoirs carbonatés nord-aquitains et en particulier ceux de Dordogne

L'important travail de collecte des données géologiques et hydrogéologiques mené depuis trois ans est résumé par le tableau ci-dessous :

	Donnée/information	Objectif	Résultats année 1	Résultats année 2	Résultats année 3	Résultats année 4
Volet géologique	Aspects géomorphologiques	inventaire formes karstiques en surface	fonctionnement karstique, histoire karstification	inventaire des dolines (terrain et bibliographie)	cartographie des modalités d'infiltration au sein de bassins d'alimentation	Analyse du drainage et des conditions d'infiltration
		inventaire formes karstiques en profondeur		répartition spatiale des conduits karstifiés		
		MNT 25 m	paléosurface, histoire karst.	traitement SIG effectué		
	Aspects géologiques sensu stricto	carte géologique	contexte, zones karstifiables	harmonisation de la carte géologique	cartographie de la couverture	
		logs géologiques		logs régionaux de référence	identification et complation	
	Aspects paléo-environnementaux	cartes paléogéographiques, climatologie, eustatisme	histoire karstification	synthèse générale des cartes paléogéographiques disponibles	synthèse paléogéographique et structurale	
Volet hydrogéologique	Aspects structuraux	cartes tectoniques (plis, fractures, failles, ...)	plans de drainage potentiels, géométrie des aquifères	synthèse générale (bibliographie et relevés de fracturation)	ajouts et homogénéisation des structures tectoniques + synthèse	
	Piézométrie	fonctionnement de l'aquifère	recupérée		inventaire des sources	Analyse ACS, ACP
	Débits de source	fonctionnement de l'aquifère	recupération des suivis de 4 sources	1 source équipée + 2 autres suivis récupérés : lancement de jaugages	Compilation données de débits (bibliographie + terrain)	Finalisation inventaire des sources
	Météorologie	support d'analyse de chroniques	stations identifiées : récupération des données selon les besoins		Poursuite des mesures de débits	Poursuite des mesures de débits
	Traçages artificiels	vitesse d'écoulement, fonctionnement	base de données constituée		Mise à disposition des fiches descriptives de sources	
	Bassins d'alimentation	caractérisation des aquifères (limites)	données récupérées		Poursuite des courbes de tarage sur 3 sources (Moulineux, Glane, Toulon)	
	Physico-chimie	fonctionnement de l'aquifère	premières interprétations (faciès chimique, distribution spatiale, ACP, AFD, ...)	Poursuite des interprétations (ACP, Diagrammes binaires, Variabilité temporelle, PCO2)	cartographie des modalités d'infiltration au sein de bassins d'alimentation	Bancarisation dans BD Traçages
	Pertes/bulides	fonctionnement karstique	partiellement récupérées	analyse des bulides	acquisition ions majeurs + poursuite interprétation PCO2	Analyse du drainage et des conditions d'infiltration
	Datations	âge des eaux souterraines	partiellement récupérées		poursuite inventaire bulides	

Illustration 1 - Tableau synthétique des travaux réalisés au cours des 3 premières années du module

2. Le développement d'approches méthodologiques et l'exploration de pistes d'interprétation pour la compréhension du fonctionnement des aquifères carbonatés

En **géologie**, la synthèse des données géologiques et paléogéographiques a permis, en appui du projet OKaNA (Husson, 2015) l'identification des trois phases majeures de karstification potentielle dans le nord du Bassin aquitain :

- le Crétacé inférieur,
- le Paléogène,
- du Miocène à l'actuel.

A ces phases de karstification majeure, de nombreuses émergences locales apparaissent à différentes périodes et semblent propices à une karstification qui serait toutefois moins intense et plus localisée. En complément, l'impact de la tectonique dans la modification du niveau de base et le rôle de structures particulières telles que les récifs dans les écoulements souterrains sont abordés. Ce travail permet d'orienter les réflexions sur l'organisation et le fonctionnement des aquifères karstiques.

Le **volet hydrogéologique** a permis jusqu'ici de dégager certaines tendances portant sur la signature chimique de différents ouvrages et l'intérêt de certains marqueurs, qu'ils soient d'origine anthropique ou non, dans l'étude du fonctionnement des aquifères carbonatés de Dordogne et de leur fonctionnalité karstique (Cabaret et *al.*, 2014). Par ailleurs, une approche de cartographie des modalités d'infiltration par croisement des informations géologiques et hydrogéologiques a été explorée et doit encore être validée mais les résultats préliminaires peuvent apporter des informations utiles sur les questions de vulnérabilité des captages et sur le degré de fonctionnalité des systèmes. La cartographie obtenue pourrait ainsi servir d'appui aux maîtres d'ouvrage dans leur démarche de protection de leurs ouvrages et la mise en place de mesures réglementaires sur une zone précise d'un bassin d'alimentation de captage.

La quatrième année de travail, objet du présent rapport, s'inscrit dans la continuité directe des travaux précédents, et propose la finalisation de l'inventaire des sources de Dordogne engagée en année 3. Des données de débits et de physico-chimie ont également été acquises afin d'appuyer les réflexions sur le fonctionnement des réservoirs. L'ensemble de ces données sur les sources sont valorisées au travers de fiches descriptives mises à disposition du grand public dans l'espace internet du SIGES Aquitaine. De la même manière, les données de traçage collectées tout au long du projet, sont bancarisées dans la base dédiée BD Traçages également relayée par le SIGES Aquitaine via l'espace cartographique.

En parallèle, une première réflexion a été menée sur la structure et le fonctionnement du système karstique par le biais des analyses corrélatoires. Enfin, une seconde réflexion porte sur l'analyse des conditions d'infiltration qui peuvent apporter des informations utiles sur les questions de vulnérabilité des captages et sur le degré de fonctionnalité des systèmes.

2. Acquisition et valorisation des données hydrogéologiques de Dordogne

2.1. CONNAISSANCES SUR LES SOURCES DE DORDOGNE

2.1.1. Inventaire finalisé des sources

Initié en 2014 (Gutierrez et al., 2016), l'inventaire des sources de Dordogne doit permettre d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement des aquifères carbonatés en caractérisant leurs exutoires. La connaissance des sources, leur disposition, leur débit ou encore leurs propriétés physico-chimiques, permet en effet d'évaluer la fonctionnalité karstique d'un exutoire.

La réalisation de cet inventaire s'est appuyée en premier lieu sur les sources présentes dans la Banque du Sous-Sol (BSS) complétée des rapports de bureaux d'étude et de thèses. Ensuite, l'ensemble des communes de Dordogne a été mis à contribution afin de répertorier les sources présentes sur leur territoire. Cette enquête, débutée en 2004, avait permis en 2005 (Saplaïroles et al., 2005) d'ajouter 821 sources à la BSS. Depuis 2014, cette enquête s'est poursuivie auprès des 115 communes qui n'avaient pas répondu et s'est finalisée en 2016. Celles-ci ont permis d'identifier 412 nouvelles sources en Dordogne. Il est également apparu nécessaire d'exploiter l'information disponible sur les cartes IGN pour avoir une connaissance plus aboutie des sources présentes en Dordogne. Nécessaire, car la contribution des mairies, même si elle s'avère primordiale, n'est pas homogène et la qualité de l'information remontée se limite à un positionnement parfois imprécis sur une carte au 1/25 000^{ème}. Nécessaire également car il s'est avéré à plusieurs reprises que des sources identifiées sur les cartes IGN n'avaient pas été inventoriées jusqu'ici alors qu'une vérification sur le terrain attestait de la réalité d'une source.

En avril 2017, 3244 sources à la fois pérennes et temporaires sont finalement recensées en Dordogne (Illustration 2). Cet inventaire, qui constitue une base de travail, devra être réajusté par la suite à la faveur de missions de terrains et d'apports de nouvelles études. Suite aux premières campagnes de terrain effectuées à l'été 2016 (ci-après), certaines sources constituant l'inventaire ont été écartées en raison de l'impossibilité de localisation de la source (réalité de la source ? problème de coordonnées ?). Certaines mairies ont également identifié des puits et même des lavoirs comme points de source or ceux-ci peuvent être disposés au bord d'une cours d'eau ou encore d'une mare. Dans l'inventaire, certains lavoirs sont donc présents et disposés à l'aval d'une source elle-même inventoriée. Là encore, une vérification sur le terrain s'impose pour préciser l'existence des sources. En attendant cette validation, le choix a été fait d'intégrer, après une première vérification, l'ensemble des sources directement à l'inventaire et de les intégrer à la BSS. Les études futures et autres missions de terrain se chargeront de vérifier et modifier cette base de données sur les sources de Dordogne.

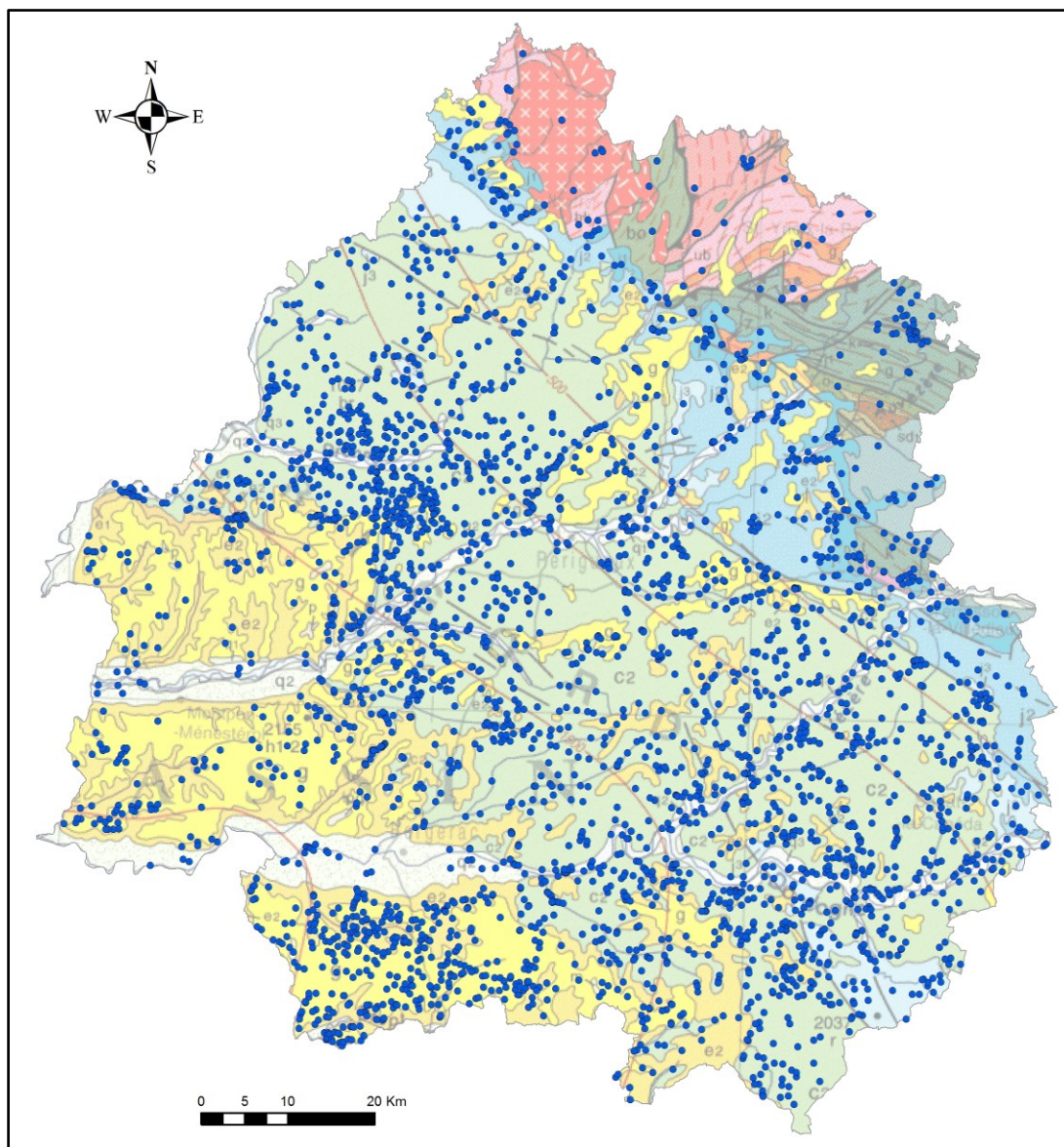


Illustration 2 - Carte de répartition des 3244 sources recensées en Dordogne en avril 2017

2.1.2. Poursuite de l'acquisition de mesures hydrogéologiques sur les sources

La connaissance des débits des sources s'avère intéressante pour notamment évaluer les ressources en eau disponibles et les modalités d'écoulements souterrains. Devant le nombre important de sources présentes sur le territoire de Dordogne, ce travail ne peut se faire que sur le long terme et doit nécessiter l'appui des acteurs locaux (bureaux d'études, universitaires, gestionnaires privés et publics, ...). Au cours du précédent rapport (Gutierrez et al., 2016), il avait été décidé d'initier ce travail de connaissance des débits des sources en proposant une compilation des données issues de la bibliographie puis une acquisition de terrain. Cette dernière s'est poursuivie à l'été 2016.

Le passage sur site permet de vérifier l'exactitude de l'inventaire (présence ou non de la source, localisation géographique, accessibilité, ...) et d'évaluer la possibilité d'une mesure de débit en identifiant la méthode à adopter, ce travail pouvant être complété par des analyses physico-chimiques des eaux.

a) Mesures de débits

La campagne de terrain 2016 a porté sur les sources situées dans et aux abords des bassins d'alimentation de deux des plus importantes résurgences de Dordogne en termes de débits moyens (plus de 2 500 m³/h) : la source de Glane (située au S-E de son bassin) et la source des Moulineaux (située au N-O de son bassin) (Illustration 3). Ce choix se justifie par le manque de connaissances sur les bassins d'alimentations de ces sources aux contextes hydrogéologiques différents. La possibilité de considérer ces deux systèmes en tant que bassins pilotes pour des programmes de recherche futurs impose également de commencer à collecter des données sur leur bassin d'alimentation.

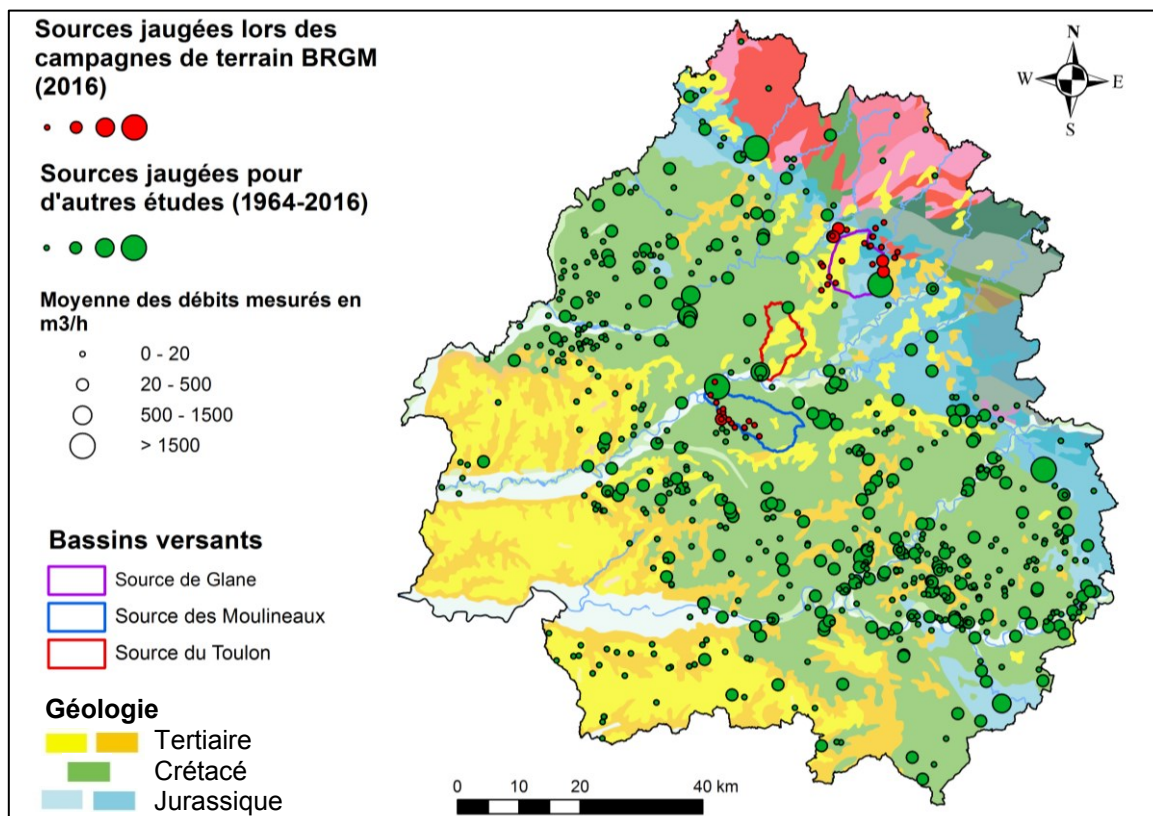


Illustration 3 - Carte de répartition des jaugeages recensés dans l'inventaire des sources de Dordogne et localisation des jaugeages effectués à l'été 2016 (en rouge), en fonction du débit mesuré

Depuis 1964, 650 sources ont été jaugées ponctuellement en Dordogne. La très grande majorité de celles-ci ont un débit jaugé inférieur à 20 m³/h tandis que seulement 4 sources dépassent les 1 500 m³/h (Illustration 4).

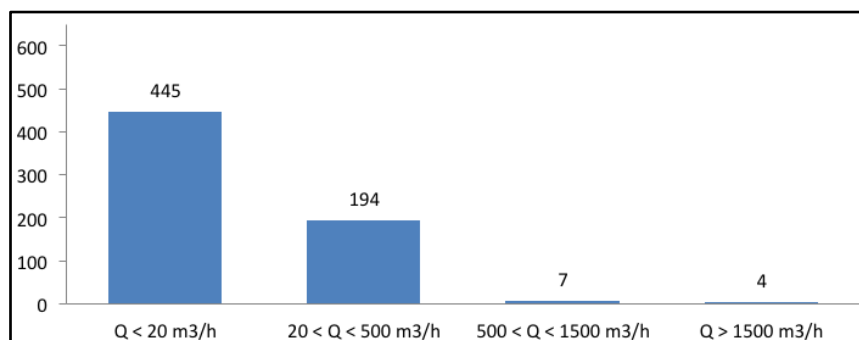


Illustration 4 - Nombre de sources jaugées par classe de débit mesuré ponctuel

b) Mesures physico-chimiques

Les mesures de débits sur chacune des sources visitées ont été complétées par des analyses physico-chimiques parmi lesquelles la température, le pH, la conductivité, l'O₂ dissous, les ions majeurs et la silice (SiO₂).

La silice provient essentiellement des minéraux silicatés (feldspaths, plagioclases, argiles, ...). Elle est peu soluble sous nos climats plutôt froids et sa mise en solution se fait avec un temps de séjour élevé, ce qui constitue un traceur d'acquisition lente dans le réservoir. Dans les aquifères carbonatés, la rareté des minéraux silicatés fait que les concentrations en silices des eaux souterraines restent faibles (quelques mg/L). Les variations de la concentration en silice (même faibles) peuvent constituer un bon marqueur de l'origine des eaux, qu'il s'agisse par exemple de formations superficielles (argilo-sableuses sus-jacentes au massif, ou d'eaux issues de parties non karstiques (grès, sables, roches plutoniques, ...). (Dörfliger et al., 2010). La silice peut donc s'avérer être un marqueur potentiel de recharge par des eaux ayant circulé sur le socle notamment.

Le choix de réaliser cette mesure au cours de la campagne 2016 a été motivé par les travaux de thèse en cours sur les sources du Toulon à Périgueux sur lesquelles des concentrations importantes en silice sont observées (20-25 mg/L lors des crues à 13 mg/L en fin d'été). Sur le bassin du Toulon, les eaux du Jurassique apparaissent moins chargées en silice que celles du Crétacé. Afin de vérifier ou non cette observation, d'autres sources de Dordogne, notamment au sein des bassins d'alimentation de la Glane et des Moulineaux dont les eaux issues respectivement du Jurassique et du Crétacé, ont été prélevées pour analyses. Les analyses de concentration en silices, tout comme celles des ions majeurs, ont été réalisées au laboratoire I2M de l'université de Bordeaux.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans les deux tableaux suivants qui synthétisent les résultats pour les sources du bassin d'alimentation (BA) de la Glane (Illustration 5) et celle du BA des Moulineaux (Illustration 6).

Paramètres mesurés	Température (°C)	pH	Cond. à 25°C (µS/cm)	O ₂ dissous (mg/L)
Valeur médiane	12,75	6,97	549	6,89
(min – max)	(11,5 – 13,5)	(6,79 – 7,7)	(255 – 740)	(2,55 – 9,68)
Nb de valeurs disponibles	22	13	21	21

Illustration 5 - Tableau récapitulatif des résultats des analyses physico-chimiques des 23 sources du bassin d'alimentation de la Glane (impluvium karstique au sein du jurassique)

Paramètres mesurés	Température (°C)	pH	Cond. à 25°C (µS/cm)	O ₂ dissous (mg/L)
Valeur médiane	12,8	6,91	626	6,91
(min – max)	(11,7 – 13,5)	(6,39 – 7,54)	(296 – 980)	(4,55 – 12,8)
Nb de valeurs disponibles	19	19	19	17

Illustration 6 - Tableau récapitulatif des résultats des analyses physico-chimiques des 19 sources du bassin d'alimentation des Moulineaux (impluvium karstique au sein du crétacé)

Les valeurs obtenues par cette campagne d'échantillonnage corroborent les informations disponibles sur les sources de ces systèmes karstiques. Les valeurs médianes et les gammes de variation de la température, du pH et de l'oxygène dissous des eaux du Jurassique apparaissent comparables à celles mesurées dans le Crétacé. La conductivité électrique des eaux du Crétacé apparaît globalement plus élevée que celle du Jurassique.

Concernant la silice, les analyses de concentration ont été effectuées sur 33 sources. 15 pour le bassin d'alimentation de la Glane qui émergent toutes du Jurassique à l'exception de celles de Vaunac (07356X0001/HY) et Fongou (07592X0022/SOURCE) qui émergent du Crétacé, et 18 sources pour le bassin d'alimentation des Moulineaux qui émergent toutes du Crétacé.

Les résultats (Illustration 7) montrent que les eaux du Crétacé se distinguent nettement des eaux jurassiques par des teneurs élevées en silice (26.7 mg/l pour le crétacé contre 8.4 mg/l). Les teneurs élevées en silice du Crétacé sont liées aux interactions eau-roche avec les faciès siliceux de la formation et pourraient également s'expliquer par des temps de résidence plus importants de l'eau souterraine au sein de la formation.

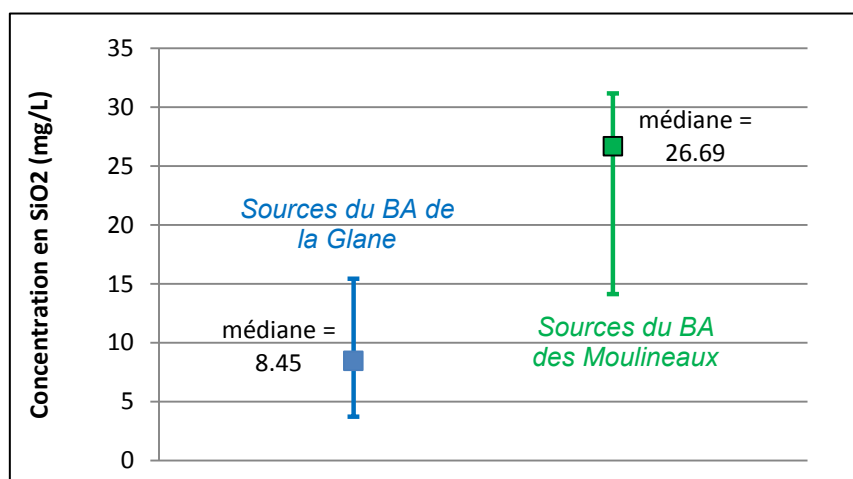


Illustration 7 - Graphique montrant la répartition des valeurs de concentration en silice des eaux des sources situées sur les BA de la Glane et des Moulineaux

Dans l'ensemble, deux pôles différents se distinguent selon le bassin d'alimentation et corroborent les résultats obtenus sur le bassin d'alimentation du Toulon. Dans le détail on peut observer que les deux sources identifiées comme crétacées et localisées dans le bassin d'alimentation de la Glane montrent des concentrations en silice similaires aux sources du Jurassique (6,02 et 9,40 mg/L). Ces deux sources émergent des calcaires du Turonien avec lesquelles les interactions eaux-roche et/ou le mélange d'eau avec le Crétacé sont faibles voire inexistantes. En termes de perspectives, l'utilisation des isotopes du strontium permettrait de préciser l'origine des eaux et l'importance des mélanges et/ou échange avec le Crétacé le cas échéant. Plus globalement, pour les karsts binaires alimentés par des impluviums non karstiques (socle) par exemple, les isotopes du strontium sont très utiles et intéressants à mettre en œuvre pour caractériser ces échanges eaux surfaces/eaux souterraines.

2.1.3. Fiche de valorisation des données de sources

Dans la continuité de la réalisation de l'inventaire des sources et des mesures de débit et de physico-chimie effectuées au cours de ce projet (Cabaret et al., 2012 ; Cabaret et al., 2014 ; Gutierrez et al., 2016), il était envisagé de mettre à disposition l'ensemble des analyses et jaugeages compilés et acquis à destination du grand public .

La valorisation des informations obtenues sur les sources s'inscrit dans un processus d'amélioration constante de leur connaissance notamment en termes de débits. Pour ces derniers, aucun espace de stockage à l'heure actuelle ne permet de s'assurer d'une part de la validité de la mesure effectuée ni d'autre part de la reproductibilité de la mesure. En effet, ces considérations nécessitent de connaître, au-delà de la mesure de débit en tant que telle et de la

date de réalisation, les caractéristiques de la source (configuration du site, photos, ...), la méthode de jaugeage utilisée et surtout la localisation précise de la mesure de débit effectuée. En effet, aucune des plateformes de diffusion des informations sur les eaux souterraines (BSS, BSS-EAU, Banque hydro, ADES) ne permettent de stocker l'ensemble des informations nécessaires. Il a donc été décidé de mettre en place des fiches descriptives permettant de regrouper l'ensemble de ces informations qui peuvent être utilisées à la fois comme document de terrain et comme document d'information pertinente à destination du grand public.

Ces fiches descriptives sont éditées au format PDF. Générées à partir d'une base Access unique, elles sont consultables au travers de l'espace cartographique du SIGES Aquitaine dans la couche « Hydrographie → Débits des sources » (<http://sigesaqi.brgm.fr/?page=carto>)

Chaque fiche contient deux pages (Illustration 8, illustration 9 et illustration 10) :

- Première page : identification, description et localisation (Illustration 8) :

La partie « **identification** » regroupe les informations générales de la source : commune, code INSEE, lieu-dit/nom, cartes IGN et géologiques associées, coordonnées, ...

La partie « **description** » présente les données techniques sur la source, l'écoulement, la géologie et toutes les informations qui lui sont associées, telles que la nature de la source, le contexte géomorphologique, la géologie au droit de l'affleurement, l'utilisation de la ressource ou encore le type de régime hydrologique associé. Dans cette même partie se trouvent d'autres indications très importantes comme la date de la dernière visite effectuée sur le site, si la mesure du débit est possible et quelles sont les conditions nécessaires à cette mesure (si elles sont connues). Un encart « Remarques, commentaires » permet de détailler l'accès au site, la configuration ou les démarches nécessaires pour effectuer les mesures.

Le reste est dédié à la **description schématique** et à la **localisation** de la source. 2 photos du site, une carte de localisation de la source sur fond de carte topographique IGN scan25, et un schéma de configuration de site sur lequel sont indiqués le(s) point(s) de sortie, les éventuels points de mesure, le sens d'écoulement des eaux et la position/sens des 2 photos. Enfin, un espace est réservé pour l'ajout de liens externes vers une localisation du site sur Google Maps, vers la fiche InfoTerre ou vers la fiche ADES correspondante (si existante).

L'ensemble des éléments présents sur cette première page doit permettre à chacun de comprendre la configuration du site et les conditions de mesures avant de se rendre sur place.

- Seconde page : mesures complémentaires aux bases nationales :

La seconde page est dédiée aux mesures et analyses qui ne trouvent pas leur place dans les banques de données nationales telles que ADES ou la Banque HYDRO. Deux cas de figure peuvent être rencontrés : 1) La source est suivie par des mesures ponctuelles (Illustration 9) ; 2) La source est suivie par des mesures en continu (Illustration 10). Dans les deux cas, un tableau présente la synthèse des mesures acquises pour quelques paramètres uniquement (débit, température, pH, conductivité) au travers de trois valeurs statistiques (1er quartile, médiane, 3ème quartile), et selon le cas le nombre/période de mesure.

Dans le cas d'une source suivie par des mesures ponctuelles, deux tableaux présentent les dix mesures de débit et des paramètres physico-chimiques les plus récents. Lorsque la source est suivie par des mesures en continu, seule la chronique de débit ou de hauteur d'eau est présentée. Les données seront téléchargeables à partir d'un lien inséré dans la fiche.

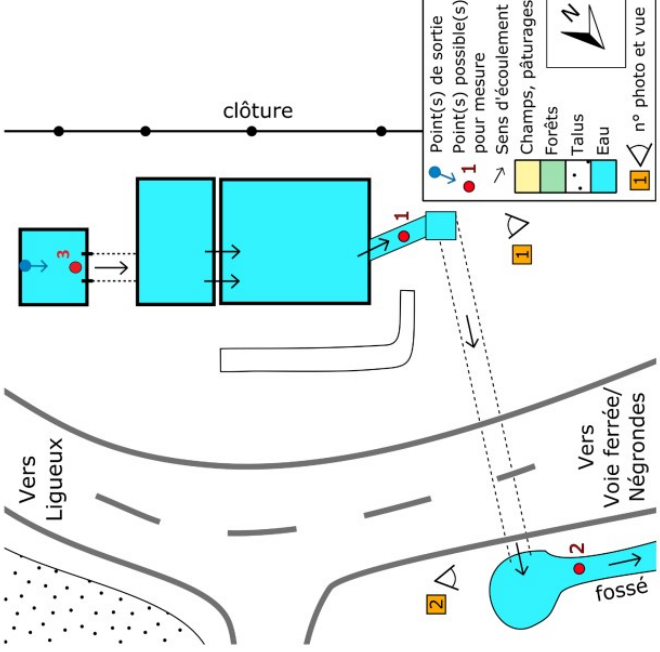
Code BSS : 07592X0001/HY		Visite terrain : OUI Date dernière visite : 28/05/2016 Mesure de débit possible ? : OUI Conditions nécessaires : Lorsque le débit est suffisamment élevé.		Dernière Mise à jour fiche : 21/07/2016			
IDENTIFICATION Commune : SAINT-ROMAIN-ET-SAINT-CLEMENT Code INSEE : 24239 Lieu-dit/Nom de la source : FONTAINE DE FONTARNAUD Carte IGN (1/25000e) : 1934 Ouest Carte géologique (1/50000e) : 759 - PERIGUEUX (EST)		Coordonnées : WGS 84 (*) Longitude E : 0.82187 Latitude N : 45.32153 Altitude : 160 Accès : Bord de route		Remarques, commentaires : L'ouvrage se présentant sous forme de deux réservoirs, possibilité d'estimer le débit au flotteur ou courantomètre lorsque le débit le permet. Demander à la mairie de Ligeux pour ouvrir le cadenas de la source afin d'effectuer des prélèvements.			
DESCRIPTION Exutoire isolé / groupe d'exutoires : Isolé Point de sortie de l'exutoire : Localisé(s) Contexte immédiat à l'émergence : Invisible sous les terrains affluents Nature de la source : Inconnue Eléments de karst associés : Inconnus Contexte géomorphologique : Flanc de versant Géologie au droit de l'affleurement : Coniacien (Crétacé) Calcaires durs cristallins, calcaires gréseux et sables fins à grossiers à la base, calcaires à Huîtres au sommet.		Photo 1 :  Photo 2 : 		Situation aval des eaux de l'exutoire : Donne naissance ou alimente un cours d'eau Classe hydrogéologique : Inconnue		Utilisation de la ressource : Patrimonial Etat : Aménagé Fonctionnalité de l'exutoire : Inconnue Type de régime : Inconnu Environnement local : Voirie, habitations, jardins culturels Périmètre de protection : NON	
LIENS EXTERNES  		situation aval, mare et ruisseau de l'autre côté de la route					

Illustration 8 - Première page de la fiche descriptive des sources « identification, description et localisation du site » (exemple du 07592X0001/HY)

Mesures ponctuelles complémentaires aux bases nationales				
Synthèse des données				
	Nombre de mesures	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile
Débit (L/s)	3	0.2	0.4	0.8
Température (°C)	2	12.3	12.35	12.4
pH	1	7.08	7.08	7.08
Conductivité (µS/cm)	2	467	485	503
Bibliographie				
[A] Projet Karst 24 [B] InfoTerre				

Mesures de débits						
Date mesure	Conditions météo	Point de mesure (voir Schéma)	Méthode employée	Q (L/s)	Description de l'écoulement et observations	Origine des données
18/05/2016	Beau	1	Flotteur	0.8	Plus précis lors de débits supérieurs. Section de sortie de lavoir imparfaite : Q obtenu surestimé.	[A]
16/05/2014	/	/	Estimation visuelle	0.2	Estimation du débit	[A]
14/10/1969	/	/	/	0.4	/	[B]

Paramètres physico-chimiques									Remarques mesures physico-chimiques
Date mesure	Conditions météo	Point de mesure	T eau (°C)	pH	Conductivité (µS/cm)	O2 dissous (%)	Alcalinité tot (mg/L HCO3)	Turbidité (NTU)	

Illustration 9 - Seconde page de la fiche descriptive des sources « mesures ponctuelles complémentaires aux bases nationales »

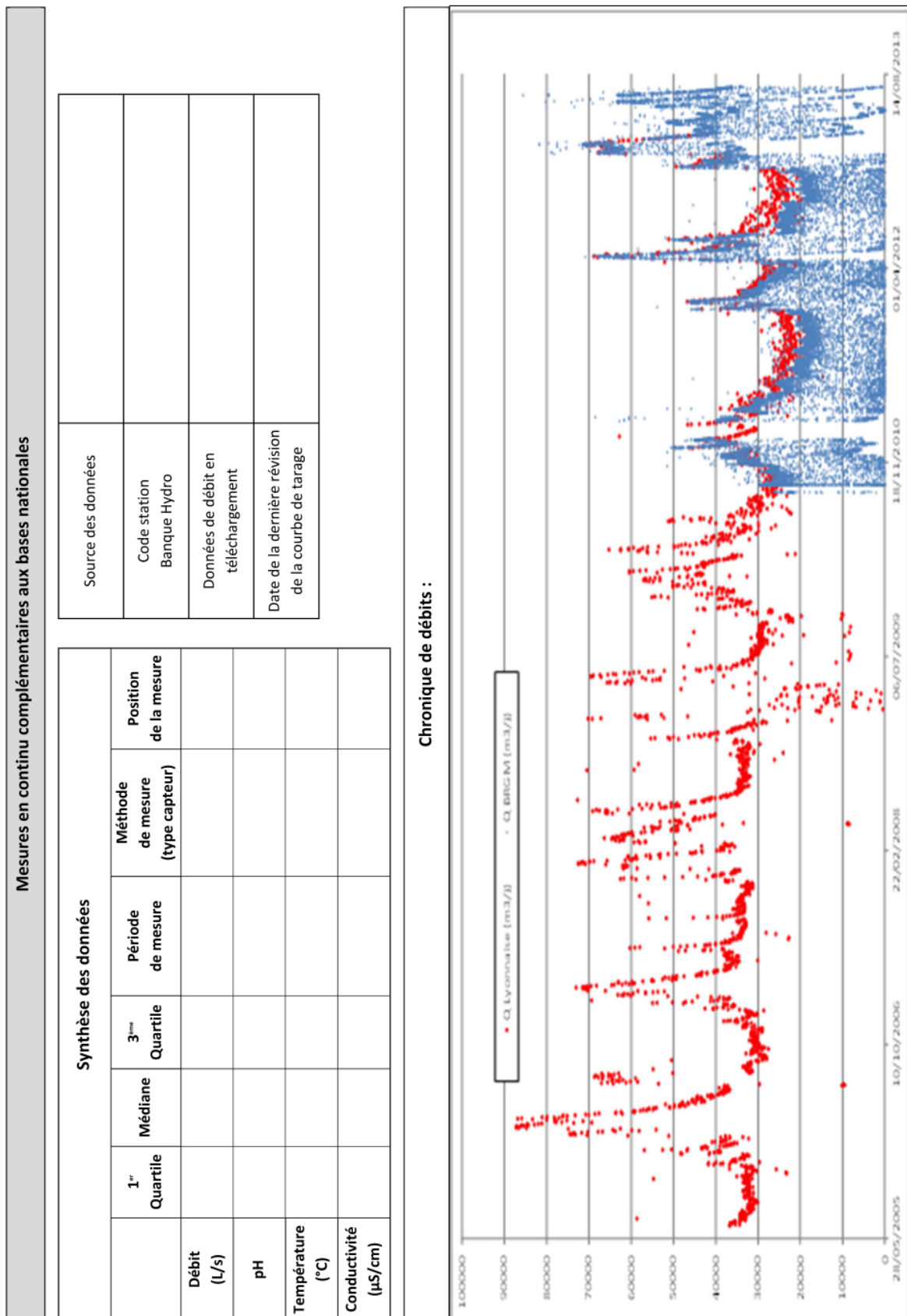


Illustration 10 - Seconde page de la fiche descriptive des sources « mesures en continu complémentaires aux bases nationales »

A l'heure actuelle, les fiches de 59 sources, correspondant à celles jaugées à l'été 2016 sur les sources de la Glane et des Moulineaux, sont disponibles sur le site du SIGES Aquitaine (Illustration 11). Des configurations de site restent cependant à numériser avant leur intégration. Les sources disposant de mesures de débit historiques et collectées précédemment au cours de notre projet (Gutierrez et al., 2016) ne sont pour l'instant pas intégrées à cet espace cartographique car elles présentent certaines imprécisions : les données sont anciennes, la méthode de jaugeage n'est pas décrite et le lieu exact de mesure rarement indiqué. La décision de les intégrer à cet espace cartographique sera prise pour la suite du projet mais elles restent disponibles sur simple demande.

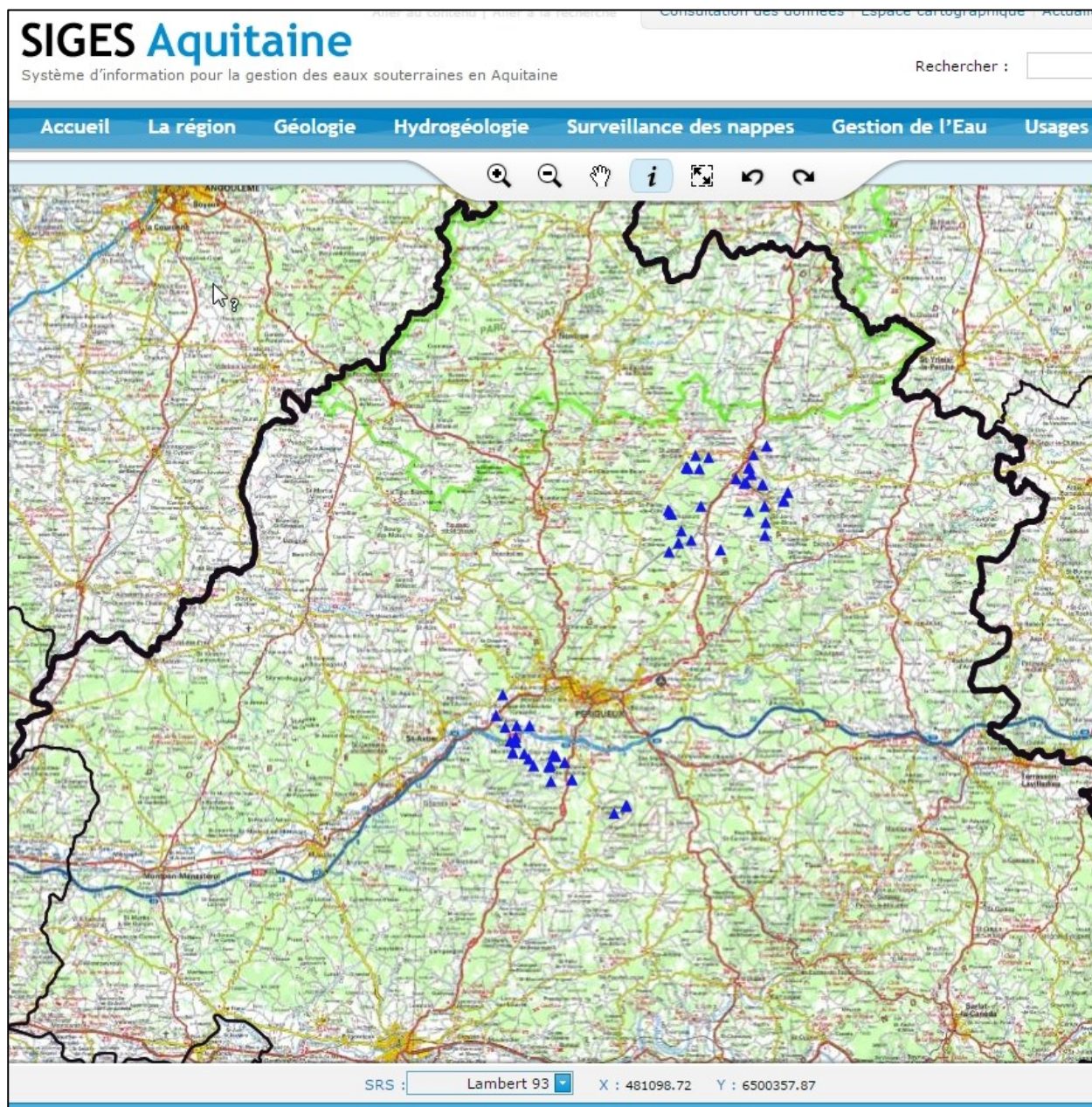


Illustration 11 - Extrait de l'espace cartographique du SIGES Aquitaine avec les sources pour lesquelles les fiches descriptives sont disponibles

2.2. BANCARISATION DES DONNEES DE TRAÇAGE

En 2013, le développement mutualisé d'un nouvel outil de saisie en ligne des données de traçages a été initié dans le cadre des projets SIGES des directions régionales Midi-Pyrénées, Aquitaine et Centre. L'objectif était de construire un outil commun à destination de tous permettant de répertorier l'ensemble des opérations de traçages hydrogéologiques effectuées en France (<https://bdtracages.brgm.fr/>). Ce travail a donné lieu à des échanges avec certaines agences de l'eau et quelques universités spécialisées dans ce domaine afin d'aboutir en mai 2016 à la mise en ligne du site BD Traçages, lequel est validé par le SANDRE.

Lors de l'inventaire de 2011 (Cabaret et al., 2012), 119 traçages ont été répertoriés à partir des données disponibles dans la littérature notamment auprès du Spéléo-Club de Périgueux, dans quelques rapports de bureaux d'études, dans les thèses ou encore dans les rapports BRGM. Il s'agit d'un inventaire non exhaustif, d'autres traçages étant disponibles dans la littérature et notamment auprès des bureaux d'études.

À la suite d'une réunion de présentation et d'échanges sur la BD Traçages en juin 2016, à laquelle était convié notamment le Comité Départemental de Spéléologie, il a été convenu de n'intégrer que les traçages issus de la bibliographie BRGM, des thèses et d'un bureau d'étude (avec leur accord). Le reste, correspondant à 52 traçages appartenant au Comité Départemental de Spéléologie, au Conseil Départemental du Lot ou à d'autres bureaux d'études, sera intégré par ses propriétaires. Après avoir rejeté 11 traçages de l'inventaire par manque d'informations suffisantes, 56 traçages ont été intégrés à la base (Illustration 12). Beaucoup ne sont renseignés que de manière partielle et ne peuvent être utilisés que qualitativement car des informations importantes manquent concernant notamment la nature du traceur, les masses injectées, les débits d'injection et de restitution, ...

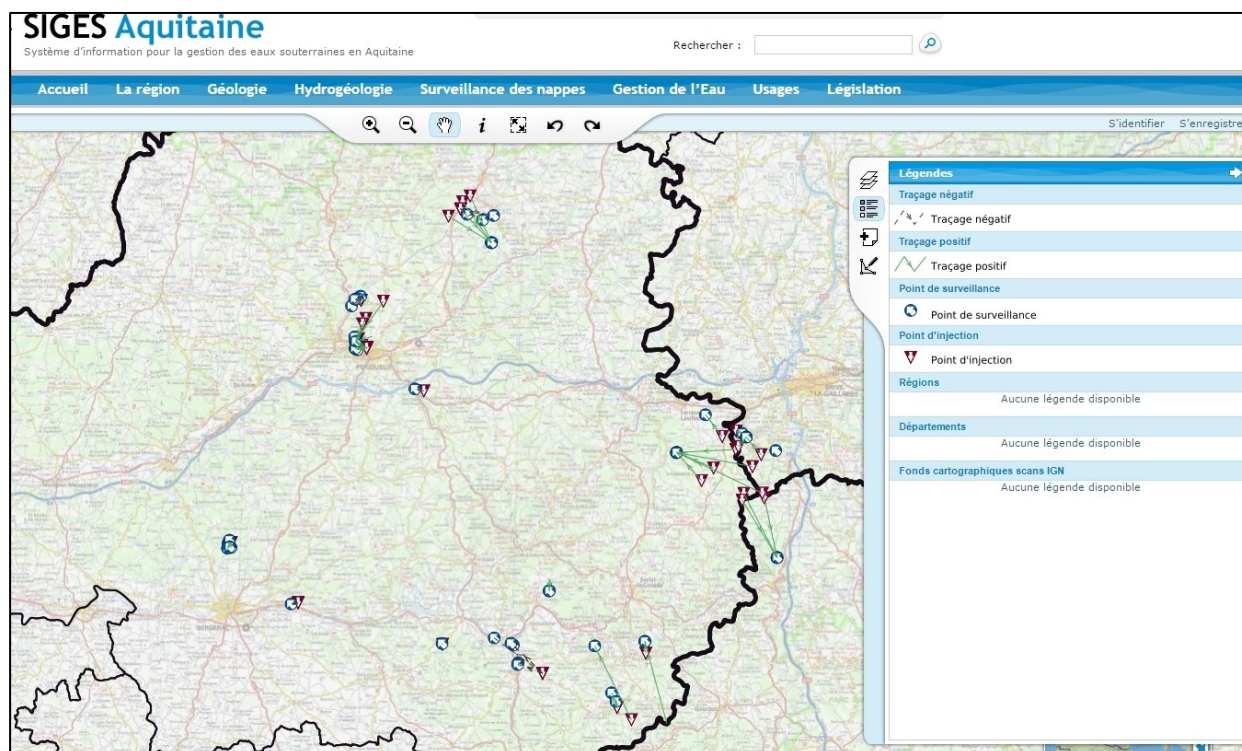


Illustration 12 - Cartographie des 56 traçages intégrés à la BD Traçages

3. Approche fonctionnelle des aquifères basée sur les analyses statistiques

Les analyses statistiques des séries chronologiques telles que les analyses corrélatoires peuvent s'utiliser pour l'approche fonctionnelle des hydrosystèmes (Dorfliger et al., 2010 ; Mangin, 1981) en assimilant ces hydrosystèmes à un filtre (ou boîte noire) qui laisse plus ou moins passer l'information contenue dans un signal d'entrée. Dans le cadre du présent exercice et devant l'importance de l'extension du domaine étudié (ensemble des réservoirs carbonatés du Secondaire du bassin nord-aquitain), l'objectif du travail est double :

- sélectionner les chroniques piézométriques suffisamment étoffées (durée, fréquence de mesure, influence anthropique, ...) pour permettre ces analyses statistiques,
- dégager des comportements différents au sein des entités réservoirs du Secondaire (Jurassique et Crétacé) indépendamment de tout autre contexte hydrogéologique (ouvrage libre/captif, profondeur, nature du recouvrement, recoupement de drains, ...).

Ce travail se focalise dans un premier temps sur le département de la Dordogne puis a été finalement élargi à la plate-forme nord aquitaine (depuis la bordure nord-est vers le centre du bassin) au travers des données disponibles en Charente, Gironde, Lot et Lot-et-Garonne. Le fait de ne pas se limiter strictement à la Dordogne était souhaitable afin de disposer d'un nombre d'ouvrages plus important et d'apporter une réflexion hydrogéologique globale sur les réservoirs carbonatés du Secondaire dans le Bassin aquitain (à l'image de celle, géologique, apportée dans le cadre des travaux de Husson (2015, 2017)). Les résultats sont présentés cependant dans un premier temps sur le territoire de Dordogne (chapitre 3.3) puis dans les autres départements (chapitre 3.4) avec à chaque fois une approche par entité réservoir. Un lien entre les territoires est proposé dans le chapitre 3.5 à partir de l'analyse de plus longues chroniques piézométriques disponibles.

Pour mémoire, les chroniques de l'Éocène ont également été traitées mais les tendances observées à la baisse sur une majorité d'entre eux ont empêché une analyse globale. Ainsi les résultats ne sont pas présentés ici, les chroniques piézométriques devant faire l'objet de traitements plus complets que ceux mis en œuvre cette année.

Ces premières analyses permettront d'axer les travaux qui seront menés dans la suite du projet, notamment le travail de « recontextualisation hydrogéologique » des comportements observés.

3.1. SELECTION DES DONNEES

Les données piézométriques issues d'ADES ont été récupérées sur les 5 départements. 137 ouvrages ont fait l'objet du premier inventaire (Illustration 13). Ne pouvant attribuer les sous-réservoirs (depuis le Bajocien jusqu'au Campanien) sur l'ensemble des ouvrages, il a été décidé de garder dans le cadre de ce travail les distinctions par grandes entités. Ainsi, la réflexion a porté sur les réservoirs de du Crétacé et du Jurassique à ceci près que les ouvrages captant le Lias ont fait l'objet d'une distinction particulière. La distinction chimique de ce sous-réservoir jurassique étant possible (Cabaret et al., 2014), une possibilité de distinction hydrodynamique a été recherchée. Les pas de temps des suivis sont variables sur la période 1964-2016, une majorité d'ouvrage étant suivie de manière continue sur au moins un an.

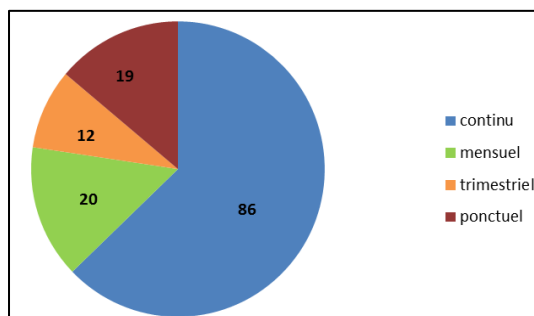


Illustration 13 - Répartition des pas de temps des 137 ouvrages d'ADES captant les aquifères du Jurassique et du Crétacé sur la période 1964-2016

Ces 86 chroniques continues ont ensuite été nettoyées pour les analyses statistiques, les contraintes étant de pouvoir disposer de chroniques longues, continues et non soumises à l'influence de prélèvements. Sur la base de ces critères, 71 chroniques d'ouvrages ont été conservées pour les analyses statistiques (certaines de ces chroniques présentent des « lacunes » qui ont été conservées car le reste de la chronique était exploitable). Un tableau de répartition des mesures est disponible en annexe 1 et fait apparaître la grande hétérogénéité des données. La disponibilité de chroniques continues en Dordogne n'est que récente, principalement depuis 2011, le même constat étant fait en Gironde, Lot et Lot-et-Garonne. Seule la Charente permet de disposer d'un grand nombre de chronique longue continue remontant jusque dans les années 1990, la plus ancienne étant celle débutant en 1984.

La répartition des 71 ouvrages sélectionnés pour l'analyse est reportée sur l'illustration 14. Pour le Jurassique, les suivis concernent principalement les zones d'affleurement ou aux abords, et notamment en Charente ainsi que quelques ouvrages profonds situées sous couverture au sud de l'emprise d'étude (Lot et Lot-et-Garonne). Peu de chroniques sont finalement disponibles et pertinentes pour décrire le fonctionnement du Jurassique dans les Causses du Quercy (dans le Lot) malgré l'importance à l'affleurement de ces formations, quelques suivis de sources étant toutefois disponibles. Pour le Crétacé, la sélection concerne 36 ouvrages, globalement mieux répartis, à la fois à l'affleurement et sous recouvrement tertiaire. La présence d'ouvrages indiqués comme « mélange » ou « inconnu » est ici identifiée car ils appartiennent probablement aux formations du Secondaire sans possibilité actuelle de distinguer clairement l'origine du réservoir. Nous noterons que les affectations de réservoir devront faire l'objet d'un travail spécifique dans la suite du projet afin de ne pas biaiser les interprétations futures.

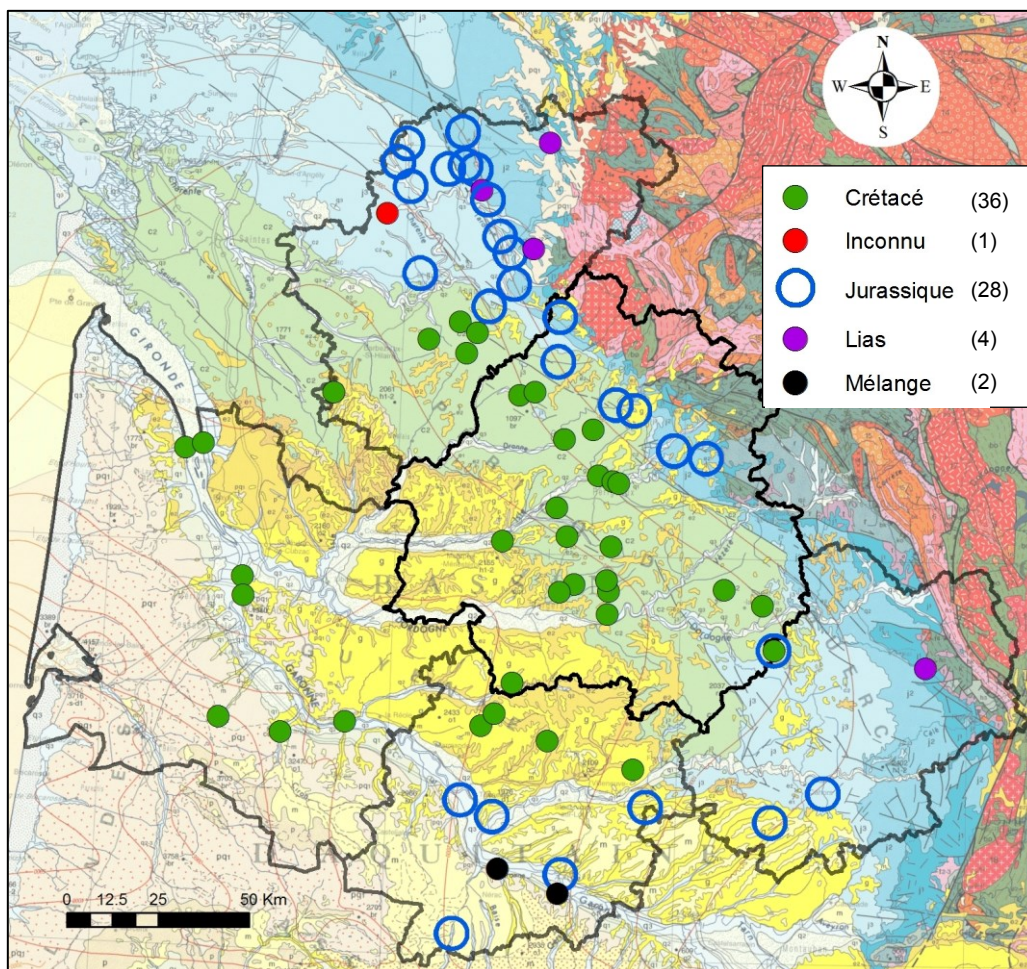


Illustration 14 - Répartition géographique des 71 ouvrages retenus (fond géologique au 1/1 000 000)

3.2. DEMARCHE ET METHODES MISES EN ŒUVRE

L'analyse des données piézométriques a été effectuée sur quatre des cinq départements de la zone d'étude, la Gironde ayant été finalement écartée du fait du peu de données exploitables pour le Jurassique et le Crétacé, avec un intérêt marqué pour celui de la Dordogne. Une attention particulière a été portée à des couples ou triplets de piézomètres situés dans un voisinage proche : ces groupes de piézomètres ont été traités dans un sous-chapitre spécifique (chapitres 3.3.3 et 3.4.3).

Les méthodes mises en œuvre sont essentiellement de trois types :

- une première approche au travers de l'élaboration des statiques sommaires relatives aux chroniques de données disponibles (minimum, médiane, maximum, moyenne, écart-type,...) qui ont principalement pour vocation de présenter leurs caractéristiques ;
- une analyse en composantes principales (ACP), dont le principe vise à identifier les liens existants entre différentes variables, puis de les décorréler en élaborant de nouvelles variables statistiquement indépendantes les unes des autres. Ceci permet de réduire le nombre de variables. Dans le cas présent, il s'agit surtout d'identifier les corrélations existantes entre les chroniques, en les caractérisant notamment deux à deux par un coefficient unique (le coefficient de corrélation). Cette approche pouvant être conduite sur un nombre de chroniques élevé, ceci permet d'obtenir sans *a priori* une vue d'ensemble et homogène des corrélations existantes ;

- une analyse corrélatoire portant sur la réalisation de corrélogrammes simples (CS ou autocorrélogrammes) et de corrélogrammes croisés (CC), ces derniers mettant en relation deux chroniques de données piézométriques. Ces tests sont caractérisés par des paramètres (durée associée à une corrélation de 0.5¹ pour les CS, intensité maximale de corrélation et durée correspondante pour les CC) qui permettent de caractériser les chroniques individuellement ou deux à deux. Sur les chroniques de piézométrie, cette analyse permet de caractériser « l'effet mémoire » de l'aquifère qui traduit la dépendance dans le temps des valeurs piézométriques et qui présente une décroissance plus ou moins rapide. En d'autres termes, « l'effet mémoire » est directement lié à l'inertie du système : il est d'autant plus grand que le filtrage introduit par le système est important.

Préalablement à la mise en œuvre de ces analyses, une recherche visuelle² de tendance - à la hausse ou à la baisse - a été effectuée, les résultats d'une analyse corrélatoire sur une chronique comportant une tendance n'ayant pas d'intérêt (la corrélation observée étant biaisée par la tendance). Les analyses ont été réalisées avec les logiciels XLStats © et TEMPO ©.

Les résultats sont présentés dans les chapitres 3.3 pour le département de la Dordogne et 3.4 pour les autres départements (Lot, Lot-et-Garonne et Charentes).

Pour finir, il convient de garder à l'esprit que les analyses conduites ci-après visent à comparer les chroniques piézométriques entre elles, sans discrimination préalable, autre que la tendance, des diverses composantes qui les établissent. Une influence éventuelle de prélèvements n'est donc pas en particulier discriminée à ce stade de l'analyse.

3.3. TRAITEMENT DES CHRONIQUES DE DORDOGNE

3.3.1. Jurassique

Il y a 6 chroniques de données disponibles relatives aux aquifères jurassiques de Dordogne (Illustration 15).

Ces chroniques ont fait l'objet d'un traitement statistique (Illustration 16), afin de présenter les principales caractéristiques des chroniques, et d'une analyse en composantes principales (Illustration 17 et illustration 18).

¹ La valeur de 0.5 est choisie de façon empirique. Cette valeur doit être i) suffisamment élevée pour que la courbe de l'autocorrélogramme croise la droite d'ordonnée correspondante et ii) la même d'une chronique à une autre, afin de permettre une comparaison relative des séries temporelles traitées.

² Une approche statistique (Mann-Kendall) n'a pas été adoptée compte tenu de la longueur des chroniques piézométriques disponibles (une dizaine d'années le plus souvent, voire moins).

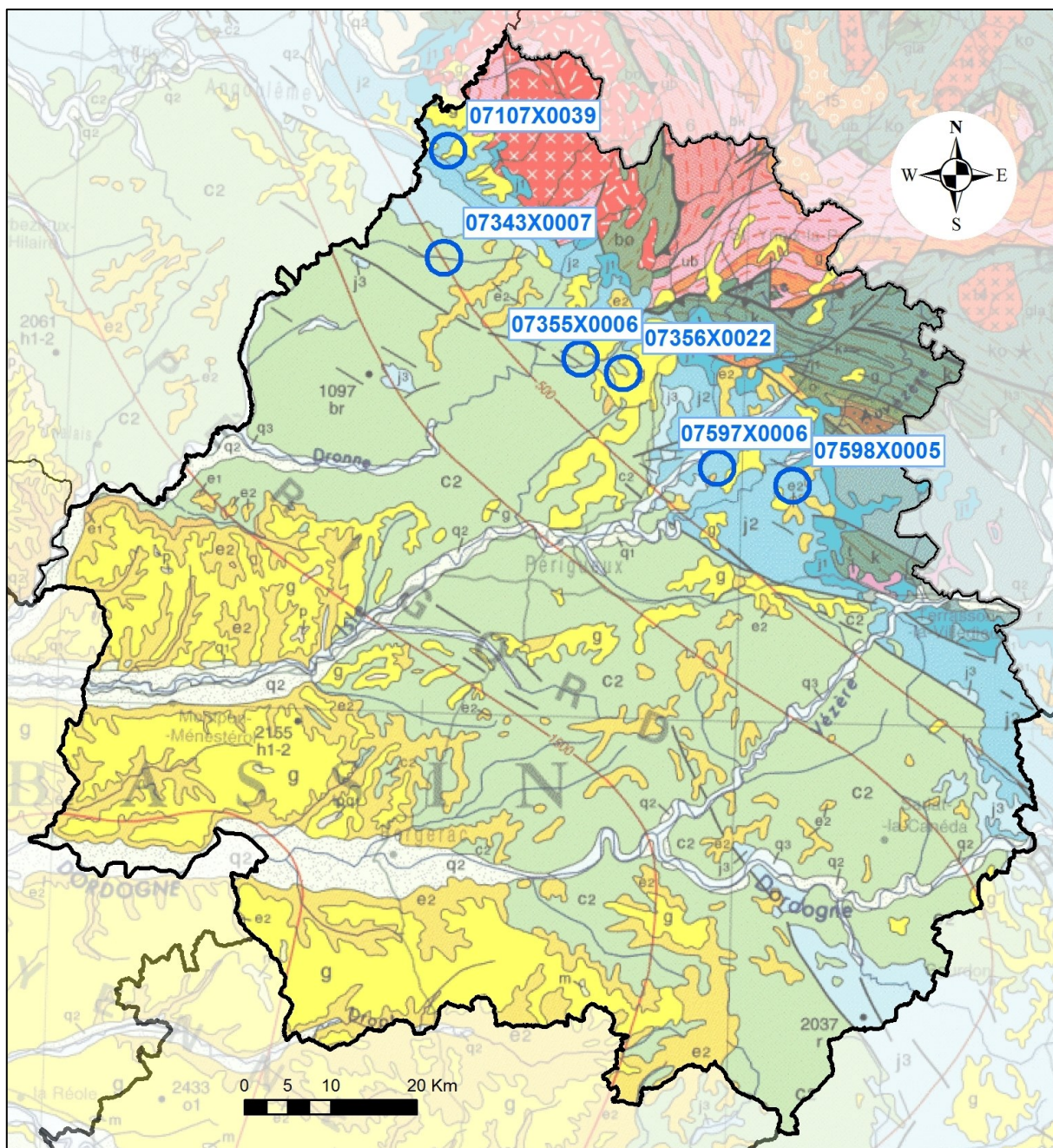


Illustration 15 - Répartition géographique des 6 chroniques piézométriques jurassiques de Dordogne sur (fond géologique au 1/1 000 000)

Echantillon	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
07107X0039/S3	4383	122.27	136.70	124.25	126.35	128.96	126.92	11.02	3.32
07343X0007/F	4383	99.47	119.81	105.12	109.08	112.71	108.99	28.35	5.32
07355X0006/F	4383	116.74	120.52	117.48	118.08	118.71	118.15	0.71	0.84
07356X0022/PZ	4383	134.14	150.62	137.34	139.64	142.98	140.27	14.45	3.80
07597X0006/F	4383	108.08	126.17	109.04	110.22	112.28	111.24	10.26	3.20
07598X0005/A81	4383	150.48	165.62	152.81	155.10	158.18	155.78	13.28	3.64

Illustration 16 - Jurassique de Dordogne - statistiques descriptives des chroniques piézométriques

Variables	07107X0039/S3	07343X0007/F	07355X0006/F	07356X0022/PZ	07597X0006/F	07598X0005/A81
07107X0039/S3	1	0.501	0.918	0.882	0.925	0.915
07343X0007/F	0.501	1	0.728	0.739	0.341	0.590
07355X0006/F	0.918	0.728	1	0.982	0.858	0.963
07356X0022/PZ	0.882	0.739	0.982	1	0.824	0.968
07597X0006/F	0.925	0.341	0.858	0.824	1	0.885
07598X0005/A81	0.915	0.590	0.963	0.968	0.885	1

Illustration 17 - Jurassique de Dordogne - Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles)

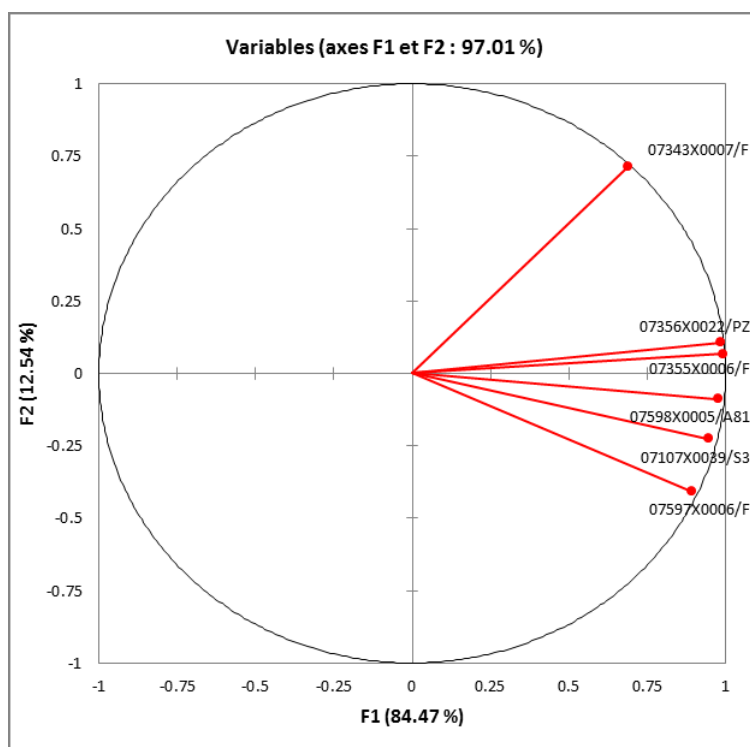


Illustration 18 - Jurassique de Dordogne - Positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP.

Ces résultats montrent dans leur ensemble l'existence de similarités fortes : à l'exception du piézomètre 07343X0007/F, les coefficients de corrélation entre deux chroniques piézométriques de cette famille dépassent systématiquement 0.82. L'illustration 18 montre bien la différenciation statistique faite concernant la chronique 07343X0007/F. On note à l'inverse que les chroniques 07355X0006/F et 07356X0022/PZ sont très similaires, avec un coefficient de corrélation de 0.98.

Ces résultats sont confirmés par la mise en œuvre des analyses corrélatrices (illustration 19, illustration 20, illustration 21 et illustration 22).

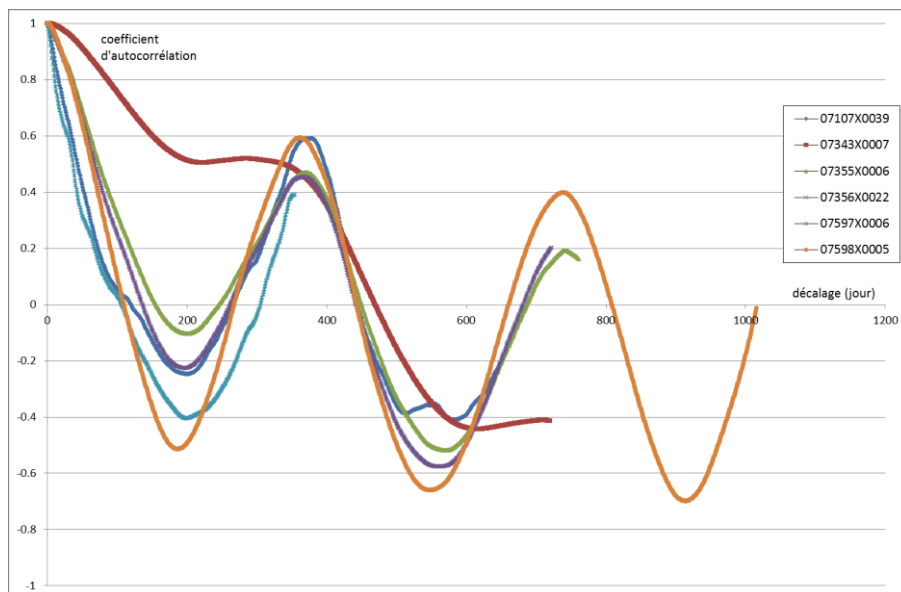


Illustration 19 - Jurassique de Dordogne - autocorrélogrammes

Piézomètre	Date début	Date fin	Autocorrélation à 0.5 (en jr)	Autocorrélation à 0 (en jr)	Tendance
07107X0039	01/09/2011	31/12/2016	44	120	non
07355X0006	29/09/2010	31/12/2016	75	155	non
07356X0022	25/01/2011	31/12/2016	69	136	non
07598X0005	24/03/2005	31/12/2016	64	110	non
07597X0006	01/02/2014	31/12/2016	37	106	non
07343X0007	01/04/2010	02/03/2016	336*	470	non

Illustration 20 - Jurassique de Dordogne - résultats des auto-corrélations³

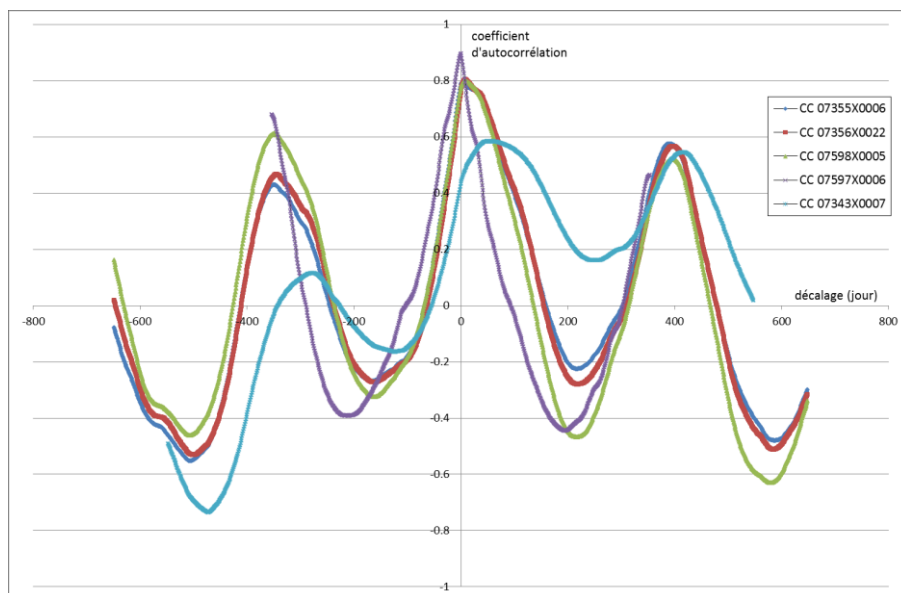


Illustration 21 - Jurassique de Dordogne - corrélogrammes croisés avec le piézomètre 07107X0039

³ La valeur d'auto-corrélation à 0.5 est atteinte après un plateau correspondant à une valeur de 0.51 et durant 150 jours environ. Le choix d'une valeur de référence à 0.55 ou 0.6 aurait donc très notablement réduit la durée obtenue.

CC - max (valeur du pic de corrélation croisée)	07107X0039	07355X0006	07356X0022	07598X0005	07597X0006	07343X0007
07107X0039		0.79	0.80	0.80	0.90	0.58
07355X0006			0.99	0.91	0.86	0.83
07356X0022				0.95	0.87	0.78
07598X0005					0.87	0.73
07597X0006						0.67
07343X0007						
CC - décalage en jour (au pic de corrélation croisée)	07107X0039	07355X0006	07356X0022	07598X0005	07597X0006	07343X0007
07107X0039		3	9	8	0	49
07355X0006			4	1	-2	34
07356X0022				-3	-8	30
07598X0005					-5	395
07597X0006						62
07343X0007						

N.B. : une valeur positive implique que la chronique en sortie du corrélogramme croisé réagit avec un retard (pour le pic de corrélation). Une valeur négative implique l'inverse

Illustration 22 - Jurassique de Dordogne - résultats des corrélogrammes croisés

Ainsi, on observe sur l'illustration 19 le comportement atypique du piézomètre 07343X0007. Les 5 autres corrélogrammes simples sont plus difficiles à distinguer mais il apparaît à la lecture de l'illustration 20 qu'il est potentiellement possible de distinguer deux sous-familles sur la base du décalage temporel correspondant à une autocorrélation d'intensité 0.5 : 07107X0039 et 07597X0006 d'une part (temps de 44 et 37 jours), les trois autres piézomètres d'autre part (pour des temps de 75, 69 et 64 jours).

Cet aspect est confirmé par les résultats des corrélogrammes croisés (Illustration 22). En effet, si les décalages temporels ne permettent pas vraiment de distinguer des sous-ensembles parmi les 5 piézomètres restants, l'intensité maximale de la corrélation incite à proposer le même découpage. Pour le piézomètre 07107X0039, le maximum de corrélation croisé atteint 0.9 avec le piézomètre 07597X0006, tandis qu'il demeure de l'ordre de 0.8 pour les trois autres piézomètres. Les chroniques des piézomètres 07355X0006, 07356X0022 et 07598X0005 sont corrélées avec un maximum allant de 0.91 à 0.99.

Des couleurs ont été utilisées dans le tableau de l'illustration 22 afin de mettre en avant les trois « groupes » qui ressortent de cette analyse (Les graphiques correspondant sont présentés par groupes en annexe 2):

- 07355X0006, 07356X0022 et 07598X0005 ;
- 07107X0039 et 07597X0006 ;
- 07343X0007.

3.3.2. Crétacé

Il y a 19 chroniques de données disponibles relatives aux aquifères crétacés de Dordogne (Illustration 23).

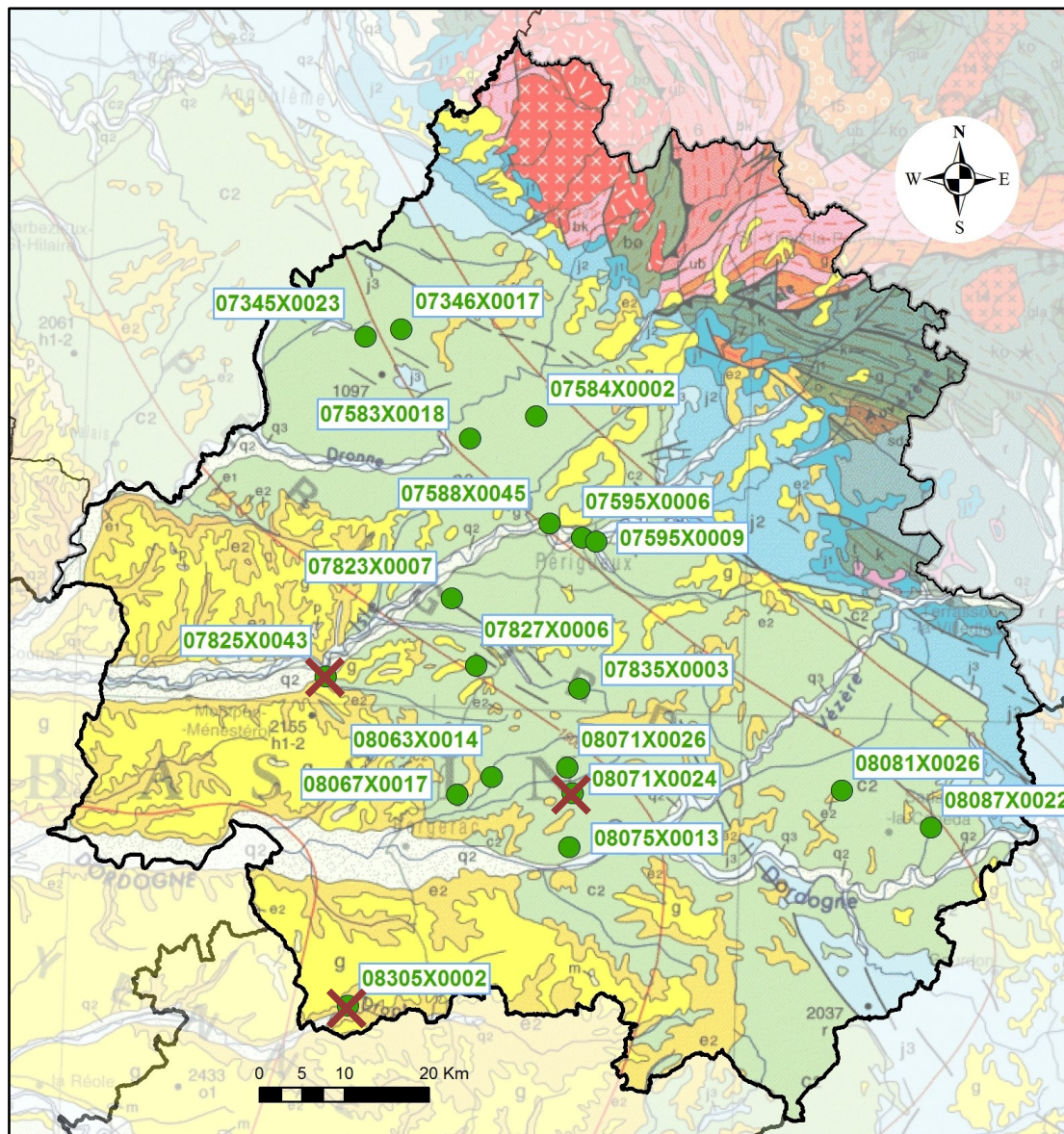


Illustration 23 - Répartition géographique des 19 chroniques piézométriques crétacées de Dordogne (fond géologique au 1/1000000)

Deux de ces chroniques (07825X0043 et 08305X0002) présentent une tendance à la baisse et sont donc écartées de l'analyse, ainsi qu'une troisième susceptible de présenter une tendance à la hausse (08071X0024). Ces trois points sont matérialisés par une croix sur l'illustration 23. Les courbes piézométriques correspondantes sont présentées en annexe 3.

Les tests ont donc été effectués sur 16 chroniques piézométriques : traitement statistique (Illustration 24) et analyse en composantes principales (Illustration 25 et illustration 26) sont restitués ci-après. On notera que la chronique 07588X0045 n'est pas intégrée aux illustration 25 et illustration 26 compte tenu de sa période de recouvrement relativement courte avec les autres chroniques et de l'existence de nombreux « trous » dans celle-ci.

Statistique	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
07345X0023	6940	117.39	124.89	120.00	120.95	121.66	120.89	1.87	1.37
07346X0017	6940	155.70	170.61	157.88	160.12	162.55	160.58	9.38	3.06
07583X0018	6940	96.21	98.13	96.48	96.84	97.10	96.83	0.14	0.38
07584X0002	6940	145.77	170.52	149.78	153.66	158.65	154.51	31.37	5.60
07588X0045	6940	83.02	84.74	83.40	83.58	83.84	83.66	0.12	0.35
07595X0006	6940	85.33	87.25	85.74	86.02	86.32	86.04	0.13	0.36
07595X0009	6940	87.21	89.43	88.13	88.47	88.80	88.44	0.21	0.46
07823X0007	6940	73.74	84.70	76.01	77.46	79.43	77.85	5.51	2.35
07827X0006	6940	175.90	178.00	176.30	176.52	176.77	176.58	0.13	0.36
07835X0003	6940	117.86	137.37	122.53	127.94	135.34	128.52	41.69	6.46
08063X0014	6940	39.62	62.90	49.30	52.25	55.21	52.17	17.00	4.12
08067X0017	6940	90.05	95.23	91.37	92.50	93.73	92.51	1.63	1.28
08071X0026	6940	157.65	164.86	158.87	160.31	161.04	160.13	1.87	1.37
08075X0013	6940	91.27	95.27	91.98	92.39	92.96	92.52	0.59	0.77
08081X0026	6940	147.88	153.21	150.48	152.17	152.54	151.52	2.01	1.42
08087X0022	6940	82.30	85.22	83.06	83.50	84.13	83.59	0.49	0.70

Illustration 24 - Crétacé de Dordogne – statistiques descriptives des chroniques piézométriques utilisées pour l'ACP

Variables	07345X0023	07346X0017	07583X0018	07584X0002	07595X0006	07595X0009	07823X0007	07827X0006	07835X0003	08063X0014	08067X0017	08071X0026	08075X0013	08081X0026	08087X0022
07345X0023		0.939	0.818	0.841	0.849	0.908	0.828	0.893	0.812	0.585	0.536	0.883	0.872	0.697	0.830
07346X0017	0.939		0.754	0.871	0.787	0.839	0.862	0.853	0.708	0.590	0.606	0.807	0.844	0.705	0.767
07583X0018	0.818	0.754		0.626	0.940	0.930	0.630	0.889	0.896	0.413	0.312	0.876	0.796	0.404	0.810
07584X0002	0.841	0.871	0.626		0.626	0.768	0.954	0.783	0.675	0.610	0.761	0.762	0.850	0.790	0.847
07595X0006	0.849	0.787	0.940	0.626		0.946	0.631	0.900	0.885	0.423	0.328	0.884	0.815	0.437	0.816
07595X0009	0.908	0.839	0.930	0.768	0.946		0.784	0.926	0.907	0.539	0.467	0.921	0.866	0.555	0.892
07823X0007	0.828	0.862	0.630	0.954	0.631	0.784		0.762	0.687	0.614	0.785	0.749	0.817	0.720	0.839
07827X0006	0.893	0.853	0.889	0.783	0.900	0.926	0.762		0.853	0.450	0.474	0.918	0.939	0.502	0.883
07835X0003	0.812	0.708	0.896	0.675	0.885	0.907	0.687	0.853		0.418	0.358	0.916	0.810	0.423	0.878
08063X0014	0.585	0.590	0.413	0.610	0.423	0.539	0.614	0.450	0.418		0.383	0.505	0.449	0.590	0.488
08067X0017	0.536	0.606	0.312	0.761	0.328	0.467	0.785	0.474	0.358	0.383		0.426	0.644	0.777	0.674
08071X0026	0.883	0.807	0.876	0.762	0.884	0.921	0.749	0.918	0.916	0.505	0.426		0.880	0.528	0.899
08075X0013	0.872	0.844	0.796	0.850	0.815	0.866	0.817	0.939	0.810	0.449	0.644	0.880		0.627	0.932
08081X0026	0.697	0.705	0.404	0.790	0.437	0.555	0.720	0.502	0.423	0.590	0.777	0.528	0.627		0.651
08087X0022	0.830	0.767	0.810	0.847	0.816	0.892	0.839	0.883	0.878	0.488	0.674	0.899	0.932	0.651	

Illustration 25 - Crétacé de Dordogne - matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles)

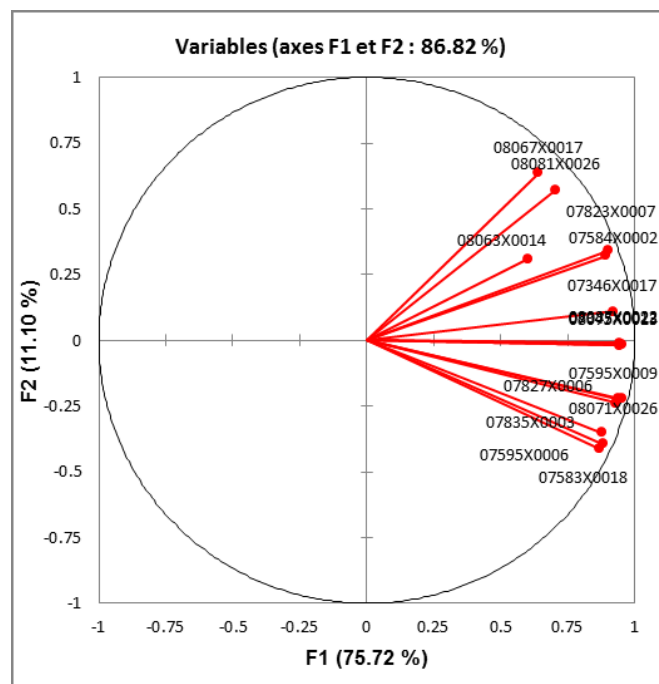


Illustration 26 - Crétacé de Dordogne - positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP

L'illustration 25 met tout d'abord en évidence trois chroniques piézométriques manifestement décorrélées de toutes les autres, avec des coefficients de corrélation toujours inférieurs à 0.8 : il s'agit des piézomètres 08063X0014, 08067X0017 et 08081X0026 (illustration 27). On note aussi leur positionnement éloigné du cercle d'optimum de corrélation sur l'illustration 26.

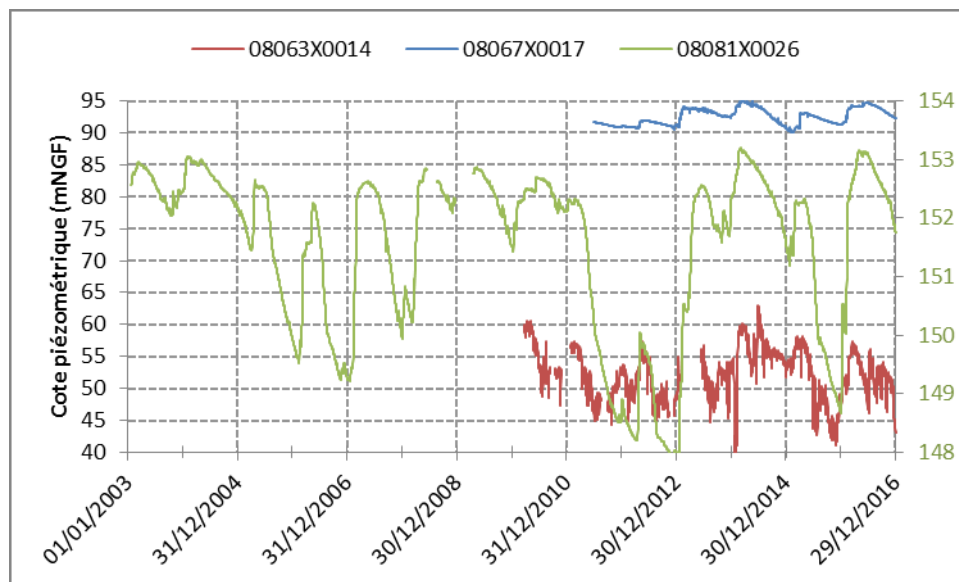


Illustration 27 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques non corrélées

Deux chroniques piézométriques (07584X0002 et 07823X0007, cf. illustration 28) sont nettement corrélées entre elles (coefficient de 0.954), tandis que les corrélations avec les autres chroniques sont bien inférieures (0.871 au mieux). Leur regroupement est de fait bien visible sur l'illustration 26, avec un positionnement proche de l'optimum de corrélation.

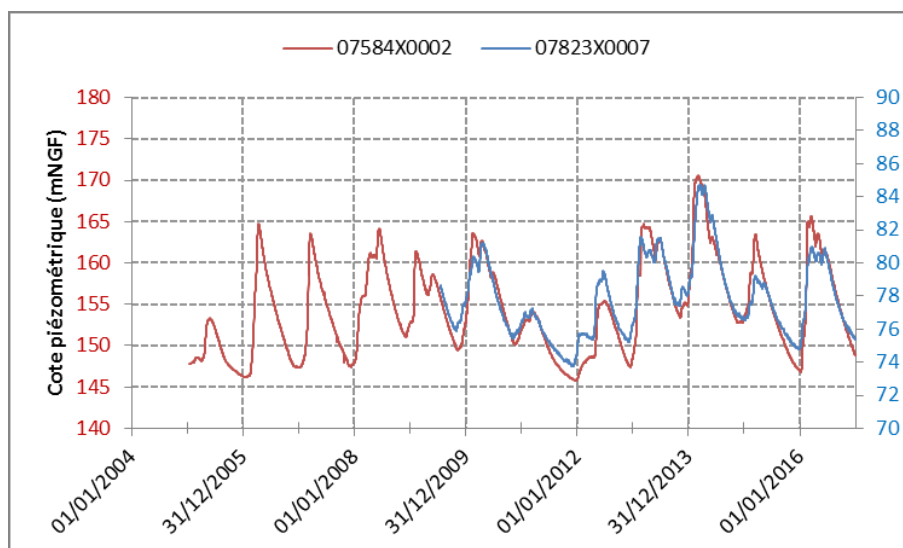


Illustration 28 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07584X0002 et 07823X0007

L'ACP ne permet pas de discriminer d'autres familles de comportement, ce qui conduit maintenant à présenter les résultats des analyses corrélatoires pour poursuivre l'analyse (Illustration 29, illustration 30 et illustration 31 pour les autocorrélogrammes ; Illustration 32 pour les corrélogrammes croisés).

Piézomètre	Date début	Date fin	Autocorrélation à 0.5 (en jr)	Autocorrélation à 0 (en jr)	Tendance
07345X0023	20/01/2006	17/12/2016	63	151	-
07346X0017	03/12/2005	31/12/2016	70	160	-
07583X0018	23/03/2010	31/12/2016	51	105	-
07584X0002	18/01/2005	31/12/2016	70	137	-
07588X0045	18/01/2005	23/11/2010	25	81	-
07595X0006	17/01/2005	31/12/2016	57	110	-
07595X0009	07/10/1998	31/12/2016	66	134	-
07823X0007	20/07/2009	31/12/2016	84	161	-
07825X0043	14/12/2008	31/12/2016	-	-	Baisse
07827X0006	22/01/2003	31/12/2016	44	113	-
07835X0003	28/01/2003	31/12/2016	52	97	-
08063X0014	26/03/2010	31/12/2016	40	152*	-
08067X0017	27/06/2011	31/12/2016	95	199	-
08071X0024	28/06/2011	31/12/2016	-	-	Hausse?
08071X0026	21/01/2003	31/12/2016	52	101	-
08075X0013	26/03/2010	31/12/2016	56	129	-
08081X0026	23/01/2003	31/12/2016	131	444*	-
08087X0022	21/07/2009	31/12/2016	67	119	-
08305X0002	16/10/2010	31/12/2016	-	-	Baisse

Illustration 29 - Crétacé de Dordogne - résultats des auto-corrélations⁴. En jaune, les chroniques non traitées, en gris les chroniques regroupées et en orange les 3 chroniques décorréélées suite à l'analyse par ACP

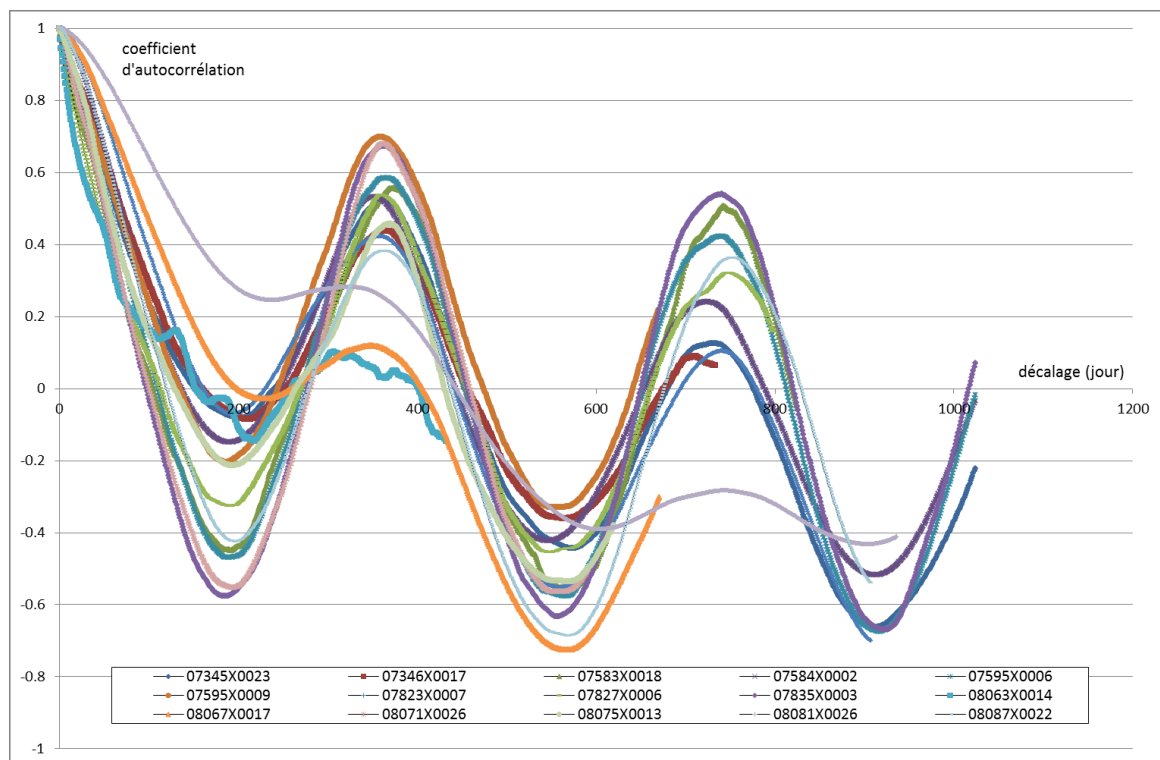


Illustration 30 - Crétacé de Dordogne - autocorrélogrammes

⁴ Les valeurs d'auto-corrélation à 0 marquées d'un astérisque sont atteintes après un plateau, voire une légère remontée de l'auto-corrélation.

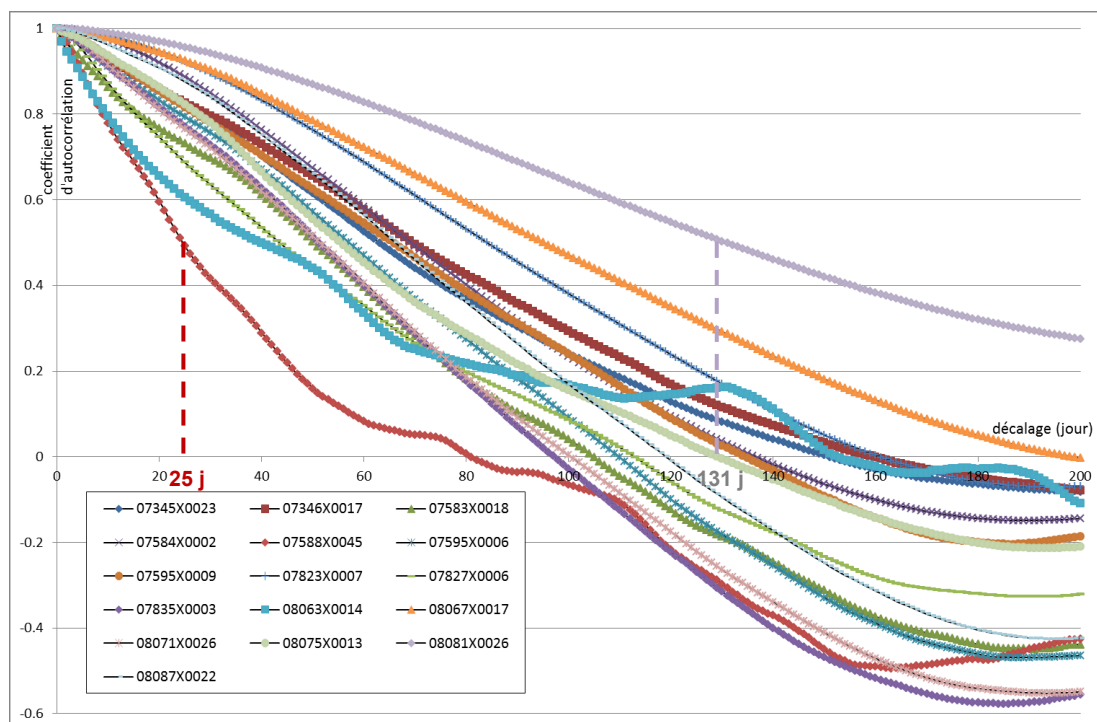


Illustration 31 - Crétacé de Dordogne - autocorrélogrammes - zoom sur les décalages 0-200 jours

CC max (-)	07345X0023	07346X0017	07583X0018	07595X0006	07595X0009	07827X0006	07835X0003	08071X0026	08075X0013	08087X0022
07345X0023		0.932	0.847	0.867	0.903	0.884	0.804	0.860	0.887	0.819
07346X0017			0.779	0.805	0.835	0.834	0.729	0.815	0.854	0.756
07583X0018				0.945	0.925	0.917	0.902	0.897	0.818	0.809
07595X0006					0.918	0.923	0.899	0.890	0.840	0.872
07595X0009						0.899	0.865	0.875	0.866	0.895
07827X0006							0.840	0.905	0.928	0.851
07835X0003								0.906	0.797	0.852
08071X0026									0.884	0.882
08075X0013										0.894
08087X0022										
CC décalage (jr)	07345X0023	07346X0017	07583X0018	07595X0006	07595X0009	07827X0006	07835X0003	08071X0026	08075X0013	08087X0022
07345X0023		0	-5	-5	-2	-1	-2	0	1	3
07346X0017			-4	-5	-1	0	-1	0	1	4
07583X0018				0	1	3	2	5	7	10
07595X0006					2	3	3	5	11	31
07595X0009						0	1	1	4	7
07827X0006							0	0	2	6
07835X0003								2	5	6
08071X0026									2	3
08075X0013										1
08087X0022										

N.B. : une valeur positive implique que la chronique en sortie du corrélogramme croisé réagit avec un retard (pour le pic de corrélation). Une valeur négative implique l'inverse

Illustration 32 - Crétacé de Dordogne - résultats des corrélogrammes croisés

Les autocorrélogrammes confirment tout d'abord le caractère atypique des trois chroniques discriminées lors de l'ACP (08063X0014, 08067X0017 et 08081X0026) : elles présentent une inertie forte mais différenciée pour deux d'entre elles, tandis que la troisième (08063X0014) est à la fois très réactive (40 jours pour une valeur d'autocorrélation de 0.5) et inertiel (152 jours pour une autocorrélation à 0).

On observe ensuite le caractère très réactif de la chronique 07588X0045, qui se traduit par une décroissance plus rapide de l'autocorrélation qui se distingue nettement des autres autocorrélogrammes (pour une valeur d'autocorrélation de 0.5 le décalage est de 25 jours et 80 jours pour une autocorrélation à 0. Le cas de cette chronique est abordé plus en détail au point 3.3.3 du présent chapitre.

Les autres autocorrélogrammes sont assez voisins : la valeur d'autocorrélation à 0.5 est systématiquement comprise entre 44 et 70 jours, tandis qu'elle s'annule pour un décalage compris entre 97 à 160 jours. On note cependant que les deux chroniques 07345X0023 et 07346X0017 sont les plus inertielles, se distinguant des autres notamment par la valeur élevée du décalage temporelle pour les critères d'autocorrélation retenue ($CS=0.5$, ou $CS=0$). L'absence de décalage entre les 2 chroniques et la forte valeur de la corrélation croisée (0.93) amène à rapprocher ces 2 points. Les chroniques piézométriques de ces 2 points sont présentées en illustration 33.

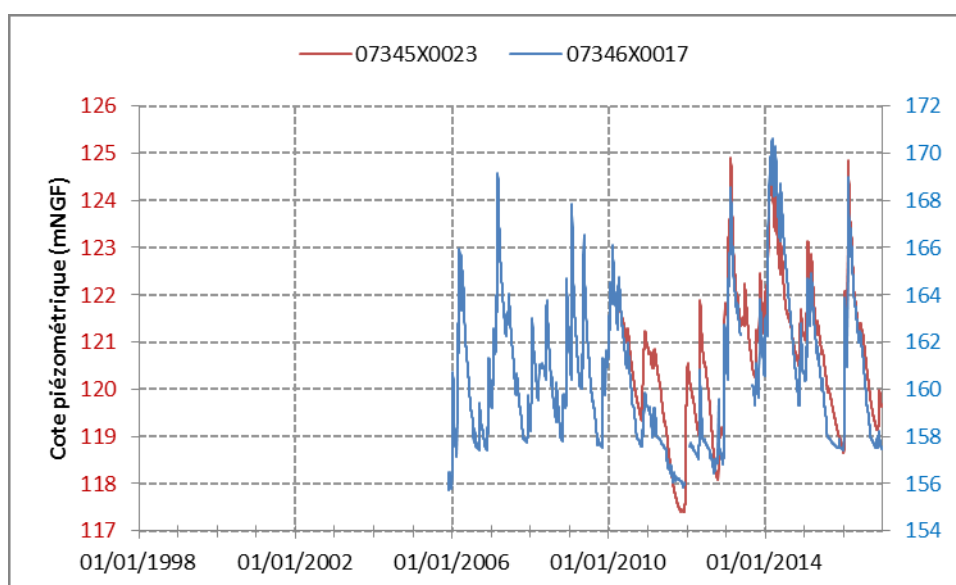


Illustration 33 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07345X0023 et 07346X0017

Enfin, l'observation de l'illustration 32 laisse envisager l'existence d'un ensemble de 5 chroniques présentant des caractéristiques similaires : ce sont celles correspondant aux ouvrages 07583X0018 à 08071X0026, à l'exception de la chronique 07835X0003. Les maxima de corrélation sont en effet compris entre 0.890 et 0.945, à l'exception du maximum de corrélation de 0.875 entre les chroniques 07595X0009 et 08071X0026. On note que les décalages temporels des maxima sont très faibles et homogènes puisqu'ils sont tous compris entre 0 et 5 jours. Ces chroniques sont présentées en illustration 34.

La chronique 07835X0003 (Illustration 35) n'a pas été intégrée à ce groupe - malgré de fortes corrélations avec d'autres piézomètres (07583X0018, 07595X0006 et 08071X0026) - compte tenu du niveau seuil existant à une cote altimétrique de 135 mNGF environ. Ce niveau seuil n'est pas retrouvé de façon aussi marquée sur les autres chroniques, ce qui a conduit à individualiser sa dynamique.

Ce regroupement conduit à isoler voire à regrouper les deux dernières chroniques (08075X0013 et 08087X0022). Elles sont caractérisées par une inertie plus importante et le décalage temporel de leur maximum de corrélation est très faible (1 jour), ce qui plaide pour un comportement proche. Les deux chroniques sont présentées en illustration 36.

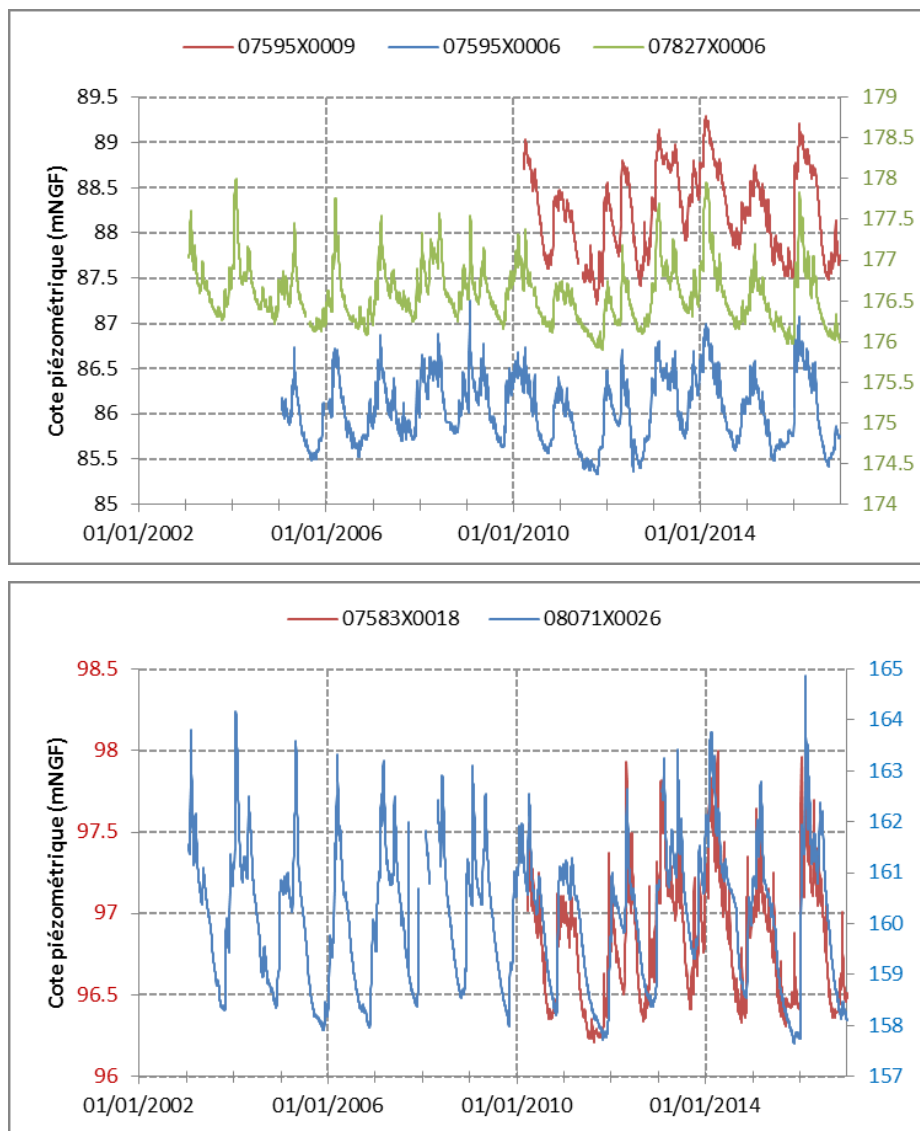


Illustration 34 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 07583X0018, 07595X0006, 07595X0009, 07827X0006 et 08071X0026

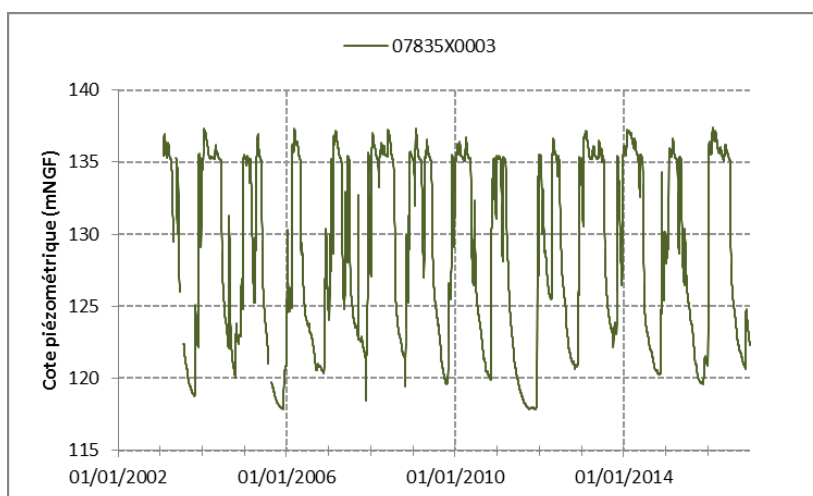


Illustration 35 - Crétacé de Dordogne - chronique piézométrique 07835X0003

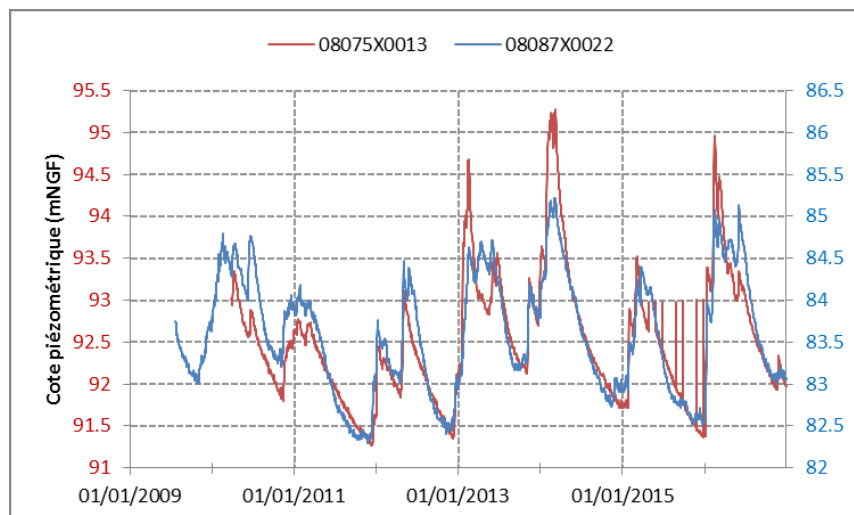


Illustration 36 - Crétacé de Dordogne - chroniques piézométriques 08075X0013 et 08087X0022

En synthèse de cette partie, on retiendra que les chroniques piézométriques suivant les aquifères crétacés de Dordogne ont été regroupées de la façon suivante :

- 2 chroniques (07825X0043 et 08305X0002) présentent une tendance pluriannuelle à la baisse et 1 chronique (08071X0024) est susceptible de présenter une tendance à la hausse ;
- 3 chroniques ont un comportement non corrélables à une autre chronique (08063X0014, 08067X0017 et 08081X0026) ;
- 1 chronique (07588X0045) comporte de trop nombreuses lacunes de données et dispose d'une période de recouvrement trop courte avec les autres chroniques, ce qui limite les possibilités d'analyses croisées ;
- 1 chronique (07835X0003) comportant un niveau seuil (niveau de débordement ?) à une cote altimétrique de 136 mNGF environ. Ce type de niveau seuil n'est pas retrouvé de façon aussi marquée sur d'autres chroniques piézométriques ;
- les autres chroniques ont été regroupées en 4 ensembles :
 - 2 chroniques : 07345X0023 et 07346X0017 ;
 - 5 chroniques : 07583X0018, 07595X0006, 07595X0009, 07827X0006 et 08071X0026 ;
 - 2 chroniques : 07584X0002 et 07823X0007 ;
 - 2 chroniques : 08075X0013 et 08087X0022.

3.3.3. Forages géographiquement proches

Une attention particulière a été portée à un doublet et un triplet de piézomètres situés dans un voisinage immédiat (Illustration 37) afin d'évaluer si des comportements différents pouvaient être observables.

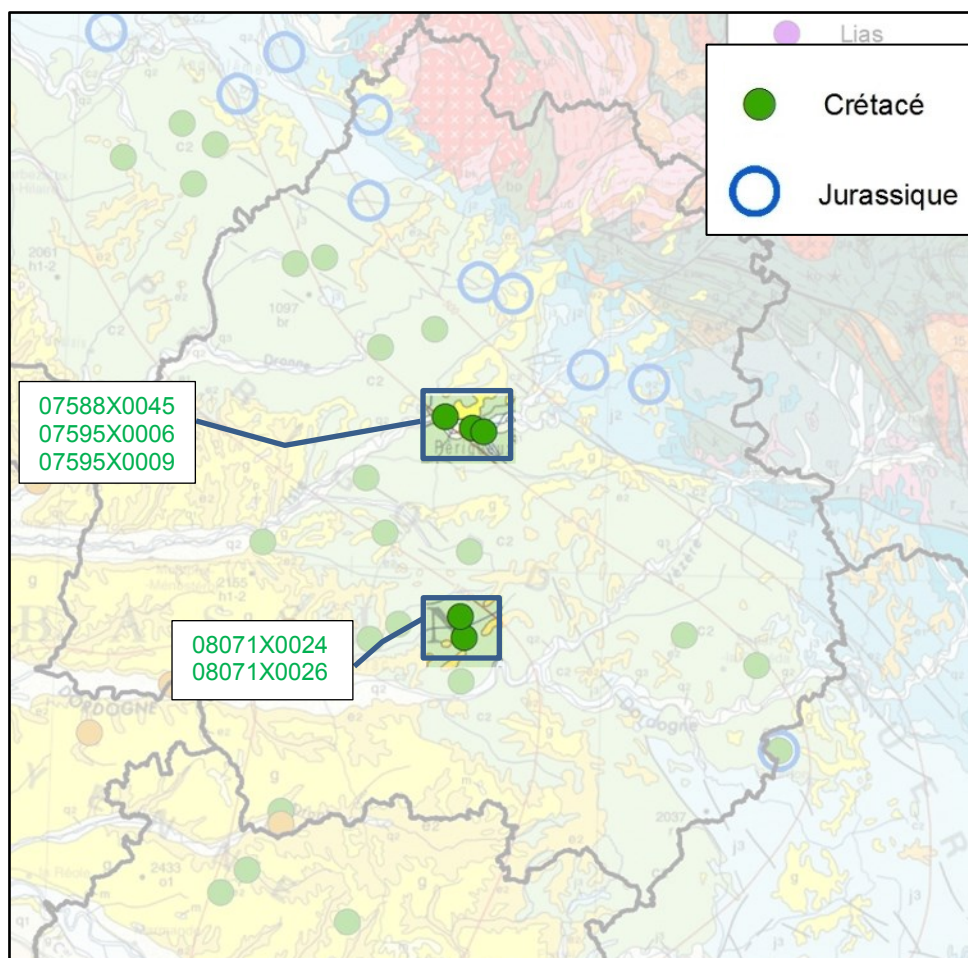


Illustration 37 - Répartition géographique des doublets et triplets de piézomètres voisins en Dordogne

Les piézomètres 08071X0024 et 08071X0026 captent un aquifère crétacé à proximité l'un de l'autre à Bergerac. La chronique 08071X0024 est trop courte pour que l'on puisse capturer une tendance à long terme car la dynamique d'évolution suggère un aquifère très inertiel. (la tendance à la hausse observable ici n'est pas jugée significative). Par ailleurs, la chronique montre qu'en 2011 et 2012, la piézométrie mesurée en été témoigne vraisemblablement de l'existence de pompages estivaux, l'effet des pompages n'étant plus visible à partir de 2012. Au regard de ces éléments et de l'inertie très différente entre les deux ouvrages (illustration 38), des analyses corrélatoires complémentaires ne seront pas mises en œuvre sur ces chroniques de données.

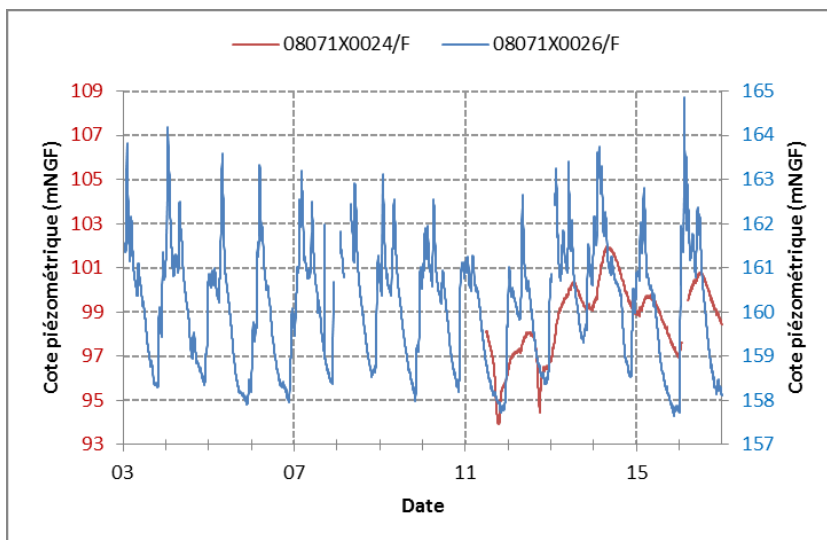


Illustration 38 - Piézométries des forages 08071X0024 et 08071X0026

Enfin, les forages 07588X0045, 07595X0006 et 07595X0009 sont situés au voisinage de Périgueux, dans la vallée de l'Isle. Les chroniques piézométriques (illustration 39) concernent toutes un aquifère du Crétacé. Les auto-corrélogrammes des piézomètres 07595X0006 et 07595X0009 sont assez proches, tandis que celui du dernier ouvrage met en évidence l'existence d'une inertie plus faible (illustration 40, une valeur d'auto-corrélation de 0.5 correspondant ainsi à 25 jours pour ce dernier piézomètre).

Il peut être intéressant de noter le rapprochement des auto-corrélogrammes des piézomètres 07595X0006 et 07588X0045 sur des décalages en temps plus importants (autour de 100 à 120 jours), tandis que ceux des piézomètres 07595X0006 et 07595X0009 s'éloignent pour les mêmes décalages. En d'autres termes, les comportements des piézomètres 07595X0006 et 07595X0009 sont proches à court terme (< 2 mois) mais différent à 3-4 mois, tandis que ceux des piézomètres 07595X0006 et 07588X0045 diffèrent à court terme et se rapprochent à moyen terme (3 à 4 mois). Ces aspects seront à confirmer à partir d'une approche plus détaillée intégrant le contexte hydrogéologique des différents ouvrages. Ce travail de contextualisation sera proposé en année 2 de la convention.

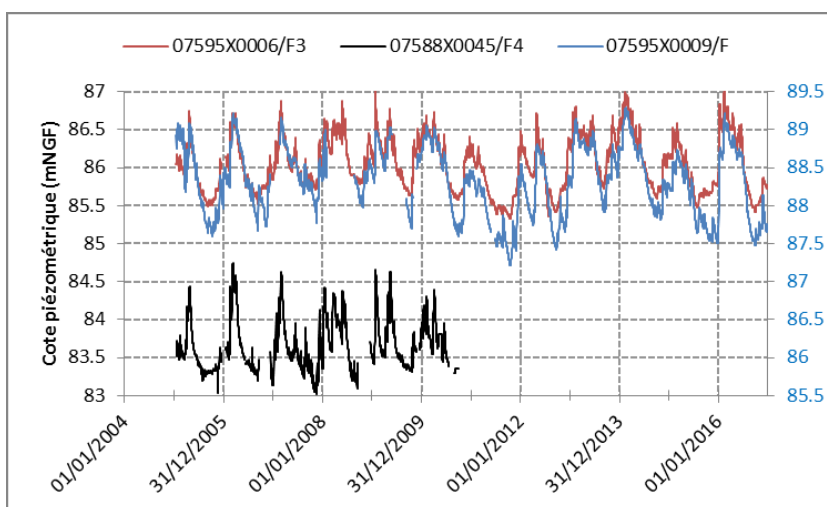


Illustration 39 - Chroniques piézométriques de l'aquifère crétacé en vallée de l'Isle

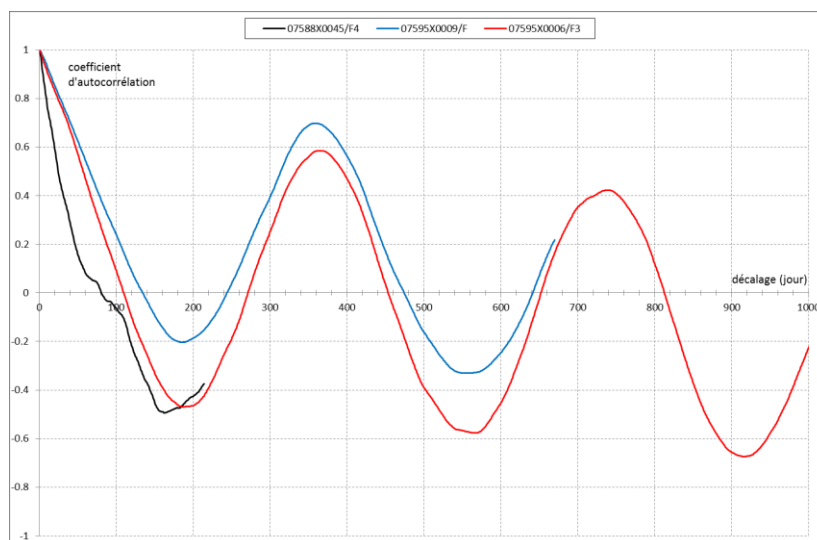


Illustration 40 - Auto-corrélogrammes de chroniques piézométriques de la vallée de l'Isle

Les paramètres déduits des corrélogrammes croisés (Illustration 41) confirment l'existence d'une bonne corrélation entre les piézomètres 07595X0006 et 07595X0009 d'une part et les piézomètres 07595X0006 et 07588X0045 d'autre part. Les piézomètres 07595X0009 et 07588X0045 sont moins corrélés entre eux.

Max (-)	07588X0045	07595X0006	07595X0009
07588X0045		0.908	0.800
07595X0006			0.918
07595X0009			
décalage (jr)	07588X0045	07595X0006	07595X0009
07588X0045		-1	2
07595X0006			2
07595X0009			

N.B. : une valeur positive implique que la chronique en sortie du corrélogramme croisé réagit avec un retard (pour le pic de corrélation). Une valeur négative implique l'inverse

Illustration 41 - Triplet de la vallée de l'Isle - résultats des corrélogrammes croisés

3.4. TRAITEMENT DES CHRONIQUES DES AUTRES DEPARTEMENTS

Les traitements des chroniques des départements voisins de la Dordogne sont présentés ensemble dans la suite par soucis de simplification et de rapidité de mise en œuvre des analyses corrélatrices.

Dans le département du Lot, aucune des 5 chroniques piézométriques disponibles ne paraît présenter de tendance bien définie. Elles ont donc toutes été prises en compte. Quatre chroniques concernent le Jurassique (dont une le Lias), tandis que la dernière est relative au Crétacé (Illustration 42).

Les 11 chroniques piézométriques identifiées dans le Lot-et-Garonne (Illustration 42) présentent pour 9 d'entre elles une tendance à la baisse (Annexe 4), tandis que la période d'analyse demeure nettement insuffisante pour les deux dernières (du 12/11/2015 au 31/12/2016). Aucune de ces chroniques n'a donc été prise en compte par la suite.

Dans le département de la Charente, 23 chroniques piézométriques ont été identifiées. 11 chroniques ont été écartées en raison soit de leur faible longueur, de lacunes importantes, de tendances observables ou encore de l'influence des prélèvements au cours de la chronique. Les 12 chroniques retenues (Illustration 42) sont relatives au Jurassique (8, dont 1 dans le Lias) et au Crétacé (4). Les résultats sont présentés par ère géologique, indépendamment des limites départementales.

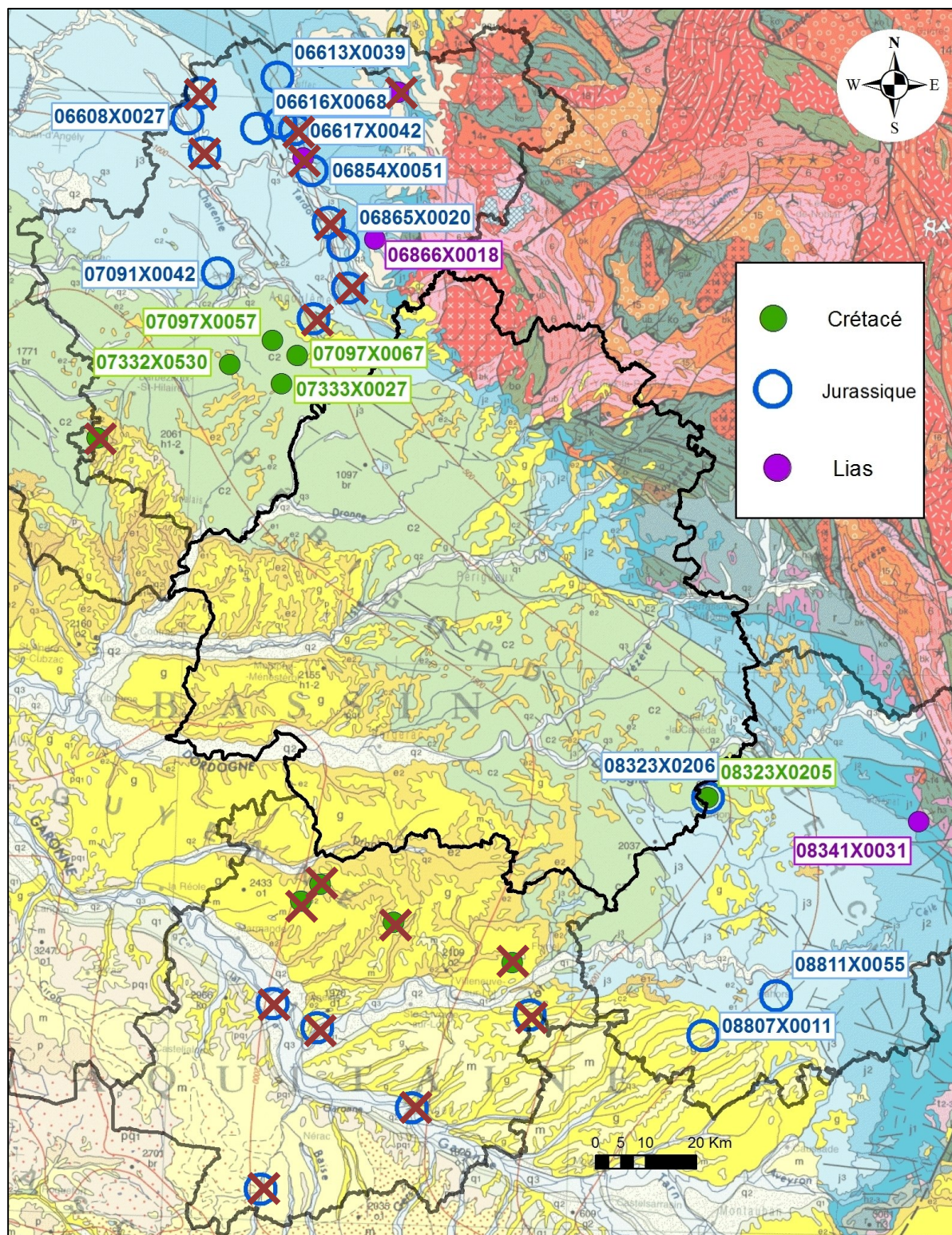


Illustration 42 - Répartition géographique des chroniques piézométriques jurassiques et crétacées de Charente, du Lot et du lot-et-Garonne (Les croix indiquent les ouvrages n'ayant pas été retenus pour les analyses)

3.4.1. Jurassique

Douze chroniques piézométriques sont relatives au Jurassique dans les départements du Lot et de Charente, dont 2 portent spécifiquement sur le Lias. Ces chroniques ont fait l'objet d'un traitement statistique (Illustration 43) afin de présenter les principales caractéristiques des chroniques et d'une analyse en composantes principales (Illustration 44).

	Statistique	Nb. Observ.	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
Lot	08323X0206	4749	83.94	92.43	88.88	90.29	91.07	89.72	3.49	1.87
	08341X0031	4749	298.21	311.44	299.12	300.61	304.53	301.98	11.64	3.41
	08807X0011	4749	186.11	198.42	191.25	193.61	195.57	193.21	7.81	2.79
	08811X0055	4749	111.56	116.82	111.79	112.15	112.87	112.42	0.64	0.80
Charente	06608X0027	4749	74.58	81.88	76.95	77.92	78.73	77.86	1.52	1.23
	06613X0039	4749	87.39	97.06	88.08	89.37	93.35	90.69	8.96	2.99
	06616X0068	4749	68.29	70.98	68.97	69.53	69.84	69.41	0.33	0.57
	06617X0042	4749	67.68	86.98	68.85	70.99	72.52	71.35	9.52	3.09
	06854X0051	4749	63.92	76.06	65.63	66.98	68.58	67.25	4.20	2.05
	06865X0020	4749	46.14	78.38	55.69	60.81	65.50	60.43	42.92	6.55
	06866X0018	4749	98.39	119.56	110.08	112.74	115.17	112.20	16.20	4.02
	07091X0042	4749	41.76	43.94	42.80	42.97	43.12	42.97	0.08	0.28

Illustration 43 - Jurassique du Lot et de Charente * statistiques descriptives des chroniques piézométriques

Variables	08323X0206	08341X0031	08807X0011	08811X0055	06608X0027	06613X0039	06616X0068	06617X0042	06854X0051	06865X0020	06866X0018	07091X0042
08323X0206		0.740	0.878	0.434	0.379	0.494	0.660	0.287	0.538	0.642	0.483	0.272
08341X0031	0.740		0.682	0.685	0.586	0.644	0.671	0.481	0.725	0.689	0.691	0.504
08807X0011	0.878	0.682		0.268	0.166	0.298	0.446	0.062	0.337	0.423	0.369	0.045
08811X0055	0.434	0.685	0.268		0.737	0.698	0.671	0.731	0.777	0.650	0.607	0.766
06608X0027	0.379	0.586	0.166	0.737		0.830	0.813	0.891	0.854	0.780	0.656	0.887
06613X0039	0.494	0.644	0.298	0.698	0.830		0.769	0.772	0.883	0.852	0.692	0.735
06616X0068	0.660	0.671	0.446	0.671	0.813	0.769		0.786	0.841	0.902	0.779	0.775
06617X0042	0.287	0.481	0.062	0.731	0.891	0.772	0.786		0.862	0.752	0.558	0.892
06854X0051	0.538	0.725	0.337	0.777	0.854	0.883	0.841	0.862		0.898	0.750	0.821
06865X0020	0.642	0.689	0.423	0.650	0.780	0.852	0.902	0.752	0.898		0.798	0.736
06866X0018	0.483	0.691	0.369	0.607	0.656	0.692	0.779	0.558	0.750	0.798		0.665
07091X0042	0.272	0.504	0.045	0.766	0.887	0.735	0.775	0.892	0.821	0.736	0.665	

Illustration 44 - Jurassique du Lot et de Charente – Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs : en vert, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles) - Carré rouge (chroniques du Lot) et Carré bleu (chroniques de Charente)

La matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP (Illustration 44) met en évidence :

- trois chroniques piézométriques manifestement décorréliées de toutes les autres, avec des coefficients de corrélation toujours inférieurs à 0.8. Il s'agit des piézomètres 08341X0031, 08811X0055 situés dans le département du Lot et du piézomètre 06866X0018 du département de la Charente pour lequel finalement les évolutions mesurées apparaissent très fortement influencées par des pompes saisonniers (Illustration 45) ;
- deux chroniques piézométriques très discriminées des autres chroniques analysées et présentant un comportement assez similaire. Ces chroniques correspondent aux ouvrages 08233X0206 et 08807X0011 situés toutes les deux dans le département du Lot (Illustration 46). On notera par ailleurs que ces chroniques montrent un comportement plus inertiel que celles de Dordogne.

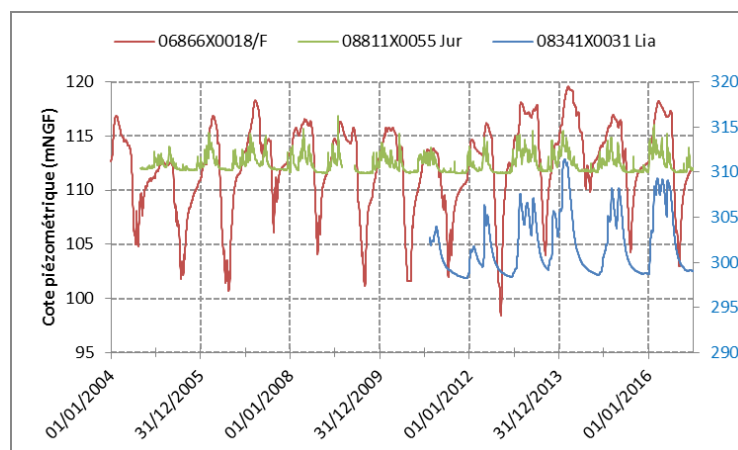


Illustration 45 - Jurassique du Lot et de Charente - chroniques piézométriques non corrélées

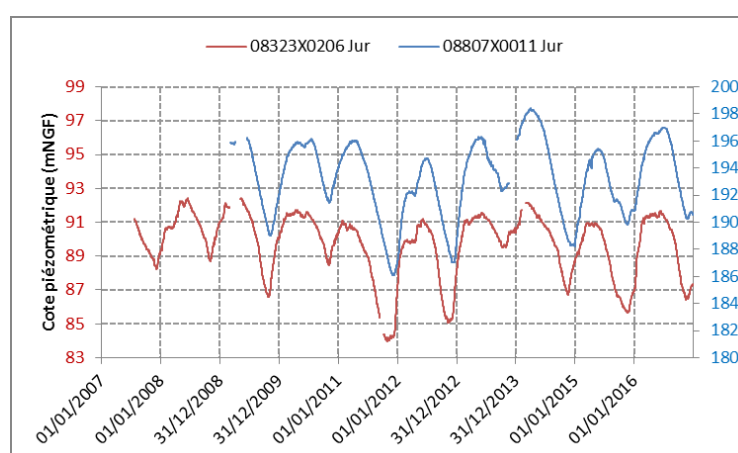


Illustration 46 - Jurassique du Lot et de Charente - séries piézométriques 08233X0206 et 08807X0011

Cette constatation montre qu'il existe des comportements hydrodynamiques distincts entre les aquifères jurassiques suivis du Lot et de Charente : les 4 chroniques disponibles dans le Lot étant soit discriminées, soit corrélées entre elles. On gardera à l'esprit que ce constat pourra être ajusté à la lumière de nouvelles chroniques ou de l'analyse plus détaillée des forçages intervenant sur chacune d'entre elles.

Des analyses corrélatoires ont été conduites sur les 7 autres chroniques piézométriques non différenciées à ce stade, celles-ci ayant été appliquées sur une période récente (01/01/2004-31/12/2016). Les résultats sont restitués en illustration 47, illustration 48 et illustration 49 pour les autocorrélogrammes et en illustration 50 pour les corrélogrammes croisés.

Piézomètre	Département	Géologie	Date début	Date fin	Autocorrélation à 0.5 (en jr)	Autocorrélation à 0 (en jr)	Tendance
08323X0206	Lot	Jurassique	24/07/2007	31/12/2016	61	112	-
08341X0031	Lot	Lias	11/02/2011	31/12/2016	58	106	-
08807X0011	Lot	Jurassique	07/03/2009	31/12/2016	70	113	-
08811X0055	Lot	Jurassique	01/09/2004	31/12/2016	26	91	-
06608X0027/AC-3	Charente	Jurassique	21/07/1993	31/12/2016	49	101	-
06613X0039/S	Charente	Jurassique	15/07/1992	21/12/2016	61	107	-
06616X0068/PIEZO	Charente	Jurassique	06/07/1995	31/12/2016	57	102	-
06617X0042/S	Charente	Jurassique	15/06/1993	31/12/2016	33	108	-
06854X0051/S	Charente	Jurassique	08/07/1992	31/12/2016	60	136	-
06865X0020/S	Charente	Jurassique	24/01/1984	31/12/2016	65	144	-
06866X0018/F	Charente	Lias	13/11/2003	26/12/2016	49	97	-
07091X0042/P	Charente	Jurassique	22/02/1995	31/12/2016	43	93	-

Illustration 47 - Jurassique du Lot et de Charente - résultats des auto-corrélations. Les chroniques regroupées sont en gris et les chroniques différenciées sont en italique

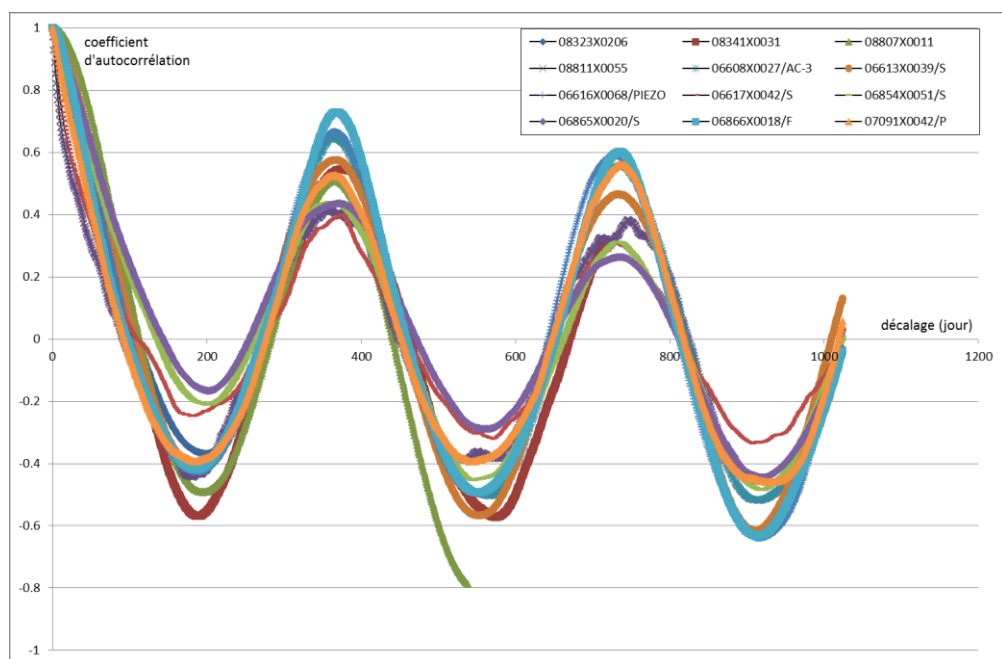


Illustration 48 - Jurassique du Lot et de Charente - Autocorrélogrammes

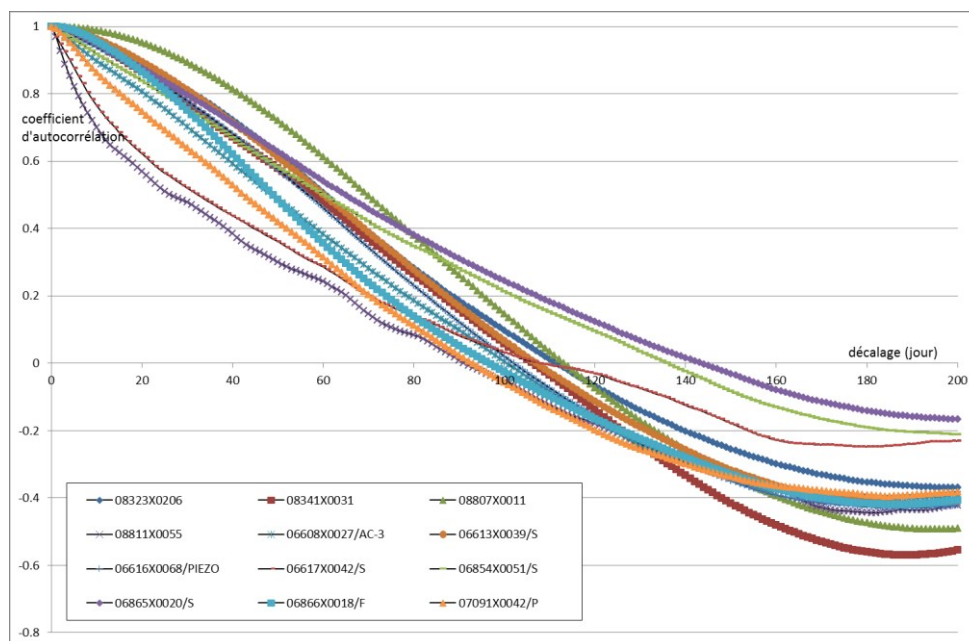


Illustration 49 - Jurassique du Lot et de Charente - Autocorrélogrammes - zoom sur les décalages 0-200 jours

CC - max (-)	06608X0027/AC-3	06613X0039/S	06616X0068/PIEZO	06617X0042/S	06854X0051/S	06865X0020/S	07091X0042/P
06608X0027/AC-3		0.831	0.860	0.878	0.855	0.818	0.868
06613X0039/S			0.759	0.802	0.877	0.839	0.728
06616X0068/PIEZO				0.774	0.821	0.871	0.757
06617X0042/S					0.884	0.779	0.856
06854X0051/S						0.877	0.801
06865X0020/S							0.751
07091X0042/P							
CC - décalage (jr)	06608X0027/AC-3	06613X0039/S	06616X0068/PIEZO	06617X0042/S	06854X0051/S	06865X0020/S	07091X0042/P
06608X0027/AC-3		7	1	0	1	4	-1
06613X0039/S			-1	-13	-3	0	-15
06616X0068/PIEZO				-1	0	2	-3
06617X0042/S					1	5	-1
06854X0051/S						2	-2
06865X0020/S							-6
07091X0042/P							

N.B. : une valeur positive implique que la chronique en sortie du corrélogramme croisé réagit avec un retard (pour le pic de corrélation). Une valeur négative implique l'inverse

Illustration 50 - Jurassique du Lot et de Charente - résultats des corrélogrammes croisés

Les autocorrélogrammes différencient peu les 7 chroniques restantes : la valeur d'autocorrélation à 0.5 est systématiquement comprise entre 33 et 65 jours, tandis qu'elle s'annule pour un décalage de 93 à 144 jours. On peut cependant avancer que deux paires d'autocorrélogrammes se distinguent :

- 06617X0042 et 08811X0055 (Lot) sont les plus réactives, l'autocorrélation chutant rapidement pour s'annuler à des valeurs similaires aux autres autocorrélogrammes. Le coefficient de corrélation entre ces chroniques demeure cependant faible (0.731, cf. illustration 44).
- 06854X0051 et 06865X0020 présentent une autocorrélation parmi les plus fortes à court terme et les plus fortes à moyen terme : celle-ci s'annule ainsi pour des décalages respectifs de 136 et 144 jours, bien au-delà des valeurs observées pour les autres autocorrélogrammes (93 à 108 jours).

La mise en œuvre des corrélogrammes croisés montre d'assez faibles corrélations entre les chroniques, les maxima se situant entre 0.728 et 0.884. Ces résultats ne conduisent pas à proposer des regroupements de comportements hydrodynamiques.

3.4.2. Crétacé

Cinq chroniques piézométriques permettent de décrire les aquifères du Crétacé dans les départements du Lot (1) et de Charente (4). Ces chroniques ont fait l'objet d'un traitement statistique (Illustration 51) afin de présenter les principales caractéristiques des chroniques et d'une analyse en composantes principales (Illustration 52 et illustration 53).

Statistique	Nb. d'observations	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Variance (n-1)	Ecart-type (n-1)
07097X0057/3	9132	91.36	94.98	91.75	91.95	92.20	92.01	0.14	0.38
07097X0067/F	9132	135.18	152.37	141.42	142.76	144.40	143.13	7.97	2.82
07332X0530/F2	9132	80.16	121.82	90.67	98.86	107.84	99.71	104.95	10.24
07333X0027/F	9132	104.63	129.39	112.43	116.29	120.66	116.53	27.11	5.21
08323X0205/F	9132	99.12	100.24	99.60	99.76	100.00	99.75	0.08	0.28

Illustration 51 - Crétacé du Lot et de Charente - statistiques descriptives des chroniques piézométriques

Variables	07097X0057/3	07097X0067/F	07332X0530/F2	07333X0027/F	08323X0205/F
07097X0057/3		0.803	0.701	0.756	0.188
07097X0067/F	0.803		0.702	0.863	0.141
07332X0530/F2	0.701	0.702		0.799	0.339
07333X0027/F	0.756	0.863	0.799		0.265
08323X0205/F	0.188	0.141	0.339	0.265	

Illustration 52 - Crétacé du Lot et de Charente - Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP

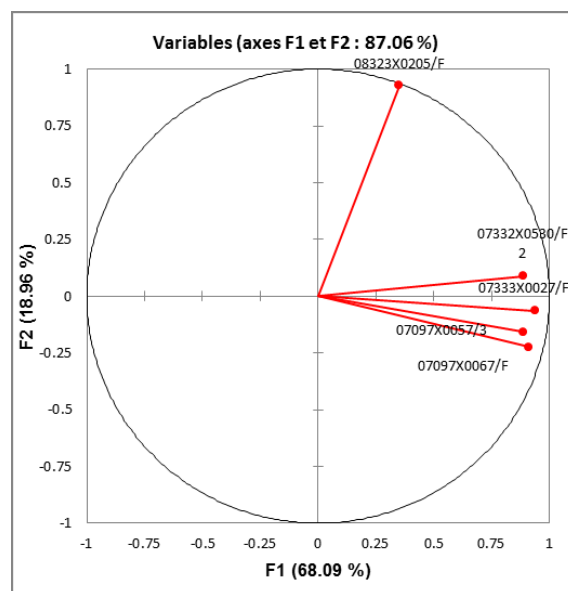


Illustration 53 - Crétacé du Lot et de Charente - Positionnement des variables piézométriques dans un espace vectoriel constitué via l'ACP

De l'analyse ACP, on montre que la chronique piézométrique crétacée du département du Lot (08323X0205) est très fortement décorrélée des chroniques crétacées du département de Charente. On note aussi qu'en Charente, les chroniques piézométriques disponibles présentent entre elles une corrélation limitée, la plus forte valeur atteinte étant de 0.863.

Les analyses corrélatoires simples confirment sans surprise la très nette différenciation Lot / Charente (Illustration 54 et illustration 55). Les corrélations croisées, conduites uniquement sur les chroniques de Charente, ne font pas apparaître de corrélations fortes (Illustration 56), ce qui est un résultat cohérent avec l'ACP. La meilleure corrélation (0.886) est obtenue pour les chroniques 07097X0067 et 07333X0027 (Illustration 57) ; pour ces chroniques, les écarts les plus importants apparaissent en période de basses eaux, ce qui pourrait s'expliquer par la mise en œuvre de pompages estivaux dans leur voisinage. Des chroniques piézométriques affranchies de l'impact de ces prélèvements pourraient donc présenter une corrélation plus forte. Les autres chroniques piézométriques sont présentées sur cette même illustration.

Piézomètre	Département	Géologie	Date début	Date fin	Autocorrélation à 0.5 (en jr)	Autocorrélation à 0 (en jr)
07097X0057/3	Charente	Crétacé	01/07/1992	31/12/2016	37	122
07097X0067/F	Charente	Crétacé	09/04/1993	05/12/2016	39	112
07332X0530/F2	Charente	Crétacé	09/04/1993	31/12/2016	70	123
07333X0027/F	Charente	Crétacé	04/06/1993	31/12/2016	54	100
08323X0205/F	Lot	Crétacé	31/08/2004	31/12/2016	154	477*

Illustration 54 - Crétacé du Lot et de Charente - résultats des auto-corrélations⁵

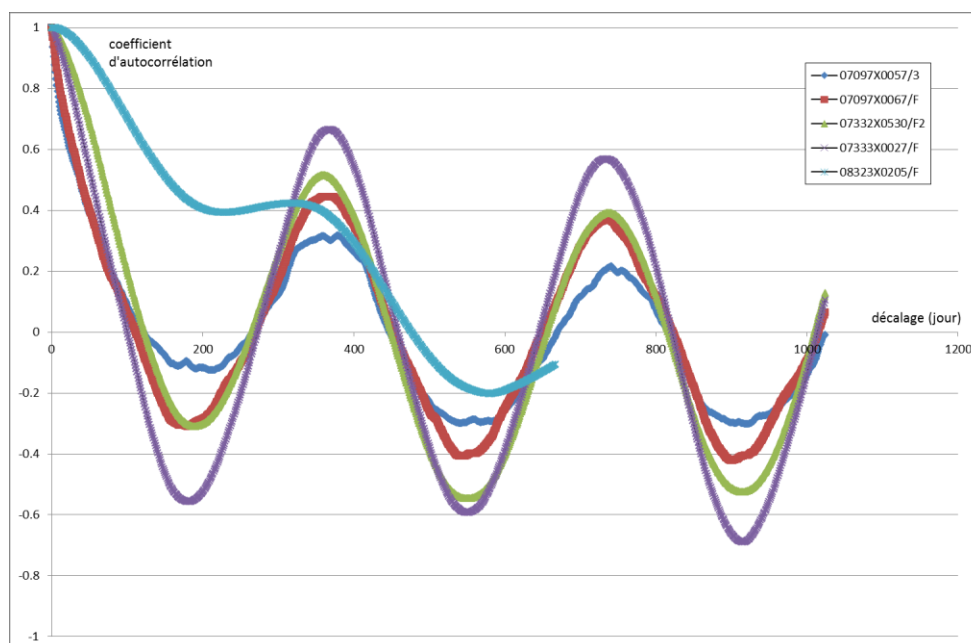


Illustration 55 - Crétacé du Lot et de Charente – autocorrélogrammes

⁵ La valeur d'auto-corrélation à 0 marquée d'un astérisque est atteinte après un plateau et une légère remontée de l'auto-corrélation à un an de décalage temporel.

CC - max (-)	07097X0057/3	07097X0067/F	07332X0530/F2	07333X0027/F
07097X0057/3		0.786	0.802	0.739
07097X0067/F			0.810	0.886
07332X0530/F2				0.862
07333X0027/F				
CC - max (-)	07097X0057/3	07097X0067/F	07332X0530/F2	07333X0027/F
07097X0057/3		0	9	1
07097X0067/F			18	2
07332X0530/F2				-18
07333X0027/F				

N.B. : une valeur positive implique que la chronique en sortie du corrélogramme croisé réagit avec un retard (pour le pic de corrélation). Une valeur négative implique l'inverse

Illustration 56 - Crétacé du Lot et de Charente - résultats des corrélogrammes croisés

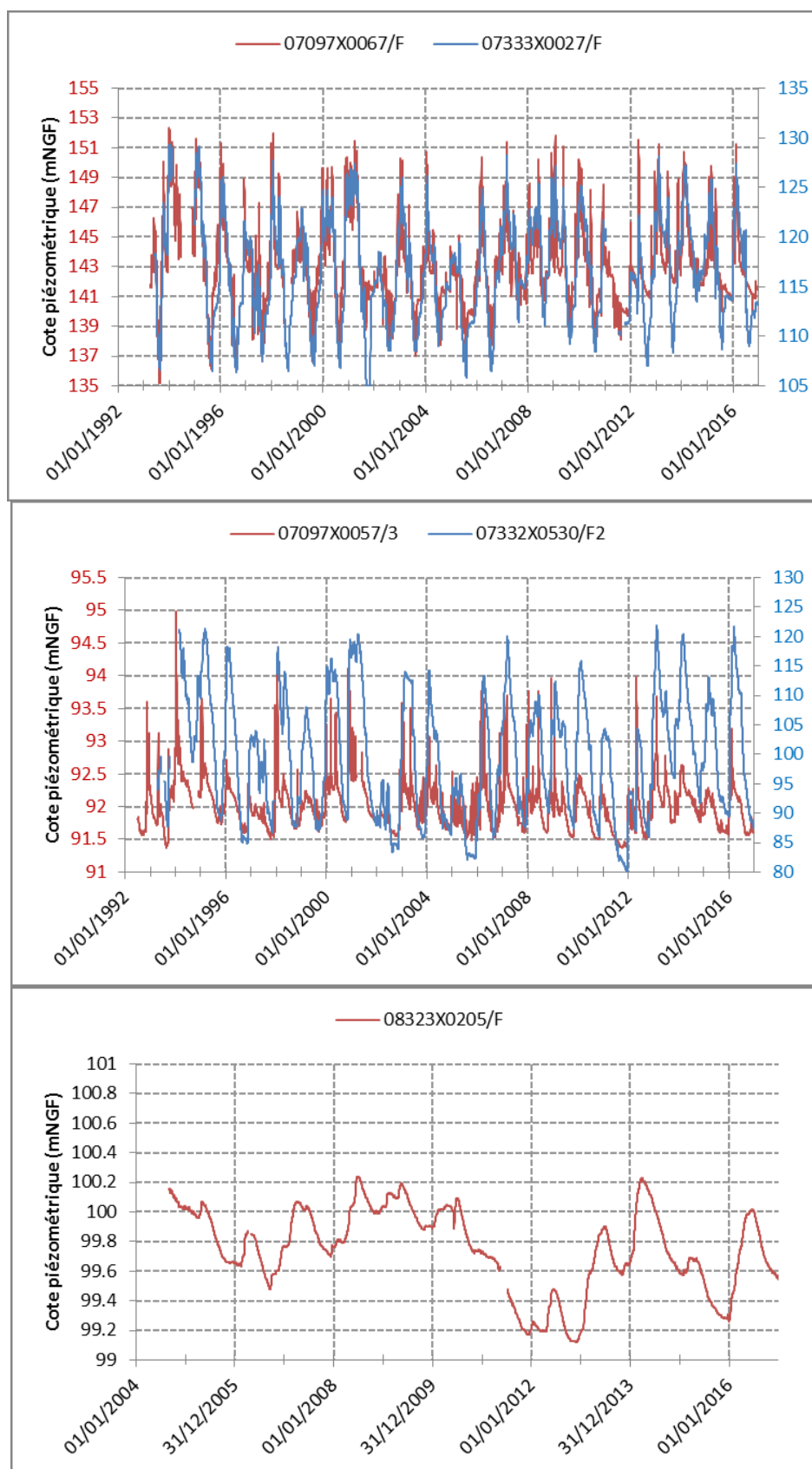


Illustration 57 - Crétacé du Lot (en bas) et de Charente (haut et milieu) - chroniques piézométriques

3.4.3. Forages géographiquement proches

A l'instar des analyses en Dordogne, une attention particulière a été portée à des groupes de piézomètres situés dans un voisinage immédiat (Illustration 58).

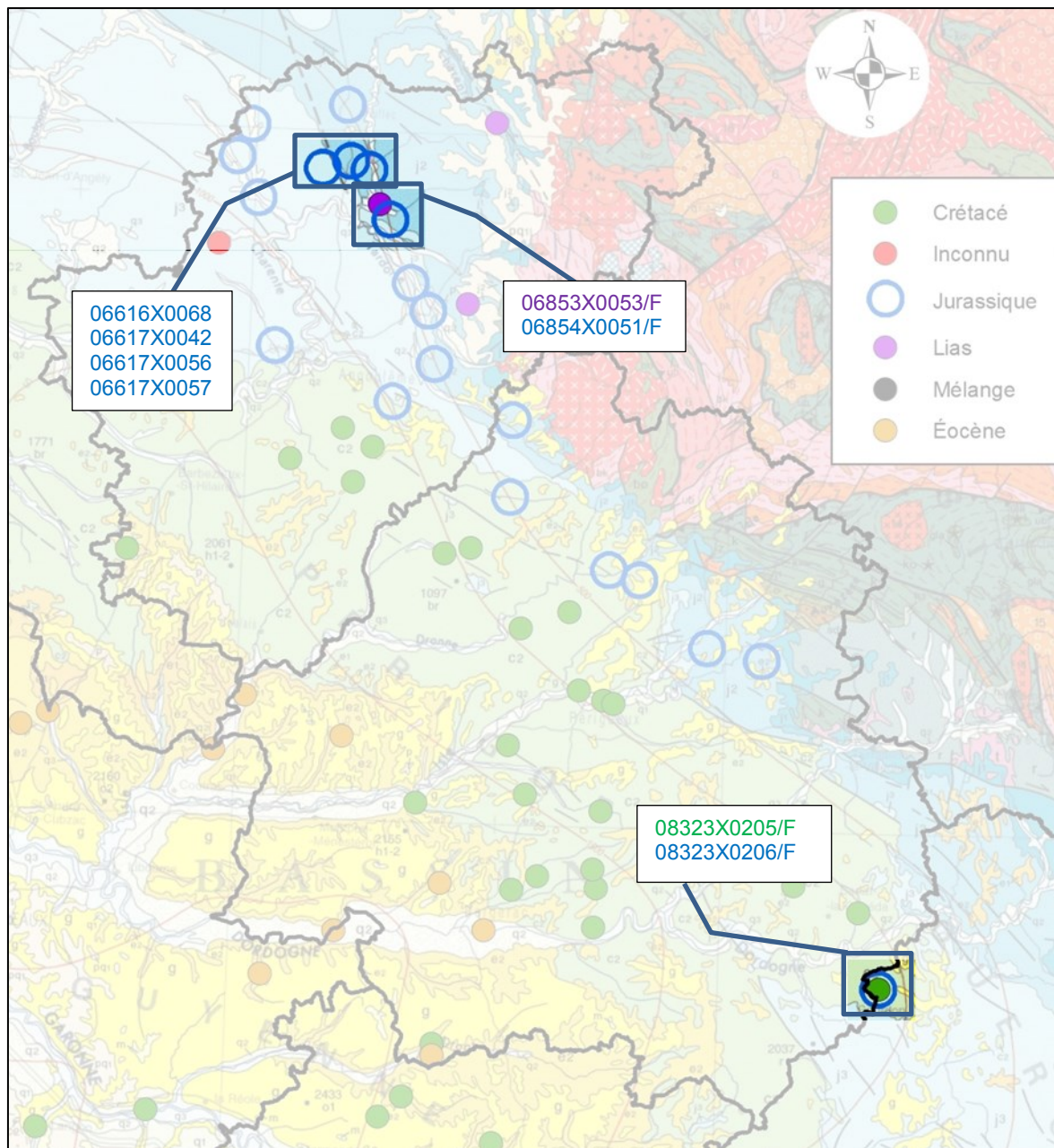


Illustration 58 - Répartition géographique des doublets et quadruplets de piézomètres voisins en Charente et Lot

Dans le département du Lot, le forage 08323X0205 captant le Crétacé et le forage 08323X0206 captant le Jurassique (Illustration 59) sont éloignés de 90 m environ. Leur corrélogramme croisé ne fait pas apparaître de similitude de comportement (Illustration 60). Le maximum (0.69) est atteint pour un décalage temporel de -7 jours, la chronique du 08323X0206 devant celle du 08323X0205. Visuellement, les chroniques piézométriques sont en effet bien distinctes, la

chronique jurassique semblant présenter un niveau seuil autour de 91 m NGF, tandis que la chronique crétacée ne laisse pas apparaître un trait similaire.

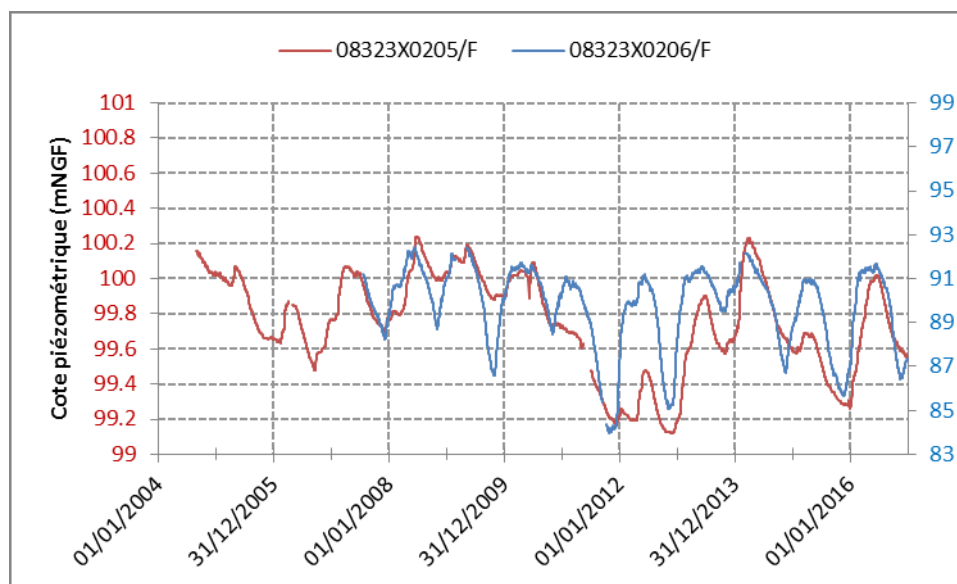


Illustration 59 - Piézométries des forages 08323X0205 et 08323X0206

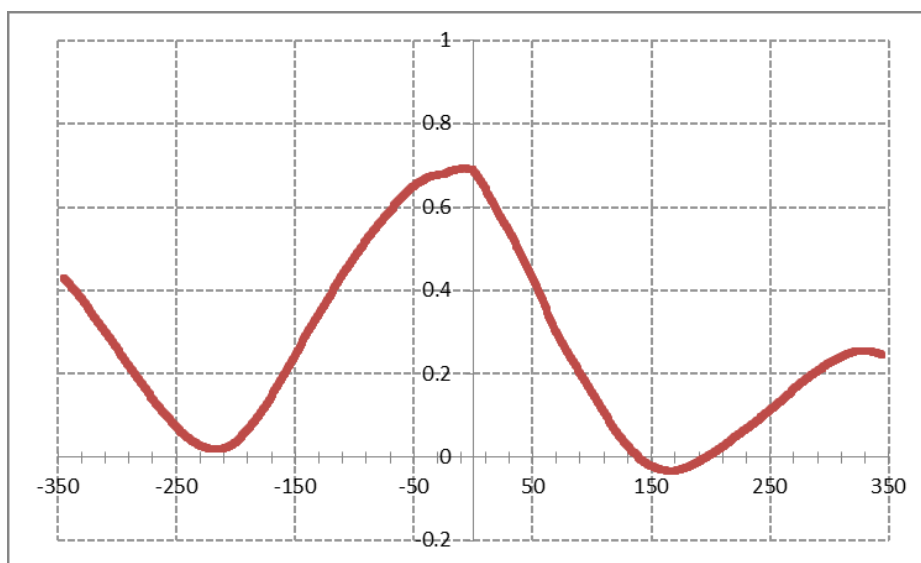


Illustration 60 - Corrélogramme croisé entre les chroniques 08323X0205 et 08323X0206

Dans le département de la Charente, les piézomètres 06853X0053 et 06854X0051 captent respectivement le Lias et une formation aquifère du Jurassique. Ces chroniques sont bien différenciées, notamment au travers de l'existence d'une tendance à la hausse dans le Lias (illustration 61). En conséquence, aucune analyse corrélatoire n'est conduite sur ces chroniques mais cette observation peut marquer une distinction entre deux sous-réservoirs jurassiques.

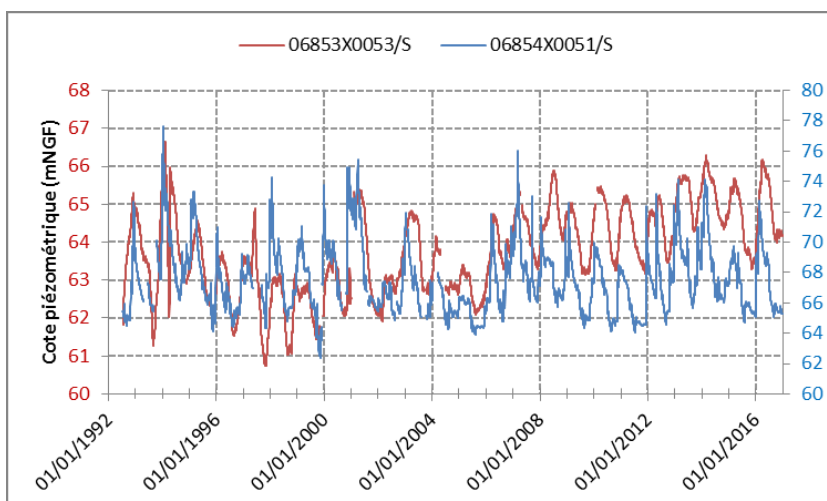


Illustration 61 - Piézométries des forages 06853X0053 et 06854X0051

Toujours dans le département de la Charente, 4 piézomètres captent les aquifères jurassiques dans un périmètre proche. Il s'agit des ouvrages 06616X0068, 06617X0042, 06617X0056 et 06617X0057. L'analyse des deux premières chroniques a été présentée au point a, elle n'est donc pas reprise en détail ici. Les chroniques 06617X0056 et 06617X0057 sont très courtes (1998-2002) et couvrent une période de temps ancienne, ce qui explique qu'ils n'ont pas l'objet d'une analyse précédemment. Les autocorrélogrammes de ces deux chroniques (Illustration 62) sont très similaires pour des décalages temporels courts et moyens (jusqu'à 150 jours environ) mais l'autocorrélation à 1 an est par exemple bien plus forte pour la chronique 06617X0057 que pour 06617X0056 (0.30 contre 0.13). Le corrélogramme croisé entre ces deux chroniques de données montre une faible corrélation (Illustration 63). Dans leur ensemble, ces 4 chroniques ne présentent pas de corrélations méritant d'être mentionnées.

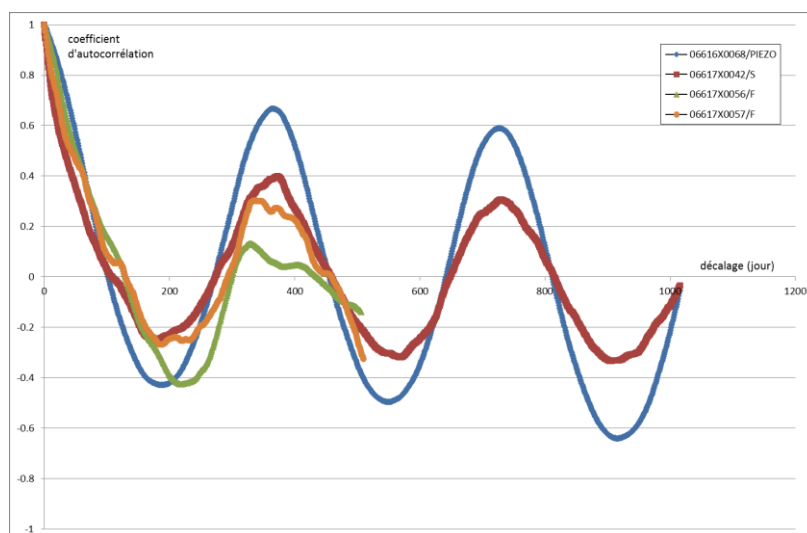


Illustration 62 - Autocorrélogrammes des chroniques 06616X0068, 06617X0042, 06617X0056 et 06617X0057

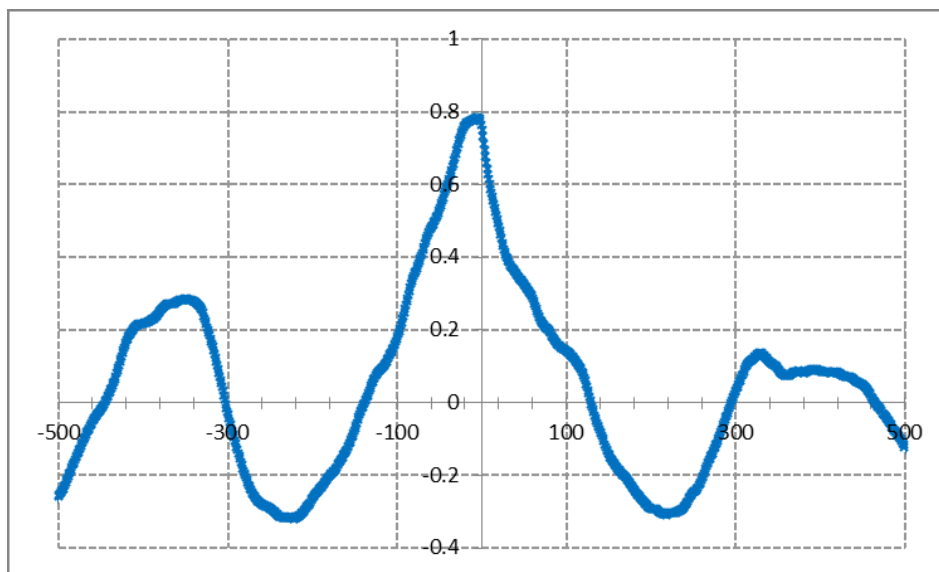


Illustration 63 - Corrélogramme croisé des chroniques 06617X0056 (en entrée) et 06617X0057

3.5. CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES 2009-2016

L'approche adoptée dans les parties 3.3 et 3.4 cloisonnant les aquifères et les départements (pour la Dordogne en tout cas), il a été décidé de conduire une analyse en composantes principales sur les chroniques piézométriques de durée relativement longue et ne présentant pas de tendance. 27 chroniques piézométriques ont ainsi été sélectionnées. Elles couvrent une période allant du 01/01/2009 au 31/12/2016.

L'illustration 64 restitue de façon synthétique cette ACP : pour chaque chronique piézométrique, le plus fort coefficient de corrélation obtenu est indiqué, ainsi que les piézomètres pour lesquels ce même coefficient dépasse 0.9 (vert) ou 0.89 (vert kaki).

Les corrélations nouvelles apportées par cette approche sont les suivantes :

- piézomètre 07345X0023/F (Crétacé de Dordogne) : corrélation avec le piézomètre 07332X0530/F2 situé en Charente et captant le Crétacé (coefficient de 0.905) ;
- piézomètre 07346X0017/F (Crétacé de Dordogne) : corrélation avec le piézomètre 07101X0041/S situé en Charente et captant le Jurassique (coefficient de 0.896) ;
- piézomètre 07584X0002/F (Crétacé de Dordogne) : corrélation avec le piézomètre 07101X0041/S situé en Charente et captant le Jurassique (coefficient de 0.931) ;
- piézomètre 07598X0005/A81 (Jurassique de Dordogne) : corrélation avec le piézomètre 07332X0530/F2 situé en Charente et captant le Crétacé (coefficient de 0.900).

Les courbes piézométriques correspondantes sont présentées deux à deux en annexe 4.

Enfin, cette approche montre également l'absence de corrélation entre le Jurassique de Dordogne et celui de Charente : l'ouvrage 07598X0005 (ressorti des analyses précédentes (chapitre 3.1.3) sous la forme d'un groupe constitué avec deux autres piézomètres (07355X0006, 07356X0022)) ne montre ici pas de corrélation évidente avec d'autres ouvrages jurassiques en Charente.

	Département	Aquifère	Plus forte corrélation	Piézomètres à CC > 0.9	Piézomètres à CC > 0.9	Piézomètres à CC > 0.89	Piézomètres à CC > 0.89
07345X0023/F	Dordogne	Crétacé	0.937	07346X0017/F	07332X0530/F2	07827X0006/F	-
07346X0017/F	Dordogne	Crétacé	0.937	07345X0023/F	-	07101X0041/S	-
07584X0002/F	Dordogne	Crétacé	0.931	07101X0041/S	-	-	-
07595X0006/F3	Dordogne	Crétacé	0.908	07827X0006/F	-	-	-
07598X0005/A81	Dordogne	Jurassique	0.900	07332X0530/F2	-	-	-
07827X0006/F	Dordogne	Crétacé	0.908	07595X0006/F3	-	07345X0023/F	08071X0026/F
07835X0003/F3	Dordogne	Crétacé	0.904	08071X0026/F	-	07827X0006/F	-
08071X0026/F	Dordogne	Crétacé	0.904	07835X0003/F3	-	-	-
06604X0179/F	Charente	Jurassique	0.902	06608X0027/AC-3	-	-	-
06608X0027/AC-3	Charente	Jurassique	0.915	06851X0071/S	06604X0179/F	-	-
06613X0039/S	Charente	Jurassique	0.893	-	-	06854X0051/S	-
06616X0068/PIEZO	Charente	Jurassique	0.918	06851X0071/S	-	06865X0020/S	-
06617X0042/S	Charente	Jurassique	0.897	-	-	06604X0179/F	-
06622X0068/S	Charente	Lias	0.864	-	-	-	-
06851X0071/S	Charente	Jurassique	0.918	06616X0068/PIEZO	06608X0027/AC-3	06854X0051/S	-
06854X0051/S	Charente	Jurassique	0.893	-	-	06613X0039/S	06851X0071/S
06865X0020/S	Charente	Jurassique	0.890	-	-	06616X0068/PIEZO	-
06866X0018/F	Charente	Lias	0.813	-	-	-	-
07091X0042/P	Charente	Jurassique	0.887	-	-	-	-
07097X0057/3	Charente	Crétacé	0.886	-	-	-	-
07097X0067/F	Charente	Crétacé	0.873	-	-	-	-
07101X0041/S	Charente	Jurassique	0.931	07584X0002/F	-	07346X0017/F	-
07326X0028/S	Charente	Crétacé	0.864	-	-	-	-
07332X0530/F2	Charente	Crétacé	0.905	07345X0023/F	07598X0005/A81	-	-
08323X0205/F	Lot	Crétacé	0.651	-	-	-	-
08323X0206/F	Lot	Jurassique	0.825	-	-	-	-
08811X0055/F	Lot	Jurassique	0.817	-	-	-	-

Illustration 64 - Chroniques piézométriques de longues durées : corrélations identifiées

3.6. QUE RETENIR DE CES ANALYSES PIEZOMETRIQUES ?

En premier lieu, beaucoup de chroniques retenues en première approche ont été écartées en raison de tendance observable à plus ou moins long terme. C'est notamment le cas de toutes les chroniques du Jurassique et du Crétacé en Lot-et-Garonne qui montrent une tendance à la baisse, venant confirmer les observations déjà mises en évidence par Platel et al. (2010) dans cette région.

À l'échelle du Bassin aquitain, peu d'ouvrages disposent au final de chroniques piézométriques continues de grande longueur et non influencées (influence de pompages ou pas de tendance visible) :

- Les 18 chroniques jurassiques pertinentes se concentrent essentiellement en bordure de bassin, à proximité des zones d'affleurement et aucune chronique n'est disponible vers l'intérieur du bassin. Les chroniques jurassiques exploitables en première approche sont disponibles essentiellement en Charente et Dordogne. En Lot-et-Garonne, la tendance à la baisse piézométrique observée sur 6 chroniques n'en permet pas l'exploitation au travers des outils statistiques utilisés dans cet exercice.
- Les 21 chroniques crétacées utilisées pour cet exercice sont mieux réparties géographiquement et à l'instar des chroniques jurassiques, 12 ont été écartées notamment car elles présentaient des tendances à la hausse ou à la baisse.

Les premières analyses statistiques mises en œuvre au cours de ce travail ont permis de faire ressortir des groupes de piézomètres aux caractéristiques différentes, que ce soit pour le Jurassique et le Crétacé, en Dordogne et dans les autres départements. Toutefois, l'analyse de ces groupes sur la simple base de leur position géographique et de l'entité aquifère capté ne montre pas d'organisation évidente et démontre la nécessité d'aller plus loin d'une part dans l'analyse de ces chroniques et d'autre part dans leur exploitation.

En effet, une analyse plus poussée doit être faite en « recontextualisant » du point de vue hydrogéologique les ouvrages et groupes d'ouvrages ressortis de ces premières analyses

statistiques. Ceci passe par une identification plus stricte du sous-réservoir capté et un repositionnement de l'ouvrage dans son environnement à savoir la profondeur de captage, la présence de couverture, la déconnexion hydraulique avec les réservoirs sous et sus-jacents ou encore le recoupement de drains. Les résultats du projet OKaNA (Husson, 2017) pourraient alors s'avérer utiles à cette analyse.

L'exploitation de ces chroniques devra être également poursuivie par la mise en œuvre d'autres méthodes d'approches du caractère fonctionnel des réservoirs. Des analyses corrélatoires croisées complémentaires (corrélatoires) du type pluie-niveaux piézométriques voire suivis physico-chimiques par exemple permettront fournir des images approchées de la réponse impulsionnelle des réservoirs et donc de leur fonctionnement. Afin de permettre une approche globale, il faudra densifier le jeu de données actuel. Cela passe par la mise en œuvre d'outils permettant de s'affranchir des influences liées aux prélèvements et des tendances observables sur les chroniques mais aussi par l'intégration des suivis quantitatifs de sources. Ainsi, les chroniques de débits de sources en Dordogne et dans le Lot ayant déjà fait l'objet d'un inventaire (Cabaret et al., 2012) devront être prises en considération.

Les premières analyses proposées ici ont ainsi permis, au-delà d'observer des comportements différents, de mieux cibler les travaux qui seront mis en œuvre dans la suite du projet.

4. Karsts de Dordogne : drainage karstique et conditions d'infiltration

Dans l'Est de la Dordogne et dans le Lot (Quercy), la relation entre le réseau hydrographique et la présence ou non d'une couverture peu perméable est bien décrite (Husson 2015 et 2017) avec à l'Est un karst nu et un drainage essentiellement karstique et à l'Ouest, une préservation de la couverture et un réseau hydrographique essentiellement non impacté par l'infiltration vers les aquifères karstiques.

L'objectif est d'essayer de déterminer quel peut être l'impact de cette couverture sur le degré d'organisation des écoulements karstiques d'une part et, dans la continuité des travaux précédents (Gutierrez et al., 2016), sur les modalités d'infiltration vers les aquifères karstiques d'autre part. Une telle analyse devrait permettre d'obtenir des informations importantes pour la gestion de la ressource en eau à l'échelle régionale : vulnérabilité de la ressource, recharge des nappes, etc.

4.1. RESEAU DE DRAINAGE EN CONTEXTE KARSTIQUE : THEORIE ET CONCEPTS

Plusieurs études illustrent l'intérêt des analyses morphométriques à l'échelle régionale de terrains karstifiés. Florea (2005) a réalisé une étude portant sur la densité et la répartition des dolines à l'échelle de l'état du Kentucky et a pu faire apparaître un lien entre directions de fracturation et alignement de dolines ; ces informations sont par exemple utiles pour définir des axes de drainage. Komac & Urbanc (2012) proposent une analyse de l'intensité de la karstification des formations géologiques de la Slovénie en croisant des indices karstiques (dolines, cavités naturelles, densité du réseau de drainage superficiel) avec la lithologie. Croskrey & Groves (2008) font une analyse de la vulnérabilité de la ressource en eau karstique à l'échelle régionale (10 districts du Kentucky) par un croisement de la carte géologique avec un MNT.

Plus spécifiquement sur le réseau de drainage, Glennon & Groves (2002) proposent une analyse du réseau karstique du bassin versant de Mammoth Cave (Kentucky). La densité du réseau de drainage karstique souterrain ($0.24-1.13 \text{ km/km}^2$) montre des valeurs plus faibles que celles obtenues pour un bassin versant non karstique à proximité (1.36 km/km^2) ; cette différence peut s'expliquer par le fait que seule une partie du réseau de drainage karstique a été explorée. En reconstituant un réseau de drainage superficiel théorique (à partir du MNT), les auteurs montrent que le drainage karstique semble avoir été influencé par le réseau de drainage superficiel (théorique) qui existait avant le décapage de la couverture.

Ford & Williams (2007) présentent une étude du drainage sur un karst de Nouvelle-Zélande où une couche peu perméable (formation détritique) recouvre à des degrés divers la formation calcaire karstifiée. Les secteurs n'ayant plus de couverture montrent un réseau de drainage karstique très évolué (plus de cours d'eau en surface, densité élevée de dolines alimentant un drainage karstique dendritique drainé vers des sources, cas 3 de l'illustration 65) ; au contraire, les secteurs sous couverture montrent essentiellement un réseau de drainage superficiel ponctué de quelques « fenêtres » sur les calcaires sous-jacents constituant autant de points d'infiltration (pertes, cas 1 de l'illustration 65). Les auteurs font l'hypothèse que le drainage a évolué temporellement du cas 1 (karst sous couverture) au cas 3 (karst nu) par décapage progressif de la couverture (érosion superficielle et soutirage dans le karst).

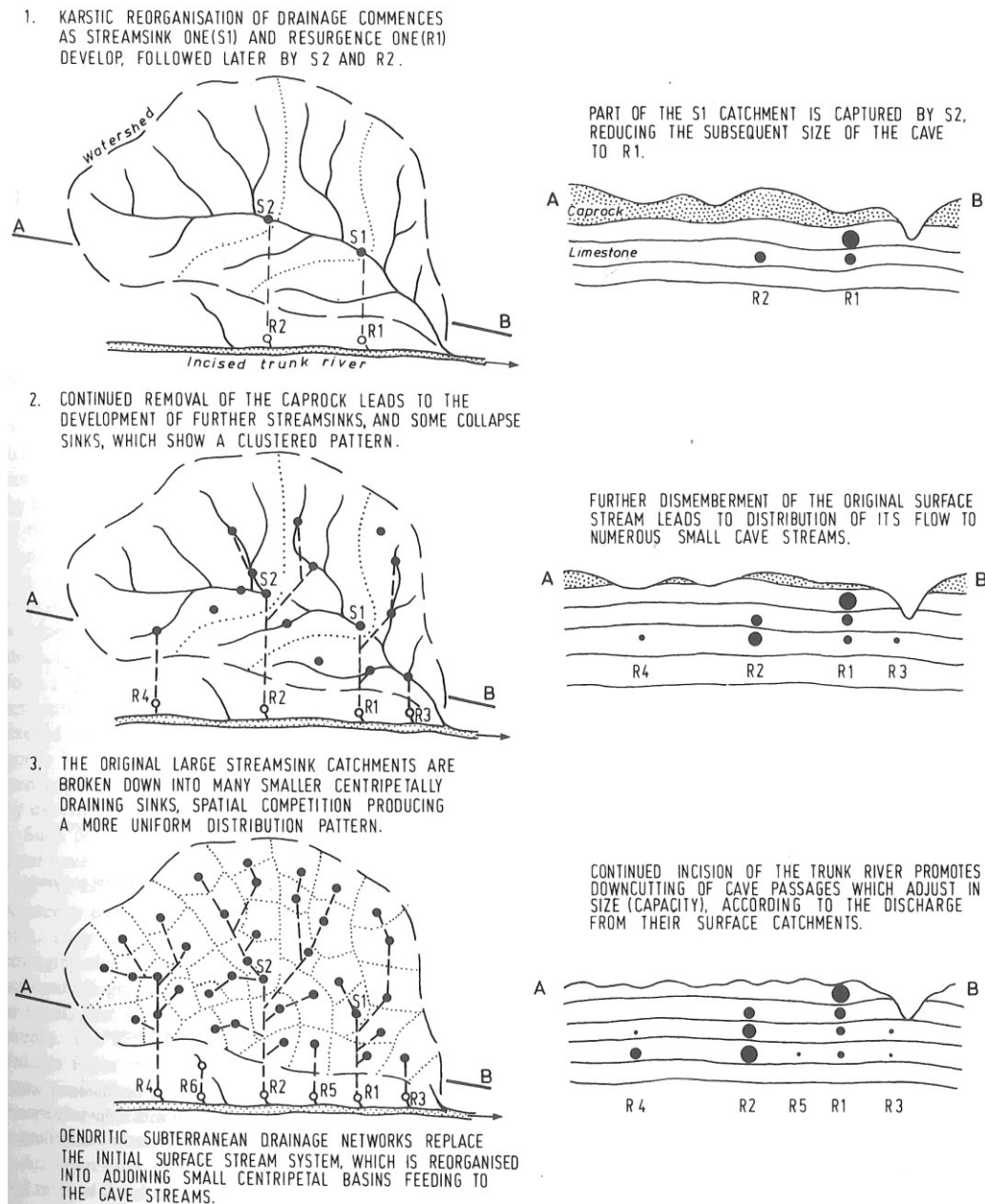


Illustration 65 - Modèle conceptuel de la réorganisation du drainage par karstification (Ford & Williams, 2007)

Au sein d'un bassin d'alimentation karstique, Ray (1999, 2001) distingue trois grandes catégories de fonctionnement hydrologique sur la base de la capacité hydraulique du réseau de drainage karstique et les modalités de recharge (unaire vs binaire) :

- 1) Bassins binaires (ou allogènes) à faible capacité de drainage karstique : la recharge se fait essentiellement par des pertes alimentées par des bassins versants non karstiques en amont ; la capture par le karst du réseau hydrographique n'est que partielle à cause d'une faible capacité de drainage karstique. De fait, dans le secteur karstique du bassin, le réseau hydrographique persiste (de manière pérenne ou saisonnière) tout en perdant une partie de son débit par des pertes karstiques.

- 2) Bassins binaires à forte capacité de drainage karstique : dans ce cas le réseau de drainage karstique s'est suffisamment développé (i.e., a atteint un degré de maturité suffisant) pour permettre l'infiltration totale des débits des cours d'eau issus de l'amont non karstique du bassin. Au sein de la partie karstique du bassin, des vallées sèches peuvent être préservées et témoigner d'une phase antérieure de développement du système de drainage moins mature.
- 3) Bassins unaires (autogène) : l'infiltration est essentiellement drainée vers l'aquifère de manière diffuse (sol et épikarst) et par des dolines (écoulements sous cutanés) ; l'existence de vallées sèches liées à une période antérieure où le réseau de drainage karstique était moins mature est possible.

Une évolution temporelle du cas 1), au cas 2) puis au cas 3) est plausible avec la maturation progressive du système de drainage karstique. L'analyse de Ray se rapproche donc de celle proposée par Ford & Williams (2007).

4.2. APPLICATION AU DEPARTEMENT DE LA DORDOGNE

4.2.1. Cadre méthodologique

La méthodologie suivante a été appliquée :

- 1) Découpage du territoire départemental en unités hydrologiques (bassins versants topographiques) ; à titre de comparaison un découpage selon une maille carrée (grille SAFRAN de 8 km de côté) a également été mis en œuvre ;
- 2) Cartographie à l'échelle départementale des secteurs karstiques (karst nu, sous couverture perméable/peu perméable, de contact) et des secteurs non karstiques (Gutierrez et al., 2016) ;
- 3) Analyse des propriétés du drainage (densité du drainage superficiel, IDPR moyen) et des densités d'indices karstiques au sein des unités hydrologiques karstiques et sur des bassins d'alimentation de sources ;
- 4) Confrontation des propriétés d'infiltration avec la typologie des karsts, l'organisation des écoulements et les caractéristiques hydrogéologiques des bassins versants/bassins d'alimentation (débit spécifique, fonctionnement hydrogéologique de la source) ;
- 5) Réflexion sur les pistes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque et l'évaluation spatiale de la recharge au sein des secteurs karstiques.

Pour caractériser hydrogéologiquement les bassins versants, une méthode de calcul des débits spécifiques, dénommée « DECLIC⁶ », développée par le CEGUM⁷ a été utilisée. Cette méthode consiste à calculer les débits spécifiques des différents cours d'eau en utilisant les données de débits de la banque HYDRO et la superficie des bassins versants de la BD Carthage. Les valeurs du débit mensuel minimal de chaque année civile (QMNA) de fréquence de retour de 5 ans sont utilisées et rapportées à la surface de bassin versant afin d'obtenir un débit d'étiage spécifique, de manière similaire à une application au cours d'eau du massif des Vosges (Fourniguet et al. 2010). Selon le CEGUM, la valeur de ce débit spécifique reflète indirectement la capacité d'infiltration des eaux superficielles par les terrains rencontrés et donc la capacité d'emménagement en eau du sous-sol. Ainsi, un débit d'étiage spécifique relativement faible peut témoigner de la présence de formations perméables et inversement un débit d'étiage spécifique élevé peut témoigner de la présence de formations imperméables.

⁶ DECLIC : Détermination des Ecoulements Caractéristiques sur le Linéaire des Cours d'eau

⁷ CEGUM : Centre d'Études Géographiques de l'Université de Metz

4.2.2. Délimitation des zones karstiques et typologie des karsts

L'essentiel des formes karstiques inventoriées en Dordogne par Cabaret et al. (2014) sont situées dans les secteurs carbonatés du département (Illustration 66). Dans le domaine cristallin au Nord-Est, quelques « cavités naturelles » sont inventoriées, mais ne constituent que des cas isolés ; ce secteur est évidemment non karstique. La deuxième grande zone non karstique correspond à l'Ouest du département qui est constitué par des formations tertiaires détritiques ; en profondeur il est possible que certaines formations carbonatées soient karstifiées, cependant cette karstification potentielle ne se manifeste pas en surface ; cette zone est donc considérée non karstique (du point de vue des conditions de drainage et d'infiltration).

En vue de l'analyse du drainage et des conditions d'infiltration en contexte karstique, le territoire karstifié doit être découpé en entités géographiques pour la mise en œuvre de traitements statistiques. Le découpage territorial correspondant aux zones hydrologiques de la BD-Carthage (211 zones couvrant le département) a été adopté car la taille de ces unités (5 km² en moyenne) est jugée satisfaisante pour les traitements et celui-ci est basé sur des limites topographiques (bassins versants). A titre de comparaison, un découpage sur la base de la grille SAFRAN (grille à maille carrée de 8 km de côté) a également été réalisé, cette grille étant utilisée pour développer la prise en compte de la recharge dans le Modèle Nord-Aquitain v4 (Saltel et al., 2016).

La première étape consiste à enlever les bassins versants non karstiques qui correspondent à ceux qui ne contiennent ni forme karstique ni formation carbonatée cartographiée. Sur le reste du territoire, la typologie des karsts est ensuite définie sur la base de la méthodologie présentée dans Gutierrez et al. (2016) (Illustration 67).). Pour mémoire cette méthodologie permet de définir des typologies de karst pour lesquelles les processus d'infiltration diffèrent : trois typologies de karst sont définies à l'échelle du bassin d'alimentation sur la base de la cartographie géologique à 1/50 000 : le karst nu, le karst sous couverture peu perméable et le karst sous couverture perméable. Ensuite il s'agit de localiser les karsts de contact en croisant la typologie des karsts avec le MNT (IGN, pas de 25 m). Un karst de contact est défini par deux conditions : 1) il se situe au contact entre le karst nu et un karst sous couverture peu perméable ou une zone non karstique peu perméable, 2) le karst nu doit être en aval de la zone peu perméable

Au final, 118 bassins versants karstiques sont ainsi délimités à partir du MNT au 5m et pour chacun des bassins, les typologies de karst (nu, sous couverture perméable/peu perméable ou de contact) sont définies. Pour quelques bassins versants au NE, il est nécessaire de sortir la partie non karstique correspondant au socle afin de ne pas biaiser les calculs de densité d'indices. Le redécoupage a été effectué en digitalisant le contour amont de ces bassins sur la base de la carte géologique harmonisée à 1/50 000. Quelques bassins de très petite taille ont été regroupés afin d'homogénéiser la distribution des surfaces.

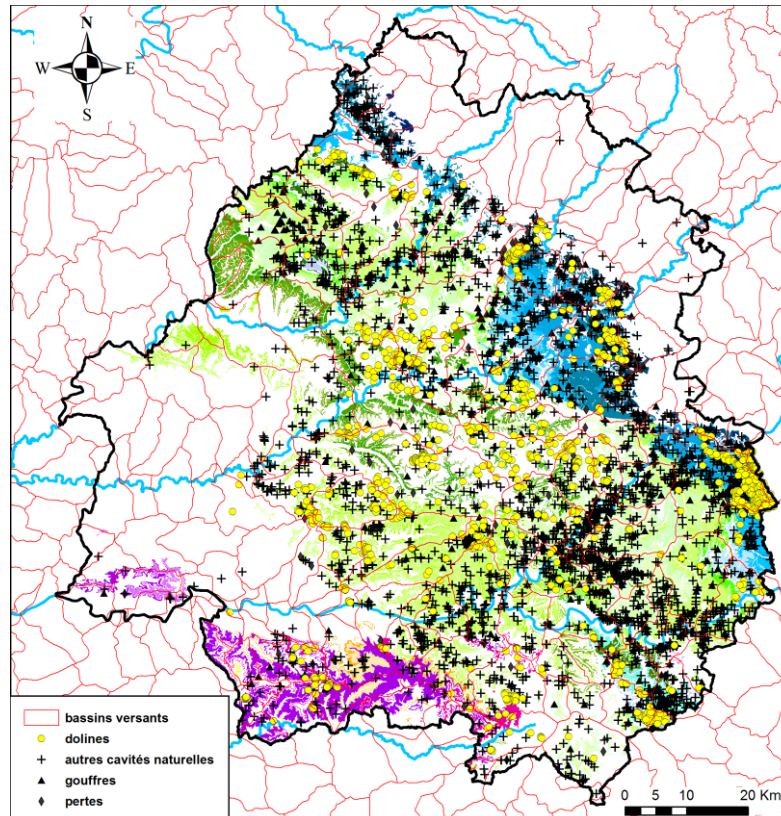


Illustration 66 - Carte des formes karstiques de Dordogne (Cabaret et al., 2014) sur fond géologique ne représentant que les formations carbonatées (Jurassique en bleu, Crétacé en vert, Tertiaire en violet)

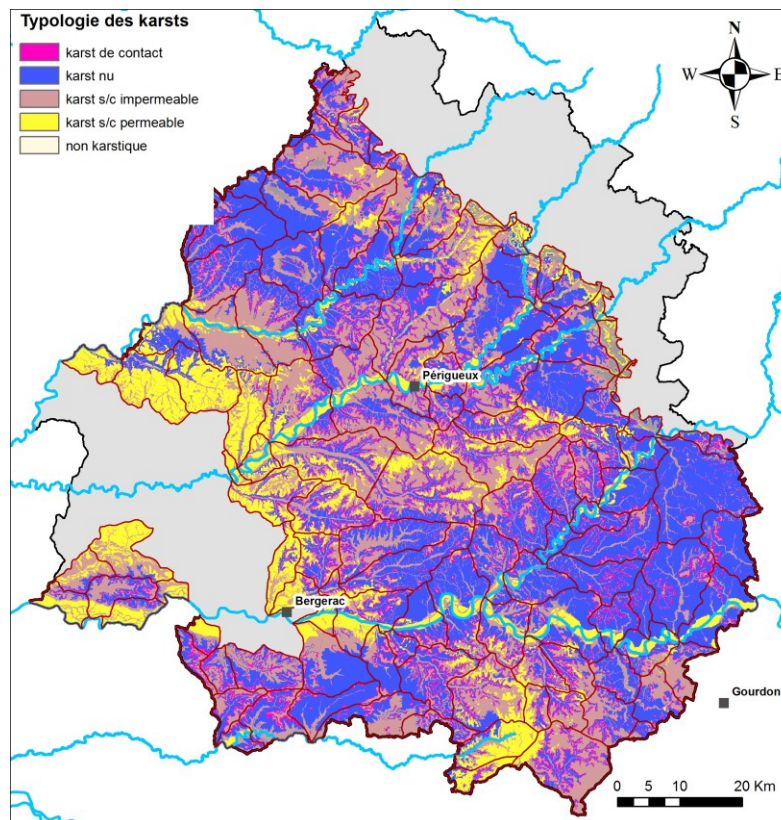


Illustration 67 - Typologie des karsts de Dordogne

4.2.3. Cartographie des conditions d'infiltration

La densité du réseau de drainage superficiel a été calculé en utilisant la BD-Carthage et en enlevant les cours d'eau d'ordre 1 (Dordogne, Vézère, L'Isle, La Dronne) qui viennent tous de l'amont du département et n'informent donc pas sur les conditions de ruissellement/infiltration du secteur d'étude. La densité correspond au ratio entre la longueur totale des cours d'eau drainant un bassin versant et la superficie de ce bassin (km/km^2). Le résultat (Illustration 68) montre globalement des bassins versants progressivement plus ruisselants ($>0,65 \text{ km}/\text{km}^2$) vers l'ouest. Cependant quelques bassins dérogent à cette règle : en particulier dans le secteur NE à la transition entre les formations non karstiques et le karst (passage progressif d'un contexte ruisselant à infiltrant) et au nord la Vézère, un secteur très ruisselant se distingue dans une zone plutôt peu ruisselante. Ce secteur est caractérisé par la prépondérance de formations géologiques peu perméables à l'affleurement.

A titre de comparaison, la densité du réseau drainage superficiel en contexte non karstique donné par Glennon & Groves (2002) est de $1,36 \text{ km}/\text{km}^2$.

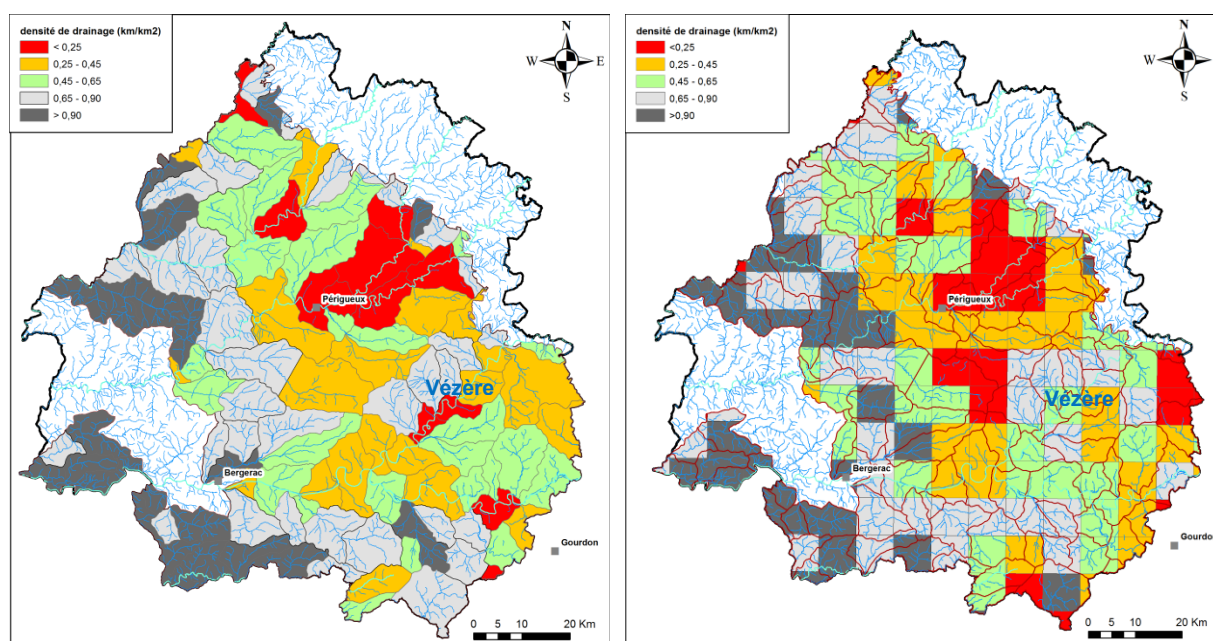


Illustration 68 - Densité du réseau de drainage superficiel calculé à partir de la BD Carthage (sans les cours d'eau d'ordre 1 illustré en traits larges sur la carte) par zone hydrologique (à gauche) et selon la découpage de la grille SAFRAN (à droite)

L'illustration 69 représente la densité de formes karstiques exprimées dans la topographie selon deux critères (la carte de répartition selon le découpage en maille SAFRAN n'est finalement pas présenté issu car les résultats sont sensiblement équivalents) : la densité d'indices karstiques (basé sur 1381 dolines, 459 gouffres, 205 pertes, 4573 cavités naturelles, soit 6618 indices au total) et la densité de vallées sèches exprimée de manière similaire à la densité de drainage superficielle (longueur totale des vallées sèches dans le bassin versant divisé par la superficie du bassin). Les vallées sèches ont été cartographiées avec les outils SIG en comparant les thalwegs du MNT à maille de 25 m et le réseau hydrographique de la BD Carthage : la présence d'un thalweg sans cours d'eau étant cartographiée en vallée sèche.

À l'instar de la densité du réseau de drainage superficiel, les densités d'indices karstiques et de vallées sèches dessinent une évolution décroissante d'est en ouest. Les formations

jurassiques, très minces à l’affleurement en bordure de socle au nord-est et plus importantes au sud-est, montrent des densités d’indices karstiques plus élevées.

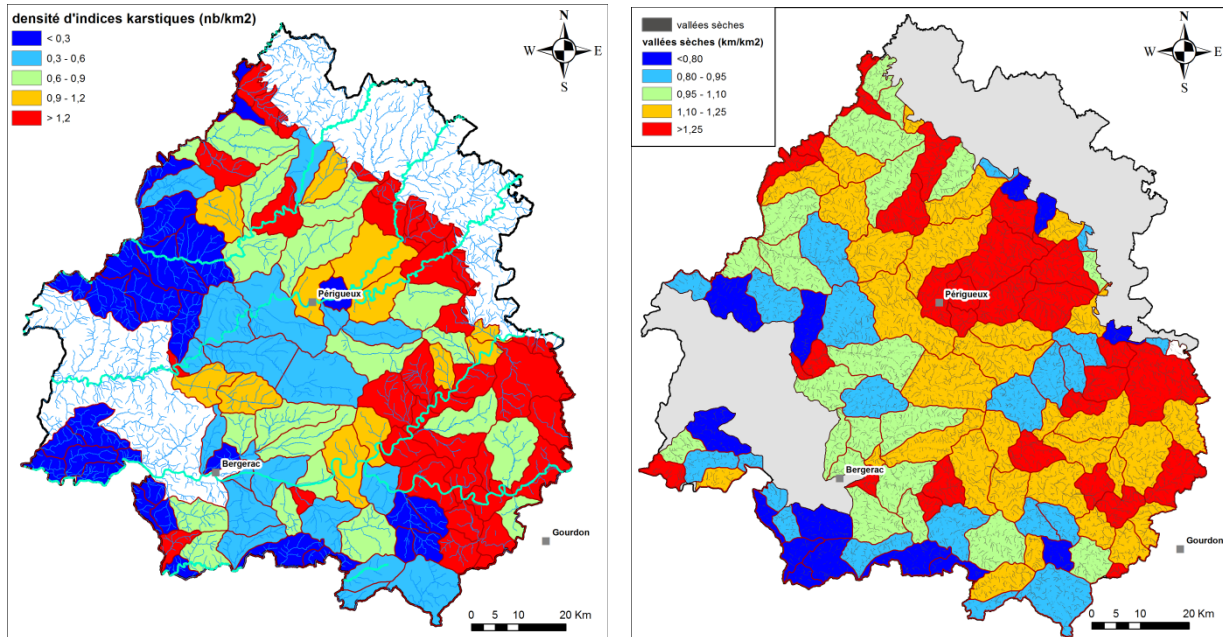


Illustration 69 - Cartographie de la densité d’indices karstiques (dolines, gouffres, pertes, autres cavités naturelles) (à gauche) et de la densité de vallées sèches (à droite)

4.2.4. Corrélation statistique entre typologie de karsts et conditions d’infiltration/ruissellement

Une analyse statistique par ACP (Analyse en Composantes Principales) a été réalisée sur les informations collectées pour chacun des bassins versants afin de tester le degré de corrélations entre les typologies de karst (surfaces respectives dans chaque bassin, exprimées en pourcentage) et des indices de ruissellement/infiltration (densité de drainage superficiel, densité de vallées sèches, densité d’indices karstiques et IDPR moyen). A titre de comparaison, le même traitement a été effectué sur les mailles de la grille SAFRAN. En limite du département, la taille des mailles est diminuée par l’intersection avec le découpage administratif ; pour certaines de ces mailles, ayant une superficie résiduelle inférieure à 9 km², il a été considéré qu’elles n’étaient plus représentatives pour le traitement statistique ; elles ont donc été exclues du traitement (19 mailles au total).

Les résultats (Illustration 70) montrent que les axes factoriels 1 et 2 expriment 63-66% de la variance totale des données, ce qui est tout à fait significatif et indique qu’une interprétation des corrélations entre paramètres est possible : on note que l’axe factoriel 1 permet de bien discriminer d’une part, les indices karstiques, la densité de vallées sèches et la typologie karst nu ; et d’autre part les indices densité de drainage superficiel et IDPR moyen (l’axe factoriel 1 permet d’opposer ces variables). L’axe factoriel 2 permet d’opposer les karsts de contact et sous couverture imperméable aux karsts sous couverture perméable. Ces corrélations et distinctions se retrouvent très clairement dans l’analyse faite sur la grille régulière SAFRAN ; ce qui montre la relative robustesse de l’analyse (à priori pas de biais induit par le découpage géographique en bassins versants).

La typologie karst de contact quant à elle se situe entre le karst nu et le karst sous couverture imperméable, ce qui est conforme à sa définition.

Ce résultat fait bien ressortir un pôle infiltrant en contexte de karst nu ; par contre le pôle ruisselant apparaît être à cheval entre les deux typologies de karst sous couverture, alors que l'on devrait s'attendre que ce pôle soit essentiellement représenté par le karst sous couverture peu perméable. Il est vraisemblable que certains territoires cartographiés en karst sous couverture perméable sont en fait relativement ruisselant (la classification des couvertures entre couvertures peu perméable ou perméable sur la base la carte géologique harmonisée à l'échelle départementale n'intègre pas de possibles variations latérales de faciès par exemple).

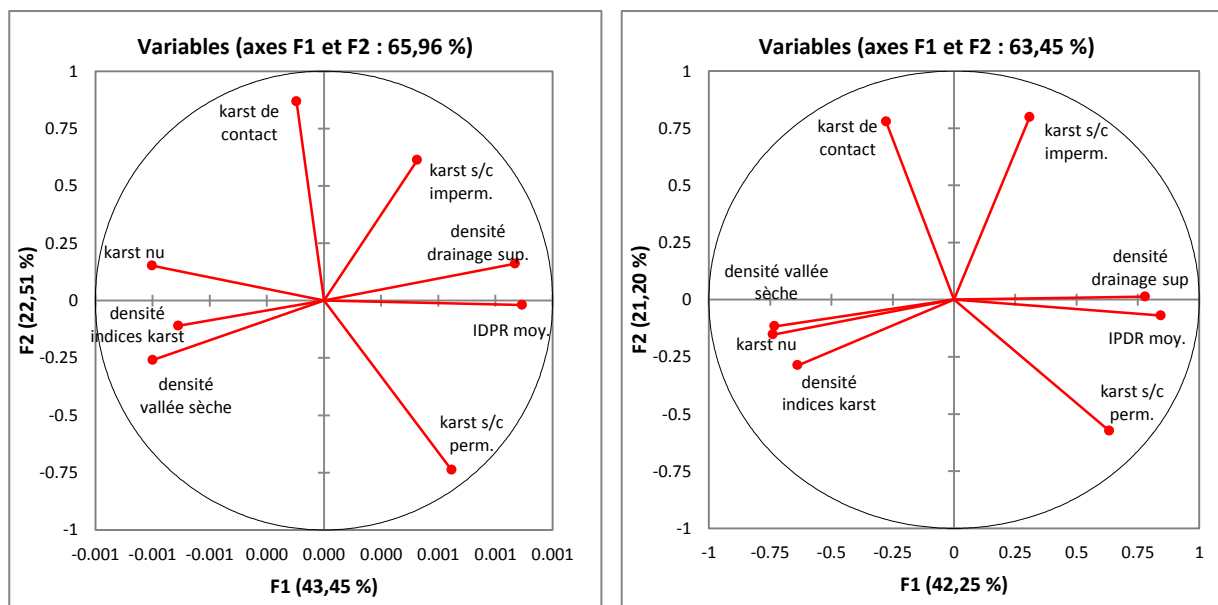


Illustration 70 - ACP sur les variables typologies de karst (karst nu, sous couvertures, de contact) et indices de ruissellement/infiltration (densité d'indices karstiques, de vallées sèches, de drainage superficiel, IDPR) sur les 118 bassins versants (à gauche) et les 134 mailles SAFRAN (à droite)

4.2.5. Comparaison avec les débits spécifiques des cours d'eau

Sur 34 stations hydrologiques de la Banque Hydro, dix n'ont pas été utilisées pour l'analyse : quatre concernant la Dordogne (bassin versant en amont du département prépondérant ne permettant pas une analyse), trois stations sur la Dronne (régime influencé en étiage, données qualifiées de douteuses), deux stations « doublons » (sur la Vézère et sur l'Eyraud) et la dernière sur le Bandiat qui n'enregistre des données que depuis 2012. Sur les 24 stations restantes (Illustration 71), les statistiques de débit peuvent être calculées sur la période 1990-2015 pour la plupart à l'exception de la Loue à Angoisse (2011-2015), L'Isle à Jumilhac (2011-2015) et la Côte (2002-2015). Les QMNA5 sont calculés avec la loi de Galton directement sur le site de la Banque Hydro. Il convient de noter que les données de certaines stations hydrologiques sont qualifiées de douteuses dans la base de données, en particulier :

- L'Isle à Mussidan : qualité douteuse des données et régime influencé en étiage ;
- La Drone à Villeteureix : régime fortement influencé en étiage ;
- Qualité des données douteuse en basses eaux pour 8 stations additionnelles.

Les débits spécifiques des cours d'eau aux différentes stations sont calculés à partir du QMNA5 (méthode DECLIC) afin d'évaluer la contribution des eaux souterraines à l'écoulement. La représentation des débits spécifiques en fonction du contexte géologique (Illustration 72) montre des valeurs assez resserrées pour les bassins en domaine de socle ($1.5\text{--}2.2 \text{ L/s/km}^2$), des valeurs inférieures à 0.7 L/s/km^2 pour les bassins versants en zone karstique et des valeurs étalées pour les grands bassins comprenant à la fois des zones de socle et des zones

karstiques ($0.7-4.5 \text{ L/s/km}^2$). Il est intéressant de remarquer une baisse significative du débit spécifique de l'Auvézère entre sa partie amont et sa partie aval ($2.12, 1.63$ puis 0.7 L/s/km^2), le point amont étant situé en domaine de socle puis les deux stations plus à l'aval correspondent à des secteurs karstiques. Cette baisse du débit spécifique pourrait indiquer des pertes le long du cours d'eau en étiage ; cette hypothèse est corroborée par un essai de traçage réalisé en amont de la dernière station hydrologique et qui a montré une relation entre des pertes (perte du Moulin du Souci) à Cubjac et des sources dans la vallée de l'Isle (émergence du Moulin).

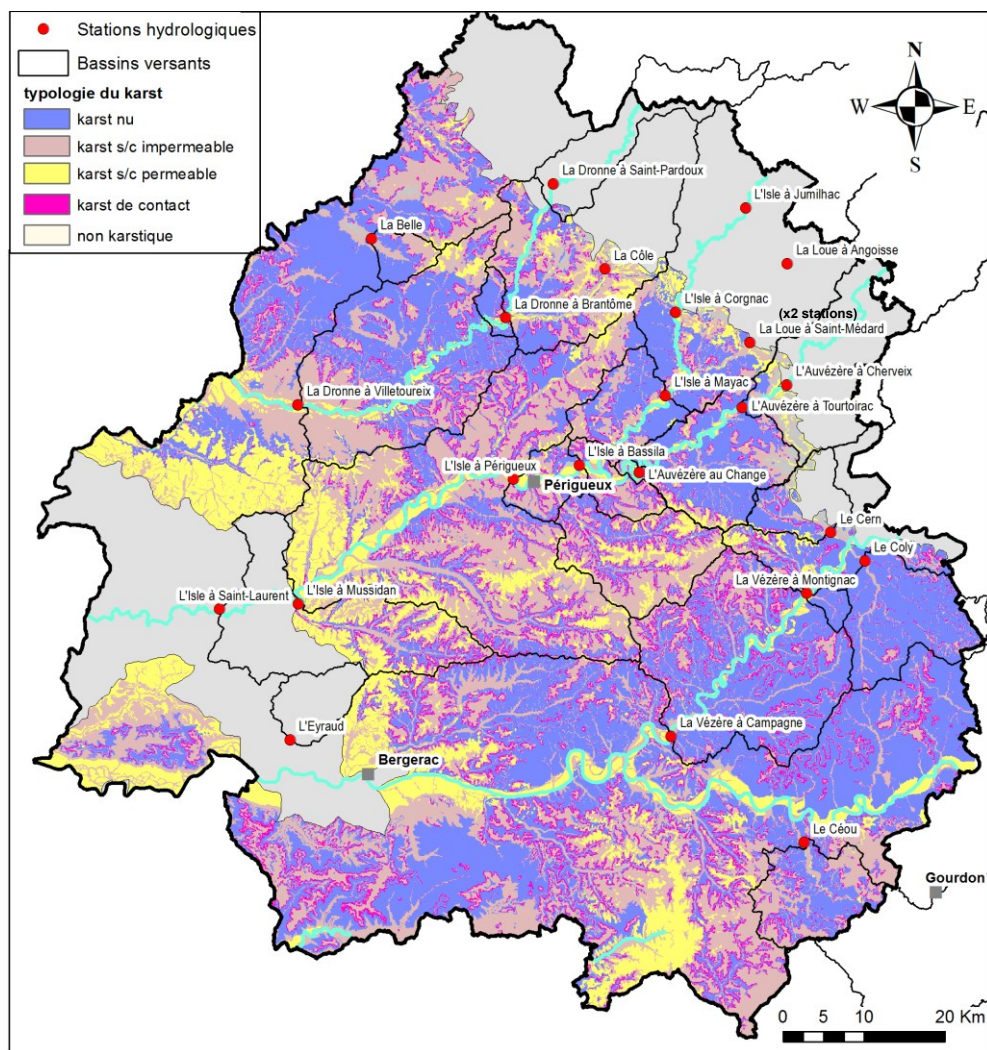


Illustration 71 - Stations hydrologiques (Banque Hydro) retenues pour le calcul des débits spécifiques

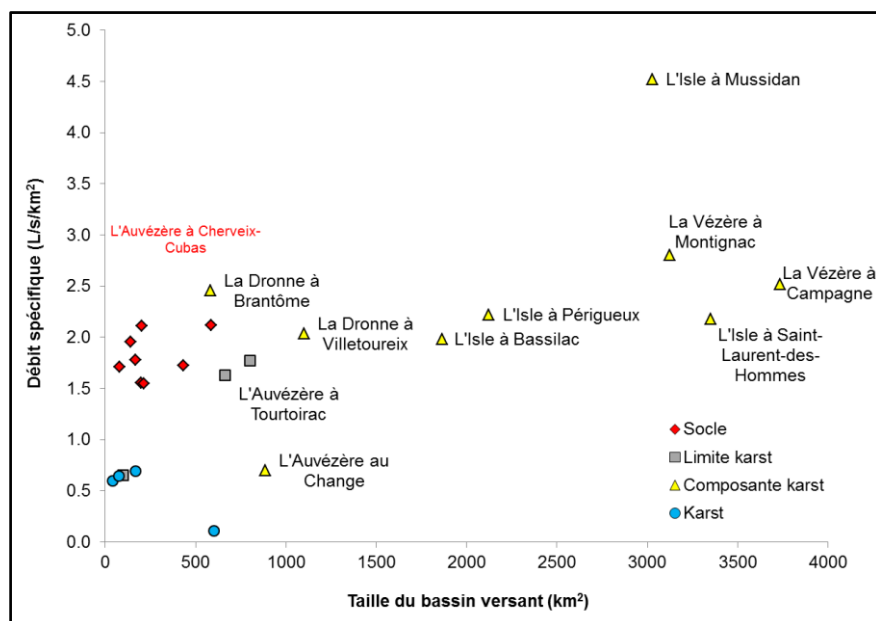


Illustration 72 - Débits spécifiques en fonction de la taille du bassin versant et du contexte géologique

4.2.6. Analyse de bassins d'alimentation de sources

Dans le but de faire une analyse statistique des caractéristiques des sources et de leur bassin d'alimentation, dix sources karstiques du département ont été sélectionnées (Illustration 73). Le bassin d'alimentation a été délimité sur la base d'essais de traçage pour 6 sources, à savoir la Glane, le Toulon, la Doux de Coly, Fongauffier, Sainte-Marie-de-Chignac, et la source du Gadet. Pour les 4 sources restantes, le bassin d'alimentation est assimilé au périmètre de protection éloigné (PPE), tel que délimité par l'ARS ; il s'agit des sources des Moulineaux, de Font Chaude, de la Brême et de Falgueyret. Il est possible que pour certains cas, le bassin d'alimentation soit en réalité plus étendu que le PPE. Les deux sources qui ont une petite partie de leur bassin hors département de la Dordogne (Coly et Gadet) ont été exclues de l'analyse statistique.

Pour une majorité des sources, des études hydrogéologiques sont disponibles et permettent de préciser la structure et le fonctionnement de l'aquifère drainé par l'exutoire.

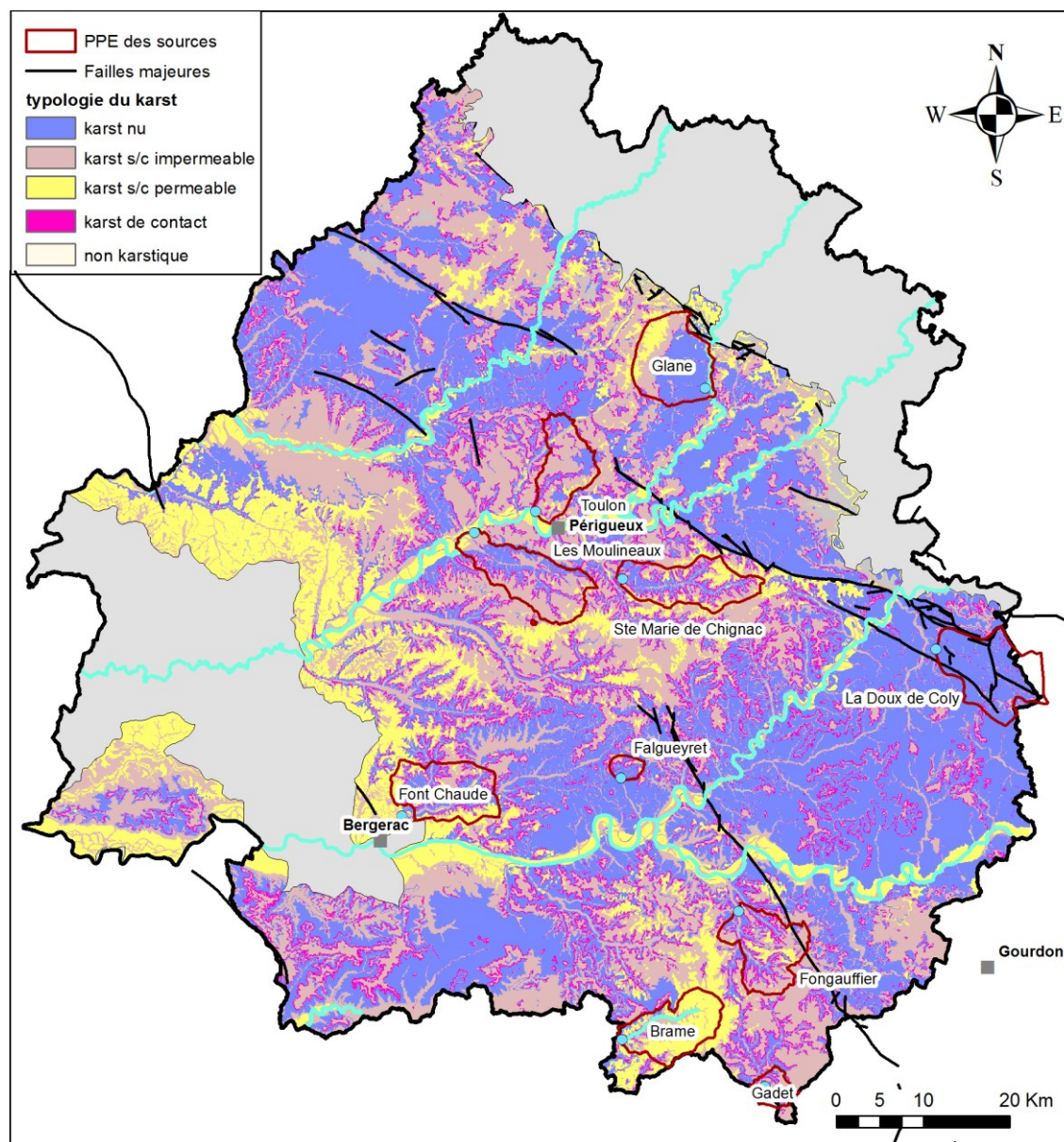


Illustration 73 - Situation des bassins d'alimentation des sources étudiées

Une analyse ACP a été réalisée en combinant à la fois des facteurs caractérisant le bassin d'alimentation (typologie du karst, indices karstiques, densité de sources, densité de drainage superficiel, densité de vallées sèches, IDPR moyen) et des critères hydrogéologiques issus de mesures à la source (débits spécifiques, concentrations en nitrates et chlorures, coefficient de variation en chlorures). Il convient d'indiquer qu'il s'agit d'une analyse préliminaire sur des données qui mériteraient d'être consolidées : le débit spécifique des sources ne dépend pas uniquement des conditions d'infiltration mais également de la pluviosité (celle-ci ne varie pas de manière très marquée à l'échelle du département), de l'occupation du sol et de prélèvements par pompage au sein du bassin d'alimentation; la superficie des bassins d'alimentation est définie avec des précisions variables en fonction de la nature des études hydrogéologiques réalisées sur les sources (plusieurs essais de traçage ou au contraire bilan hydrologique sur des données fragmentaires); les concentrations en ions majeurs et les coefficients de variations de ces concentrations sont calculés sur un nombre d'analyses différent d'une source à l'autre. Malgré ces limitations, l'analyse doit permettre de faire ressortir les tendances générales de comportements des aquifères karstiques de Dordogne.

Les résultats (Illustration 74 et illustration 75) montrent que les 2 premiers axes factoriels expriment plus de 70% de la variance des échantillons ; ils font ressortir trois pôles :

- Un pôle « karst nu » à forte densité d'indices karstiques et de vallées sèches et à fort débit spécifique correspondant aux sources de la Glane, de Falgueyret et de la Doux de Coly ; ce pôle est également corrélé avec les facteurs nitrates et coefficient de variation des concentrations en chlorures ;
- Un pôle « karst sous couverture peu perméable » à forte densité de drainage superficiel et densité de sources correspondant aux sources de Fongauffier et Gadet ainsi que Font Chaude et Sainte Marie de Chignac ; ce pôle est anti-corrélé aux facteurs débit spécifique et nitrates ;
- Un pôle marqué « karst sous couverture perméable » correspondant à la source de la Brême ; ce pôle correspond également au facteur chlorures qui est bien corrélé avec les deux sources restantes, à savoir sources du Toulon et des Moulineaux.

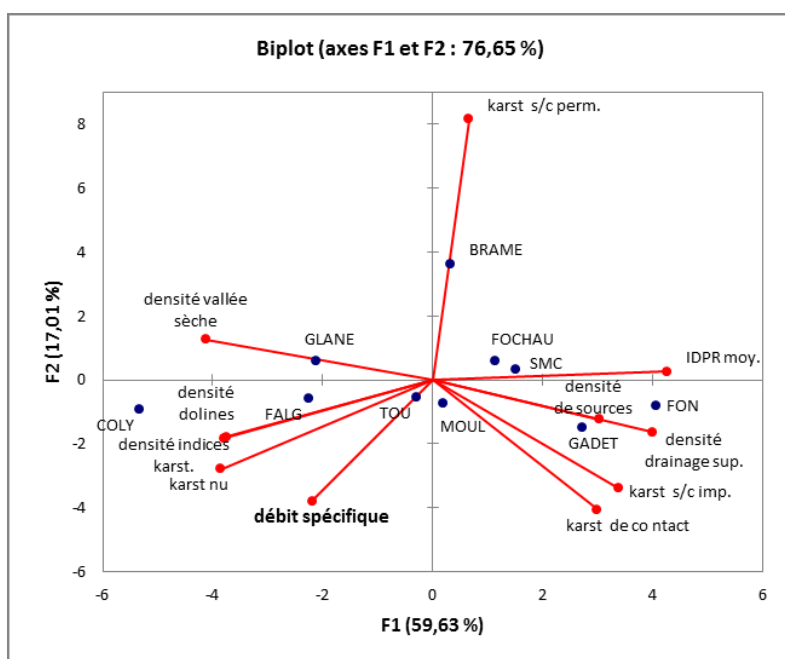


Illustration 74 - ACP portant sur les facteurs caractérisant les bassins d'alimentation et le débit spécifique des sources (FALG : Falgueyret, TOU : Toulon, MOUL : Moulineaux, FOCHAU : Font Chaude, SMC : Ste Marie de Chignac, FON : Fongauffier)

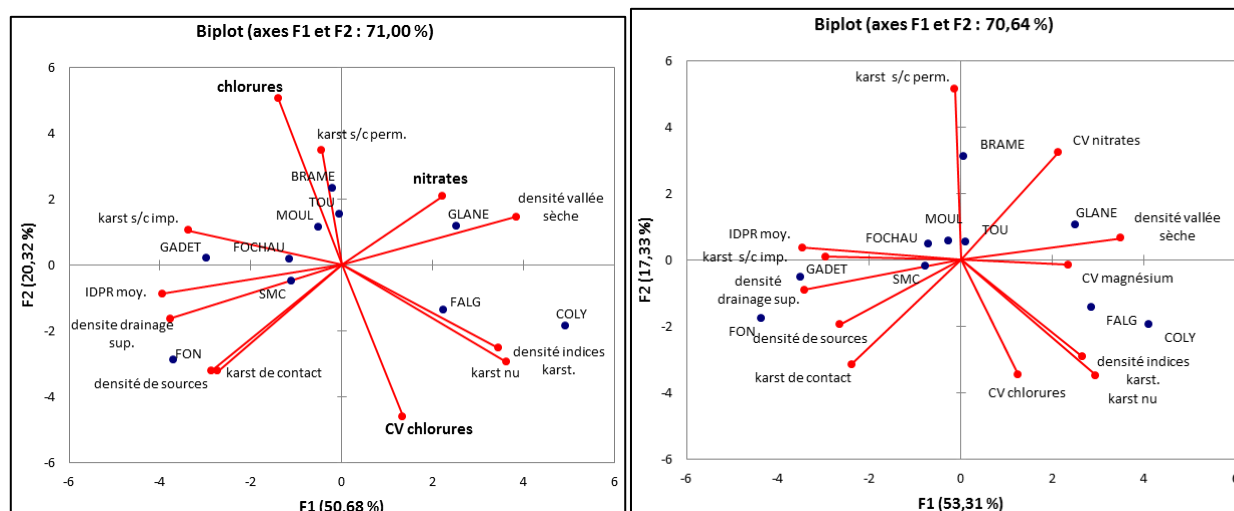


Illustration 75 - ACP portant sur les facteurs caractérisant les bassins d'alimentation et des paramètres chimiques mesurés aux sources (concentrations en nitrates et chlorures, coefficient de variation en chlorures, nitrates et magnésium)

Cette analyse ACP permet de faire ressortir quelques familles de sources ayant des caractéristiques communes (Illustration 76) :

- Les sources de la Glane, Doux de Coly et Falguyret drainent l'aquifère du Bathonien pour les deux premières et l'aquifère du Campanien pour la dernière. Elles ont pu être explorées spéléologiquement avec des réseaux de conduits partiellement noyés pour Falguyret et la Glane et un réseau entièrement noyé pour la Doux de Coly (profondeur maximale 60 m sous le niveau de la source). Ces sources sont celles qui présentent les vitesses de traçage les plus élevées (traçages uniquement sur la Glane et Doux de Coly), comprises entre 50 et 200 m/h (vitesse moyenne). Ces informations sont cohérentes avec les caractéristiques de leurs bassins d'alimentation : prédominance de karst nu, forte présence d'indices karstiques et de vallées sèches et à l'inverse faible densité de drainage superficiel et peu de sources. Ces caractéristiques confèrent une vulnérabilité élevée à leur bassin d'alimentation. En résumé, ces sources drainent des aquifères karstiques fonctionnels, ce qui est également confirmé par des variations de concentration plutôt élevées (CV chlorures, magnésium, nitrates) et des concentrations en nitrates indicatrices de transferts rapides depuis la surface.

- Les sources de Fongauffier et Gadet d'une part, et Font Chaude et Sainte Marie de Chignac d'autre part, forment deux « binômes », les deux premières drainant l'aquifère du Coniacien-Santonien et les deux autres drainant le même aquifère mais également le Turonien (Font Chaude) ou le Campanien (Sainte Marie de Chignac). Ces sources comprennent une composante plus profonde marquée par une anomalie thermique positive (en particulier Fongauffier et Font Chaude). Deux essais de traçage sont disponibles pour la source de Sainte Marie de Chignac avec des vitesses moyennes de 3 et 15 m/h. Les bassins d'alimentation de ces sources montrent une présence importante de karst sous couverture peu perméable et en conséquence une plus grande surface de karst de contact. Leurs débits spécifiques sont relativement faibles et la vulnérabilité de la ressource est limitée au regard des infiltrations diffuses (à l'exception des secteurs de karst nu) ; par contre les larges secteurs de karst sous couverture peu perméable vont générer du ruissellement qui pourra se ré-infiltrer de manière concentrée, rendant la ressource vulnérable à ces modalités d'infiltration (exemple du cours d'eau le Manoire dans le bassin d'alimentation de Sainte Marie de Chignac). Ces sources montrent des variations temporelles de concentrations peu marquées.

- Les sources du Toulon et des Moulineaux se situent systématiquement dans une position intermédiaire entre les deux groupes de sources décrits ci-dessus. Il s'agit de sources légèrement sub-thermales qui comprennent une alimentation par une nappe superficielle et une alimentation plus profonde ; le Toulon draine les aquifères du Turonien et du Cénomaniens alors que les Moulineaux drainent le Coniacien-Santonien. Six essais de traçages dans le bassin d'alimentation de la source du Toulon montrent des vitesses moyennes comprises entre 3 et 18 m/h. Leurs débits spécifiques sont comparables aux sources de karst nu fonctionnel (groupe 1) par contre les variations temporelles de concentration sont intermédiaires entre le comportement du groupe 1 (variations marquées) et celui du groupe 2 (peu/pas de variations).

- La dernière source, la Brême, est un cas à part puisque la majorité de son bassin d'alimentation est constitué par une couverture perméable. Elle draine l'aquifère du Coniacien-Santonien qui est essentiellement captif ; elle est décrite comme peu vulnérable par Bichot et al. (1997) et aucun essai de traçage positif n'a été réalisé. Son débit spécifique est faible, comparable au groupe 2 et elle montre de faibles variations temporelles de concentrations.

In fine, ces résultats montrent globalement la cohérence qu'il existe entre les typologies de karst, les indices morphologiques et le comportement des sources karstiques investiguées.

Cat.	sources	Karst nu	Ecart type	karst s/c perm.	Ecart type	Karst s/c imperm.	Ecart type	Karst de contact	Ecart type
1	Glane, Coly, Falgueyret	0.66	0.20	0.07	0.09	0.18	0.10	0.07	0.06
2	Font Chaude, Ste-Marie, Fongauffier, Gadet	0.23	0.07	0.13	0.09	0.49	0.16	0.15	0.02
3	Toulon, Moulineaux	0.27	0.01	0.07	0.01	0.56	0.00	0.11	0.00
4	Brême	0.07	-	0.65	-	0.24	-	0.04	-

Illustration 76 - Classification des sources en quatre catégories et superficie respective des différentes typologies de karst au sein de leurs bassins d'alimentation respectifs

Une analyse des hydrogrammes a été effectuée sur deux sources : la Doux de Coly par Marchet (1991) et la source du Toulon par Lorette (2014) ; il en ressort que ces deux sources sont très distinctes dans leur comportement, ce qui est bien mis en évidence dans un diagramme de Mangin (Illustration 77) :

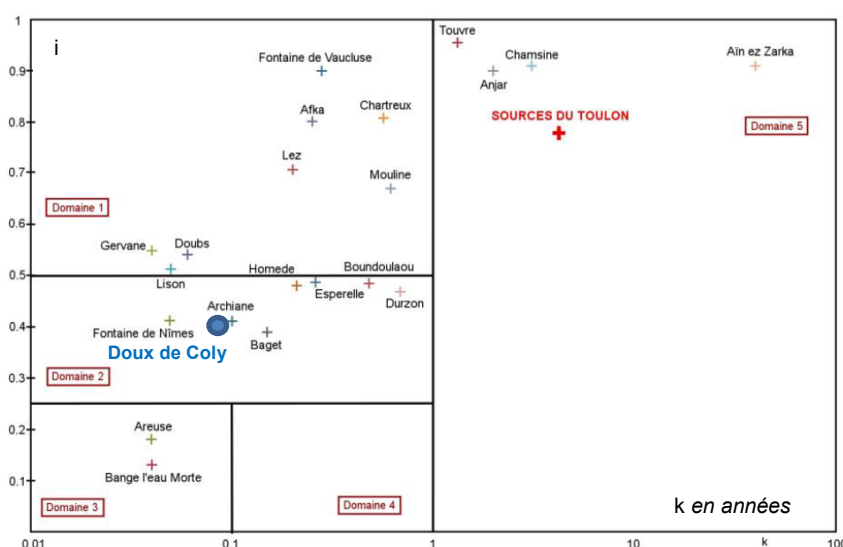


Illustration 77 - Diagramme de classification des sources karstiques proposée par Mangin avec report de la source du Toulon et de la Doux de Coly (modifié de Lorette 2014)

4.3. PERSPECTIVES SUR LA VULNERABILITE ET LA RECHARGE

L'analyse des conditions d'infiltration, à l'échelle départementale, des karsts de Dordogne a consisté à comparer par des outils statistiques la typologie des karsts (karst nu, sous couverture, de contact), les éléments de morphologie karstique (dolines, pertes, vallées sèches) et de conditions de ruissellement (densité de drainage superficiel, IDPR) avec des informations hydro(géo)logiques (débits spécifiques, fonctionnement de sources karstiques). Les résultats montrent une cohérence d'ensemble en lien avec la typologie du karst :

Les bassins versants dominés par le karst nu sont alimentés par de l'infiltration diffuse (forte densité d'indices karstiques) et montrent des débits spécifiques faibles indiquant une faible capacité de stockage (et/ou un déficit d'écoulement en raison d'une alimentation des nappes plus profondes) ; ce contexte regroupe également les sources qui montrent le plus de variabilité saisonnière des concentrations en ions majeurs (chlorure, nitrate, magnésium) ;

Les bassins versants dominés par le karst sous couverture montrent une capacité d'infiltration réduite (peu d'indices karstiques, forte densité de ruissellement superficiel) et des débits spécifiques plus élevés indiquant un stockage plus efficace des eaux d'infiltration (p.ex. au sein de la couverture).

Se surimpose à ce schéma, une composante profonde de l'alimentation de certaines sources karstiques qui contribue à réguler leur débit tout en modifiant partiellement leur composition physico-chimique.

En termes de vulnérabilité de la ressource en eau, les secteurs à karst nu sont vulnérables puisqu'ils favorisent le transfert rapide d'eau de la surface vers le réseau de drainage karstique. Les secteurs de karst sous couverture semblent relativement protégés (infiltration lente au travers des formations perméables, ruissellement sur les formations de couverture peu perméables) ; par contre si l'aval de ces karsts sous couverture peu perméable sont en contact avec le karst nu (karst de contact), il y a possibilité d'infiltration concentrée du ruissellement vers le réseau de drainage karstique ; ces situations représentent donc une vulnérabilité accrue.

L'utilisation de la carte de typologie des karsts pour une cartographie départementale de la vulnérabilité semble une piste intéressante ; cependant elle nécessite une phase de validation sur des sites montrant des caractéristiques variées. En particulier, la distinction entre karst sous couverture perméable et peu perméable semble arbitraire dans certains cas et il est vraisemblable que certaines formations caractérisées actuellement comme perméables, ne le sont en réalité pas. Une telle situation peut évidemment modifier significativement la vulnérabilité à l'aval (possibilité d'une zone de karst de contact). Une approche objective pour préciser la nature des couvertures est la mesure de la radiométrie spectrale de la couverture qui informe directement sur la teneur et la nature des minéraux argileux. Il conviendrait en parallèle d'intégrer les cartes des sols (et de végétation) existantes afin de préciser la nature de cette couverture.

L'estimation de la recharge est une question a priori plus délicate à aborder car elle comporte deux échelles qui peuvent être imbriquées : la recharge des aquifères libres qui sont drainés par les sources karstiques et la recharge des aquifères captifs qui contribue au flux au sein de l'aquifère multicouches du bassin sédimentaire aquitain. La recharge est diffuse au sein des secteurs à karst nu et karst sous couverture perméable ; elle est concentrée en aval des karsts sous couverture peu perméable et le long de certains tronçons de cours d'eau. Ces mêmes cours d'eau constituent également les zones d'émergence des nappes libres, voire également de nappes captives (sources hyperthermes). Localement la situation peut être complexe

comme par exemple le long du Céou où des pertes vers la nappe libre coexistent avec des sources hyperthermes indiquant la concomitance d'une vidange d'une nappe plus profonde (Fradet 1985) ; un autre exemple est la capture d'une partie du débit de l'Auvézère au profit de l'Isle par les pertes du Moulin du Souci.

Au vu de cette complexité, il semble difficile en l'état de quantifier la recharge vers les aquifères captifs. Les méthodes de cartographie de la recharge telles qu'APLIS (Andreo et al. 2008) ne sont pas applicables car elles concernent des sources en contexte montagneux. L'IDPR ne permet de retranscrire que le caractère ruisselant ou infiltrant maille par maille et ne retranscrit en aucun cas les flux latéraux qui sont prépondérants dans ces contextes de fluviokarst et karst sous couverture.

Dans le cas de la Dordogne, les échanges entre les cours d'eau et les nappes karstiques constituent un élément essentiel des flux. La difficulté pour la quantification de ces flux est en partie expérimentale puisque les cours d'eau principaux ont des débits importants et les incertitudes liées à la mesure de leurs débits peuvent correspondre à des valeurs de flux tout à fait significatives. Il pourrait cependant être intéressant d'acquérir de nouvelles données en période d'étiage, par exemple en utilisant la thermographie pour localiser des émergences de nappe et en effectuant des jaugeages différentiels dans ces secteurs. Une approche complémentaire serait une analyse des cotes du réseau hydrographique en comparaison avec les cotes piézométriques des différentes nappes afin de préciser la direction des flux. A titre d'exemple, les profils de quatre cours d'eau en Dordogne ont été constitués (Illustration 78) : ceux-ci montrent une pente des cours d'eau bien plus importante dans le secteur de socle en amont puis des pentes plus ou moins douces dans le secteur karstique ; on voit également que la Dronne est en position haute et pourrait potentiellement être en situation d'alimenter des nappes karstiques alors que la Vézère montre un profil différent qui est à rattacher au bassin hydrologique de la Dordogne.

Les concepts développés ici sont applicables à d'autres contextes de karst sous couverture.

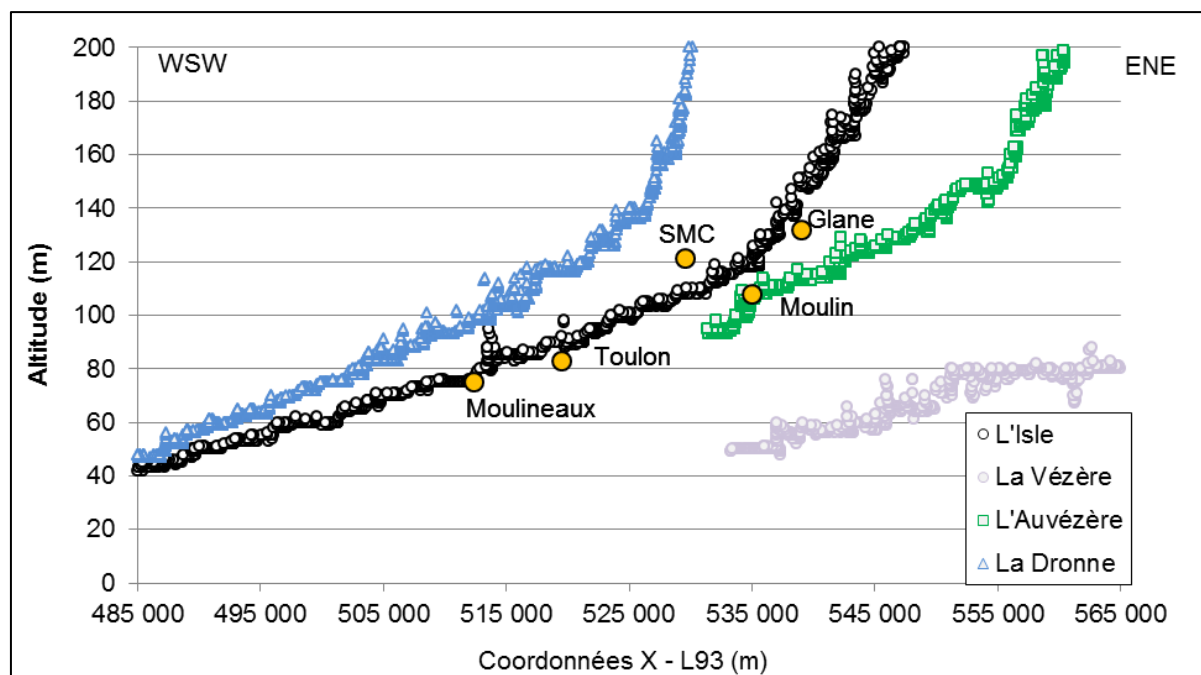


Illustration 78 - Profils d'altitude des cours d'eau principaux (à l'exception de la Dordogne) projeté sur un plan N60E passant à proximité du cours de l'Isle. Les cotes et la localisation approximative des sources principales situées dans la vallée de l'Isle sont également représentées (ronds oranges)

5. Conclusion

La compréhension du fonctionnement des aquifères carbonatés nord-aquitains et notamment ceux de Dordogne s'est poursuivi au cours de cette quatrième année autour de deux axes. Les travaux réalisés sont synthétisés sur l'illustration 79.

	Donnée/information	Objectif	Résultats année 1	Résultats année 2	Résultats année 3	Résultats année 4
Volet géologique	Aspects géomorphologiques	inventaire formes karstiques en surface inventaire formes karstiques en profondeur MNT 25 m	fonctionnement karstique, histoire karstification paléosurface, histoire karstification	inventaire des dolines (terrain et bibliographie) répartition spatiale des conduits karstifiés traitement SIG effectué	cartographie des modalités d'infiltration au sein de bassins d'alimentation	Analyse du drainage et des conditions d'infiltration
	Aspects géologiques sensu stricto	carte géologique logs géologiques	contexte, zones karstifiables	harmonisation de la carte géologique cartographie de la couverture logs régionaux de référence		
	Aspects paléo-environnementaux	cartes paléogéographiques, climatologie, eustatisme	histoire karstification	identification et compilation des cartes paléogéographiques disponibles	synthèse paléogéographique et structurale	
	Aspects structuraux	cartes tectoniques (plis, fractures, failles, ...)	plans de drainage potentiels, géométrie des aquifères	synthèse générale (bibliographie et relevés de fracturation)	ajouts et homogénéisation des structures tectoniques + synthèse	
	Piézométrie	fonctionnement de l'aquifère	recupérée			1ères analyses statistiques
	Débits de source	fonctionnement de l'aquifère	recupération des suivis de 4 sources	1 source équipée + 2 autres suivis récupérés : lancement de jaugeages	inventaire des sources Compilation données de débits (bibliographie + terrain) Poursuite des courbes de tarage sur 3 sources (Moulineaux, Glane, Toulon)	Finalisation inventaire des sources Poursuite des mesures de débits Mise à disposition des fiches descriptives de sources
Volet hydrogéologique	Météorologie	support d'analyse de chroniques	stations identifiées : récupération des données selon les besoins			
	Traçages artificiels	vitesse d'écoulement, fonctionnement	base de données constituée		cartographie des modalités d'infiltration au sein de bassins d'alimentation	Bancarisation dans BD Traçages
	Bassins d'alimentation	caractérisation des aquifères (limites)	données récupérées			Analyse du drainage et des conditions d'infiltration
	Physico-chimie	fonctionnement de l'aquifère	premières interprétations (faciès chimique, distribution spatiale, ACP, AFD, ...)	Poursuite des interprétations (ACP, Diagrammes binaires, Variabilité temporelle, P _{CO2})	acquisition ions majeurs + poursuite interprétation P _{CO2}	
	Pertes/bulides	fonctionnement karstique	partiellement récupérées	Analyse des bulides	poursuite inventaire bulides	
	Datations	âge des eaux souterraines	partiellement récupérées			

Illustration 79 - Tableau synthétique des travaux réalisés au cours des 4 années du module

Le premier axe a permis de finaliser l'inventaire des sources de Dordogne sur la base des documents bibliographiques et des enquêtes auprès des mairies. 3244 sources sont ainsi recensées en Dordogne, chiffre qui sera affiné sur le long terme à la suite de vérifications de terrain et l'apport de travaux futurs (thèses, rapports de bureaux d'étude). Cet inventaire a également été l'occasion de collecter dans un premier temps des données sur le débit et la physico-chimie des sources soit au travers de l'exploitation de données bibliographiques soit d'un travail de terrain réalisé à l'été 2016. L'ensemble de ces données a ensuite été valorisé au travers de fiches descriptives mises en ligne sur le SIGES Aquitaine via l'espace cartographique. Ces fiches constituent à l'heure actuelle, le seul espace de stockage actuellement disponible permettant disposer à la fois des mesures de débits des sources avec la méthode utilisée et le lieu de mesure. Le travail réalisé cette année a également permis de bancariser une grande partie des données de traçages collectées tout au long du projet (le reste devant être bancarisé par le comité départemental de spéléologie et certains bureaux d'études en tant que propriétaires de la donnée).

Le second axe de travail a consisté à mettre en œuvre des méthodes d'exploitation des chroniques piézométriques afin de fournir de premiers éléments de caractérisation des aquifères au sein des formations jurassiques et crétacés. Le nombre de chroniques exploitables s'est avéré restreint avec une répartition géographique limitée. Ces premières analyses (ACP et analyses corrélatoires) ont permis de faire ressortir des groupes de piézomètres aux caractéristiques différentes, que ce soit pour le Jurassique et le Crétacé, en Dordogne et dans les autres départements. Ces premières analyses ont permis, au-delà de faire un inventaire exhaustif des chroniques piézométriques pertinentes à l'échelle du Bassin nord-aquitain, de cibler les travaux futurs qui passeront par la remise en contexte hydrogéologique des ouvrages

étudiés, par la densification de données (intégration des suivis de sources et utilisation d'outils permettant de s'affranchir de forçages (prélèvements, baisse ou hausse piézométrique continue sur le long terme)) et la mise en œuvre d'autres outils permettant notamment d'évaluer les relations pluie-niveaux piézométriques voire suivis physico-chimiques dans le but de préciser le fonctionnement des hydrosystèmes.

Enfin, les analyses des conditions d'infiltration à l'échelle départementale ont montré la cohérence d'ensemble offerte par la typologie du karst (karst nu, sous couverture, de contact) laissant envisager au travers d'une cartographie départementale de cette typologie une approche intéressante pour caractériser la vulnérabilité de la ressource en eau.

6. Bibliographie

Andreo B., Vias J., Durán J.J., Jiménez P., López-Geta J.A., Carrasco F. (2008) - Methodology for groundwater recharge assessment in carbonate aquifers: application to pilot sites in southern Spain. *Hydrogeology Journal* 16: 911–925.

Bichot F., Chery L., Cournil T., Lastennet R., Platel J.P., Sourisseau B., Vouvé J. (1997) - Préservation de la qualité des eaux de la nappe du Crétacé supérieur du sud-est de la Dordogne et du nord-est du Lot et Garonne – Protection des captages de la Brame et Gadet. Rapport public BRGM R39577, 106 p.

Cabaret O., Gutierrez T., Perrin J. (2012) - Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne - Module 4 - Année 3. Rapport final. BRGM/RP-61681-FR, 82 p., 45 fig., 6 ann.

Cabaret O., Gutierrez T., Perrin J., avec la collaboration de Goubier J. B., Lorette G., Lastennet R. et Minvielle S. (2014) - Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts libres et sous couverture du département de la Dordogne - Module 4 - Année 4. Rapport final. BRGM/RP-62902-FR, 131 p., 110 ill., 10 ann. sur 1 CD.

Croskrey A., Groves C. (2008) - Groundwater sensitivity mapping in Kentucky using GIS and digitally vectorized geologic quadrangles. *Environ Geology* 54:913–920.

Dörfliger N., Crochet P., Guérin R., Jozja N., Marsaud B., Mondain P., Muet P., Plagnes V. (2010) - Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. BRGM/RP-58237-FR, 246 p., 82 illus., 5 ann.

Florea L.J. (2005) - Using state-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure: *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 67, no. 2, p. 120–124.

Ford D., Williams P. (2007) - *Karst Hydrogeology and Geomorphology* (revised edition): Chichester, West Sussex, John Wiley and Sons Ltd., 562 p.

Fourniguet G., Boucher J., Nguyen-Thé D. (2010) - Référentiel hydrogéologique français BDLISA, bassins Rhin-Meuse et Seine Normandie – Année 3. Rapport public BRGM/RP-57519-FR.

Fradet P. (1985) - Etude hydrogéologique du bassin aval du Céou (affluent de la Dordogne) – recherche d'eau souterraine destinée à l'irrigation. Thèse de doctorat Université de Franche-Comté : 202 p.

Glennon A., Groves C. (2002) - An examination of perennial stream drainage patterns within the Mammoth Cave watershed, Kentucky. *Journal of Cave and Karst studies* 64 (1): 82-91.

Gutierrez T., Cabaret O., Perrin J., avec la collaboration Stöckle A. (2016) - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Connaissances des karsts aquitains - Étude des karsts

libres et sous couverture du département de la Dordogne. Module 4 - Année 5 – Convention 2008-2013. Rapport final BRGM/RP-64800-FR, 53 p., 31 ill., 4 ann.

Husson E. (2015) - Origine, caractérisation et distribution prédictive du Karst sur la bordure Nord-Aquitaine. Synthèse bibliographique & rapport d'avancement. Rapport intermédiaire BRGM/RP-65041-FR, 72 p., 41 ill., 5 ann

Husson E. (2017) - Origine, caractérisation et distribution prédictive du Karst sur la bordure Nord-Aquitaine. rapport final. En cours de parution.

Komac M., Urbanc J. (2012) - Assessment of spatial properties of karst areas on a regional scale using GIS and statistics – the case of Slovenia. Journal of Cave and Karst studies 74(3): 251-261.

Lorette G. (2014) - Etude hydrogéologique des sources du Toulon (Dordogne). Mémoire de Master 2, Université d'Avignon : 136 p.

Mangin A. (1981) - Utilisation des analyses corrélatoire et spectrale dans l'approche des systèmes hydrologiques. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, 293, pp.401-404.

Marchet P. (1991) - Approche de la structure et de l'évolution des systèmes aquifères karstiques par l'analyse de leur fonctionnement - Application au NW du Causse de Martel (Quercy, France). Thèse de l'Université de Toulouse, 327 p.

Platel J.P., Pédron N., Gomez E., Saltel M. (2010) - Perspectives de gestion des nappes du Secondaire en Agenais-Périgord. Synthèse géologique et hydrogéologique, modélisation hydrodynamique. BRGM/RP-59330-FR, 217p., 101 fig., 12 tab., 19 ann.

Ray J. (1999) - A model of karst drainage basin evolution, interior low plateaus, USA, in Palmer, A.N., Palmer, M.V., and Sasowsky, I.D., eds., Karst modeling: Leesburg, Va., Karst Waters Institute Special Publication 5, p. 58.

Ray J. (2001) - Spatial interpretation of karst drainage basins: in Beck, B.F., and Herring, J.G., eds., Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology, Proceedings of the Eighth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental and Engineering Impacts of Karst, April 1–4, 2001, Louisville, Kentucky: Lisse, Balkema Publishers, p. 235–244.

Saltel M., Willeumier A., Cabaret O. (2016) – Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Développements et maintenance du Modèle Nord-Aquitain de gestion des nappes – Module 1 – Année 5. BRGM/RP-65039-FR, 82 p., 39 ill., 21 tab, 10 ann.

Saplaïroles M., Mauroux B., Ducasse G. (2005) - Gestion des eaux souterraines en Région-Aquitaine. Appui à la mise en place des réseaux départementaux de suivi qualité et quantité. Module 1. Année 2. BRGM/RP-53647-FR, 139 p., 28 ill., 6 ann

Annexe 1

Tableau du nombre de mesures piézométriques disponible par an pour chacun des 87 ouvrages sur la période 1984-2016

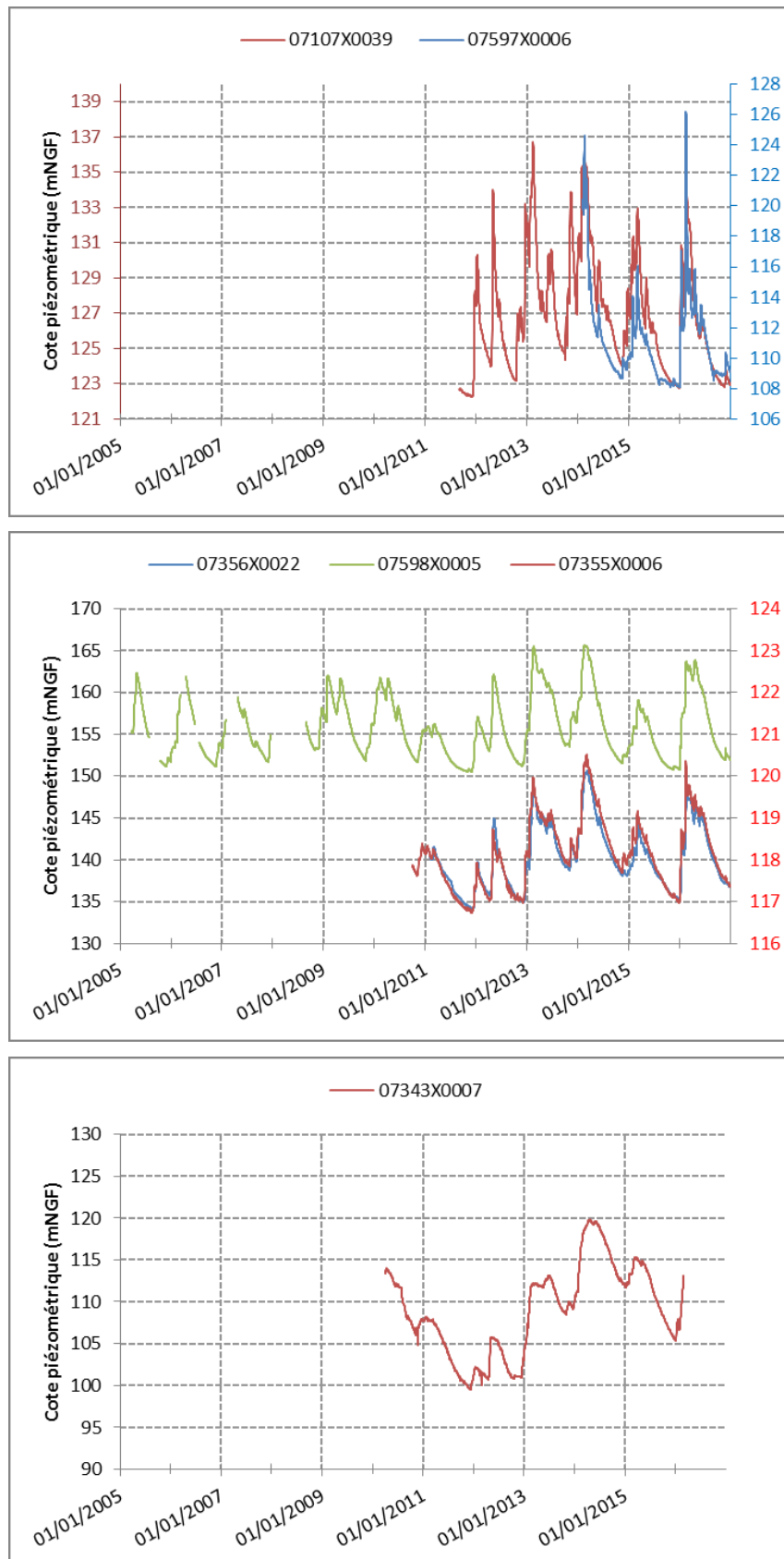
Les chiffres ci-dessous correspondent au nombre de jour dans l'année avec une mesures piézométrique

Les entités aquifères indiquées comme « Mélange » indique que l'origine de l'eau est probablement double (Jurassique et Crétacé)

Dpt	Indice BSS	Entité aquifère	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Dordogne	07107X0039/S3	Jurassique																											122	366	365	365	365	366		
	07343X0007/F	Jurassique																											275	365	366	365	365	366		
	07345X0023/F	Crétacé																							346	365	366	365	365	366	365	365	365	352		
	07346X0017/F	Crétacé																						29	365	365	366	365	365	346	337	249	365	365	366	
	07355X0006/F	Jurassique																											94	365	366	365	365	366		
	07356X0022/P2	Jurassique																											341	366	365	365	365	366		
	07583X0018/F	Crétacé																											284	365	366	365	365	366		
	07584X0002/F	Crétacé																						348	365	365	366	365	365	365	366	365	365	366		
	07588X0045/F4	Crétacé																						330	255	365	275	345	229							
	07595X0006/F3	Crétacé																						332	348	365	366	365	365	365	366	365	365	366		
	07595X0009/F	Crétacé															86	365	366	365	192	264	366	365	348	314	158	230	365	331	366	365	365	365	366	
	07597X0006/F	Jurassique																																334	365	366
	07598X0005/A81	Jurassique																							201	293	268	127	365	365	365	366	365	365	366	
	07823X0007/F	Crétacé																											165	365	365	366	365	365	366	
	07825X0043/S4	Crétacé																										18	78	123	177	301	365	365	365	366
	07827X0006/F	Crétacé																					344	366	336	365	365	366	365	347	365	366	365	365	366	
	07835X0003/F3	Crétacé																					284	366	340	365	365	366	365	365	366	365	365	365	366	
	08063X0014/F	Crétacé																											216	300	330	231	365	365	366	
	08067X0017/F	Crétacé																												188	366	365	365	365	366	
	08071X0024/F	Crétacé																												187	366	365	365	365	365	311
	08071X0026/F	Crétacé																					345	366	365	365	336	277	365	365	366	342	365	365	366	
	08075X0013/F	Crétacé																											281	365	366	365	365	365	337	366
	08081X0026/SE.20	Crétacé																					343	366	365	365	365	288	253	365	365	366	365	365	366	
	08087X0022/P2	Crétacé																											164	365	365	366	365	365	365	366
	08305X0002/F	Crétacé																											77	365	366	365	317	365	366	
	Charente	06604X0179/F	Jurassique													292	366	352	343	365	366	365	295	365	366	365	365	365	334	365	365	366	365	365	348	341
		06608X0027/AC-3	Jurassique													164	365	365	366	365	365	278	364	89	247	346	366	365	365	365	366	365	365	366	365	366
		06613X0039/S	Jurassique									170	365	365	350	366	365	365	365	366	319	329	365	366	365	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	356
		06616X0068/PIEZO	Jurassique													121	366	303	365	365	366	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	365	366
		06617X0042/S	Jurassique									200	350	304	366	365	317	365	366	308	365	365	366	365	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	366	
		06617X0056/F	Jurassique																																	
		06617X0057/F	Jurassique																																	
		06622X0068/S	Lias																																	
06844X0070/F		Inconnu																																		
06851X0071/S		Jurassique													132	365	262	365	366	365	365	365	365	366	365	365	365	366	365	365	366	365	365	365	366	
06853X0053/S		Lias													170	365	292	365	366	365	365	339	366	323	365	335	299	365	365	340	366	365	340	365	365	366
06854X0051/S		Jurassique													177	274	365	365	366	247	365	358	312	349	322	271	297	365	365	365	366	365	366	365	365	366
06858X0036/F		Jurassique													179	256	365	365	323	328	352	365	366	365	365	328	290	365	365	365	366	365	365		302	
06865X0020/S		Jurassique	343	365	365	365	366	365	365	365	305	365	365	365	365	365	365	365	365	292	274	269	321	341	366	365	339	332	366	365	365	365	365	365	366	
06866X0018/F		Lias																																		
07091X0042/P		Jurassique																																		
07097X0057/3		Crétacé																																		
07097X0067/F		Crétacé																																		
07098X0037/F		Jurassique																																		
07101X0041/S		Jurassique																																		
07326X0028/S		Crétacé																																		
07332X0530/F2		Crétacé																																		
07333X0027/F		Crétacé																																		
Gironde	07548X0009/F	Crétacé																																		
	07555X0071/FB	Crétacé	33	37	29	28	30	32	38	34	26	27	29	28	45	42	35	34	41	26	41	29	319	308	365	365	366	365	365	365	347	274	365	332	95	
	08033X0157/F1	Crétacé																																		
	08037X0398/F1	Crétacé	211	115	67	180	134	325	188	63	27	174	172	69	188	199	189	291	225	271	197	272	339	227	336	331	366	365	306	336	296	309	365	365	366	
	08512X0002/F	Crétacé																																		
Lot	08518X0002/F	Crétacé																				</														

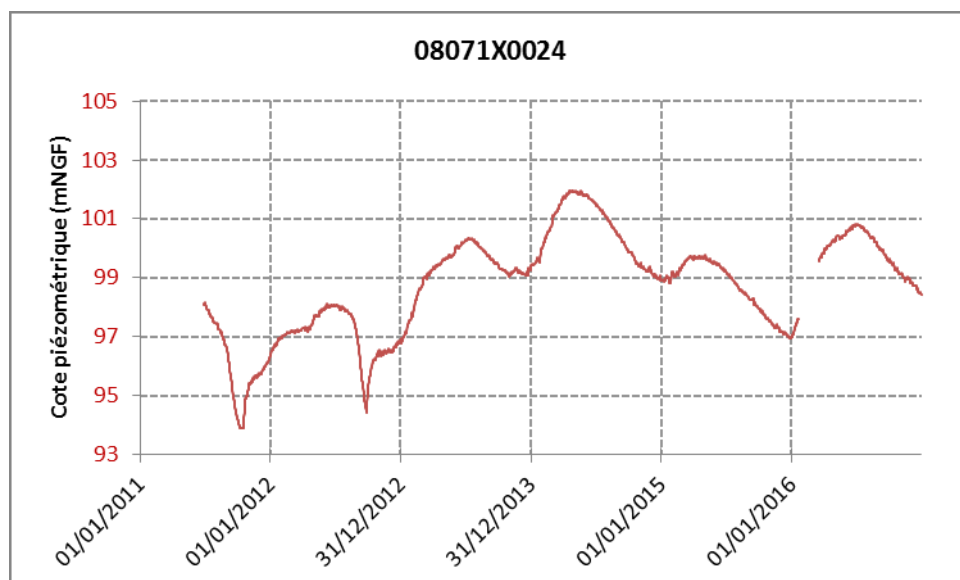
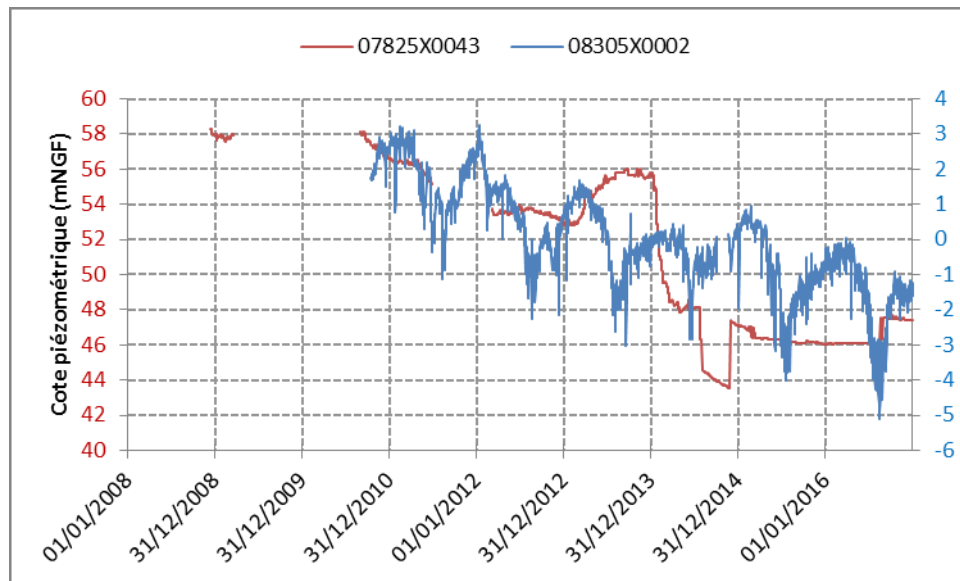
Annexe 2

Chroniques piézométriques par groupes constitués des 6 piézomètres jurassiques de Dordogne



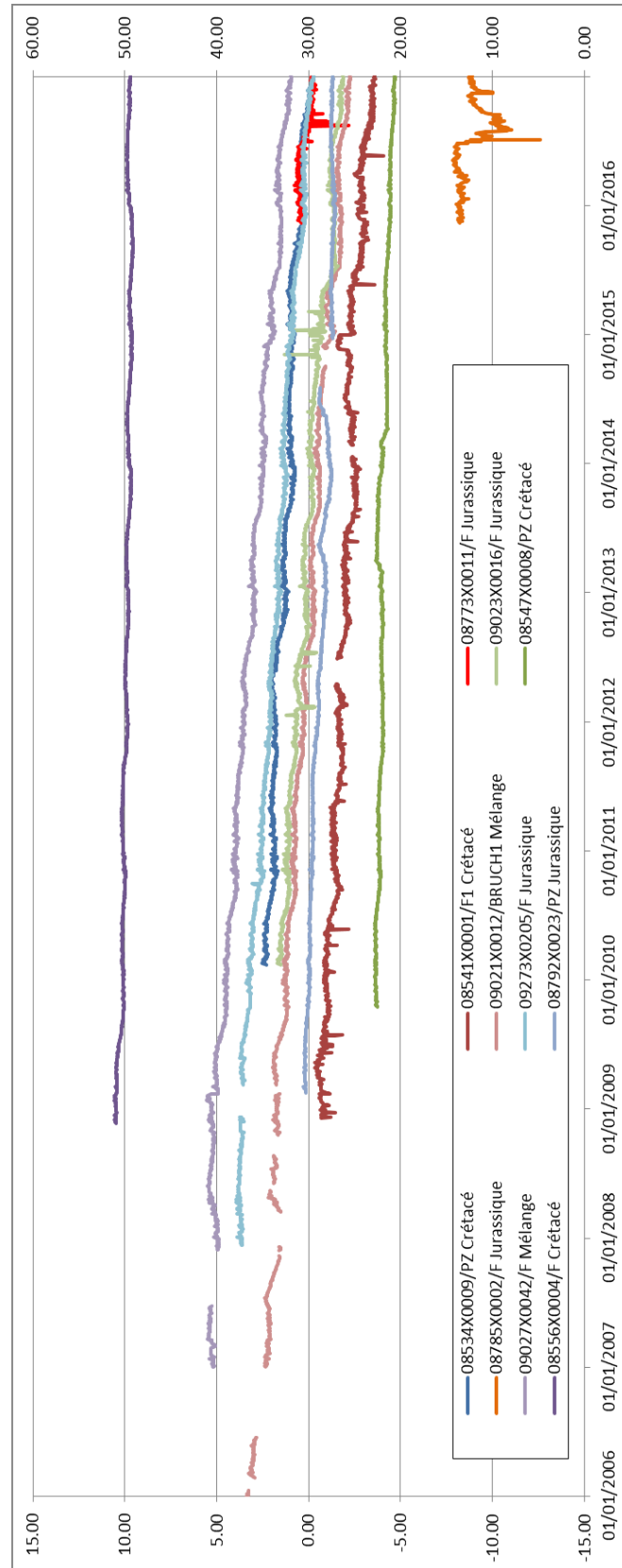
Annexe 3

Chroniques piézométriques du Crétacé de Dordogne écartées de l'analyse



Annexe 4

Évolution des 11 chroniques piézométriques du Lot-et-Garonne



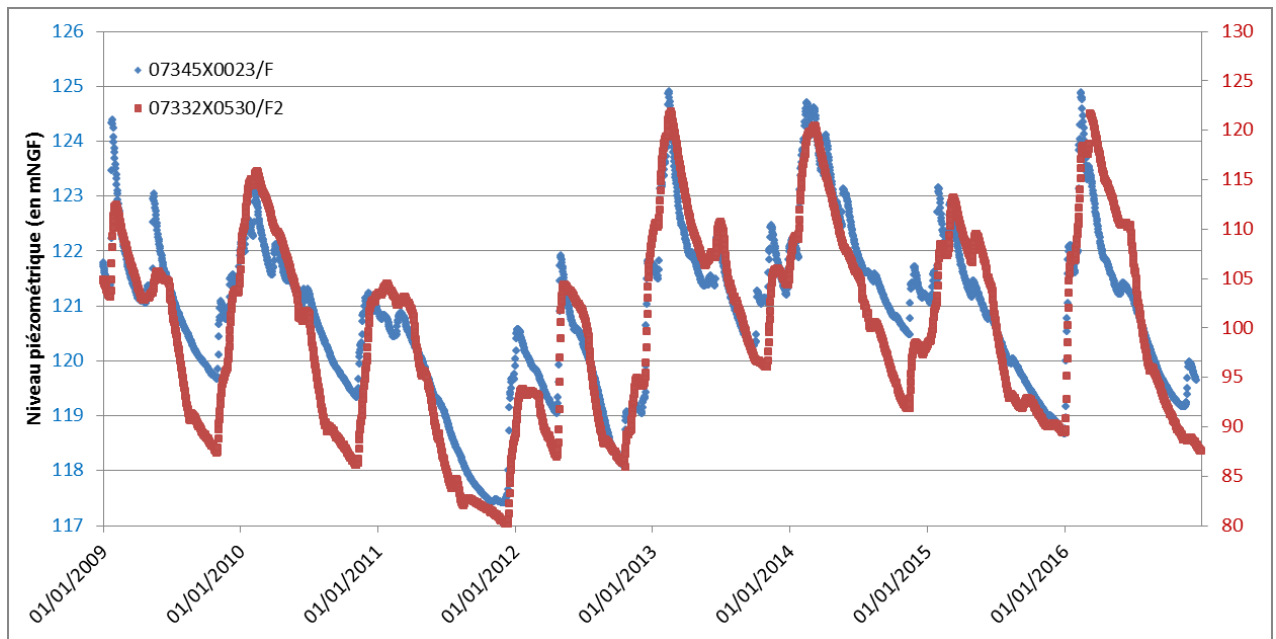
Annexe 5

**Matrice de corrélations obtenue lors de l'ACP
des 27 chroniques piézométriques longues**
(les résultats sont présentés selon un dégradé de couleurs :
en bleu, les valeurs les plus élevées, en rouge les plus faibles)

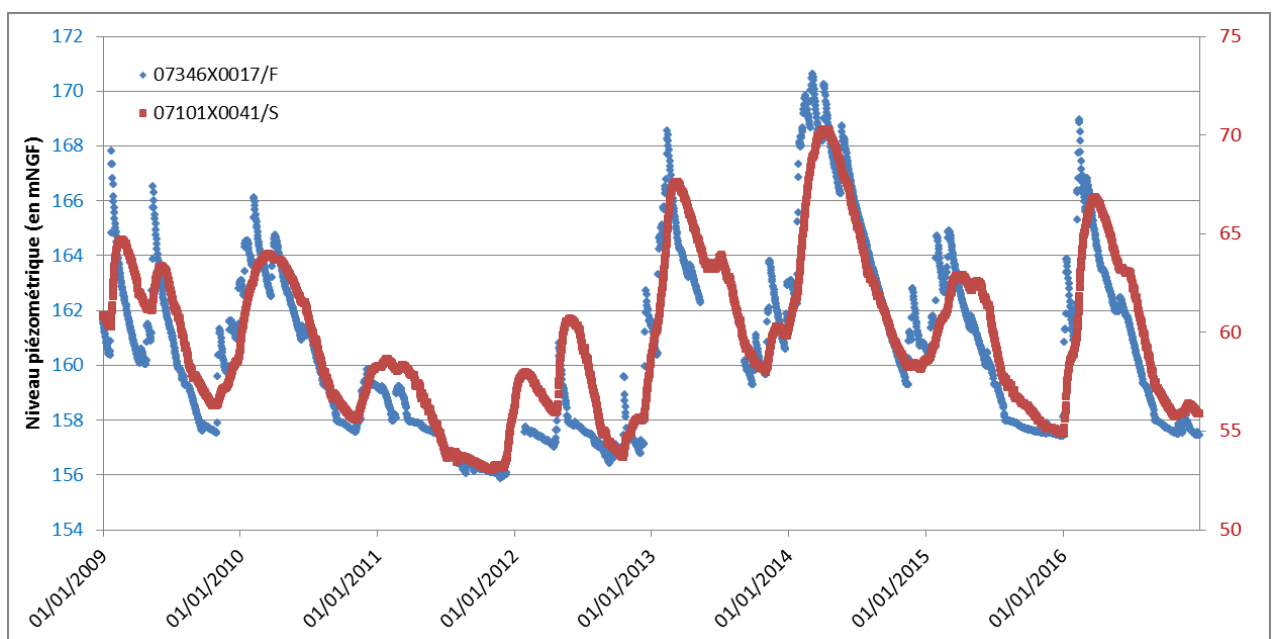
[illegible]

Annexe 6

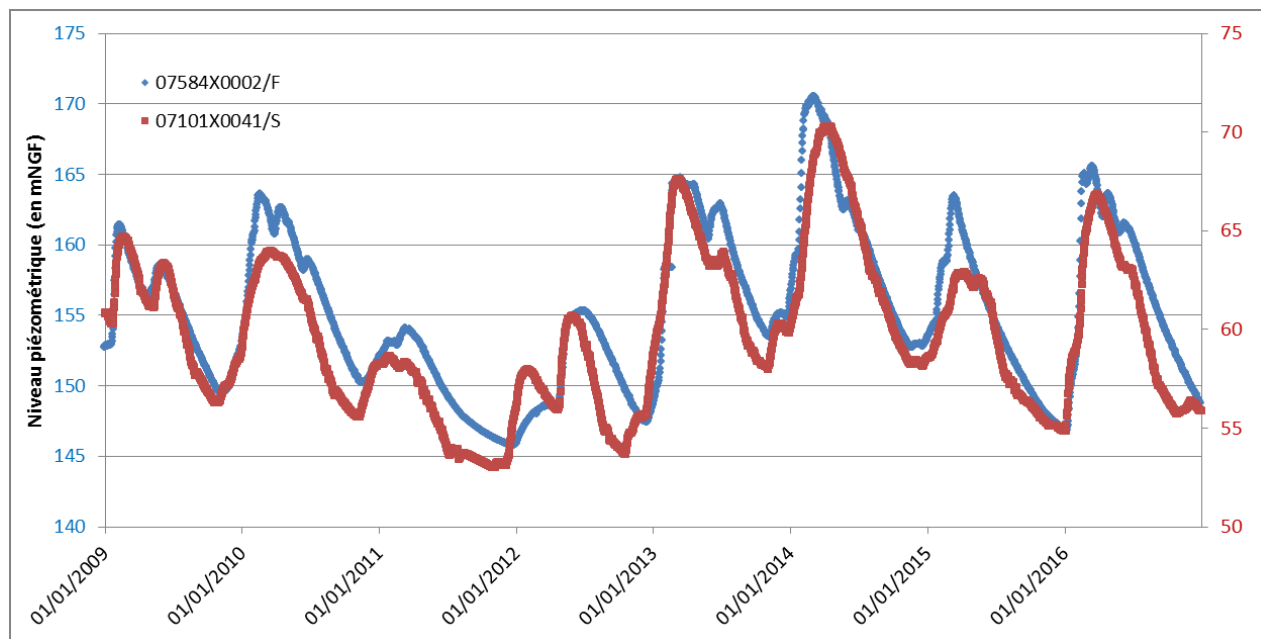
Couples piézométriques obtenus des corrélations sur les longues chroniques piézométriques



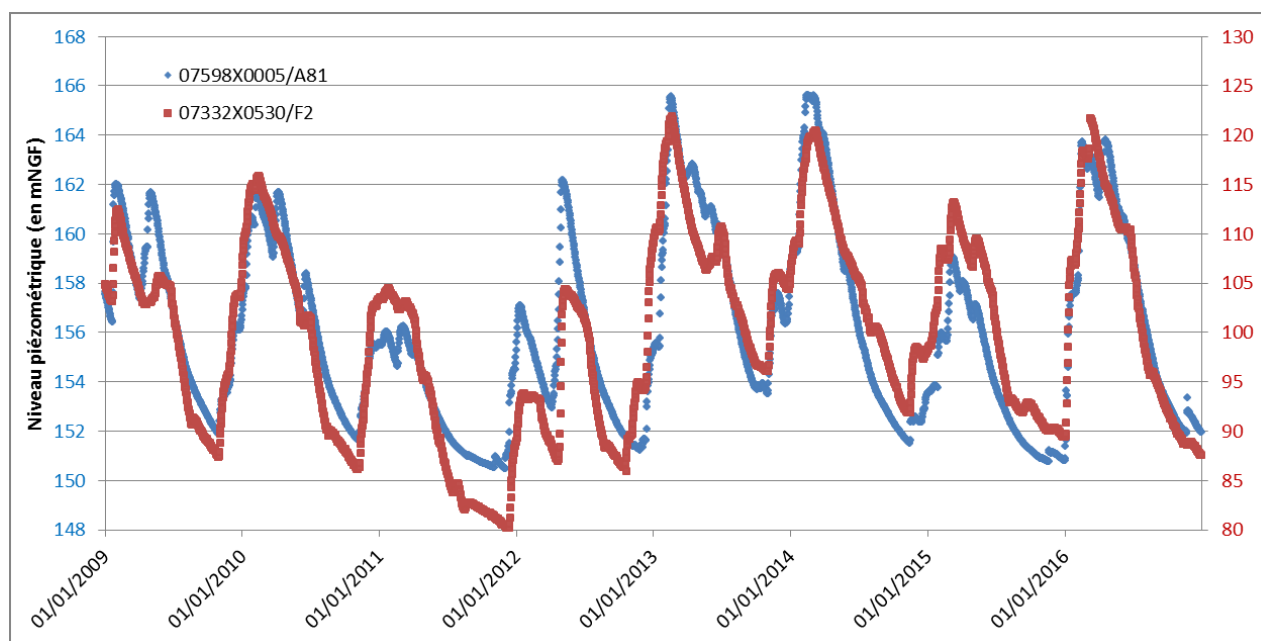
Piézométries des forages 07345X0023/F et 07332X0530/F2.



Piézométries des forages 07346X0017/F et 07101X0041/S.



Piézométries des forages 07584X0002/F et 07101X0041/S



Piézométries des forages 07598X0005/A81 et 07332X0530/F2



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 Nouvelle-Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, avenue Léonard de Vinci

33600 Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70