



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Etude des écoulements souterrains et des relations nappe–rivière dans la basse vallée de la Drôme (26)

Rapport final

BRGM/RP-72759-FR

Version 3 du 12 janvier 2024

Étude réalisée dans le cadre des projets de recherche et développement

Bertin C., Cartannaz C., Gourcy L., Lasseur E., Malcuit E., Stéphane M.,
Surdyk N.

Vérificateur :

Nom : J. Lions

Fonction : 089 3740 46 -625.5

Date : 10/10/2023

Signature :

Approbateur :

Nom : S. Buschaert

Fonction : Directeur Auvergne Rhône
Alpes

Date : 15/01/2024

Signature :

S. BUSCHAERT

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



Mots clés : Nappe alluviale, rivière, molasse miocène, alluvions, aquifère, jaugeage, Drôme, basse vallée, bassin du Bas-Dauphiné

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

Bertin C., Cartannaz C., Gourcy L., Lasseur E., Malcuit E., Stéphane M., Surdyk N. 2024. Etude des écoulements souterrains et des relations nappe–rivière dans la basse vallée de la Drôme (26). Rapport final V3. BRGM/RP-72759-FR, 186 p.
Version 1 en date du 15/05/2023
Version 2 prenant en compte les retours du comité de suivi en date de septembre 2023, les compléments d'analyses sur le forage de Grâne et les recommandations finalisées
Version 3 finale prenant en compte les demandes du COTEC du 4 décembre 2023.

Synthèse

La basse vallée de la Drôme est confrontée depuis plusieurs années à une dégradation de l'état quantitatif et qualitatif des aquifères les plus sollicités pour l'alimentation en eau potable et pour les usages agricoles. Ces problématiques se retrouvent également pour les eaux de surface, notamment la rivière Drôme. Malgré les différentes actions mises en œuvre, le contexte global de l'hydrosystème n'évolue pas favorablement.

La présente étude a pour objectifs 1) de réaliser un diagnostic global sur la caractérisation quantitative et qualitative des eaux souterraines et des eaux de surface, 2) d'évaluer la nature des pressions qui s'exercent sur les ressources en eau et 3) de proposer des pistes d'actions pour améliorer la gestion quantitative et qualitative des ressources en eau.

Afin de mieux connaître le contexte géologique de la zone d'étude qui s'étend d'amont en aval, de Crest à la confluence avec le Rhône, une synthèse géologique détaillée et un retraitement de lignes sismiques datant des années 1960 ont été réalisés. La recherche et l'interprétation des données existantes, couplées à des investigations de terrain (jaugeage, mesures piézométriques et physico-chimiques et prélèvements d'eau pour analyse) ont été effectués dans l'objectif d'une meilleure caractérisation des différents compartiments de l'hydrosystème de la Drôme.

Les principaux éléments qui ont été mis en évidence dans le cadre de la présente étude sont :

- Les eaux souterraines et superficielles du secteur d'étude présentent un faciès principalement bicarbonaté-calcique. Il est cependant possible de distinguer plusieurs types d'eau pour ce même faciès ;
- Les principaux types ou pôles qui ont été identifiés sont : le pôle des **eaux des alluvions** qui peut être subdivisé en alluvions anciennes et alluvions récentes, le pôle des **eaux de la molasse miocène** au sein desquelles existe une différenciation entre les nappes superficielles et les nappes profondes; le pôle des **eaux des calcaires oligocènes**, le pôle des **eaux des calcaires crétacés** et le pôle des **eaux de surface** dont la signature chimique est quasi-constante sur tout le linéaire de la rivière Drôme.
A ces 5 grands contextes hydrogéochimiques, se rajoutent les **eaux des formations pliocènes** qu'il est moins aisé de différencier en raison notamment de similitudes chimiques avec les eaux des nappes profondes de la molasse miocène ;
- Des interactions et des relations ont pu être mises en évidence entre les différents pôles : eaux superficielles/ eaux des alluvions récentes, eaux des alluvions anciennes/ eaux des calcaires oligocène par ex. , ou suspectées entre certaines nappes profondes du Miocène et du Pliocène ;
- Concernant la rivière Drôme et ses relations avec la nappe alluviale, il a été montré que le cours d'eau est sujet à des fluctuations temporelles et spatiales de son débit. Selon les secteurs, la Drôme draine la nappe ou est alimentée par cette dernière, il existe aussi des tronçons où les relations hydrauliques entre les deux milieux semblent restreintes comme vers Crest par exemple. En période d'étiage, la diminution du débit de la rivière peut se traduire par l'apparition d'assecs notamment en amont du seuil de la CNR.

Les recommandations proposées pour améliorer la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau de la basse vallée de la Drôme sont détaillées en conclusions du rapport et synthétisées comme suit :

- **Densifier le réseau de suivi des eaux souterraines** dans les secteurs présentant des enjeux majeurs en particulier la nappe des alluvions récentes de la Drôme. Dans la zone d'étude, cette nappe ne comporte actuellement que quatre points de suivi qui ne permettent pas de retranscrire tous les éléments qui peuvent avoir une influence sur la piézométrie de la nappe. Dans le secteur compris entre Allex/Grâne et Crest, la densification du réseau de suivi pourrait s'accompagner de l'élaboration d'un modèle hydrodynamique permettant d'évaluer l'impact des prélèvements. Par ailleurs, il est proposé d'intégrer le forage créé dans le cadre de l'étude (forage de Grâne) dans un réseau de suivi notamment piézométrique, des nappes profondes de la molasse miocène, non suivies actuellement dans le bassin de Crest ;
- **Confirmer par un suivi détaillé des périodes d'assecs au seuil CNR, la relation avec les mesures piézométriques des ouvrages de Livron et Loriol**, dans l'objectif de déterminer préventivement la survenue des assecs ;
- **Recenser et contrôler le bon état des puits et forages de la nappe alluviale de la Drôme et des nappes de la molasse miocène** afin de mettre en œuvre des actions visant à réduire la vulnérabilité des nappes (ex. réhabilitation ou comblement des ouvrages vétustes).
Par ailleurs, cette connaissance exhaustive des ouvrages de prélèvements et des volumes prélevés peut permettre de mieux gérer les ressources et de prévenir la genèse de conflits entre les différents usages.

Sommaire

1. Introduction	16
2. Contexte géologique, profils sismiques	19
2.1. Introduction	19
2.2. Histoire géologique du bassin de Crest et lithostratigraphie	20
2.2.1. <i>Histoire anté-cénozoïque</i>	20
2.2.2. <i>Evolution paléoenvironnementale cénozoïque</i>	20
2.3. Profils sismiques	27
2.3.1. <i>Principe</i>	27
2.3.2. <i>Déstockage des données sismiques brutes et traitement</i>	29
2.3.3. <i>Interprétation</i>	31
2.3.4. <i>Conclusions sur le retraitement des lignes sismiques</i>	36
2.3.5. <i>Données de l'étude Zone Atelier Bassin du Rhône</i>	36
3. Les eaux souterraines	39
3.1. Introduction	39
3.2. Les aquifères alluviaux	39
3.2.1. <i>Alluvions récentes de la Drôme</i>	39
3.2.2. <i>Alluvions anciennes</i>	42
3.3. Les formations pliocènes	43
3.4. La molasse miocène	45
3.5. Les formations oligocènes	47
3.6. Les formations crétacées	47
4. Données pluviométriques	49
5. Les eaux de surface	51
5.1. Contexte	51
5.2. Fluctuations spatiales du débit de la Drome	53
5.3. Relations nappe/rivière	57
5.4. Examen des assecs de la période juillet-août 2022	59
6. Caractérisation des écoulements souterrains	65
6.1. Etude des fluctuations piézométriques	65
6.1.1. <i>Zone aval – Alluvions à la confluence de la Drôme et du Rhône</i>	66
6.1.2. <i>Zone aval – Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à les Tourettes</i>	71
6.1.3. <i>Zone amont – Alluvions de la Drôme d'Allex/Grâne à Crest</i>	75
6.2. Cartographie des écoulements souterrains	76
6.2.1. <i>Déroulement des campagnes de mesures</i>	79
6.2.2. <i>Piézométrie de la nappe des alluvions récentes de la Drôme</i>	79
6.2.3. <i>Piézométrie de la nappe des alluvions anciennes surmontées par les limons et loess dans le secteur Chabrilan-Grâne</i>	85
6.2.4. <i>Piézométrie de la nappe de la molasse miocène</i>	86
6.2.5. <i>Conclusions sur les écoulements souterrains</i>	89
7. Les pressions anthropiques	93
7.1. Pression agricole	93
7.2. Assainissement	96
7.3. Pression industrielle	98
7.4. Prélèvements	100
7.4.1. <i>Prélèvement pour l'irrigation</i>	101

7.4.2.	<i>Prélèvement pour l’Alimentation en Eau Potable</i>	102
7.4.3.	<i>Prélèvements pour usages industriels</i>	103
8.	Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines et des eaux superficielles.....	105
8.1.	Introduction.....	105
8.2.	Analyse des points de suivi existants.....	105
8.2.1.	<i>Les points d’eau souterraine (PE ESO)</i>	105
8.2.2.	<i>Les points d’eau superficielle (PE ESU)</i>	111
8.2.3.	<i>Caractérisation hydrogéochimique</i>	113
8.3.	Données acquises en 2022 : campagnes d’investigation en hautes eaux et basses eaux	134
8.3.1.	<i>Paramètres physico-chimiques mesurés in situ</i>	136
8.3.2.	<i>Diagrammes de Piper et faciès hydrochimiques des eaux</i>	139
8.3.3.	<i>Eléments majeurs</i>	143
8.3.4.	<i>Eléments traces</i>	150
8.3.5.	<i>Autres éléments pouvant refléter un impact anthropique</i>	153
8.4.	Données acquises en 2023 : forage de Grâne.....	160
8.4.1.	<i>Données des paramètres physico-chimiques in situ, éléments majeurs et traces</i>	160
8.4.2.	<i>Substances émergentes et terres rares</i>	164
8.4.3.	<i>Données des isotopes stables de la molécule d’eau et de datation des eaux</i>	165
8.4.4.	<i>Apports scientifiques et conclusions suite à la réalisation du forage de Grâne en 2023</i>	175
8.5.	Conclusions sur la caractérisation hydrogéochimique.....	175
9.	Conclusions et recommandations	177
10.	Références bibliographiques.....	183

Liste des figures

Figure 1 :	Localisation de la zone d’étude et communes concernées.....	17
Figure 2 :	Lithologie simplifiée de la zone d’étude (d’après la carte géologique à 1/50000 du BRGM n°842 de Crest)	19
Figure 3 :	Vue sur la barre calcaire blanc du Stampien supérieur le long de la D538 (commune de Divajeu).....	21
Figure 4 :	Principales lithologies et stratigraphies du puits Montoisson (BSS001ZWXN)	22
Figure 5 :	Calcaires lacustres blanc de l’Oligocène supérieur (crête des Roches).....	23
Figure 6 :	Alluvions rive gauche de la Drôme présentant une forte épaisseur avec une forte cohésion permettant des fronts de taille verticaux. Quelques lentilles peuvent être cimentées (image de droite).....	24
Figure 7 :	Contexte géomorphologique du cône de déjection de la Drôme dans la vallée du Rhône. Traits violets : linéaments morphologiques, traits oranges : courbes de niveau (équidistance 5 m)	26
Figure 8 :	Vue sur le placage de Loess en rive gauche de la Drôme, qui repose sur les alluvions anciennes de la rivière (commune de Grâne).....	27
Figure 9 :	Illustration de l’acquisition sismique sur le terrain.....	28

Figure 10 : Illustration des données sismiques brutes : tir sismique et documents de terrain....	29
Figure 11 : Géologie simplifiée de la zone d'étude et position des données (sismique et forages) utilisées).....	30
Figure 12 : Ligne sismique 81SE4A interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double.(La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11).....	32
Figure 13 : Ligne sismique B2M11 interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double. .(La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11).....	33
Figure 14 : Ligne sismique B2M5 interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double. .(La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11).....	34
Figure 15 : Proposition de schéma structural et tracé possible de la vallée messinienne principale basé sur l'interprétation des lignes sismiques (attention : la faible qualité et la faible quantité des données amène une incertitude importante sur l'interprétation).....	35
Figure 16 : Localisation des radargrammes en amont et en aval du pont de Livron (Source : ZABR,2016)	36
Figure 17 : Profil sismique n°6 en aval du pont de la RN 7 (Source : ZABR, 2016)	37
Figure 18 : Profil n°1 en amont du pont de la RN 7 (Source : ZABR, 2016).....	37
Figure 19 : Lithologie simplifiée de la zone d'étude (d'après la carte géologique à 1/50000 du BRGM n°842 de Crest)	39
Figure 20 : Relations hydrauliques entre la Drôme et la nappe alluviale, Transect central et transect Est (Source : SOGREAH , 2012)	40
Figure 21 : Coupe Ouest-Est passant par le captage de Couthiol (commune de Livron) illustrant les relations indirectes entre la nappe des alluvions anciennes et la nappe des alluvions récentes. (IdéeEaux, 2018 modifié).	41
Figure 22 : Carte piézométrique de la nappe des limons et loess dans le secteur la Plaine/St-Laurent sur la commune de Chabrillan, juin 2015 (Levasseur, 2015)	43
Figure 23 : Localisation de la Ria Pliocène (en gris) dans la vallée de la Drôme (Source : IdéeEAUX, 2012 d'après de la Vaissière, 2006).....	44
Figure 24 : Entrée de la galerie de captage de la source du Terrail implantée dans les formations pliocènes du coteau de Laye à Alex.	45
Figure 25 : Carte piézométrique des circulations profondes de la molasse miocène, cercle vert : la zone d'étude (source IdéeEaux, 2012 d'après Cave, 2011).....	46
Figure 26 : Précipitations moyennes annuelles à Vaunaveys-le-Rochette de 2001 à 2021 (source : agriculteur de Vaunaveys, communication personnelle)	49
Figure 27 : Précipitations moyennes mensuelles à Vaunaveys-le-Rochette de 2001 à 2021 (source : agriculteur de Vaunaveys, communication personnelle)	50
Figure 28 : Précipitations journalières sur la période 2001-2021 mesurées à Vaunaveys la Rochette (Source : agriculteur de Vanaveys, communication personnelle).....	50
Figure 29 – Réseau hydrographique de la zone d'étude et points de suivi quantitatifs	51
Figure 30 : Moyennes interannuelles à la station de Saillans V426401001, (source : Hydroportail)	52

Figure 31 : Mesures de débit par jaugeage sur la Drôme le 29/03/2022	54
Figure 32 : Localisation des points de mesures sur les eaux superficielles pour les campagnes hautes et basses eaux 2013 (code terrain)	55
Figure 33 : Débits mesurés (m ³ /s) sur les eaux superficielles de la campagne hautes eaux	56
Figure 34 : Carte des échanges nappe/Drôme en basses eaux 2014 (source : ZABR, 2016) ..	58
Figure 35 : Carte des échanges nappe alluviale/Drome en mars 2022 (en vert : alluvions récentes).....	59
Figure 36 : Chroniques des piézomètres 08422X0190-Loriol et 08422X0191- Livron (côte en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022	60
Figure 37 : Chroniques du piézomètre 08424X0006 – Eurre (côte en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022	60
Figure 38 : Chroniques du piézomètre 08423X0107-Grâne (cote en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022	61
Figure 39 : Chroniques des piézomètres 08422X0190-Loriol et 08422X0191- Livron (côte en m NGF) et fluctuations de la Drôme à Saillans pour l'année 2019	62
Figure 40 : Localisation de points de suivi des fluctuations de la nappe des alluvions récentes dans la zone d'étude (seuls les 6 ouvrages avec un code font l'objet d'une analyse de leur chronique).....	65
Figure 41 : Chroniques piézométriques au pas journalier des points 08422X0191/F2- Livron et 08422X0190/F1 - Loriol (source : ADES)	66
Figure 42 : Analyse statistique de la chronique de données piézométrique journalière pour le forage 08422X0191/F2 (Outil : ESTHER)	67
Figure 43 : Valeurs moyennes mensuelles de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (Outil : ESTHER).....	68
Figure 44 : Valeurs minimales mensuelles de la chroniques de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER).....	68
Figure 45 : Valeurs maximales mensuelles de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER).....	69
Figure 46 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER).....	69
Figure 47 : Calculs de tendance par année hydrologique sur la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER).....	70
Figure 48 : Chroniques des piézomètres PZ3 et PZ4 de Livron. Données mensuelles (source : Delmonico-Dorel Carrières)	71
Figure 49 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques pour le piézomètre Piezo3 LIVRON (Source : ESTHER).....	72
Figure 50 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques pour le piézomètre Piezo4 LIVRON (Source : ESTHER).....	72
Figure 51 : Comparaison des chroniques du forage 08422X0191/F2 et du piézomètre Piezo4 LIVRON (ESTHER).....	73

Figure 52 : Cartes piézométriques dans le secteur Livron/Drôme pour les années 1955, 1965 et 1979. Les flèches indiquent le sens général d'écoulement de la nappe, les côtes sont en m NGF (source : Compagnie Nationale du Rhône).....	74
Figure 53 : Chroniques piézométriques au pas journalier des points 08424X0006/F2 (haut) et 08423X0067/PZ (bas) (source : ADES).....	75
Figure 54 : Localisation des points d'eau souterraine recensés en bibliographie, avec indication de l'aquifère captée (avéré ou supposé).....	77
Figure 55 : Localisation des points de suivis (eaux souterraine et eau superficielle) retenus avec indication de leur code terrain.....	78
Figure 56 : cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux » 2022 pour la nappe alluviale dans le secteur Livron/Drôme et Loriol/Drôme. Les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines	80
Figure 57 : Transect Nord-Sud passant au seuil CNR présentant la piézométrie de la nappe (points 237, 290b, 708, 704 et 706) et la cote de la rivière pour la campagne hautes eaux de mars 2022 (remarque : le piézomètre 708 est déporté par rapport à l'axe du transect)	81
Figure 58 : cartes piézométriques « hautes eaux » eaux et « basses eaux » pour la nappe alluviale dans le secteur Crest-Grâne/Alex. Les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines	83
Figure 59 : Synthèse des relations nappe alluviale / Drôme de la campagne « hautes eaux » 2022 (les droites en pointillé correspondent au isopièzes des figures 56 et 57)	84
Figure 60 : cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux » pour la nappe des coteaux – aquifère des limons et loess dans le secteur Grâne-Chabrillan. Les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines	85
Figure 61 : Carte piézométrique basses eaux pour l'aquifère de la molasse miocène. Les flèches bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines pour les nappes superficielles, les flèches oranges illustrent le sens d'écoulement pour les circulations profondes	86
Figure 62 : Localisation des forages ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique en continu (nappe profonde molasse Miocène) : forage 800 (Grâne) et forage 504 (Chabrillan)	88
Figure 63 : Chroniques piézométriques des forages 504 Chabrillan et 800 Grâne (m NGF) pour la période du 07/09/22 au 24/04/23	88
Figure 64 : Coupe Ouest-Est commune de Livron illustrant les relations indirectes entre la nappe des alluvions anciennes et la nappe des alluvions récentes. (IdéeEaux, 2018 modifié).....	90
Figure 65 : schémas conceptuels de circulation des eaux souterraines dans le bassin de Crest. Image gauche : circulations profondes, image droite : circulations superficielles (la flèche indique le sens de circulation).....	91
Figure 66 : Traitement des données communales du RGA sur la zone d'étude pour la période de 1988 à 2010 (Les couleurs foncées représentent les résultats d'enquêtes, les couleurs claires sont des interpolations –Agreste, 2021)	93
Figure 67 : Traitement des données des ilots parcellaires du RPG sur la zone d'étude pour la période de 2010 à 2019 (IGN, 2021a)	94
Figure 68 : Répartition des cultures sur la zone d'étude en 2019 d'après le Registre Parcellaire Graphique (IGN, 2021a).	95
Figure 69 : Situation des stations de traitement des eaux usées sur la zone d'étude (DREAL, 2020).....	97

Figure 70 : Situation des IPCE sur la zone d'étude par secteur d'activité.....	99
Figure 71 : Evolution des volumes prélevés entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m ³ - source : BNPE).....	100
Figure 72 : Répartitions des volumes prélevés par commune sur la période 2012 et 2019 ...	101
Figure 73 : Evolution des volumes prélevés pour l'irrigation entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m ³ - source : BNPE).....	102
Figure 74 : Evolution des volumes prélevés pour l'usage l'alimentation en eau potable entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m ³ - source : BNPE).	103
Figure 75 : Evolution des volumes prélevés pour les usages industriels entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m ³ - source : BNPE).	104
Figure 76 : Localisation des points d'eau souterraine retenus dans le secteur d'étude	107
Figure 77 : Localisation des points d'eau superficielle (ESU) sélectionnés sur le secteur d'étude ;	111
Figure 78 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique à 25°C (μS/cm) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU).....	114
Figure 79 : Diagramme température de l'eau (°C) versus pH des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	115
Figure 80 : Diagramme de Piper des points d'eau souterraine (ESO)	115
Figure 81 : Diagramme de Piper des points d'eau superficielle (ESU)	116
Figure 82 : Diagramme de Piper des points d'eau ESO en fonction de l'affectation code masse d'eau et des points d'eau ESU.	117
Figure 83 : Diagramme de Piper des points d'eau ESO en fonction de la carte géologique simplifiée du secteur d'étude et des points ESU	118
Figure 84 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des points d'eau souterraine (ESO) retenus avec indication du contexte géologique.	119
Figure 85 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des points d'eau superficielle (ESU).....	119
Figure 86 : Diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	120
Figure 87 : Diagramme Ca + Mg (mmol/L) versus HCO ₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	121
Figure 88 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SO ₄ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	121
Figure 89 : Diagramme Ca/Na (mol/mol) versus Ca/Mg (mol/mol) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	122
Figure 90 : Diagramme Cl (mmol/L) versus NO ₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)	123
Figure 91 : Carte des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) par point d'eau ESO et ESU.	124
Figure 92 : Evolution temporelle de la concentration en nitrate pour les points d'eau ESO situés dans la molasse miocène (08428X0003/HY et 08427X0022/HY).....	124
Figure 93 : Décalage entre l'apport d'azote et le besoin (modifié d'après Pang et Letey, 2000)	125

Figure 94 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus HCO_3 (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU).....	126
Figure 95 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus NO_3 (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU).....	126
Figure 96 : Carte des concentrations moyennes en bore ($\mu\text{g/L}$) par point d'eau ESO et ESU et localisation des STEU (stations de traitement des eaux usées et nombre d'équivalents-habitants (EH)).	127
Figure 97 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus Cu ($\mu\text{mol/L}$) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU).....	128
Figure 98 : Diagramme Zn ($\mu\text{mol/L}$) versus NO_3 (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU).....	129
Figure 99 : Carte des concentrations moyennes en cuivre ($\mu\text{g/L}$) par point d'eau ESO et ESU, et localisation des élevages importants (ICPE) du secteur d'étude.....	129
Figure 100 : Carte des concentrations moyennes en zinc ($\mu\text{g/L}$) par point d'eau ESO et ESU, et localisation des élevages importants (ICPE) du secteur d'étude.....	130
Figure 101 : Localisation des points d'eau souterraine (PE ESO) et point d'eau superficielle (PE ESU) ayant fait l'objet de prélèvements et mesures physico-chimiques in situ lors de la campagne de basses eaux 2022.	135
Figure 102 : Conductivités électriques moyennes à 25°C ($\mu\text{S/cm}$) des points d'eau souterraine (PE ESO) et superficielle (PE ESU) du secteur d'étude et conductivités électriques à 25°C ($\mu\text{S/cm}$) mesurées in situ lors de la campagne de Hautes Eaux 2022.	136
Figure 103 : Conductivités électriques à 25°C ($\mu\text{S/cm}$) des points d'eau souterraine (PE ESO) et superficielle (PE ESU) mesurées in situ lors de la campagne de Basses Eaux 2022.	137
Figure 104 : Diagramme température de l'eau ($^\circ\text{C}$) versus conductivité des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) historiques, et des données des campagnes Hautes Eaux et Basses Eaux 2022.	138
Figure 105 : Diagramme température de l'eau ($^\circ\text{C}$) versus pH des points d'eau souterraine (ESO BE 2022) et superficielle (ESU BE 2022) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données historiques.....	139
Figure 106 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$) des points d'eau souterraine pour les données historiques (PE ESO), des points d'eau superficielle historiques (PE ESU) et des points d'eau prélevés en BE 2022 (PE ESO BE 2022)-cercle rouge : pole ESU Drôme, cercle vert clair: pole ESO alluvions, cercle bleu : Oligocène	140
Figure 107 : Diagramme de Piper des points d'eau souterraine (ESO) prélevés en basses eaux 2022.....	141
Figure 108 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison des points d'eau souterraine (ESO) en basses eaux 2022 et les des points d'eau souterraine de référence captant les alluvions récentes	142
Figure 109 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison du point d'eau souterraine (ESO) captant l'Oligocène (Calcaires) en basses eaux 2022 et des points d'eau souterraine de référence captant le Crétacé (Calcaires) et l'Oligocène (Calcaires).....	142
Figure 110 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison des points d'eau souterraine (ESO) captant le Miocène (Molasse libre et captive) en basses eaux 2022 et des points d'eau « qualité » historiques.....	143

Figure 111 : Diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) et des données de la campagne de Basses Eaux 2022. Cercle rouge : ESU Drôme, cercle bleu : ESO calcaires oligocènes, cercle vert foncé : calcaires crétacés, cercle vert clair : ESO alluvions récentes.....	144
Figure 112 : Diagramme Ca + Mg (mmol/L) versus HCO ₃ (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	145
Figure 113 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SO ₄ (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	146
Figure 114 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SiO ₂ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022- cercle jaune : molasse libre et cercle vert : alluvions récentes.....	147
Figure 115 : Diagramme Ca/Na (mol/mol) versus Ca/Mg (mol/mol) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	148
Figure 116 : Diagramme Cl (mmol/L) versus NO ₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) de référence et des points d'eau ESO prélevés en Basses Eaux 2022.....	149
Figure 117 : Carte des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données « qualité » historiques.	149
Figure 118 : Diagramme B (µmol/L) versus HCO ₃ (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	151
Figure 119 : Diagramme B (µmol/L) versus NO ₃ (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	151
Figure 120 : Diagramme B (µmol/L) versus Na +K (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	152
Figure 121 : Carte des concentrations moyennes en bore (µg/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données historiques ESO et ESU ; localisation des STEU du secteur d'étude.	152
Figure 122 : Diagramme Ca (mmol/L) versus F (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.....	153
Figure 123 : Cercle des corrélations.....	155
Figure 124 : Graphique des observations et variables actives pour les axes F1 et F2 dont les valeurs propres représentent près de 43 % de la variabilité cumulée (Légende des affectations hydrogéologiques : Alluvions récentes : AR, Alluvions anciennes : AA, Limons et loess : Li, Pliocène (Sable et argiles bleues) : Pl, Miocène (Molasse libre) : MiL, Miocène (Molasse captive) : MiC Oligocène (Calcaires) : Ol).....	155
Figure 125 : Diagramme Y (µmol/L) versus B (µmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.....	157

Figure 126 : Diagramme Dy (ng/L) versus Er (ng/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.	158
Figure 127 : Diagramme Dy (ng/L) versus Eu (ng/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.	158
Figure 128 : Diagramme Gd (ng/L) versus B (µg/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne basses eaux 2022.	159
Figure 129 : Diagramme température de l'eau (°C) versus conductivité du forage de Grâne (2023), des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) historiques, et des données des campagnes Hautes Eaux et Basses Eaux 2022.	160
Figure 130 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique (µS/cm) du forage de Grâne (2023), des points d'eau souterraine pour les données historiques (PE ESO), des points d'eau superficielle historiques (PE ESU) et des points d'eau prélevés en BE 2022 (PE ESO BE 2022)	161
Figure 131 : Diagramme de Piper de l'eau du forage et de l'ensemble des points d'eau souterraine (ESO et ESU) suivis dans le projet.	162
Figure 132 : Carte de synthèse des résultats de la Vaissière (2006), extrait de Cave (2011).	162
Figure 133 : Diagramme Ca + Mg (mmol/L) versus HCO ₃ (mmol/L) du forage de Grâne (2023), des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.	163
Figure 134 : Diagramme B (µmol/L) versus Na +K (mmol/L) du forage de Grâne (2023), des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.	164
Figure 135 : Diagramme oxygène 18 versus deutérium des eaux du secteur d'étude, modifié d'après de la Vaissière (2006), avec ajout de la DML Néogène du Bas – Dauphine (de la Vaissière, 2006), de la moyenne des eaux de pluies sur Montvendre (Cave, 2011), de la moyenne de l'aquifère molassique (Cave, 2011) et des résultats du nouveau forage dans la molasse miocène de Grâne (2023).	166
Figure 136 : Extrait de la carte de répartition de l'oxygène 18 dans l'aquifère molassique (Cave, 2011).	167
Figure 137 : Extrait de la carte de répartition du deutérium dans l'aquifère molassique (Cave, 2011).	167
Figure 138 : Schéma de réalisation de l'estimation des âges apparents des eaux souterraines par traceurs chimiques	168
Figure 139 : Résultat des analyses de CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF ₆ pour l'eau du forage 800 (Grâne).	169
Figure 140 : Extrait de la carte des activités carbone 14 mesurées dans le bassin de Valence (pCM), De la Vaissière (2006).	170
Figure 141 : Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère néogène (âge arrondi en années), De la Vaissière (2006).	171
Figure 142 : Relation A ¹⁴ C (pcm) versus δ ¹³ C (‰ vs PDB) du CMTD des eaux de l'aquifère néogène, modifié d'après De la Vaissière (2006), et du forage ID 800.	172
Figure 143 : Relation A ¹⁴ C (pcm) versus δ ¹³ C (‰ vs PDB) du CMTD des eaux de l'aquifère du Bas-Dauphiné, modifié d'après Cave (2011) et du forage ID 800.	173

Figure 144 : Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère molassique (extrait de Cave, 2011).	174
---	-----

Liste des tableaux

Tableau 1 : Lignes sismiques retraitées dans le projet	31
Tableau 2 : DOE du bassin versant de la Drôme (source : PGRE)	52
Tableau 3 : Mesures différentielles de débit de la Drôme sur les périodes estivales 2015-2022 (Source OFB, SMRD)	54
Tableau 4 : Localisation des points de mesures « eau superficielle » et résultats des jaugeages réalisés en hautes eaux (campagne du 28 et 29/03/22)	55
Tableau 5 : Débits d'affluents de la rive droite de la Drôme mesurés le 06/09/2022.....	57
Tableau 6 : Tableau récapitulatif des points d'eau ESO disposant de suffisamment d'années de chroniques de données piézométriques, en fonction de leur affectation BDLISA.	66
Tableau 7 : Tableau de synthèse du traitement statistique des données piézométriques des points 08422X0191/F2 et 08422X0190/F1	70
Tableau 8 : Tableau de synthèse du traitement statistique des données piézométriques des points 08424X0006/F2 et 08423X0067/PZX	75
Tableau 9 : Elevage en 2010 (nombre de têtes par commune selon les principales espèces) .	95
Tableau 10 : Estimation des flux annuels d'azote par commune provenant de l'assainissement collectif et l'assainissement non collectif (Sispea, 2022)	98
Tableau 11 : Liste des points d'eau souterraine (ESO) sélectionnés et bancarisés dans ADES	106
Tableau 12 : Liste des paramètres physico-chimiques in-situ et des éléments majeurs	107
Tableau 13 : Liste des éléments traces.....	108
Tableau 14 : Concentrations moyennes en éléments traces pris en compte pour les points d'eau souterraine (ESO) retenus	109
Tableau 15 : Paramètres physico-chimiques in situ moyen et concentrations moyennes en éléments majeurs des 12 points d'eau souterraine (ESO) retenus.	110
Tableau 16 : Liste des points d'eau superficielle (ESU) sélectionnés sur le secteur d'étude, avec codes et libellés des stations (NAIADES), communes et coordonnées	111
Tableau 17 : Paramètres physico-chimiques in situ moyen et concentrations moyennes en éléments majeurs des 3 points d'eau superficielle (ESU).....	112
Tableau 18 : Concentrations moyennes en éléments traces pris en compte pour les 3 points d'eau superficielle (ESU).	113
Tableau 19 : Masses d'eau souterraine correspondant aux points d'eau ESO du secteur d'étude.	116
Tableau 20 : Teneur en impureté moyenne (ETM) dans une sélection d'engrais organiques (d'après SOGREAH, 2007).	128

Tableau 21 : Concentrations moyennes (µg/L) en substances phytosanitaires par point d'eau et par paramètre (Données ADES).....	131
Tableau 22 : Paramètres phytosanitaires identifiés et quantifiés sur 9 points d'eau du secteur d'étude, usage, famille et type de culture et interdiction d'usage effective.	132
Tableau 23 : Molécules identifiées comme déclassantes pour les points d'eau du secteur d'étude (données ADES).	133
Tableau 24 : Liste des molécules « émergents » recherchées dans ADES pour les 12 points d'eau souterraines du secteur d'étude	133
Tableau 25 : Molécules (émergents) quantifiées pour les points d'eau souterraine du secteur d'étude (Données ADES).	134
Tableau 26 : Tableau récapitulatif des points d'eau ESO et ESU suivis en Basses Eaux 2022.	135
Tableau 27 : Terres rares analysées et limite de quantification.	156
Tableau 28 : Résultats d'analyses en terres rares pour l'eau du forage de Grâne (ID 800) en 2023.	165
Tableau 29 : Résultats d'analyses des isotopes stables de la molécule d'eau pour le forage de Grâne (ID 800) en 2023.....	165
Tableau 30 : Résultats d'analyses du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C pour l'eau du forage de Grâne (ID 800) en 2023.....	169
Tableau 31 : Valeurs isotopiques des pôles de mélanges (De la Vaissière, 2006).	173

Liste des annexes

Annexe 1.....	189
Les principales étapes du traitement des données sismiques	189
Annexe 2.....	195
Calculs statistiques avec le logiciel ESTHER sur les données piézométriques.....	195
Annexe 3.....	207
Coordonnées des points eaux souterraines des campagnes 2022.....	207

1. Introduction

Le bassin versant de la rivière Drôme est classé en Zone de Répartition des Eaux depuis 1995 et malgré les efforts menés par les différents usagers (abandon des prélèvements pour l'irrigation au seuil des Pues, interconnexion des réseaux), la rivière est toujours confrontée à une réduction de son débit notamment dans le secteur proche de sa confluence avec le Rhône, qui conduit à des assèchs réguliers en période estivale.

Certains secteurs de la nappe d'accompagnement de la Drôme ont été identifiés comme ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable (AEP) dans le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) du bassin Rhône Méditerranée. Trois zones de sauvegarde non exploitées actuellement (ZSNEA) ont ainsi été définies sur les communes de Grâne et Loriol/Drôme.

Par ailleurs, plusieurs études menées sur la basse vallée de la Drôme (Larguier, 2006 ; Idée Eaux, 2021...) ont mis en évidence une contamination d'origine anthropique, essentiellement agricole des eaux de surface et des eaux souterraines.

La quasi-totalité des communes de la partie aval du bassin versant du SAGE Drôme se situent en zones vulnérable aux nitrates. La dégradation de la qualité des eaux souterraines peut atteindre localement des concentrations en nitrates qui ne sont pas acceptables pour une consommation humaine. Ainsi, trois secteurs de ressources stratégiques (Livron-sur-Drôme, Chabrillan et Alex) sont concernés par cette problématique et deux captages (Chaffoix à Autichamp et Rouveyrol à Chabrillan), ont été classés en zones d'actions renforcées de par leurs concentrations en nitrate supérieures à 50 mg/l..

La présente étude a pour objectifs de réaliser un diagnostic global sur les aspects quantitatif et qualitatif des eaux souterraines et des eaux superficielles, d'évaluer la nature des pressions qui s'exercent sur les ressources en eau et de proposer des pistes d'actions pour améliorer la gestion quantitative et qualitative de ces ressources.

La zone étudiée s'étend de Crest à la confluence avec le Rhône et couvre une superficie de près de 230 km² (Figure 1).

Ce secteur comprend dix communes: Loriol-sur-Drôme, Livron-sur-Drôme, Alex, Grâne, Eurre, Crest, Chabrillan, Autichamp, La Roche-sur-Grâne.

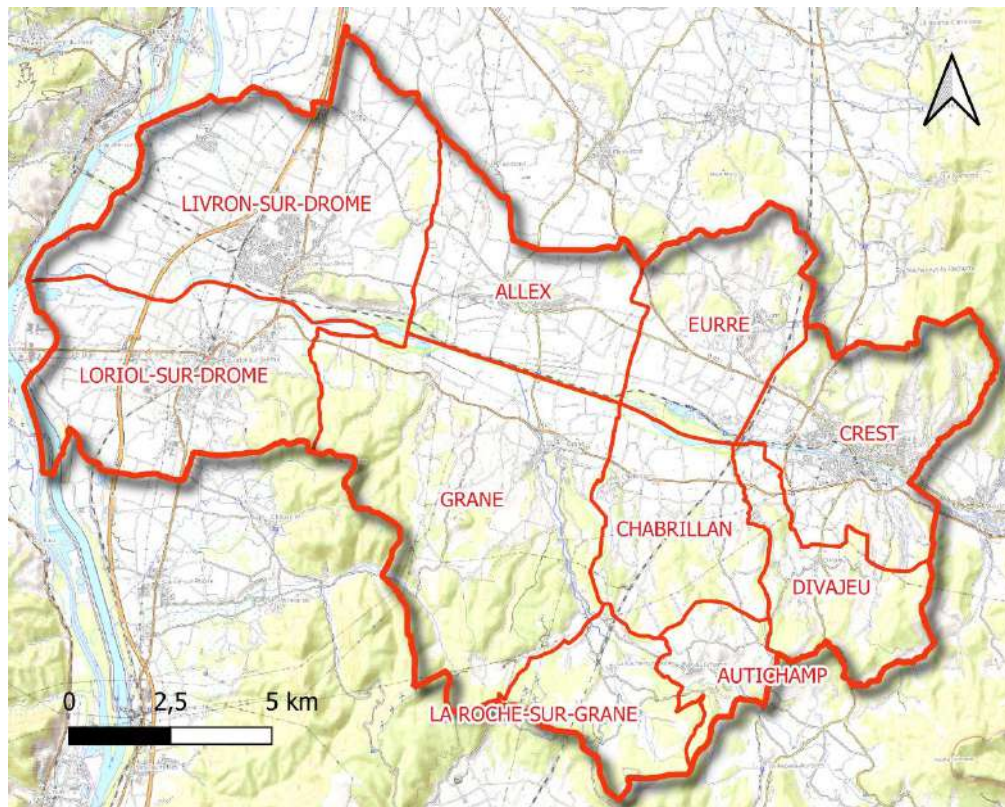


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et communes concernées

2. Contexte géologique, profils sismiques

2.1. INTRODUCTION

Il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance du contexte géologique de la zone d'étude pour pouvoir identifier les faciès géologiques qui permettent la constitution de nappes, ceux qui constituent des barrières hydrauliques, leurs agencements les uns par rapport aux autres et les éventuelles structures qui peuvent modifier les écoulements souterrains.

Pour cela, une synthèse bibliographique des connaissances (cartes géologiques, rapports, thèses ...) a été réalisée et a été complétée par des investigations de terrain. Un retraitement de lignes sismiques a également été effectué dans l'objectif d'apporter des éclaircissements sur les formations sous couverture, la présence de failles et le rôle de la rive pliocène qui pourraient conditionner une partie des écoulements souterrains.

La zone d'étude correspond au bassin de Crest, synforme cénozoïque d'axe N-S, qui correspond à la terminaison méridionale du bassin du Bas-Dauphiné, ou Fosse de Valence. Ce bassin tertiaire est délimité à l'est par les chaînons subalpins du Vercors, au sud par le Seuil de Réauville (ou Valréas-Monjoyer) marqué par des affleurements crétacés, et à l'ouest par le socle cristallin du Massif central. Ce bassin s'étend sur le Bas Dauphiné marqué par la plaine quaternaire de l'Isère et les collines miocènes du plateau de Chambaran.

La Figure 2 présente les formations géologiques qui affleurent dans la zone d'étude, selon une lithologie simplifiée. Ces formations sont reprises de façon plus détaillée dans le paragraphe suivant.

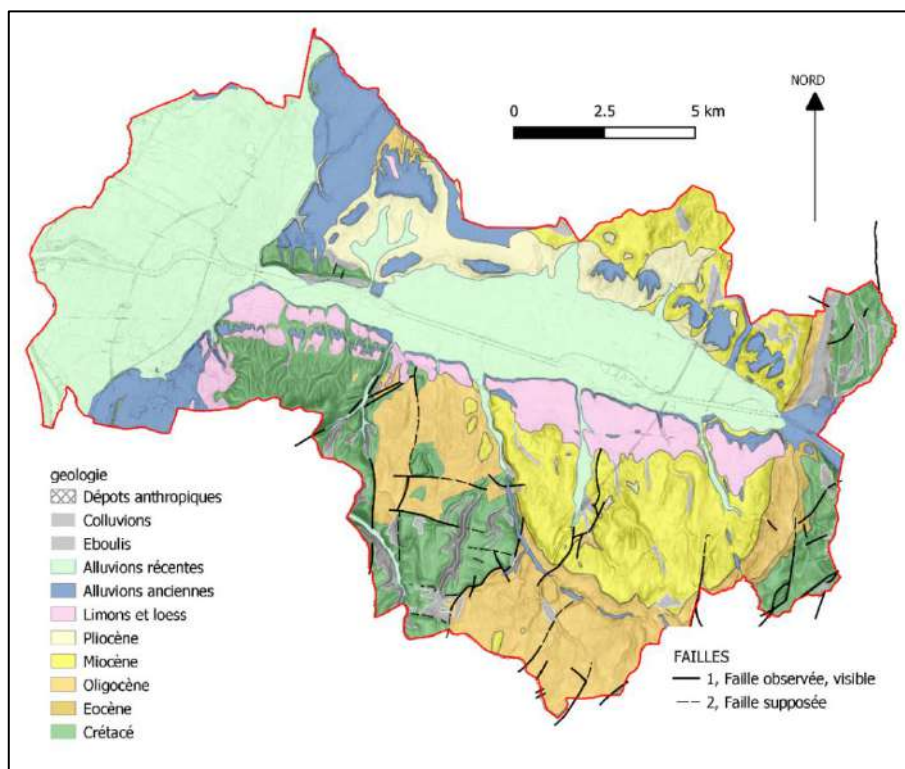


Figure 2 : Lithologie simplifiée de la zone d'étude (d'après la carte géologique à 1/50000 du BRGM n°842 de Crest)

2.2. HISTOIRE GEOLOGIQUE DU BASSIN DE CREST ET LITHOSTRATIGRAPHIE

2.2.1. Histoire anté-cénozoïque

Le rifting téthysien est préservé en profondeur dans le Bassin de Crest et sur la bordure du Massif Central (Faille et bloc basculé de Châteaubourg). Le Trias se dépose sur le socle hercynien et vient remplir des petites dépressions associées aux failles normales. Il est souvent très peu épais (quelques dizaines de mètres). Malgré cela, les trois divisions qui composent le Trias germanique sont présentes (Bundsandstein, Muschelkalk, Keuper). Au Jurassique, l'océanisation de la Téthys est accompagnée de la mise en place de dépôts marno-calcaires épais de plusieurs centaines de mètres. La sédimentation se poursuit au Crétacé inférieur, période pendant laquelle la zone se situe en bordure de la fosse vocontienne. Celle-ci se comble progressivement avec, en particulier, la mise en place de dépôts marins récifaux connus sous le nom de faciès urgonien. Le Crétacé supérieur est absent dans la zone d'étude.

La quasi-totalité du Mésozoïque est donc préservée sous le Bassin de Crest. Au niveau du forage de Montoisson (BMT1) d'une profondeur de 3 976 m (BSS001ZWXN) la série se découpe de la manière suivante : socle métamorphique, Trias-Rhétien, Hettangien, Sinémurien, Lias moyen et supérieur (indifférenciés), Bajocien, Bathonien, Callovien, Oxfordien, Kimméridgien, Tithonien, Berriasien, Valanginien, Hautérivien, Barrémien (faciès urgonien, formant à l'affleurement l'essentiel des reliefs du Vercors).

2.2.2. Evolution paléoenvironnementale cénozoïque

Eocène moyen

L'histoire cénozoïque du Bassin de Crest débute à l'Eocène moyen. Au Lutétien/Bartonien, l'orogénèse pyrénéo-provençale est à son apogée dans le SE de la France. Elle cause la formation d'une série de plis E-W mis en place sous un régime compressif essentiellement N-S (Ventoux-Lure, Lubéron, Alpilles, etc.). En termes de dépôts sédimentaires, l'émergence de reliefs importants entraîne la formation de cônes alluviaux évoluant vers des dépôts lacustres dans leur partie distale (dans la fosse de Valence). Ces dépôts se mettent en place dans des dépressions de faibles extensions spatiales associées à du décrochement extensif et souvent mal contraintes par les données de subsurface. Ils n'ont pas été traversés par le forage de Montoisson (abréviation BMT1) et sont difficilement repérables sur les profils sismiques. En surface, ces formations affleurent au sud de Crest et correspondent aux formations notées e7-g1/g2a sur la carte géologique (feuille de Crest 1/50 000^{ème} et feuille de Die 1/50 000^{ème}). Très mal datées, elles sont classiquement attribuées à l'Eocène moyen en raison de la présence du Priabonien au-dessus.

Eocène supérieur et Rupélien basal

L'ensemble Eocène supérieur et Rupélien basal (Formation infra salifère (FIS) et Formation salifère inférieure (FSI), assez développé dans la zone d'étude, se dépose durant une phase de structuration de la zone, correspondant au rifting ouest européen et antérieure à l'influence de la compression alpine dans le Bas Dauphiné qui ne prendra place qu'au Miocène. Le Rift ouest européen correspond à un ensemble de bassins extensifs (Fossé d'Alès, de Manosque, de la Bresse, du Rhin, de Valence (Bas-Dauphiné), etc.) mis en place au Priabonien et à l'Oligocène inférieur qui pourrait se former à la suite de la phase compressive Eocène moyen et dans un contexte cinématique proche. En termes de lithologie, on observe une alternance de dépôts calcaires, évaporitiques, mais aussi marno-gréseux et conglomératiques, qui les rend souvent

difficile à différencier des dépôts de l'Eocène moyen. L'environnement de dépôt est essentiellement lacustre mais évolue latéralement vers un domaine fluvial et des systèmes de cônes alluviaux en position proximale. A l'affleurement, ils correspondent à la partie sommitale des niveaux e7-g1/g2a (feuille de Crest 1/50 000^{ème}), la partie basale commençant dans l'Eocène moyen mais n'étant pas différenciable en subsurface.

La formation salifère inférieure fait suite stratigraphiquement à la FIS et correspond à la deuxième partie du remplissage associé au rifting ouest européen (fin de l'éventail syn-sédimentaire). Le paléoenvironnement est lacustre et les dépôts sont principalement chimiques : évaporitiques dans le centre du bassin et carbonatés (palustres) sur les bordures. Ces dépôts se déposent en contexte de faible niveau d'eau et de forte évaporation causant la précipitation des espèces chimiques en solution en contexte de sursaturation. La FSI est principalement préservée en subsurface mais est également présente à l'affleurement autour du bassin de Crest : il s'agit de la première barre calcaire de la feuille de Crest (g2b1, cf. photo Figure 3) correspondant à la partie proximale d'un lac (palustre). Situé sur un haut topographique à cette période, le forage BMT1 ne traverse pas la FSI.



Figure 3 : Vue sur la barre calcaire blanc du Stampien supérieur le long de la D538 (commune de Divajeu)

Oligocène à Miocène basal : Rupélien (Formation Marneuse intermédiaire), **Chattien et Aquitanien** (Formation Evaporitique supérieure et Formation marno sableuse terminale).

Le Rifting ouest européen s'achève au Rupélien inférieur dans le Bas-Dauphiné, s'en suit une période de plus faible subsidence, caractérisée par des variations d'épaisseur et de faciès moindre. La sédimentation change radicalement avec un retour des dépôts terrigène dans le bassin. Puis l'environnement de dépôt redevient progressivement continental avec une transition depuis des faciès marins vers des faciès lacustres, un retour à des dépôts deltaïques puis finalement des sédiments fluviaux, dans un système globalement progradant d'est en ouest. En termes de lithologie, il s'agit essentiellement de sédiments marneux évoluant verticalement et latéralement vers des faciès sableux. La Formation marneuse intermédiaire FMI correspond au premier niveau cénozoïque du forage de BMT1, constitué de marnes lacustres (Figure 4). A l'affleurement, il s'agit des niveaux g2b2 et g2c des feuilles de Crest et Die. Ce sont des marnes grises à événements conglomératiques gravitaires traduisant une instabilité importante, qui

évoluent latéralement vers des marnes rouges témoignant d'un rapprochement des bordures du bassin.

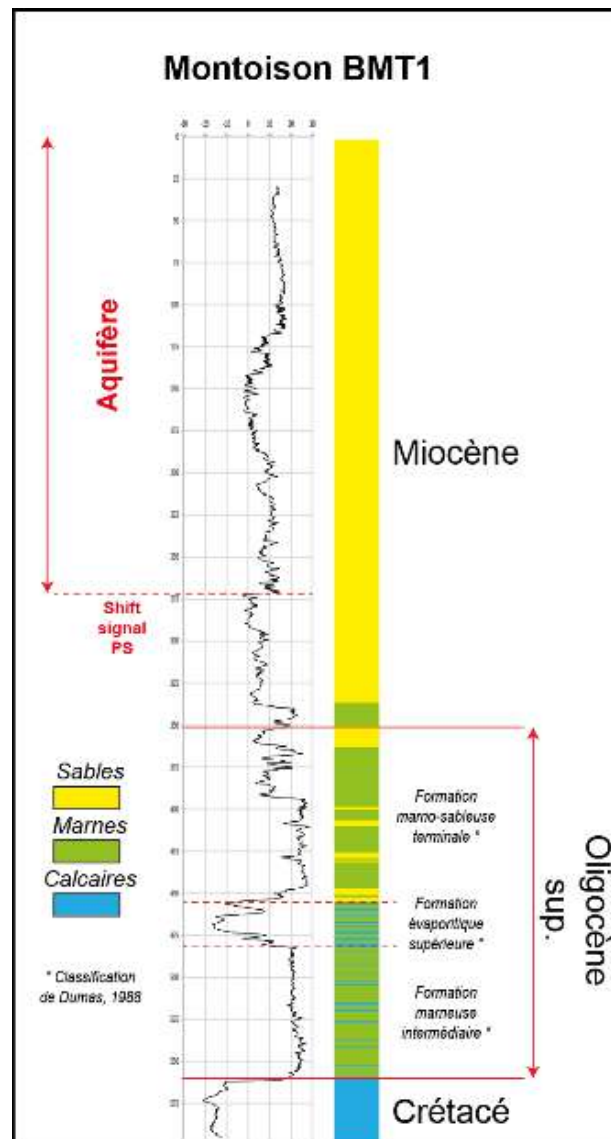


Figure 4 : Principales lithologies et stratigraphies du puits Montoisson (BSS001ZWXN)

Le Chattien inférieur correspond au retour d'une sédimentation chimique dans l'ensemble du bassin. Le paléoenvironnement est similaire à celui de la formation salifère inférieure : évaporites lacustres dans le centre du bassin et carbonates au niveau des bordures. Cette formation, appelée Formation évaporitique supérieure (FEV), est probablement associée à une chute du niveau de base et à un confinement du bassin. Elle est présente dans le forage de BMT1 et correspond en surface à la seconde barre calcaire de la bordure du Bassin de Crest (niveau g3 de la feuille de Crest, Figure 5).



Figure 5 : Calcaires lacustres blanc de l'Oligocène supérieur (crête des Roches)

La Formation marno-sableuse terminale (FMST) achève le remplissage oligocène du Bas-Dauphiné et se continue dans l'Aquitaniens. Il s'agit d'un retour à la sédimentation terrigène, et s'organise sur une transition depuis des faciès marin (sables à glauconie de Montchenu et marnes à dinoflagellés de St-Lattier) vers des faciès continentaux (deltaïque -> fluvatile). Cette formation n'est présente qu'en subsurface et correspond à des marnes et des sables lacustres dans le forage BMT1.

Le Miocène inférieur et moyen. La sédimentation miocène débute au Burdigalien supérieur dans le Bas-Dauphiné. La déformation de l'avant-pays alpin, combinée à des périodes de transgression eustatique, permettent une transgression dans la Vallée du Rhône qui remonte jusqu'au bassin molassique suisse. Le domaine marin perdurera globalement dans le Bas-Dauphiné jusqu'au Miocène supérieur et à la régression tortonienne. Des dépôts détritiques essentiellement sableux (« molasses ») se mettent en place dans le Bas-Dauphiné, la source de ces sédiments étant mixte massif alpin-massif central. Seuls le Burdigalien supérieur et le Langhien sont préservés dans le Bassin de Crest, le Miocène supérieur ayant été érodé probablement par les glaciations quaternaires. Dans le Bassin de Crest, les dépôts présentent les plus fortes épaisseurs dans un système de deux systèmes de vallées incisées (burdigalienne et langhienne). A l'affleurement, il s'agit des Marnes de la Grenette et des sables d'Autichamps (Lesueur et al., 1990 ; Rubino et al., 1990).

Le Pliocène. Après le comblement miocène, commence une importante phase d'érosion (crise messinienne qui abaisse les eaux de la méditerranée de 1500m) qui est à l'origine d'un système fluvatile (pré-Rhône et pré-Drôme) dont le niveau de base est inférieur à celui des cours d'eau actuels. La pré-Drôme passait plus au Nord de son cours actuel, au niveau de Livron et l'épaisseur d'au moins 200 m de remplissage pliocène suggère des profondeurs d'incision de plus de 200 m pour la paléo Drôme. La transgression de la mer pliocène a ainsi envahi les vallées pré-pliocènes du Rhône, de la Drôme et de l'Eyrieux. Les dépôts marins atteignent l'altitude de 240 m à Clionsclat (Sud de Loriol), 260 m à Eurre (NE de Crest). Il n'est pas possible de reconstituer exactement les rivages de cette mer à cause des érosions quaternaires.

Les marnes prédominent dans la partie inférieure du Pliocène marin. Les sables prédominent dans la partie supérieure, mais avec des récurrences de marnes. Ils sont plus fins que les sables miocènes, parfois finement lités, et contiennent des empreintes de feuilles. Dans la vallée du Rhône, à cause des recouvrements quaternaires (alluvions, cailloutis de piedmont, loess), le Pliocène marin est rarement visible. Il a été mis en évidence par de nombreux sondages de la

Compagnie nationale du Rhône au Nord de Loriol. Il s'étalait largement de la Voulte à Livron. Mais au Sud de Loriol, le chenal pliocène se rétrécit et s'écarte du tracé actuel du Rhône. Un faciès lagunaire (principalement argileux) fait la transition avec le Pliocène inférieur continental : ce sont les Couches à Congéries du château Pergaud à l'Ouest d'Allex, qui ne sont plus visibles.

Le Pliocène supérieur ou plio-villafranchien fluvial est très disséqué par l'érosion; il n'en subsiste que des buttes-témoins. Ce sont des cailloutis peu ou pas cimentés, à galets calcaires prédominants, parfois impressionnés (mais nettement moins que les galets du Miocène), avec de gros blocs épars pouvant atteindre 1 m dans leur plus grande dimension.

Au **Quaternaire**, le Rhône et ses affluents reprennent leur travail d'érosion et étalent leurs alluvions en une série de terrasses étagées. Le Rhône quaternaire n'a pas retrouvé exactement le tracé du Rhône pré-pliocène. La Drôme a changé de tracé pour passer non plus au Nord de Livron mais entre Livron et Loriol.

Les **alluvions anciennes de la Drôme**, à galets calcaires prédominants. Ces galets de calcaires jurassiques ou crétacés du Diois sont souvent plus ou moins anguleux et aplatis, plus rarement bien roulés, selon la longueur du transport subi.

Sur la rive droite de la Drôme, il est possible de distinguer trois niveaux étagés. Le plus ancien, notation Fvo sur la carte géologique, se suit très bien depuis Crest jusqu'au plateau de Soulier au Nord-Ouest d'Allex. Dans le secteur de Soulier, les alluvions de la Drôme viennent en contact avec celles du Rhône, ce qui permet de raccorder les deux systèmes de terrasses et d'attribuer au Villafranchien ce haut niveau de la Drôme. Son épaisseur est supérieure à 10 mètres. Sur la rive gauche de la Drôme, des niveaux plus jeunes (FwD et FxD) sont mieux représentés mais ils sont recouverts par une épaisse couche de loess. L'épaisseur de ce niveau d'alluvions est d'environ 8 mètres (Figure 6).



Figure 6 : Alluvions rive gauche de la Drôme présentant une forte épaisseur avec une forte cohésion permettant des fronts de taille verticaux. Quelques lentilles peuvent être cimentées (image de droite)

Les **alluvions anciennes du Rhône** sont constituées principalement de galets bien roulés de quartzites et de roches cristallines ou métamorphiques. Les galets de quartzites, très résistants, peuvent atteindre 40 cm dans leur plus grande dimension. Ils sont parfois éolisés (galets à facettes). Les galets de roches cristallines ou métamorphiques sont plus ou moins altérés. On

observe de plus des galets calcaires plus ou moins corrodés. Ces alluvions sont localement indurées. Elles peuvent comporter des lentilles sableuses ou limoneuses.

Les **alluvions actuelles et récentes** sont composées de sables graviers, galets et limons. Au confluent de la Drôme, le Rhône s'est étalé sur une largeur atteignant 6 km (y compris le Würm récent non différenciable), les apports de la Drôme l'ayant refoulé progressivement vers l'Ouest. Dans ce secteur, les sondages de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ont traversé une épaisseur d'alluvions sablo-graveleuses de 9 à 18 m. Le Sondage BSS001ZWJK (au niveau de Lafarge Béton à l'ouest de Loriol), d'une profondeur de 22 m, ne recoupe pas à priori l'ensemble de ces formations, ce qui suppose une épaisseur encore plus importante.

L'apport détritique de la Drôme forme un éventail sur les alluvions du Rhône responsable d'un cône de déjection qui est assez peu prononcé dans le relief. Il semble que ce dernier soit dissymétrique avec dans sa partie sud, une empreinte dans le relief moins marquée avec des courbes de niveau globalement orientées Nord-Sud qui au Nord, passé un linéament géomorphologique NE-SW, prennent la courbure caractéristique d'un éventail (Figure 7)

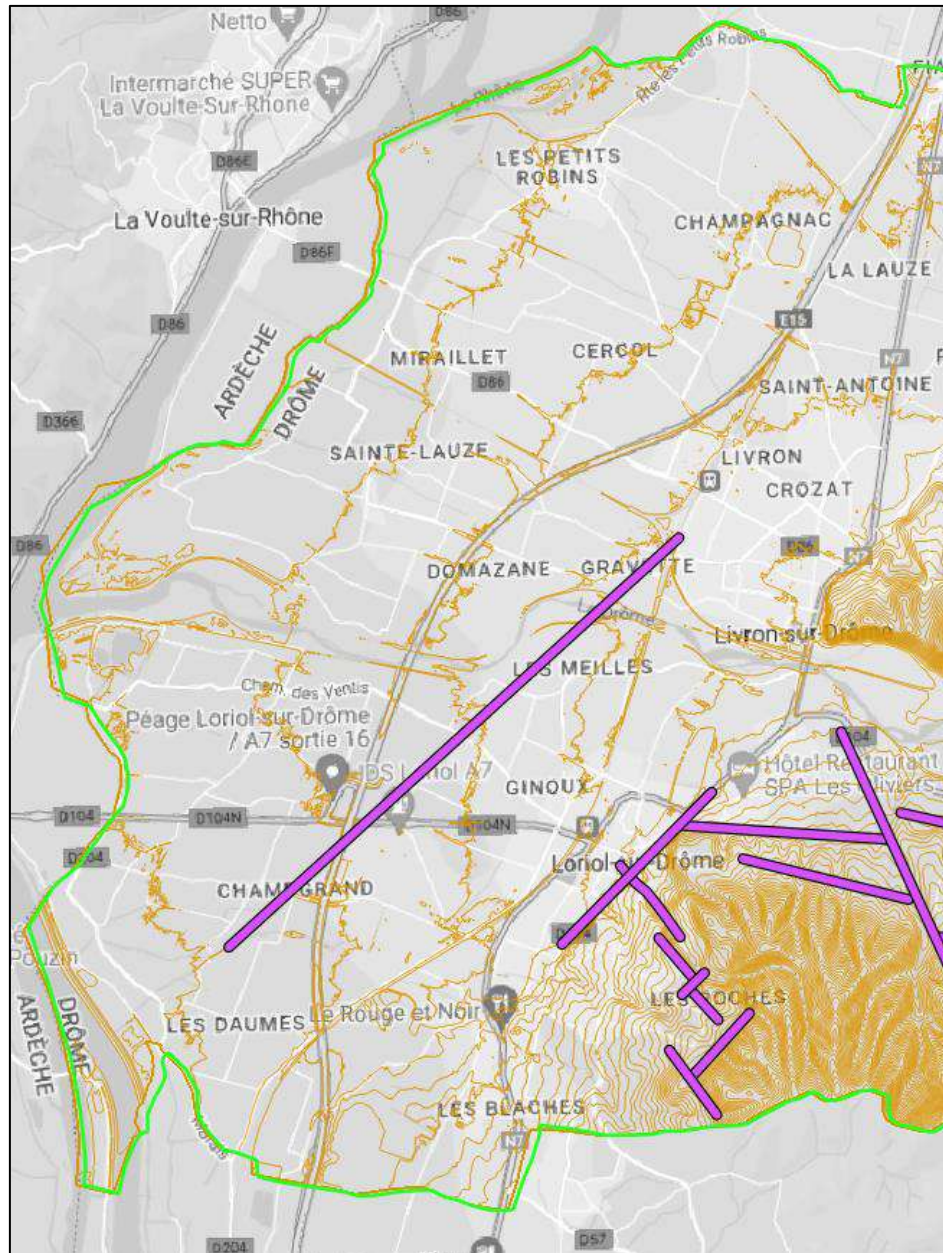


Figure 7 : Contexte géomorphologique du cône de déjection de la Drôme dans la vallée du Rhône. Traits violets : linéaments morphologiques, traits oranges : courbes de niveau (équidistance 5 m)

Au Quaternaire moyen, des **lœss et limons** recouvrent les coteaux du Rhône et de la Drôme.

Le lœss typique de couleur jaune, calcaire, pulvérulent est cohérent car il peut former des talus verticaux de plusieurs mètres. Il s'observe sur les terrasses alluviales anciennes de la rive gauche de la Drôme (Figure 8). Ces lœss ainsi que les limons de décalcification peuvent contenir des lentilles de cailloutis de piedmont.



Figure 8 : Vue sur le placage de Loess en rive gauche de la Drôme, qui repose sur les alluvions anciennes de la rivière (commune de Grâne).

2.3. PROFILS SISMIQUES

Dans un objectif d’imager la structure du sous-sol et notamment d’obtenir des enseignements sur les grands ensembles géologiques qui constituent le bassin de Crest, il a été choisi de retraiter les données de deux lignes de sismique réflexion acquises en 1961. Ces lignes sismiques font partie d’une campagne menée par la Compagnie Générale de Géophysique pour la Société Nationale des Pétroles d’Aquitaine (aujourd’hui TOTAL), sur les permis miniers de la Drôme.

Il faut noter que :

- Toutes les données géophysiques, acquises sur des titres miniers, sont gérées actuellement soit par les opérateurs privés toujours présents en France, soit par le Bureau des Ressources Energétiques du Sous-Sol (BRESS), de la Direction Générale de l’Energie et du Climat (DGECC), sous le Ministère de la Transition écologique. Depuis 2006, ces données sont petit à petit capitalisées au BRGM, qui est, par délégation via une convention avec le Ministère, en charge de l’archivage, et de la mise à disposition de ces données (mission « MINERGIES ¹ »).
- D’après le code minier français les données brutes issues de l’exploration pétrolière sont publiques au bout de 10 ans.

2.3.1. Principe

Le principe de cette méthode est le suivant : des ondes sismiques, engendrées par l’explosion de charges explosives ou de camions vibrateurs, se propagent à travers les terrains sédimentaires, et se réfléchissent à l’interface des formations de nature différente. Les ondes réfléchies sont enregistrées à la surface de la terre par une série de sismographes (appelés géophones) (Figure 9). Chaque couple « source sismique » - « récepteur » va créer une trace élémentaire et imager un point en profondeur. L’ensemble des traces élémentaires, imageant un même point en profondeur, est appelé « Point Milieu Commun » ou « Common Middle Point » (CMP).

¹ www.minergies.fr/

Ces données recueillies, sont chargées dans des logiciels de traitement sismique, qui après plusieurs étapes de filtrage, de corrections et d'addition, donneront un profil sismique. Après interprétation, ce profil permet d'apporter des informations pertinentes sur les différentes structures géologiques telles que leur géométrie (failles, discordances...) et potentiellement leur faciès.

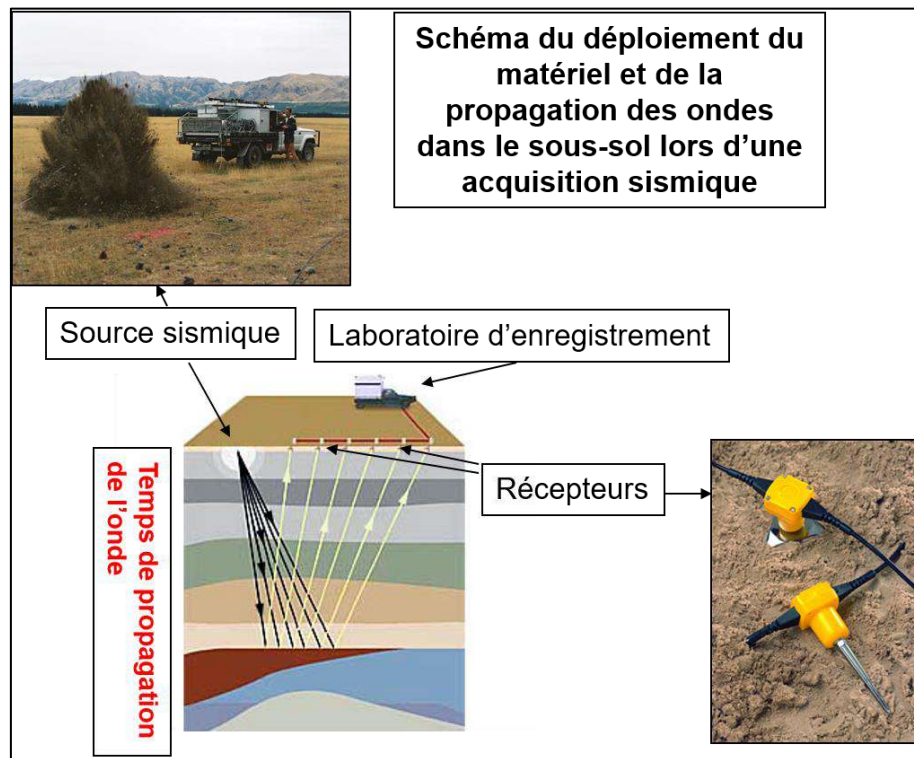


Figure 9 : Illustration de l'acquisition sismique sur le terrain

Les données sismiques brutes (Figure 10) sont constituées : 1) du signal sismique (tir sismique) enregistré sur des supports analogiques ou magnétiques, 2) des informations sur les paramètres d'enregistrement et de déploiement du dispositif d'acquisition (rapport d'enregistrement), (3) des coordonnées des positions de tous les géophones et de toutes les sources d'ondes, issues des camions vibrateurs (ou des explosions pour la dynamite).

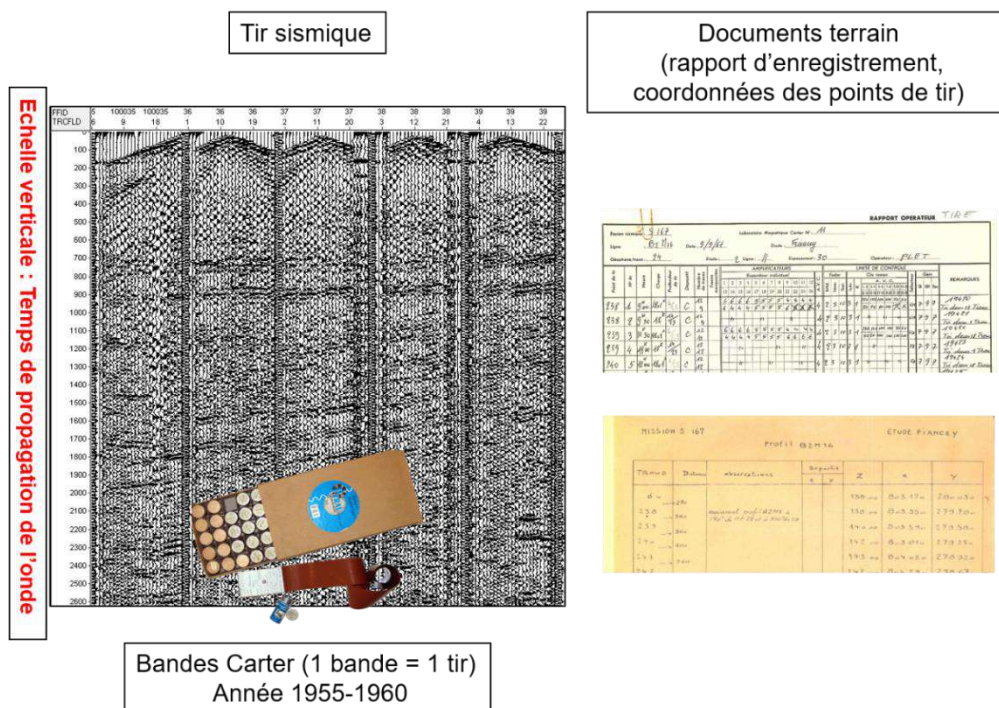


Figure 10 : Illustration des données sismiques brutes : tir sismique et documents de terrain

Les données acquises sur le terrain sont, pour les tirs sismiques, transcrites au format des logiciels informatiques de traitement des données sismiques. Ces données sont ensuite envoyées dans un centre de traitement des données sismiques afin d'obtenir après la mise en œuvre d'un traitement spécifique, un profil sismique retraité ou ligne sismique retraitée.

2.3.2. Déstockage des données sismiques brutes et traitement

Dans le cadre de l'étude, deux lignes sismiques nommées respectivement B2M11 et B2M16 ont été retraitées. Elles sont perpendiculaires, et complètent un maillage de lignes (81SE04, B2M5...) déjà disponibles au BRGM. Ces lignes sismiques sont présentées sur la Figure 11.

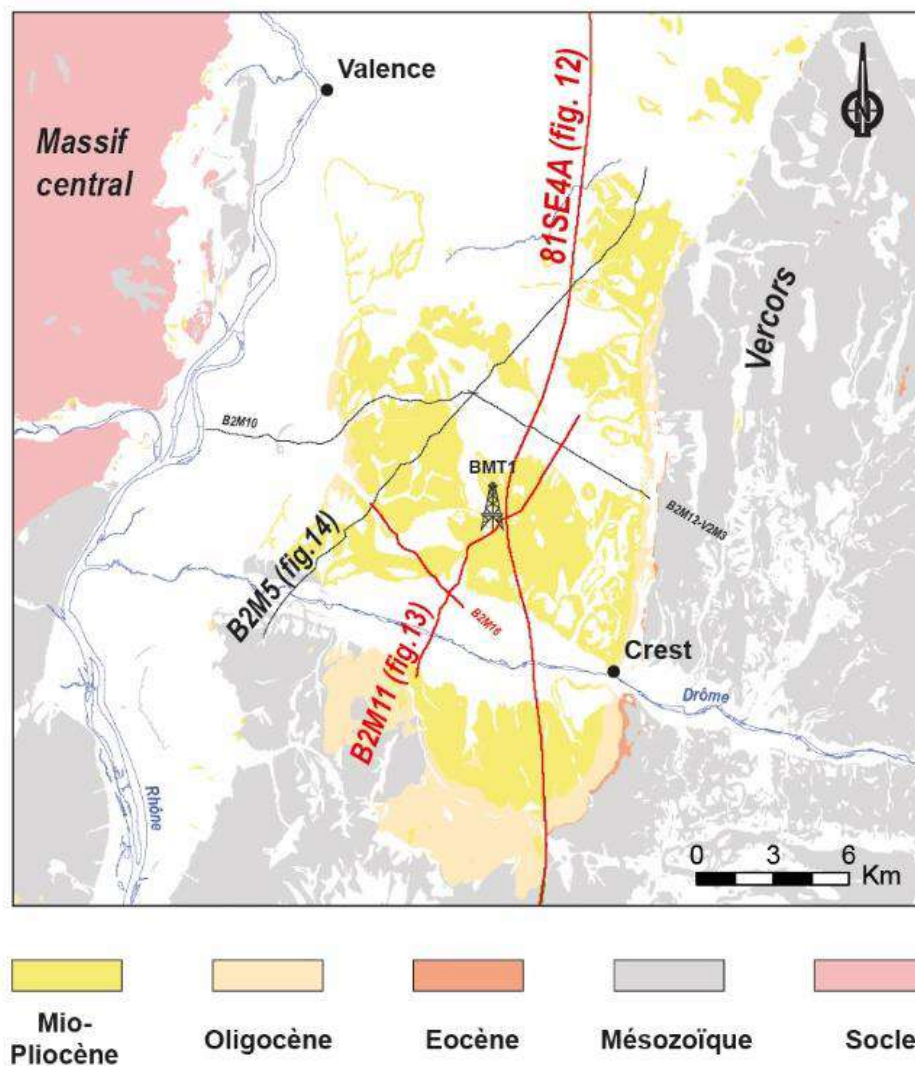


Figure 11 : Géologie simplifiée de la zone d'étude et position des données (sismique et forages) utilisées

Le déstockage des données sismiques brutes a compris les étapes suivantes :

- la demande des données auprès de TOTAL;
- la réception et le contrôle des données et des documents reçus ;
- la transcription des tirs sismiques au format des logiciels informatiques de traitement sismique ;
- la transcription des coordonnées des positions des sources sismiques et des récepteurs du format papier au format numérique le cas échéant.

À la réception des données transcrites, et avant la phase de retraitement, un premier travail de contrôle sur les données brutes a été effectué par le BRGM afin de vérifier si l'ensemble des informations nécessaires étaient cohérentes et complètes.

Les lignes sismiques ont été retraitées par le BRGM en utilisant la migration après addition des traces (post-stack time migration ou migration post-stack). Le détail des principales étapes du traitement est présenté en annexe 1.

Les caractéristiques des lignes sont listées dans le Tableau 1

Nom de la ligne	Premier Point de tir	Dernier Point de tir	Premier CMP	Dernier CMP	Distance entre CMP (m)	Longueur en CMP (Km)
B2M11	79	1052	215	846	20	12.620
B2M16	238	253	212	578	15	5.490
Total:						18.110

Tableau 1 : Lignes sismiques retraitées dans le projet

2.3.3. Interprétation

La répartition des épaisseurs et principales structures

La terminaison Sud du Bassin du Bas-Dauphiné au niveau du seuil de Réauville montre une structuration importante par des failles d'orientation principale N0 à 30 dont certaines sont incurvées. Ces failles affectent les dépôts crétacés inférieur et éo-oligocènes et participent vraisemblablement à leur préservation. Ces structures ne semblent pas affecter les dépôts miocènes. Des structures N50 et plus rarement N110 affectent les mêmes dépôts. D'après les cartes géologiques, les principales structures N0 à N50 montrent principalement des jeux décrochants senestres.

De la même façon, l'ensemble des lignes sismiques dans la zone montrent des plis et failles dont la structuration est antérieure au Miocène. La qualité des lignes sismiques est assez variable, en relation principalement avec la qualité de l'acquisition initiale.

La ligne 81SE04 montre la meilleure imagerie et est utilisée comme référence (Figure 12).

Les géométries sédimentaires montrent des dépôts syntectoniques visibles par les variations d'épaisseur principalement dans les séries Eocène supérieur- Oligocène inférieur. L'intervalle Oligocène supérieur est légèrement affecté par ces accidents qui semblent pour l'essentiel être scellés durant cet intervalle. Enfin, une partie des failles pointées sur la sismique affectent le substratum mésozoïque mais ne décalent pas les dépôts de l'Eocène supérieur à Oligocène, suggérant un jeu anté-priabonien.

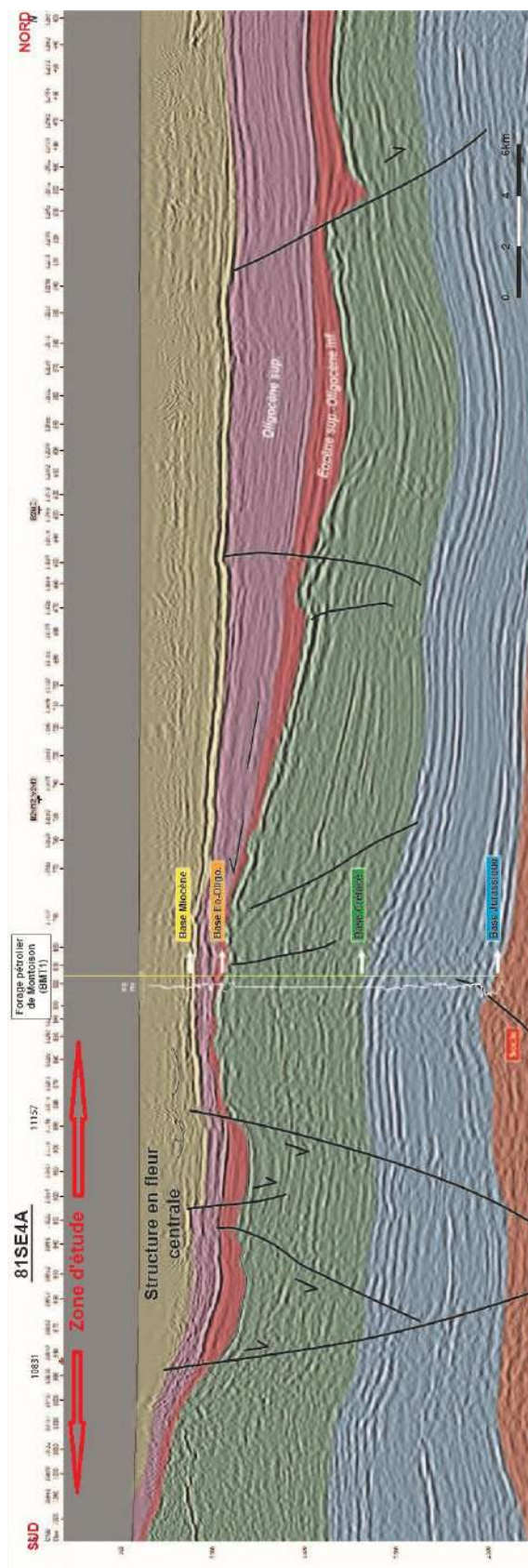


Figure 12 : Ligne sismique 81SE4A interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double. (La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11)

La majorité des structures observées montre un jeu normal, la tectonique compressive alpine est peu marquée au niveau du rejeu des accidents. La densité des lignes et la qualité médiocre de plusieurs d'entre elles en particulier les lignes B2M11, B2M5 (Figure 13 et Figure 14), ne permettent pas de corrélérer avec certitude une grande partie des failles observées sur la sismique d'un profil à l'autre. Toutefois quelques failles majeures montrant des jeux importants ou délimitant des portions de bassins (grabens, horsts) peuvent être identifiées et corrélées. Elles jouent probablement un rôle important dans la circulation des eaux souterraines et la mise en communication des différents horizons aquifères.

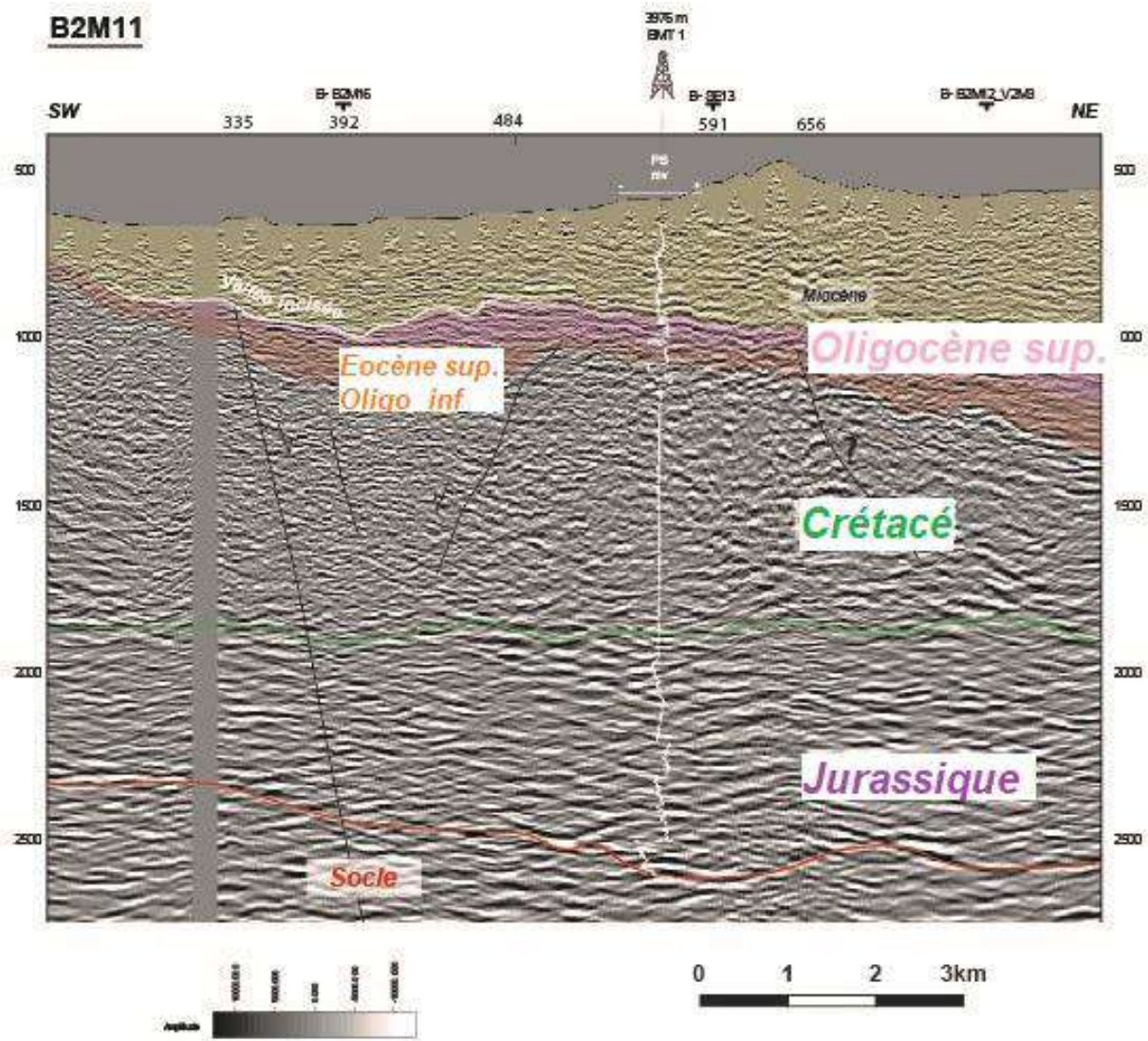


Figure 13 : Ligne sismique B2M11 interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double. (La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11)

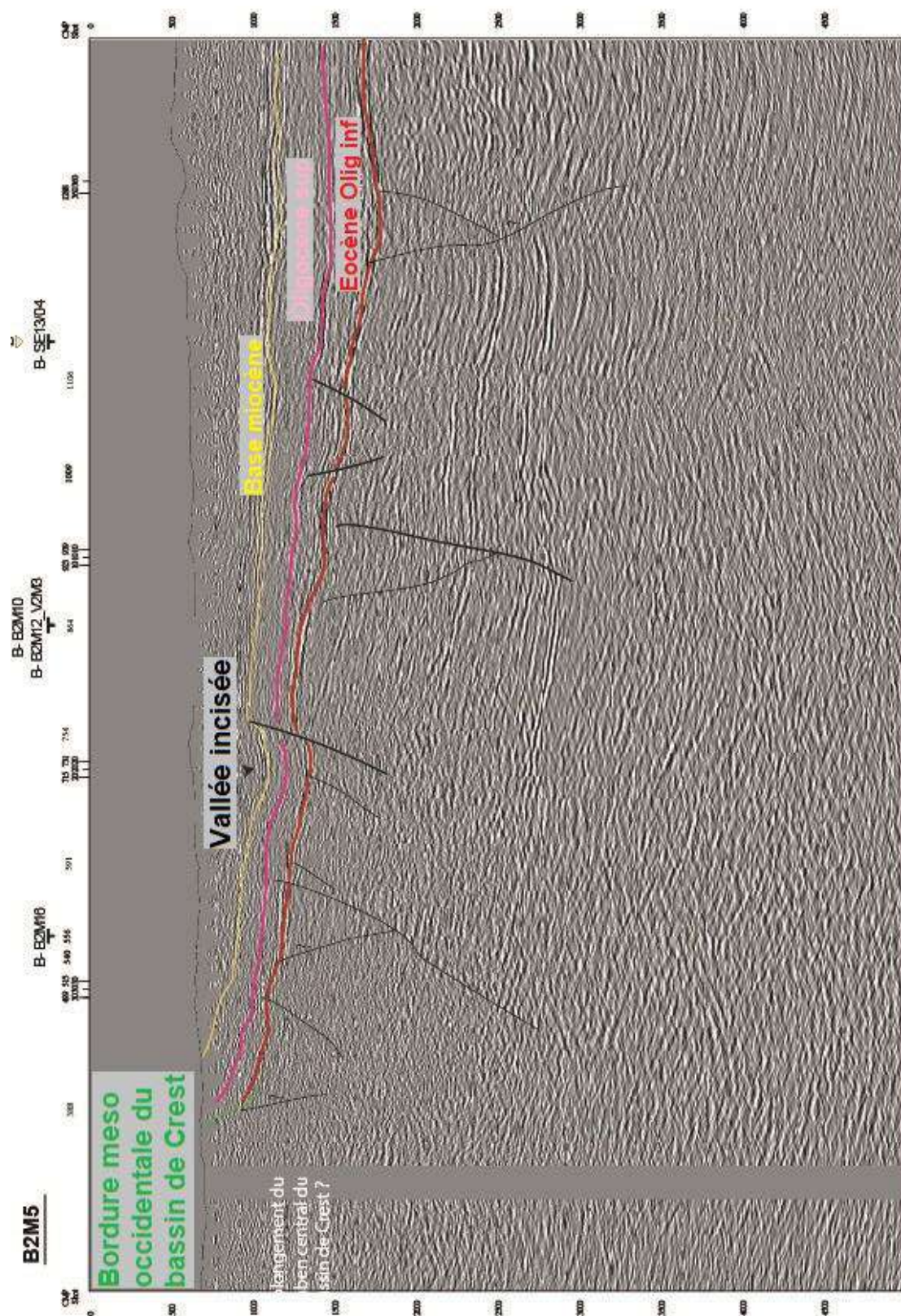
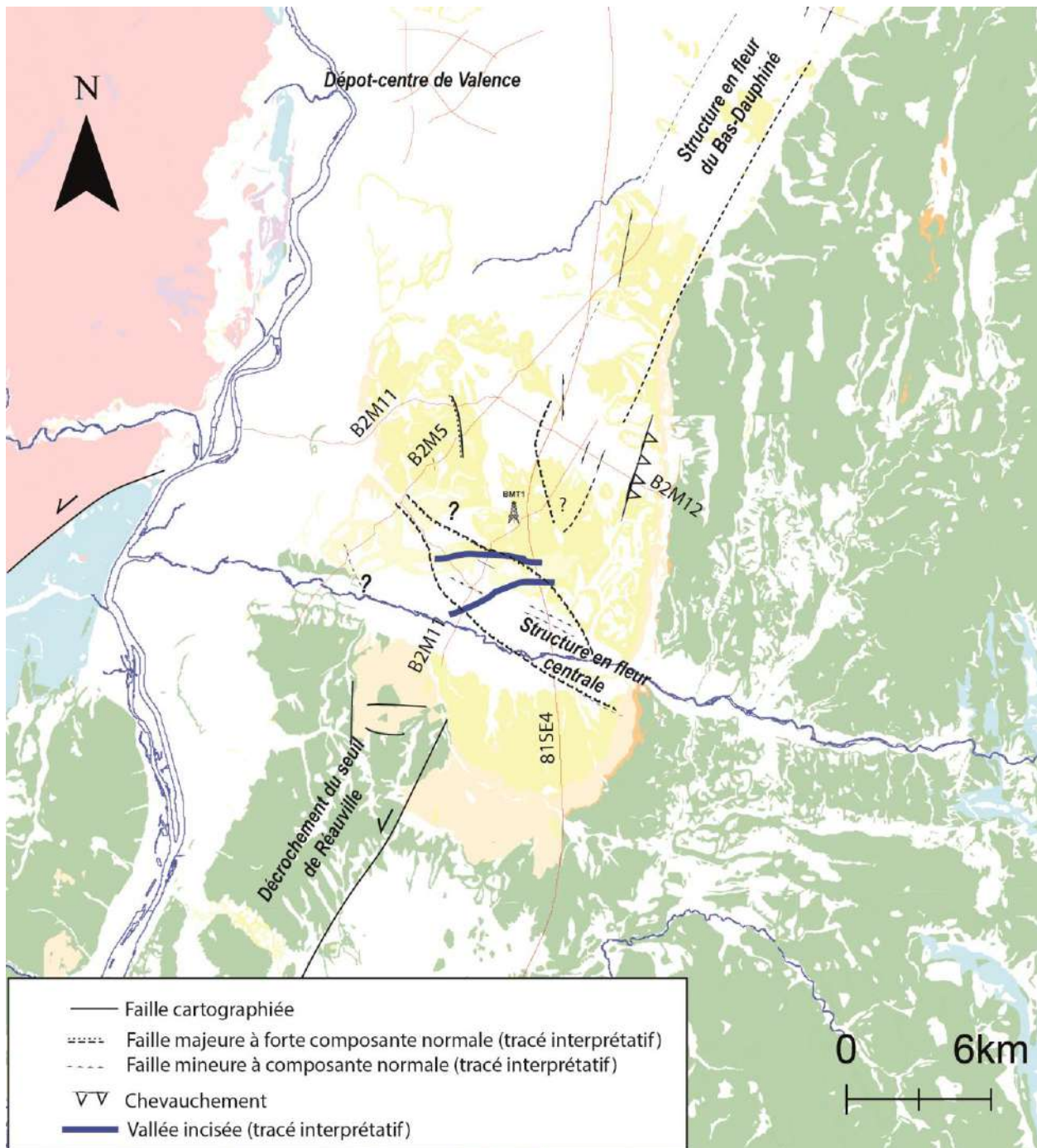


Figure 14 : Ligne sismique B2M5 interprétée, montrant les principales structures et variations d'épaisseur dans les sédiments tertiaires. L'échelle en ordonnées est en temps double. (La localisation de la ligne sismique est présentée Figure 11)

Un schéma structural et le tracé possible de la vallée messinienne principale basée sur l'interprétation des lignes sismiques sont présentés Figure 15.



La présence de cette vallée messinienne a vraisemblablement une influence sur le fonctionnement hydrogéologique actuel de l'hydrosystème de la basse vallée de la Drôme (cf. chapitre 3.4.).

2.3.4. Conclusions sur le retraitement des lignes sismiques

L'ensemble de ces interprétations permettent d'identifier les principales structures affectant principalement les dépôts oligocène et antérieurs, qui génèrent des géométries particulières susceptibles de mettre en communication les différents niveaux aquifères oligocène et crétacé. Elles permettent de montrer l'existence de vallée incisée d'âge miocène inférieur, siège de possibles aquifères.

Elles fournissent enfin la donnée de base pour reconstruire la géométrie de ces niveaux peu atteints par les forages. Pour aller plus loin et renforcer les interprétations des acquisitions géophysiques supplémentaire (sismique mais aussi électromagnétique) seraient nécessaires.

Il convient de noter que le retraitement des données sismiques a mis en évidence que les sédiments plioquaternaires ne peuvent pas être imagés de façon satisfaisante. Ce type d'acquisition sismique permet d'imager en effet que les formations plus profondes.

2.3.5. Données de l'étude Zone Atelier Bassin du Rhône

Afin de compléter les connaissances sur le sous-sol de la zone d'étude, il convient de mentionner la campagne de prospection géophysique par radar géologique qui a été réalisée dans le cadre de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR, 2016).

Les profils ont été effectués de part et d'autre du pont de la RN n°7 à Livron/Drôme (Figure 16). Ils couvrent un secteur qui n'est pas imagé par les lignes sismiques et concernent des horizons moins profonds (formations alluviales, formations pliocènes et formations du Crétacé proches de l'affleurement).



Figure 16 : Localisation des radargrammes en amont et en aval du pont de Livron (Source : ZABR, 2016)

Ils ont permis d’imager le remplissage fluvial de la Drôme (alluvions récentes d’une puissance estimée de 4 à 7 m) ainsi que les formations marno-calcaires litées de l’Hauterivien. Une zone faillée, semble affecter ces dernières formations sur le profil 5 et profil 6 (Figure 17).

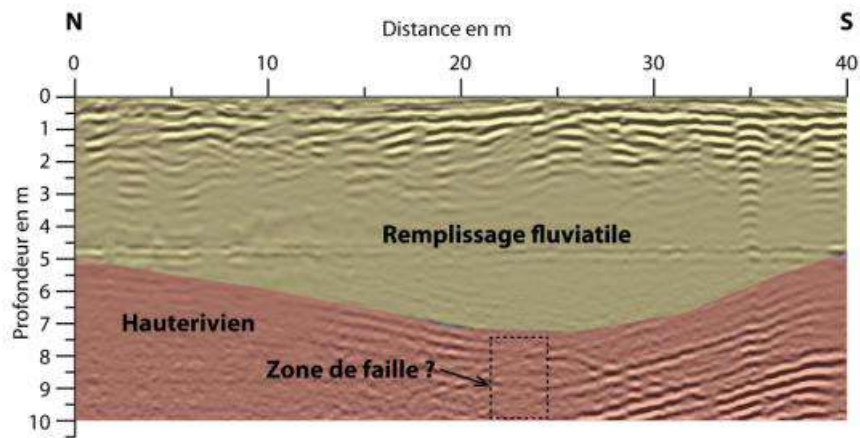


Figure 17 : Profil sismique n°6 en aval du pont de la RN 7 (Source : ZABR, 2016)

Certains profils en amont du pont montrent l’existence d’un horizon de remplissage indéterminé (fluvial ou Pliocène) intercalé entre ces deux formations : profil 1 par ex (Figure 18).

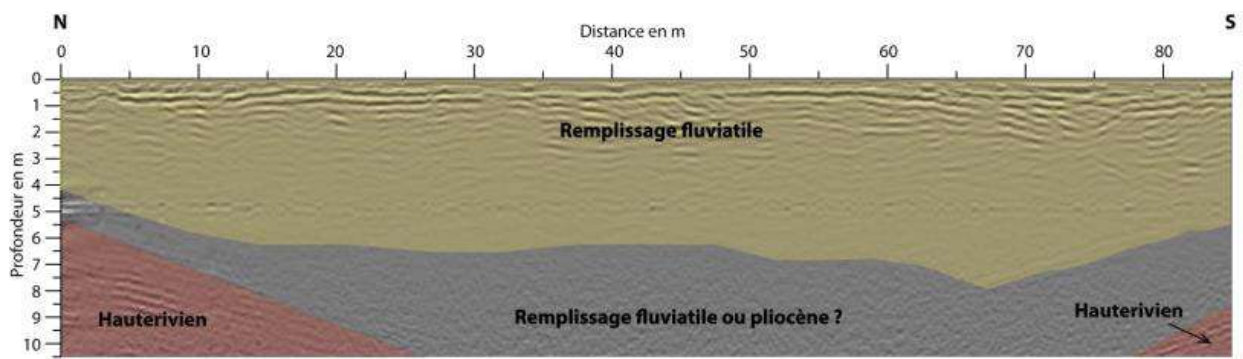


Figure 18 : Profil n°1 en amont du pont de la RN 7 (Source : ZABR, 2016)

3. Les eaux souterraines

3.1. INTRODUCTION

Avant la présentation des données issues ou traitées dans les sections 4 à 9, la section qui suit présente les connaissances déjà existantes sur les principaux contextes hydrogéologiques de la zone d'étude. Afin de permettre une description plus aisée des différents contextes, les regroupements par lithologies simplifiées présentés dans le chapitre 2 sont utilisés ici.

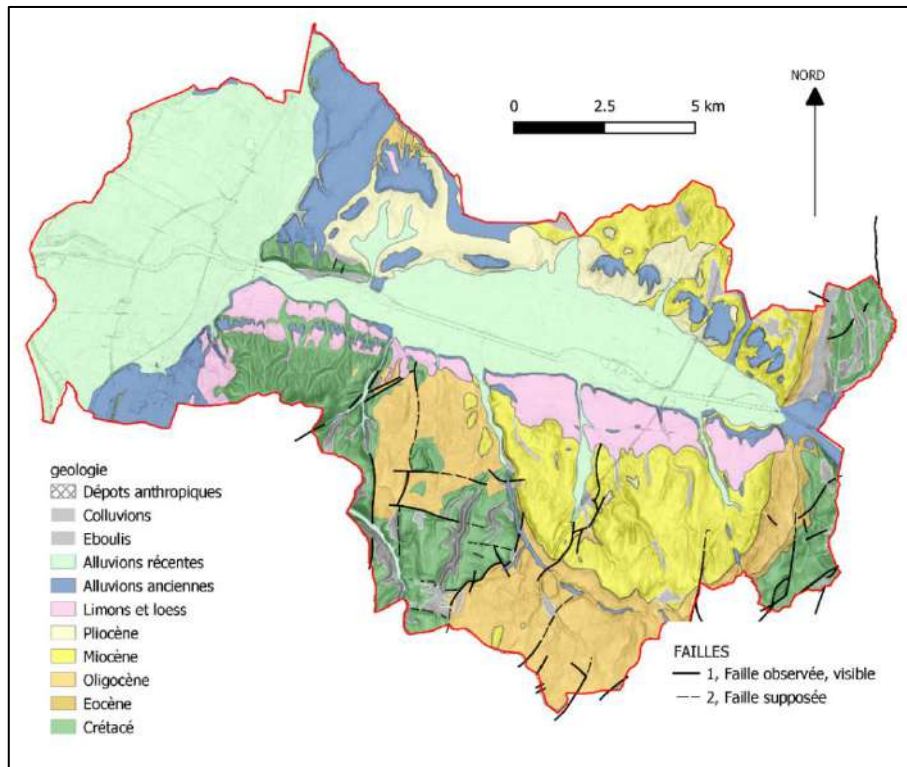


Figure 19 : Lithologie simplifiée de la zone d'étude (d'après la carte géologique à 1/50000 du BRGM n°842 de Crest)

3.2. LES AQUIFERES ALLUVIAUX

3.2.1. Alluvions récentes de la Drôme

Les principales réserves aquifères conséquentes du secteur d'étude se trouvent dans les alluvions récentes de la Drôme. Celles-ci sont représentées en vert clair sur la figure 19.

a) Secteur de Livron/Drôme et Loriol/Drôme

Ce secteur comporte des captages d'AEP (Domazane, Couthiol, Négociale), de nombreux forages destinés à l'irrigation des cultures et ainsi que des puits à usage domestique.

Le substratum de l'aquifère des alluvions récentes est formé des calcaires marneux de l'Hauterivien. Ces derniers peuvent être surmontés par les formations argileuses pliocènes comme dans le secteur des captages d'AEP de la Domazane.

L'aquifère alluvial d'une vingtaine de mètres de puissance est constitué de sables, galets et graviers. Les alluvions gravello-sableuses du Rhône ont été remaniées par les apports de la Drôme qui a fortement surcreusé les alluvions du Rhône en val de la route nationale n°7 (cf cône de déjection de la figure 7).

La nappe est présente dans le continuum alluvions du Rhône / alluvions de la Drôme.

L'aquifère est protégé par une couverture argileuse (argile bleue à brune parfois légèrement sableuse) de 6 et 12 m d'épaisseur pouvant localement être plus ou moins érodée. Cet horizon argileux confère à la nappe une certaine protection vis-à-vis des activités anthropiques : la nappe étant captive sous cette couverture (IdéesEAUX, 2018).

Les études de mise en conformité des captages d'AEP ont mis en évidence une alimentation de la nappe principalement par la Drôme depuis le pont de la RN 7 à Livron sur Drôme, avec un sens d'écoulement général du Sud-Est vers le Nord-Ouest pour le territoire de la commune de Livron sur Drôme et un sens d'écoulement orienté vers le Sud-Ouest pour Lorioi sur Drôme.

Le gradient hydraulique est faible, inférieur à 5 ‰, ce qui traduit une forte perméabilité des matériaux alluviaux : de l'ordre de 10^{-3} m/s.

L'étude SOGREAH (2012) a montré que : 1) la rivière Drôme se situe toujours en position haute par rapport à la nappe alluviale avec laquelle elle est en connexion hydraulique (Figure 20) et que 2) le débit de la Drôme diminue de façon continue de la sortie du défilé constitué des falaises calcaires du Crétacé à Livron jusqu'au seuil de la CNR, pour le régime hydrologique de la rivière en 2011.

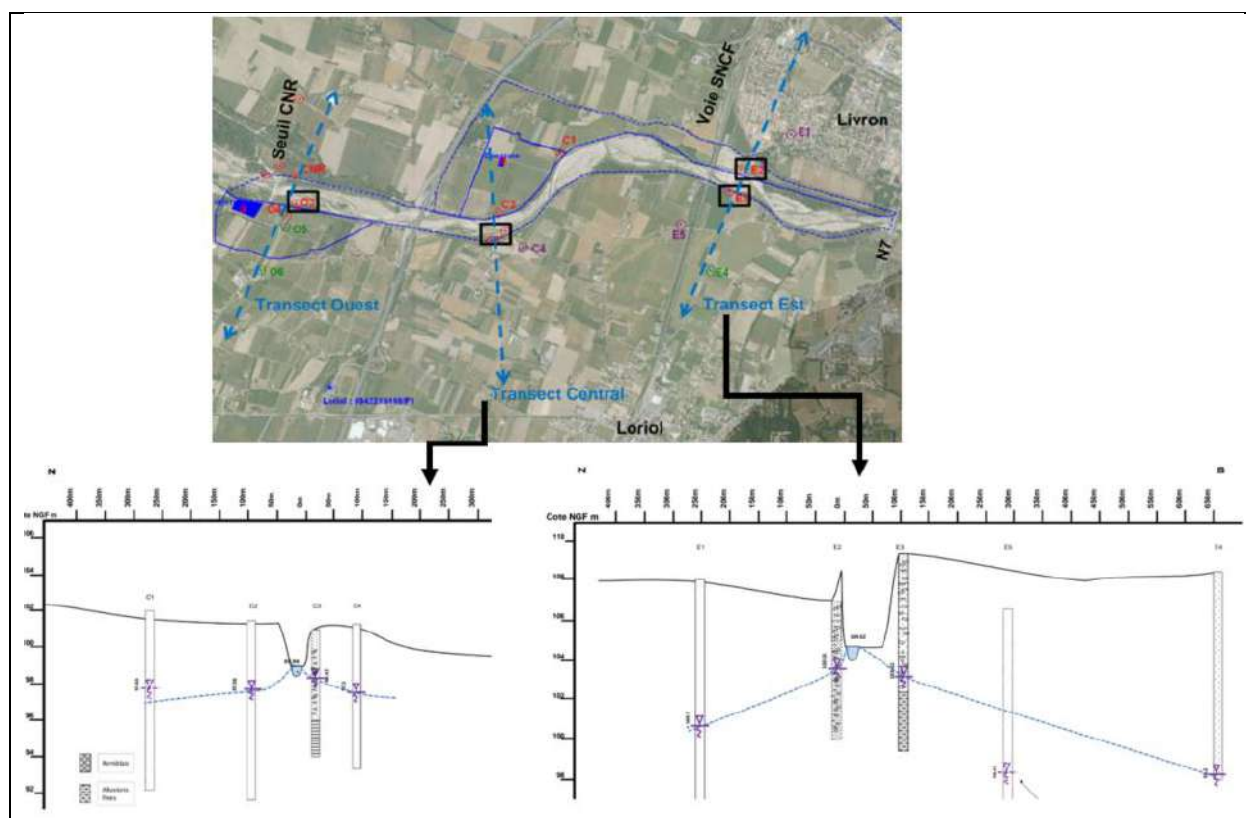


Figure 20 : Relations hydrauliques entre la Drôme et la nappe alluviale, Transect central et transect Est (Source : SOGREAH , 2012)

Le rapport d'étude IdéesEAUX (2018) a également mis en évidence une alimentation en provenance des coteaux situés à l'Est de la commune de Livron/Drôme. Les alluvions anciennes, surélevées par rapport aux alluvions récentes, contiennent en effet des nappes morcelées qui se créent à la faveur de surcreusement du substratum argileux du Pliocène (Figure 21). Ces nappes peuvent être en continuité hydraulique directe ou indirecte avec la nappe des alluvions récentes.

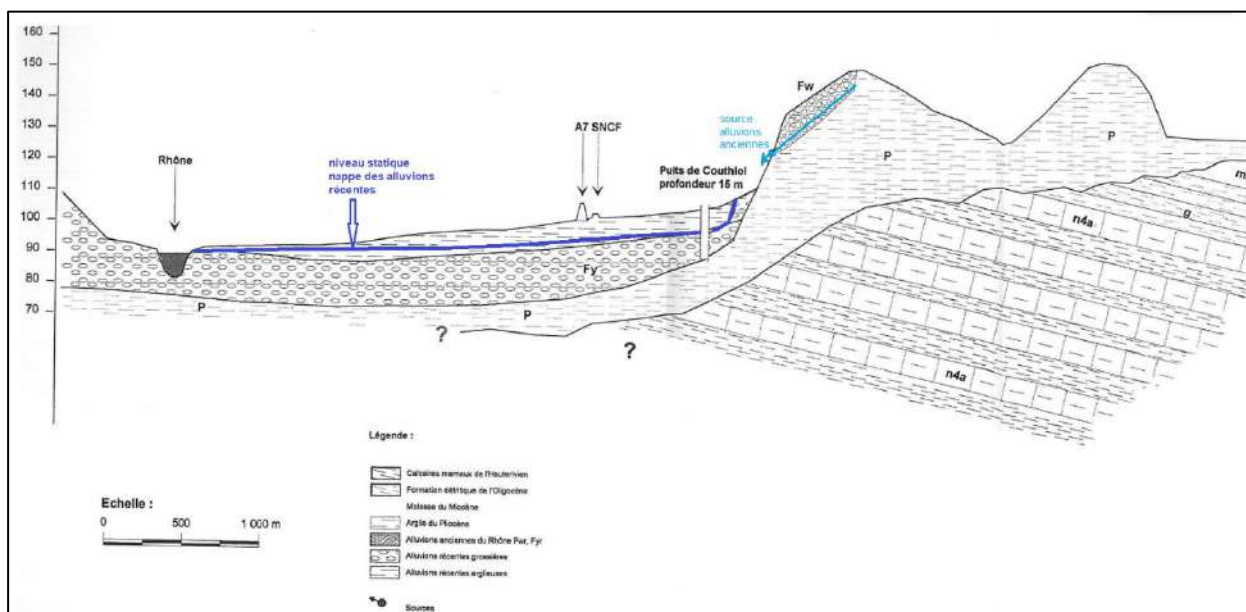


Figure 21 : Coupe Ouest-Est passant par le captage de Couthiol (commune de Livron) illustrant les relations indirectes entre la nappe des alluvions anciennes et la nappe des alluvions récentes. (IdéeEaux, 2018 modifié).

Une alimentation depuis les coteaux de l'Est de la commune de Loriol est probable mais elle semble de faible importance car il existe très peu de captages de sources en bibliographie dans ce secteur. On peut citer toutefois les anciens captages d'AEP de Signol implantés dans les alluvions anciennes au Sud de la ville (BSS001ZWPPX).

b) Secteur de Crest à Alex/Grâne

Comme pour la partie aval, ce secteur comporte des captages d'AEP, de nombreux forages destinés à l'irrigation des cultures et ainsi que des puits à usage domestique.

Les alluvions d'une épaisseur moyenne de l'ordre 10 mètres reposent à l'Est sur les formations molassiques (Crest, Divajeu) et à partir d'Eurre environ et jusqu'à Alex/Grâne sur les formations pliocènes. Dans l'extrême Ouest, les alluvions reposent sur les calcaires marneux de l'Hauteriviens. Les alluvions sont constituées en général d'éléments plutôt grossiers.

La nappe alluviale est libre. Le niveau statique varie de 170 m NGF de Crest à 120 m NGF à l'entrée du défilé Livron/Loriol sur Drôme. Le niveau piézométrique varie de de -2 m/terrain naturel (TN) à -5 m/TN.

Plusieurs études ont montré que les échanges nappe/rivière ne sont pas homogènes sur l'ensemble du tronçon et selon la rive considérée (ZABR, 2016). Dans certains secteurs de la rive droite, il a été montré un colmatage important des berges.

Certains méandres anciens, décelables seulement par prospection géophysique, présentent une perméabilité relativement élevée ce qui a permis d'y implanter des captages d'AEP : les Pues et Puits de la Gare sur la commune d'Allex (Thieuloy, 1987 et 1986).

Sur la commune d'Allex, Ideaux (2011) a montré l'existence d'un axe de drainage préférentiel correspondant à un ancien chenal. Ce secteur bénéficie d'une bonne transmissivité comprise entre 0,01 et 0,2 m²/s. A cet endroit c'est la nappe qui alimente la rivière.

Dans le secteur du captage d'AEP des Ramieres (commune d'Eurre), la perméabilité est de l'ordre de 1 à 3.10⁻³ m/s. Le battement de la nappe a une valeur moyenne de 1,5 m (Margalhan-Ferrat, 1991).

A noter qu'il existe des secteurs où la productivité de l'aquifère alluvial n'est pas très bonne en particulier lorsque que l'on s'éloigne de la Drôme. L'ancien captage d'AEP des Roures sur la commune de Grâne par exemple, a été abandonné en raison de la présence de nitrate en concentration supérieure à 50 mg/L mais aussi en raison d'une mauvaise réalimentation de la nappe par la Drôme dans ce secteur.

3.2.2. Alluvions anciennes

Dans ce rapport, il est fait une distinction entre les nappes des hautes terrasses des alluvions anciennes et les nappes des alluvions anciennes de la rive gauche de la Drôme, recouvertes par des limons et loess.

a) Alluvions anciennes

Ces formations sont présentes à l'affleurement dans toute la zone d'étude mais elles sont principalement développées à l'Est de Livron et Loriol. Elles contiennent des nappes morcelées qui apparaissent à la faveur de surcreusement du Pliocène imperméable (cf chap 3.1.1.).

Plusieurs émergences donnent naissance à des rûs au Nord du Haut-Livron par exemple, qui vont ensuite rejoindre la nappe des alluvions récentes. Tout au nord de la commune de Livron (secteurs St Genys, Fontgrand, les fonds, La Tourette...) on peut observer la présence de sources qui ont été captées pour alimenter des lavoirs ou des fontaines.

L'étude IDEEAUX (2018) sur le captage de Couthiol à Livron mentionne pour les alluvions anciennes de ce secteur un gradient hydraulique important (~20 ‰) traduisant de faibles perméabilités de l'aquifère (10⁻⁵ m/s).

Des puits, à usage domestique, captent à présent cette ressource en eau qui était utilisée dans le passé pour l'AEP. On peut citer par exemple, un ancien captage d'AEP de la commune d'Allex qui interceptait une petite venue d'eau située à la base de l'ancienne terrasse alluviale couronnant le coteau de Laye sur lequel est implanté le bourg. D'une puissance de 10 à 20 m d'épaisseur, ces alluvions anciennes surmontent les formations pliocènes (Rampon, 1984). La commune de Loriol disposait également de deux captages interceptant une nappe circulant dans les alluvions anciennes, au sud de la ville : captages de Signol (BSS001ZWPPX).

b) Alluvions anciennes & Limons et loess

Ces formations sont présentes sur la haute terrasse qui borde le Sud de la Drôme. Ces formations alluvionnaires qui reposent sur des marnes miocènes contiennent une nappe appelée « nappe des coteaux ». Plusieurs études ont montré que cet aquifère était fortement chenalisé. Les limons argileux peuvent localement assurer une certaine protection à la nappe mais il peut exister des

irrégularités de la couverture pédologique qui permettent à la couche graveleuse d'affleurer. Des études ont montré l'existence de fortes concentrations en nitrate dans la nappe.

Les investigations menées lors de la création du forage de l'auberge de la plaine à Chabrillan (BSS003WPPQ) ont montré que l'aquifère avait dans ce secteur une épaisseur d'environ 14 m avec une zone saturée de seulement 0,90 m. La perméabilité a été estimée à $4,4 \cdot 10^{-4}$ m/s (Tschanz, 1997).

Levasseur (2015) a déterminé, pour le secteur la Plaine/St-Laurent de la commune de Chabrillan un sens d'écoulement de la nappe orienté du Sud vers le Nord, c'est-à-dire en direction de la Drôme (Figure 22).

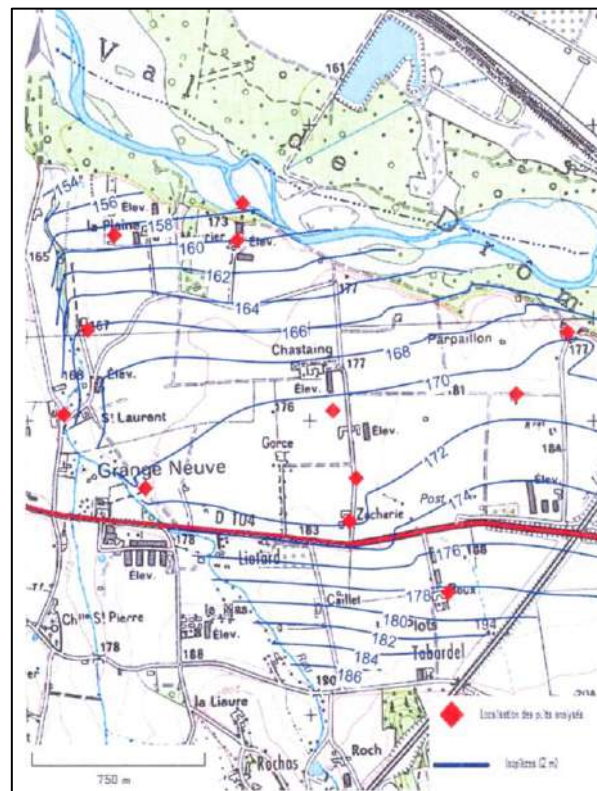


Figure 22 : Carte piézométrique de la nappe des limons et loess dans le secteur la Plaine/St-Laurent sur la commune de Chabrillan, juin 2015 (Levasseur, 2015)

L'exutoire de la nappe des coteaux se situe au droit de la terrasse des alluvions anciennes. Cette nappe n'est pas en connexion hydraulique directe avec la nappe des alluvions récentes de la Drôme.

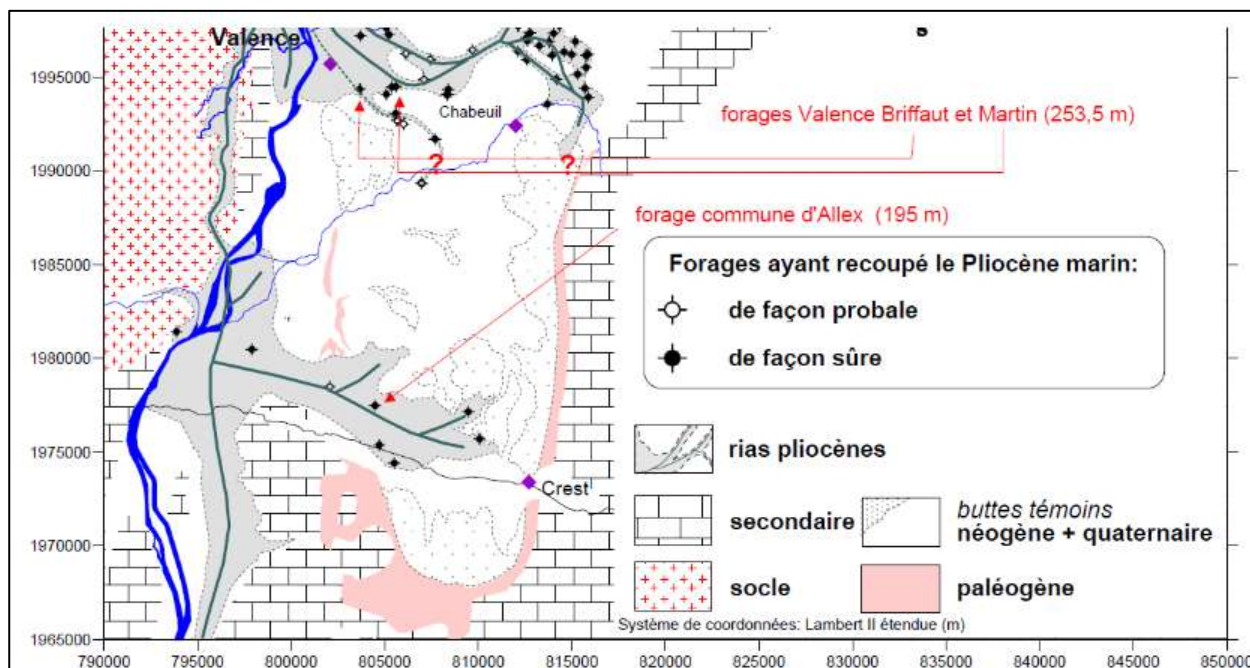
La plupart des exploitations agricoles du secteur comportent un ou plusieurs puits utilisés autrefois pour les besoins domestiques et pour l'arrosage des cultures. A présent, ces puits servent principalement pour l'arrosage des jardins et potagers.

3.3. LES FORMATIONS PLIOCENES

Présentes à l'affleurement au nord de la zone d'étude, ces formations qui comportent des argiles ou marnes sableuses, grises ou bleues, se retrouvent sous couverture alluviale sur une partie du territoire. La Figure 23 indique l'emplacement de la Ria Pliocène dans la vallée de la Drôme (de la Vaissière, 2006).

Bien qu'il soit souvent indiqué dans la littérature que ces formations constituent le substratum des nappes alluviales et qu'elles ne sont pas aquifères, il apparaît néanmoins qu'il existe des passées sableuses contenant des nappes. Cet aspect est mentionné par de la Vaissière (2006) qui souligne le potentiel aquifère des niveaux sableux marins du Pliocène, que Ballesio (1972) a relevé en grand nombre dans la vallée de la Drôme. Les données actuelles ne montrent toutefois pas de continuité spatiale entre ces niveaux sableux à l'échelle du bassin.

Par ailleurs, l'Infra-pliocène qui provient d'une phase de démantèlement liée à la crise messinienne, comporte des éléments grossiers et renferme une nappe dont les potentialités restent à démontrer mais qui pourraient ne pas être négligeables. Les travaux réalisés pour le Train à Grande Vitesse ont montré près d'Eurre, que cet horizon compris entre la molasse et le pliocène, présentait une perméabilité de $K = 10^{-5}$ m/s avec une nappe en charge (4 à 5 m au-dessus du sol).



Des puits à usage domestique, de quelques mètres de profondeur, captent de petites nappes présentent au-dessus des niveaux marneux imperméables. Ces nappes peuvent donner naissance à de petites sources.

A titre anecdotique, on relève l'existence de deux galeries creusées dans les formations pliocènes de coteau de Laye où se situe le bourg d'Allex. La galerie de la source du terrail est située dans la montée éponyme et la galerie de la source Seguin est située dans la cour d'une habitation à côté de la mairie. En décembre 2022, les débits de deux sources étaient très faibles et ne servaient plus qu'à alimenter un bassin du parc de la congrégation religieuse St Joseph.



Figure 24 : Entrée de la galerie de captage de la source du Terrail implantée dans les formations pliocènes du coteau de Laye à Alex.

Plusieurs forages recoupant des niveaux aquifères du Pliocène sableux sont recensés, notamment sur la commune d'Alex. Parmi eux, on peut citer un forage de 195 m de profondeur réalisé par la municipalité en 1984 au droit du coteau de Laye (BSS001ZWVD). Il a rencontré des sables bouillants aquifères intercalés dans des niveaux marneux (Rampon, 1984). Malgré la définition de périmètres de protection, cet ouvrage n'a pas été mis en production en raison de la qualité de l'eau qui s'est avérée non compatible pour l'alimentation en eau potable en raison de concentrations importantes en fer, manganèse et baryum.

Un forage a été réalisé en 2022 au pied du coteau de Laye (BSS004CXPV). D'une profondeur de 28 m, il a recoupé les alluvions récentes de la Drome sur 11 m avant d'atteindre des marnes sableuses aquifères du Pliocène. Le substratum imperméable de la nappe est constitué d'argiles bleues. Sa coupe technique indique qu'il est crépiné au droit des marnes sableuses et à la base des alluvions. Cet ouvrage est utilisé pour un usage industriel.

3.4. LA MOLASSE MIOCENE

Le bassin molassique de Crest forme une cuvette synclinale, ouverte en un demi-cercle sur la vallée de la Drôme. La molasse miocène se compose de matériaux détritiques avec une dominante sableuse. Selon les secteurs, elle se présente sous la forme d'un sable plus ou moins argileux ou gréseux (IdéeEAUX, 2012).

L'aquifère molassique est caractérisé par des perméabilités de l'ordre de 10^{-5} m/s en moyenne, avec une amplitude de perméabilité pouvant aller de 10^{-7} et 10^{-3} m/s. Ces variations aussi bien horizontales que verticales, traduisent une très forte hétérogénéité du milieu (Cave et Faure, 2011).

Cet aquifère a un fonctionnement stratifié. Il comporte dans sa partie sommitale de petites nappes superficielles qui se créent à la faveur d'un faciès sous-jacent de plus faible perméabilité (marnes, grès). Thieuloy (1966) par exemple rapporte la présence d'une petite nappe dans la combe du rif noir, en amont du village des Porteronds, qui se forme au contact d'un banc de grès grossier.

Des circulations plus profondes existent également et dépendent du relief régional à la différence des circulations superficielles qui sont guidées par la topographie locale.

Des phénomènes de mise en charge des nappes profondes se rencontrent quand la nappe de la molasse se retrouve sous le Pliocène argileux ou sous les faciès marneux dans le bassin de Crest. Les passées indurées provoquent également la mise en charge de celle-ci (De la Vaissière, 2006).

Au Sud de la Drôme, l'aquifère est alimenté directement par les précipitations au droit des zones d'affleurement. De la Vaissière (2006) fait état également d'une possible alimentation par les formations mésozoïques du massif de Marsanne via la faille éponyme. Larguier (2006) a défini une ligne de partage des eaux, pour les circulations superficielles, qui passe au droit du village d'Autichamp et qui se poursuit vers l'Est-Nord-Est.

Au nord de la Drôme, une ligne de partage des eaux souterraines passant par Vaunaveys la Rochette sépare le bassin de Crest du reste du bassin de Valence, la recharge de l'aquifère se fait par les précipitations.

De la Vaissière (2006) a comparé les caractéristiques hydrodynamiques (transmissivité et perméabilité) de la molasse du Miocène et du Pliocène et en a déduit qu'il n'y aurait pas de discontinuité forte dans la circulation de l'eau entre la matrice Miocène et Pliocène. Les rias pliocènes pourraient selon lui, drainer l'aquifère miocène notamment l'infra-pliocène constitué de matériaux grossiers que l'on retrouve de manière continue dans tout le bassin. En ce qui concerne les niveaux sableux du Pliocène marin, il n'a pas été démontré à ce jour, qu'ils soient continus spatialement et donc qu'ils puissent drainer à grande échelle la molasse miocène. Pour cet auteur, les vitesses de circulation de l'eau varient de quelques m/an dans les rias pliocènes et les horizons aquifères profonds de la molasse à 200 à 300 m/an pour les nappes superficielles et dans les zones les plus perméables.

La carte piézométrique dressée par Cave (2011) donne un sens d'écoulement global de la nappe de la molasse miocène orientée Est-Ouest avec une composante vers le Sud au Nord de la Drôme et une composante vers le Nord au Sud de la rivière (IdéeEaux, 2012).

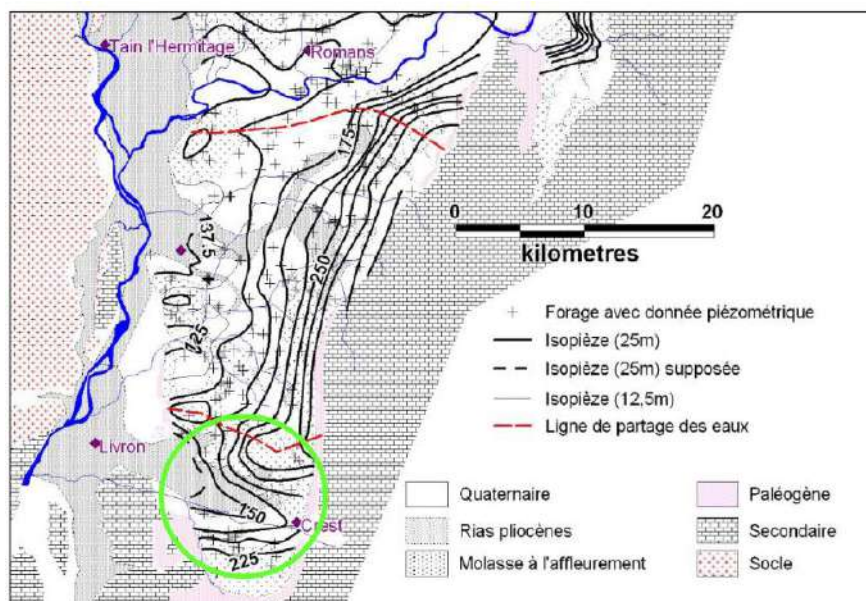


Figure 25 : Carte piézométrique des circulations profondes de la molasse miocène, cercle vert : la zone d'étude (source IdéeEaux, 2012 d'après Cave, 2011)

De nombreux puits domestiques exploitent les nappes superficielles. Certaines sources ont été ou sont encore également captées pour l'AEP (Captage des Jacomons à Chabrilan, source Chaffoix à Autichamp) mais on observe une dégradation de la qualité de cette ressource depuis les années 1990. Certaines nappes peu profondes peuvent également être captées par de petites galeries.

Des forages pouvant atteindre 180 m de profondeur, essentiellement à usage agricole, exploitent des nappes captives qui peuvent présenter localement un artésianisme. Les débits exploitables atteignent au mieux 60 m³/h et un certain nombre d'ouvrages se révèlent peu productifs. Par ailleurs, il apparaît que souvent un seul niveau est vraiment productif, le reste des parties crépinées est peu ou pas productif.

3.5. LES FORMATIONS OLIGOCENES

Les ressources en eau souterraine contenues dans les formations oligocènes sont peu importantes et sont essentiellement liées à des circulations fissurales.

Dans le secteur d'étude, le captage d'AEP Dorier sur la commune d'Autichamp exploite de manière gravitaire cette ressource (Margalhan-Ferrat, 2009).

Deux captages d'AEP sont recensés sur la commune de la Roche-sur Grâne : le captage de Terron-Fayes et le captage du Buis. Dans les deux sites, la nappe circule dans les calcaires fissurés du Stampien, des intercalations marneuses constituent le substratum de la nappe. (Monnier, 1999 et Thieuloy, 1998).

Quelques puits domestiques sont également recensés sur les communes de Grâne, Autichamp et Divajeu

La ressource est vulnérable aux contaminations d'origine superficielle du fait du transit rapide des précipitations. L'épaisseur modeste de la formation réservoir et la faible étendue des bassins versants conduit à des fluctuations importantes de débits à l'échelle annuelle.

3.6. LES FORMATIONS CRETACEES

Les formations crétacées n'ont que de très faibles ressources en eau souterraine par suite de la prédominance des faciès marneux imperméables.

Sur la commune de Grâne, le syndicat Drôme Rhône exploite pour l'AEP, la source du Filan sur la commune de Grâne (calcaires à silex du Bédoulien recouvert par des éboulis) et la source de la Teyssonne (circulations karstiques provenant des calcaires barrémiens et pour partie alluvions de fond de vallée).

4. Données pluviométriques

Il n'existe pas de station météorologique de Météo France en activité sur le territoire étudié. Larguier (2006) cite une hauteur d'eau moyenne de 825,9 mm sur la période 1921-1970 pour une station Météo France qui était située à Crest. Cet auteur rapporte également une moyenne de 923 mm de précipitations relevée par un agriculteur de la commune d'Autichamp de 1999 à 2005.

Dans le cadre de cette étude, un exploitant agricole de la commune de Vaunaveys-la-Rochette (commune au Nord de Crest) a fourni les mesures qu'il réalise depuis 2001. Les moyennes annuelles des précipitations entre 2001 et 2021 sont représentées sur la Figure 26. Elles ne semblent pas montrer de tendance d'évolution marquée. La moyenne sur les derniers 20 années est de 866,4 mm, elle est assez proche de la valeur citée précédemment pour Crest.

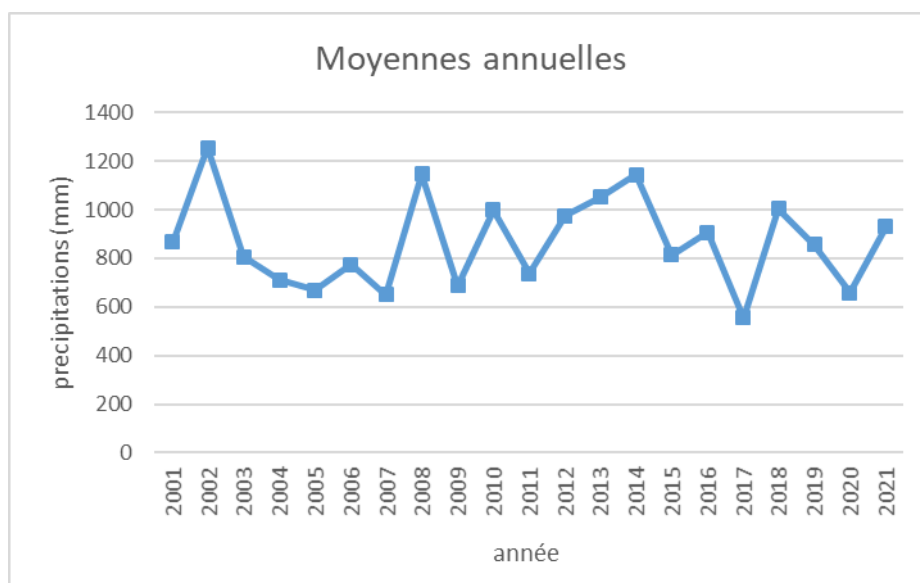


Figure 26 : Précipitations moyennes annuelles à Vaunaveys-le-Rochette de 2001 à 2021 (source : agriculteur de Vaunaveys, communication personnelle)

Les mois de septembre à novembre sont ceux qui reçoivent en moyenne le plus de précipitations, ainsi que le mois de mai. Les autres mois de l'année apparaissent assez similaires en terme de hauteur d'eau recueillie (Figure 27). Ces observations sont en accord avec les flux de Sud, précipitations d'origine méditerranéenne, qui affectent de façon majoritaire la zone d'étude.

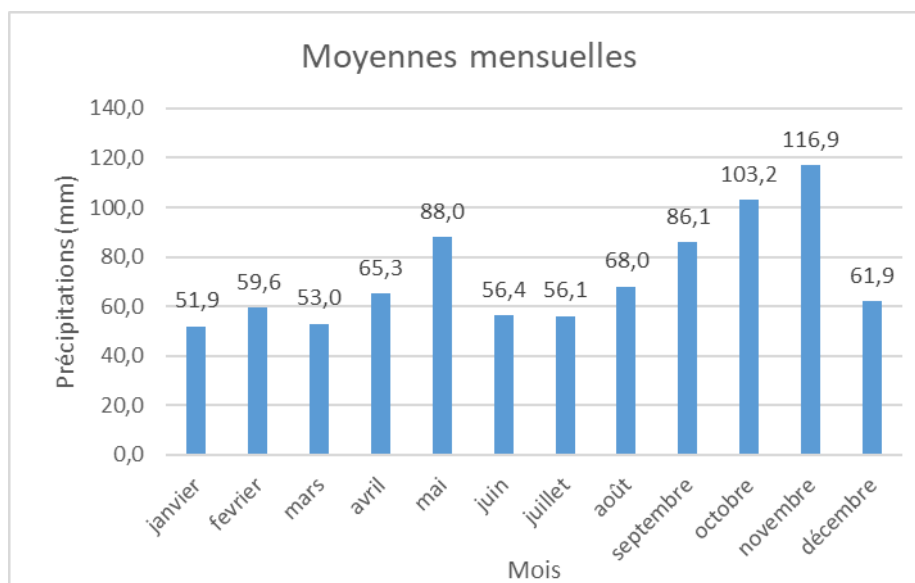


Figure 27 : Précipitations moyennes mensuelles à Vaunaveys-le-Rochette de 2001 à 2021 (source : agriculteur de Vaunaveys, communication personnelle)

La Figure 28 présente l'ensemble des données recueillies sur la période 2001-2021. Il semblerait que le nombre d'événements pluvieux supérieurs à 80 mm soient moins important depuis 2011

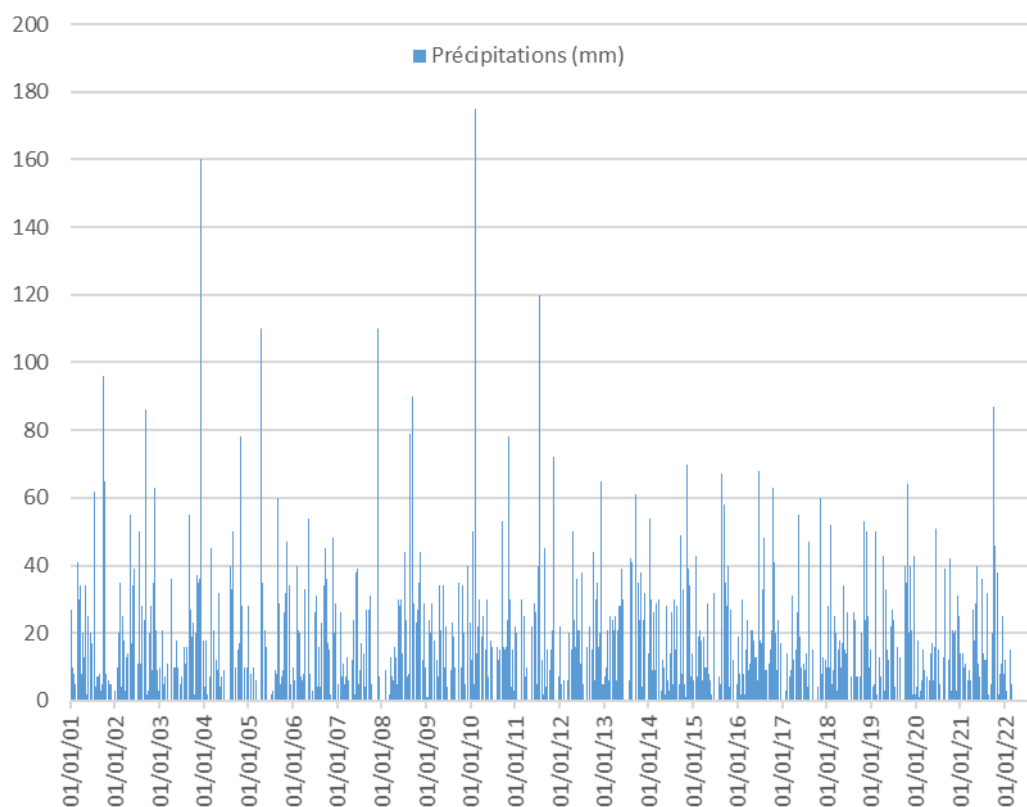


Figure 28 : Précipitations journalières sur la période 2001-2021 mesurées à Vaunaveys la Rochette (Source : agriculteur de Vanaveys, communication personnelle)

5. Les eaux de surface

5.1. CONTEXTE

La Drôme prend sa source à la Bâtie des Fonds (1030 m d'altitude) et la superficie de son bassin versant est 1640 km².

Les fluctuations saisonnières de débit de la rivière sont assez importantes, elles sont liées à la fonte des neiges et à la pluviométrie automnale. En période estivale, la Drôme fait face à des étiages sévères, en moyenne 3 années sur 4. La rivière traverse d'Est en Ouest la zone d'étude avant de rejoindre la Rhône (Figure 29).

Il est à noter que les eaux souterraines du bassin versant de la Drôme (en amont de la zone d'étude) ne contribuent que de manière réduite au soutien du débit de la rivière en période de basses eaux. Les principaux contributeurs sont les sources issues du massif du Vercors (masse d'eau FRDG111) et les sources issues des calcaires thitoniens et turoniens (MESO FRDG 127).

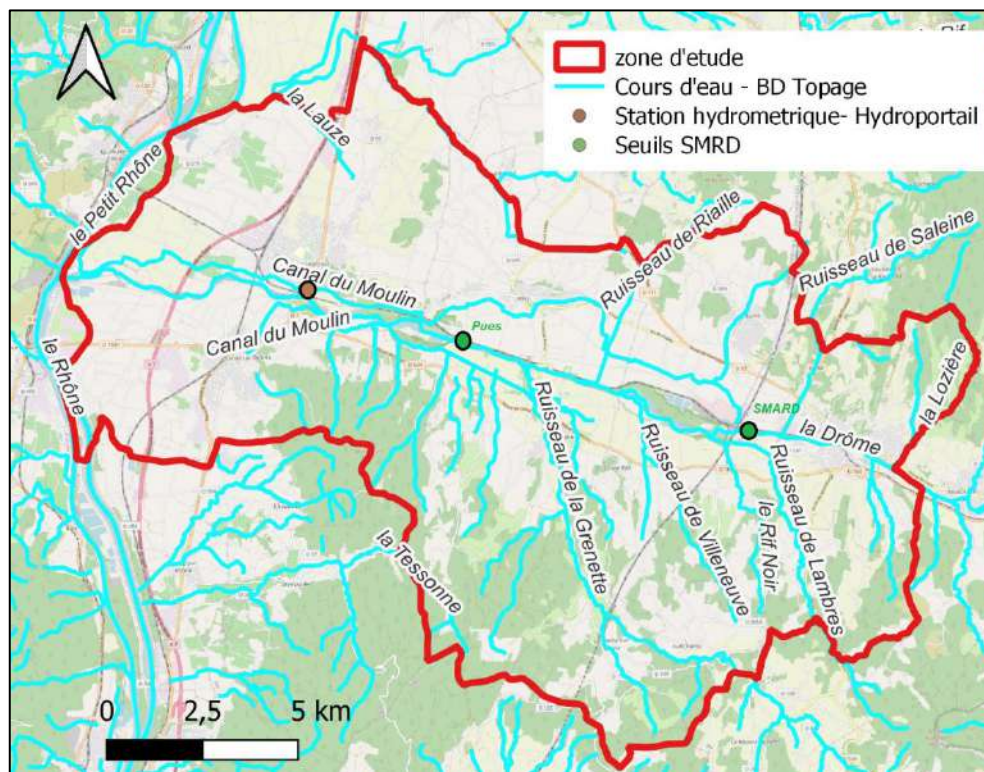


Figure 29 – Réseau hydrographique de la zone d'étude et points de suivi quantitatifs

Dans le secteur de la basse vallée, la Drôme a une profondeur moyenne de 30 cm pour une largeur moyenne de 8 m (ZABR, 2016). Afin de contrer les inondations, une partie du cours d'eau a été endiguée à partir du 17^{ème} siècle et jusqu'aux années 1960. La pente du cours d'eau est de l'ordre de 6 ‰ dans les secteurs en tresses et de 4 ‰ dans les secteurs chenalisés (Artelia, 2012).

La zone d'étude comporte une station hydrométrique implantée sur la Drôme au droit de la commune de Livron-sur-Drôme (V4287011201). Le site internet hydroportail (<https://www.hydro.eaufrance.fr>) précise que ses données sont qualifiées d'incertaines en

basses eaux. La station de Saillans (V426401001), à environ 15 km en amont de Crest, dispose de données qualifiées de « bonnes » quel que soit le régime hydrologique. Le débit moyen interannuel (module) à Saillans est de 17 m³/s (Figure 30).

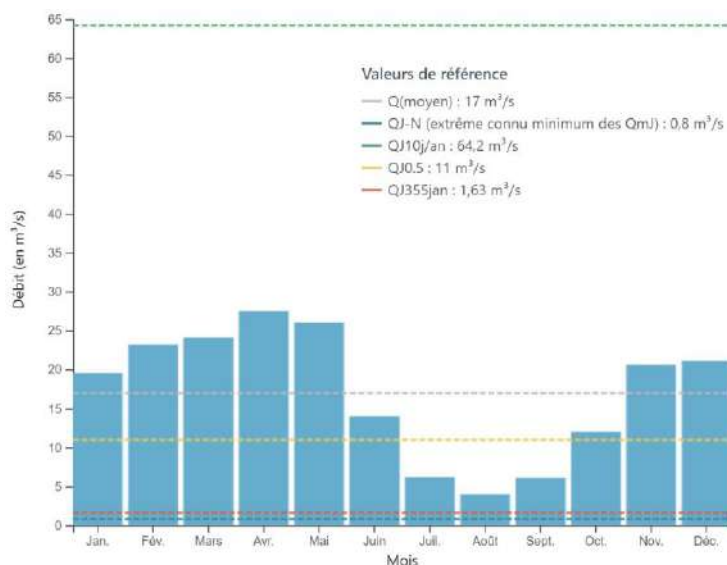


Figure 30 : Moyennes interannuelles à la station de Saillans V426401001, (source : Hydroportail)

La station de Saillans fait partie des stations hydrométriques de référence de l'Arrêté Cadre Sécheresse (ACS) pour le bassin de la Drôme (Arrêté du 07/04/23). Sa représentativité est estimée de niveau 2 (l'arrêté comporte 3 niveaux).

Les débits d'objectifs du bassin de la Drôme sont présentés dans le tableau suivant :

Point de suivi de référence	Débits Objectifs d'Étiage mensuels (m³/s)				Pour comparaison QMNA5 naturel théorique (m³/s)
	DOE juin	DOE juillet	DOE août	DOE septembre	
La Drôme à Saillans (station hydrométrique et point nodal du SDAGE)	3,4	2,1	2	1,9	1,79
La Drôme au seuil des Pues	3,8	1,9	2,3	3,6	1,96
La Drôme au pont de Livron	4,4	2,5	2,9	4,1	2,54

Tableau 2 : DOE du bassin versant de la Drôme (source : PGRE)

Le syndicat mixte de la rivière Drôme (SMRD) contribue au suivi quantitatif de la Drôme et de ses affluents, notamment en période d'étiage estival par le biais de jaugeages et du suivi des assecs (www.riviere-drome.fr). Les stations de mesures du SMRD dans la zone d'étude sont situées au seuil des Pues² et au seuil SMARD (Figure 29).

² Arrêt du suivi en 2017

5.2. FLUCTUATIONS SPATIALES DU DEBIT DE LA DROME

Les études et suivis des variations de débit de la Drôme ont mis en évidence, outre une évolution temporelle, des variations spatiales du débit dans la basse vallée.

Il existe à la fois des apports en provenance des eaux souterraines (drainage de la nappe d'accompagnement par la Drôme) et des apports en provenance des eaux de surface. Plusieurs cours d'eau plus ou moins pérennes, rejoignent en effet la Drôme dans le secteur étudié. Les principaux sont :

- En rive droite : ruisseau de Riaille, ruisseau de Saleine ;
- En rive gauche : ruisseau de Villeneuve, ruisseau de Lambre, ruisseau le rif noir, ruisseau de la Grenette.

Une station hydrométrique est recensée sur la Grenette (V4287010 01). Elle est située en amont (et en dehors) de la zone d'étude, à une dizaine de kilomètres de la confluence avec la Drôme. Elle fait partie des stations hydrométriques de référence de l'ACS du 7 avril 2023

Des diminutions du débit se produisent également tout au long du linéaire du cours d'eau, soit par prélèvements directs dans la rivière ; soit par infiltration vers l'aquifère alluvial.

La Chambre d'Agriculture de la Drôme assure le portage de l'OUGC (organisme unique de gestion collective) en charge de l'Autorisation Unique Pluriannuelle (AUP) pour le bassin de la Drôme. L'autorisation de prélèvement au seuil SMARD est modulé par Arrêté Préfectoral notamment durant la période d'irrigation. Dans l'objectif de réduire les prélèvements dans le bassin versant de la Drôme classé en Zone de Répartition des Eaux (ZRE), le Syndicat d'Irrigation Drômois a engagé des travaux de restructuration de ses réseaux et envisage en particulier de recourir à un approvisionnement par l'eau du Rhône (SID, 2019 et 2021).

La présence de plusieurs canaux et dérivations contribue également à la variabilité spatiale observée.

Durant l'été 2011, étiage modéré de la Drôme, l'étude SOGREAH (2012) a montré que le débit de la rivière diminuait régulièrement entre le pont de la N7 à Livron et la partie amont du seuil de la CNR. Durant la période considérée (01/08/21 – 20/10/2011), et pour les 3 campagnes de mesures réalisées, la perte de débit a été de 1,2 m³/s. Les auteurs en déduisent que dans ce secteur, la Drôme contribue à la recharge de la nappe.

Plus récemment, des mesures effectuées par l'OFB et le SMRD ont confirmé ces fluctuations spatiales. Le tableau suivant reprend des mesures réalisées en période estivale.

Date	Saillans m3/s	Débit amont SMARD m3/s	Débit aval SMARD m3/s	Débit aval Pues m3/s	Débit amont Pues m3/s	Débit RN7 m3/s	Débit seuil CNR m3/s	pertes amont aval m3/s	pertes aval RN7 m3/s
31/07/2015		2,88	2,47	1,81			0,52	2,361	
31/08/2015		2,99	2,81	2,33		2,83	1,3	1,691	1,53
22/08/2016		2,54	2,19	1,97			1,02	1,52	
02/09/2016			1,92	1,24		1,45	0,05		1,4
09/09/2016		1,66	1,66	1,06		1,41	0,07	1,59	1,34
09/08/2019		2,21	1,98				env 50 l/s		
02/08/2020		2,08	1,89				0	2,08	
14/09/2021			2,4			2,18	0,86		1,32
02/08/2022	1,7-1,8	1,07			0,293	0,839	0	1,07	0,84

Tableau 3 : Mesures différentielles de débit de la Drôme sur les périodes estivales 2015-2022 (Source OFB, SMRD)

Les pertes de débit entre l'amont du seuil SMARD et l'amont du seuil CNR peuvent atteindre jusqu'à 2,36 m³/s. Elles sont imputables pour partie aux prélèvements directs pour l'irrigation comme on peut le voir dans le tableau 3, par exemple, sur les mesures encadrant le seuil SMARD. Après la sortie du défilé constitué des formations du Crétacé à Livron, les pertes mesurées sont un peu plus importantes que celles observées par SOGREAH en 2011.

Dans le cadre de la présente étude, il a été effectué des jaugeages en divers points de la Drôme et sur ses affluents lors de la campagne de mesures « hautes eaux ³ » (Figure 31). Les mesures ont été réalisées par le BRGM avec un appui du SMRD pour pouvoir réaliser un maximum de mesures en un temps le plus court possible. Les mesures ont été faites à l'aide de courantomètres électromagnétiques, les résultats des appareils BRGM et SMRD ont été confronté et validé sur un point de mesure commun. Les mesures sur les affluents ont été faites le 28/03/22 et les mesures sur la Drôme le 29/03/22 dont le débit moyen journalier à Saillans pour cette date était de 6,9 m³/s.



Figure 31 : Mesures de débit par jaugeage sur la Drôme le 29/03/2022

La localisation des sites de mesures et les résultats des mesures de débit sont reportés sur la Figure 32 et le Tableau 4

³ Au regard de la moyenne interannuelle de la Drôme pour un mois de mars : 24,1 m³/s, le débit moyen de la Drôme le 29/03/22 (6,9 m³/s) ne se situe pas dans un régime de hautes eaux.

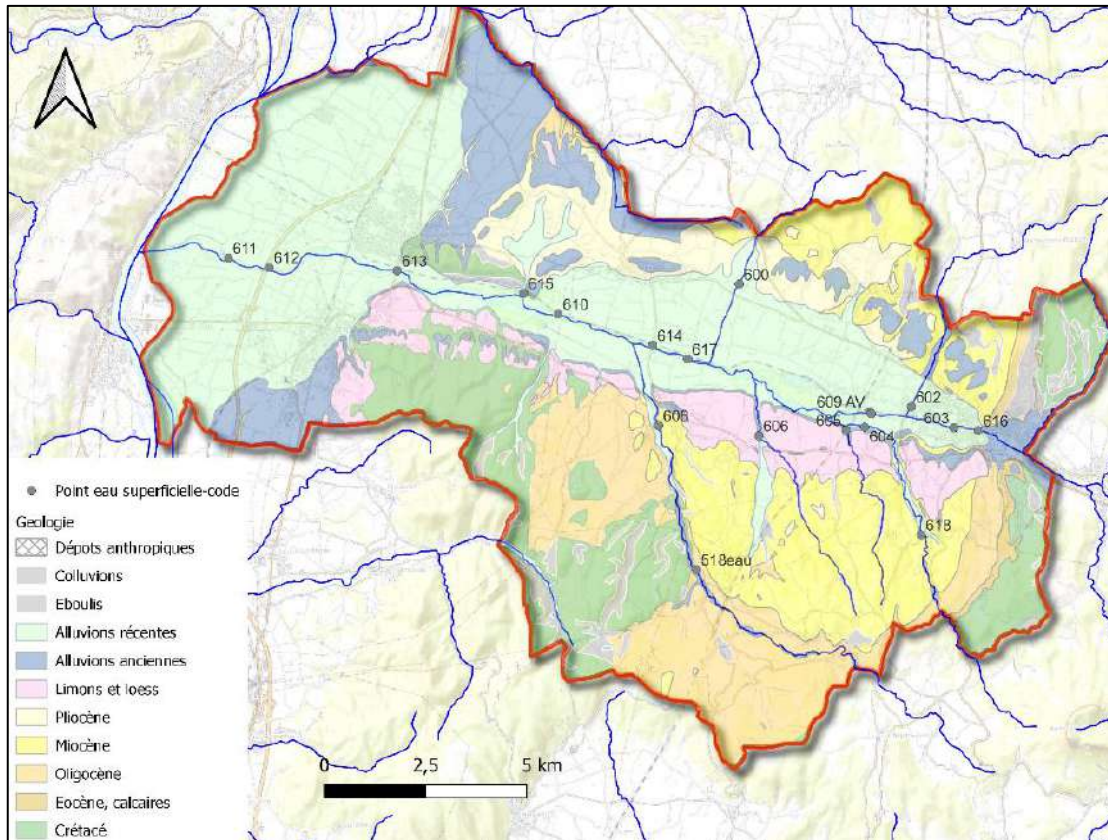


Figure 32 : Localisation des points de mesures sur les eaux superficielles pour les campagnes hautes et basses eaux 2013 (code terrain)

X (Lambert 93)	Y(Lambert 93)	Code	nom	debit HE (m3/s)
852988,947	6401735,538	518eau	Grenette intermédiaire	non mesuré
854050,03	6408789,003	600	Riaille	0,09
849577,294	6408051,049	610	seuil PUES	7,58
851911,392	6407277,289	614	pont D125	7,311
848724	6408558	615	canal du Moulin	0,165
854531,302	6405043,954	606	Villeneuve	0,04
858300	6405764	602	Saleine	0,016
859348,169	6405239,497	603	Drome	non mesuré
857272,911	6405646,15	609 AV	seuil SMARD aval	7,96
857313	6405590	609 AM	seuil SMARD amont	8,319
859955,142	6405172,411	616	pont SNCF	8,3
857149,804	6405255,66	604	Lambres	0,03
856684,154	6405183,473	605	Rif noir	0,02
852057,277	6405296,706	608	Grenette aval	0,07
841430,625	6409434,041	611	seuil CNR	6,39
842439	6409200	612	amont A7	6,172
845599	6409124	613	pont N7	8,93
852774,695	6406941,061	617	amont pont D125	non mesuré
858541	6402599	618	Lambres	non mesuré

Tableau 4 : Localisation des points de mesures « eau superficielle » et résultats des jaugeages réalisés en hautes eaux (campagne du 28 et 29/03/22)

On observe sur la Figure 33, une perte de débit de 1,91 m³/s sur la totalité du linéaire étudié (de la station 616 à la station 611). Les affluents contribuent à hauteur de 0,266 m³/s avec une légère

prépondérance pour la rive gauche : 0,160 m³/s par rapport à la rive droite : 0,106 m³/s. Les pertes au niveau du seuil SMARD sont de l'ordre de 0,4 m³/s.

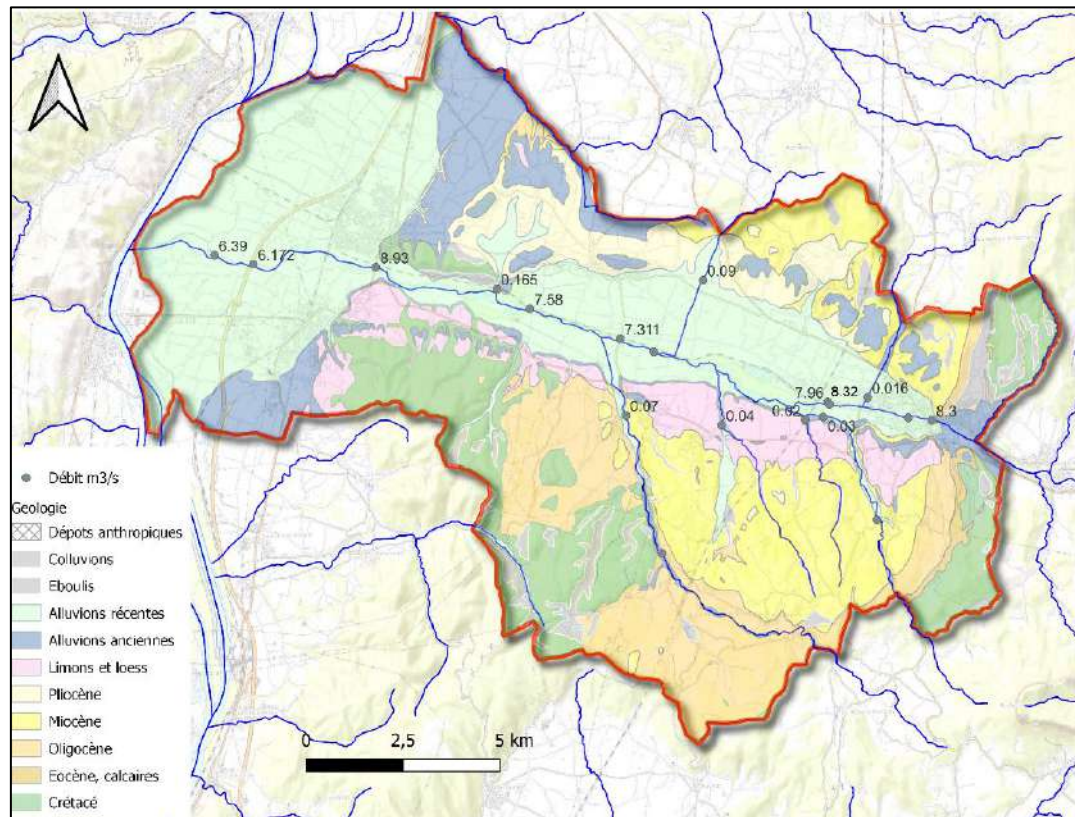


Figure 33 : Débits mesurés (m³/s) sur les eaux superficielles de la campagne hautes eaux

On peut remarquer, en première approche, plusieurs situations différentes de l'amont vers l'aval (Figure 33) :

- Sur la portion de rivière comprise en amont du seuil SMARD (du point SNCF de Crest n°616 et le point 609 amont), on note une quasi stabilité du débit malgré les apports (faibles) en provenance de la Saleine. On peut en déduire que les échanges nappe/rivière sont limités ;
- En aval du seuil SMARD et jusqu'au le pont de la D125 (station 614), la Drôme continue de voir son débit décroître et ce malgré les apports des ruisseaux du Rif noir, Lambres, Villeneuve et Riaille (+ 0,18 m³/s). En prenant en compte ces apports, on peut estimer la perte au point 614 à 0,83 m³/s ;
- Entre le point 614 et jusqu'au seuil des Pues, le débit de la Drôme augmente grâce notamment aux apports de la Grenette. Ceux-ci ne sont pas suffisants pour expliquer le débit mesuré aux Pues, il est envisageable de considérer que les relations hydrauliques entre la rivière et sa nappe d'accompagnement ont changé et que la Drôme draine dans ce secteur les eaux souterraines. Cette situation semble se poursuivre jusqu'au débouché du défilé à Livron (point 613). A noter, le débit non négligeable au niveau du canal du moulin (point 615) ;
- Au-delà du point 613 (pont N 7) la rivière réalimente la nappe ;
- La perte au seuil CNR par rapport au pont de la N7 s'élève à 2,54 m³/s.

Ces jaugeages différentiels mettent en avant des variations spatiales de débit de la Drôme qui sous-entendent une modification des relations hydrauliques entre la rivière et les eaux

souterraines. Il n'est pas possible d'en tirer des indications précises sur les volumes échangés compte tenu de l'amplitude limitée des variations de débit mesurés et de l'incertitude sur les mesures (+/- 10 %).

Ces jaugeages n'ont pas pu être réalisés pour la campagne « basses eaux » en raison des orages violents qui ont eu lieu plusieurs jours de suite et ont provoqué une crue de la Drôme et des gonflements importants des ruisseaux. Pour des raisons de sécurité, il n'a pas été possible de faire les mesures sur la Drôme. Quelques affluents ont pu être visités, les mesures réalisées sur ces derniers sont reportées sur le Tableau 5. On note une perte de débit du Lambres entre le village de Divajeu et la partie aval et à contrario, un gain pour la Grenette entre la partie amont (point 518eau) et la ville de Grâne.

Code	nom	debit BE (l/mn)
518eau	Grenette intermédiaire	< 1
606	Villeneuve	159
604	Lambres	1
605	Rif noir	14
608	Grenette aval	323
618	Lambres amont	10

Tableau 5 : Débits d'affluents de la rive droite de la Drôme mesurés le 06/09/2022

5.3. RELATIONS NAPPE/RIVIERE

Comme vu précédemment, des échanges existent entre la Drôme et les eaux souterraines. Ces échanges ont également été montrés à l'occasion de la réalisation des essais de nappe effectués pour les captages d'AEP.

Dans le bassin de Crest, la complexité du réseau hydrographique avec la présence de nombreux canaux et fossés ainsi que de seuils et ouvrages rend difficile la compréhension des échanges nappe-rivière. La dynamique forte de la rivière constitue également une difficulté supplémentaire. Une étude de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR, 2016) a montré, par le biais d'une analyse géomatique, que le sens des échanges varie tout au long du linéaire entre Crest et la zone aval d'Allex (Figure 34

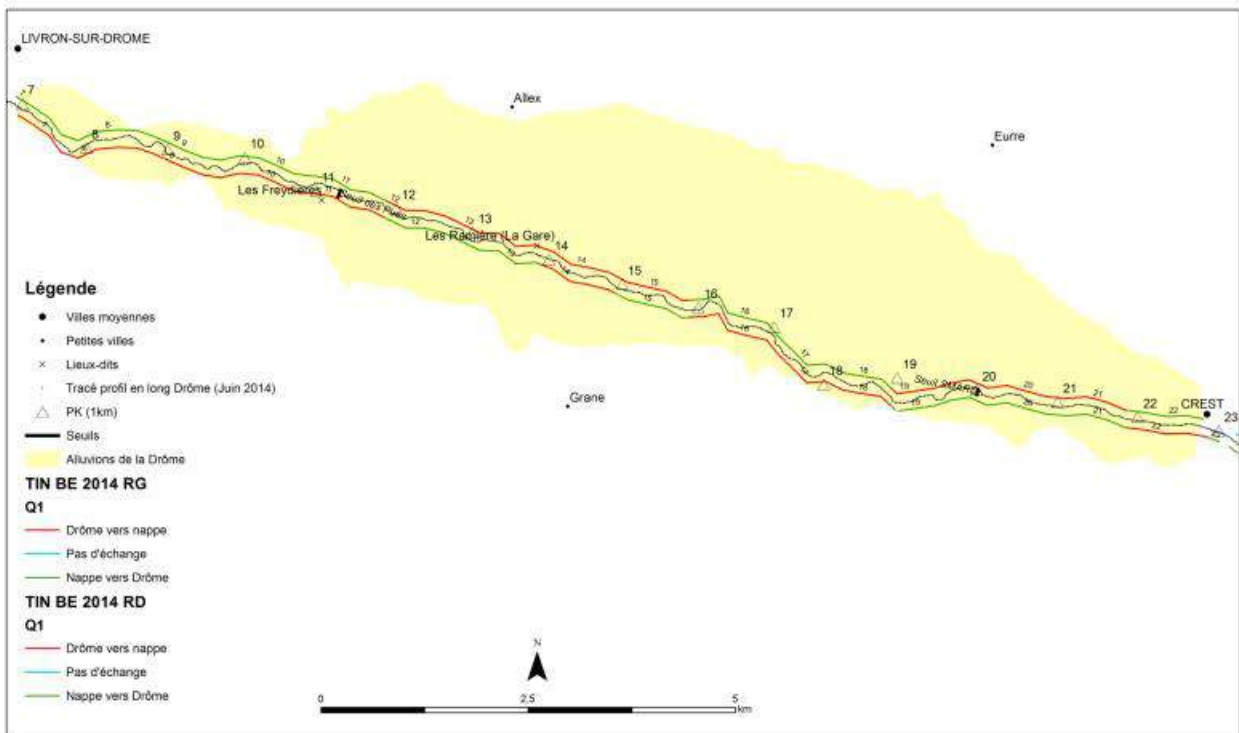


Figure 34 : Carte des échanges nappe/Drôme en basses eaux 2014 (source : ZABR, 2016)

Cette évaluation repose toutefois sur des données qui ont été recueillies à des périodes différentes. Il est possible que pour certains tronçons, sujets à une forte variabilité temporelle, le diagnostic réalisé soit incertain.

Les mesures de débits réalisés les 28 et 29 mars 2022 (Figure 35) illustrent également la variabilité spatiale des relations hydrauliques entre la Drôme et la nappe alluviale avec :

- Des relations de la Drôme vers la nappe (secteur en aval du pont de la RN7);
- Des relations de la nappe vers la rivière (secteur aval du pont RD 125);
- Et des secteurs où les relations semblent limitées (secteur amont de seuil SMARD).

Ces relations seront précisées avec les cartes piézométriques (cf. chap. 6.2.)

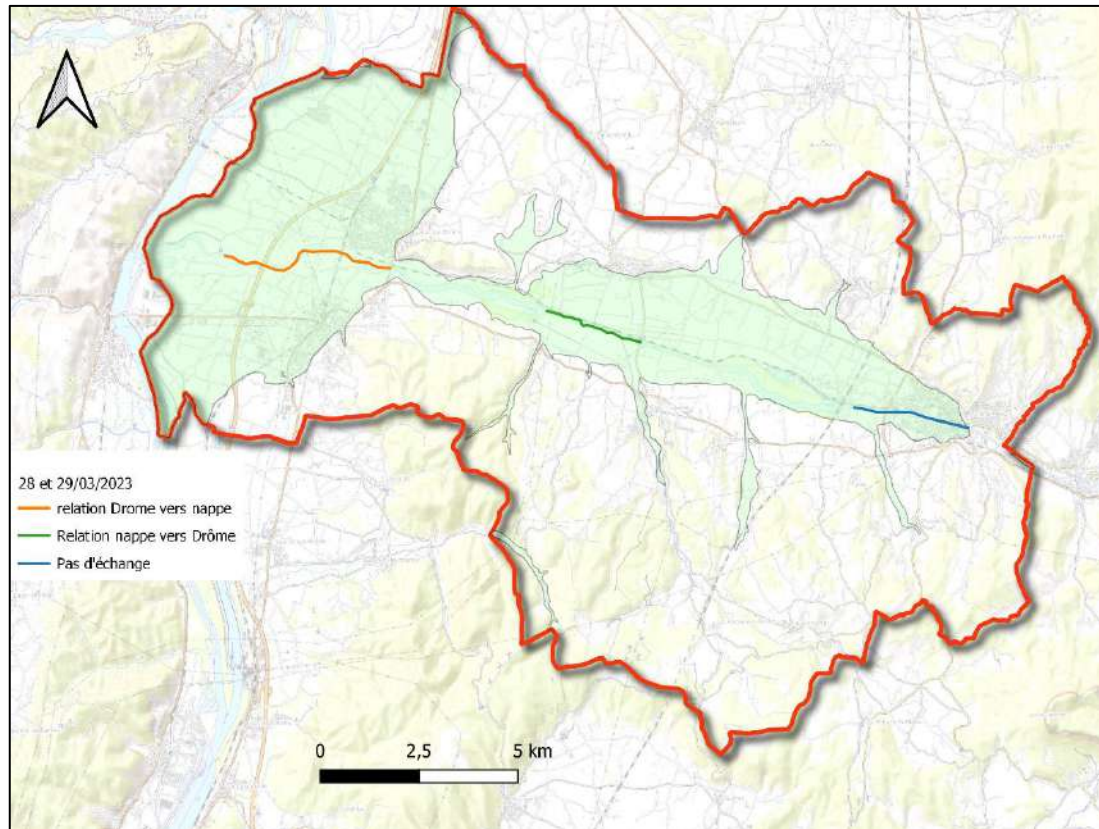


Figure 35 : Carte des échanges nappe alluviale/Drôme en mars 2022 (en vert : alluvions récentes)

5.4. EXAMEN DES ASSECS DE LA PERIODE JUILLET-AOUT 2022

Depuis 1989, des assecs sont observés à la période estivale en amont du seuil de la CNR. Leurs survenues ne sont pas systématique et ils peuvent remonter plus ou moins en amont selon les conditions climatiques. A noter que l'aval du seuil CNR n'est pas touché par ces assecs grâce à l'influence du Rhône⁴.

Le SMRD a constaté un assec de la Drôme en amont du seuil de la CNR le lundi 11 juillet 2022. Il est indiqué dans le compte-rendu de visite, une mise en place probable entre le 8 et le 10 juillet. Nous retenons, dans la suite de l'étude, la date du 9 juillet pour le début de cet évènement. Le linéaire concerné est situé en l'amont du seuil, il est maximum le 26 juillet pour atteindre 2,1 km. L'assec s'est poursuivi jusqu'au 24 août où le SMRD indique l'existence d'un écoulement en amont du seuil.

Un deuxième secteur d'assec a également été observé en aval du lac des Fredieres. D'après les compte-rendu de visites, cet épisode s'est produit du 5 au 9 août.

Une analyse des chroniques des piézomètres d'Eurre⁵ (08424X0006), Loriol (08422X0190), Livron (08422X0191) et des données de la station hydrométrique de Saillans a été réalisée afin d'évaluer si l'apparition de ces deux assecs pouvait se traduire par une modification significative

⁴ à l'exception de l'aval immédiat du seuil

⁵ La chronique du piézomètre de Grâne n'est pas prise en compte car cet ouvrage est influencé par des prélèvements

des fluctuations de la nappe alluviale et/ou de la Drôme. Les données du piézomètre de Grâne suivi par le SMRD (08423X0107) ont été également examinées.

Les résultats pour l'année 2022 sont présentées Figure 36, Figure 37 et Figure 38 .

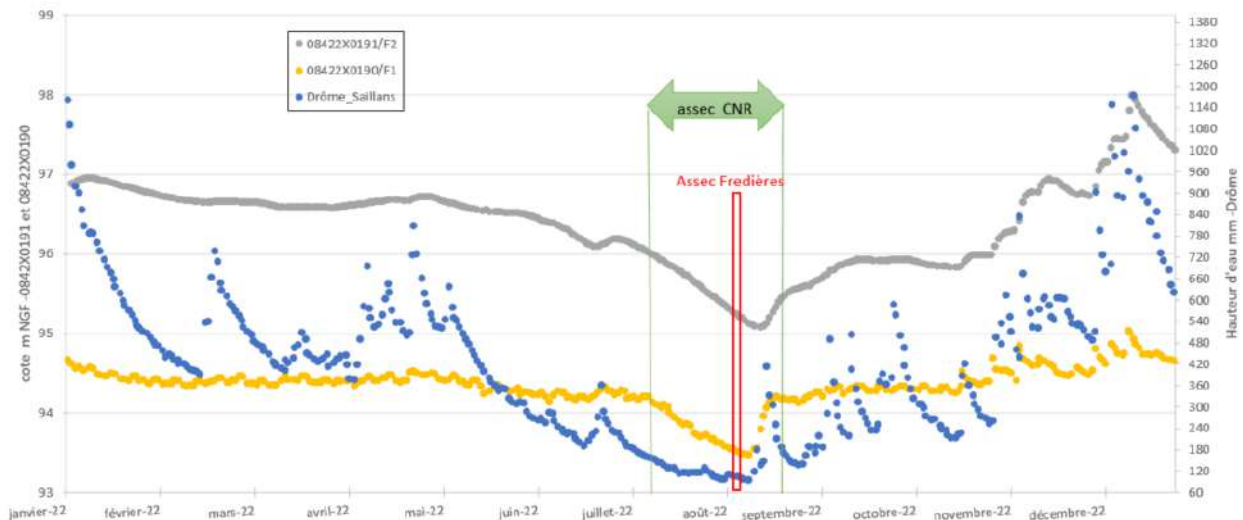


Figure 36 : Chroniques des piézomètres 08422X0190-Loriol et 08422X0191- Livron (côte en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022

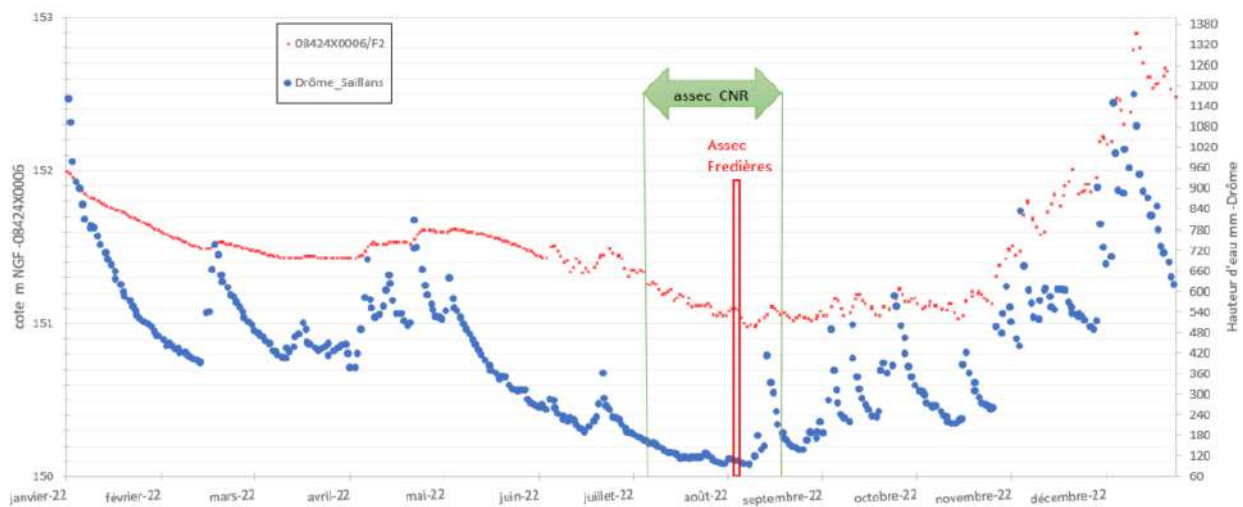


Figure 37 : Chroniques du piézomètre 08424X0006 – Eurre (côte en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022



Figure 38 : Chroniques du piézomètre 08423X0107-Grâne (cote en m NGF) et hauteurs d'eau mesurées à Saillans (hauteur instantanée minimale journalière) pour l'année 2022

Le début de l'assec au seuil CNR (9 juillet) correspond à une hauteur d'eau de 166 mm (hauteur instantanée minimale du jour) soit 1,539 m³/s à la station de Saillans. La cote aux piézomètres de Loriol (08422X0190) et Livron (08422X0191) étaient respectivement de 94,2 m et 96,07 m NGF. La cote de l'eau au piézomètre d'Eurre (08424X0006) était quant à elle de 151,34 m NGF. A titre indicatif, le SMRD a mesuré le 7 juillet un débit de 2,088 m³/s sur la Drôme en amont de la prise d'eau du seuil SMARD.

Il apparaît que la période d'assec du seuil CNR est assez bien retranscrite par une fluctuation significative de la nappe au droit du piézomètre de Loriol : la nappe décroît de manière marquée à partir du 12 juillet soit 2-3 jours après le constat d'assec et retrouve quasiment son niveau d'avant l'assec après le 22 août. Ces observations permettent de :

- confirmer la relation hydraulique entre la Drôme et la nappe dans ce secteur de la rive gauche, avec un sens d'écoulement de la rivière vers la nappe ;
- considérer, en première approche, que la cote piézométrique de 94,2 m est associée (pour la période considérée) au début de l'assec sur cette portion de la Drôme.

Les fluctuations piézométriques de la nappe en rive droite (Livron) n'encadrent pas aussi bien l'épisode d'assec : la nappe ne retrouve son niveau d'avant l'assec qu'en fin d'octobre. L'évolution des hauteurs d'eau mesurées à Saillans ne permettent pas non plus de retranscrire l'épisode d'assec au seuil CNR.

Il est à noter que l'analyse des fluctuations piézométriques (cf chapitre 6) montrent une amplitude double en faveur de Livron par rapport à Loriol indiquant que la nappe en rive droite serait plus sujette aux variations de la hauteur du niveau d'eau dans la rivière.

Le début de l'assec (5 août) du secteur des Frédières correspond à une hauteur d'eau de la Drôme à Saillans de 98 m (la valeur du débit est qualifiée « douteuse »), le niveau piézométrique à Eurre est de 151,05 m NGF. Les côtes piézométriques de Loriol et Livron sont respectivement de 93,61 et 95,39 m NGF.

L'observation de la chronique du piézomètre d'Eurre, plus proche des Frédières, marque un épisode de 3 jours sous la cote 151 m NGF (150,98 à 150,99 m) entre le 12 et 15 août. Il est

hasardeux toutefois d'en tirer des conclusions vis-à-vis de l'assec des Fredières compte tenu de la faible amplitude des variations mesurées.

L'examen de la chronique du piézomètre de Grâne suivi par le SMRD, ne montre pas d'évolution particulière en relation avec l'apparition de l'assec des Fredières.

Analyse rétrospective des assecs 2017 et 2019

Le SMRD nous a fourni des éléments concernant l'assec au niveau du seuil CNR qui a débuté aux alentours du 7 août. La présente les fluctuations piézométriques des points de suivi de Livron et Loriol, ainsi que les fluctuations de la Drôme à Saillans. La fin de l'assec ne nous a pas été communiquée aussi, il n'est pas possible de vérifier si les fluctuations enregistrées sur la nappe encadrent la période considérée. Toutefois, on note que le début de l'assec correspond à une cote piézométrique de 94,05 m NGF pour Loriol et 96,01 m NGF pour Livron

Les minimas pour 2019 ont été enregistré vers le 18 septembre pour Loriol et vers le 23 septembre pour Livron

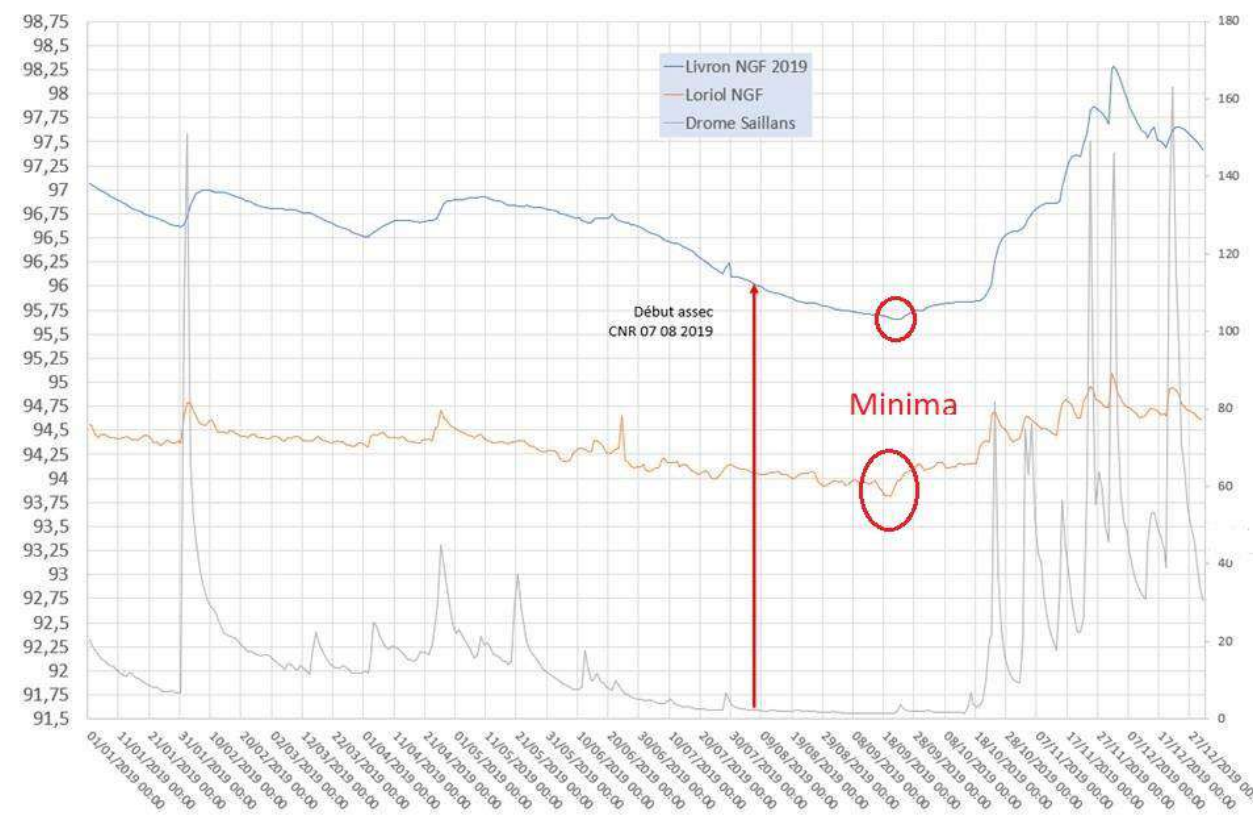


Figure 39 : Chroniques des piézomètres 08422X0190-Loriol et 08422X0191- Livron (côte en m NGF) et fluctuations de la Drôme à Saillans pour l'année 2019

En 2017, l'assec a débuté le 31 juillet ce qui correspond à une cote de 94,09 m NGF pour Loriol et 96,13 m NGF pour Livron. Pour mémoire, les valeurs relevées en 2022 étaient respectivement 94,20 m et 96,07 m.

Il est difficile de déterminer à partir d'observations sur 3 années, les cotes piézométriques associées au début de l'assec au seuil CNR, on note toutefois que les valeurs pour Livron sont assez proches. Pour aller plus loin dans l'analyse, il conviendrait de suivre avec précision sur

plusieurs années l'apparition des assecs. Une difficulté étant d'arriver à définir avec certitude la date d'apparition ou d'installation de l'assec.

6. Caractérisation des écoulements souterrains

6.1. ETUDE DES FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES

Les seuls suivis piézométriques réguliers de la zone d'étude sont réalisés sur la nappe des alluvions récentes.

Plusieurs producteurs de données réalisent un suivi piézométrique de la nappe des alluvions récentes : CNR, SMRD, Syndicat d'irrigation Drômois (SID), Carrières de granulats, Reserve Naturelle Ramières du val de Drôme, BRGM etc. L'acquisition des données peut se faire de manière automatisée ou manuellement, la fréquence des mesures est également variable. La Figure 40 présente ces points de suivis.

Sur le secteur d'étude, quatre points d'eau souterraine disposent d'un suivi piézométrique bancarisé dans la base de données ADES. Ils sont présentés avec leur code BSS sur la carte Figure 40. Le BRGM est le producteur des données (suivi automatique au pas horaire). Ces points figurent dans la liste des piézomètres de référence de l'arrêté cadre sécheresse du 7 avril 2023 pour le bassin de la Drôme.

Un opérateur privé (Delmonico-Dorel) nous a fourni les données de ses piézomètres dans la carrière de Livron et la carrière d'Eurre (suivi manuel mensuel). Nous avons choisi de retenir les données de la carrière de Livron (PZ3 et PZ4) afin de pouvoir examiner les fluctuations de plusieurs entités de la BDLISA. La carrière d'Eurre étant en effet située dans une entité BDLISA déjà suivie par un piézomètre du BRGM (BSS001ZWXR).

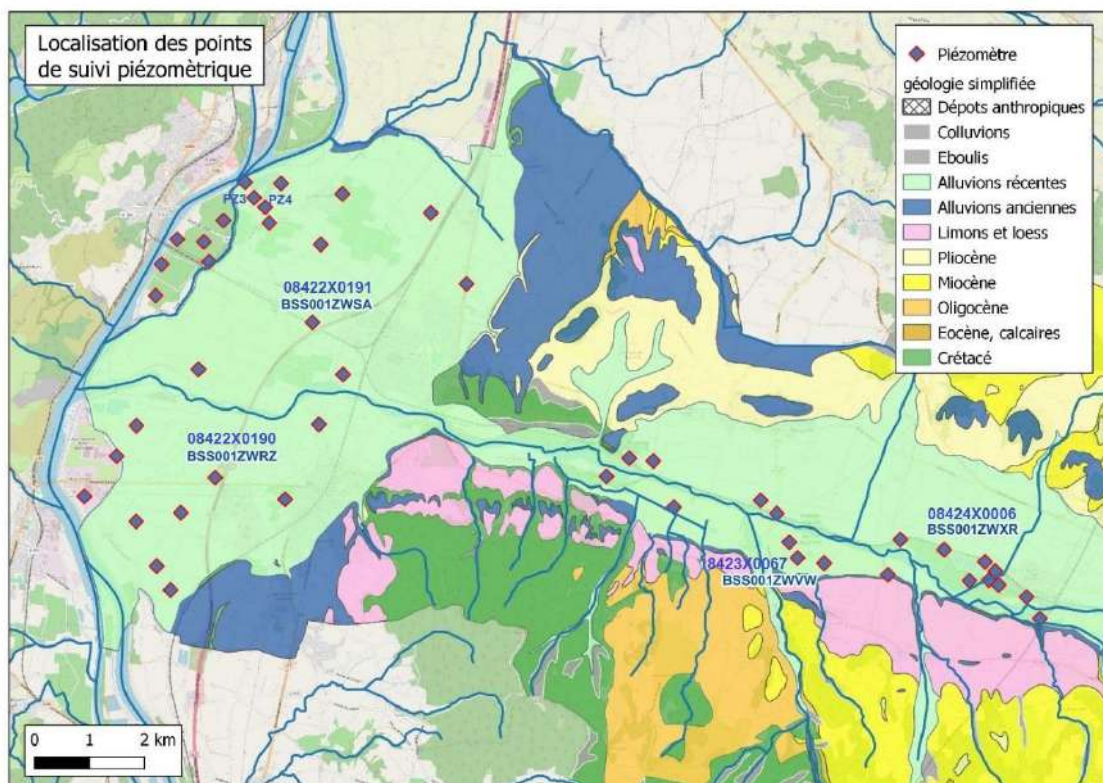


Figure 40 : Localisation de points de suivi des fluctuations de la nappe des alluvions récentes dans la zone d'étude (seuls les 6 ouvrages avec un code font l'objet d'une analyse de leur chronique)

Les caractéristiques de ces points et les références des entités BDLISA sont décrites dans le Tableau 6.

Code BSS	New BSS	Nom - lieu dit	Commune	BDLISA Code	BDLISA Libellé	Profondeur (m)	Période dispo	Nombre d'années avec mesures
08424X0006/F2	BSS001ZWXR		EURRE	712BM02	Alluvions de la Drôme en amont de Livron-sur-Drôme	8,5	30/06/1995 - 02/12/2021	27
08423X0067/PZ	BSS001ZWVW		GRANE	712BM02	Alluvions de la Drôme en amont de Livron-sur-Drôme	5	05/01/1995 - 03/12/2021	27
08422X0190/F1	BSS001ZWRZ	PEAGE-ECHANGEUR DE LORIOI, AUTOROUTE A7	LORIOI SUR DROME	712BM01	Alluvions à la confluence de la Drôme et du Rhône	11,5	18/12/1999 - 03/12/2021	23
08422X0191/F2	BSS001ZWSA	PROXIMITE SILO, VOIE FERREE ET D.86	LIVRON SUR DROME	712BM01	Alluvions à la confluence de la Drôme et du Rhône	11,5	20/12/1999 - 19/11/2021	23
Piezo3_LIVRON		CARRIERE / GRAVIERE	LIVRON SUR DROME	712AE01	Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à Les Tourettes		01/02/2012 - 01/12/2021	10
Piezo4_LIVRON		CARRIERE / GRAVIERE	LIVRON SUR DROME	712AE01	Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à Les Tourettes		01/02/2014 - 01/12/2021	8

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des points d'eau ESO disposant de suffisamment d'années de chroniques de données piézométriques, en fonction de leur affectation BDLISA.

Les chroniques ont été analysées à l'aide du logiciel ESTHER du BRGM. Ce logiciel permet une étude statistique des données.

6.1.1. Zone aval – Alluvions à la confluence de la Drôme et du Rhône

La Figure 41 présente les chroniques des piézomètres 08422X0191 (Livron) et 08422X0190 (Loriol). On peut remarquer que la nappe alluviale fluctue de manière identique sur les deux rives de la Drôme.

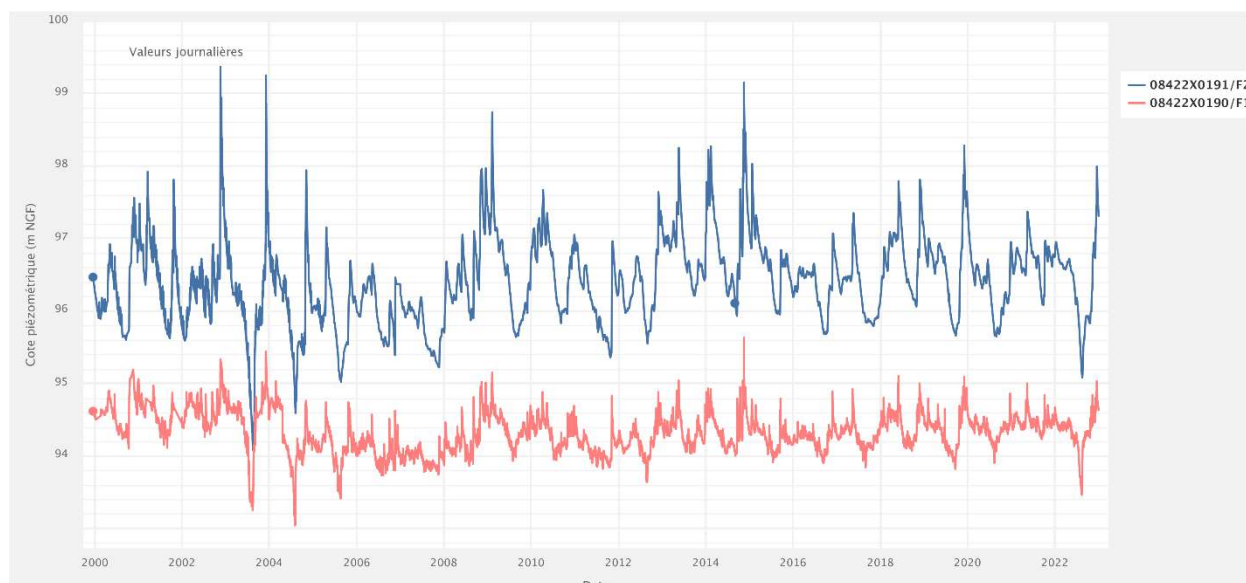


Figure 41 : Chroniques piézométriques au pas journalier des points 08422X0191/F2- Livron et 08422X0190/F1 - Loriol (source : ADES)

Les traitements statistiques permettent de présenter les données des chroniques avec les valeurs moyenne et moyenne mini-annuelle ; mais aussi la période de mesures, le nombre d'années de mesures, le nombre total de données journalières, les piézométries moyenne, maximale et minimale, et par année le nombre de mesures piézométriques disponibles.

A partir des valeurs de moyennes mensuelles, il est possible de s'intéresser aux cycles hydrogéologiques éventuels, en regardant notamment les valeurs moyennes minimales et

maximales. L'analyse des valeurs minimales et maximales mensuelles permet de mettre en évidence la période de basses eaux et la périodes des hautes eaux. L'analyse par boxplot par mois des moyennes mensuelles et des moyennes mensuelles interannuelles permet de valider les périodes de basses eaux et hautes eaux. Le corrélogramme et le périodogramme au pas de temps mensuel permet également de mettre en évidence les cycle de la nappe.

Enfin, les calculs de tendances effectués avec le test de Mann-kendall en se basant sur les moyennes annuelles par année hydrologique permettent de déterminer une possible évolution.

Les résultats obtenus pour le piézomètre de Livron sont présentés de la Figure 42 à la Figure 47. Les résultats pour le piézomètre de Loriol sont présentés en annexe 2.

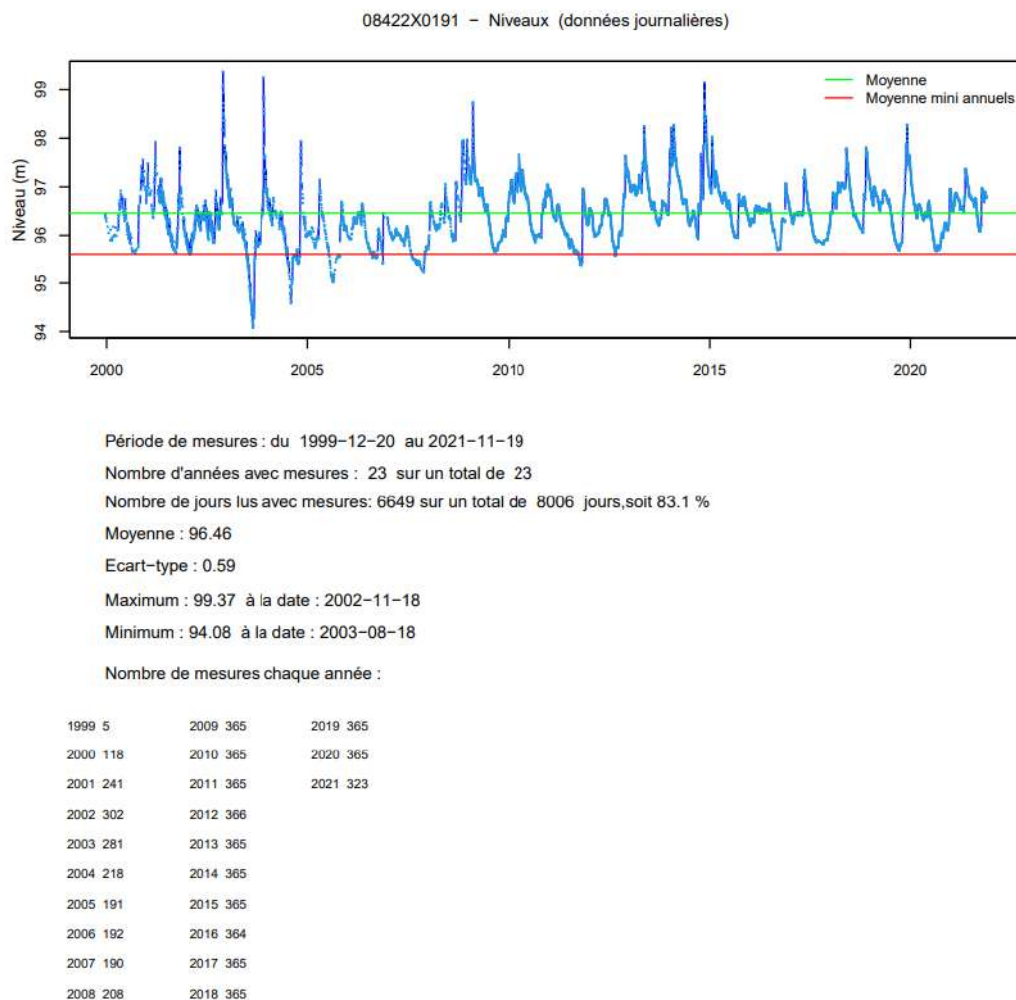


Figure 42 : Analyse statistique de la chronique de données piézométrique journalière pour le forage 08422X0191/F2 (Outil : ESTHER)

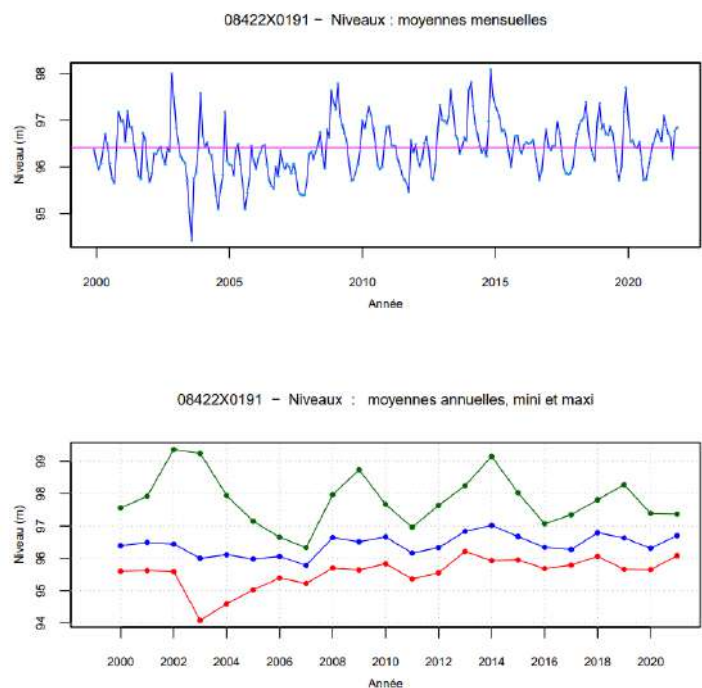


Figure 43 : Valeurs moyennes mensuelles de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (Outil : ESTHER)

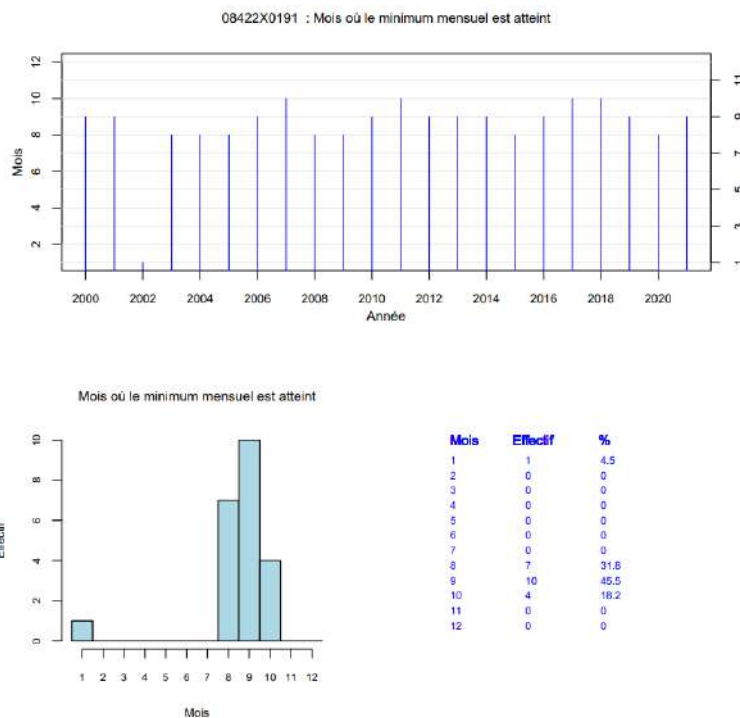


Figure 44 : Valeurs minimales mensuelles de la chroniques de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER)

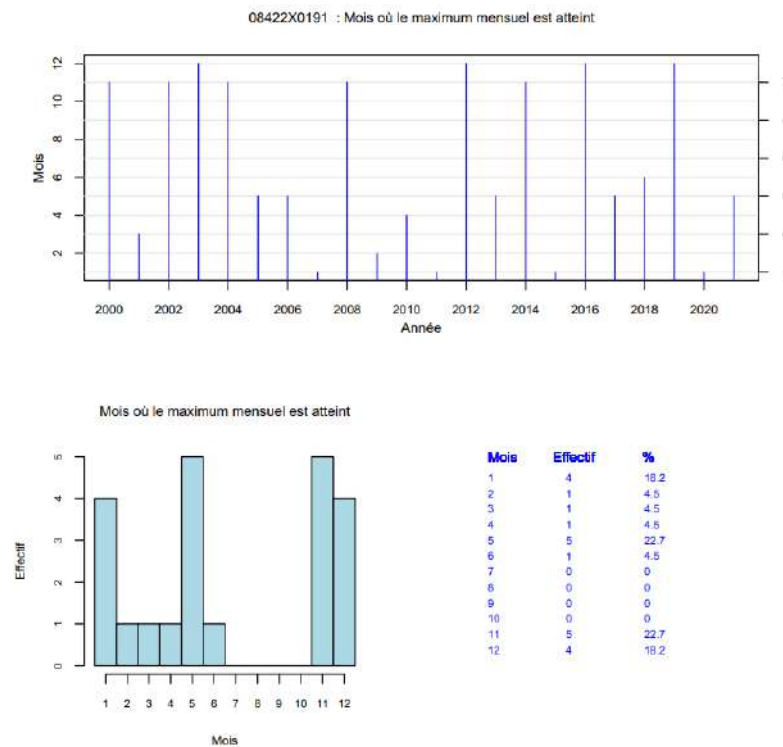


Figure 45 : Valeurs maximales mensuelles de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER)

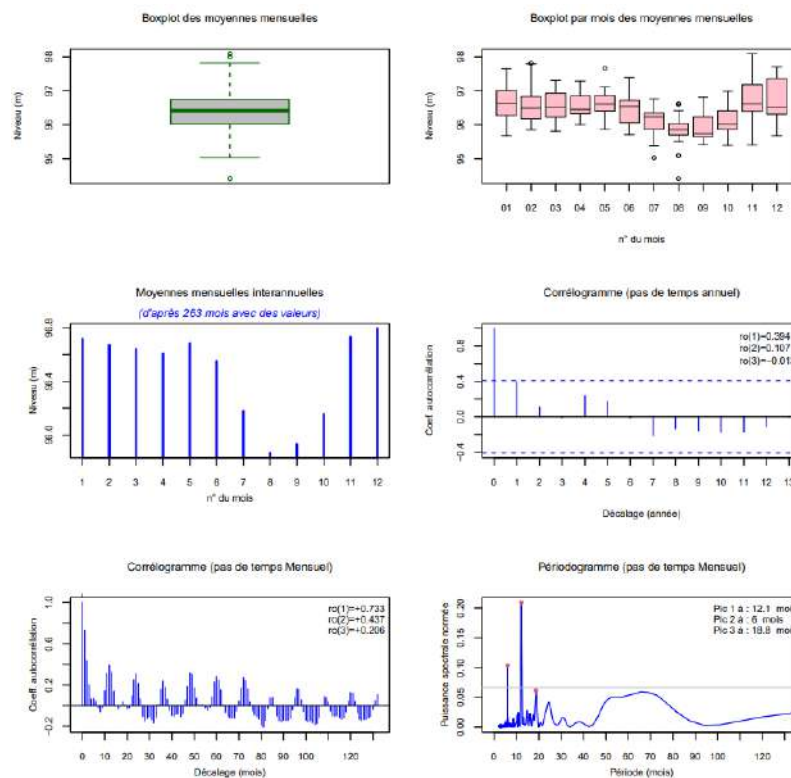


Figure 46 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER)

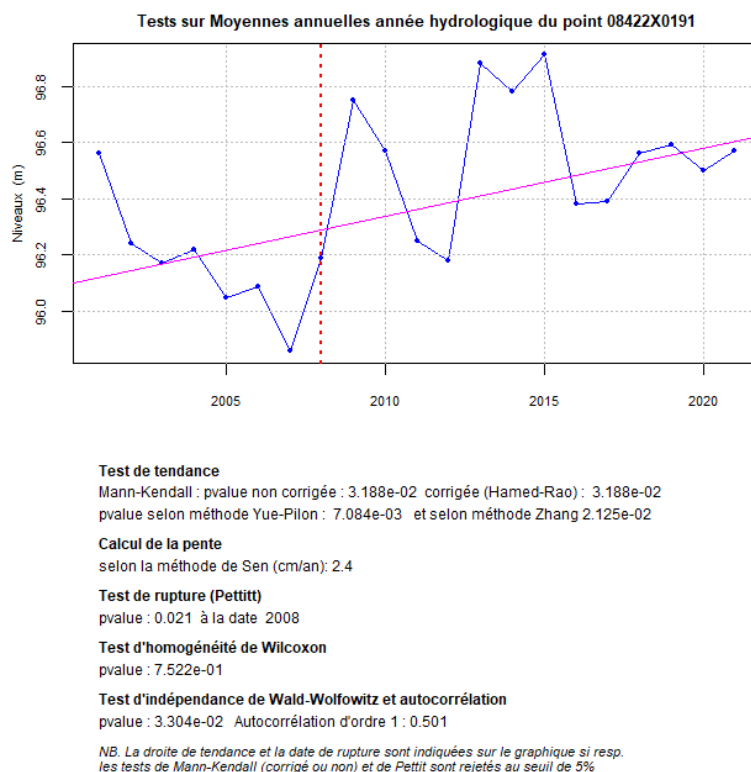


Figure 47 : Calculs de tendance par année hydrologique sur la chronique de données piézométriques journalières pour le forage 08422X0191/F2 (ESTHER)

Le Tableau 7 récapitule les principaux résultats.

Code	Commune	Cycle	Tendance	Basses eaux	Hautes eaux	Mini	Maxi	Battement (m)
08422X0190/F2	Loriol/Drôme	annuel	aucune	Juillet-septembre	Novembre - décembre	03/08/2004	15/11/2014	2,59
08422X0191/F1	Livron/Drôme	annuel	hausse	Août-septembre	Novembre - décembre + mai	18/08/2003	18/11/2002	5,29

Tableau 7 : Tableau de synthèse du traitement statistique des données piézométriques des points 08422X0191/F2 et 08422X0190/F1

Le traitement statistique des deux piézomètres 08422X0191/F2 et 08422X0190/F1 pour la zone aval met en avant :

- une cyclicité annuelle de la nappe alluviale,
- un battement de nappe plus important en rive droite de la Drôme (Livron) où la nappe est réputée captive (Noel, 2005). Cette amplitude, approximativement du double en faveur de Livron par rapport à Loriol, semble indiquer que la rive droite serait plus sujette aux variations de la hauteur du fil d'eau dans la rivière et que la couverture argileuse qui maintient la nappe en captivité n'est pas continue ;
- des basses eaux durant la période estivale. La période de hautes eaux est moins bien définie ;
- Aucune tendance d'évolution significative ne se distingue pour la nappe en rive gauche dans l'environnement du piézomètre de Loriol ;

- Une tendance à la hausse pour le piézomètre de Livron qui n'était pas attendue et qu'il n'est pas possible d'expliquer avec les éléments actuels.

6.1.2. Zone aval – Alluvions en rive gauche du Rhône de Tain-l'Hermitage à les Tourettes

La Figure 48 présente les fluctuations de la nappe au droit des piézomètres de la carrière Delmonico-Dorel de Livron (localisation Figure 40).

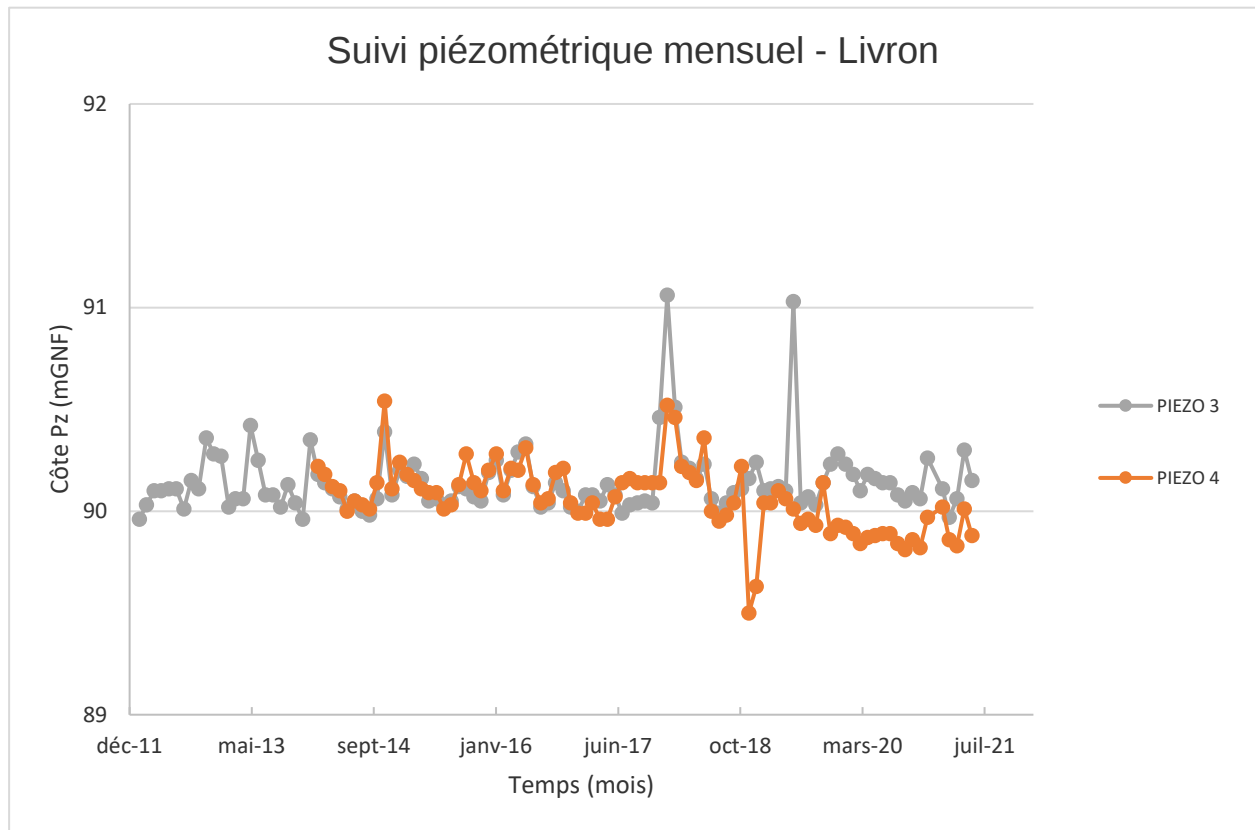


Figure 48 : Chroniques des piézomètres PZ3 et PZ4 de Livron. Données mensuelles (source : Delmonico-Dorel Carrières)

Le battement de la nappe à proximité du Rhône est de l'ordre du mètre en raison de la cote imposée par le fleuve : les piézomètres de Livron, PZ3 et PZ4, montrent des fluctuations pouvant atteindre respectivement 1,10 m et 1,04 m. Les deux piézomètres montrent globalement des évolutions synchrones, avec toutefois une tendance à la baisse pour le PZ4.

Le résultat de l'analyse statistique de la chronique du piézomètre PZ3 est présenté sur la Figure 49. La chronique de données couvre la période 2012 – 2021, soit 10 années de mesures, mais le nombre de mesures par année est faible : 12. La valeur maximale a été enregistrée en janvier 2018 et la valeur minimale en février 2012.

Compte tenu du faible nombre de données disponibles, il n'est pas possible d'effectuer une analyse statistique plus poussée. Néanmoins, l'analyse des données disponibles permet de situer les basses eaux en août - septembre et les hautes eaux en décembre et janvier.

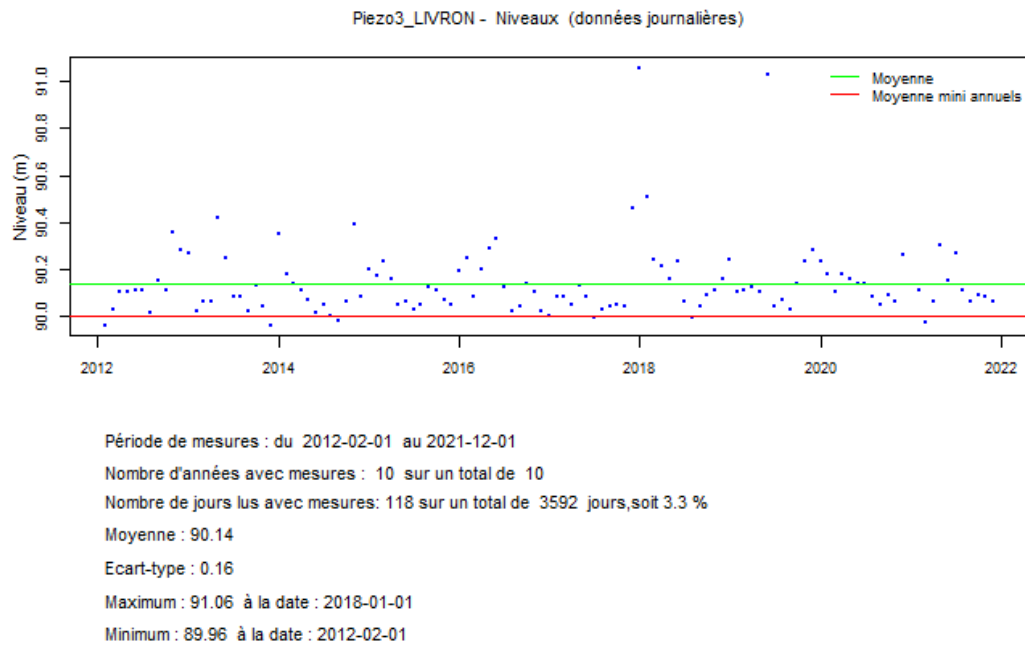


Figure 49 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques pour le piézomètre Piezo3 LIVRON (Source : ESTHER).

Le résultat de l'analyse de la chronique piézométrique du piézomètre « Piezo4 LIVRON » est présenté sur la Figure 50. La chronique de données couvre la période 2014 – 2021, soit 8 années de mesures, avec 1 mesure par mois. La valeur maximale a été enregistrée en novembre 2014 et la valeur minimale en décembre 2018.

L'analyse des données disponibles permet de situer les basses eaux en août - septembre et les hautes eaux de novembre à février.

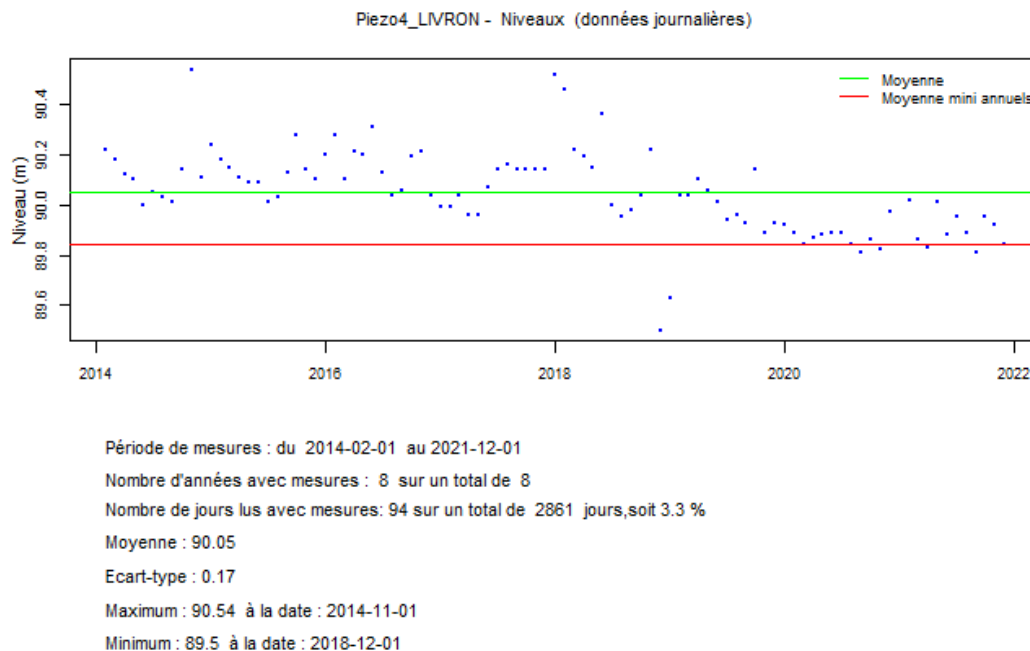


Figure 50 : Analyse statistique de la chronique de données piézométriques pour le piézomètre Piezo4 LIVRON (Source : ESTHER).

Une comparaison de la chronique du forage 08422X0191/F2 (Livron) avec celle du Piézo4 Livron a été effectuée, afin d'évaluer s'il existe des analogies entre ces deux points de suivi (Figure 51). Cette analyse rapide permet de mettre en évidence des comportements similaires, comme en 2014 et 2015 par exemple, mais aussi des différences importantes. Etant donné la faible fréquence d'acquisition des données pour le Piézo4 Livron, il est à l'heure actuelle difficile d'en tirer davantage de conclusions.

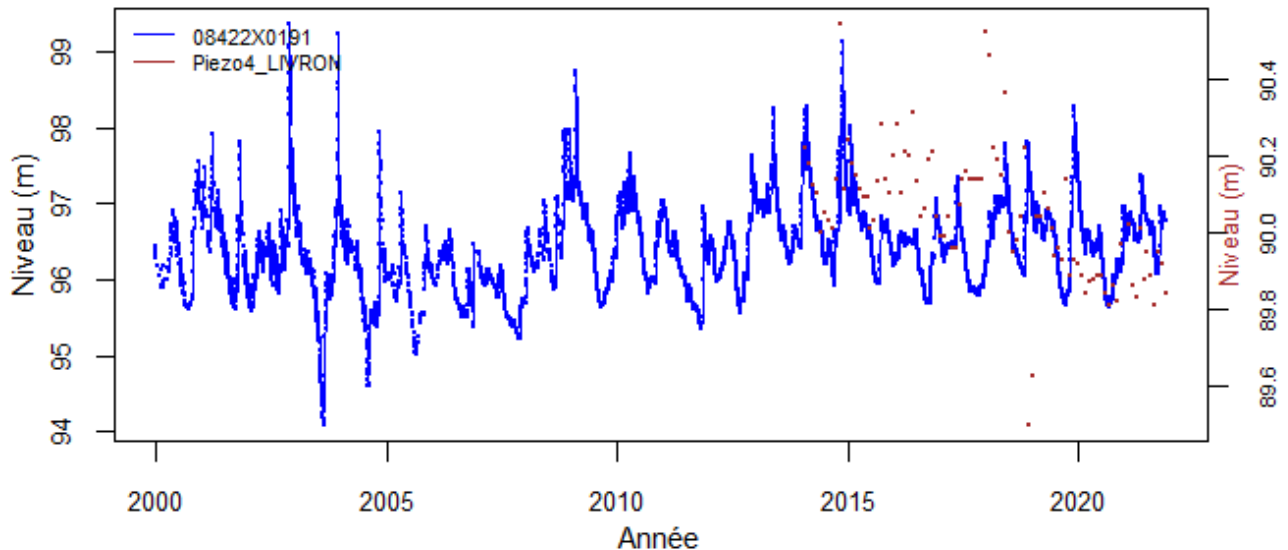


Figure 51 : Comparaison des chroniques du forage 08422X0191/F2 et du piézomètre Piezo4 LIVRON (ESTHER).

La Compagnie Nationale du Rhône (CNR) nous ayant gracieusement fourni leurs données historiques de suivi des eaux souterraines dans le secteur de Livron/Drôme, nous avons pu dresser les cartes piézométriques. La Figure 52 présente les résultats pour les années 1955, 1964 et 1979.

L'examen permet de constater que le sens d'écoulement global de la nappe (du Sud-Ouest vers le Nord-Est) n'a quasiment pas évolué sur les années considérées. On remarque également que la cote 90 m NGF fluctue très peu spatialement. Ceci démontre l'impact du Rhône dans ce secteur. Cette isopièze pourrait être utilisée pour délimiter la nappe du Rhône de la nappe de la Drôme, pour le secteur de la rive droite de la rivière.

Il apparaît également pour les 3 années considérées, que les côtes piézométriques ont assez peu évolué à l'exception du point de suivi situé vers la Domazane. On note en effet, une baisse de l'ordre de 2 m entre 1955 et 1979 sur cet ouvrage.

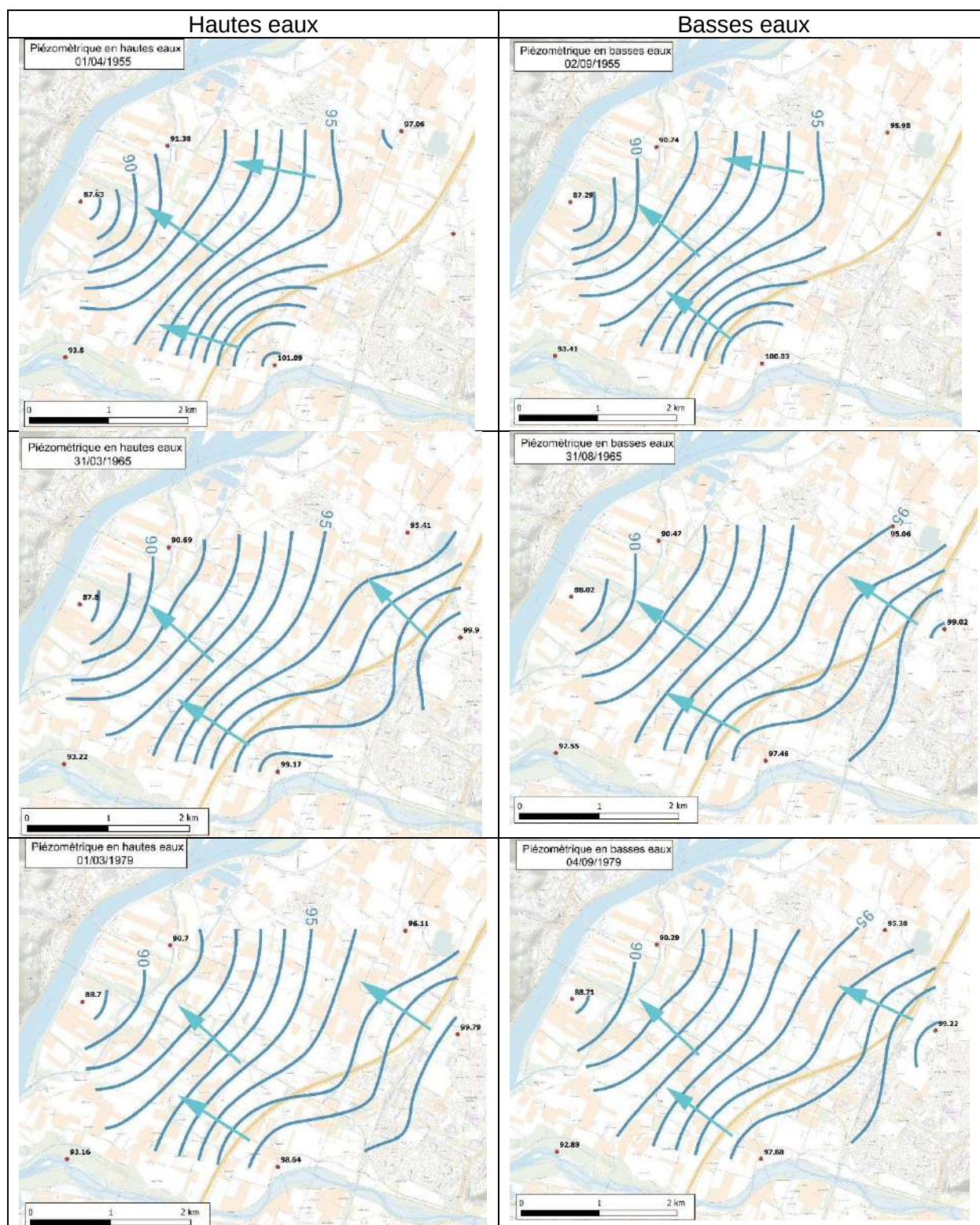


Figure 52 : Cartes piézométriques dans le secteur Livron/Drôme pour les années 1955, 1965 et 1979. Les flèches indiquent le sens général d'écoulement de la nappe, les côtes sont en m NGF (source : Compagnie Nationale du Rhône)

6.1.3. Zone amont – Alluvions de la Drôme d'Allex/Grâne à Crest

La Figure 53 présente les chroniques des piézomètres 08424X0006/F2 (Eurre) et 08423X0067/PZ (Grâne). Il est à noter que ce dernier ouvrage est influencé par des prélèvements.

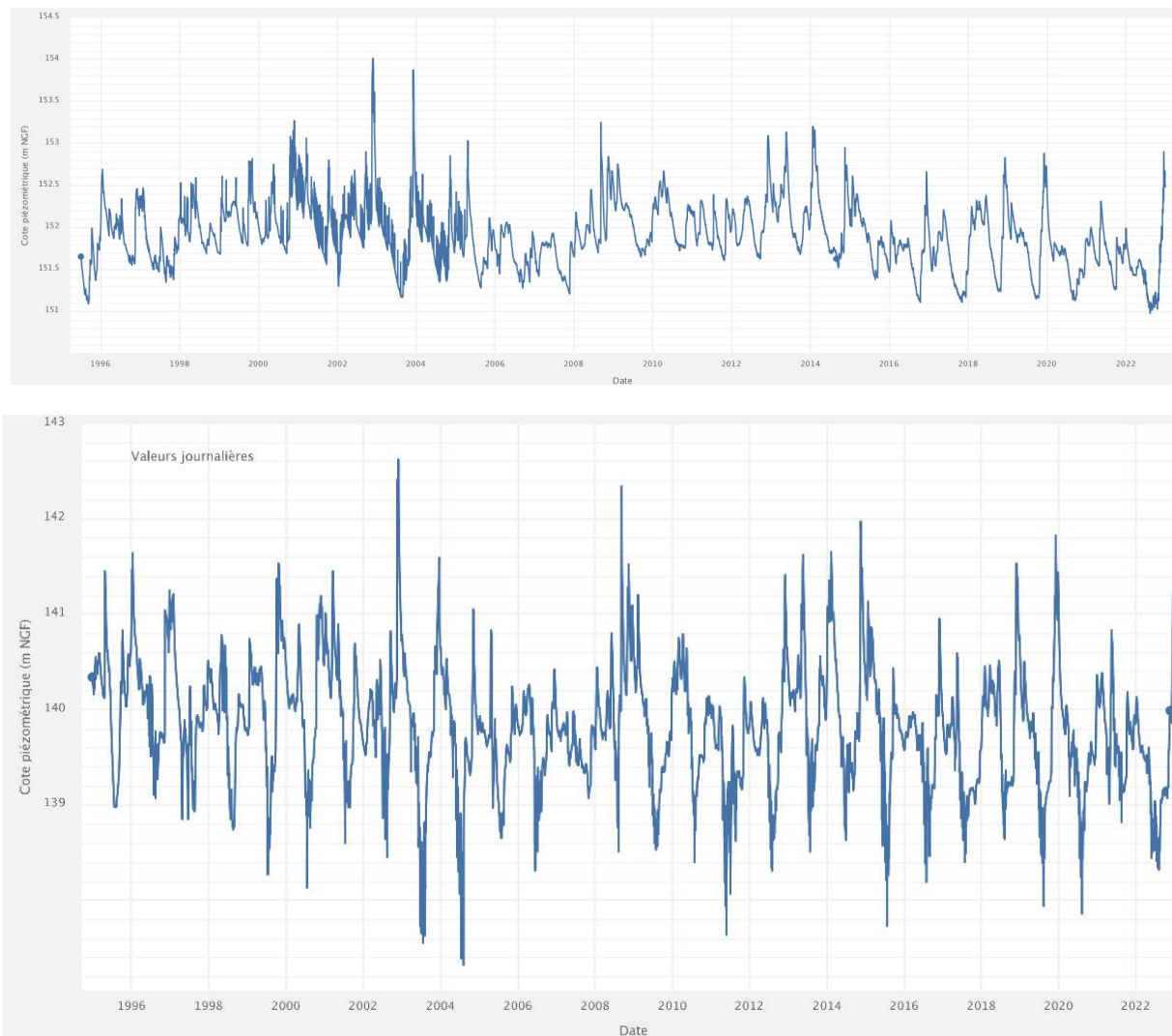


Figure 53 : Chroniques piézométriques au pas journalier des points 08424X0006/F2 (haut) et 08423X0067/PZ (bas) (source : ADES)

Le tableau suivant récapitule les principaux résultats des traitements statistiques réalisés avec le logiciel ESTHER. Le détail, pour les deux points de suivi, est présenté en annexe 2.

Code	Commune	Cycle	Tendance	Basses eaux	Hautes eaux	Mini	Maxi	Battement (m)
08424X0006/F2	Eurre	annuel	aucune sur la totalité de la chronique, mais baisse depuis 2010	Août-octobre	Décembre + avril-mai	14/08/2022	25/11/2002	3,03
08423X0067/PZ	Grâne	annuel	baisse	Juillet-septembre	Novembre - janvier	05/08/2004	29/11/2002	5,30

Tableau 8 : Tableau de synthèse du traitement statistique des données piézométriques des points 08424X0006/F2 et 08423X0067/PZX

Le tableau de synthèse met en avant des observations communes avec le secteur en aval de Livron à savoir une cyclicité annuelle, des battements de nappe atteignant plusieurs mètres, une période de basses eaux circonscrite à la période estivale et des hautes eaux moins bien définies.

Le secteur amont se distingue par contre par une baisse du niveau de la nappe, des deux côtés de la Drôme. Cette baisse est continue depuis le début des observations à Grâne et elle s'observe depuis 2010 à Eurre avec un point de rupture en 2015.

La baisse de la surface piézométrique peut avoir pour origine une augmentation des prélèvements et/ou une diminution de la pluviométrie dans le bassin d'alimentation de la nappe.

La chronique des précipitations mesurées à Vaunaveys la -Rochette pour la période 2001-2021 ne montre pas d'évolution particulière à l'échelle des moyennes annuelles mais on note toutefois une diminution du nombre d'évènements supérieurs à 80 mm depuis 2011.

Concernant les prélèvements dans la Drôme, il convient de noter que dans le cadre de la mise en place de l'organisme Unique de Gestion Collective de l'irrigation sur le bassin versant de la Drôme, qui décline de l'instauration de zones de répartition des Eaux (ZRE sous bassin du Rhône et ZRE Alluvions de la Drôme), il y a eu une diminution des prélèvements pour l'irrigation à partir de 2018 en conformité avec le plan de gestion de la ressource en eau.

6.2. CARTOGRAPHIE DES ECOULEMENTS SOUTERRAINS

Dans l'objectif d'identifier les relations éventuelles entre les principales nappes ainsi que les relations entre les eaux souterraines et les eaux superficielles, il a été effectué dans un premier temps un travail bibliographique de recherche des points d'accès aux eaux souterraines (puits, galeries, forages, sources, piézomètres...). Près de 450 points ont ainsi été recensés, la majorité d'entre eux sont situés en contexte alluvial (Figure 54)

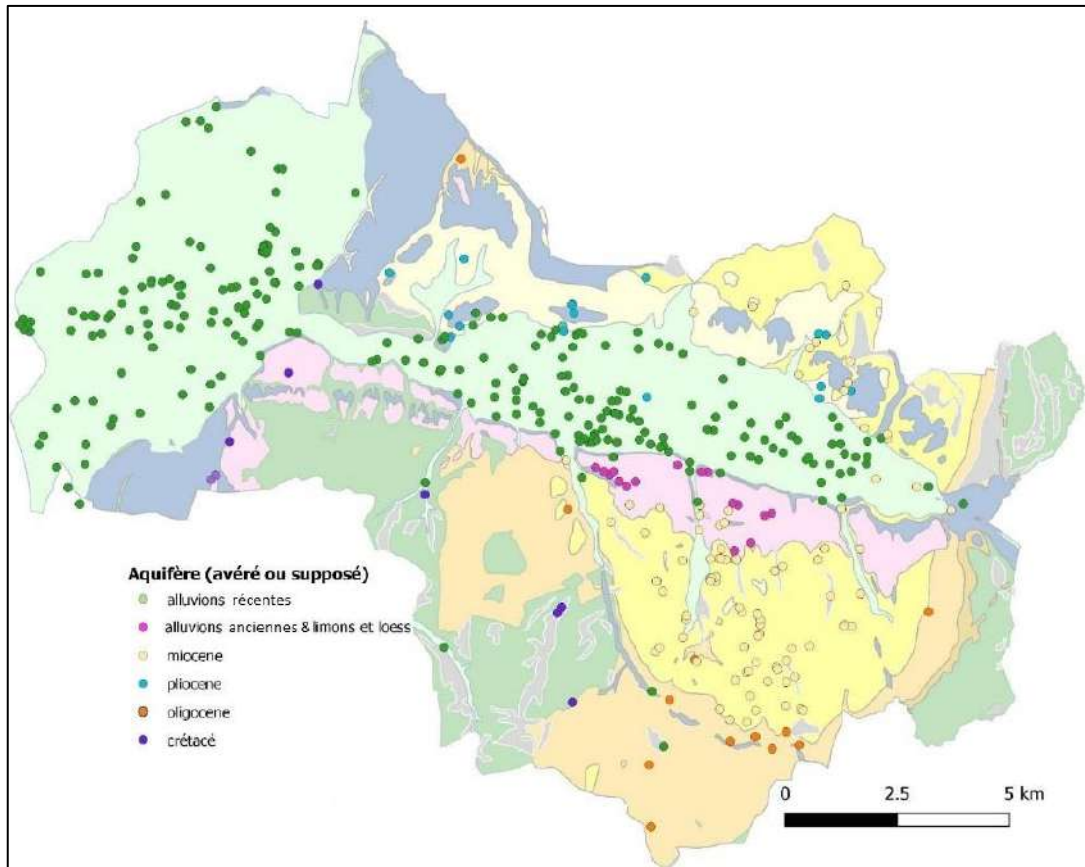


Figure 54 : Localisation des points d'eau souterraine recensés en bibliographie, avec indication de l'aquifère captée (avéré ou supposé)

Un travail de validation sur site a ensuite été effectué afin de vérifier la pérennité des points pré-identifiés, de contrôler si ces derniers se prêtaient aux différentes mesures envisagées (piézométrie, débit, mesures physico-chimiques *in situ*, possibilités de prélèvements) et la nature de l'aquifère capté. Le travail de repérage sur site s'est basé prioritairement sur les aquifères les plus sollicités qui concentrent les problématiques de quantité et/ou de qualité, notamment les nappes des alluvions récentes et nappes de la molasse miocène. De nombreux points supplémentaires ont pu être identifiés lors de la phase de repérage *in situ*.

Après validation par le comité technique de l'étude, un total de 97 points d'eau souterraine et 18 points d'eau superficielle ont été retenus pour les deux campagnes de mesures (Figure 55).

Il est à noter que ce nombre de points sélectionnés est plus élevé que celui prévu initialement dans le programme de l'étude ; soit 80 points prévus pour l'ensemble des eaux souterraines et des eaux superficielles. Ceci afin de tenir compte du risque de ne pas pouvoir accéder au point de mesure le jour de la visite : absence du propriétaire, refus d'accès, détérioration de l'ouvrage, absence d'eau etc ...

Les coordonnées géographiques et la commune d'implantation des points d'eau souterraine sont reportés en annexe 3. Les coordonnées des points d'eau de surface sont présentées sur le tableau 4.

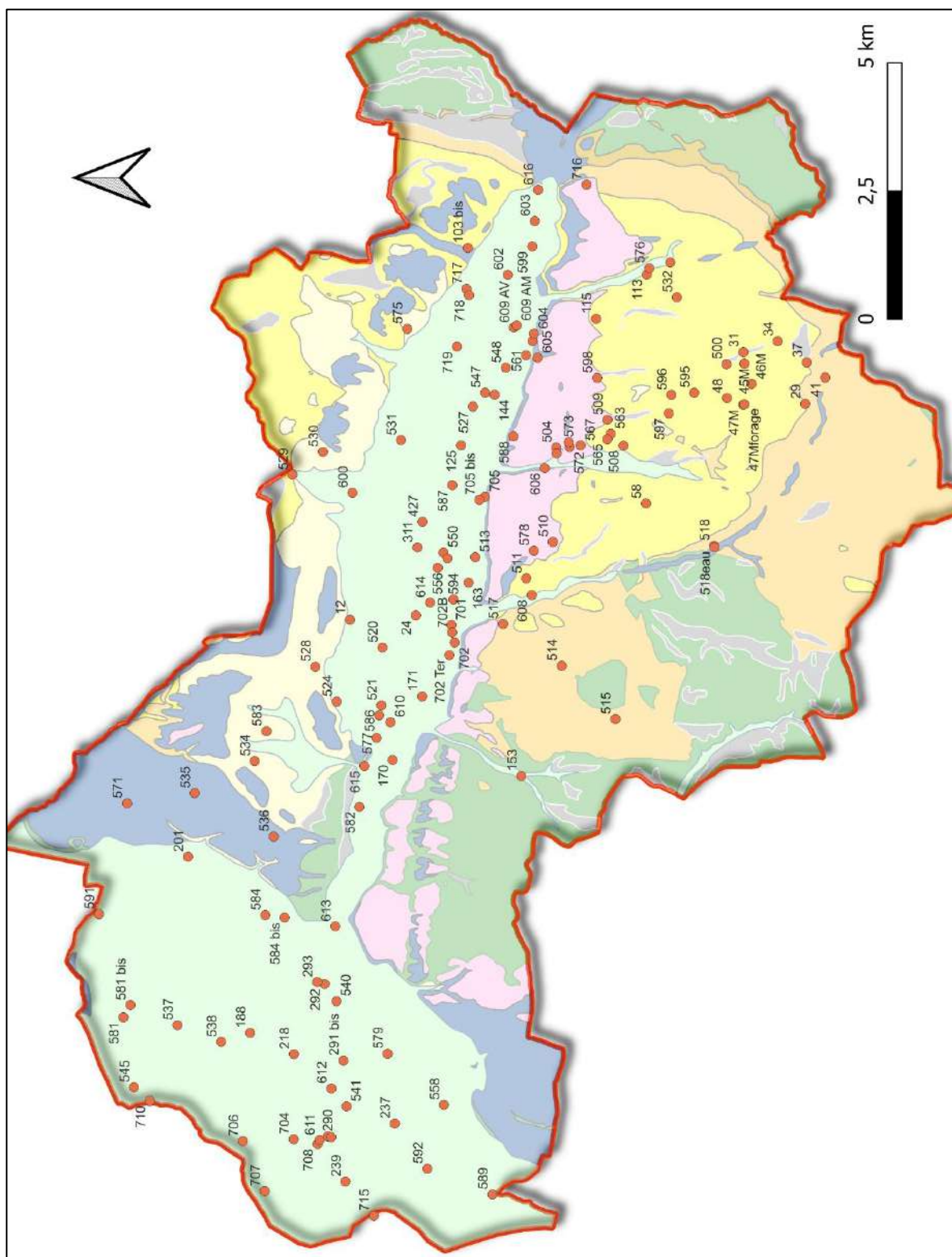


Figure 55 : Localisation des points de suivis (eaux souterraine et eau superficielle) retenus avec indication de leur code terrain

6.2.1. Déroulement des campagnes de mesures

Sur la base des résultats du traitement statistique des chroniques piézométriques de la nappe des alluvions récentes, il a été choisi de réaliser la campagne de hautes eaux à la fin du mois de mars et la campagne de basses eaux au début du mois de septembre.

La **campagne de hautes eaux s'est déroulée du 28 mars au 1^{er} avril 2022**. Quatre agents du BRGM se sont partagés les opérations de mesures piézométriques, de mesures de débits sur les eaux de surface et de nivellement. Un agent du SMRD a contribué à la réalisation des jaugeages.

Des mesures de température et de conductivité électrique ont été réalisées quand il était possible de renouveler l'eau des ouvrages souterrains ou sur les points d'eau à écoulement permanent (source, cours d'eau).

Le 1^{er} avril, de grosses chutes de neige ont perturbé les opérations de nivellement.

La **campagne de basses eaux s'est déroulée du 5 au 9 septembre 2022**. La campagne comportait outre les points de mesures réalisées en hautes eaux, le prélèvement d'échantillons d'eau de surface et d'eau souterraine (30 échantillonnage prévus). L'objectif de ces prélèvements planifiés en basses eaux, était d'avoir une signature hydrogéochimique propre à chaque compartiment de l'hydrosystème, en limitant les interférences avec les précipitations météoriques qui peuvent apporter une certaine dilution du signal en période de hautes eaux. Le planning a été élaboré en tenant compte des contraintes logistiques pour réduire les délais de transport.

Les échantillons prélevés chaque journée étaient apportés tous les soirs à une plateforme d'expédition située à Bourg-les-Valence, ils étaient réceptionnés le lendemain matin par les laboratoires.

Les prélèvements sur les point d'eau souterraine ont été fait de manière à assurer un pelevement représentatif de l'eau de la nappe. Pour cela des pompages ont été réalisé en tenant compte du calcul du volume d'eau extrait et par la stabilité de la conductivité électrique mesurée en continu. Cette étape peut durer plusieurs heures. Lorsque l'ouvrage ne comportait pas de pompe en place, le BRGM a utilisé une pompe immergée (pompe MP1 de Grandfos de 2" de diamètre).

La campagne a été perturbée par la survenue d'orages importants à partir du mercredi 7 septembre qui ont entraîné des ruissellements importants et une crue de la Drôme. Pour des raisons de sécurité, il n'a pas été réalisé de mesures de débits sur la rivière. De plus, la Drôme et certains de ses affluents n'ont pas pu être échantillonnés en raison d'une turbidité excessive liée au ruissellement.

Il est à noter également que la faiblesse des précipitations en 2022 s'est traduite par l'absence de niveau d'eau mesurable sur plusieurs points d'eau souterraine et par des constats d'assecs sur certains affluents de la Drôme avant le déclenchement des orages du milieu de la semaine.

6.2.2. Piézométrie de la nappe des alluvions récentes de la Drôme

La Figure 56 présente les cartes piézométriques de la nappe en mars et en septembre 2022 en aval de Livron/Drôme.

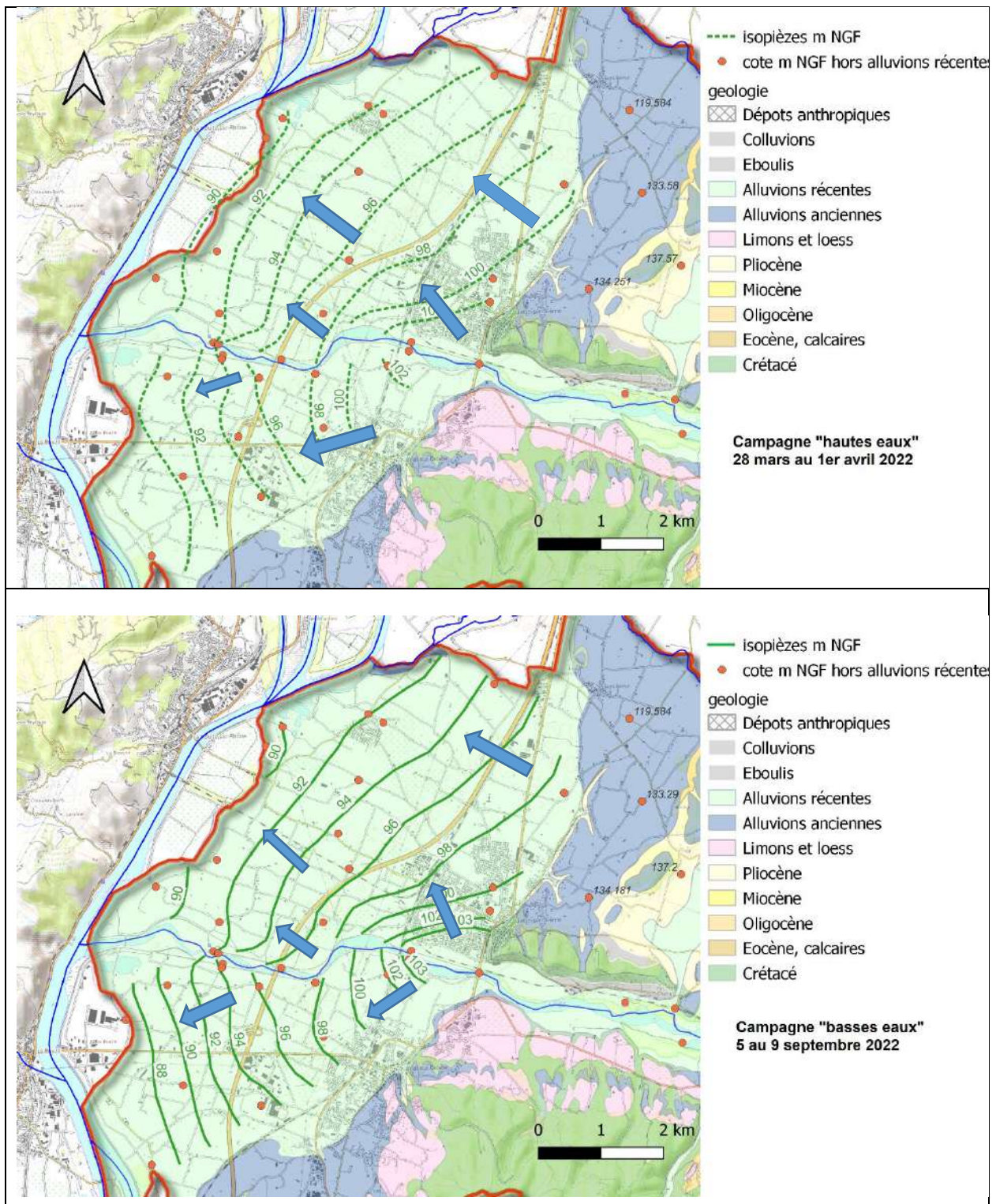


Figure 56 : cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux » 2022 pour la nappe alluviale dans le secteur Livron/Drôme et Loriol/Drôme. Les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines

Ces cartes montrent que le sens général d'écoulement des eaux souterraines est similaire pour les deux périodes de mesures, et ce pour les deux rives de la Drôme. Il est orienté vers le Nord-Ouest pour le secteur Nord de la Drôme et il est orienté vers le Sud-Ouest pour le secteur Sud.

Ce schéma est dans la même disposition que les cartographiques des années 1955, 1965 et 1979 de la rive droite (cf. Figure 52)

On observe également que les écoulements se font dès la sortie du défilé de Livron/Drôme, de la Drôme vers sa nappe d'accompagnement. Les isopièzes semblent un peu plus resserrées à la sortie du défilé, notamment au droit de la ville de Livron. Ceci suggère une perméabilité moindre de l'aquifère dans ce secteur.

La Figure 57 présente un transect Nord-Sud passant par la Drôme au seuil CNR. La coupe interprétative des échanges nappes-rivière tracée avec les données de la campagne hautes eaux, montre que la rivière est en position haute par rapport à la nappe. Cette configuration est identique à celle mise en évidence dans l'étude SOGREAH, 2012 (cf. Figure 20) Cette observation indique une alimentation de la nappe par la Drôme.

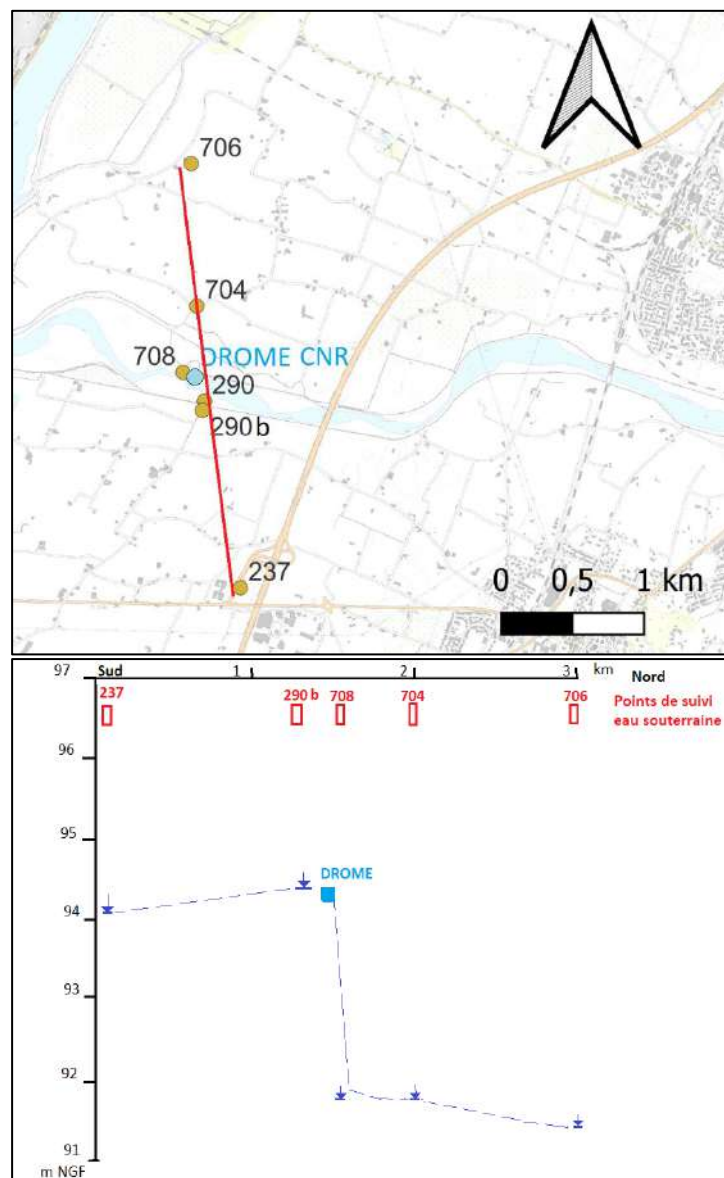


Figure 57 : Transect Nord-Sud passant au seuil CNR présentant la piézométrie de la nappe (points 237, 290b, 708, 704 et 706) et la cote de la rivière pour la campagne hautes eaux de mars 2022 (remarque : le piézomètre 708 est déporté par rapport à l'axe du transect)

Il est à noter que dans le secteur présenté sur la figure 57, le gradient est beaucoup plus marqué en rive droite, suggérant un colmatage possible de la berge dans ce secteur.

A titre informatif, les cotes des points de suivis dans les alluvions anciennes du secteur de Livron/Drôme ont été reportées sur la Figure 56. Compte tenu du caractère morcelé des nappes dans ces formations et du petit nombre de points de mesures, il n'a pas été dressé de cartes piézométrique pour cet aquifère.

La Figure 58 présente les cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux » de la nappe des alluvions récentes entre Crest et Alex/Grâne.

Ces cartes montrent pour le secteur au Nord de la Drôme, un sens d'écoulement général de la nappe orienté vers le Nord-Ouest dans un premier temps, qui devient ensuite presque Est-Ouest et qui, au niveau d'Alex prend la direction du Sud-Ouest. L'ajout de 3 points supplémentaires sur la commune d'Eurre lors de la campagne de basses eaux a permis de mettre en évidence une alimentation probable depuis les coteaux. Il n'a pas été possible de vérifier l'existence d'écoulements de ce type au droit de la commune d'Alex : les deux points situés à proximité des coteaux étaient à sec en septembre.

Au Sud de la Drôme, le sens d'écoulement de la nappe est globalement orienté vers l'ouest-nord-ouest. On observe près de la haute terrasse des alluvions anciennes surmontée par les limons et loess, une inflexion des isopièzes qui traduit des apports en provenance de cet aquifère.

Les cotes des points de suivis implantés dans le Pliocène au Nord de la Drome, l'Oligocène et le Crétacé au Sud de la rivière sont reportés la Figure 58. Le faible nombre de points de suivi dans ces aquifères ne permet pas de dresser des cartes des écoulements souterrains.

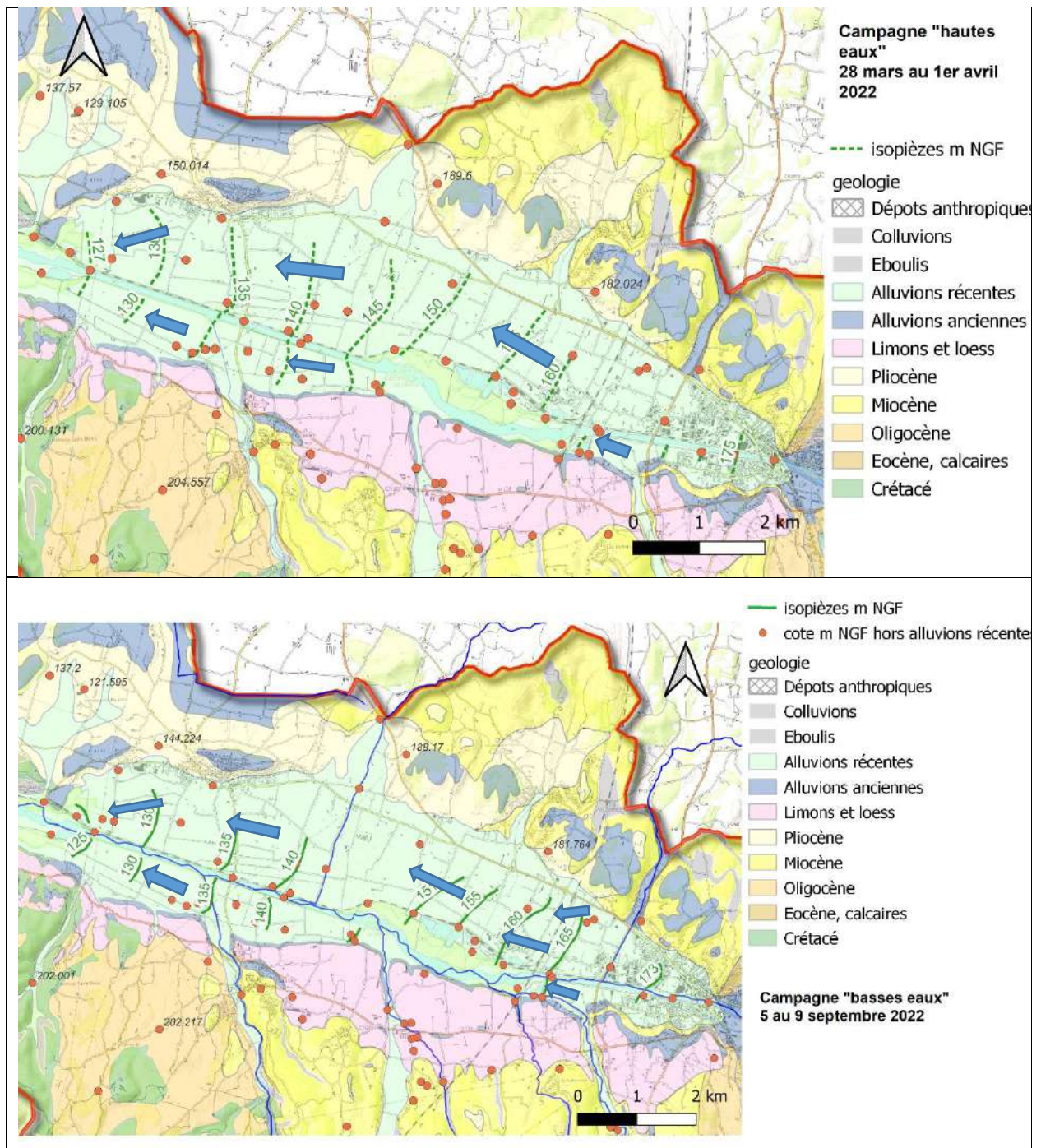


Figure 58 : cartes piézométriques « hautes eaux » et « basses eaux » pour la nappe alluviale dans le secteur Crest-Grâne/Alex. Les flèches indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines

A partir de ces cartes piézométriques et des jaugeages réalisés sur la Drôme pour la période « hautes eaux 2022 », il a été réalisé une synthèse des relations nappe/rivière pour cette période (Figure 59) :

- La zone 1 correspond à un secteur où la Drôme alimente la nappe. Les chroniques des piézomètres de Loriol et Livron ne mettent pas en évidence d'impact des prélèvements sur la nappe alluviale.

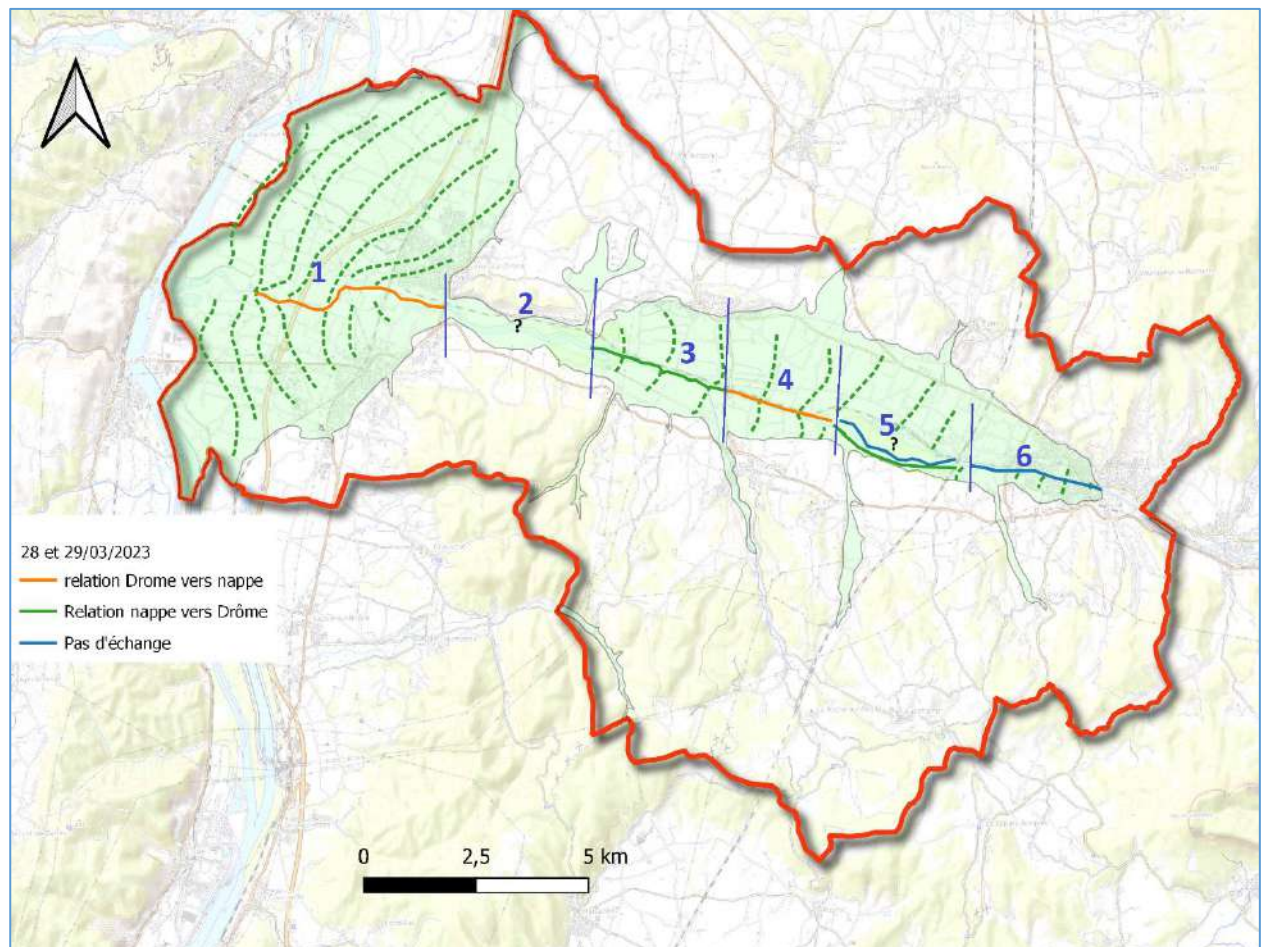
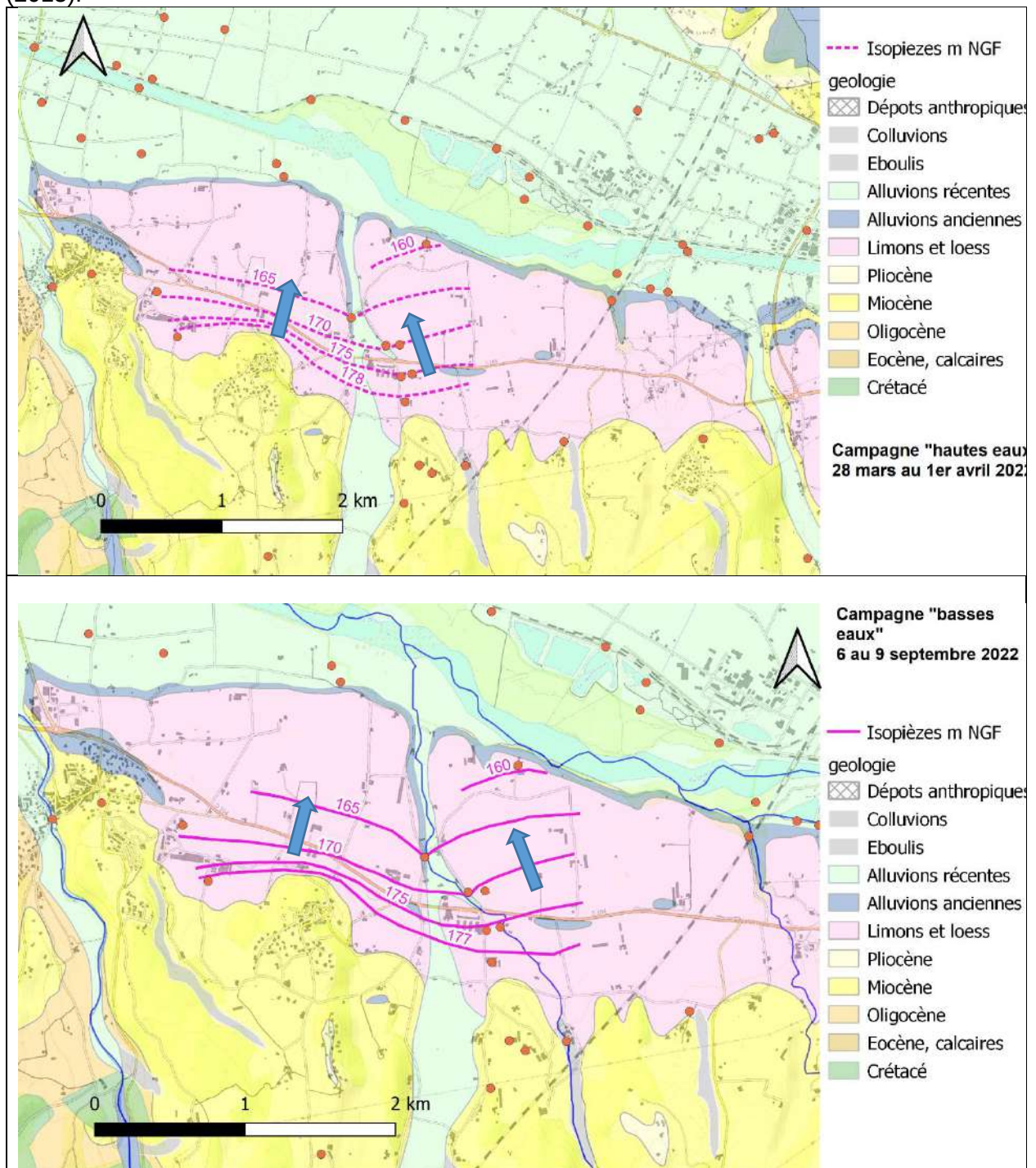


Figure 59 : Synthèse des relations nappe alluviale / Drôme de la campagne « hautes eaux » 2022 (les droites en pointillé correspondent au isopièzes des figures 56 et 57) .

- La zone 2 n'est pas renseignée quant à la relation nappe rivière par manque de données;
- La zone 3 : les informations acquises dans le cadre de l'étude et la bibliographie existante permettent d'affirmer que pour la rive droite, c'est la nappe qui alimente la Drôme. Tous les prélèvements dans la nappe alluviale ont par conséquent un impact sur le cours d'eau. En rive gauche, le schéma est moins clair : il semble y avoir peu d'échanges hormis dans la partie plus aval. Les jaugeages montrent que dans ce secteur la Drôme voit son débit croître de l'amont vers l'aval ;
- La zone 4 : les isopièzes montrent que l'écoulement se fait de la Drôme vers la nappe. Ceci est confirmé par les jaugeages qui indiquent une diminution du débit de la rivière de l'amont vers l'aval.
- La zone 5 ne dispose pas de points de suivi des eaux de la nappe à proximité de la rivière. Les relations avec la rivière sont hypothétiques.
- La zone 6 apparaît comme étant une zone où les échanges sont limités : les jaugeages n'indiquent ni apports ni pertes sur cette zone et les isopièzes sont globalement parallèles au cours d'eau.

6.2.3. Piézométrie de la nappe des alluvions anciennes surmontées par les limons et loess dans le secteur Chabrillan-Grâne

Les campagnes de mesures de la piézométrie de la nappe montrent que le sens d'écoulement des eaux se fait du Sud vers le Nord. Ce résultat est concordant avec les travaux de Levasseur (2015).



On observe également un drainage de la nappe par le ruisseau de Villeuneuve dans le secteur de Chabrillan ainsi qu'un resserrement des isopièzes dans les secteurs proches des affleurements miocènes.

Il est vraisemblable que cette nappe soit alimentée pour partie par les précipitations météoriques dans les secteurs où la couverture limoneuse est absente, et pour partie par des écoulements souterrains en provenance des nappes superficielles de la molasse miocène. En effet, les différentes mesures réalisées en septembre 2022 montrent que la nappe est présente, en l'absence de pompage, à quelques mètres de profondeur par rapport au sol bien que la pluviométrie soit déficitaire depuis plusieurs mois.

6.2.4. Piézométrie de la nappe de la molasse miocène

L'aquifère miocène a un fonctionnement stratifié avec des écoulements superficiels et des écoulements profonds (cf. chap. 3).

Des mesures piézométriques ont été faites sur des forages et puits et des mesures de débits sur des sources captées par de petites galeries. Les forages captant les écoulements profonds sont essentiellement des ouvrages agricoles et il n'a pas été possible d'y réaliser des mesures sur un certain nombre d'entre eux, soit parce que la tête de l'ouvrage est boulonnée en raison d'un artésianisme, soit en raison d'un encombrement, et de l'absence de tube guide-sonde. Sur quelques points, les aménagements prévus pour la campagne hautes eaux se sont avérés mal adaptés pour réaliser les mesures. Ils ont été modifiés pour la campagne basses eaux, c'est pourquoi la cartographie de la piézométrie des écoulements profonds n'est disponible que pour les mesures de septembre 2022 (Figure 61).

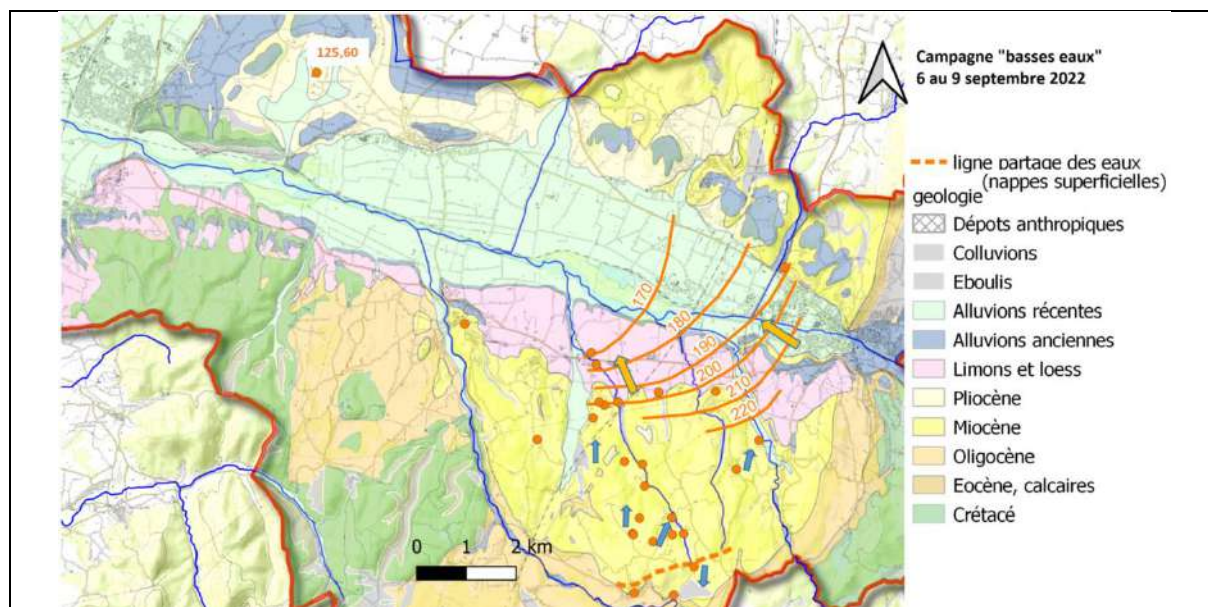


Figure 61 : Carte piézométrique basses eaux pour l'aquifère de la molasse miocène. Les flèches bleues indiquent le sens d'écoulement des eaux souterraines pour les nappes superficielles, les flèches oranges illustrent le sens d'écoulement pour les circulations profondes

Le sens général d'écoulement des circulations profondes est cohérent avec celui reporté par de la Vaissière (2006) et Cave (2011) à savoir, pour le secteur Sud de la Drôme, une direction Sud

Sud-Est- Nord Nord-Ouest. Dans le secteur de Crest, il s'infléchit vers l'Ouest. Pour tracer les isopièzes, seul un forage (ID 583- Allex) a pu être mesuré : la cote de l'eau est reportée sur la Figure 61. Cette mesure suggère un sens d'écoulement orienté vers le Nord-Ouest, c'est-à-dire sur la rive pliocène.

Il est à noter que plusieurs auteurs dont Cave (2011) indiquent de probables échanges verticaux au sein de la molasse miocène mais aussi entre la molasse et les nappes superficielles (au droit des terrasses alluviales par exemple).

Forage de Grâne (ID 800)

Afin de compléter ce paragraphe sur les écoulements au sein de la molasse captive, il est présenté ici le suivi mis en place à l'occasion de la réalisation d'un forage sur la commune de Grâne BSS004GYJR (ID 800) (les données techniques sont disponibles sur infoterre (<http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS004GYJR>)).

Cet ouvrage réalisé dans le cadre de la présente étude a été achevé en février 2023. D'une profondeur initiale de 96 m, il a été crépiné de 77 à 88 m de profondeur au droit d'un niveau aquifère sableux captif du Miocène. Cet ouvrage est situé dans la rive Pliocène.

Afin d'évaluer si les fluctuations de la nappe étaient en phase avec celles d'un forage proche (ID 504 à Chabrillan) mesuré lors des campagnes basses eaux et hautes eaux, une sonde automatique de mesure et d'enregistrement de la piézométrie a été installée au forage 504 en septembre 2022. Un dispositif identique a été installé au forage ID 800 à partir de mars 2023.

La localisation des deux forages est présentée sur la Figure 62 et les chroniques enregistrées sont présentées Figure 63.

On peut observer une élévation d'un niveau de la nappe à Chabrillan pendant l'automne, puis un semi plateau vers le début de l'année 2023. Deux épisodes de pompage marquent la fin de la chronique.

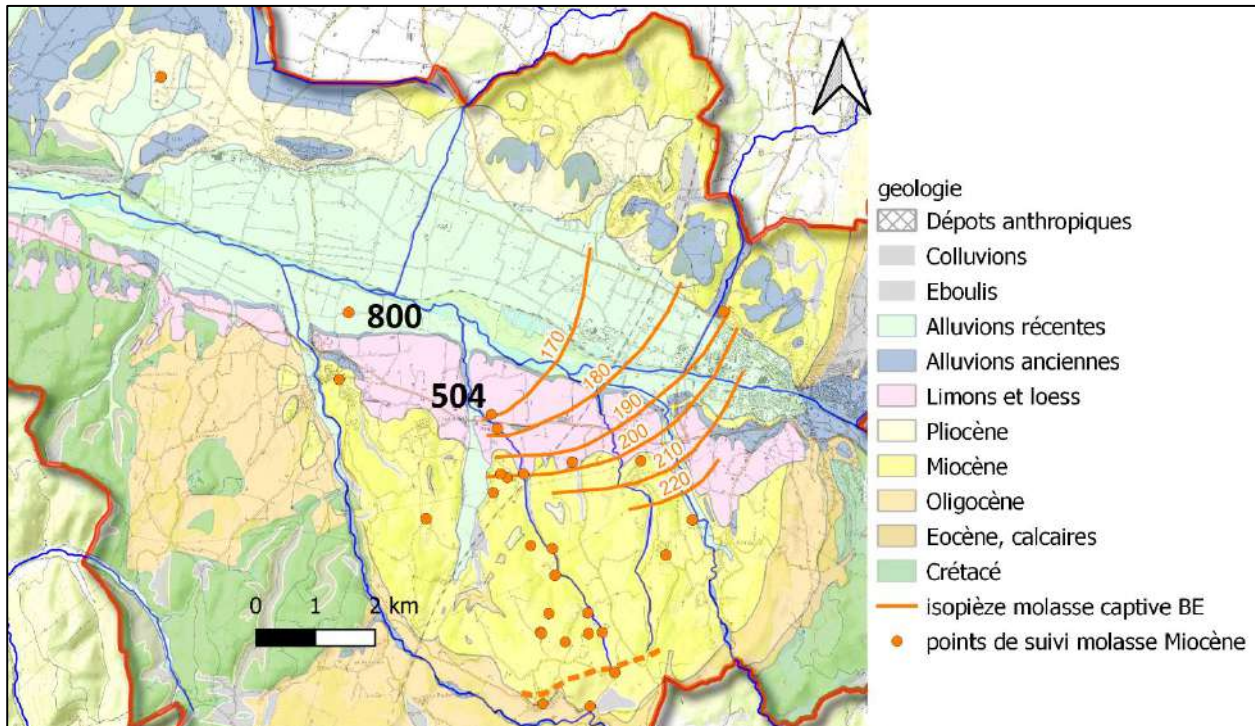


Figure 62 : Localisation des forages ayant fait l'objet d'un suivi piézométrique en continu (nappe profonde molasse Miocène) : forage 800 (Grâne) et forage 504 (Chabrillan)

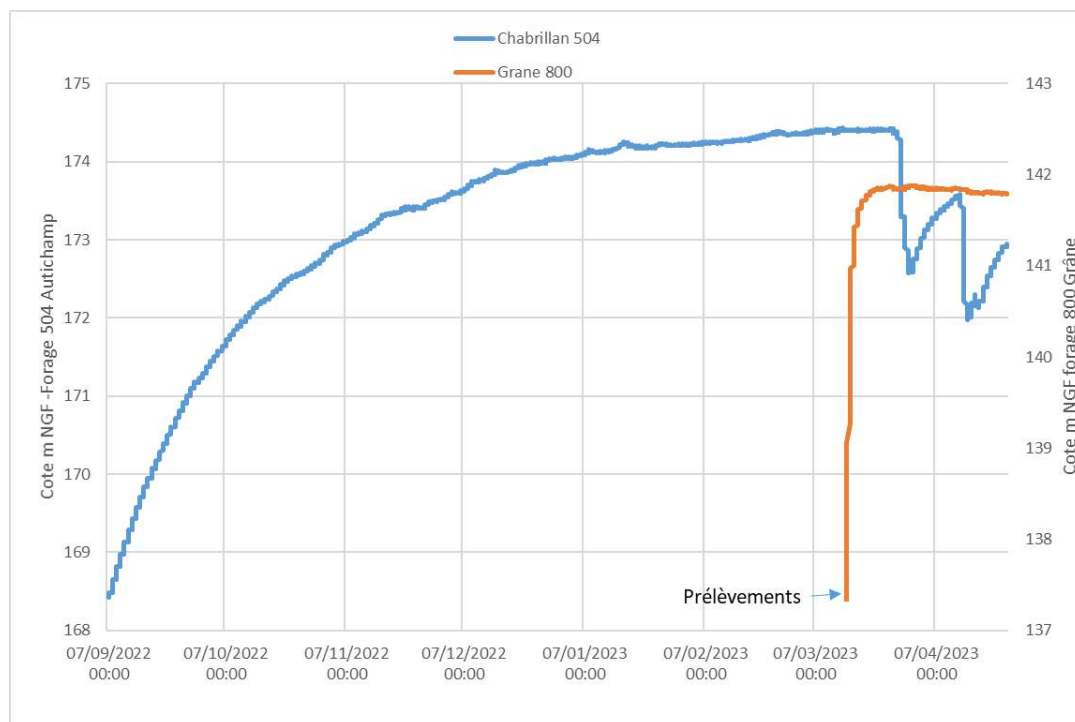


Figure 63 : Chroniques piézométriques des forages 504 Chabrillan et 800 Grâne (m NGF) pour la période du 07/09/22 au 24/04/23

La chronique de Grâne débute par une croissance rapide qui correspond au retour à l'équilibre de la nappe après pompage pour les prélèvements d'échantillons d'eau. Cet équilibre correspond à une cote de 141,8 m NGF. Dans le même temps, la cote du forage 504 est de 174,4 m NGF.

Cette différence altimétrique (environ 33 m) confirme le sens global des écoulements en direction du Nord-Ouest

Concernant les circulations superficielles dans la molasse miocène, il est apparu difficile de tracer des isopièzes en raison de l'assèchement de plusieurs points en septembre. En effet, hormis certains points où les mesures confirment l'existence d'une unique nappe, de nombreux cas de figure montrent des gradients hydrauliques très forts entre certains points peu éloignés les uns des autres, traduisant une diminution de la perméabilité et donc des variations de faciès. Ces observations suggèrent la présence de deux nappes. Il n'est donc pas possible de définir une carte piézométrique unique pour les écoulements superficiels. Les mesures réalisées toutefois permettent de déterminer le sens global d'écoulement des circulations superficielles qui est orienté en direction de la Drôme. On note également un drainage de ces petites nappes par les principaux cours d'eau (rif noir, Lambres...). Ce sens d'écoulement général des nappes superficielles de la molasse est identique pour la campagne hautes eaux.

A noter également, que le débit des sources captées par galeries a diminué de 33 % à 55% entre mars 2022 et septembre 2022.

6.2.5. Conclusions sur les écoulements souterrains

Dans le secteur d'étude, seule la nappe des alluvions récentes de la Drôme bénéficie d'un suivi régulier depuis plusieurs dizaines d'années. Quatre points de suivi, intégrés à l'arrêté cadre sécheresse pour le bassin de la Drôme, enregistrent les fluctuations de la nappe de part et d'autres de la rivière. Il est à noter que le point de suivi implanté sur la commune de Grâne (08423X0067) est influencé par des prélèvements. **Il conviendrait de tenir compte de ce biais et de réduire son degré de représentativité dans l'Arrêté Cadre Sécheresse (actuellement au niveau maximum).**

Au droit de ces 4 points, la nappe présente des caractéristiques communes à savoir une cyclicité annuelle et un battement compris entre 2,5 m et 5,3 m.

Pour le secteur en aval de la RN7, les piézomètres n'enregistrent pas de tendance à la baisse du niveau de la nappe des alluvions récentes de la Drôme. **Toutefois, la transposition de ce constat à l'ensemble du cône de déjection de la Drôme dans la vallée du Rhône n'est potentiellement pas valide en raison de plusieurs facteurs pouvant avoir une influence locale sur la piézométrie :** influence du Rhône, influence de la Drôme, alimentation par les coteaux et, influence des prélèvements (AEP, irrigation).

Il est donc recommandé d'étoffer le réseau de suivi piézométrique dans ce secteur. Le sens d'écoulement général de la nappe est cependant constant depuis plusieurs décennies. Il est orienté, depuis la rivière, en direction du Rhône.

Dans le secteur amont (Allex-Grâne/Crest), la tendance observée depuis quelques années est une baisse du niveau de la nappe des alluvions récentes de la Drôme. Il n'est pas noté de tendance à la baisse de la pluviométrie marquée dans le secteur d'étude. Aussi même si cette dernière possibilité ne peut pas être écartée, il est probable que la baisse du niveau de la nappe soit imputable à un accroissement des prélèvements. **Il conviendrait, comme pour le secteur en aval de la RN7, d'étoffer le réseau de suivi piézométrique pour consolider les observations** qui ne reposent actuellement que sur 2 ouvrages de suivi. Le sens d'écoulement de la nappe alluviale dans la partie amont de la zone d'étude est globalement orienté Est-Ouest avec selon les tronçons de la rivière une alimentation de la nappe par la Drôme ou, une alimentation de la Drôme par la nappe alluviale comme par exemple à l'Est de la commune d'Allex. Sur d'autres tronçons (rive droite entre Crest et Eurre par ex), les isopièzes apparaissent

quasi-perpendiculaires au cours d'eau traduisant des secteurs avec peu d'échanges. L'inflexion des isopièzes de la nappe alluviale à proximité des coteaux traduit l'existence de connexions avec les nappes superficielles de la molasse et la nappe des alluvions anciennes surmontées par les limons et loess.

La nappe des alluvions anciennes & limons et loess, présente sur la haute terrasse de la rive gauche de la Drôme, s'écoule en direction de la rivière et alimente la nappe des alluvions récentes.

Le sens d'écoulement général des nappes superficielles de la molasse miocène est également orienté vers la Drôme. Les cours d'eau qui entaillent les formations molassiques participent aussi au drainage de ces écoulements souterrains peu profonds.

Les circulations profondes au sein de la molasse sont également orientées vers la Drôme mais avec une composante Sud-Ouest / Nord-Ouest. Des échanges verticaux par drainage ascendant sont pressentis au sein de la molasse ainsi qu'entre la molasse et les aquifères superficiels.

Les figures suivantes présentent sur des schémas conceptuels, ces principales observations : relations entre la nappe des alluvions anciennes et la nappe des alluvions récentes –coupe Est Ouest sur la commune de Loriol-sur-Drôme (Figure 64) et écoulements souterrains dans le bassin de Crest, selon une direction Nord-Sud (Figure 65).

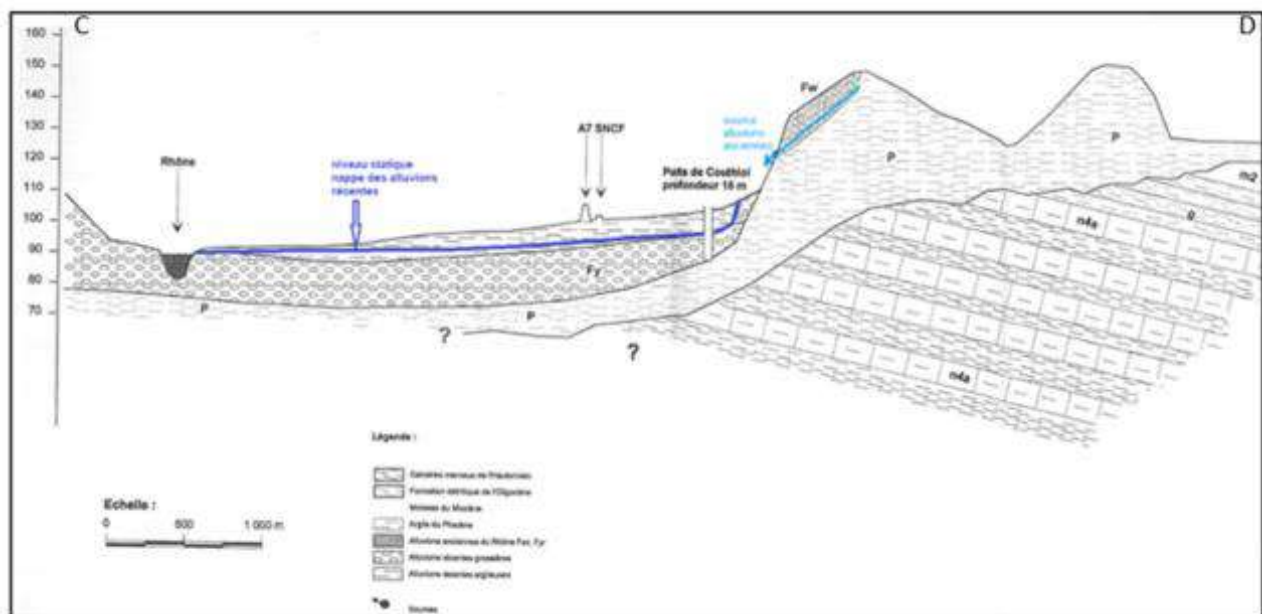


Figure 64 : Coupe Ouest-Est commune de Livron illustrant les relations indirectes entre la nappe des alluvions anciennes et la nappe des alluvions récentes. (IdéeEaux, 2018 modifié).

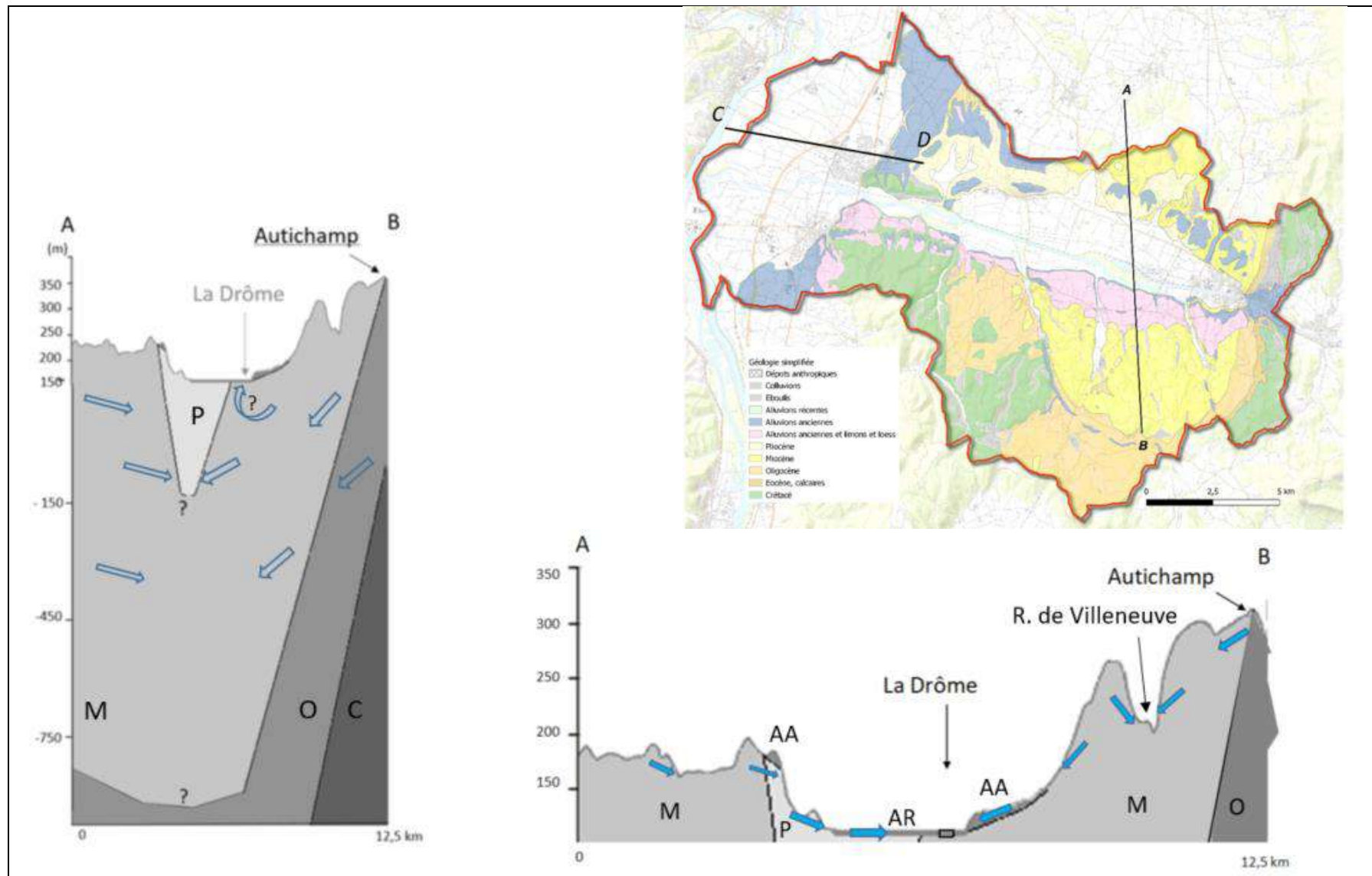


Figure 65 : schémas conceptuels de circulation des eaux souterraines dans le bassin de Crest. Image gauche : circulations profondes, image droite : circulations superficielles (la flèche indique le sens de circulation).

7. Les pressions anthropiques

7.1. PRESSION AGRICOLE

L'analyse de l'occupation du sol se base sur deux sources, les enquêtes du Recensement Général Agricole (RGA⁶ - Agreste, 2021) en 1988, 2000 et 2010 et sur des traitements du Registre Parcellaire Graphique (RPG⁷ - IGN, 2021a) de 2010 à 2019.

La Figure 66 présente l'évolution de l'occupation du sol entre 1988 et 2010 sur la base des enquêtes du RGA. L'occupation de la zone ne connaît pas de bouleversement important sur la période considérée (1988-2019). La surface en blé tendre diminue de 20% à 14%. La surface en maïs grain diminue de 17% à 12%. Ces baisses vont notamment permettre l'augmentation des surfaces de blé dur (catégorie « autres céréales ») et plus récemment de légumes. Le sorgho occupait 5% à 6% de la SAU⁸ à la fin des années 1980, il occupe depuis 2010 environ 3% de la SAU.

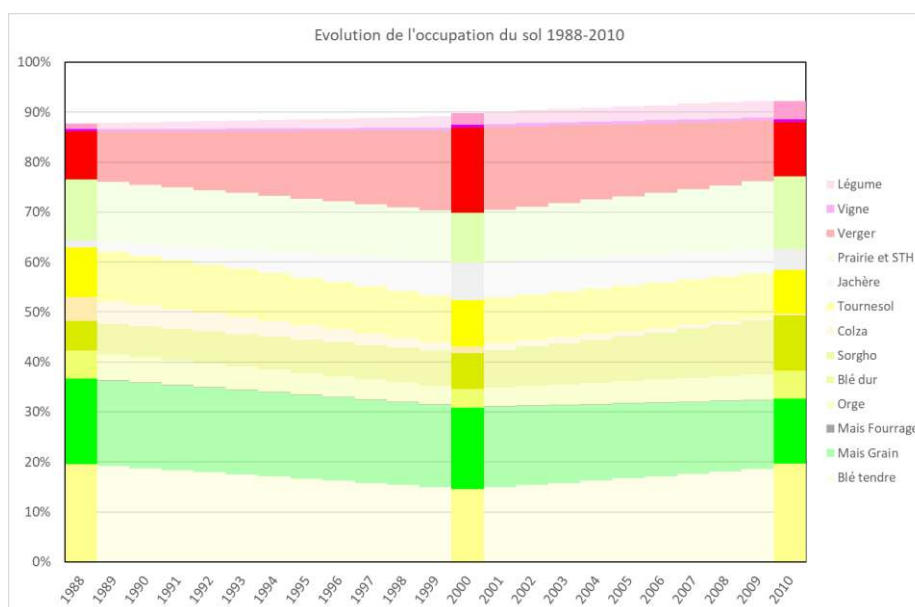


Figure 66 : Traitement des données communales du RGA sur la zone d'étude pour la période de 1988 à 2010 (Les couleurs foncées représentent les résultats d'enquêtes, les couleurs claires sont des interpolations –Agreste, 2021)

La Figure 67 présente l'évolution de l'occupation du sol entre 2010 et 2019 sur les bases d'un traitement du RPG. Entre 2010 à 2019, la surface en blé tendre diminue de 21% à 14%. La

⁶ RGA : Le Recensement Général Agricole établit des statistiques sur le nombre d'exploitations, les orientations technico-économiques des communes, les surfaces agricoles utilisées, les productions et surfaces concernées, les surfaces toujours en herbe, et les surfaces herbagères principales. Ces données sont donc qualitatives, et communales. Les enquêtes RGA sont réalisées au siège de l'exploitation (une parcelle est associée à la commune de l'exploitation à laquelle elle appartient).

⁷ RPG : Le Registre Parcellaire Graphique est une base de données géographiques servant de référence à l'instruction des aides de la politique agricole commune (PAC). Une version anonymisée est diffusée, elle contient les données graphiques des ilots parcellaires munis de leur culture principale. Les cultures (et les ilots associées) ne faisant pas l'objet d'aides PAC ne sont pas incluses dans le RPG.

⁸ La superficie agricole utilisée (SAU) est une notion normalisée dans la statistique agricole européenne. Elle comprend les terres arables (y compris pâturages temporaires, jachères, cultures sous abri, jardins familiaux...), les surfaces toujours en herbe et les cultures permanentes (vignes, vergers...).

surface en maïs grain diminue également de 15% à 12%. Les surfaces en vergers semblent être plus ou moins stables aux alentours de 10%. La surface en légumes augmente légèrement de 5% à 7%.

Il faut aussi noter une évolution dans le mode de gestion de surface enherbée ou à destination de l'alimentation des animaux. En 2010, 11% des surfaces étaient déclarées en Prairies et 8% le sont en 2019. En comparaison, 2% des surfaces étaient déclarées en fourrages contre 9% en 2019. Les nouvelles surfaces en fourrage sont de la « luzerne », à partir de 2015 il y a eu des modifications dans les collectes des données de déclarations PAC lors du passage à la nouvelle version du RPG (IGN, 2021b).

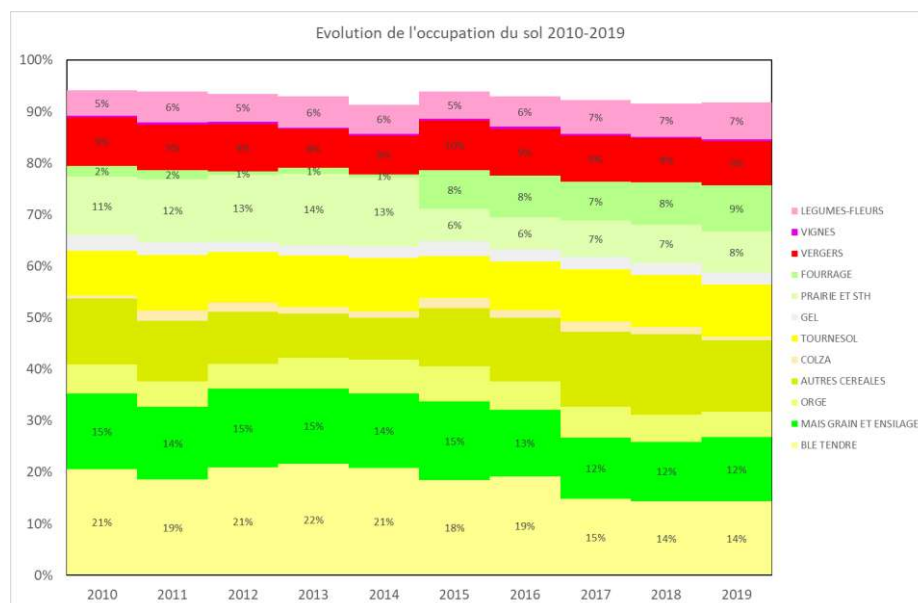


Figure 67 : Traitement des données des ilots parcellaires du RPG sur la zone d'étude pour la période de 2010 à 2019 (IGN, 2021a) .

La Figure 68 présente la répartition des cultures sur la zone d'étude. Les vergers, parcelles symbolisées en rouge sur la carte, sont plutôt rassemblés à l'aval (Ouest) du bassin. La partie centrale de l'aire d'étude rassemble davantage de céréales (dont le maïs symbolisé en vert franc et les céréales à paille symbolisé en jaune). La périphérie rassemble plus de parcelles en estives (prairie peu productive) et en production de fourrage. Les surfaces dédiées aux légumes (généralement de l'ail symbolisé en rose) sont principalement situées au centre de la zone d'étude.

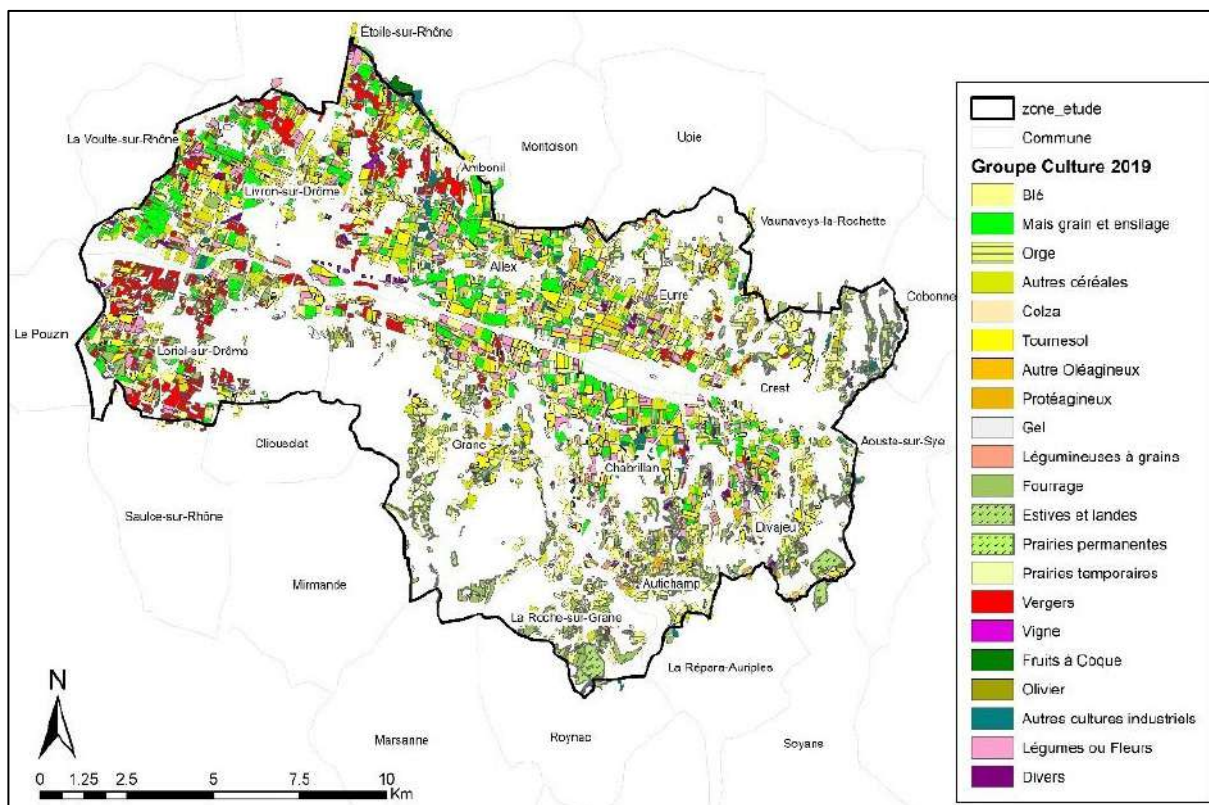


Figure 68 : Répartition des cultures sur la zone d'étude en 2019 d'après le Registre Parcellaire Graphique (IGN, 2021a).

Le Tableau 9 présente les nombres d'animaux par commune et par espèce. Ces données ont été collectées lors d'une enquête réalisée par les services de statistique du Ministère de l'agriculture en 2010⁹ (RGA - Agreste, 2021). Ces chiffres, du fait du secret statistique, sont une minimisation du nombre d'animaux présent en 2010 puisque les communes ayant moins de trois exploitants concernés ne sont pas représentées.

Commune	Total Equidès	Chèvres	Brebis nourrices	Total Porcins	Volailles	Lapines- mères
26006 - Alex					89100	
26021 - Autichamp					62876	
26065 - Chabrillan	6				69181	
26108 - Crest		425	655		1174253	660
26115 - Divajeu			212			
26125 - Eurre						
26144 - Grane	21	505	56	1921	116	
26165 - Livron-sur-Drome						
26166 - Lorient-sur-Drome					47643	
26277 - La Roche-sur-Grane		187				

Tableau 9 : Elevage en 2010 (nombre de têtes par commune selon les principales espèces)

⁹ Les informations contenues dans le Recensement Général Agricole (RGA) proviennent de données qui sont issues d'enquêtes auprès d'exploitations agricoles jugées représentatives. Les enquêtes sont réalisées environ tous les dix ans et pour l'instant les statistiques sont disponibles pour cinq dates, 1970, 1979, 1988, 2000 et 2010.

A cette échelle communale, la corrélation entre la densité de l'élevage et la contamination des eaux n'est pas réalisable. Il n'est pas de mesure de qualité de l'eau à l'échelle communale. De plus, les excréta animaux sont gérés comme des engrais et ils sont appliqués sur des parcelles agricoles puis absorbés par des plantes. La planification de l'application des excréta sur des parcelles en nombre suffisant autour des bâtiments est un prérequis pour l'autorisation par les autorités de la mise en exploitation d'élevages de grandes tailles. Cette formalité est nommée le plan d'épandage, certains élevages peuvent être amenés à appliquer leurs engrais sur des communes limitrophes.

Ces données ne permettent donc pas de localiser une éventuelle contamination, en revanche, elles permettent de préciser que sur la zone d'étude, principalement en amont, la fertilisation peut être d'origine organique (Larguier, 2006).

7.2. ASSAINISSEMENT

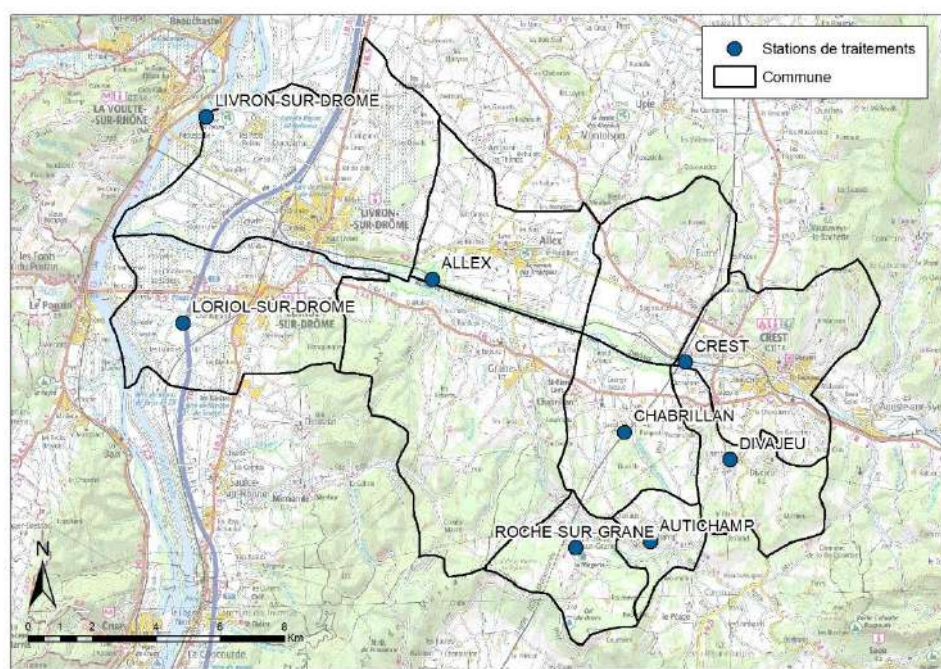
Les informations concernant le nombre d'habitants reliés au réseau d'assainissement collectif (AC) ou reliés au réseau d'assainissement non collectif (ANC) sont théoriquement disponibles sur le site de l'observatoire des services publics d'eau et d'assainissement, mis en œuvre par l'Office français de la biodiversité (Sispea, 2021).

Néanmoins, ces données sont parfois difficiles à exploiter puisque, bien qu'à l'échelle communale, les clefs des répartitions principales de ce site sont les organismes de gestion en charge de l'assainissement.

Ainsi, si plusieurs communes sont desservies par le même organisme, elles partageront toutes la même valeur de population desservie bien que ces communes n'aient pas des populations équivalentes. Dans le secteur étudié, il est assez difficile de calculer précisément le nombre d'habitants relié à un dispositif d'assainissement non collectif pour un certain nombre de communes car le SIGMA (syndicat intercommunal pour la gestion mutualisée de l'assainissement) dessert 28 communes (Sispea, 2021 - <https://www.services.eaufrance.fr/service/200347/2019>).

L'[assainissement non collectif \(ANC\)](#) désigne les installations individuelles de traitement des eaux domestiques. Ces dispositifs concernent les habitations qui ne sont pas desservies par un réseau public de collecte des eaux usées et qui doivent en conséquence traiter elles-mêmes leurs eaux usées avant de les rejeter dans le milieu naturel.

Pour connaître la population d'une commune disposant d'un dispositif d'assainissement non collectif (ANC), il a donc parfois fallu croiser les informations provenant de plusieurs sources comme la population totale de la commune et la population desservie par un service d'assainissement collectif (Figure 69), ou bien consulter des sources spécifiques comme certaines enquêtes publiques réalisées dans le cadre des schémas d'assainissement (Poyry, 2011 ; IRH, 2021 ; Larguier, 2006).



commune	création	tranche	commune	création	tranche
Alex	1995	[10 000 ; 100 000 [EH	Divajeu	1992	Taille < 200 EH
Autichamp	1970	Taille < 200 EH	Livron-sur-drome	2006	[10 000 ; 100 000 [E
Chabrillan	2007	[200 ; 2 000 [EH	Lorient-sur-drome	2001	[2 000 ; 10 000 [EH
Crest	1996	[10 000 ; 100 000 [EH	Roche-sur-grane	2004	Taille < 200 EH

Figure 69 : Situation des stations de traitement des eaux usées sur la zone d'étude (DREAL, 2020)

Le nombre d'habitants possédant une ANC permet d'estimer un flux de nitrate entrant en fonction de chaque commune. Il existe un consensus autour d'une valeur de 15 g d'azote émis par habitant. Les sources divergent ensuite sur la proportion pouvant effectivement être transformée en nitrate et celle étant transformée en élément gazeux. De plus, les 15 g d'azote représentent la valeur d'émission avant assainissement. Il n'existe pas de base de données sur les performances de réduction de l'assainissement non collectif en fonction des communes. Ces valeurs dépendent pour chaque installation individuelle du type d'assainissement, de l'âge de l'équipement et de l'entretien de ce dernier (Boutin et al., 2017).

Le Tableau 10 présente la quantité d'azote par commune et ainsi que la quantité d'azote par surface totale de chaque commune de la zone d'étude. Le tableau montre que de manière général, l'impact sur les communes est plutôt limité en comparaison de l'azote provenant des cultures. Cette valeur a été calculée en multipliant la surface des parcelles déclarée dans le RPG de 2019 (IGN, 2021) de chaque commune par une valeur moyenne de surplus calculés, 39 Kg/ha. Cette valeur moyenne de surplus calculée provient des travaux de Poivert (2018), il s'agit d'une moyenne entre 1917 et 2017 au niveau national. La valeur moyenne pour la Drôme entre 2000 et 2010 est de 30 kg/ha.

La connaissance de l'impact de l'assainissement non collectif peut également être intéressante pour le suivi de certains éléments comme le bore. En effet les eaux usées provenant de

l'assainissement (collectif ou non) ont des concentrations généralement plus importantes en bore que les eaux souterraines (Vengosh *et al.*, 1996)

	Population totale	Population AC estimée	Population ANC estimée	kg / an / commune
Allex	2474	2593	0	0
Autichamp	124	120	20	109.5
Chabrillan	690	215	475	2600.625
Crest	8270	7610	660	3613.5
Divajeu	626	246	380	2080.5
Eurre	1280		1280	7008
Grane	1877	2476	0	0
Livron			625	3421.875
Loriol-sur-Drôme	6487	6699	661	3618.975
La Roche-sur-Grane	174	85	89	487.275

Tableau 10 : Estimation des flux annuels d'azote par commune provenant de l'assainissement collectif et l'assainissement non collectif (Sispea, 2022)

7.3. PRESSION INDUSTRIELLE

Concernant les pressions industrielles, la base de données des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) a été consultée (<https://www.georisques.gouv.fr/risques/installations>), celle-ci répertorie toutes les exploitations industrielles ou agricoles susceptibles de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour l'environnement, la sécurité et la santé des riverains. Toutes les ICPE des communes de la zone d'étude ont été répertoriées mais seuls les établissements ayant un régime d'autorisation ou un régime d'enregistrement ont été analysés plus en détail car ils présentent un risque plus fort pour l'environnement. Les établissements suivant le régime de déclaration n'ont pas été analysés car ils ne présentent pas de risques graves ou nuisances (selon ce classement). D'autres données bibliographiques précisant les contaminations potentielles des eaux ont également été utilisées (Véolia, 2020, Artelia, 2019 ; Idées-Eaux, 2021).

La Figure 70 localise les ICPE sur la zone d'étude. Les données présentées ont été recueillies en mai 2022. La carte distingue les ICPE soumises au régime de déclaration en les classant par secteur d'activité similaire. Par exemple, les activités nécessitant autorisation « Elevage de porc » et « Elevage de volaille » sont regroupées sous le même item « Elevage ».

Ce regroupement permet d'illustrer que le secteur agro-alimentaire est plutôt présent à l'est de la zone d'étude tandis que le reste des activités est plutôt présent à l'ouest dans les zones d'activité de Livron-Loriol.

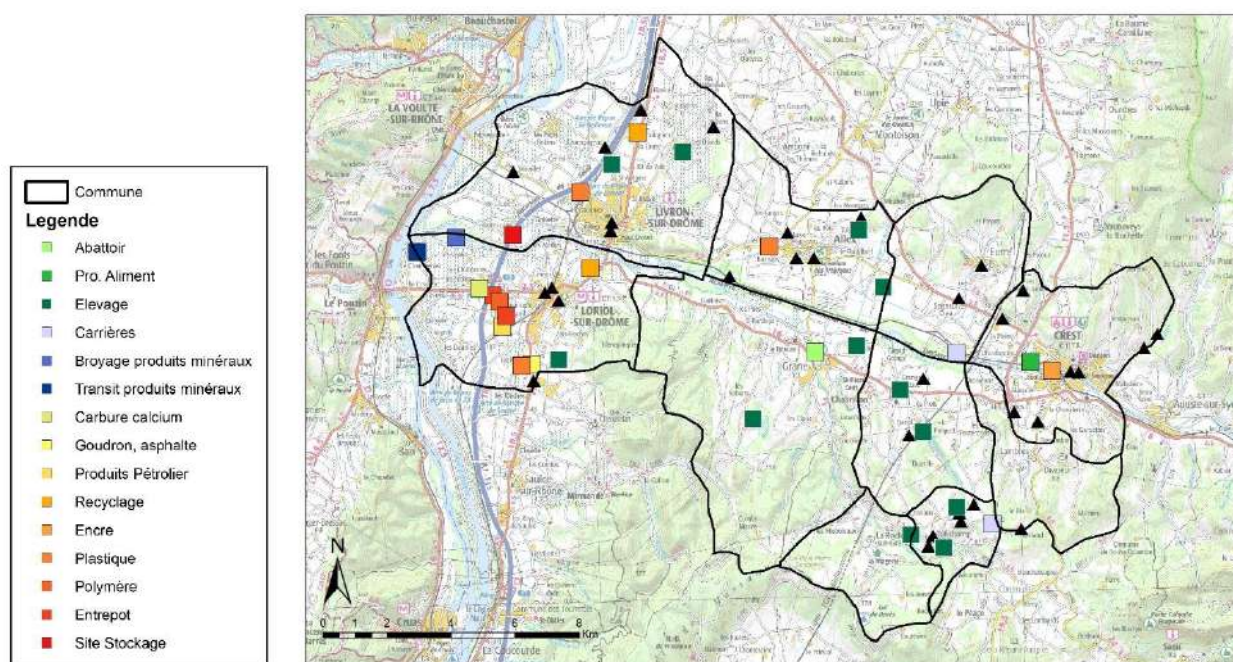


Figure 70 : Situation des IPCE sur la zone d'étude par secteur d'activité

La plupart des ICPE dans la partie est du bassin sont des bâtiments d'élevage de taille importantes. Les possibilités de contamination des eaux par les élevages ont également été signalées dans la section traitant de la pression agricole. Ces établissements génèrent principalement des déchets organiques qui peuvent avoir une influence sur les concentrations en azote et phosphore dans les eaux. Réglementairement, ces établissements disposent de parcelles agricoles pour épandre les déchets produits par les animaux et qui serviront d'éléments fertilisants dans le cadre des parcelles définies dans le plan d'épandage.

De manière générale, les autres activités industrielles et commerciales de la zone d'étude sont réunies dans des zones d'activités reliées au système d'assainissement des eaux des communes concernées. Deux études récentes (Véolia, 2020 ; Artelia, 2019) ont acquis des données vis-à-vis des substances industrielles. La première a été déclenchée dans le cadre de l'étude de la déviation routière des communes de Loriol-sur-Drome et Livron-sur-Drome. La qualité des eaux souterraines avait été jugée satisfaisante du point de vue des substances industrielles. L'autre étude porte sur le suivi du fonctionnement de la station d'épuration d'Alex-Grane mais concerne un nombre plus limité de substances présentes dans les eaux usées en entrée de la station de traitement.

Les documents relatifs aux ICPE des communes de la zone d'étude indiquent les raisons du classement des établissements par la DREAL. Par exemple, la société d'embouteillage de compotes « Charles et Alice » sur la commune d'Alex est classée sous le régime de l'autorisation du fait de son utilisation de matière plastique. Les analyses préliminaires de la base de données Ades (cf. chapitre 8) ne montrent pas de substance liée à ce processus dans les eaux souterraines aux alentours de la société. De même la société la Géant Pièce Auto à Livron-sur drome (Préfecture de la Région Rhône-Alpes, 2011) est classée sous le régime de l'autorisation pour l'utilisation de matériau de recyclage mais les analyses préliminaires de la base de données Ades ne montrent pas de substance liée à ce processus (comme les hydrocarbures ou des métaux lourds) dans les qualitomètres à proximité.

L'abattoir de Grâne a également fait l'objet d'une autorisation au titre des ICPE. Cet établissement génère principalement des déchets organiques qui peuvent avoir une influence sur les concentrations en azote et phosphore dans les eaux. Pour limiter les risques de contaminations, l'abattoir a une convention avec la station d'épuration de Grâne (MRAE, 2021).

7.4. PRELEVEMENTS

Les données de prélèvement sont accessibles grâce à la BNPE¹⁰ depuis 2012 sur les communes de la zone d'étude. L'analyse de ces données montrent que les prélèvements varient selon les années entre 7 500 000 m³ et 10 000 000 m³. La part du prélèvement de chaque usage est assez stable dans le temps. Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP) sont en moyenne de 23%, de 5% pour l'industrie et 71% pour l'agriculture (irrigation). Les prélèvements pour l'irrigation sont majoritaires-quelle que soit l'année considérée.

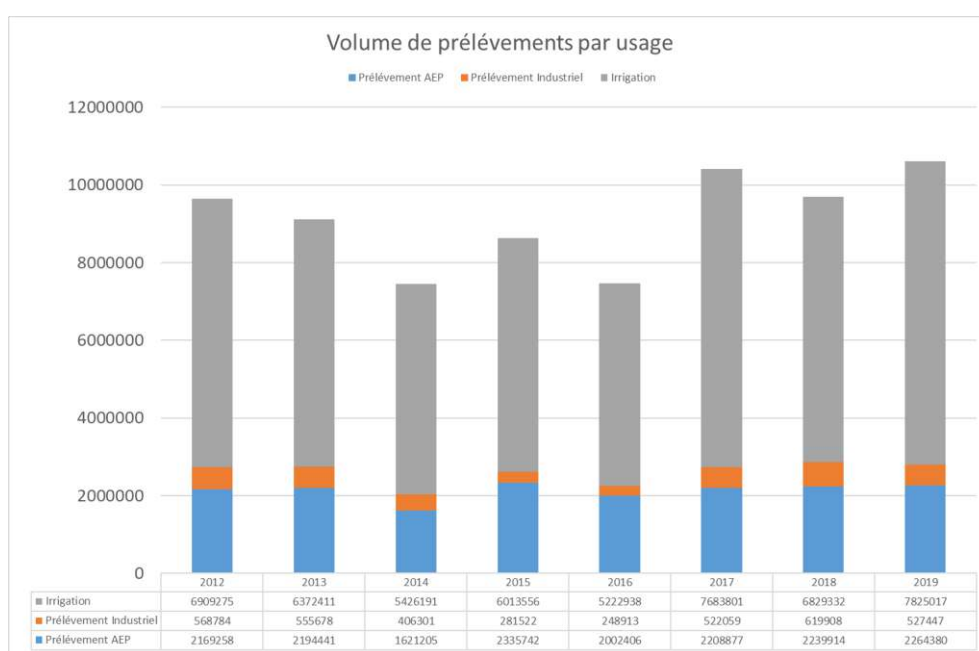


Figure 71 : Evolution des volumes prélevés entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m³ - source : BNPE).

Les communes réalisant le plus de prélèvements sont Alex, Loriol-sur-Drome et Divajeu (Figure 72). Dans le cas d'Alex, la part de la production AEP est supérieure à la moyenne du reste de la zone d'étude (moyenne 32% au lieu de 23%). Pour Loriol, la répartition des usages est relativement similaire à la moyenne de la zone d'étude. A Divajeu, l'ensemble des prélèvements est utilisé pour l'irrigation.

¹⁰ [Accueil | BNPE \(eaufrance.fr\)](https://eaufrance.fr/)

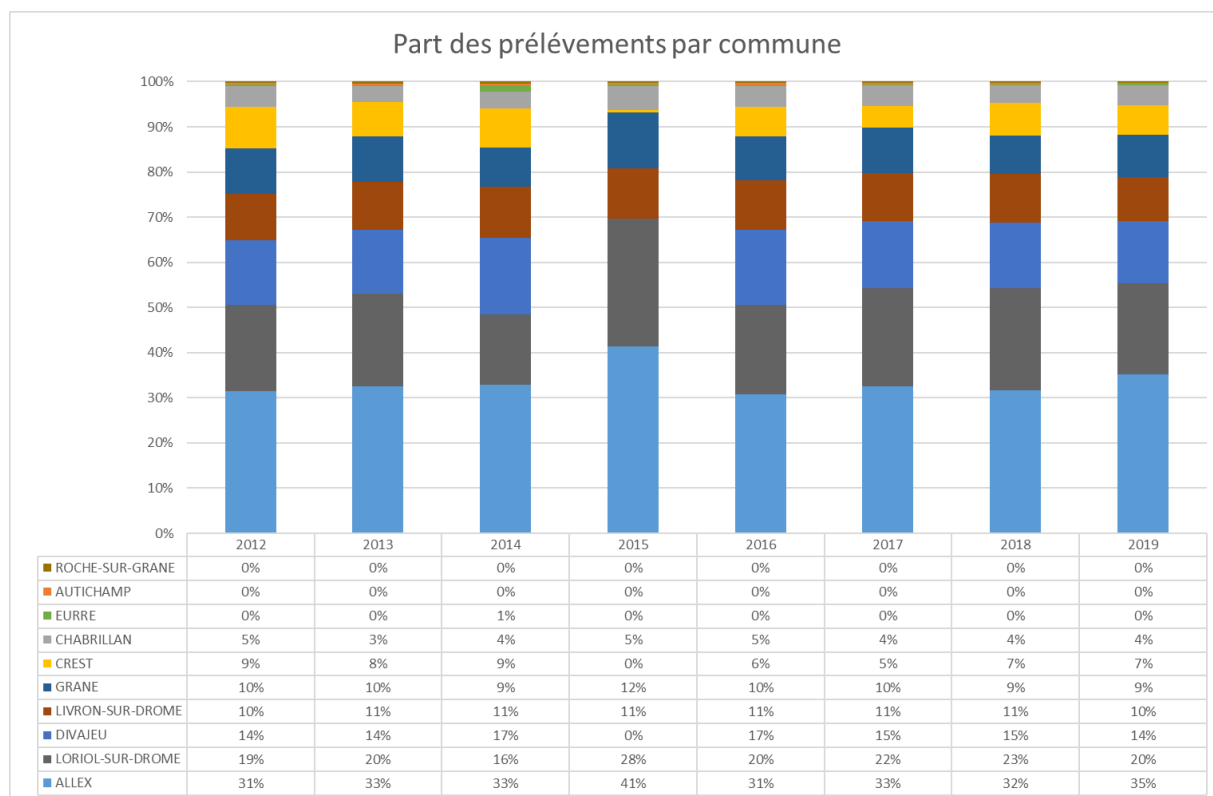


Figure 72 : Répartitions des volumes prélevées par commune sur la période 2012 et 2019

7.4.1. Prélèvement pour l'irrigation

La Figure 73 présente l'évolution des volumes de prélèvements à usage agricole sur la période 2012 à 2019. Aucune tendance ne semble pouvoir être dégagée et le manque de profondeur de la chronique de prélèvement empêche l'application d'outil statistique pour la détection de tendance. Il est possible de noter que l'irrigation a été moins importante en 2014 et en 2016 et plus importante en 2017 et 2019.

Les données provenant d'une étude réalisée sur un secteur situé à environ 30 km au nord de la zone d'étude permettent de déduire que l'irrigation dans le secteur étudié est généralement dédiée au maïs, aux vergers et aux légumes (Sygred, 2019).

Bien que les surfaces en maïs aient diminué (cf. paragraphe précédent), les volumes dédiés à l'irrigation n'ont pas diminué. Cela peut s'expliquer par le fait que des cultures comme le soja mais surtout les légumes ont pu bénéficier des volumes d'eau économisés pour l'irrigation du maïs. Le traitement des données des ilots parcellaires du RPG de 2010 à 2019 montre que les surfaces de maïs ont diminué de 200 ha sur la zone d'étude passant de 1200 ha à 1000 ha, alors que dans le même temps, les surfaces en légumes ont augmenté de 200 ha passant de 400 ha à 600 ha. L'irrigation de ces deux cultures peuvent se compenser puisque ces deux types de culture sont irrigués à des taux similaires (80% - Sygred, 2019).



Figure 73 : Evolution des volumes prélevés pour l'irrigation entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m³ - source : BNPE).

Les données de la BNPE permettent également de distinguer l'origine de l'eau ayant servi à l'irrigation. Sur la période disponible, les eaux souterraines représentent environ 45% à 50% de l'eau ayant servi à l'irrigation, excepté pour l'année 2015 durant laquelle les eaux souterraines ont représenté 65% de l'eau destinée à irrigation.

7.4.2. Prélèvement pour l'Alimentation en Eau Potable

Tous comme les prélèvements pour l'irrigation, les prélèvements pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) sont stables sur la période étudiée (Figure 74). La baisse importante des prélèvements pour l'année 2014 peut paraître étonnante. La variation de consommation ne peut pas être due à une variation de population sur une période si courte. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées : un attrait touristique moindre en raison d'une période estivale a été plus froide et pluvieuse que la normale, , un abreuvement des animaux d'élevage plus limité si l'été est plus frais, un éventuel problème de rapportage des données Ces hypothèses ne s'excluent pas et peuvent se conjuguer la même année.

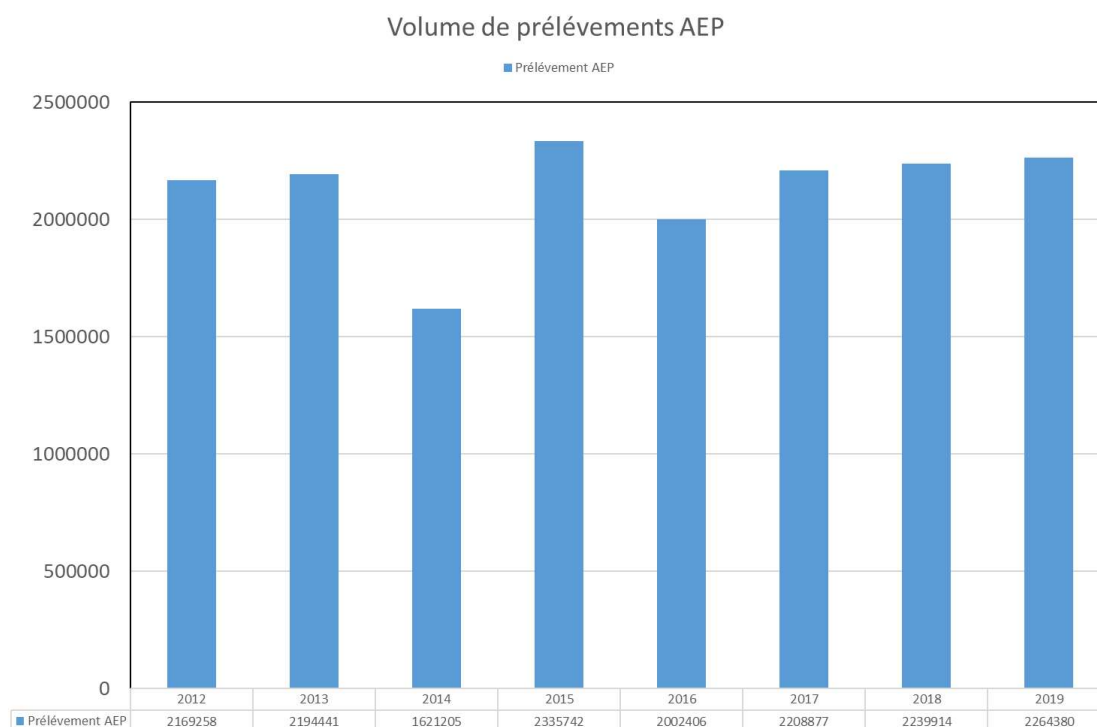


Figure 74 : Evolution des volumes prélevés pour l'usage l'alimentation en eau potable entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m³ - source : BNPE).

7.4.3. Prélèvements pour usages industriels

L'industrie est l'usage prélevant le moins d'eau sur le secteur étudié (Figure 75). Comme pour les autres types de prélèvement, il existe des variations mais elles ne semblent pas se produire selon le même modèle que les prélèvements des autres usages. Par exemple, les usages industriels sont les plus élevés en 2017 alors que ce n'est pas le cas pour les deux autres types d'usage.

En ce qui concerne, la baisse des usages entre 2014 et 2016, il est impossible de juger car des données paraissent ne pas avoir été reportés dans la BNPE. Par exemple, environ 200 000 m³ sont absents pour la commune de Grâne sur ces trois années. Nous n'avons pas d'indications des possibles arrêts temporaires d'industries sur cette zone.

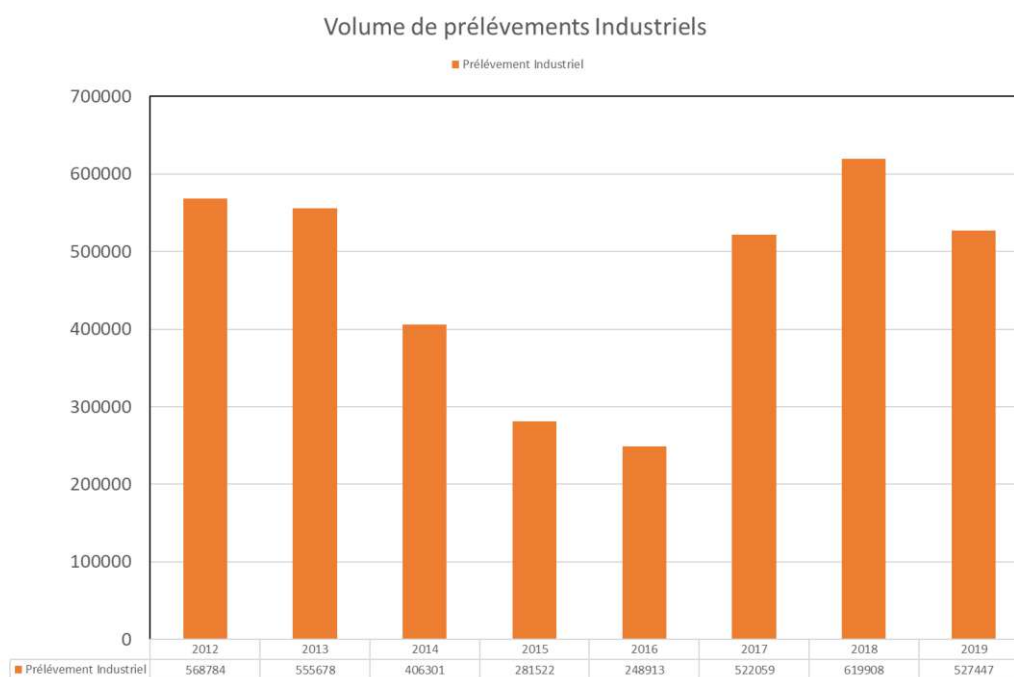


Figure 75 : Evolution des volumes prélevés pour les usages industriels entre 2012 et 2019 pour l'ensemble des communes de la zone d'étude (en m³ - source : BNPE).

8. Caractérisation hydrogéochemique des eaux souterraines et des eaux superficielles

8.1. INTRODUCTION

L'objectif de ce travail de caractérisation hydrogéochemique est d'acquérir une vision spatiale de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines sur le territoire de l'étude, à travers une analyse des données « qualité » existantes, mais aussi via l'acquisition et l'interprétation de nouvelles données. Ce travail vise à identifier les différents pôles géochimiques en fonction des caractéristiques hydrogéologiques des différents aquifères du secteur d'étude, mais aussi à caractériser certains impacts anthropiques sur la qualité des eaux, notamment ceux relatifs à la pression urbaine et ceux relatifs à la pression agricole.

8.2. ANALYSE DES POINTS DE SUIVI EXISTANTS

8.2.1. Les points d'eau souterraine (PE ESO)

a) Sélection des points d'eau

La sélection des points d'eau souterraine a été effectuée, en prenant en compte de la localisation des points de la zone d'étude en fonction de la géologie et du contexte hydrogéologique. L'objectif est d'obtenir un jeu de points d'eau (PE ESO) disposant d'un nombre suffisant de données qualité disponibles dans ADES¹¹ et, étant représentatif de la diversité des contextes de la basse vallée de la Drôme.

Les 13 points d'eau présentés dans le tableau ci-après ont dans un premier temps été sélectionnés.

¹¹ ADES : portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

Code BSS	New BSS	Libellé	Commune	X (L 93 m)	Y (L93 m)	Hydrogéologie	Code masse d'eau
08422X0002/F	BSS001ZWJG	Couthiol	Livron/Drôme	845644	6410687	Alluvions récentes	DG337
08422X0005//F1	BSS001ZWJK	La Négociale	Loriol/Drôme	842170	6407063	Alluvions récentes	DG337
08423X0054/HY	BSS001ZWVH	Val-Brian	Grâne	848530	6405244	Crétacé (Calcaires)	DG527
08423X0055/P	BSS001ZWVJ	Les Roures	Grâne	852811	6406413	Alluvions récentes	DG337
08424X0033/F	BSS001ZWYU	Forage Combes	Eurre	856714	6406554	Alluvions récentes	DG337
08427X0021/S	BSS001ZXJA	La Teysonne	Grâne	848960	6401832	Alluvions récentes	DG527
08427X0022/HY	BSS001ZXJB	Source Rouveyrol	Chabrillan	853714	6403308	Miocène (molasse)	DG251
08427X0023/F	BSS001ZXJC	Rouveyrol	Chabrillan	853704	6403308	Miocène (molasse)	DG251
08427X0026/HY	BSS001ZXJF	Les Buis	roche sur Grâ	853575	6397811	Oligocène (Calcaires)	DG251
08427X0035/F	BSS001ZXJH	Forage privé la Beaune	Grâne	853098	6405013	Miocène (molasse)	DG251
08428X0003/HY	BSS001ZXJS	Source Chaffoix	Autichamp	856374	6401390	Miocène (molasse)	DG251
08423X0051/P	BSS001ZWVE	Puits de la Gare	Allex	852218	6407367	Alluvions récentes	DG337
08422X0137/DRAIN	BSS001ZWPW	Signol Nord	Loriol/Drôme	843859	6405677	Crétacé (Calcaires)	DG527

Tableau 11 : Liste des points d'eau souterraine (ESO) sélectionnés et bancarisés dans ADES

Pour chacun des 13 points d'eau souterraine sélectionnés, une vérification du nombre d'analyses qualité et du nombre de paramètres chimiques disponibles a été effectuée. Le PE ESO « BSS001ZWPW - 08422X0137/DRAIN » ne dispose pas d'assez d'analyses exploitables dans ADES pour pouvoir travailler sur sa caractérisation hydrochimique, il a donc été exclu.

Les 12 points d'eau retenus sont présentés sur la Figure 76.

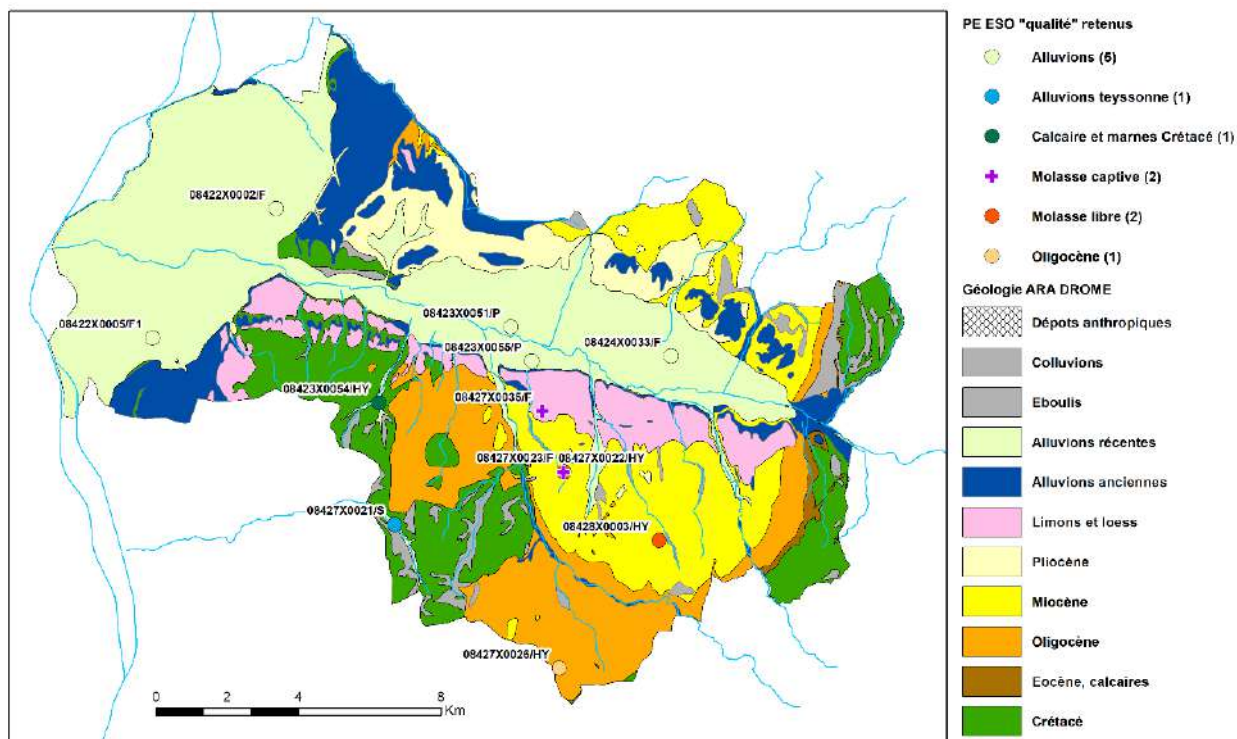


Figure 76 : Localisation des points d'eau souterraine retenus dans le secteur d'étude
b) Extraction des données qualité à partir de la base de données ADES

Un premier travail exploratoire a été réalisé à partir des données qualité disponibles dans ADES. Pour chaque point d'eau souterraine, et pour chaque paramètre analysé et bancarisé, les données suivantes ont été récupérées : Nombre de mesures, Nombre de mesures quantifiées, Paramètre, Unité, Minimum non quantifié, Minimum quantifié, Maximum et Moyenne calculée.

Les paramètres pris en compte pour les paramètres physico-chimiques *in situ* (température de l'eau, conductivité électrique, pH), les éléments majeurs et traces, sont décrits dans les tableaux ci-après.

Code paramètre	Paramètre	Unité
1301	Température de l'Eau	°C
1302	Potentiel en Hydrogène (pH)	unité pH
1303	Conductivité à 25°C	μS/cm
1327	Hydrogénocarbonates	mg(HCO ₃)/L
1337	Chlorures	mg(Cl)/L
1338	Sulfates	mg(SO ₄)/L
1340	Nitrate	mg(NO ₃)/L
1367	Potassium	mg(K)/L
1372	Magnésium	mg(Mg)/L
1374	Calcium	mg(Ca)/L
1375	Sodium	mg(Na)/L

Tableau 12 : Liste des paramètres physico-chimiques *in-situ* et des éléments majeurs

Code paramètre	Paramètre	Unité
1350	Phosphore total	mg(P)/L
1350	Phosphore total	mg(P ₂ O ₅)/L
1362	Bore	µg(B)/L
1383	Zinc	µg(Zn)/L
1386	Nickel	µg(Ni)/L
1392	Cuivre	µg(Cu)/L
1393	Fer	µg(Fe)/L

Tableau 13 : Liste des éléments traces

c) Vérification des balances ioniques

Afin de s'assurer de la qualité d'une analyse physico-chimique ou de l'absence d'un ou plusieurs éléments majeurs dans la composition géochimique d'une eau, il est nécessaire de calculer la balance ionique de l'analyse.

Nous avons reconstitué une analyse physico-chimique « type » par point d'eau, en prenant la valeur moyenne pour les paramètres majeurs à partir de l'ensemble des données disponibles. Le calcul de la balance ionique sert ainsi à valider l'analyse « type » par point d'eau.

La balance ionique a donc été calculée pour toutes les analyses moyennées à partir de la formule suivante :

$$\text{Balance ionique} = 100 \times \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}$$

Les sommes sont exprimées en meq.L⁻¹.

La fiabilité de l'analyse au regard de la balance ionique est considérée comme :

- excellente pour une balance entre - 1 et + 1 % ;
- acceptable pour une balance entre - 5 et + 5 % ;
- médiocre pour une balance entre - 10 et + 10 % ;
- mauvaise pour une balance inférieure à - 10 et supérieure à + 10 %.

Les analyses « types » des 12 points d'eau ESO retenus ont une balance ionique qui varie entre -0,7 % et 1 % ; soit des balances que l'on peut considérer comme excellentes.

d) Les analyses moyennes

Les résultats des valeurs moyennes pour les éléments traces pris en compte dans cette étude sont présentés dans le Tableau 14. Les résultats des valeurs moyennes pour les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* et les éléments majeurs pour les points d'eau souterraine du secteur d'étude sont présentés dans le Tableau 15.

		Code paramètre	1350	1350	1362	1383	1386	1392	1393
		Paramètre	Phosphore total	Phosphore total	Bore	Zinc	Nickel	Cuivre	Fer
Code BSS	Nouveau code BSS	Unité	mg(P)/L	mg(P ₂ O ₅)/L	µg(B)/L	µg(Zn)/L	µg(Ni)/L	µg(Cu)/L	µg(Fe)/L
08422X0002/F	BSS001ZWJG	Moyenne	0,02	0,02	39,90	256,50	2,21	32,67	
08422X0005/F1	BSS001ZWJK	Moyenne	0,03		40,00	110,00	3,00	3,00	5,20
08423X0054/HY	BSS001ZWVH	Moyenne		0,02	5,00		< 5,0	< 10,0	
08423X0055/P	BSS001ZWVJ	Moyenne			22,30	67,44	1,15	33,54	64,95
08424X0033/F	BSS001ZWYU	Moyenne							6,53
08427X0021/S	BSS001ZXJA	Moyenne	0,02	0,03	6,60	250,00	< 5,0	31,50	
08427X0022/HY	BSS001ZXJB	Moyenne		0,08	9,00		< 5,0		
08427X0023/F	BSS001ZXJC	Moyenne		0,02	16,50		< 5,0		142,20
08427X0026/HY	BSS001ZXJF	Moyenne		0,02	< 10,0		< 5,0		5,00
08427X0035/F	BSS001ZXJH	Moyenne							102,61
08428X0003/HY	BSS001ZXJS	Moyenne	0,01	0,01	< 10,0		< 5,0		3,04
08423X0051/P	BSS001ZWVE	Moyenne			36,00	8,60	1,92	6,48	4,54

Tableau 14 : Concentrations moyennes en éléments traces pris en compte pour les points d'eau souterraine (ESO) retenus

08422X0002 (Couthiol – Livron), 08422X0005 (Négociale – Lorient), 08423X0054 (Val Brian – Grâne), 08423X0055 (Roures –Grâne), 08424X0033 – Combres-Eurre) 08427X0021 (Teysonne – Grâne), 08424X0022 (source Rouveyrol – Chabrillan), 08427X0023 (Rouveyrol – Chabrillan), 08427X0026 (Les Buis- Roche /Grâne), 08427X0035 (la beaune- Grâne), 08428X0003 (Chaffoix – Autichamp), 08423X0051 (Puits de la gare – Allex), 08428X0137 (Signal Nord – Lorient)

Code paramètre	1301	1302	1303	1327	1337	1338	1340	1367	1372	1374	1375		
	Température de l'Eau	Potentiel en Hydrogène (pH)	Conductivité à 25°C	Hydrogénocarbonates	Chlorures	Sulfates	Nitrates	Potassium	Magnésium	Calcium	Sodium		
Unité	°C	unité pH	µS/cm	mg(HCO ₃)/L	mg(Cl)/L	mg(SO ₄)/L	mg(NO ₃)/L	mg(K)/L	mg(Mg)/L	mg(Ca)/L	mg(Na)/L		
Nouveau code BSS													
08422X0002/F	BSS001ZWJG	Moyenne	14,0	7,3	557	299,2	13,0	38,7	13,7	2,2	8,8	102,6	7,8
08422X0005/F1	BSS001ZWJK	Moyenne	13,9	7,4	476	266,8	7,1	28,0	7,8	1,2	7,3	89,4	5,2
08423X0054/HY	BSS001ZWVH	Moyenne	11,8	7,4	463	277,3	4,5	13,2	4,0	0,8	2,5	95,9	2,2
08423X0055/P	BSS001ZWVJ	Moyenne	12,5	7,3	661	331,9	16,0	48,3	46,1	1,7	10,1	132,7	6,0
08424X0033/F	BSS001ZWVU	Moyenne	14,3	7,2	635	342,3	17,2	37,2	14,3	2,9	9,8	113,0	12,7
08427X0021/S	BSS001ZXIA	Moyenne	12,8	7,3	512	318,1	4,1	13,1	7,4	0,6	2,1	109,1	2,1
08427X0022/HY	BSS001ZXIB	Moyenne	13,4	7,2	756	371,4	11,0	43,7	58,8	2,4	6,4	150,2	4,0
08427X0023/F	BSS001ZXIC	Moyenne	13,7	7,4	659	403,2	7,9	27,8	9,2	1,3	28,8	97,5	4,4
08427X0026/HY	BSS001ZXIF	Moyenne	12,5	7,4	571	352,1	3,7	17,3	6,5	-	13,6	103,9	2,2
08427X0035/F	BSS001ZXIH	Moyenne	14,5	7,3	594	384,4	4,2	17,9	1,1	1,5	34,4	72,3	6,0
08428X0003/HY	BSS001ZXIS	Moyenne	12,1	7,2	726	361,9	14,2	25,7	61,0	0,5	7,6	141,7	4,2
08423X0051/P	BSS001ZWVE	Moyenne	13,6	7,4	514	294,4	6,1	26,9	7,4	1,2	7,6	95,5	4,8

Tableau 15 : Paramètres physico-chimiques in situ moyen et concentrations moyennes en éléments majeurs des 12 points d'eau souterraine (ESO) retenus.

8.2.2. Les points d'eau superficielle (PE ESU)

a) Sélection des points

Trois stations de suivi « qualité » des eaux superficielles sont disponibles dans NAIADES¹² sur le secteur d'étude. Elles concernent uniquement la rivière Drôme et sont présentées dans le Tableau 16 et localisées sur la Figure 77.

Code station ESU - NAIADES	Libellé station	Commune	X (L93 m)	Y (L93 m)
6109100	DROME A LIVRON-SUR-DROME	Livron-sur-Drôme	844415	6409460
6580437	DROME A CHABRILLAN	Chabrillan	855548	6405722
6590500	DROME A EURRE	Chabrillan	856185	6405555

Tableau 16 : Liste des points d'eau superficielle (ESU) sélectionnés sur le secteur d'étude, avec codes et libellés des stations (NAIADES), communes et coordonnées

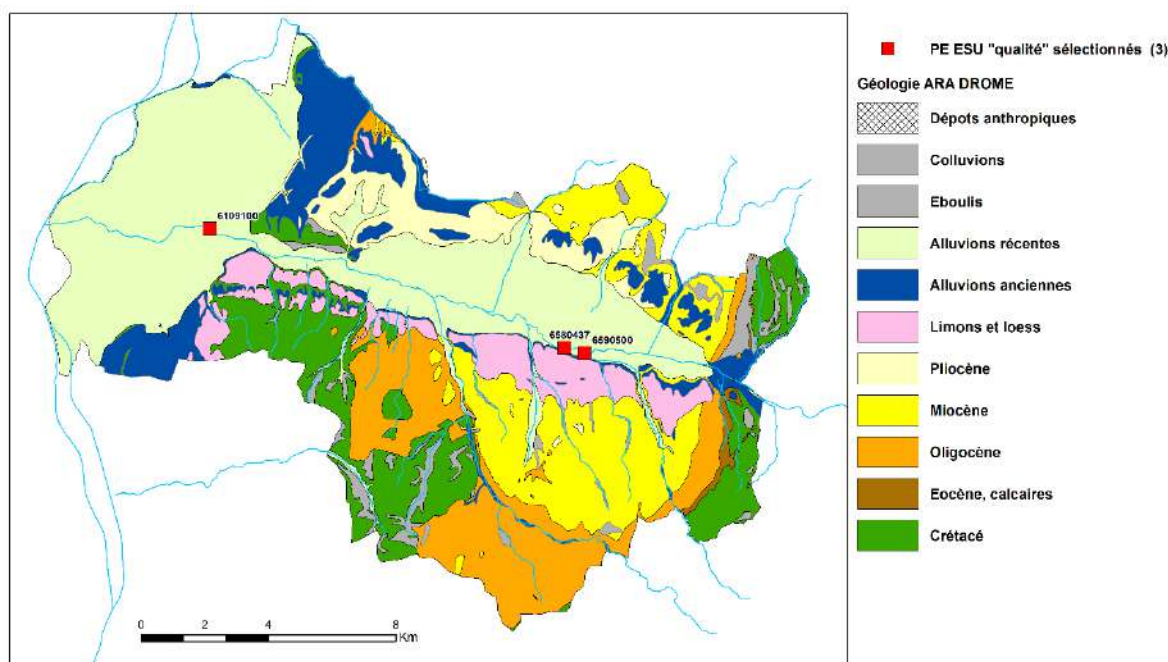


Figure 77 : Localisation des points d'eau superficielle (ESU) sélectionnés sur le secteur d'étude ;

b) Extraction des données qualités à partir de NAIADES

Les données qualité disponibles pour ces 3 stations ESU ont été extraites à partir de la base de données NAIADES, la période de référence choisie est 2000 - 2021, soit plus de 20 ans de données.

Un travail de traitement et de mise en forme des données extraites de NAIADES a été nécessaire.

¹² NAIADES : Données sur la qualité des eaux de surface <https://naiades.eaufrance.fr/>

Une sélection a été effectuée à partir des champs décrivant la matrice Support et la qualité de l'analyse, de façon à ne conserver que les analyses d'eau (vs. sédiment par exemple) et des résultats d'analyses qualifiés comme corrects.

Les limites de quantification (LQ) ont été prises en compte et les valeurs de LQ/2 ont été calculées afin de les affecter aux résultats ayant des résultats inférieurs aux limites de quantification ($R_{sAna} = LQ$).

Les paramètres chimiques pris en compte sont les mêmes que pour les eaux souterraines.

Pour chaque point d'eau ESU et chaque paramètre, un traitement statistique du jeu de données a été effectué pour calculer le nombre de données, la période de référence d'analyses, les valeurs min, max, moyenne et l'écart-type, afin de s'assurer de la représentativité des données. Les données moyennées au point d'eau ont ensuite été sélectionnées pour la suite de l'interprétation.

c) Vérification des balances ioniques

Pour chaque point d'eau, une analyse physico-chimique « type » a donc été reconstituée, en prenant la valeur moyenne pour chaque paramètre à partir de l'ensemble des données disponibles sur la période 2000-2021. Le calcul de la balance ionique permet de valider l'analyse « type » déterminée pour chaque point d'eau.

Les analyses « types » des 3 points d'eau ESU ont une balance ionique qui varie entre -1,1% et -0,4% ; soit des balances que l'on peut considérer comme excellentes.

d) Les analyses moyennes

Les résultats des valeurs moyennes¹³ pour les paramètres physico-chimiques *in situ* et les éléments majeurs pour les points d'eau superficielle du secteur d'étude sont présentés dans le Tableau 17. Les résultats des valeurs moyennes pour les éléments traces pris en compte dans cette étude sont présentés dans le Tableau 18.

Code station ESU - NAIADES	Libellé station	CdParametre LbLongParamètre	1301	1302	1303	1327	1337	1338	1340	1367	1372	1374	1375
			Température de l'Eau	Potentiel en Hydrogène (pH)	Conductivité à 25°C	Hydrogénoca rbonates	Chlorures	Sulfates	Nitrates	Potassium	Magnésium	Calcium	Sodium
		SymUnitMesure	°C	unité pH	µS/cm	mg(HCO3)/L	mg(Cl)/L	mg(SO4)/L	mg(NO3)/L	mg(K)/L	mg(Mg)/L	mg(Ca)/L	mg(Na)/L
6109100	DROME A LIVRON-SUR-DROME	Moyenne	13,6	8,2	405	221,7	5,5	23,0	4,3	1,2	7,3	68,7	5,0
6580437	DROME A CHABRILLAN	Moyenne	13,5	8,3	386	214,3	5,2	21,5	2,8	1,1	7,0	64,9	5,0
6590500	DROME A EURRE	Moyenne	13,0	8,3	392	207,1	5,6	20,8	2,7	1,2	6,9	63,6	5,2

Tableau 17 : Paramètres physico-chimiques *in situ* moyen et concentrations moyennes en éléments majeurs des 3 points d'eau superficielle (ESU).

¹³ A noter : le fait d'utiliser des analyses moyennes ne permet pas d'interpréter les données en fonction de la variabilité naturelle (hautes eaux /basses eaux) des eaux superficielles (

		Code paramètre	1350	1350	1362	1383	1386	1392	1393
		Paramètre	Phosphore total	Phosphore total	Bore	Zinc	Nickel	Cuivre	Fer
Code station ESU - NAIADES	Libellé station	Unité	mg(P)/L	mg(P ₂ O ₅)/L	µg(B)/L	µg(Zn)/L	µg(Ni)/L	µg(Cu)/L	µg(Fe)/L
6109100	DROME A LIVRON-SUR-DROME	Moyenne	0,02		33,82	0,68	1,47	0,92	4,68
6580437	DROME A CHABRILLAN	Moyenne	0,04		25,00				30,50
6590500	DROME A EURRE	Moyenne	0,04		33,69	1,75	1,21	0,69	

Tableau 18 : Concentrations moyennes en éléments traces pris en compte pour les 3 points d'eau superficielle (ESU).

8.2.3. Caractérisation hydrogéochimique

a) Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* pris en compte sont la température de l'eau, la conductivité électrique à 25°C et le pH.

Éléments dissous totaux (TDS) versus conductivité électrique

La somme des éléments dissous (Total Dissolved Solid : TDS) a été calculée pour l'ensemble des analyses géochimiques reconstituées du secteur d'étude.

Le TDS (g/L) a été comparé aux valeurs moyennes de conductivité électrique à 25°C (µS/cm) normalement mesurées *in situ*.

Les données des points d'eau ESO, affectés en fonction de la géologie/hydrogéologie, et des points d'eau ESU sont présentées sur la Figure 78.

La régression linéaire sur le graphique présenté ci-après met en avant la bonne corrélation (avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,99$) entre les données TDS et conductivité ; ceci permet de valider ainsi d'une seconde manière le jeu de données reconstituées des eaux souterraines et des eaux superficielles du secteur d'étude.

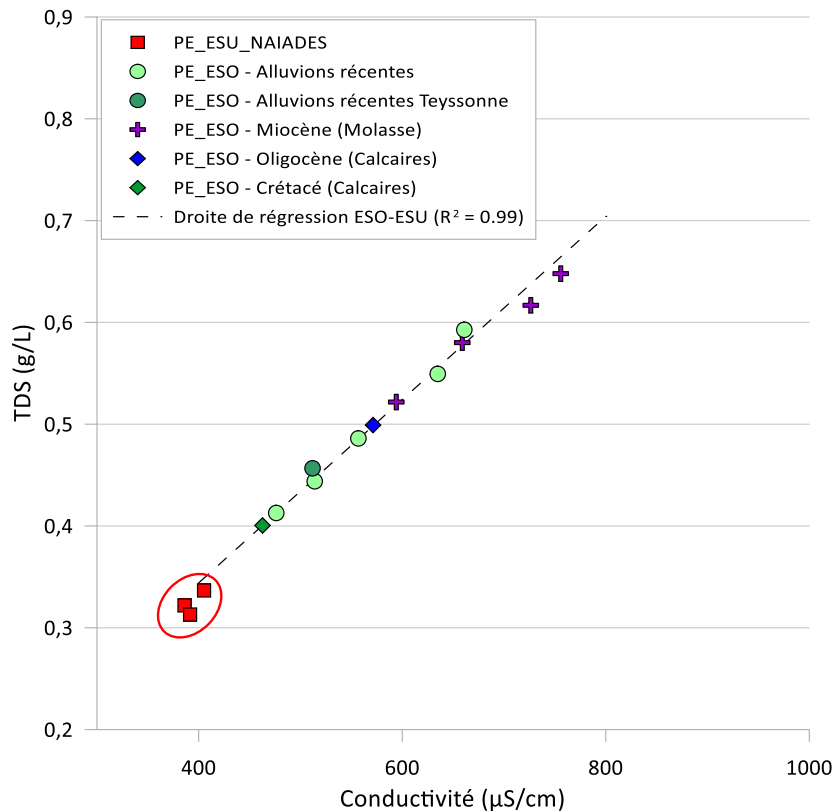


Figure 78 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique à 25°C (μS/cm) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Ce diagramme permet aussi de mettre en évidence que :

- Les 3 points ESU sont les moins minéralisés ;
- Les PE ESO correspondant à la molasse miocène sont les plus minéralisés ;
- L'ensemble des valeurs de conductivité se répartissent entre celles des eaux superficielles (faibles) et celles des eaux souterraines molassiques (élevées).

Température de l'eau versus pH

Le diagramme température de l'eau versus pH (Figure 79) permet de distinguer :

- les points d'eau superficielle (ESU) qui ont un pH supérieur à 8 et une température moyenne comprise entre 13 et 14°C ;
- les eaux souterraines (ESO) qui ont un pH compris entre 7,2 et 7,4 et une température moyenne variant entre 11,5 et 14,5°C.

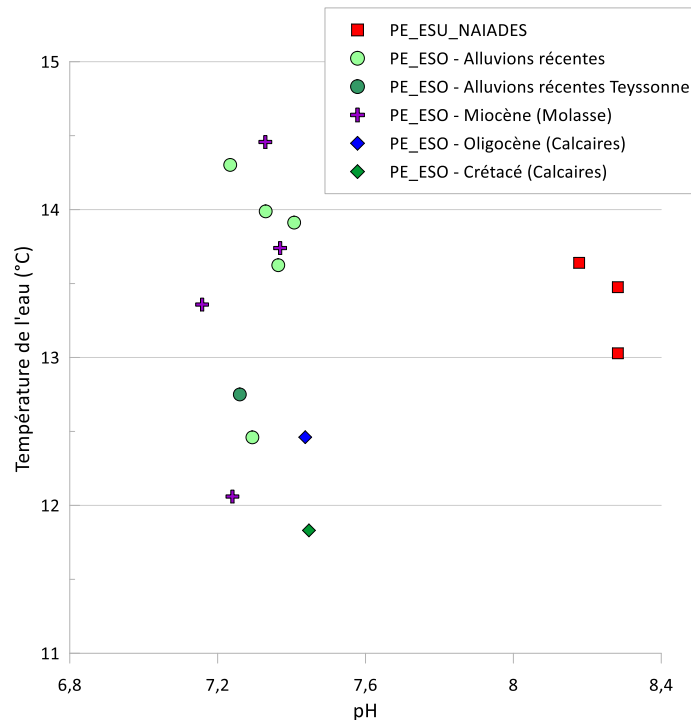


Figure 79 : Diagramme température de l'eau (°C) versus pH des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

b) Diagrammes de Piper et faciès hydrochimique

Le diagramme de Piper permet grâce à la composition chimique en éléments majeurs de l'eau de caractériser d'une part le faciès hydrochimique d'une eau, mais aussi d'autre part de comparer les points d'eau entre eux.

Diagramme de Piper sans distinction d'origine des points d'eau

D'après le diagramme de Piper des eaux souterraines (Figure 80), les 12 points d'eau souterraine (ESO) pris en compte ont un faciès bicarbonaté-calcique ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$).

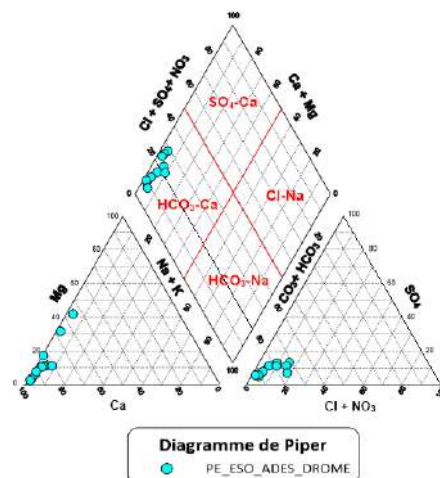


Figure 80 : Diagramme de Piper des points d'eau souterraine (ESO)

Pour les eaux superficielles (Figure 81), le diagramme de Piper indique également un faciès bicarbonaté-calcaïque ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$). De plus, on remarque que les points d'eau ESU se superposent entre eux ; leur composition chimique est donc très proche. Elle correspond globalement à celle des eaux souterraines du secteur d'étude.

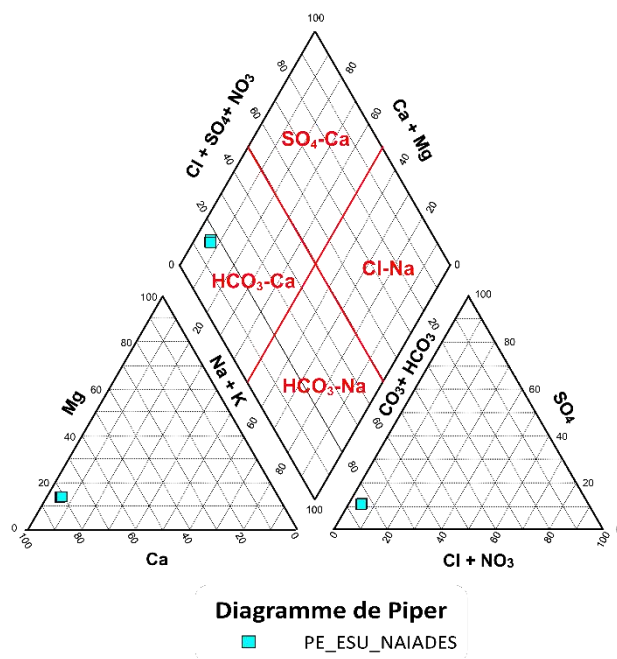


Figure 81 : Diagramme de Piper des points d'eau superficielle (ESU)

Prise en compte des éléments de géologie pour les points d'eau ESO et ESU

1ère approche à partir des informations des codes masses d'eau souterraine

Une classification des points d'eau ESO a été effectuée en fonction du code masse d'eau. Trois codes masse d'eau sont identifiés dans le secteur d'étude ; ils sont présentés dans le Tableau 19. Pour mémoire, les points ESU sont tous rattachés à la masse d'eau superficielle DR438a (La Drôme de Crest au Rhône).

Code Masse d'eau	Rattachement du point d'eau au référentiel des masses d'eau souterraine	Abbréviation - Piper
DG337	Alluvions de la Drôme	Alluvions
DG527	Calcaires et marnes crétacés du BV Drôme, Roubion, Jabron	Calcaires-marnes
DG251	Molasses miocènes du Bas Dauphiné plaine de Valence et Drôme des collines	Molasse

Tableau 19 : Masses d'eau souterraine correspondant aux points d'eau ESO du secteur d'étude.

Le diagramme de Piper (Figure 82) permet de mettre en évidence une certaine stabilité dans la composition chimique des points d'eau ESO des alluvions, et a priori une plus grande variabilité pour les points d'eau ESO des molasses, notamment vis-à-vis de leur concentration en magnésium.

De plus, les points d'eau ESU se superposent très bien avec les points d'eau ESO correspondant aux alluvions.

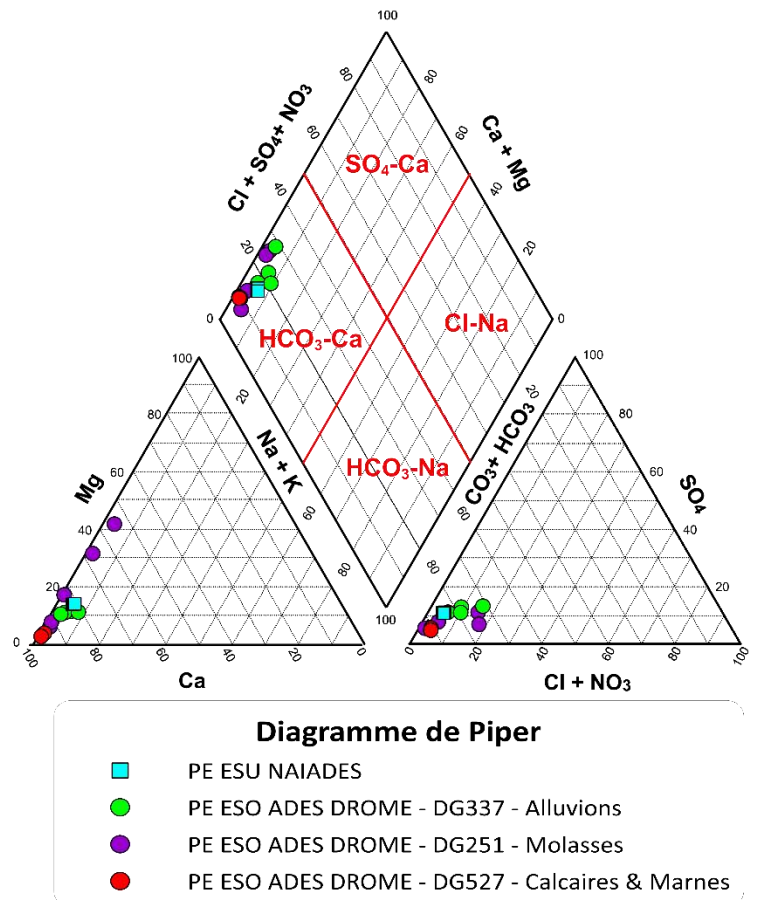


Figure 82 : Diagramme de Piper des points d'eau ESO en fonction de l'affectation code masse d'eau et des points d'eau ESU.

2^{ème} approche à partir des informations géologiques correspondant à la carte géologique simplifiée du secteur d'étude.

Les points d'eau ESO ont été catalogués en fonction de la géologie simplifiée correspondant à la zone d'étude. Le diagramme de Piper (Figure 83) permet de confirmer les premières conclusions:

- le lien entre les points d'eau ESU et les points d'eau ESO des alluvions récentes ;
- la variabilité de composition chimique entre les points d'eau ESO rattachés aux formations molassiques ;
- des signatures chimiques relativement proches pour les points d'eau ESO et ESU du secteur d'étude (faible variabilité globale).

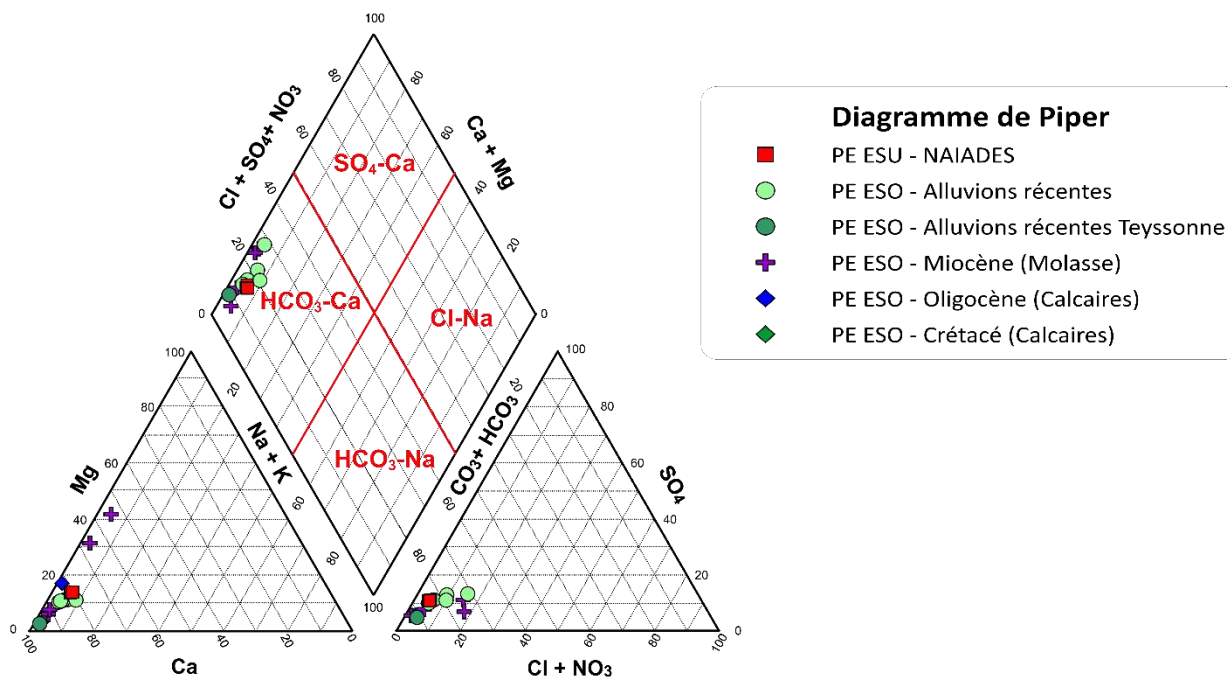


Figure 83 : Diagramme de Piper des points d'eau ESO en fonction de la carte géologique simplifiée du secteur d'étude et des points ESU

c) Diagrammes de Schoeller-Berkaloff

Les diagrammes de Schoeller-Berkaloff sont également basés sur la composition en éléments majeurs des points d'eau ESO et ESU, par contre ils permettent de comparer plus facilement la composition chimique des points d'eau et donc de mettre en évidence des liens entre les ESO entre eux, mais aussi entre les ESO et les ESU.

Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux souterraines

Dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 84), les 12 points d'eau ESO, présentés en fonction de leur affectation géologique, ont globalement une signature chimique proche ; avec bien évidemment le faciès bicarbonaté calcique qui ressort. Par contre, une certaine variabilité est rencontrée pour le magnésium, les alcalins (Na et K), les chlorures, les sulfates et le nitrate.

Ce diagramme montre également une signature quasi similaire entre le point du Crétacé ESO_08423X0054/HY et le point ESO_08427X0021/S implanté dans les alluvions récentes de la Teyssonne dont le bassin versant est constitué de formations crétacées.

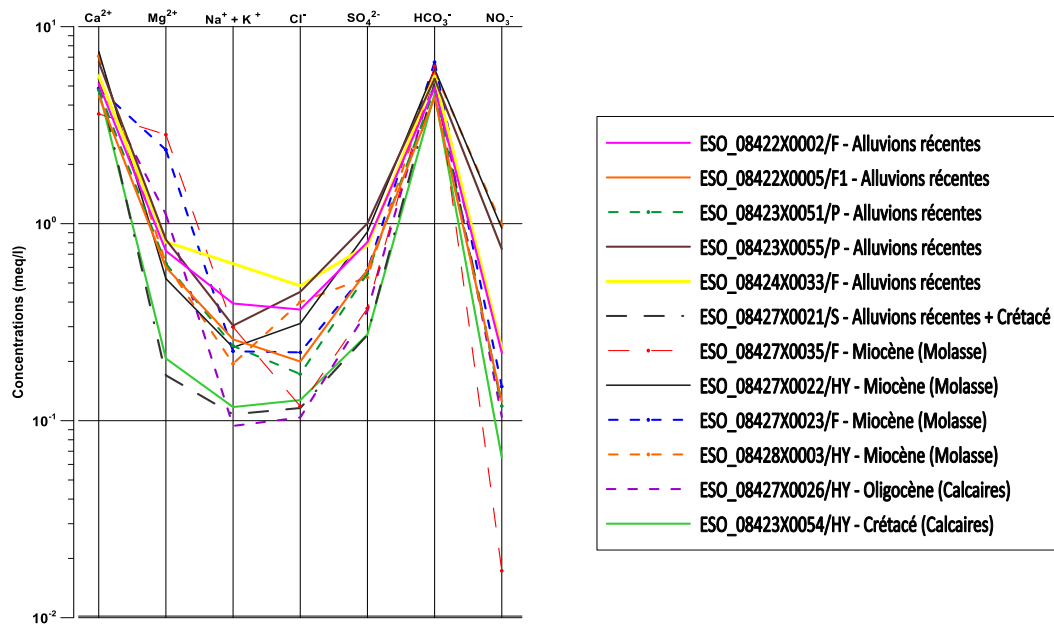


Figure 84 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des points d'eau souterraine (ESO) retenus avec indication du contexte géologique.

Diagramme de Schoeller-Berkaloff des ESU

La signature chimique des 3 points ESU est présentée dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 85). Les 3 points d'eau ESU ont le même profil chimique, avec le faciès bicarbonaté calcique qui ressort. La composition chimique de la Drôme d'amont en aval est donc sensiblement identique, du moins pour les éléments majeurs.

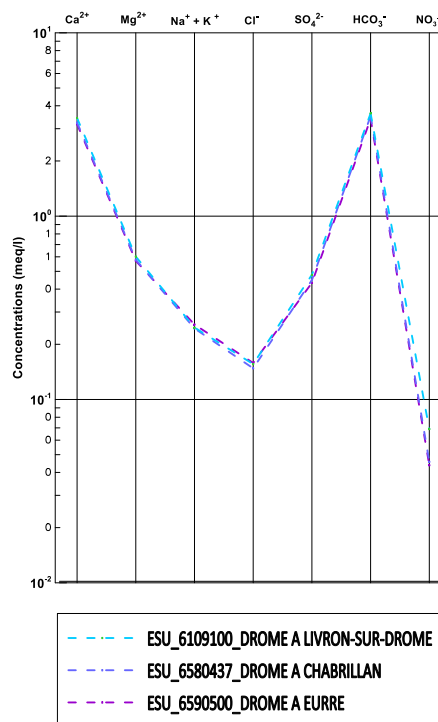


Figure 85 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des points d'eau superficielle (ESU)

d) *Eléments majeurs*

Les relations inter-éléments sont présentées ci-après sous forme de diagrammes binaires en prenant en compte soit des concentrations des éléments en mmol/L, soit des ratios molaires d'éléments. L'objectif de cette partie est d'identifier des pôles correspondant aux différents types d'aquifères, d'essayer de caractériser les différents types d'eau en fonction des processus d'interactions eau-roche, mais aussi d'essayer de mettre en évidence l'impact de certaines pollutions d'origine anthropique.

Cl versus Na

Le diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) (Figure 86) montre une certaine variabilité des concentrations en Na et Cl, notamment vis-à-vis de la droite de dilution de l'eau de mer ; certains points sont enrichis en Na comme les points d'eau ESU (cercle rouge) et d'autres sont enrichis en Cl

Les signatures en Na et Cl du points ESO du Crétacé et du point des alluvions récentes de la Teyssonne sont proches (cercle vert). Ceci met en évidence le lien entre ce point d'eau implanté dans les alluvions de la Teyssonne et les formations crétacées sous-jacentes et/ou du bassin versant.

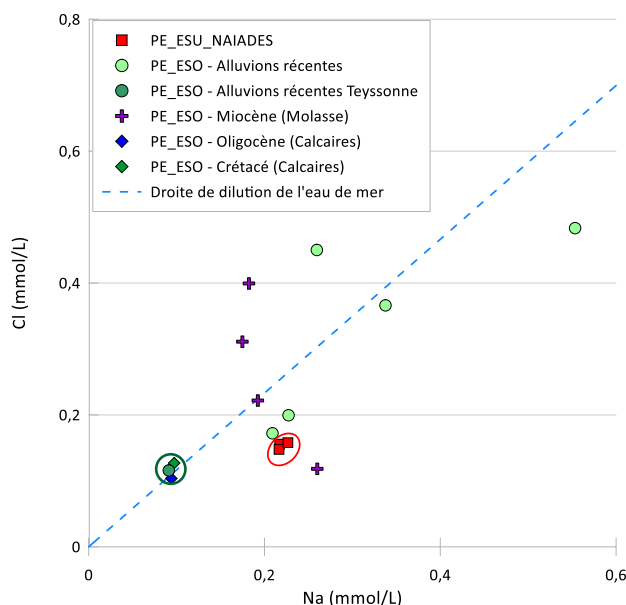


Figure 86 : Diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Ca + Mg versus HCO₃

Le diagramme Ca + Mg versus HCO₃ (Figure 87) permet de prendre en compte notamment les processus d'interactions eau-roche avec les formations carbonatées du secteur d'étude.

L'ensemble des points d'eau ESU et ESO du secteur d'étude s'aligne globalement sur la droite de pente légèrement supérieure à 1 : 2 (Figure 87). Ceci témoigne de processus d'interactions eau-roche communs pour les eaux du secteur d'étude, avec à priori des temps d'interactions plus ou moins longs. Les eaux superficielles ont les plus faibles valeurs de Ca + Mg et HCO₃ (cercle rouge) puis on retrouve les eaux des alluvions récentes et du Crétacé, puis celle de l'Oligocène et enfin les eaux de la molasse miocène qui sont les plus minéralisées.

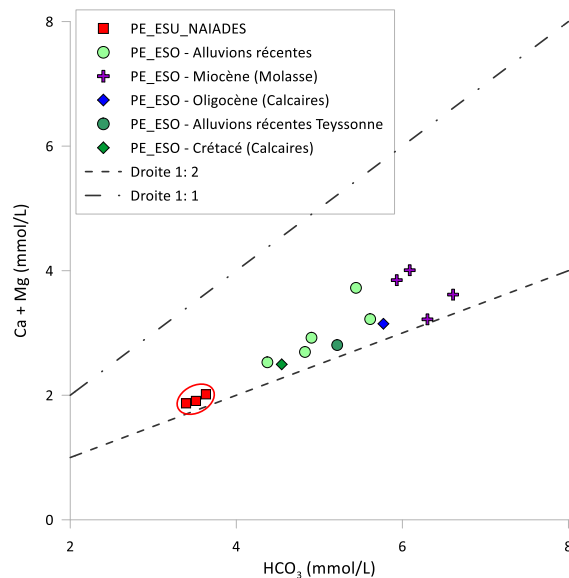


Figure 87 : Diagramme Ca + Mg (mmol/L) versus HCO₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Ca versus SO₄

Le diagramme Ca versus SO₄ (Figure 88) permet de distinguer 2 groupes des points :

- le 1^{er} groupe rassemble les points d'eau ESU, les points d'eau ESO des alluvions récentes, et de la molasse miocène. Ces points s'alignent grossièrement, indiquant un enrichissement progressif en Ca et SO₄. Cet enrichissement progressif est peut-être en lien avec la présence de gypse, ou d'anhydrite, dans les formations.
- Les points d'eau ESO des formations carbonatées Crétacé et Oligocène et le point des alluvions de la Teyssonne forment un groupe à part (cercle vert). Ils sont nettement enrichis en Ca au regard de la concentration en sulfates.

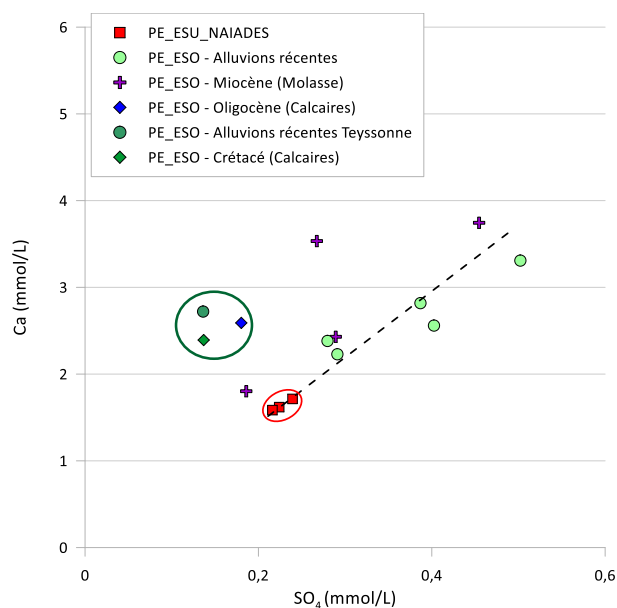


Figure 88 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SO₄ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Ca/Na versus Ca/Mg

Le diagramme de ratios molaires Ca/Na versus Ca/Mg (Figure 89), permet également de montrer l'existence de processus d'interactions eau-roche similaires pour certains aquifères mais également des différences dans l'acquisition de la minéralisation de l'eau pour d'autres contextes :

- Les eaux des alluvions récentes (hors Teyssonne) ont une signature proche de celles des eaux superficielles ;
- Les eaux des alluvions récentes s'enrichissent un peu en Ca et Mg avec un ratio Ca/Mg constant et un ratio Ca/Na qui augmente.
- Les eaux des formations molassiques et des formations crétacées (point ESO Crétacé et alluvions de la Teyssonne) s'alignent globalement sur une même droite, les eaux du Crétacé ayant les ratios Ca/Mg et Ca/Na les plus importants.
- la position du point d'eau des calcaires oligocènes dans le diagramme indique une acquisition de sa minéralisation différente.

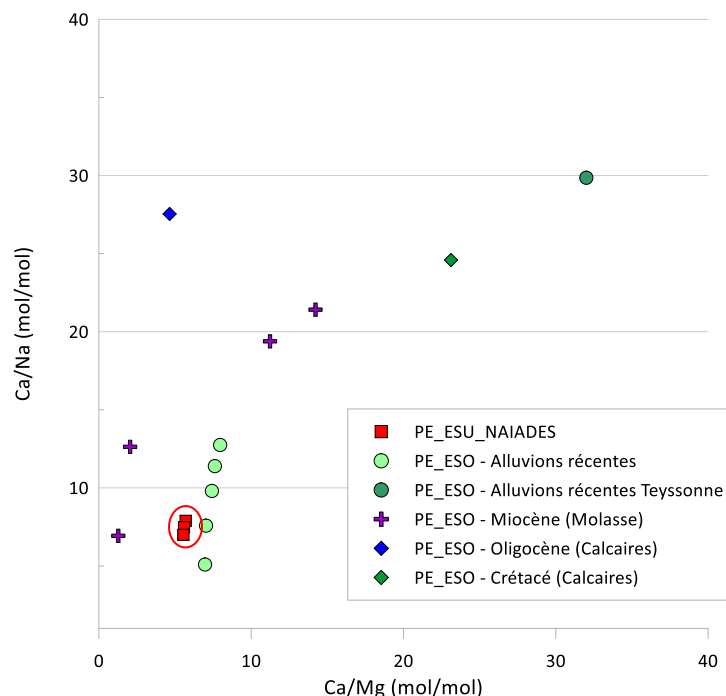


Figure 89 : Diagramme Ca/Na (mol/mol) versus Ca/Mg (mol/mol) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Cl versus NO₃

Le diagramme Cl versus NO₃ (Figure 90) met en avant 2 groupes de points :

- des points avec des concentrations en nitrate proches ou supérieures de la limite qualité pour des eaux destinées à la consommation humaine (50 mg/L);
- des points avec des concentrations faibles, inférieures à 15 mg/L. On note un enrichissement des alluvions récentes en Cl mais pas en NO₃ (hors point 08423X0055/P).

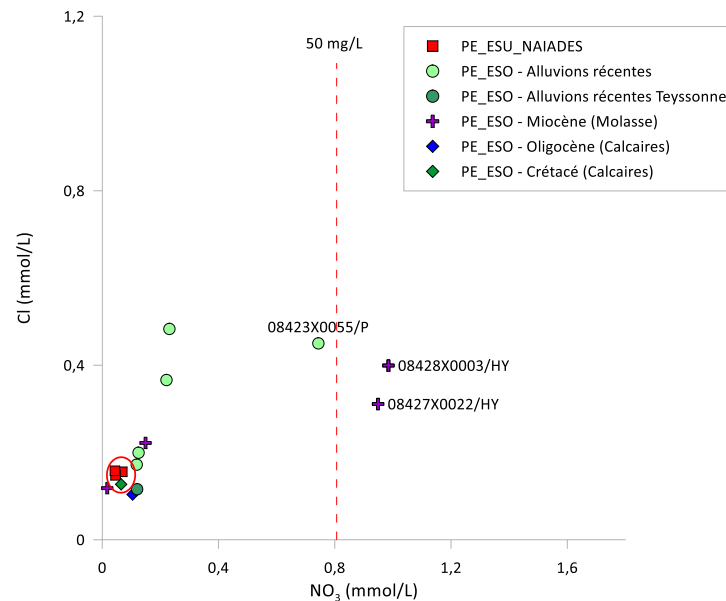


Figure 90 : Diagramme Cl (mmol/L) versus NO₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Les 2 points d'eau ESO dépassant la limite de qualité sont deux captages d'AEP (08428X0003/HY et 08427X0022/HY) situés respectivement sur la commune d'Autichamp et la commune de Chabrillan. Le puits 08423X0055/P, dans les alluvions récentes, est un ancien captage d'AEP de la commune de Grâne qui n'est actuellement plus utilisé en raison des concentrations élevées en nitrate (moyenne de 46 mg/L).

Au vu de ces trois valeurs qui traduisent une contamination des nappes, un rapide focus sur le nitrate est réalisé ci-après afin d'apporter des éléments de compréhension sur ces valeurs.

Les sources naturelles de nitrate sont principalement dues aux apports par les pluies et cycle de l'azote au niveau des sols et de la végétation. Les origines anthropiques sont nombreuses. Et sont essentiellement liées au lessivage des engrais et aux rejets domestiques et industriels (Blum *et al*, 2002). Les concentrations dans les eaux naturelles dépendent de nombreux processus biogéochimiques constituant le cycle de l'azote. Elles sont faibles à l'état naturel (quelques mg/L), au-delà de 10 mg/L, il est généralement admis qu'un apport anthropique entre en jeu.

La représentation cartographique des concentrations moyennes en nitrate des points d'eau de la zone d'étude (Figure 91) permet d'observer que les deux points avec les plus fortes concentrations sont implantés dans le même secteur et, qu'ils sont en contexte hydrogéologique de molasse miocène.

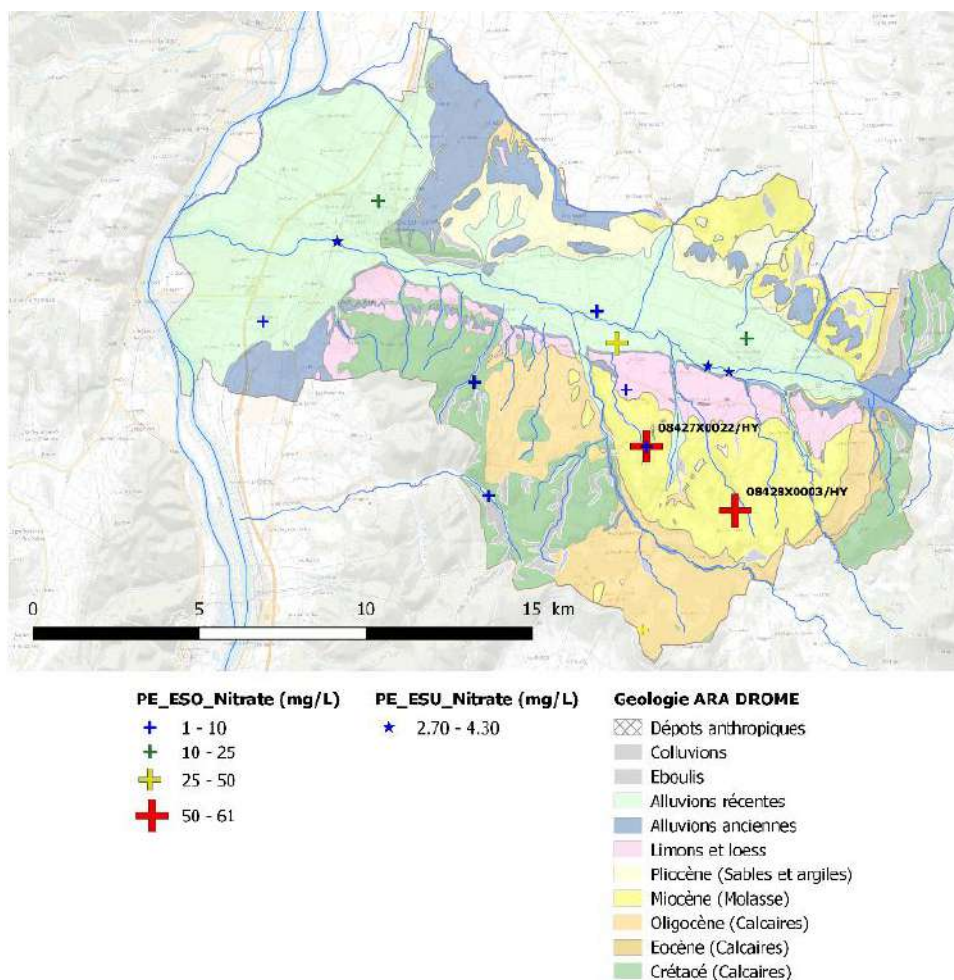


Figure 91 : Carte des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) par point d'eau ESO et ESU.

Le graphique montrant l'évolution temporelle de leurs concentrations en nitrate est présenté Figure 92. Il permet de mettre en évidence depuis les années 90 des concentrations élevées, proches ou supérieures aux 50 mg/L pour le point d'eau 08428X0003/HY (Source Chaffoix à Autichamp) et des concentrations avec une tendance à la hausse pour le point d'eau 08427X0022/HY, (source Rouveyrol à Chabrillan), avec ces dernières années des concentrations supérieures à 80 mg/L de nitrate. Ils sont listés dans le SDAGE comme « captage prioritaire » pour la mise en place de programmes d'actions vis-à-vis des pollutions diffuses nitrates et phytosanitaires.

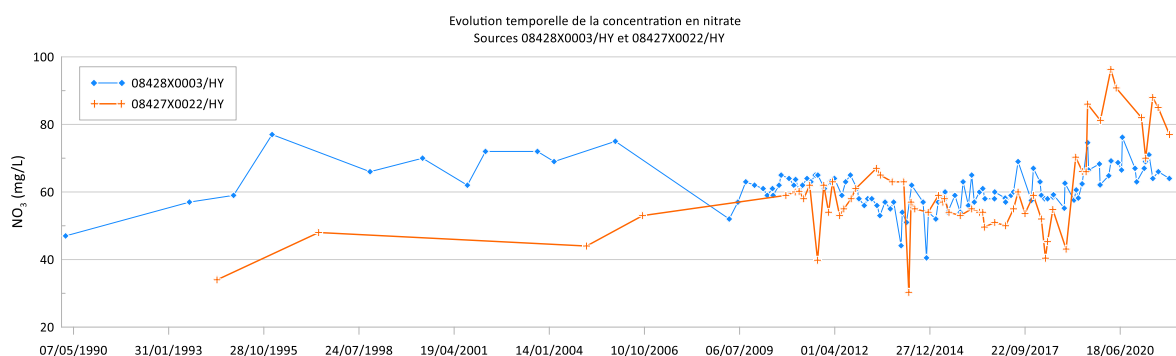


Figure 92 : Evolution temporelle de la concentration en nitrate pour les points d'eau ESO situés dans la molasse miocène (08428X0003/HY et 08427X0022/HY).

Ces deux points d'eau sont situés sur les communes d'Autichamp et de Chabrillan or comme il a été vu au chapitre 3, cette partie de la zone d'étude enregistre une pression agricole élevée, avec notamment des élevages importants qui sont des sources potentielles d'azote lors de l'épandage de l'excrétât des animaux (Larguier, 2006, Levasseur, 2015).

En conditions normales, le lessivage d'azote est limitée car les épandages sont réalisés pour que l'azote puisse être absorbé par les plantes sur les parcelles. Néanmoins, la fertilisation organique peut être difficile à gérer car les engrais organiques nécessitent un temps de dégradation plus ou moins long avant que les éléments azotés puissent être assimilables par les plantes. Il y a un décalage (Figure 93) entre l'application d'azote et le besoin (Pang et Letey, 2000 ; Ryser and Pittet 2000).

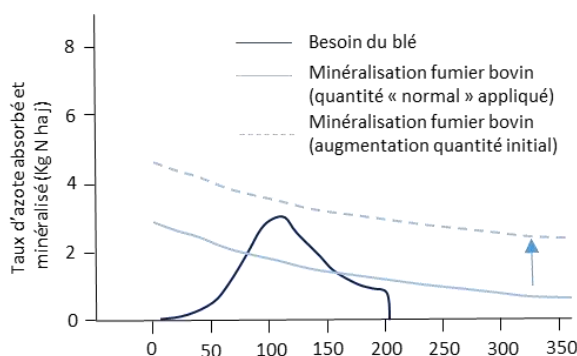


Figure 93 : Décalage entre l'apport d'azote et le besoin (modifié d'après Pang et Letey, 2000)

e) Eléments traces

Bore

Le suivi du bore est intéressant, car il s'agit d'un marqueur d'activité anthropique ; le bore est particulièrement présent dans les eaux usées provenant de l'assainissement (collectif ou non), les eaux naturelles sont, en revanche peu riches en bore. Le bore peut également provenir des épandages d'engrais organiques. Les diagrammes B versus HCO_3^- (Figure 94) et B versus NO_3^- (Figure 95) permettent de mettre en évidence que les points d'eau les plus enrichis en bore sont les eaux superficielles et les points d'eau ESO des alluvions récentes. Les points d'eau souterraine des formations molassiques miocènes, des calcaires oligocènes et crétacées sont peu impactés par le bore. De plus, le graphique B versus NO_3^- (Figure 95) permet de mettre en évidence que les points d'eau nettement impactés par le nitrate ne le sont pas par le bore. Les pressions anthropiques sur le secteur d'étude sont donc distinctes et leur impact différent suivant les secteurs.

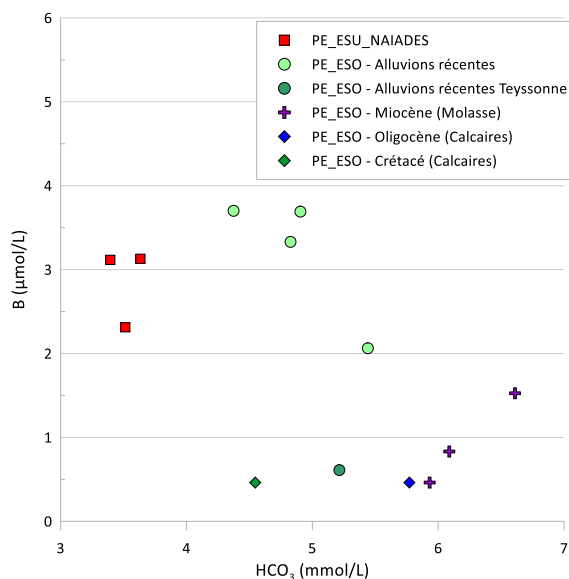


Figure 94 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus HCO_3 (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

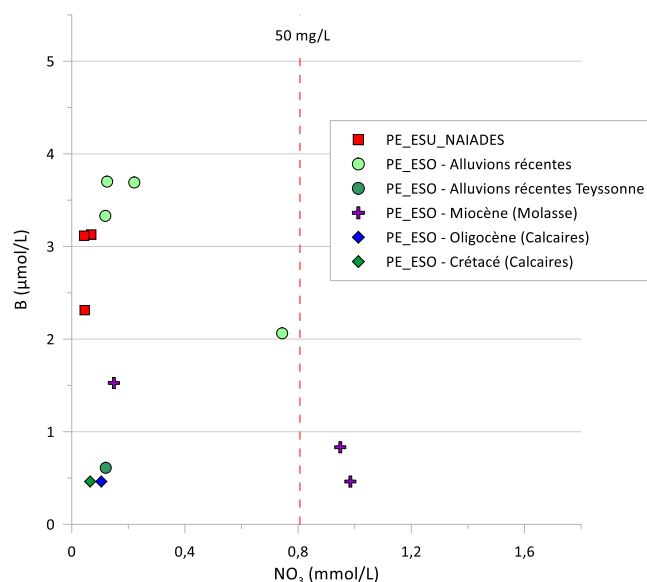


Figure 95 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus NO_3 (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

La Figure 96 présente les concentrations moyennes en bore dans les eaux superficielles et les eaux souterraines, et la localisation des stations de traitement des eaux usées du secteur d'étude en indiquant le nombre d'équivalents-habitants (EH). Elle montre que :

- Les concentrations moyennes en bore mesurées dans les eaux souterraines et superficielles sont inférieures aux exigences de qualité pour l'AEP (1,5 mg/L d'après l'Arrêté du 30 Décembre 2022 modifiant l'arrêté du 11 Janvier 2007) ;
- Les eaux superficielles et les eaux souterraines des alluvions récentes de la Drôme présentent plus de 25 $\mu\text{g/L}$ de bore. On note que les plus importantes STEU du secteur d'étude se trouvent au droit des alluvions récentes.

La source majoritaire de bore sur le secteur d'étude semble être en lien avec l'assainissement collectif (stations de traitements des eaux usées) ou autonomes.

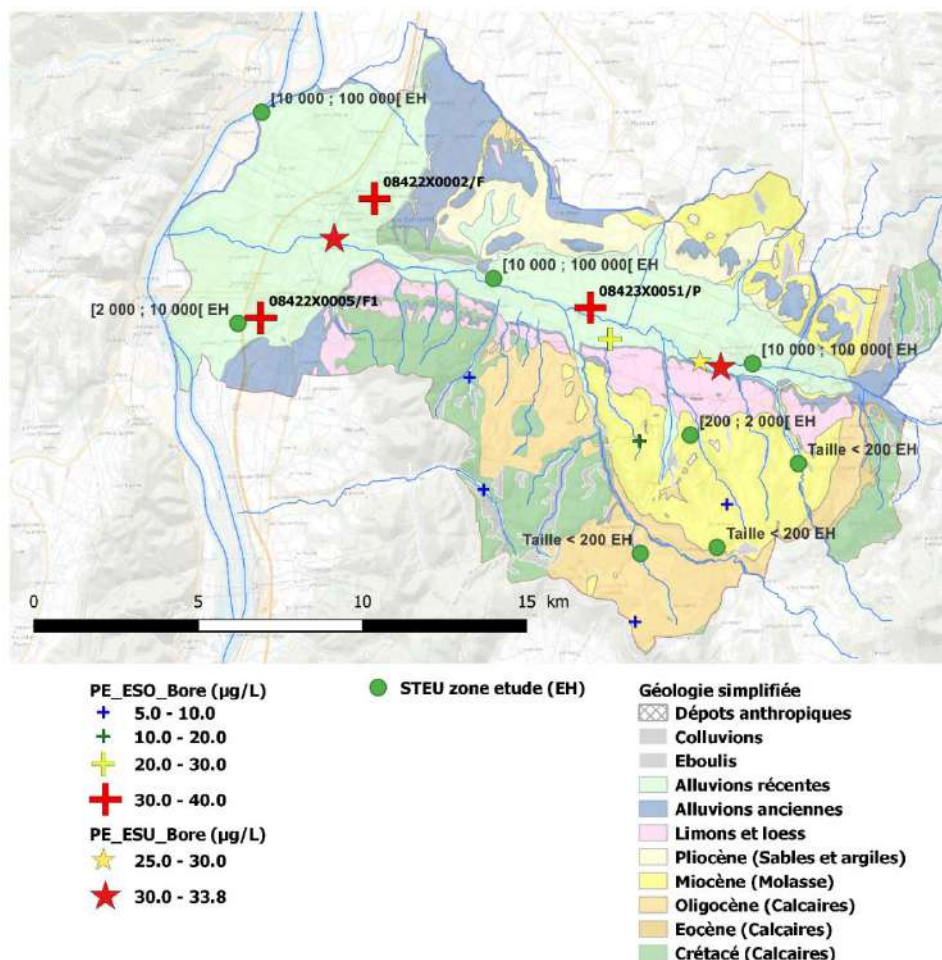


Figure 96 : Carte des concentrations moyennes en bore (µg/L) par point d'eau ESO et ESU et localisation des STEU (stations de traitement des eaux usées et nombre d'équivalents-habitants (EH)).

Cuivre et zinc

Le cuivre a été étudié car il peut être introduit de manière importante par les activités agricoles. Les produits à base de cuivre sont des fongicides qui sont souvent employés et qui peuvent modifier les concentrations en cuivre dans l'environnement (Van-Zwieten et al., 2004 ; Gallagher et al., 2001). Dans les vignobles, le cuivre est appliqué mondialement depuis plusieurs décennies pour lutter contre le mildiou.

Des études ont montré que les fertilisations organiques pouvaient également avoir un impact sur les teneurs en éléments métalliques du sol comme le cuivre et zinc (Huang et Jin, 2008 ; Cang et al., 2004). Le Tableau 13 présente des exemples teneurs en impuretés pouvant être contenu dans des engrais organiques (SOGREAH, 2007)

Contaminant	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Bovin lisier	1,8	0,3	8	42,8	7,8	4,8	219
Porcins fumier	0,7	0,3	3,7	75	2,5	5,2	396
Porcins lisiers	1,2	0,5	13,4	368	14	47	379

Ovin	1	0,3	6,3	41,4	6,8	3,6	187
Caprins	2,7	0,3	7,6	34	7,7	3,4	203
Cheval fumier	1	0,2	5,3	16	10	58	82

Tableau 20 : Teneur en impureté moyenne (ETM) dans une sélection d'engrais organiques (d'après SOGREAH, 2007).

Dans la zone d'étude, les données bancarisées dans ADES pour le cuivre et le zinc ne concernent que quelques points, à savoir les points d'eau ESO correspondant aux alluvions récentes et aux alluvions de la Teyssonne et 2 points d'eau ESU (Figure 98 et Figure 98).

Les eaux superficielles ont des concentrations moyennes en Cu et Zn très faibles. Les points d'eau ESO des alluvions récentes enregistrent les concentrations moyennes élevées, avec pour le cuivre des valeurs comprises entre 30 et 35 $\mu\text{g/L}$ ($\approx 0,5 \mu\text{mol/L}$) et pour le zinc des valeurs proches de 250 $\mu\text{g/L}$ (3,8 $\mu\text{mol/L}$). Figure 97, il n'y a pas de lien direct démontré entre les concentrations en Cu et B, ainsi qu'entre les concentrations en Zn et NO_3 .

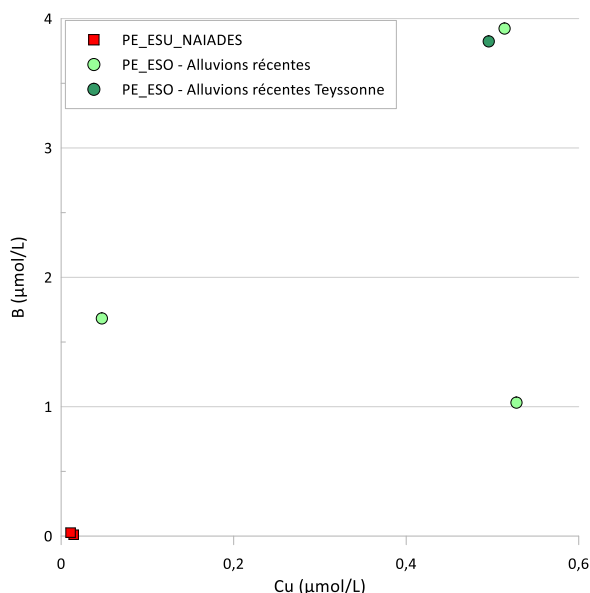


Figure 97 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus Cu ($\mu\text{mol/L}$) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

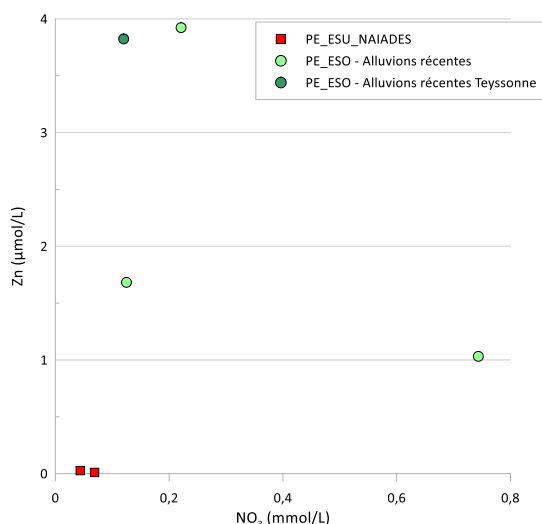


Figure 98 : Diagramme Zn (µmol/L) versus NO₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU)

Les Figure 99 et Figure 100 présentent la répartition spatiale des concentrations en cuivre et zinc pour les points d'eau ESO et ESU ainsi que la localisation des principaux élevages : « Elevage de porc » ; « Elevage de volaille » ; « Elevage de bovins » (cf. chapitre 7). Ces données ne permettent pas d'identifier un lien direct entre la présence d'élevages importants et les teneurs en Zn et Cu. Les données des STEU et des autres sites industriels n'ont pas été pris en compte dans cette représentation.

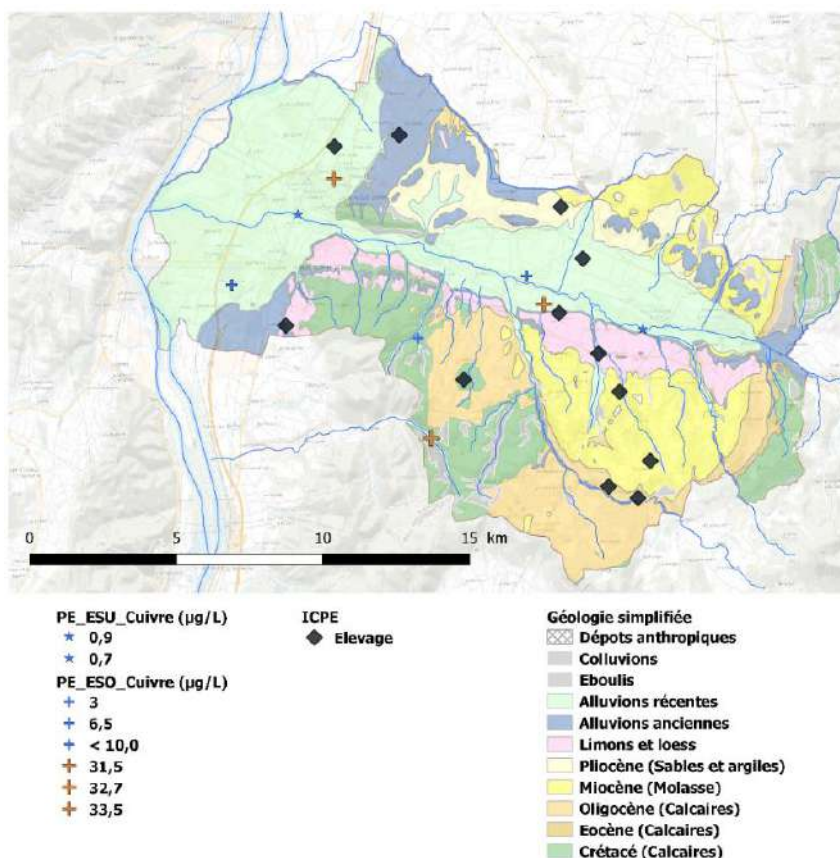


Figure 99 : Carte des concentrations moyennes en cuivre (µg/L) par point d'eau ESO et ESU, et localisation des élevages importants (ICPE) du secteur d'étude.

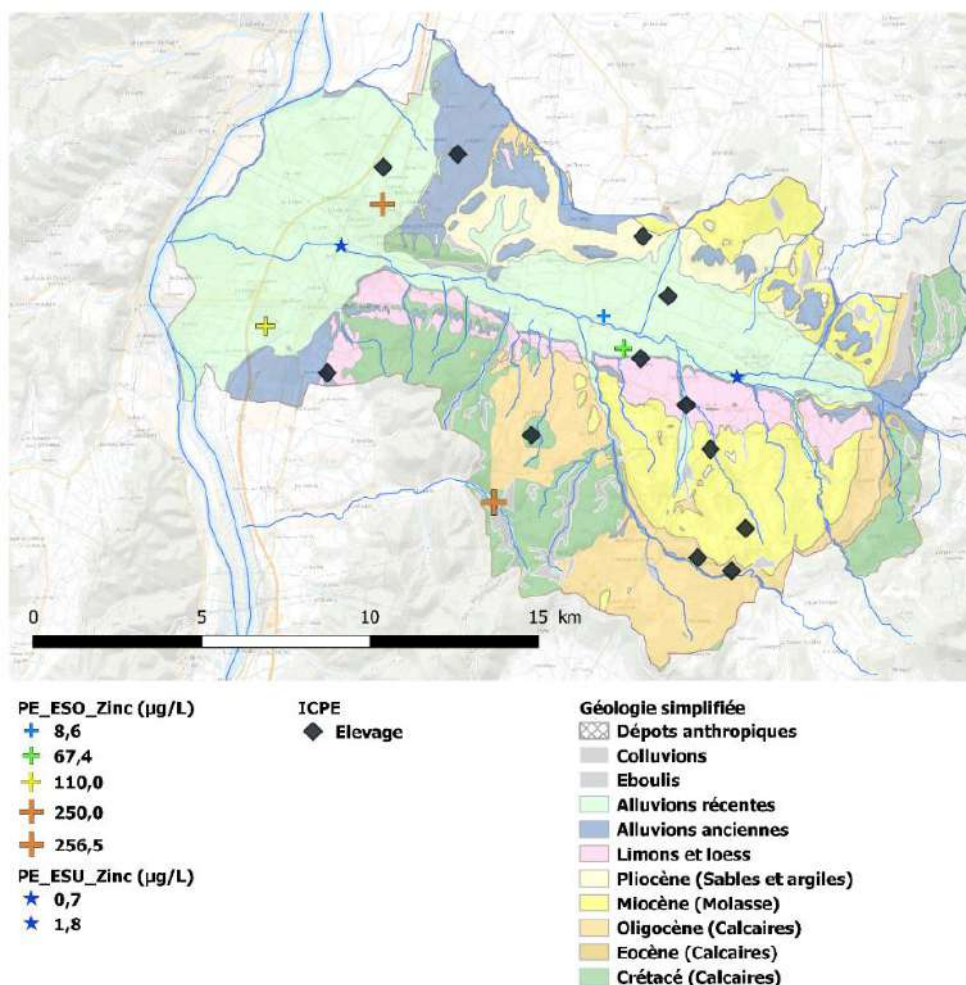


Figure 100 : Carte des concentrations moyennes en zinc (µg/L) par point d'eau ESO et ESU, et localisation des élevages importants (ICPE) du secteur d'étude.

D'un point de vue de la réglementation, les concentrations moyennes pour le cuivre sont inférieures à la valeur seuil fixée à 2 mg/L pour les eaux souterraines et la norme de qualité environnementale (NQE-MA) fixée à 1 µg/L pour les eaux superficielles. Pour le zinc, les concentrations des eaux souterraines, certes relativement élevées car proches de 250 µg/L, restent inférieures à la valeur seuil de 5 mg/L. Les eaux superficielles ont des concentrations moyennes inférieures à la NQE de 7,8 µg/L pour le zinc.

f) Produits phytosanitaires

Les résultats des analyses de produits phytosanitaires et métabolites des douze points d'eau souterraines ont été extrait de la base de données ADES. Un pré-traitement a été effectué afin d'éliminer les erreurs, comme par exemple les résultats d'analyse égaux à « 0 » alors que leur code remarque analyse (cdrq) est égal à 1 (=analyses dites quantifiées) et pour lesquels aucune valeur de LQ n'est renseignée.

Deux calculs ont ensuite été réalisés, le premier avec uniquement les résultats quantifiés (> LQ, notés « cdrq1 ») et le second avec l'ensemble des résultats d'analyses, en ayant préalablement remplacé pour les résultats non quantifiés (<LQ) la valeur du résultat par la LQ/2.

Les concentrations moyennes (µg/L) par point d'eau ESO et par paramètre sont présentées dans le Tableau 21.

	Code_bss	08422X0002/F	08422X0002/F	08423X00051/P	08423X00051/P	08423X00054/HY	08423X00054/HY	08423X00055/P	08423X00055/P	08424X00033/F	08424X00033/F
	Commune	Livron sur Drôme	Livron sur Drôme	Allex	Allex	Grane	Grane	Grane	Grane	Eurre	Eurre
code_param	nom_param	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2
1101	Alachlore										
1105	Aminotriazole									0,210	0,033
1107	Atrazine	0,024	0,015					0,020	0,008		
1108	Atrazine déséthyl	0,032	0,023	0,060	0,011	0,020	0,017	0,034	0,034		
1113	Bentazone			0,030	0,011						
1129	Carbendazime										
1201	Hexachlorocyclohexane bêta										
1203	Hexachlorocyclohexane gamma										
1221	Métolachlore total										
1263	Simazine	0,030	0,010	0,040	0,008						
1486	Dichlorophenol-2,4										
1500	Fénuron										
1517	Naphtalène			0,020	0,010			0,001	0,001		
1669	Norflurazone									0,119	0,058
1763	Ethidimuron									0,020	0,019
1830	Atrazine désopropyl déséthyl					0,035	0,045	0,023	0,017		
1832	2-hydroxy atrazine	0,009	0,010							0,040	0,032
1907	AMPA										
2089	Mépiquat chlorure									0,060	0,012
2737	Desmethylnorflurazon									0,136	0,048
2974	S-Métolachlore										
6276	Somme des pesticides totaux	0,014	0,211			0,054	0,152				
6854	Metolachlor ESA							0,055	0,033		

	Code_bss	08427X00022/HY	08427X00022/HY	08427X00023/F	08427X00023/F	08427X00035/F	08427X00035/F	08428X00003/HY	08428X00003/HY
	Commune	Chabrillan	Chabrillan	Chabrillan	Chabrillan	Grane	Grane	Autichamp	Autichamp
code_param	nom_param	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2	Moyenne_cdrq1	Moyenne_LQ/2
1101	Alachlore	0,016	0,004						
1105	Aminotriazole								
1107	Atrazine	0,017	0,007						
1108	Atrazine déséthyl	0,028	0,027	0,006	0,003			0,020	0,009
1113	Bentazone	0,048	0,031					0,061	0,039
1129	Carbendazime							0,008	0,009
1201	Hexachlorocyclohexane bêta	0,002	0,003					0,002	0,004
1203	Hexachlorocyclohexane gamma	0,001	0,003						
1221	Métolachlore total	0,030	0,006			0,020	0,013		
1263	Simazine								
1486	Dichlorophenol-2,4	0,135	0,043			0,080	0,033		
1500	Fénuron					0,020	0,013		
1517	Naphtalène								
1669	Norflurazone								
1763	Ethidimuron								
1830	Atrazine désopropyl déséthyl	0,054	0,050						
1832	2-hydroxy atrazine								
1907	AMPA	0,100	0,019					0,129	0,031
2089	Mépiquat chlorure								
2737	Desmethylnorflurazon								
2974	S-Métolachlore					0,020	0,022		
6276	Somme des pesticides totaux	0,131	0,131	0,006	0,209			0,057	0,128
6854	Metolachlor ESA	0,281	0,281					0,027	0,011

Tableau 21 : Concentrations moyennes (µg/L) en substances phytosanitaires par point d'eau et par paramètre (Données ADES).

Sur les 12 points d'eau ESO de la sélection, seulement 9 points d'eau ESO ont des analyses supérieures à la LQ pour à minima 2 molécules et 23 paramètres ont ainsi été quantifiés. La plupart des produits phytosanitaires présentés dans cette liste n'ont plus d'autorisation de mise sur le marché (Tableau 22).

Six substances peuvent encore être en lien avec des produits utilisés actuellement : trois sont des produits phytosanitaires, les autres substances sont des métabolites de phytosanitaires.

		Usage / Famille	Type de culture
code_param	nom_param		
1101	Alachlore	non autorisé	
1105	Aminotriazole	non autorisé	
1107	Atrazine	non autorisé	
1108	Atrazine déséthyl	non autorisé	
1113	Bentazone	Herbicide	Maïs, soja, pois
1129	Carbendazime	non autorisé	
1201	Hexachlorocyclohexane bêta	non autorisé	
1203	Hexachlorocyclohexane gamma	non autorisé	
1221	Métolachlore total	non autorisé	
1263	Simazine	non autorisé	
1486	Dichlorophenol-2,4	Métabolite d'herbicide	Blé, orge, traitements généraux (2,4 D)
1500	Fénuron	non autorisé	
1517	Naphtalène	non autorisé	
1669	Norflurazone	non autorisé	
1763	Ethidimuron	non autorisé	
1830	Atrazine déisopropyl déséthyl	non autorisé	
1832	2-hydroxy atrazine	non autorisé	
1907	AMPA	Métabolite d'herbicide	Traitements généraux
2089	Mépiquat chlorure	Fongicide, régulateur croissance	Blé, orge, crucifères oléagineuses
2737	Desmethylnorflurazon	non autorisé	
2974	S-Métolachlore	Herbicide	Maïs, pois, betterave
6276	Somme des pesticides totaux		
6854	Metolachlor ESA	Métabolite d'herbicide	Maïs, pois, betterave

Tableau 22 : Paramètres phytosanitaires identifiés et quantifiés sur 9 points d'eau du secteur d'étude, usage, famille et type de culture et interdiction d'usage effective.

Les produits phytosanitaires retrouvés sont essentiellement des herbicides. De manière générale les produits détectés sont plutôt associés aux cultures de céréales (ex : blé, maïs). Le métolachlore (ou S-Métolachlore) est particulièrement utilisé dans le désherbage du maïs.

Les deux paramètres les plus élevés pour les points d'eau ESO du secteur d'étude sont l'atrazine déséthyl et la somme des pesticides totaux, qui concernent respectivement 7 et 5 points d'eau.

Les valeurs déclassantes, au titre des seuils DCE pour les eaux souterraines, ont été examinées par point d'eau. Les résultats sont présentés sur le Tableau 23

En considérant uniquement à la moyenne globale sur la période 2017-2021, seul le point d'eau 08427X0022/HY (Chabrillan) a une concentration moyenne en métolachlor ESA supérieure à la valeur seuil DCE (0,1 µg/l).

En prenant en compte uniquement les résultats quantifiés (notés « cdrq1 »), 3 points d'eau ont été identifiés avec des valeurs maximales déclassantes (08428X0003/HY, 08427X0022/HY et 08424X0033/F), pour les 8 paramètres suivants : bentazone, atrazine déisopropyl déséthyl, metolachlor ESA, norflurazone, desmethylnorflurazon, diclorophenol-2,4, aminotriazole et AMPA.

code_bss	Commune	code_param	nom_param	Nombre de résultats d'analyses	Moyenne globale déclassante	Nombre d'analyses quantifiées	Pourcentage de quantification	Moyenne cdrq1 déclassante	Max cdrq1 déclassant	Valeur seuil DCE (µg/L)
08428X0003/HY	Autichamp	1113	Bentazone	82	non	46	56	non	oui	0,1
08428X0003/HY	Autichamp	1907	AMPA	72	non	1	1	oui - 1 seule valeur	oui - 1 seule valeur	0,1
08427X0022/HY	Chabrillan	1830	Atrazine déisopropyl déséthyl	29	non	19	66	non	oui	0,1
08427X0022/HY	Chabrillan	6854	Metolachlor ESA	19	oui	19	100	oui	oui	0,1
08427X0022/HY	Chabrillan	1486	Dichlorophenol-2,4	12	non	2	17	oui	oui	0,1
08424X0033/F	Eurre	1669	Norflurazone	23	non	8	35	oui	oui	0,1
08424X0033/F	Eurre	2737	Desmethylnorflurazon	23	non	5	22	oui	oui	0,1
08424X0033/F	Eurre	1105	Aminotriazole	23	non	1	4	oui - 1 seule valeur	oui - 1 seule valeur	0,1

Tableau 23 : Molécules identifiées comme déclassantes pour les points d'eau du secteur d'étude (données ADES).

Pour mémoire, les points d'eau 08427X0022/HY et 08428X0003/HY sont listés « captage vulnérable » au titre de la sensibilité nitrate. Le point 08427X0022/HY l'est également au titre de la sensibilité aux pesticides.

g) Substances émergentes

Douze molécules classées comme « d'intérêt émergents » ont été recherchées dans ADES, afin d'avoir un aperçu complémentaire de l'impact de pollutions anthropiques sur la qualité des eaux souterraines (Tableau 24).

Code_param	Nom_param
1958	4-nonylphénol ramifiés
2766	Bisphénol A
5296	Carbamazépine
5354	Paracétamol
5430	Triclosan
6519	Caféine
6644	Ethylparabène
6660	Tolyltriazole
6693	Propylparabène
6695	Méthylparabène
6989	Triclocarban
7543	Benzotriazole

Tableau 24 : Liste des molécules « émergents » recherchées dans ADES pour les 12 points d'eau souterraines du secteur d'étude

Parmi les 504 analyses correspondant à ces 12 paramètres, seuls 15 résultats d'analyses sont quantifiés sur la période 2010-2022. Ils sont présentés sur le Tableau 25 et concernent deux molécules : le bisphénol A (quantifié 14 fois de 2018 à 2022) et le paracétamol (quantifié une fois en 2018).

code_bss	code_param	nom_param	Année min	Année max	Nombre d'analyses quantifiées	Unité	Min quantifié	Max quantifié	Moyenne quantifiée
08423X0051/P	5354	Paracétamol	2018	2018	1	ng/L	34,0	34,0	34,0
08427X0022/HY	2766	Bisphénol A	2018	2018	1	µg/L	0,07	0,07	0,07
08427X0035/F	2766	Bisphénol A	2018	2022	9	µg/L	0,02	0,09	0,04
08428X0003/HY	2766	Bisphénol A	2018	2019	4	µg/L	0,03	0,06	0,04

Tableau 25 : Molécules (émergents) quantifiées pour les points d'eau souterraine du secteur d'étude (Données ADES).

Les quatre points d'eau impactés sont les suivants :

- 08423X0051/P sur la commune d'Allex (Alluvions récentes);
- 08427X0022/HY sur la commune de Chabrillan (Molasse miocène) ;
- 08427X0035/F sur la commune de Grane (Molasse miocène);
- 08428X0003/HY sur la commune d'Autichamp (Molasse miocène).

Notons cependant que pour les deux points d'eau, 08423X0051/P et 08427X0022/HY, une seule analyse a été quantifiée respectivement pour le paracétamol et le bisphénol A.

8.3. DONNEES ACQUISES EN 2022 : CAMPAGNES D'INVESTIGATION EN HAUTES EAUX ET BASSES EAUX

Dans cette partie de l'étude, une distinction a été effectuée pour les eaux souterraines captant les formations molassiques miocènes, en distinguant la molasse libre et la molasse captive. La comparaison avec les données « qualité » historiques prendra également compte de cette distinction. Une distinction a également été faite sur les alluvions récentes et les alluvions anciennes.

Lors de la campagne de basses eaux 2022, 23 points d'eau souterraine (PE ESO) et 3 points d'eau superficielle (PE ESU) ont fait l'objet d'un suivi hydrogéochimique, avec mesures *in situ* des paramètres physico-chimiques et prélèvements pour analyses chimiques aux laboratoires (cf. chapitre 6.2.1.). Ces points d'eau sont présentés sur la Figure 101 (avec le code terrain) avec les points d'eau ESO et ESU ayant des données « qualité » historiques et la géologie simplifiée.

Les points d'eau de la campagne basses eaux 2022 ont été sélectionnés de façon à couvrir l'ensemble des formations aquifères du secteur d'étude, des alluvions récentes à l'aquifère crétacé. Un tableau récapitulatif de l'ensemble des points d'eau est présenté Tableau 26.

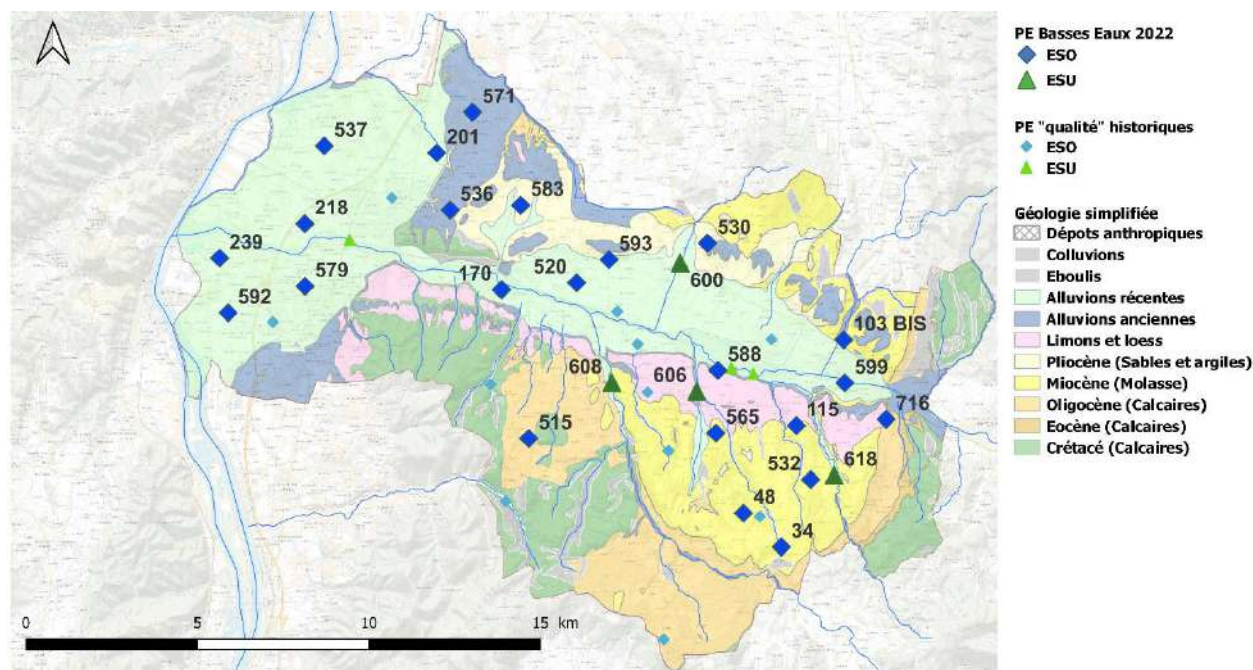


Figure 101 : Localisation des points d'eau souterraine (PE ESO) et point d'eau superficielle (PE ESU) ayant fait l'objet de prélèvements et mesures physico-chimiques in situ lors de la campagne de basses eaux 2022.

ESO/ESU	ID Point d'eau	Commune	Affectation hydrogéologique
ESO	579	Loriol	Alluvions récentes
ESO	530	Eurre	Pliocène (Sable et argiles bleues)
ESO	103 BIS	Crest	Miocène (Molasse captive)
ESO	593	Alex	Pliocène (Sable et argiles bleues)
ESO	571	Livron	Alluvions anciennes
ESO	48	Autichamp	Miocène (Molasse libre)
ESO	716	Crest	Limons et loess
ESO	532	Divajeu	Miocène (Molasse libre)
ESO	515	Grane	Oligocène (Calcaires)
ESO	170	Grane	Alluvions récentes
ESO	599	Crest	Alluvions récentes
ESO	588	Chabrillan	Limons et loess
ESO	201	Livron	Alluvions récentes
ESO	239	Loriol	Alluvions récentes
ESO	537	Livron	Alluvions récentes
ESO	592	Loriol	Alluvions récentes
ESO	218	Livron	Alluvions récentes
ESO	583	Alex	Miocène (Molasse captive)
ESO	536	Livron	Alluvions anciennes
ESO	34	Autichamp	Miocène (Molasse libre)
ESO	115	Divajeu	Miocène (Molasse libre)
ESO	565	Chabrillan	Miocène (Molasse captive)
ESO	520	Alex	Alluvions récentes
ESU	608	Grane	
ESU	606	Chabrillan	
ESU	618	Divajeu	

Tableau 26 : Tableau récapitulatif des points d'eau ESO et ESU suivis en Basses Eaux 2022.

8.3.1. Paramètres physico-chimiques mesurés *in situ*

Les paramètres physico-chimiques *in situ* ont été mesurés sur le terrain, il s'agit de la conductivité à 25 °C ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la température de l'eau, le pH, l'oxygène dissous et le potentiel d'oxydo-réduction.

a) Conductivité électrique à 25°C

La Figure 102 présente spatialement les valeurs de conductivité électrique des points d'eau ESO et ESU, mesurées lors de la campagne de hautes eaux (HE) 2022, mais aussi à titre de comparaison les conductivités moyennes historiques calculées précédemment.

Les valeurs de conductivités mesurées dans les cours d'eau en HE 2022 sont cohérentes avec les valeurs historiques des ESU. Des variations s'observent suivant les secteurs, pour les eaux souterraines.

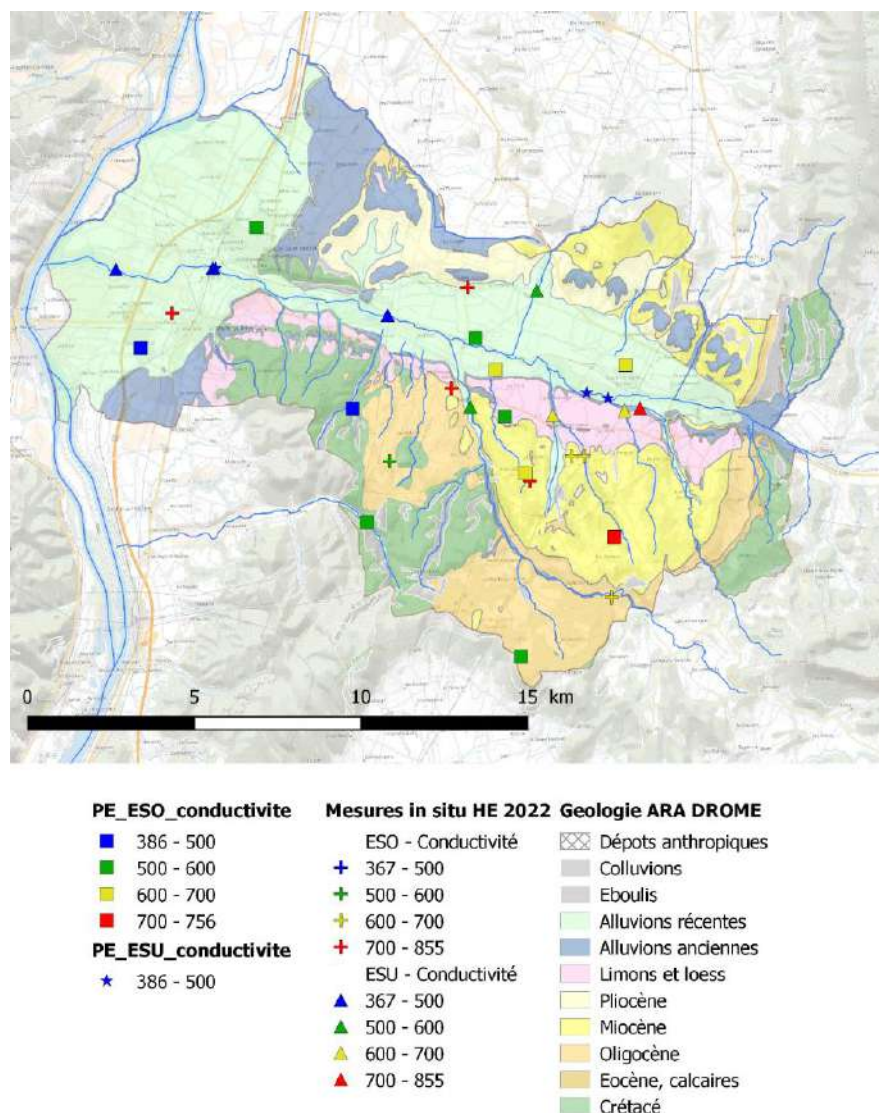


Figure 102 : Conductivités électriques moyennes à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des points d'eau souterraine (PE ESO) et superficielle (PE ESU) du secteur d'étude et conductivités électriques à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) mesurées *in situ* lors de la campagne de Hautes Eaux 2022.

Les mesures de conductivité électrique effectuées sur les points d'eau ESO et ESU en basses eaux 2022 sont présentées sur la Figure 103. La gamme des conductivités corrigées à 25°C des points d'eau souterraine s'étend de 367 à 905 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une valeur moyenne de 589 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs de conductivité des points d'eau superficielle varient de 475 à 714 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 589 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

On observe une cohérence, pour un même secteur, entre les valeurs mesurées sur les eaux souterraines et les eaux superficielles. De plus, ces valeurs ESO et ESU sont en accord avec les valeurs moyennes des données historiques.

On peut remarquer toutefois que 2 points d'eau ESO (alluvions récentes) situés au Nord de Livron/Drôme ont des conductivités relativement élevées pour ce type d'aquifère (points d'eau 201 et 537, croix orange sur la Figure 103). Ceci peut être le reflet de contaminations locales de la nappe.

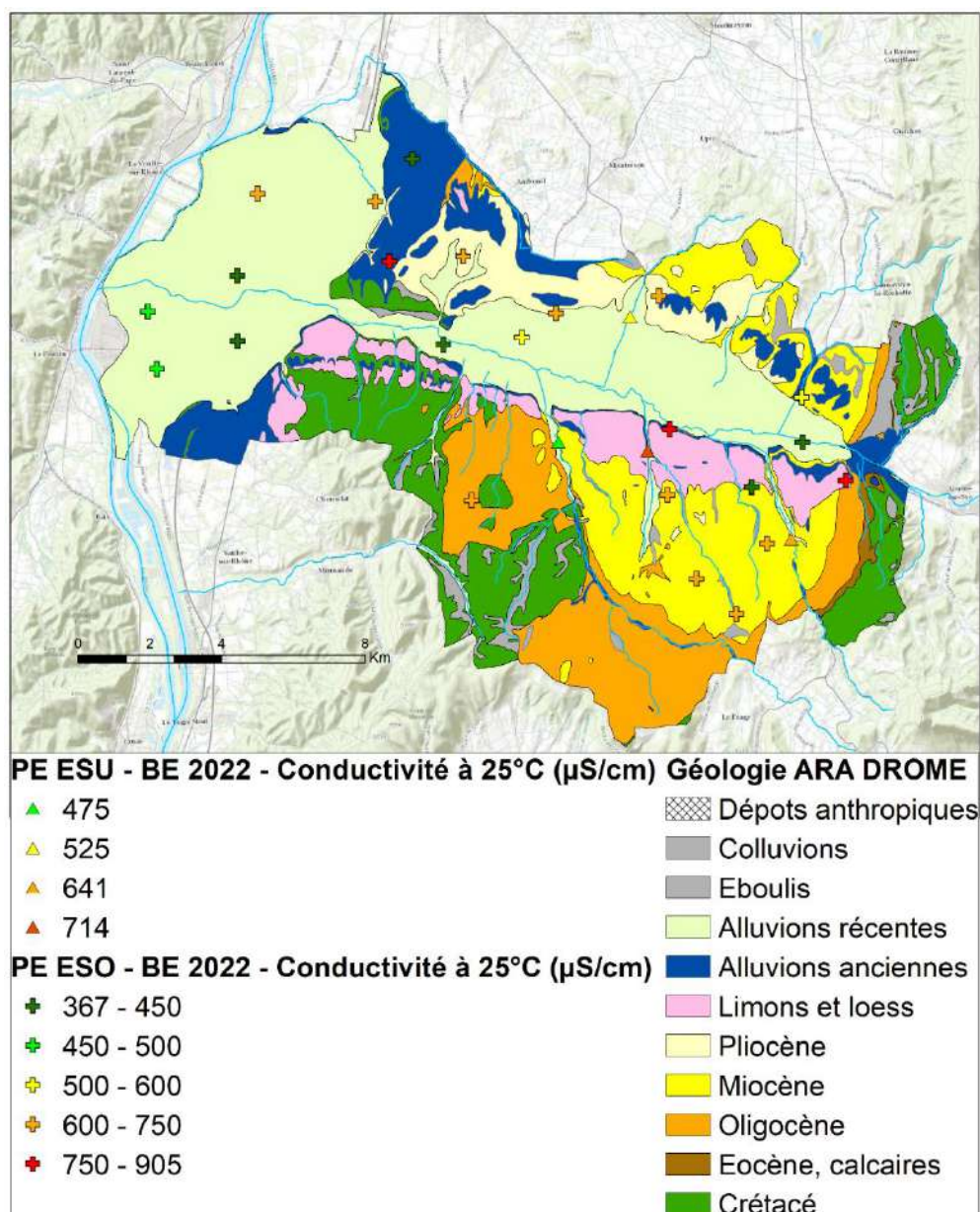


Figure 103 : Conductivités électriques à 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des points d'eau souterraine (PE ESO) et superficielle (PE ESU) mesurées in situ lors de la campagne de Basses Eaux 2022.

b) Conductivité électrique versus température de l'eau

Le graphique binaire (Figure 104) présente les valeurs de conductivités électriques en fonction des températures de l'eau pour l'ensemble des points suivis en basses eaux 2022, mais aussi à titre de comparaison en fonction des données historiques et des valeurs mesurées en hautes eaux 2022. Les points d'eau sont représentés en fonction de leur affectation ESO ou ESU, et en fonction de leur hydrogéologie simplifiée.

Ceci permet de mettre en évidence, par exemple que le point d'eau ESO (ID 536) situé dans les alluvions anciennes est le plus minéralisé des basses eaux. On remarque également que les températures de l'eau en BE 2022 sont plus élevées qu'en hautes eaux 2022, mais aussi que les températures moyennes des données historiques, ceci reflétant très bien la variation climatique annuelle de température.

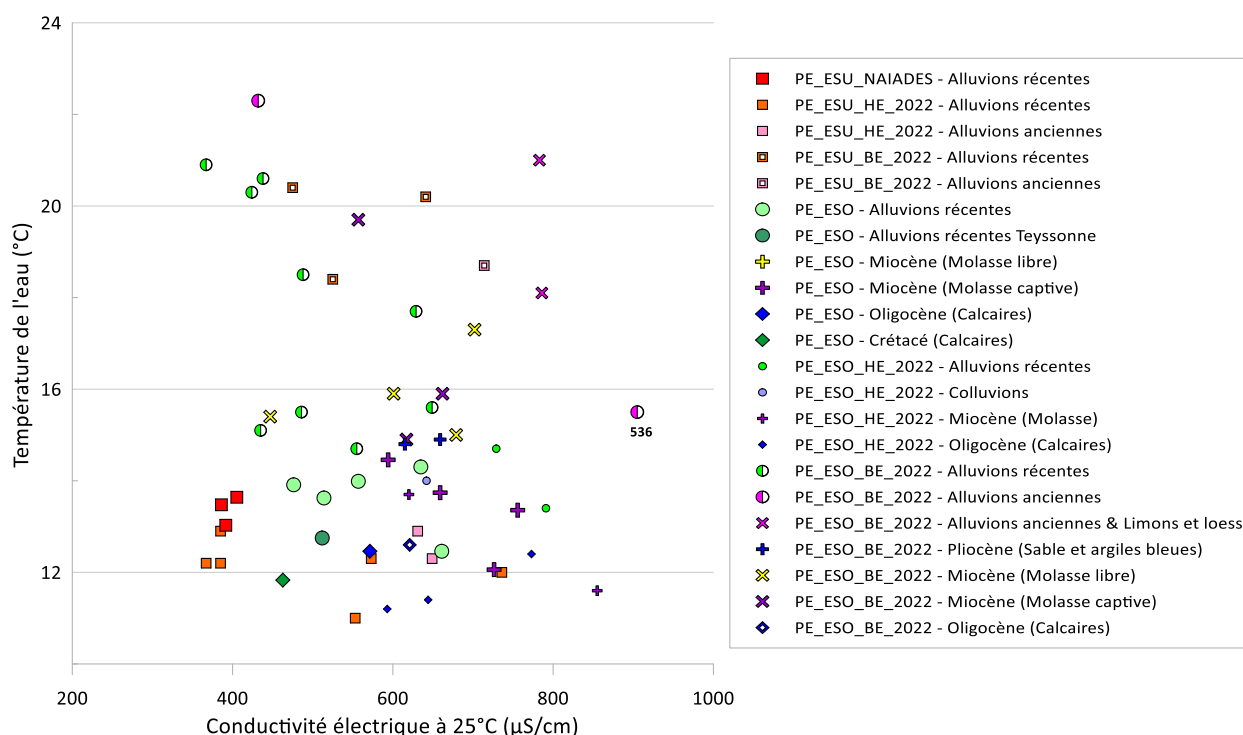


Figure 104 : Diagramme température de l'eau (°C) versus conductivité des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) historiques, et des données des campagnes Hautes Eaux et Basses Eaux 2022.

c) pH

Le graphique binaire (Figure 105) présente les valeurs de pH en fonction des températures de l'eau pour l'ensemble des points suivis en basses eaux 2022, mais aussi à titre de comparaison en fonction des données historiques. Les points d'eau sont représentés en fonction de leur affectation ESO ou ESU, et de leur hydrogéologie simplifiée.

Le pH des eaux superficielles présente des valeurs supérieures à 7,5 - 8 ; ce qui est conforme à des valeurs attendues pour les eaux superficielles. Deux points d'eau souterraine captant la nappe des alluvions récentes (520- Allex et 579-Loriol sur la Figure 105) ont un pH proche des eaux superficielles, cela peut mettre en avant un lien ESU-ESO. Un point d'eau captant la molasse miocène libre (115-Divajeu) présente également une valeur de pH dans la même gamme. Elle peut indiquer une recharge très superficielle.

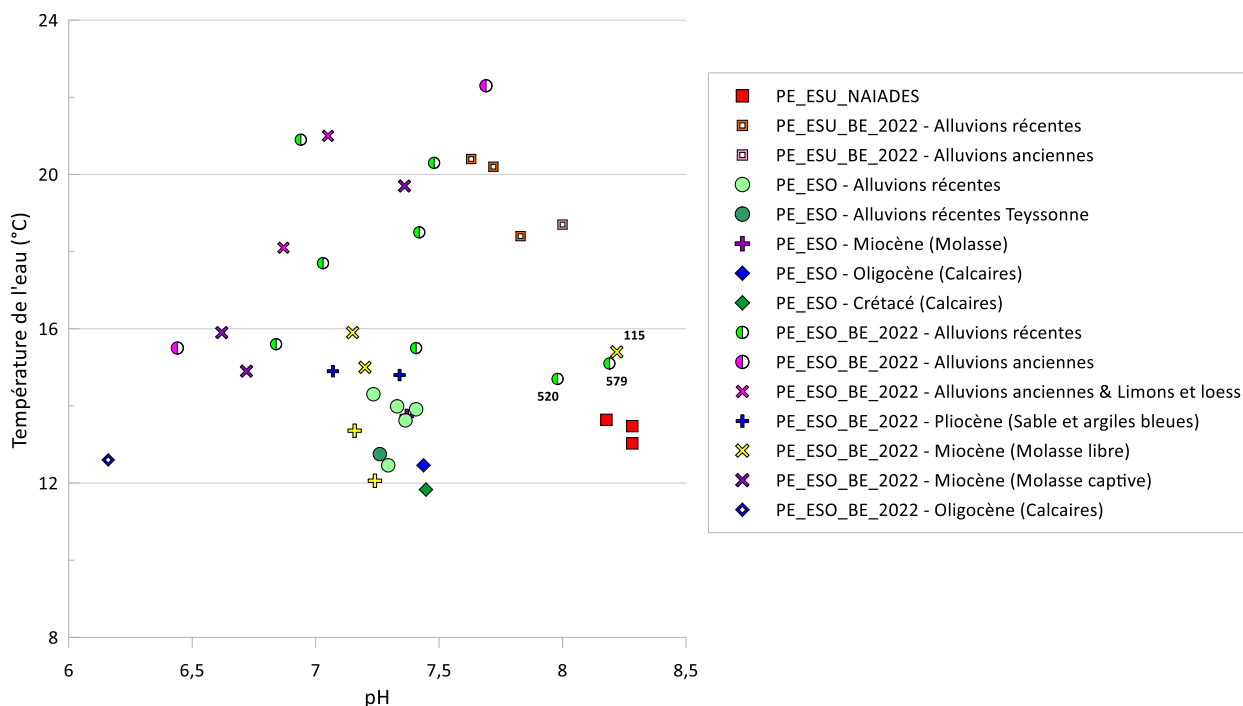


Figure 105 : Diagramme température de l'eau (°C) versus pH des points d'eau souterraine (ESO BE 2022) et superficielle (ESU BE 2022) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données historiques.

d) Oxygène dissous et potentiel d'oxydo-réduction

Lors de la campagne de basses eaux 2022, les mesures *in situ* d'oxygène dissous dans l'eau varient pour les eaux souterraines de 0,3 à 9,7 mg/L avec une valeur moyenne de 6,8 mg/L ; et pour les eaux superficielles de 8,1 à 8,9 mg/L avec une moyenne de 8,4 mg/L.

Les valeurs mesurées sur le terrain pour le potentiel d'oxydo-réduction ont été corrigées en fonction des caractéristiques du matériel utilisé (WTW SenTix® ORP) et de l'électrode de référence. Les valeurs du potentiel rédox en fonction de l'électrode standard à hydrogène, Eh NHE (mV), varient pour les eaux souterraines du secteur d'étude de 151 à 495 mV avec une moyenne de 371 mV ; et pour les eaux superficielles de 281 à 406 mV avec une moyenne de 355 mV. Ces valeurs positives sont conformes aux valeurs rencontrées couramment pour des eaux brutes souterraines et superficielles.

8.3.2. Diagrammes de Piper et faciès hydrochimiques des eaux

a) Vérification de la balance ionique

Les analyses des 23 points d'eau ESO prélevés en septembre 2022 ont une balance ionique qui varie entre 1,2 et 6,7 %, ce qui est satisfaisant. L'ensemble des 23 analyses des prélèvements ESO sont donc retenues.

Le graphique TDS vs conductivité électrique (Figure 106) permet de valider d'une deuxième façon le jeu de données. Il permet aussi de mettre en évidence l'augmentation de la minéralisation des eaux, en partant des eaux superficielles jusqu'aux eaux souterraines. Sur le graphique sont identifiés les différents pôles hydrogéologiques - hydrogéochimiques : les points d'eau ESU-pôle Drôme (cercle rouge), les points d'eau ESO des alluvions récentes (cercle vert clair), les calcaires de l'Oligocène (cercle bleu) et les calcaires du Crétacé (cercle vert foncé). Les points d'eau de la molasse miocène ainsi que les point d'eau de la nappe des limons et loess sont les plus

minéralisés. On note également une valeur importante pour un point des alluvions anciennes (ID : 536).

Ces différents pôles seront affinés en prenant en compte par la suite les éléments majeurs, mineurs et traces.

Enfin, ce graphique permet également de mettre en évidence la complémentarité des données « qualité » acquises lors de la campagne de basses eaux 2022 avec les moyennes reconstituées pour les données « qualité » historiques.

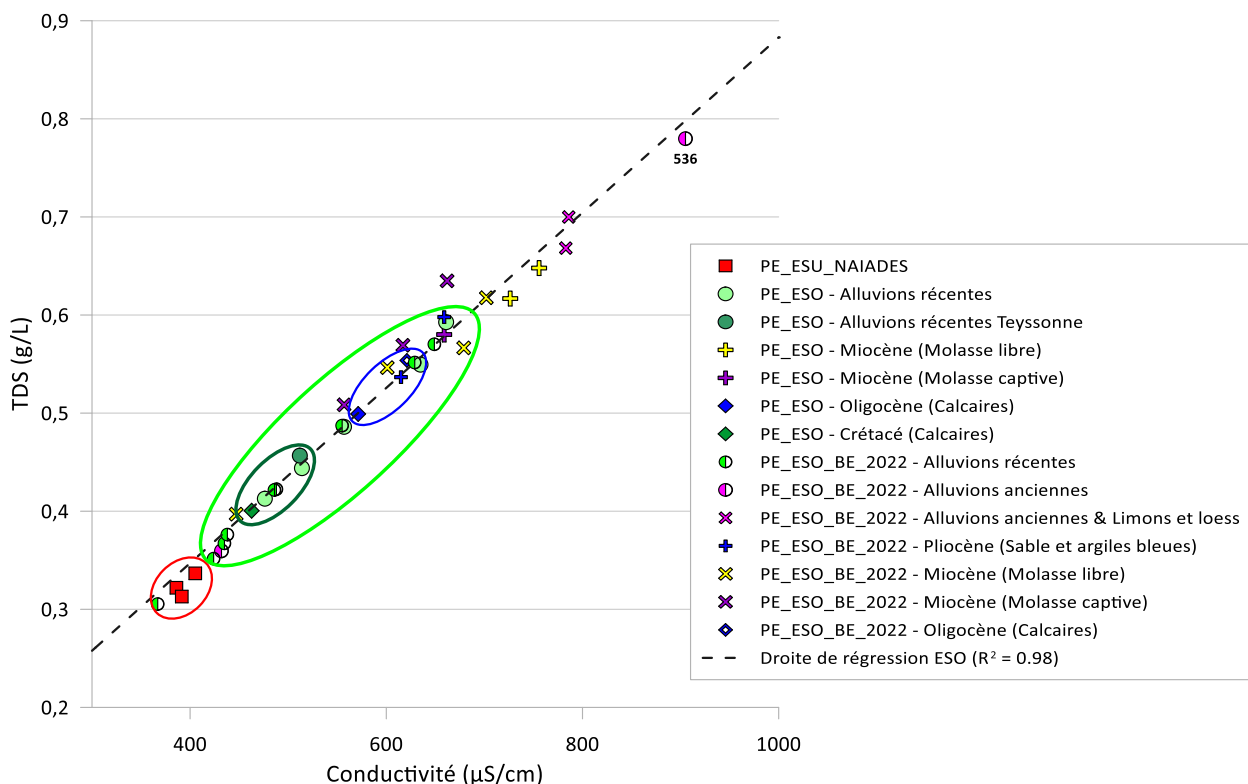


Figure 106 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique ($\mu\text{S/cm}$) des points d'eau souterraine pour les données historiques (PE ESO), des points d'eau superficielle historiques (PE ESU) et des points d'eau prélevés en BE 2022 (PE ESO BE 2022)-cercle rouge : pôle ESU Drôme, cercle vert clair: pôle ESO alluvions, cercle bleu : Oligocène

b) Diagramme de Piper

D'après le diagramme de Piper des eaux souterraines (Figure 107), les 23 points d'eau souterraine (ESO) prélevés en basses eaux 2022 ont un faciès bicarbonaté-calcique ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$).

Les données confirment la caractérisation hydrogéochimique déjà réalisée à partir des concentrations moyennes en éléments majeurs pour les données « qualité » historiques. Elles permettent aussi de mettre en avant une plus grande variabilité dans la chimie des eaux, notamment pour les eaux souterraines captant la molasse miocène, les alluvions anciennes et les limons et loess.

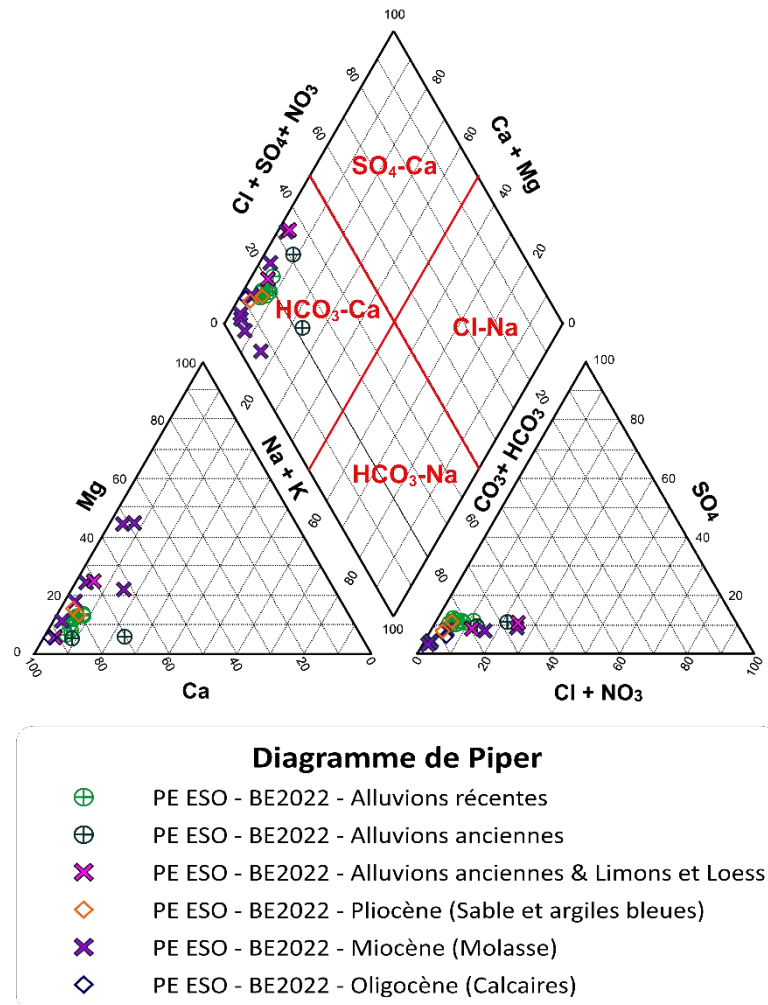


Figure 107 : Diagramme de Piper des points d'eau souterraine (ESO) prélevés en basses eaux 2022.

c) Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Les diagrammes de Schoeller-Berkaloff ont été réalisés pour les différents contextes hydrogéologique, en intégrant les points d'eau prélevés en basses eaux 2022 et les analyses historiques.

On observe une certaine stabilité temporelle pour les eaux souterraines des alluvions récentes (Figure 108) et les eaux souterraines du groupe Oligocène-Crétacé (Figure 109). Une variabilité peut cependant être pointée vis-à-vis des concentrations en nitrates, chlorures et ions alcalins pour les alluvions récentes, et pour les concentrations en magnésium du groupe Oligocène-Crétacé.

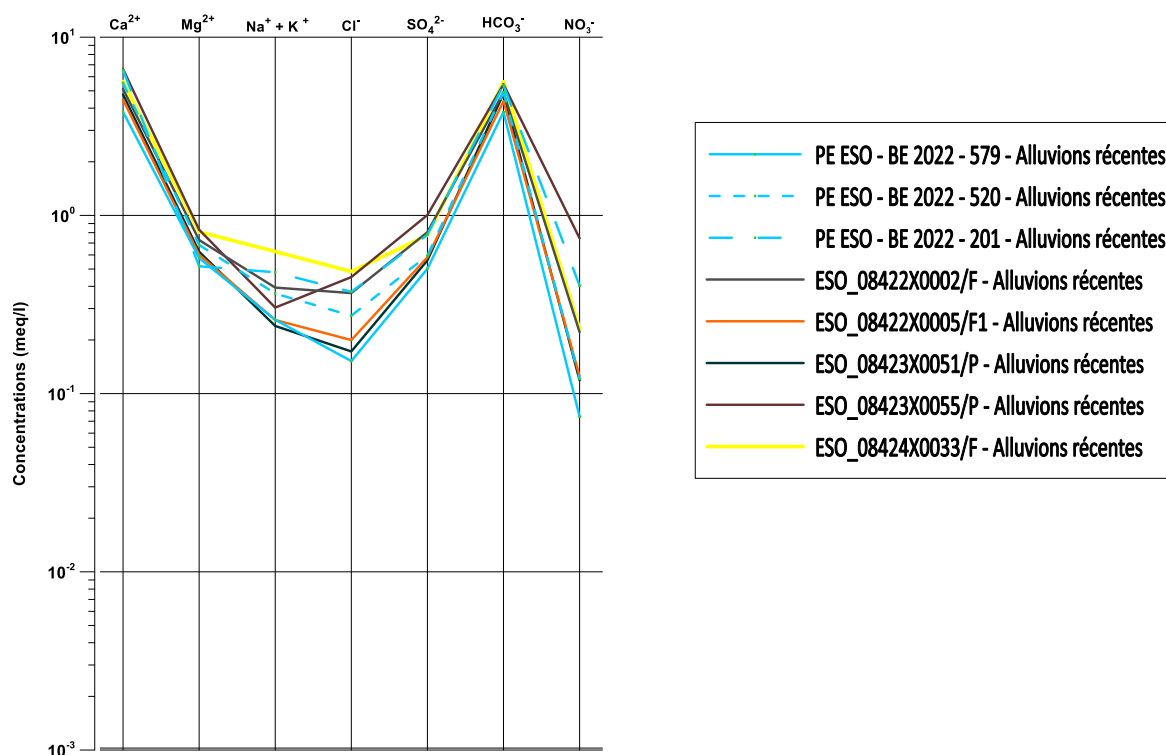


Figure 108 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison des points d'eau souterraine (ESO) en basses eaux 2022 et les des points d'eau souterraine de référence captant les alluvions récentes

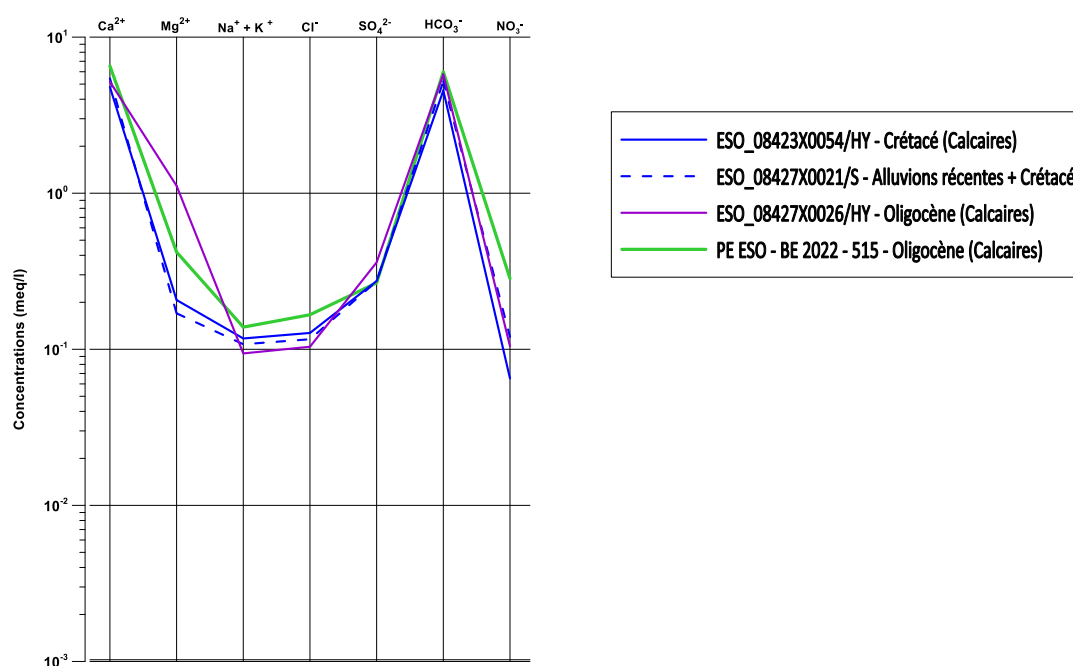


Figure 109 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison du point d'eau souterraine (ESO) captant l'Oligocène (Calcaires) en basses eaux 2022 et des points d'eau souterraine de référence captant le Crétacé (Calcaires) et l'Oligocène (Calcaires)

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 110) consacré aux points d'eau captant la molasse du Miocène montre une plus large gamme de variations des concentrations en éléments majeurs hormis pour les concentrations en calcium et hydrogénocarbonates reflet du faciès bicarbonaté calcaïque.

Un distinguo a été fait sur le caractère libre ou captif de la nappe. Le graphique met en avant que les points d'eau captant la molasse captive miocène sont nettement plus enrichis en magnésium, mais aussi en alcalins (Na + K) et ont des concentrations plus faibles en nitrate et en chlorures. Cette observation est en accord avec les travaux de De la Vaissière (2006) et Cave (2011). Les eaux de l'aquifère constitué par la molasse miocène captive sur le secteur d'étude peuvent être marquées par des processus d'interactions eau-roche plus importants, et sont mieux protégées vis-à-vis des pollutions anthropiques. La minéralisation plus importante en magnésium des eaux de la molasse captive sera discutée par la suite ; mais ceci est en lien avec la présence de dolomite dans la molasse miocène, identifiée notamment par Huneau (2000) et De la Vaissière (2006).

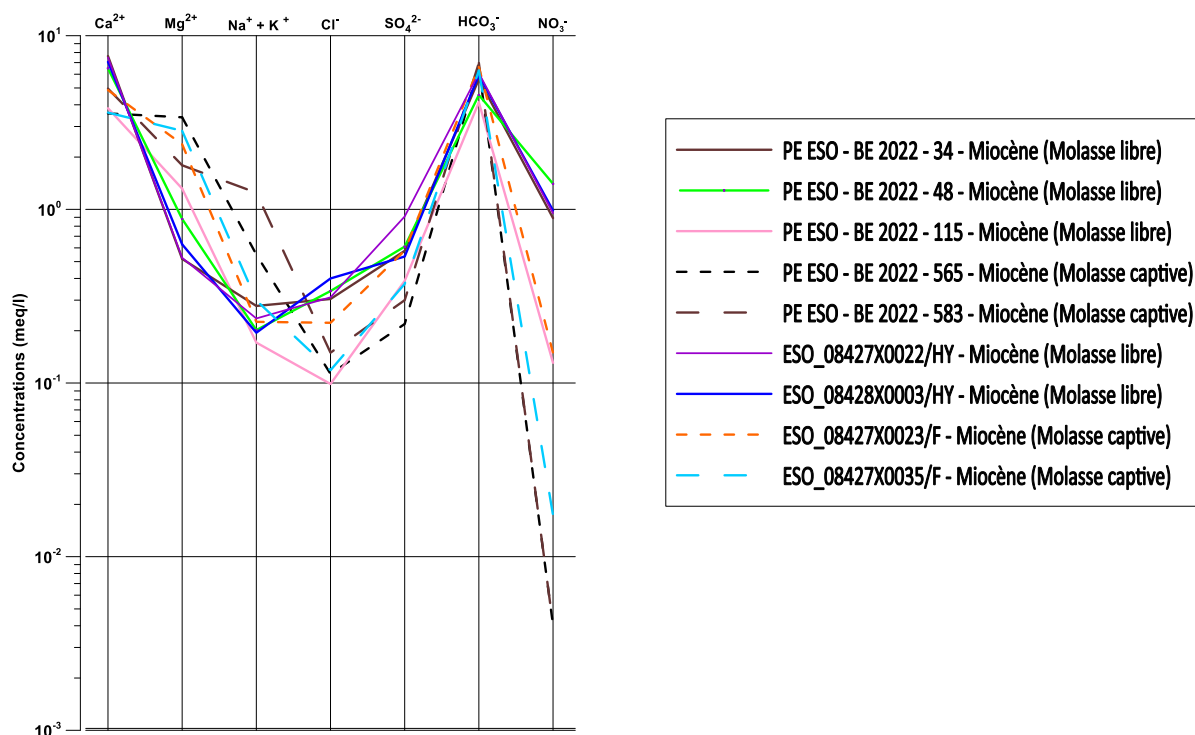


Figure 110 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff : comparaison des points d'eau souterraine (ESO) captant le Miocène (Molasse libre et captive) en basses eaux 2022 et des points d'eau « qualité » historiques.

8.3.3. Eléments majeurs

L'objectif de cette partie est d'identifier des pôles correspondant aux différents types d'aquifères, de caractériser les différents types d'eau en fonction des processus d'interactions eau-roche, mais aussi de mettre en évidence l'impact de certaines pollutions d'origine anthropique.

a) Cl versus Na

Le diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) (Figure 111) montre que la majorité des points d'eau ESO et ESU s'alignent de part de d'autre de la droite de dilution de l'eau de mer.

Les plus fortes concentrations en Na et Cl correspondent à un point d'eau des alluvions anciennes prélevé en basses eaux 2022 (ID 536-Livron), qui est le point d'eau présentant la plus forte minéralisation (Cf. 8.3.2).

Il est possible de mettre en évidence plusieurs pôles, marqués par des cercles de couleur : en rouge les eaux superficielles, en bleu et vert foncé les eaux des calcaires oligocènes et crétacés et en vert clair les eaux relatives aux alluvions récentes qui montrent des gammes de concentration plus larges en Na et Cl.

Comme déjà observé sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 110), deux points dans la molasse captive prélevés en basses eaux 2022 (ID 583-Alex et 565-Chabrillan) présentent un net enrichissement en Na. L'enrichissement en sodium marquerait les interactions eau-roche et indique un long temps de séjour de l'eau dans l'aquifère (Cave, 2011).

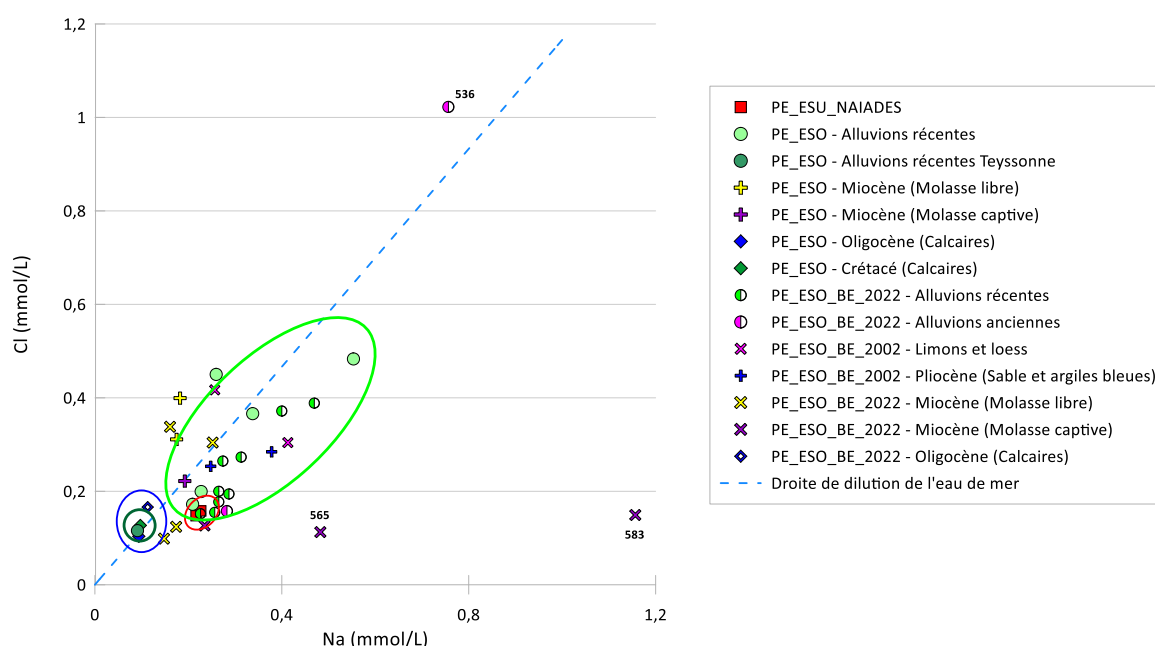


Figure 111 : Diagramme Cl (mmol/L) versus Na (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) et des données de la campagne de Basses Eaux 2022. Cercle rouge : ESU Drôme, cercle bleu : ESO calcaires oligocènes, cercle vert foncé : calcaires crétacés, cercle vert clair : ESO alluvions récentes

b) Ca+Mg versus HCO_3

Le diagramme Ca + Mg versus HCO_3 (Figure 112) permet de prendre en compte les processus d'interactions eau-roche avec les formations carbonatées.

Comme remarqué avec les données historiques, l'ensemble des points d'eau ESU et ESO du secteur d'étude s'alignent globalement sur une droite de pente légèrement supérieure à 1:2. Ceci va dans le sens de processus d'interactions eau-roche communs pour les eaux du secteur d'étude, avec a priori des temps d'interactions eau-roche plus ou moins longs. Ce graphique permet également d'identifier les différents pôles (cercles de couleur) pour les eaux du secteur d'étude en fonction de leurs contextes hydrogéologiques.

Les eaux superficielles et quelques points d'eau souterraine situés dans les alluvions sont les moins minéralisées en Ca + Mg et HCO_3 ; on retrouve les eaux des alluvions récentes qui

s'enrichissent progressivement en $\text{Ca} + \text{Mg}$ et HCO_3 ; viennent ensuite les eaux marquant les calcaires du Crétacé qui ont une minéralisation proche des alluvions récentes ; puis les eaux des calcaires de l'Oligocène. On observe également que les points d'eau du Pliocène se situent près des ESO des alluvions les plus minéralisées et de la molasse.

Les eaux les plus riches en $\text{Ca} + \text{Mg}$ et HCO_3 sont celles captant les alluvions & limons et loess et la molasse miocène. Cette similitude entre limons et molasse peut indiquer des échanges entre ces deux types d'aquifères.

On retrouve le point d'eau le plus minéralisé des alluvions anciennes (ID 536) qui est également le plus riche en $\text{Ca} + \text{Mg}$. Pour la molasse libre, on note que le point d'eau ID 115 a une chimie proche des alluvions récentes, confirmant pour ce point d'eau un contexte de nappe très superficielle.

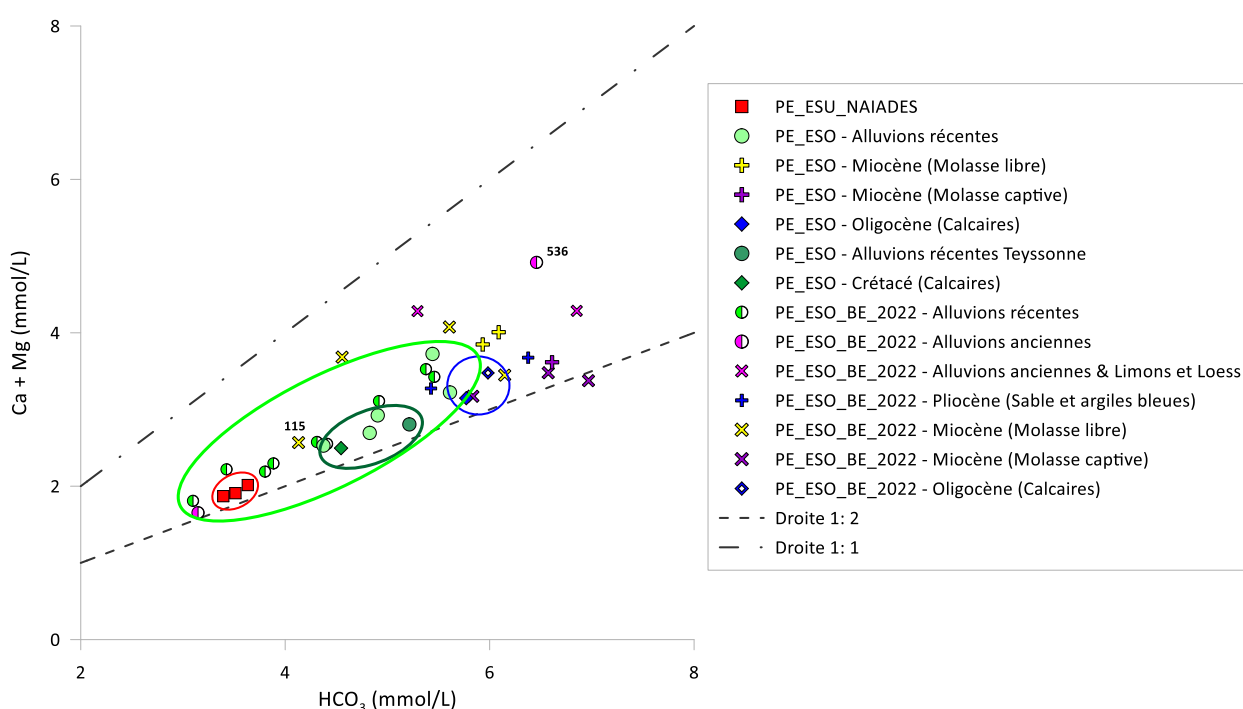


Figure 112 : Diagramme $\text{Ca} + \text{Mg}$ (mmol/L) versus HCO_3 (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

c) Ca versus SO_4

Comme remarqué précédemment avec les données historiques, le diagramme Ca versus SO_4 (Figure 113) permet de distinguer plusieurs groupes des points :

Les points d'eau ESU, les points d'eau ESO des alluvions récentes, du Pliocène, des limons et loess et de la molasse miocène libre sont globalement alignés, indiquant un enrichissement progressif en Ca et SO_4 . Cet enrichissement progressif est peut-être en lien avec la présence de gypse, ou d'anhydrite, dans les formations encaissantes. Une origine anthropique ne peut toutefois pas être écartée localement.

A noter que la présence de concentrations élevées en sulfates dans la molasse du bassin de Crest est également signalée Cave (2011). Cet auteur mettait en avant un possible apport en provenance des formations oligocènes (dissolution de gypse).

Notre étude tend à montrer que les points d'eau ESO des formations carbonatées Crétacé (cercle vert foncé) et Oligocène (cercle bleu) sont enrichies en Ca relativement à la corrélation entre le Ca et le SO_4 observée dans les alluvions. Le calcium provenant principalement des formations carbonatées. Ces aquifères ne montrent pas de relation avec la présence de gypse.

On note à nouveau la position particulière du point d'eau ID 115 de la molasse libre proche des alluvions récentes (cercle vert clair) et des eaux superficielles (cercle rouge).

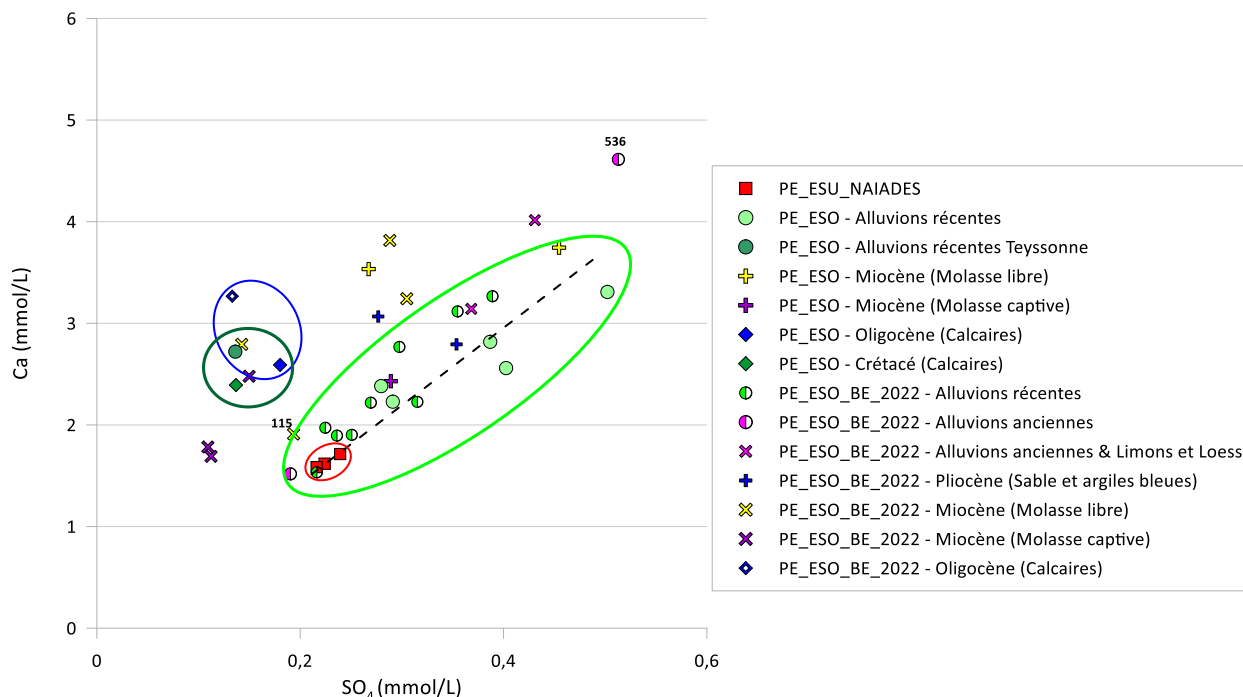


Figure 113 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SO_4 (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

d) Ca versus SiO_2

Le diagramme Ca versus SiO_2 (Figure 114) est construit avec les données des points d'eau souterraine prélevés en basses eaux 2022. La silice permet de distinguer les alluvions récentes (cercle vert clair) et la molasse libre (cercle jaune) de la molasse captive miocène et des sables et argiles du Pliocène plus riches en silice. Cet enrichissement est en lien avec des temps d'interactions eau-roche plus importants.

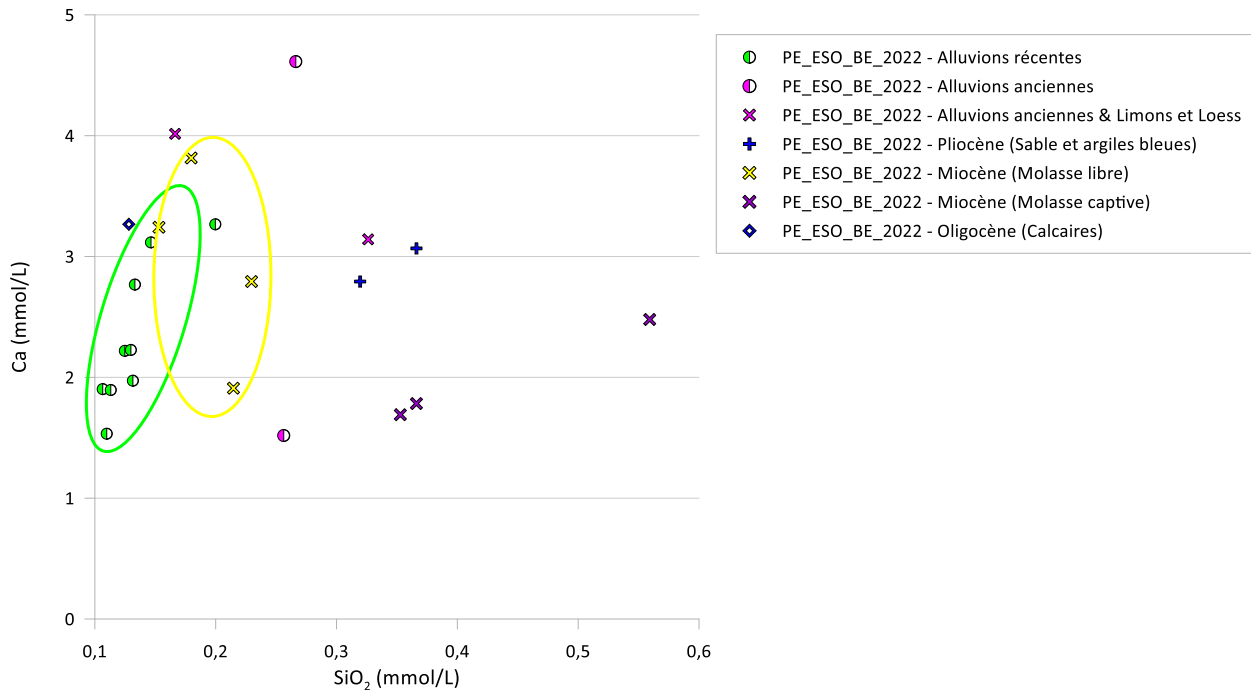


Figure 114 : Diagramme Ca (mmol/L) versus SiO₂ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022- cercle jaune : molasse libre et cercle vert : alluvions récentes..

e) Ca/Na versus Ca/Mg

Le diagramme de ratios molaires Ca/Na versus Ca/Mg (Figure 115) permet de distinguer clairement 6 pôles qui décrivent les différents aquifères du secteur d'étude :

1. Les eaux superficielles (cercle rouge) ;
2. Les eaux des alluvions récentes et les eaux des alluvions anciennes (cercle vert clair). Les eaux des alluvions récentes ont une signature proche des eaux superficielles;
3. Les eaux des calcaires crétacés (cercle vert foncé) qui ont un ratio Ca/Mg plus important que les autres eaux du secteur d'étude;
4. Les eaux des calcaires oligocènes (cercle bleu);
5. Les eaux de la molasse miocène libre (cercle jaune),
6. Les eaux de la molasse miocène captive (cercle violet), qui présentent les ratio Ca/Na et Ca/Mg les plus faibles. Les molasses captives sont enrichies en Mg et Na du fait d'une interaction eau-roche plus marquée.

On remarque que les eaux du Pliocène se trouvent à l'interface entre les eaux du Miocène captif et les eaux du Miocène libre. Les deux points d'eau situés dans les alluvions anciennes & limons et loess sont soit similaire à la molasse libre, soit à la molasse captive.

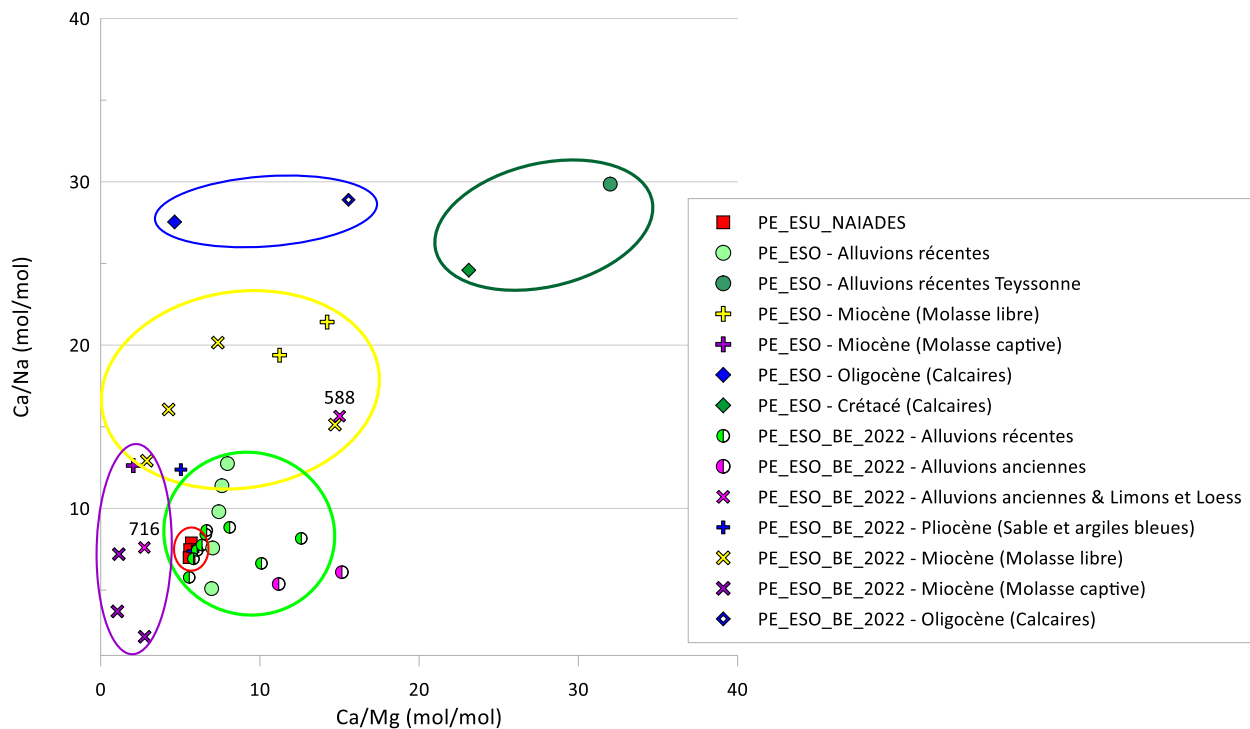


Figure 115 : Diagramme Ca/Na (mol/mol) versus Ca/Mg (mol/mol) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

f) Cl versus NO₃

Le diagramme Cl versus NO₃ (Figure 116) permet de mettre en évidence les points d'eau souterraine qui sont fortement contaminés en nitrate, avec des concentrations supérieures ou proches de la limite qualité (50 mg/L). Ces points d'eau sont principalement identifiés dans la molasse libre du Miocène (ID 48), dans les limons et loess (aquifère libre ; ID 588), mais aussi pour le point ID 536 des alluvions anciennes ; ce dernier étant également le point le plus enrichi en Cl. Les aquifères de la molasse miocène libre et des alluvions anciennes & limons et loess apparaissent donc des aquifères sensibles aux pollutions anthropiques, qui sont ici a priori d'origine agricole.

Le point d'eau dans les alluvions anciennes ID 536 semble quant à lui impacté par à minima deux types de pollutions d'origine anthropique (domestique et agricole), les données du bore et autres polluants analysés viendront compléter ce premier diagnostic.

Pour les autres aquifères, on retrouve les pôles des eaux superficielles, des formations carbonatées de l'Oligocène et du Crétacé et de la molasse captive avec de faibles concentrations en nitrate et en chlorures. Les points d'eau échantillonnés dans ces aquifères sont peu impactés par des pollutions d'origine anthropique.

Par contre, les alluvions récentes représentent une gamme de concentrations en NO₃ et Cl plus importante, certains points d'eau ayant une concentration en nitrates se rapprochant fortement des 50 mg/L, ce qui traduit une faible protection de cet aquifère face aux pollutions.

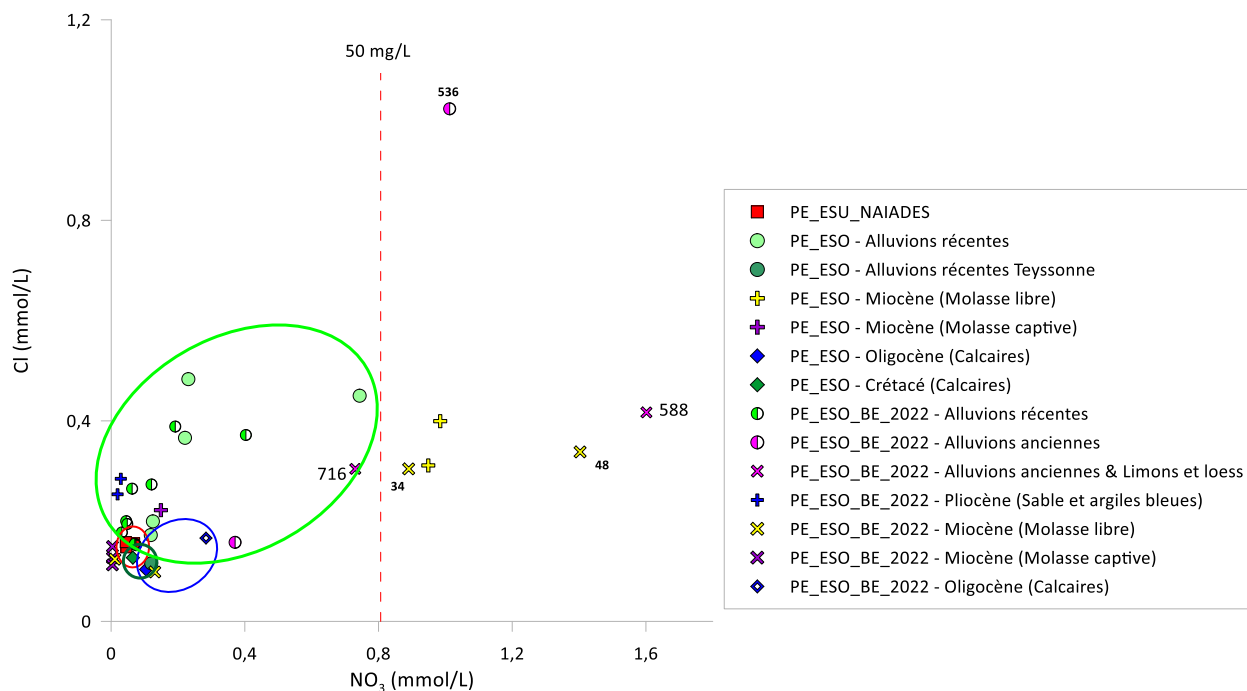


Figure 116 : Diagramme Cl (mmol/L) versus NO₃ (mmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) de référence et des points d'eau ESO prélevés en Basses Eaux 2022.

La carte (Figure 117) présente les concentrations en nitrate mesurées dans les eaux souterraines ainsi que les valeurs mesurées sur les 3 affluents de la rive gauche de la Drôme qui ont pu être échantillonnés : La Grenette (aval), Lambres et Villeneuve. Seul ce dernier cours d'eau présente une concentration en nitrate supérieure à 25 mg/L.

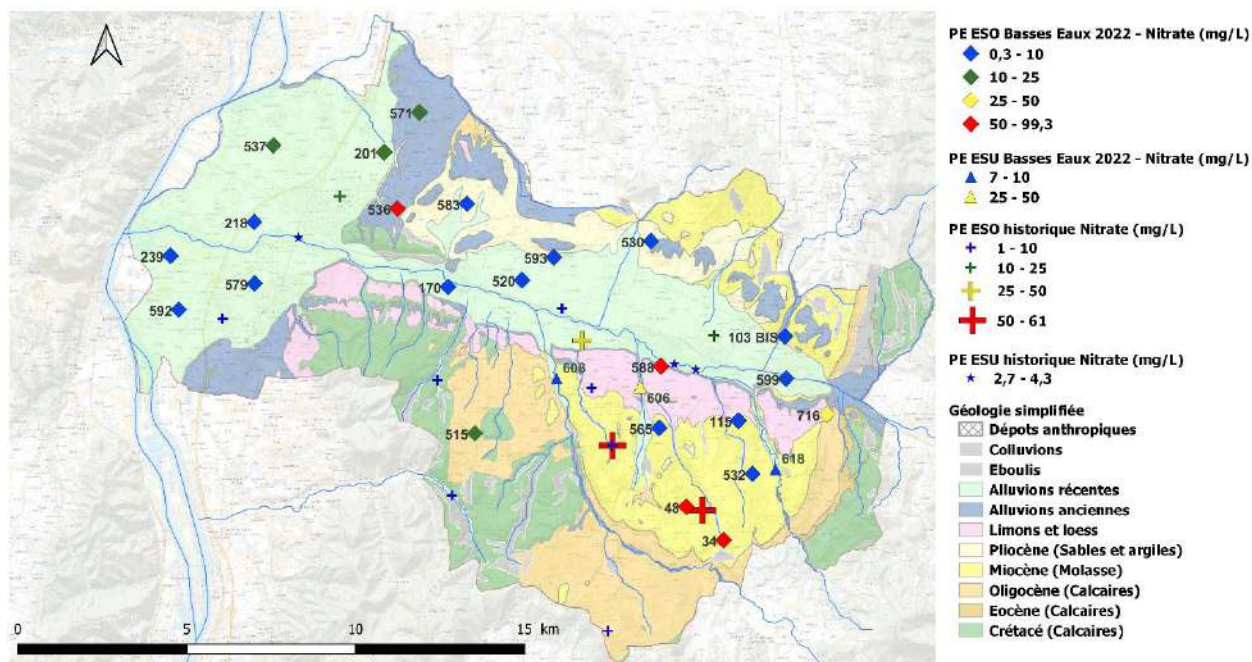


Figure 117 : Carte des concentrations moyennes en nitrate (mg/L) des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données « qualité » historiques.

8.3.4. Eléments traces

a) Le bore

Les diagrammes B versus HCO_3 (Figure 118), B versus NO_3 (Figure 119) et B versus $\text{Na} + \text{K}$ (Figure 120) permettent de distinguer à nouveau les différents contextes aquifères de la zone d'étude :

- Les eaux superficielles (cercle rouge) ;
- Les eaux de l'aquifère des calcaires crétacés (cercle vert foncé)
- Les eaux de l'aquifère des calcaires de l'Oligocène (cercle bleu) ;
- Les eaux des alluvions récentes, avec le point ID 571 des alluvions anciennes (cercle vert clair) ;
- Les eaux de la molasse libre du Miocène (cercle jaune) ;
- Les eaux de la molasse captive du Miocène (cercle violet).

Les points d'eau les plus enrichis en bore sont les points des alluvions récentes et des alluvions anciennes, les points d'eau des limons et loess (ID 716).

Les graphiques permettent aussi de mettre en évidence la proximité hydrochimique des points d'eau superficielle et les points d'eau des alluvions. Les concentrations en bore plus importantes dans les eaux des alluvions récentes peuvent être mises en relation avec la présence de systèmes d'assainissement collectif (STEU) sur le secteur d'étude (Figure 121).

Les points d'eau souterraine des calcaires de l'Oligocène et du Crétacé sont peu impactés en bore et en nitrate. Ces points d'eau sont relativement protégés des pollutions d'origine anthropique.

Le diagramme B versus NO_3 (Figure 119) permet de distinguer la molasse libre de la molasse captive. La molasse libre non contaminée en bore (ID 48 et ID 34 Figure 121) est par contre beaucoup plus contaminée en nitrate (Figure 117). Ces points sont dans un contexte où la pression anthropique est essentiellement agricole.

Le point d'eau captant les limons et loess (ID 716) et celui des alluvions anciennes (ID 536) sont à la fois contaminés en bore et en nitrate (Figure 119). Leur implantation géographique (Figure 121) et les caractéristiques hydrogéologiques expliquent vraisemblablement ces concentrations : ces deux points captent en effet une nappe libre située dans un environnement comportant des habitations plus ou moins isolées et des parcelles à usage agricole.

Pour la molasse captive, plus précisément pour le point plus riche en bore et en hydrogénocarbonates (ID 583) (Figure 118), l'origine de cette concentration en bore plus élevée a, a priori, une origine différente, vraisemblablement naturelle. En effet, en plus d'une concentration en nitrate inférieure à la LQ (Figure 119), le point de la molasse captive (ID 583) a également la concentration en ions alcalins la plus élevée (Figure 120), indiquant vraisemblablement des eaux évoluées, plus anciennes, ceci avait été également observé dans les travaux de Cave (2011).

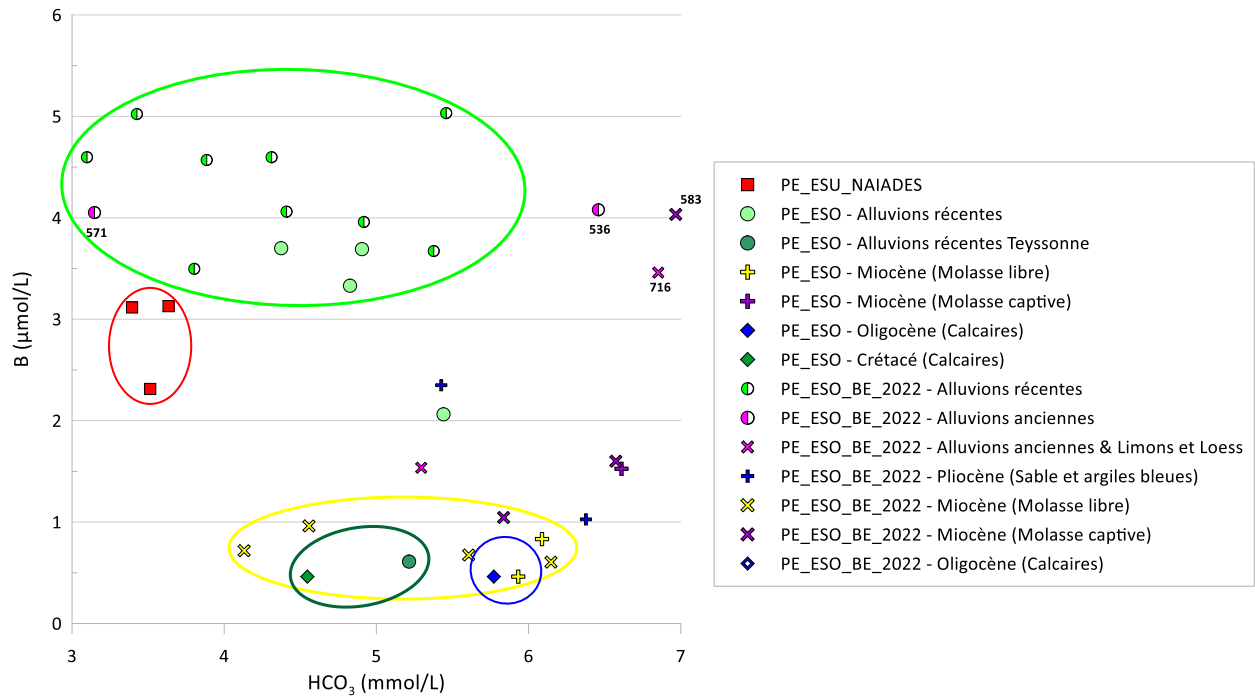


Figure 118 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus HCO_3 (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

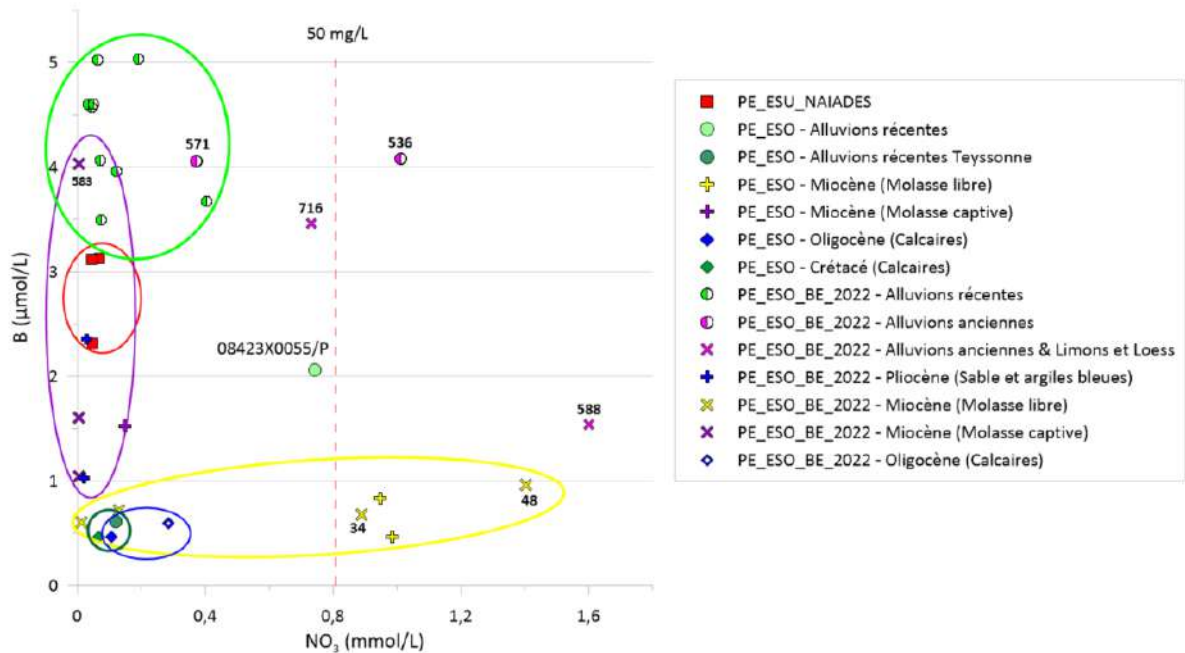


Figure 119 : Diagramme B ($\mu\text{mol/L}$) versus NO_3 (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

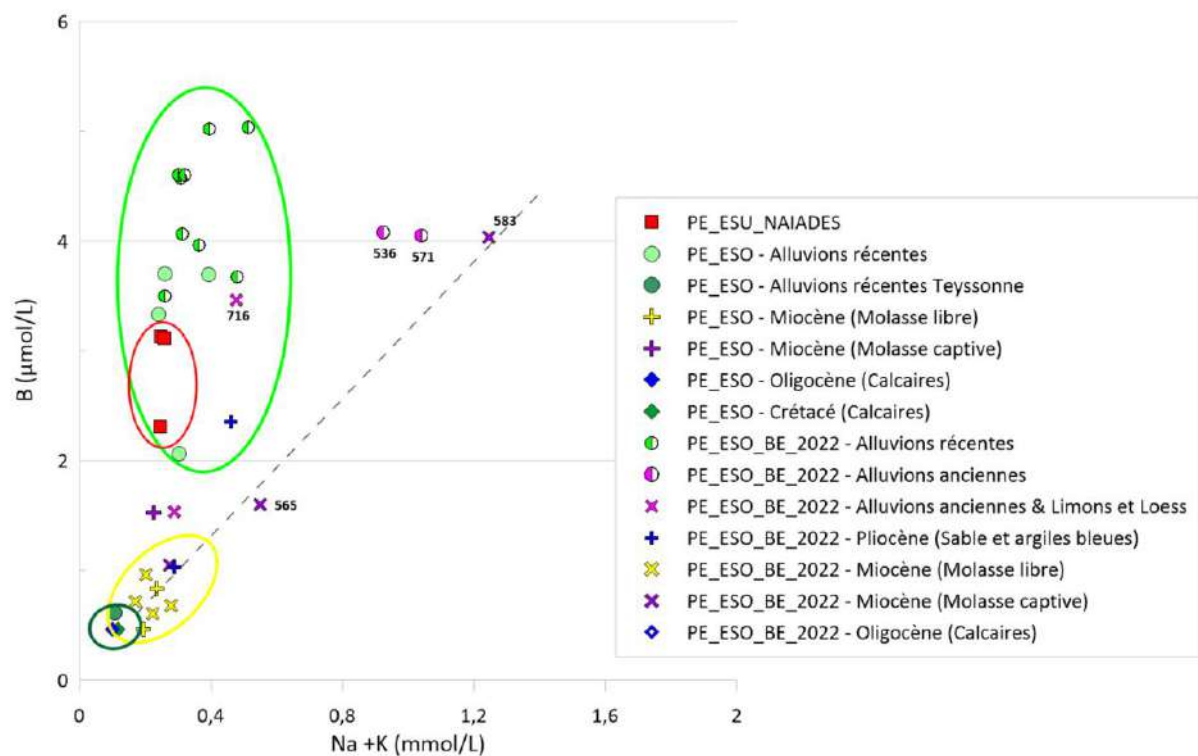


Figure 120 : Diagramme B (µmol/L) versus Na + K (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

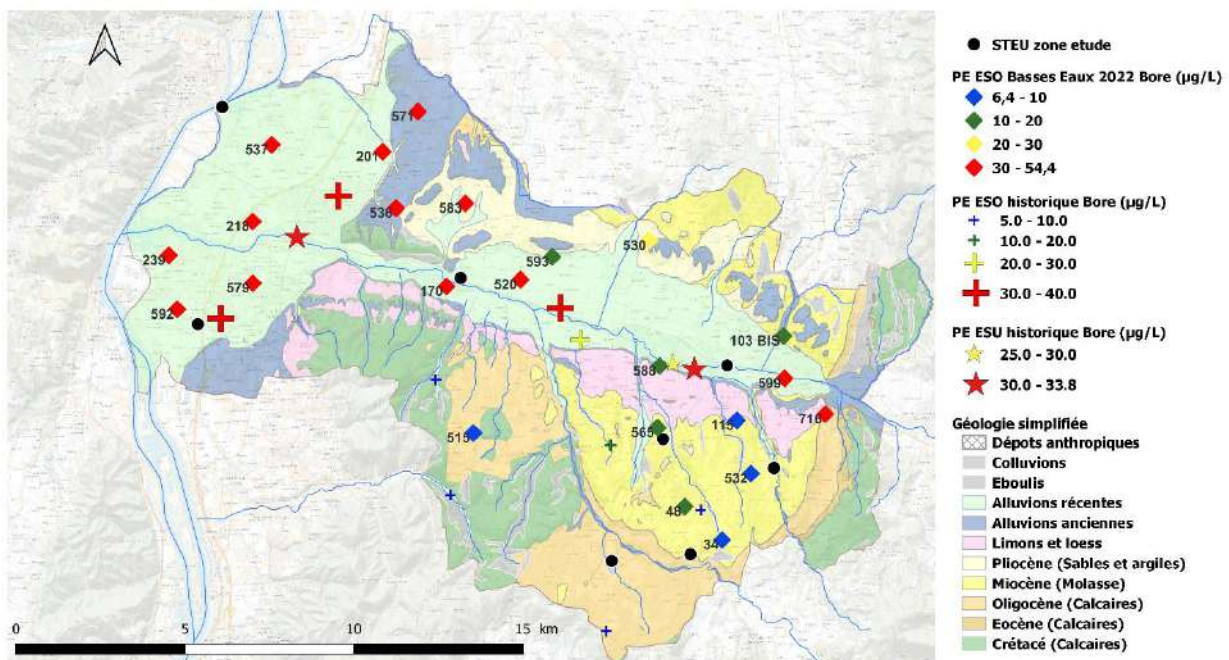


Figure 121 : Carte des concentrations moyennes en bore (µg/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne Basses Eaux 2022 et des données historiques ESO et ESU ; localisation des STEU du secteur d'étude.

b) Le fluor

Les données de concentrations en fluor des eaux souterraines de la campagne de basses eaux 2022 sont présentées dans le digramme Ca versus F (Figure 122) avec les données « qualité » historiques.

Deux points se détachent particulièrement en raison de leurs fortes concentrations en fluor : le point « historique » 08427X0026/HY (La Roche sur Grâne) des calcaires Oligocène et le point ID 716 des alluvions anciennes & limons et loess (Divajeu). Ce dernier point est situé en aval et à faible distance de formations oligocènes. La présence de fluorite dans les formations oligocènes pourrait expliquer le fluor retrouvé dans les eaux de ces deux points. Pour le point de Divajeu, la présence de fluor met en évidence une relation entre les deux contextes hydrogéologiques.

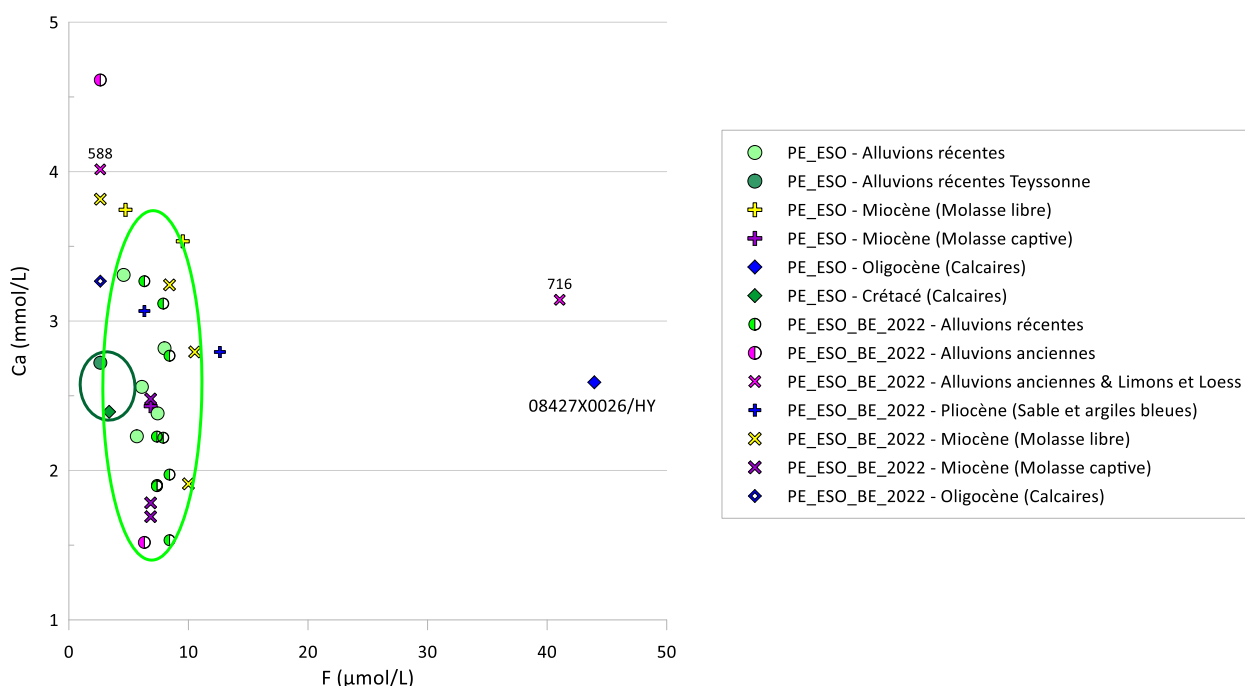


Figure 122 : Diagramme Ca (mmol/L) versus F (mmol/L) des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

8.3.5. Autres éléments pouvant refléter un impact anthropique

a) Substances émergentes

Lors de la campagne de basses eaux 2022, des analyses des émergents suivants ont été réalisées sur les eaux souterraines : 4-nonylphénol ramifiés ; Bisphénol A ; Carbamazépine ; Paracétamol ; Triclosan ; Caféine ; Ethylparabène ; Tolyltriazole ; Propylparabène ; Méthylparabène ; Triclocarban ; Benzotriazole.

Sur l'ensemble des paramètres analysés, seuls 3 paramètres dépassent les limites de quantification, tout en restant toutefois à des concentrations inférieures à 0,1 µg/L :

- le bisphénol A (ID 579 dans les alluvions récentes) ;
- la caféine (ID 579 et ID 201 dans les alluvions récentes ; ID 103 BIS et ID 583 dans la molasse captive du Miocène) ;

- le benzotriazole (ID 530 dans les sables et argiles bleues du Pliocène ; ID 536 dans les alluvions anciennes ; ID 565 dans la molasse captive).

En outre, pour ces points d'eau, les concentrations en bore peuvent être non négligeables. Néanmoins, il faut distinguer à minima deux cas distincts. Tout d'abord, les aquifères superficiels, non ou peu protégés, comme ceux des alluvions récentes et des sables et argiles bleues du Pliocène, qui sont sensibles aux pollutions d'origine anthropique, marquées ici par la présence de substances émergentes et des concentrations en bore élevées. Dans un second cas, les aquifères plus profonds, supposés protégés, comme ceux de la molasse captive (ex. ID 565 et ID 583), qui naturellement peuvent avoir des concentrations en bore plus élevées, liées à des eaux plus évoluées ; mais qui a priori peuvent **localement** être contaminés par des apports superficiels contaminés, mis en évidence ici par la présence de molécules émergentes.

Ces données complètent les données historiques (cf. paragraphe 8.2.), où il avait été quantifié :

- du paracétamol avait été quantifié pour le point d'eau 08423X0051/P dans les alluvions récentes ;
- du bisphénol A pour les points d'eau 08427X0022/HY et 08428X0003/HY (molasse libre) et 08427X0035/F (molasse captive).

Toutes ces données mettent en avant la vulnérabilité des aquifères alluvionnaires et molassiques vis-à-vis des activités anthropiques.

Analyse en composantes principales

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir des concentrations en bisphénol A, caféine, benzotriazole, NO₂ (nitrite), NO₃ (nitrate), B (bore), Fe (fer), PO₄ (phosphates) selon les contextes hydrogéologiques des eaux prélevées en basses eaux 2022. Les résultats sont présentés dans les graphiques suivants (Figure 123 et Figure 124).

Cette analyse permet d'identifier trois pôles distincts :

- Un pôle caractérisé par les nitrates et nitrites, constitué principalement par des points d'eau dans la molasse libre du Miocène et dans les limons et lœss qui reflète une contamination d'origine agricole ;
- Un pôle qui se distingue par la caféine, le bisphénol A et le bore, constitué principalement par des points d'eau dans les alluvions récentes, mais aussi par quelques points d'eau dans les alluvions anciennes et dans la molasse captive du Miocène. La présence de substances émergentes traduit une contamination d'origine domestique ;
- Un pôle contaminé en benzotriazole et avec des concentrations en fer plus élevées, constitués par des points d'eau du Pliocène, ainsi qu'un point dans la molasse captive du Miocène.

Cette analyse permet de compléter la caractérisation hydrogéochimique de l'hydrosystème de la zone d'étude.

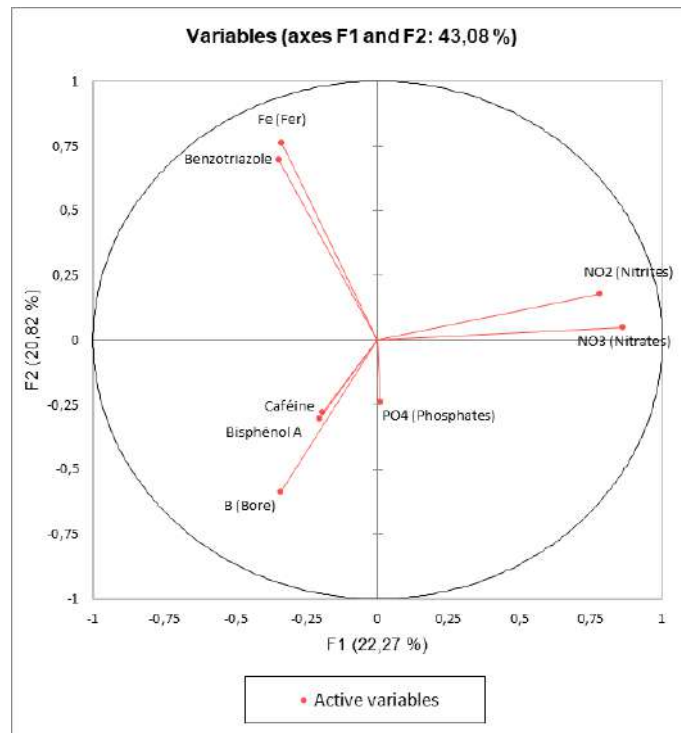


Figure 123 : Cercle des corrélations

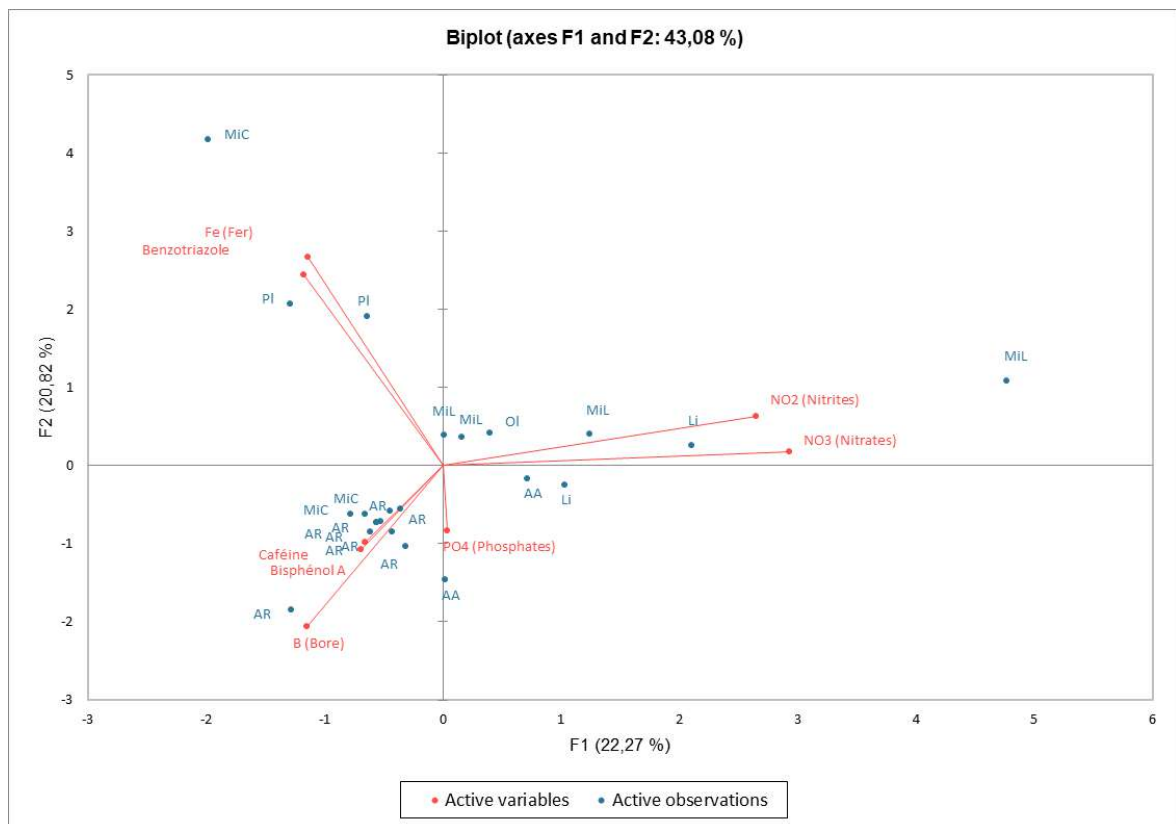


Figure 124 : Graphique des observations et variables actives pour les axes F1 et F2 dont les valeurs propres représentent près de 43 % de la variabilité cumulée (Légende des affectations hydrogéologiques : Alluvions récentes : AR, Alluvions anciennes : AA, Limons et loess : Li, Pliocène

(Sable et argiles bleues) : *Pl*, Miocène (Molasse libre) : *MiL*, Miocène (Molasse captive) : *MiC* Oligocène (Calcaires) : *OI*).

b) Terres rares

Des analyses des terres rares ont été effectuées par ICP-MS sur les prélèvements d'eau souterraine de la campagne de basses eaux 2022. Les éléments analysés sont décrits dans le Tableau 27 avec leur limite de quantification.

Paramètre	Code Sandre	LQ	Méthode	Unité
Dy (Dysprosium)	6068	0.1	ICP-MS	ng/L
Er (Erbium)	6069	0.1	ICP-MS	ng/L
Eu (Europium)	5874	0.5	ICP-MS	ng/L
Gd (Gadolinium)	2788	0.5	ICP-MS	ng/L
Ho (Holmium)	6072	0.1	ICP-MS	ng/L
Lu (Lutétium)	6073	0.1	ICP-MS	ng/L
Pr (Praséodyme)	5876	0.5	ICP-MS	ng/L
Sm (Samarium)	5875	0.5	ICP-MS	ng/L
Tb (Terbium)	5873	0.1	ICP-MS	ng/L
Tm (Thulium)	6079	0.1	ICP-MS	ng/L
Y (Yttrium)	2798	10	ICP-MS	ng/L
Yb (Ytterbium)	6080	0.1	ICP-MS	ng/L
Ce (Cérium)	1801	1	ICP-MS	ng/L
Nd (Neodyme)	5877	0.5	ICP-MS	ng/L
La (Lanthane)	3347	1	ICP-MS	ng/L

Tableau 27 : Terres rares analysées et limite de quantification.

Pour les 23 échantillons analysés, seuls deux éléments n'ont pas été quantifiés : praséodyme (Pr) et terbium (Tb). Pour les autres terres rares, les résultats et le nombre de point d'eau ayant des résultats quantifiés varient selon l'élément analysé. Les éléments les plus quantifiés sont dans un ordre décroissant : l'yttrium (22/23), le dysprosium (20/23), l'erbium (18/23), l'euporium (16/23), le lanthane (15/23).

L'yttrium peut être rejeté dans l'environnement par les industries productrices d'essence (catalyseur pour craquage, additifs) et lors de la mise en décharge de certains équipements ménagers (écrans de télévision par ex.). Il peut être également utilisé lors des radiothérapies. L'yttrium a été quantifié 22 fois sur 23 échantillons ; seul le point d'eau (ID 593) dans les sables et argiles bleues du Pliocène a un résultat d'analyse inférieur à la LQ. Les valeurs quantifiées sont comprises entre 18 et 275 ng/L ; les valeurs les plus élevées correspondent à des points d'eau captant les alluvions récentes (Figure 125). Une relation semble se dessiner entre les concentrations en bore et la présence d'yttrium dans les eaux souterraines, en particulier dans les aquifères alluviaux. La valeur la plus élevée avec 275 ng/L correspond à un puits (ID 599) situé dans les alluvions récentes à proximité de l'hôpital de Crest, ce point d'eau est également marqué par la présence de gadolinium.

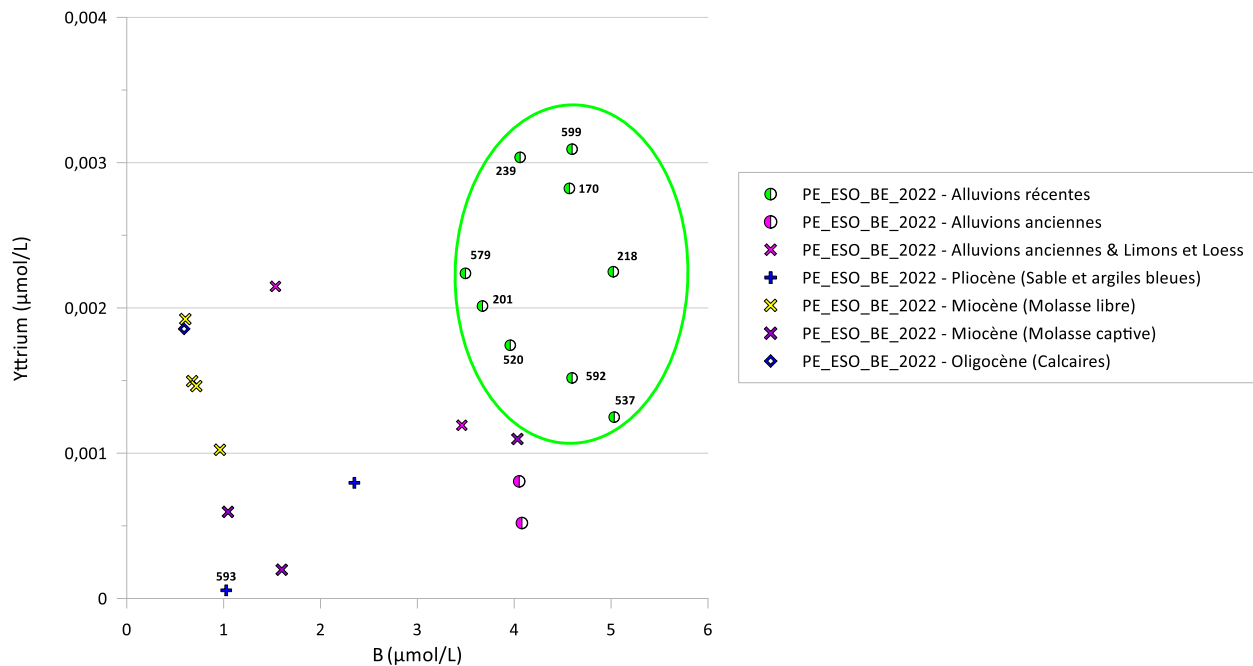


Figure 125 : Diagramme Y (µmol/L) versus B (µmol/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.

Le dysprosium (Dy) et l'erbium (Er), comme les autres terres rares, peuvent se retrouver dans l'environnement par les industries productrices d'essence (catalyseur pour craquage, additifs), mais aussi par nos déchets, comme certains équipements ménagers (télévision par exemple). Le diagramme Dy versus Er (Figure 126) met en évidence une relation linéaire ($R^2 = 0,83$) entre les concentrations de dysprosium et d'erbium dans les eaux souterraines prélevées en basses eaux 2022. Les points d'eau qui ont les concentrations les plus importantes sont situés dans les alluvions récentes, mais aussi dans les alluvions anciennes pour le point ID 536.

On peut aussi comparer les concentrations en dysprosium (Dy) et l'euprium (Eu) (Figure 127). Par contre, on ne constate pas de relation linéaire entre les 2 éléments. Les concentrations les plus élevées en euprium se retrouvant dans les points des alluvions anciennes & Limons et Loess (ID 716) ou de la molasse miocène (ID 583).

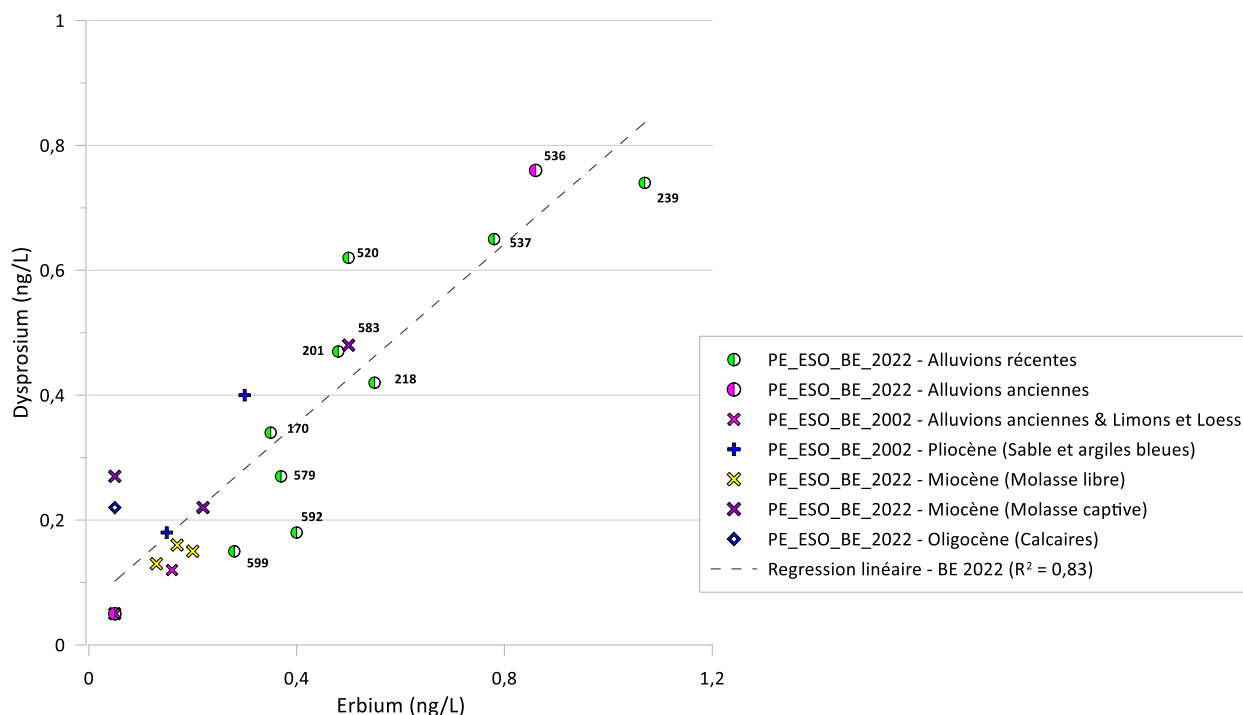


Figure 126 : Diagramme Dy (ng/L) versus Er (ng/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.

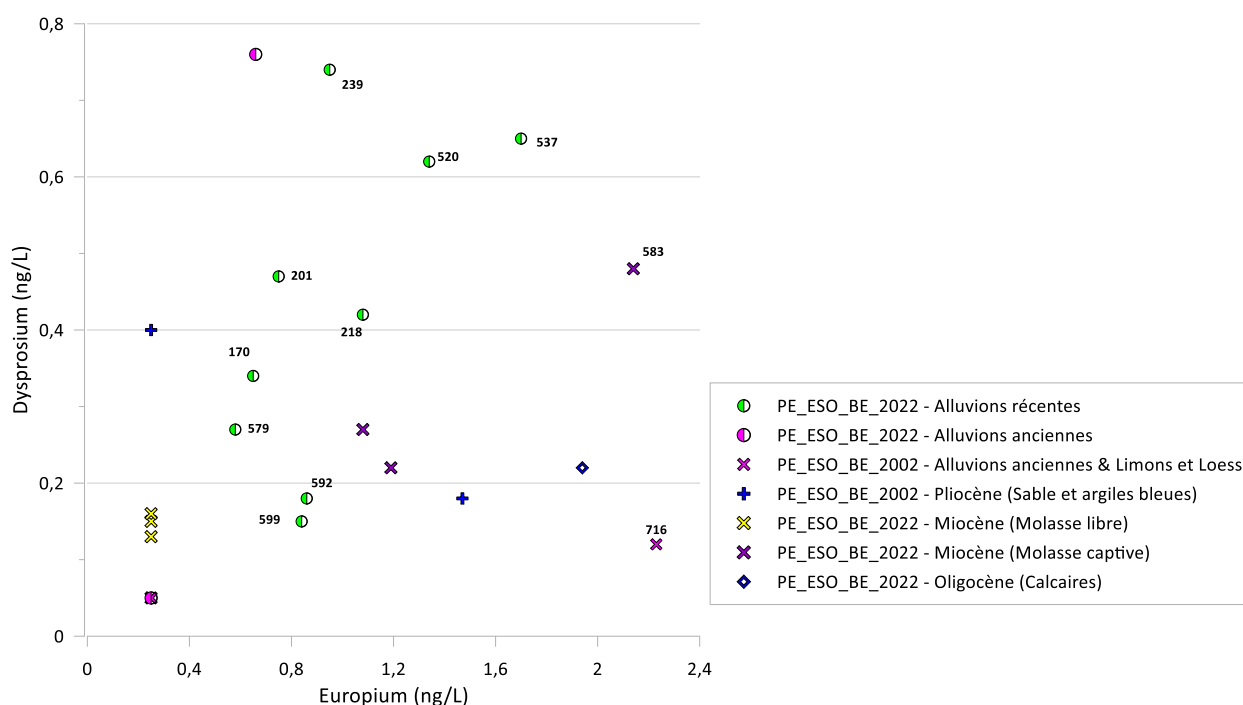


Figure 127 : Diagramme Dy (ng/L) versus Eu (ng/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne de Basses Eaux 2022.

Parmi les terres rares, le gadolinium est un produit de contraste utilisé notamment lors des IRM ; d'un point de vue hydrogéochimique, il peut être utilisé comme marqueur de réseaux d'assainissement. Les résultats d'analyses du gadolinium réalisés en basses eaux 2022 n'ont été quantifiés que pour les points d'eau souterraine captant les alluvions récentes (Figure 128). En

couplant les résultats du gadolinium à ceux du bore, on met en évidence notamment l'impact des rejets des assainissements urbains. Sur le diagramme Gd vs B (Figure 128), les points d'eau des alluvions récentes ayant les plus fortes concentrations en gadolinium sont les points d'eau ID 170 et ID 218 ; ces deux points d'eau se situent tous deux à quelques centaines de mètres du cours d'eau de la Drôme. De plus, le point ID 170 est situé à environ 600 m en aval de la station d'épuration d'Allex-Grâne, les teneurs en bore et en gadolinium relevé dans cet ouvrage sont a priori dues en grande partie à la présence de cette station d'épuration juste en amont.

Le point d'eau ID 537, marqué par une concentration en bore relativement élevée et une concentration non négligeable en gadolinium, est quant à lui situé dans les alluvions récentes à moins de 2 km en aval hydraulique de la station d'épuration de Livron-sur-Drôme. De plus, il est à noter que dans ce même secteur, un centrage d'imagerie médicale est présent sur la commune de Livron-sur-Drôme.

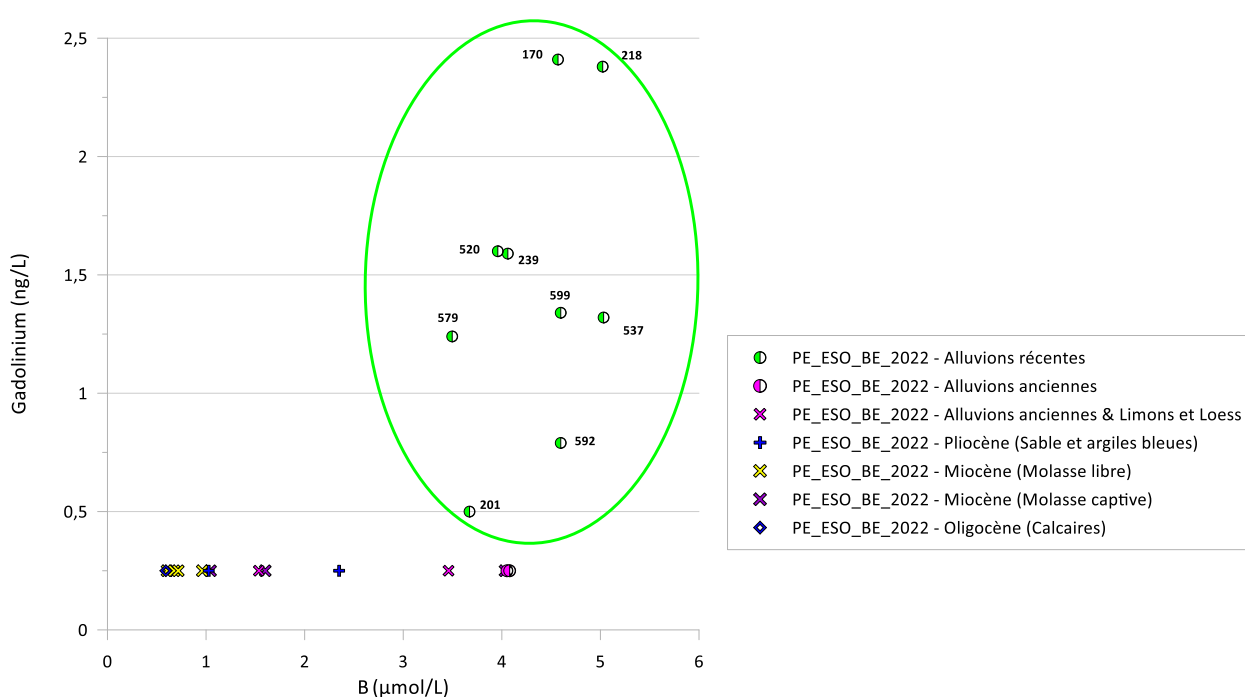


Figure 128 : Diagramme Gd (ng/L) versus B (µg/L) des points d'eau souterraine (ESO) de la campagne basses eaux 2022

8.4. DONNEES ACQUISES EN 2023 : FORAGE DE GRANE

Le forage de Grâne (ID 800, code BSS : BSS004GYJR), achevé en février en 2023 capte l'aquifère captif de la molasse miocène (cf Chap 6.2.) Les prélèvements d'eau ont été réalisés après pompage le 15 mars 2023.

8.4.1. Données des paramètres physico-chimiques *in situ*, éléments majeurs et traces

Les paramètres physico-chimiques, mesurés sur site le 15/03/2023 à la fin de la réalisation du forage sont conformes aux valeurs connues du secteur d'étude (Figure 129), en lien avec la nature hydrogéologique de l'aquifère (Miocène – molasse nappe captive), à savoir un pH de 7,4 ; une température de l'eau de 15,8°C, une conductivité électrique à 25°C de 721 $\mu\text{S}/\text{cm}$; un potentiel d'oxydoréduction corrigé (Eh corrigé) de 232 mV.

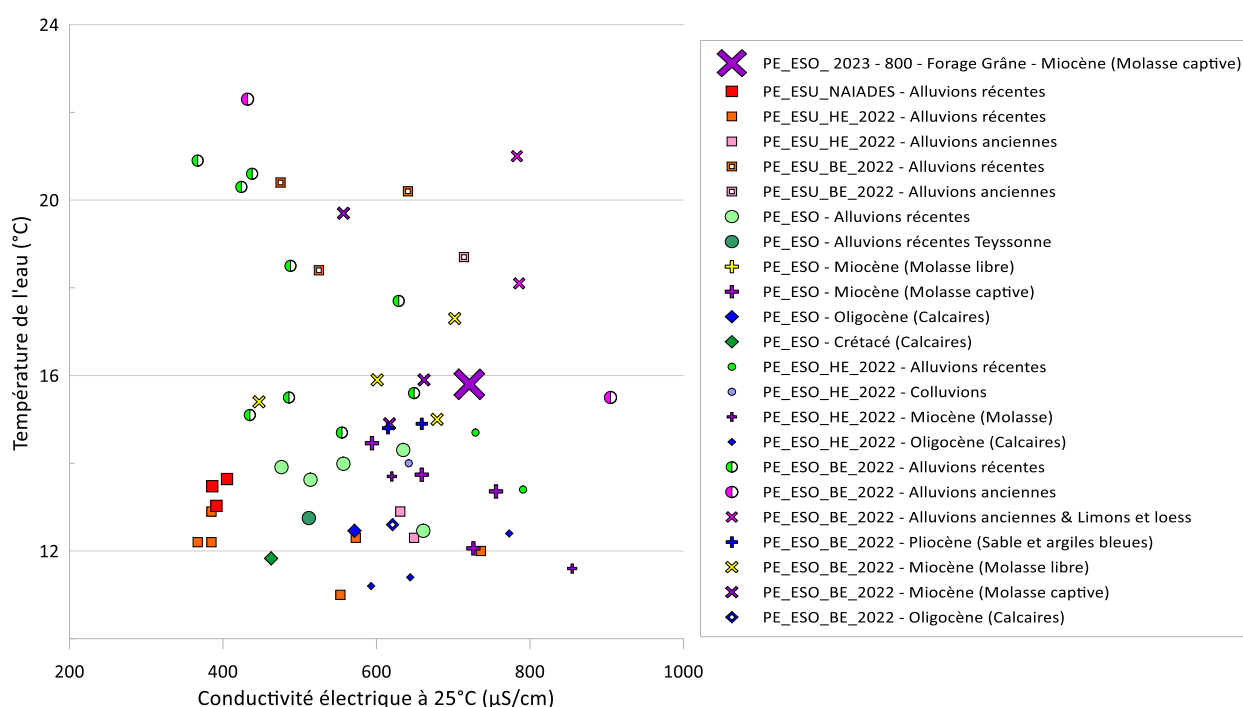


Figure 129 : Diagramme température de l'eau (°C) versus conductivité du forage de Grâne (2023), des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU) historiques, et des données des campagnes Hautes Eaux et Basses Eaux 2022.

Les résultats d'analyses des éléments majeurs présentent une balance ionique, avec 0,3 %, excellente. De plus, la bonne corrélation entre le TDS et la conductivité électrique à 25°C confirme la qualité d'analyse du point d'eau (Figure 130). Ce diagramme, TDS vs conductivité, permet aussi de mettre en évidence que l'eau du forage de Grâne a une minéralisation plutôt élevée pour le secteur d'étude, conforme aux eaux de la molasse miocène.

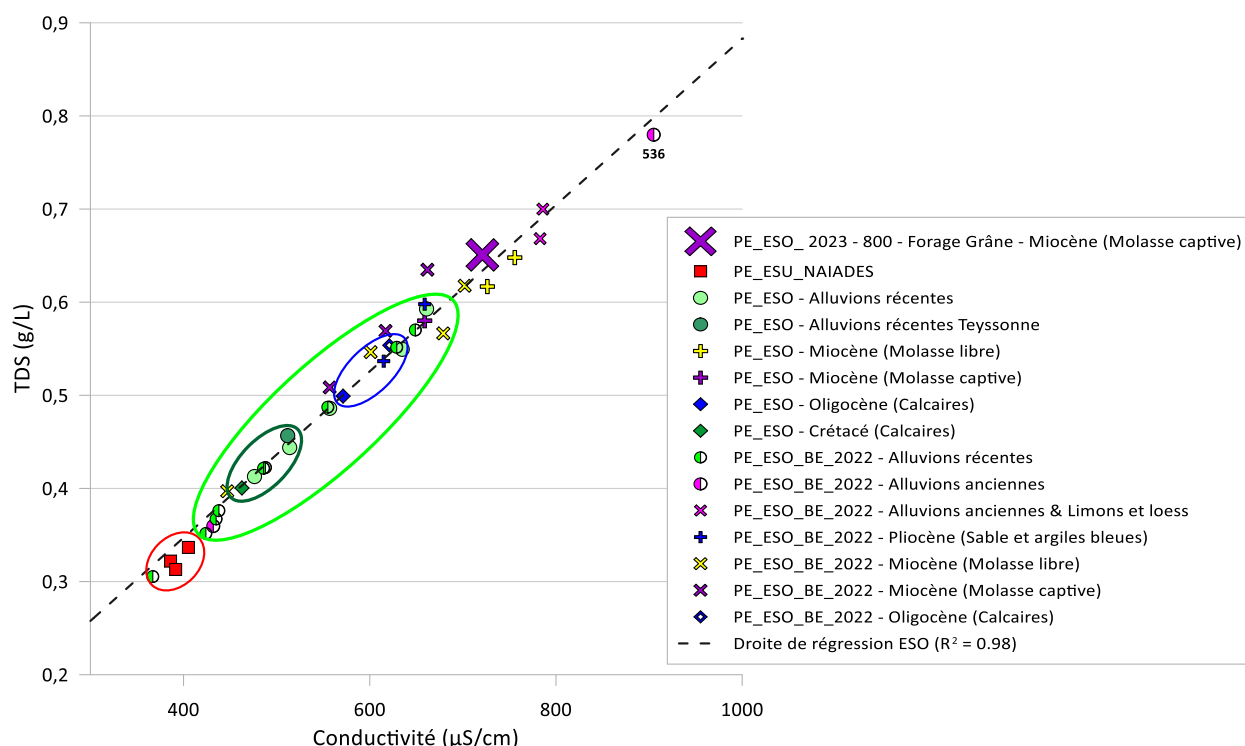


Figure 130 : Diagramme TDS (g/l) versus conductivité électrique (μS/cm) du forage de Grâne (2023), des points d'eau souterraine pour les données historiques (PE ESO), des points d'eau superficielle historiques (PE ESU) et des points d'eau prélevés en BE 2022 (PE ESO BE 2022)

A partir des concentrations en éléments majeurs, le point d'eau du forage de Grâne a été ajouté dans le diagramme de Piper (Figure 131), comportant toutes les données utilisées dans cette étude (données historiques ADES et NAIADES ; campagne 2022).

L'eau du forage de Grâne présente un faciès bicarbonaté-calcaïque ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), en adéquation avec le contexte hydrogéologique (Figure 131). La localisation du point dans le diagramme de Piper indique à la fois un appauvrissement en Ca et en enrichissement en Mg ; mais aussi un net enrichissement en Na + K par rapport à l'ensemble des eaux ESO et ESU du secteur d'étude. A partir de ces premières constatations, il apparaît que l'eau de ce forage est plus évoluée que les eaux prélevées jusqu'alors dans ce projet.

D'après de la Vaissière (2006) et Cave (2011), le forage de Grâne se situerait dans un secteur avec des eaux évoluées (Figure 132). Ces eaux sont marquées par des concentrations élevées en magnésium, sodium et potassium et de faibles teneurs en nitrate. Les résultats d'analyses des éléments majeurs (Mg, Na, K) du forage de Grâne confirment cette hypothèse, ainsi que les résultats d'analyses pour NO_3 et NO_2 qui sont inférieurs à la LQ. Les concentrations mesurées dans l'eau du forage de Grâne sont également cohérentes avec les cartes de répartition présentées par Cave (2011) pour les éléments majeurs.

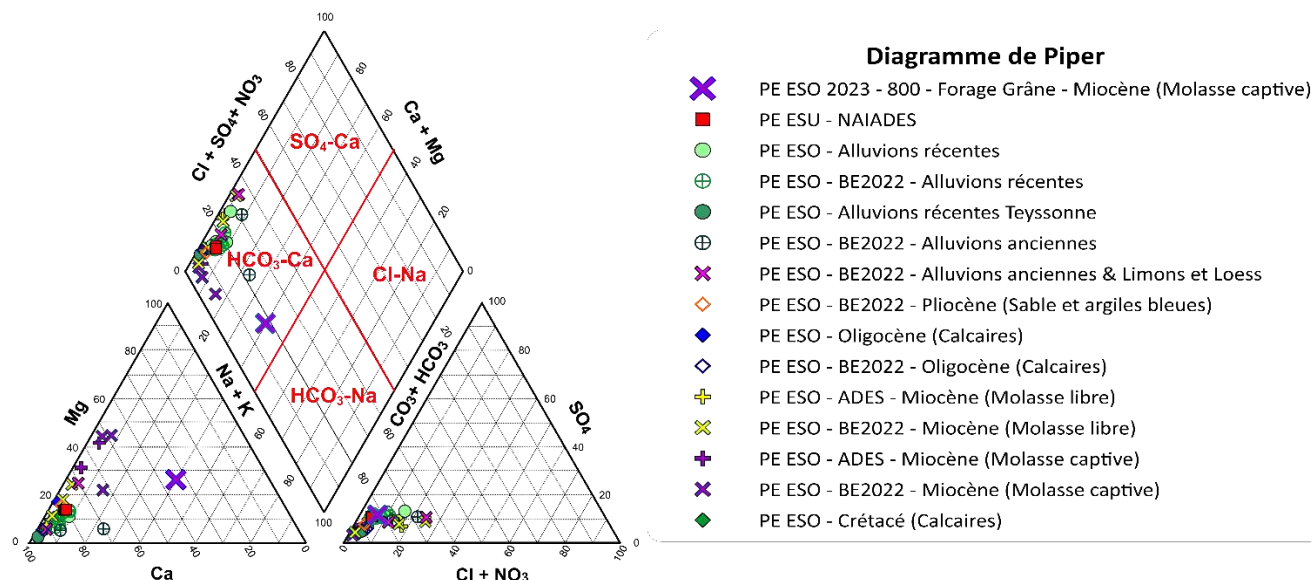


Figure 131 : Diagramme de Piper de l'eau du forage et de l'ensemble des points d'eau souterraine (ESO et ESU) suivis dans le projet.

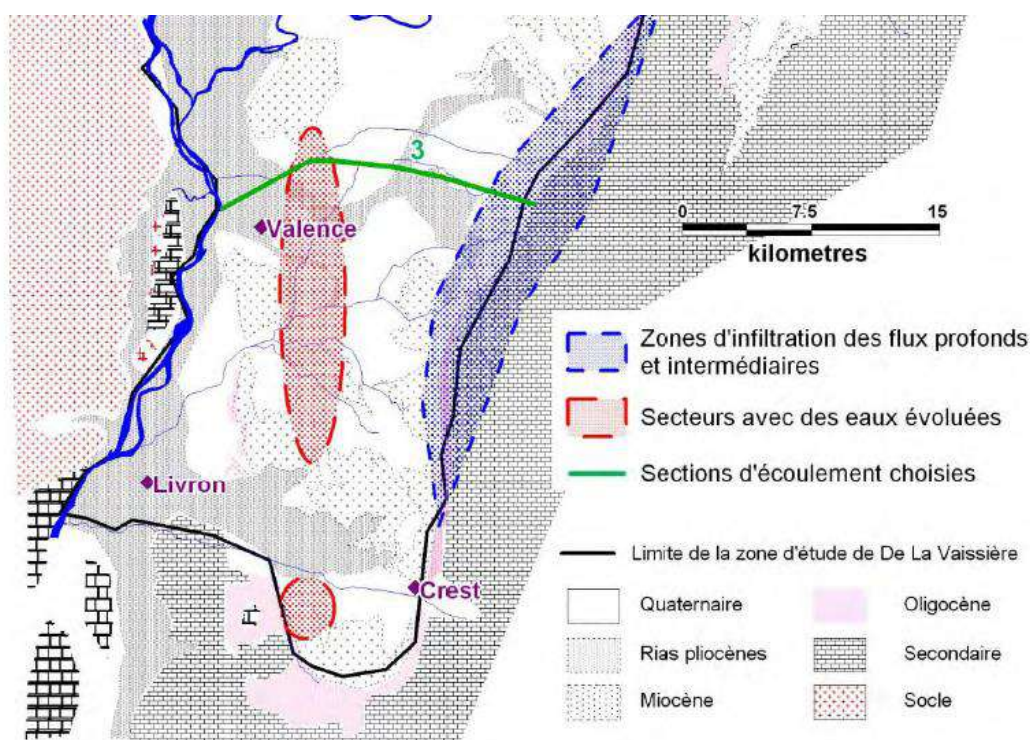


Figure 132 : Carte de synthèse des résultats de la Vaissière (2006), extrait de Cave (2011).

Les concentrations en $\text{Ca} + \text{Mg}$ et HCO_3 (Figure 133) confirment la signature d'eau évoluée de ce point d'eau, marquée notamment par les phénomènes d'interactions eau-roche avec les carbonates, déjà démontrés par De la Vaissière (2006), Cave (2011) et Lions et al. (2013) ; avec la précipitation de calcite et la dissolution de dolomite. Dans le diagramme $\text{Ca} + \text{Mg}$ versus HCO_3 (Figure 133), le point d'eau ID 800 se situe bien en dessous de la droite 1 : 4 ; indiquant un mécanisme de dissolution de la dolomite (Cf. De la Vaissière, 2006).

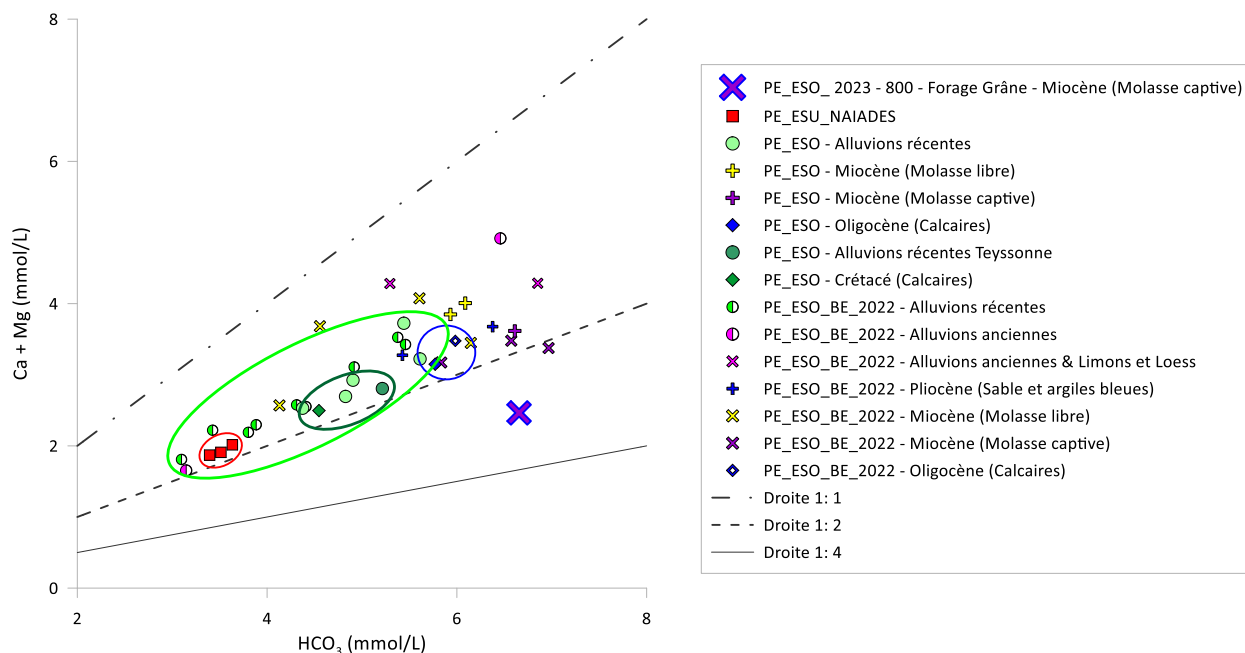
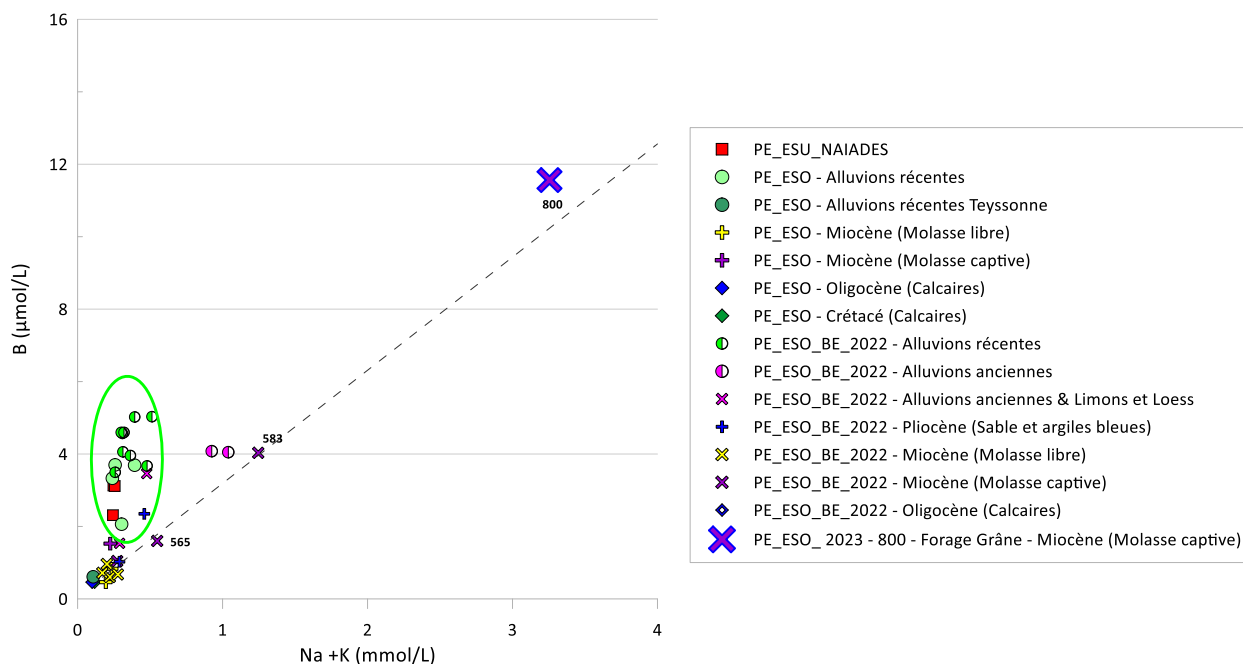


Figure 133 : Diagramme $\text{Ca} + \text{Mg}$ (mmol/L) versus HCO_3 (mmol/L) du forage de Grâne (2023), des données historiques des points d'eau souterraine (ESO) et superficielle (ESU), et des données de la campagne de Basses Eaux 2022.

En plus des processus d'interactions eau - roche avec les carbonates (dissolution de dolomite et précipitation de calcite), la chimie de l'eau du forage de Grâne indique également des réactions avec échanges de base (substitution d'un ion alcalino-terreux par un ion alcalin), dues à la fraction argileuse présente dans l'aquifère molassique. En effet, les concentrations en Na (71 mg/L) et en Mg (27 mg/L) proviennent des interactions eau-roche avec les carbonates, mais aussi aux échanges de base, avec un gain en Na + K et une perte en Ca + Mg. Ceci a été démontré pour l'aquifère molassique par De la Vaissière (2006) et Cave (2011). De plus, la concentration en bore (125 $\mu\text{g/L}$), qui est très élevée pour le secteur (Figure 134) vient confirmer le caractère évolué de l'eau de l'aquifère de la molasse miocène captée par le forage de Grâne. On remarquera également, que sur le diagramme B versus Na +K (Figure 134), la relation linéaire pour les eaux de la molasse miocène captive, déjà mise en évidence pour les points d'eau ID 565 et ID 583, est confirmée par l'eau du forage de Grâne (ID 800), marquée par un fort enrichissement en Na + K et B.

L'horizon capté par le nouveau forage de Grâne est profond, protégé de tout apport anthropique, la concentration en bore relativement élevée est naturelle. De plus, les concentrations en éléments majeurs et traces mettent en évidence une eau évoluée, et donc très certainement une eau ancienne, ou autrement dit une eau avec un temps de résidence important. Les données des outils de datation, présentées plus loin (chap. 8.4.3.), viendront compléter ces premiers résultats.



8.4.2. Substances émergentes et terres rares

Les analyses des 12 substances émergentes (4-nonylphénol ramifiés ; Bisphénol A ; Carbamazépine ; Paracétamol ; Triclosan ; Caféine ; Ethylparabène ; Tolyltriazole ; Propylparabène ; Méthylparabène ; Triclocarban ; Benzotriazole) par analyse UPLC/MS/MS indiquent des résultats d'analyses inférieurs aux limites de quantification pour les 12 substances. Ceci confirme le caractère captif et protégé de l'aquifère capté par le forage (ID : 800) de Grâne.

Les analyses des terres rares (Dy, Er, Eu, Gd, Ho, Lu, Pr, Sm, Tb, Tm, Y, Yb, Ce, Nd et La) réalisée par ICP-MS, indiquent des résultats d'analyses quantifiés ($> \text{LQ}$) pour seulement 3 éléments : le dysprosium, l'erbium et l'yttrium (Tableau 28). Ces concentrations sont faibles et a priori sont d'origine naturelle.

Paramètre	Code Sandre	LQ	Méthode	Résultat	Unité
Dy (Dysprosium)	6068	0.1	ICP-MS	0.31	ng/L
Er (Erbium)	6069	0.1	ICP-MS	0.26	ng/L
Eu (Europium)	5874	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Gd (Gadolinium)	2788	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Ho (Holmium)	6072	0.1	ICP-MS	<0.10	ng/L
Lu (Lutétium)	6073	0.1	ICP-MS	<0.10	ng/L
Pr (Praséodyme)	5876	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Sm (Samarium)	5875	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Tb (Terbium)	5873	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Tm (Thulium)	6079	0.1	ICP-MS	<0.10	ng/L
Y (Yttrium)	2798	1	ICP-MS	10.1	ng/L
Yb (Ytterbium)	6080	0.5	ICP-MS	<0.50	ng/L
Ce (Cérium)	1801	1	ICP-MS	<1.0	ng/L
Nd (Neodyme)	5877	1	ICP-MS	<1.0	ng/L
La (Lanthane)	3347	1	ICP-MS	<1.0	ng/L

Tableau 28 : Résultats d'analyses en terres rares pour l'eau du forage de Grâne (ID 800) en 2023.

8.4.3. Données des isotopes stables de la molécule d'eau et de datation des eaux

a) Isotopes stables de la molécule d'eau

Les mesures des rapports isotopiques de l'hydrogène et de l'oxygène de la molécule d'eau ont été réalisées au BRGM par la méthode d'équilibration eau-gaz. Les valeurs δD et $\delta^{18}O$ ont été déterminées par rapport à celles obtenues pour des références internes analysées dans les mêmes séquences et rapportées dans l'échelle V-SMOW/V-SLAP. Les résultats sont présentés dans le Tableau 29, ainsi que les incertitudes associées.

N° Echantillon	Nom Echantillon	δD ‰ V-SMOW	$\delta^{18}O$ ‰ V-SMOW
23-6-045-A-001	800 prélevé 15/03/23	-72.9	-10.5
Commentaire : Incertitudes moyennes : ≤ 1 ‰ pour δD , < 0.1 ‰ pour $\delta^{18}O$.			

Tableau 29 : Résultats d'analyses des isotopes stables de la molécule d'eau pour le forage de Grâne (ID 800) en 2023.

Ces résultats d'analyses en isotopes stables ont été comparés aux résultats des travaux de thèse sur le secteur d'étude de De la Vaissière (2006) et Cave (2011), en prenant également en compte les travaux antérieurs comme ceux de Celle (2000) et Gal (2005). Sur la Figure 135, le point d'eau ID 800 est présenté sur un diagramme modifié d'après de la Vaissière (2006). De plus, nous avons ajouté à ce diagramme :

- la droite météoritique locale (DML) déterminée par de la Vaissière (2006), qui avait pour équation $\delta D = 7,6 \delta^{18}O + 7,5$;
- la moyenne des précipitations à Montvendre obtenus par Cave (2011) ;
- la moyenne obtenue pour l'aquifère molassique par Cave (2011).

La position du point d'eau ID 800 dans ce diagramme permet de mettre en évidence que :

- L'eau prélevée dans le forage de Grâne en 2023 a une signature en isotopes stables cohérente par rapport au contexte local ; elle est située sur la droite météoritique locale déterminée par De la Vaissière (2006), qui est proche de la droite météoritique mondiale (WMWL) de Craig (1961) ; mais aussi sur la droite ($\delta D = 7,8 \delta^{18}O + 8,9$) des eaux de forages de l'aquifère molassique de la famille A (sans tritium) déterminée par Cave (2011) ;
- L'eau de ce forage profond est par contre très appauvrie en deutérium et oxygène 18 par rapport aux données connues de l'aquifère molassique, si on la compare aux données de De la Vaissière (2006) et Cave (2011) ;
- L'eau de ce forage est également très appauvrie en deutérium et oxygène 18 par rapport à la moyenne des eaux de pluie à Montvendre, déterminée par Cave (2011).

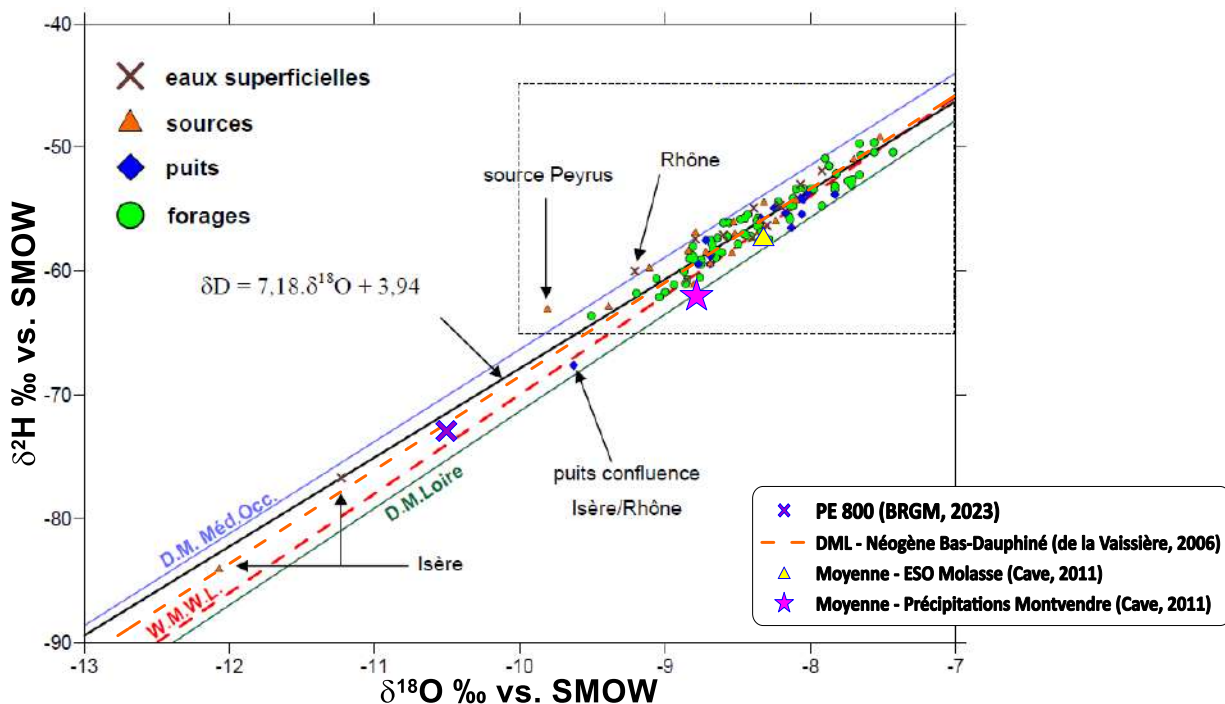


Figure 135 : Diagramme oxygène 18 versus deutérium des eaux du secteur d'étude, modifié d'après de la Vaissière (2006), avec ajout de la DML Néogène du Bas – Dauphine (de la Vaissière, 2006), de la moyenne des eaux de pluies sur Montvendre (Cave, 2011), de la moyenne de l'aquifère molassique (Cave, 2011) et des résultats du nouveau forage dans la molasse miocène de Grâne (2023).

L'eau du forage de Grâne (ID 800) est beaucoup plus appauvrie que les eaux de la famille A, déterminée par Cave (2011), qui correspondent à des eaux de l'aquifère molassique, sans tritium et avec peu ou pas de nitrates, non influencées par des phénomènes d'évaporation d'origine anthropique, probablement infiltrées avant les années 60 ; ceci laisse donc présager une eau au temps de résidence important, donc beaucoup plus ancienne que ce qui a été prélevé et analysé jusqu'à présent sur le secteur d'étude (Cf. Figure 136 et Figure 137).

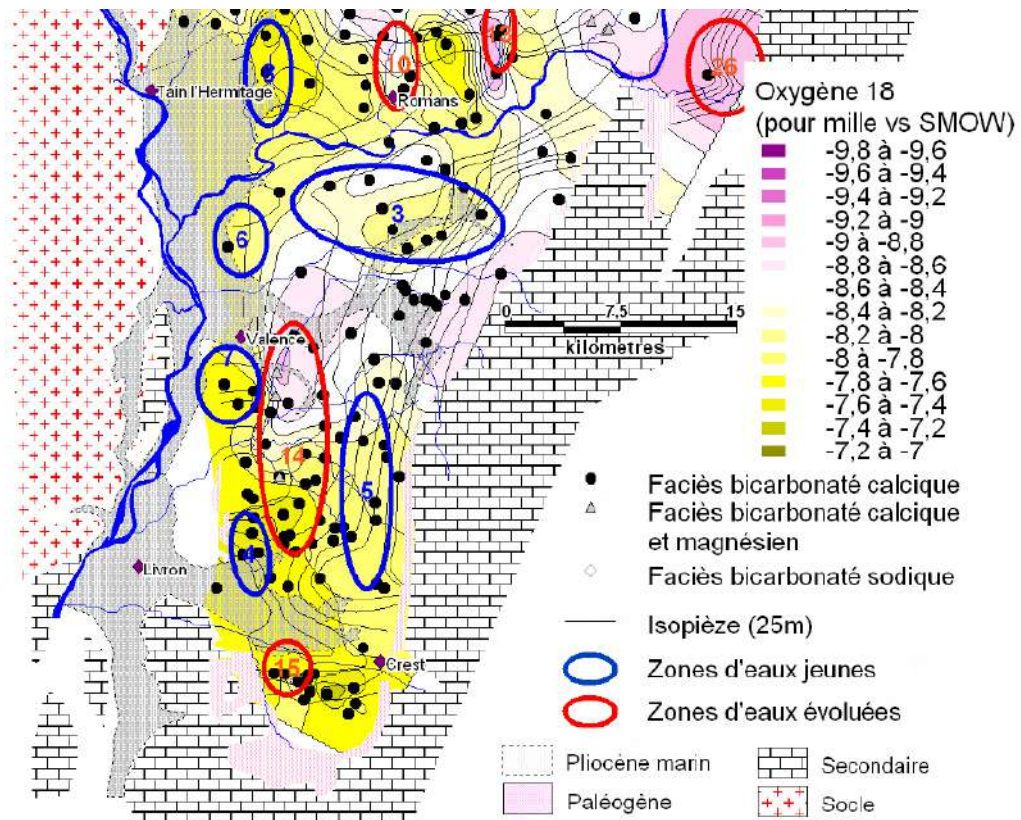


Figure 136 : Extrait de la carte de répartition de l'oxygène 18 dans l'aquifère molassique (Cave, 2011).

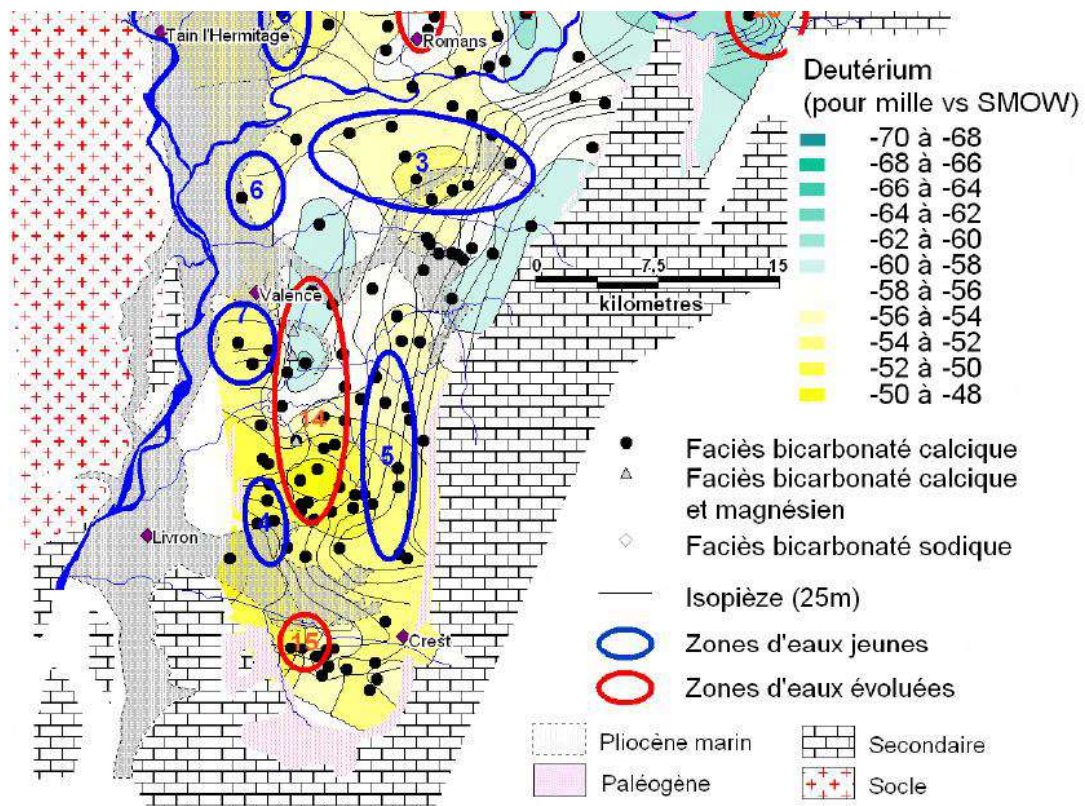


Figure 137 : Extrait de la carte de répartition du deutérium dans l'aquifère molassique (Cave, 2011).

b) Principe de datation par les outils CFC-SF6

Le principe de datation des eaux se base sur un schéma simple (cf. Figure 138). Un prélèvement d'eau est réalisé et les échantillons sont envoyés au laboratoire afin d'analyser les concentrations en gaz dissous CFC-11, CFC-12, CFC-113, SF₆ dans l'eau (concentrations données en pico ou femtomoles.l⁻¹). Il convient ensuite d'exprimer ses concentrations en 'équivalent atmosphère', c'est-à-dire calculer la concentration de l'air qui était en contact avec l'eau lorsque la mise à l'équilibre s'est opérée. Ce sont ces concentrations qu'il conviendra de comparer avec les mesures de concentrations en gaz dans l'atmosphère, à des stations de référence et mesurées depuis plusieurs dizaines d'années à diverses localisations du globe. La dissolution des gaz dans l'eau est contrôlée par différents paramètres : température, pression atmosphérique, salinité. La température utilisée est celle de l'eau mesurée au moment du prélèvement. La pression atmosphérique est calculée à partir de la donnée d'altitude du point de mesure. Les eaux étant peu minéralisées le facteur salinité n'est pas pris en compte ici. Un modèle de circulation de l'eau de la recharge jusqu'à un exutoire (captage) doit également être choisi pour permettre l'estimation des âges apparents.



Figure 138 : Schéma de réalisation de l'estimation des âges apparents des eaux souterraines par traceurs chimiques

La notion d'âge apparent repose sur l'approximation de la distribution des temps de séjour par une fonction mathématique, pour laquelle il est possible de calculer un estimateur tel que la médiane ou la moyenne. Dans le détail la méthode s'appuie sur le fait qu'il est possible de relier la concentration en un traceur au temps t et en un point d'un système aquifère (idéalement son exutoire) à sa concentration incidente au temps $t-i$. Pour pouvoir comprendre la structuration de la distribution des âges, il est donc nécessaire de pouvoir reproduire les concentrations mesurées à l'aide de modèles. Différentes fonctions transferts (modèles) sont utilisées, mais les plus courantes sont les fonctions piston (PFM, piston flow model), exponentielles (EM, exponential model), dispersives (DM, dispersiv model) ou des combinaisons de celles-ci.

Résultats

Les eaux ont été envoyées au laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne) pour analyses des CFC-11, CFC-12, CFC-113 et du SF₆ ; les résultats sont présentés sur la Figure 139 ci-dessous.

sample	date	CFC conc. [pmol/l]			SF ₆ conc. in fmol/l
		CFC-12	CFC-11	CFC-113	
800	14.03.2023	0,09 ±0,05	0,14 ±0,05	0,03 ±0,05	0,3 ±0,1

Figure 139 : Résultat des analyses de CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF₆ pour l'eau du forage 800 (Grâne)

Dans un premier temps, un calcul est effectué afin de passer d'une concentration dans l'eau en une concentration dans l'air (en partie par trillions volumique, pptv) qui pourra être comparée aux concentrations mesurées sur des stations de référence. Pour l'étude concernée c'est la station de Mace Head (Ireland) qui est utilisée.

Les données de chacun des traceurs (CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF₆) sont également comparées entre elles afin de détecter des anomalies comme des contaminations ou dégradation.

On constate que les valeurs de concentrations sont très proches des incertitudes analytiques. De très faibles concentrations indiquent une faible concentration en gaz dans l'atmosphère au moment de la recharge. On peut considérer que les eaux sont donc d'âge apparent inférieur à 1950. Du fait de ces très faibles concentrations il n'est pas possible de déterminer le modèle de transfert le plus adapté à l'interprétation.

On peut donc conclure des données des gaz dissous que les apports d'eau jeune sont très faibles voire inexistantes au niveau du forage de Grâne (ID 800).

c) Rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et activité de ^{14}C

Les mesures du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C ont été réalisées par Beta Analytic Inc. (Floride, USA). Le carbone inorganique dissous dans l'eau est extrait sous vide par acidification et le gaz est purifié par cryogénie. Un aliquote est utilisé pour la mesure du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ par spectrométrie de masse en phase gazeuse (Gasbench IRMS). Le reste du CO₂ est réduit en graphite pour la mesure de l'activité de ^{14}C par spectrométrie de masse par accélération (AMS). L'activité de ^{14}C mesurée est reportée par rapport à celle du carbone moderne référence; elle est exprimée en % de carbone moderne et normalisée en tenant compte de la valeur $\delta^{13}\text{C}$ (pCM).

Un équivalent en âge conventionnel ou apparent peut être estimé à partir de l'activité du ^{14}C en utilisant la valeur de Libby de 5 568 ans comme période (demi-vie) du radiocarbone. Cet âge dit « conventionnel » est reporté en ans BP (Before Present) avec 1950 comme année de référence pour le présent.

Les résultats d'analyses du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C sont présentés dans le Tableau 30, ainsi que l'âge conventionnel estimé à près de 32 000 ans BP.

N° Echantillon	Nom Echantillon	$\delta^{13}\text{C}$ vs V-PDB	Activité ^{14}C pCM	Age ^{14}C conventionnel BP ($\pm 1\sigma$)
23-6-045-A-001	800	-7.4	1.83 ± 0.05	32170 ± 220

Tableau 30 : Résultats d'analyses du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et de l'activité de ^{14}C pour l'eau du forage de Grâne (ID 800) en 2023.

D'après ces premiers résultats, notons que l'eau analysée du forage de Grâne (ID 800) a, a priori, un âge conventionnel proche des limites de la méthode d'estimation des temps de résidence des eaux souterraines par les isotopes du carbone (30 000 ans).

Les données des isotopes du carbone du forage de Grâne, en 2023, sont tout d'abord comparées aux données connues sur le secteur d'étude.

De la Vaissière (2006) a réalisé une carte de répartition des activités C^{14} dans le bassin de Valence (Figure 140) et une carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère néogène (Figure 141). D'après ces deux cartes, l'activité C^{14} pour le forage n°280 situé à proximité du forage de Grâne (800) était de 31,1 pCM en 2004 et le temps de résidence moyen était estimé à 2 700 ans. Il faut savoir, que ce forage (n°280) a une profondeur d'investigation de 108 m et qu'il est crépiné de 35 à 75 m par rapport au sol. De plus, d'après De la Vaisière (2006), ce secteur correspond à des eaux évoluées, âgées et infiltrées en altitude. Il a estimé que l'altitude du bassin d'alimentation du forage n°280 correspondrait au massif de Marsanne, situé au sud-ouest en dehors du bassin molassique.

Notons dès à présent que l'activité en C^{14} du forage de Grâne (1.83 pCM) en 2023 est nettement inférieure à celle du forage n°280 mesurée en 2004.

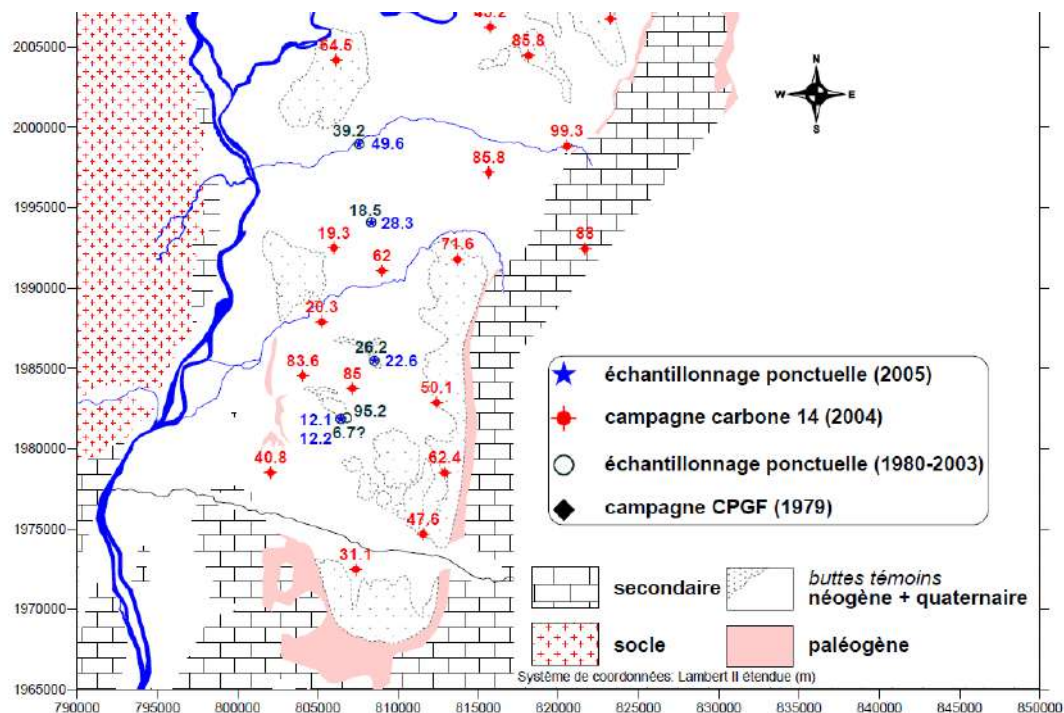


Figure 140 : Extrait de la carte des activités carbone 14 mesurées dans le bassin de Valence (pCM), De la Vaissière (2006).

Figure 141 : Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère néogène (âge arrondi en années), De la Vaissière (2006).

171

D'après De la Vaissière (2006), le forage n° 311 est situé au nord de la zone étude, à l'extrémité aval de la vallée de la Valloire dans l'ancienne ria pliocène de l'Isère (Figure 141). De la Vaissière a estimé que l'eau du forage de St Rambert d'Albon a un âge de l'ordre de 27 000 ans. De plus, il a établi qu'un mélange isotopique vers un pôle beaucoup plus appauvri de la matrice aquifère pourrait être à l'origine de cette signature.

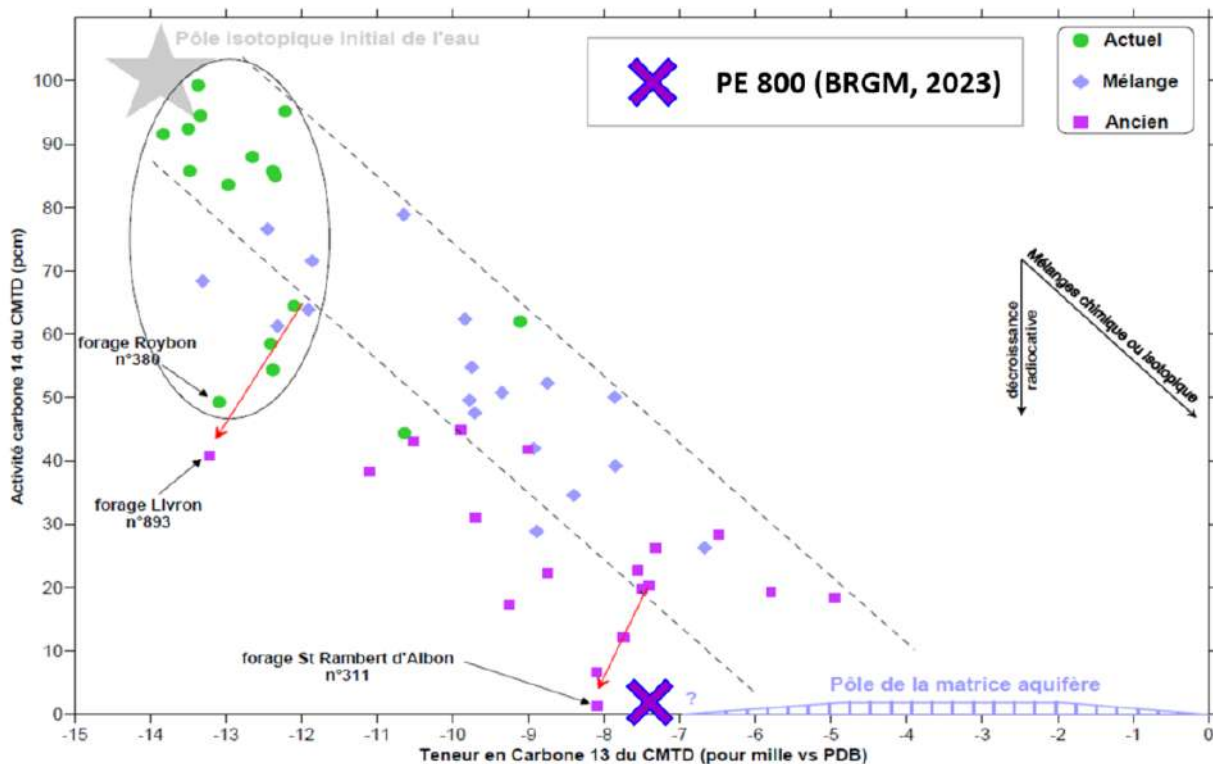


Figure 142 : Relation $A^{14}C$ (pcm) versus $\delta^{13}C$ (‰ vs PDB) du CMTD des eaux de l'aquifère néogène, modifié d'après De la Vaissière (2006), et du forage ID 800.

Cave (2011) est arrivé à des conclusions proches de celle de De la Vaissière (2006). En plaçant les données des isotopes du carbone du forage de Grâne (ID 800) dans le diagramme $A^{14}C$ versus $\delta^{13}C$ établi par Cave (2011) (Figure 143), on s'aperçoit que les résultats isotopiques du carbone du forage ID 800 se situent dans le pôle des eaux anciennes, en système fermé, proche du pôle de la matrice carbonatée de l'aquifère.

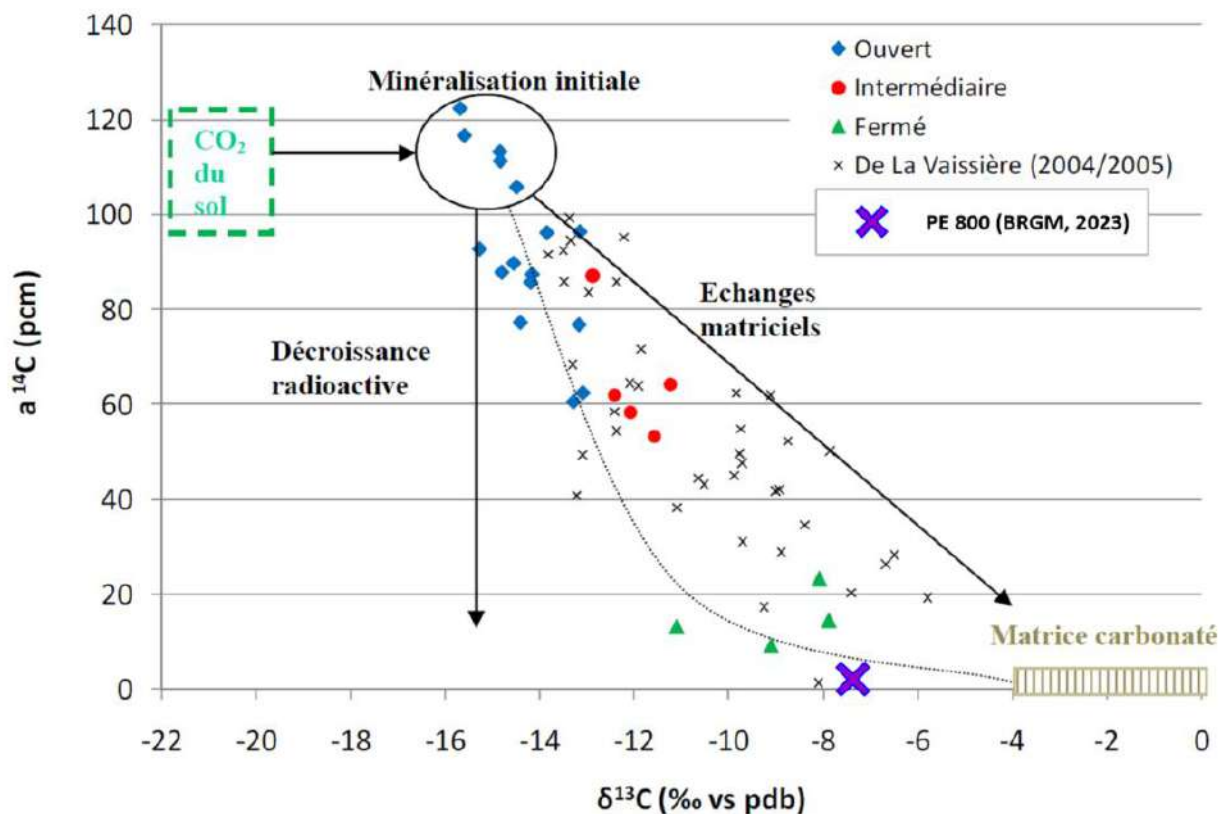


Figure 143 : Relation $A^{14}C$ (pcm) versus $\delta^{13}C$ (‰ vs PDB) du CMTD des eaux de l'aquifère du Bas-Dauphiné, modifié d'après Cave (2011) et du forage ID 800.

De la Vaissière a calculé les âges apparents selon 7 modèles différents de correction de l'âge des eaux (Tamers (Tamers, 1967), Pearson (Ingerson et Pearson, 1964), « F&G » et « F&G eq » (Fontes et Garnier, 1979), AIEA (Salem et al., 1980), Evans (Evans et al., 1979), Eichinger (Eichinger, 1983), Olive (Olive, 1998), en prenant comme référence pour le CO_2 atmosphérique un $\delta^{13}C$ d'environ -8 ‰ (Clark et al., 1997) et pour les deux principales sources de carbone, le CO_2 biogénique du sol et la matrice carbonatée de l'aquifère, les valeurs de $\delta^{13}C$ et $A^{14}C$ sont définies dans le Tableau 31. Ces valeurs ont été reprises par Cave (2011), elles serviront également à nos calculs.

	$\delta^{13}C_{PDB}$ ‰ mesuré ou estimé	$A^{14}C$ pcm estimée
CO_2 biogénique du sol	-21,5	100
Matrice carbonatée	-3,6	0

Tableau 31 : Valeurs isotopiques des pôles de mélanges (De la Vaissière, 2006).

D'après De la Vaissière (2006), seuls les modèles de Tamers et Olive montrent une relativement bonne adéquation entre les âges calculés et ceux estimés à partir des indicateurs de temps de séjour, malgré le fait que ces modèles Tamers et Olive surestiment probablement les âges réels.

De plus, De la Vaissière (2006) a établi 2 nouveaux modèles de corrections, afin de prendre en compte la présence de calcite secondaire dans la matrice carbonatée, surtout les phénomènes de dilution du carbone 13 et du carbone 14 provenant de la dissolution incongruente de dolomite. A partir de ces modèles l'âge apparent moyen de l'eau du forage n°311 a été établi à 27 855 ans.

Par ailleurs, d'après Cave (2011), dans l'aquifère molassique du Bas-Dauphiné, la dissolution du gypse n'entre en compte que dans le bassin de Crest ; ceci est confirmé par les analyses du forage ID 800 en 2023.

De plus, parmi les 3 familles d'eaux déterminées par Cave (2011), l'eau du forage de Grâne (ID 800) appartiendrait à la famille des eaux évoluant en système fermé vis-à-vis du CO₂ du sol pour lesquels les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ équilibrant sont supérieures à -18 ‰, et sont donc enrichies par rapport au CO₂ biogénique du sol. Pour ces eaux, une participation de la matrice carbonatée à la teneur isotopique en carbone 13 du CMTD est donc supposée. Ces eaux présentent des pH plus élevés, proches de 7,4 et des pCO₂ généralement plus faibles. Les activités en carbone-14 sont faibles. Les résultats d'analyses du forage de Grâne en 2023 (ID 800) correspondent en tout point à ces critères.

Cave (2001) a établi une carte des âges moyens de l'aquifère molassique (Figure 144). Sur le secteur du forage de Grâne, dans le bassin de Crest, l'âge moyen maximal des eaux de l'aquifère molassique ne dépasse pas 3 000 ans.

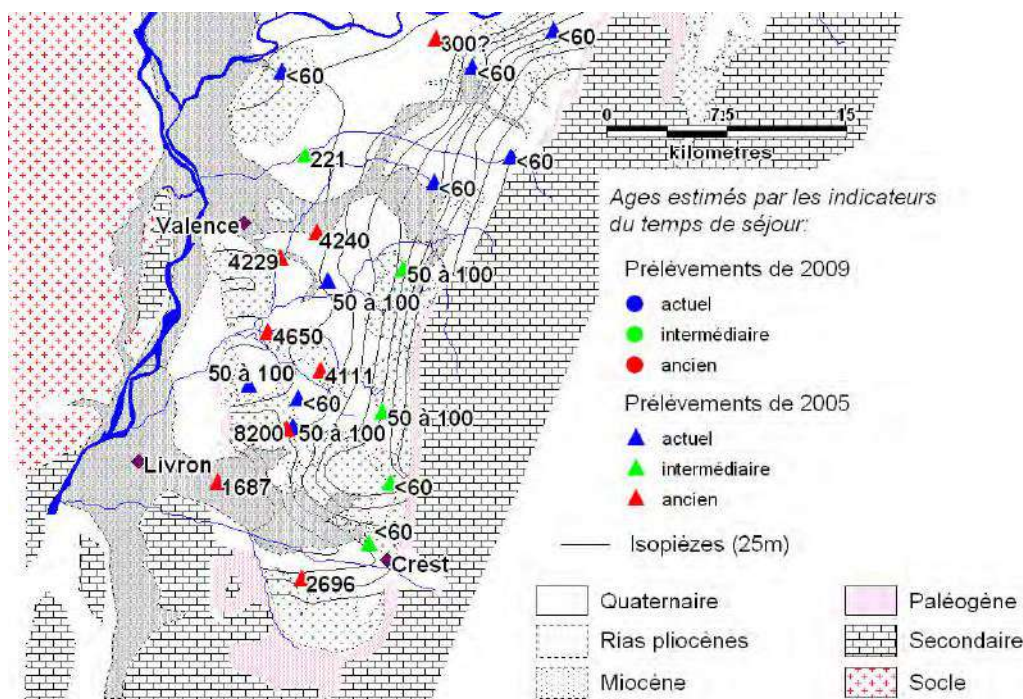


Figure 144 : Carte des âges moyens de l'eau dans l'aquifère molassique (extrait de Cave, 2011).

A partir des résultats d'analyses des isotopes du carbone de l'eau du forage de Grâne prélevée en 2023, nous avons calculé à partir des modèles de correction de l'âge des eaux utilisées par De La Vaissière (2006) et Cave (2011), l'âge apparent de l'eau du forage ID 800. L'âge moyen en prenant en compte tous les résultats est de 24 000 ans ; et plus précisément le modèle de Tamers donne 28 126 ans et celui d'Olive : 25 611 ans.

En tenant compte des travaux de De La Vaissière (2006) et Cave (2011), nous pouvons estimer que l'eau du forage de Grâne, prélevée en 2023, est très ancienne, avec un âge apparent de l'eau compris entre 24 000 et 28 000 ans.

8.4.4. Apports scientifiques et conclusions suite à la réalisation du forage de Grâne en 2023

Le forage de Grâne, crépiné de 77 à 88 m dans la molasse miocène, correspond à un horizon aquifère relativement profond, marquée par la présence d'une eau évoluée, à la conductivité relativement élevée pour la zone d'étude, riche en bore, en sodium et potassium et exempt de pollutions d'origine anthropique.

Les données de datation des eaux utilisés, à savoir les isotopes stables de la molécule d'eau, CFC-SF6 et isotopes du carbone, mettent en avant le fait que l'eau prélevée dans le forage de Grâne, ID 800, en 2023 est une eau très ancienne, dont l'âge apparent entre 24000 et 28000 ans.

Les résultats d'analyses géochimiques et isotopiques de ce forage, réalisé en 2023 confirment les observations et interprétations réalisées à partir des données historiques (ADES) et des données acquises lors des campagnes de terrain réalisées en 2022 dans le cadre de cette étude, mais aussi les hypothèses avancées dans les travaux notamment de De La Vaissière (2006) et Cave (2011). Ces résultats d'analyses mettent aussi en avant l'existence d'une eau beaucoup plus évoluée et plus ancienne que ce qui était connu à l'heure actuelle sur le secteur de la basse vallée de la Drôme. Ils confirment aussi le fonctionnement stratifié du système de la molasse avec des eaux très anciennes dans certains secteurs ou à certaines profondeurs.

8.5. CONCLUSIONS SUR LA CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE

Les données « qualité » historiques reconstituées à partir des données qualité extraites d'ADES pour les eaux souterraines et de NAIADES pour les eaux de surface ont permis dans un premier temps de caractériser l'hydrogéochimie des eaux de l'hydrosystème de la basse vallée de la Drôme et, d'identifier les différents aquifères du secteur d'étude et de caractériser sommairement leur chimie.

Les nouvelles données acquises lors des campagnes de hautes eaux 2022 et de basses eaux 2022 ont permis d'affiner la caractérisation de l'ensemble de l'hydrosystème de la basse vallée de la Drôme.

Les eaux de la zone d'étude ont toutes un faciès bicarbonaté calcique ; avec des variations notables pour les concentrations en magnésium, en ions alcalins (Na + K), mais aussi en nitrate.

D'un point de vue naturel, la chimie des eaux du secteur d'étude est en lien direct avec :

- les différents processus d'interactions eau-roche qui ont lieu au sein des aquifères et donc dépendant de leur géologie et minéralogie ;
- les temps de séjour des eaux dans les aquifères qui se traduisent notamment par un enrichissement en sodium et magnésium ;
- la proximité de la zone de recharge de ces aquifères.

Cinq principaux contextes hydrogéochimiques sont clairement identifiés dans la basse vallée de la Drôme :

- **Les eaux de surface ou eaux superficielles**

L'analyse des données « historiques » des eaux de la rivière Drôme, montre que la composition chimique de ces dernières est quasi constante d'amont en aval, du moins

pour les éléments majeurs. Ses caractéristiques hydrogéochimiques se distinguent de celles des eaux souterraines avec notamment une minéralisation plus faible et des concentrations en bore élevées.

- **Les eaux des alluvions récentes et les eaux des alluvions anciennes**

Les eaux des alluvions récentes, qui sont en lien direct avec les eaux de surface, sont les plus vulnérables comme en témoigne la présence d'émergents tels la caféine ou le bisphénol A. C'est dans ce groupe que l'on observe la plus grande variabilité de composition géochimique.

Les eaux circulant dans les alluvions anciennes ont une composition chimique qui est proche de celles des alluvions récentes. Elles montrent toutefois un enrichissement en HCO_3^- et $\text{Ca}+\text{Mg}$. L'existence locale d'interactions avec d'autres aquifères : molasse/formations carbonatées oligocènes ou molasse/alluvions anciennes & limons et loess est suggérée par la présence de certains éléments marquant ces pôles (enrichissement en $\text{Ca}+\text{Mg}$ et HCO_3^- par ex).

- **Les eaux de la molasse du Miocène**, au sein desquelles il est possible de distinguer la molasse libre et captive ;

D'une manière générale, les eaux de la molasse miocène sont les plus minéralisées.

Les eaux de la molasse libre du Miocène sont les plus impactées par les pollutions anthropiques d'origine agricole, comme le démontrent leurs concentrations élevées en nitrate, ainsi que les concentrations en molécules phytosanitaires et leurs métabolites.

Les eaux de la molasse captive montrent un enrichissement en certains éléments qui traduisent des interactions eau/roche plus longues.

Le forage réalisé à Grâne dans le cadre de la présente étude, illustre parfaitement le processus d'évolution des nappes captives de la molasse. En effet, sa chimie particulière a mis en évidence les processus d'interaction eau-roche avec les carbonates (calcite, dolomite) présents dans l'aquifère, mais aussi les processus d'échanges de bases. Cette eau très ancienne, est exempte de toutes pollutions anthropiques, riche en alcalins ($\text{Na} + \text{K}$), mais aussi en bore d'origine naturelle. Les outils de datation des eaux utilisés dans le cadre de cette étude ont permis d'estimer l'âge apparent de cette eau entre 24 000 et 28 000 ans.

- **Les eaux des calcaires de l'Oligocène ;**

Ces eaux sont plutôt à l'équilibre avec les carbonates. Elles présentent le plus fort ratio Ca/Na , avec les eaux des calcaires du Crétacé.

- **Les eaux des calcaires du Crétacé ;**

Ces eaux ont le ratio Ca/Mg le plus élevé dans la zone d'étude. Leur minéralisation est plus forte que celle des eaux de l'Oligocène.

Les eaux des aquifères carbonatés de l'Oligocène et du Crétacé semblent être moins impactés par des pollutions d'origine anthropique. La raison est probablement une pression plus faible des activités humaines dans ces secteurs.

- A ces cinq grands contextes hydrogéochimiques, il est possible d'adjoindre les **eaux du Pliocène**. Leur composition chimique proche de celle de la molasse miocène, ne permet toutefois pas de les distinguer nettement au même titre que les autres grands pôles. Les eaux du Pliocène présentent par ex, comme les eaux de la molasse captive, les plus fortes concentrations en silice de la zone d'étude. Cette proximité chimique avec les eaux de la molasse suggère de possibles interactions entre aquifères.

9. Conclusions et recommandations

Les travaux menés dans le cadre de l'étude couplés à l'analyse des données bibliographiques permettent d'apporter des enseignements sur le fonctionnement de l'hydrosystème de la basse vallée de la Drôme.

L'analyse des données hydrogéochimiques a permis d'identifier clairement cinq principaux contextes hydrogéochimiques de la basse vallée de la Drôme. Un sixième contexte est également présent mais il se distingue moins des principaux pôles. La chimie des eaux du secteur d'étude est en lien direct avec :

- les différents processus d'interactions eau-roche qui ont lieu au sein des aquifères en fonction de leur géologie et minéralogie ;
- les temps de séjour des eaux dans les aquifères ;
- la proximité avec la zone de recharge de ces aquifères.

Les aquifères alluviaux

D'un point de vue géologique, la zone d'étude comporte des alluvions récentes en lien avec les eaux superficielles et des hautes terrasses alluviales composées d'alluvions anciennes, parfois surmontées de limons et loess comme en rive gauche de la Drôme.

Les caractérisations hydrogéochimiques conduisent à classer les eaux des alluvions dans un même grand contexte mais il est possible d'observer au sein de cet ensemble, des différences chimiques entre les alluvions récentes et les alluvions anciennes. Ces spécificités se retrouvent également au niveau des écoulements des eaux souterraines.

Les alluvions récentes de la Drôme sont les plus représentées et constituent la ressource en eau la plus importante et la plus sollicitée de la zone d'étude, que ce soit pour un usage alimentation en eau potable, un usage pour l'irrigation, un usage domestique ou un usage industriel.

Du fait de la connexion hydraulique avec les eaux de surface, les eaux des alluvions récentes montrent une grande variabilité de composition géochimique ainsi que la présence d'émergents tels la caféine ou le bisphénol traduisant l'impact des rejets eaux usées.

Les relations nappe/rivière sont complexes et non uniformes tout au long du parcours de la Drôme. Entre Crest et Allex, trois types d'interactions différentes sont identifiées : le secteur amont de la plaine alluviale semble se caractériser par des échanges peu nombreux avec la Drôme. La partie centrale de la plaine alluviale montre des échanges orientés de la Drôme vers la nappe tandis que la partie aval de la plaine alluviale voit des échanges de la nappe vers la rivière, notamment sur la rive droite.

Au-delà du pont de la RN 7 et jusqu'à la confluence avec le Rhône, les échanges sont clairement orientés depuis la Drôme vers la nappe et ce depuis quelques décennies. On note également une influence de la nappe alluviale du Rhône dans les secteurs proches du fleuve. Pour le secteur en rive droite de la Drôme, la cote de la nappe alluviale de la Drôme 90 m (NGF) semble marquer la limite entre les 2 nappes alluviales.

Quatre points de suivi, intégrés à l'arrêté cadre sécheresse pour le bassin de la Drôme, enregistrent les fluctuations de la nappe alluviale de part et d'autres de la rivière avec une antériorité significative. Au droit de ces 4 points, la nappe alluviale présente des caractéristiques

communes à savoir une cyclicité annuelle et un battement compris entre 2,5 m et 5,3 m. Dans le secteur de la plaine alluviale entre Crest et Grâne/Alex, la tendance déduite de l'analyse des chroniques piézométriques est une baisse du niveau de la nappe depuis quelques années. Il est probable qu'elle soit le reflet de l'impact des prélèvements même si une cause naturelle (modification de la pluviométrie) ne peut pas être écartée. Cette évolution ne se retrouve pas sur les deux piézomètres situés dans le secteur en aval du pont de la RN7 : on observe une stabilité sur la rive gauche et une tendance à l'augmentation (non explicable à ce jour) sur la rive droite.

Les alluvions anciennes

Les eaux circulant dans les alluvions anciennes ont une composition chimique qui est proche des eaux des alluvions récentes avec toutefois quelques différences comme des concentrations plus importantes de HCO_3 et $\text{Ca}+\text{Mg}$ par exemple. Il est possible d'observer localement des éléments qui traduisent des interactions locales d'interactions avec d'autres aquifères en particulier les nappes libres de la molasse miocène ou les nappes de l'aquifère carbonaté oligocène.

Le sens général d'écoulement des nappes des alluvions anciennes est orienté en direction des alluvions récentes. Les connexions hydrauliques entre alluvions récentes et alluvions anciennes peuvent être directes ou indirectes lorsque les alluvions anciennes surmontent des horizons de faible perméabilité comme des argiles pliocènes.

Ces nappes sont vulnérables vis-à-vis des activités anthropiques et peuvent présenter des contaminations liées aux activités agricoles et/ou domestiques (rejets assainissements par ex.)

L'aquifère de la molasse miocène.

Cet aquifère a un fonctionnement stratifié et présente une grande hétérogénéité. Il comporte dans sa partie sommitale de petites nappes superficielles et morcelées qui se créent à la faveur d'un faciès sous-jacent de plus faible perméabilité. Des circulations plus profondes existent également et dépendent du relief régional à la différence des circulations superficielles qui sont guidées par la topographie locale. Les nappes superficielles sont drainées par les cours d'eau qui entaillent la molasse. Le sens global des écoulements souterrains est orienté en direction de la Drôme. Les circulations profondes au sein de la molasse du bassin de Crest sont également orientées vers la Drôme mais avec une composante Sud-Est/Nord-Ouest en lien avec la rive pliocène.

Des phénomènes de mise en charge des nappes profondes se rencontrent quand la nappe de la molasse se retrouve sous le Pliocène argileux ou sous les faciès marneux. Les passées indurées provoquent également la mise en charge des nappes.

Les caractérisations hydrogéochimiques permettent de distinguer les eaux des nappes superficielles de celles des eaux des nappes profondes et captives.

Les nappes superficielles de la molasse sont les plus impactées par les pollutions anthropiques d'origine agricole, comme le démontrent leurs concentrations élevées en nitrate, ainsi que les concentrations en molécules phytosanitaires et leurs métabolites.

Les eaux de la molasse profonde montrent un enrichissement en certains éléments qui traduisent des interactions eau/roche (carbonates) plus longues conduisant à des eaux plus « évoluées ». Les eaux sont en particulier naturellement riches en alcalins et en bore et sont exemptes de toutes pollutions anthropiques. Le forage réalisé à Grâne dans le cadre de la présente étude, illustre parfaitement ce processus d'évolution des nappes captives de la molasse. Il a mis en évidence l'existence d'une eau beaucoup plus ancienne (âge apparent de 24 000-28000 ans, voire plus) et plus évoluée que ce qui était jusqu'alors connu dans le secteur d'étude

D'une manière générale, les eaux de la molasse miocène sont les plus minéralisées du secteur d'étude.

Elles sont utilisées pour des usages agricoles et notamment les ressources profondes, pour des usages domestiques et pour l'alimentation en eau potable, certains captages étant fortement impactés par des contaminations anthropiques.

Les eaux des calcaires de l'Oligocène ;

Les ressources en eau de ces formations sont plutôt modestes et sont essentielles liées à des circulations fissurales ce qui leur confère une grande vulnérabilité vis-à-vis des activités anthropiques. Des fluctuations importantes de débit à l'échelle annuelle, caractérisent les sources. Les nappes sont utilisées pour l'AEP et pour des usages domestiques

Les eaux des calcaires du Crétacé ;

Ces ressources sont également modestes.

Ces eaux ont le ratio Ca/Mg le plus élevé dans la zone d'étude. Leur minéralisation est plus forte que celle des eaux de l'Oligocène.

Les eaux des aquifères carbonatés de l'Oligocène et du Crétacé semblent être moins impactées par des pollutions d'origine anthropique. La raison est probablement une pression plus faible des activités humaines dans ces secteurs.

Le travail de retraitement de certaines lignes sismiques des années 1960 a permis de mettre en évidence dans la partie centrale de la zone d'étude, des accidents tectoniques affectant ces formations ante-miocènes. Ces accidents peuvent potentiellement jouer un rôle dans la circulation des eaux souterraines et permettre la mise en communication des aquifères.

Les eaux du Pliocène

Les formations pliocènes affleurent au Nord de la zone d'étude et se retrouvent sous une partie de la couverture alluviale. Elles présentent des horizons sableux pouvant contenir des nappes. Il est possible de distinguer des nappes superficielles qui donnent naissance à de petites sources qui ne sont plus utilisées à présent que pour des usages domestiques, et des nappes plus profondes intercalés entre des niveaux marneux ou argileux.

Il n'a pas été démontré à ce jour que les niveaux sableux marins soient spatialement continus, bien que ces horizons soient présents en plus grand nombre dans le bassin de Crest que dans le reste du bassin du bas-Dauphiné.

L'infra-pliocène situé à l'interface entre la molasse et le Pliocène, comporte un horizon à éléments grossiers, qui apparaît être continu à l'échelle du bassin. Des forages ont montrés qu'une nappe en charge était présente dans cet horizon. D'après certains auteurs, les ria pliocènes et notamment l'horizon infra pliocène pourraient drainer l'aquifère miocène.

La caractérisation hydrogéochimique n'a pas permis de distinguer les eaux du Pliocène de manière aussi claire que les quatre pôles d'eau souterraine exposés plus haut. En effet, leur composition chimique se rapproche de celle des eaux la molasse miocène, notamment des nappes captives. Cette proximité chimique conforte les hypothèses d'interactions probables entre aquifères miocènes et les aquifères pliocènes. De plus, la direction générale des écoulements molassiques profonds alignés sur la ria pliocène plaide pour ce type d'interaction.

Les eaux superficielles

La Drôme principal cours d'eau de la zone d'étude, est sujette à des fluctuations temporelles et spatiales de son débit.

Ainsi qu'il a été vu plus haut, les relations hydrauliques entre la rivière et la nappe alluviale évoluent sur le linéaire de la Drôme.

La caractérisation hydrogéochimique des eaux de la Drôme montre que la chimie de la Drôme demeure quasi-constante sur tout le linéaire de rivière étudié. Cette dernière observation signifie que les volumes d'eau transitant par la rivière impriment une signature chimique forte qui ne peut pas permettre d'observer un éventuel transfert d'eau souterraine de minéralisation différente, et en particulier depuis la nappe alluviale. Toutefois, les prélèvements et analyses géochimiques réalisées dans le cadre de l'étude mettent en avant des caractéristiques très proches entre les eaux de la nappe des alluvions récentes de la Drôme et les eaux de surface. Ces dernières sont également impactées par les rejets des stations de traitement des eaux usées qui se font dans les cours d'eau, et qui contiennent des éléments et substances typiques d'effluents d'assainissement : bore, caféine, paracétamol, bisphénol A...que l'on retrouve également dans les eaux de la nappe alluviale. Ce constat permet de confirmer les relations entre les eaux superficielles et la nappe alluviale. Il convient de préciser que des rejets d'assainissements autonomes peuvent, dans une moindre mesure, également apporter des éléments et substances directement dans la nappe alluviale.

Les jaugeages différentiels qui ont été faits dans le cadre de la présente étude révèlent que la perte de débit entre l'amont et l'aval de la zone d'étude peut se produire en dehors de la période estivale.

Durant l'été, la diminution du débit de la rivière peut se traduire par l'apparition d'assecs notamment en amont du seuil de la CNR. Ces derniers sont dépendant du débit de la Drôme en amont du seuil.

L'examen des chroniques des piézomètres situés dans ce secteur au regard des périodes de survenue des épisodes d'assecs laisse présumer une possible association entre une cote piézométrique (spécifique à chaque piézomètre) et le début de l'assec.

Les recommandations suivantes sont proposées pour améliorer la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau de la basse vallée de la Drôme :

- **Action n°1 : Densifier le réseau de suivi piézométrique des eaux souterraines**, en particulier les nappes qui comportent des enjeux majeurs.

La nappe des alluvions récentes mériterait des points de suivi complémentaires :

Action 1a : dans le secteur du cône de déjection de la Drôme dans la vallée du Rhône. Plusieurs facteurs ((prélèvements, Rhône, Drôme, apports des coteaux) peuvent influencer la piézométrie de la nappe dans ce secteur. Afin de pouvoir évaluer l'impact de ces facteurs, il est recommandé de mettre en place un suivi, au droit des communes de Livron et Loriol, sur des points proches de la Drôme, sur des points situés dans la partie centrale du cône, sur des points proches de la zone d'influence du Rhône ainsi que sur des points pouvant refléter des écoulements en provenance des coteaux.

Action 1b : dans le secteur de la plaine alluviale entre Alex/Grâne et Crest où il pourrait judicieux de suivre en continu les fluctuations de la nappe sur la commune de Grâne en amont de la réserve naturelle, ainsi que sur les communes de Chabrillan et Divajeu afin de préciser clairement le sens d'écoulement de la nappe en rive gauche.

En fonction des ressources financières disponibles il pourrait être judicieux de prévoir des implantations plus ou moins proches de la Drôme et des implantations proches de la haute terrasse alluviale afin d'étudier les interactions avec la nappe des coteaux qui présente une dégradation de sa qualité. Il convient de rappeler ici que le piézomètre BSS001ZWVW de la commune de Grâne est influencé par des prélèvements. Il figure dans la liste des piézomètres de référence de l'ACS avec un niveau de représentativité maximal qu'il conviendrait de réduire au regard de ce biais.

Action 1c : en rive droite, il pourrait être intéressant d'approfondir l'étude des écoulements souterrains peu profonds à proximité des coteaux sur la commune d'Eurre et Alex où des nappes peu profondes circulant dans la molasse et le pliocène viennent alimenter la nappe des alluvions récentes. Il serait intéressant également de vérifier le peu de relations qui semblent exister entre la nappe et la rivière en aval de la ville de Crest.

Le réseau de suivi à créer pourrait s'appuyer sur certains ouvrages appartenant à des réseaux existants (SMRD, SID ...). L'objectif principal du réseau à créer pourrait être d'alimenter un modèle mathématique maillé permettant de simuler l'impact des prélèvements en nappe alluviale dans ce secteur en tension.

Action 1d : En parallèle du développement du réseau de suivi des eaux souterraines il conviendrait également d'installer des points de suivi des variations de la cote de la rivière sur ce tronçon de la Drôme.

- **Action n°2 : Confirmer par un suivi détaillé des périodes d'assecs au seuil CNR, la relation avec les mesures piézométriques des ouvrages de Livron et Loriol.**

L'identification de la cote associée à l'apparition du phénomène d'assec, pourrait s'accompagner d'une analyse statistique des chroniques qui permettrait de définir un seuil d'anticipation de survenue de l'assec.

- **Action n°3 : Recenser et contrôler le bon état des puits et forages de la nappe alluviale de la Drôme et des nappes de la molasse miocène.**

Les recherches bibliographiques et les investigations sur site ont révélé un nombre conséquents d'ouvrages pour la plupart non recensés et parfois vétustes. Les ouvrages dégradés constituent des points de vulnérabilité de la nappe vis-à-vis des activités anthropiques. Ils représentent également un risque pour la sécurité des personnes.

Action 3a : Il conviendrait de mettre en œuvre des mesures de réhabilitation ou de comblement dans les règles de l'Art des ouvrages concernés.

Par ailleurs, il semble que localement les prélèvements ne soient pas recensés et comptabilisés ce qui peut engendrer à plus ou moins long terme des conflits d'usage.

Action 3b : Il conviendrait également de bien encadrer la bonne réalisation des forages qui captent les nappes profondes du Miocène. Leur intérêt patrimonial et l'absence de contamination doit être préservés. Il est recommandé à ce titre d'engager un suivi régulier

(quantitatif et qualitatif) du forage créé sur la commune de Grâne à l’occasion de la présente étude.

10. Références bibliographiques

Agreste (2021). Base de données en ligne - Centre d'études et de prospective. Disponible sur internet à <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/!searchurl/searchUiid/search/>

Artelia (2012) – Etudes d'estimation des volumes prélevables globaux. Sous bassin versant de la Drôme. Rapport final. MGX, n°1741596. (Rapports phase 1 &2, 3, 4&5, 6).

Artelia (2019). Projet de déviation des communes de Livron-sur-Drôme et Loriol-sur-Drôme Pièce E -Étude d'impact Volet 2 -Etat initial. 67p.

Ballesio R. (1972). Etude stratigraphique du Pliocène Rhodanien. Thèse de Doctorat Lyon I, 315 p.

Barbier R. (1956). Rapport géologique sur le nouveau projet d'adduction d'eau de la commune de Livron.

Blum A, Chery L., Barbier J., Baudry D., Petelet-Giraud E. (2002). Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport final, Rapport BRGM RP-51549-FR.

Boutin, C., Olivier, L., Agenet, P., Parisi, S., Artuit, P., Branchu, P., Decout, A., Dubois, V., Dubourg, L., Dhumeaux, D., Jousse, S., Leval, C., Mouline, B., Portier, N., Rambert, C., Souliac, L., Szabó, C. (2017). Assainissement non collectif : le suivi in situ des installations de 2011 à 2016. Synthèse technique du rapport final. 27p.

Cang L., Wang Y., Zhou D., Dong Y., 2004. Heavy metals pollution in poultry and livestock and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China. Journal of Environmental Sciences.16 (3), pp. 371-374.

Cave T., Faure G. (2011). Etude de la nappe de la molasse du Bas-Dauphiné. Bilan des résultats et orientations de gestion. Rapport IDEES-EAUX et Université d'Avignon.

Cave T. (2011). Fonctionnement hydrodynamique du bassin tertiaire du Bas-Dauphiné entre la Drôme et la Varèze (Drôme et Isère, Sud-Est de la France). Etude géochimique et isotopique. Thèse, université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Celle H. (2000). Caractérisation des précipitations sur le pourtour de la Méditerranée Occidentale. Approche isotopique et chimique. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 222 p.

Clark I., Fritz P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New-York. 328 p.

De La Vaissière R. (2006). Etude de l'aquifère néogène du Bas-Dauphiné. Apports de la géochimie et des isotopes dans le fonctionnement hydrogéologique du bassin de Valence (Drôme, Sud-Est de la France). Thèse, université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

DREAL (2020). Stations de traitement des eaux usées en Auvergne Rhône Alpes. Base de données en ligne : <https://catalogue.datar.gouv.fr/geosource/consultationWMS?IDT=54178479>.

Eichinger L. (1983). A contribution to the interpretation of ^{14}C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. Proceedings of the 11th International ^{14}C Conference, Radiocarbon, 25 (2), pp. 347–356.

Evans G. V., Otlet R. L., Downing A., Monkhouse R. A., Rae G. (1979). Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. Isotope Hydrology II, Vienna, IAEA, pp. 679-708.

Fontes J.-C., Garnier J.M. (1979). Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: a review of the existing models and a new approach. Water Resour. Res., 15 (2), pp. 399–413.

Gal F. (2005). Etude géochimique et isotopique des eaux de surface du bassin versant du Furan et des eaux minérales du Graben du Forez, Est du Massif Central Français. Thèse de doctorat Université Jean Monnet, St-Etienne, 198 p.

Gallagher D.L., Johnston K.M., Dietrich A.M., 2001. Fate and Transport of Copper-based Crop Protectants in Plasticulture Runoff and the Impact of Sedimentation as a Best Management Practice, Water Research. 35 (12), pp. 2984-2994.

Huang S-W, Jin J-Y, 2008. Status of heavy metals in agricultural soils as affected by different patterns of land use. Environ Monit Assess. 139, pp. 317-327.

Huneau F. (2000). Fonctionnement hydrogéologique et archives paléoclimatiques d'un aquifère profond méditerranéen. Thèse de doctorat Avignon et des Pays de Vaucluse, 192 p.

IDEES-EAUX (2009). Réalisation d'un pompage d'essai de longue durée en période d'étiage estival sur le forage d'essai des Ventis. Commune de Loriol (26). Rapport SC-090607-POM

IDEES-EAUX (2011). Suivi de l'influence d'un prélèvement dans la Drôme et sa nappe d'accompagnement- Simulations par modélisation mathématique. Syndicat d'irrigation d'Allex-Montoison. Rapport provisoire, BB-110315-EHY

IDEES-EAUX (2012). Recherche d'une nouvelle ressource en eau potable dans l'aquifère molassique. Ville de Crest. Rapport BB-120622-EHY. 21 p.

IDEES-EAUX (2018). 2 – Etude hydrogéologique visant à améliorer les connaissances de la plaine alluviale de la rivière Drome et du captage de Couthiol. Commune de Livron-sur-Drôme (26). Rapport IDEES-EAUX – BB-1718226.

IDEES-EAUX (2021). Etat des lieux qualitatif des Zones de Sauvegarde Non Exploitées Actuellement (ZSNEA) identifiées dans les alluvions de la Drôme, dans le cadre des ressources stratégiques Synthèse des résultats des campagnes d'analyses. 255 p.

IGN (2021). RPG - Registre parcellaire graphique - Une base de données géographiques servant de référence à l'instruction des aides de la politique agricole commune (PAC) - Disponible sur internet à <https://geoservices.ign.fr/rpg#telechargementrpg2019>

IGN (2021). RPG Version 2.0 - Registre Parcellaire Graphique – Géoservices. https://geoservices.ign.fr/sites/default/files/2021-07/DC_DL_RPG_2-0.pdf

Ingerson E., Pearson F. J. (1964). Estimation of age and rate of motion of groundwater by ¹⁴C-méthod. In: Miyake, Y. and Koyama, T., Eds., Recent Researches in Field of Hydrosphere, Atmosphere and Nuclear Geochemistry, Maruzen, Tokyo, pp. 263-283.

IRH (2021). Notice explicative Mission d'étude du système d'assainissement du Syndicat Intercommunal d'Assainissement d'Allex-Grâne et des communes d'Allex et Grâne Zonage d'assainissement des eaux usées – Commune de Grâne. 24p

Larguier C. (2006). Etat des lieux des nitrates et des pesticides dans les eaux souterraines entre Charpey et Montélier. 49p. (rapport).

Larguier C. (2006). Etude de la propagation des nitrates sur le bassin molassique d'Autichamp (Drôme). Rapport de stage Master 2PRO « hydrogéologie et environnement » Université d'Avignon.

Levasseur J. (2015). Hydrogéologie du secteur sud de la plaine de Valence. Etude de la contamination des eaux souterraines par les nitrates sur la commune de Chabrillan – Drôme (26). Mémoire de stage de Master Eau, ressource. Université Montpellier 2.

Margalhan-Ferrat H. (1991). Captage AEP des Ramières, commune d'Eurre. Périmètres de protection.

Margalhan-Ferrat H. (2009). Captage Dorier, commune d'Autichamp. Avis de l'hydrogéologue agréé sur les protections sanitaires et territoriales. 8 p.

Margalhan –Ferrat H. (1999). Champ captant des Jacomons, commune de Chabrillan, protection sanitaire et territoriale. Rapport hydrogéologue agréé.

Monnier T. (1999). Définition des périmètres de protection du captage de Terron-Fayes en vue de l'AEP de la commune de la Roche –sur-Grâne.

MRAE (2021). Mission régionale d'autorité environnementale Auvergne Rhône Alpes. Avis délibéré de la mission régionale d'autorité environnementale sur le projet d'extension des activités d'abattage et de la découpe de volailles, de la société Bernard Royal Dauphiné, à Grâne (26) - (2e avis). Avis n°2021-ARA-AP-1196. 16p.

Noel Y., Lamotte C. (2005). Définition des limites de la nappe d'accompagnement ddu Rhône sur les communes de Loriol et Livron-sur-Drôme (Drôme. Rapport BRGM/RP-53836-FR.41 p.

Olive P. (1998). La datation des eaux souterraines par le radiocarbone revisitée. Université Paris VI - centre recherches géodynamiques, 34 p.

Pang X.P., Letey J., 2000. Organic Farming: Challenge of Timing Nitrogen Availability to Crop Nitrogen Requirements. Soil Sci. Soc. Am. J. 64, pp. 247-253.

Poivert (2018). Analyse et modélisation des surplus azotés en France au cours du siècle dernier : application aux échelles départementales et communales. Thèse à l'université de Tours. 271p.

Poyry (2011). Ville de Livron sur drome – Actualisation du schéma directeur d'assainissement – dossier d'enquête publique. 36p.

Préfecture de la région Rhône-Alpes (2011). Avis de l'Autorité environnementale sur la demande d'autorisation d'extension de l'exploitation de traitement des véhicules hors d'usage.

Commune de Livron sur Drome. Département de la Drome présenté par la société Géant Pièce Auto. 4p

Rampon G. (1984). Périmètres de protection du nouveau forage, dit Borne, destiné à l'alimentation en eau potable de la commune d'Allex au lieu-dit « Laye ». Rapport GO/RHA-84/012. 5 p.

Ryser J. Pittet P., 2000. Influence du sol et de la fumure sur les cultures et le drainage des éléments fertilisants. Rev Suisse Agric 32(4). pp. 159-164.

Salem O., Visser J.H., Dray M., Gonfiantini R. (1980). Environmental isotopes used in a hydrogeological study of north-eastern Brazil. In Arid-Zone Hydrology: Investigations with Isotope Techniques, IAEA, Vienna, pp. 165-179.

Sispea - Services Eau France (2022). Observatoire national des services d'eau et assainissement. Disponible sur internet à <https://www.services.eaufrance.fr/>.

SOGREAH, 2007. Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France métropolitaine - Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques - Rapport final. 330 p.

SOGREAH, 2012. Etude volumes prélevables. Investigations complémentaires à l'aval de Livron-Loriol. Note ° 174 1596. 16 p.

Syndicat d'irrigation Drômois. (2019, 2021). Rapports d'activités

Sygreed (2019). Autorisation Environnementale Unique pour les Installations, Ouvrages, Travaux et Activités relative à la loi sur l'eau : prélèvement pour l'irrigation à des fins agricoles, dans le bassin versant topographique de la Galaure (hors prélèvements dans le Rhône et ses alluvions) pour une durée de 3 ans, 59 p.

Tamers M.A. (1967). Radiocarbon ages of groundwater in an arid zone unconfined aquifer. In Isotope Techniques in the Hydrological Cycle, AGU Monograph 11, pp. 143-152.

Thieuloy J. P. (1966). Rapport hydrogéologique sur les conditions de protection de la source 'Durand », commune de Divajeu.

Thieuloy J. P. (1986). Gisement hydrologique et protection sanitaire du nouveau puits du quartier des Pues, commune d'Allex.

Thieuloy J. P. (1987). Gisement hydrologique et protection sanitaire du nouveau puits « de la gare », commune d'Allex.

Thieuloy J. P. (1998). Mise en conformité territoriale et sanitaire du captage AEP du Buis, commune de la Roche-sur Grâne. 12 p

Tschanz X. (1997). Rapport hydrogéologique pour le forage AEP, SCI La Plaine, Chabrillan.

Van-Zwieten L., Merrington G., Van-Zwieten M. 2004. Review of impacts on soil biota caused by copper residues from fungicide application. SuperSoil 2004: 3rd Australian New Zealand Soils Conference, University of Sydney Australia, 5–9 December.

Véolia (2020). Syndicat Intercommunal d'Assainissement d'Allex Grâne - Recherche de micropolluants dans les eaux brutes et dans les eaux usées traitées de stations de traitement des eaux usées et à leur réduction - Mise en œuvre de la note technique du 12 août 2016. 32p

Vengosh, A; Rarni k. (1996). Chemical modifications of groundwater contaminated by recharge of treated sewage effluent. Journal of Contaminant Hydrology 23 347-360.

Zone Atelier Bassin du Rhône (2016). Evaluation des échanges nappes/rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau). Rapport final de phase 5 (2013-2016).

Annexe 1

Les principales étapes du traitement des données sismiques

Les lignes sismiques ont été retraitées en utilisant la migration après addition des traces (post-stack time migration ou migration post-stack), car l'ordre de couverture (nombre de traces imageant le même point) est égal à 1.

Séquence de traitement

- Mise à jour de la géométrie
- Edition des traces invalides et/ou bruitées
- Correction des statiques primaires : pointé des premières arrivées
- Correction de la divergence sphérique
- Deux itérations d'atténuation des bruits aléatoires
- Déconvolution « spike » surface consistante et déconvolution prédictive surface consistante
- Compensation des amplitudes surface consistante
- Atténuation des bruits
- Deux itérations d'analyse de vitesses et de corrections statiques résiduelles
- Addition des traces
- Migration après addition des traces (migration post-stack)
- Atténuation des bruits aléatoires post migration
- Filtre passe-bande et égalisation des amplitudes

Commentaires sur les principales étapes du traitement

- ***Mise à jour de la géométrie et édition des traces invalides ou bruitées***

La mise à jour de la géométrie des traces sismiques a été effectuée à partir des feuilles de correction contenant des informations sur le dispositif d'acquisition sur le terrain (emplacement des sources et des récepteurs) et a permis d'établir une première image de contrôle.

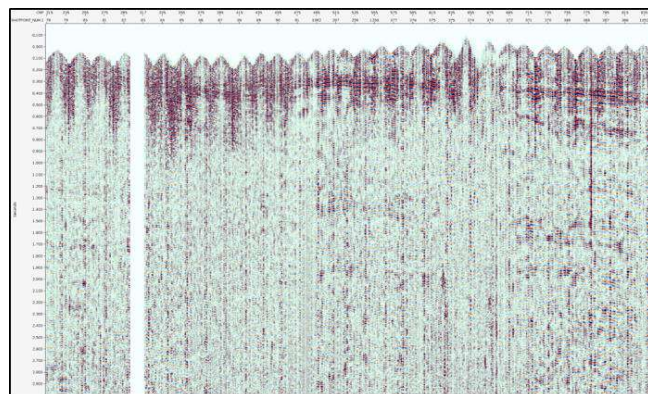


Image de la ligne sismique BM après la mise à jour de la géométrie

À partir des coordonnées des sources, les coordonnées des récepteurs et des traces ont été calculées dans les systèmes de projection Lambert 2 étendu et Lambert 93.

Les traces invalides et/ou bruitées sont éliminées par l'utilisation d'un algorithme qui élimine les amplitudes anormales.

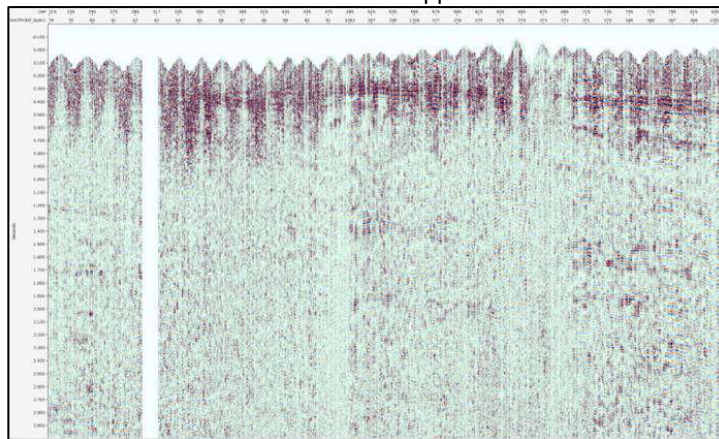
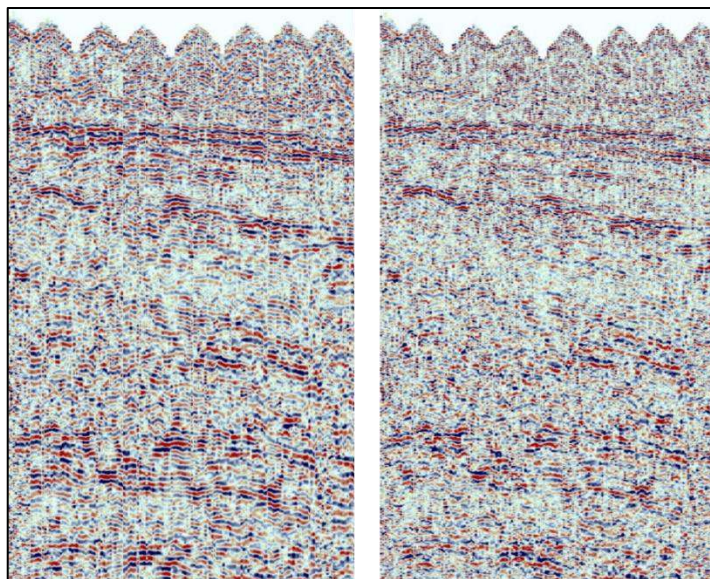


Image de la ligne sismique B2M11 après élimination des traces invalides et bruitées

- **Déconvolution**

Si le signal de la source sismique était une impulsion idéalement brève, le signal enregistré serait une série de brèves impulsions en provenance des diverses discontinuités du sous-sol. Or cette source idéale n'existe pas, de sorte que chaque discontinuité réfléchit un signal complexe. Ce signal réfléchi peut être considéré comme la convolution du signal émis et de la réponse impulsionnelle du terrain.

Pour ramener le signal de sortie à une série de brèves impulsions, il faut effectuer l'opération inverse de la convolution, d'où la déconvolution. La déconvolution aura aussi un rôle d'atténuation du pédalage du signal entre les différents marqueurs géologiques.



Extrait de la ligne sismique B2M11 avant et après déconvolution (amplitude égalisée).

- **Corrections statiques primaires**

Avant d'additionner les traces élémentaires, il faut les ramener à un plan de référence, ou Datum Plan (DP), pour tenir compte des anomalies introduites par les variations d'altitude et de vitesse près de la surface du sol. Ces variations entraînent des temps erronés de propagation des ondes dans le sol, pouvant parfois déformer voire détruire l'horizon sismique.

En effet les traces sismiques ne sont pas enregistrées sur une surface plane, et leur position est tributaire de la morphologie du terrain. De plus la vitesse dans la première tranche est variable, dans les 20 premiers mètres, qui constituent la couche altérée. Cette variabilité de la vitesse dans

la couche altérée, crée des distorsions dans les temps de propagation des ondes. Après application des corrections statiques, les traces sismiques ont été ramenées à un plan horizontal et dénudées de l'effet de la zone altérée.

- **Addition des traces**

Un couple point de tir–récepteur permet d'imager le sous-sol à une position située à mi-distance entre le point de tir et le récepteur. Plusieurs couples point de tir–récepteur imagent la même position, c'est ce qui est nommé « la couverture ». L'addition des traces consiste à additionner toutes les traces imageant la même position, pour obtenir une seule trace résultante. Cette technique permet d'améliorer le rapport signal sur bruit et d'augmenter la qualité de l'image finale.

Du fait de la faible couverture des lignes sismiques de ce projet, une addition des traces a été effectuée pour obtenir l'image finale (figure 8) avant la migration.

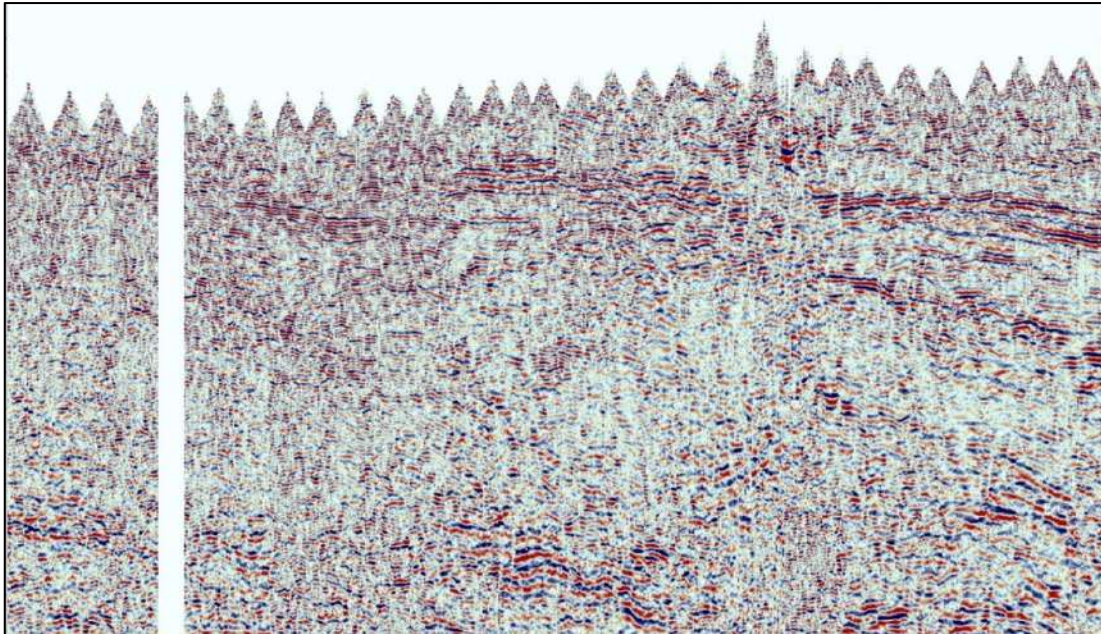


Image zoomée de la ligne sismique B2M11 après addition des traces (amplitude égalisée) et avant migration.

- **Migration après addition**

Dans des zones à forts pendages, des segments de points sont imagés dans des positions éloignées de leurs positions réelles. La migration est le procédé qui permet la remise en place des évènements à leur position réelle (figure 9).

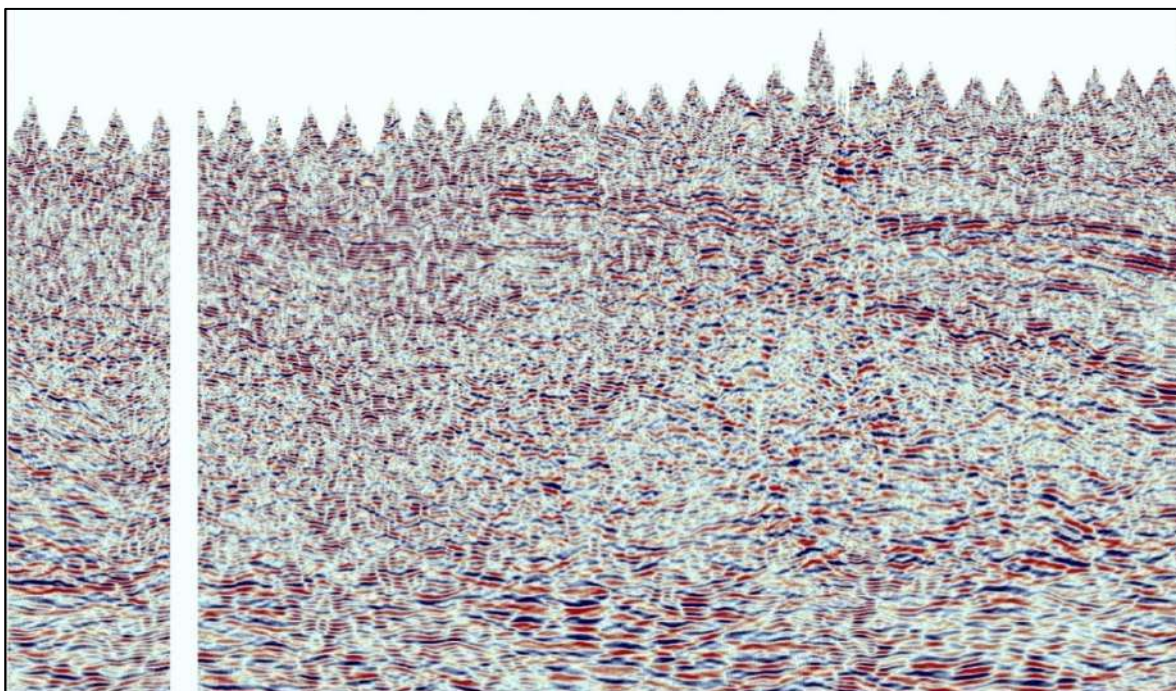
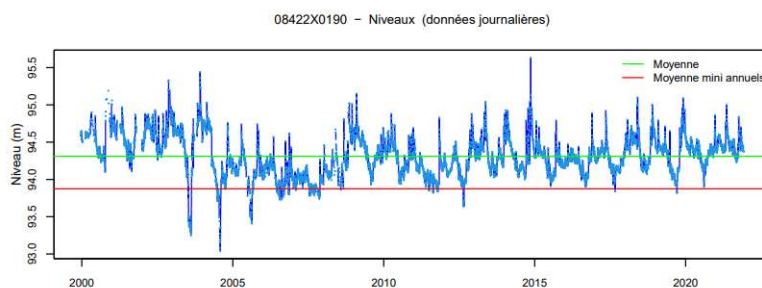


Image zoomée de la ligne sismique B2M11 après migration post-stack (amplitude égalisée).

Annexe 2

Calculs statistiques avec le logiciel ESTHER sur les données piézométriques

Piézomètre 08422X0190/F1

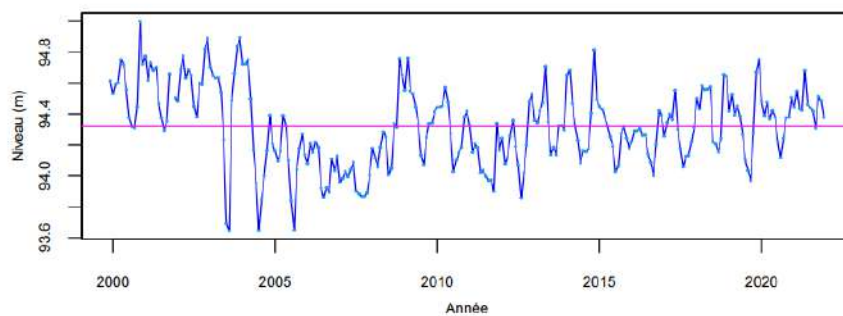


Période de mesures : du 1999-12-18 au 2021-12-03
 Nombre d'années avec mesures : 23 sur un total de 23
 Nombre de jours lus avec mesures: 7349 sur un total de 8022 jours, soit 91.6 %
 Moyenne : 94.31
 Ecart-type : 0.27
 Maximum : 95.63 à la date : 2014-11-15
 Minimum : 93.04 à la date : 2004-08-03

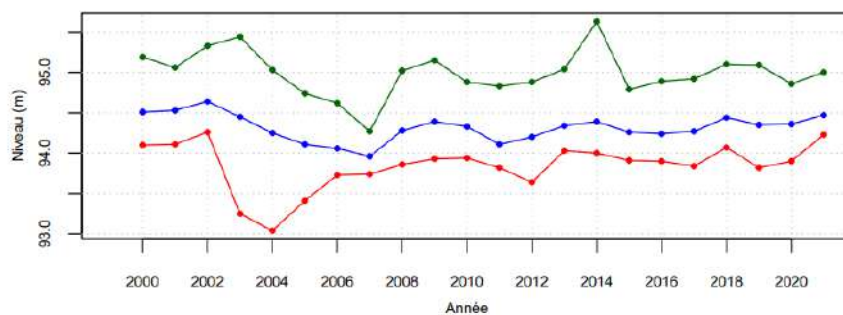
Nombre de mesures chaque année :

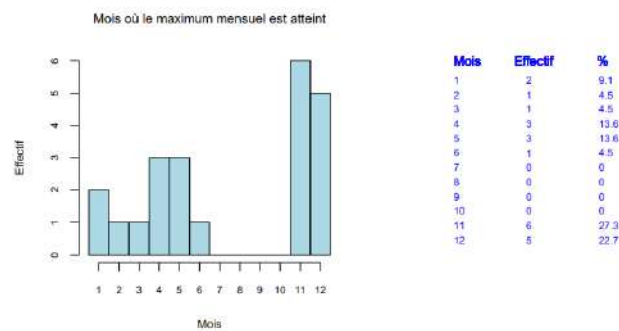
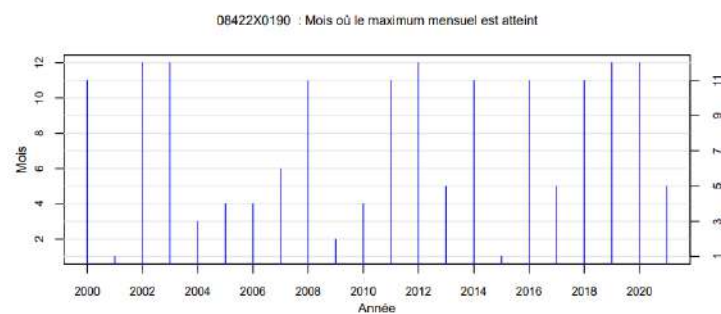
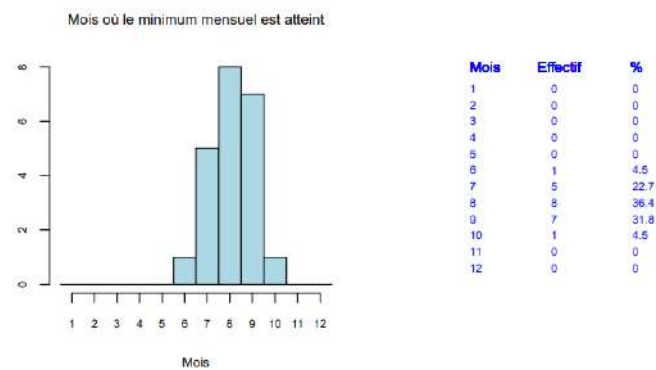
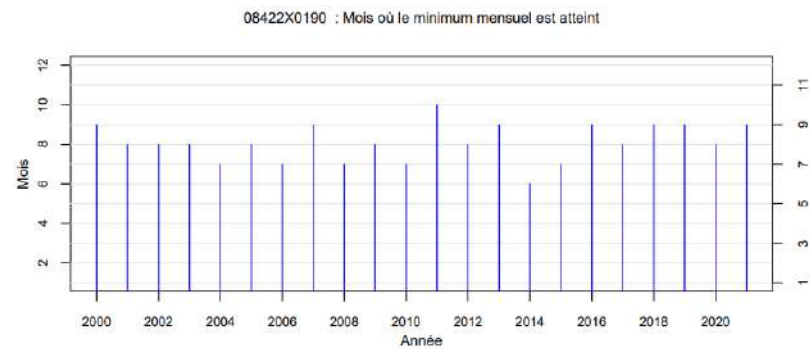
1999 14	2009 359	2019 365
2000 204	2010 363	2020 365
2001 247	2011 364	2021 337
2002 324	2012 366	
2003 327	2013 365	
2004 339	2014 365	
2005 293	2015 365	
2006 330	2016 366	
2007 326	2017 365	
2008 235	2018 365	

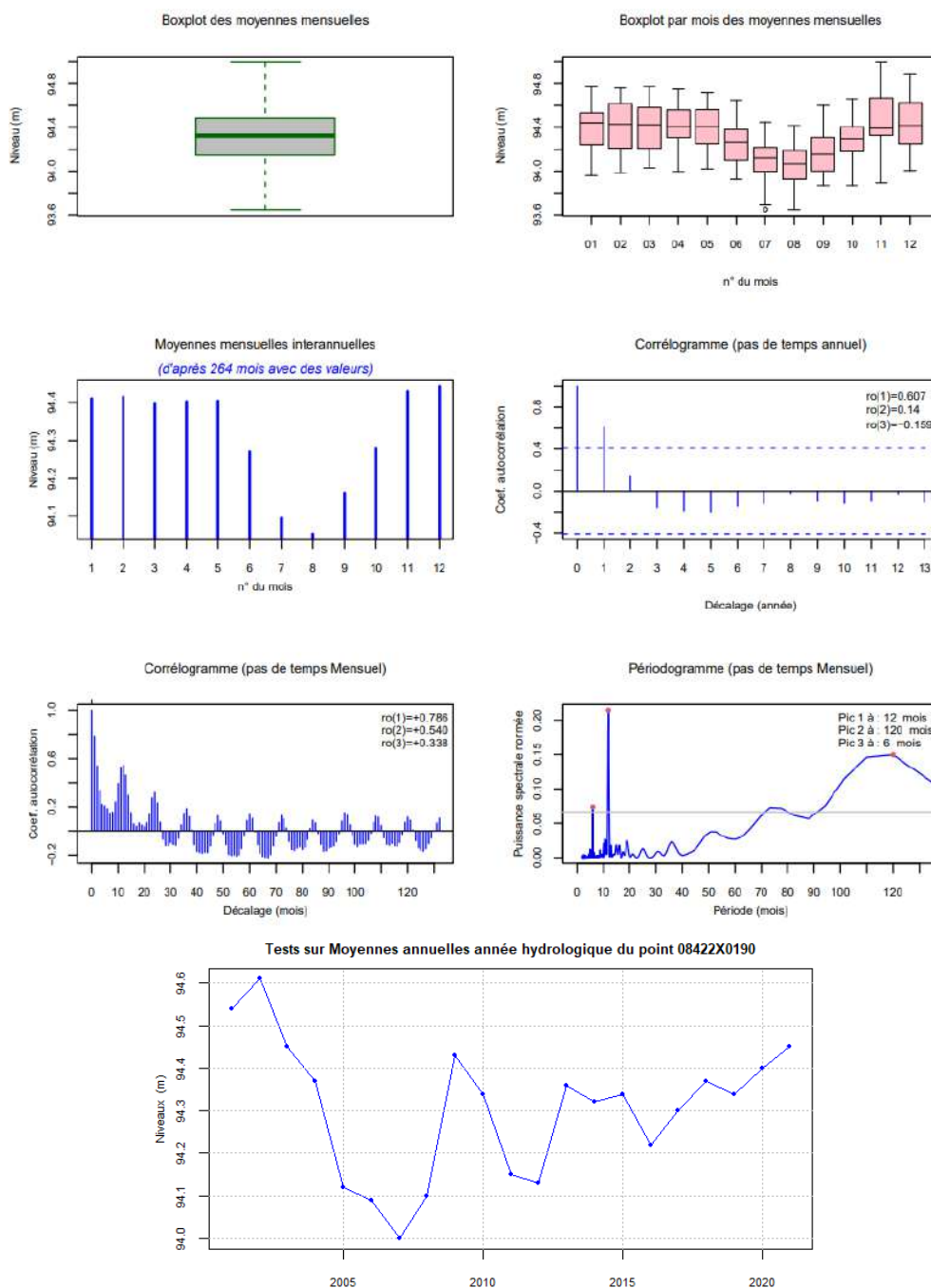
08422X0190 – Niveaux : moyennes mensuelles



08422X0190 – Niveaux : moyennes annuelles, mini et maxi







Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 8.559e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 8.953e-01
pvalue selon méthode Yue-Pilon : 8.551e-02 et selon méthode Zhang 9.799e-02

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): 0.2

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.186

Test d'homogénéité de Wilcoxon

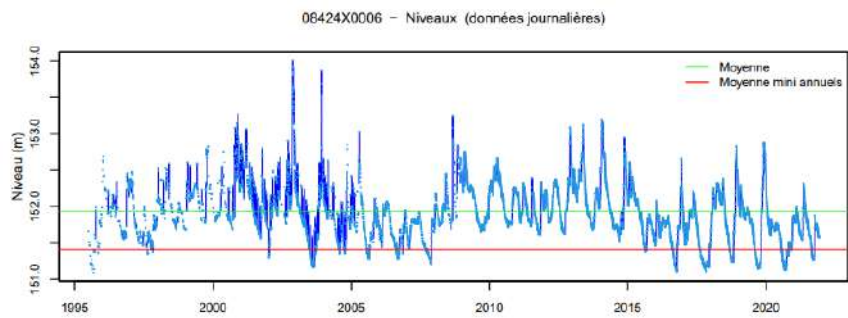
pvalue : 9.157e-01

Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 7.246e-02 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.572

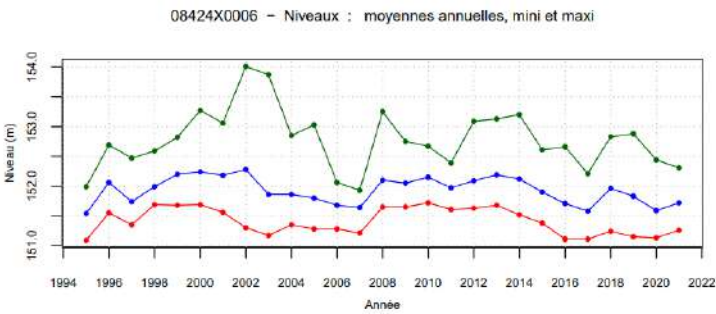
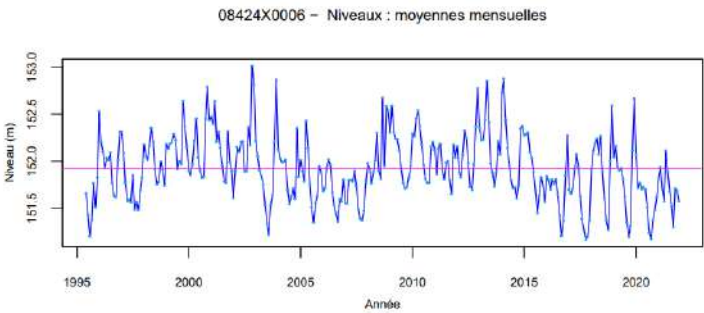
NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp.
les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettitt sont rejetés au seuil de 5%

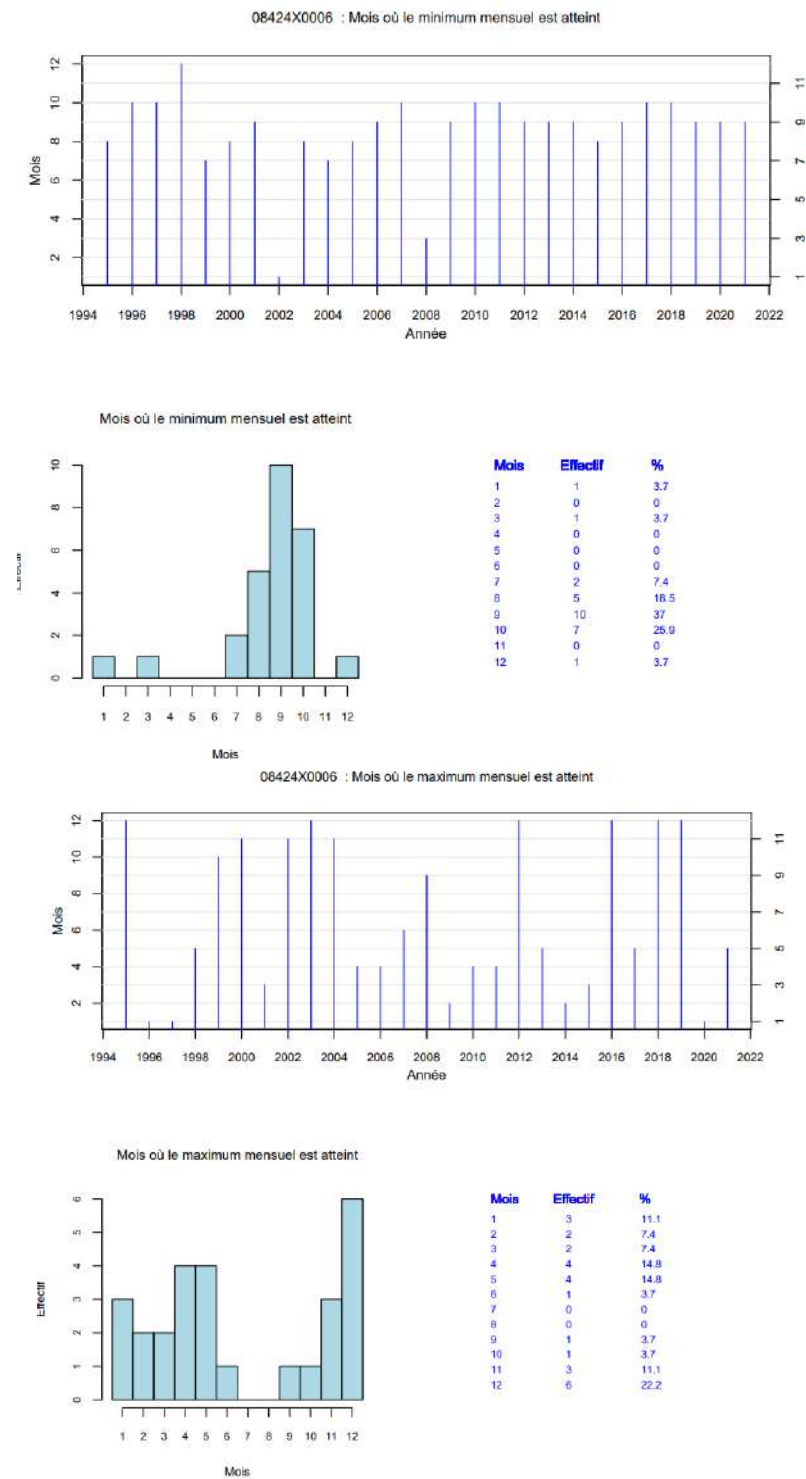
Piézomètre 08424X0006/F2

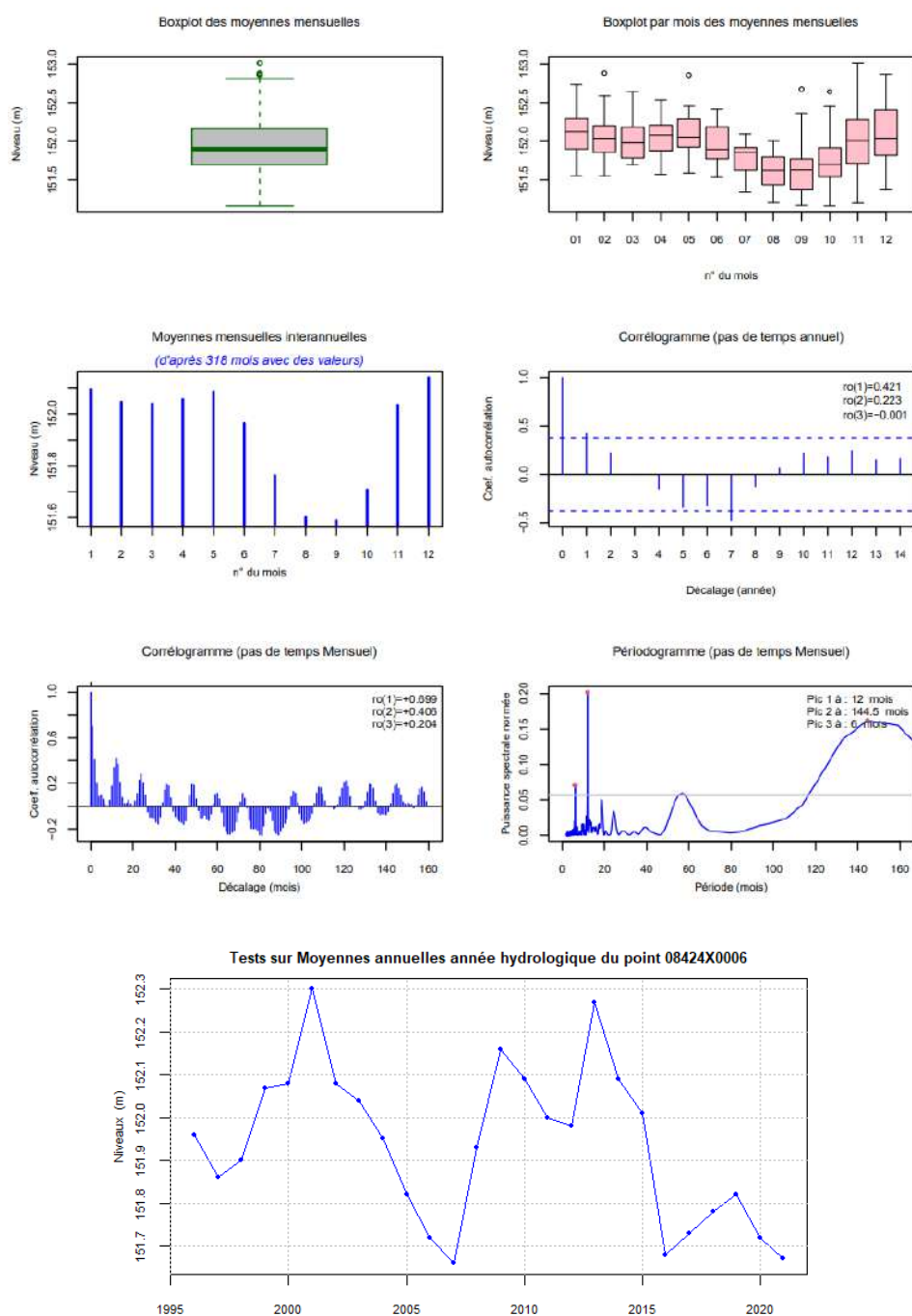


Période de mesures : du 1995-06-30 au 2021-12-02
Nombre d'années avec mesures : 27 sur un total de 27
Nombre de jours lus avec mesures: 7091 sur un total de 9853 jours, soit 73.5 %
Moyenne : 151.93
Ecart-type : 0.39
Maximum : 154.01 à la date : 2002-11-25
Minimum : 151.09 à la date : 1995-09-06
Nombre de mesures chaque année :

1995 30	2005 218	2015 364
1996 86	2006 221	2016 366
1997 154	2007 197	2017 365
1998 128	2008 203	2018 365
1999 110	2009 365	2019 365
2000 149	2010 365	2020 365
2001 223	2011 365	2021 336
2002 222	2012 368	
2003 220	2013 365	
2004 167	2014 364	







Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 1.025e-01 corrigée (Hamed-Rao) : 2.114e-01
pvalue selon méthode Yue-Pilon : 4.714e-03 et selon méthode Zhang 1.610e-01

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an) : -0.9

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.065 à la date 2015

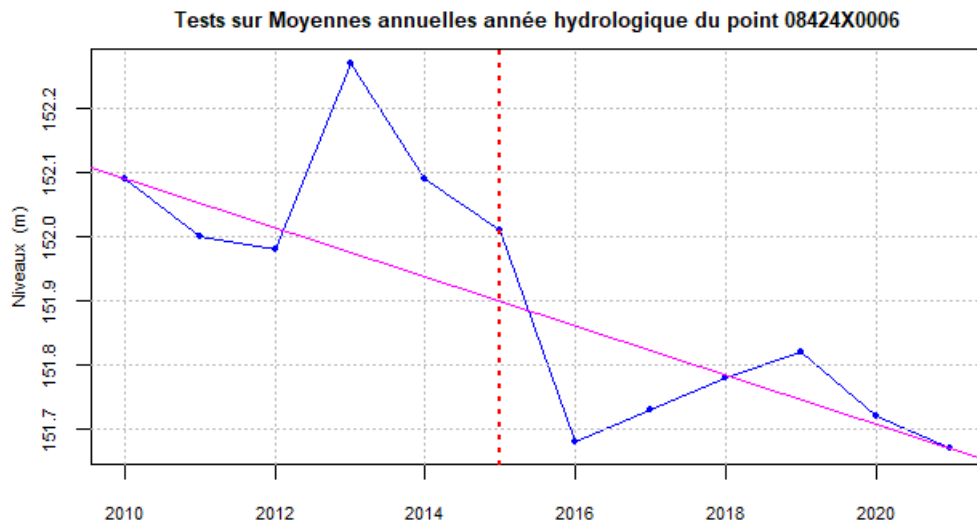
Test d'homogénéité de Wilcoxon

pvalue : 9.183e-01

Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

pvalue : 6.811e-04 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.615

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrige ou non) et de Pettitt sont rejetés au seuil de 5%



Test de tendance

Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 1.334e-02 corrigée (Hamed-Rao) : 1.765e-04
pvalue selon méthode Yue-Pilon : 1.952e-02 et selon méthode Zhang 6.171e-02

Calcul de la pente

selon la méthode de Sen (cm/an): -3.8

Test de rupture (Pettitt)

pvalue : 0.031 à la date 2015

Test d'homogénéité de Wilcoxon

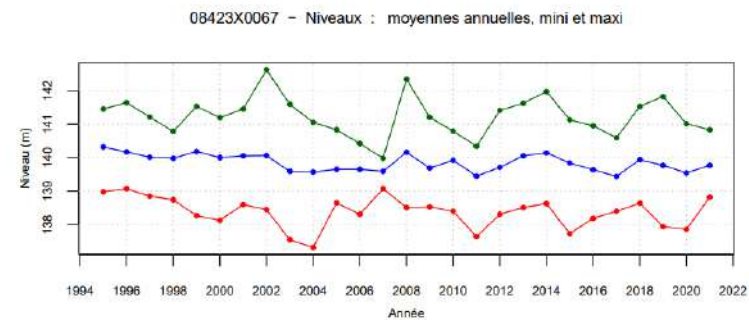
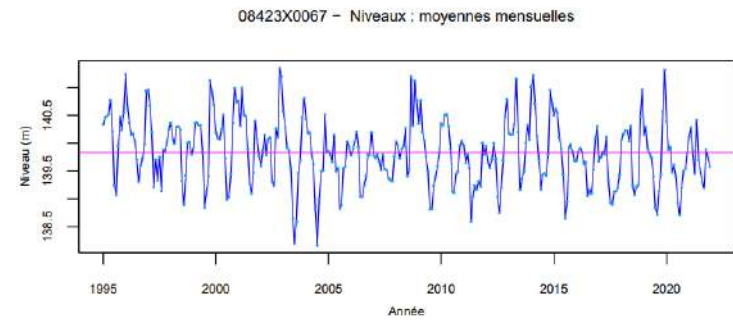
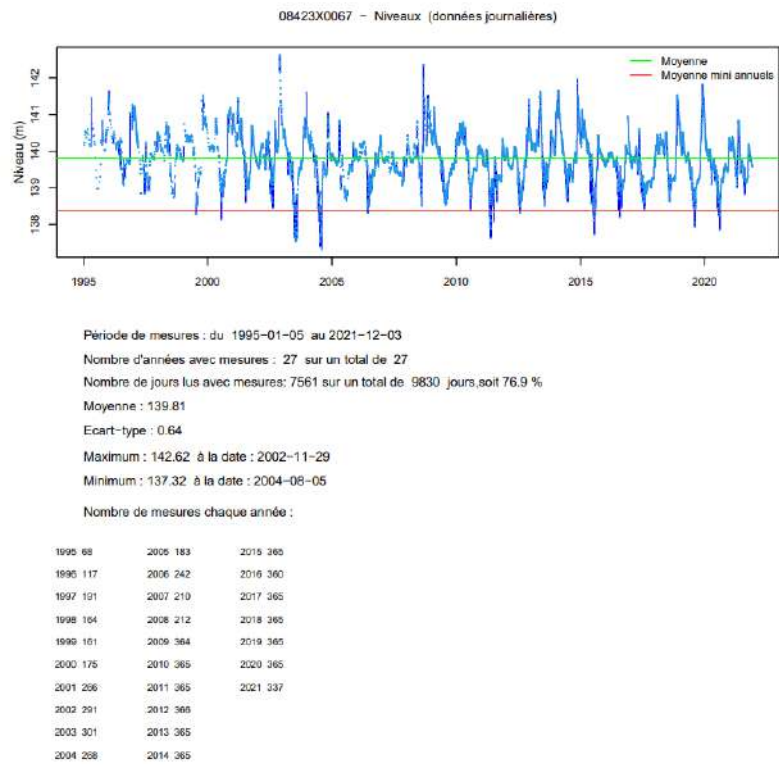
pvalue : 3.469e-01

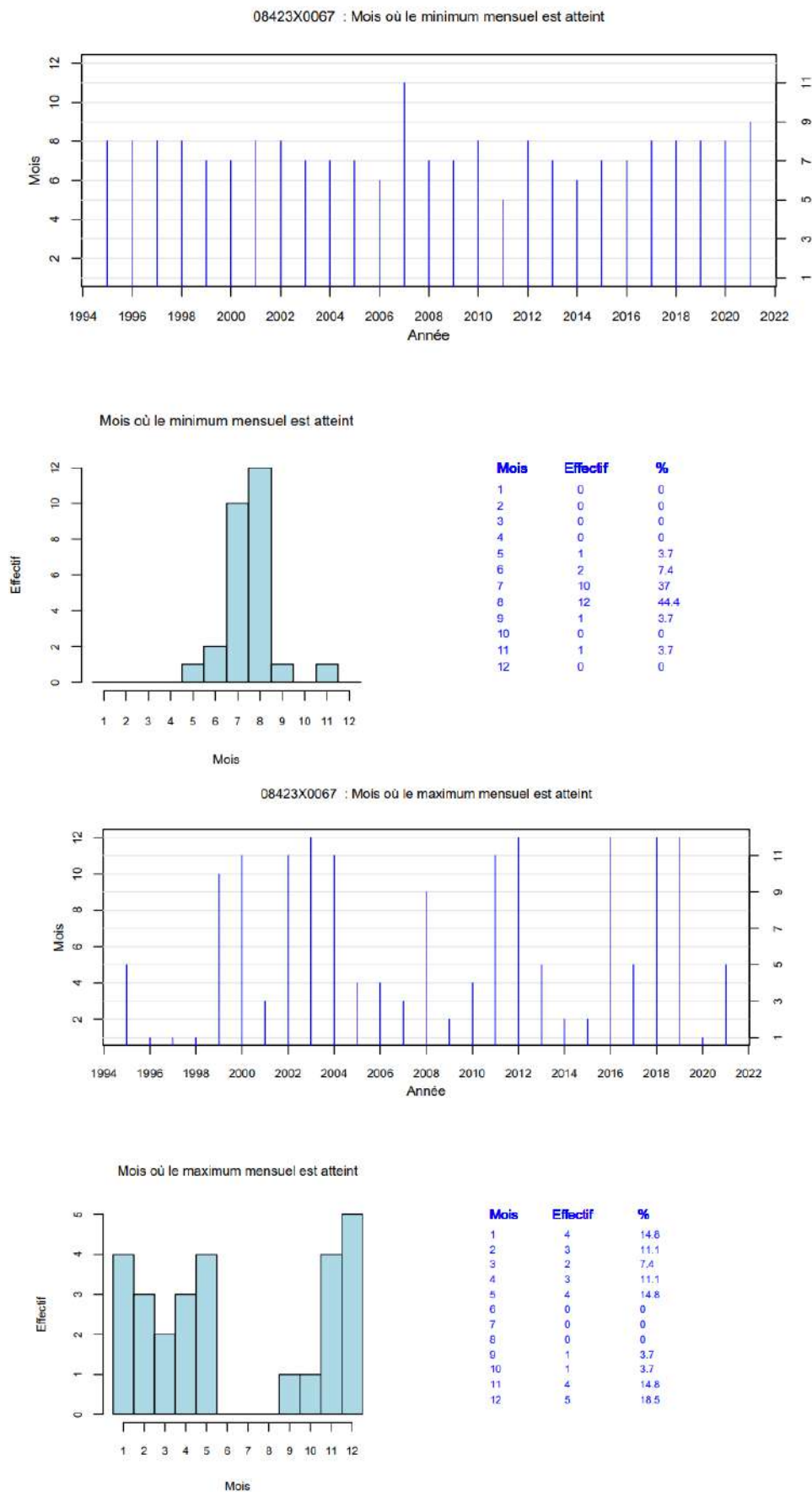
Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation

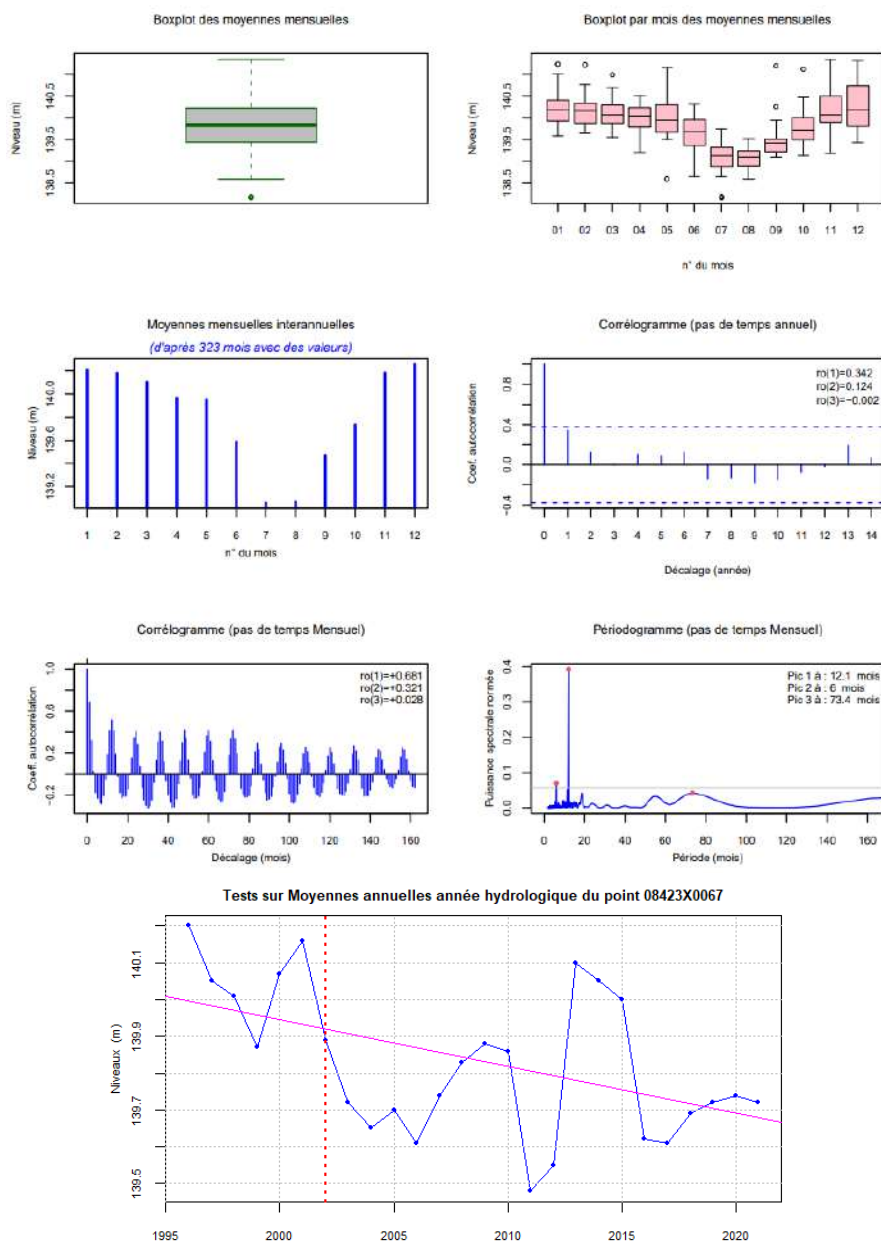
pvalue : 1.232e-03 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.586

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp. les tests de Mann-Kendall (corrigé ou non) et de Pettitt sont rejetés au seuil de 5%

Piézomètre 08423X0067/Pz







Test de tendance
 Mann-Kendall : pvalue non corrigée : 2.726e-02 corrigée (Hamed-Rao) : 9.683e-02
 pvalue selon méthode Yue-Pilon : 3.356e-02 et selon méthode Zhang 3.624e-01

Calcul de la pente
 selon la méthode de Sen (cm/an) : -1.3

Test de rupture (Pettitt)
 pvalue : 0.035 à la date 2002

Test d'homogénéité de Wilcoxon
 pvalue : 1.229e-01

Test d'indépendance de Wald-Wolfowitz et autocorrélation
 pvalue : 6.811e-04 Autocorrélation d'ordre 1 : 0.505

NB. La droite de tendance et la date de rupture sont indiquées sur le graphique si resp.
 les tests de Mann-Kendall (corrige ou non) et de Pettitt sont rejetés au seuil de 5%

Annexe 3

Coordonnées des points eaux souterraines des campagnes 2022

Commune	Code	X_L93 (m) GPS	Y_L93 (m) GPS		Commune	Code	X_L93 (m) GPS	Y_L93 (m) GPS
Allex	12	851574	6408837		Grâne	153	848529	6405498
Allex	24	851662	6407555		Grâne	163	852298	6406527
Allex	311	852985	6407524		Grâne	170	848842	6408007
Allex	427	853484	6407425		Grâne	171	850080	6407430
Allex	520	851034	6408208		Grâne	510	853092	6404885
Allex	521	849906	6408227		Grâne	511	852383	6405404
Allex	524	849977	6409095		Grâne	513	852796	6406398
Allex	528	850660	6409512		Grâne	514	850676	6404714
Allex	529	854403	6409958		Grâne	515	849638	6403668
Allex	550	852886	6407016		Grâne	517	851495	6405857
Allex	556	852589	6407128		Grâne	518	853015	6401745
Allex	577	849274	6408321		Grâne	578	852923	6405257
Allex	583	849403	6410466		Grâne	594	851970	6406822
Allex	586	849712	6408269		Grâne	701	851475	6406859
Autichamp	29	855785	6399968		Grâne	702	851132	6406800
Autichamp	31	856794	6401175		Grâne	518eau	852989	6401736
Autichamp	34	857004	6400505		Grâne	702 Ter	850885	6406902
Autichamp	37	856591	6399936		Grâne	702B	851327	6406848
Autichamp	41	856298	6399579		Grâne	800	852597	6406505
Autichamp	48	855898	6401491		Le Pouzin	715	839956	6408374
Autichamp	500	856556	6401502		Livron-sur-Drôme	188	843521	6410784
Autichamp	45M	856567	6401155		Livron-sur-Drôme	201	846953	6411994
Autichamp	46M	856174	6401014		Livron-sur-Drôme	218	843107	6409929
Autichamp	47M	855763	6401176		Livron-sur-Drôme	293	844514	6409476
Autichamp	47Mforage	855776	6401157		Livron-sur-Drôme	534	848820	6410698
Chabrillan	58	853843	6403072		Livron-sur-Drôme	535	848196	6411863
Chabrillan	504	854932	6404820		Livron-sur-Drôme	536	847347	6410326
Chabrillan	505	854819	6404814		Livron-sur-Drôme	537	843672	6412200
Chabrillan	508	854969	6403510		Livron-sur-Drôme	538	843348	6411347
Chabrillan	509	855473	6403822		Livron-sur-Drôme	545	842461	6413049
Chabrillan	563	855199	6403760		Livron-sur-Drôme	571	847996	6413181
Chabrillan	565	855093	6403826		Livron-sur-Drôme	581	843825	6413253
Chabrillan	567	854977	6404346		Livron-sur-Drôme	582	847927	6408652
Chabrillan	572	854943	6404558		Livron-sur-Drôme	584	845819	6410488
Chabrillan	573	855035	6404579		Livron-sur-Drôme	591	845837	6413730
Chabrillan	588	855152	6405653		Livron-sur-Drôme	704	841450	6409933
Chabrillan	595	856002	6402131		Livron-sur-Drôme	706	841412	6410926
Chabrillan	596	855959	6402575		Livron-sur-Drôme	707	840437	6410499
Chabrillan	597	855598	6402627		Livron-sur-Drôme	708	841353	6409469
Chabrillan	598	856291	6404022		Livron-sur-Drôme	710	842196	6412737
Chabrillan	705	853972	6406208		Livron-sur-Drôme	581 bis	844065	6413117
Chabrillan	705 bis	853913	6406316		Livron-sur-Drôme	584 bis	845770	6410114
Crest	599	858854	6405288		Loriol-sur-Drôme	237	841755	6407966
Crest	716	860057	6404226		Loriol-sur-Drôme	239	840623	6408928
Crest	717	858026	6406568		Loriol-sur-Drôme	290	841504	6409271
Crest	718	857904	6406521		Loriol-sur-Drôme	292	844475	6409331
Crest	103 bis	858822	6406541		Loriol-sur-Drôme	540	844138	6409100
Divajeu	113	858306	6403056		Loriol-sur-Drôme	541	842087	6408904
Divajeu	115	857441	6404042		Loriol-sur-Drôme	558	842119	6407007
Divajeu	532	857860	6402469		Loriol-sur-Drôme	579	843114	6408106
Divajeu	533	857005	6405284		Loriol-sur-Drôme	589	840371	6406062
Divajeu	561	856730	6405408		Loriol-sur-Drôme	592	840873	6407331
Divajeu	576	858427	6403006		Loriol-sur-Drôme	290 bis	841488	6409204
Divajeu	532 bis	857962	6402414		Loriol-sur-Drôme	291 bis	842981	6408965
Eurre	125	854975	6406674					
Eurre	144	855964	6406021					
Eurre	527	855732	6406440					
Eurre	530	854850	6409363					
Eurre	531	855079	6407844					
Eurre	547	856003	6406204					
Eurre	548	856488	6405803					
Eurre	575	857244	6407722					
Eurre	587	854198	6406845					
Eurre	719	856900	6406755					



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Auvergne-Rhône-Alpes

12 avenue des Landais

63170 Aubière

Tél. : 04.73.15.23.00

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm