



Syndicat Mixte de
l'Argens



Rapport

Etude de caractérisation des ressources souterraines du bassin versant de la Nartuby et définition de zones de sauvegarde

Rapport de phase 5 – Interprétation des résultats des investigations complémentaires



Rapport n°114737/version B – 19 septembre 2022

Projet suivi par Léo CLENET – 06.28.67.88.49 – leo.clenet@anteagroup.fr



www.anteagroup.fr/fr

Fiche signalétique

Etude de caractérisation des ressources souterraines du bassin versant de la Nartuby et définition de zones de sauvegarde
Rapport de phase 5 – Interprétation des résultats des investigations complémentaires

CLIENT	SITE
Syndicat Mixte de l'Argens	Bassin versant de la Nartuby
Adresse postale	2 avenue de Lazare Carnot 83300 Draguignan
Nom	Rémi GUERISSE
Fonction	Chargé de projet contrat de rivière Nartuby
Tél	09.72.45.24.93
Mail	r.guerisse@syndicatargens.fr

RAPPORT D'ANTEA GROUP

Responsable du projet	Léo CLENET
Interlocuteur commercial	Nicolas BLANCHOIN
Implantation chargée du suivi du projet	Implantation d'Aubagne
Rapport n°	114739
Version n°	version B
Votre commande et date	Référence / date : AE du 06/03/2020
Projet n°	PACP190431

	Nom	Fonction	Date
Rédaction	L. CLENET (Antea Group) P. FENART (Hydrofisis)	Hydrogéologues	Septembre 2022
Approbation	V. DURAND	Responsable d'équipe	Septembre 2022
Relecture qualité	M-L. ANTONUCCI	Secrétariat	Septembre 2022

Suivi des modifications

Indice Version	Date de révision	Nombre de pages	Nombre d'annexes	Objet des modifications
A	04/03/2022	84	0	Version initiale
B	19/09/2022	87	0	Mise à jour suite aux données collectées entre février et septembre 2022 (piézométrie et jaugeage)

Sommaire

1. Présentation du projet et des objectifs	7
1.1. Le contexte du projet	7
1.2. Les objectifs de l'étude.....	8
1.3. L'objet de ce rapport	8
2. Justification des investigations complémentaires.....	9
2.1. Lacunes existantes à l'issue des phases 1 et 2	9
2.2. Programme d'investigation retenu	12
2.3. Planning	12
3. Suivi chimique des eaux souterraines	14
3.1. Objectifs	14
3.2. Méthodologie	15
3.3. Résultats	17
3.4. Interprétations des résultats	23
4. Suivi piézométrique	25
4.1. Objectifs	25
4.2. Méthodologie	27
4.3. Résultats	30
4.4. Interprétations des résultats	34
5. Campagnes de jaugeage	36
5.1. Objectifs	36
5.2. Méthodologie	37
5.3. Résultats	41
5.3.1. Amont du bassin versant	42
5.3.2. Aval du bassin versant.....	47
5.4. Interprétations des résultats	51
5.4.1. Amont du bassin versant	51
5.4.2. Aval du bassin versant.....	57
6. Traçage	61
6.1. Objectifs	61
6.2. Mode opératoire	62
6.2.1. Principe du traçage des eaux souterraines	62
6.2.2. Point d'injection	63
6.2.3. Période d'injection	63
6.2.4. Choix du traceur et quantité injectée	65
6.2.5. Points de suivi	65

6.2.6.	Suivi des volumes pompés	68
6.2.7.	Analyse des échantillons	68
6.3.	Conditions de réalisation du traçage.....	68
6.3.1.	Date et lieu d'injection	68
6.3.2.	Contexte hydrologique.....	71
6.4.	Résultats	72
6.4.1.	Approche générale.....	72
6.4.2.	Restitution observée et mesurée.....	72
6.4.1.	Caractéristiques de la restitution	74
6.5.	Interprétations des résultats	76
7.	Conclusion	78
7.1.	Synthèse des résultats.....	78
7.2.	Impacts sur les zones de sauvegarde pré-identifiées en phase 2	81
7.3.	Recommandations.....	82
7.3.1.	Suivi piézométrique	82
7.3.2.	Suivi des débits.....	82
7.3.3.	Investigations complémentaires	82

Table des figures

Figure 1 :	Procédures associées à la protection des ressources en eau	7
Figure 2 :	Points de prélèvement pour les analyses physico-chimiques de Phase 5	16
Figure 3 :	Evolution des paramètres physico-chimiques associés au forage de Pont d'Aups	17
Figure 4 :	Evolution des paramètres physico-chimiques associés au forage de Valaury	18
Figure 5 :	Evolution des paramètres physico-chimiques associés à la source de La Foux	19
Figure 6 :	Diagramme de Piper des eaux de Valaury	23
Figure 7 :	Evolution de la concentration en nitrates et bicarbonates au droit des points de suivi	24
Figure 8 :	Suivi piézométrique en continu prévisionnel de Phase 5	26
Figure 9 :	Localisation des piézomètres créés à Draguignan	28
Figure 10 :	Localisation du piézomètre créé à Trans-en-Provence	28
Figure 11 :	Chronique piézométrique des ouvrages jusqu'au 05/09/2022	32
Figure 12 :	Synthèse du suivi piézométrique à l'issue de la Phase 5 (avec les cotes piézométriques moyennes en m NGF)	33
Figure 13 :	Localisation des zones d'apport et de perte de la Nartuby identifiées par le BRGM-CEREMA en 2013	37
Figure 14 :	Mesures de jaugeage intégrées à la Phase 5	40
Figure 15 :	Conditions climatiques de l'année 2021	41
Figure 16 :	Débits de la Nartuby en amont du bassin versant de janvier 2021 à juillet 2022	43
Figure 17 :	Débits de la Nartuby d'Ampus de janvier 2021 à juillet 2022	44
Figure 18 :	Température mesurée aux points de suivi de la Nartuby en amont du bassin versant	45
Figure 19 :	Conductivité mesurée aux points de suivi de la Nartuby en amont du bassin versant	46
Figure 20 :	Débits de la Nartuby en aval du bassin versant de janvier 2021 à juillet 2022	48
Figure 21 :	Température mesurée aux points de suivi de la Nartuby en aval du bassin versant	49
Figure 22 :	Conductivité mesurée aux points de suivi de la Nartuby en aval du bassin versant	50

Figure 23 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby d'Ampus	52
Figure 24 : Principale zone d'apport suspectée entre les Frayères et les Ferrières	53
Figure 25 : Synthèse cartographique des modalités d'alimentation et de restitution de l'aquifère Jurassique en amont du bassin versant de la Nartuby	55
Figure 26 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby amont	56
Figure 27 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby dans le secteur des Frayères	56
Figure 28 : Photographies des arrivées d'eau constatées en aval des gorges de Trans-en-Provence	58
Figure 29 : Synthèse cartographique des modalités d'alimentation et de restitution de l'aquifère Muschelkalk en aval du bassin versant de la Nartuby	59
Figure 30 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby aval	60
Figure 31 : Cartographie des résultats du traçage réalisé en 1973 (R. COVA)	62
Figure 32 : Schéma de principe du traçage envisagé dans les gorges de Châteaudouble	63
Figure 33 : Evolution des débits de la Nartuby au cours d'une année (moyennes interannuelles, source : SMA)	64
Figure 34 : Répartition mensuelle des pluies sur la commune de Draguignan (1997-2018)	64
Figure 35 : Localisation des points de suivi du traçage	66
Figure 36 : Exemple d'instrumentation d'un point de suivi lors d'un essai de traçage	67
Figure 37 : Localisation du point d'injection du traceur	69
Figure 38 : Photographies prises lors de l'injection	70
Figure 39 : Contexte climatique au cours du traçage	71
Figure 40 : Concentration en fluorescéine détectée aux points de suivi	73
Figure 41. Eléments caractéristiques d'un courbe de restitution de traceur	74
Figure 42 : Interprétation du traçage	77
Figure 43 : Interpolation du toit du Muschelkalk à proximité de Draguignan	83
Figure 44 : Profils géophysiques envisagés	84

Table des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des investigations complémentaires proposées à l'issue de la Phase 1 et intégrée à la Phase 5	11
Tableau 2 : Planning global des investigations de phase 5	13
Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de l'aquifère du Muschelkalk	14
Tableau 4 : Résultats des analyses d'eau (1)	20
Tableau 5 : Résultats des analyses d'eau (2)	21
Tableau 6 : Résultats des analyses d'eau (3)	22
Tableau 7 : Caractéristiques techniques des piézomètres nouvellement créés	27
Tableau 8 : Statistiques piézométriques des ouvrages suivis	30
Tableau 9 : Planning détaillé des tournées de prélèvement planifiées dans le cadre du traçage	67
Tableau 10 : Résultats de la restitution au point de suivi en amont des Frayères	75
Tableau 11 : Résultats de la restitution au point de suivi des Ferrières	76

1. Présentation du projet et des objectifs

1.1. Le contexte du projet

Le Syndicat Mixte de l'Argens (SMA) a été créé en 2014 en réponse aux inondations de 2010 sur les secteurs de la Dracénie et de la basse vallée de l'Argens. Son périmètre de compétence s'étend au bassin versant de l'Argens et regroupe 74 communes réparties en 8 intercommunalités sur le département du Var.

Si l'alimentation en eau potable présente un enjeu d'intérêt majeur, la compréhension des modalités d'échanges entre le karst et la nappe alluviale de la Nartuby, les problématiques de soutien d'étiage ou encore le maintien de la fonctionnalité des milieux constituent également des enjeux essentiels pour le SMA.

Les ressources utilisées pour l'alimentation en eau potable de la zone d'étude sont actuellement diversifiées et suffisantes mais sont en revanche toutes soumises à des problématiques variées (turbidité, augmentation de la salinité, changement climatique). La présente étude doit donc participer à la sécurisation de l'alimentation en eau potable (pour les captages actuels et de nouvelles zones de recherches à anticiper).

Les études de caractérisation et de protection des zones de sauvegarde sont des sujets complexes. Elles nécessitent des méthodologies d'étude éprouvées (retours d'expérience) et d'engager des actions de concertation et de communication avec les différents acteurs du territoire afin de proposer des actions d'interventions réellement opérationnelles.

Type d'outils	Protection d'un captage (qualitatif et quantitatif)		Actions correctives	Prospective amont
	Loi sur l'eau et les milieux aquatiques	DUP et Périmètres de protection	Aire d'alimentation de captage	Zones de sauvegarde
Service pilote	DDTM	ARS	DDTM	Agence de l'Eau
Bases juridiques	Articles L214-1 à L214-4 et R214-1 du code de l'environnement	Articles L.1321-2 et R.1321-13 du code de la santé publique	DCE (orientations) Articles L211-3-5 de la loi sur l'eau Articles R.114-1 à R144-10 du code rural	DCE (orientations) SDAGE (mise en application) Article L211-3 du Code de l'Environnement
Objectifs	Préservation des équilibres des écosystèmes	Protection contre les pollutions ponctuelles et accidentelles	Lutte contre les pollutions diffuses	Préserver des zones en vue de leur utilisation dans le futur pour la consommation humaine.
Fait générateur	Tous les captages publics d'eau destinée à la consommation humaine		Captages Grenelle ou Comité Dep. de l'Eau	Masses d'eau définies dans le SDAGE
Moyens d'actions	Déclaration d'Utilité Publique (déclinaison dans les documents d'urbanismes)		Actions volontaires : programme d'actions	SAGE SCOT, PLU
Application	Systématique et obligatoire pour tous les captages		A l'initiative du Préfet (possibilité de rendre obligatoires les mesures préconisées)	Mesures et préconisations dans le SAGE (PAGD et Règlement)

Figure 1 : Procédures associées à la protection des ressources en eau

1.2. Les objectifs de l'étude

Dans le cadre de l'action B1.1 du second contrat de rivière de la Nartuby et en réponse à l'action 5E-01 « protéger les ressources stratégiques pour l'alimentation en eau potable » du SDAGE 2010-2015, la présente étude lancée par le SMA a pour objectifs principaux :

- D'améliorer la connaissance et de caractériser le fonctionnement hydrogéologique des eaux souterraines ;
- D'identifier les secteurs stratégiques pour l'alimentation en eau potable et de déterminer des objectifs de gestion de nappe ;
- De définir et caractériser des zones de sauvegarde pour le futur (ZSF) pour l'alimentation en eau potable et de mettre en œuvre des actions concrètes pour assurer la protection des ressources en eau au niveau des différents documents d'urbanisme ;
- De mieux comprendre les relations entre eaux souterraines et superficielles et de définir un réseau de suivi piézométrique permettant d'aboutir à une gestion durable de la ressource.

Il est important de noter que les deux principales masses d'eau souterraines du secteur d'étude, à savoir « l'Aquifère des Plateaux calcaires des Plans de Canjuers » (masse d'eau FRDG139) et les « Calcaires et dolomies du Muschelkalk de l'avant-pays provençal » (masse d'eau FRDG169), sont identifiées dans le SDAGE comme ressources patrimoniales pour l'AEP et/ou comme aquifères stratégiques (karst) pour l'alimentation en eau potable.

A ce titre, l'approche de type « ressource stratégique » qui sera menée vise à identifier des secteurs à forts enjeux (déjà exploités ou non), appelés zones de sauvegarde pour le futur (ZSF), qu'il conviendra de préserver pour les besoins futurs en eau potable et de prendre les dispositions nécessaires à leur protection.

En ce sens, la mission est organisée selon le phasage suivant :

- Phase 1 : Caractérisation des eaux souterraines sur le territoire ;
- Phase 2 : Détermination des objectifs de gestion de nappe ;
- Phase 3 : Détermination des ZSRE et des ZSRNE (Zones de Sauvegarde des Ressources Exploitées et des Ressources Non Exploitées) ;
- Phase 4 : Proposition d'un réseau de suivi piézométrique ;
- Phase 5 (au cours de l'étude) : Réalisation de reconnaissances complémentaires.

1.3. L'objet de ce rapport

Le présent rapport présente les objectifs et les résultats de l'ensemble des investigations complémentaires intégrées à la phase 5 dans le but de lever les incertitudes existantes relevées à l'issue des phases 1 et 2.

2. Justification des investigations complémentaires

2.1. Lacunes existantes à l'issue des phases 1 et 2

Les acquis concernant la connaissance hydrogéologique des unités sont très inégaux y compris pour les secteurs les mieux étudiés comme le Malmont ou les Frayères. L'amélioration de l'exploitation des ressources en eau passera nécessairement par une amélioration des connaissances sur les aquifères.

Il est ainsi nécessaire d'évaluer les réserves potentielles, notamment des unités les plus intéressantes, dans un équilibre quantitatif de manière à ne pas impacter durablement les ressources notamment au moyen de pompages et rabattements excessifs, sachant que l'intérêt principal des réservoirs karstiques est leur recharge rapide en cas de précipitations soutenues et leur capacité à la surexploitation saisonnière. Il convient donc d'évaluer lesquels de ces réservoirs présentent une ressource renouvelable cohérente avec leur exploitation durable.

En ce sens, deux types d'exploitation pourront être envisagés avec :

- Une exploitation gravitaire comme cela est actuellement le cas sur de nombreuses sources (Dragon, Fontvielle, Frayères, Magdeleine, Béou Téou, Domaine, etc. ;
- Une exploitation par forage ou captage immergé (souterrain) et gestion active avec rabattement du niveau piézométrique. Dans ce type d'exploitation, des études complémentaires seront nécessaires afin d'évaluer les capacités des aquifères (recharge vs pompages) et l'impact de pompages sur de potentielles interconnexions entre aquifères notamment les relations nappe(s)/rivière dans la plaine de Draguignan.

Dans une démarche de sauvegarde des masses d'eau, les zones contributives devront être prises en considération. Une analyse des modalités d'infiltration permettrait de définir des zones de priorité en termes de protection de la ressource, en définissant notamment des zones d'alimentation directe et rapide, des zones de contribution retardée ou tamponnée avec potentiellement des phénomènes de dilution ou de concentration et des zones d'alimentation par ruissellements. Notamment, l'importance des infiltrations directes des précipitations, auxquelles s'ajoutent les pertes des ruissellements de surface à leur traversée des reliefs calcaires, font des aquifères karstiques des ressources particulièrement vulnérables aux pollutions.

L'analyse bibliographique complétée par les visites de terrain amènent aux hypothèses suivantes :

- Les pertes localisées dans les gorges de Châteaudouble pourraient participer à l'alimentation du massif karstique en rive gauche de la Nartuby dont une zone de résurgence serait localisée aux Ferrières (plus en aval de la source exploitée des Frayères) ;
- L'aquifère du Muschelkalk serait compartimenté en deux nappes distinctes séparées par un horizon marneux d'une vingtaine de mètres. Le compartiment supérieur serait représentatif de l'amont de la vallée de Draguignan : forages de Pont d'Aups ou Sainte Anne. Tandis que le compartiment inférieur serait à l'origine des résurgences entre Trans-en-Provence et La Motte (débit total estimé à 1 m³/s) ;
- La source de la Foux pourrait être alimentée conjointement par les deux compartiments Muschelkalk dans des proportions variables ;
- Le toit des calcaires du Muschelkalk pourrait présenter une zone de dépression dans le secteur de Sainte Anne (paléo-poljé) jusqu'à la Foux. Ce talweg pourrait constituer un axe de drainage préférentiel de la nappe. La source de la Foux étant située en point bas de la plaine de Draguignan.

Afin de lever ces incertitudes, un programme d'investigation a été proposé en Phase 1. La synthèse de ces prescriptions est mentionnée dans le tableau en page suivante.

Investigation	Objectif(s)	Zone d'investigation envisagée	Coût	Intégrée à la Phase 5
Traçage – Gorges de Châteaudouble	Caractériser le bassin d'alimentation des Frayères et confirmer ou infirmer l'alimentation des Ferrières via les pertes de la Nartuby dans les gorges de Châteaudouble	Injection dans les zones de perte des gorges de Châteaudouble, et suivi aux Frayères et Ferrières	Faible : 10-15 k€	Oui
Traçage – vallons Muschelkalk	Définir les modalités d'alimentation et l'extension du/des bassin(s) d'alimentation de/des aquifères Muschelkalk et les directions d'écoulement des différents compartiments	Injection dans les zones de perte du Rioufreid et du Riou de Claviers, et suivi à La Foux et aux résurgences entre Trans et La Motte et sur la bordure Est	Elevé : 50-70 k€ (quantité de traceur importante vu la distance et les dynamiques supposées, suivi dense)	Non
Jaugeages (ou observation visuelle a minima)	Caractériser les zones d'apport et de perte sur le linéaire de la Nartuby ou de ses affluents, et définir des seuils de débit pour lesquels la Nartuby alimente le karst	La Nartuby de Montferrat à Trans-en-Provence	Faible : prise en charge SMA	Prise en charge SMA
Observations visuelles (ou jaugeage si possibilité)	Définir les zones de perte et la recharge via les apports des cours d'eau de surface	Rioufreid (Figanières), Riou sec (Figanières/Callas), le Réal (Les Arcs), Riou de Claviers (Claviers), Nartuby d'Ampus	Faible : prise en charge SMA	Prise en charge SMA
Piézométrie –Doublet de piézomètres en bordure de la Nartuby	Caractériser les relations entre la Nartuby et la nappe alluvions/Muschelkalk sup., et la dynamique du compartiment inférieur sous-jacent	Parcelle BL635 à Draguignan	Modéré : 40-60 k€ (profondeurs prévisionnelles de 50 et 100 m)	Prise en charge SMA (marché à bon de commande géotechnique)
Piézométrie –Piézomètre sur le massif Muschelkak	Caractériser la dynamique du compartiment Muschelkalk inférieur	Secteur du lieu-dit « Baudin » à Trans-en-Provence	Modéré : 20-30 k€ (profondeur prévisionnelle 100 m)	Prise en charge SMA (marché à bon de commande géotechnique)
Piézométrie – Instrumentation	Caractériser la dynamique des différentes nappes en aval de Rebouillon (nouveaux forages, Incapis)	Draguignan et Trans-en-Provence (5 ouvrages)	Faible : 550€/ouvrage en location (pour un an sans mise en place) ou 1200€/ouvrage en achat	Oui
Mesures physico-chimiques de base	Définir la signature physico-chimique des eaux de façon simple et rapide au cours de l'année	Points de jaugeage, observations visuelles et suivi piézométrique	Faible : 1 000 € (acquisition sonde multi-paramètres par SMA)	Prise en charge SMA
Mesures physico-chimiques (ions et anions majeurs)	Définir la signature physico-chimique des eaux en laboratoire au cours d'un cycle hydrologique (Caractériser la dynamique et les interactions entre les différents compartiments aquifères)	Forage de Pont d'Aups, source de La Foux, forage de Vallauray	Faible : 60€/points Suivi mensuel sur un cycle hydrologique pour 3 points : 2 160€ (frais de laboratoire uniquement)	Oui
Prospection géophysique	Détermination de la géométrie du toit des carbonates du Muschelkalk et des zones de relations rivière/nappe/karst (de son interaction avec les alluvions de la plaine de la Nartuby)	2 lots : - Draguignan de la Clappe à Pont d'Aups - Draguignan secteur Sainte Anne et La Foux	Modéré : 20 – 30 k€ (REX SEVE)	Non
Mesure de débit en continu	Caractériser le fonctionnement des aquifères à l'échelle des unités hydrogéologiques et d'estimer les ressources mobilisables	Chaque unité hydrogéologique	Elevé (nombreux exutoires, suivi dense et sur un cycle hydrologique complet au minimum)	Non

Tableau 1 : Synthèse des investigations complémentaires proposées à l'issue de la Phase 1 et intégrée à la Phase 5

2.2. Programme d'investigation retenu


Les investigations complémentaires ont été sélectionnées afin de compléter les connaissances acquises tout en respectant l'enveloppe budgétaire de la fiche action. Ce critère a été en effet déterminant dans le choix et la hiérarchisation des investigations à mettre en œuvre.


Les actions retenues concernent :

- L'instrumentation de 5 piézomètres pour suivre le niveau de la nappe en continu ;
- La réalisation d'un traçage dans les gorges de Châteaudouble avec 3 points de suivi équipés d'un fluorimètre et d'un préleveur automatique ;
- La réalisation de prélèvements mensuels au droit des forages de Pont d'Aups, du forage de Vallaury et de la source de La Foux pour analyse physico-chimique des eaux (prise en charge partielle par le SMA) ;
- La réalisation d'un doublet de forages équipés en piézomètre à Draguignan en aval des forages de Pont d'Aups (prise en charge par le SMA) ;
- La réalisation d'un piézomètre profond sur la commune de Trans-en-Provence (prise en charge par le SMA) ;
- La réalisation de campagnes de jaugeage mensuelles en complément des mesures existantes, notamment en amont d'Ampus, en aval des Frayères et dans le secteur des gorges de Trans-en-Provence (prise en charge par le SMA).

2.3. Planning

Le planning a été mis à jour au cours de l'étude et en fonction de l'avancement des différentes opérations. La synthèse globale est présentée en page suivante.

																
	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19	M20	M21	M22
	janv-21	févr-21	mars-21	avr-21	mai-21	juin-21	juil-21	août-21	sept-21	oct-21	nov-21	déc-21	janv-22	févr-22	mars-22	avr-22
PHASE 2 : DETERMINATION DES OBJECTIFS DE GESTION DE NAPPE																
Pré-identification des zones de sauvegarde																
Objectifs de gestion raisonnée des nappes																
Rapport de fin de phase																
Réunion COTECH																
HORS PHASE : REALISATION DE 3 PIEZOMETRES COMPLEMENTAIRES																
HORS PHASE : JAUGEAGES ET OBSERVATIONS VISUELLES COMPLEMENTAIRES (SMA)																
PHASE 5 : MISSIONS DE RECONNAISSANCES COMPLEMENTAIRES																
Opérations de tracage																
Préparation/injection																
Suivi de la restitution (1 mois)																
Interprétation et intégration au rapport de phase 3																
Instrumentation temporaire des puits et forages																
Relevés piézométriques INCAPIS																
Relevés piézométriques NOUVEAUX PIEZOMETRES																
Interprétation et intégration au rapport de phase 3																
Interprétation et intégration au rapport de phase 4																
Géochimie des eaux de surface et des eaux souterraines																
Campagnes de prélèvements																
Interprétation et intégration au rapport de phase 3																



■ : Délais de réalisation du Groupement
■ : Délais indépendants de la mission du groupement (Commandes, réunions, validations,...)

Tableau 2 : Planning global des investigations de phase 5

3. Suivi chimique des eaux souterraines

3.1. Objectifs

L'analyse de paramètres physico-chimique comme la température, la conductivité et les débits sont classiquement utilisées en hydrogéologie afin de décrire le fonctionnement des systèmes karstiques. L'acquisition de données harmonisées et comparables à l'échelle du bassin versant sur les différentes unités hydrogéologiques permettrait d'affiner la compréhension de leur fonctionnement.

En complément, et afin de déterminer les apports des différents compartiments vers la source de la Foux, des analyses plus complètes peuvent être réalisées.

Si l'on considère les forages de Pont d'Aups comme représentatifs du compartiment supérieur du Muschelkalk (les forages de Sainte Anne sont écartés étant donné qu'un mélange des eaux a déjà été identifié dans ce secteur), et le captage de Vallauray ou de Vallongue comme représentatifs du compartiment inférieur, certains paramètres physico-chimiques peuvent être révélateurs de l'origine des eaux :

Paramètres	Muschelkalk supérieur	Muschelkalk inférieur		La Foux
	Pont d'Aups	Vallauray	Vallongue	
Calcium (mg/l)	117.2	138.6	149.9	370.0
Carbonates (mg/l)	0.7	0.3	0.7	< 10
Chlorures (mg/l)	8.3	36.1	12.1	1100.0
Conductivité à 20°C (µS/cm)	713.7	602.0	610.0	
Hydrogénocarbonates (mg/l)	269.4	411.8	386.4	290.0
Magnésium (mg/l)	26.4	12.4	11.5	52.0
Nitrates (mg/l)	2.8	2.8	2.3	3.6
Potassium (mg/l)	1.3	1.1	1.1	18.0
Potentiel en Hydrogène (pH)	7.3	7.1	7.2	
Sodium (mg/l)	4.2	19.6	5.4	680.0
Sulfates (mg/l)	167.6	59.4	93.6	930.0

Tableau 3 : Paramètres physico-chimiques des eaux de l'aquifère du Muschelkalk

Le Tableau 3 présente les moyennes interannuelles des concentrations de certains anions et cations majeurs des eaux issues des forages de Pont d'Aups, Vallauray et Vallongue (données ADES comprenant environ 22 mesures pour Pont d'Aups depuis 1996, 6 mesures pour Vallauray depuis 2007 et une dizaine de mesure pour Vallongue depuis 1998). Les concentrations associées à la source de La Foux sont issues d'une campagne de prélèvement réalisée lors de l'étude des dolines du massif du Malmont en 2020.

Des différences notables sont observées sur les concentrations en sulfates et magnésium (plus faibles dans le compartiment inférieur). Afin de confirmer cette tendance, il peut être envisagé de réaliser une campagne de prélèvement mensuelle au cours d'un cycle hydrologique (ou à défaut sur 6 mois comprenant la période de basses eaux) au droit de ces 3 points : Pont d'Aups, La Foux,

Vallaury. **Ces éléments permettront de définir le pourcentage d'apport des différents compartiments Muschelkalk vers la source de La Foux.**

3.2. Méthodologie

Les prélèvements ont été réalisés selon une fréquence mensuelle par le SMA sur les points suivants :

- Forages F1 et F2 de Pont d'Aups : le forage F1, d'une profondeur de 110 m, capte les calcaires du Muschelkalk sous la couche de marnes noires. Le forage F2 présente quant à lui une profondeur de 47 m et capte les calcaires du Muschelkalk en lien avec les alluvions de la Nartuby.
- Forage F2 de Valaury : l'ouvrage est profond de 40 m et présente une épaisse couche argileuse en tête (entre 15 et 20 m). L'ouvrage capte les arrivées d'eau issues des calcaires et brèches du Muschelkalk inférieur (unité C), et est cimenté en partie basse probablement à partir des sables et grès rouges du Trias inférieur (contrairement à ce qui est indiqué sur la coupe technique).
- Source de La Foux : exutoire naturel et principal de l'aquifère du Muschelkalk dans le secteur de Draguignan. Cette source, impropre à la consommation, est fortement minéralisée, chargée en sulfates et chlorures (2,5g de résidus secs et 1g de NaCl avec une conductivité supérieure à 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), et avec un débit moyen de l'ordre de 800 à 900 l/s. Cette minéralisation est due au lessivage et à la dissolution des dépôts d'évaporites intercalés dans la série triasique.

Les échantillons ont été envoyés au laboratoire SGS, et les analyses ont portées sur les paramètres suivants :

- Anions : carbonates, hydrogénocarbonates, chlorures, nitrites, nitrates, sulfates, orthophosphates ;
- Cations : calcium, potassium, magnésium, sodium ;
- Autres : pH, conductivité, température, potentiel RedOx, Fer.

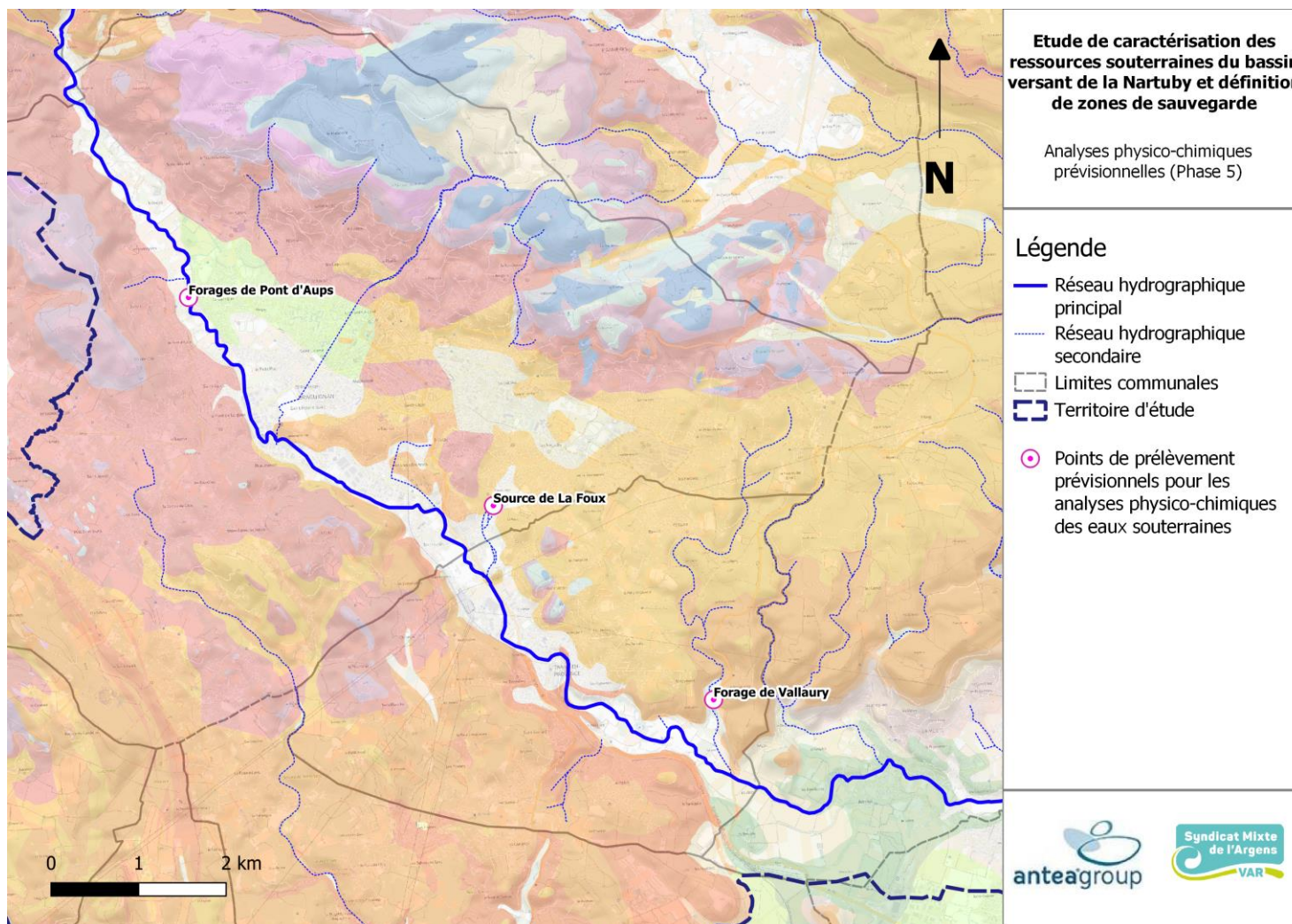


Figure 2 : Points de prélèvement pour les analyses physico-chimiques de Phase 5

3.3. Résultats

Un total de 27 prélèvements a été effectué : suivi sur 9 mois de mai 2021 à janvier 2022.

Le tableau en page suivante présente les résultats des campagnes.
Il en ressort les éléments suivants :

- **Pont d'Aups** : l'eau est de type bicarbonaté calcique avec une forte teneur en sulfate (moyenne de 169 mg/l). Le pH est proche de la neutralité (compris entre 7,1 et 7,6) et la conductivité est représentative d'une eau faiblement minéralisée (comprise entre 650 et 690 µg/l). Les concentrations en nitrates et chlorures sont faibles : respectivement de 2 et 5,9 mg/l en moyenne. Les paramètres sont stables sur l'ensemble de la chronique de mesure à l'exception de la concentration en nitrates qui a tendance à légèrement augmentée en fin de chronique.

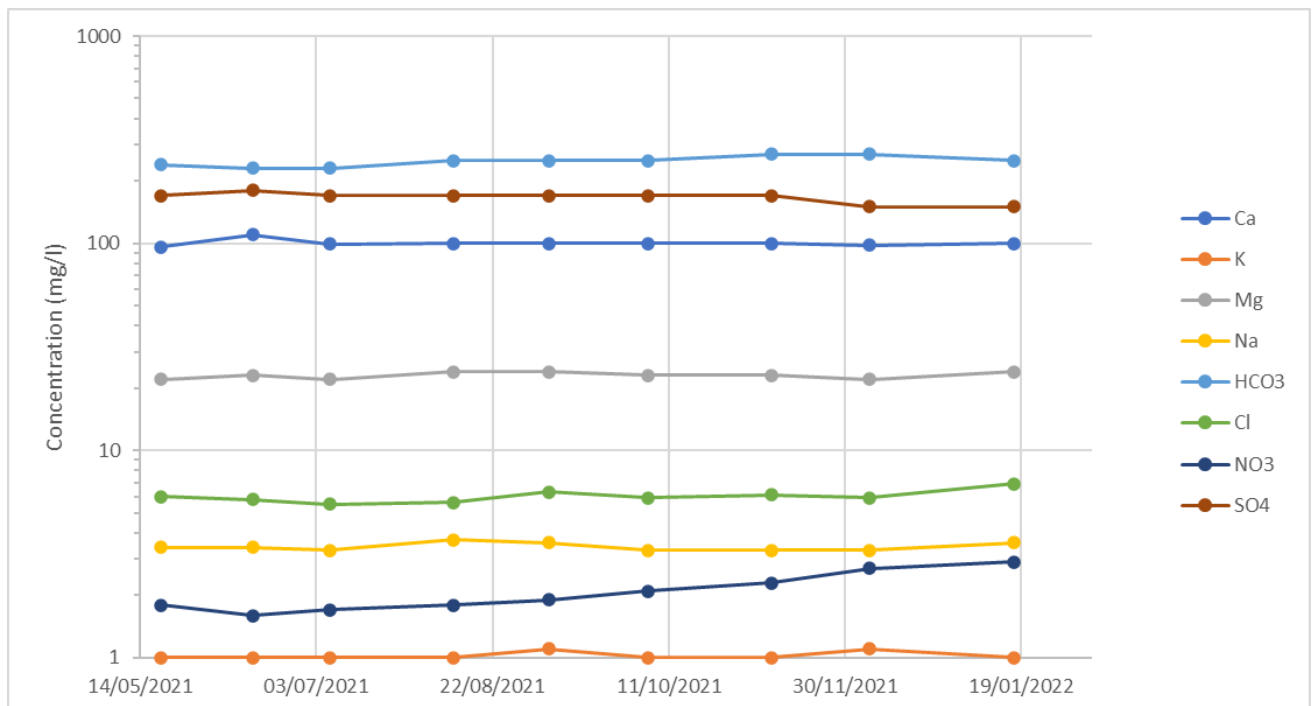


Figure 3 : Evolution des paramètres physico-chimiques associés au forage de Pont d'Aups

- **Valaury** : l'eau captée par le forage de Valaury présente un faciès chloruré et sulfaté avec des concentrations moyennes sur ces deux paramètres respectivement de 147,5 et 220 mg/l. Le pH est également proche de la neutralité (compris entre 7 et 7,3) et la conductivité témoigne d'une minéralisation importante (comprise entre 1300 et 1600 µg/l). Les concentrations sont relativement fluctuantes sur la chronique de mesure, particulièrement sur les paramètres suivants : sulfates (de 180 à 300 mg/l), chlorures (de 120 à 200 mg/l) et sodium (de 57 à 96 mg/l).

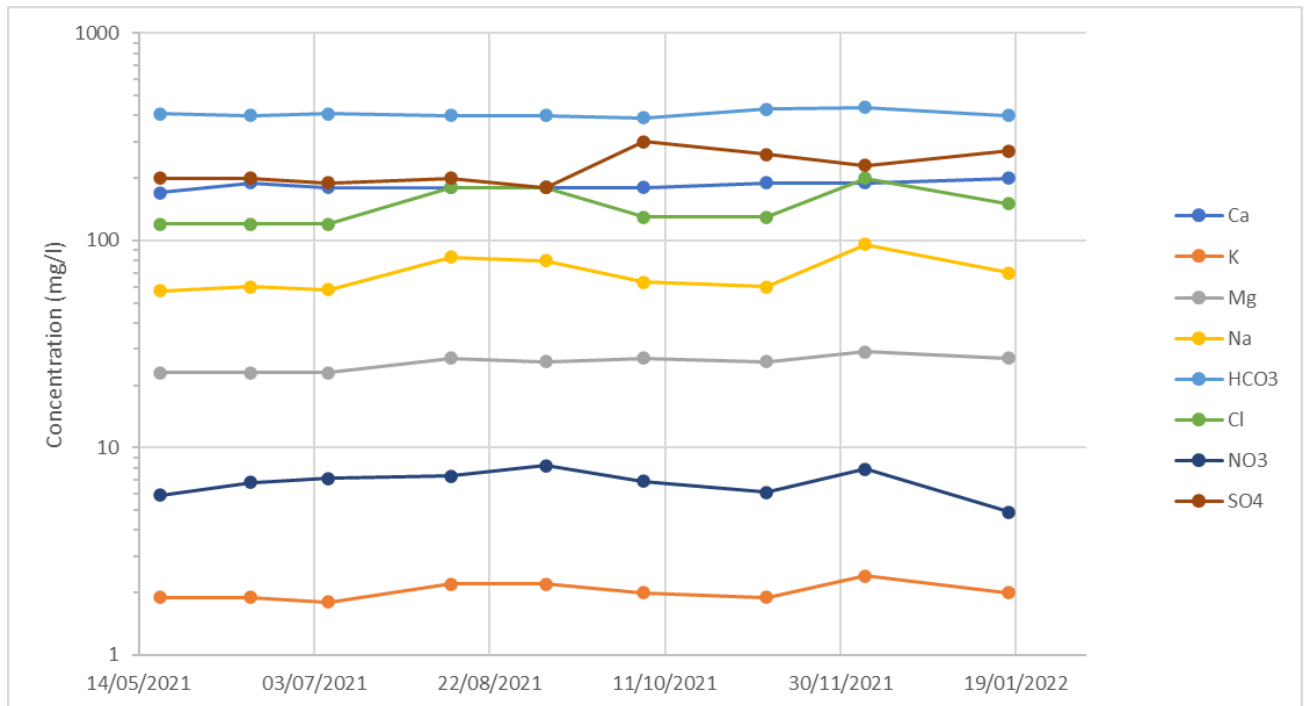


Figure 4 : Evolution des paramètres physico-chimiques associés au forage de Valaury

- La Foux** : les eaux de la source de la Foux se distinguent des autres points de suivi de part une minéralisation très élevée. Elles présentent en effet une forte teneur en calcium (366,25 mg/l en moyenne), en potassium (17,38 mg/l en moyenne), en magnésium (53,25 mg/l en moyenne), en sodium (667,5 mg/l en moyenne), en chlorures (1062,5 mg/l en moyenne) et en sulfates (983,75 mg/l en moyenne). Son pH est similaire aux autres points de suivi (compris entre 7 et 7,4) et sa conductivité témoigne de sa forte minéralisation (comprise entre 4900 et 5500 µg/l). Les paramètres sont stables sur l'ensemble de la chronique à l'exception de la concentration en sodium (variant de 610 à 840 mg/l), et en nitrates bien que celle-ci reste faible (concentration comprise entre 0,74 et 4,9 mg/l).

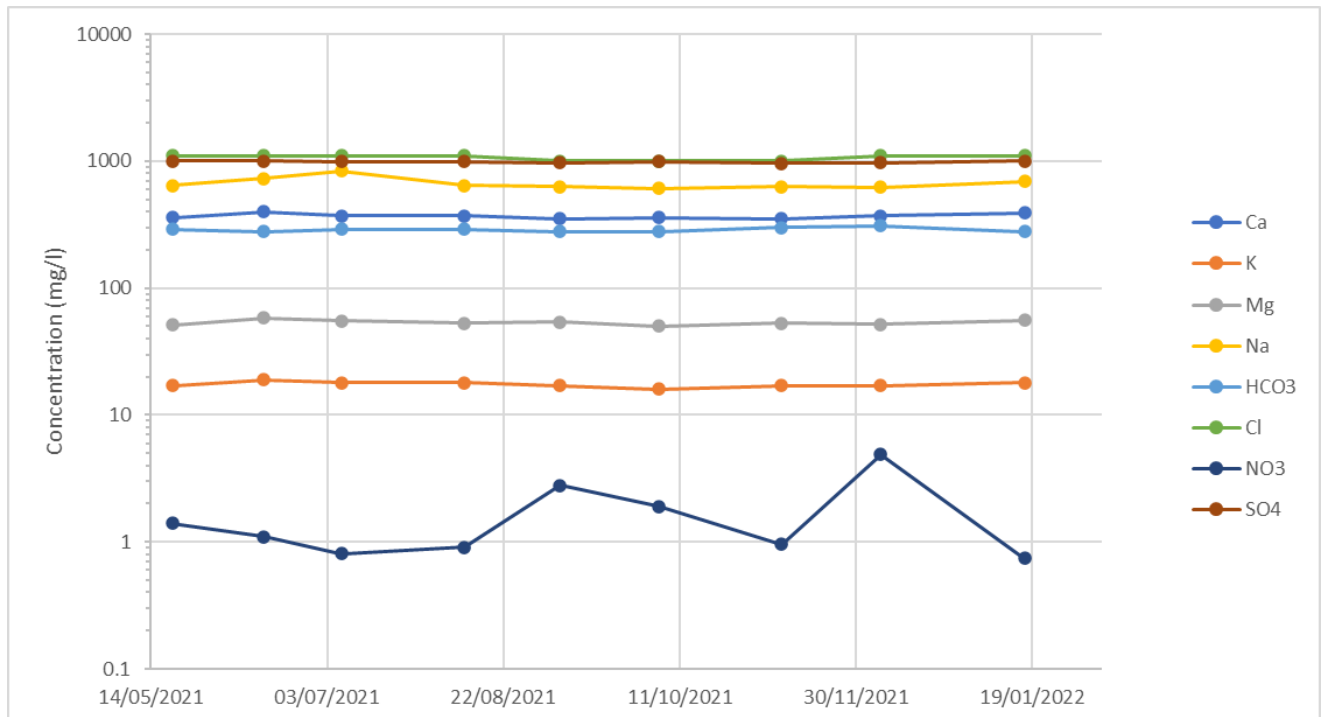


Figure 5 : Evolution des paramètres physico-chimiques associés à la source de La Foux

La source de la Foux présente une stabilité physico-chimique remarquable. Les pluies d’octobre à décembre se traduisent par une légère baisse de la minéralisation (de 5 500 à 4 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$) qui est expliquée par une légère baisse des teneurs en chlorures et sulfates.

Il en est de même pour la source de Valaury : bonne stabilité physico-chimique, excepté pour les sulfates dont la concentration augmente par temps de pluie.

On observe un comportement inverse sur les eaux prélevées au champ captant de Plan d’Aups avec une baisse des sulfates par temps de pluie qui se traduit par une baisse de la minéralité des eaux prélevées.

Paramètres	Unité	Mai 2021			Juin 2021			Juillet 2021		
		Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux
pH		7.6	7.1	7.4	7.4	7.1	7.1	7.3	7.1	7.1
Conductivité	uS/cm	670	1300	5300	690	1300	5400	660	1500	5500
Température	°C	21.1	21.9	20.4	22.4	22.9	22.9	20.1	21.4	20.2
Calcium	ug/l	96000	170000	360000	110000	190000	400000	99000	180000	370000
Potassium	ug/l	1000	1900	17000	< 1000	1900	19000	1000	1800	18000
Magnésium	ug/l	22000	23000	51000	23000	23000	58000	22000	23000	55000
Sodium	ug/l	3400	57000	640000	3400	60000	730000	3300	58000	840000
Fer	ug/l	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Carbonate	mg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Bicarbonate	mg/l	240	410	290	230	400	280	230	410	290
Chlorures	mg/l	6	120	1100	5.8	120	1100	5.5	120	1100
Nitrite	mg/l	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3
Nitrate	mg/l	1.8	5.9	1.4	1.6	6.8	1.1	1.7	7.1	0.81
Sulfate	mg/l	170	200	1000	180	200	1000	170	190	990
Orthophosphates	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Potentiel RedOx	MmV	410	430	410	420	420	430	450	440	430

Tableau 4 : Résultats des analyses d'eau (1)

Paramètres	Unité	Août 2021			Septembre 2021			Octobre 2021		
		Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux
pH		7.1	7.1	7	7.3	7.3	7.3	7.3	7	7.1
Conductivité	uS/cm	670	1500	5300	680	1400	4900	680	1500	4900
Température	°C	19.9	22.4	19.8	21	20.7	21	20	20	20.1
Calcium	ug/l	100000	180000	370000	100000	180000	350000	100000	180000	360000
Potassium	ug/l	1000	2200	18000	1100	2200	17000	<1000	2000	16000
Magnésium	ug/l	24000	27000	53000	24000	26000	54000	23000	27000	50000
Sodium	ug/l	3700	83000	640000	3600	80000	630000	3300	63000	610000
Fer	ug/l	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Carbonate	mg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Bicarbonate	mg/l	250	400	290	250	400	280	250	390	280
Chlorures	mg/l	5.6	180	1100	6.3	180	1000	5.9	130	1000
Nitrite	mg/l	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3
Nitrate	mg/l	1.8	7.3	0.91	1.9	8.2	2.8	2.1	6.9	1.9
Sulfate	mg/l	170	200	990	170	180	970	170	300	990
Orthophosphates	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Potentiel RedOx	MmV	420	420	400	410	480	430	430	450	430

Tableau 5 : Résultats des analyses d'eau (2)

Paramètres	Unité	Novembre 2021			Décembre 2021			Janvier 2022		
		Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux	Pont d'Aups	Valaury	La Foux
pH		7.2	7	7	7.6	7.3	7.3	7.6	7.3	7.3
Conductivité	uS/cm	650	1400	5000	650	1600	5100	660	1500	5500
Température	°C	19.9	20.1	20	19.4	19.6	20	18.9	18.2	18.8
Calcium	ug/l	100000	190000	350000	98000	190000	370000	100000	200000	390000
Potassium	ug/l	1000	1900	17000	1100	2400	17000	1000	2000	18000
Magnésium	ug/l	23000	26000	53000	22000	29000	52000	24000	27000	56000
Sodium	ug/l	3300	60000	630000	3300	96000	620000	3600	70000	690000
Fer	ug/l	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
Carbonate	mg/l	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Bicarbonate	mg/l	270	430	300	270	440	310	250	400	280
Chlorures	mg/l	6.1	130	1000	5.9	200	1100	6.9	150	1100
Nitrite	mg/l	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.3
Nitrate	mg/l	2.3	6.1	0.96	2.7	7.9	4.9	2.9	4.9	< 0.75
Sulfate	mg/l	170	260	960	150	230	970	150	270	1000
Orthophosphates	mg/l	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
Potentiel RedOx	MmV	330	400	430	420	450	420	420	440	440

Tableau 6 : Résultats des analyses d'eau (3)

3.4. Interprétations des résultats

Les eaux issues du forage de Valaury présentent une concentration plus importante en sodium et chlorures au cours des mois d'août et septembre 2021. La période de juin à septembre est représentative d'une période de très basses eaux, les apports pluviométriques étant particulièrement faibles : 40,4 mm de précipitation sur 4 mois. L'augmentation de la minéralisation à cette période peut être due :

- A un phénomène de dilution limité du fait d'une diminution des apports en amont du captage ;
- A une sollicitation de la nappe du Trias inférieur compte tenu de la coupe technique de l'ouvrage (crépiné à la base jusque dans les sables rouges du Trias).

A cette période, les eaux de la source de La Foux ne présentent pas de variation de concentration sur ces deux paramètres. Etant donné la signature physico-chimique des eaux de La Foux, un éventuel apport plus important issu du massif Muschelkalk à l'Est n'est pas identifiable si l'on se base uniquement sur ces deux paramètres : concentration en sodium et chlorures environ 10 fois plus importante au droit de la source de la Foux.

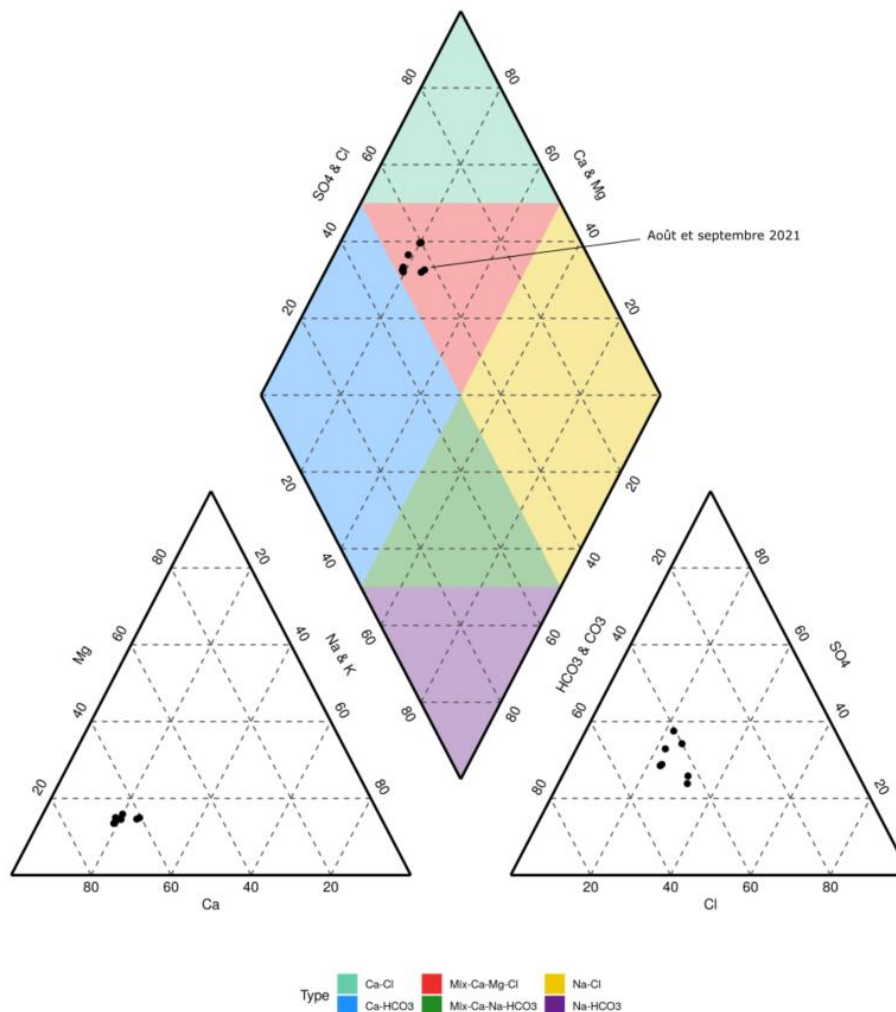


Figure 6 : Diagramme de Piper des eaux de Valaury

Les teneurs en nitrates et en bicarbonates des points de suivi de Pont d’Aups et de La Foux sont similaires (respectivement d’environ 2 et 270 mg/l). La concentration en nitrates au droit du forage de Valaury est quant à elle 3 à 4 fois supérieure, tandis que celle en bicarbonates est 1,5 fois plus importante. Ces paramètres pourraient donc jouer le rôle de traceur dans l’apport d’eau en provenance du massif Muschelkalk vers la source de la Foux.

Le graphique ci-après présente la variation de ces paramètres au droit des 3 points de suivi. Il peut être noté :

- Qu’à partir de septembre 2021 (soit à la sortie de la période de basses eaux), une corrélation est nettement observable entre La Foux et Valaury en ce qui concerne la concentration en nitrates. Avant cette date, les variations entre Pont d’Aups et La Foux sont similaires ;
- Qu’en ce qui concerne la concentration en bicarbonates, les 3 points de suivi semblent avoir les mêmes variations sur l’ensemble de la chronique, bien que les courbes de Valaury et La Foux présentent davantage de ressemblances dans leurs variations. La courbe associée à la source de La Foux est plus lissée car tamponnée par les différents apports participant à son alimentation.

Cette analyse vient étayer l’hypothèse que **la source de la Foux est en partie alimentée par le massif Muschelkalk à l’Est de Draguignan en dehors de la période de basses eaux.**

A noter que les forages de Pont d’Aups et la source de la Foux sont localisés dans un environnement plutôt urbain et donc peu soumis à la problématique de nitrates (pas d’activités agricoles en amont), tandis que le forage de Valaury se situe en bordure du massif comprenant une majorité de zones naturelles et quelques zones agricoles pouvant être à l’origine de cette concentration plus élevée en nitrates.

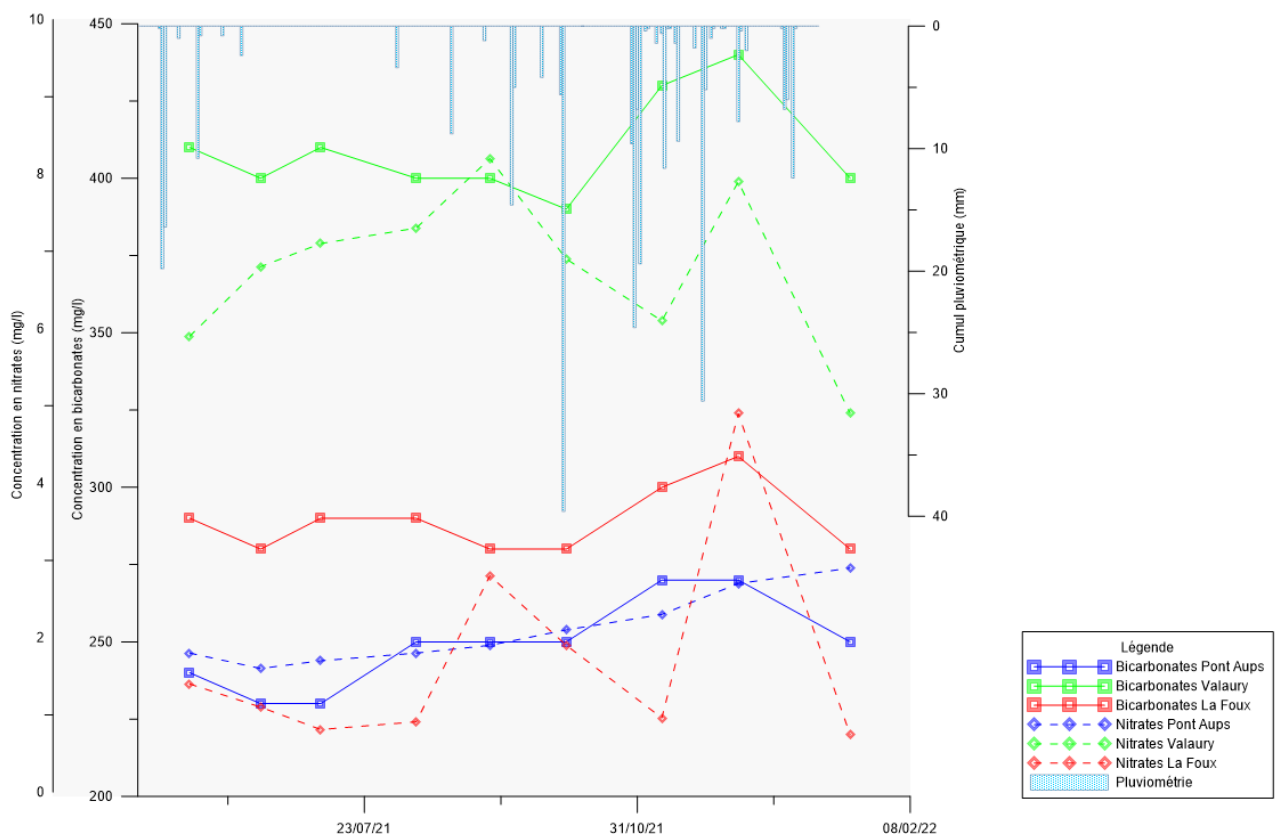


Figure 7 : Evolution de la concentration en nitrates et bicarbonates au droit des points de suivi

4. Suivi piézométrique

4.1. Objectifs

Les objectifs du suivi piézométrique sont doubles :

- Caractériser la dynamique des nappes en présence (alluvions/Muschelkalk et Muschelkalk inférieur) ;
- Caractériser les relations nappe/rivière en aval de Rebouillon où les relations entre la rivière et l'aquifère Muschelkalk sont complexes.

A l'échelle du territoire d'étude, il n'existe que quelques ouvrages de suivi répartis de façon éparées entre Draguignan et La Motte :

- Deux ouvrages captant l'aquifère du Muschelkalk disposent d'une chronique de mesure en continu (ADES) : piézomètres à Sainte Anne (Draguignan) et les Séouves (La Motte) ;
- Un ouvrage réalisé dans le cadre de missions géotechniques fait l'objet d'un suivi mensuel par le SMA : secteur de la zone commerciale à Trans-en-Provence. Ce piézomètre capterait la nappe superficielle contenue dans les alluvions sans atteindre les calcaires du Muschelkalk.

A ce jour, aucun ouvrage ne capte la nappe du Muschelkalk à proximité de la Nartuby ce qui ne permet pas de définir clairement les relations entre la rivière et l'aquifère du Muschelkalk. De plus, seuls deux ouvrages à l'échelle du bassin versant disposent d'une chronique de mesure complète à ce jour (ouvrages ADES).

Afin d'obtenir une chronique de mesure complète pouvant être comparée aux variations de débit de la Nartuby et à la pluviométrie (définition de la dynamique des nappes supérieure et inférieure du Muschelkalk), les ouvrages suivants ont été équipés avec des capteurs de pression (mesure horaire du niveau de la nappe) :

- Le doublet de forages projeté à Draguignan (aquifères supérieur et inférieur du Muschelkalk), soit deux ouvrages instrumentés ;
- Le forage du Muschelkalk projeté à Trans-en-Provence ;
- Deux forages existants situés dans le quartier des Incapis à Draguignan.

Le réseau de suivi piézométrique est constitué par les ouvrages cités ci-avant et complété par les ouvrages existants suivants :

- Mesure du niveau de la nappe au droit des forages en exploitation de Pont d'Aups et Sainte Anne à Draguignan (VEOLIA) ;
- Mesure du niveau de la nappe au droit des piézomètres ADES existants (Sainte Anne à Draguignan et La Motte).

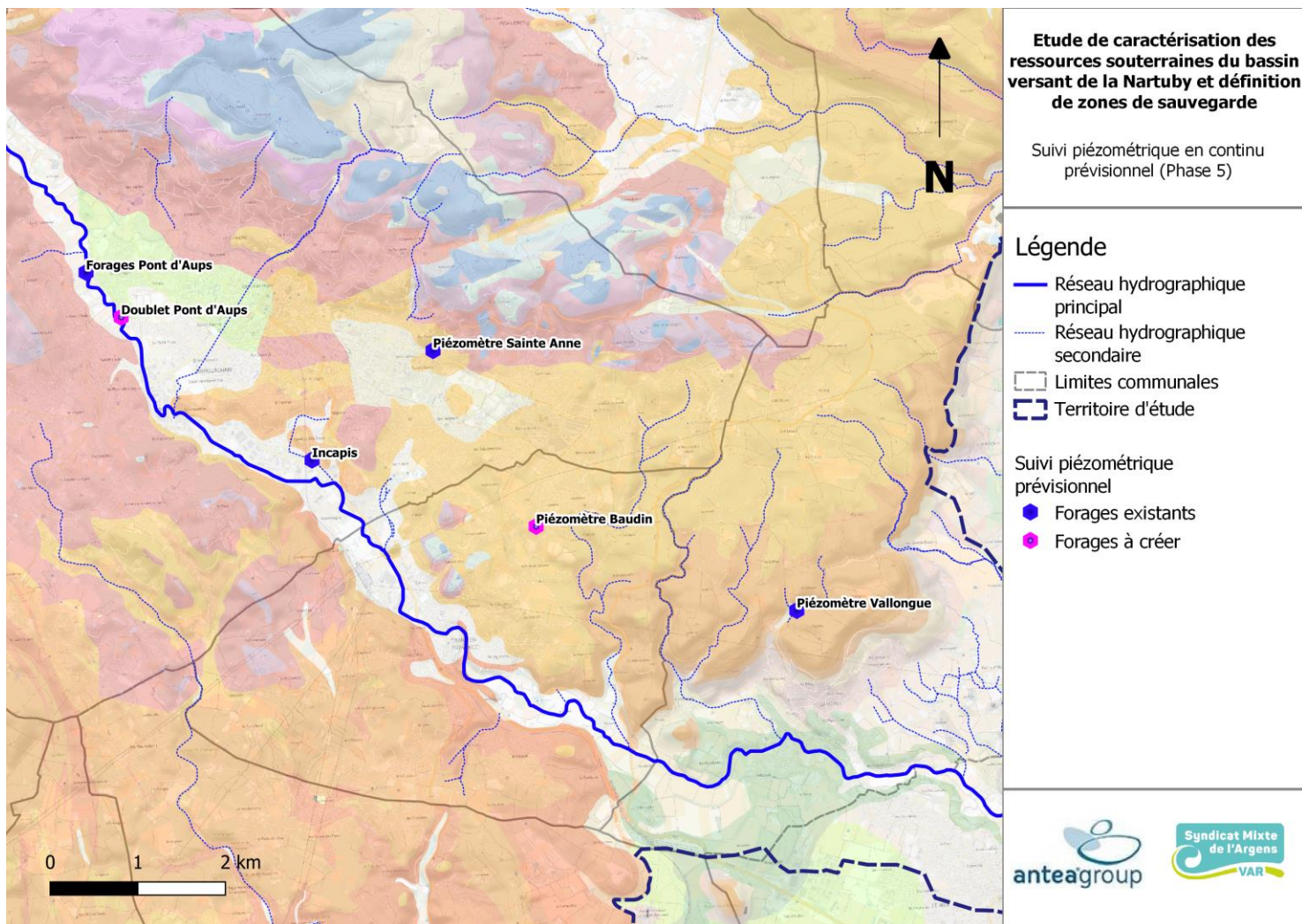


Figure 8 : Suivi piézométrique en continu prévisionnel de Phase 5

4.2. Méthodologie

Les deux puits des Incapis ont été équipés d'un capteur de pression de façon simultanée en date du 7 mai 2021. D'une profondeur d'environ 14 m, ces puits captent la nappe alluviale dans la continuité de l'aquifère Muschelkalk.

La création des 3 piézomètres supplémentaires a été pris en charge par le SMA qui a fait appel à l'entreprise Hydrogéotechnique pour la réalisation des travaux. Les travaux se sont déroulés du 05/08/2021 au 20/08/2021.

Les caractéristiques techniques, ainsi que la localisation des ouvrages, sont présentées ci-dessous.

Répartition tube piézométrique	PZ1	PZ2	PZ3
Localisation	DRAGUIGNAN		TRANS EN PROVENCE
Profondeur (m)/TN	102	51	101
Tubage piézométrique plein	De 0 à 58m	De 0 à 18m	De 0 à 80m
Tubage piézométrique crépiné	De 58 à 102m	De 18m à 51m	De 80m à 101m

Remplissage annulaire	PZ1	PZ2	PZ3
Localisation	DRAGUIGNAN		TRANS EN PROVENCE
Profondeur (m)/TN	102	51	101
Remplissage béton	De 0 à 50m	De 0 à 15m	De 0 à 75m
Remplissage argile	De 50m à 58m	De 15m à 18m	De 75m à 80m
Remplissage gravette	De 58m à 102m	De 18m à 51m	De 80m à 101m

Tableau 7 : Caractéristiques techniques des piézomètres nouvellement créés

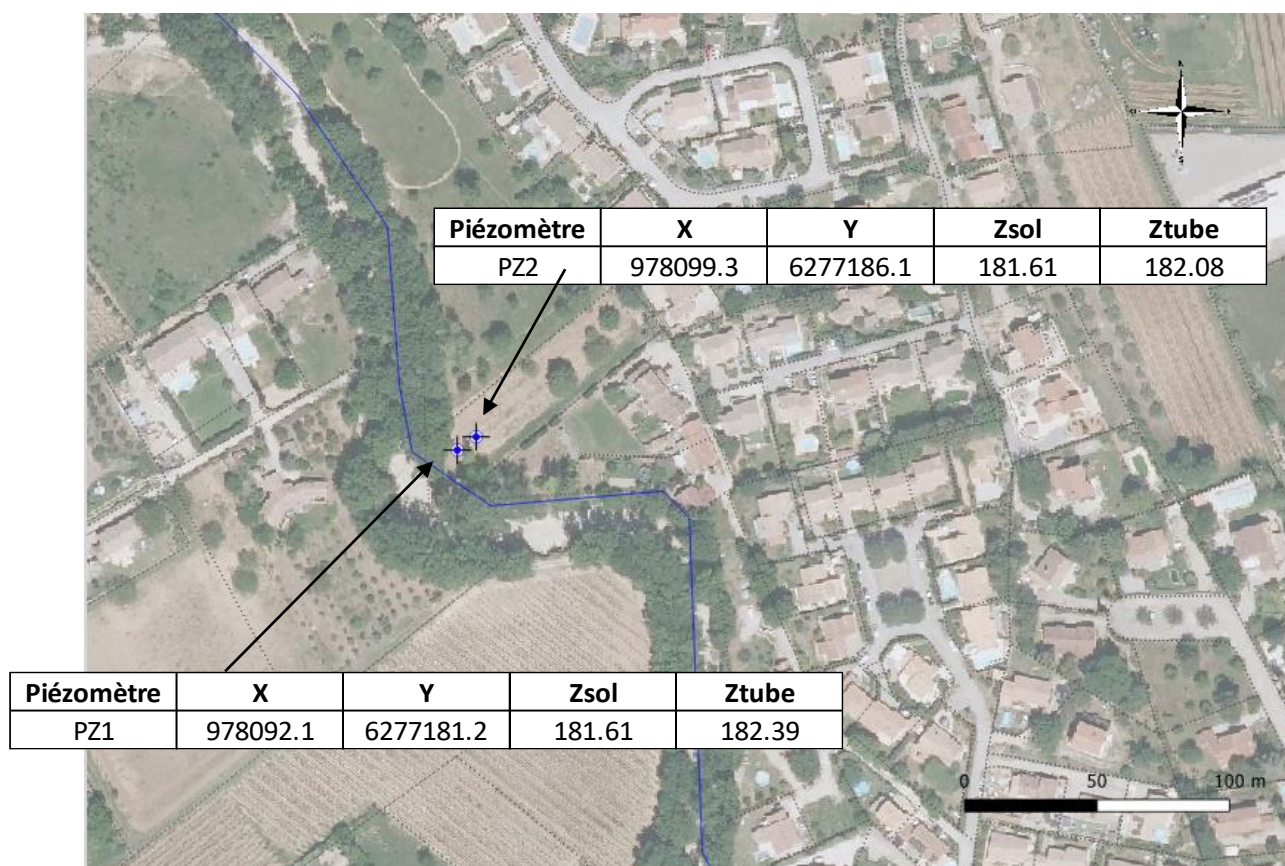


Figure 9 : Localisation des piézomètres créés à Draguignan

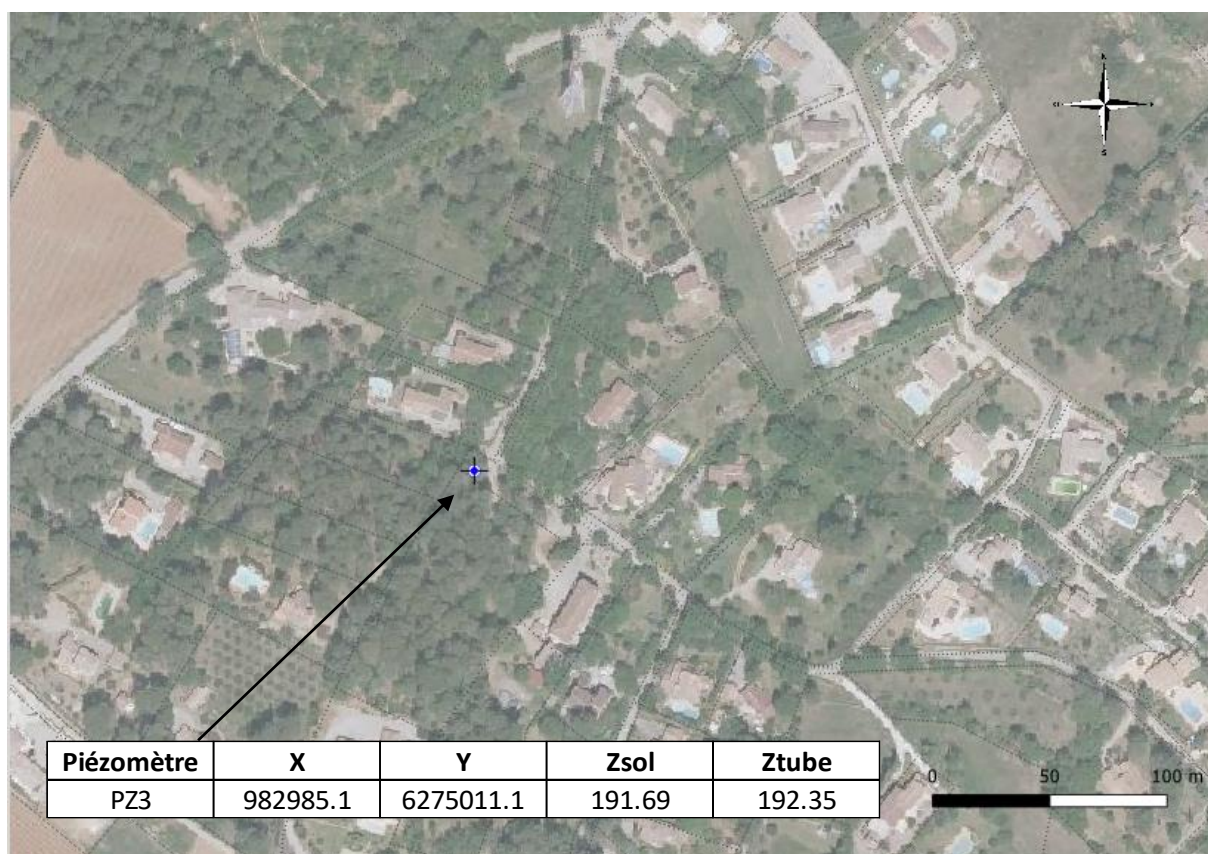


Figure 10 : Localisation du piézomètre créé à Trans-en-Provence

Le compte-rendu de travaux d'Hydrogéotechnique est présenté en Annexe I.

Remarque : concernant le PZ1 à Draguignan, il est mentionné dans le rapport : « *le piézomètre PZ1 a fait l'objet d'un télescopage afin de ne pas mettre en relation les deux nappes supposées* ». Les prescriptions émises par Antea Group n'ont malheureusement pas été respectées : ancrage dans les marnes à l'issue de la première phase de la foration, puis mise en place d'un tubage PW 121/143 mm pour assurer l'isolement de la nappe supérieure. En effet, la foration au tricône 150 mm a été réalisée jusqu'au toit des calcaires inférieurs et non des marnes, il y a donc eu mise en communication des nappes au cours de la foration. A noter également que le bouchon d'argile mis en place n'atteint pas la base des marnes.

Les piézomètres PZ1 à Draguignan et PZ3 à Trans-en-Provence ont été équipés d'un capteur de pression en date du 09/11/2021. L'ouvrage PZ2 a quant à lui été instrumenté en date du 04/11/2021. A cette occasion, une mesure du fond de l'ouvrage a été réalisée. Les profondeurs des ouvrages sont respectivement de 93,82, 51,41 et 104,34 m. D'après le tableau 7, seul l'ouvrage PZ1 à Draguignan présenterait des dépôts d'une épaisseur de 8,18 m.

L'ensemble des capteurs ont été réglé selon un pas de temps horaire.

Enfin, le SMA réalise en complément des mesures ponctuelles sur des ouvrages à proximité de la Nartuby à Draguignan (zone d'activité) et à Trans-en-Provence (à proximité du croisement entre la D1555 et la D54) : piézomètres créés dans le cadre d'investigations géotechniques.

De façon synthétique, le suivi piézométrique concerne les aquifères suivants :

- PZ1 : Muschelkalk inférieur ;
- PZ2 : Muschelkalk supérieur / alluvions ;
- Incapis : alluvions ;
- Piézomètre ADES Sainte Anne : origine des eaux probablement mixte (Muschelkalk supérieur / alluvions / apports du massif Jurassique Malmont) ;
- PZ3 : Muschelkalk inférieur ;
- Pz DRA Bonhomme : alluvions ;
- Piézomètre ADES Vallongue : Muschelkalk inférieur ;
- Pz TRA Retru SP1 à SP4 : alluvions.

4.3. Résultats

Les chroniques piézométriques sont présentées sur le graphique en page suivante.
Les statistiques issues des données acquises sont les suivantes.

	Incapis 1	Incapis 2	Pz1 Drag	Pz2 Drag	Pz3 Trans	Pz Ste Anne	Pz Vallongue	DRA Bonhomme*	TRA Retru SP1*	TRA Retru SP2*	TRA Retru SP4*
Min	154.87	156.51	156.54	156.77	125.99	155.46	145.5	153.03	96.61	98.68	97.6
Max	158.662	158.653	164.34	168.81	137.7	159.65	161.85	154.25	98.52	99.25	98.38
Battement	3.792	2.143	7.8	12.04	11.71	4.19	16.35	1.22	1.91	0.57	0.78
Moy	156.84	157.37	159.30	159.65	129.50	157.70	157.71	153.90	97.16	99.03	98.02
Mediane	156.849	157.1815	159.05	158.8	130	157.72	158.8	153.97	97.1	99.07	98.065

Tableau 8 : Statistiques piézométriques des ouvrages suivis

* Données disponibles jusqu'en janvier 2022

Les deux puits des Incapis présentent des variations tout à fait identiques, c'est pourquoi il a été choisi à partir du mois de novembre de ne conserver l'instrumentation que d'un seul puits (Incapis 1). La chronique de l'ouvrage est globalement stable mais celui-ci reste toutefois très réactif aux évènements pluvieux. Le battement de la nappe est de 3,79 m pour une cote piézométrique moyenne de 156,84 m NGF.

Contrairement aux Incapis, le piézomètre superficiel situé dans le secteur de Pont d'Aups (Pz2 Drag) présente un battement beaucoup plus important. Le niveau de la nappe y est 3 m plus haut, soit de 159,65 m NGF.

L'ouvrage PZ1 à Draguignan fait état d'une cote piézométrique d'environ 159,3 m NGF, soit un niveau légèrement inférieur à la nappe du Muschelkalk supérieur. Le battement est nettement plus tamponné que l'ouvrage superficiel mais le piézomètre enregistre la même réactivité face aux pluies.

L'ouvrage PZ3 à Trans-en-Provence capte la nappe du Muschelkalk inférieur à une cote comprise entre 125 et 138 m NGF.

En ce qui concerne le piézomètre situé sur le champ captant de Vallongue, captant la même nappe, la chronique présente une vidange de l'ouvrage de près de 20 m en juillet 2021. Le niveau remonte à partir du mois d'août 2021, indépendamment des pluies, pour retrouver son niveau initial et se stabiliser en octobre 2021. Un nouveau décrochage (inférieur à 10 m) est ensuite enregistré entre les mois de mai et août 2022.

L'ensemble des piézomètres évoqués précédemment enregistrent une baisse progressive du niveau de la nappe jusqu'à la fin du suivi. Deux ruptures de pentes sont observables :

- La première baisse survient après les pluies d'octobre/novembre 2021. Le niveau semblait se stabiliser sur l'ensemble des ouvrages jusqu'au début du mois de mai 2022 grâce aux pluies survenues à cette période ;
- A partir du mois de juin 2022, la baisse du niveau piézométrique s'accélère en l'absence d'évènement pluviométrique notable et durable. Cela est d'autant plus flagrant sur la chronique de l'ouvrage Pz3 à Trans-en-Provence avec un niveau qui chute jusqu'à 126 m NGF à la fin du suivi.

Les ouvrages captant la nappe alluviale en aval du bassin versant font état d'une cote piézométrique comprise entre 97 et 99 m NGF avec un battement de l'ordre du mètre. L'ouvrage SP1 présente un battement légèrement plus important, probablement du fait de l'influence des apports issus du massif Muschelkalk situé à l'Ouest.

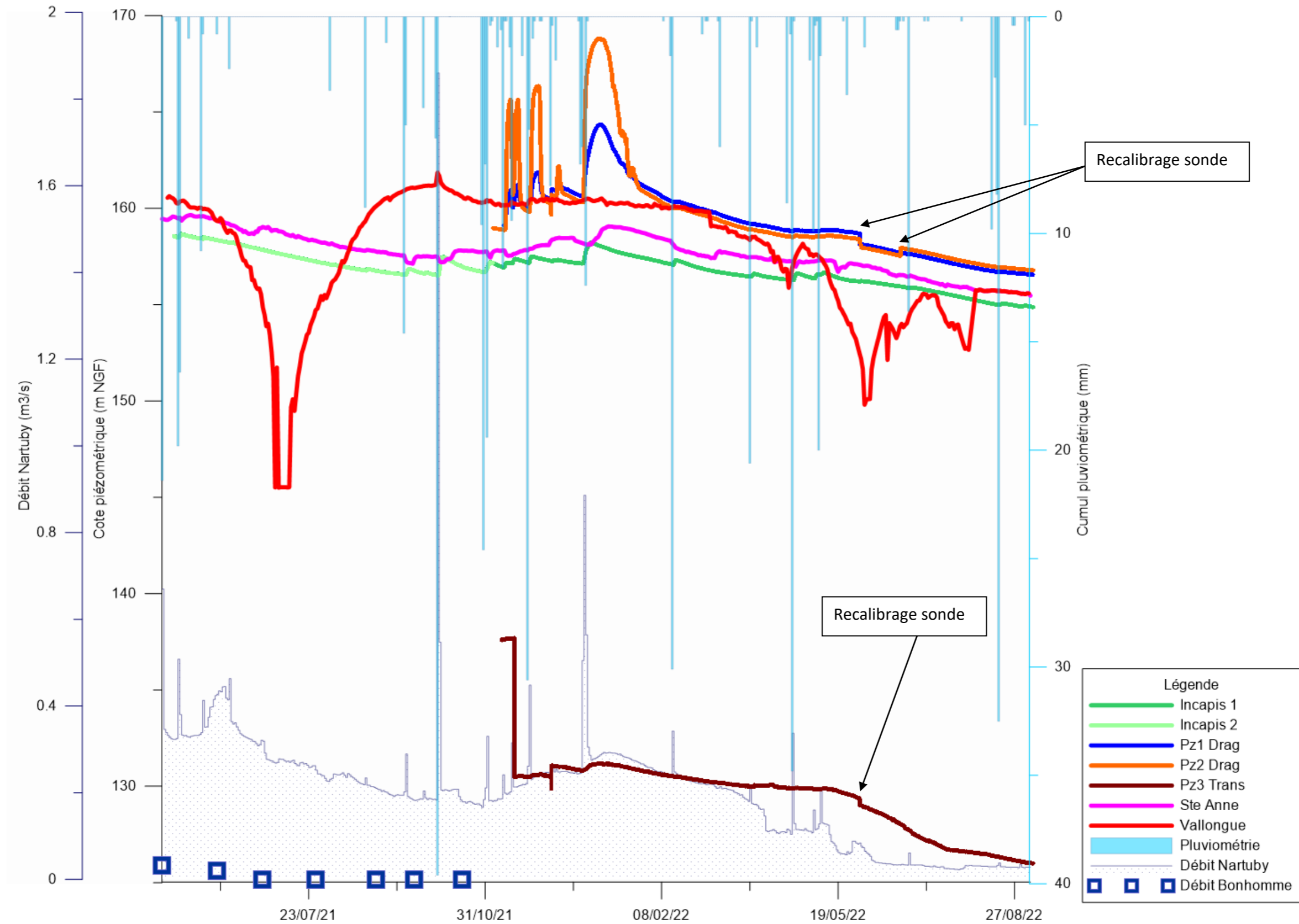


Figure 11 : Chronique piézométrique des ouvrages jusqu'au 05/09/2022

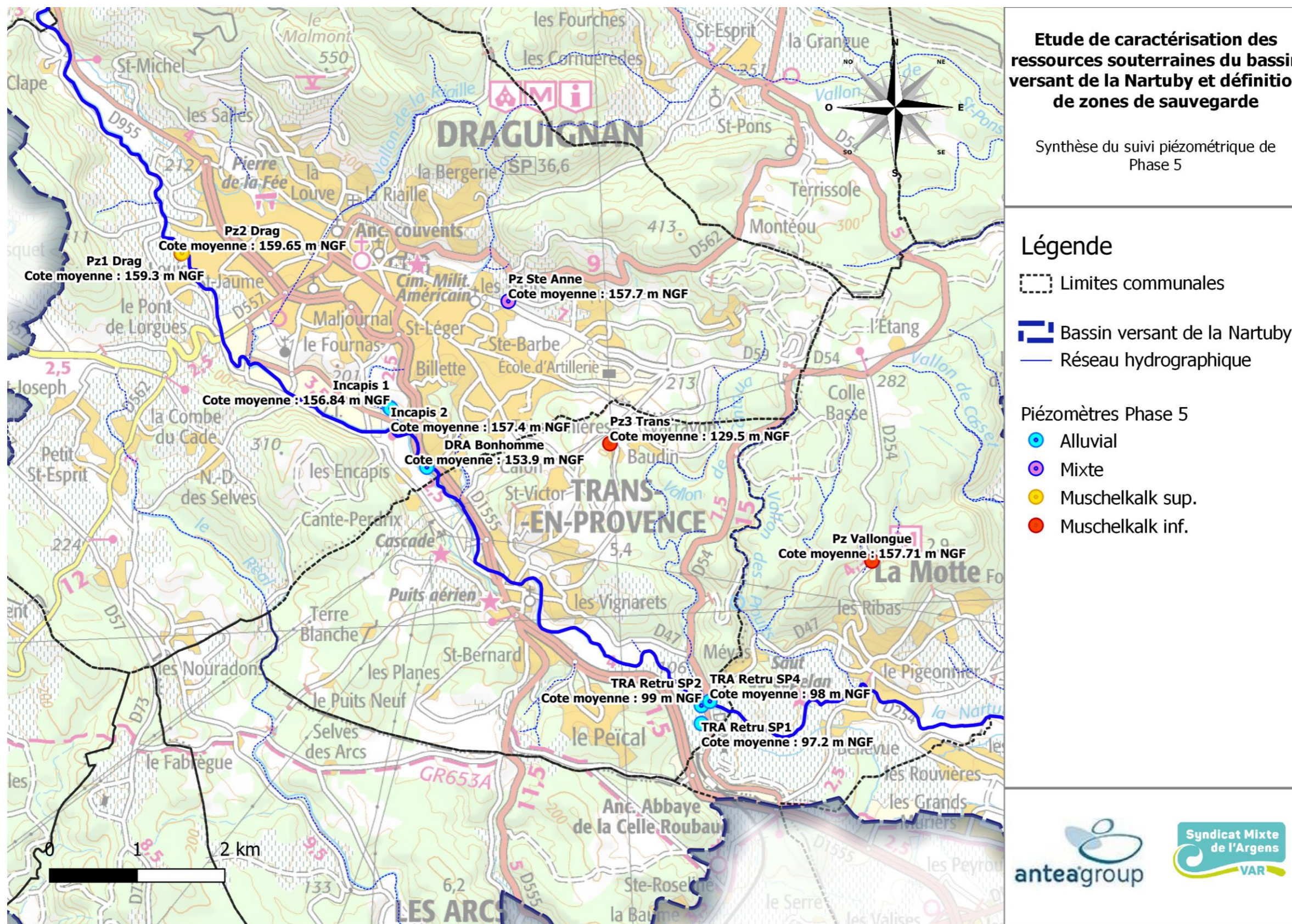


Figure 12 : Synthèse du suivi piézométrique à l'issue de la Phase 5 (avec les cotes piézométriques moyennes en m NGF)

4.4. Interprétations des résultats

Dans l'aquifère amont, on a bien un comportement différent entre nappe profonde et nappe superficielle en amont de St Hermentaire (nouveaux piézomètres forés en 2021 au lieu-dit Le Petit Plan). La nappe profonde réagit avec un léger retard et avec une moindre intensité aux événements pluvieux. On peut observer des gradients de charge entre les deux nappes qui varient en fonction du temps :

(1) hors événements pluvieux, la nappe profonde présente une charge plus forte que la nappe superficielle (possibilité de drainance ascendante),

(2) pendant les événements pluvieux, les gradients de charge s'inversent et c'est la nappe superficielle qui présente une charge plus élevée que la nappe profonde (possibilité de drainance descendante).

Les données de topographie disponibles (OPSIAS, 2015) proposent un fond de rivière à environ 180 m au Pont d'Aups et à 170 m NGF au Pont de Lorgues ; on a donc bien sur toute la durée du suivi un toit de nappe superficielle qui reste inférieure de plus de 10 m sous le lit de la rivière ; cela permet de conclure à une **déconnexion permanente entre rivière et nappe dans ce secteur durant la période suivi**. Ajoutons que les pluies d'octobre et de décembre sont faibles (de 20 à 60 mm). Il est possible et probable que les pics piézométriques correspondent à une réactivation des pertes sur un plus grand linéaire entre les Clappes et St Hermentaire.

A noter que les piézomètres de Pont d'Aups sont situés à 430 m au Sud des forages d'exploitation de la Ville de Draguignan. Etant donné les débits d'exploitation (environ 100 m³/h/ouvrage) et du fait que les ouvrages sont situés en amont hydraulique des piézomètres, l'influence des pompages sur le niveau piézométrique mesuré doit être négligeable.

En partie intermédiaire, les niveaux de nappe mesurés sur le piézomètre des Incapis (de l'ordre de 157 m NGF en moyenne) et ceux relatifs au piézomètre St Anne (157,7 m NGF en moyenne) montrent des altitudes qui les rattachent a priori à l'aquifère amont. On observe des réactions similaires à ceux du Petit Plan plus en amont ; les réactions sont toutefois plus tamponnées avec un retard certain pour le piézomètre de St Anne.

Rappelons que la source de la Foux serait installée vers la côte 155 m NGF. Les données de topographie disponibles (OPSIAS, 2015) proposent un fond de rivière à environ 170 m au Pont de Lorgues et de 153 m NGF à la confluence avec les eaux de la Foux. Dans la plaine des Incapis, les altitudes varient entre 162 et 156 m NGF.

On peut donc proposer que la zone de restitution fût à son minimum durant le suivi (quelques centaines de mètres seulement en amont de la confluence) et que pour des augmentations de niveaux de nappe plus importants (162 m NGF par exemple), il est possible et probable que la totalité de la zone de restitution soit activée avec une remise en eau de la Nartuby depuis le quartier du Salamandrier jusqu'à la confluence de la Foux.

Dans l'aquifère aval (communes de Trans-en-Provence et de La Motte, en aval de la Foux), on observe une valeur basse de piézométrie sur le piézomètre de Trans (de 126 à 130 m NGF) qui indique la bonne connexion avec la zone de restitution à la Nartuby située entre les gorges de Trans-en-Provence et la station « Retru » (de 120 à 110 m NGF).

Notons que le piézomètre plus au Sud sur la commune de La Motte présente lui une piézométrie plus élevée (environ 160 m NGF), ce qui est cohérent avec la structure géologique qui plonge vers le Nord. Cette disposition et ces niveaux de nappe laissent supposer **un axe de drainage N110 qui s'alignerait sous les dépressions topographiques observées entre Trans-en-Provence et le quartier des Faïsses**

plus au Nord-Est. Cette interprétation est supportée par les deux chroniques longues du territoire (piézomètre de St Anne et piézomètre de Vallongue), qui montrent bien des niveaux de basses eaux, inférieurs à la côte altimétrique de la Foux pour le piézomètre de Vallongue ; on notera aussi la tendance baissière impressionnante pour le piézomètre de St Anne (-15 m environ en 20 ans).

A noter que les variations piézométriques du piézomètre de Sainte Anne sont directement influencées par le débit de pompage du champ captant.

Enfin, la baisse du niveau piézométrique enregistrée sur le piézomètre de Vallongue est synchrone à une augmentation progressive des débits de prélèvement du forage jusqu'en juillet 2021 (débit porté à environ 660 m³/j).

5. Campagnes de jaugeage

5.1. Objectifs

La Nartuby est en relation étroite avec les masses d'eau du bassin versant dont les formations encaissantes constituent le substratum de la Nartuby :

- Des calcaires du Jurassique (Portlandien et Bathonien) sur sa partie amont occidentale (Nartuby d'Ampus) ;
- Des formations imperméables du Keuper sur sa partie amont orientale (de sa source jusqu'aux gorges de Châteaudouble) et en amont de Draguignan ;
- Des calcaires du Jurassique de Châteaudouble jusqu'à Rebouillon ;
- Des calcaires du Muschelkalk de Draguignan jusqu'à La Motte ;
- Les formations du Permien sous recouvrement Quaternaire en partie aval du bassin versant de La Motte jusqu'à sa confluence avec l'Argens au Muy.

L'étude à ce jour la plus complète en termes de description des relations nappe-rivière est l'étude BRGM/CEREMA qui avait réalisée avec comme objectif de mieux caractériser le risque d'effondrement dans le secteur de Draguignan lié à la dissolution du gypse. Nous en rappelons ici les principales informations.

Des campagnes de jaugeage ont permis de mettre en évidence des zones d'apports ou de pertes caractérisant les échanges entre la nappe et la rivière : campagnes de hautes et basses eaux réalisées par le BRGM en 2013 (de Châteaudouble à Trans-en-Provence).

Ces campagnes d'investigation, ainsi que les visites ponctuelles de terrain effectuées, ne permettent pas de lever les incertitudes sur :

- Le bilan des apports et des pertes de la Nartuby à l'échelle du bassin versant. En effet, aucune mesure n'a été réalisée en aval de la Nartuby (les mesures s'arrêtant dans le secteur de Trans-en-Provence) ;
- L'alimentation issue de la Nartuby d'Ampus via des zones de pertes vers les unités hydrogéologiques jurassiques amont, notamment celle d'Ampus-Frayères ;
- Les relations nappes/rivières dans les secteurs où les zones d'apports/de pertes s'inversent en fonction des périodes hydrologiques pour un même tronçon.

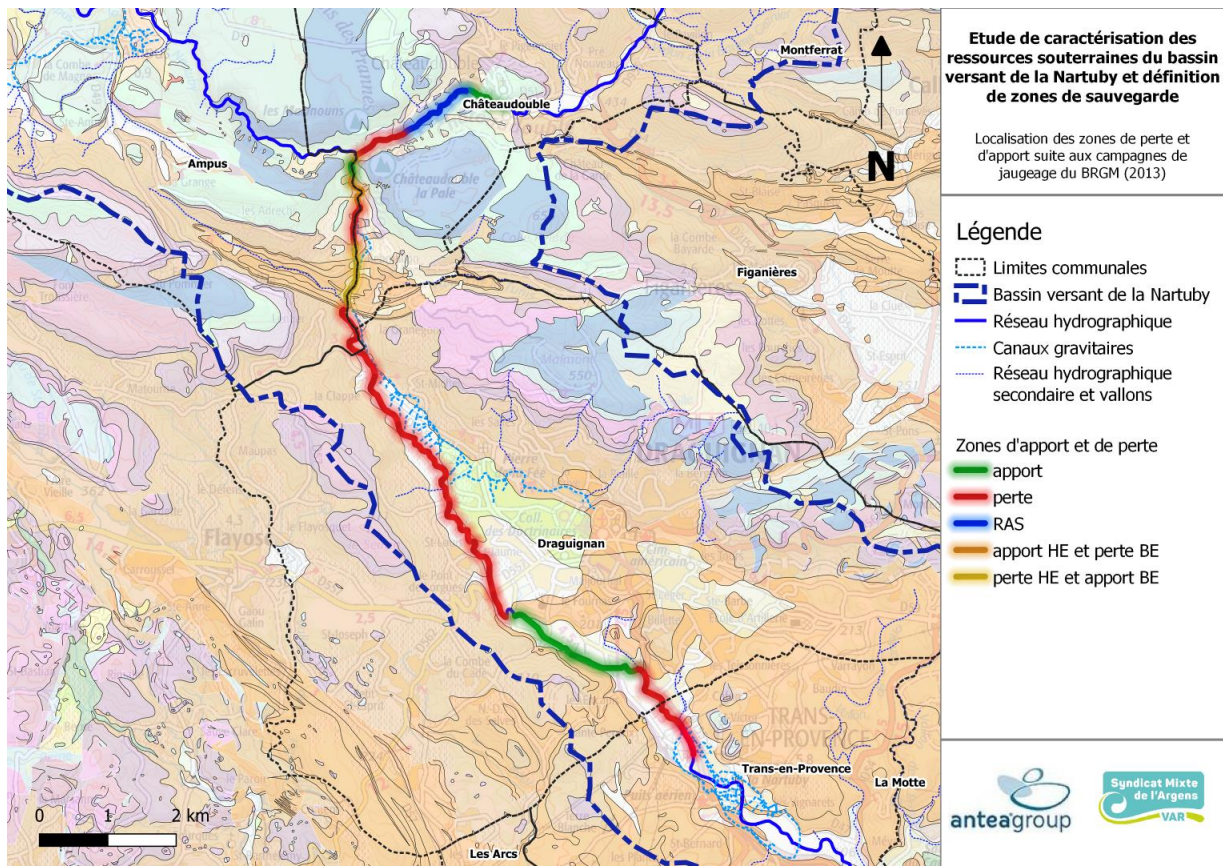


Figure 13 : Localisation des zones d'apport et de perte de la Nartuby identifiées par le BRGM-CEREMA en 2013

Les objectifs des campagnes de jaugeage complémentaires sont donc de :

- Caractériser les zones d'apport et de perte sur le linéaire de la Nartuby et de la Nartuby d'Ampus ;
- Définir des seuils de débit pour lesquels la Nartuby alimente le karst ;
- Définir les zones de pertes et d'apports des cours d'eau secondaires à l'échelle du territoire d'étude, notamment au droit des massifs Muschelkalk.

5.2. Méthodologie

Le suivi réalisé par le SMA comprenait d'ores et déjà 12 points de mesure répartis sur la Nartuby, ses affluents et les principaux canaux gravitaires.

Le programme d'investigation initial comprenait 16 points de jaugeage en complément des points de mesure existants :

- Affluents du Beudron et du Bivosque sur la commune de Montferrat : modification des points de mesure existants avec une mesure en amont des pertes sous alluviales ;
- La Nartuby d'Ampus sur la commune d'Ampus :
 - Mesure en aval de la source de Fontigon qui correspond à la naissance de la Nartuby d'Ampus ;

- Mesure dans le vallon de Valségure pour quantifier les apports de ce vallon vers la Nartuby d’Ampus. Ces eaux devraient ensuite s’infiltrer dans les gorges en amont du village d’Ampus et participer directement à la recharge de l’aquifère karstique ;
- Mesure en amont des Frayères pour quantifier les pertes entre l’amont et l’aval des gorges d’Ampus.
- La Nartuby dans les gorges de Châteaudouble :
 - Mesure en amont des gorges au niveau du verrou alluvial ;
 - Mesure en amont des Frayères dans la partie aval des gorges afin de quantifier les pertes sur ce tronçon.
- La Nartuby dans le secteur de Rebouillon :
 - Mesure en aval des Frayères qui correspondra à la somme des apports de la source des Frayères, de la Nartuby en provenance des gorges de Châteaudouble, et de la Nartuby d’Ampus ;
 - Deux mesures en amont et en aval des apports identifiés dans le secteur des Ferrières. Ceux-ci auront été préalablement identifiés par le SMA au moyen d’une campagne de mesure préalable ;
 - Mesure en aval de Rebouillon après la bouture anticlinale. Cette mesure permettra de quantifier les apports/pertes associés aux calcaires du Muschelaklk entre la mesure existante du SMA (référéncée « Rebouillon ») et celle-ci.
- La Nartuby entre Draguignan et Trans-en-Provence :
 - Mesure à Pont de Lorgues pour quantifier les pertes de la Nartuby entre Rebouillon et ce point de mesure ;
 - Mesure dans le secteur des Incapis en amont de la Foux pour quantifier les pertes de la Nartuby entre Pont de Lorgues et ce point de mesure ;
 - Mesure en aval des gorges de Trans-en-Provence pour quantifier les apports vers la Nartuby identifiés dans ce secteur. Une campagne de mesure préalable permettra de localiser précisément les venues d’eau justifiant l’augmentation de débit observé entre les stations de mesure existantes de Trans-en-Provence et Retru.
- Le Riou de Claviers :
 - Mesure au niveau du moulin du Riou pour quantifier le débit du cours d’eau en amont d’éventuelles zones de perte (gorges du Muschelkalk) ;
 - Mesure au niveau du lieu-dit « Les Baux » au contact Muschelkalk/Keuper pour quantifier le débit du cours d’eau en aval d’éventuelles zones de perte. Ces jaugeages, couplées à des observations visuelles, permettront de savoir si ces pertes alimentent en partie le réservoir Muschelkalk plus au sud.

Dans le cas où la mesure par jaugeage ne serait pas réalisable (débit ou hauteur d’eau insuffisant), le point de mesure fera l’objet d’une observation visuelle à minima.

Les mesures de jaugeage seront couplées à des observations visuelles des cours d'eau à des points clés (17 points d'observation au total) :

- La Nartuby d'Ampus :
 - En amont de la plaine Miocène à l'est de la source de Fontigon. Une première observation sera réalisée au niveau de la chapelle de N.D. de Spéluque. En l'absence d'écoulement, l'observation sera réalisée plus en amont au niveau du moulin ;
 - En aval des gorges d'Ampus du village pour confirmer l'absence d'écoulement et l'infiltration des eaux dans les gorges au profit du karst Jurassique.
- Le vallon de Tunis : en amont et en aval de la carrière de Granegone pour confirmer les pertes de ce vallon au profit du karst Muschelkalk.
- Le réal sur la commune des Arcs : aux zones de transition géologique (Keuper/Muschelkalk et Muschelkalk/alluvions) pour confirmer la présence de pertes au profit du réservoir Muschelkalk dont des résurgences pourraient être observées en rive droite de la Nartuby entre Trans-en-Provence et La Motte.
- Le vallon de la Catalane vers La Motte : en amont et en aval du cours d'eau pour l'identification des zones d'apports ou pertes pouvant participer à la recharge de l'aquifère Muschelkalk ;
- Le Rioufreid à Figanières :
 - En aval du poljé au contact des formations quaternaires et Muschelkalk ;
 - En aval du cours d'eau afin d'identifier des zones d'apports ou pertes pouvant participer à la recharge de l'aquifère Muschelkalk.
- Le Riou sec à Figanières et Callas : un point en sortie des terrains du Keuper, et un autre en amont du poljé au contact Muschelkalk et Quaternaire.
- Le vallon du Plan à Callas : un point en sortie de Keuper, un point avant le poljé, un point en sortie du poljé, et un point en fermeture du karst.

Dans le cas où une mesure de jaugeage est réalisable (débit et/ou hauteur d'eau suffisants), un jaugeage du cours d'eau sera effectué afin de renforcer l'ensemble des données acquises dans le cadre des investigations complémentaires.

Enfin, l'ensemble des points de suivi feront l'objet d'une mesure in situ des paramètres suivants au moyen d'une sonde physico-chimique : pH, conductivité, température.

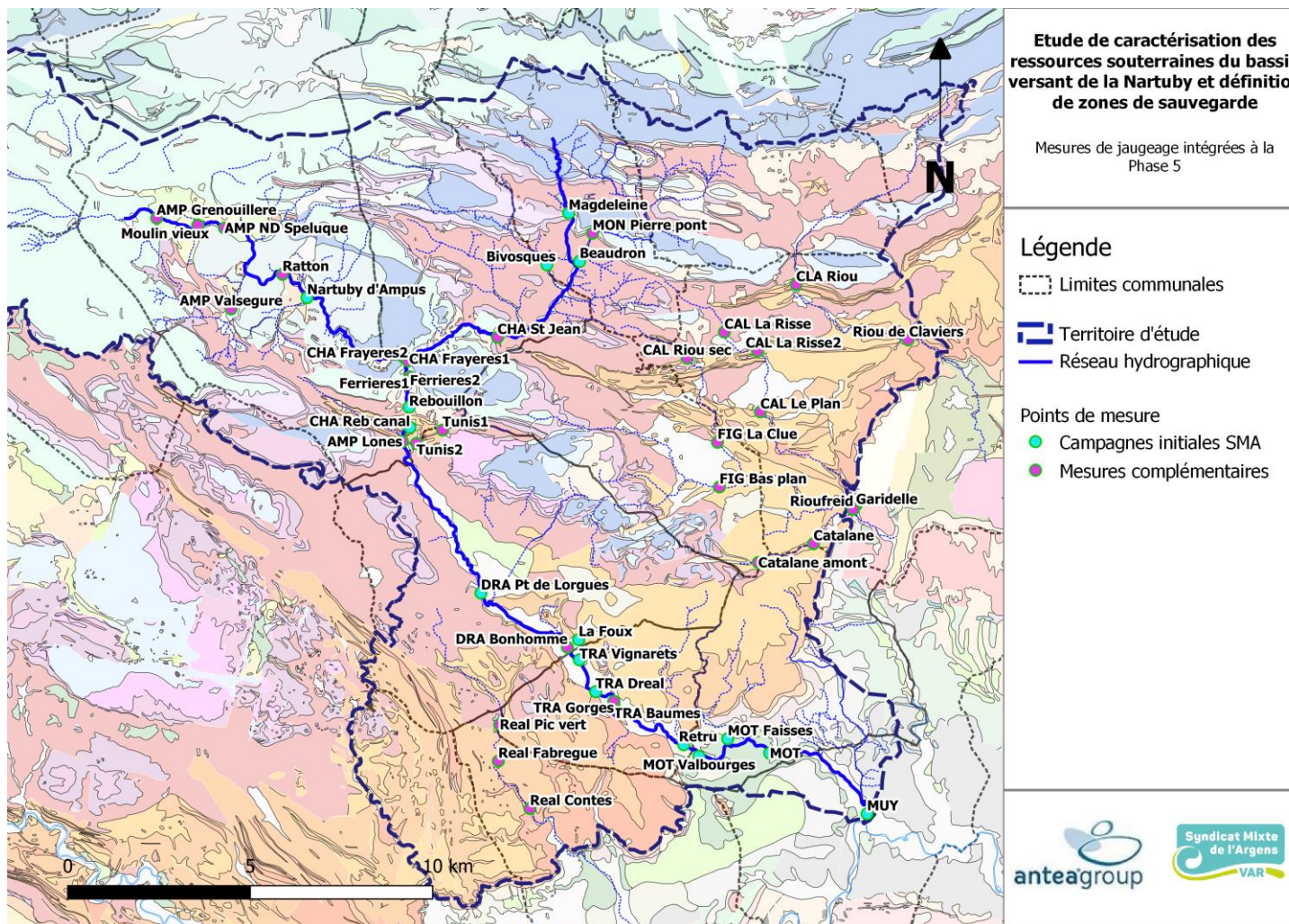


Figure 14 : Mesures de jaugeage intégrées à la Phase 5

5.3. Résultats

Les campagnes complémentaires, couplées aux mesures usuelles du SMA, ont débutées en février 2021.

Rapidement, 2 stations ont été abandonnées à cause de l'accès difficile ou de l'absence d'eau :

- AMP Grenouillères : amont de la Nartuby d'Ampus. Les premières venues d'eau sont constatées à partir du point « Moulin Vieux » ;
- TRA Baumes : redondance avec le point TRA Gorges situé en amont immédiat (gamme de valeur mesurée identique).

Les observations visuelles ont été réalisées uniquement au cours des 2 premiers mois. L'absence d'eau lors des premières visites a démontré que **ces vallons correspondent à des zones d'infiltration uniquement en période pluvieuse**. En dehors, la majorité des vallons sont secs (seul le Riou de Claviers présente un débit constant).

A noter que **les investigations complémentaires se sont déroulées au cours d'une année particulièrement sèche**. En effet, le cumul pluviométrique annuel n'a atteint que 510 mm, soit la 6^e valeur la plus basse depuis 1946. La moyenne annuelle est habituellement plutôt de l'ordre de 850 mm.

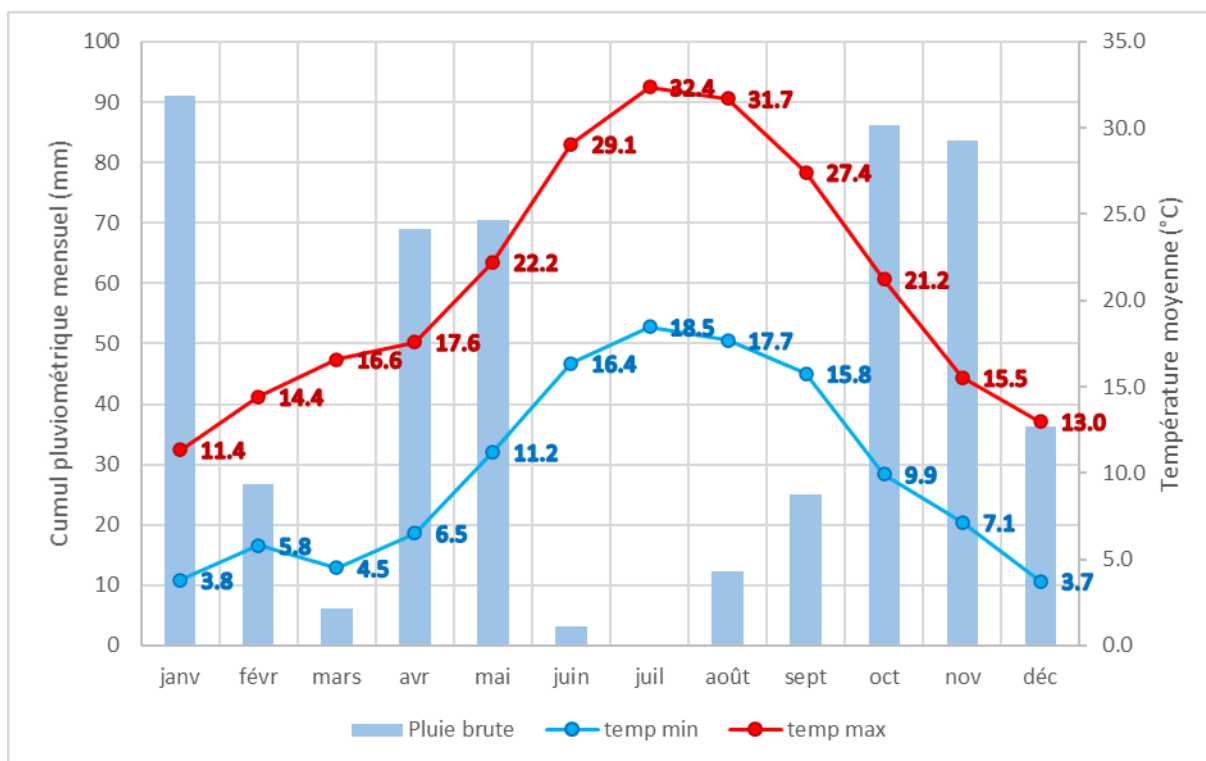


Figure 15 : Conditions climatiques de l'année 2021

A noter que l'année 2022 est également considérée comme exceptionnellement sèche avec un cumul pluviométrique de 215 mm entre janvier août.

5.3.1. Amont du bassin versant

L'amont du bassin versant comprend la Nartuby, et ses affluents, de sa source (La Magdeleine) jusqu'à La Clappe, ainsi que la Nartuby d'Ampus du hameau de la Grenouillère jusqu'à la confluence aux Frayères.

Les débits les plus importants sont mesurés à la station Rebouillon où le débit de la Nartuby atteint 1,2 m³/s en janvier 2021. En étiage (septembre), le débit n'est plus que de 81 l/s.

Les résurgences en tête des bassins versants donnant naissance aux cours d'eau de la Nartuby et de la Nartuby d'Ampus ont un débit limité étant donné le débit mesuré en aval : respectivement de 116 l/s et 23 l/s en janvier 2021, et de 16 l/s et 0 l/s en septembre 2021. Les cours d'eau sont essentiellement alimentés par :

- Les apports issus des affluents :
 - Entre 3 et 17 l/s pour le Bivosque et entre 8 et 75 l/s pour le Beudron concernant la Nartuby ;
 - Entre 0 et 19 l/s en provenance du vallon de Valségure pour la Nartuby d'Ampus.
- Les rejets directs dans les cours d'eau : stations d'épuration de Montferrat-Châteaudouble (débit de référence arrivant à la station de 153 m³/j) et d'Ampus (débit de référence arrivant à la station de 155 m³/j). Le débit rejeté vers le milieu naturel sera au maximum équivalent au débit arrivant à la station ;
- Les sources ponctuant le linéaire des cours d'eau et les venues sous alluviales. La source des Frayères participe majoritairement au débit du cours d'eau avec un débit estimé entre 5 et 371 l/s en 2021 (au minimum 20 % du débit total du cours d'eau en aval de la source).

En dehors de la période hivernale (novembre/décembre), les mesures de températures montrent des valeurs relativement stables aux points suivants : Chapelle St-Jean, en aval de la source des Frayères et aux Ferrières (entre 13 et 15 °C), et dans une moindre mesure à la source de la Magdeleine. Tandis que les autres points de suivi montrent des fluctuations corrélées à la température de l'air (cf. Figure 15).

En ce qui concerne la conductivité, en dehors du mois de mai pour lequel l'ensemble des conductivités mesurées sont bien plus basses que la suite des mesures (sans doute un problème de calibration de la sonde à sa mise en service), l'amont du bassin versant de la Nartuby (Magdeleine, Bivosque, Beudron sauf en décembre 2021 et mai 2022 pour ce dernier point) se distingue des autres points avec une conductivité de l'ordre de 1400 µS/cm. La conductivité augmente fortement à partir de la chapelle Saint-Jean jusqu'en amont des Frayères (environ 2100 µS/cm) avant de diminuer et de se stabiliser en aval de la source des Frayères (environ 1600 µS/cm). A noter que la conductivité est fluctuante et nettement plus importante en novembre 2021 et mai 2022 en aval des Frayères avec des valeurs comprises entre 1500 et 3600 µS/cm.

Les conductivités ponctuelles mesurées sur la Nartuby d'Ampus montrent des valeurs faibles en amont (1100 µS/cm) mais élevées au vallon de Valségure (1800 µS/cm). La conductivité résultante en aval de la confluence du vallon avec la Nartuby d'Ampus doit en toute logique être intermédiaire (pas de mesure disponible).

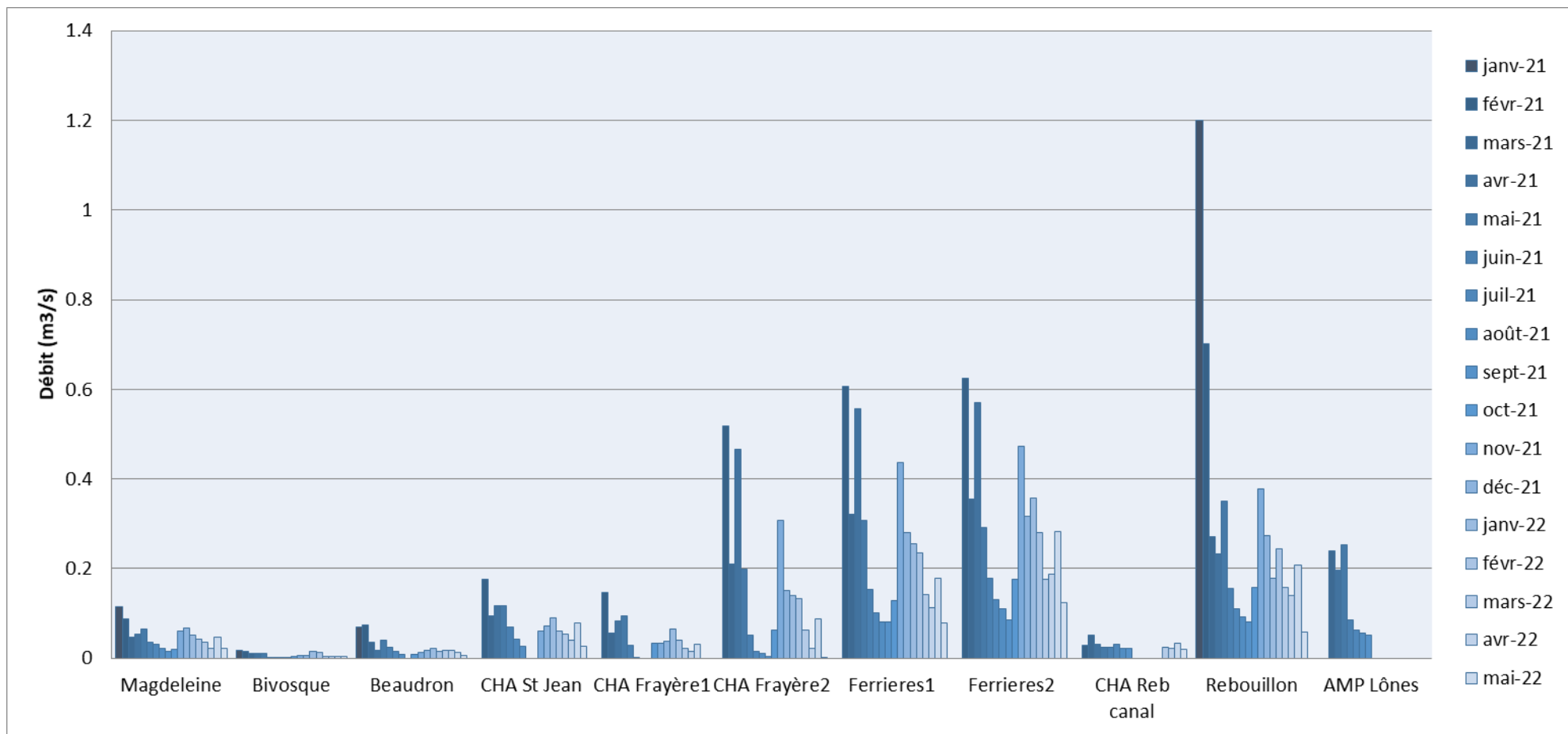


Figure 16 : Débits de la Nartuby en amont du bassin versant de janvier 2021 à juillet 2022

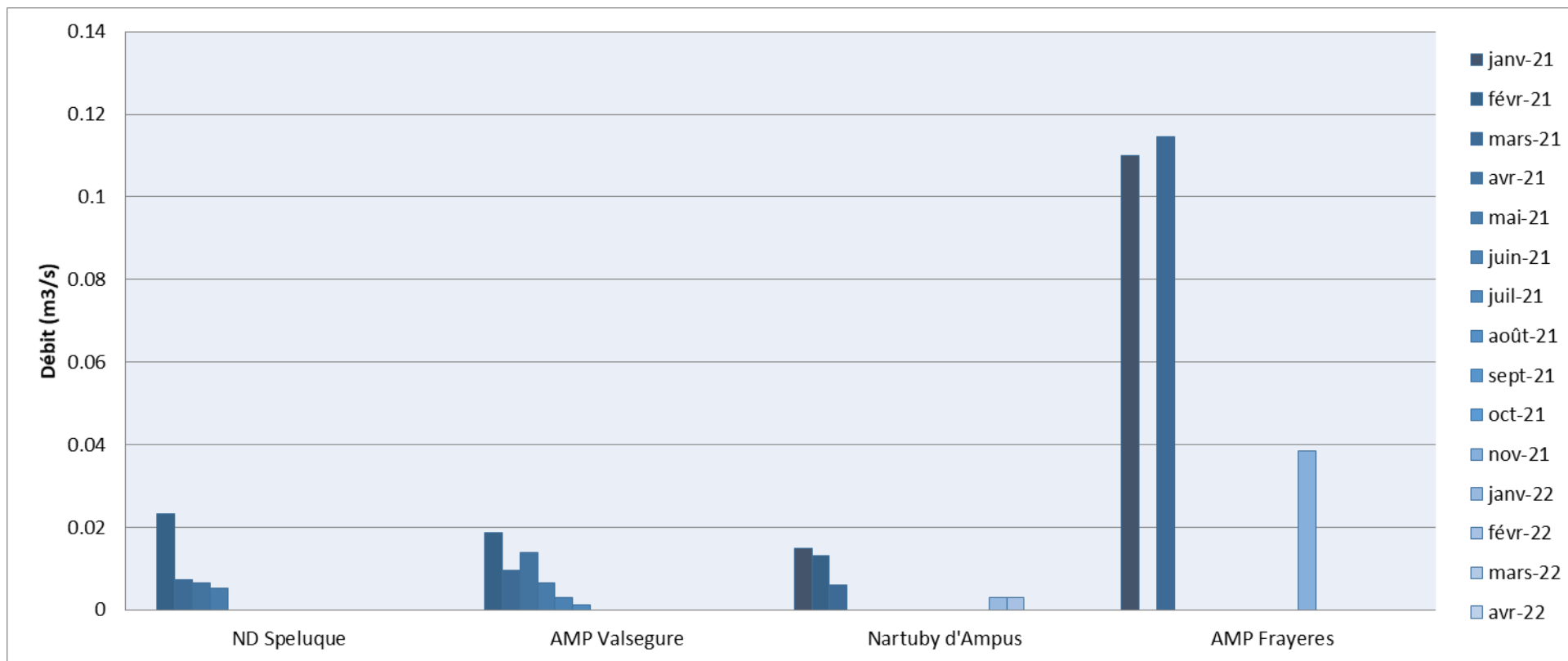


Figure 17 : Débits de la Nartuby d'Ampus de janvier 2021 à juillet 2022

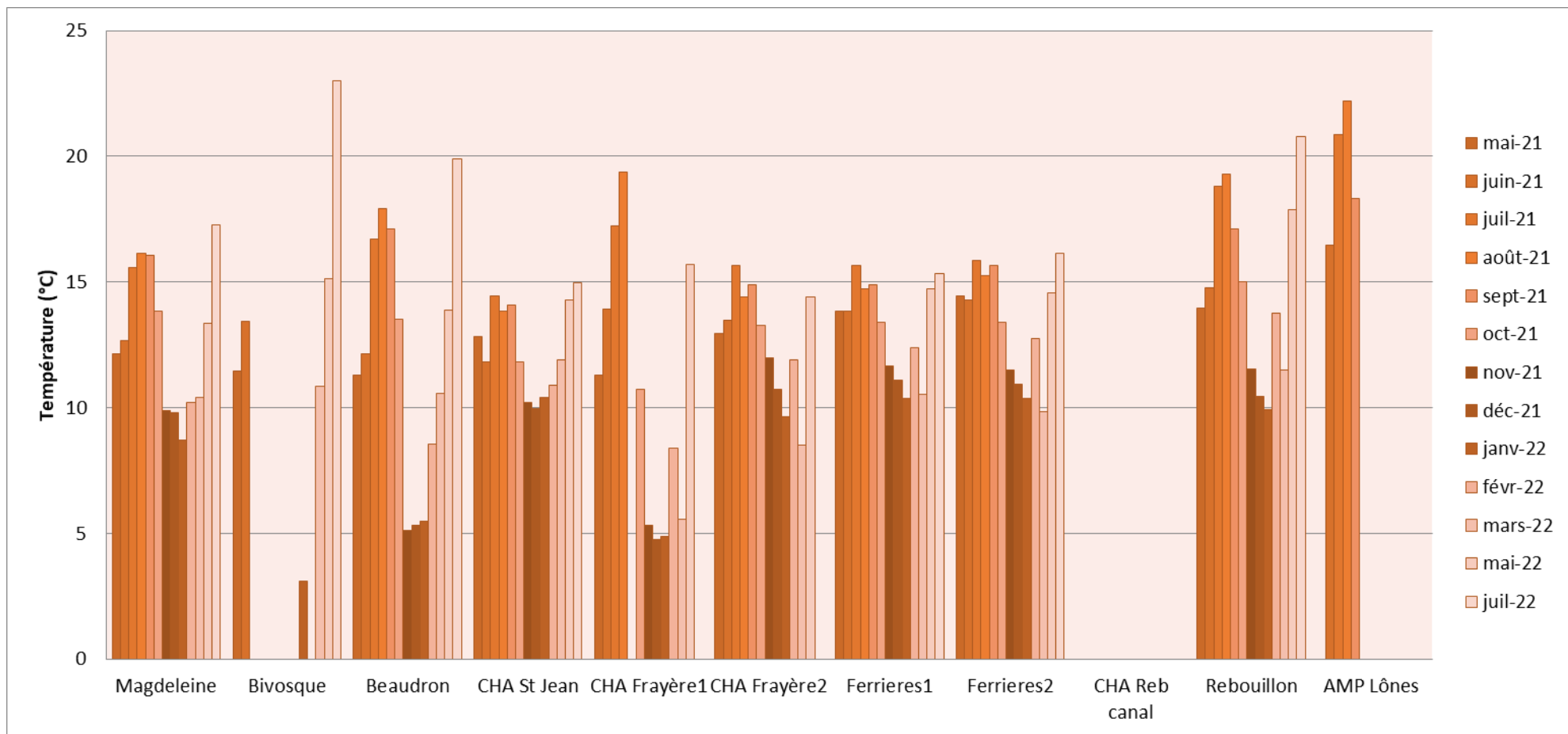


Figure 18 : Température mesurée aux points de suivi de la Nartuby en amont du bassin versant

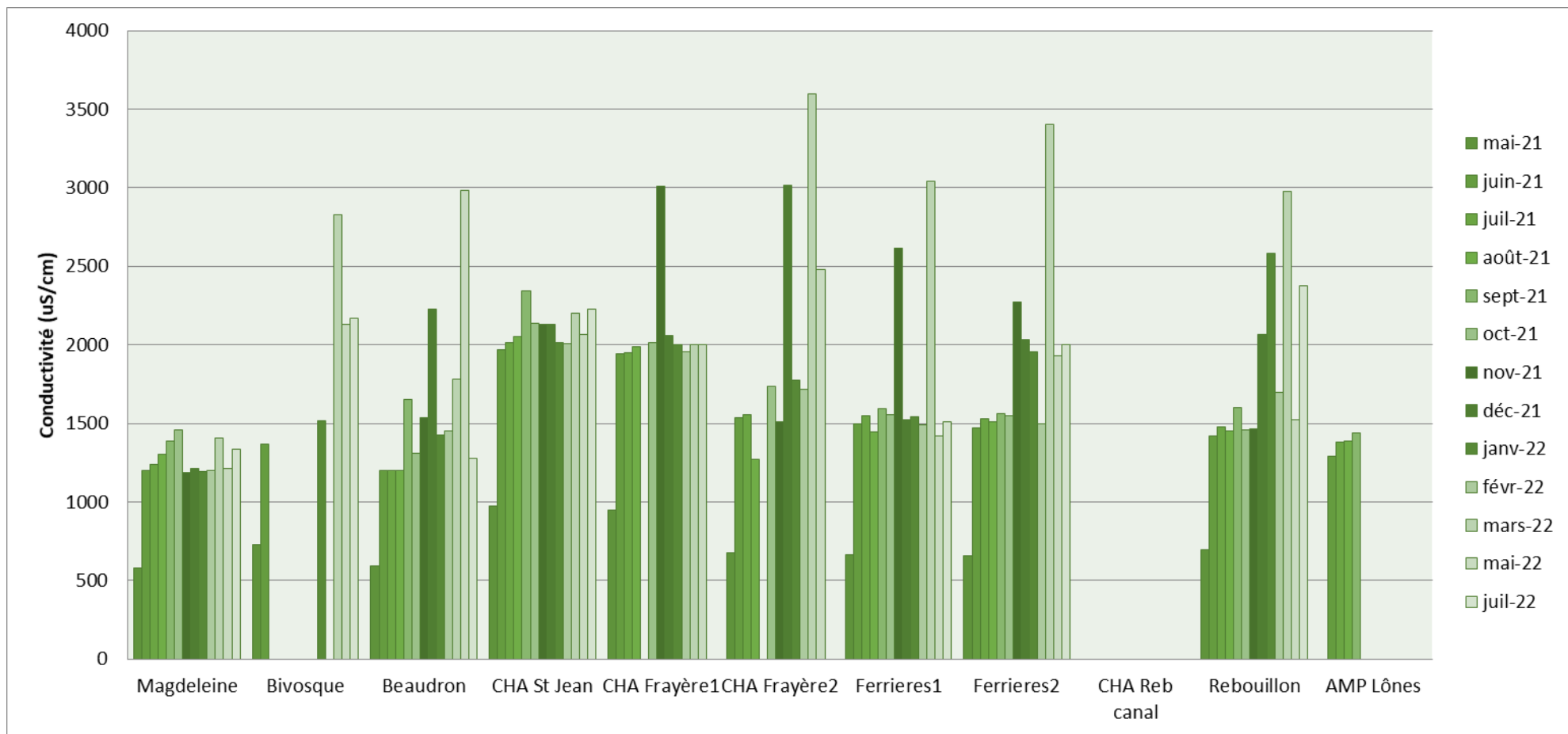


Figure 19 : Conductivité mesurée aux points de suivi de la Nartuby en amont du bassin versant

5.3.2. Aval du bassin versant

L'aval du bassin versant désigne la Nartuby de La Clappe jusqu'à sa confluence avec l'Argens sur la commune du Muy.

La Nartuby fut à sec entre la Clappe et Pont de Lorgues pendant toute la durée du suivi. Au point de suivi Bonhomme (c'est-à-dire au niveau de la zone commerciale de Draguignan, en amont de la confluence avec les eaux provenant de la source de la Foux), la Nartuby était en eau jusqu'en mai 2021 (débits compris entre 19 et 49 l/s de février à mai).

En période de basses eaux, la source de la Foux est en totalité à l'origine du débit de la Nartuby à partir de la confluence. Sur la période de mesure, le débit de la source était compris entre 100 et 950 l/s. Le canal des Vignarets vient ponctionner une partie du débit de la Nartuby entre la Foux et les gorges de Trans-en-Provence (débit prélevé < 60 l/s).

En aval des gorges de Trans-en-Provence, le débit augmente fortement jusqu'à atteindre la station Retru où le débit mesuré est compris entre 585 et 2030 l/s.

En aval le débit est stable en dehors des prélèvements des canaux (débit du canal de Valbourgès compris entre 50 et 120 l/s) à l'origine de la diminution du débit jusqu'à l'exutoire : entre 527 et 1494 l/s au Muy.

A l'exception de la source de la Foux, les températures mesurées sont corrélées aux fluctuations des températures de l'air. La source présente une température très stable aux alentours de 15 °C. La température mesurée en aval immédiat des gorges de Trans-en-Provence semble tout de même être plus faible que sur le reste des points de suivi du cours d'eau (moyenne de 14,6 °C contre environ 15,7 °C sur les autres points de suivi).

En ce qui concerne la conductivité, et en dehors du mois de mai, elle reste bien plus élevée que l'amont du bassin versant. La source de la Foux, du fait de sa forte minéralisation, présente une conductivité de l'ordre de 10 mS/cm. Elle diminue légèrement en aval jusqu'aux gorges de Trans-en-Provence avec une valeur moyenne de 9800 µS/cm. Enfin, elle diminue nettement à partir de la station Retru (moyenne de 8150 µS/cm) pour se stabiliser jusqu'à son exutoire.

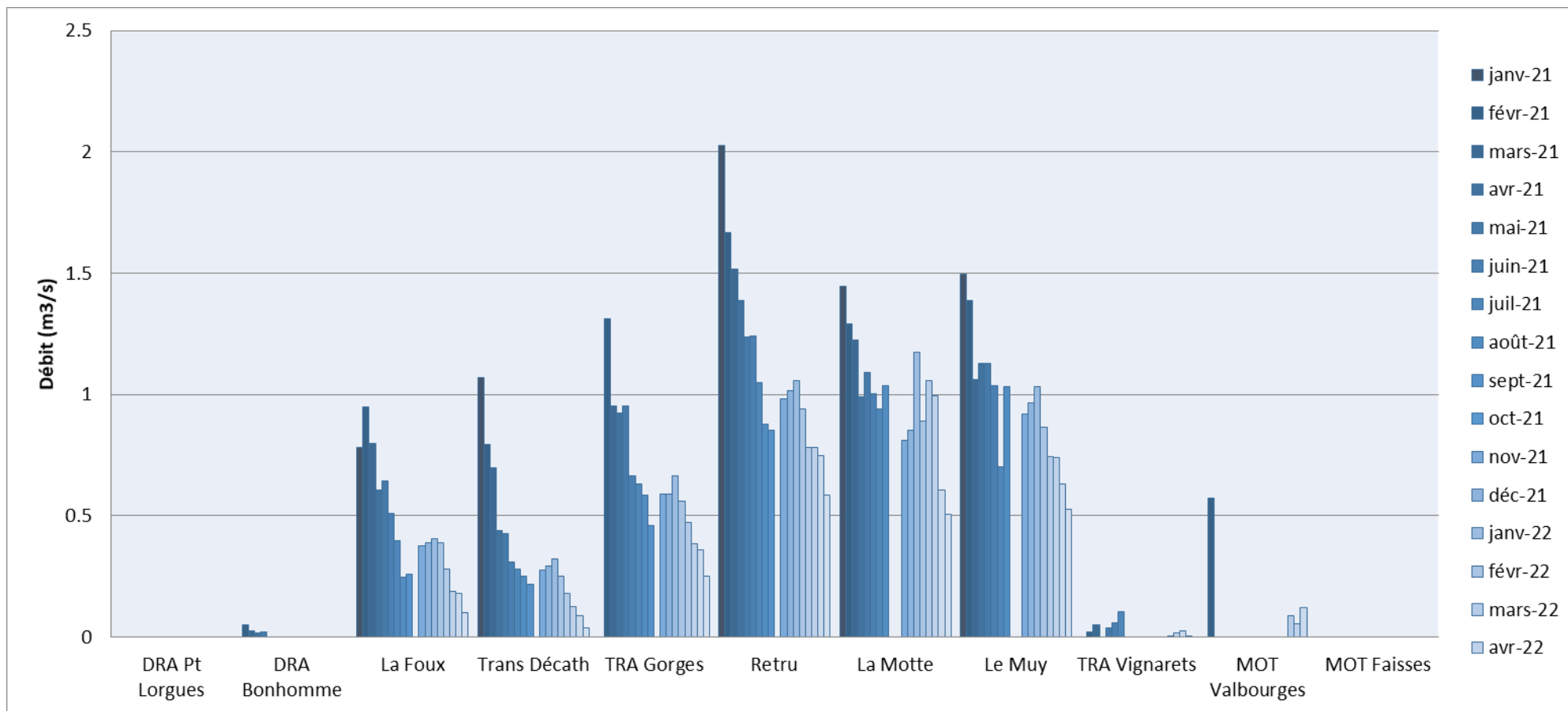


Figure 20 : Débits de la Nartuby en aval du bassin versant de janvier 2021 à juillet 2022

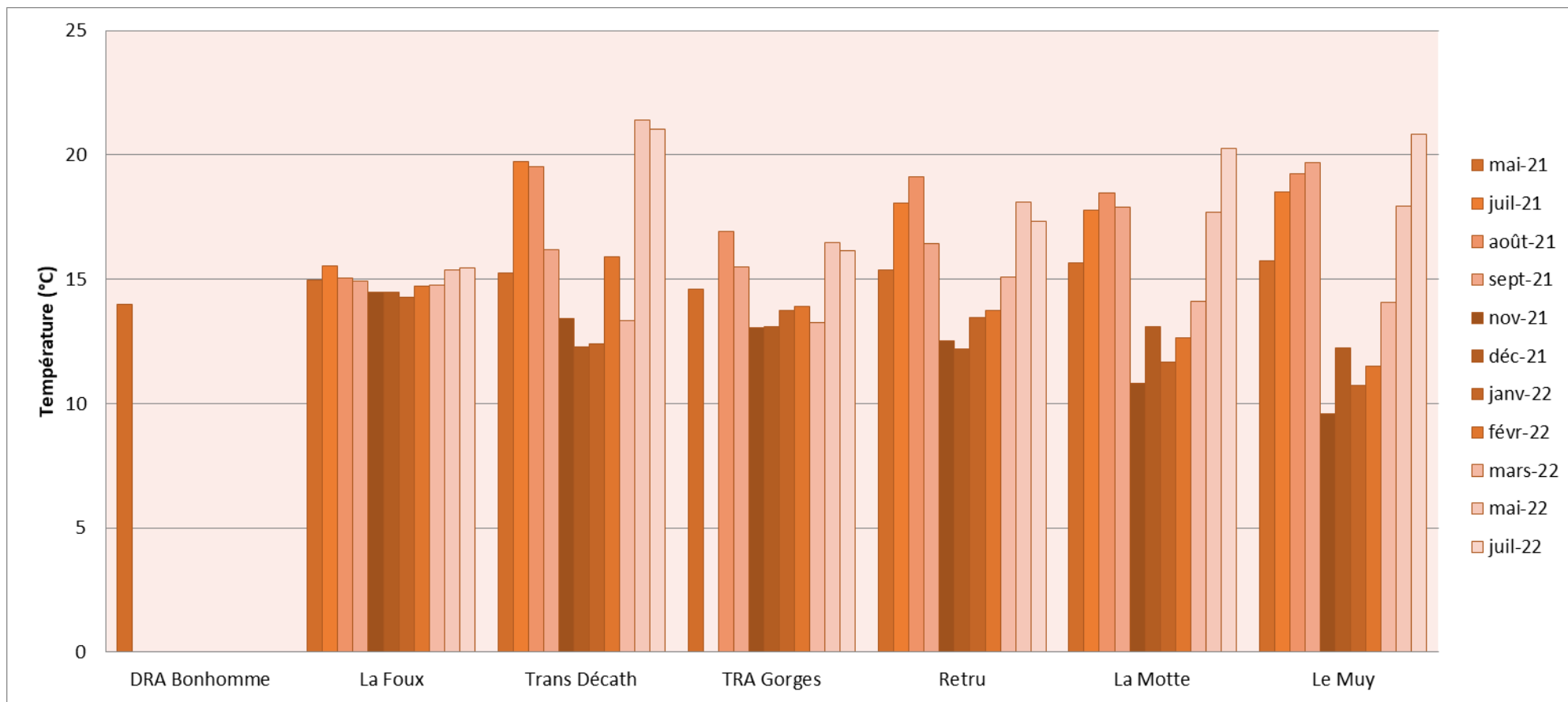


Figure 21 : Température mesurée aux points de suivi de la Nartuby en aval du bassin versant

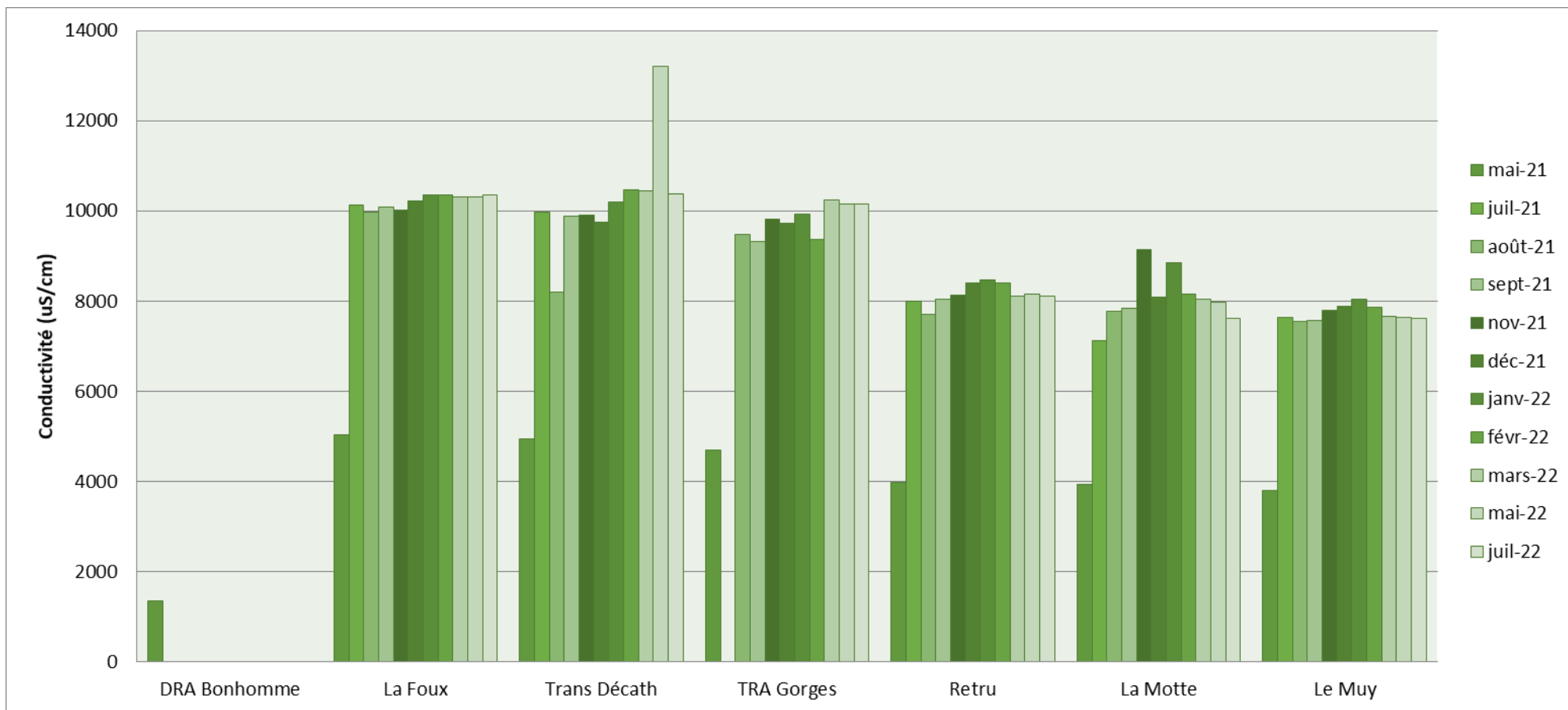


Figure 22 : Conductivité mesurée aux points de suivi de la Nartuby en aval du bassin versant

5.4. Interprétations des résultats

Les mesures de jaugeage permettent de définir les zones d'apports et de perte sur l'ensemble du linéaire de la Nartuby et de la Nartuby d'Ampus, de leur source jusqu'à leur exutoire.

Les zones de perte correspondent à une infiltration des eaux de surface à la faveur des aquifères encaissants (Jurassique ou Muschelkalk), tandis que les zones d'apport correspondent à l'inverse à une alimentation du cours d'eau par les eaux souterraines.

Les mesures réalisées permettent ainsi de réaliser un état des lieux et une cartographie de l'interaction entre la rivière et les eaux souterraines en fonction de la période hydrologique.

5.4.1. Amont du bassin versant

L'alimentation des systèmes karstiques se fait par le biais de deux moyens : par infiltration des eaux de pluie et par pertes des cours d'eau.

L'infiltration des eaux de pluie se fait sur un vaste impluvium (environ 50 km²). On peut distinguer l'impluvium en amont de la source des Frayères (environ 44 km²) de celui qui concerne les massifs karstiques en rive droite comme en rive gauche à l'aval de cette source (environ 10 km²).

En prenant comme hypothèse une pluie efficace de 400 mm et un coefficient d'infiltration de 90%, le volume infiltré sur l'impluvium amont serait de l'ordre de 12 Mm³/an et de 3 Mm³/an sur les impluviums aval.

5.4.1.1. Nartuby d'Ampus

Pour la Nartuby d'Ampus, on observe deux zones de pertes :

- Une première zone de perte est située à l'amont d'Ampus quand deux cours d'eau traversent les calcaires du Jurassique supérieur dans le massif de la Rouvière. Au Nord, la Nartuby d'Ampus est alimentée par les sables miocènes qui tapissent la plaine de Taradeau. Les débits apportés par ces sables et perdus au bénéfice de la nappe karstique sont d'environ 10 l/s en début de printemps puis tarissent rapidement dès juin. Au Sud, le Valségure est alimenté par un trop plein du canal de dérivation de la source de Fontigon ; les débits apportés par ces sables et perdus au bénéfice de la nappe karstique sont d'environ 20 l/s en début de printemps puis tarissent vers fin juillet. En faisant l'hypothèse d'un débit d'alimentation par pertes de l'ordre de 50 l/s sur 9 mois, l'ordre de grandeur de cette modalité d'alimentation est d'environ 1 Mm³/an. Notons que c'est une hypothèse pessimiste, minorée ; il n'a pas été possible d'estimer le débit de pertes en pleines eaux.
- La deuxième zone de perte est localisée dans les gorges d'Ampus, à l'aval du village et à l'amont de la source des Frayères. Les débits observés sont extrêmement faibles (<20 l/s au printemps) et en période estivale, ils correspondent uniquement au rejet d'alimentation de la station d'épuration. Sur un plan quantitatif, on peut donc considérer cette zone de pertes comme négligeable en termes d'apports au système karstique, excepté en périodes pluvieuses intenses. D'un point de vue qualitatif, l'infiltration des eaux de rejet de la station d'épuration dans l'aquifère karstique doit être soulignée avec toutes les implications que cela a sur des objectifs épuratoires qui se doivent d'être ambitieux.

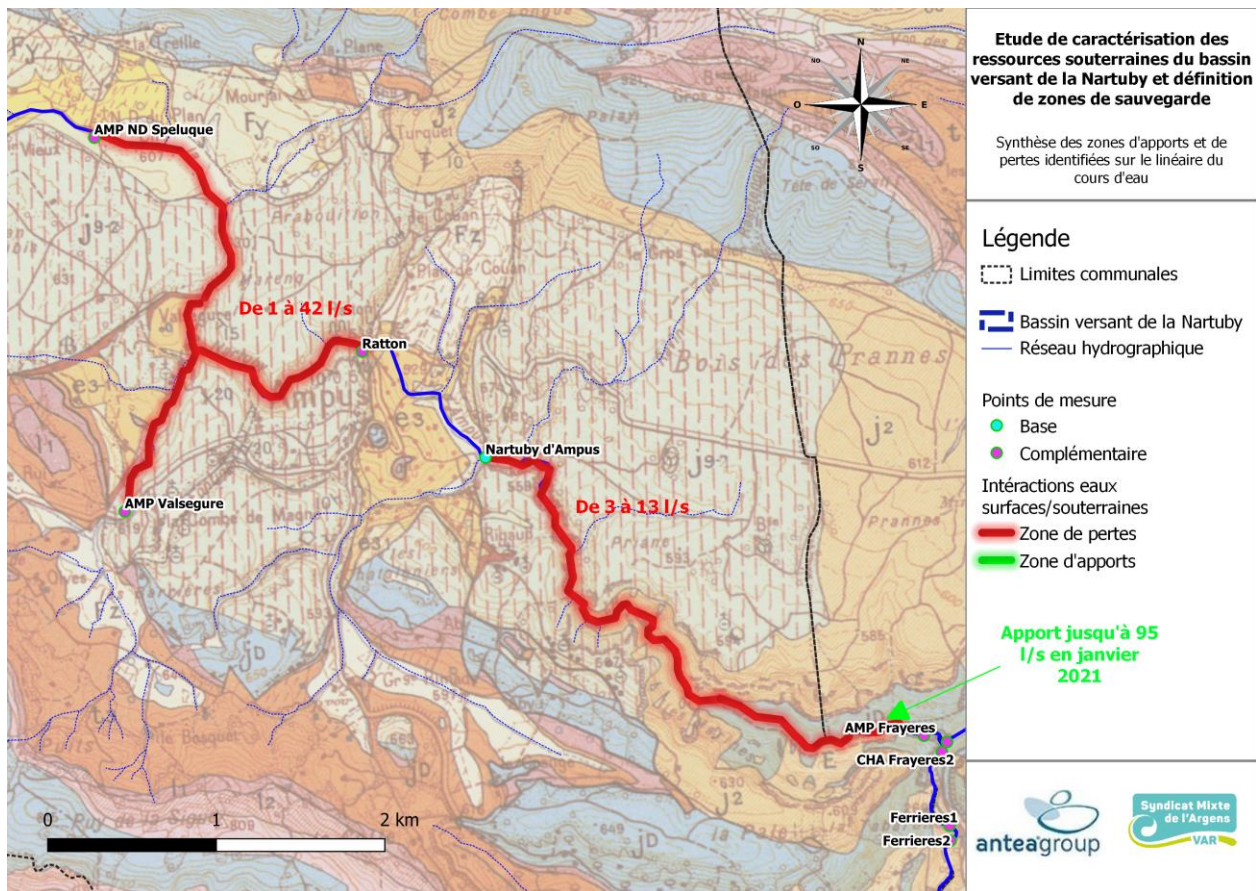


Figure 23 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby d'Ampus

5.4.1.2. Nartuby

Il s'avère qu'en période de hautes et moyennes eaux (de février à mai 2021), le débit mesuré à la chapelle Saint-Jean est strictement égal aux débits cumulés de la Magdeleine, du Bivosque et du Beaudron. Aucune infiltration ou aucun apport n'est détecté à cette période sur le linéaire de la Nartuby.

Sur le Beaudron, en période de hautes et moyennes eaux, un apport est constaté entre l'amont et l'aval du ruisseau : de 22 l/s en février et de 14 l/s en mai 2021. Ces apports sont suspects étant donné le contexte géologique (substratum du ruisseau : terrains du Keuper réputés imperméables). Ces anomalies peuvent être dues aux précipitations ponctuelles ayant eues lieu aux dates des mesures (cumul de 0,8 mm enregistré).

En période de basses eaux, le débit aval est légèrement inférieur au débit amont probablement du fait d'un drainage du ruisseau par les alluvions.

Il a été constaté sur le terrain que le Bivosque quant à lui s'infiltré en totalité au profit des alluvions.

Le tronçon entre la chapelle Saint Jean et l'amont des Frayères est toujours représentatif d'une zone de pertes : de 20 à 47 l/s entre février 2021 et juillet 2022. Ces dernières sont totales entre les mois d'août et septembre 2021. **Il peut être émis comme hypothèse que pour un débit de la Nartuby inférieur à 30 l/s (débit mesuré à la chapelle Saint-Jean en août 2021 et juillet 2022), les pertes seront totales sur ce linéaire.**

L'apport des pertes permanentes dans les gorges au profit de l'aquifère Jurassique des Ferrières est estimé à environ 1 Mm³/an.

Les données acquises dans le cadre de cette étude montrent que l'ordre de grandeur de l'alimentation des systèmes karstiques du Jurassique supérieur est d'environ 15 Mm³/an.

Les mesures hydrauliques montrent que la zone de restitution des aquifères karstiques du Jurassique supérieur s'étend des Frayères à Rebouillon et que les modalités de restitution sont variables.

Le débit mesuré en aval des Frayères (Frayères 2) correspond aux débits cumulés de la Nartuby, de la Nartuby d'Ampus et du rejet de la source des Frayères. Lorsque cette dernière n'est pas en exploitation, la dérivation d'une partie des eaux de la source est rejetée plus en aval (entre Frayères 2 et Ferrières 1). Le débit de rejet est au maximum de 55 l/s selon la DPVA. La mesure réalisée à Ferrières 1 comprend donc ce débit de rejet.

Sur la période de mesure, le débit de la source des Frayères est estimé à 220 à 370 l/s suite à des événements pluvieux et de l'ordre de 1 à 10 l/s à l'étiage en régime influencé par les prélèvements.

Le tronçon entre les Frayères et l'aval des Ferrières correspond à une importante zone d'apports. Celle-ci serait localisée principalement en un point en rive droite en aval des Frayères (cf. photographie), et de manière plus diffuse en aval. Un apport en rive droite pourrait sous-entendre que la Nartuby est alimentée dans ce secteur par le massif Jurassique situé à l'Ouest.

Au total, sur la période de mesure, l'apport total est compris entre 26 et 160 l/s.



Figure 24 : Principale zone d'apport suspectée entre les Frayères et les Ferrières

Ces données permettent de proposer un flux de restitution à la Nartuby de l'ordre de 12 Mm³/an.

Cette estimation est en première approche cohérente avec les flux d'alimentation estimés à environ 15 Mm³/an. L'écart entre entrées et sorties est faible et pourrait s'expliquer de plusieurs manières :

- Imprécision avec surestimation de la quantification des flux d'alimentation par infiltration des eaux de pluie. Nous proposons ici une quantification basée sur l'hypothèse d'une pluie

efficace « historique » de 300 mm issue de la littérature scientifique et technique mais qui mériterait d'être confirmée par l'exploitation de données plus fiables et plus récentes (données SAFRAN).

- Existence d'un autre exutoire naturel. Au vu de la configuration géologique, il est possible que des flux faibles et localisés se fassent depuis l'aquifère du Jurassique supérieur vers l'aquifères sous-jacent du Muschelkalk.

Au final, on peut insister sur le soutien d'étiage important de ces karsts du Jurassique supérieur qui permettent de donner à la rivière lors des étiages forts, un débit compris entre 70 et 120 l/s (vidange lente des réserves) en plus des 30 l/s apports en tête de bassin versant par les aquifères liasiques.

De plus, ces observations sont importantes pour la détermination de la surface à inclure dans la zone de sauvegarde pour la protection de la source des Frayères. Si on accepte un débit moyen d'environ 150 l/s, le flux d'alimentation de cette source karstique serait de l'ordre de 5 Mm³/an.

L'alimentation par les pertes sur la Nartuby d'Ampus sont de l'ordre de 1 Mm³/an et les pertes de la Nartuby de Châteaudouble ne bénéficient pas à cette ressource. **Ces données confirment que l'alimentation principale de la source des Frayères du Jurassique supérieur se fait principalement par infiltration des eaux de pluie.**

Les mesures hydrauliques réalisées à l’aval des Ferrières permettent aussi de valider le schéma avec deux aquifères distincts pour l’aquifère du Muschelkalk : un aquifère amont et un aquifère aval (cf. cartes ci-dessous).

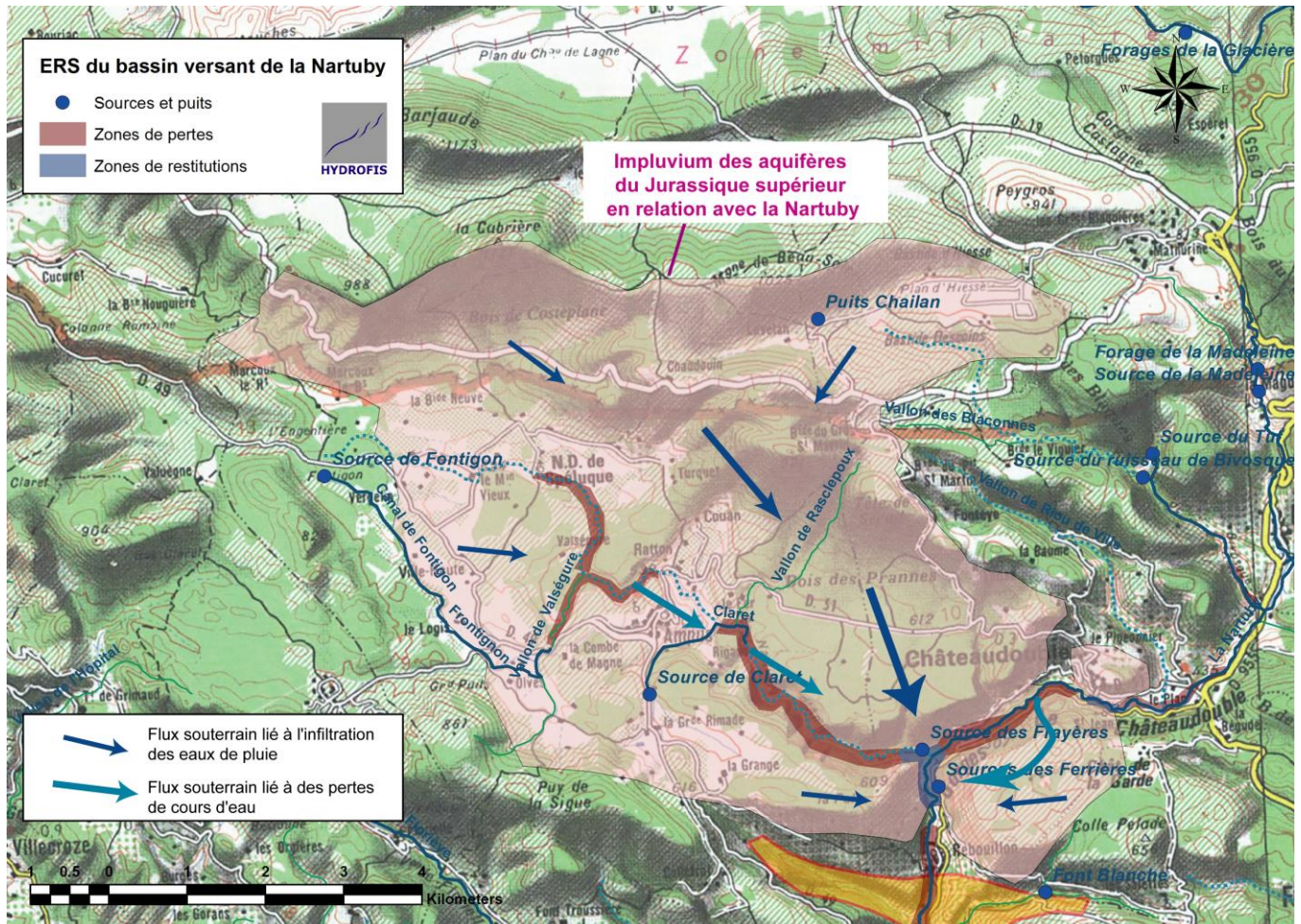


Figure 25 : Synthèse cartographique des modalités d'alimentation et de restitution de l'aquifère Jurassique en amont du bassin versant de la Nartuby

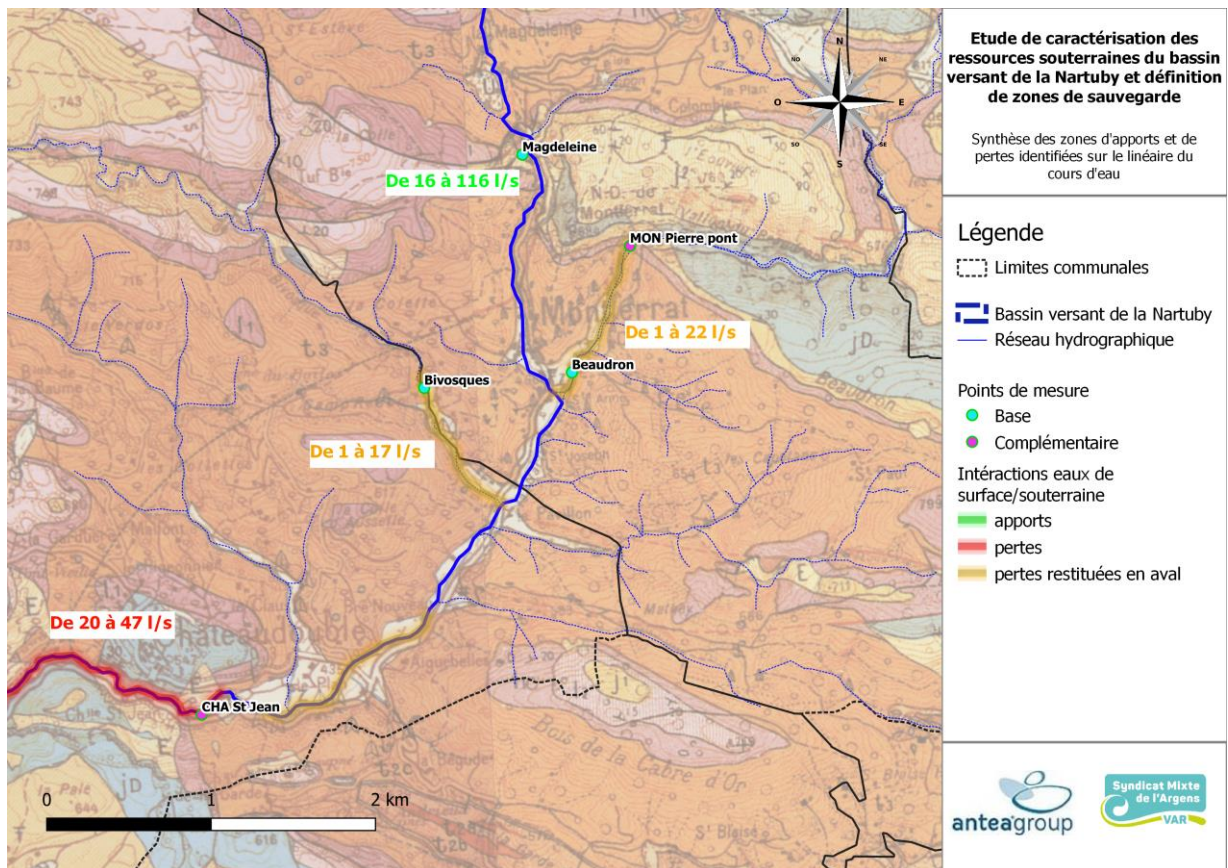


Figure 26 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby amont

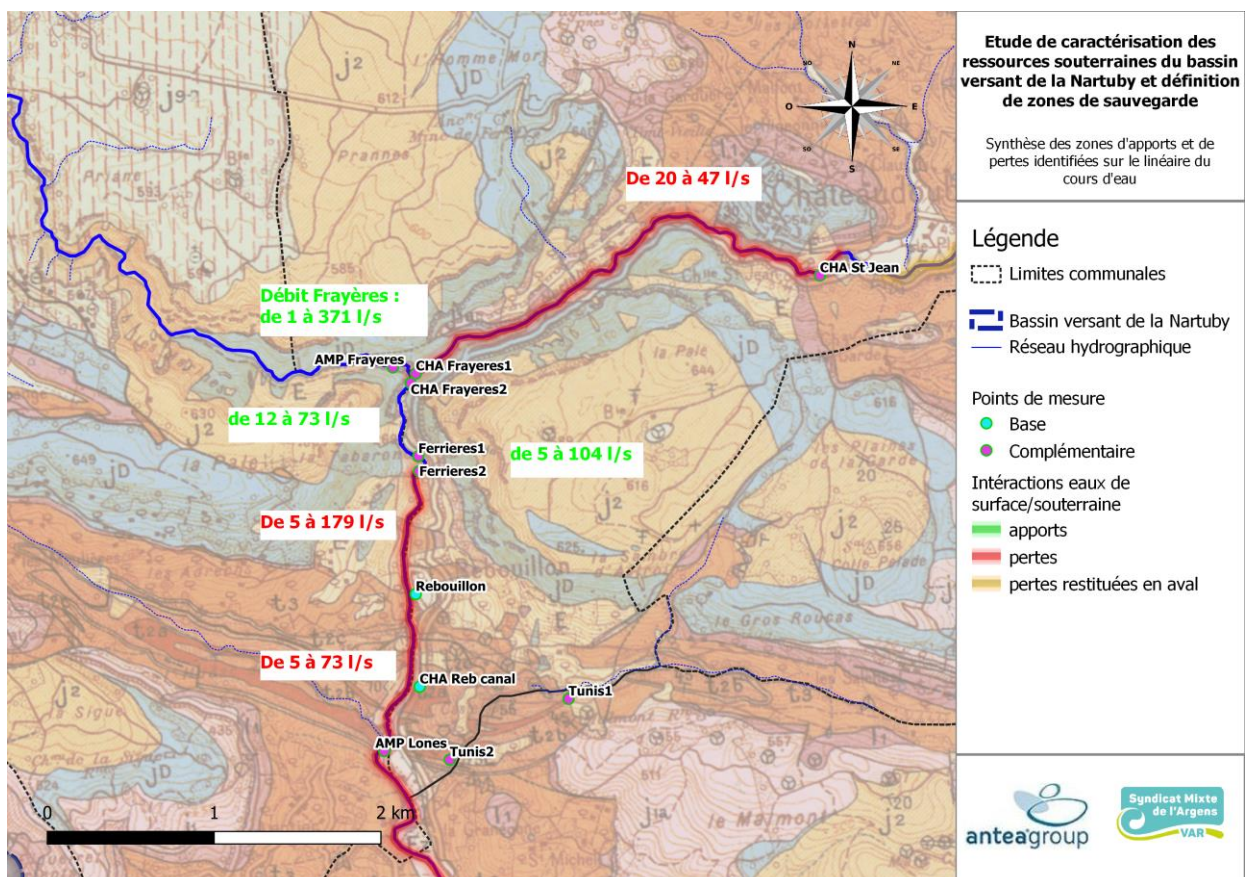


Figure 27 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby dans le secteur des Frayères

5.4.2. Aval du bassin versant

L'aquifère amont s'étend de la fenêtre de Rebouillon aux Incapis et se trouve plus ou moins sous la plaine alluviale de Draguignan. Cet aquifère est composé de deux réservoirs : un réservoir superficiel, très connecté aux pertes de la Nartuby, et un réservoir profond plus isolé (cf. chapitre 4).

Cet aquifère est alimenté principalement par les pertes de la Nartuby, secondairement par l'infiltration des eaux de pluie sur son impluvium.

Les pertes se font à deux endroits distincts :

- Au droit de la fenêtre de Rebouillon avec des pertes à l'étiage de l'ordre de 5 à 75 l/s. Elles peuvent toutefois être massives, notamment comme en janvier 2022 avec des pertes estimées à 180 l/s, soit 50% du débit de la Nartuby aux Ferrières. On a probablement sur ce secteur des zones de pertes qui s'activent seulement en période de hautes eaux, avec des conduits karstiques capables de « boire » de grande quantité d'eau. Il serait intéressant de poursuivre les mesures qui encadrent cette zone de pertes et de les compléter par des observations adaptées en période de crue (période exceptionnellement sèche du suivi). Avec l'hypothèse de seulement 60 jours de crue à 250 l/s et 300 jours de basses eaux avec des débits de pertes moyens de l'ordre de 100 l/s, le volume infiltré serait de l'ordre 4 Mm³/an.
- Entre la Clappe et St Hermentaire. Il s'agit de la zone de pertes bien identifiée de la Nartuby au profit de l'aquifère karstique. Les débits d'infiltration varient entre 200 et 300 l/s en pleines eaux ; l'été, quand le débit amont est faible, les débits d'infiltration chutent (environ 50 l/s). Avec ces données, on peut estimer le volume infiltré à environ 5 Mm³/an.

L'alimentation par infiltration des eaux de pluie est secondaire. En considérant le Keuper comme imperméable, elle se fait principalement au droit de la plaine alluviale (environ 7 km²) au travers des horizons limoneux et des graves. En prenant comme hypothèse une pluie efficace de 300 mm et un coefficient d'infiltration de 40%, le volume infiltré serait de l'ordre de 1 Mm³/an.

Cet aquifère amont se vidange de deux manières :

- Par des retours à la Nartuby avec une zone de restitution qui s'étend du Pont de Lorgues à la confluence avec la Foux (quartier St Hermentaire). Les débits restitués varient avec le niveau piézométrique de la nappe ; en 2021, ils étaient d'environ 50 l/s en février et se sont taris en juin. Les volumes restitués sont donc faibles : de l'ordre de 1 Mm³/an. Cette configuration implique l'existence d'une barrière hydraulique : elle pourrait correspondre soit à une structure faillée qui remonte des argiles et du gypse au droit de la zone de la Foux, soit à une structure plissée qui produit le même effet.
- Par une alimentation de la source de la Foux (155 m NGF). Rappelons que le module de cette source est estimé à environ 900 l/s (soit environ 28 Mm³/an). Avec le schéma proposé, on peut estimer que près de 50% de l'alimentation de cette source puissante se fait par passage des eaux de l'aquifère amont. L'origine des 50% restant fait à ce jour l'objet d'hypothèse : venues d'eaux souterraines en provenance du Malmont et/ou venues d'eaux souterraines en provenance de l'aquifère aval (en particulier en hautes eaux). Un gain important est constaté du fait de l'apport majoritaire en provenance de la **source de la Foux : entre 102 et 948 l/s** sur la période de mesure.

A noter que le canal du Vignarets draine la Nartuby à hauteur de 4 à 103 l/s. Le débit de prélèvement du canal était nul en juillet et août 2021.

L'aquifère aval s'étend sur un vaste territoire sur les deux rives de la Nartuby (depuis les Arcs jusqu'à Claviers).

Il est alimenté de plusieurs façons :

- Par infiltration des eaux de pluie sur un vaste impluvium (environ 65 km²). En prenant comme hypothèse une pluie efficace de 300 mm et un coefficient d'infiltration de 90%, le volume infiltré serait de l'ordre de 18 Mm³/an.
- Par les pertes du riuou de Claviers (de 62 l/s au printemps à 0 en été). On peut estimer cet apport à environ 2 Mm³/an.
- Par les pertes **constatées entre les stations de La Foux et Trans-en-Provence (Décathlon) malgré les apports de la source : entre 39 et 196 l/s**. Seul le mois d'août 2021 rend compte de l'absence de pertes sur ce tronçon (débit de la Foux équivalent à celui mesuré à la station « Décathlon»). Le volume cumulé de ces apports par pertes peut être estimé à environ 6 Mm³/an.
- Par des pertes activées de façon temporaire durant les épisodes de pluie sur les cours d'eau qui prennent leurs sources dans les aquifère du Jurassique amont ou dans les horizons peu perméables du Keuper (Real, Catalane, clue de Figanières,..). Il est difficile de proposer un volume d'alimentation pour ces zones de pertes.

Les gorges de Trans-en-Provence sont le principal exutoire du système : de 213 à 527 l/s sur la période de mesure. Il a été vu précédemment que ces apports proviennent du massif Muschelkalk situé au Nord des gorges. Des venues d'eau sont nettement visibles sur le terrain.



Figure 28 : Photographies des arrivées d'eau constatées en aval des gorges de Trans-en-Provence

Entre l'aval des gorges et la station « Retru », une nouvelle zone d'apport est constatée : entre 282 et 576 l/s sur la période de mesure. Les arrivées d'eau n'ont pas pu être clairement identifiées sur le terrain et sont probablement disséminées de manière diffuses directement dans le lit mineur du cours d'eau.

Il est important de souligner la présence de la STEP de Trans-en-Provence entre ces deux stations qui participe à l'apport mis en évidence avec le rejet des eaux traitées. Le débit moyen arrivant à la station est de 5841 m³/j, tandis que **le volume rejeté est estimé en moyenne à 64 l/s en 2021**.

Le débit en aval tend ensuite à se stabiliser jusqu'au Muy : entre 527 et 1494 l/s. Les canaux d'irrigation de Vabourgès et des Faïsses conduisent à diminuer le débit de la Nartuby entre la station « Retru » et La Motte (entre 2021 et 2022, le débit de prélèvement du canal de Valbourgès, mesuré

ponctuellement, est compris entre 56 et 571 l/s). Une partie du débit prélevé est ensuite restitué à la Nartuby entre La Motte et Le Muy.

Au final, le bilan proposé pour les aquifères du Muschelkalk est déséquilibré. Les volumes rendus à la Nartuby par les trois zones de restitution cumulent environ 50 Mm³/an alors que le cumul des modes d'alimentation identifiés est d'environ 36 Mm³/an.

Cet écart peut être expliqué de plusieurs manières :

- Participation de l'alimentation des aquifères du Muschelkalk par les eaux infiltrées au droit du Malmont.
- Mauvaise estimation de l'infiltration des eaux météoriques.
- Sous-estimation des pertes sur les cours d'eau temporaires qui traversent l'impluvium karstique.
- Sous-estimation des volumes infiltrés par les zones de perte durant les épisodes pluvieux.

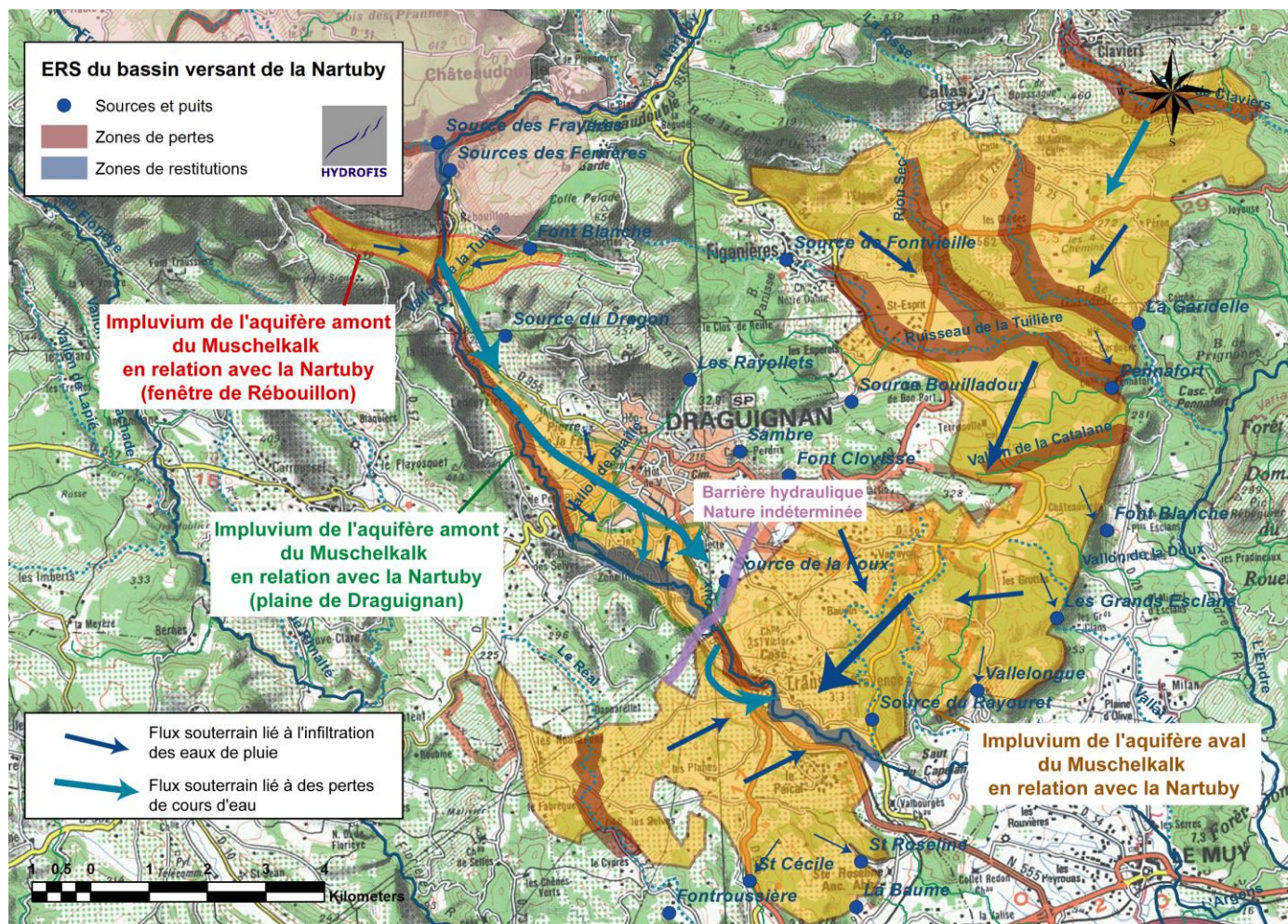


Figure 29 : Synthèse cartographique des modalités d'alimentation et de restitution de l'aquifère Muschelkalk en aval du bassin versant de la Nartuby

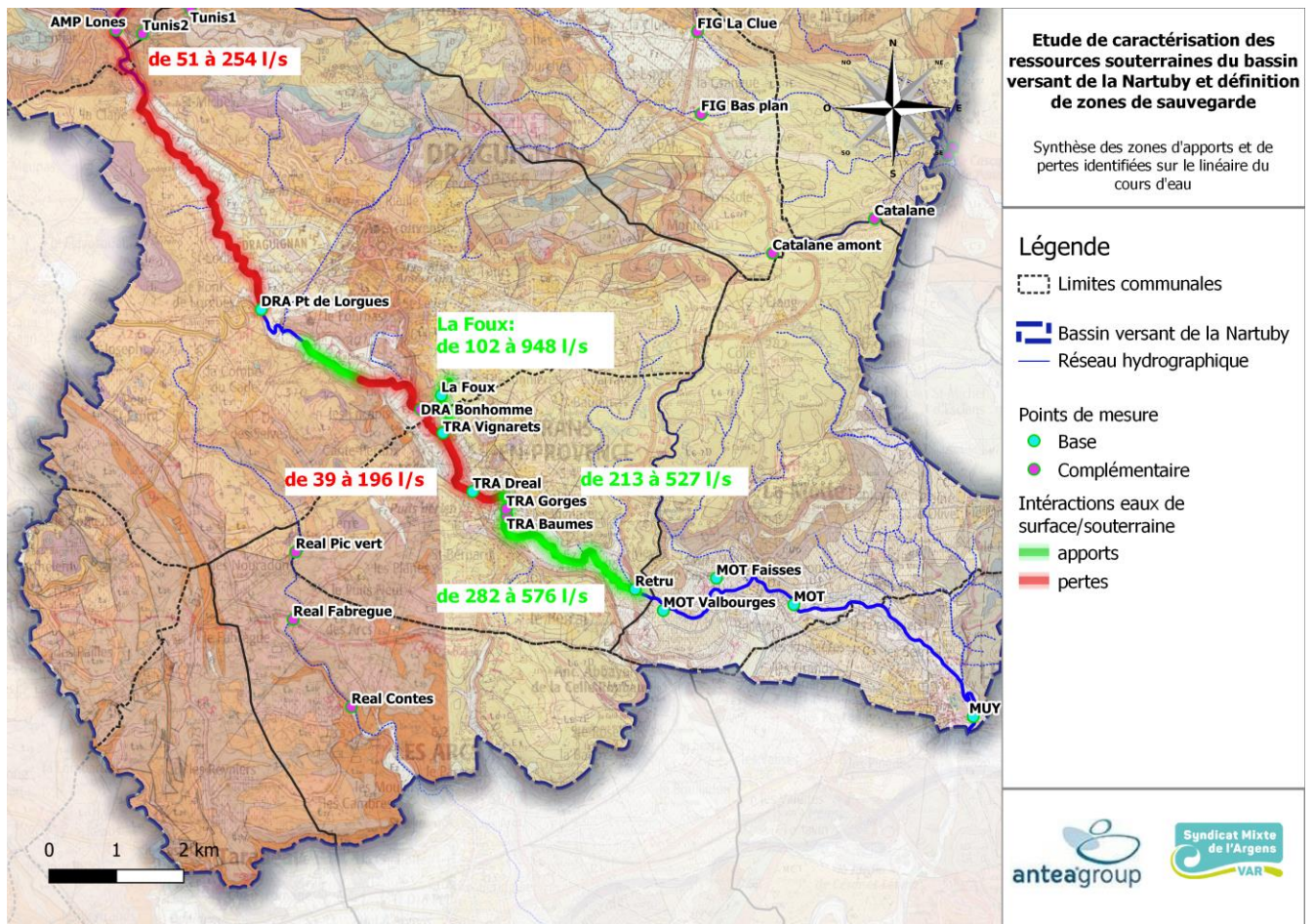


Figure 30 : Synthèse des zones d'apports et de pertes identifiées sur la Nartuby aval

6. Traçage

6.1. Objectifs

La zone nord du bassin versant de la Nartuby se situe sur une zone de partage des eaux entre 4 grandes unités hydrogéologiques : Aups-Fontigon, Ampus-Frayères, Magdeleine et Fontaine L'Evêque (cette dernière est exclue du territoire d'étude). En l'absence de traçage dans cette zone, il est difficile de dresser des limites de bassin d'alimentation des unités hydrogéologiques karstiques, notamment ce qui transite vers les Frayères et la Magdeleine ou ce qui alimente Fontaine l'Evêque.

Dans un premier temps, l'objectif est de valider le traçage peu documenté du Plan d'Hiesse de 1973. Le lien entre le plan d'Hiesse plus au Nord et la source des Frayères a été démontré par une expérience de traçage en 1973 : rejet de 15 kg de fluorescéine dans l'embut du plan d'Hiesse avec une chasse d'eau de 12 m³/s. Le colorant est apparu 21 jours après injection dans l'aven qui drainait le plan d'Hiesse ; ceci étant, des venues d'eau colorées seraient aussi apparues dans la Nartuby d'Ampus.

Ce traçage pose en effet question dans la mesure où la structure géologique fait remonter le Keuper entre le Plan d'Hiesse et les Frayères. La validation de ce traçage permettrait d'obtenir des données plus robustes sur le cheminement des eaux souterraines dans ce secteur qui peuvent s'effectuer selon deux cheminements différents :

- Injection au Plan d'Hiesse et restitution directe au Frayères ;
- Injection au Plan d'Hiesse, restitution à Bivosque ou Magdeleine, transit en surface dans le cours de la Nartuby et pertes aboutissant aux Frayères ;

Cette validation peut être envisagée de manière indirecte dans un premier temps par un traçage relativement simple entre les pertes dans l'amont des gorges de Châteaudouble et les Frayères.

Ce traçage permettrait également d'apporter des éléments sur le bassin d'alimentation des Frayères (prise en compte ou non du cours amont de la Nartuby dans l'alimentation), et de confirmer ou d'infirmer l'individualisation du compartiment jurassique en rive gauche de la Nartuby (via la faille SW-NE à l'W de Châteaudouble).

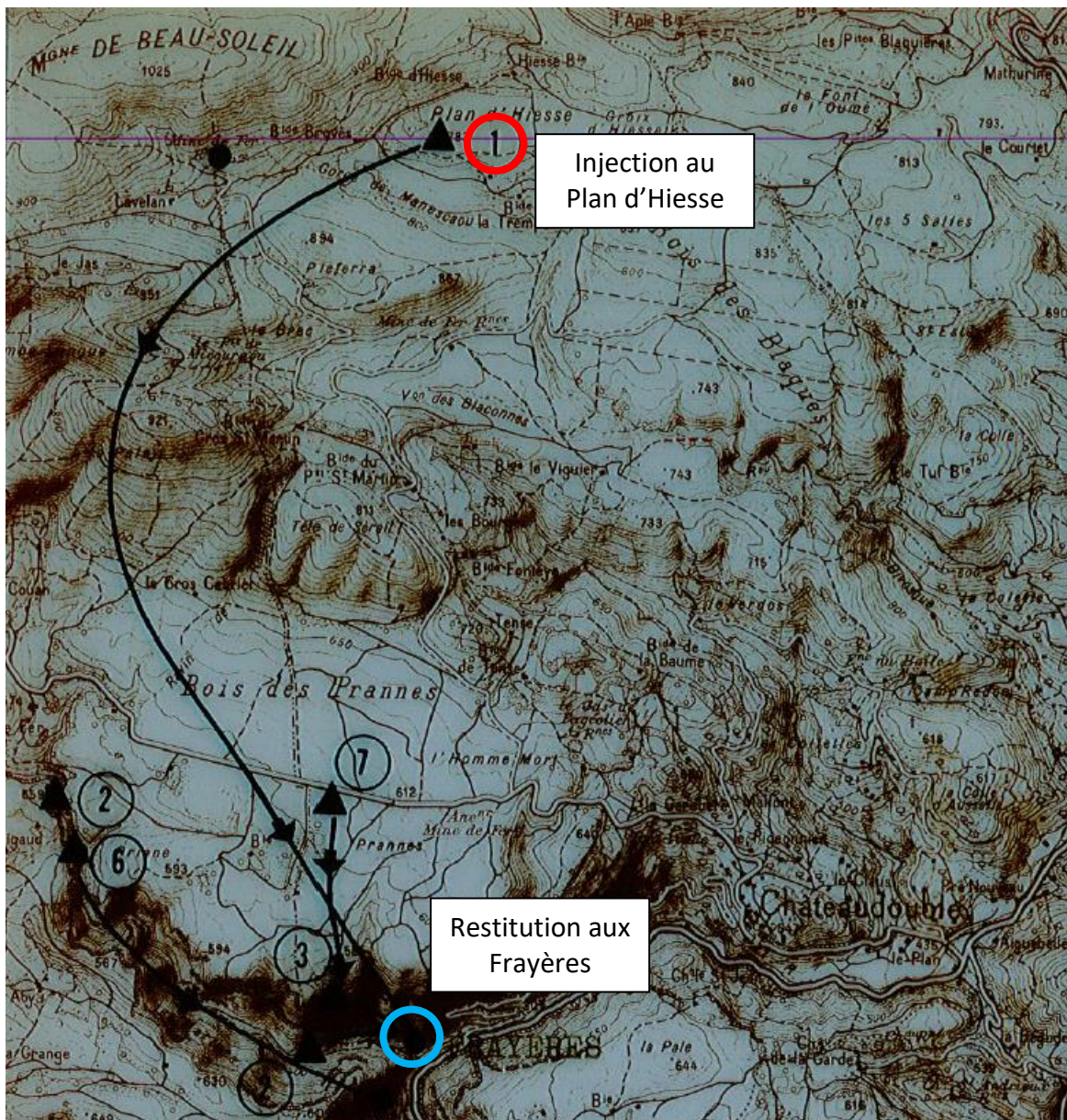


Figure 31 : Cartographie des résultats du traçage réalisé en 1973 (R. COVA)

6.2. Mode opératoire

6.2.1. Principe du traçage des eaux souterraines

Le principe consistera à injecter un traceur fluorescent dans la Nartuby en amont immédiat de la zone de perte identifiée dans les gorges de Châteaudouble.

Le traceur employé est inoffensif et n'aura aucun impact sur le milieu naturel et aquatique. Quoique souvent spectaculaire, les colorations résultantes sont inoffensives pour la santé humaine, la faune et la flore.

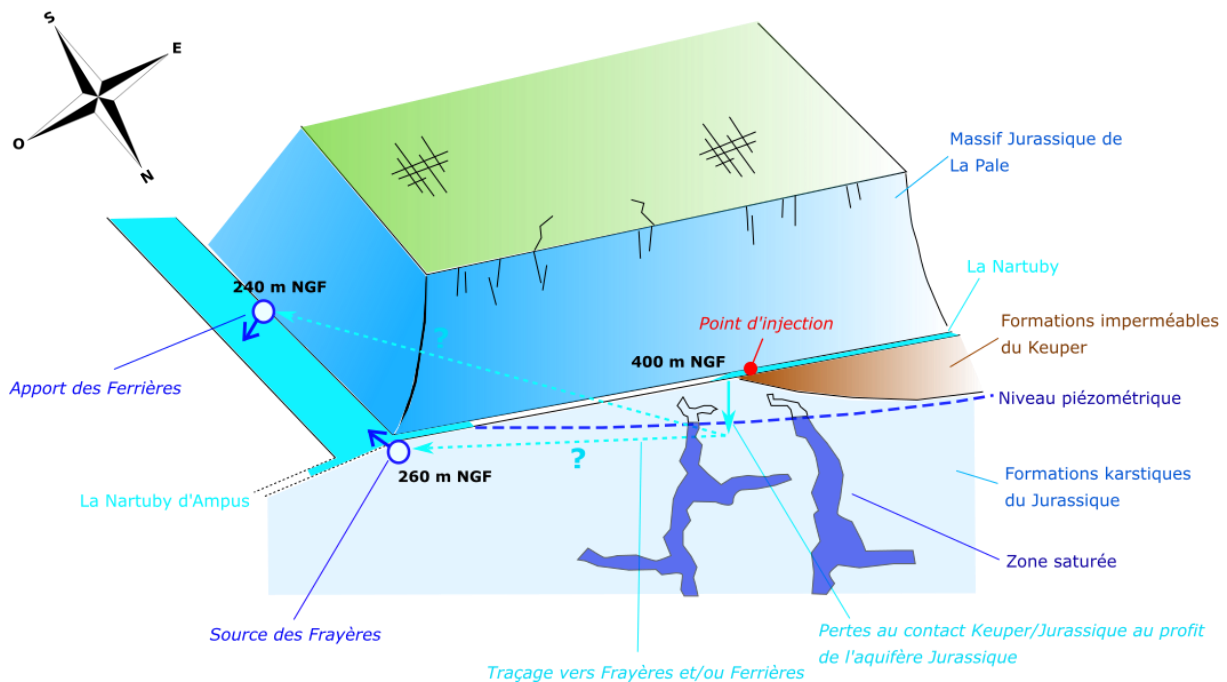


Figure 32 : Schéma de principe du traçage envisagé dans les gorges de Châteaudouble

6.2.2. Point d'injection

Il est prévu de réaliser l'injection en amont immédiat des pertes identifiées.

Il n'est pas prévu de réaliser une poussée du traceur par injection d'eau étant donné que ce rôle sera joué par la rivière directement.

6.2.3. Période d'injection

L'objectif est de réaliser l'injection lorsque les pertes sont totales afin que la totalité du traceur s'infilte. La période d'injection est donc directement liée :

- A l'évolution des débits de la Nartuby (selon le retour d'expérience associé aux mesures du SMA et de la station hydrologique de Trans-en-Provence). L'objectif étant de cibler la période hydrologique pour laquelle les pertes dans les gorges sont totales ;
- Les conditions hydrologiques afin d'éviter les premières pluies automnales qui pourraient :
 - Favoriser le ruissellement et engendrer une perte partielle du traceur (pertes au bénéfice de l'aquifère jurassique moins importantes) ;
 - Favoriser l'interaction de tout autre produit lors de l'analyse des échantillons aux exutoires : la matière organique ou divers polluants pouvant contenir un mélange fluorescent interfèrent avec la mesure.

Seule la station hydrologique de Trans-en-Provence dispose d'un suivi en continu. **Le débit moyen interannuel y est de 1,55 m³/s, tandis que les débits moyens mensuels sont compris entre 0,53 et 2,04 m³/s** (respectivement en septembre et en janvier).

En parallèle de la station hydrologique pérenne, le SMA organise des campagnes de jaugeages mensuelles à divers points du bassin versant (cf. Figure 33). La chronique de mesure disponible

s'établit entre 2007 et 2020. La période de basses eaux est comprise entre les mois d'août et octobre, les plus faibles débits étant enregistrés au cours du mois de septembre.

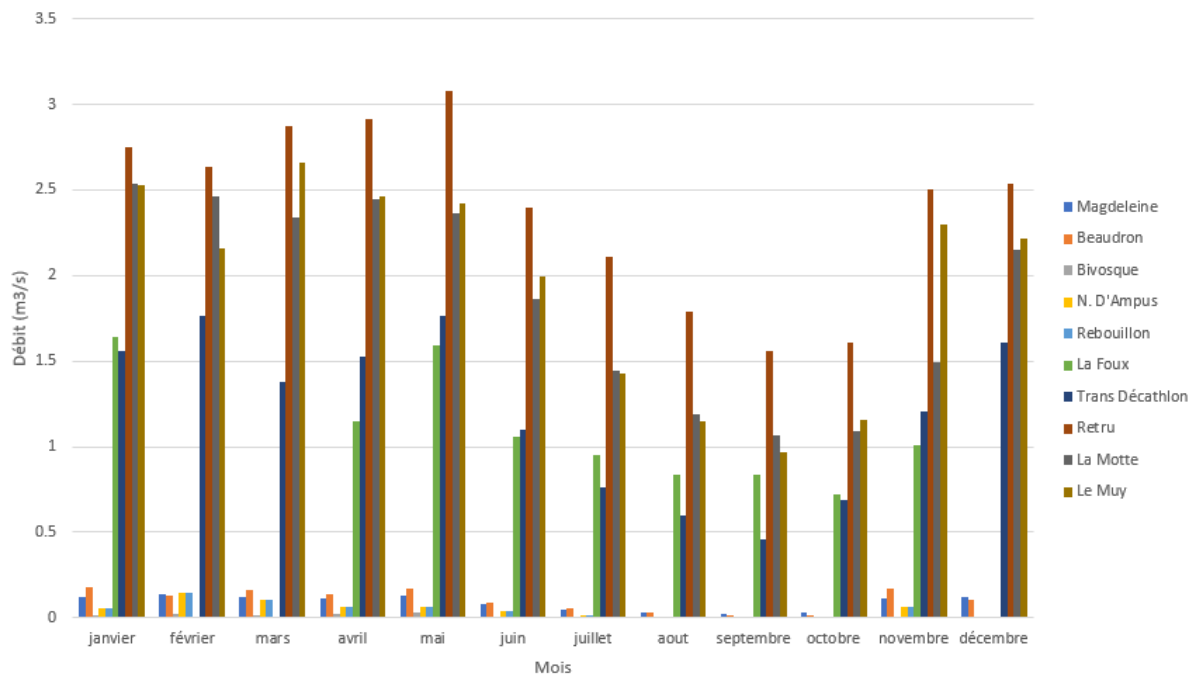


Figure 33 : Evolution des débits de la Nartuby au cours d'une année (moyennes interannuelles, source : SMA)

Une station Météo France est localisée au droit de Draguignan dans le quartier « Salamandrier » (code station : 83050007). La station, ouverte depuis le 01/03/1996, permet d'évaluer la pluviométrie au cœur du bassin versant de la Nartuby.

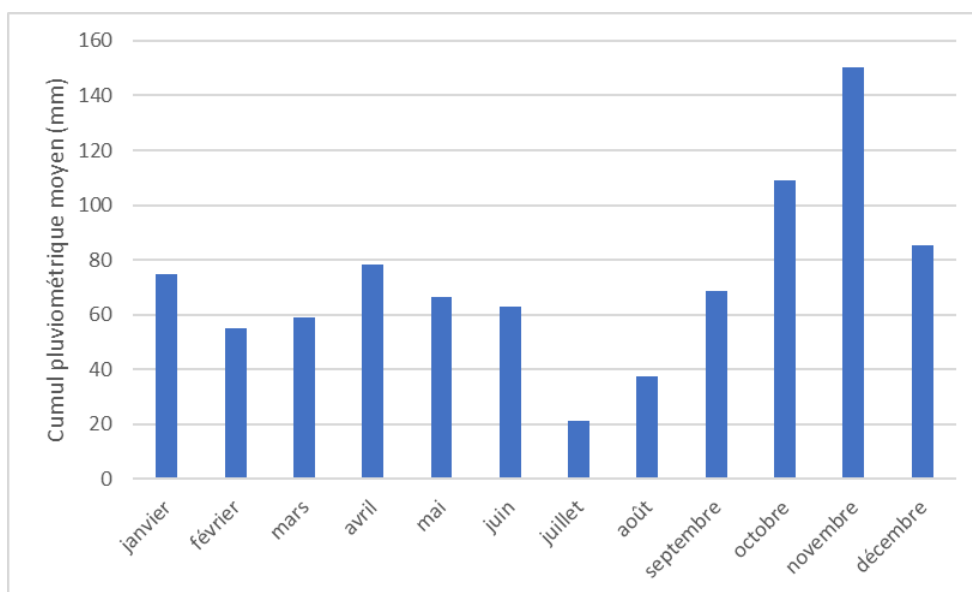


Figure 34 : Répartition mensuelle des pluies sur la commune de Draguignan (1997-2018)

D'après la Figure 34, le cumul pluviométrique moyen ne dépasse pas les 40 mm entre juillet et août. Les apports pluviométriques sont donc faibles et correspondent aux périodes d'étiage des nappes et des cours d'eau.

Au regard du contexte hydrologique et météorologique, la période retenue correspond à la fin du mois d'août. La date précise sera fixée 15 jours avant l'intervention en fonction des conditions météorologiques.

Dans le cas où les pertes ne sont pas totales, des mesures de jaugeage seront réalisées en amont et en aval immédiat du point d'injection afin de connaître le débit d'infiltration et la part du traceur non infiltrée.

6.2.4. Choix du traceur et quantité injectée

Le traceur sélectionné est la fluorescéine sodique (coloration verte). C'est un traceur fluorescent facile à mettre en œuvre et à analyser par les laboratoires spécialisés, et couramment utilisé en hydrogéologie.

La fluorescéine, qui se détecte à une faible concentration, possède les meilleures caractéristiques d'un traceur.

Les quantités injectées prennent en compte plusieurs paramètres comme la distance entre l'injection et les points de suivi, le débit de la Nartuby ainsi que la complexité géologique et le volume supposé des réserves d'eau souterraine. Au regard de ces éléments, **il est prévu d'injecter la quantité de 2 kg de traceur.**

En fonction de la concentration en traceur restituée, il est possible qu'une coloration apparaisse sur le captage AEP des Frayères. L'exploitant (VEOLIA) sera intégré à l'organisation du traçage et à son évolution afin d'éviter toute coloration de l'eau captée qui pourrait déranger les usagers. Un système de télétransmission avec alerte (dépassement du seuil de coloration visuelle) sera installé à la source des Frayères dans le cas où la source est exploitée (ce point sera abordé avec l'exploitant).

6.2.5. Points de suivi

6.2.5.1. Suivi en continu

Il est prévu de suivre 3 points de restitution sur une durée de 1 mois. Pour chaque point il est prévu le dispositif suivant :

- Fluorimètre alimenté par batterie et calé sur un pas de temps de mesure de 15 minutes ;
- Système de télétransmission associé au fluorimètre et alimenté par batterie ;
- Préleveur automatique muni de 24 flacons de 500 ml alimenté par batterie.

Les points de suivi correspondent aux exutoires potentiels de cette zone de pertes : source AEP des Frayères, secteur amont des Frayères, apports dans le secteur des Ferrières.

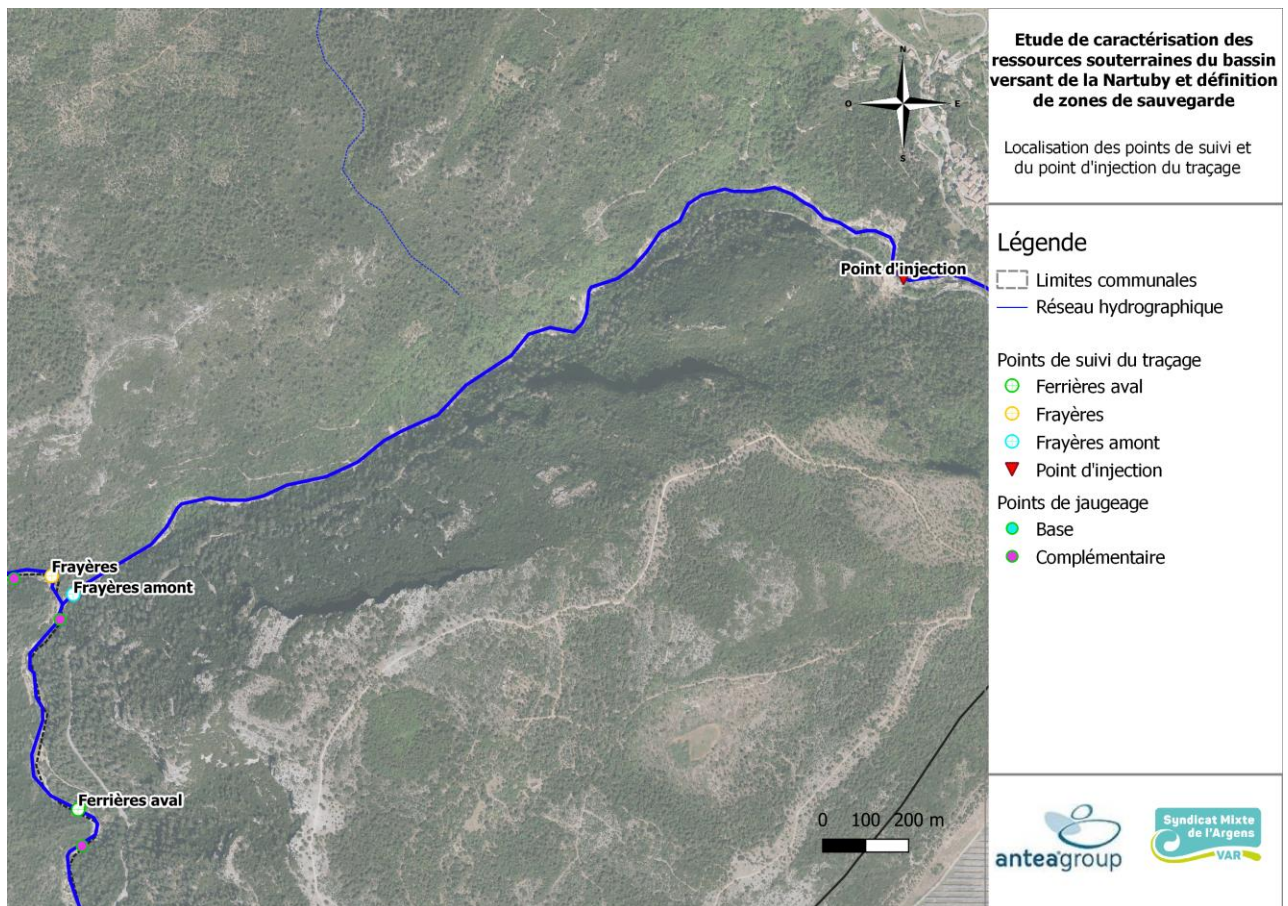


Figure 35 : Localisation des points de suivi du traçage

Dans cette configuration, les potentiels apports de traceur seront interceptés :

- Sur la Nartuby en amont des Frayères (nom du point de suivi : NAR) ;
- A la source des Frayères directement (nom du point de suivi : FRA) ;
- Aux Ferrières en aval (nom du point de suivi : FER).

Un exemple d'équipement d'un point de suivi est présenté sur la figure en page suivante.



Figure 36 : Exemple d'instrumentation d'un point de suivi lors d'un essai de traçage

Les préleveurs seront programmés selon un pas de temps de :

- 4 heures la première semaine, soit 6 échantillons par jour, étant donné que cette période est favorable à l'apparition du traceur aux exutoires ;
- 6 heures la deuxième semaine, soit 4 échantillons par jour, étant donné que cette période est également propice à l'apparition du traceur aux exutoires ;
- 8 heures pour les semaines suivantes, soit 3 échantillons par jour.

Un ingénieur hydrogéologue se rendra sur place une fois par semaine afin de récolter les échantillons et contrôler les instruments de mesure.

Les mesures de jaugeage du SMA seront conservées pendant toute la durée du suivi.

Le planning détaillé des tournées de prélèvement est présenté ci-après.

Opérations	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Préparation (matériel, organisation...)																																			
Installation du matériel + programmation (12h)																																			
Echantillons témoins + programmation (4h)																																			
Injection du traceur début d'après-midi																																			
Première tournée																																			
Deuxième tournée																																			
Troisième tournée																																			
Quatrième tournée																																			
Cinquième tournée																																			
Retrait du matériel																																			

Tableau 9 : Planning détaillé des tournées de prélèvement planifiées dans le cadre du traçage

6.2.6. Suivi des volumes pompés

La source des Frayères est actuellement exploitée par VEOLIA. A ce titre, le débit prélevé tout au long du suivi sera collecté afin d'identifier les variations de prélèvement. Ces données seront comparées à la courbe de restitution du traceur.

6.2.7. Analyse des échantillons

Les échantillons prélevés par les préleveurs automatiques ou manuellement seront stockés dans des flacons en verre brun fumé rincés à l'eau prélevée.

L'analyse par spectrofluorimétrie sera réalisée par la Cellule R&D d'Expertise et de Transfert en Traçage Appliqués à l'Hydrogéologie et à l'Environnement (CETRAHE) de l'université d'Orléans.

Le spectrofluorimètre utilisé est un appareil mono-faisceau dont la résolution du balayage spectral est de l'ordre de 2 nm. Sous l'action d'un rayon lumineux de longueur d'onde bien précise (pic d'excitation), les produits fluorescents émettent un rayonnement (pic d'émission) dont l'amplitude est proportionnelle à la concentration du produit analysé.

La comparaison entre l'amplitude obtenue sur l'échantillon et l'amplitude d'une gamme étalon réalisée sur le même colorant permet alors de déterminer la concentration du produit. La comparaison entre les longueurs d'ondes des échantillons analysés (spectres d'émission et d'excitation) et du traceur utilisé lors de l'injection permet de vérifier que l'intensité mesurée correspond bien aux produits recherchés.

Ainsi, le spectre positif signifie que le colorant est présent dans l'échantillon analysé. A l'inverse, si le spectre est négatif, le produit analysé n'est pas le colorant mais un tout autre produit comme la matière organique ou divers polluants pouvant contenir un mélange fluorescent interférent avec la mesure.

Le seuil de détection pour la fluorescéine est de 0,001 µg/l dans les eaux naturelles optiquement propres.

6.3. Conditions de réalisation du traçage

6.3.1. Date et lieu d'injection

L'objectif initial était de cibler la période pendant laquelle les pertes sur le tronçon des gorges de Châteaudouble étaient totales. C'était le cas en août et septembre comme l'atteste les jaugeages réalisés (cf. Figure 16).

La période exceptionnellement sèche de l'été 2021 a entraîné la mise en vigueur d'un arrêté sécheresse contraignant la mise en œuvre du traçage. En effet, l'exploitation de la source des Frayères ne pouvait être arrêtée, même momentanément en cas de détection du traceur fluorescent (niveaux au droit des forages d'exploitation de Pont d'Aups et Sainte Anne au plus bas et pression des usagers importante).

A ce titre, **la date d'injection a été décalée à la fin de l'arrêté préfectoral, soit le 19 octobre 2021.**

Le point d'injection retenu est situé à une distance de 560 m en aval du point de jaugeage de la Chapelle Saint-Jean, et donc en aval du contact Keuper/Jurassique. Le point d'injection reste tout de même en amont des zones de pertes fréquemment constatées sur ce tronçon.

Une quantité de 2 kg de fluorescéine a directement été injectée dans la Nartuby le 19/10/2021 à 11h58 dans une zone où le flux suffisant permettait la bonne dispersion du traceur en aval (cf. photographies en page suivante).

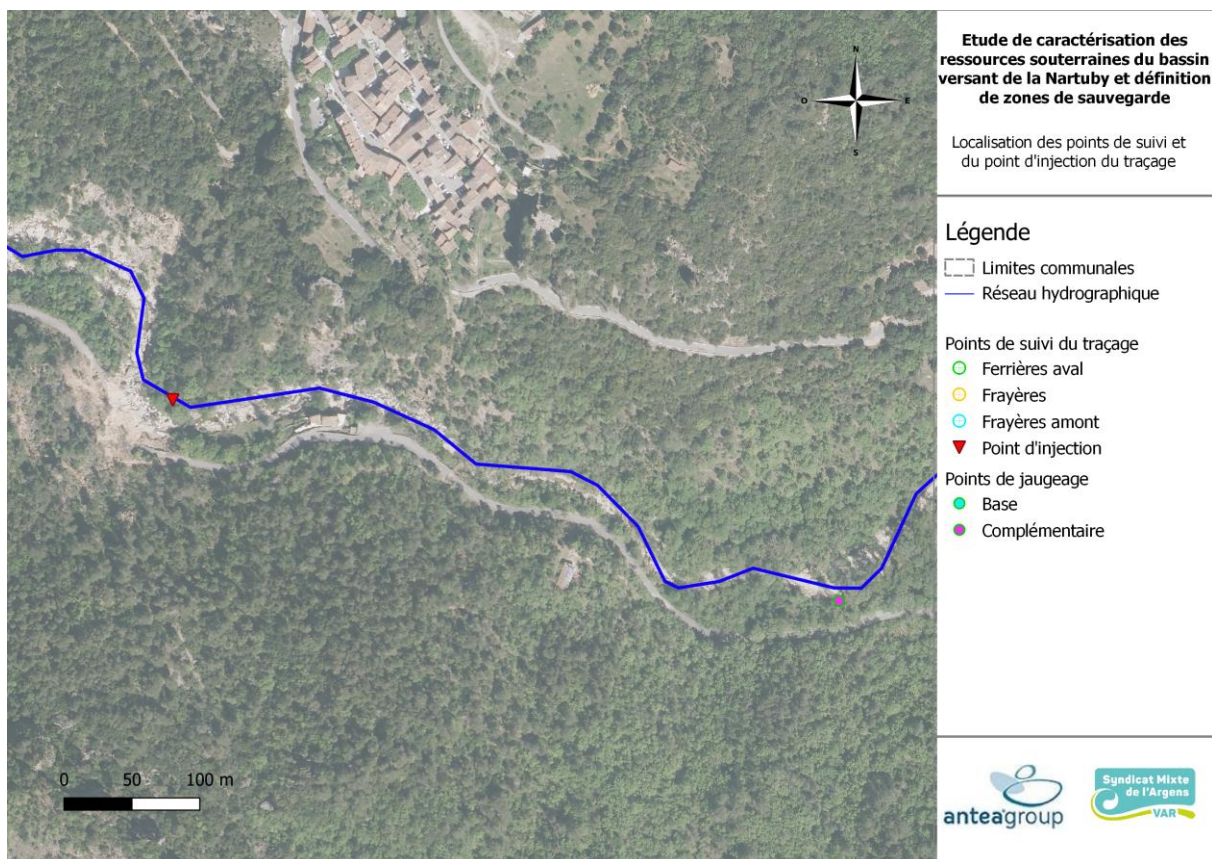


Figure 37 : Localisation du point d'injection du traceur

Le suivi a respecté en tout point le protocole détaillé au chapitre précédent. Le préleveur associé au point de suivi « NAR » (Nartuby en amont des Frayères) n'a pu être installé que le 20 octobre suite à un mauvais fonctionnement du préleveur initial.

Le suivi a duré jusqu'à la date du 16/11/2021 à 11h00. Le matériel a été désinstallé à cette date.

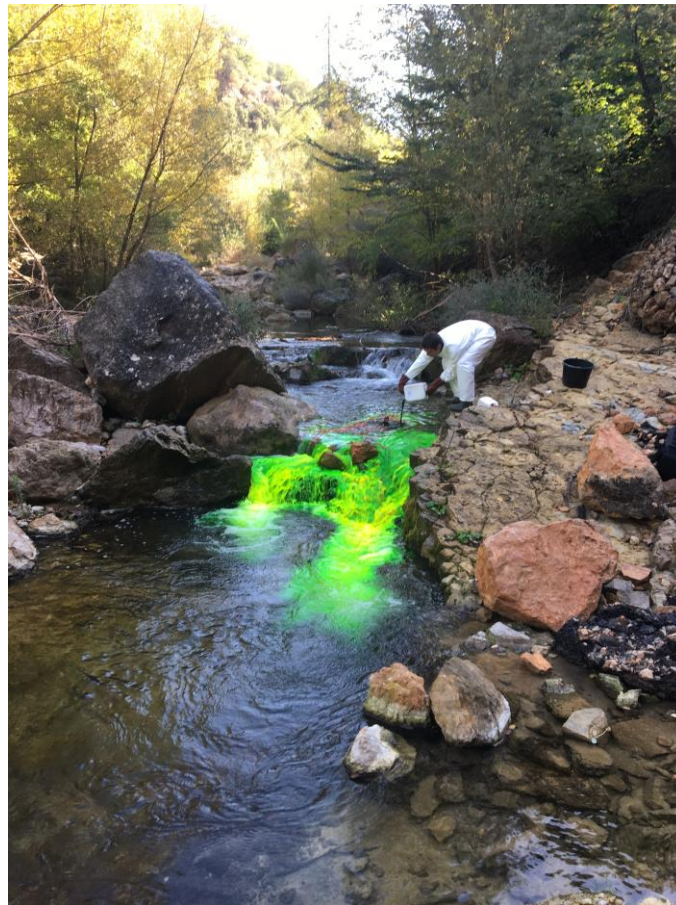


Figure 38 : Photographies prises lors de l'injection

6.3.2. Contexte hydrologique

Des mesures de jaugeage complémentaires ont été réalisées le 18 et le 20 octobre 2021. Le débit de la Nartuby au droit du point d'injection était de 91 l/s, tandis que le débit en amont des Frayères était de 51 l/s. **Les pertes sur le linéaire sont donc égales à 40 l/s, soit 44% du débit total amont.**

En aval, les débits mesurés le 18 octobre font état :

- D'un débit de 62 l/s en aval des Frayères ;
- D'un débit de 130 l/s aux Ferrières (point amont) ;
- D'un débit de 176 l/s aux Ferrières (point aval).

Les fortes pluies du début du mois d'octobre (cumul de 45,2 mm les 3 et 4 octobre) n'ont pas permis de maintenir les pertes totales relevées en août et septembre.

Dans ce contexte, **une partie du traceur injecté est parti en rivière et ne s'est pas infiltré dans le karst.** Le volume sera quantifié dans le chapitre suivant.

Sur la période de suivi, des épisodes pluvieux doivent être notés :

- Du 29 octobre au 1^{er} novembre : cumul total de 60,4 mm ;
- Le 10 novembre : cumul de 11,6 mm ;
- Du 14 au 15 novembre : cumul de 10,8 mm.

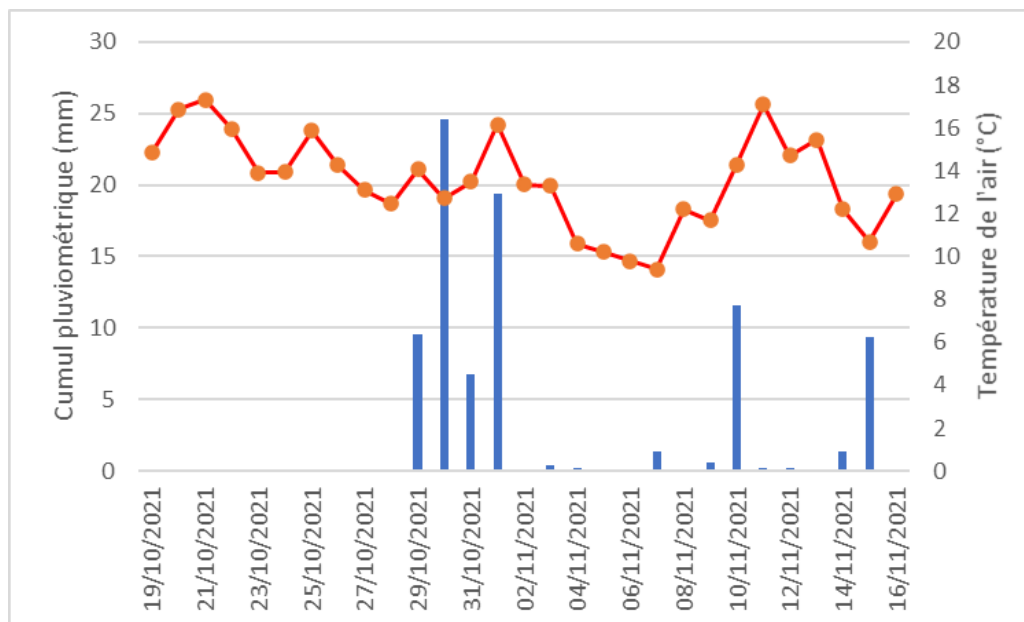


Figure 39 : Contexte climatique au cours du traçage

Les jaugeages réalisés par le SMA à la fin du mois de novembre (29/11/2021) rendent compte :

- D'une zone de pertes de 38 l/s entre la chapelle Saint-Jean et l'amont des Frayères ;
- D'une zone d'apports de 128 l/s entre l'aval des Frayères et l'amont des Ferrières ;
- D'une zone d'apports de 37 l/s entre l'amont et l'aval des Ferrières.

6.4. Résultats

6.4.1. Approche générale

Un résultat de traçage doit donc toujours être illustré par la courbe de restitution (donnant la répartition des concentrations en fonction du temps). La maîtrise des débits au point de restitution permet d'effectuer un bilan massique du traçage, et donc de calculer le pourcentage de restitution en traceur. Il correspond au rapport entre la masse injectée et la masse restituée.

La Figure 40 présente l'ensemble des résultats d'analyse effectués en laboratoire couplés avec les données acquises par les fluorimètres au droit de chaque point de suivi. Il peut déjà être souligné que les résultats des deux méthodes d'acquisition sont corrélés et cohérents (fluctuations identiques et valeurs similaires), hormis en fin de chronique où les disparités constatées sont dues à l'augmentation de la turbidité biaisant la mesure optique de l'appareil.

6.4.2. Restitution observée et mesurée

Le traceur n'a jamais été détecté à la source des Frayères sur la période de suivi :

- Le laboratoire confirme que les concentrations mesurées correspondent au bruit de fond naturel et que le traceur n'a pas été détectée sur les échantillons analysés. **A noter qu'un colis envoyé par nos soins n'a jamais été réceptionné par le laboratoire. Le colis aurait été cassé et détruit par le transporteur. Ce colis contenait les 36 premiers échantillons associés à la source des Frayères ce qui correspondait à la période de suivi du 19/10 au 25/10 ;**
- Le fluorimètre a toutefois suivi la concentration en traceur en continu. Ce dernier n'a pas été détecté sur toute la période de suivi. Les pics constatés sur les courbes de suivi actualisées en temps réel au cours de la campagne correspondaient à une augmentation ponctuelle de la turbidité.

Le traceur a atteint le point de suivi situé en amont des Frayères le 19 octobre à partir de 22h30. Le pic de restitution est atteint quelques heures plus tard avec une concentration de 197,6 µg/l le 20 octobre à 1h30.

La décroissance débutera le même jour à partir de 7h45. La concentration initiale (bruit de fond naturel avant injection) n'est pas retrouvée avant la fin du suivi, toutefois une stabilisation de la concentration à environ 0,5 µg/l est observable à partir du 28 octobre à 13h15.

Le traceur a atteint quelques temps après le point de suivi en aval dans le secteur des Ferrières le 20 octobre à 4h00, soit 5h30 après l'arrivée du traceur en amont des Frayères. Le pic de la restitution a été atteint le même jour à 10h45 avec une concentration égale à 70,2 µg/l. La concentration diminue ensuite de manière continue jusqu'à être inférieure à 0,2 µg/l à partir du 2 novembre.

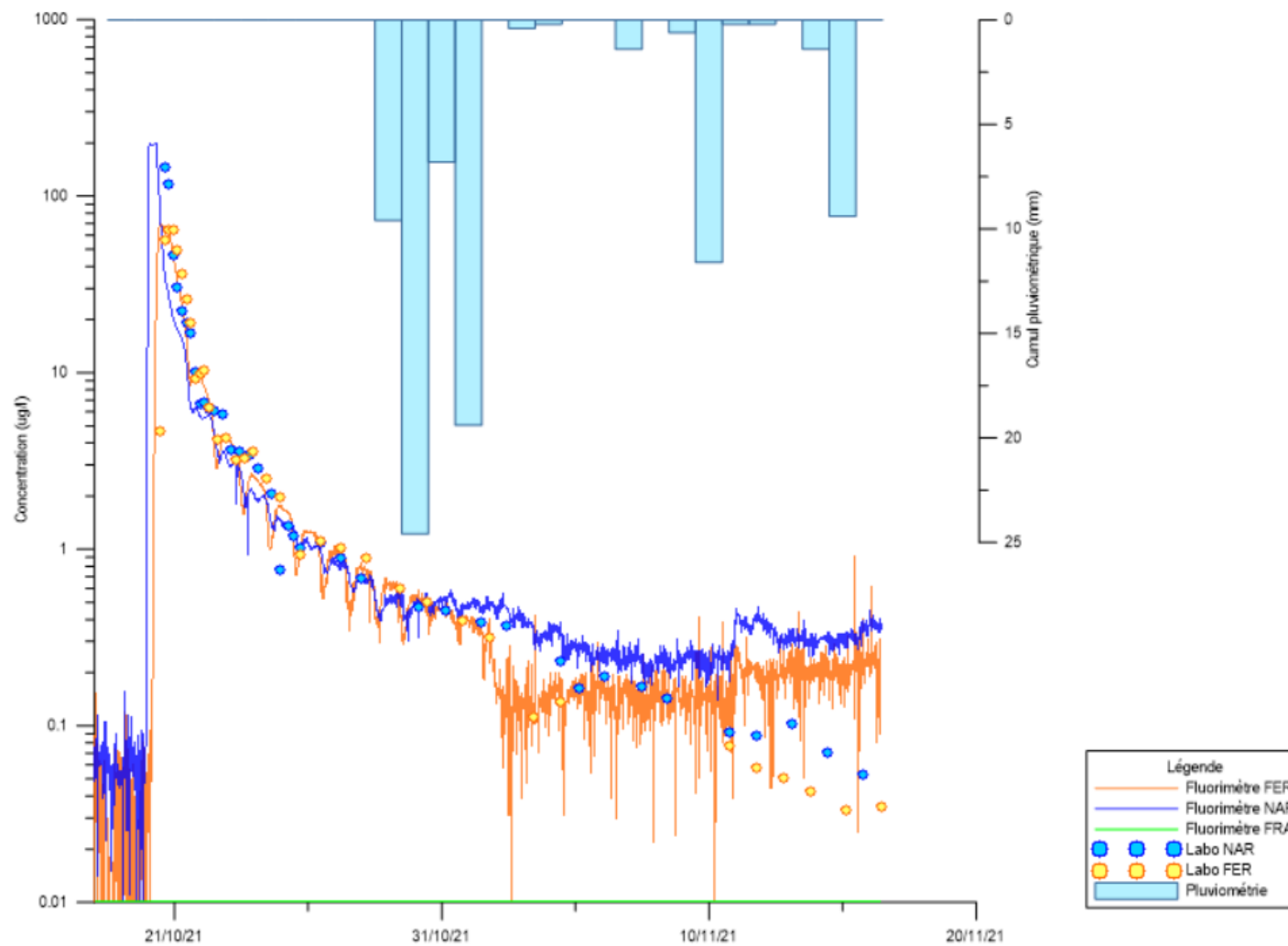


Figure 40 : Concentration en fluorescéine détectée aux points de suivi

6.4.1. Caractéristiques de la restitution

6.4.1.1. Préambule

Avant d'évoquer les résultats de la restitution des traceurs, le schéma ci-dessous récapitule les principaux éléments d'information déduits d'une courbe de restitution d'un traceur.

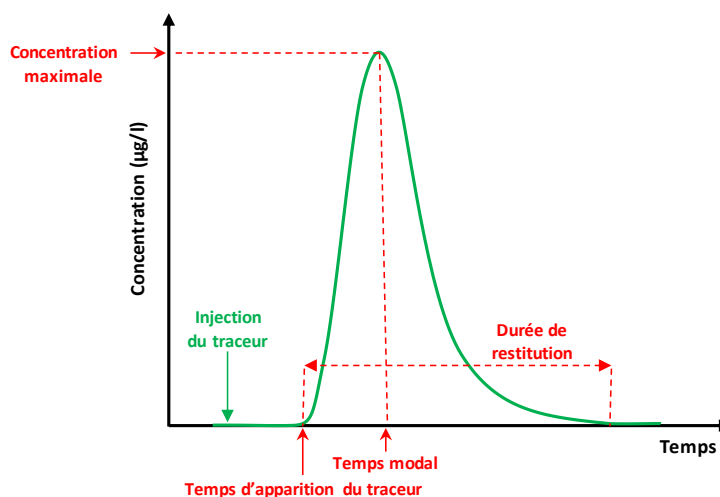


Figure 41. Eléments caractéristiques d'une courbe de restitution de traceur

6.4.1.2. Nartuby

L'injection de la fluorescéine a eu lieu le 19/10/2021 à 11h58. Les caractéristiques de la restitution sont les suivantes (Cf. Tableau 10) :

- Les premières arrivées sont mesurées par le fluorimètre le 19/10 à 22h30, soit 10h30 après l'injection. La distance entre le point d'injection et le point de suivi est de 2 450 m, la vitesse maximale atteinte par le traceur est de 233 m/h ou 5600 m/j ;
- La forme de la restitution est uni-modale (un seul pic). Le maximum de concentration est atteint le 20/10 à 01h30 avec 197,6 µg/l. Le temps modal correspondant est de 13,53 h soit une vitesse modale de 181,1 m/h ou 4345,9 m/j ;
- à partir des derniers résultats d'analyses, la fin totale de la restitution peut être estimée aux alentours du 28/10, soit 9 j après l'injection. Le temps de passage du traceur est de 8,5 j ;
- La période de surveillance a permis d'observer une restitution de l'ordre de 541 g soit 27,05 % de la masse du traceur injectée (2 000 g) ;
- la valeur minimale de dilution (concentration maximale restituée sur la masse injectée) est de $9,985 \cdot 10^{-8}$ l-1. Ainsi, pour un déversement de 50 kg d'une substance potentiellement polluante et miscible à l'eau, dans les mêmes conditions d'injection et de transfert que celles du traçage, la concentration maximale simulée à la source serait de l'ordre de 499 µg/l.

Injection	
Lieu d'injection	Nartuby en aval de la Chapelle Saint Jean
Restitution	Nartuby en amont des Frayères
Date d'injection	19/10/2021 à 11 :58
Traceur	Fluorescéine
Distance entre l'injection et la restitution (m)	2 450
Masse injectée (g)	2 000
Masse restituée (g)	541
Restitution	27,05 %
Temps	
Apparition du traceur (j)	19/10/2021 22 :30
Temps modal (j)	0,56
Durée de restitution (j)	8,5
Vitesses	
Vitesse d'apparition (m/h)/(m/j)	233/5600
Vitesse modale (m/h)/(m/j)	181,1/4345,9
Concentration et dilutions	
Concentration max (µg/l)	197,6
Dilution unitaire (l ⁻¹)	9,985.10 ⁻⁸
Concentration pour 50 kg de polluant (µg/l)	499

Tableau 10 : Résultats de la restitution au point de suivi en amont des Frayères

6.4.1.3. Ferrières

L'injection de la fluorescéine a eu lieu le 19/10/2021 à 11h58. Les caractéristiques de la restitution au droit de ce point de suivi situé le plus en aval du système sont les suivantes (Cf. Tableau 11) :

- Les premières arrivées sont mesurées par le fluorimètre le 20/10 à 4h00, soit 16h après l'injection. La distance entre le point d'injection et le point de suivi est de 3 060 m, la vitesse maximale atteinte par le traceur est de 191,25 m/h ou 4590 m/j ;
- La forme de la restitution est uni-modale (un seul pic). Le maximum de concentration est atteint le 20/10 à 10h45 avec 70,2 µg/l. Le temps modal correspondant est de 22,75 h soit une vitesse modale de 134,5 m/h ou 3228,1 m/j ;
- à partir des derniers résultats d'analyses, la fin totale de la restitution peut être estimée aux alentours du 02/11, soit 14 j après l'injection. Le temps de passage du traceur est de 13 j ;
- La période de surveillance a permis d'observer une restitution de l'ordre de 1411 g soit 70,6 % de la masse du traceur injectée (2 000 g) ;
- la valeur minimale de dilution (concentration maximale restituée sur la masse injectée) est de 3,51.10⁻⁸ l⁻¹. Ainsi, pour un déversement de 50 kg d'une substance potentiellement polluante et miscible à l'eau, dans les mêmes conditions d'injection et de transfert que celles du traçage, la concentration maximale simulée à la source serait de l'ordre de 175,5 µg/l.

Injection	
Lieu d'injection	Nartuby en aval de la Chapelle Saint Jean
Restitution	Nartuby aux Ferrières
Date d'injection	19/10/2021 à 11 :58
Traceur	Fluorescéine
Distance entre l'injection et la restitution (m)	3 060
Masse injectée (g)	2 000
Masse restituée (g)	1411
Restitution	70,6 %
Temps	
Apparition du traceur (j)	20/10/2021 4 :00
Temps modal (j)	0,95
Durée de restitution (j)	13
Vitesses	
Vitesse d'apparition (m/h)/(m/j)	191,25/4590
Vitesse modale (m/h)/(m/j)	134,5/3228,1
Concentration et dilutions	
Concentration max (µg/l)	70,2
Dilution unitaire (l ⁻¹)	3,51.10 ⁻⁸
Concentration pour 50 kg de polluant (µg/l)	175,5

Tableau 11 : Résultats de la restitution au point de suivi des Ferrières

6.5. Interprétations des résultats

Tout d'abord, le volume de traceur restitué au droit du point de suivi en amont des Frayères permet d'affirmer qu'une quantité importante du traceur s'est infiltrée dans les gorges de Châteaudouble (restitution totale < 28 % du volume injecté).

Le fait que le traceur ne soit pas ressorti aux Frayères, et que le volume de traceur restitué aux Ferrières est plus important (restitution totale < 71 % du volume injecté d'autant plus que les eaux des Ferrières sont diluées par l'apport des Frayères), permet de confirmer l'hypothèse que :

- **La source des Frayères n'est pas alimentée par les pertes des gorges de Châteaudouble mais uniquement par le karst Jurassique situé au Nord ;**
- **Celles-ci alimentent plutôt le massif Jurassique situé au Sud, qui alimente lui-même les venues sous-alluviales localisées entre les Frayères et les Ferrières, en rive gauche de la Nartuby.**

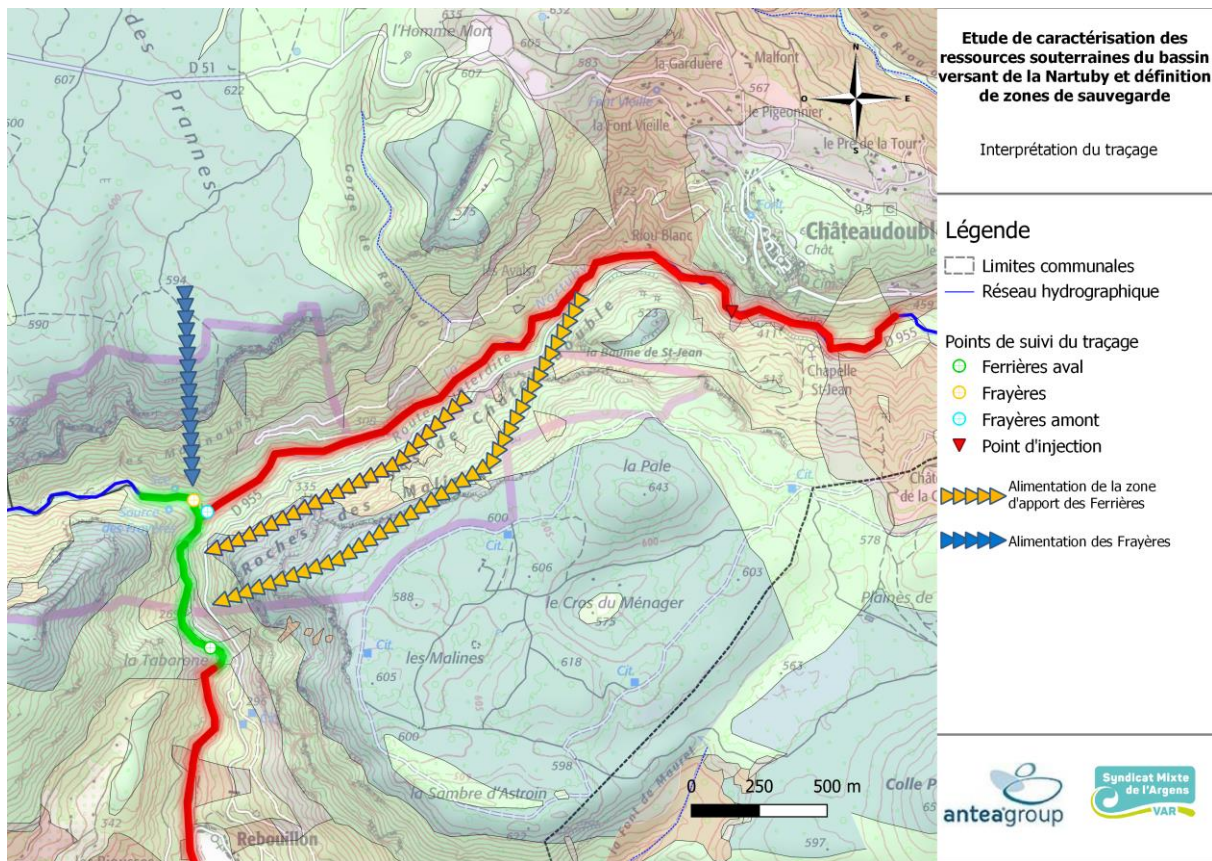


Figure 42 : Interprétation du traçage

La concentration en traceur mesuré au seuil de la Clappe le 21/10/2021 à 16h19, soit 52 heures après l'injection, était de 14,247 µg/l. Le seuil de la Clappe est situé à 6 km en aval du point d'injection.

A noter que le traceur n'a jamais été détecté à la source de la Foux sur la période de suivi. L'infiltration totale des eaux dans le complexe alluvions/Muschelkalk de la plaine de Draguignan ralenti considérablement le temps de propagation du traceur.

7. Conclusion

7.1. Synthèse des résultats

Les actions retenues à l'issue des Phases 1 et 2 concernent :

- L'instrumentation de 5 piézomètres pour suivre le niveau de la nappe en continu jusqu'en septembre 2022 ;
- La réalisation d'un traçage dans les gorges de Châteaudouble avec 3 points de suivi équipés d'un fluorimètre et d'un préleveur automatique ;
- La réalisation de prélèvements mensuels au droit des forages de Pont d'Aups, du forage de Vallauray et de la source de La Foux pour analyse physico-chimique des eaux (prise en charge partielle par le SMA) ;
- La réalisation d'un doublet de forages équipés en piézomètre à Draguignan en aval des forages de Pont d'Aups (prise en charge par le SMA) ;
- La réalisation d'un piézomètre profond sur la commune de Trans-en-Provence (prise en charge par le SMA) ;
- La réalisation de campagnes de jaugeage mensuelles en complément des mesures existantes, notamment en amont d'Ampus, en aval des Frayères et dans le secteur des gorges de Trans-en-Provence (prise en charge par le SMA).

Les principaux résultats des investigations complémentaires sont résumés ci-dessous :

- Les paramètres physico-chimiques des forages de Pont d'Aups, de Valauray et de la source de la Foux sont globalement stables tout au long de la période de mesure. Seules les eaux issues du forage de Valauray présentent une concentration plus importante en sodium et chlorures au cours des mois d'août et septembre 2021 probablement du fait des très faibles précipitations à cette période (apports diminués).

Une corrélation est nettement observable entre La Foux et Valauray en ce qui concerne la concentration en nitrates. Avant cette date, les variations entre Pont d'Aups et La Foux sont similaires. En ce qui concerne la concentration en bicarbonates, les 3 points de suivi semblent avoir les mêmes variations sur l'ensemble de la chronique, bien que les courbes de Valauray et La Foux présentent davantage de ressemblances dans leurs variations.

Cette analyse vient étayer l'hypothèse que la source de la Foux est en partie alimentée par le massif Muschelkalk à l'Est de Draguignan en dehors de la période de basses eaux.

- La cote piézométrique mesurée au droit de l'ouvrage de Trans-en-Provence est comprise entre 125,99 et 137,7 m NGF. Ce dernier est représentatif de l'aquifère Muschelkalk inférieur. La cote altimétrique de la source de la Foux est estimée à 158 m NGF, tandis que la cote altimétrique du fond de la Nartuby en aval des gorges de Trans-en-Provence est estimée à environ 115 m NGF. En ce sens, **l'aquifère Muschelkalk inférieur ne peut pas alimenter la source de la Foux mais serait à l'origine des résurgences en aval des gorges de Trans.**

Les mesures piézométriques des Incapis rendent compte d'un niveau indépendant du débit mesuré à la station « Bonhomme », la Nartuby étant sèche à partir du mois de juin. La cote

altimétrique du lit mineur du cours d'eau est estimée à 159,2 m NGF dans ce secteur tandis que la cote piézométrique mesurée aux Incapis est comprise entre 154,8 et 158,7 m NGF.

Dans le secteur de Pont d'Aups, on peut observer des gradients de charge entre les deux nappes qui varient en fonction du temps :

- hors événements pluvieux, la nappe profonde présente une charge plus forte que la nappe superficielle (possibilité de drainance ascendante),
- pendant les événements pluvieux, les gradients de charge s'inversent et c'est la nappe superficielle qui présente une charge plus élevée que la nappe profonde (possibilité de drainance descendante).

Sur toute la durée du suivi, le toit de nappe superficielle reste inférieur de plus de 10 m sous le lit de la rivière ; cela permet de conclure à une **déconnexion permanente entre rivière et nappe dans ce secteur durant la période suivi.**

- Les jaugeages réalisés ont mis en évidence les éléments suivants :
 - L'ordre de grandeur de l'alimentation des systèmes karstiques du Jurassique supérieur est d'environ 16 Mm³/an. Outre l'alimentation directe par l'infiltration des eaux de pluie, l'aquifère est alimenté grâce à trois zones de perte principales :
 - à l'amont d'Ampus quand deux cours d'eau traversent les calcaires du Jurassique supérieur dans le massif de la Rouvière.
 - dans les gorges d'Ampus, à l'aval du village et à l'amont de la source des Frayères.
 - Dans les gorges de Châteaudouble entre la chapelle Saint-Jean et l'amont des Frayères. L'expérience de traçage a permis de montrer que les eaux qui transitent par cette zone de perte retrouvent la Nartuby au droit des sources des Ferrières et non par la source des Frayères.
 - Toujours concernant les systèmes karstiques du Jurassique supérieur, les données permettent de proposer un flux de restitution à la Nartuby de l'ordre de 12 Mm³/an, avec trois zones de restitution identifiées :
 - Restitution importante au droit de la source des Frayères (de 220 à 370 l/s suite à des événements pluvieux à 1-10 l/s à l'étiage en régime influencé par les prélèvements).
 - Restitution tout aussi importante dans les gorges entre Frayère et Ferrières : les débits de restitution sont moins variables mais du même ordre de grandeur : de 26 à 160 l/s.
 - Au final, on peut insister sur le soutien d'étiage important de ces karsts du Jurassique supérieur qui permettent de donner à la rivière lors des étiages forts, un débit compris entre 70 et 120 l/s (vidange lente des réserves) en plus des 30 l/s apports en tête de bassin versant par les aquifères liasiques.
 - L'aquifère Muschelkalk amont s'étend de la fenêtre de Rebouillon aux Incapis et se trouve plus ou moins sous la plaine alluviale de Draguignan. Cet aquifère est composé de deux réservoirs : un réservoir superficiel, très connecté aux pertes de la Nartuby, et un réservoir profond plus isolé.

- Cet aquifère amont est alimenté principalement par les pertes de la Nartuby (estimées à 9 Mm³/an) et secondairement par l'infiltration des eaux de pluie sur son impluvium :
 - au droit de la fenêtre de Rebouillon où des zones de pertes importantes semblent s'activer seulement en période de hautes eaux (pertes pouvant atteindre 180 l/s), avec des conduits karstiques capables de « boire » de grande quantité d'eau.
 - entre la Clappe et St Hermentaire. Il s'agit de la zone de pertes bien identifiée de la Nartuby au profit de l'aquifère karstique (pertes comprises entre 50 et 300 l/s).
- Cet aquifère amont se vidange de deux manières :
 - Par des retours à la Nartuby avec une zone de restitution qui s'étend du Pont de Lorgues à la confluence avec la Foux (quartier St Hermentaire). Les volumes restitués sont faibles : de l'ordre de 1 Mm³/an. Cette configuration implique l'existence d'une barrière hydraulique : elle pourrait correspondre soit à une structure faillée qui remonte des argiles et du gypse au droit de la zone de la Foux, soit à une structure plissée qui produit le même effet.
 - Par une alimentation de la source de la Foux : module de cette source est estimé à environ 900 l/s (soit environ 28 Mm³/an).
- L'aquifère Muschelkalk aval s'étend sur un vaste territoire sur les deux rives de la Nartuby (depuis les Arcs jusqu'à Claviers). Il est alimenté de plusieurs façons :
 - Par infiltration des eaux de pluie sur un vaste impluvium (environ 65 km²) : volume infiltré estimé à 18 Mm³/an.
 - Par les pertes du riu de Claviers (de 62 l/s au printemps à 0 en été). On peut estimer cet apport à environ 2 Mm³/an.
 - Par des pertes de la Nartuby entre la Foux et les gorges de Trans-en-Provence ; elles varient de 200 l/s en moyennes eaux à 40 l/s à l'étiage. Le volume cumulé de ces apports par pertes peut être estimé à environ 6 Mm³/an.
 - Par des pertes activées de façon temporaire durant les épisodes de pluie sur les cours d'eau qui prennent leurs sources dans les aquifère du Jurassique amont ou dans les horizons peu perméables du Keuper (Real, Catalane, clue de Figanières,..). Il est difficile de proposer un volume d'alimentation pour ces zones de pertes.
- Les gorges de Trans-en-Provence sont le principal exutoire de cet aquifère Muschelkalk : de 213 à 527 l/s sur la période de mesure. Entre l'aval des gorges et la station « Retru », une nouvelle zone d'apport est constatée : entre 282 et 576 l/s.
- Au final, le bilan proposé pour les aquifères du Muschelkalk est déséquilibré. Les volumes rendus à la Nartuby par les trois zones de restitution cumulent environ 50 Mm³/an alors que le cumul des modes d'alimentation identifiés est d'environ 36 Mm³/an. Ceci peut s'expliquer par une :
 - Participation de l'alimentation des aquifères du Muschelkalk par les eaux infiltrées au droit du Malmont.
 - Mauvaise estimation de l'infiltration des eaux météoriques.

- Sous-estimation des pertes sur les cours d'eau temporaires qui traversent l'impluvium karstique.
 - Sous-estimation des volumes infiltrés par les zones de perte durant les épisodes pluvieux.
- Le traçage réalisé dans les gorges de Châteaudouble a permis de démontrer qu'une quantité importante du traceur s'est infiltrée dans les gorges de Châteaudouble (restitution totale < 28 % du volume injecté). Le fait que le traceur ne soit pas ressorti aux Frayères, et que le volume de traceur restitué aux Ferrières est plus important (restitution totale < 71 % du volume injecté d'autant plus que les eaux des Ferrières sont diluées par l'apport des Frayères), permet de confirmer l'hypothèse que :
 - La source des Frayères n'est pas alimentée par les pertes des gorges de Châteaudouble mais uniquement par le karst Jurassique situé au Nord ;
 - Celles-ci alimentent plutôt le massif Jurassique situé au Sud, qui alimente lui-même les venues sous-alluviales localisées entre les Frayères et les Ferrières, en rive gauche de la Nartuby.

7.2. Impacts sur les zones de sauvegarde pré-identifiées en phase 2

L'ensemble des investigations ont permis de confirmer les hypothèses émises à l'issue des Phases 1 et 2, ainsi que les premières observations liées aux relations nappe/rivière (zones de pertes et d'apports), à savoir que :

- Les pertes localisées dans les gorges de Châteaudouble pourraient participer à l'alimentation du massif karstique en rive gauche de la Nartuby dont une zone de résurgence serait localisée aux Ferrières (plus en aval de la source exploitée des Frayères) ;
- L'aquifère du Muschelkalk serait compartimenté en deux nappes distinctes séparées par un horizon marneux d'une vingtaine de mètres. Le compartiment supérieur serait représentatif de l'amont de la vallée de Draguignan : forages de Pont d'Aups ou Sainte Anne. Tandis que le compartiment inférieur serait à l'origine des résurgences entre Trans-en-Provence et La Motte (débit total estimé entre 0,5 et 1,2 m³/s) ;

Concernant la source de la Foux, il a été démontré que l'origine de l'eau ne pouvait être liée à l'aquifère Muschelkalk inférieur. Son alimentation par l'aquifère Muschelkalk supérieur, que ce soit en provenance de la plaine de Draguignan ou du massif de Trans-en-Provence, n'a pas été prouvée. Etant donné les débits mesurés à la source, une alimentation de celle-ci par l'aquifère Muschelkalk supérieur dans des proportions variables (par l'Ouest et l'Est) en fait une hypothèse viable.

Dans tous les cas, **les résultats des investigations ne remettent pas en cause les conclusions de la Phase 2 et les zonages qui en découlent, à l'exception de l'unité hydrogéologique d'Ampus-Frayères. Selon les résultats du traçage, le massif Jurassique situé en rive gauche de la Nartuby des gorges de Châteaudouble peut être écarté de la ZSE.**

7.3. Recommandations

7.3.1. Suivi piézométrique

Le suivi piézométrique réalisé a permis de comprendre en partie les interactions entre les compartiments Muschelkalk et la rivière. Toutefois, étant donné le contexte hydrologique particulier sur la période de mesure (sécheresse prolongée), le suivi n'a pas compris de réelle période de hautes eaux. A ce titre, nous préconisons de maintenir le suivi, notamment en période pluvieuse et de recharge des nappes.

D'autre part, en complément, des piézomètres complémentaires peuvent cibler les secteurs suivants :

- Au droit de la fenêtre de Rébouillon (recommandation prioritaire) : enjeu de compréhension des dynamiques d'infiltration/alimentation. Les jaugeages ont montré que ce secteur correspond à la zone d'alimentation principale de l'aquifère Muschelkalk (pertes totales de la Nartuby alimentée par les aquifères du Jurassique) ;
- Au droit des Incapis (recommandation secondaire) : compréhension des dynamiques de pertes dans ce secteur.

Ces éléments de réflexion pourront être intégrés à la Phase 4 de l'étude.

7.3.2. Suivi des débits

En ce qui concerne les points de mesure relatifs à l'aquifère du Jurassique supérieur (aval de la fenêtre de Rébouillon), on peut considérer que les mesures réalisées dans le cadre de l'étude ont bien permis de caractériser les débits d'infiltration au droit des zones de perte ; ces mesures ne sont plus prioritaires.

Par contre, dans un souci de bonne gestion quantitative, il serait intéressant suivre les débits de restitution de l'aquifère et donc de conserver les mesures de débit estival à l'aval immédiat des Ferrières. Elles renseignent sur le volume cumulé restitué par l'aquifère jurassique à la Nartuby et permettraient d'anticiper les déficits de recharge dans l'aquifère du Muschelkalk à l'aval.

En ce qui concerne les points de mesure relatifs à l'aquifère du Muschelkalk, de nouveau, il reste intéressant de prolonger le suivi des débits restitués par l'aquifère. Il faut donc conserver les points relatifs à la source de la Foux et à Retru, et les compléter par des mesures à la confluence entre la Nartuby et les eaux de la Foux (zone de restitution de St Hermentaire).

7.3.3. Investigations complémentaires

Un premier travail de collecte et d'analyse des données géologiques avait été entrepris durant la Phase 1 de l'étude. Il avait servi à la proposition des premières hypothèses sur les grandes structures hydrogéologiques susceptibles d'expliquer les particularités observées de la nappe triasique. Il avait notamment été proposé une approche du toit du Muschelkalk qui montre de nombreuses anomalies.

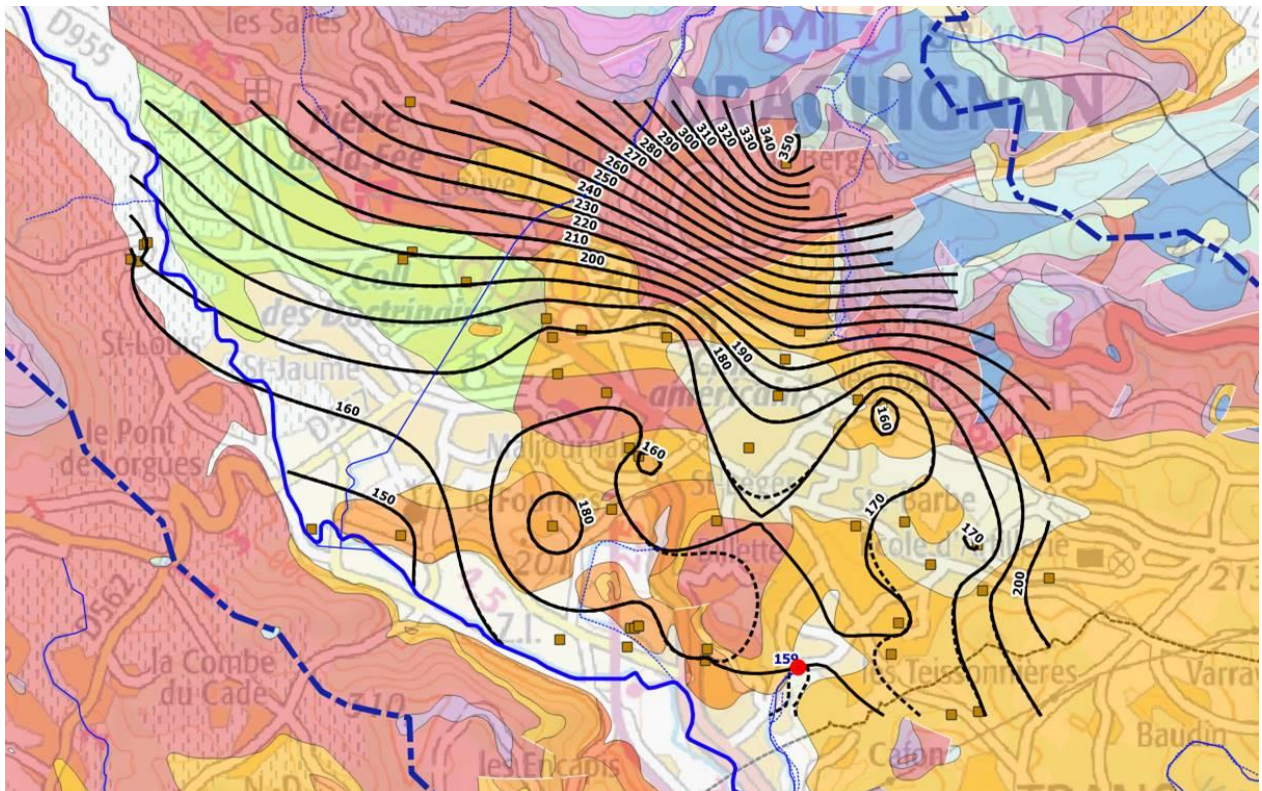


Figure 43 : Interpolation du toit du Muschelkalk à proximité de Draguignan

Cette première approche avait déjà permis de proposer une compartimentation verticale de la nappe avec l'identification de deux niveaux aquifères dans la série triasique.

Il avait déjà été noté lors du COTEC de Phase 1 que la réalisation d'une étude structurale approfondie pourrait aider à la compréhension des principales observations hydrogéologiques (zones de pertes, zones de restitution, caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines...).

Les données acquises font de nouveau ressortir un fort besoin d'un schéma structural consolidé. Il devra nécessairement donner des éclaircissements sur toutes les grandes structures de type failles ou plis susceptibles de produire une compartimentation horizontale de l'aquifère triasique.

Pour cela, il peut être envisagé de réaliser un complément d'étude basé sur les investigations suivantes :

- Collecte et analyse des données de la BSS. Report des données côtés sur les grandes interfaces géologiques dans un fichier SIG de référence.
- Traitement et analyse des données topographiques (MNT) pour mettre en évidence des indices géomorphologiques susceptibles d'expliquer une éventuelle compartimentation horizontale.
- Réalisation d'une campagne prospective géophysique (panneaux électriques) en amont de la plaine de Draguignan et dans le secteur de Sainte Anne.
- Reconnaissances de terrain.

En ce qui concerne la prospection géophysique, les investigations proposées en fin de Phase 1 peuvent être reprises avec les deux zones de prospection suivantes :

- Détermination de la géométrie du Muschelkalk dans le secteur de Sainte Anne et La Foux. Cela permettrait de valider la dépression supposée du toit des carbonates créant un axe de drainage de la nappe vers la Foux ;
- Détermination de la géométrie du Muschelkalk sous le recouvrement alluvial en amont de Draguignan et localisation de la zone de transition entre le Keuper et le Muschelkalk.

Le lot 1 (amont de Draguignan) comprend 6 profils orientés NE-SO pour un linéaire total de 5,5 km, tandis que le lot 2 (secteur Sainte Anne/La Foux) comprend 3 profils pour un linéaire total de 5,8 km.

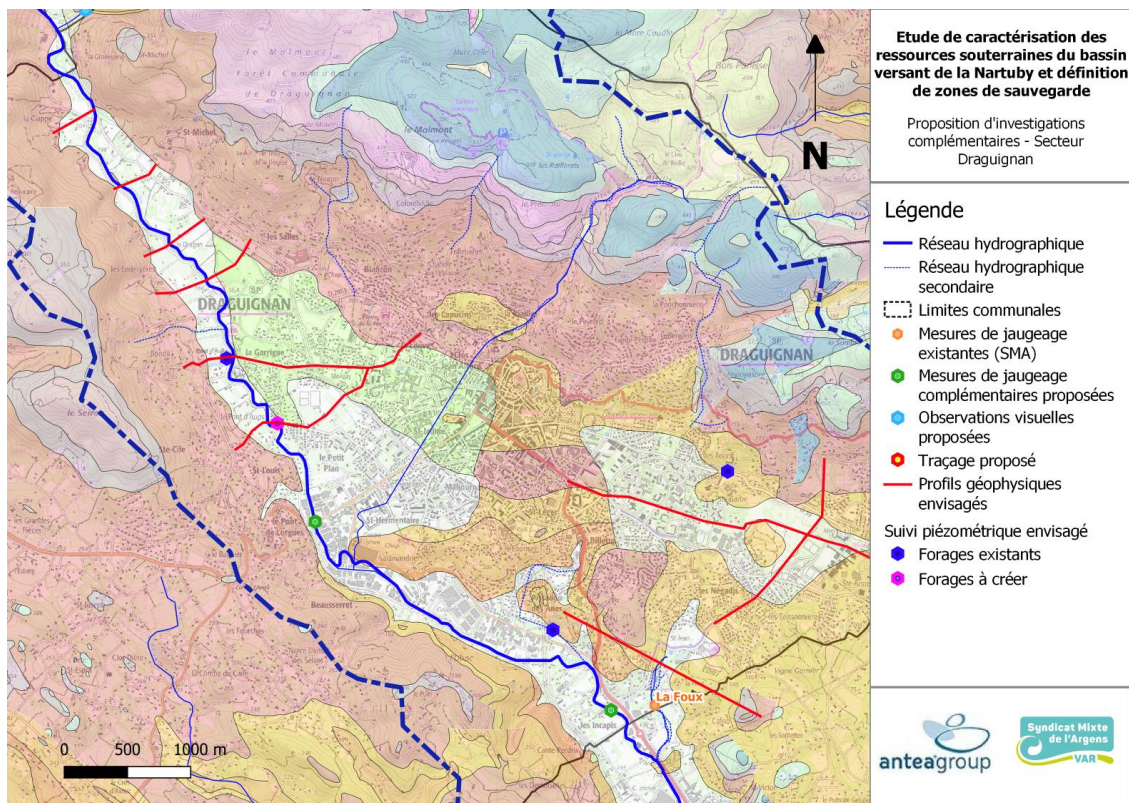


Figure 44 : Profils géophysiques envisagés

L'objectif de ce complément d'étude serait de fournir une note technique synthétique de présentation d'un schéma structural avec au moins trois coupes sommaires pour permettre de comprendre et de visualiser la structure interne de l'aquifère triasique.

Le coût global de ces investigations complémentaires est estimé à 35 k€ HT.

Observations sur l'utilisation du rapport

Ce rapport, ainsi que les cartes ou documents, et toutes autres pièces annexées constituent un ensemble indissociable. Les incertitudes ou les réserves qui seraient mentionnées dans la prise en compte des résultats et dans les conclusions font partie intégrante du rapport.

En conséquence, l'utilisation qui pourrait être faite d'une communication ou d'une reproduction partielle de ce rapport et de ses annexes ainsi que toute interprétation au-delà des énonciations d'Antea Group ne sauraient engager la responsabilité de celui-ci. Il en est de même pour une éventuelle utilisation à d'autres fins que celles définies pour la présente prestation.

Les résultats des prestations et des investigations s'appuient sur un échantillonnage ; ce dispositif ne permet pas de lever la totalité des aléas liés à l'hétérogénéité des milieux naturels ou artificiels étudiés. Par ailleurs, la prestation a été réalisée à partir d'informations extérieures non garanties par Antea Group ; sa responsabilité ne saurait être engagée en la matière.

Antea Group s'est engagé à apporter tout le soin et la diligence nécessaire à l'exécution des prestations et s'est conformé aux usages de la profession. Antea Group conseille son Client avec pour objectif de l'éclairer au mieux. Cependant, le choix de la décision relève de la seule compétence de son Client.

Le Client autorise Antea Group à le nommer pour une référence scientifique ou commerciale. A défaut, Antea Group s'entendra avec le Client pour définir les modalités de l'usage commercial ou scientifique de la référence.

Ce rapport devient la propriété du Client après paiement intégral de la mission, son utilisation étant interdite jusqu'à ce paiement. A partir de ce moment, le Client devient libre d'utiliser le rapport et de le diffuser, sous réserve de respecter les limites d'utilisation décrites ci-dessus.

Pour rappel, les conditions générales de vente ainsi que les informations de présentation d'Antea Group sont consultables sur : <https://www.anteagroup.fr/fr/annexes>

Mesure

- Air ambiant
- Air intérieur
- Exposition professionnelle
- Eau
- Pollution atmosphérique

Environnement

- Due diligence et conseil stratégique
- Sites et sols pollués
- Travaux de dépollution
- Dossiers réglementaires

Eau

- Traitement des effluents industriels
- Eau ressource et géothermies
- Eau potable et assainissement
- Aménagement hydraulique



Data

-
- Systèmes d'information et data management
- Solutions pour le data management environnemental

Aménagement du territoire

- Projet urbain
- L'environnement au cœur des stratégies et projets
- Stratégie territoriale et planification

Infrastructures

- Déconstruction et désamiantage
- Géotechnique
- Fondations et terrassements
- Ouvrages et structures
- Risques naturels
- Déchets et valorisation

Références :



Portées
communiquées
sur demande

HYDROGÉOTECHNIQUE

Spécialistes en études de sol,
chaussée et environnement.



Syndicat Mixte de l'Argens
2 Avenue Lazare Carnot
83300 DRAGUIGNAN



COMPTE RENDU FACTUEL DES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES

Réalisation de 3 piézomètres profonds pour le suivi de la nappe

DRAGUIGNAN (83) + TRANS EN PROVENCE (83)

Investigations géotechniques – Compte rendu factuel des sondages

DOSSIER N°	INDICE	DATE	RÉDACTEUR	CONTRÔLEUR	SUPERVISEUR	OBSERVATIONS / MODIFICATIONS
C.21.50135	A	06/10/21	GCA	AGA	/	Première émission

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	3
1.1. MISSIONS.....	3
1.2. DOCUMENTS FOURNIS.....	3
1.3. DESCRIPTION DU PROJET AU STADE DE NOTRE MISSION.....	4
2. CONTEXTE SITOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE & HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRAL	5
2.1. CONTEXTE SITOLOGIQUE.....	5
2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	6
2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE.....	7
3. PROGRAMME SPÉCIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE	8
3.1. PROGRAMME SPÉCIFIQUE.....	8
3.2. IMPLANTATION ET CALAGE ALTIMÉTRIQUE.....	9
ANNEXES	11
ANNEXE 1 PLAN D'IMPLANTATION DES SONDAGES.....	12
ANNEXE 2 COUPE DES SONDAGES DESTRUCTIFS.....	13
ANNEXE 3 MISSIONS GÉOTECHNIQUES.....	14

1. INTRODUCTION

1.1. MISSIONS

À la demande et pour le compte du **Syndicat Mixte de l'Argens**, l'agence PACA du Bureau d'Etudes **HYDROGÉOTECHNIQUE SUD-EST** a procédé à l'exécution des investigations géotechniques préalables à la réalisation de piézomètres profonds dans le but d'effectuer un suivi piézométrique sur les communes de **DRAGUIGNAN ET TRANS EN PROVENCE (83)**.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la norme 94.500 des missions type d'ingénierie géotechnique de l'AFNOR-USG (Novembre 2013), qui suivent les étapes d'élaboration et de réalisation de tout projet, à savoir :

- **Article 6 : investigations géotechniques**

Cette mission se termine à la remise du présent rapport. Elle s'appuie sur des prestations d'investigations géotechniques proposées et réalisées par notre société.

Cette étude a été réalisée par **Geoffrey CADRAN** ingénieur en géotechnique, avec le contrôle interne de **Alexandre GARDAS**, Ingénieur Géotechnicien et Directeur d'agence.

Les objectifs de cette étude sont :

- Réaliser les forages, essais et mesures selon le programme imposé,
- Dépouiller les forages et essais conformément aux modes opératoires AFNOR correspondants,
- Fournir un compte-rendu factuel des différents résultats (coupes des sondages, procès-verbaux d'essais et résultats des mesures).

Le caractère de cette étude est strictement de type géotechnique. Les aspects liés à la recherche de pollution éventuelle ou à la caractérisation des ouvrages enterrés et des incidences des vestiges et fouilles archéologiques sont exclus. Notre mission n'intègre pas l'étude des dispositifs d'assainissement ni l'étude de la possibilité d'infiltration des eaux pluviales.

1.2. DOCUMENTS FOURNIS

Pour mener à bien notre mission, il nous a été transmis la localisation des piézomètres ainsi que leur profondeur.

1.3. DESCRIPTION DU PROJET AU STADE DE NOTRE MISSION

Dans le cadre d'une étude sur le bassin versant de l'Argens, des études visent à suivre les variations des différentes nappes de ce dernier. Le Syndicat Mixte de l'Argens souhaite ainsi poser des piézomètres profonds afin de pouvoir suivre ces niveaux d'eau.



2. CONTEXTE SITOLOGIQUE, GÉOLOGIQUE & HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRAL

2.1. CONTEXTE SITOLOGIQUE

Les sites d'implantation des piézomètres sont situés sur les communes de Draguignan et Trans en Provence dans le département du Var (83). Deux piézomètres sont prévus à Draguignan et 1 seul à Trans en Provence.



Carte IGN de la zone d'étude



Site de Draguignan



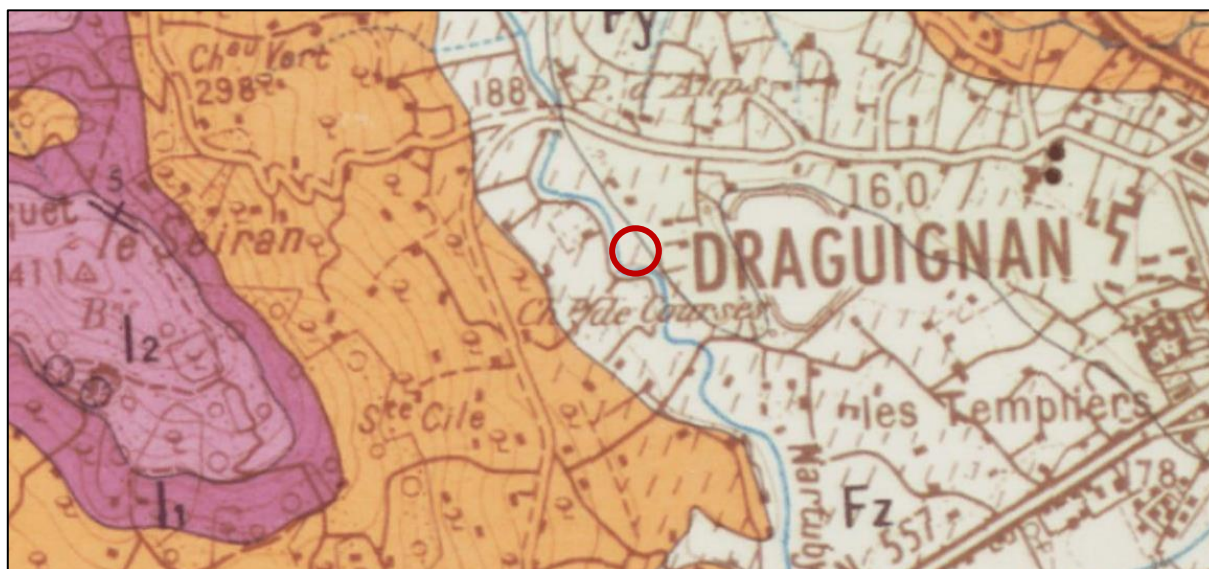
Site de Trans en Provence

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Nous avons exploité la carte géologique de FREJUS CANNES au 1/50 000ème dont un extrait est présenté ci-après :



Extrait de la carte géologique – Site Trans en Provence – Source : www.geoportail.gouv.fr



Extrait de la carte géologique – Site Draguignan – Source : www.geoportail.gouv.fr

Site de Trans en Provence :

Le secteur d'implantation du piézomètre s'inscrit au sein d'un contexte composé de calcaire et de marnes. Les marnes et calcaire du Ladinien-Carnien devrait être rencontré rapidement.

Secteur de Draguignan :

La lithologie attendue serait composée d'alluvions modernes Fz constitués par des sables et limons. Le substratum local composé par le Keuper ou le Muschelkalk devrait être intersecté. Ces étages géologiques sont par nature marneuse ou calcaire.

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

Compte tenu du contexte géologique et sitologique, il est probable que des circulations d'eau puissent s'établir :

- Sous forma de nappe d'accompagnement des cours d'eau (Nartuby au droit de Draguignan ...)
- sous forme de nappes de stagnation dans les remblais et les formations superficielles,
- sous forme de circulation à la faveur de la perméabilité des différentes couches de sol,
- sous forme de circulation au sein des fracturation ou altération du substratum.

3. PROGRAMME SPÉCIFIQUE D'INVESTIGATIONS MIS EN ŒUVRE

3.1. PROGRAMME SPÉCIFIQUE

Sur la base d'un programme et d'une implantation définis dans le cahier des charges, nous avons mis en œuvre les investigations suivantes du 05/08/21 au 20/08/21 :

- **3 sondages destructif notés PZ1 à PZ3 réalisés au tricône en diamètre 115mm et 150mm jusqu'à 50m à 100m de profondeur environ** avec enregistrement des paramètres de forages :
 - La vitesse instantanée d'avancement (VIA),
 - La pression sur l'outil (PO),
 - La pression d'injection du fluide de forage (PI),
 - Couple de rotation (CR).

Les enregistrements sont ensuite traités par ordinateur et joints aux coupes de sondages.

	PZ1	PZ2	PZ3
Localisation	DRAGUIGNAN		TRANS EN PROVENCE
Profondeur (m)/TN	102	51	101
Foration au tricône ø 150mm	De 0 à 50m	/	De 0 à 50m
Foration au tricône ø 115mm	De 50m à 102m	De 0 à 51m	De 50m à 101m

- **Dans ces forages, ont été installé un tubage piézométrique en diamètre 52/60mm répartis de la manière suivante :**

Répartition tube piézométrique	PZ1	PZ2	PZ3
Localisation	DRAGUIGNAN		TRANS EN PROVENCE
Profondeur (m)/TN	102	51	101
Tubage piézométrique plein	De 0 à 58m	De 0 à 18m	De 0 à 80m
Tubage piézométrique crépiné	De 58 à 102m	De 18m à 51m	De 80m à 101m

Remplissage annulaire	PZ1	PZ2	PZ3
Localisation	DRAGUIGNAN		TRANS EN PROVENCE
Profondeur (m)/TN	102	51	101
Remplissage béton	De 0 à 50m	De 0 à 15m	De 0 à 75m
Remplissage argile	De 50m à 58m	De 15m à 18m	De 75m à 80m
Remplissage gravette	De 58m à 102m	De 18m à 51m	De 80m à 101m

Remarque sur la campagne : Le piézomètre PZ1 à fait l'objet d'un télescopage afin de ne pas mettre en relation les deux nappes supposées.

Il a été réalisé un forage au tricône $\varnothing 150\text{mm}$ puis mise en place d'un tubage 120/140mm, les marnes ont été franchies et le forage s'est arrêté au niveau du toit calcaire. Nous avons alors mise en place de l'argile dans le remplissage annulaire afin de créer un bouchon étanche. Ensuite un second tricône en diamètre 115mm a été descendu afin de forer jusque 102m de profondeur.

A la fin de la campagne un nettoyage de tous les piézomètres par soufflage a été réalisé à l'aide d'un compresseur.

Remarque importante : La description lithologique indiquée sur les coupes de sondage est issue des remontées de cuttings lors du forage. Durant le forage, la remontée des cuttings étant aléatoire, de nombreuses approximations ont été faites afin d'établir la coupe. Nous nous sommes également appuyés de la banque de forage du BRGM et des enregistrements des paramètres de forage.

Seul un sondage carotté permettrait d'obtenir une précision supplémentaire.

3.2. IMPLANTATION ET CALAGE ALTIMÉTRIQUE


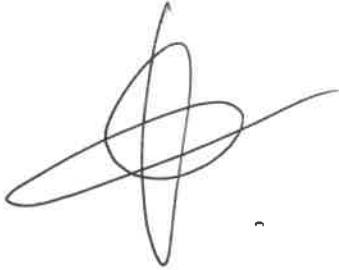
Le plan d'implantation des sondages est présenté en annexe 1 du rapport.

Les coordonnées X, Y, Z des sondages n'ont pas été mesurés.

Notre mission se termine à la remise du présent compte-rendu qui constitue un ensemble indissociable.

Nous restons à la disposition du **Syndicat Mixte de l'Argens** et de tous les intervenants pour tous renseignements complémentaires.

Dressé par les Ingénieurs soussignés :

Dressé par l'ingénieur :	Vérifié par l'ingénieur soussigné :
Geoffrey CADRAN	Alexandre GARDAS
	

ANNEXES



ANNEXE 1

PLAN D'IMPLANTATION DES SONDAGES



PLAN D'IMPLANTATION DES PIEZOMETRES



Site de Draguignan



Site de Trans en Provence

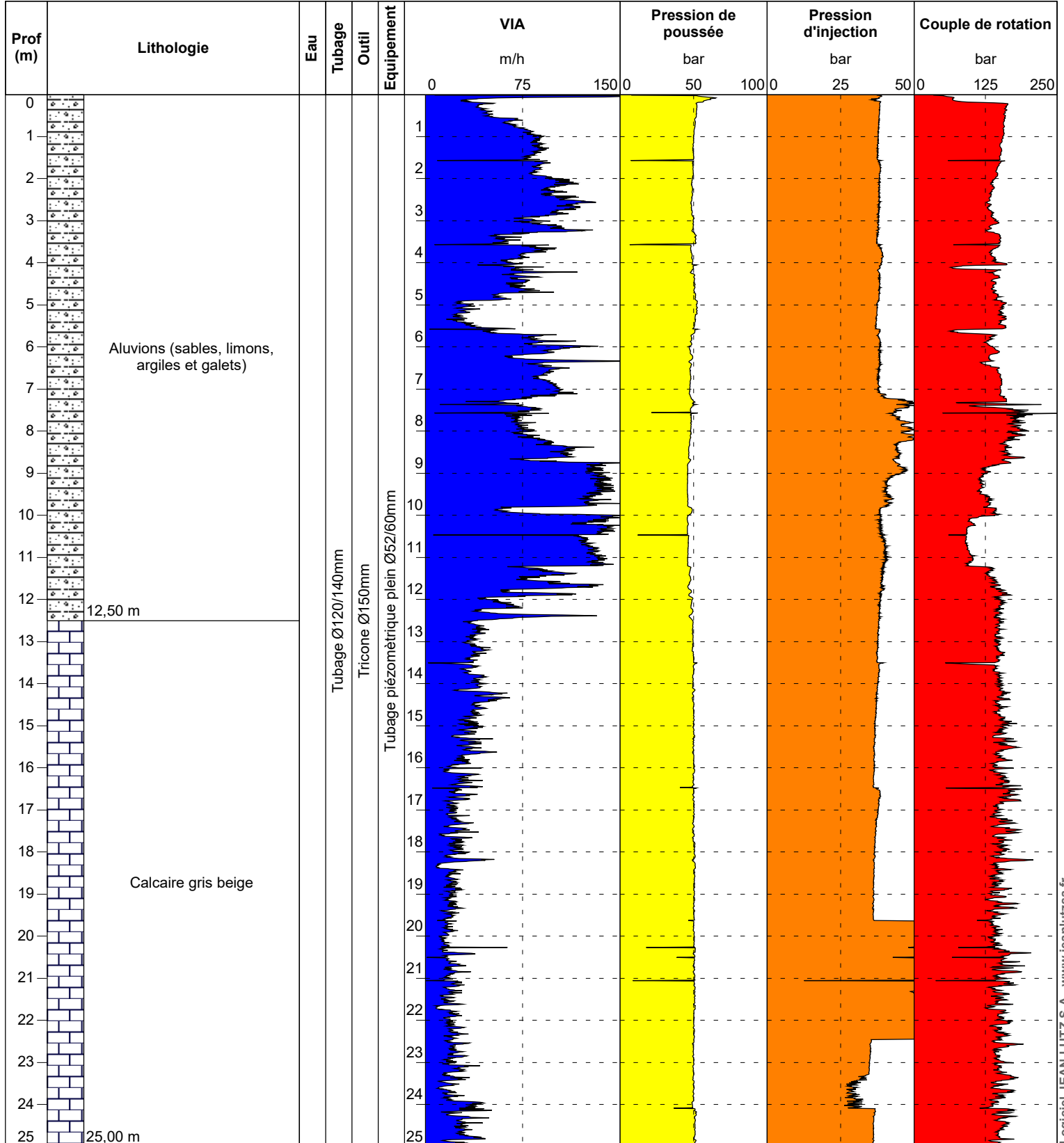
ANNEXE 2

COUPE DES SONDAGES DESTRUCTIFS

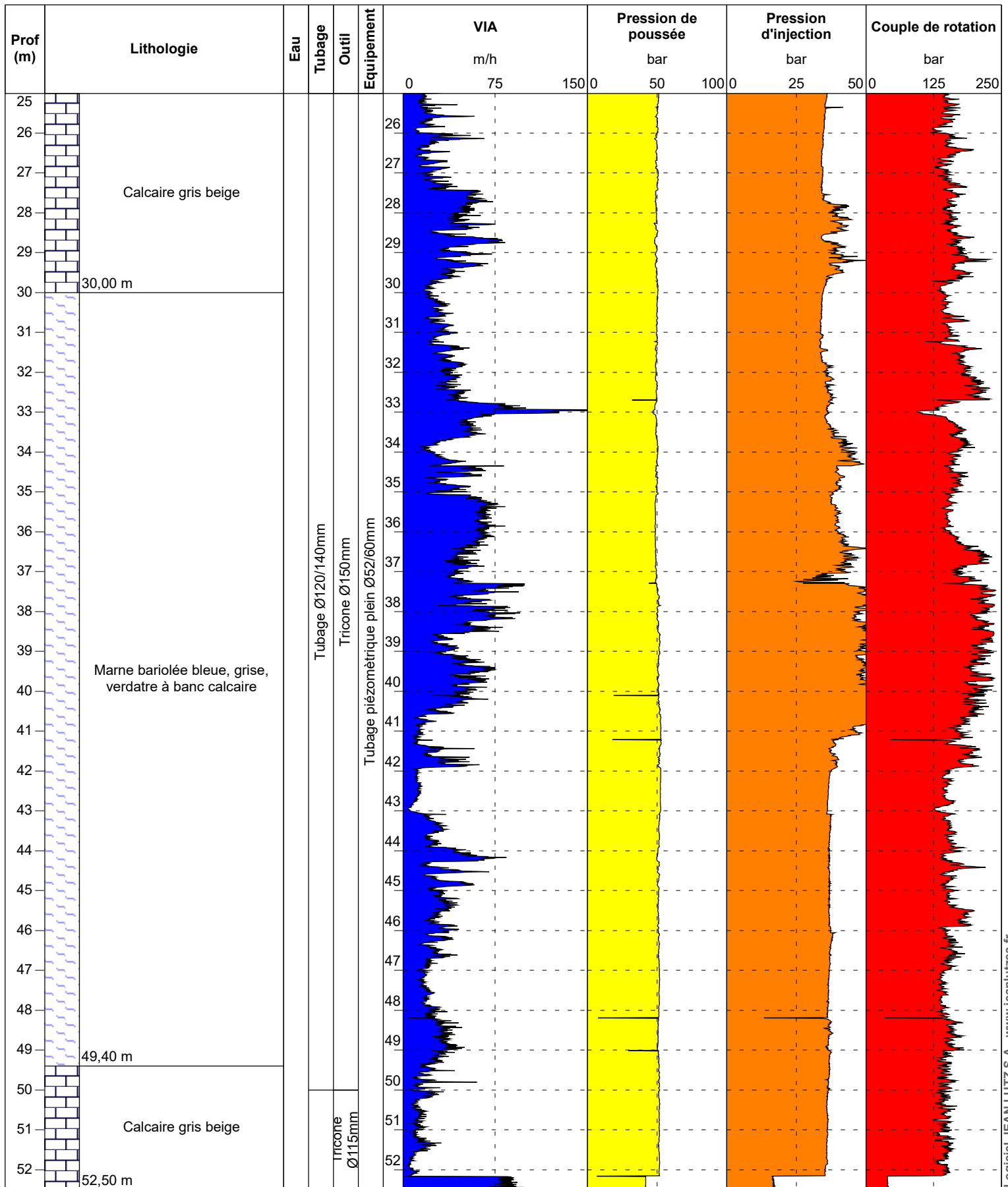




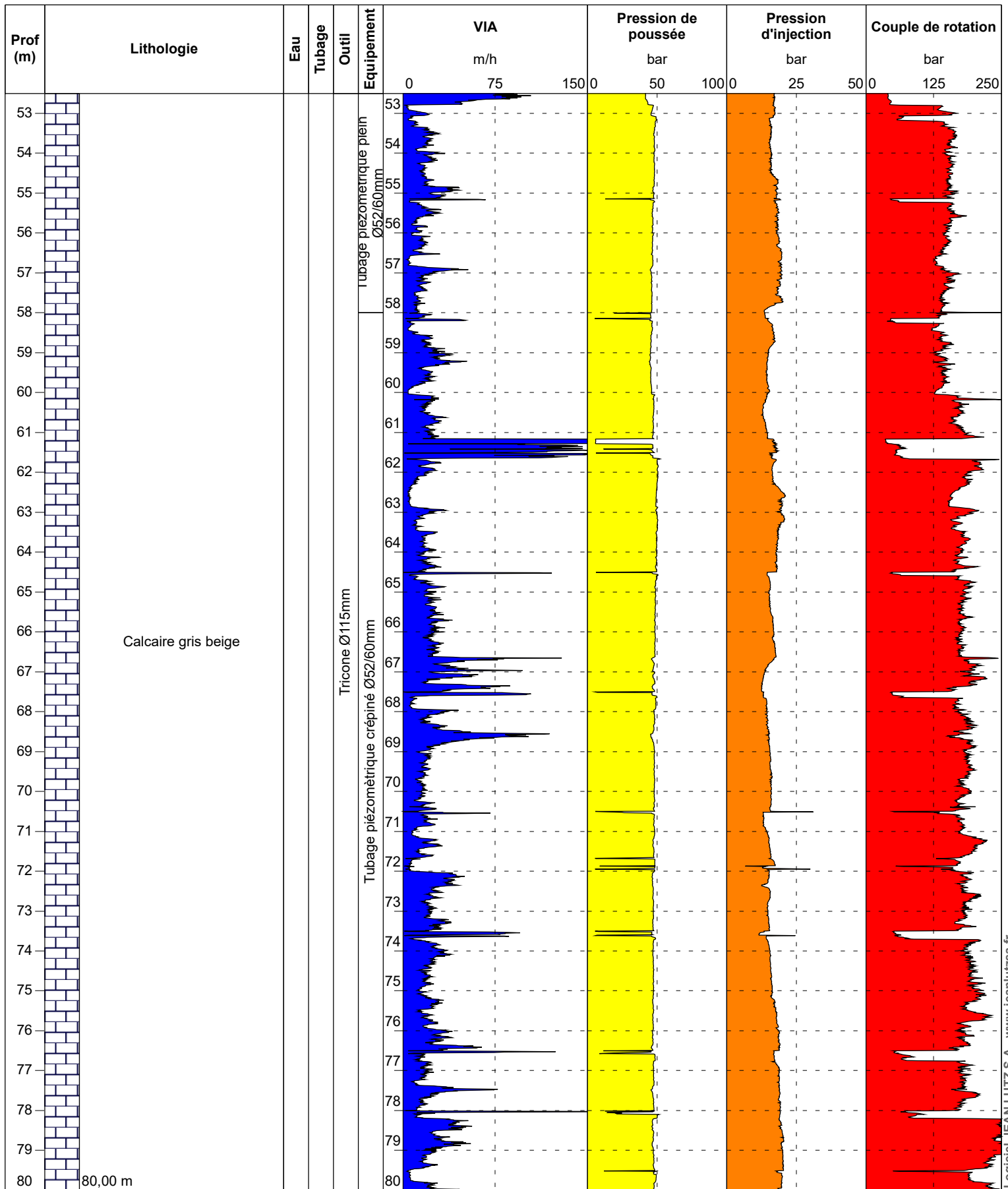
Sondage destructif : PZ1



PZ1

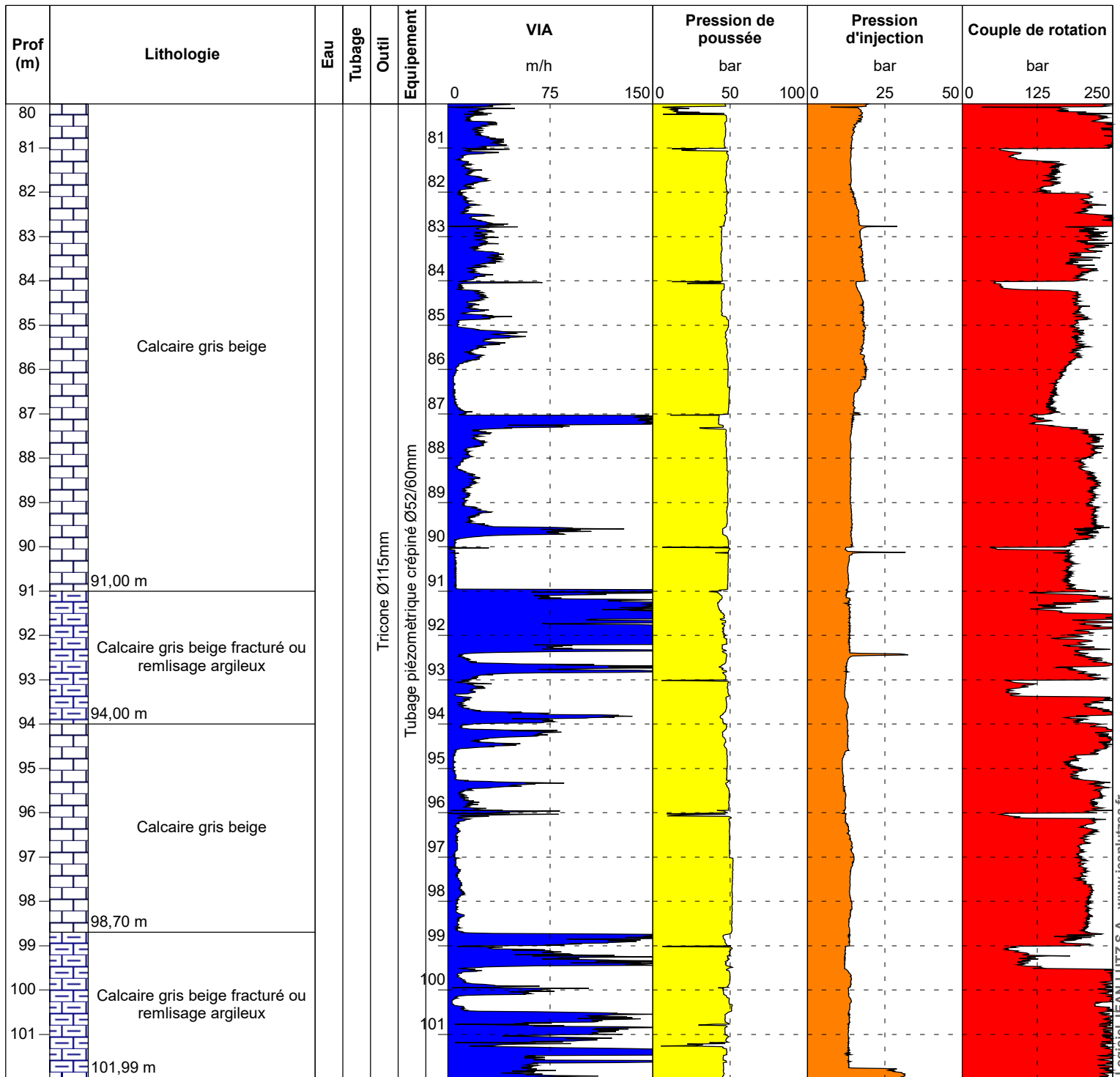


PZ1



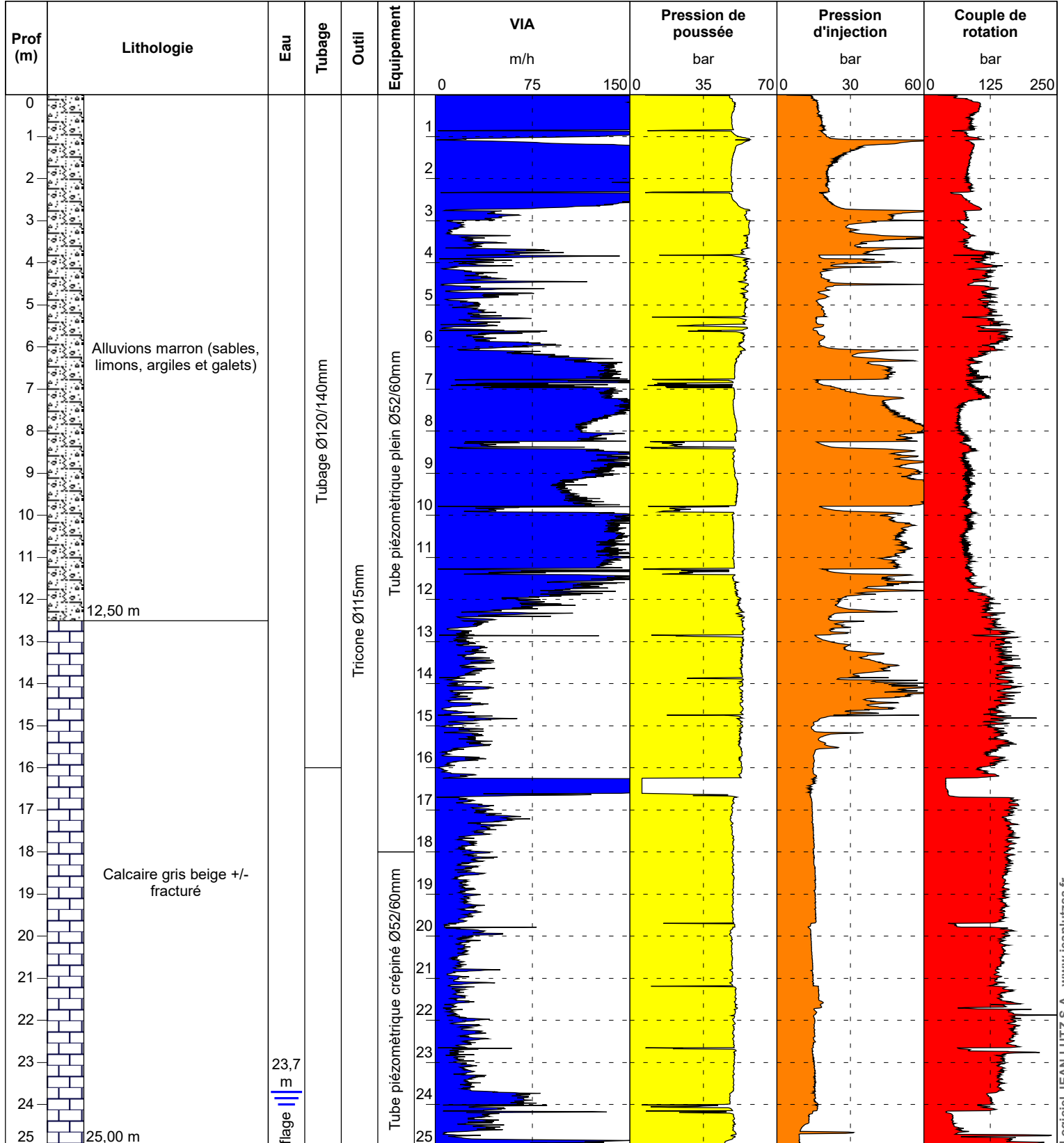
80,00 m

PZ1

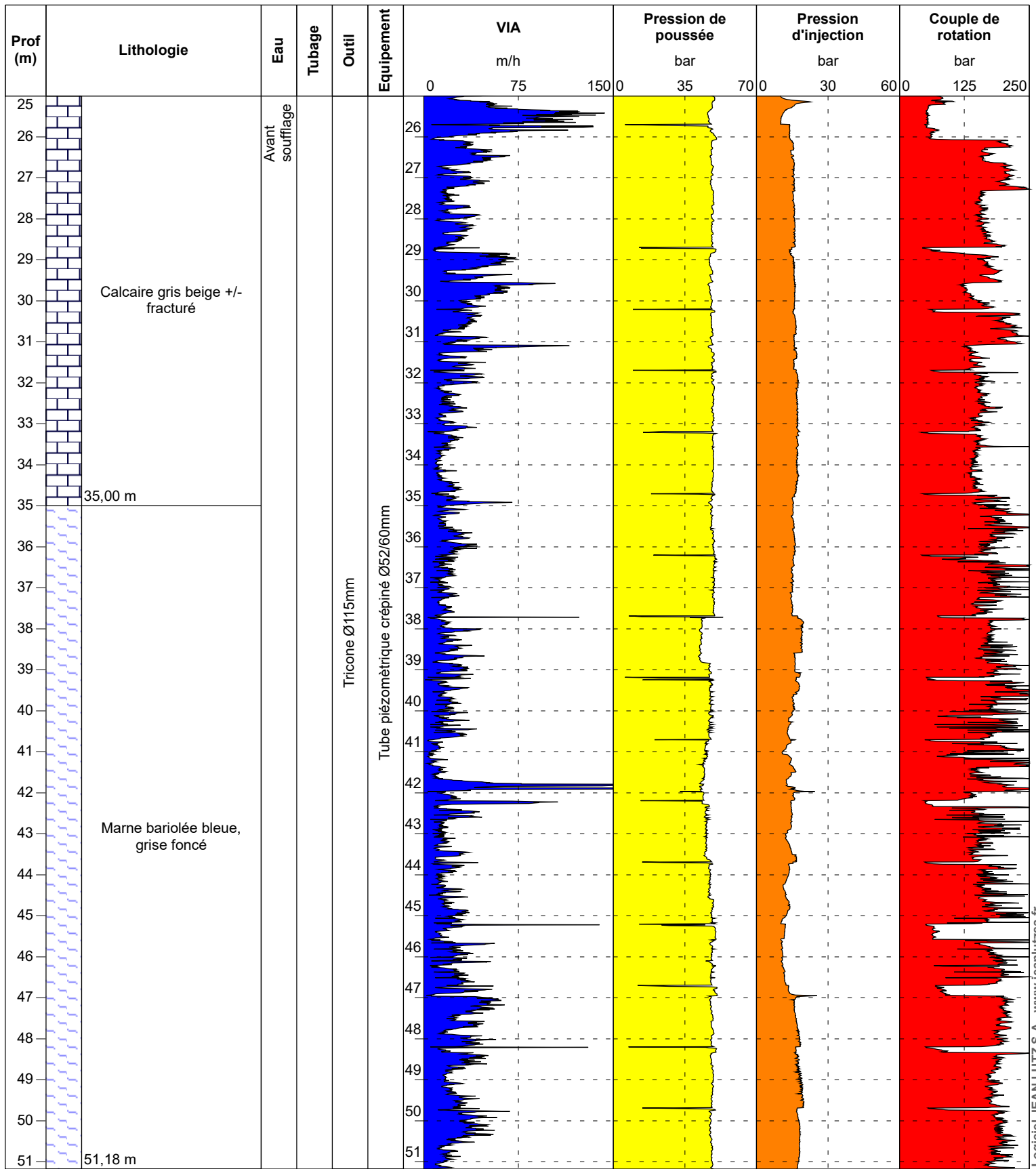




Sondage destructif : PZ2

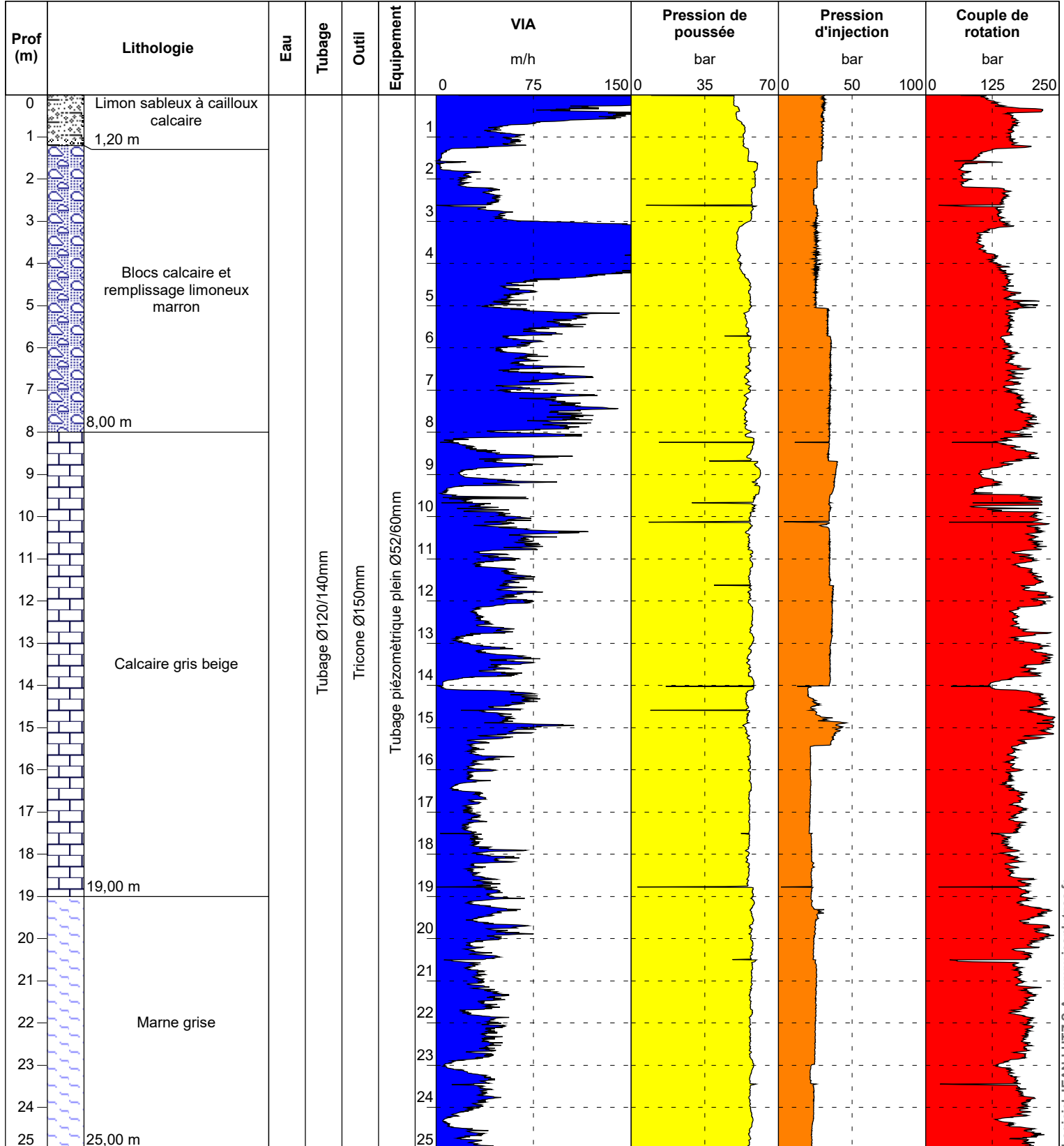


PZ2

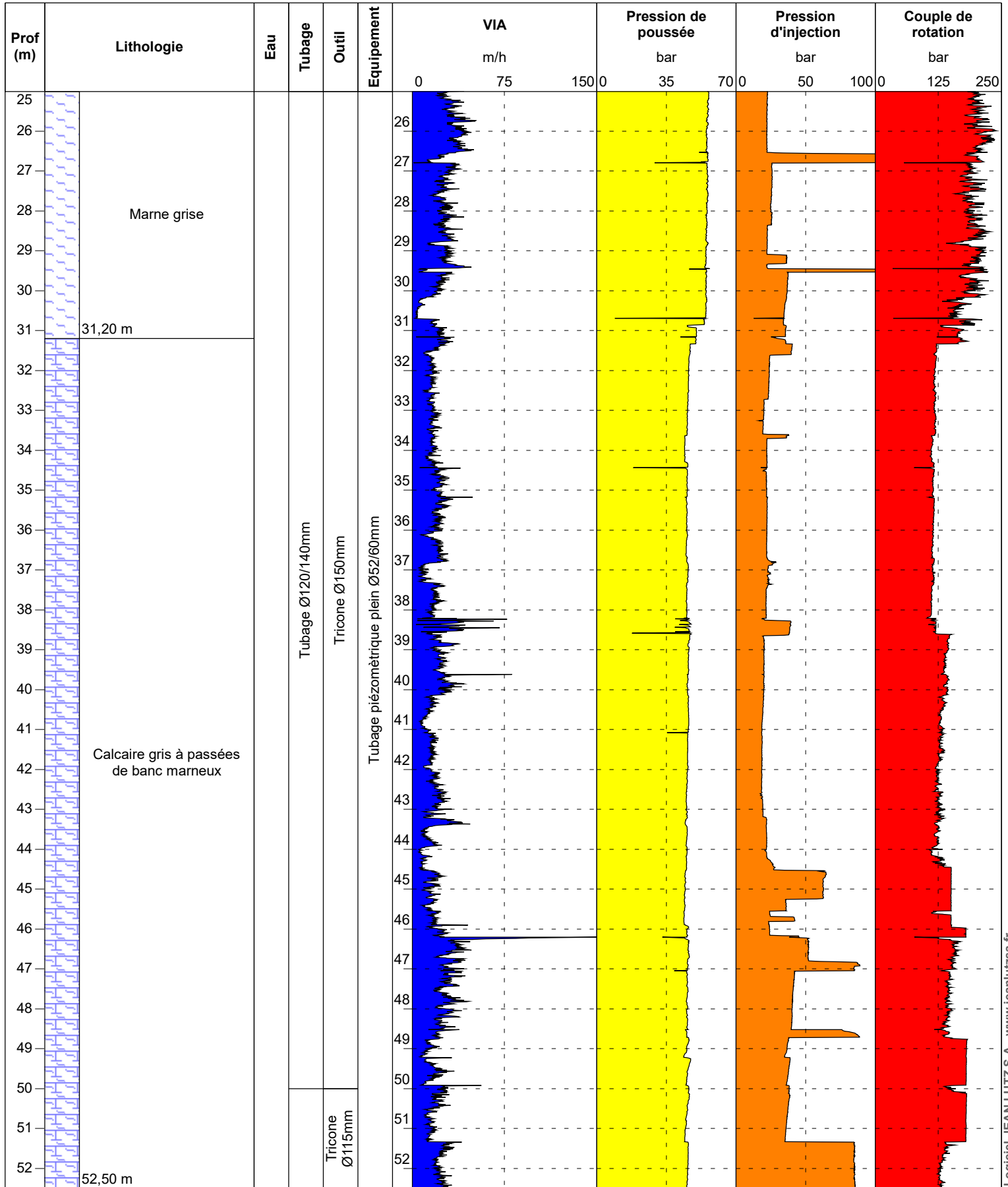




Sondage destructif : PZ3



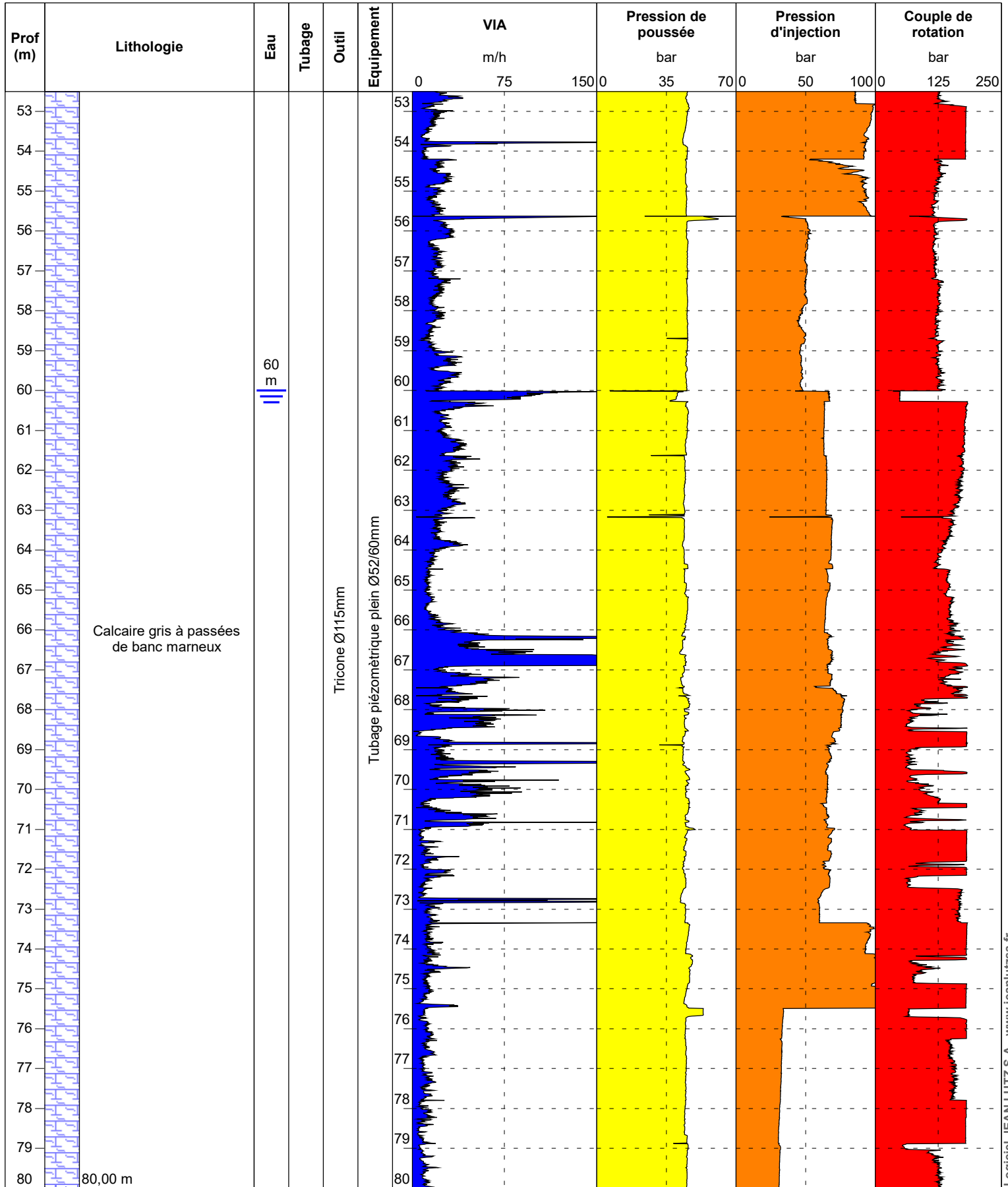
PZ3



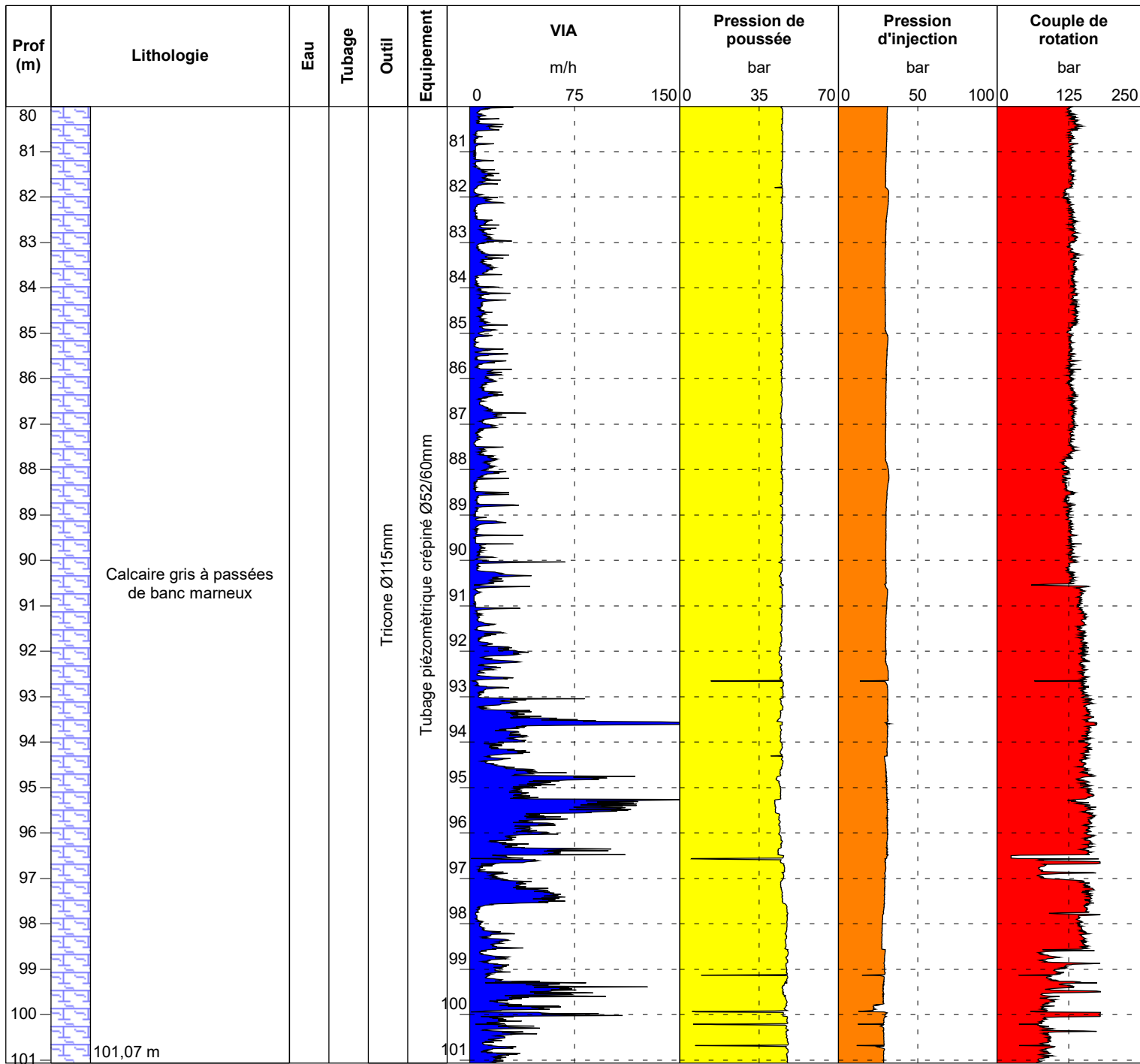
31,20 m

52,50 m

PZ3



PZ3





Compte-rendu de pose / Piézomètre ouvert

N° Affaire : C.21.50135		Client : Syndicat Mixte de l'Argens (SMA)
Date : 12/08/21		Ht (m) : 0.5 (Hauteur du PVC hors sol)
Lieu : DRAGUIGNAN (83)		Hp (m) : 0.6 (Hauteur du capot hors sol)
GPS :		P (m) : 102 (Profondeur du forage)
X = Y = Z =		Hw (m) (niveau d'eau) Avant Pose / TN : 23.7 Après Pose / Tube : 23.7

Massif Béton :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Massif étanche	de 0m	à 58m
Massif Filtrant	de 58m	à 102m
Bouchon de Fond :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Développement Air lift :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Vidage du piézomètre manuel :	<input type="checkbox"/> Oui	<input checked="" type="checkbox"/> Non

N° Sondage : PZ1	
PVC Ø (mm) : 51/60mm Ex : 51/60 mm	PVC Plein de 0m à 58m
Forage Ø (mm) : 116mm Ex : 51/60 mm	PVC Crépiné de 58m à 102m

Remarques : Néant

Contrôle interne	Nom : GCA	Visa :
------------------	-----------	--------



Compte-rendu de pose / Piézomètre ouvert

N° Affaire : C.21.50135		Client : Syndicat Mixte de l'Argens (SMA)				
Date : 18/08/21		Ht (m) : 0.5 (Hauteur du PVC hors sol)				
Lieu : DRAGUIGNAN (83)		Hp (m) : 0.6 (Hauteur du capot hors sol)				
GPS : X = Y = Z =		P (m) : 51 (Profondeur du forage)				
		<table border="1"> <tr> <td>Hw (m) (niveau d'eau)</td> <td>Avant Pose / TN : 22.7</td> </tr> <tr> <td></td> <td>Après Pose / Tube : 22.7</td> </tr> </table>	Hw (m) (niveau d'eau)	Avant Pose / TN : 22.7		Après Pose / Tube : 22.7
Hw (m) (niveau d'eau)	Avant Pose / TN : 22.7					
	Après Pose / Tube : 22.7					

Massif Béton :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Massif étanche	de 0m	à 18m
Massif Filtrant	de 18m	à 51m
Bouchon de Fond :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Développement Air lift :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Vidage du piézomètre manuel :	<input type="checkbox"/> Oui	<input checked="" type="checkbox"/> Non

N° Sondage : PZ2	
PVC Ø (mm) : 51/60mm Ex : 51/60 mm	PVC Plein de 0m à 18m
Forage Ø (mm) : 115mm Ex : 51/60 mm	PVC Crépiné de 18m à 51m

Remarques : Néant

Contrôle interne Nom : GCA Visa :



Compte-rendu de pose / Piézomètre ouvert

N° Affaire : C.21.50135		Client : Syndicat Mixte de l'Argens (SMA)
Date : 05/08/21		Ht (m) : 0.5 (Hauteur du PVC hors sol)
Lieu : DRAGUIGNAN (83)		Hp (m) : 0.7 (Hauteur du capot hors sol)
GPS :		P (m) : 102 (Profondeur du forage)
X = Y = Z =		Hw (m) (niveau d'eau) Avant Pose / TN : 60.0 Après Pose / Tube : 60.0

Massif Béton :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Massif étanche	de 0m	à 80m
Massif Filtrant	de 80m	à 102m
Bouchon de Fond :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Développement Air lift :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui	<input type="checkbox"/> Non
Vidage du piézomètre manuel :	<input type="checkbox"/> Oui	<input checked="" type="checkbox"/> Non

N° Sondage : PZ3	
PVC Ø (mm) : 51/60mm Ex : 51/60 mm	PVC Plein de 0m à 80m
Forage Ø (mm) : 115mm Ex : 51/60 mm	PVC Crépiné de 80m à 102m

Remarques : Néant

Contrôle interne Nom : GCA Visa :

ANNEXE 3

MISSIONS GÉOTECHNIQUES



CLASSIFICATION DES MISSIONS TYPE D'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE**(extraite de la norme NF P 94-500 - novembre 2013)**

L'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étapes 1 à 3) doit suivre les étapes de conception et de réalisation de tout projet pour contribuer à la maîtrise des risques géotechniques. Le maître d'ouvrage ou son mandataire doit faire réaliser successivement chacune de ces missions par une ingénierie géotechnique. Chaque mission s'appuie sur des données géotechniques adaptées issues d'investigations géotechniques appropriées.

ÉTAPE 1 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE PRÉALABLE (G1)

Cette mission exclut toute approche des quantités, délais et coûts d'exécution des ouvrages géotechniques qui entre dans le cadre de la mission d'étude géotechnique de conception (étape 2). Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire. Elle comprend deux phases :

Phase Étude de site (ES)

Elle est réalisée en amont d'une étude préliminaire d'esquisse ou d'APS pour une première identification des risques géotechniques d'un site.

- Faire une enquête documentaire sur le cadre géotechnique du site et l'existence d'avoisinants avec visite du site et des alentours.
- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Fournir un rapport donnant pour le site étudié un modèle géologique préliminaire, les principales caractéristiques géotechniques et une première identification des risques géotechniques majeurs.

Phase Principes Généraux de Construction (PGC)

Elle est réalisée au stade d'une étude préliminaire, d'esquisse ou d'APS pour réduire les conséquences des risques géotechniques majeurs identifiés. Elle s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un rapport de synthèse des données géotechniques à ce stade d'étude (première approche de la ZIG, horizons porteurs potentiels, ainsi que certains principes généraux de construction envisageables (notamment fondations, terrassements, ouvrages enterrés, améliorations de sols).

ÉTAPE 2 : ÉTUDE GÉOTECHNIQUE DE CONCEPTION (G2)

Cette mission permet l'élaboration du projet des ouvrages géotechniques et réduit les conséquences des risques géotechniques importants identifiés. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend trois phases :

Phase Avant-Projet (AVP)

Elle est réalisée au stade de l'avant-projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un rapport donnant les hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade de l'avant-projet, les principes de construction envisageables (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions générales vis-à-vis des nappes et des avoisinants), une ébauche dimensionnelle par type d'ouvrage géotechnique et la pertinence d'application de la méthode observationnelle pour une meilleure maîtrise des risques géotechniques.

Phase Projet (PRO)

Elle est réalisée au stade du projet de la maîtrise d'œuvre et s'appuie obligatoirement sur des données géotechniques adaptées suffisamment représentatives pour le site.

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats,
- Fournir un dossier de synthèse des hypothèses géotechniques à prendre en compte au stade du projet (valeurs caractéristiques des paramètres géotechniques en particulier), des notes techniques donnant les choix constructifs des ouvrages géotechniques (terrassements, soutènements, pentes et talus, fondations, assises des dallages et voiries, améliorations de sols, dispositions vis-à-vis des nappes et des avoisinants), des notes de calcul de dimensionnement, un avis sur les valeurs seuils et une approche des quantités.

Phase DCE / ACT

Elle est réalisée pour finaliser le Dossier de Consultation des Entreprises et assister le maître d'ouvrage pour l'établissement des Contrats de Travaux avec le ou les entrepreneurs retenus pour les ouvrages géotechniques.

- Établir ou participer à la rédaction des documents techniques nécessaires et suffisants à la consultation des entreprises pour leurs études de réalisation des ouvrages géotechniques (dossier de la phase Projet avec plans, notices techniques, cahier des charges particulières, cadre de bordereau des prix et estimatif, planning prévisionnel).
- Assister éventuellement le maître d'ouvrage pour la sélection des entreprises, analyser les offres techniques, participer à la finalisation des pièces techniques des contrats de travaux.

ÉTAPE 3 : ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DE RÉALISATION (G3 et G4, distinctes et simultanées)**→ ÉTUDE ET SUIVI GÉOTECHNIQUES D'EXÉCUTION (G3)**

Cette mission permet de réduire les risques géotechniques résiduels par la mise en œuvre à temps de mesures correctives d'adaptation ou d'optimisation. Elle est confiée à l'entrepreneur sauf disposition contractuelle contraire, sur la base de la phase G2 DCE/ACT.

Elle comprend deux phases interactives :

Phase Étude

- Définir si besoin un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Etudier dans le détail les ouvrages géotechniques : notamment établissement d'une note d'hypothèses géotechniques sur la base des données fournies par le contrat de travaux ainsi que des résultats des éventuelles investigations complémentaires, définition et dimensionnement (calculs justificatifs) des ouvrages géotechniques, méthodes et conditions d'exécution (phasages généraux, suivis, auscultations et contrôles à prévoir, valeurs seuils, dispositions constructives complémentaires éventuelles).
- Elaborer le dossier géotechnique d'exécution des ouvrages géotechniques provisoires et définitifs : plans d'exécution, de phasage et de suivi.

Phase Suivi

- Suivre en continu les auscultations et l'exécution des ouvrages géotechniques, appliquer si nécessaire des dispositions constructives prédéfinies en phase étude.
- Vérifier les données géotechniques par relevés lors des travaux et par un programme d'investigations géotechniques complémentaire si nécessaire (le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats).
- Etablir la prestation géotechnique du dossier des ouvrages exécutés (DOE) et fournir les documents nécessaires à l'établissement du dossier d'interventions ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

→ SUPERVISION GÉOTECHNIQUE D'EXÉCUTION (G4)

Cette mission permet de vérifier la conformité des hypothèses géotechniques prises en compte dans la mission d'étude et suivi géotechniques d'exécution. Elle est à la charge du maître d'ouvrage ou son mandataire et est réalisée en collaboration avec la maîtrise d'œuvre ou intégrée à cette dernière. Elle comprend deux phases interactives :

Phase Supervision de l'étude d'exécution :

- Donner un avis sur la pertinence des hypothèses géotechniques de l'étude géotechnique d'exécution, des dimensionnements et méthodes d'exécution, des adaptations ou optimisations des ouvrages géotechniques proposées par l'entrepreneur, du plan de contrôle, du programme d'auscultation et des valeurs seuils.

Phase Supervision du suivi d'exécution :

- Par interventions ponctuelles sur le chantier, donner un avis sur la pertinence du contexte géotechnique tel qu'observé par l'entrepreneur (G3), du comportement tel qu'observé par l'entrepreneur de l'ouvrage et des avoisinants concernés (G3), de l'adaptation ou de l'optimisation de l'ouvrage géotechnique proposée par l'entrepreneur (G3).
- Donner un avis sur la prestation géotechnique du DOE et sur les documents fournis par le DIUO.

DIAGNOSTIC GÉOTECHNIQUE (G5)

Pendant le déroulement d'un projet ou au cours de la vie d'un ouvrage, il peut être nécessaire de procéder, de façon strictement limitative, à l'étude d'un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques, dans le cadre d'une mission ponctuelle. Ce diagnostic géotechnique précise l'influence de cet ou ces éléments géotechniques sur les risques géotechniques identifiés ainsi que leurs conséquences possibles pour le projet ou l'ouvrage existant.

- Définir, après enquête documentaire, un programme d'investigations géotechniques spécifique, le réaliser ou en assurer le suivi technique, en exploiter les résultats.
- Etudier un ou plusieurs éléments géotechniques spécifiques (par exemple soutènement, causes géotechniques d'un désordre) dans le cadre de ce diagnostic, mais sans aucune implication dans la globalité du projet ou dans l'étude de l'état général de l'ouvrage existant.
- Si ce diagnostic conduit à modifier une partie du projet ou à réaliser des travaux sur l'ouvrage existant, des études géotechniques de conception et/ou d'exécution ainsi qu'un suivi et une supervision géotechniques seront réalisés ultérieurement, conformément à l'enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (étape 2 et/ou 3).

SCHÉMA D'ENCHAÎNEMENT DES MISSIONS GÉOTECHNIQUES
(extrait de la norme NFP 94-500 - Novembre 2013)

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Étude géotechnique préalable (G1)		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Etude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisses, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Étude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-Projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Études géotechniques de réalisation (G3/G4)		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Etude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Etude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage	Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux		
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant	Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés	Fonction de l'élément géotechnique étudié

HYDROGÉOTECHNIQUE

