



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document à accès immédiat

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

Rapport provisoire

RP-71257-FR

24 novembre 2021

Expertise réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Crastes de Paulet F., Laurencelle M.

Vérificateur :

Nom : J-C. MARECHAL

Fonction : Responsable de l'unité
Nouvelles Ressources en Eau

Date : 21/10/2021

Signature :

Approbateur :

Nom : S. BUSCHAERT

Fonction : Directeur Auvergne – Rhône -
Alpes du BRGM

Date : 22/10/2021

Signature :

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

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

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

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

Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi 78-753 du 17/07/78. Passé ce délai, il devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande.

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

Votre avis nous intéresse

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

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Hydrogéologie, eau souterraine, tunnel, ferroviaire, train, fret, galerie souterraine, DHI, réseau de surveillance, TELT, Lyon-Turin, Aussois, Avrieux, Bramans, Val-Cenis, Fourneaux, Le Freney, Modane, St-André, St-Julien-Montdenis, St-Martin-d'Arc, St-Michel-de-Maurienne, St-Martin-la-Porte, Villarodin-Bourget.

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

Crastes de Paulet F., Laurencelle M. (2021) – Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines. Rapport provisoire. **RP-71257-FR**, 118 p., 23 fig., 14 tab., 4 ann., 1 CD

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-01/04/2021

Synthèse

La liaison ferroviaire transalpine Lyon (France) – Turin (Italie) est un projet de ligne de chemin de fer mixte voyageurs/fret, long de 230 km et traversant les Alpes. En raison de plusieurs contraintes (relief, géologie, réseau ferré existant...), le projet de liaison ferroviaire inclut la réalisation de plusieurs tunnels à travers les Alpes. Le creusement de galerie/tunnel pouvant avoir une influence sur le fonctionnement des eaux souterraines, et donc sur les usages existants (eau potable, usage industriel, irrigation, etc.), un réseau de surveillance des eaux souterraines a été mis en place durant les années 1990. D'abord érigé pour répondre à un besoin de connaissances des ressources en eau souterraine, **ce réseau eu ensuite pour vocation : la surveillance des impacts éventuels pendant les travaux de creusement puis durant l'exploitation de la liaison ferroviaire.**

Le sujet étant complexe et spécifique, la DDT 73 a sollicité un accompagnement scientifique par le BRGM, avec pour objectif d'assurer une expertise et une analyse de la pertinence du réseau de suivi des eaux souterraines. Ce travail s'inscrit dans l'optique d'une révision de l'autorisation existante fin 2021 par la DDT73.

Au regard des documents transmis par les différents intervenants (DDT, ARS, communes, TELT), le BRGM a organisé une collaboration entre plusieurs agents du centre technique d'Orléans et de la direction régionale Auvergne Rhône Alpes afin de réaliser, dans les délais impartis, un travail d'analyse et d'expertise suivant plusieurs axes :

- L'analyse des évolutions de la composition du réseau de suivi des eaux souterraines depuis 1994 ;
- La compréhension et l'analyse de la méthode « DHI » mise au point dans le cadre du projet du tunnel Lyon-Turin ;
- L'analyse des chroniques de débit par des méthodes de traitement du signal ;
- L'examen des protocoles d'acquisition, de contrôle, de sauvegarde et de transmission des données acquises par TELT ;
- Le traitement et la synthèse des demandes d'ajout/suppression de points de surveillance, exprimées par les collectivités et des services de l'Etat à l'automne 2021.

Les différents réseaux de suivi hydrogéologique établis au fil des années en lien avec le projet Lyon-Turin ont connu des évolutions, résumées dans ce rapport. Les réseaux mentionnés dans le présent rapport sont, en ordre chronologique de création ou de proposition :

1. Réseau d'auscultation hydrogéologique de TELT (première définition en 1994) ;
2. Réseau prescrit par l'arrêté préfectoral du 04/03/2011 ;
3. Réseau de surveillance amélioré (propositions d'évolutions formulées très récemment par TELT) ;
4. Réseau de surveillance proposé dans cette expertise.

Le suivi rétrospectif des évolutions des réseaux de suivi apparaît cependant difficile. Au regard des enjeux industriels sur un chantier tel que le projet Lyon-Turin, il paraît pertinent qu'un tableau synthétique reprenant l'ensemble des points de suivi relatif aux eaux souterraines, et ce depuis la création du premier réseau en 1994, soit créé puis régulièrement mis à jour, afin d'éviter entre autres que l'abandon de certains points de suivi soit mal compris et donc mal perçu par les acteurs locaux.

L'analyse de la méthode « DHI » montre que cette méthode repose sur un schéma conceptuel solide, a été éprouvée par différents tests et a connu plusieurs évolutions au cours du projet. Les évolutions récentes de la méthode DHI apparaissent pertinentes. Les principales actions recommandées pour consolider l'application de la méthode DHI au projet Lyon-Turin sont : de réaliser prochainement un retour d'expérience dès que l'excavation du tunnel de base (TdB) sera suffisamment avancée afin de valider plus spécifiquement l'indice DHI TdB, et de rassembler en un document l'argumentaire scientifique justifiant les choix faits lors de la conceptualisation du système aquifère – tunnel traité par la méthode DHI.

Les 126 chroniques de suivi du débit qui étaient disponibles sur le Portail Environnemental de TELT (ne comprenant toutefois que 85 des 101 sources du réseau prescrit) ont été analysées statistiquement et visuellement afin d'apporter des éléments de description, de compréhension et de qualification concernant les données de débit. Les résultats de ces analyses mettent en évidence des problèmes de continuité insuffisante du suivi, d'imprécision des mesures et de non-quantification des débits très élevés pour plusieurs points d'eau. Près de 75% des chroniques examinées ont une exploitabilité réduite à cause d'un ou plusieurs de ces problèmes. Néanmoins, l'historique des débits mesurés est jugé quand même exploitable dans 111 des 126 chroniques examinées. Le problème décelé le plus fréquemment étant la discontinuité du suivi, les recommandations formulées suite à cette analyse vont dans le sens d'effectuer un suivi hydrogéologique beaucoup plus régulier des points d'eau.

Concernant les modes de mesure des différents paramètres (débit, hauteur d'eau, température, conductivité électrique), l'adéquation des moyens est majoritairement correcte. Le point faible principal réside dans l'utilisation d'une estimation du débit (jaugeage) par empotement (à l'aide d'un seau et d'un chronomètre) pour plusieurs captages alors que son utilisation est conseillée pour des débits inférieurs à 100 L/min. 46 captages présentent régulièrement des débits supérieurs, entraînant une incertitude importante sur l'estimation du débit, et par conséquent des difficultés quant à la mesure d'un éventuel impact des travaux de TELT. Il paraît donc nécessaire que, au cas par cas, une solution technique alternative soit recherchée. Sans influence directe sur la composition du réseau de surveillance, la mise en place progressive de l'automatisation des mesures et leur télétransmission apparaissent comme une étape essentielle au regard des enjeux, en particulier celui de la détection d'éventuel impact des travaux souterrains.

Quant à l'évolution du réseau de surveillance des eaux souterraines, le BRGM a pris en compte les demandes exprimées par les collectivités (33 ajouts) et les services de l'Etat (DDT : 18 ajouts, 4 suppressions, etc. ; ARS : 66 captages identifiés), et réalisé un travail supplémentaire d'analyse (suppression des doublons, des sites non localisés, et des points situés à l'ouest de St-Julien-Mont-Denis).

Après un travail d'analyse, le BRGM propose un réseau de surveillance à partir des 177 points, soit un ajout de 46 points par rapport au réseau de surveillance actif composé de 131 points (dont 101 sources avec un suivi prescrit par arrêté). Ce dénombrement n'est probablement pas définitif puisqu'un travail supplémentaire de confirmation/sélection parmi les nouveaux points possibles est identifié comme nécessaire après la remise du présent rapport. Ce travail devra être mené de façon collégiale entre les différents acteurs du territoire (DDT, ARS, collectivités, TELT). En l'état actuel, le réseau proposé par le BRGM et le réseau actif (d'après la DDT) partagent 110 points en commun.

Le lecteur trouvera les recommandations propres à chaque axe de travail, en fin de chaque chapitre ou sous-chapitre du présent rapport.

Sommaire

SYNTHESE.....	3
SOMMAIRE	5
LISTE DES FIGURES	6
LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES ANNEXES	8
1. INTRODUCTION.....	9
1.1. CONTEXTE.....	9
1.2. OBJECTIFS	10
1.3. PERTINENCE D'UN RESEAU DE SURVEILLANCE.....	11
1.4. RESERVES RELATIVES AU PRESENT TRAVAIL.....	12
2. ANALYSE DU RESEAU DE SUIVI HYDROGEOLOGIQUE EXISTANT	13
2.1. DONNEES DISPONIBLES POUR L'EXPERTISE	13
2.2. HISTORIQUE D'EVOLUTION DU RESEAU DE SUIVI HYDROGEOLOGIQUE	14
2.2.1. Analyse.....	14
2.2.2. Recommandations relatives à l'historique du réseau	20
2.3. ANALYSE DU DHI	20
2.3.1. Définition générale de l'indice « DHI »	20
2.3.2. Composantes nécessaires au calcul du DHI.....	21
2.3.3. Echelles de normalisation des composantes du DHI.....	23
2.3.4. Formules de calcul du PI puis du DHI	26
2.3.5. Classifications DHI.....	27
2.3.6. Comparaison des classifications DHI TdB de l'APR2006 versus du PRF 2013-2017	29
2.3.7. Avis général sur la méthode DHI.....	30
2.3.8. Recommandations relatives à la méthode DHI	33
2.4. ANALYSE DES DONNEES DE SUIVI PAR TRAITEMENT DU SIGNAL.....	33
2.4.1. Données, approche, méthodes et outils utilisés	33
2.4.2. Résultats de l'analyse	39
2.4.3. Conclusions sur l'exploitabilité des données de suivi avec un bilan par commune.....	51
2.4.4. Recommandations relatives à la qualité des chroniques de suivi	53
3. PRECONISATIONS CONCERNANT L'AMELIORATION DU RESEAU DE SUIVI HYDROGEOLOGIQUE EXISTANT.....	55
3.1. PROTOCOLE D'ACQUISITION DES DONNEES	55
3.1.1. Constat réalisé à partir des rapports et d'entretiens avec TELT	55
3.1.2. Constat à partir des graphiques et tableaux transmis par TELT et la DDT aux communes en juin 2021	59
3.1.3. Recommandations	59
3.2. CONTROLE, TRAITEMENT ET SAUVEGARDE DES DONNEES	61
3.2.1. Constat	61
3.2.2. Recommandations	61
3.3. COMPOSITION DU RESEAU DE SUIVI.....	63
3.3.1. Synthèse des demandes exprimées par les collectivités.....	63
3.3.2. Synthèse des demandes exprimées par les services de l'Etat	64
3.3.3. Sites à ajouter/supprimer des deux listes transmises.....	65
3.3.4. Sites nécessitant une action/étude complémentaire.....	66

3.3.5.	Commentaires	67
3.3.6.	Proposition de composition pour le réseau de surveillance des eaux souterraines	67
4.	CONCLUSION.....	71
5.	BIBLIOGRAPHIE	75

Liste des figures

Figure 1 : Coupe schématique du tunnel entre St-Jean-de-Maurienne et Susa (Source: TELT). 9

Figure 2 : DUP du tracé du tunnel et zone-tampon de 2 km de celle-ci [Sources : OSM, TELT]10

Figure 3 : Localisation des points de surveillance des eaux souterraines dans la moitié occidentale de la zone d'étude [Sources : OSM, DDT]..... 18

Figure 4 : Localisation des points de surveillance des eaux souterraines dans la moitié orientale de la zone d'étude [Sources : OSM, DDT]..... 19

Figure 5 : (a) Matrice d'interactions binaires, (b) Matrice d'interactions globales et (c) poids des 4 variables fondamentales par rapport au potentiel de drainage de la galerie (tunnel), à la base de la méthode DHI..... 21

Figure 6 : Matrice des interactions entre les 4 variables fondamentales du système aquifère – tunnel considérées dans l'évaluation du potentiel de drainage d'une section de tunnel (résultat intermédiaire PI), et facteurs clés liés au point d'eau appliqués pour estimer le risque au droit du point d'eau, telle que définie dans la première version de la méthode DHI publiée en 2001 [Dematteis et al., 2001] 22

Figure 7 : Conceptualisation de l'effet topographique (facteur clé ET) : a) Schéma conceptuel illustrant 4 localisations différentes du point d'eau et 2 positions relatives de la galerie et de la nappe libre impactée (cas 1 / 2 : la ligne horizontale indiquant la cote de la galerie) ; b) valeurs considérées pour le calcul de l'ET dans l'APR2006 [LTF, 2004c] ; c) valeurs pour le calcul de l'ET dans le PRF [TELT, 2013]..... 26

Figure 8 : Correspondance partielle des classes DHI entre les versions initiale, APR2006 et PRF 2013-2017 de la méthode DHI [illustration adaptée de la figure 1 du rapport du PRF : TELT, 2013] 28

Figure 9 : Exemple de résultat graphique d'une analyse de la tendance linéaire d'une chronique de débit..... 36

Figure 10 : Exemple d'analyse spectrale : a) Chronique préfiltrée des débits du point 19,1 analysée ; b) Périodogramme et son interprétation en termes de classe de cyclicités 38

Figure 11 : Longueur des chroniques de suivi du débit 40

Figure 12 : Résultats de l'analyse des lacunes dans chroniques de débits : (en haut) Lacunes dans les séries temporelles agrégées par mois ; (au milieu) Lacunes dans les séries agrégées

par année ; (en bas) Comparaison saisonnière du taux de lacunes durant hautes versus basses eaux.	41
Figure 13 : Résultats de l'analyse de redondance des valeurs numériques de la chronique, une des manifestations de l'imprécision des mesures	42
Figure 14 : Fréquence des débits trop importants pour être quantifiés, dans les chroniques	43
Figure 15 : Exemple d'une chronique avec une fréquence élevée de débits non quantifiés.....	43
Figure 16 : Valeurs extrêmes dans les chroniques : a) Fréquence ; b) Boxplots sur lesquels se base la détection des valeurs extrêmes, ici l'exemple de la chronique du point 49	44
Figure 17 : Ruptures détectées sur les 24 chroniques ayant une rupture qualifiée de significative par le test de Pettitt et associée à une diminution (significative) du débit moyen : a) Distribution de l'année de la rupture détectée (1 par chronique) ; b) Année de rupture et taux de diminution du débit médian associés.	47
Figure 18 : Tendances linéaires générales des chroniques, évaluées selon la méthode non paramétrique de la pente de Sen et résumées par la variation totale du débit au cours de la période de suivi entière : a) Facteur de variation totale de la tendance = débit d'après la tendance à la fin ÷ débit au début de la période de suivi, donc < 1 indique une tendance à la baisse ; b) Variation totale de la tendance = débit d'après la tendance à la fin – débit au début de la période de suivi, exprimé en L/min et par intervalle.....	48
Figure 19 : Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase de chantier	56
Figure 20: Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase d'exploitation	57
Figure 21: Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase d'exploitation	58
Figure 22 : Localisation des points proposés par le BRGM pour la surveillance des eaux souterraines dans la moitié occidentale de la zone d'étude [Sources : OSM, TELT].....	68
Figure 23 : Localisation des points proposés par le BRGM pour la surveillance des eaux souterraines dans la moitié orientale de la zone d'étude [Sources : OSM, TELT]	69

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de nombre de points de surveillance par commune, dans le réseau prescrit par l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 (Source: DDT)	15
Tableau 2 - Répartition par commune du nombre de points de surveillance (actifs et inactifs) du réseau actuel de surveillance amélioré des eaux souterraines (Source: DDT)	16
Tableau 3 : Chronologie approximative des travaux de creusement réalisés à ce jour (Source : TELT)	17

Tableau 4 : Définitions initiales des échelles de normalisation des variables et facteurs clés du système aquifère – tunnel [extrait de l'acte de conférence de Dematteis et al., 2001 ; les noms abrégés utilisés dans le présent document ont été ajoutés tout à gauche].....	24
Tableau 5 : Définitions actuelles des échelles de normalisation des variables et facteurs clés du système aquifère / cours d'eau – tunnel [adapté des annexes 1 et 2 du rapport du PRF : TELT, 2013].....	25
Tableau 6 : Changements de classe DHI TdB (tunnel de base) entre les résultats des phases d'APR2006 et du PRF 2013-2017 du projet Lyon-Turin	30
Tableau 7 : Nombre et part de points perturbés par classe DHI Total APR	32
Tableau 8 : Nombre de chroniques concernées par différents facteurs limitant l'applicabilité des analyses et/ou tests de tendance, de rupture ou de cyclicités	45
Tableau 9 : Résultat des tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt.....	46
Tableau 10 : Nombre de chroniques qui satisfont toutes, certaines ou aucune des conditions idéalement requises pour effectuer une analyse probabiliste destinée à estimer des indicateurs (seuils) de gestion des débits.....	46
Tableau 11 : Cyclicité principale identifiée dans le signal des chroniques pouvant faire l'objet d'une analyse spectrale	49
Tableau 12 : Bilan des problèmes de Continuité (!C), de Précision (!P) et de Quantification (!Q) décelés ou confirmés lors de l'examen visuel des 126 chroniques de débit, calculé par commune puis au total	53
Tableau 13 : Statut de la donnée piézométrique (Source: eaufrance / ADES)	62
Tableau 14 : Qualification du résultat (Source: eaufrance / ADES)	62

Liste des annexes

ANNEXE 1 COMPOSITION DU RESEAU ACTUEL ET PROPOSITIONS	77
ANNEXE 2 RESULTATS DETAILLES DE L'EXAMEN VISUEL DES 126 CHRONIQUES DE DEBITS TRAITEES	97
ANNEXE 3 COMPOSITION DU RESEAU PROPOSE PAR LE BRGM.....	107
ANNEXE 4 LISTE DES ANNEXES ELECTRONIQUES JOINTES AU RAPPORT	117

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La liaison ferroviaire transalpine Lyon (France) – Turin (Italie) est un projet de ligne de chemin de fer mixte voyageurs/fret, long de 230 km et traversant les Alpes. Son tracé a été redécoupé en 3 sections : une section française de 140 km confiée à SNCF Réseau, une section commune franco-italienne de 84 km confiée à Tunnel Euralpin Lyon Turin (TELT SAS) à partir de 2015, une section italienne de 46 km à RFI (Rete ferroviaria italiana). En raison de plusieurs contraintes (relief, géologie, réseau ferré existant...), le projet de liaison ferroviaire inclut la réalisation de plusieurs tunnels (Figure 1). Le coût du projet est estimé à 8,6 Mds d'euros, répartis entre l'UE (40%), l'Italie (35%) et la France (25%) [Source : [TELT](#)]. En France, le projet de tunnel ferroviaire a fait l'objet d'une DUP (Déclaration d'Utilité Publique) en 2007, prorogée en 2017 pour s'étendre jusqu'en 2022. La DUP inclut un tracé de l'emprise des travaux (Figure 2).

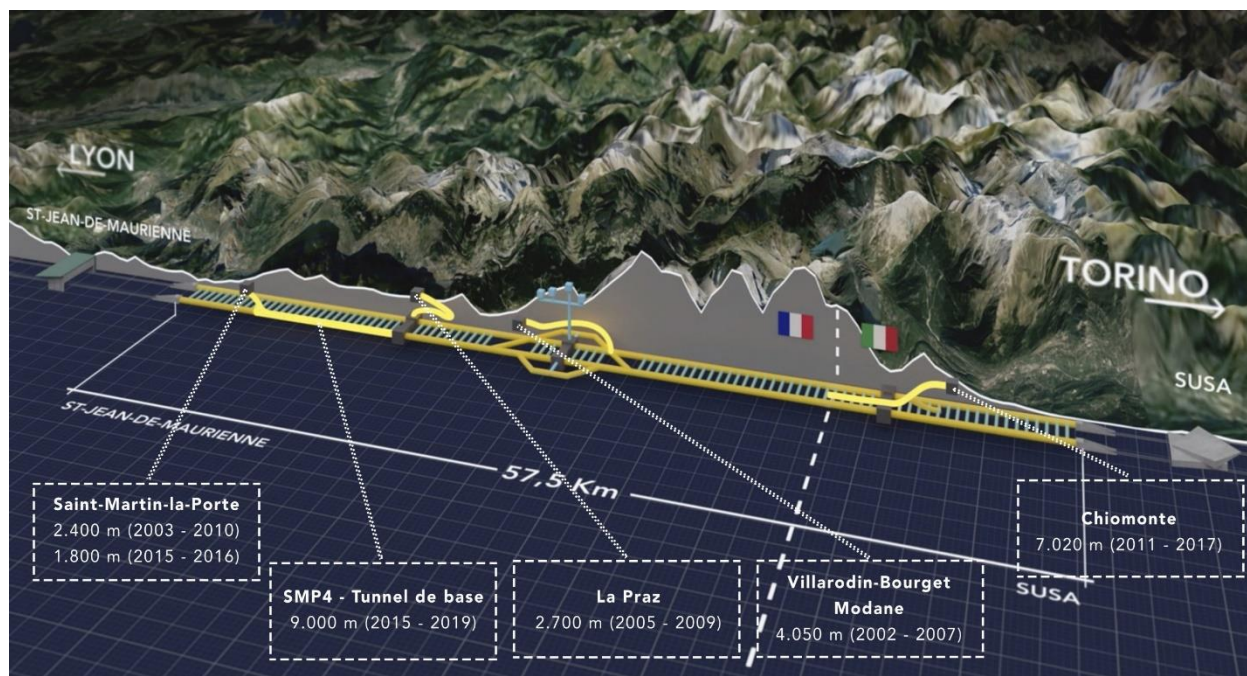


Figure 1 : Coupe schématique du tunnel entre St-Jean-de-Maurienne et Susa (Source: TELT)

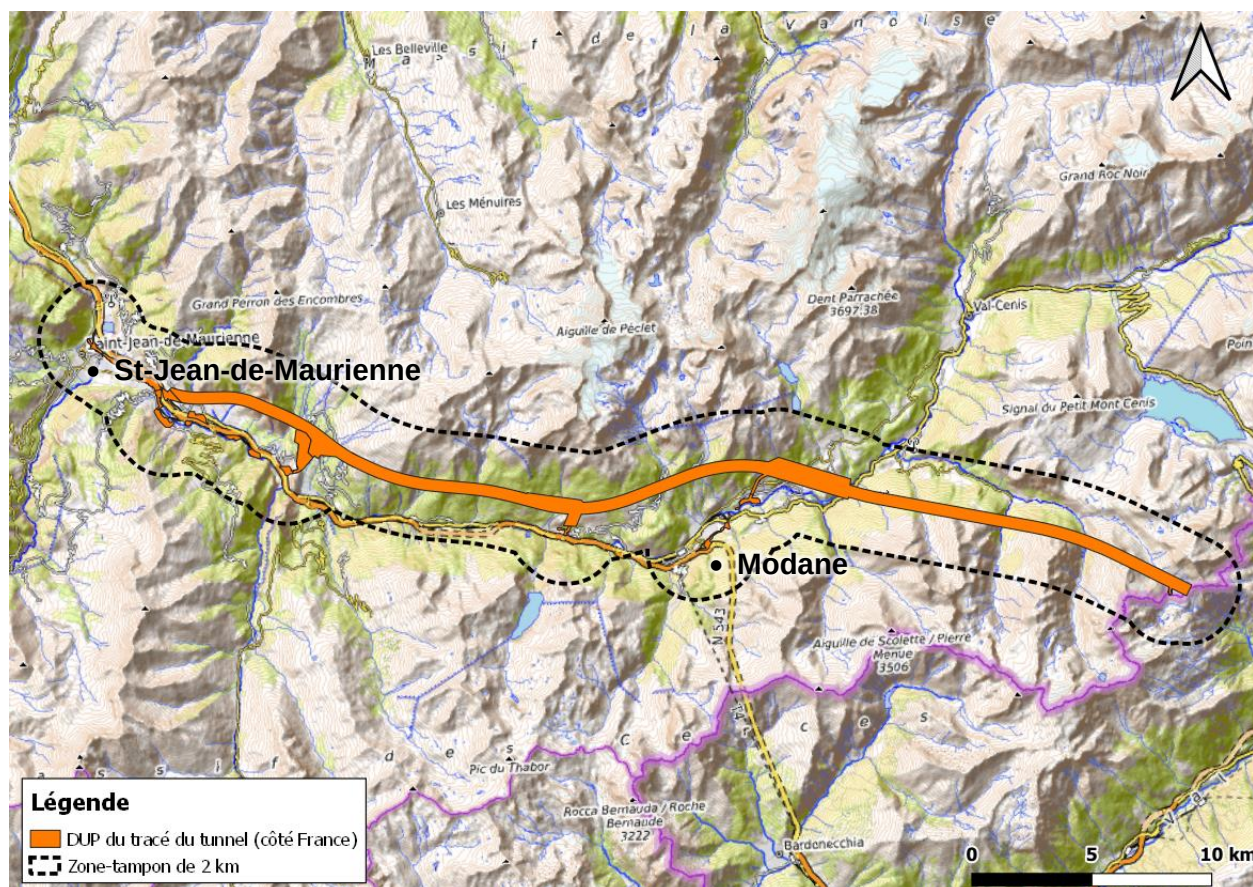


Figure 2 : DUP du tracé du tunnel et zone-tampon de 2 km de celle-ci [Sources : OSM, TELT]

Le creusement des sections en tunnel est susceptible de perturber le fonctionnement du réseau hydrologique souterrain, alimentant les sources et captages d'eau en surface. Ce sujet a été pris en compte dès la conception du projet, afin de comprendre la structure du réseau, de suivre toute évolution susceptible d'intervenir et de déclencher la mise en place de mesures appropriées, pour maintenir les usages de l'eau. Ce suivi est particulièrement sensible pour la population et les collectivités locales, car il constitue la base sur laquelle s'appuie la garantie que les usages de l'eau seront préservés. La conception du réseau de suivi et l'analyse des données qui en seront issues nécessitent une bonne maîtrise technique des acteurs responsables, en premier lieu la DDT de Savoie (garante au travers des autorisations données au projet, du dispositif de suivi et de la bonne prise en compte des éventuels impacts notamment ceux nécessitant des mesures appropriées de compensation pour préserver les usages) et, en second lieu, les communes et intercommunalités, chargées d'assurer l'approvisionnement en eau potable des citoyens et de défendre l'accès à cette ressource de manière générale.

1.2. OBJECTIFS

Le sujet étant complexe et spécifique, il nécessite un accompagnement scientifique. Il a donc été proposé qu'un appui dans la durée soit demandé au BRGM, avec pour objectif d'assurer la pertinence du réseau de suivi mis en œuvre et d'appuyer les acteurs locaux dans l'analyse et la compréhension des données, qui seront mises à disposition par le projet. La maîtrise d'ouvrage de cette intervention est confiée à la DDT de Savoie.

Le choix du BRGM s'appuie sur les missions attribuées à cet établissement public industriel et commercial, sous tutelle des ministères en charge de la recherche, de l'écologie et de l'économie,

qui relèvent en particulier : de l'appui aux politiques publiques, de l'expertise scientifique, de la collecte, de la capitalisation et de la diffusion des connaissances, dans le domaine des sciences de la Terre et des risques géologiques et anthropiques.

Dans le cadre de ces missions, une coopération a été mise en place entre la DDT et le BRGM, cofinancée par le FAST (Fonds d'Accompagnement et de Soutien Territorial), afin d'accompagner la DDT et les collectivités du territoire vers une maîtrise technique et scientifique de la problématique lien tunnel -ressources en eaux souterraines et de permettre au BRGM d'approfondir sa connaissance et son expérience sur la base d'un projet majeur de tunnel.

L'assistance technique fournie par le BRGM auprès de la DDT73 comprend deux volets. Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du volet 1 de la convention n° C 219090 entre le BRGM et TELT (Tunnel Euralpin Lyon-Turin), dont l'objectif est l'expertise de la pertinence du réseau de suivi autorisé (des eaux souterraines) pour la détection des impacts éventuels du projet Lyon-Turin et la rédaction de propositions et/ou recommandations relatives à ce même réseau. Le second volet interviendra annuellement de 2022 à 2025 ; il s'intégrera au groupe technique du comité de management environnemental, dédié au sujet eau souterraine, qui sera réuni chaque année, sur la base de l'expertise faite par le BRGM du rapport annuel de suivi des eaux souterraines produits par TELT. Ce travail s'inscrit dans l'optique d'une possible révision de l'autorisation existante par la DDT73.

1.3. PERTINENCE D'UN RESEAU DE SURVEILLANCE

Les facteurs contrôlant un réseau de surveillance des eaux souterraines sont nombreux : densité/localisation des points de mesure au regard de la taille du chantier (ou de l'ouvrage), pérennité, représentativité de chaque station par rapport par à un secteur géographique et/ou une entité hydrogéologique (ex : un aquifère superficiel), paramètre(s) et fréquence(s) de mesure, etc. Ces facteurs doivent être étudiés en fonction des objectifs identifiés à la construction du réseau de surveillance. Pour un réseau relatif aux eaux souterraines, les objectifs peuvent être variés : gestion de la production d'eau potable, suivi de la sécheresse, rapportage européen dans le cadre de la DCE, etc. De façon simplifiée, un réseau de surveillance peut être considéré comme pertinent lorsque les moyens techniques sont conformes à plusieurs contraintes, dont les plus importantes sont les objectifs de la surveillance.

Concernant le projet TELT, il est à noter que les objectifs ont évolué entre les années 1990 et la période actuelle, passant d'un besoin de connaissances des ressources à celui de la surveillance des impacts éventuels pendant les travaux de creusement puis durant l'exploitation du tunnel (§ 2.2).

Afin de faciliter la lecture du présent rapport, il apparaît nécessaire d'énumérer les différents réseaux de suivi hydrogéologique établis au fil des années en lien avec le projet Lyon-Turin. Ces réseaux, détaillés plus bas (§ 2.2 et 3.3), sont, en ordre chronologique de création ou de proposition :

- Réseau d'auscultation hydrogéologique de TELT (première définition en 1994) ;
- Réseau prescrit par l'arrêté préfectoral du 04/03/2011 ;
- Réseau de surveillance amélioré (propositions d'évolutions formulées très récemment par TELT) ;
- Réseau de surveillance proposé dans cette expertise.

1.4. RESERVES RELATIVES AU PRESENT TRAVAIL

Comme indiqué précédemment (§ 1.3), la construction d'un réseau de surveillance correspond à un arbitrage entre des objectifs, des moyens techniques et des contraintes environnementales. Dans le cadre de la présente expertise, le BRGM s'est attaché à étudier la pertinence des moyens techniques au regard des objectifs de surveillance des impacts, d'abord quantitatifs puis – de façon secondaire – qualitatifs, du chantier TELT sur les eaux souterraines. Il est donc apparu nécessaire de :

- Comprendre l'évolution du réseau de surveillance au cours du temps et l'influence exercée par le DHI sur sa composition ;
- Analyser les données existantes, notamment à l'aide d'outils du traitement du signal ;
- Comprendre le protocole actuel de surveillance, ainsi que toute la chaîne de valorisation de la donnée depuis le point de mesure jusqu'à sa mise à disposition pour l'utilisateur final.

Ces trois points peuvent être traduits de façon simplifiée sous la forme de questions : les choix relatifs à la composition du réseau, notamment l'utilisation du DHI, étaient-ils pertinents au regard des objectifs du réseau ? Le mode opératoire actuel et les données collectées à ce jour permettent-ils de détecter correctement un impact (passé, actuel et futur) du chantier ? La chaîne de transmission/valorisation de la donnée permet-elle une sauvegarde et un usage correct de la donnée ? Est-elle cohérente avec les objectifs ?

Parmi les contraintes relatives au présent travail (cadre juridique, accès aux données de TELT, organisation des échanges avec les services de l'Etat et les communes concernées par le projet ferroviaire...), la volonté des acteurs locaux (préfecture, DDT, communes...) d'obtenir un rapport permettant une mise à jour de l'arrêté préfectoral d'ici la fin de l'année 2021 (reportée ensuite au début de l'année 2022) a nécessité de sélectionner les cibles de la présente expertise réalisée par le BRGM. Ainsi, aucune visite de terrain n'a pu être organisée et l'ensemble du travail a été réalisé à partir de rapports et/ou de données transmises par différents intervenants (TELT, DDT 73, etc.). Le travail ne saurait donc être considéré comme exhaustif, et servira probablement comme point de départ à un débat technique contradictoire entre TELT et la DDT quant à la mise à jour du réseau relatif aux eaux souterraines.

2. Analyse du réseau de suivi hydrogéologique existant

2.1. DONNEES DISPONIBLES POUR L'EXPERTISE

Avant le lancement de la présente analyse, la DDT a intégré le BRGM en tant que destinataire des courriers électroniques envoyés aux communes. Chaque courrier contenait : un tableau des points de réseau réglementaire de surveillance des eaux souterraines (aux formats PDF et XLSX), une carte de localisation (au format PDF) et un courrier d'accompagnement (au format PDF).

Au lancement de l'expertise, TELT a fourni au BRGM plusieurs documents relatifs aux différentes phases du projet TELT, à la méthode DHI et à la définition puis l'évolution du réseau de suivi hydrogéologique associé au projet. Ces documents sont cités dans la bibliographie du présent rapport : Rampnoux, 1995 ; Rampnoux, 1996 ; Rampnoux & Dzikowski, 2002 ; LTF, 2004a ; LTF, 2004b ; LTF, 2004c ; LTF, 2005 ; LTF, 2013 ; TELT, 2013 ; TELT, 2021b.

Un dossier de 13 fichiers PDF intitulés « Données historiques relatives au suivi des sources, mise à jour mars 2021 » a également été fourni au BRGM, indirectement par TELT via la DDT 73, soit un fichier par commune. Ces documents listent les points suivis dans la commune, incluent une photo de chaque ouvrage suivi, l'éventuel historique des travaux et modifications de points de repère, des commentaires et, surtout, l'historique complet des chroniques brutes de débit, conductivité et température de l'eau accumulé jusqu'en mars 2021. L'historique de mesures est rapporté sous la forme de tableaux bruts de valeurs numériques (au pas mensuel) et aussi par des graphiques simples. Les fichiers PDF mis à la disposition du BRGM sont :

- 1-Aussois-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 2-Avrieux-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 3-Bramans-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 4-Fourneaux-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 5-Le Freney-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 6-Modane-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 8-Orelle-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 9-St-André-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 10-St-Julien-Montdenis-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 11-St-Martin d'Arc-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 12-St-Martin-la-Porte-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 13-St-Michel de Maurienne-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf
- 18-Villarodin-Bourget-Graphes QTC et tableaux de valeurs.pdf

Un document présentant la « Liste des sources suivies par TELT » a été fourni par TELT via la DDT 73, cette dernière ayant vérifié ladite liste avant de l'envoyer au BRGM. Cette liste a été fournie d'une part dans un rapport au format PDF [TELT, 2021a] et d'autre part dans un classeur Excel. Le contenu du fichier Excel a été copié et joint au présent rapport (Annexe 1).

De plus, après la signature d'un engagement de confidentialité, le BRGM a obtenu un accès au Portail Environnemental de TELT, ce qui a permis de consulter, visualiser et télécharger diverses données essentiellement relatives à la composante « Eau ». Néanmoins, le service de support du Portail et des échanges directs avec TELT ont permis au BRGM d'obtenir les fichiers suivants :

- Un export de 126 chroniques de suivi du débit (au format Excel) ;
- Des fichiers SIG sur diverses thématiques (Hydrogéologie, Géologie, DHI, Projet de tracé du tunnel et autres ouvrages incluant des informations sur la chronologie des travaux effectués à ce jour, etc.)

Par ailleurs, l'ARS a transmis un fichier Excel contenant l'ensemble des captages localisés dans un rayon de 2 km autour des installations déclarées dans le cadre de la DUP du tunnel ferroviaire. Ce fichier contient pour les 67 captages : la désignation, les coordonnées géographiques, le type d'ouvrage (puits, forage, prise d'eau dans un ruisseau...), le type d'usage (AEP, alimentaire, thermal, etc.), la commune, le code Sise Eaux, le type de ressource exploitée (eau souterrain, eau superficielle...), etc. En parallèle, le BRGM a profité des possibilités du serveur cartographique Atlasanté (atlasante.fr – Min. de la Santé) afin de récupérer des informations sur les captages situés en dehors de la zone-tampon de 2 km.

2.2. HISTORIQUE D'EVOLUTION DU RESEAU DE SUIVI HYDROGEOLOGIQUE

2.2.1. Analyse

Selon les études disponibles [Rampnoux, 1995 ; TELT, 2021b], le premier réseau d'auscultation hydrogéologique de TELT a été établi en 1994 à partir d'une sélection effectuée initialement parmi un inventaire de 505 points d'observation au départ. Ce premier réseau comptait 16 ruisseaux et 341 points relatifs aux eaux souterraines (162 captages communaux, 94 captages privés, 85 sources non captées ; le suivi pouvant être : mensuel, trimestriel ou temporaire).

Face aux difficultés d'accès à certains sites en période hivernale, une nouvelle sélection a été effectuée en 1995. Alors que le premier réseau comptait 341 points relatifs aux eaux souterraines, 125 d'entre eux se trouvaient à une altitude supérieure ou égale à 1800 m. Parmi ces 125 sites, 28 ont finalement été retenus, en juin 1996, comme « représentatifs de l'ensemble des parties élevées des bassins versants » [Rampnoux, 1996]. Il est à noter que la même étude [Rampnoux, 1996] contient des résultats relatifs à des jaugeages sur des ruisseaux, des essais de traçage et des datations à l'aide de tritium.

En 2000-2001, un travail complémentaire [Rampnoux & Dzikowski, 2002] a repris le travail réalisé en 1999 qui proposait 460 points de mesure. Il en partage les conclusions mais va plus loin dans la suppression de points en s'appuyant sur plusieurs arguments : points dans des aquifères superficiels (souvent identifiés en altitude et considérés comme peu voire non influencés par le chantier), sources et forages aux débits très faibles subissant presque systématiquement des tarissements durant l'hiver ou en fin d'été, un point suffisant à représenter plusieurs points aux caractéristiques similaires (identifiées sur la période 1995-2000). *In fine*, les auteurs ont retenu 172 points de mesure¹, répartis sur 133 ouvrages « dont 14 situés à plus de 1800 mètres d'altitude, avec un pas de suivi mensuel pour 116, trimestriel pour 3 et temporaire pour 14 » [Rampnoux & Dzikowski, 2002].

En 2002-2005, une étude hydrogéologique a été réalisée par les groupement de bureaux d'études ARCADIS ESG – SEA Consulting – SILENE – BAPTENDIER notamment afin d'évaluer le risque de perturbations des sources et captages conséquentes au creusement du tunnel de

¹ Le rapport TELT [2021] concernant cette étape d'évolution du réseau avance plutôt le nombre de 176 points de mesure.

base et des descenderies du Lyon-Turin. La méthode DHI (*Drawdown Hazard Index* : cf. Section 2.3) a été appliquée à cette fin sur 305 points d'eau [TELT, 2021b]. Cette évaluation a comme objectif « d'identifier selon une méthode probabiliste les points d'eau présentant des risques élevés de tarissement et pour lesquels des mesures compensatoires doivent être étudiées » [TELT, 2021b].

En 2005-2007, une étude hydrogéologique d'Avant-Projet de Référence (APR) réalisée par ANTEA est « répartie du recensement des points d'eau saisis dans la base de données depuis le début des années 1994 soit 667 points », incluant des cours d'eau [LTF, 2005]. La méthode DHI a été appliquée à l'ensemble de ces points en calculant des indices liés à l'excavation des descenderies et du tunnel de base d'abord séparément, puis conjointement, produisant ainsi un « DHI TdB » (tunnel de base) et un « DHI Total ». Parmi ces 667 points, 194 ont fait l'objet d'une étude complémentaire car ils présentaient un risque non négligeable (classe DHI Total > 1) vis-à-vis des travaux de creusement du tunnel de base et/ou des descenderies. De ceux-ci, 87 points ont été estimés « à risque vis-à-vis du seul creusement du tunnel de base » et 107 points comme « présentant des risques vis-à-vis des seules descenderies » [LTF, 2005].

En 2011, l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 relatif à l'état initial et au suivi dans le cadre du projet Lyon-Turin précise que le réseau prescrit est constitué de 119 points de surveillance : 101 sources et 18 forages profonds. La répartition entre communes est présentée dans le tableau ci-contre.

Commune	Nombre de points
Avrieux	4
Aussois	7
Bramans (Val-Cenis)	7
Le Freney	5
Modane	4
Orelle	17
Saint-André	15
St-Jean-de-Maurienne	1
Saint-Julien-Montdenis	7
Saint-Martin-d'Arc	1
Saint-Michel-de-Maurienne	23
Saint-Martin-la-Porte	19
Villarodin-Bourget	9
Total	119

Tableau 1: Répartition de nombre de points de surveillance par commune, dans le réseau prescrit par l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 (Source: DDT)

De 2013 à 2017, une nouvelle étude hydrogéologique (d'abord un Projet de Référence : PR, puis un Projet de Référence Final, PRF) réévalue les probabilités de perturbations spécifiquement liées aux travaux d'excavation du tunnel de base, sur 655 points d'eau souterraine² et 27 points d'eau de surface [TELT, 2013]. Une nouvelle version de la méthode DHI est appliquée, qui répartit

² « Le point 318 fait partie du réseau du suivi, mais n'est plus en état de fonctionnement depuis le 24 septembre 2010 pour des raisons externes à la réalisation de la ligne ferroviaire. L'indice DHI n'a donc pas été calculé pour ce point, et par conséquent le total est ramené à 655. » [TELT, 2013]

les points entre 3 classes DHI TdB (vis-à-vis du seul creusement du tunnel de base) au lieu des 4 classes utilisées en 2005-2007 dans l'APR. Le rapport du PRF inclut une section « Retour d'expérience de l'excavation des descenderies » qui examine la cohérence entre les probabilités d'impact indiquées par les DHI évalués dans l'APR et les impacts réellement observés depuis [TELT, 2013]. Sur les 655 points d'eau souterraine caractérisés, 563 sont associés à un risque très faible à nul (DHI TdB = 1), 74 à un risque faible (DHI TdB = 2), 8 à un risque fort et 10 ont été impactés par les descenderies. Ces bilans, de même que quantité d'autres informations relatives au DHI, sont abordées dans la section suivante du présent rapport (cf. Section 2.3).

Actuellement, en 2021, le réseau d'auscultation hydrogéologique du chantier du Lyon-Turin, dont le suivi a été confié à GEOTEC, comprend 193 points de mesure dont 126 sources, 65 forages / piézomètres et 2 cours d'eau du côté français [TELT, 2021b]. Parmi ces points, 85 sources, 18 forages profonds, 21 piézomètres et les 2 cours d'eau font l'objet d'un suivi rapproché, toujours pour le côté français [TELT, 2021b]. Ce réseau d'auscultation comprend notamment tous les points du réseau prescrit par arrêté préfectoral en 2011.

Un réseau de surveillance « amélioré », correspondant au réseau prescrit augmenté de propositions d'ajustement formulées récemment par TELT, est également géré par ce dernier. Ce sont les données de suivi du débit de 126 points de ce réseau de surveillance amélioré (essentiellement des sources) qui font l'objet d'une analyse par traitement du signal dans la section suivante du chapitre (cf. Section 2.4).

Les cartes suivantes (Figure 3 et Figure 4) permettent de visualiser la répartition des 141 points actifs (131) et inactifs (10) du réseau actuel de surveillance amélioré des eaux souterraines, dont la DDT a transmis la localisation au BRGM en juin 2021.

Commune	Nombre de points
Avrieux	5
Aussois	5
Bramans (Val-Cenis)	9
Le Freney	2
Modane	5
Orelle	8
Saint-André	18
St-Jean-de-Maurienne	16
Saint-Julien-Montdenis	7
Saint-Martin-d'Arc	1
Saint-Michel-de-Maurienne	30
Saint-Martin-la-Porte	21
Villarodin-Bourget	14
Total	141

Tableau 2 - Répartition par commune du nombre de points de surveillance (actifs et inactifs) du réseau actuel de surveillance amélioré des eaux souterraines (Source: DDT)

Par ailleurs, la chronologie des travaux de creusement réalisés à ce jour a pu être résumée sur la base des informations SIG fournies par TELT à la demande du BRGM (Tableau 3). Noter que « ces informations restent relativement indicatives dans la mesure où selon les ouvrages la progression des creusements n'est pas linéaire et a pu connaître des périodes d'inactivité »

[TELT, 2021 : communication par mail]. Ce résumé n'est donc pas exhaustif ni détaillé, mais il donne un aperçu des principaux chantiers ayant pu impacter les points d'eau. Le croisement de ces informations (dates de creusement, localisation, longueur et progression estimée au cours du temps) avec la localisation de chacun des points d'eau du réseau de surveillance proposé n'est toutefois pas fait dans la présente expertise car au-delà de l'objectif.

Segment du chantier	Dates de creusement		Points kilométriques*		Longueur creusée* (km)
	début travaux	fin travaux	PK min. (km)	PK max. (km)	
Descenderie 3a SMP4	02-2015	12-2016	10	11	1.9
Descenderie LPR	01-2006	03-2009	20	22	3.2
Descenderie SMP	06-2003	07-2010	11	12	2.3
Descenderie VBM	07-2002	11-2007	30	33	4.0
TdB : tube sud partie 2 SMP4	04-2015	09-2019	11	20	8.6
TdB : tube sud partie 3b SMP4	01-2017	10-2021	10	12	11.0

SMP = Saint-Martin-la-Porte ; LPR = La Praz ; VBM = Villarodin-Bourget/Modane ; TdB = Tunnel de Base

* : Mesures spatiales estimées à partir de « Trace_creusements_2021-10_L93.shp » et « PK_Tracciato.shp » donc valeurs approximatives volontairement arrondies

Tableau 3 : Chronologie approximative des travaux de creusement réalisés à ce jour (Source : TELT)

RP-71257-FR – Rapport provisoire – 24 novembre 2021 18

RP-71257-FR – Rapport provisoire – 24 novembre 2021 19

2.2.2. Recommandations relatives à l'historique du réseau

Au regard des contraintes techniques, environnementales, et possiblement budgétaires, le réseau de surveillance des eaux superficielles et souterraines a connu de nombreuses évolutions depuis 1994. Cependant, le suivi de ces évolutions semble rétrospectivement difficile à la lecture des documents consultés par le BRGM. **Au regard des enjeux industriels sur un chantier tel que le projet Lyon-Turin, il paraît pertinent qu'un tableau synthétique reprenant l'ensemble des points de suivi relatif aux eaux souterraines, et ce depuis la création du premier réseau en 1994, soit créé puis régulièrement mis à jour, qui mentionnerait, d'une part la date et les raisons de l'ajout du point, et d'autre part, la date et les raisons de l'abandon du point (voire les références du rapport) le cas échéant.**

À titre d'exemple, le travail du BRGM concernant les piézomètres suivis dans le cadre du réseau ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines – <https://ades.eaufrance.fr>) fait l'objet d'un rapport annuel par bassin (ex : Orofino *et al.*, 2020 ; BRGM/RP-69794-FR). Dans ce document, figurent les évolutions du réseau (ancien/nouveau point, type d'intervention de maintenance...), les statistiques de chargement, etc.

Au regard des enjeux relatifs à la transparence et au partage de l'information, un tel tableau permettrait, entre autres, de conserver la justification de l'abandon de certains points de suivi, d'éviter des incompréhensions et de limiter le risque d'une perception négative par les acteurs locaux (à cause d'une difficulté à trouver une documentation justifiant l'abandon du point).

2.3. ANALYSE DU DHI

2.3.1. Définition générale de l'indice « DHI »

Un indice de probabilité de tarissement de la source appelé « DHI » (de l'anglais *Drawdown Hazard Index*) a été défini par SEA Consulting [Dematteis *et al.*, 2001]. Cet indice a été développé afin d'évaluer les risques de diminution de productivité (diminution du débit / niveau pouvant aller jusqu'au tarissement) de points d'eau souterraine situés à proximité d'ouvrages souterrains liés au creusement d'un tunnel en contexte montagneux. Sa création a été jugée nécessaire puisqu'il n'existait pas encore de méthode permettant « l'évaluation de l'impact du percement d'un tunnel sur les circulations d'eaux souterraines » [LTF, 2005]. Aussi, plus récemment, une variante de la méthode DHI a été développée (en adaptant la méthode originale) afin de pouvoir également évaluer un indice de probabilité d'impact sur des tronçons du réseau hydrographique, appelé « DHI réseau » [TELT, 2013].

La méthode DHI [Dematteis *et al.*, 2001 ; Torri *et al.*, 2007] a été utilisée dans le projet Lyon-Turin et décrite dès sa phase d'avant-projet sommaire (APS) [LTF, 2004c] afin de qualifier le risque auquel sont exposés les centaines de points d'eau composant le réseau de surveillance des ressources en eaux souterraines et superficielles situées à proximité des zones de creusement effectué ou projeté du tunnel Lyon-Turin (tunnel de base et descenderies).

La méthode DHI se base sur la théorie des systèmes, appliquée ici au milieu hydrogéologique alpin traité comme un « système aquifère – tunnel » composé d'un amas rocheux, de galeries creusées en son sein et de points d'eau [Hudson, 1992 ; Dematteis *et al.*, 2001 ; LTF, 2004c]. Cette approche systémique permet de représenter approximativement le système complexe à l'étude, par une matrice d'interactions binaires de cause à effet entre plusieurs variables

caractéristiques du système (Figure 5a). Des poids sont attribués à dire d'expert à chaque paire de variables jugées susceptibles d'interagir en utilisant par exemple « des lois empiriques ou analytiques » [Dematteis *et al.*, 2001]. Une matrice d'interactions globales (Figure 5b) est ensuite calculée à partir de la matrice d'interactions binaires afin d'en tirer le poids que les variables du système ont (Figure 5c) dans l'évaluation du potentiel de drainage de la galerie « PI » [LTF, 2004c]. Enfin, des facteurs clés liés au point d'eau et à sa localisation par rapport à la galerie sont appliqués au potentiel PI pour estimer le risque de perturbation du point d'eau. Ces composantes nécessaires au calcul du DHI sont présentées en détail dans la sous-section suivante (§ 2.3.2).

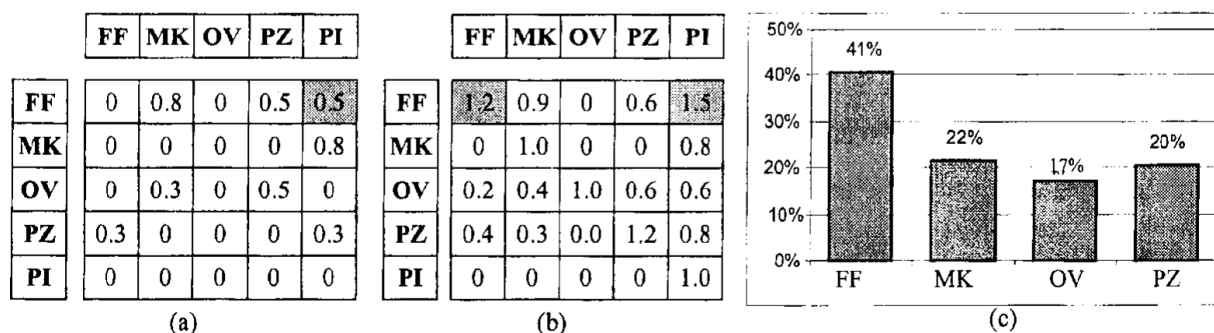


Figure 5 : (a) Matrice d'interactions binaires, (b) Matrice d'interactions globales et (c) poids des 4 variables fondamentales par rapport au potentiel de drainage de la galerie (tunnel), à la base de la méthode DHI

La méthode DHI appliquée au projet Lyon-Turin a connu des évolutions depuis sa publication initiale en 2001 : dans la définition, le nom ou par l'ajout de certaines variables ; dans les formules impliquées dans le calcul de l'indice brut (valeur décimale) ; et dans les valeurs seuils considérées pour transformer l'indice DHI brut en un « degré » (catégorie, classe) de risque. Trois versions de la méthode DHI ont ainsi pu être distinguées dans la documentation fournie ou citée par TELT :

- 1) Méthode DHI initiale de 2001, décrite dans l'acte de conférence publié dans le cadre du « AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress » [Dematteis *et al.*, 2001] ;
- 2) Méthode DHI présentée dans le rapport de l'APS 2002-2004 et utilisée dans la phase d'APR2006 [LTF, 2004c ; LTF, 2005] ;
- 3) Méthode DHI actuelle décrite dans le rapport du PRF 2013-2017 [TELT, 2013].

2.3.2. Composantes nécessaires au calcul du DHI

En un premier temps, 4 variables fondamentales sont utilisées pour décrire l'amas rocheux (les quatre premières cases noires en partant de la gauche dans la diagonale de la matrice de la Figure 6) et évaluer le potentiel d'écoulement d'eau dans le tunnel (*Potential of Inflow* : PI) conséquent aux travaux d'excavation (5^{ème} case). Le nombre et les définitions détaillées de ces variables fondamentales n'ont pas changé depuis la formulation initiale de la méthode DHI en 2001. La quantification des forces relatives des interactions entre variables fondamentales s'est faite à l'aide de lois empiriques ou analytiques lorsque possible, ou de manière plus qualitative et arbitraire (à dire d'expert) autrement [Dematteis *et al.*, 2001].

En un second temps, des « facteurs clés » liés spécifiquement au point d'eau et à son contexte sont considérés (cases à fond blanc ajoutées en partie droite de la Figure 6). Ces facteurs, censés

être indépendants entre eux³, multiplie le résultat intermédiaire PI (potentiel de drainage par le tunnel) pour évaluer cette fois la probabilité d'un impact hydrogéologique au point d'eau, c'est-à-dire le DHI. Le nombre et les définitions détaillées de ces facteurs clés ont changé depuis la première mouture de la méthode DHI. Les changements sont expliqués ci-après.

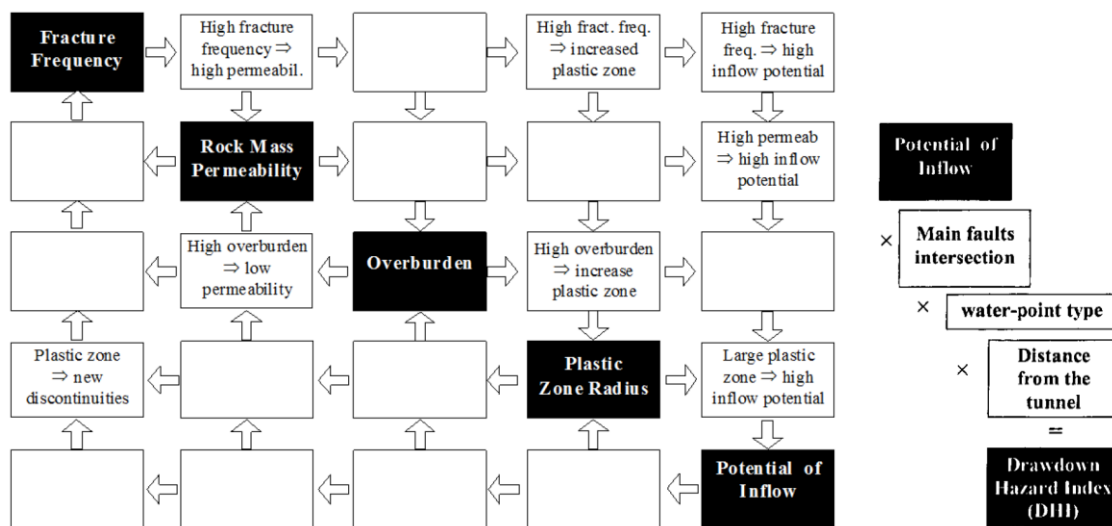


Figure 6 : Matrice des interactions entre les 4 variables fondamentales du système aquifère – tunnel considérées dans l'évaluation du potentiel de drainage d'une section de tunnel (résultat intermédiaire PI), et facteurs clés liés au point d'eau appliqués pour estimer le risque au droit du point d'eau, telle que définie dans la première version de la méthode DHI publiée en 2001 [Dematteis et al., 2001]

Dans sa version initiale de 2001, la méthode DHI considérait 4 variables fondamentales, 1 variable de résultat intermédiaire et 3 facteurs clés liés au point d'eau [Dematteis et al., 2001 ; TELT, 2013]. Ces 3 facteurs (IF, ST et DT : définitions dans la liste un peu plus bas) étaient alors effectivement indépendants entre eux. Un quatrième facteurs clé lié à la localisation du point d'eau a cependant été ajouté par après — première mention trouvée dans le rapport de l'APS [LTF, 2004c] — pour tenir compte aussi de l'effet topographique (ET). Ce quatrième facteur ET n'est toutefois pas indépendant, puisqu'il se base lui aussi sur la distance au tunnel, comme le facteur DT. De plus, à partir du PRF 2013-2017, le premier facteur clé (IF) a été intégré comme composante dans un nouveau facteur clé nommé CP afin de tenir compte non seulement des failles majeures (composante IF*) mais aussi des conduits karstiques liés à la dissolution localisée des karsts (composante FD*). Le terme CP a ainsi remplacé le terme IF dans la formule de calcul du DHI brut à partir du PRF. Voici donc la liste des variables et facteurs utilisés dans les différentes versions de la méthode DHI :

Variables fondamentales décrivant l'amas rocheux (liste inchangée depuis version initiale) :

- FF : Fréquence de fracturation (*fracture frequency*)
- MK : Perméabilité du massif (*rock mass permeability*)

³ Dans un fascicule détaillant la méthode DHI, il est écrit : « Les facteurs clés, contrairement aux autres variables considérées, ne présentent pas d'interaction entre eux ; ce sont des variables indépendantes. C'est pourquoi ils ne sont pas inclus dans la matrice du PI. » [LTF, 2004c]

- OV : Epaisseur de la couverture (*overburden*)
- PZ : Extension de la zone plastique (*plastic zone radius*)

Variable de résultat intermédiaire (inchangée depuis la version initiale) :

- PI : Potentiel de drainage (*potential of inflow*)
 - ...d'une section de tunnel et non au droit d'un point d'eau

Facteurs clés liés au point d'eau (avec des changements depuis la version initiale) :

- IF : Intersection avec des failles majeures (*main faults intersection*) :
 - Facteur utilisé tel quel dans les versions initiale de 2001, puis APR2006, du DHI
 - Remplacé par le facteur CP à partir du PRF 2013-2017 (voir ci-dessous)
- CP : Intersection avec des horizons de perméabilité : failles principales et phénomènes de dissolution du karst (CP : canaux de perméabilité) :
 - Nouveau facteur utilisé en remplacement de IF à partir du PRF 2013-2017. La valeur de CP, entre 1 et 2, est obtenue sommant les 2 composantes suivantes :
 - IF* : Intersection avec des failles majeures (une valeur entre 1 et 1.5)
 - FD* : Phénomènes de dissolution (une valeur entre 0 et 0.5)
- ST : Type de source (ou autre point d'eau) (*spring type*)
- DT : Distance entre le point d'eau et le tunnel (*distance from the tunnel*)
- ET : Effet topographique
 - Facteur ajouté à la méthode DHI à partir de l'APS 2002-2004 et l'APR2006 (définition détaillée plus bas)

2.3.3. Echelles de normalisation des composantes du DHI

Pour chaque variable ou facteur⁴, une échelle de conversion de l'observation brute a été définie de manière semi-arbitraire (à dire d'expert) afin d'obtenir des indicateurs normalisés entre 0 et 1 (Tableau 4). Par exemple, la fréquence de fracturation observée en nombre de fractures par mètre est normalisée en considérant 20 fractures / m comme borne supérieure (de sorte que FF = 1 si la fréquence observée ≥ 20 f. / m). Une logique similaire s'applique aux 3 autres variables fondamentales, à la différence près que l'indicateur normalisé OV varie à l'inverse de l'épaisseur de couverture observée : OV est d'autant plus élevé que la couverture est mince. En ce qui concerne les facteurs clés liés au point d'eau (IF $\rightarrow$ CP, ST, DT et ET), les échelles de normalisation convertissent plutôt des informations catégorielles (ex. oui / non pour IF). Le Tableau 4 présente les échelles définies dans la première version de la méthode DHI en 2001. Le petit zéro ajouté en tant qu'indice aux noms abrégés des anciens facteurs IF₀, ST₀ et DT₀ vise à rappeler que leurs valeurs étaient alors normalisées entre 0 et 1. Le Tableau 5 présente les nouvelles échelles utilisées plus récemment et documentées dans le rapport du PRF [TELT, 2013] pour le calcul du DHI des points d'eau souterraine et celui du « DHI réseau » des eaux superficielles.

Une comparaison des deux tableaux permet de constater plusieurs différences, parfois subtiles, mais ayant tout de même un impact sur le DHI brut calculé. Entre autre changements notables :

- La variable fondamentale FF est passée d'une échelle quantitative (basée sur un nombre de fractures par mètre) à une échelle qualitative aux valeurs d'échelon arbitraires.

⁴ Les composantes nécessaires au calcul du DHI ont été définies dans la sous-section précédente. Les noms codés sous forme de sigles (ex. IF, OV ou DT) y sont décodés et les composantes sont expliquées.

- L'échelle des distances au tunnel du facteur DT a été étirée de façon importante, le seuil supérieur passant de 800 m (dans la version de 2001) à 5000 m (dans le PRF 2013-2017).
- De nouveaux facteurs clés entrent en jeu dans les versions plus récentes de la méthode DHI : le facteur ET est ajouté, tandis que le facteur CP (IF* + FD*) remplace le facteur IF. De plus, le nouveau facteur clé CP a 4 échelons alors que son prédécesseur IF n'en avait que 2.

Comme expliqué en fin de section (§ 2.3.7), ces changements apparaissent adéquats et avoir amélioré, avec les autres évolutions, la méthode DHI dans son application au projet Lyon-Turin.

FF	FF - fracture frequency	λ (fractures/m)	0	5	10	15	20
		index	0	0.25	0.5	0.75	1
MK	MK - rock mass permeability	Permeab. degree	very low	low	medium	high	
		index	0	0.33	0.66	1	
OV	OV - overburden	thickness (m)	<50	50	100	200	>200
		Index	0.9	0.5	0.25	0.1	
PZ	PZ - plastic zone radius	radius	0	10	20	>30	
		index	0	0.3	0.7	1	
IF₀	IF - intersection of main faults	intersection with main conductive fracture connected with water point				NO	YES
		index				0	1
ST₀	SP - spring type	type	superficial	intermediate	deep flow system		
		index	0	0.5	1		
DT₀	DT - distance from the tunnel	distance (m)	>800	600+800	400+600	200+400	100+200 <100
		index	0	0.1	0.2	0.4	0.8 1

Tableau 4 : Définitions initiales des échelles de normalisation des variables et facteurs clés du système aquifère – tunnel [extrait de l'acte de conférence de Dematteis et al., 2001 ; les noms abrégés utilisés dans le présent document ont été ajoutés tout à gauche]

Variable	Description	Echelons numériques
FF	Fréquence de fracturation	1 = failles principales et/ou zone de fracturation et dissolution avec développement de morphologie karstique ; 0,75 = failles principales et/ou zone de fracturation et dissolution sans développement de morphologie karstique ; 0,4 = failles principales et/ou zone de fracturation ou dissolution avec développement de morphologie karstique ; 0,2 = dissolution sans développement de morphologie karstique ; 0,1 = absence
MK	Perméabilité du massif	1,0 = perméabilité élevée à très élevée ; 0,7 = perméabilité moyenne à élevée ; 0,3 = perméabilité faible à moyenne ; 0,1 = perméabilité très faible à faible
OV	Epaisseur de la couverture	0,9 = couverture de moins de 50 m ; 0,5 = couverture de 50 à 100 m ; 0,2 = couverture de 100 à 500 m ; 0,1 = couverture de plus de 500 m
PZ	Extension de la zone plastique	1 = rayon de la zone plastique > rayon galerie ; 0 = rayon de la zone plastique < rayon galerie
Facteur		

Variable	Description	Echelons numériques
CP (note**)	Intersection avec des horizons ou canaux de perméabilité élevée : $CP = IF^* + FD^*$ (horizons pour les eaux sout. ; canaux pour les eaux superf.)	1 = aucune intersection ; 1,25 = intersection avec horizon en dissolution sans développement de morphologie de karst ; 1,5 = intersection avec des failles principales ; 2 = intersection avec structures typiquement karstiques
IF*	Intersection avec des failles majeures	1,5 = intersection avec des failles qui coupent la galerie ; 1 = aucune intersection
FD*	Phénomènes de dissolution	0,5 = phénomènes de dissolution avec développement de régime hydrodynamique de type karstique ; 0,25 = dissolution sans développement de morphologie karstique ; 0 = absence de phénomènes de dissolution
ST (TS) RT**	Type de source (ou autre point d'eau souterraine) OU Type d'alimentation (pour eaux superficielles et le DHI réseau)	2 = source profonde (alimentée par le substratum rocheux) ; 1,5 = source mixte (intermédiaire) ; 1 = source superficielle (liée aux dépôts quaternaires)
DT	Distance du tunnel (distance horizontale et verticale entre le point d'eau et le tunnel)	1,9 = distance évaluée < 200 m ; 1,5 = distance entre 200 et 500 m ; 1,2 = distance entre 500 et 1000 m ; 1,1 = distance entre 1000 et 5000 m ; 0 = distance évaluée > 5000 m (→DHI brut = 0)
ET ET réseau**	Effet topographique OU Effet topographique réseau	Echelle allant de 0 (→DHI brut = 0) à 2 pour la probabilité de tarissement la plus élevée selon la position relative du point d'eau (versant et cote) : voir la Figure 7 un peu plus bas) 2 = distance verticale > 0 et intersection bassin-ouvrage ; 1 = distance verticale < 0 et intersection bassin-ouvrage ou distance verticale > 0 et pas d'intersection bassin-ouvrage ; 0 = distance verticale < 0 et pas d'intersection bassin-ouvrage

* : Sous-variables qui sont additionnées pour obtenir la valeur numérique de la variable CP

** : Variantes des variables ST et ET adaptées à l'évaluation du DHI réseau (eaux superficielles)

Tableau 5 : Définitions actuelles des échelles de normalisation des variables et facteurs clés du système aquifère / cours d'eau – tunnel [adapté des annexes 1 et 2 du rapport du PRF : TELT, 2013]

A propos du facteur clé ET (effet topographique), il est important de mentionner que les valeurs attribuées aux différents cas représentés dans le schéma conceptuel du facteur (Figure 7a) ont changé entre les versions APR et PRF de la méthode DHI. En effet, dans la première définition de ce facteur clé, les paramètres « cote » et « versant » étaient nuls dans plusieurs cas, avec comme résultat que l'ET (alors calculé en faisant la moyenne des deux paramètres) était souvent neutre (Figure 7b). Rappelons que la valeur effectivement utilisée comme facteur multiplicateur de PI était alors obtenue en additionnant +1 à la valeur brute de la colonne « ET » du tableau de la Figure 7b de façon à disposer d'un facteur effectif entre 1 et 2. **Les valeurs attribuées aux différents cas du schéma dans le PRF nous paraissent une conceptualisation plus plausible des probabilités de lien hydraulique entre un point d'eau et une galerie selon**

leurs localisations topographiques respectives (Figure 7c). Néanmoins, il semble que cette amélioration conceptuelle ait eu très peu d'impact tangible sur les DHI calculés, puisque la valeur du facteur clé ET est presque toujours égale à 2 (effet topographique maximal) dans les tableaux de calculs annexés aux rapports de l'APR et du PRF. Ceci s'explique probablement par le fait que les points conservés dans le réseau d'auscultation hydrogéologique de TELT depuis l'APR sont très majoritairement situés sur le même versant qu'une des galeries déjà excavées ou prévues, à des cotes supérieures aux altitudes des galeries (soit les configurations 1d, 2c ou 2d dans la Figure 7a).

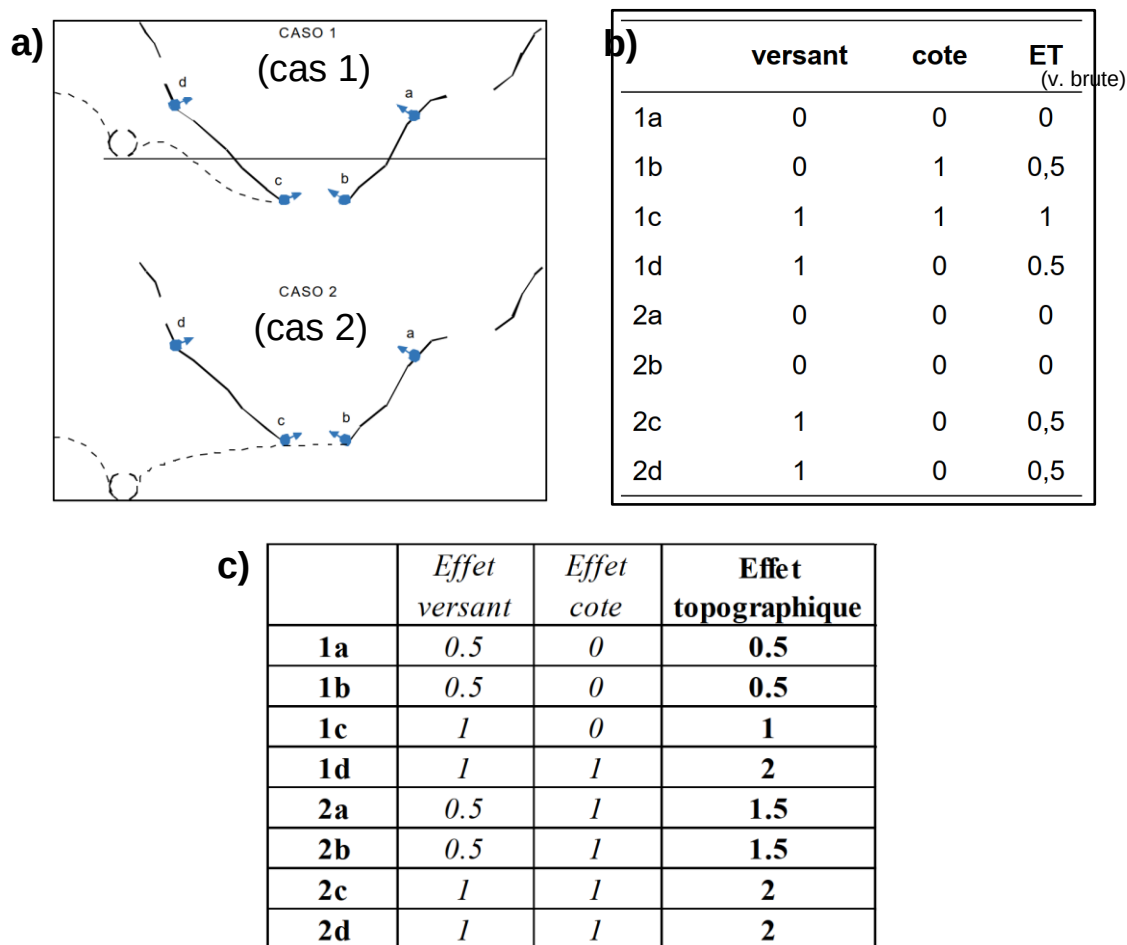


Figure 7 : Conceptualisation de l'effet topographique (facteur clé ET) : a) Schéma conceptuel illustrant 4 localisations différentes du point d'eau et 2 positions relatives de la galerie et de la nappe libre impactée (cas 1 / 2 : la ligne horizontale indiquant la cote de la galerie) ; b) valeurs considérées pour le calcul de l'ET dans l'APR2006 [LTF, 2004c] ; c) valeurs pour le calcul de l'ET dans le PRF [TELT, 2013].

2.3.4. Formules de calcul du PI puis du DHI

La formule utilisée pour calculer le potentiel de drainage (PI) est restée inchangée depuis 2001. Elle produit un résultat intermédiaire sous la forme d'un nombre décimal entre 0 et 1 :

$$PI = (41*FF + 22*MK + 17*OV + 20*PZ) / 100$$

Les coefficients de la formule ci-contre sont issus de la publication initiale de la méthode DHI [Dematteis *et al.*, 2001]. Ils ont été extraits de la cinquième colonne de la matrice d'interactions globale combinant les 4 variables fondamentales et le résultat intermédiaire PI (revoir Figure 5b) puis transformés en pourcentages arrondis. Or, la matrice globale est issue d'une matrice d'interactions binaires dont les coefficients semblent avoir été attribués en partie à dire d'expert. Ces coefficients paraissent néanmoins raisonnables.

Rappelons que la variable calculée PI ne constitue pas l'indicateur de risque de tarissement du point d'eau, puisqu'il ne tient pas compte du contexte de ce dernier. C'est pourquoi le calcul du DHI, présenté ci-après, implique des termes complémentaires.

La formule de calcul du DHI brut a évolué depuis sa création. En effet, à l'origine, le calcul du DHI ne considérait que 3 variables complémentaires liées au point d'eau, lesquelles étaient normalisées entre 0 et 1. Pour que ces variables jouent le rôle d'amplificateur conditionnel du résultat, chaque terme entre parenthèses devait être ≥ 1 d'où la nécessité d'ajouter 1 à chacune des 3 variables IF_0 , ST_0 et DT_0 placées entre parenthèses dans la formule d'origine :

$$\text{DHI brut (version 2001)} = PI * (IF_0+1) * (ST_0+1) * (DT_0+1) * 100$$

A partir de l'APS, la formule de calcul du DHI brut inclut aussi la variable conceptualisant l'effet topographique (ET). De plus, les variables complémentaires sont désormais normalisées entre 1 et 2 (ce qui évite d'avoir à ajouter +1). Cette formule a été utilisée dans les phases d'APS et d'APR2006 [LTF, 2004c ; LTF, 2005] :

$$\text{DHI brut (version APS et APR2006)} = PI * IF * ST * DT * \mathbf{ET} * 100$$

Puis, plus récemment, la formule a été revue à nouveau pour y remplacer le facteur IF par CP [TELT, 2013] :

$$\text{DHI brut (version PRF 2013-2017)} = PI * \mathbf{CP} * ST * DT * ET * 100$$

Un « DHI normalisé » est ensuite calculé en divisant le DHI brut par la valeur maximale $DHI_{\max}$ « que l'on obtient dans la situation théorique de plus grande probabilité de tarissement de la source ($FF = 1$; $MK = 0,9$; $OV = 0,9$; $PZ = 1$; $DT = 1,9$; $CP = 2$; $ST = 2$; $ET = 2$) », laquelle est égale à 1461 dans les versions APS / APR2006 et PRF 2013-2017 (actuelle) de la méthode DHI [LTF, 2004c ; TELT, 2013] :

$$\text{DHI normalisé} = \text{DHI brut} / DHI_{\max}$$

2.3.5. Classifications DHI

Enfin, le DHI normalisé est subdivisé en classes (ou degrés) de risque. Les nombre de classes et les valeurs seuils utilisées pour délimiter celles-ci ont changé entre versions. La méthode DHI initiale de 2001 définissait ainsi 3 classes avec 0.2 et 0.7 comme valeurs seuils. Dans la version revue pour l'APR2006, le nombre de classes est passé à 4 et les valeurs seuils ont été modifiées : 0.1, 0.2 et 0.3. Enfin, dans la version actuelle utilisée dans le PRF 2013-2017, le nombre de classes a été réduit à 3 classes et les valeurs seuils ont été modifiées à nouveau : 0.17 et 0.25. La Figure 8 ci-dessous résume graphiquement l'évolution de la classification DHI de version en version. Rappelons que la borne supérieure de la dernière classe DHI correspond à un DHI normalisé de 1.0 (soit à un $DHI_{\text{brut}} = DHI_{\max}$) peu importe la version, ce qui n'est pas clair dans la figure originale du rapport du PRF, dans laquelle le DHI normalisé maximal est égal à 0.5.

Ce sont, au final, ces « classes DHI » qui sont utilisées en pratique comme indicateur du degré de probabilité de tarissement (ou de diminution notable du débit) des points d'eau. D'après la documentation fournie, les valeurs seuils entre classes ont été « définies sur la base des impacts qui se sont réellement vérifiés » et « ont été confirmées par le retour d'expérience du creusement des descenderies » [rapport du PRF : TELT, 2013]. La confirmation dont il est fait mention ne paraît toutefois pas aussi claire, à la lecture du rapport en question : le retour d'expérience, au contraire, « met en évidence quelques situations d'incohérence entre la prévision des impacts et les impacts réellement observés » [TELT, 2013].

Une autre particularité dans l'application de la méthode DHI a trait aux types d'ouvrages excavés pris en compte dans les calculs. En effet, dans la phase d'APR, plusieurs DHI ont été évalués : un DHI concernant le tunnel de base, d'une part, et un DHI concernant les descenderies, d'autre part. Ces résultats ont été résumés dans l'APR par une classe de « DHI TdB » (tunnel de base seulement) et une classe de « DHI Total » (tunnel de base et descenderies : note maximale) [LTF, 2005]. Dans le cadre du PRF 2013-2017, la version la plus récente de la méthode DHI « a été appliquée pour tous les points d'eau qui se trouvent dans les zones d'influence du Tunnel de Base, c'est-à-dire se situant dans une bande large de 2000 m et axée sur le tunnel de base » (à quelques exceptions près précisées dans le rapport), « l'excavation des descenderies étant terminée », produisant comme nouveau résultat principal une classe de « DHI TdB PRF » [TELT, 2013].

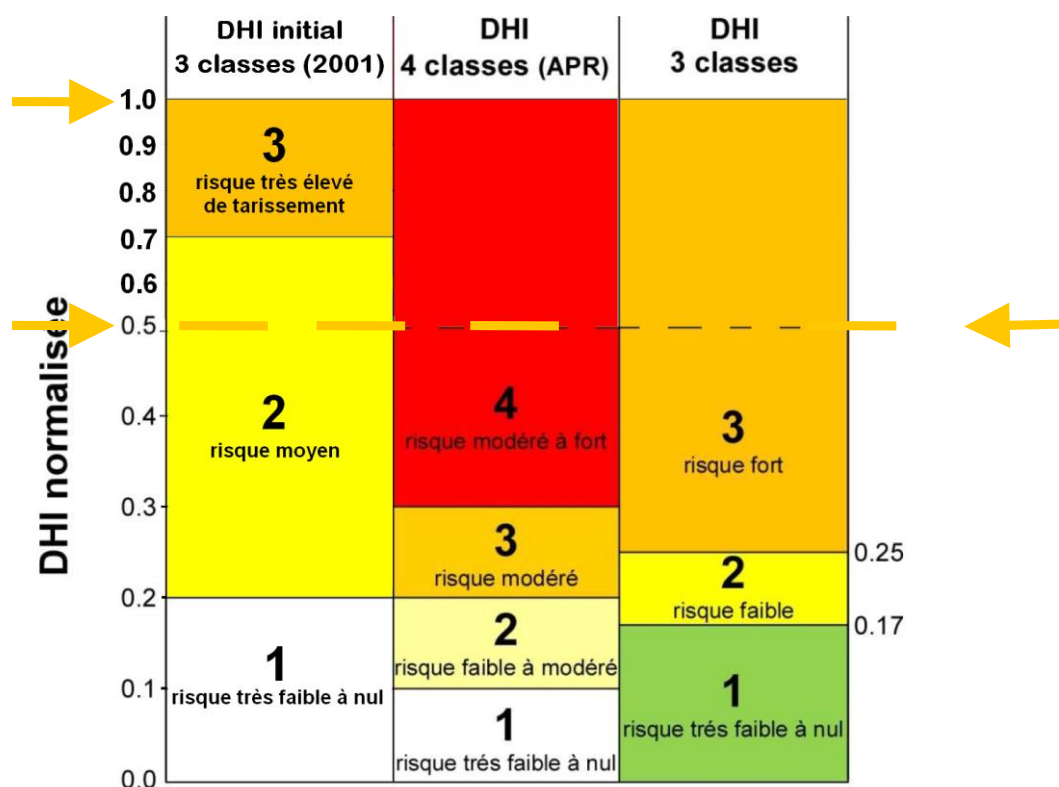


Figure 8 : Correspondance partielle des classes DHI entre les versions initiale, APR2006 et PRF 2013-2017 de la méthode DHI [illustration adaptée de la figure 1 du rapport du PRF : TELT, 2013]

2.3.6. Comparaison des classifications DHI TdB de l'APR2006 versus du PRF 2013-2017

Une comparaison sommaire de l'ensemble des DHI de l'APR2006 et du PRF compilés dans l'annexe 3 du rapport du PRF 2013-2017 a été réalisée dans cette étude afin de voir si l'évolution de la classification DHI concernant les travaux d'excavation du tunnel de base (DHI TdB) entre la version APR et la version PRF avait changé de manière significative la part des points classés comme ayant un « risque très faible à nul » de tarissement (classe DHI de 1) [TELT, 2013]. Les résultats de cette analyse, présentés dans le Tableau 6 ci-dessous, permettent de constater que :

- La très vaste majorité des points traités par la méthode DHI (95.9 %) ont conservé le même numéro de classe DHI TdB entre les versions APR et PRF.
- 2 points non classés (NC) lors de l'APR ont pu l'être dans le PRF (points 2007,4 et 13-A).
- 10 points n'ont pas de classe DHI TdB PRF car ils ont été impactés après l'APR et une classification de leur sensibilité n'a donc plus de sens.
- 6 points (0.9 %) ont vu leur classe DHI augmenter de l'APR au PRF.
- 9 points seulement (1.4 %) ont vu leur classe DHI diminuer de l'APR au PRF, mais parmi ceux-ci, 4 sont simplement passés du DHI APR maximal de 4 au DHI PRF maximal de 3.
- Donc, seuls les 5 points suivants ont vraiment vu leur classe DHI TdB diminuer. Et l'annexe 4 du rapport du PRF fournit des justifications appropriées pour chaque cas :
 - Pour les points 1, 2 et 3 de la commune de Modane (APR = 4 ou 3 → PRF = 2), la note explicative fournie dans le rapport du PRF est : « La source n'a pas été impactée par l'excavation de la descenderie de Modane. Le circuit en roche ne s'approfondit pas jusqu'à la cote galerie. » [TELT, 2013]
 - Pour le point 8 de la commune de Modane (APR = 2 → PRF = 1) : « La source se situe à une distance majeure de 5000 m du tunnel de base. » [TELT, 2013]
 - Enfin, pour le point 3031 de Saint-Michel-de-Maurienne (APR = 3 → PRF = 1) : « La source n'a pas été impactée par l'excavation de la descenderie de SMLP. Le circuit en roche ne s'approfondit pas jusqu'à la cote galerie. Données de 2004 à 2013 manquantes. » [TELT, 2013]

En somme, l'évolution de la méthode DHI de la phase de l'APR au PRF n'a pratiquement pas changé la part des points classés comme ayant un « risque très faible à nul » de tarissement (classe DHI de 1) : celle-ci est demeurée largement majoritaire à environ 85 % de l'effectif total. De la même façon, la part des points de classe DHI = 2 est demeurée stable à 11 % de l'effectif total, laissant environ 2 % de points de classe DHI > 2 (Tableau 6). En d'autres termes, **l'évolution de la méthode DHI appliquée au projet Lyon-Turin n'apparaît pas avoir détérioré (biaisé) les résultats produits par celle-ci.**

DHI TdB APR → PRF	Nombre de points	Commentaire
Pas de changement de classe DHI		
1 → 1	560	
1 → NC	1	Pas de nouveau calcul
1 → PI	2	Points impactés après l'APR
2 → 2	64	
2 → PI	8	Points impactés après l'APR
3 → 3	4	
Changement de classe DHI		
1 → 2	6	Classe DHI augmentée +1
2 → 1	1	Classe DHI diminuée -1

3 → 1	1	Classe DHI diminuée –2
3 → 2	2	Classe DHI diminuée –1
4 → 2	1	Classe DHI diminuée –2
4 → 3	4	Classe DHI demeurée maximale
NC → 1	1	Calcul récent seulement
NC → 2	1	Calcul récent seulement
Bilan des changements		
Pas de changement (ou NC)	629	95.9
Point impacté après l'APR	10	1.5
Calcul récent seulement	2	0.3
Classe DHI augmentée	6	0.9
Classe DHI diminuée (ou max.)	9	1.4
(classe demeurée maximale)	(4)	(0.6)
Totaux par classe DHI		
Numéro de classe	DHI TdB APR	DHI TdB PRF
1	569	563
2	73	74
3	7	8
4	5	—
NC	2	1
PI	0	10
GRAND TOTAL	656	656

(NC : non classé ; PI = point impacté ; TdB = concernant le tunnel de base)

Tableau 6 : Changements de classe DHI TdB (tunnel de base) entre les résultats des phases d'APR2006 et du PRF 2013-2017 du projet Lyon-Turin

2.3.7. Avis général sur la méthode DHI

La méthode DHI apparaît tout à fait pertinente et bien conçue dans l'ensemble. Bien qu'elle n'ait pas été appliquée sur un grand nombre de projets de tunnels différents, elle paraît avoir réussi à fournir des estimations vraisemblables du risque de tarissement des sources, dans le cas du tunnel transfrontalier Lyon-Turin mais aussi de quelques autres chantiers. En effet, les résumés de présentations relatifs au DHI qui nous ont été transmis par TELT en septembre 2021 [Dematteis *et al.*, 2007 ; Torri *et al.*, 2007] indiquent que le DHI a aussi été testé sur les chantiers de l'usine électrique de Pont Ventoux (en Italie) et du tunnel ferroviaire du Perthus (entre la France et l'Espagne). Ce dernier a d'ailleurs fait l'objet d'un article publié en 2011 et republié en 2021 [Dematteis *et al.*, 2011 ; Dematteis *et al.*, 2021] dans lequel une partie des résultats du DHI subdivisé en 4 classes sont présentés. Les auteurs de l'article y indiquent toutefois qu'aucun impact n'a été observé, ni pendant ni après les travaux d'excavation, sur les captages d'eau potable et le site thermal du Boulou, mais l'information concernant les autres ouvrages (ex : source servant à l'irrigation) n'est pas détaillée : « l'impact mesuré sur tous les points d'eaux est cohérent avec celui prévu avant le démarrage des travaux ». Cette application du DHI au tunnel du Perthus en somme, même si elle est pertinente, n'est cependant pas un cas d'étude qui aura permis une véritable validation du DHI, puisqu'aucun cas d'impact avéré n'était disponible pour quantifier au moins grossièrement la capacité du DHI à prévoir les impacts du chantier sur les sources des environs.

Notre principale critique quant à la méthode DHI en général est la part à dire d'expert (et donc estimée) qui s'ajoute à la part déjà importante d'empirisme dans la définition puis le choix des

variables et facteurs clés d'une part, et dans les valeurs utilisées pour la pondération des interactions entre les variables du système et pour traduire les observations concrètes en valeurs normalisées, d'autre part. Une part « à dire d'expert » est néanmoins acceptable dans une modélisation conceptuelle de système complexe telle que proposée par la méthode DHI (Dematteis *et al.* 2001).

En ce qui concerne le projet Lyon-Turin en tant que tel, la méthode DHI apparaît avoir été adaptée aux caractéristiques propres à la zone d'étude en basant ses paramètres, lorsque possible, sur des modélisations analytiques ou numériques des écoulements souterrains visant à simuler les débits d'exhaure (écoulements vers le tunnel ou les descenderies) et à étudier « la cinétique et l'extension spatiale des perturbations piézométriques engendrées par le tunnel » [LTF, 2004b]. **Bien que certains choix de composantes ou de valeurs aient été faits à dire d'expert, la mise en œuvre de la méthode DHI spécifiquement pour le projet Lyon-Turin semble avoir suivi une démarche scientifique adéquate et avoir réduit autant que possible la part des choix faits à dire d'expert dans la méthode DHI appliquée au projet.**

La fiabilité prédictive des résultats obtenus par la méthode DHI dans sa version APR2006 a été évaluée dans le cadre d'un « retour d'expérience » bien documenté dans le rapport du PRF. Comme il est écrit dans ledit rapport, « la confrontation entre l'évaluation de l'indice DHI proposé dans l'APR et les données du suivi effectué par LTF après 2006 sur les secteurs des descenderies met en évidence quelques situations minoritaires d'incohérence entre la prévision des impacts et les impacts réellement observés. » [TELT, 2013]. Il y a par exemple le cas particulier du point d'eau 322 qui, malgré une distance horizontale d'environ 3 km au tunnel de base, a été impacté par le creusement de ce dernier, contredisant le degré de probabilité de tarissement « très faible à nul » attribué à ce point par le « DHI TdB APR ». Malgré quelques exceptions, donc, force est de constater que, **dans la majorité des cas, les points perturbés avaient des classes « DHI Total (APR) » supérieures à 1**, avertissant donc d'un degré de probabilité de tarissement au moins « faible » (DHI 2), sinon « modéré » (DHI 3) voire « fort » (DHI 4). Ces quelques « exceptions à la règle », puisque minoritaires et typiquement attendues d'une approche probabiliste telle que la méthode DHI, ne sont donc pas suffisamment nombreuses pour remettre en cause la méthode DHI.

Une analyse plus détaillée des tableaux de DHI et des informations sur les perturbations présentées dans la section « 3.2 Retour d'expérience de l'excavation des descenderies » du rapport du PRF [TELT, 2013], réalisée pour les fins de cette expertise, a permis de constater que, sur les 18 points rapportés dans les tableaux comme ayant été perturbés par l'excavation des descenderies :

- Seulement 4 des 18 points perturbés avaient une classe DHI Total APR = 1 :
 - les points 277,1 ; 277,2 et 277,3 du « Captage des Avenières » :
 - Dans la note de l'annexe 4 du rapport du PRF rédigée pour ce point : « Sources situées à distance majeure de 2000 m et sur le versant gauche de l'Arc. Montrent un impact faible (baisse du débit) par rapport à l'excavation de la descenderie de Modane. Le DHI augmente de 1 à 2. »
 - le point 318 du « Captage de la Saussaz » :
 - Ce cas d'impact est intéressant. Dans la note de l'annexe 4 du rapport du PRF rédigée pour ce point, l'impact imprévu est expliqué comme suit : « La source a été impactée par l'excavation de la descenderie de La Praz (diminution du débit). Le point 318 se situe sur le versant opposé de la vallée de l'Arc par rapport à la descenderie de Saint-Martin-la-Porte. » Il semble donc que ce ne soit pas la descenderie prévue qui ait eu un impact.
- Les points perturbés avaient toutefois rarement la classe DHI la plus élevée (DHI Total APR = 4) mais plutôt des DHI intermédiaires (de 2 ou 3 dans l'APR).

Afin de dresser un portrait plus général des performances de la classification DHI en termes de sa capacité à prédire les impacts liés dans ce cas-ci à l'excavation des descenderies, le nombre de points perturbés est comparé au nombre total de points par classe DHI Total APR⁵. Les résultats de cette comparaison, présentés dans le Tableau 7, montrent clairement que :

- Il est très peu probable qu'un point de classe DHI APR = 1 soit perturbé (< 1 cas sur 100 d'après ce retour d'expérience).
- La probabilité d'une perturbation augmente significativement avec la classe DHI APR, du moins jusqu'à la classe 3 inclusivement.
- La probabilité accrue d'une perturbation associée à la classe maximale (= 4 dans la version APR) n'est pas confirmée par ce retour d'expérience.

DHI Total APR	Nombre total de points	Nombre de points perturbés	Part de points perturbés
1	465	4	0.9 %
2	113	5	4.4 %
3	42	7	16.7 %
4	36	2	5.6 %
Total	656	18	2.7 %

Tableau 7 : Nombre et part de points perturbés par classe DHI Total APR

La méthode DHI apparaît donc efficace pour distinguer les points très peu à risque (DHI 1) versus les autres (DHI > 1). De plus, le choix fait dans le PRF de réduire la classification DHI à trois classes au lieu de quatre apparaît tout à fait justifié, la classe 3 du DHI PRF étant à peu près équivalente à la fusion des classes 3 et 4 du DHI APR. De même, la modification des valeurs seuils définissant la nouvelle classification DHI PRF apparaît adéquate puisqu'elle a conservé la même répartition des points entre classes DHI (=1, =2, >2) que la classification antérieure (APR).

En somme, le DHI apparaît comme un outil relativement efficace en général pour la prédiction des impacts du creusement d'une galerie (tunnel de base ou descenderies) sur les points d'eau souterraine environnants (diminution du débit voire tarissement). La nouvelle classification DHI en 3 degrés de risque apparaît adéquate.

⁵ Les nombres de points perturbés et totaux ont été préparés à partir des informations et données de la section 3.2 et des annexes 3 et 4 du rapport du PRF [TELT, 2013].

2.3.8. Recommandations relatives à la méthode DHI

Un futur exercice de retour d'expérience suite à l'excavation d'au moins quelques sections du Tunnel de Base (TdB) serait un exercice important à faire pour valider plus spécifiquement l'indice DHI TdB PRF, le retour d'expérience traité à ce jour dans le rapport du PRF étant limité aux perturbations causées par l'excavation des descenderies.

Aussi, il serait intéressant, au moins d'un point de vue scientifique, qu'un document soit rédigé qui rassemble toutes les explications utiles pour justifier les valeurs fixes intrinsèques à la méthode DHI (coefficients dans les matrices d'interactions, niveaux dans les échelles de normalisation des composantes, etc.) et les autres choix faits pour résumer conceptuellement le système aquifère – tunnel très complexe en quelques variables seulement⁶.

2.4. ANALYSE DES DONNEES DE SUIVI PAR TRAITEMENT DU SIGNAL

2.4.1. Données, approche, méthodes et outils utilisés

Les données de suivi du débit des sources, ruisseaux ou captages d'eau, rendues disponibles par TELT via leur Portail Environnemental – Composante « Eau » – Type « Ress. eaux souterraines – sources (T3) » – Paramètre « Débit », se présentent sous la forme de chroniques (séries temporelles) rattachées à un point d'observation pouvant être localisé sur une carte et donc mis en relation avec son contexte hydrogéologique. Ces chroniques de débit peuvent aussi être exportées depuis le Portail afin d'être analysées statistiquement et d'en dégager des caractéristiques. Remarque : Les chroniques liées aux forages (Type « Ress. eaux souterraines – forages (T3) » – Paramètre « Niveau Eau Abs ») n'ont pas été considérées dans cette analyse. 126 chroniques de suivi du débit ont ainsi été exportées à partir du Portail Environnemental de TELT. Les points de suivi auxquels elles sont liées font tous partie du réseau de surveillance amélioré mais ils ne comprennent que 85 des 101 sources du réseau prescrit⁷.

Des statistiques classiques (comptages, moyennes, tendance...) permettent de décrire le contenu de chaque chronique selon différents points de vue. Et, lorsque la chronique traduit un suivi suffisamment régulier et continu (pas trop souvent interrompu au cours du temps) et devient assimilable à un « signal », elle peut aussi être abordée par des approches de traitement du signal, ce qui permet notamment d'effectuer une analyse spectrale afin d'identifier les cyclicités apparentes dans le signal.

L'objectif de cet ensemble d'analyses statistiques est d'apporter des éléments de description, de compréhension et de qualification sur les données de débit accumulées depuis le début du suivi, qui permettent de porter un regard critique sur la pertinence du suivi du débit effectué à ce jour en termes d'exploitabilité (statistique en un premier temps) des données. En notant que les

⁶ Des éléments explicatifs sur la plupart des composantes de la méthode DHI ont pu être repérés çà et là dans la documentation fournie. Toutefois, aucun des documents consultés ne rassemble des justifications pour toutes les valeurs fixées dans la méthode DHI. Une mention explicite de la nature « arbitraire » (à dire d'expert) de certaines valeurs suffirait, le cas échéant.

⁷ L'indisponibilité, sur le Portail, de données de suivi sur plusieurs sources du réseau prescrit, est probablement liée à un abandon plus ou moins récent du suivi de ces points (abandon d'usage, tarissement ou modification du captage ayant conduit à remplacer le point de suivi par un autre point de suivi). Mais il est probable que certaines des chroniques soient indisponibles sur le Portail de TELT pour d'autres raisons.

données de suivi jugées ici d'exploitabilité statistique limitée peuvent dans certains cas s'avérer utilisables en pratique. Ce sera le cas en particulier s'il y a une anomalie flagrante (tarissement soudain ou diminution très importante) dans l'évolution des débits de la source suivie, alors facilement détectable visuellement dans la chronique malgré la mauvaise qualité numérique du signal examiné. Dans un tel cas, la détection d'impacts moindres ou progressifs (tendance à la baisse) sera toutefois impossible.

Dans cette partie de l'expertise, il a été décidé de caractériser les 126 chroniques de suivi du débit disponibles auprès de TELT (et appartenant toutes au réseau de surveillance amélioré), en termes de :

- fréquence des observations, durée et continuité du suivi ;
- statistiques descriptives générales sur les valeurs ;
- fréquence des débits non quantifiés (car trop importants pour être mesurés) ;
- redondance dans les valeurs numériques (potentiellement liée à leur imprécision) ;
- tendance linéaire générale (à la hausse ou à la baisse, significative ou non) ;
- changement dans la moyenne au cours du temps (c.-à-d. non homogénéité, rupture) ;
- diminution des débits (après une année de rupture, selon une tendance, ou récente) ;
- cyclicité(s) apparente(s) dans le signal.

La caractérisation de ces chroniques de débit permet d'apprécier la qualité du signal numérique formé par leurs données, de tester la possibilité d'effectuer diverses analyses statistiques ou par examen visuel et ainsi de juger si la chronique devrait permettre une détection efficace des anomalies dans l'évolution du débit (changement important du débit de la source au cours du temps : soudain = rupture dans le signal, ou progressif = tendance linéaire à la baisse).

Les traitements numériques nécessaires à la production de ces résultats ont été réalisés avec le logiciel gratuit R destiné au calcul statistique, à la représentation graphique et à la science des données en général (<https://www.r-project.org/>). Les scripts R utilisés pour les fins de cette partie d'analyse sont en fait largement basés ou inspirés sur des outils et modules spécialisés développés antérieurement par le BRGM, incluant principalement :

- OPERADES (BRGM/RP-70030-FR) : un ensemble d'Outils Pour l'Exploitation par R des données d'ADES (centré à l'origine que sur l'analyse de chroniques piézométriques) qui permet le traitement en lot de N chroniques et inclut plusieurs modules d'analyse de séries temporelles (estimation de tendance linéaire, identification des cyclicités apparentes...) pouvant facilement être réutilisés dans de nouveaux scripts R pour d'autres applications ;
- ESTHER (BRGM/RP-67518-FR) : un outil consacré à l'Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R incluant divers modules de prétraitements et d'analyses dont plusieurs ont été réutilisés pour les fins de cette expertise ;
- HYPIZ (BRGM/RP-68344-FR) dérivé de HYPE (BRGM/RP-63066-FR) : un outil qui permet l'estimation des tendances d'évolution des niveaux d'eau souterraine, considéré surtout comme inspiration pour l'analyse des tendances.

Des développements spécifiques au projet ont néanmoins été nécessaires afin d'adapter les fonctionnalités de plusieurs des modules de ces outils existants, au sein d'un nouvel outil spécifique aux besoins du projet. Cet outil se compose de quelques scripts codés en langage R.

L'outil d'analyse des chroniques de débits du projet Lyon-Turin effectue une boucle de traitement en lot qui génère, d'une part, un tableau de synthèse avec une ligne de résultats (statistiques et indicateurs variés) par chronique traitée et, d'autre part, une fiche de résultats graphiques associés aux analyses effectuées, là aussi par chronique traitée. Ces résultats détaillés (le grand

tableau des indicateurs et les fiches de graphiques) ne sont cependant pas présentés dans le corps du rapport étant donné leur taille. Ils sont plutôt consultables sous la forme d'un fichier Excel et d'un fichier PDF joints comme annexes électroniques (voir la liste dans l'Annexe 4).

Les paragraphes qui suivent détaillent la méthodologie techniquement employée pour traiter les données et effectuer les analyses statistiques.

Agrégation de la chronique brute → statistiques annuelles

Bien que certains des indicateurs conçus dans cette partie de l'expertise soient évalués sur les données brutes, la grande majorité d'entre eux sont plutôt évalués sur des statistiques calculées à un pas mensuel ou annuel. Plusieurs indicateurs reposent ainsi sur la moyenne des débits observés au cours de chaque année civile. La préparation d'une série de valeurs statistiques agrégées calculées à un pas de temps régulier présente l'avantage clé d'accorder un poids égal à chaque mois ou année indépendamment des irrégularités du suivi à l'intérieur des mois ou années de la chronique brute, ce qui évite un éventuel biais dans les résultats de l'analyse⁸. De plus, seules les années offrant un suivi suffisamment complet (le critère retenu étant : avec au moins 1 valeur par mois pour au moins 6 des 12 mois de l'année civile) sont considérées dans la plupart des analyses (test d'homogénéité, estimation de tendance). Les années incomplètes sont rejetées car les statistiques calculées pour celles-ci (lorsque calculables) sont moins fiables à cause des mois lacunaires⁹. La mise en œuvre de cette condition d'année suffisamment complète (ASC) permet ainsi de maximiser la fiabilité des analyses effectuées.

Evaluation de la continuité temporelle du suivi

La qualification des chroniques en termes de longueur (nombre d'observations et durée du suivi), de continuité (absences ou non d'observation pour certains mois) et de statistiques descriptives générales se concentre sur les temps des observations et sur les durées entre observations. Certains indicateurs s'intéressent simplement au nombre de mois ou années sans observation, tandis que d'autres évaluent la durée de la plus longue période (sur N mois ou N années) sans observation. Une période de N mois sans observation ou de N années insuffisamment complètes est alors décrite comme une période « lacunaire ». De même, le terme de « lacune » correspond à un ou plusieurs mois consécutifs sans observation dans le cas d'une série mensuelle, ou à une ou plusieurs années consécutives sans observation ou insuffisamment complètes dans le cas d'une série annuelle (chronique brute agrégée / année). La présence de « lacunes » en trop grande proportion dans une chronique peut limiter les possibilités d'analyses statistiques ainsi que l'exploitabilité effective de la chronique vis-à-vis de l'objectif de détecter des anomalies.

Remarque : les critères utilisés pour la détermination des portions « suffisamment continues » de la chronique sont moins restrictifs ici par rapport à ce qui est exigé pour les chroniques piézométriques journalières du réseau national ADES dans OPERADES ou ESTHER, en raison

⁸ En effet, si la tendance était évaluée sur la chronique brute en accordant un poids égal à toutes les observations sans égard à leur proximité (densité) temporelle, une portion de chronique au suivi plus dense, par exemple avec 15 valeurs dans un intervalle de 6 mois, exercerait un poids supérieur à une autre portion de même durée mais ayant moins de valeurs, ce qui influencerait de manière inégale le résultat du calcul.

⁹ Les valeurs mensuelles absentes, si plus faibles ou plus fortes par rapport aux valeurs présentes, auraient peut-être produit une statistique annuelle significativement différente si elles avaient été disponibles.

de l'intervalle de temps le plus souvent mensuel entre observations et en raison aussi de la fréquence relativement élevée des lacunes dans les chroniques de suivi du débit par TELT.

Estimation de tendance linéaire

L'évaluation de la tendance linéaire est basée sur la méthode non paramétrique de la pente de Sen¹⁰ (1968), une méthode plus robuste que la méthode paramétrique par régression linéaire simple. Cette méthode robuste est employée et documentée dans plusieurs outils développés au BRGM dédiés à l'analyse statistique de séries temporelles hydrogéologiques, dont les outils ESTHER, HYPE et HYPIZ (Croiset et Lopez, 2013 ; Croiset et al., 2018 ; Seguin et al., 2018).

La tendance est évaluée sur les débits moyens annuels (la moyenne des débits observés au cours de chaque année civile). Mais seules les années qualifiées de suffisamment complètes sont considérées. Le module de d'estimation de la tendance linéaire calcule la pente de la droite de régression mais également plusieurs indicateurs. La Figure 9 présente l'indicateur IRTLC, qui évalue « l'importance relative de la tendance linéaire calculée » par rapport à l'étendue des valeurs résiduelles autour de celle-ci. Mais l'indicateur principalement retenu et exploité dans cette expertise est plutôt la « variation totale » calculée avec la tendance au cours de la période entière, puisque cette valeur est plus parlante et facile à exprimer en un pourcentage de changement par rapport à la valeur de départ.

En pratique, l'évaluation d'une tendance non négligeable dans une chronique de débit est un des moyens possibles pour détecter une anomalie (diminution) progressive du débit d'une source.

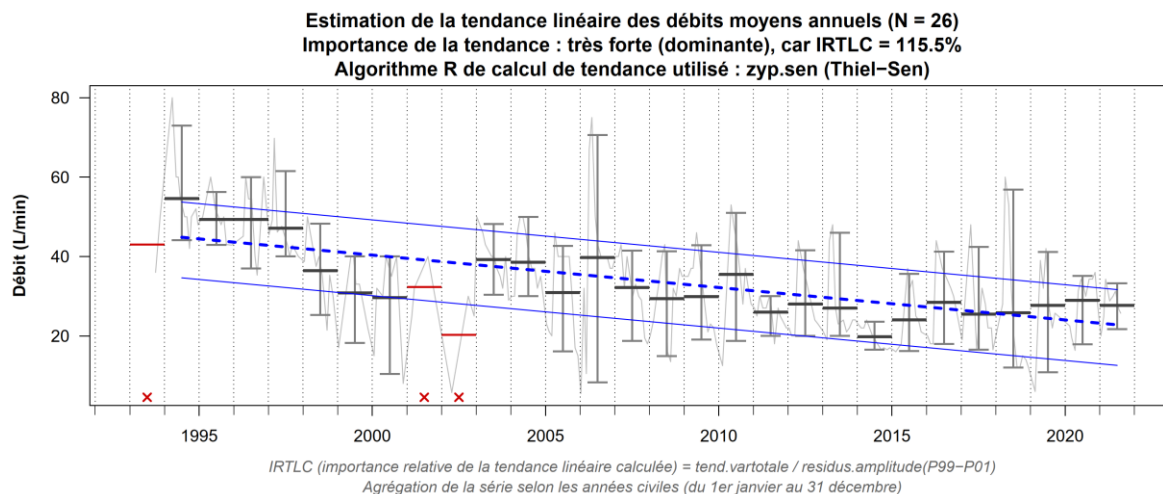


Figure 9 : Exemple de résultat graphique d'une analyse de la tendance linéaire d'une chronique de débit

Identification des cyclicités apparentes dans le signal

L'analyse spectrale est utilisée afin d'identifier et quantifier les variations « cycliques » dans le signal des chroniques. Ce type d'analyse décompose le signal brut, souvent complexe, d'une

¹⁰ La pente de Sen, aussi appelée pente de Kendall-Theil ou pente de Theil-Sen, est égale à la médiane de toutes les pentes calculées entre chaque paire de point (temps, valeur). C'est une méthode de calcul de pente robuste recommandée pour l'analyse de tendance par Helsel, Hirsch et al. (2020).

chronique en plusieurs composantes cycliques distinctes (Croiset et al., 2016 ; BRGM/RP-70030-FR). La méthode d'analyse spectrale retenue pour cette expertise repose sur une transformation de Fourier globale du signal brut qui génère un « périodogramme ». Le périodogramme est un graphique de « spectre des puissances » qui représente visuellement les « puissances spectrales » (c.-à-d. l'importance) d'une large gamme de « fréquences » (ex. $f = 0.1$ cycle/an) ou de « périodes » (ex. $T = f^{-1} = 10$ ans/cycle) au sein du signal analysé. La représentation fréquentielle du signal ainsi obtenue facilite généralement la détection des cyclicités, en particulier lorsque le signal brut est composé d'une superposition de plusieurs cycles s'étendant sur différentes échelles de temps (Seguin et al., 2018).

La librairie R « [lomb](#) » (Ruf, 1999) est utilisée pour générer les périodogrammes. Une borne supérieure correspondant à la moitié de la durée totale du suivi 2N est imposée à l'axe des périodes de sorte que la règle des 2N années dérivée du théorème d'échantillonnage de Shannon soit respectée, évitant ainsi que les résultats peu fiables des périodes de durées > N années ne figurent parmi les résultats du périodogramme.

L'interprétation du périodogramme est faite par une version améliorée de l'algorithme original de l'outil OPERADES initialement développé pour l'étude nationale de l'inertie des niveaux piézométriques en France métropolitaine (BRGM/RP-70030-FR). Cet algorithme identifie les pics principaux dans le périodogramme et compare leurs puissances spectrales relatives afin de déterminer quel est le ~cycle principal (période la plus puissante) et s'il domine ou non (par un facteur ≥ 2) les autres cycles détectés. L'algorithme amélioré évalue également l'importance du « bruit » dans le signal. L'évaluation de l'importance relative du bruit dans le signal se fait de manière similaire, en extrayant tous les pics ayant une période < 5.5 mois avec une puissance spectrale > 2/3 de la puissance maximale des pics de la portion « signal » du périodogramme, au-delà de cette même période seuil (pics de périodes > 5.5 mois). L'algorithme d'interprétation catégorise enfin le signal parmi une des classes de cyclicités prédéfinies dans l'outil : Annuelle dominante (bruitée ou non), Annuelle non dominante (bruitée ou non), Pluriannuelle dominante (bruitée ou non), ..., Bruit haute-fréquence dominant. Ou « Analyse sautée » lorsque l'analyse spectrale n'est pas possible, pour diverses raisons (ex. trop grande lacune dans la chronique).

La Figure 10b ci-dessous montre, à titre d'exemple, le périodogramme produit à partir de la chronique de débits du point 19,1, malgré une longue lacune de 7 ans. La série préfiltrée des débits journaliers ayant fait l'objet de l'analyse spectrale est illustrée dans la Figure 10a. Le texte dans la zone graphique du périodogramme (« = ... ») est le résultat de l'interprétation faite automatiquement par l'algorithme développé, indiquant dans ce cas-ci que le signal est dominé par une cyclicité annuelle avec un bruit haute-fréquence relativement important. Les codes entre parenthèses sont des formes abrégées pour exprimer autrement la classe de cyclicités détectée.

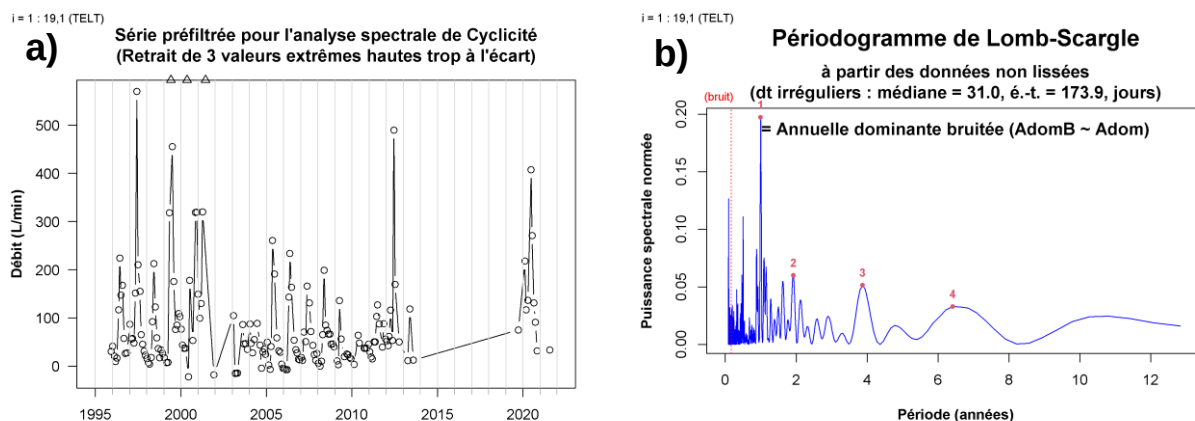


Figure 10 : Exemple d'analyse spectrale : a) Chronique préfiltrée des débits du point 19,1 analysée ; b) Périodogramme et son interprétation en termes de classe de cyclicités

Détection de rupture (non homogénéité)

La détection d'une rupture dans la moyenne de la série temporelle est faite par le test non paramétrique de Pettitt (1979) qui dérive du test de Mann-Whitney (voir BRGM/RP-63066-FR pour une description détaillée). Le test de Pettitt permet de déterminer le temps auquel se produit le changement principal de position (des moyennes) des valeurs observées. Si le test présente une p-value très faible (ex. $p < 0.05$) on peut en conclure que la rupture est significative et calculer les moyennes (ou les médianes) de part et d'autre, c.-à-d. avant et après la rupture. Helsel, Hirsch *et al.* (2020) recommandent d'utiliser ce test pour déterminer le point de rupture de manière objective (sur la base d'une analyse statistique) plutôt que subjective (par une analyse visuelle à la recherche d'un saut important dans les valeurs de la chronique). D'autres tests et algorithmes existent qui permettent de détecter plus d'un point de changement dans une chronique, mais pour les fins de cette expertise, le test de Pettitt est jugé suffisant car il informe s'il y a au moins une rupture significative dans la série, dans lequel cas il est alors de toute façon pertinent voire essentiel d'examiner visuellement la chronique.

En pratique, la détection statistique d'une rupture dans une chronique de débit est un des moyens possibles pour détecter une anomalie franche (~soudaine) dans l'évolution du débit d'une source.

Tests statistiques pour vérifier la stationnarité, l'homogénéité et l'indépendance des séries

Quelques autres tests sont réalisés, en plus du test de Pettitt, pour vérifier si les hypothèses de stationnarité, d'homogénéité ou d'indépendance des valeurs annuelles sont adéquates ou au contraire doivent être rejetées. Pour plus de détails sur ces tests, voir les rapports BRGM/RP-63066-FR et BRGM/RP-65718-FR).

Pour vérifier la stationnarité, deux tests sont utilisés : le test de Mann-Kendall classique, et une version modifiée de ce test, suivant la méthode de Hamed et Rao, qui tient compte de l'éventuelle autocorrélation de la série. Si les p-valeurs calculées par ces deux tests sont toutes deux très faibles ($p \leq 0.05$), l'hypothèse de stationnarité est rejetée et on peut alors considérer que la tendance estimée par la pente de Sen est statistiquement significative.

Pour vérifier l'homogénéité, c'est le test de Wilcoxon qui est utilisé. Ce test non paramétrique est réalisé après le test de rupture de Pettitt, car il vient comparer deux portions de la série : la partie avant versus la partie après l'année de rupture s'il y a une rupture significative ou, à défaut, la première moitié versus la seconde moitié de la série. Ce test ne prend pas en compte les lacunes. Le principe du test est de traiter ces deux portions comme deux échantillons (d'un point de vue statistique) pour vérifier si l'un est significativement plus élevé ou plus bas que l'autre.

Pour vérifier l'indépendance, une approche simple basée sur l'autocorrélation des valeurs de la série est appliquée, comme dans l'outil ESTHER. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 « ro_1 » est calculé et une valeur seuil de 0.6 est considérée. Si $ro_1 < 0.6$, la série est jugée indépendante.

Il est important de souligner que ces tests statistiques (de stationnarité, d'homogénéité et d'indépendance de la série) apportent un regard purement statistique sur la série, lequel peut s'avérer insuffisant dans certains cas non idéaux, par exemple si la série est courte, trop lacunaire ou trop bruitée. Il demeure donc pertinent, en pratique, de vérifier les résultats de ces tests par une appréciation visuelle des caractéristiques des séries inhérentes à ces hypothèses, avant de porter un jugement sur l'importance de la non stationnarité (ex. tendance à la baisse) de la série d'un point de vue pratique, par exemple. C'est pourquoi la préparation des résultats présentés ci-après a également compris une phase d'examen visuel de l'ensemble des chroniques.

2.4.2. Résultats de l'analyse

Plusieurs analyses ont été réalisées à partir du grand tableau d'indicateurs¹¹ généré en suivant la méthodologie décrite dans la sous-section précédente (§ 2.4.1). Ces analyses apportent des éléments de réponse face aux questionnements sur la pertinence du suivi effectué jusqu'à présent, en termes d'exploitabilité des données, pour 126 chroniques de suivi du débit disponibles auprès de TELT et appartenant toutes au réseau de surveillance amélioré (cf. Annexe 2 et Annexe 4 pour la liste des points de suivi considérés dans cette analyse et les résultats détaillés).

Fréquence, durée et continuité temporelle du suivi

L'analyse des chroniques confirme que la vaste majorité des points sont suivis à une fréquence approximativement mensuelle : pour 96 % des points, le pas de temps médian entre observations consécutives se situe entre 28 et 35 jours. Il n'y a donc que 4 % des points qui font l'objet d'un suivi principalement hebdomadaire.

En termes de durée totale du suivi (de l'observation la plus ancienne à la plus récente), 85 % des points proposent une chronique s'étalant sur plus de 20 ans. Il y a 18 points ayant un suivi d'une durée inférieure à 20 ans (Figure 11a). Une vérification des années de première et de dernière observation confirme néanmoins que la durée plus courte en ces 18 points s'explique à chaque fois par le fait que le suivi a été initié plus récemment.

En termes de nombre d'observations faites par point, une majorité de points cumule entre 150 et 300 observations à ce jour (Figure 11b). Une dizaine de points se démarque par des nombres plus élevés, tandis qu'une trentaine de points ont un nombre d'observations inférieur à 150. On pourrait penser que ces deux indicateurs sont parfaitement corrélés, mais ce n'est pas le cas en

¹¹ Ce grand tableau d'indicateurs est consultable au format Excel, parmi les annexes électroniques jointes.

réalité à cause des discontinuités dans le suivi. En effet, une comparaison graphique XY des deux indicateurs révèle aussitôt que presque tous les points offrent moins d'observations qu'il serait attendu d'un suivi mensuel régulier (Figure 11c). Les résultats présentés par la suite vont confirmer et affiner ce constat.

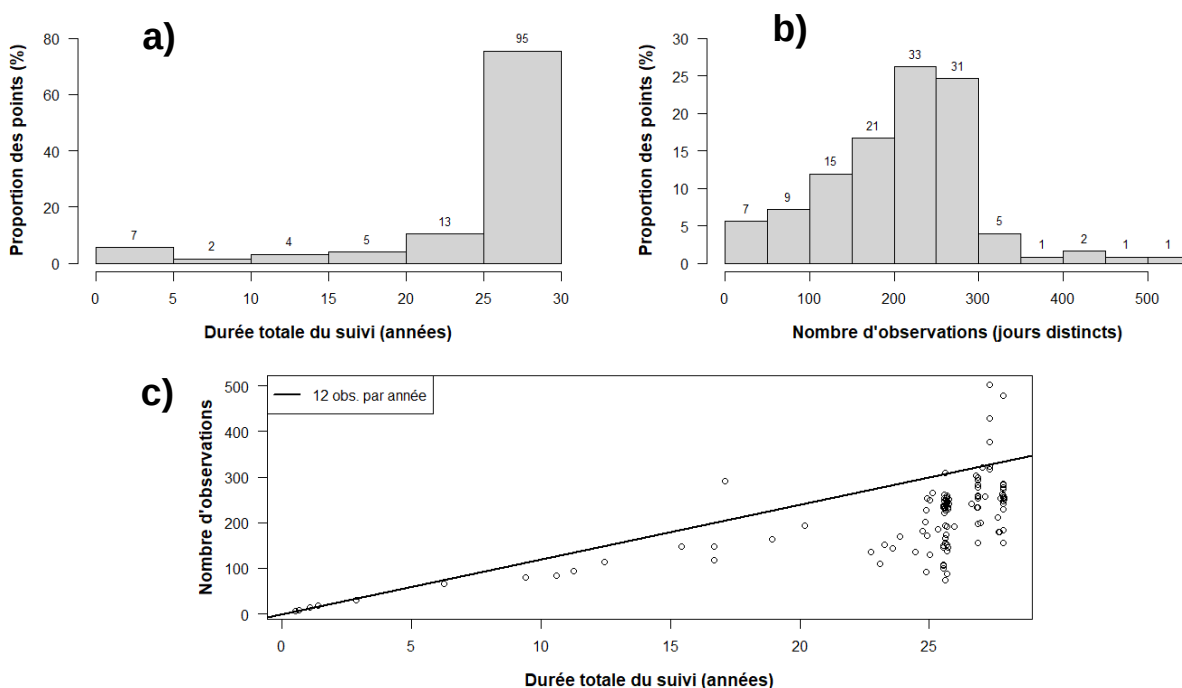


Figure 11 : Longueurs des chroniques de suivi du débit

L'analyse des lacunes dans les séries agrégées par mois ou par année permet de dresser un portrait plus fin de la continuité du suivi. Les résultats rapportés dans la Figure 12 ci-dessous montrent ainsi que :

- De nombreux points ont une proportion importante de mois lacunaires c.-à-d. sans observation du débit : 97 points ont >20 % de mois lacunaires, dont 30 points ont >30 % de mois lacunaires.
- 37 points ont un suivi interrompu ≥ 5 fois par des lacunes s'étendant sur plus de 3 mois. Seuls 6 points offrent un suivi mensuellement continu.
- En appliquant la notion d'années suffisamment complètes (une ASC a au moins 1 valeur par mois pour au moins 6 des 12 mois de l'année civile), 42 points ont un suivi troué par >20 % d'années incomplètes ou manquantes, dont 13 points avec >50 % d'années incomplètes ou manquantes.
- Le plus grand bloc d'années lacunaires (incomplètes ou manquantes) dans la chronique dépasse 20 % de la durée totale du suivi pour 33 points, et même 40 % pour 10 points.
- Par ailleurs, aucune variation significative du taux de mois lacunaires n'est observée entre saisons de hautes eaux versus de basses eaux¹². Néanmoins, les mois de juillet, décembre, janvier et mai apparaissent beaucoup plus souvent comme « mois le plus

¹² Entre « hautes eaux » de mars à août, et « basses eaux » de septembre à février : des « semestres hydrogéologiques » définis de manière simplifiée et rapide seulement pour cette analyse.

lacunaire » que les autres mois de l'année. Les hypothèses explicatives proposées sont les suivantes. Les lacunes plus fréquentes en décembre et janvier sont probablement liées à des périodes d'enneigement durant lesquelles les captages sont difficiles d'accès. Les lacunes des mois de mai et de juillet correspondent probablement à des moments où les débits sont plus difficiles à mesurer car particulièrement forts.

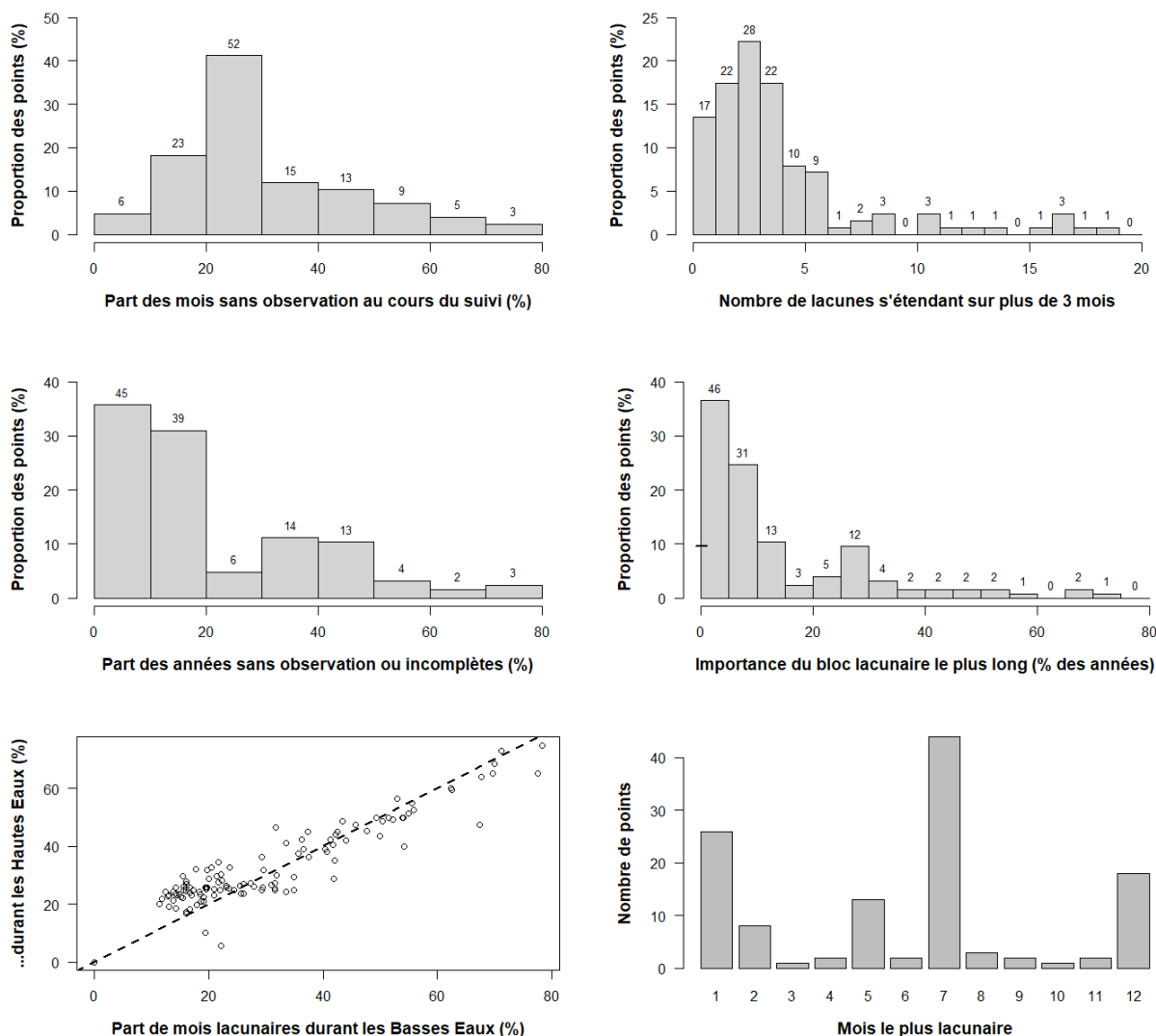


Figure 12 : Résultats de l'analyse des lacunes dans chroniques de débits : (en haut) Lacunes dans les séries temporelles agrégées par mois ; (au milieu) Lacunes dans les séries agrégées par année ; (en bas) Comparaison saisonnière du taux de lacunes durant hautes versus basses eaux.

Qualité numérique des observations

Un autre aspect intéressant à investiguer a trait à la qualité des observations de débit faites dans le cadre du suivi des points du réseau de surveillance des eaux souterraines. Si une majorité des observations apportent une mesure quantitative du débit, l'analyse du jeu de données révèle néanmoins que plusieurs observations sont imprécises voire non quantitatives.

Les imprécisions des mesures se manifestent de deux manières différentes dans les données.

Dans certaines chroniques, le nombre de valeurs différentes¹³ est anormalement limité. Ceci est exposé par un indicateur évaluant l'importance des trois valeurs les plus fréquentes par rapport à l'ensemble des N valeurs de la chronique (part exprimée en pourcentage). L'analyse des résultats de cet indicateur permet de constater l'importance des trois valeurs les plus fréquentes dépasse 20 % pour 81 points et 50 % pour 15 points (Figure 13). Il y a même 4 chroniques pour lesquelles trois valeurs composent plus de 80 % de leur contenu (points 1 ; 59 ; 228,1 ; et 3044,2 : tous les 4 des CC). Tous points confondus, les 5 valeurs les plus fréquentes sont : 0, 600, 120, 60 et 99999 (valeur brute indiquant l'observation non quantitative d'un débit trop important pour être mesuré par l'instrumentation utilisée sur le terrain : voir un peu plus bas).

Et dans certaines chroniques (parfois les mêmes), on observe un ou des plateaux numériques où une même valeur se répète pour plusieurs observations consécutives. Dans la majorité des cas, les plateaux numériques sont de longueur limitée. Mais il y a tout de même 40 chroniques qui ont un plateau numérique long d'au moins 5 observations, et 12 chroniques avec un plateau constant sur >10 observations. En termes de durée, 6 chroniques ont un plateau dont la durée accapare >30 % de la durée totale du suivi (points 1 ; 59 ; **65,2** ; 228,1 ; **3044,2** ; et **6007** : pour les trois points en gras toutefois, c'est le débit nul = 0 L/min qui est mesuré à répétition).

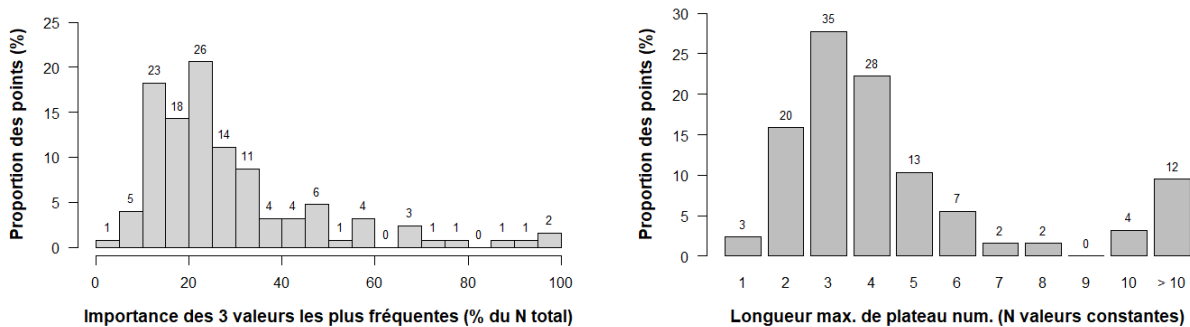


Figure 13 : Résultats de l'analyse de redondance des valeurs numériques de la chronique, une des manifestations de l'imprécision des mesures

Il y a aussi des observations de débit qui ne sont pas quantitativement exploitables, c.-à-d. dont la valeur rapportée ne peut être utilisée tel quel de façon fiable. D'une part, il arrive que le débit soit « trop important pour être jaugé au seau, donc généralement supérieur à 1200 l/min¹⁴ ». La valeur brute renseignée dans la base de données est alors = 99999 afin d'indiquer un débit trop important. Ces valeurs non quantifiées peuvent être soit écartées (ignorées), soit remplacées par la valeur quantifiée la plus élevée de la chronique, préalablement à la plupart des analyses et tests statistiques, sans dégradation notable des résultats si elles sont peu fréquentes. Ces astuces seront cependant moins pertinentes et peu efficaces si l'analyse s'intéresse aux maxima de la chronique. 45 des 126 chroniques ont au moins une valeur brute 99999 (débit trop important pour être quantifié) et 22 chroniques en ont plus de quatre (Figure 14a). La part des débits non quantifiés dépasse 10 % du nombre total d'observations dans 8 chroniques (points 23 ; 39 ; 277,1 ; 321,1 ; 321,2 ; 2016,2 ; 3023 ; et 4-A) (Figure 14b).

¹³ Valeurs différentes : ici après arrondissement des valeurs au dixième de litre par minute (0.1 L/min).

¹⁴ D'après ce qui est indiqué dans plusieurs des documents de compilation tabulaire et graphique des « Données historiques relatives au suivi des sources » (établis par GEOTEC et validés par TELT, en 2021).

A titre d'illustration, la Figure 15 présente la chronique du point 321,1 dont 36 % des observations sont non quantitatives. Les moyennes mensuelles ont été calculées en suivant l'astuce décrite plus haut qui consiste à remplacer les valeurs brutes 99999 par le débit quantifié maximal ayant été observé (ici = 3600 L/min). Malgré cette opération, on constate que les moyennes annuelles calculées sont fortement influencées par les pseudo-observations de débits très élevés (= 3600) et donc peu fiables. On note aussi que le maximum annuel n'est presque jamais quantifié, en raison des débits trop importants pour être quantifiés.

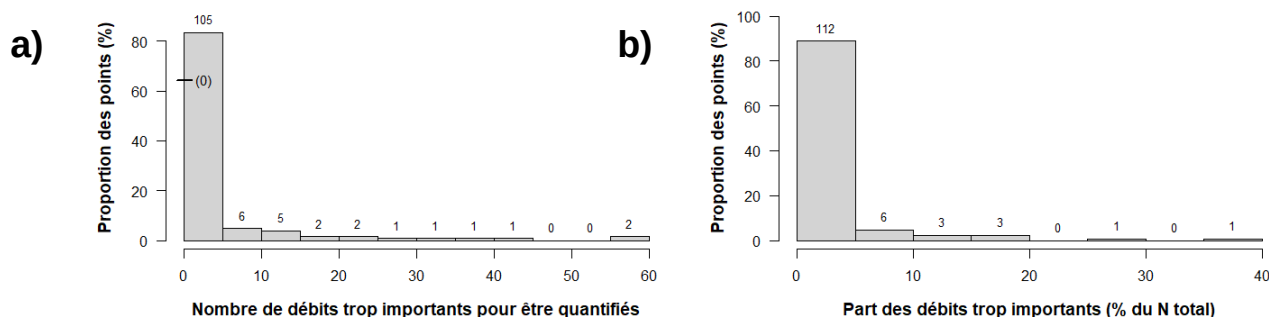


Figure 14 : Fréquence des débits trop importants pour être quantifiés, dans les chroniques

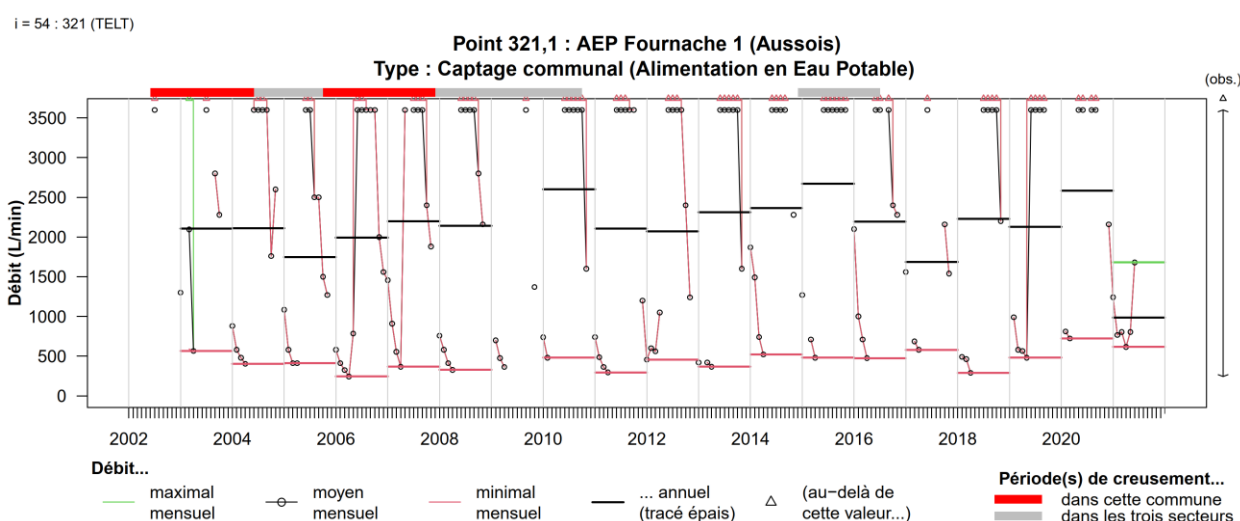


Figure 15 : Exemple d'une chronique avec une fréquence élevée de débits non quantifiés

Un autre élément relatif à la qualité des observations est la présence de valeurs que l'on peut juger potentiellement aberrantes car « extrêmes », c.-à-d. très à l'écart par rapport à la vaste majorité des données « non extrêmes » de la chronique¹⁵. Ces valeurs extrêmes incluent parfois

¹⁵ Par données « non extrêmes », on entend les valeurs qui se trouvent à l'intérieur des bornes déterminées par un premier boxplot calculé sur les valeurs brutes de la chronique ainsi qu'un second boxplot calculé sur les maxima annuels des années complètes, en considérant un intervalle non extrême ou « moustache » s'étendant jusqu'à 5 fois (v. brutes) ou 3 fois (max. annuels) l'écart interquartile. Les débits bruts 99999 sont ainsi parfois considérés non extrêmes si on les retrouve fréquemment dans les maxima annuels.

les débits trop importants mentionnés plus haut, mais elles peuvent aussi inclure des débits nuls (0 L/min) ou très faibles s'ils sont peu fréquents et bien inférieurs à la majorité des autres débits observés. L'analyse du jeu de données indique que la majorité des chroniques (82 / 126) ne contient pas de valeur extrême. Il y a donc 44 chroniques qui ont au moins 1 valeur extrême (Figure 16). Dans l'ensemble, la part de ces valeurs extrêmes demeure néanmoins très faible. De plus, un examen visuel rapide des chroniques concernées permet de constater que la majorité des débits qualifiés d'extrêmes ne sont en fait pas aberrants : si l'algorithme les a qualifiés ainsi, c'est simplement parce que ces débits sont à la fois très élevés et très rares dans la chronique. En somme, la nature extrême et potentiellement aberrante de quelques valeurs a généralement peu d'impact sur la qualité des chroniques d'un point de vue pratique. A titre informatif, les 5 chroniques ayant le plus grand nombre de valeurs extrêmes « potentiellement aberrantes » sont celles des points : 49, 50, 75, 6-B et 18-E.

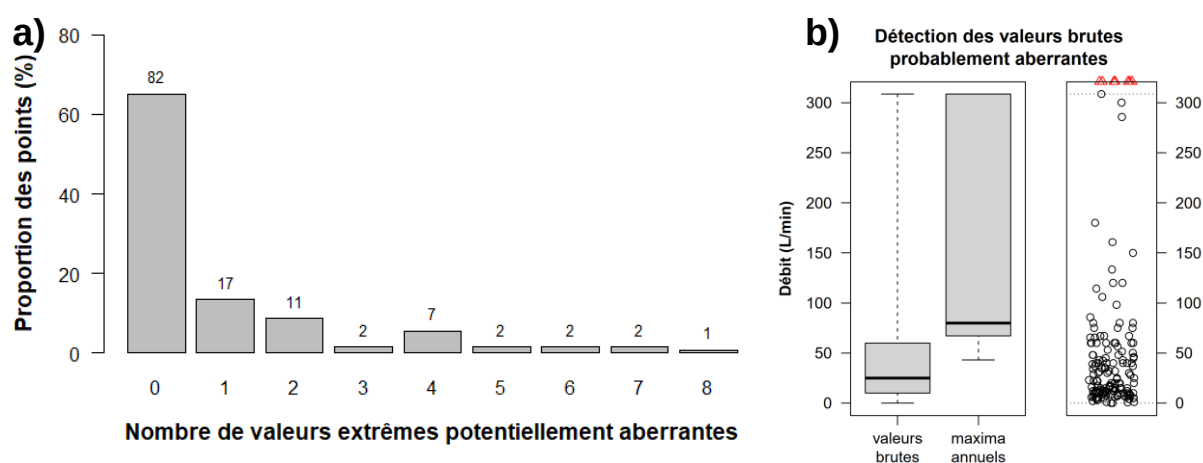


Figure 16 : Valeurs extrêmes dans les chroniques : a) Fréquence ; b) Boxplots sur lesquels se base la détection des valeurs extrêmes, ici l'exemple de la chronique du point 49

Evolution du débit au cours du temps et tests statistiques liés

Des tests et analyses statistiques ont été appliqués sur les chroniques disponibles afin d'évaluer pour quelles chroniques une évaluation statistique du changement du débit au cours du temps est permise. Ces tests et analyses se sont concentrés sur la recherche d'une tendance linéaire générale et d'une éventuelle rupture dans les débits moyens annuels des « Années suffisamment Complètes » (ASCs) seulement. Les chroniques ont aussi fait l'objet d'une analyse spectrale afin de déterminer les cyclicités principales composant leur signal, lorsque celui-ci est d'assez bonne qualité pour se prêter à ce type d'analyse.

Préalablement aux tests et analyses de Tendance / Rupture / Cyclicités en tant que tel, plusieurs indicateurs relatifs à la continuité du suivi et à la qualité des observations ont été considérés afin de vérifier quelles chroniques sont suffisamment continues et d'assez bonne qualité numérique pour que ces tests et analyses soient appliqués. Plusieurs facteurs limitant l'applicabilité de ces derniers à certaines chroniques ont ainsi été définis. Le Tableau 8 présente le décompte des points de suivi (n) en fonction des combinaisons de facteurs limitants identifiés. On constate que :

- 80 (soit >60 %) des points de suivi satisfont les conditions d'application (avec aucun facteur limitant) ;

- 14 chroniques apparaissent trop courtes (en termes de nombre d'années suffisamment complètes disponibles) ;
- 14 chroniques présentent un plateau numérique et/ou des valeurs trop redondantes (donc une mauvaise résolution numérique des valeurs rapportées) ;
- 34 (soit 27 %) des chroniques ont trop de lacunes (années incomplètes ou manquantes).

Si on considère les analyses séparément¹⁶, ces facteurs empêchent l'analyse de tendance pour 15 points, rendent l'analyse de rupture peu fiable et donc pertinente pour 40 points, et empêchent l'analyse spectrale des cyclicités du signal de 26 points.

Il y a donc près du tiers des chroniques (46 / 126) qui ne peuvent faire l'objet de toutes ces analyses à la fois, la plupart en raison de facteurs limitants qui pourraient être atténués voire résolus à moyen/long terme par l'amélioration du suivi effectué (voir § 2.4.4 et Chapitre 3).

Facteurs limitant les analyses de Tendance ou de Rupture ou de Cyclicités	n	%
Aucun (les trois analyses sont possibles)	80	63.5
Nombre d'Années Suffisamment Complètes (ASCs) insuffisant	5	4
Nombre d'ASCs insuffisant & Plateau ou valeurs redondantes	1	0.8
Nombre d'ASCs insuffisant & Plateau ou valeurs redondantes & Trop de lacunes	3	2.4
Nombre d'ASCs insuffisant & Trop de lacunes	5	4
Plateau ou valeurs redondantes	6	4.8
Plateau ou valeurs redondantes & Trop de lacunes	4	3.2
Trop de lacunes	22	17.5
Au moins un facteur limitant identifié (par le traitement en lot des chroniques)	46	36.5

Tableau 8 : Nombre de chroniques concernées par différents facteurs limitant l'applicabilité des analyses et/ou tests de tendance, de rupture ou de cyclicités

Ensuite, les tests statistiques de Mann-Kendall (tendance) et de Pettitt (rupture) ont été appliqués, seulement aux chroniques ne présentant pas de facteur limitant¹⁷. Le Tableau 9 rappelle qu'une part importante (32 %) des chroniques n'ont pas pu faire l'objet de tests fiables en raison des facteurs limitants mentionnés plus haut. Une tendance ou une rupture significative et exclusive n'est détectée que dans 16 chroniques. Dans 20 autres chroniques, ce sont tendance et rupture qui sont toutes deux significatives. Comme les résultats des tests de tendance et de rupture indiquent alors tous deux une significativité, ils ne permettent donc pas, pour ces 20 chroniques, de savoir s'il y a bel et bien une tendance et une rupture dans le signal, ou si c'est une rupture importante qui à elle seule a mené à la détection d'une « fausse tendance ». Une analyse visuelle des chroniques demeure donc essentielle au moins pour ces 20 cas. Enfin, il y a 50 chroniques

¹⁶ Il est à noter qu'il y a des recoupements entre certains des dénombrements de points présentés ici.

¹⁷ A propos des facteurs limitants, il y a quelques différences en termes de facteurs limitants et de critères utilisés (valeurs seuils) spécifiquement pour les analyses spectrales. C'est ce qui explique qu'il n'y ait que 40 chroniques limitées d'après le Tableau 9 tandis qu'il y en a un peu plus (46) d'après le Tableau 8.

(soit 40 % des points de suivi) dans lesquelles ni tendance ni rupture significatives ne sont confirmées par les tests¹⁸.

Résultat des tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt	n	%
Tendance et rupture NON significatives	50	39.7
Tendance seule à être significative	7	5.6
Rupture seule à être significative	9	7.1
Tendance et rupture significatives → Tendance et/ou Rupture	20	15.9
Tests seraient peu fiables (à cause de facteurs limitants...)	40	31.7

Tableau 9 : Résultat des tests statistiques de Mann-Kendall et de Pettitt

En complément, les trois tests statistiques définis dans la documentation de l'outil ESTHER du BRGM qui sont proposés pour évaluer si une série de valeurs annuelles est adaptée à une analyse probabiliste, ont été appliqués aux chroniques. Ces tests, qui vérifient le respect des conditions de stationnarité (test de Mann-Kendall), d'homogénéité (test de Wilcoxon) et d'indépendance (plutôt basée sur l'autocorrélation d'ordre 1 : $r < 0.6$) de la série, viennent ajouter autant de conditions en plus des facteurs limitants traités plus haut¹⁹. Le Tableau 10 ci-dessous présente le nombre de chroniques qui satisfont l'ensemble (4), une partie ou aucune (0) de ces conditions. Ce résultat indique ainsi que seules 42 chroniques seraient de bonnes candidates pour une analyse probabiliste destinée à estimer des indicateurs (seuils) de gestion des débits. Si on ajoute à ces 4 conditions un 5^{ème} critère visant à exclure les chroniques contenant >1 % de débits non quantifiés afin que le calcul des seuils ne soit pas perturbé par ceux-ci, le nombre de chroniques exploitable se réduit à 29.

Ok pour analyse probabiliste ?	n	%
oui : 4 conditions satisfaites	42	33.3
non : 3 conditions satisfaites	37	29.4
non : 2 conditions satisfaites	24	19
non : 1 conditions satisfaites	16	12.7
non : 0 conditions satisfaites	7	5.6

Tableau 10 : Nombre de chroniques qui satisfont toutes, certaines ou aucune des conditions idéalement requises pour effectuer une analyse probabiliste destinée à estimer des indicateurs (seuils) de gestion des débits

En termes de rupture, voici les résultats obtenus pour les 24 chroniques ayant une rupture qualifiée de significative par le test de Pettitt et associée à une diminution du débit moyen, avec un suivi débutant avant 2000 et se poursuivant au-delà de 2010 afin de maximiser les chances de détecter une éventuelle rupture entre ces années (Figure 17). L'histogramme montre que l'année la rupture est variable, avec toutefois une légère prépondérance entre 2002 et 2005

¹⁸ Rappelons toutefois qu'une tendance visuellement évidente mais ayant un taux de variation (pente) modéré n'est pas nécessairement qualifiée de significative par le test de Mann-Kendall. La raison étant que les Y de la droite de régression linéaire apparaissent alors trop peu dépendants des X (ici : le temps).

¹⁹ La 4^e condition à satisfaire est qu'aucun des facteurs limitants précités n'ait été identifié pour la chronique.

(Figure 17a). Le nuage de points détaille les ruptures en précisant la diminution de débit associée à chaque rupture ainsi que le code du point concerné (Figure 17b). On constate que la diminution (relativement au débit moyen avant la rupture) peut être de très faible (<20% pour 4 points) à très forte (>80% pour 2 points). Les points impactés 6007, tari au cours de l'année 2003 (source « impactée par les travaux d'excavation de la descenderie de Villarodin-Bourget/Modane » entre juillet 2002 et novembre 2007, cf. Tableau 3) et 3004, qui a montré une diminution très prononcée de ses débits (captage « perturbé par les travaux d'excavation de la descenderie de Saint-Martin-la-Porte entre juin 2003 et juillet 2010, cf. Tableau 3), tous deux documentés dans le rapport du PRF [TELT, 2021] sont ainsi mis en évidence par cette analyse (Figure 17b).

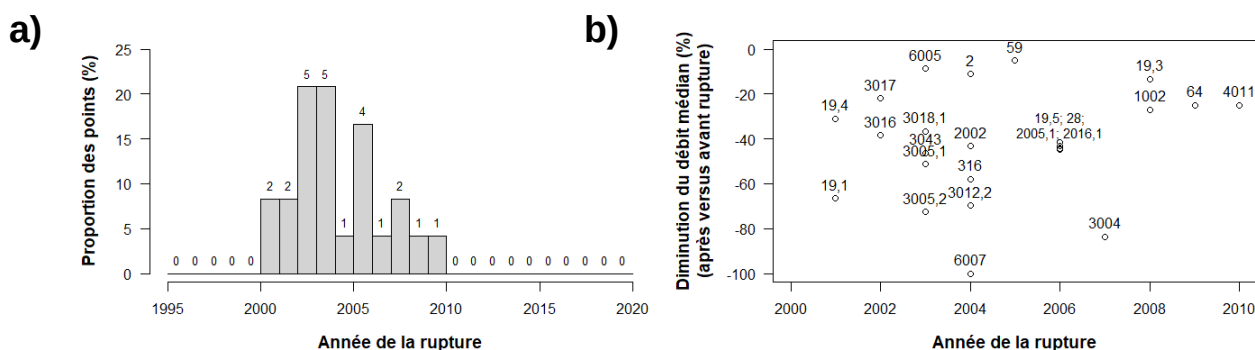


Figure 17 : Ruptures détectées sur les 24 chroniques ayant une rupture qualifiée de significative par le test de Pettitt et associée à une diminution (significative) du débit moyen : a) Distribution de l'année de la rupture détectée (1 par chronique) ; b) Année de rupture et taux de diminution du débit médian associés.

En termes de tendance linéaire générale, les pentes estimées par la méthode non paramétrique de la pente de Sen ont été utilisées pour calculer la « variation totale » du débit annuel moyen sur la période de suivi entière²⁰ au point. Un calcul de tendance a été fait pour les 111 chroniques ne présentant pas de « facteur limitant » concernant ce type d'analyse (voir plus haut). Les résultats sont rapportés de deux manières différentes dans la Figure 18.

Dans l'histogramme de gauche (Figure 18a), on constate que le facteur de variation totale du débit (au cours de la période de suivi entière) s'étend d'une forte réduction (facteur < 1) à une augmentation notable (facteur > 1) du débit annuel moyen. Sans surprise, l'intervalle montrant la proportion la plus élevée correspond à une variation très faible (facteur ~ 1). On remarque 54 points affichant une tendance négative. A l'opposé, 9 points affichent une forte tendance positive avec un facteur de variation totale > 2 : 1004 ; 4002 ; 13-M1 ; 3023 ; 9-A ; 79 ; 117 ; 49 ; 18-F (en ordre croissant de facteur de variation totale).

L'histogramme de droite (Figure 18b) présente la variation totale de la tendance en termes d'écart entre le débit annuel moyen final (le plus récent) – initial (le plus ancien) calculé par point de suivi. Ces résultats complémentaires permettent simplement de souligner l'ampleur des évolutions estimées du débit annuel moyen en quantité absolue (pertes ou gains de productivité du point d'eau en L/min). Ils montrent ainsi qu'on peut observer des tendances autant à la baisse qu'à la hausse des débits, dans ce réseau de surveillance. A titre informatif, les points montrant les

²⁰ La période de suivi « entière » s'étend de la première à la dernière année « suffisamment complète ». La variation totale est la différence entre la dernière moins la première valeur de débit annuel moyen (AC).

variations totales positives les plus fortes ($> +200$ L/min) sont : 277,1 ; 1-A ; 1004 ; 4002 ; 39 ; 6-B ; 3023 ; 57 ; 58 ; 1-B ; 13-M1 ; 2-B ; 2019,7 ; 18-F (en ordre croissant de variation totale du débit annuel moyen).

Il est donc important de garder à l'esprit que le débit peut montrer une tendance ambiante à la hausse, lorsqu'on analyse une chronique afin de déterminer si les travaux d'excavation ont eu ou non un impact sur la productivité du point d'eau. Ainsi, c'est la réduction de la pente d'une tendance, plutôt que le strict constat d'une forte tendance négative, qui devrait être surveillée.

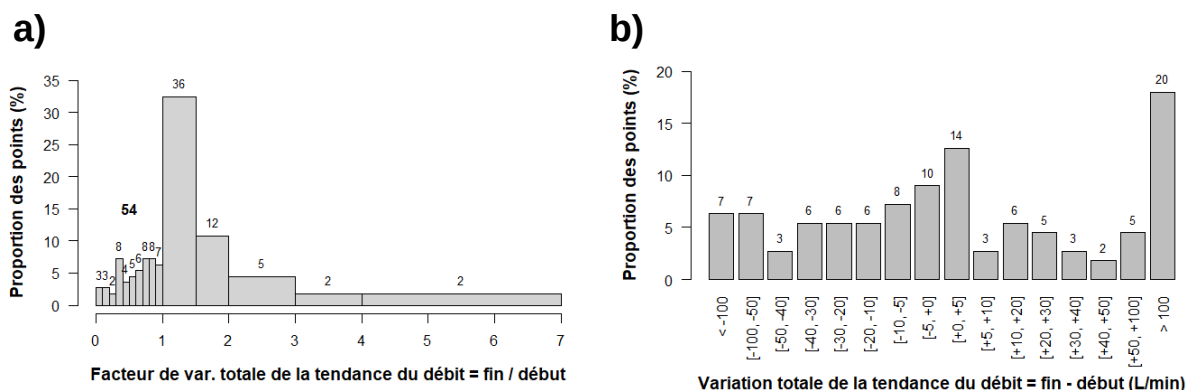


Figure 18 : Tendances linéaires générales des chroniques, évaluée selon la méthode non paramétrique de la pente de Sen et résumée par la variation totale du débit au cours de la période de suivi entière :

a) Facteur de variation totale de la tendance = débit d'après la tendance à la fin ÷ débit au début de la période de suivi, donc < 1 indique une tendance à la baisse ; b) Variation totale de la tendance = débit d'après la tendance à la fin – débit au début de la période de suivi, exprimé en L/min et par intervalle.

Mentionnons toutefois que les tests et analyses statistiques considérés ici ne permettent d'évaluer qu'une tendance linéaire générale et qu'une seule rupture éventuelle pour l'ensemble de la série des données annuelles retenues. En effet, les méthodes classiques qui sont utilisées ne découpent pas la chronique en sous-parties pour affiner l'analyse²¹.

Cyclicité(s) apparente(s) dans le signal

L'analyse spectrale des chroniques, réalisée par la préparation d'un périodogramme de Lomb-Scargle puis par l'identification de ses périodes principales par interprétation de ses pics de puissance, a permis de caractériser les cyclicités apparentes dans le signal de 100 des 126 chroniques disponibles. Le Tableau 11 ci-dessous compile les résultats de l'interprétation des périodogrammes en termes de classe de cyclicité principale. Rappelons que la part relative du contenu haute-fréquence ou « bruit » dans le signal²² est également évaluée lors du traitement d'interprétation du périodogramme, en calculant un rapport signal / bruit. C'est ainsi que le terme

²¹ Une analyse affinée pour par exemple discriminer une première portion de chronique stable, précédant une portion de tendance à la diminution, interrompue par une rupture marquant la chute soudaine des débits et le passage à une dernière portion au débit moyen quasi-nul.

²² L'évaluation de l'importance relative du bruit dans le signal est faite en extrayant tous les pics ayant une période < 5.5 mois avec une puissance spectrale $> 2/3$ de la puissance maximale des pics de la portion « signal » du périodogramme, au-delà de cette même période seuil (pics de périodes > 5.5 mois). Rappel : plus haute fréquence = période plus courte ; plus basse fréquence = période plus longue.

de « bruit » est introduit dans la classification présentée dans le Tableau 11. Les résultats de l'analyse spectrale révèlent ainsi que :

- Un cinquième des chroniques disponibles ne peuvent faire l'objet d'une analyse spectrale à cause d'une trop grande période lacunaire, de valeurs numériques trop redondantes, ou parce que de trop courte durée.
 - Une majorité (57%) des chroniques de débits montre une cyclicité annuelle dominante.
 - Le nombre de chroniques montrant une cyclicité pluriannuelle est beaucoup plus faible.
 - Les cas intermédiaires dits « mixtes », montrant des cyclicités multiples non dominantes, sont relativement nombreux (avec 19 points, soit 15% de l'ensemble des chroniques).
 - Une part importante (au nombre de 48, soit 38%) des chroniques analysées sont bruitées.
 - Une forte majorité (11 / 14) des chroniques classées en pluriannuel (PA...) sont bruitées.
 - Deux (2) chroniques sont dominées par le bruit²³ : celles des points 3005,2 et 6005.
- En somme, les données de suivi du débit disponibles à ce jour sont fréquemment affectées par un bruit relativement important. Ce bruit, s'il peut être le reflet de variations réelles du débit au point d'eau, est plus vraisemblablement lié à la qualité numérique et à la résolution temporelle (fréquence d'acquisition) limitée des mesures.
- En effet, il est typiquement assez rare qu'une seule mesure (ponctuelle, instantanée) de débit par mois résume fidèlement l'ensemble des débits instantanés réellement écoulés en ce point au cours du mois (soit le débit mensuel moyen réel). S'il ressort de cette analyse que plusieurs des chroniques ont un signal bruité, c'est de ce fait parce qu'elles sont composées de débits instantanés ayant une variabilité élevée, et non de débits moyens mensuels, qui auraient une variabilité moindre et auraient formé un signal plus lisse et donc, moins bruité.
 - D'où l'intérêt voire, dans plusieurs cas, la nécessité, d'une fréquence d'acquisition des mesures journalière, même pour analyser les chroniques agrégées par mois.

Classe de cyclicité principale (et codes abrégés)	n	%
Analyse sautée	26	20.6
Annuelle dominante (Adom)	43	34.1
Annuelle non dominante (Anondom ~ mixte)	6	4.8
Pluriannuelle dominante (PAdom)	1	0.8
Pluriannuelle non dominante (PAnondom ~ mixte)	2	1.6
Bruit haute-fréquence dominant (Bdom ~ bruit)	2	1.6
Annuelle dominante bruitée (AdomB ~ Adom)	29	23.0
Annuelle non dominante bruitée (AnondomB ~ mixte)	6	4.8
Pluriannuelle dominante bruitée (PAdomB ~ PAdom)	6	4.8
Pluriannuelle non dominante bruitée (PAnondomB ~ mixte)	5	4.0

Tableau 11 : Cyclicité principale identifiée dans le signal des chroniques pouvant faire l'objet d'une analyse spectrale

²³ Le bruit domine en ces points avec des rapports signal / bruit calculés < 0.5 . Les pics de bruit dominent donc ceux du signal par un facteur > 2 en termes de puissance spectrale relative.

Par ailleurs, une confrontation des résultats de ces analyses spectrales avec ceux des analyses de tendance et de rupture a permis d'identifier 3 points pour lesquels les résultats de toutes ces analyses doivent être interprétés avec une prudence particulière en raison d'une cyclicité pluriannuelle détectée en même temps qu'une tendance linéaire ou une rupture apparente dans le signal : les points 64 ; 3005,3 ; et 3031. En effet, pour ces points, la cyclicité pluriannuelle apparente pourrait en fait n'être qu'une fausse cyclicité correspondant plutôt à une rupture ou à une tendance résiduelle dans le signal analysé²⁴, ou vice versa.

Examen visuel des chroniques

Les tests statistiques et analyses diverses appliqués sur les chroniques agrégées à l'année et résumés plus haut ont mis en évidence qu'une part non négligeable des chroniques ne respectent pas toutes les conditions nécessaires pour effectuer des analyses de tendance, de rupture et spectrale. 46 chroniques ont ainsi été jugées d'exploitabilité statistique limitée parce qu'elles ont trop de lacunes (sont trop discontinues), ont un plateau numérique trop long, ont des valeurs trop redondantes, sont trop courtes, ou souvent une combinaison de plusieurs de ces « facteurs limitants » (revoir le Tableau 8 plus haut).

Cependant, cette qualification automatisée des chroniques basée sur le traitement statistique en lot des chroniques ne doit pas être considérée fiable en tout temps : elle vise plutôt à apporter un premier jeu d'indicateurs très instructifs sur la qualité et l'exploitabilité statistique des chroniques. En d'autres termes, les tests statistiques et autres analyses automatiques ne disqualifient pas nécessairement les chroniques ne pouvant y satisfaire. C'est l'examen visuel des chroniques, réalisé par la suite, qui permet de confirmer (ou non) leur exploitabilité effective.

Lors de cet examen visuel, une attention particulière a été accordée aux chroniques pour lesquelles des facteurs limitants avaient été identifiés, mais l'ensemble des chroniques disponibles a tout de même été examiné. Deux objectifs différents mais complémentaires ont été considérés lors de cet examen, ayant pour but de répondre en parallèle aux deux questions suivantes, pour chaque point de suivi traité :

- 1) L'historique des débits mesurés à ce point est-il exploitable ?
 - a. Si oui, y a-t-il des facteurs à souligner qui limitent la qualité de la chronique ?
 - b. Sinon, pour quelles raisons l'historique du point est-il peu utile ?
- 2) Est-il pertinent de continuer de suivre des débits à ce point dans le futur ?
 - a. Si oui, y aurait-il des aspects à améliorer dans le suivi effectué ?
 - b. Sinon, pour quelles raisons ?

L'examen visuel des 126 chroniques de débits a, ainsi, permis de dresser un bilan plus précis quant à la qualité et donc la pertinence et l'exploitabilité effective du suivi effectué à ce jour. Les résultats détaillés de cet examen sont présentés dans l'Annexe 2. La compilation de ceux-ci révèle que :

En termes de suivi historique :

- L'historique des débits mesurés est exploitable dans 111 des 126 chroniques examinées.

²⁴ On parle ici de tendance résiduelle puisque la tendance linéaire calculée est retirée de la série de données annuelles soumise à l'analyse spectrale. Ce qui n'empêche pas la série « sans tendance » de comprendre encore une portion (non entière) montrant une augmentation ou diminution, plus encore si ces variations sont non linéaires. Or, cette portion peut être interprétée à tort par l'algorithme comme cycle lent.

- Parmi celles-ci, 48 chroniques sont directement exploitables, sans facteur limitant, tandis que 63 chroniques sont jugées exploitables malgré un ou plusieurs facteurs limitants.
- 15 chroniques de débits sont jugées peu utiles (pas ou difficilement exploitables) en raison d'un ou plusieurs facteurs limitants.
- Les principaux facteurs limitants confirmés par l'examen visuel des chroniques de débits sont la fréquence élevée ou encore la longue durée des lacunes ($69 / 126 = 55 \%$), l'imprécision des mesures ($37 / 126 = 29 \%$) et la non quantification des débits très élevés ($19 / 126 = 15 \%$). Souvent, plusieurs facteurs limitants ont été constatés dans une même chronique.

En termes de suivi futur :

- Le suivi futur peut être poursuivi sans besoin d'améliorer le protocole d'acquisition pour seulement 46 (soit 37 %) des 126 points d'eau examinés.
- La poursuite du suivi des débits pour 74 des autres points d'eau (soit 60 %) devrait être accompagnée de modifications au protocole d'acquisition afin d'améliorer :
 - la continuité du suivi (au moins une mesure à tous les mois, sans interruption) ;
 - la précision des mesures (afin d'avoir un signal numérique plus lisse et réaliste) ;
 - la méthode (instrumentation) de mesure afin de quantifier les débits très élevés. (Rappel : L'Annexe 2 peut être consultée afin de connaître les facteurs limitants spécifiques à chaque chronique.)
- La poursuite du suivi des débits est jugée inutile pour 6 des 126 points d'eau examinés, soit parce que la source est tarie depuis plusieurs années, parce que le point de suivi a été remplacé par un autre, ou encore parce que le débit est pratiquement toujours nul.

2.4.3. Conclusions sur l'exploitabilité des données de suivi avec un bilan par commune

Le jeu de données de suivi du débit actuellement disponible par TELT via leur Portail Environnemental comprend 126 chroniques de continuité, de qualité et d'exploitabilité inégales.

Il y a d'abord la fréquence d'acquisition des mesures, très majoritairement mensuelle, qui limite la continuité numérique du signal. En effet, une mauvaise continuité du signal a été confirmée dans 55 % des chroniques de débits examinées. De même, les résultats des analyses spectrales ont souligné que 38% des chroniques sont bruitées, une autre indication qu'une donnée mensuelle ne suffit pas à constituer un signal continu dans plus du tiers des cas.

Ensuite, la continuité du suivi est rarement totale. En effet, 77 % des chroniques ont >20 % de mois lacunaires (sans observation du débit). De même, l'examen visuel des chroniques de débits a confirmé que l'irrégularité du suivi effectué limite l'exploitabilité de 55 % des chroniques.

Puis, il y a la qualité numérique du signal qui, elle aussi, peut limiter l'exploitabilité statistique, l'interprétation visuelle, voire la pertinence même des chroniques vis-à-vis de l'objectif pratique de détection des impacts éventuels du projet sur le débit des sources. Les analyses ont identifié 14 chroniques comprenant une part anormalement élevée de redondance dans leurs valeurs brutes. Cette redondance témoigne de l'imprécision (c.-à-d. la basse résolution numérique) des valeurs de la chronique. Même si ces valeurs redondantes et plateaux numériques peuvent parfois s'expliquer par l'effet stabilisant attendu de l'ouvrage en place sur le débit mesuré (ex. réservoir) ou encore par le tarissement temporaire ou permanent du point d'eau (plateau à 0 L/min), leur présence dans le signal est le plus souvent imputable à une précision limitée des mesures de débit in situ. De la même façon, quelque 500 débits non quantifiés car trop forts pour

être mesurés par l'instrumentation utilisée sur le terrain (un seau, le plus souvent) sont présents dans le jeu de données. Ces débits non quantifiés réduisent la fiabilité des statistiques calculées à partir des chroniques concernées, tout au moins pour les années qui en contiennent²⁵. D'après l'examen visuel des 126 chroniques, 29 % d'entre elles sont imprécises et 15 % d'entre elles incluent une part non négligeable de débits non quantifiés.

Les problèmes de Continuité (!C), de Précision (!P) et de Quantification (!Q) décelés ou confirmés lors de l'examen visuel des chroniques de débit et limitant leur exploitabilité effective, sont comptabilisés par type de problème et par commune, dans le Tableau 12 suivant. Ce bilan des problèmes (ou facteurs limitants) détectés dans le suivi historique des points d'eau examinés souligne que :

- 11 des 13 communes ont > 50 % de chroniques de suivi limitées en termes de continuité du suivi, de précision des mesures et/ou de quantification des débits très élevés.
- 8 des 13 communes ont ≥ 80 % de chroniques de suivi limitées, dont 2 communes pour lesquelles toutes les chroniques de suivi historique examinées ont une exploitabilité limitée par au moins un de ces facteurs.
- Dans l'ensemble, les problèmes les plus fréquemment détectés sont, en ordre décroissant de fréquence : la mauvaise continuité du suivi (!C), l'imprécision des mesures (!P) et la non quantification des débits trop élevés pour l'instrumentation de mesure utilisée (!Q).
- Dans l'ensemble, 74 % des chroniques examinées ont une exploitabilité limitée.
- Attention toutefois (rappel) : Les points de suivi auxquels les chroniques examinées ici sont liées font tous partie du réseau de surveillance amélioré, mais ils ne comprennent que 85 des 101 sources du réseau prescrit par l'arrêté préfectoral de 2011 (cf. § 2.2.1).

²⁵ Les statistiques qui concernent l'ensemble des valeurs ou des percentiles élevés (moyenne, écart type, P90, maximum) sont les plus impactées. Les percentiles moins élevés, telle la médiane, peuvent aussi être impactés lorsque les débits non quantifiés dominent un mois ou une année donnée. La seule statistique peu impactée par les débits non quantifiés est le minimum.

Sigle	Commune	!C	!P	!Q	n !CPQ	n pts	% !CPQ
AVR	Avrieux	2	1	0	2	5	40
AUS	Aussois	2	2	2	4	5	80
BRA	Bramans (Val-Cenis)	5	4	0	7	8	88
FOU	Fourneaux	1	0	1	2	2	100
FRE	Le Freney	5	0	0	5	5	100
MOD	Modane	5	1	1	7	8	88
ORE	Orelle	7	7	1	9	17	53
SAD	Saint-André	8	10	1	13	15	87
SJU	Saint-Julien-Montdenis	1	3	2	4	7	57
SMA	Saint-Martin-d'Arc	0	0	0	0	1	0
SMM	Saint-Michel-de-Maurienne	17	5	4	18	28	64
SMP	Saint-Martin-la-Porte	11	3	0	11	12	92
VBT	Villarodin-Bourget	5	1	7	11	13	85
Totaux	(pour ces 13 communes)	69	37	19	93	126	74

« n !CPQ » = nombre de points concernés par au moins un de ces trois types de problèmes ; « n pts » = nombre de points d'eau examinés pour la commune ; « % !CPQ » = part des points qui sont problématiques pour la commune.

Tableau 12 : Bilan des problèmes de Continuité (!C), de Précision (!P) et de Quantification (!Q) décelés ou confirmés lors de l'examen visuel des 126 chroniques de débit, calculé par commune puis au total

Par ailleurs, les tests statistiques et analyses diverses appliqués sur les chroniques agrégées à l'année ont mis en évidence qu'une part non négligeable des chroniques ne respectent pas toutes les conditions nécessaires pour effectuer des analyses de tendance, de rupture et spectrale. En effet, 46 chroniques ont été identifiées comme incompatibles avec la réalisation d'au moins un de ces tests statistiques parce qu'elles ont trop de lacunes, ont un plateau numérique ou des valeurs redondantes, sont trop courtes, ou une combinaison de plusieurs de ces facteurs limitants. Le principal facteur limitant, que ce soit pour les données brutes ou agrégées à l'année, est l'irrégularité du suivi (qui se traduit par une part souvent trop importante de lacunes). De même, l'application de tests statistiques complémentaires sur les séries de données annuelles informe que seules 42 chroniques seraient de bonnes candidates pour une analyse probabiliste destinée à estimer des indicateurs (seuils) de gestion des débits faibles. Ces chiffres (46 et 42) ont été confirmés par la phase d'examen visuel des chroniques, qui suggère même que ces chiffres pourraient être révisés à la hausse (d'après le Tableau 12).

2.4.4. Recommandations relatives à la qualité des chroniques de suivi

L'analyse des chroniques de débit disponibles pour 126 points d'eau du réseau de surveillance hydrogéologique de TELT, par traitement de signal puis par examen visuel, a mis en évidence 3 types principaux de problèmes ou facteurs limitant l'exploitabilité des chroniques (Tableau 12) : la mauvaise continuité du suivi (!C), l'imprécision des mesures (!P) et la non-quantification des débits trop élevés (!Q). Or, **la majorité des cas d'exploitation de ces chroniques de débit profiterait d'un suivi régulier et continu (ininterrompu) avec des mesures toujours suffisamment précises et quantifiées dans la mesure du possible.** En effet, disposer de données de meilleure qualité permettrait d'ici quelques années de réaliser des analyses plus sensibles et plus fiables, que ce soit à des fins de détection d'anomalies, par recherche de

ruptures et évaluation de tendances, ou pour la définition de seuils de gestion des débits faibles, à titre d'exemples. Naturellement, ces solutions n'auront pas d'effet sur le suivi historique déjà accumulé. D'où l'importance de mettre en œuvre rapidement des stratégies de résolution de ces problèmes, afin que le nouvel historique en cours d'accumulation soit désormais exempt de ces problèmes et présente progressivement une meilleure exploitabilité.

Pour résoudre simultanément ces 3 problèmes dans le suivi futur des sources, il faudrait :

Au minimum :

- Effectuer un suivi hydrogéologique strictement régulier des points d'eau en assurant au moins une mesure par mois sur tous les mois de l'année ;
- Veiller à ce que l'instrumentation de mesure utilisée soit bien adaptée à toute la gamme des débits pouvant être rencontrés au point, y compris lors des pics de « crue », de sorte que les débits mesurés soient, en termes pratiques, des valeurs moins arrondies et plus proches des débits réels.

Et dans l'idéal :

- Remplacer la procédure d'acquisition manuelle des mesures par une station de mesure automatisée, qui pourrait effectuer une acquisition instantanée par jour voire par heure et ainsi constituer une série de débits moyens, maximums ou minimums journaliers continue, régulière et plus lisse (c.-à-d. montrant des variations progressives) grâce à sa résolution temporelle plus fine. Cette série journalière serait la nouvelle chronique brute stockée dans la base de données et pourrait, au besoin, être agrégée par mois ou par année afin d'obtenir une série de débits moyens/max./min. mensuels ou annuels bien plus représentative des débits réels. En effet, disposer à la base d'une mesure par jour éviterait que les séries mensuelles ne se résument qu'à une seule mesure instantanée du débit par mois comme c'est le cas jusqu'à maintenant pour la grande majorité des points d'eau suivis.

Ces améliorations liées à l'augmentation de la fréquence du suivi ne poseront pas de problème en termes d'exploitabilité de l'ensemble de la chronique (historique) : le maintien d'une fréquence mensuelle n'est pas préférable. De plus, au regard de la durée de vie d'un ouvrage tel que la liaison ferroviaire Lyon-Turin (plusieurs dizaines d'années), il est probable qu'à long terme (horizon 2050) les données à fréquence mensuelle représenteront une partie de plus en plus négligeable de l'historique, au fur et à mesure de l'automatisation du réseau.

En outre, l'analyse des tendances indique qu'il y a parfois des tendances générales à la hausse du débit moyen. C'est donc la réduction de la pente d'une tendance même si elle demeure positive, et non pas que le strict constat d'une forte tendance négative, qui devrait être surveillée.

Les recommandations introduites ici représentent une approche complémentaire à celle développée dans le chapitre suivant concernant les « Préconisations concernant l'amélioration du réseau de suivi hydrogéologique existant » (cf. Chapitre 3).

3. Préconisations concernant l'amélioration du réseau de suivi hydrogéologique existant

3.1. PROTOCOLE D'ACQUISITION DES DONNEES

3.1.1. Constat réalisé à partir des rapports et d'entretiens avec TELT

Au sujet des eaux souterraines, l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 relatif à l'état initial et au suivi dans le cadre du projet Lyon-Turin fait la distinction entre :

- le suivi qualitatif des piézomètres situés à proximité des zones de travaux. Les paramètres suivis sont : pH, conductivité électrique, sulfate, HAP, arsenic, plomb, cadmium et mercure (ainsi que le béryllium pour le site des Sarrasins). La fréquence d'échantillonnage est variable suivant le statut du piézomètre.

Si l'ouvrage fait partie des sites non maintenus en phase d'exploitation (du tunnel), alors il sera suivi de façon trimestrielle pendant un an, puis abandonné en cas de conformité des paramètres (ou temporairement maintenu jusqu'à disparition de la non-conformité).

Si l'ouvrage est maintenu lors de l'exploitation, alors il fera l'objet d'un suivi à fréquence trimestrielle pendant un an, puis semestrielle pendant cinq ans supplémentaires. Si aucune non-conformité n'est détectée, alors le suivi sera abandonné. Dans le cas inverse, la fréquence redevient mensuelle jusqu'à la mise en place d'une solution technique.

- le suivi quantitatif des ressources souterraines, qui est l'objet du présent rapport. Les « points d'eau » feront l'objet de mesure de débit ; les « sources et forages » seront suivis via les variations de la charge hydraulique (« niveau piézométrique ou statique ») La fréquence des mesures est : mensuelle lorsque le point (source ou forage) est situé en dehors d'une zone comprise entre 1 km en amont et 2 km en aval d'un des fronts d'attaque (zone de creusement) ; ou hebdomadaire lorsqu'il est situé au sein de cette même zone. La fréquence pourra être augmentée en cas d'apparition de variations de débit et/ou de « fragilité avérée ».

Les figures suivantes (Figure 19, Figure 20 et Figure 21) reprennent des extraits de l'arrêté concernant les eaux souterraines.

ARTICLE IX : SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

9.1. Définition

Le suivi des eaux souterraines concerne le suivi qualitatif des eaux des nappes souterraines et des sources susceptibles d'être polluées - directement par infiltration ou indirectement suite à une pollution des milieux superficiels – ainsi que le suivi quantitatif des sources ou forage (AEP ou industriels) situés dans la zone d'influence hydrogéologique du tunnel (au total, 18 forages et 101 points d'eaux de DHI – note d'évaluation du risque de baisse de débit définie dans les protocoles en annexe du présent arrêté – compris entre 1 et 4).

12/24

9.2. Qualité des eaux souterraines

Fréquence de prélèvement

Les nappes identifiées comme présentant un risque potentiel d'impact par une pollution directe ou indirecte liée à l'activité d'excavation (cf. cartographies et tableaux du dossier de protocoles) seront équipées de piézomètres aménagés pour permettre le prélèvement d'échantillons. Les résurgences, identifiées comme indicateurs d'une pollution souterraine, feront également l'objet d'analyses. Ces prélèvements seront effectués à fréquence trimestrielle pendant toute la durée des travaux.

Paramètres analysés

Les analyses, effectuées systématiquement sur les échantillons prélevés, porteront sur les paramètres suivants :

- pH, température
- Salinité : conductivité, sulfates,
- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP): Benzo(a) pyrene, benzo(b)- fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(g,h,i)pérylène, indeno(1,2,3-cd)pyrène
- métaux : Arsenic, Plomb, Cadmium, Mercure,
- Béryllium. Ce paramètre ne sera mesuré que sur les piézomètres situés en amont et en aval du site des Sarrazins

9.3. Suivi quantitatif des ressources souterraines

Fréquence de suivi

- **Forages, captages AEP et points d'eau de DHI supérieur ou égal à 3** : suivi mensuel dès lors que le point d'eau ou le forage se situe en dehors d'une zone comprise entre 1 km en amont et 2 km en aval d'un des fronts d'attaque. Dans la zone comprise entre 1 km en amont et 2 km en aval d'un des fronts d'attaque, le suivi de ces ressources passera à fréquence hebdomadaire.
- **Points d'eau de DHI = 2, hors captages AEP** : suivi mensuel – En cas de constat d'une baisse effective de débit, la fréquence de suivi deviendra hebdomadaire.
- **Points d'eau de DHI = 1, hors captages AEP, identifiés comme indicateur d'un impact du percement du tunnel** : fréquence trimestrielle.

Paramètres suivis

Les points d'eau feront l'objet de mesures de débits. Les mesures quantitatives réalisées sur les forages porteront sur des relevés de niveaux d'eau (niveau piézométrique ou statique).

Les points d'eau seront également échantillonnés pour réalisation d'analyses in-situ portant sur la température de l'eau et sa conductivité.

Figure 19 : Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase de chantier

ARTICLE XIV : SUIVI DES EAUX SOUTERRAINES

14.1. Qualité des eaux souterraines

Fréquence de prélèvement

A la fin des travaux, certains piézomètres seront maintenus pendant la phase d'exploitation, d'autres ont vocation à être obstrués. A partir du repli du chantier et **pendant un an**, les piézomètres non maintenus en phase d'exploitation feront l'objet d'un **suiti trimestriel** qui cessera au terme de ce délai si aucune non-conformité des paramètres n'est observée. Dans le cas contraire, ce suivi sera poursuivi jusqu'à stabilisation des paramètres.

S'agissant des piézomètres maintenus en phase exploitation, le suivi s'opérera également à fréquence trimestrielle pendant un an mais se poursuivra pendant 5 ans à raison de 2 campagnes de prélèvements par an. Si une non-conformité était alors mise en évidence, le suivi repassera à une périodicité mensuelle jusqu'à ce que la cause de la source de pollution soit identifiée et qu'une solution soit apportée.

Si aucune non-conformité n'est observée, le suivi sera abandonné à l'issue de cette période.

Paramètres analysés

Les analyses, effectuées systématiquement sur les échantillons prélevés, porteront sur les paramètres suivants :

- Ph
- Salinité : conductivité, sulfates,
- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP): Benzo(a) pyrene, benzo(b)- fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(g,h,i)pérylène, indeno(1,2,3-cd)pyrène
- Métaux : Arsenic, Plomb, Cadmium, Mercure,
- Béryllium. Ce paramètre ne sera mesuré que sur les piézomètres situés en amont et en aval du site des Sarrazins.

14.2. Suivi quantitatif des ressources souterraines

Fréquence de suivi

Au terme de la phase travaux, un bilan du suivi des ressources souterraines sera effectué. Le suivi en phase exploitation portera sur les sources et les forages affectés lors de la phase travaux, dont la liste sera validée par le service en charge de la police de l'eau.

La fréquence de suivi de ces sources sera mensuelle sur les points d'eau impactés lors des travaux, sur une durée à définir par un expert hydrogéologue puis à valider par le service en charge de la police de l'eau. En cas de fragilité avérée ou de grande variation de débit et sur analyse au cas par cas par les services en charge de la police de l'eau, cette fréquence pourra être augmentée jusqu'à stabilisation des paramètres mesurés.

18/24

Paramètres suivis

Les points d'eau feront l'objet de mesures de débits. Les mesures quantitatives réalisées sur les sources et les forages porteront sur des relevés de niveaux d'eau (niveau piézométrique ou statique). Les points d'eau seront également échantillonnés pour réalisation d'analyses in-situ portant sur la température de l'eau et sa conductivité.

Figure 20: Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase d'exploitation

17.2. Eaux souterraines

Les prélèvements des échantillons d'eau souterraine se feront selon les recommandations du fascicule technique AFNOR FD X31-615.

ARTICLE XX : SEUILS ADMISSIBLES POUR LES PARAMÈTRES PRÉSENTS DANS LES EAUX SOUTERRAINES

Les normes de qualités et les valeurs seuils à retenir pour la qualification qualitative des eaux souterraines sont celles définies dans l'arrêté de 17 décembre 2008 établissant les critères d'évaluation et les modalités de détermination de l'état des eaux souterraines et des tendances significatives et durables de dégradation de l'état chimique des eaux souterraines.

Figure 21: Extraits de l'arrêté préfectoral n°2011-165 du 04/03/2011 concernant la phase d'exploitation

Les informations recueillies durant la présente expertise ne permettent pas de savoir si le protocole relatif à une norme (AFNOR ou autre) en matière d'échantillonnage des eaux a été suivi par TELT et son sous-traitant.

Afin de faciliter le déroulement des mesures, TELT a rédigé une fiche descriptive pour 123 sources (« Fiche Information Source ») et 76 forages ou piézomètres (« Fiche Information Piézomètre »). Y figurent, entre autres, des informations nécessaires pour localiser et identifier l'ouvrage (photographies, coordonnées en L93...) et réaliser la mesure (localisation du point de repère, méthode de mesure, etc.). Le document est complété par un extrait de carte topographique et une vue aérienne. Des informations relatives aux risques (accès, conditions météorologiques) et aux EPI (casque, gants, lunettes, etc.) y sont également répertoriées.

D'après les renseignements transmis par TELT, les mesures au niveau d'un site sont généralement réalisées en présence d'un(e) agent de l'entreprise attributaire du marché relatif au réseau de suivi (actuellement, GEOTEC) et d'un(e) agent de la commune concernée. Les valeurs relevées (débit, température, conductivité électrique...) sont consignées sur une tablette numérique de l'entreprise et sur un carnet (gardé par la commune).

Sur un faible nombre de stations, la relève du débit est effectuée par lecture d'un compteur. Dans la majorité des cas, le débit est mesuré de façon manuelle (jaugeage au seau, lecture sur une échelle de niveau). Pour quelques forages, le niveau piézométrique est mesuré automatiquement par une sonde enregistreuse numérique. Sur les autres sites, une sonde piézométrique manuelle est utilisée. Les mesures de conductivité sont réalisées à l'aide d'un conductimètre électronique. Dans de rares cas, les données sont transmises par une entreprise extérieure (ex : SYNERGIE).

Lors de la saisie des données, le (la) technicien(ne) a la possibilité d'ajouter un commentaire concernant la mesures (ex : « débit trop élevé », « conductimètre HS », « modification du seuil », « mesure suite à des travaux », etc.). La fréquence de mesure est dépendante de l'importance du point de mesure (fréquence allant d'hebdomadaire à trimestrielle). Pour rappel, l'arrêté du 04/03/2011 prévoit par défaut une fréquence mensuelle, devenant hebdomadaire lorsque le point de surveillance est située dans une zone comprise entre 1 km en amont et 2 en aval d'un front d'attaque.

3.1.2. Constat à partir des graphiques et tableaux transmis par TELT et la DDT aux communes en juin 2021

Le BRGM a reçu une copie des courriers transmis par la DDT à 13 communes en juin 2021. Parmi les documents joints à chaque commune, figurent : un texte concernant les points de suivi (historique, évolution du débit, mode de mesure, etc.), des graphiques et tableaux (réalisés par GEOTEC pour le compte de TELT).

En consultant ces documents joints, le BRGM a pu étudier la situation de 179 points de surveillance (lorsque les descriptifs et les graphiques étaient disponibles). Supérieurs au nombre de points du réseau prescrit, ils correspondent aussi à une partie du réseau d'auscultation. Il a pu ainsi être constaté que :

- Le jaugeage à l'aide d'un seau et d'un chronomètre (aussi appelé « mesure de débit par empotement ») est une technique fréquemment utilisée par TELT et son entreprise sous-traitante. La mesure semble être réalisée le plus souvent avec un seau de 20 L, voire un « contenant de 37L ». Les autres méthodes consistent en la lecture de la hauteur d'eau au niveau d'un seuil (avec l'utilisation d'une courbe de tarage) et la lecture d'un compteur volumétrique ;
- Des sites ont fait l'objet de travaux pour faciliter et/ou fiabiliser les mesures de débit ;
- Des repères de mesure ont été déplacés afin de faciliter/fiabiliser les mesures ;
- Des difficultés d'accès sont régulièrement évoquées pour un faible nombre de sources situées en altitude, en particulier en période hivernale ;
- L'absence d'agent municipal empêche la réalisation de mesures.

3.1.3. Recommandations

Le jaugeage au seau (ou « mesure de débit par empotement ») est trop souvent utilisé, et ce pour des débits trop importants vis-à-vis de l'état de l'art. Le BRGM n'a pas retrouvé de valeur-seuil dans une norme ISO ou NF, comme c'est le cas pour d'autres dispositifs de mesure sur un canal ouvert. Néanmoins, à titre d'exemples : Benoist et Birgand [2002] préconisent une utilisation de cette technique pour des débits compris entre 0,1 et 0,6 (voire 1) L/s (soit 6 à 36, voire 60 L/min) sur des bassins versants agricoles, Meuli et Wehrle [2001] déconseillent un temps de remplissage inférieur à 5 s (soit 240 L/min pour un seau de 20 L) ; l'INRAE (équipe G2DR) déconseille de l'utiliser pour un débit supérieur à « 10 L/min environ » pour la surveillance d'un barrage [Source : [Wikihydro](#)] ; la FAO préconise cette méthode pour un débit inférieur à 5 L/s (soit 300 L/min) [Source : [FAO](#)].

Au regard de ces éléments, le BRGM a estimé que 46 sites étaient concernés par un mode jaugeage non pertinent (la valeur-seuil retenue ici pour un jaugeage au seau est : 300 L/min). Il est donc préconisé que le jaugeage au seau y soit abandonné et que des travaux (ex : construction d'un déversoir) et/ou un nouveau mode de mesure (par un capteur de pression, capteur sonique, etc.) soient prescrits. La recherche de solution technique (travaux et/ou nouveau mode) devra faire l'objet d'une étude au cas par cas.

Les autres problèmes relevés par le BRGM peuvent être regroupés en 3 autres groupes : ceux relatifs aux problèmes d'accès (avalanche, destruction de la source, indisponibilité d'un(e) agent

de la commune concernée...), au manque d'information sur les documents remis aux communes (point de référence en NGF, volume du bassin utilisé pour le jaugeage), et à des travaux ou études à mener (mise à jour de la courbe de tarage car non valide au-delà d'une certaine valeur, travaux permettant la mesure et le raccordement (temporaire) pour un usage de la ressource, etc.), .

En complément, le BRGM recommande également :

- **Le changement de mode opératoire et/ou la réalisation de travaux pour 51 sites (dont 46 en lien avec l'abandon du jaugeage au seau de 20 L) ;**
- **La fourniture d'information complémentaire sur les documents remis aux communes (2 sites concernés) ;**
- **La sécurisation/rénovation/construction de routes d'accès, y compris en période hivernale, (7 sites concernés) et la mise à disposition d'un agent communal pour effectuer conjointement les mesures avec TELT ou son sous-traitant (6 sites concernés dont 5 aussi identifiés pour la sécurisation de l'accès).**

Il est à noter que certains sites rencontrent plusieurs problématiques, et que la présente analyse n'a pas pu être étendue aux sites que les communes et/ou les services de l'Etat souhaitent voir ajouter au réseau existant.

En complément, il est à noter que **la sauvegarde des changements de repère (ex : modification de la hauteur du repère suite à des travaux) gagnerait à être centralisée dans un fichier unique et accessible**. Le fichier relatif à l'évolution du réseau (cf. recommandation § 2.2.2) pourrait remplir cet office.

Etant donné l'importance et la durée d'un projet aussi structurant qu'un tunnel ferroviaire, il paraît pertinent que, lorsque cela est techniquement possible (ex : réalisation de travaux de maçonnerie, pose d'un seuil, etc.), **le site soit équipé d'une station de mesure automatique, paramétrée avec un pas de temps horaire, voire journalier**.

La mise en place d'une station automatique permettrait également d'étendre, à moindre coût, le spectre des paramètres physico-chimiques mesurés *in situ* car la température et la conductivité électrique sont généralement couplées dans les sondes numériques actuelles (seule la conductivité est mesurée actuellement par TELT). Les paramètres tels que le pH ou le potentiel redox sont plus compliqués à suivre lors de mesures en continu, notamment en raison de la fragilité de certaines sondes et de la nécessité de calibrer régulièrement les sondes. L'oxygène dissous reste facile lorsque la mesure est réalisée par l'intermédiaire d'un capteur optique. Lors d'une visite (ex : entretien/contrôle du matériel), la mesure de l'ensemble des paramètres à l'aide d'un boîtier multi-paramètres et de sondes prend peu de temps (5 minutes).

Au regard de ces éléments, il paraît donc pertinent de proposer le dispositif suivant :

- Station automatique : suivi du débit (et/ou de la charge hydraulique), de la température et la conductivité (corrigée à une température donnée) ;
- Station non automatique : suivi du débit (et/ou de la charge hydraulique), de la température, la conductivité (corrigée à une température donnée), le pH, l'oxygène dissous (en mg/L et %) et le potentiel redox (mV).

Il est important de rappeler ici que la mise en place et l'utilisation d'un réseau de suivi automatisé entraînent aussi des contraintes relatives à la gestion d'un parc de sondes numériques et d'appareils de transmission : processus d'achat, formation des agents à la configuration et à l'installation des appareils, remplacement des batteries des sondes et des transmetteurs (ex : 1 à 2 fois/an), etc. Une automatisation complète d'un réseau existant prend plusieurs mois et nécessite la prise en compte des spécificités de chaque site (point d'accrochage, sécurité du matériel, etc.).

Si le suivi des ouvrages par télétransmission permet d'accélérer la récupération des données et la détection de baisse anormale de débit, il est aussi tributaire de l'état du réseau de télécommunication (en fonction de la technologie choisie). La mise en place d'un réseau automatique et télétransmis n'est donc pas une garantie certaine d'obtenir 100 % des données journalières sur une année.

3.2. CONTROLE, TRAITEMENT ET SAUVEGARDE DES DONNEES

3.2.1. Constat

Le fichier recevant les données de terrain est compilé une fois par mois et fait l'objet d'un rapport d'auscultation par le sous-traitant de TELT. Le contrôle de la qualité des mesures se fait par visualisation graphique de la chronique.

Les données sont ensuite intégrées à la base de données de TELT, et ce à fréquence mensuelle. Elles sont disponibles en consultation pour le personnel de TELT et les services de l'Etat via un *webportal*. D'après les informations recueillies, la donnée ne semble pas faire l'objet d'un autre traitement systématique (niveau de qualité, détection/correction d'erreur ou de dérive, détection de dépassement de seuils).

Depuis 2021, TELT transmet à chaque commune, et ce à fréquence annuelle, l'ensemble des valeurs mesurées au niveau des stations présentes sur la commune. Par le passé, cette transmission de données se faisait après une demande de la commune.

3.2.2. Recommandations

Suite à une comparaison concernant les outils de mise à disposition d'informations à caractère hydrogéologique, **il pourrait être pertinent de profiter de l'existence de la base nationale ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines – <https://ades.eaufrance.fr>) et d'y verser l'intégralité des données du réseau de suivi relatif aux eaux souterraines.** Ce site internet présente notamment l'avantage d'être gratuit, librement accessible au public, reconnu par les services de l'Etat, et respectant le protocole européen SANDRE. Au-delà la sécurisation et de la sauvegarde des données, il permet à chaque producteur de données de renseigner le niveau de qualité des données versées (ex : « brute », « contrôlée » - Tableau 13 et Tableau 14), de renseigner des informations techniques (ex : changement de repère) et de profiter d'outils graphiques et de calcul statistique.

Libellé de l'élément	Définition de l'élément
Donnée brute	Données issues du processus d'acquisition n'ayant subi aucun examen. Ex. : donnée directement issue de l'appareil de mesure.
Donnée contrôlée niveau 1	Données ayant subi un ou plusieurs contrôles (au bureau, par un système expert ou par une personne physique) en fonction du contexte de la mesure.
Donnée contrôlée niveau 2	Données ayant subi un contrôle par une comparaison avec une mesure manuelle sur le terrain (contrôle de la chaîne d'acquisition avec correction des dérives).
Donnée mise en perspective	La valeur a été utilisée dans un rapport ou valorisée (diagrammes binaires, comparaison faciès, etc.). Cette mise en perspective de l'information permet de consolider son niveau de validité et détecter les dernières erreurs.

Tableau 13 : Statut de la donnée piézométrique (Source: eaufrance / ADES)

Libellé de l'élément	Définition de l'élément
Qualification non définissable	Une valeur sera non définissable lorsque le producteur est dans l'impossibilité d'obtenir les informations nécessaires pour évaluer la conformité de la donnée . Il s'agit par exemple de données historiques récupérées des archives dont on a perdu toute information sur la façon dont elles ont été produites.
Correcte	Une valeur est déclarée « Correcte » lorsque elle est estimée valide au stade de validation indiquée dans l'information « statut de la donnée » et vis-à-vis de la finalité recherchée.
Incorrecte	Une valeur est déclarée « Incorrecte » lorsque elle est estimée erronée au stade de validation indiqué dans l'information « statut de la donnée » et vis-à-vis de la finalité recherchée.
Incertaine	Une valeur sera déclarée « Incertaine » si la validité de la donnée reste « douteuse » au stade de validation indiquée dans l'information « statut de la donnée ». Dans la mesure du possible, la qualification « Douteuse » doit être une étape transitoire de la validation de la donnée et doit être réservé à des avancements intermédiaires de la validation.
Non qualifiée	Etat initial de la mesure qui n'a encore subi aucun audit ou interprétation du producteur de données en vue de sa validation.

Tableau 14 : Qualification du résultat (Source: eaufrance / ADES)

À défaut de la bancarisation des données sur ADES, un système similaire de contrôle des données, à partir d'une mesure manuelle ou d'une sonde automatique, apparaît comme nécessaire pour un projet tel que le Lyon-Turin. Il est à noter que des outils proches ont également été développés à des fins commerciales par des bureaux d'étude.

Malgré les particularités des réseaux de télécommunications en zone de montagne, **la mise en place d'un système de télécommunications (plusieurs technologies disponibles : SMS,**

GPRS, LoRaWAN...) permettrait d'améliorer la fréquence de transmission des données, mais aussi celles de contrôle et mise à disposition auprès de tiers ou du public. Elle favoriserait probablement la détection des variations, voire de dépassement de seuils, que ceux-ci soient liés ou non à l'impact des travaux et de l'exploitation du tunnel ferroviaire. Une meilleure réactivité pourrait donc être attendue.

3.3. COMPOSITION DU RESEAU DE SUIVI

3.3.1. Synthèse des demandes exprimées par les collectivités

Les communes concernées par le tracé ont été sollicitées par la DDT 73 à l'aide d'un courrier en date du 30/06/2021, puis d'un courrier électronique transmis le 02/07/2021. Celui-ci contenait une lettre concernant le suivi de l'impact du Lyon-Turin et l'expertise réalisée par le BRGM, une carte et des tableaux permettant d'identifier les points du réseau de surveillance amélioré actuel. La lettre d'accompagnement précisait que les réponses devaient être transmises d'ici fin juillet.

Plusieurs communes n'ont pas répondu dans les délais impartis, ou alors de façon partielle en promettant une réponse complète pour mi-septembre. Un travail supplémentaire de relance a donc été effectué en septembre et en octobre. Des contacts téléphoniques et électroniques ont aussi été nécessaires pour corriger/préciser les réponses de plusieurs mairies (ex : coordonnées géographiques erronées ou absentes, plusieurs sites identifiés sur une même ligne du tableau de réponse, etc.). Malgré un contact téléphonique de la DDT, la commune du Freney semble être la seule à ne pas avoir fourni de réponse formelle.

Après analyse des réponses des communes, l'ensemble des points à ajouter représenterait 33 points de surveillance. Néanmoins, plusieurs difficultés ont été constatées :

- Des points faisant déjà partie du réseau de suivi des eaux superficielles (points SBM-1 à SBM-4, PVT-1; PVT-2 et 293 – demandés par Modane) ont été identifiés pour faire partie du réseau de suivi des eaux souterraines ;
- Des demandes d'ajout concernant 8 sites plus proches du tunnel de Fréjus que du tunnel Lyon-Turin, mais dont 2 ont fait partie d'un réseau lié au projet Lyon-Turin (points 6-CV²⁶ et 9) ;
- La nécessité de créer 2 nouvelles catégories pour qualifier certains nouveaux sites. Le BRGM a proposé : « potentiel captage communal (Alimentation en Eau Potable) » (4 captages sur Aussois, 8 sur Modane) et « potentiel captage Privé (pouvant être utilisé pour l'alimentation en eau potable – privée) » (1 captage concerné sur Aussois) ;
- Des demandes relatives à des forages géothermiques (déclarés comme « moyen de chauffage principal de l'habitation – pompage/réinjection ») ont été faites.

***Remarque :** D'après les informations collectées par le BRGM, cet envoi collectif concernant l'évolution du réseau de surveillance des eaux souterraines est une première. Cependant, il ne*

²⁶ La commune de Modane demandé l'ajout du point 6-C. Après un travail de vérification du BRGM sur la base des éléments communiqués par la DDT, il semblerait que l'identifiant du site soit en réalité 6-CV.

faut pas occulter le fait que plusieurs documents tendent à prouver que TELT a su adapter son réseau aux demandes des communes, surtout quand il s'agissait de captages utilisés pour l'AEP. Ces derniers, considérés ici comme des nouveaux points (par rapport à l'arrêté préfectoral de 2011), font en réalité déjà partie des points du réseau actualisé par TELT (§ 3.3.2).

3.3.2. Synthèse des demandes exprimées par les services de l'Etat

ARS

En août 2021, l'ARS 73 a transmis à la DDT 73 et au BRGM : un tableau contenant l'ensemble des captages d'eau (actifs, en cours de création, abandonnés), situés dans un rayon de 2 km autour du chantier TELT (Figure 2), et ce tout usage confondu (AEP, agricole, privé...). Après une analyse du contenu par le BRGM, des modifications (ex : correction de coordonnées X/Y) et clarifications (propositions de correspondance entre le code SISE Eau et le numéro pour le réseau TELT) ont été demandées en septembre 2021.

Au 30/09, la DDT 73 a transmis au BRGM des éléments de réponse provenant de l'ARS 73 :

- Les captages identifiés comme « actifs » ou « en projet » doivent être inclus au réseau de suivi des eaux souterraines ;
- Les captages identifiés comme « abandonnés » pour lesquels un usage, non déclaré auprès de l'ARS, a été mentionné par les communes ont été conservés. Les autres captages « abandonnés » n'ont pas été retenus. (Ce point a fait l'objet d'un échange entre l'ARS, la DDT et le BRGM en octobre.)

Bien que cela ne puisse être assimilée strictement à une demande d'ajout de points au réseau actuel (une majorité de captages faisant déjà l'objet d'une surveillance par TELT), le travail en collaboration avec l'ARS a permis d'identifier 66 captages devant potentiellement appartenir au futur réseau. Il est à noter que ces 66 points peuvent déjà faire, ou avoir fait, partie du réseau prescrit, ou actualisé, et/ou du réseau d'auscultation de TELT.

DREAL

La DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) n'a pas fait état d'attente spécifique concernant des stations du réseau de TELT.

DDT 73

La DDT a transmis au BRGM un tableau reprenant les demandes de TELT quant à l'évolution du réseau de suivi (Annexe 1), soit :

- 14 abandons ;
- 1 erreur d'identification ;

- 18 ajouts (correspondant souvent à des remplacements de points abandonnés) ;
- 4 sites réattribués au réseau hydrométrique (surveillance des eaux superficielles) et 3 sites pour être gardés (en devenant « points témoins ») ou supprimés (en raison d'un usage autre que l'AEP, et de leur DHI PRF égal 1).

D'après la DDT, ces évolutions sont le reflet des connaissances concernant le tarissement et l'évolution des usages des points. Il est à noter que 14 sites sont considérés comme « témoins ».

En complément, la DDT souhaite que deux nouvelles catégories supplémentaires soient créées :

- « AU » : captages communaux ou privés à autres usages sans consommation (agrément : lavoirs, fontaines ; sources privées hors AEP ; etc.)
- « CCA » : captage communal pour arrosage/abreuvement.

Des changements de catégories ont également été demandés pour plusieurs points.

3.3.3. Sites à ajouter/supprimer des deux listes transmises

Le BRGM a vérifié que les sites devant être supprimés (1 erreur et 14 abandons – cf. §3.3.2), ou transférés vers le réseau de surveillance des eaux superficielles (4 sites concernés – cf. §3.3.2), à la demande de la DDT, ne font pas partie de ceux demandés comme ajouts par les communes ou l'ARS. Les points pouvant devenir témoins ou être supprimés (3 sites concernés) ne font pas partie des demandes d'ajout par l'ARS.

Concernant la vérification entre les deux listes (celle de l'ARS ; celle de la DDT et des communes), il apparaît que 39 points de surveillance font l'objet d'une demande commune.

Après analyse, le BRGM décide de ne pas retenir dans le réseau de suivi des eaux souterraines :

- Les sites identifiés comme devant faire partie du réseau de surveillance (hydrométrique) des eaux superficielles ;
- Les 2 captages, identifiés par l'ARS, situés à l'ouest de Villard Clément (partie occidentale de St-Julien-Mont-Denis) car les travaux de percement ne commencent qu'à partir de ce secteur. L'existence d'un lien hydraulique entre ces points et les travaux souterrains paraît très peu probable.

Les points « La Fraidière » et « Echaillon » ont donc été retirés de la sélection ;

- 3 sites (2 forages géothermiques : « Giraud parcelle 3649 » et « Fornier » ; 1 captage privé : « Pellerey ») sur Modane et Fourneaux, initialement proposés puis supprimés à la demande de la commune de Modane (faute de pouvoir transmettre des coordonnées géographiques).

3.3.4. Sites nécessitant une action/étude complémentaire

Au regard des informations contenus dans les §3.3.1 à 3.3.3, la 1^{ère} action à mener correspond à une vérification des informations disponibles au sein de l'ARS, des communes, de la DDT et de TELT. En effet, le travail du BRGM tend à montrer que :

- Des écarts de coordonnées géographiques et/ou de dénomination persistent pour un certain nombre de captages. Une action de vérification est donc nécessaire ;
- Certains captages ne semblent pas avoir été intégrés par le passé aux réseaux de surveillance (réglementaire) et/ou d'auscultation (non réglementaire) de TELT. Des indices sont donc à créer pour ces ouvrages. La priorité doit être donnée aux captages d'eau potable (actuels et futurs), en particulier s'ils ont été identifiés dans les deux listes ;
- Les forages géothermiques mentionnés par la commune de Modane doivent faire l'objet d'un complément d'étude. Etant donné leur localisation dans la partie basse de la vallée, il est probable que ces derniers soient peu profonds (moins de 50 m) et atteignent un aquifère superficiel, probablement en lien avec la nappe d'accompagnement de l'Arc et/ou la nappe transitant dans des cônes de déjection et/ou des éboulis. Par le passé, des aquifères jugés superficiels n'ont pas été retenus pour faire partie du réseau actuel. Par souci de cohérence avec les choix antérieurs, une étude de ces forages, ainsi que le calcul du DHI (si pertinent), permettront de lever tout doute quant à leur appartenance au réseau de surveillance. De plus, étant donné la densité de points sur le centre de la commune de Modane, la question d'une sélection parmi ces forages géothermiques (au lieu de choisir l'intégralité de ces sites) reste posée. Face au manque d'éléments techniques disponibles pour ces ouvrages, le BRGM propose temporairement et par défaut que deux ouvrages géothermiques soient suivis : l'un en rive droite, l'autre en rive gauche de l'Arc. Le choix des sites parmi ceux proposés par Modane et le mode de mesure seront déterminés en concertation avec les acteurs locaux (DDT, TELT, mairie de Modane, propriétaires des ouvrages).
- Comme indiqué dans le § 3.3.1, de nombreuses demandes concernent des captages localisés au sud de Modane, à l'aplomb ou à proximité du tunnel de Fréjus, c.-à-d. sur le versant opposé à celui du projet TELT. Là aussi, un effort d'étude complémentaire puis de sélection (à partir des points les plus représentatifs de ce secteur) pourrait être envisagé. Ce travail devrait se pencher sur les éventuels résultats des études liées au creusement du tunnel du Fréjus, et du réseau de surveillance afférent. Par souci de cohérence avec les choix antérieurs, une étude de ces sources, ainsi que le calcul du DHI (si pertinent), permettront de lever tout doute quant à leur appartenance au réseau de surveillance. Face au manque d'éléments techniques disponibles pour ces ouvrages, le BRGM propose temporairement et par défaut que :
 - Dans le groupe de captages en dehors des 2 km (vers Valfréjus), seul le point « 8 » fasse l'objet d'un suivi. Le nombre de points n'augmente donc pas dans cette zone ;
 - Dans le groupe de captages situés dans la zone-tampon de 2 km, deux points parmi les cinq identifiés (« 4 ? », « 5 ? », « 5 ? », « 6 ? », « COM_7 ») fassent l'objet d'un suivi. Le choix des sites parmi ceux proposés par Modane et le mode de mesure seront déterminés en concertation avec les acteurs locaux (DDT, TELT, mairie de Modane, propriétaires des ouvrages).

3.3.5. Commentaires

Il est important de rappeler que les préconisations faites dans le présent rapport ont été rédigées au regard des documents consultés et de la méthode décrite dans les précédents chapitres afin de permettre la mise à jour d'un arrêté préfectoral d'ici fin 2021 (voire début 2022). Une mise à jour des connaissances, l'acquisition de données complémentaires, ou l'application de nouvelles réglementations environnementales, apportera un regard différent et pourra ainsi justifier une nouvelle mise à jour du réseau de surveillance des eaux souterraines.

Il est également rappelé ici que les préconisations relatives, par exemple, à l'abandon du jaugeage au seau et à la mise au point d'un nouveau protocole de mesure (impliquant ou non des travaux – cf. §3.1) ne sont pas synonymes de suppression de sites de surveillance, mais ces derniers devront faire l'objet d'une discussion entre la DDT, TELT et les propriétaires des ouvrages afin de trouver une solution technique pour assurer la représentativité de la mesure et la pérennité du point.

À la lecture des documents, le BRGM n'a pas trouvé de référence à un éventuel modèle de convention juridique liant TELT (ou son sous-traitant) et le propriétaire d'un point de suivi afin de garantir les droits d'accès au site. Ce document n'est pas une obligation mais permet de clarifier les droits et obligations de chaque partie concernant l'accès et/ou l'entretien du point de suivi.

3.3.6. Proposition de composition pour le réseau de surveillance des eaux souterraines

Au regard des demandes exprimées par les collectivités (33 ajouts) et les services de l'Etat (DDT : 18 ajouts, 4 suppressions, etc. ; ARS : 66 captages identifiés), ainsi que des éléments d'analyse précédents, le BRGM propose un réseau de surveillance à partir des 177 points suivants. Il est rappelé ici que le BRGM a fait le choix de garder les points devant faire l'objet d'une vérification (§3.3.4). La liste des points de surveillance est disponible en Annexe 3.

Ce nouveau réseau représente un ajout de 46 points, par rapport au nombre de points actifs du réseau actuel transmis par la DDT (« réseau de surveillance amélioré » : 131 points actifs – cf. § 2.2.1). Il est à noter que le réseau proposé par le BRGM et le réseau actuel de surveillance (d'après la DDT) partagent 110 points en commun.

En comparaison du réseau de surveillance existant, les points supplémentaires traduisent une volonté de renforcement du réseau dans plusieurs secteurs : celui de la commune de Montricher-Albanne, le versant nord de St-Michel-de-Maurienne, celui de Valfréjus et du versant sud de Modane, le versant nord d'Aussois, le vallon d'Ambin et une part importante de la commune de Bramans.

La localisation des points du nouveau réseau de surveillance des eaux souterraines proposé dans cette expertise est présentée dans les deux cartes suivantes (Figure 22 et Figure 23).

RP-71257-FR – Rapport provisoire – 24 novembre 2021 68

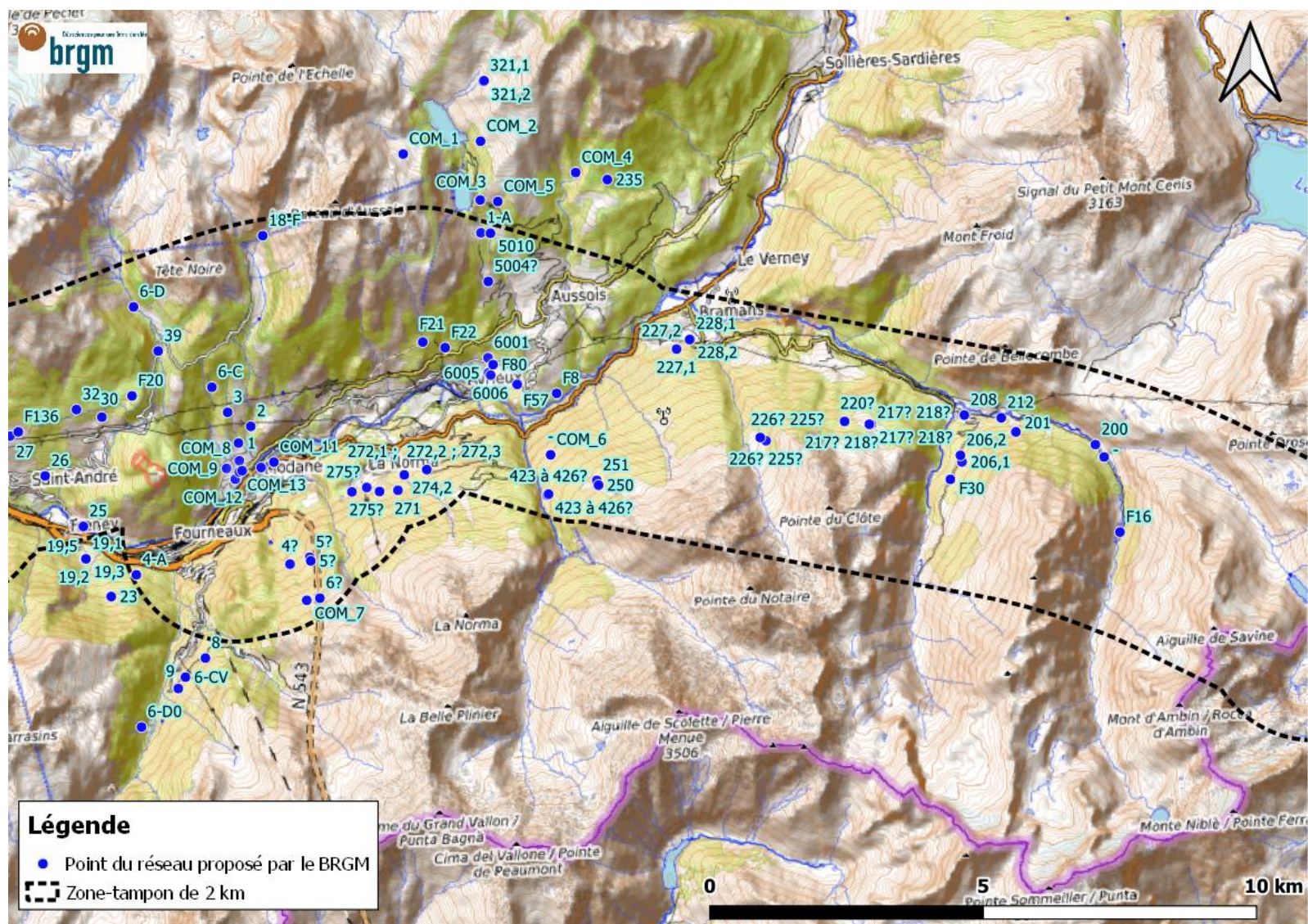


Figure 23 : Localisation des points proposés par le BRGM pour la surveillance des eaux souterraines dans la moitié orientale de la zone d'étude [Sources : OSM, TELT]

4. Conclusion

Dans chaque chapitre du présent rapport, les auteurs ont tenu à 1) présenter de façon synthétique les informations contenues dans plusieurs documents supports à l'expertise, et à 2) rendre un avis argumenté quant à la qualité et/ou la pertinence de ces informations. Le lecteur trouvera donc les recommandations du BRGM en fin de chaque chapitre ou sous-chapitre.

Afin de donner une meilleure compréhension de l'état et de la composition du réseau de suivi des eaux souterraines, le présent rapport s'est en premier lieu efforcé de comprendre l'évolution historique du réseau de surveillance et de présenter la logique de construction et d'utilisation du DHI (*Drawdown Hazard Index* ou Indice du risque de baisse de productivité voire de tarissement du point d'eau). L'étude des documents montre que le réseau a connu de nombreuses évolutions depuis 1994, notamment à la faveur d'une modification des objectifs. Ces derniers sont passés d'un besoin de connaissances relatif aux ressources en eau à celui de la surveillance des impacts éventuels pendant les travaux de creusement puis durant l'exploitation du tunnel. Cependant, le suivi de ces évolutions semble rétrospectivement difficile à la lecture des documents consultés.

La principale recommandation correspond à la création d'un tableau synthétique reprenant l'ensemble des points de suivi relatif aux eaux souterraines, et ce depuis la création du réseau, apparaît pertinente. Ce tableau devra être régulièrement mis à jour.

L'analyse montre que le DHI semble avoir été élaboré à partir d'un schéma conceptuel solide en faisant appel à des informations géologiques (ex. fracturation) et hydrogéologiques (ex. perméabilité) issues notamment de levés en surface, de logs de forages et de tests en laboratoire. Cet indice a aussi été, au moins en partie, éprouvé par différents tests (utilisation de modèles numériques et de solutions analytiques, test du DHI sur quelques autres projets souterrains) et a connu plusieurs évolutions au cours du projet du tunnel ferroviaire Lyon-Turin. Ces évolutions récentes de la méthode DHI ne paraissent pas avoir mené à un changement de répartition des points entre classes DHI de degré de risque. **Les principales actions recommandées pour consolider l'application de la méthode DHI au projet Lyon-Turin sont : de réaliser prochainement un retour d'expérience dès que l'excavation du Tunnel de Base (TdB) sera suffisamment avancée afin de valider plus spécifiquement l'indice DHI TdB²⁷, et de rassembler en un document les explications justifiant les valeurs fixes intrinsèques à la méthode DHI et les autres choix faits lors de la conceptualisation du système aquifère – tunnel afin que le lecteur s'intéressant à la méthode DHI ne voit plus des valeurs et choix arbitraires là où il y a bel et bien eu un argumentaire scientifique derrière ces valeurs et choix.**

Dans un second temps, la présente expertise s'est intéressée à l'analyse des chroniques de suivi du débit des sources / ruisseaux / captages qui étaient disponibles sur le Portail Environnemental de TELT, composante « Eau », type « Ress. eaux souterraines – sources (T3) ». 126 chroniques ont ainsi pu être analysées, d'abord de manière automatique en lot (calcul de nombreux indicateurs, traitements et tests statistiques divers, analyse spectrale du signal), puis manuellement par un examen visuel fait en tenant compte des informations acquises dans la phase automatisée. Les résultats de cette analyse en lot puis de l'examen visuel des chroniques de débit mettent en évidence des problèmes de continuité insuffisante du suivi (lacunes fréquentes dans la chronique en partie dues à un suivi irrégulier), d'imprécision des mesures et de non-quantification des débits très élevés pour plusieurs points d'eau. **Près de 75 % des chroniques examinées ont une exploitabilité limitée ou réduite à cause d'un ou plusieurs de ces**

²⁷ Rappel : Le retour d'expérience traité à ce jour dans le rapport du PRF s'est limité aux perturbations causées par l'excavation des descenderies.

problèmes. Néanmoins, l'historique des débits mesurés est jugé quand même exploitable dans 111 des 126 chroniques examinées. Le problème décelé le plus fréquemment étant la mauvaise continuité du suivi, les recommandations formulées suite à cette analyse vont dans le sens d'effectuer un suivi hydrogéologique beaucoup plus régulier des points d'eau, en assurant au strict minimum une mesure par mois sur tous les mois de l'année (sachant que cette fréquence est souvent insuffisante pour la détection d'impacts) ou, dans l'idéal, en réduisant le pas de temps d'acquisition à une mesure par semaine voire par jour (condition optimale pour la détection d'impacts et une meilleure réactivité).

Concernant les modes de mesure des différents paramètres (débit, hauteur d'eau, température, conductivité électrique), le BRGM a recherché les chroniques de 179 points parmi les documents transmis, puis étudié l'adéquation des moyens techniques au regard des objectifs (surveillance d'un impact sur la ressource en eau). L'adéquation des moyens est majoritairement correcte : l'existence de fiche descriptive pour chaque site (incluant les éventuels travaux) permet de faciliter le suivi, des commentaires sont présents pour expliquer les valeurs manquantes ou erronées, etc. Le point faible principal réside dans l'utilisation d'une estimation du débit (jaugeage) par empotement (à l'aide d'un seau et d'un chronomètre) pour plusieurs captages. Rustique, cette méthode permet d'estimer correctement le débit sortant d'une canalisation, par exemple au niveau du captage d'une source. Cependant, son utilisation est conseillée pour des débits inférieurs à 100 L/min (voire 300 L/min selon les sources bibliographiques consultées). **Force est de constater que 46 captages présentent des débits supérieurs, et ce plusieurs fois dans l'année, entraînant une incertitude importante sur l'estimation du débit, et par conséquent des difficultés quant à la mesure d'un éventuel impact des travaux de TELT. Il paraît donc nécessaire que, au cas par cas, une solution technique alternative soit recherchée. Les autres recommandations établies concernant le mode opératoire concernent la réalisation de travaux et/ou la recherche d'un mode de mesure alternatif, la transmission d'informations complémentaires, la mise à disposition d'un agent communal (pour permettre à TELT et/ou son sous-traitant de se rendre au point de surveillance).**

Sans influence directe sur la composition du réseau de surveillance des eaux souterraines, **la mise en place progressive de l'automatisation des mesures et leur télétransmission apparaissent comme une étape essentielle au regard des enjeux**, en particulier celui de la détection d'éventuel impact des travaux souterrains. Si des captages doivent profiter en priorité de cette mesure, alors les captages publics utilisés pour l'AEP apparaissent comme prioritaires.

En complément, une augmentation de la fréquence de mesure pour les sources (de mensuelle/hebdomadaire [en fonction de la localisation vis-à-vis du front d'attaque] à journalier – par exemple) représenterait un gain important en matière de connaissances de la ressource en eau, tout comme de détection et d'interprétation des variations de débit. **Une augmentation de la fréquence de mesure serait également synonyme d'une analyse statistique plus robuste si les services de l'Etat décident d'établir des seuils d'alerte pour les points du réseau actualisé de surveillance des eaux souterraines.**

Au regard des demandes exprimées par les collectivités (33 ajouts) et les services de l'Etat (DDT : 18 ajouts, 4 suppressions, etc. ; ARS : 66 captages identifiés), **ainsi que des éléments d'analyse précédents, ainsi que des éléments d'analyse présents dans ce rapport** (suppression des doublons, des sites non localisés, et des points situés à l'ouest de St-Julien-Mont-Denis), le BRGM propose un réseau de surveillance à partir des **177 points** (contre 131 points actifs d'après la DDT), soit un ajout de 46 points de surveillance. Ce dénombrement n'est probablement pas définitif puisqu'un travail supplémentaire de confirmation/sélection parmi les nouveaux points a été identifié comme nécessaire après la remise du présent rapport. Ce travail devra être mené de façon collégiale entre les différents acteurs du territoire (DDT, ARS, collectivités, TELT). En

l'état actuel, le réseau de surveillance proposé par le BRGM et le réseau actif (d'après la DDT) partagent 110 points en commun.

5. Bibliographie

Benoist J-C., Birgand F. (2002) Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles. Ingénieries n°41, pp 23-38.

Conover W.L. (1980). Practical nonparametric statistics, 2nd ed.: New York, John Wiley and Sons, 493p.

Croiset N., Lopez B. (2013) - HYPE: Outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines - Manuel d'utilisation. Rapport BRGM/RP-63066-FR, 55 p., 33 fig.

Croiset N., Neaud C., Henriot A. (2018) - Manuel utilisateur Hypiz. Rapport final. BRGM/RP-68344-FR, 36 p.

Dematteis A., Torri R. & Looser M. (2007) Water Resources Management in Tunneling: insights in the decision-making process to improve tunnels environmental sustainability. In: Proceedings of XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, 17–21 September 2007.

Dematteis A., Torri R., Chereau B. Ducrot M. (2021) Groundwater in the Perthus Tunnel: feedback after excavation Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 10 (2), 65 - 71

Helsel D.R., Hirsch R.M., Ryberg K.R., Archfield S.A., Gilroy E.J. (2020). Statistical methods in water resources: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 4, chapter A3, 458 p., <https://doi.org/10.3133/tm4a3>. [Remplace USGS Techniques of Water-Resources Investigations, book 4, chapter A3, version 1.1, qui avait été publié en 2002.]

Laurencelle M., Allier D., Henriot A., Manceau J.C. (2020) – Calcul de l'inertie des aquifères de France métropolitaine à partir de chroniques piézométriques. Rapport final. BRGM/RP-70030-FR, 35 p., 3 fig., 6 tabl., 2 ann.

LTF (2004a) Avant-Projet Sommaire (APS) – Etudes hydrogéologiques 2002-2004 – Rapport final, fascicule 1 : Rapport hydrogéologique de synthèse. Première diffusion 17/12/2004, Dernières corrections 26/01/2005, réf. APS-2096-ESSB-BRA-AH-RF01-2, 88 p.

LTF (2004b) Avant-Projet Sommaire (APS) – Etudes hydrogéologiques 2002-2004 – Rapport final, fascicule 2 : Partie française du projet. Première diffusion 17/12/2004, Dernières corrections 31/03/2005, réf. APS-2096-ESSB-BRA-AH-RF02-1, 281 p.

LTF (2004c) Avant-Projet Sommaire (APS) – Etudes hydrogéologiques 2002-2004 – Rapport final, fascicule 4, partie 5 : Calcul de l'aléa de tarissement des sources (méthode DHI). Première diffusion 17/12/2004, Dernières corrections 31/03/2005, réf. APS-2096-ESSB-BRA-AH-RF45-1, 16/31 p. (partie en français).

LTF (2005) Avant-Projet de Référence (APR) – Hydrogéologie – Impact des tunnels sur les points d'eau (côté France). Première diffusion 12/12/2005, Dernières corrections 22/02/2007, réf. APR-B2-0051, 104 p.

LTF (2013) Projet de Référence (PR) France – Rapport sur les points d'eau et leurs risques d'impact (France). Document PDF fourni incomplet (32 premières pages seulement), Première diffusion 5/12/2013, Dernières corrections 24/04/2014, réf. APR-B2-0051, 32/148 p.

Masset O., Loew S. (2010) Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. *Hydrogeol J* 18, 863–891 (2010). <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0569-1>

Meuli C., Wehrle K. (2001) Spring catchment. SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management. 52 p.

Orofino S., Chabart M., Doney C., Guignat S., Fleury P., Moulin M. (2020) Réseau de surveillance de l'état quantitatif des eaux souterraines du bassin Rhône-Méditerranée – Rapport de gestion 2019, rapport BRGM/RP-69794-FR, 53 p., 28 ill., 1 ann

Rampnoux J-P. (1995) Contrat assistance hydrogéologique pour l'étude de la future traverse ferroviaire alpine Lyon-Turin. Rapport final: conclusions de l'étude 1994 – 1er semestre 1995 ; Définition et méthodologie des études ultérieures. Université de Savoie, Laboratoire de géologie structurale et appliquée. SNCF, Région de Chambéry. Rapport final. Edition du 13/06/1995. 11 p., 1 ann.

Rampnoux J-P. (1996) Contrat assistance hydrogéologique pour l'étude de la future traverse ferroviaire alpine Lyon-Turin. Rapport hydrogéologique: Missions 1995-1996. Université de Savoie, Laboratoire de géologie structurale et appliquée. SNCF, Région de Chambéry. Rapport final. Edition du 13/06/1996. 197 p.

Rampnoux J-P., Dzikowski M. (2002) Contrat assistance hydrogéologique pour l'étude de la future traverse ferroviaire alpine Lyon-Turin. Redéfinition du réseau d'auscultation hydrogéologique, dans le cadre de la poursuite de l'étude de l'état initial des ressources en eaux superficielles, en relation avec la foration du tunnel de base. Université de Savoie, Laboratoire de géologie structurale et appliquée. SNCF, Région de Chambéry. Rapport final. Edition du 29/03/2022. 197 p.

Ruf T. (1999) - The Lomb-Scargle Periodogram in Biological Rhythm Research: Analysis of Incomplete and Unequally Spaced Time-Series. *Biological Rhythm Research*, 30, 178-201.

Seguin J.J., Allier D., Croiset N., Klinka T., Manceau J.C. (2018) - ESTHER. Etudes de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final BRGM/RP-67518-FR, 299 p., 126 fig., 10 ann.

Sen P.K. (1968) - Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63:324, 1379-1389, doi: 10.1080/01621459.1968.10480934

TELT (2021a) Liste des sources suivies par TELT. Etabli par Simon Viat, Edition du 16/04/2021. Réf. 1000-MA-OREAM33-0, 34 p.

TELT (2021b) Présentation méthodologie TELT suivi hydrogéologique des sources et évaluation du risque d'impact. SSI-C1, 8 p.

Torri R., Dematteis A. & Delle Piane L. (2007) Drawdown hazard of springs and wells in tunneling: predictive model and verification. In: *Proceedings of XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems*, 17–21 September 2007.

Annexe 1 Composition du réseau de surveillance « amélioré » incluant des propositions d'évolutions par TELT

(document établi par TELT en 2021, vérifié, complété puis transmis au BRGM par la DDT 73) [TELT, 2021a]

Légende

sources du protocole initial qui ne peuvent plus être suivies aujourd'hui
points d'eau substituant d'autres points d'eau ou non retenus lors de la définition initiale du protocole mais qui remplissent les critères de sélection ($2 \leq \text{DHI PRF} \leq 3$ ou de type captage communal AEP) justifiant d'une intégration au protocole
captages communaux AEP mais considérés avant tout comme points témoins compte-tenu du risque très faible ou nul d'incidence (en particulier car situés en rive gauche de l'Arc)
sources retenues dans le protocole initial ne remplissant pas les critères car non AEP et sans risque significatifs reconnus mais intégrées pour jouer le rôle de points d'eau témoin
sources du protocole initial qui ne remplissent plus les critères de sélection susdits ($\text{DHI PRF} = 1$ et ne sont pas de type captage communal AEP) et pourraient ainsi soit être retirés du protocole, soit être maintenues mais pour jouer le rôle de points d'eau témoin

Légende pour les DHI PRF

DHI = 3
DHI = 2
DHI = 1
DHI: nd = non déterminé

NB : la colonne "DHI TdB" correspond aux anciennes classes DHI évaluées en phase d'avant-projet de référence (APR 2007) par rapport aux stricts travaux du tunnel de base
la colonne "DHI total" correspond aux anciennes classes DHI évaluées en phase d'avant-projet de référence (APR 2007) par rapport à l'ensemble des ouvrages souterrains de TELT (tunnel de base + descenderies)

Légende pour les types

XX : type inchangé par rapport au protocole

XX : type modifié ou précisé par rapport au protocole

Sigles types

CC = captage communal (Alimentation en Eau Potable) ; CP = captage Privé (pouvant être utilisé pour l'alimentation en eau potable – privée) ; CCA = captage communal pour arrosage/abreuvement ; UI = usages industriels (centrale hydroélectrique, etc.) ; AU = captages communaux ou privés à autres usages sans consommation (agrément : lavoirs, fontaines ; sources privées hors AEP ; etc.) ; RU = Ruisseau ; SNC = Source Non Captée ; NI = non identifié

Sigles communes

AUS = Aussois, AVR = Avrieux, BRA = Bramans (Val-Cenis), FOU = Fourneaux, FRE = Le Freney, MOD = Modane, ORE = Orelle, SAD = Saint-André, SJU = Saint-Julien-Montdenis, SMA = Saint-Martin-d'Arc, SMM = Saint-Michel-de-Maurienne, SMP = Saint-Martin-la-Porte, VBT = Villarodin-Bourget

Aussois :**tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts**

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
1-A	Brise-charge du Droset	AUS	CC	1	2	1	Permet de mesurer la somme des débits des captages AEP de Plan d'Aval (322, 323, 324, 325)
321,1	AEP Fournache 1	AUS	CC	1	2	1	
321,2	AEP Fournache 2	AUS	CC	1	2	1	

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
1-B	Ruisseau St-Benoît - pont du Droset	AUS	RU	1	2	1	Ruisseau de Saint-Benoît Bien que le protocole ne prévoyait pas de mesure hydrométrique à ce niveau du cours d'eau, ce point de mesure est plus à rattacher à un suivi hydrométrique qu'un suivi de source
5010	Source Ortet route	AUS	SNC	1	2	1	source sans intérêt particulier mais probablement conservée surtout parce qu'on passe devant lors de la tournée...

Avrieux :**tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts**

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
6001	Bassin de Saint-Benoît (réservoir communal)	AVR	CC	2	2	2	Mesure au niveau du bassin, en aval du point de captage
6005	Source du Freney / Frêne	AVR	SNC	3	4	3	source aménagée pour être mesurée mais non captée, en aval dans les prés, il existe des canaux d'irrigations encore plus ou moins entretenus.
6006	Source du Gros Saule	AVR	SNC	2	4	2	source aménagée pour être mesurée mais non captée, en aval dans les prés, il existe des canaux d'irrigations encore plus ou moins entretenus.
6007	Source de l'Envers	AVR	SNC	2	4		Tarie depuis 2003

tableau 2 : points du protocole initial correspondant à des ruisseaux suivis dans le cadre des mesures hydrométriques

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
2-B	Cascade Saint-Benoît	AVR	RU	2	3	2	point de mesure hydrométrique du St-Benoit (cascade)

Le suivi de ce point sera poursuivi de la même manière mais dans le cadre des mesures hydrométriques plutôt que de la ressource en eau souterraine

Bramans (Val Cenis) :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
201	Galerie Bramans	BRA	CC	1	1	1	
206	captage de Pré Clément d'en haut	BRA	CC	1	1	1	intégration par la commune au réseau AEP - dernières mesures en 2001, en attente de travaux par la commune pour pouvoir mesurer le débit, mesures T et C reprises en 11/2020 <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
208	Source le Planey bas	BRA	SNC	2	2	2	non utilisée
212	Source du refuge du Sufflet	BRA	CP	2	2	2	AEP du refuge
227,1	Source des Lorrains - gauche	BRA	CC	1	1	1	
227,2	Source des Lorrains - droite	BRA	CC	1	1	1	
228,1	captage de Plan Pommier - Est	BRA	CC	1	1	1	intégration par la commune au réseau AEP - rattachable au suivi historique 1995-2004 <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
228,2	captage de Plan Pommier - Ouest	BRA	CC	1	1	1	intégration par la commune au réseau AEP - non suivie auparavant <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>

Fourneaux :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
4-A	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Gauche (origine Arplane)	FOU	CC	1	1	1	Somme des sources du secteur d'altitude d'Arplane .(12, 13, 14, 16). <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
23	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Droite	FOU	CC	1	1	1	Source mesurée dans le même brise-charge que la 4-A <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>

Le Freney :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	<i>DHI TdB (APR)</i>	<i>DHI total (APR)</i>	<i>DHI (PRF)</i>	Remarques
19,1	Captages des voutes planes basses - gauche	FRE	CC	1	1	1	Rive gauche : à considérer comme point témoin Source débranchée par la commune en 2001-2002, puis depuis 2013, coule de nouveau depuis septembre 2019
19,2	Captages des voutes planes basses - centre	FRE	CC	1	1	1	Rive gauche : à considérer comme point témoin
19,3	Captages des voutes planes basses - droite au fond	FRE	CC	1	1	1	Rive gauche : à considérer comme point témoin
19,4	Captages des voutes planes basses - droite au milieu (bas)	FRE	CC	1	1	1	Rive gauche : à considérer comme point témoin
19,5	Captages des voutes planes basses - droite devant	FRE	CC	1	1	1	Rive gauche : à considérer comme point témoin

Modane :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
1	Forage - réservoir Loutraz	MOD	CC	4	4	2	Forage situé au niveau du réservoir de Loutraz : mesure niveau statique du forage puis mesure débit sur la conduite du réservoir (débit ainsi mesuré correspondant à celui de la pompe) Forage utilisé en renfort des sources 2 et 3 si besoin
2	Source Claret	MOD	CC	3	3	2	Source mesurée au niveau du réservoir de Loutraz (comme « source » 1).
3	Source Combacile	MOD	CC	3	3	2	Source mesurée au niveau du réservoir de Loutraz (comme « source » 1).
6-D	Polset	MOD	CP	1	1	1	Anciennement source 42 de Saint-André, Ne pas confondre avec 6-DV de Valfréjus AEP pour les chalets d'alpage attention, dans historique : 6-D avant 2011 = barrage des Herbiers
8	Captage Jorio (Valfréjus)	MOD	CC	2	2	1	Captage de Jorio, mesure au réservoir au-dessus de la station de Valfréjus. Mesure longtemps bridée par le filtre du compteur de la canalisation. Mesure réalisée par un jaugeage au seuil plus récemment

tableau 2 : points du protocole initial correspondant à des ruisseaux suivis dans le cadre des mesures hydrométriques							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
6-A	sur Ruisseau du St Bernard MOD (2 EL)	MOD	RU	1	1	nd	Ruisseau Saint-Bernard de Modane Point de mesure décalé plusieurs fois en 2004, 2014, puis encore une fois en amont en 2018
6-B	sur ruisseau du St-Bernard MOD (réglet)	MOD	RU	1	1	nd	Ruisseau Povaret

Le suivi de ces points sera poursuivi de la même manière mais dans le cadre des mesures hydrométriques plutôt que de la ressource en eau souterraine

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
6-C	Source des sangliers	MOD	SNC	-	-	nd	À ne pas confondre avec 6-CV de Valfréjus, qui a été suivie un temps à Valfréjus mais qui n'a rien à voir, 2 versants différents

Orelle :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
8-A	Galerie du Prec	ORE	CP	1	1	1	Rive gauche AEP des chalets d'alpage (EDF) point témoin
61	Lavoir du teppey (hameau)	ORE	AU	2	2	2	Lavoir
64	Forage autroute (93m, artésien)	ORE	CC	2	3	2	Forage artésien, utilisé pour AEP, mesure débit exhaure
65,1	Captage Bonvillard (des Crozes) - au fond	ORE	CC	2	2	2	Point témoin pour ce secteur, en rive gauche captage AEP
65,2	Captage Bonvillard (des Crozes) - à droite	ORE	CC	2	2	2	Réaménagé par la commune en juin 2020 Depuis la mesure est plus facilement réalisable, et ne peut être comparée à l'historique
68	Source Planet amont	ORE	SNC	2	2	2	Projet de captage AEP en compensation de la 64 <i>proposition d'intégration au protocole au vu de son rôle dans la compensation</i>
75	Pont de la Balme (à droite)	ORE	CC	2	2	2	
76	Pont de la Balme (à gauche)	ORE	CC	2	2	2	
77	captage des acacias	ORE	SNC	2	2	2	Non utilisé, écoulement vers l'Arc (ancien usage industriel ?)
78	Source de la Pessonière	ORE	CP	2	2	2	Arrêt de suivi en 2000, reprise du suivi en 2013 avec mesure de débits partiels puis complets en 2019 suite à l'aménagement du point de mesure
79	Captage Goudissart (Orelle Nord)	ORE	SNC	2	2	2	ouvrage utilisé en secours pour eau d'arrosage
84	Captage Michel Cassaz	ORE	CP	2	2	2	Source dans une cave, propriétaire décédé (arrêt du suivi en 2004)
86	Captage de la cochonnière aval (AEP)	ORE	CC	2	2	2	
91	captage du Replat	ORE	CC	1	1	1	Arrêt de suivi en 2004, reprise de suivi en 2018 <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
92bis	captage du Verney	ORE	CC	1	1	1	Aussi nommée 92 avant 2000, avant des travaux de réfection complète entre 2000 et 2005 Relevés trimestriels jusqu'en 2018, mensuels ensuite utilisée que de façon exceptionnelle dans l'AEP car influencée par les précipitations (eau trouble en période de pluie)
93bis	captage de l'Arpon	ORE	CC	1	1	1	attention nom: 93 avant travaux en 2018, 93bis depuis mais même point <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
112	source du chalet du Verney	ORE	CP	2	2	2	
117	source du creux de l'Ours	ORE	SNC	2	2	2	Rive gauche, non utilisée actuellement Protocole : rôle de témoin dans le secteur

Saint-André :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
25	Source de la Corbière	SAD	CP	2	2	2	
26	Réservoir de Saint-André	SAD	CC	2	2	2	Suspensions mesures de juin à octobre 2019 en raison d'insécurité d'accès, reprise en novembre 2019 après travaux de sécurisation
27	Captage de Montruard	SAD	CC	2	2	2	
28	Captage de Villard	SAD	CC	1	3	1	
29	Captage des Champs	SAD	CC	1	2	1	
30	Source Fontaine Bénite (trop-plein réservoir du Col)	SAD	CC	1	1	1	Protocole : point témoin pour ce secteur
32	Captage sur la Drière	SAD	CC	1	1	1	Alimente le réseau AEP communal <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal</i>
39	Source Planay Nord (amont)	SAD	SNC	3	3	3	Travaux réalisés en Juillet 2018 : mesure beaucoup plus précise
57	Ruisseau de l'Arpont amont Ouest	SAD	SNC	1	1	1	Protocole : point témoin pour ce secteur Sources bien plus hautes que le point de mesure.
58	Ruisseau de l'Arpont amont Est	SAD	SNC	1	1	1	Protocole : point témoin pour ce secteur Maximas non connus
59	Réservoir de la La Praz	SAD	CC	1	3	1	Mesurée bien plus bas que la source car débit trop important Débit constant correspondant au débit de la conduite (non représentatif) – pas de mesure possible au captage.

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
49	Source Sommière Sud	SAD	CP	1	2	1	captée pour alimenter un bassin à truites - non utilisée pour la consommation humaine a priori donne lieu à un ruisseau qui alimente beaucoup plus bas le lavoir de Villard
50	Source Sommière Nord	SAD	CP	1	2	1	prise d'eau juste en aval du point de mesure pour alimenter un chalet donne lieu à un ruisseau qui alimente beaucoup plus bas le lavoir de Villard
9-A	Source Lovato	SAD	AU	nd	nd	nd	abreuvement bétail (pâturage - chevaux)
9-B	Source des Gorges	SAD	AU	nd	nd	nd	aménagée pour la mesure à la demande des propriétaires
9-C	Source des Gorges 2	SAD	CP	nd	nd	nd	Usage AEP privé

St-Julien-Montdenis :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
1002	Captage ND des Neige	SJU	CC	1	1	1	point témoin pour le secteur
1004	Captage du Revet	SJU	CC	1	1	1	
1011	captage des Fayards	SJU	CCA	2	2	2	Arrêt du suivi en 2004 car ne s'écoulait plus (captée par le forage F131 ?) réaménagement du point de mesure et reprise du suivi en 2020
1012	Captage de Costerg	SJU	CC	1	1	1	Non utilisée actuellement
1016,1	captage du Nayet, arrivée gauche	SJU	CCA			nd	Captage communal utilisé pour l'arrosage de l'ouvrage de protection du hameau et de la centrale solaire, ainsi que pour l'arrosage des jardins Situé à moins de 100m en aval du captage des Fayards, capte celui-ci ainsi que d'autre émergences du secteur <i>proposition d'intégration au protocole car complète le suivi de la source 1011 et présente certainement le même DHI = 2</i>
1016,2	captage du Nayet, arrivée droite	SJU	CCA			nd	Captage communal utilisé pour l'arrosage de l'ouvrage de protection du hameau et de la centrale solaire, ainsi que pour l'arrosage des jardins capte certaines émergences du secteur <i>proposition d'intégration au protocole car complète le suivi de la source 1011 et présente certainement le même DHI = 2</i>

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
1003	Source de l'Auby	SJU	CCA	1	1	1	Utilisée pour abreuvement

St-Martin-d’Arc :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	<i>DHI TdB (APR)</i>	<i>DHI total (APR)</i>	<i>DHI (PRF)</i>	Remarques
137	Captage des grandes Seignières	SMA	CC	1	1	1	Protocole : peut jouer le rôle de témoin en rive gauche Arc

St-Michel-de-Maurienne :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
316	Fontaine froide amont	SMM	CC	1	2	1	
317	Fontaine froide aval	SMM	CC	1	2	1	
318	Captage de la Saussaz	SMM	CC	1	1	nd	Ancien captage AEP abandonné (arrêt du suivi en 2010)
3004	Source de Pré Garin	SMM	CC	1	3	nd	
3005,1	Captage de Beaune (ancien) - gauche	SMM	CC	2	3	2	À la création du 3005,3 : baisse de débit des deux premiers captages (3005,1 et 3005,2) – même champ captant – depuis, baisse du débit de 3005,3 mais débit global des 3 captage reste stable.
3005,2	Captage de Beaune (ancien) - droite	SMM	CC	2	3	2	À la création du 3005,3 : baisse de débit des deux premiers captages (3005,1 et 3005,2) – même champ captant – depuis, baisse du débit de 3005,3 mais débit global des 3 captage reste stable.
3005,3	Captage de Beaune (nouveau)	SMM	CC	1	2	nd	Captage 3005,3 n'est plus utilisé car eau trop chargée - dépôts noirs, filtres à charbon installés mais pas suffisants, du coup, captage débranché. Pour autant, il est toujours conservé en secours.
3011	Captage de Villard Bernon	SMM	CCA	1	4	1	Sert pour arrosage, plus pour AEP
3012,1	Captage des Teppes - centre (gauche)	SMM	CCA	1	3	1	Tarissement en été en même temps que le ruisseau à proximité Arrosage uniquement
3012,2	Captage des Teppes - droite	SMM	CCA	1	3	2	Arrosage uniquement
3014	Captage des Lies	SMM	CC	2	2	2	Ancien captage abandonné, ne coule plus (arrêt suivi en 2000) 2019 : Le captage n'est plus utilisé par la commune depuis longtemps et pose des problèmes d'écoulements sur la route suite à des conduites bouchées, les 2 arrivées d'eau sont quasiment sèches, des racines sortent des drains, jusque dans le bassin. Le captage n'est plus entretenu.
3016	Captage du Pré Mollard	SMM	CC	1	4	1	
3017	Captage de Milla	SMM	CC	1	4	1	AEP
3018,1	Captage des Fortunes	SMM	CC	1	3	1	
3022	l'Etraz Ouest - gauche	SMM	CC	1	3	1	
3023	l'Etraz Ouest - droite	SMM	CC	1	3	1	Reçoit la totalité de Pré Mollard (3016) et une partie du captage de Sainte-Marguerite (3052) situé à plus de 2 000 m (pertinence ?)
3031	Le Chêne - lavoir	SMM	AU	3	3	1	Lavoir
3043	Captage du Thyl Dessous	SMM	CCA	1	3	1	Tarissement mi 2017, puis écoulement temporaire, et désormais réalimentée par la 3044,1
3044	Captage du Terrail	SMM	CCA	2	2		Ce point n'existe pas en réalité, il est représenté par ses deux arrivées d'eau : points 3044,1 et 3044,2, qui étaient bien intégrées au protocole

3044,1	Captage du Terrail - milieu	SMM	CCA	2	2	2	Arrosage, ancien AEP
3044,2	Captage du Terrail - droite	SMM	CCA	2	2	2	Arrosage, ancien AEP (écoulement temporaire : une fois par décennie)

tableau 2 : points du protocole initial correspondant à des ruisseaux suivis dans le cadre des mesures hydrométriques

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
13-M1	Ruisseau la Grollaz - amont	SMM	RU	nd	nd	nd	Échelle sur ruisseau de la Grollaz

Le suivi de ce point sera poursuivi de la même manière mais dans le cadre des mesures hydrométriques plutôt que de la ressource en eau souterraine

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT

Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
13-N	Source Michel Fontaine	SMM	CP	-	-	nd	Trop-plein d'une citerne pour AEP privé
13-0	Source André Grange	SMM	AU	-	-	nd	Écoulement temporaire, depuis mi 2018, absence d'écoulement, cause identifiée indépendante des travaux Abandon du suivi
3007	Source de Plan de Perousaz - gauche uniquement	SMM	SNC	1	2	1	Attention : deux arrivées : - l'une provenant de petites sources en amont : à suivre - l'autre provenant du trop-plein du brise-charge au niveau de sa réduction de diamètre (eau provenant des secteurs Sainte-Marguerite (3052) et Bertrand (3057) 1km à l'Est) : non suivie
3025	Lavoir bas de l'Etraz	SMM	AU	1	3	1	Lavoir
3036	Source Fontaine du Thyl Dessous du 2nd village	SMM	AU	1	2	1	Fontaine
3041,1	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées sur pilier lavoir	SMM	AU	1	3	1	Origine : deux anciens captages juste au-dessus - provient de 2 anciens captages mais n'est plus utilisé pour AEP
3041,2	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées au fond (rigole en bois et au fond à droite à côté lavoir)	SMM	SNC	1	3	1	Origine : ruisseau dévié plus en amont qui se réinfiltre et ressort aux Fontanettes Parfois le débit augmente car le ruisseau peut être détourné dans le champ au-dessus (baisse conductivité)
3055	Ruisseau B du Vigny	SMM	RU	1	1	1	point témoin haut - il s'agit d'un des rares points avec 3062 où la mesure est faite sur un ruisseau mais réellement au plus près de la source même du ruisseau (les autres points "RU" sont souvent éloignées des émergences qui se trouvent beaucoup plus en altitude) - il s'agit d'une source principale d'un ruisseau du secteur du Vigny

3062	Ruisseau du Champieu	SMM	RU	1	1	1	point témoin haut - il s'agit d'un des rares points avec 3055 où la mesure est faite sur un ruisseau mais réellement au plus près de la source même du ruisseau (les autres points "RU" sont souvent éloignées des émergences qui se trouvent beaucoup plus en altitude) - il s'agit d'une source principale d'un ruisseau important du secteur du St Bernard de SMP Projet de prise d'eau pour captage AEP d'une bergerie
------	----------------------	-----	----	---	---	---	---

St-Martin-la-Porte :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
12-B	Source CLEMENT Henri	SMP	CP	2	3	2	Ne coule plus depuis 2003
2001	Source des Magnins	SMP	CP	2	2	2	Augmentation du débit suite aux travaux de réfection du captage et des drains en août 2019.
2002	Source de la Porte	SMP	CP	3	4	3	
2004,1	Sce La Villette n° 2 (CHAUMAZ R.): source	SMP	CC	2	4	2	Ne coule plus depuis 2009 (détruit par un terrassement ?)
2004,2	Sce La Villette n° 2 (CHAUMAZ R.): trop-plein	SMP	CC	2	4	2	Ne coule plus depuis 2009 (détruit par un terrassement ?)
2005,1	Captage de Bordeaux - gauche	SMP	CP	1	2	2	AEP privé (auberge et chalets)
2005,2	Captage de Bordeaux - droite	SMP	CP	1	2	2	AEP privé (auberge et chalets) En hiver relié directement à la conduite : non mesurable alors.
2006,1	Source de Charbutan	SMP	CP	-	-	2	Captage Ratel, AEP privé chalet
2006,2	Captage de Charbutan (RATEL E.): trop-plein	SMP	CP	2	2	2	trop-plein du réservoir du captage Ratel (2006,1), or la mesure de 2006,1 nécessitant la vidange du réservoir, le trop-plein ne coule plus et 2006,2 plus mesurée (sec) depuis de nombreuses années
2007,1	Champieu gauche	SMP	CC	1	2	1	
2007,2	Champieu droite	SMP	CC	1	2	1	
2007,4	Champieu "plymouth"	SMP	CC	nd	2	2	=2007,3 avant les travaux de captage
2015	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°1	SMP	UI	4	4	3	Capté par centrale hydroélectrique Remplacé par 2019,4, situé un peu plus en aval Correspondance température-conductivité avérée
2016,1	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°2 (EL)	SMP	UI	4	4	3	Capté par centrale hydroélectrique Remplacé par 2019,5, situé un peu plus en aval Correspondance température-conductivité avérée
2016,2	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°2 (PVC)	SMP	UI	4	4	3	Capté par centrale hydroélectrique Remplacé par 2019,5, situé un peu plus en aval Source qui n'est plus significative des résurgences du secteur
2019,0	Source 0 de la forêt de Beaune	SMP	UI	nd	nd	nd	ruisseau apparu récemment (après 2015?) - pas de nom, suivi depuis février 2020 capté par la microcentrale Mesure température et conductivité Pas de mesure de débit spécifique mais débit global des ruisseaux mesuré par Synergie (point 2019,7) <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>

2019,2	Source 2 de la forêt de Beaune	SMP	UI	nd	nd	nd	ruisseau apparu récemment (2011-2012?) issu des "Sources d'en haut", suivi depuis février 2020 capté par la microcentrale Mesure température et conductivité Pas de mesure de débit spécifique mais débit global des ruisseaux mesuré par Synergie (point 2019,7) <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>
2019,3	Source 3 de la forêt de Beaune	SMP	UI	nd	nd	nd	ruisseau issu de la "Source calme", suivi depuis février 2020 capté par la microcentrale Mesure température et conductivité Pas de mesure de débit spécifique mais débit global des ruisseaux mesuré par Synergie (point 2019,7) <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>
2019,4	Source 4 de la forêt de Beaune	SMP	UI	nd	nd	nd	ruisseau issu de la "Source du loup", suivi depuis février 2020 capté par la microcentrale Mesure température et conductivité Pas de mesure de débit spécifique mais débit global des ruisseaux mesuré par Synergie (point 2019,7) <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>
2019,5	Source 5 de la forêt de Beaune	SMP	UI	nd	nd	nd	ruisseau issu des "Source du Marais" et "Source noire", suivi depuis février 2020 capté par la microcentrale Mesure température et conductivité Pas de mesure de débit spécifique mais débit global des ruisseaux mesuré par Synergie (point 2019,7) <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>
2019,7	Collecteur centrale hydraulique	SMP	UI	nd	nd	nd	Point représentant la mesure du débit de l'ensemble des sources de la forêt de Beaune (2019,x) par Synergie <i>proposition d'intégration au protocole en remplacement de 2015 2016,1 et 2016,2</i>

Villarodin-Bourget :

tableau 1 : sources du protocole initial et proposition d'ajouts							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
18-E	Source de Villarodin	VBT	SNC	2	2	2	Mesure sur réseau (repiquage ruisseau additionnel en 2018/2019) En été débit non mesurable car branchement direct au réseau : suivi de température et conductivité uniquement Hiver, mesure des trois paramètres possible <i>proposition d'intégration au protocole au vu de son DHI = 2</i>
18-F	Vallon d'Orgère	VBT	CC	1	1	nd	À l'aval des points 261 (captage de la Masse : non mesurable car débit trop important), donc mesure du ruisseau en aval qui reçoit le trop-plein du captage (suivi : ruisseau + trop-plein captage) <i>proposition d'intégration au protocole car AEP communal suite à mesure de compensation</i>
275	Fontaine aux oiseaux (gauche)	VBT	CC	1	1	nd	
277,1	Captage des Avenières (La Norma) - gauche	VBT	CC	1	1	2	
277,2	Captage des Avenières (La Norma) - centre	VBT	CC	1	1	2	
277,3	Captage des Avenières (La Norma) - droite	VBT	CC	1	1	2	
4004	Source des Echillons	VBT	SNC	2	2	2	
4006	Captage communal (ou Réservoir d'Amondon)	VBT	CC	1	2	1	Remplacé par 18-F : plusieurs arrivées d'eau dans le même tuyau depuis que le captage de la Masse a été fait
4010	Source de la Pariotte (ou des Baches)	VBT	SNC	2	2	2	source dirigée par un fossé bachelé pour détourner l'eau en amont et le long du merlon protégeant Le Bourget d'un glissement de terrain, pas d'usage particulier
4014	la Fourrière	VBT	CP	1	3	1	2019 : problèmes de suintements en amont, travaux réalisés en 2019 pour reprendre l'écoulement en totalité

tableau 3 : autres sources du réseau d'auscultation de TELT							
Code du point de mesure	Nom du point de mesure	Commune	Type	DHI TdB (APR)	DHI total (APR)	DHI (PRF)	Remarques
4002	Ruisseau la Chaussina	VBT	RU	1	3	1	Mesure au jaugeage par traceur pour s'affranchir de l'engravement trop régulier du point de mesure point considéré "à conserver" dans étude Univ Savoie 2004 mais sans préciser pourquoi, sa pertinence pose question suivi depuis 99, coule tout l'année (d'autres ruisseaux voisins sont soit temporaires, soit soutenus par des dérivations du Povaret ou autre)

4008	Rimollard haut	VTB	CP	1	2	1	proche de l'axe du tunnel et coule toute l'année, ce qui n'est pas le cas de toutes les sources dans le secteur
4009	Source de la Cabrette	VTB	SNC	1	1	1	sur l'axe du tunnel et coule toute l'année, ce qui n'est pas le cas de toutes les sources dans le secteur
4011	Rimollard bas	VTB	CP	1	4	1	proche de l'axe du tunnel et coule toute l'année, ce qui n'est pas le cas de toutes les sources dans le secteur

Annexe 2 Résultats détaillés de l'examen visuel des 126 chroniques de débits traitées

Cette annexe présente les résultats de l'examen visuel des 126 chroniques de débits quant à la qualité (exploitabilité) du suivi effectué à ce jour et aussi à la pertinence de continuer de suivre le point d'eau dans le futur. Les colonnes centrales contiennent le commentaire détaillé issu de l'examen des chroniques dans chacune des deux optiques. La cellule est colorée : en vert si la chronique est exploitable / pertinente sans réserve ; en jaune si elle est exploitable / pertinente malgré un ou plusieurs problèmes ; en rouge si elle est peu exploitable / peu pertinente en raison des problèmes détectés. Ces problèmes sont soit : une Continuité insuffisante du suivi (!Cont), une Précision insuffisante des valeurs brutes (!Préc) ou la Non-Quantification des débits très élevés (!NonQ). Les cas de signaux bruités d'après l'analyse spectrale sont également signalés (!Bruit).

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
1	Forage - réservoir Loutraz	MOD	OUI mais signal composé de longs plateaux	OUI (si suffisant de surveiller que le débit du réservoir reste constant)				
2	Source Claret	MOD	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
3	Source Combacile	MOD	OUI mais signal composé de longs plateaux	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
8	Captage Jorio (Valfréjus)	MOD	PEU utile car signal troué de lacunes avec grande lacune de 16 ans	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
19,1	Captages des voutes planes basses - gauche	FRE	OUI sauf portion récente surtout lacunaire depuis 2013	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
19,2	Captages des voutes planes basses - centre	FRE	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
19,3	Captages des voutes planes basses - droite au fond	FRE	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
19,4	Captages des voutes planes basses - droite au milieu (bas)	FRE	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
19,5	Captages des voutes planes basses - droite devant	FRE	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
23	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Droite	FOU	OUI malgré très grande lacune de 19 ans en milieu de suivi	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
25	Source de la Corbière	SAD	OUI	OUI				X
26	Réservoir de Saint-André	SAD	OUI malgré imprécision des mesures proches d'un plateau	OUI mais précision des mesures à améliorer SI suffisant de surveiller que le débit du réservoir reste constant		X		
27	Captage de Montruard	SAD	OUI	OUI				X
28	Captage de Villard	SAD	OUI malgré imprécision des mesures avant 2007	OUI		X		X
29	Captage des Champs	SAD	OUI malgré imprécision générale des mesures	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
30	Source Fontaine Bénite (trop-plein réservoir du Col)	SAD	OUI	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		X
39	Source Planay Nord (amont)	SAD	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI	X	X		
49	Source Sommière Sud	SAD	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI	X	X		
50	Source Sommière Nord	SAD	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X	X		
57	Ruisseau de l'Arpont amont Ouest	SAD	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X	X		
58	Ruisseau de l'Arpont amont Est	SAD	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X	X		
59	Réservoir de la La Praz	SAD	OUI mais signal composé de longs plateaux avec une lacune de 5 ans	OUI (si suffisant de surveiller que le débit du réservoir reste constant)	X			

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
61	Lavoir du teppey (hameau)	ORE	OUI malgré grande lacune de 8 ans en milieu de suivi	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		X
64	Forage autroute (93m, artésien)	ORE	OUI	OUI				X
65,1	Captage Bonvillard (des Crozes) - au fond	ORE	OUI	OUI				
65,2	Captage Bonvillard (des Crozes) - à droite	ORE	OUI malgré imprécision des mesures avant 2019	OUI		X		
68	Source Planet amont	ORE	OUI mais début récent du suivi	OUI				
75	Pont de la Balme (à droite)	ORE	OUI	OUI				
76	Pont de la Balme (à gauche)	ORE	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X		X	
77	captage des acacias	ORE	OUI	OUI				X
78	Source de la Pessonière	ORE	PEU utile avant 2020 car signal avant travaux hétérogène discontinu	OUI				X
79	Captage Goudissart (Orelle Nord)	ORE	OUI malgré signal troué de lacunes dont grande lacune de 8 ans	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		
86	Captage de la cochonière aval (AEP)	ORE	OUI	OUI				
91	captage du Replat	ORE	OUI malgré très grande lacune de 14 ans > 50% de l'historique total	OUI	X			
92bis	captage du Verney	ORE	PEU utile car suivi trop peu fréquent et discontinu avant 2018	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
93bis	captage de l'Arpon	ORE	OUI malgré très grande lacune de 14 ans > 50% de l'historique total	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		
112	source du chalet du Verney	ORE	OUI	OUI				
117	source du creux de l'Ours	ORE	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		X

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
137	Captage des grandes Seignières	SMA	OUI	OUI				X
201	Galerie Bramans	BRA	OUI	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		
206	captage de Pré Clément d'en haut	BRA	OUI mais début récent du suivi	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
208	Source le Planey bas	BRA	OUI malgré imprécision des mesures et grande lacune de 11 ans	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		
212	Source du refuge du Sufflet	BRA	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
227,1	Source des Lorrains - gauche	BRA	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
227,2	Source des Lorrains - droite	BRA	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
228,1	captage de Plan Pommier - Est	BRA	OUI mais début récent du suivi	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
228,2	captage de Plan Pommier - Ouest	BRA	OUI mais début récent du suivi	OUI				
275	Fontaine aux oiseaux (gauche)	VBT	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
277,1	Captage des Avenières (La Norma) - gauche	VBT	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
277,2	Captage des Avenières (La Norma) - centre	VBT	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	X
277,3	Captage des Avenières (La Norma) - droite	VBT	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
316	Fontaine froide amont	SMM	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
317	Fontaine froide aval	SMM	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
321,1	AEP Fournache 1	AUS	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	X
321,2	AEP Fournache 2	AUS	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	X
1002	Captage ND des Neige	SJU	OUI	OUI				
1003	Source de l'Auby	SJU	OUI	OUI				
1004	Captage du Revet	SJU	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
1011	captage des Fayards	SJU	OUI mais début récent du suivi	OUI				
1012	Captage de Costerg	SJU	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes et quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer ET méthode de mesure à adapter aux débits élevés	X	X	X	
1016,1	captage du Nayet, arrivée gauche	SJU	OUI mais début récent du suivi	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
1016,2	captage du Nayet, arrivée droite	SJU	OUI mais début récent du suivi	OUI mais précision des mesures à améliorer		X		
2001	Source des Magnins	SMP	OUI malgré grande lacune de 11 ans en milieu de suivi	OUI	X			X
2002	Source de la Porte	SMP	OUI malgré grande lacune de 8 ans en milieu de suivi	OUI	X			
2005,1	Captage de Bordeaux - gauche	SMP	OUI	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		X
2005,2	Captage de Bordeaux - droite	SMP	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
2006,1	Source de Charbutan	SMP	OUI malgré grande lacune de 8 ans en milieu de suivi	OUI	X			
2007,1	Champieu gauche	SMP	OUI	OUI				X

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
2007,2	Champieu droite	SMP	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
2007,4	Champieu plymouth	SMP	OUI (après retrait de 1 valeur numériquement aberrante en 2010)	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		X
2015	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°1	SMP	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	NON point de suivi remplacé par un autre dans le protocole	X	X		
2016,1	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°2 (EL)	SMP	OUI malgré grande lacune de 7 ans en fin de suivi	NON point de suivi remplacé par un autre dans le protocole	X			X
2016,2	Ruisseau de la Forêt de Beaune n°2 (PVC)	SMP	OUI malgré grande lacune de 7 ans en fin de suivi	NON point de suivi remplacé par un autre dans le protocole	X			X
2019,7	Collecteur centrale hydroélectrique	SMP	OUI mais début récent du suivi	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
3004	Source de Pré Garin	SMM	OUI	OUI				X
3005,1	Captage de Beaune (ancien) - gauche	SMM	OUI mais attention car baisse de débit suite à création captage 3005,3	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
3005,2	Captage de Beaune (ancien) - droite	SMM	OUI mais attention car baisse de débit suite à création captage 3005,3	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
3005,3	Captage de Beaune (nouveau)	SMM	OUI	OUI				
3007	Source de Plan de Perousaz - gauche uniquement	SMM	OUI mais attention car quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais continuité des mesures à améliorer ET méthode de mesure à adapter aux débits élevés	X		X	X
3011	Captage de Villard Bernon	SMM	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
3012,1	Captage des Teppes - centre (gauche)	SMM	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
3012,2	Captage des Teppes - droite	SMM	OUI	OUI				

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
3016	Captage du Pré Mollard	SMM	OUI	OUI				
3017	Captage de Milla	SMM	OUI	OUI				
3018,1	Captage des Fortunes	SMM	OUI	OUI				
3022	l'Etraz Ouest - gauche	SMM	OUI	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		X
3023	l'Etraz Ouest - droite	SMM	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer ET méthode de mesure à adapter aux débits élevés	X	X	X	
3025	Lavoir bas de l'Etraz	SMM	OUI	OUI				X
3031	Le Chêne - lavoir	SMM	OUI malgré grande lacune de 8 ans en milieu de suivi	OUI	X			X
3036	Source Fontaine du Thyl Dessous du 2nd village	SMM	OUI	OUI				X
3041,1	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées sur pilier lavoir	SMM	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
3041,2	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées au fond (rigole en bois et au fond à droite à coté lavoir)	SMM	OUI mais attention car quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	X
3043	Captage du Thyl Dessous	SMM	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
3044,1	Captage du Terrail - milieu	SMM	OUI	OUI				
3044,2	Captage du Terrail - droite	SMM	PEU utile débit presque toujours nul car écoulement sporadique	PEU utile car débit sporadique presque toujours nul				
3055	Ruisseau B du Vigny	SMM	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			X
3062	Ruisseau du Champieu	SMM	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes avant 2019	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés	X	X	X	

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
			et débits élevés non quantifiés fréquents					
4002	Ruisseau la Chaussina	VBT	OUI	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
4004	Source des Echillons	VBT	OUI malgré grande lacune de 12 ans en milieu de suivi	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
4008	Rimollard haut	VBT	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
4009	Source de la Cabrette	VBT	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
4010	Source de la Pariotte (ou des Baches)	VBT	OUI mais attention car quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
4011	Rimollard bas	VBT	OUI	OUI				X
4014	la Fourrière	VBT	OUI	OUI				X
5010	Source Ortet route	AUS	OUI	OUI				X
6001	Bassin de Saint-Benoît (réservoir communal)	AVR	OUI	OUI				
6005	Source du Freney / Frêne	AVR	OUI	OUI				X
6006	Source du Gros Saule	AVR	OUI	OUI				X
6007	Source de l'Envers	AVR	OUI malgré lacunes comme archive car source tarie	NON car source tarie depuis 2003 (suivi arrêté depuis 2014)	X			
1-A	Brise-charge du Droset	AUS	OUI malgré imprécision des mesures et signal troué de lacunes fréquentes	OUI	X	X		X
1-B	Ruisseau St-Benoît - pont du Droset	AUS	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes avant 2020	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		
2-B	Cascade Saint-Benoît	AVR	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
4-A	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Gauche (origine Arplane)	FOU	OUI mais attention car débits élevés non quantifiés fréquents	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
6-A	sur Ruisseau du St Bernard MOD (2 EL)	MOD	OUI malgré très grande lacune de 17 ans en milieu de suivi	OUI	X			
6-B	sur ruisseau du St-Bernard MOD (réglet)	MOD	OUI mais attention car quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
6-C	Source des sangliers	MOD	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI	X			X
6-D	Polset	MOD	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			
8-A	Galerie du Prec	ORE	PEU utile car mesures imprécises avec trop de lacunes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X	X		X
9-A	Source Lovato	SAD	OUI mais attention car quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais méthode de mesure à adapter aux débits élevés			X	
9-B	Source des Gorges	SAD	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		
9-C	Source des Gorges 2	SAD	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI	X			X
13-M1	Ruisseau la Grollaz - amont	SMM	OUI malgré quelques années lacunaires et fort contraste hautes eaux basses eaux	OUI mais précision des mesures à améliorer	X	X		X
13-N	Source Michel Fontaine	SMM	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer	X	X		X
13-O	Source André Grange	SMM	OUI malgré lacunes comme archive car ne coule plus depuis 2018	NON suivi abandonné car source ne coule plus depuis 2018 pour cause indépendante des travaux	X			
18-E	Source de Villarodin	VBT	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes	OUI mais continuité du suivi à améliorer	X			

Code	Nom du point	Commune	Historique exploitable ?	Suivi futur pertinent ?	!Cont	!Préc	!NonQ	!Bruit
18-F	Vallon d'Orgère	VBT	OUI malgré signal troué de lacunes fréquentes et quelques débits élevés non quantifiés	OUI mais précision ET continuité des mesures à améliorer ET méthode de mesure à adapter aux débits élevés	X	X	X	X

Le petit tableau complémentaire ci-dessous permet de traduire les sigles de commune utilisés dans le tableau ci-avant, en noms complets :

Sigle	Commune
AUS	Aussois
AVR	Avrieux
BRA	Bramans (Val-Cenis)
FOU	Fourneaux
FRE	Le Freney
MOD	Modane
MON	Montricher-Albanne
ORE	Orelle
SAD	Saint-André
SJU	Saint-Julien-Montdenis
SMA	Saint-Martin-d'Arc
SMM	Saint-Michel-de-Maurienne
SMP	Saint-Martin-la-Porte
VBT	Villarodin-Bourget
VBM	Villarodin-Bourget/Modane

Annexe 3 Composition du réseau de surveillance des eaux souterraines proposé par le BRGM

Rappel : ce tableau a été constitué à partir des demandes exprimées par les collectivités et les services de l'Etat.

Les lignes suivantes contiennent les définitions des codes et sigles utilisés dans le tableau.

Colonne

: **Problemes**

<i>Code</i>	<i>Définition</i>
!C	Problème de Continuité insuffisante de la chronique brute
!P	Problème de Précision insuffisante des valeurs de la chronique brute
!Q	Problème de Quantification des débits trop élevés pour l'instrumentation de mesure utilisée
aucun	Aucun problème décelé lors de l'examen visuel de la chronique brute et des résultats des analyses
nd	Impossible de qualifier la chronique de débits de ce point car ses données de suivi sont indisponibles sur le Portail Env. de TELT

Code_Reco

<i>Code</i>	<i>Recommandation</i>
AB	Abandon du jaugeage au seau de 20L.
TRX	Réalisation de travaux et/ou recherche d'un nouveau protocole de mesure du débit.
INFO	Transmission d'informations manquantes aux communes.
ACC	Assurer la présence d'un(e) agent de la commune lors du passage de TELT.

Usage_ARS

<i>Code</i>	<i>Définition</i>
PRV	Adduction collective privée
AEP	Adduction collective publique
ALI	Activité agro-alimentaire
THE	Usage thermal
UST	Source, puits, fontaine à usage public

Sigle_Type

<i>Sigle</i>	<i>Type</i>
CC	captage communal (Alimentation en Eau Potable)
AU	captages communaux ou privés à autres usages sans consommation (agrément : lavoirs, fontaines ; sources privées hors AEP ; etc.)
PCC	potentiel captage communal (Alimentation en Eau Potable)
SNC	Source Non Captée
CP	captage Privé (pouvant être utilisé pour l'alimentation en eau potable – privée)
PCP	potentiel captage Privé (pouvant être utilisé pour l'alimentation en eau potable – privée)
EH	Entité hydrogéologique
CCA	captage communal pour arrosage/abreuvement
RU	Ruisseau
UI	usages industriels (centrale hydroélectrique, etc.)

Pour rappel :

AUS = Aussois, AVR = Avrieux, BRA = Bramans (Val-Cenis), FOU = Fourneaux, FRE = Le Freney, MOD = Modane, MON= Montricher-Albanne, ORE = Orelle, SAD = Saint-André, SJU = Saint-Julien-Montdenis, SMA = Saint-Martin-d'Arc, SMM = Saint-Michel-de-Maurienne, SMP = Saint-Martin-la-Porte, VBT = Villarodin-Bourget.

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

Code_TELT	Nom_point	Sigle_Commune	Sigle_Type	X_L93	Y_L93	Code_Reco	Usage_ARS	Problemes
1-A	Brise-charge du Droset	AUS	CC	992334,7	6466996,7			!C, !P
321,1	AEP Fournache 1	AUS	CC	992390,1	6469780,3	AB, TRX		!Q
321,2	AEP Fournache 2	AUS	CC	992372,8	6469765	AB, TRX		!Q
5010	Source de l'Ortet (bord de route)	AUS	AU	992508,48	6466988,82			aucun
COM_1	Source du Pisset	AUS	PCC	990913,28	6468438,75			nd
COM_2	Source du Combet	AUS	PCC	992327,76	6468673,36			nd
COM_3	Source du Carrelet	AUS	PCC	992321,26	6467598,13			nd
235	Source de Fournette	AUS	PCC	994646,17	6467970,43			nd
F8	Forage Esseillon	AUS	SNC	993719	6464059			nd
COM_4	Source chalet de la Paix	AUS	CP	994066,98	6468100,77			nd
COM_5	Source bord de RD 108 sous cantine	AUS	SNC	992642,82	6467569,66			nd
5004?	Source Moulins - chalet Fernand	AUS	PCP	992468,42	6466106,61			nd
6001	Bassin de Saint-Benoît (réservoir communal)	AVR	CC	992464	6464710			aucun
6005	Source du Freney / Frêne	AVR	SNC	992472	6464432			aucun
6006	Source du Gros Saule	AVR	SNC	992512	6464394			aucun
COM_6	Source de Gurgot	AVR	CC	993609,1722	6462934,686			nd
250	Le Soliet d'en Haut	AVR	CC	994484,7886	6462379,413			nd
251	Le Soliet d'en Bas	AVR	CC	994453,3847	6462467,249			nd
423 à 426?	Bonneret	AVR	CC	993570,875	6462214,525			nd
423 à 426?	Bonnerette Aval	AVR	CC	993544,1458	6462196,187			nd
F21	quartzites	AVR	EH	991271,65	6464997,33			nd
F22	quartzites	AVR	EH	991680,25	6464894,89			nd
F57	quartzites	AVR	EH	992997,66	6464223,71			nd
F80	quartzites	AVR	EH	992556,47	6464585,24			nd
19,1	Captages des voutes planes basses - gauche	FRE	CC	985106,5	6461030,08	AB, TRX, ACC		!C
19,2	Captages des voutes planes basses - centre	FRE	CC	985107,63	6461030,17	AB, TRX, ACC		!C
19,3	Captages des voutes planes basses - droite au fond	FRE	CC	985109,04	6461030,19	ACC		!C

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

19,4	Captages des voutes planes basses - droite au milieu (bas)	FRE	CC	985110,28	6461030,23	ACC		!C
19,5	Captages des voutes planes basses - droite devant	FRE	CC	985111,5	6461030,23	ACC		!C
1	Forage - réservoir Loutraz	MOD	CC	987901	6463150	INFO		aucun
2	Source Claret	MOD	CC	988126	6463455			!C
3	Source Combacile	MOD	CC	987703	6463712			!P
6-D	Polset	MOD	CP	985982,9	6465641,4	AB, TRX		!C
8	Captage Jorio (Valfréjus)	MOD	CC	987296,5	6459213,9	AB, TRX		!C
6-C	Source des sangliers	MOD	SNC	987415,48	6464172,18			!C
4?	Roitelet : BSS001WUEN / 07757X0023	MOD	PCC	988844	6460934			!C, !P
6?	Roitelet 1: BSS001WUEQ / 07757X0025	MOD	PCC	989390	6460311			!C, !P
5?	Le Génie 1: BSS001WUEP / 07757X0024	MOD	PCC	989204	6461061			!C, !P
5?	Le Génie 1: BSS001WUFU / 07757X0055	MOD	PCC	989222	6460994			!C, !P
COM_7	Source: BSS001WUDY / 07757X0009	MOD	PCC	989150	6460273			nd
6-CV	Le réservoir: BSS001XTHF / 07992X1009	MOD	PCC	986932	6458866			nd
9	Les Souches 1 et 2: BSS001XTHE / 07992X1007	MOD	PCC	986801	6458658			nd
6-D0	Les Herbiers: BSS001XTHL / 07992X1014	MOD	PCC	986128	6457953			nd
COM_8	Blondon-parcelle 3689	MOD	AU	987916	6462826			nd
COM_9	Jobert-parcelle3805	MOD	AU	987684	6462685			nd
COM_10	Lazier-parcelle3526	MOD	AU	988315	6462702			nd
COM_11	Fasana/Jobert parcelle 3528	MOD	AU	988548	6462801			nd
COM_12	Fasana Raissiguier parcelle 3320	MOD	AU	987843	6462488			nd
COM_13	Margueron-parcelle 3647	MOD	AU	987916,853	6462620,448			nd
COM_14	Fernandes parcelle 3650	MOD	AU	987969,06	6462642,64			nd
4-A	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Gauche (origine Arplane)	FOU	CC	986034,0617	6460738,368	AB, TRX		!Q
23	Brise charge n°3 de la Montagne de Charvoz - Droite	FOU	CC	985574,29	6460340,66	AB, TRX		!C
25	Source de la Corbière	SAD	CP	985065	6461624			aucun

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

26	Réservoir de Saint-André	SAD	CC	984366	6462548	AB, TRX, ACC		!P
27	Captage de Montruard	SAD	CC	983724	6463277	AB, TRX		aucun
28	Captage de Villard	SAD	CC	982821	6463210	AB, TRX		!P
29	Captage des Champs	SAD	CC	981346	6463436	AB, TRX		!P
30	Source Fontaine Bénite (trop-plein réservoir du Col)	SAD	CC	985404	6463625	AB, TRX		!P
32	Captage sur la Drière	SAD	CC	984938,4688	6463762,2	AB, TRX		nd
39	Source Planay Nord (amont)	SAD	SNC	986432	6464834	AB, TRX		!C, !P
57	Ruisseau de l'Arpont amont Ouest	SAD	SNC	981942	6464621	TRX, ACC		!C, !P
58	Ruisseau de l'Arpont amont Est	SAD	SNC	982131	6464633	TRX, ACC		!C, !P
59	Réservoir de La Praz	SAD	CC	981933	6463867	TRX		!C
49	Source Sommière Sud	SAD	CC	983474,1	6464035,87	AB, TRX		!C, !P
50	Source Sommière Nord	SAD	CC	983421,68	6464117,43	-		!C, !P
9-A	Source Lovato	SAD	AU	983058,87	6463119,91	AB, TRX		!Q
9-B	Source des Gorges	SAD	AU	981833,83	6464130,33	AB, TRX		!C, !P
9-C	Source des Gorges 2	SAD	CC	981849,23	6464216,56			!C
F20	quartzites	SAD	EH	985954	6464013			nd
F70	houiller gréseux	SAD	EH	982535	6462952			nd
F71	houiller gréseux	SAD	EH	982365	6463242			nd
F136		SAD	EH	983875	6463354			nd
137	Captage des grandes Seignières	SMA	CC	971268	6462000	AB, TRX		aucun
1002	Captage ND des Neige	SJU	CC	966792	6470725	AB, TRX		aucun
1003	Source de l'Auby	SJU	CCA	967441,6374	6470885,595			aucun
1004	Captage du Revet	SJU	CC	967306	6471152	INFO		!Q
1011	Captage des Fayards	SJU	CCA	967989	6467873			aucun
1012	Captage de Costerg	SJU	CC	966770	6467860	AB, TRX		!C, !P, !Q
1016,1	captage du Nayet, arrivée gauche	SJU	CCA	967920,6	6467814,78			!P
1016,2	captage du Nayet, arrivée droite	SJU	CCA	967920,6	6467814,78			!P
F36	dépôts quaternaires	SJU	EH	967535,65	6467686,16			nd
F52	calcschistes et flyschs	SJU	EH	969210,72	6467053,01			nd

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

F60	dépôts quaternaires	SJU	EH	966194,73	6468060,96			nd
316	Fontaine froide amont	SMM	CC	973945	6462731			!C
317	Fontaine froide aval	SMM	CC	973946	6462731			!C
3004	Source de Pré Garin	SMM	CC	972988	6467519			aucun
3005,1	Captage de Beaune (ancien) - gauche	SMM	CC	972650	6467403			!C
3005,2	Captage de Beaune (ancien) - droite	SMM	CC	972652	6467403			!C
3005,3	Captage de Beaune (nouveau)	SMM	CC	972661	6467427			aucun
3011	Captage de Villard Bernon	SMM	CCA	972134	6466121			!C
3012,1	Captage des Teppes - centre (gauche)	SMM	CCA	972124	6465332			!C
3012,2	Captage des Teppes - droite	SMM	CCA	972125	6465332			aucun
3016	Captage du Pré Mollard	SMM	CC	972698	6464704	AB, TRX		aucun
3017	Captage de Milla	SMM	CC	972723	6465108	AB, TRX		aucun
3018,1	Captage des Fortunes	SMM	CC	972967	6464572	AB, TRX		aucun
3022	l'Etraz Ouest - gauche	SMM	CC	972716	6464552	AB, TRX		!C, !P
3023	l'Etraz Ouest - droite	SMM	CC	972766	6464552	AB, TRX		!C, !P, !Q
3031	Le Chêne - lavoir	SMM	AU	972040	6464625			!C
3044,1	Captage du Terrail - milieu	SMM	CCA	974156	6464662	AB, TRX		aucun
3044,2	Captage du Terrail - droite	SMM	CCA	974155,5	6464670,3			aucun
13-N	Source Michel Fontaine	SMM	CP	975360,93	6464197,05			!C, !P
3007	Source de Plan de Perousaz - gauche uniquement	SMM	SNC	973246,7158	6466929,527	AB, TRX		!C, !Q
3025	Lavoir bas de l'Etraz	SMM	AU	972746,8413	6464220,712			aucun
3036	Source Fontaine du Thyl Dessous du 2nd village	SMM	AU	973982,3937	6463867,076			aucun
3041,1	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées sur pilier lavoir	SMM	AU	973841,59	6464418,19			!C
3041,2	Lavoir du Thyl Dessus - 2 arrivées au fond (rigole en bois et au fond à droite à coté lavoir)	SMM	SNC	973843,04	6464418,18			!Q
3055	Ruisseau B du Vigny	SMM	RU	974826,74	6467022,95	AB, TRX		!C
3062	Ruisseau du Champieu	SMM	RU	973124,88	6469251,57			!C, !P, !Q
3052?	Captage Ste Marguerite	SMM	CC	974674	6467178			nd
328? 329?	Captage Bertrand	SMM	CC	975161	6467613			nd

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

F19	houiller gréseux (Villard Bernon)	SMM	EH	972096,6397	6465888,351			nd
2001	Source des Magnins	SMP	CP	970095,8465	6465808,799			!C
2002	Source de la Porte	SMP	CP	971421,52	6465282,93			!C
2005,1	Captage de Bordeaux - gauche	SMP	CP	971688,2991	6469072,782	AB, TRX		!C, !P
2005,2	Captage de Bordeaux - droite	SMP	CP	971689,7341	6469072,824	TRX		!C
2006,1	Source de Charbutan	SMP	CP	971738,2447	6468648,635			!C
2007,1	Champieu gauche	SMP	CC	972322,0019	6469223,262			aucun
2007,2	Champieu droite	SMP	CC	972323,2375	6469223,264	AB, TRX		!C
2007,4	Champieu "plymouth"	SMP	CC	972278,7826	6468955,144	AB, TRX		!C, !P
2019	Source 0 de la forêt de Beaune	SMP	UI	971103,22	6468286,9			nd
2019,2	Source 2 de la forêt de Beaune	SMP	UI	971098,78	6468208,89			nd
2019,3	Source 3 de la forêt de Beaune	SMP	UI	971096,3	6468086,5			nd
2019,4	Source 4 de la forêt de Beaune	SMP	UI	971092,83	6467986,3			nd
2019,5	Source 5 de la forêt de Beaune	SMP	UI	971103,1	6467931,17			nd
2019,7	Collecteur centrale hydroélectrique	SMP	UI	971150,9524	6467911,612			!C
F18	Houiller gréseux	SMP	EH	971705,5559	6465330,499			nd
8-A	Galerie du Prec	ORE	CP	980769,0385	6461054,83			!C, !P
61	Lavoir du teppey (hameau)	ORE	AU	978684,614	6462990,361			!C, !P
64	Forage autroute (93m, artésien)	ORE	CC	979343,3328	6463543,983			aucun
65,1	Captage Bonvillard (des Crozes) - au fond	ORE	CC	979017,8627	6463646,41	AB, TRX		aucun
65,2	Captage Bonvillard (des Crozes) - à droite	ORE	CC	979018,8904	6463646,356			!P
68	Source Planet amont	ORE	SNC	979286,8222	6464164,109	AB, TRX		aucun
75	Pont de la Balme (à droite)	ORE	CC	978887,0725	6465060,99	AB, TRX		aucun
76	Pont de la Balme (à gauche)	ORE	CC	978905,1747	6465214,345	AB, TRX		!C, !Q
77	captage des acacias	ORE	SNC	977278,5393	6462741,951			aucun
78	Source de la Pessonière	ORE	CP	977605,66	6462872,18			aucun
79	Captage Goudissart (Orelle Nord)	ORE	SNC	977208,8828	6463262,711	AB, TRX		!C, !P
86	Captage de la cochonière aval (AEP)	ORE	CC	977587,7063	6463418,303	AB, TRX		aucun
91	captage du Replat	ORE	CC	976829,73	6464048,92			!C

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

92bis	captage du Verney	ORE	CC	976712,0884	6464334,76	AB, TRX		!P
93bis	captage de l'Arpon	ORE	CC	976939,39	6464356,84			!C, !P
112	source du chalet du Verney	ORE	CP	979587,6386	6463291,171	AB, TRX		aucun
117	source du creux de l'Ours	ORE	SNC	979296,0173	6461826,822			!C, !P
F54	houiller schisteux	ORE	EH	979335,7165	6464052,807			nd
201	Galerie Bramans	BRA	CC	1002115,577	6463353,238	AB, TRX		!C, !P
206,1	captage Pré Clément d'en haut - source haute	BRA	CC	1001130,88	6462804,31			!P
206,2	captage Pré Clément d'en haut - source basse	BRA	CC	1001101,962	6462924,92			!P
208	Source le Planey bas	BRA	SNC	1001173,779	6463661,934			!C, !P
212	Source du refuge du Sufflet	BRA	CP	1001848,977	6463612,558	AB, TRX		!C
227,1	Source des Lorrains - gauche	BRA	CC	995912,2513	6464870,522			!C
227,2	Source des Lorrains - droite	BRA	CC	995911,8796	6464870,572			!C
228,1	captage de Plan Pommier - Est	BRA	CC	996165,0834	6465055,335			!P
228,2	captage de Plan Pommier - Ouest	BRA	CC	996150,6243	6465043,345			aucun
F16	micaschistes et gneiss	BRA	EH	1004019,579	6461520,388			nd
F30	micaschistes et gneiss	BRA	EH	1000918,817	6462485,815			nd
62	PUITS DE BONVILLARD	ORE	CC	979341,6104	6463540,645		AEP	nd
159	LA CULAZ AVAL	SJU	CC	967316,93	6466020,652		AEP	nd
160	LA CULAZ AMONT	SJU	CC	967310,045	6465992,096		AEP	nd
200	PLAN DE LA VIE	BRA	UI	1003569,877	6463121,342		ALI	nd
271	LE GROS MELEZE	VBT	CC	990816,6007	6462285,486		AEP	nd
274,2	SAINT JOSEPH	VBT	CC	990933,3794	6462566,511		AEP	nd
275 ?	LA FONTAINE AUX OISEAUX OUEST	VBT	CC	990247,3617	6462336,31		AEP	!C
275 ?	LA FONTAINE AUX OISEAUX	VBT	CC	990481,1431	6462262,634		AEP	!C
-	LES FONTAINES/GURGO	AVR	CC	993609,1722	6462934,686		AEP	nd
-	LE BOCHET AMONT	MON	CC	967233,7307	6466186,051		AEP	nd
-	RIVE GAUCHE	BRA	UI	1003729,945	6462894,854		ALI	nd
1009,2?	BAILLERY	SJU	AU	967400,801	6469489,441		USP	nd
1009? 1009,1?	LES FONTAINES	SJU	AU	967651,515	6469772,522		USP	nd

Tunnel Euralpin Lyon – Turin : Appui à la compréhension du lien projet – ressources en eaux souterraines

18-F	LA MASSE	VB	CC	988344,7916	6466944,535		AEP	!C, !P, !Q
217? 218?	MONTBAS SOURCE 2	BRA	UI	999473,874	6463487,998		ALI	nd
217? 218?	MONTBAS SOURCE 1	BRA	UI	999435,5028	6463478,59		ALI	nd
217? 218?	MONTBAS 1	BRA	CP	999436,7419	6463493,767		PRV	nd
220?	BOIS BRULE	BRA	CP	998984,8296	6463546,138		PRV	nd
226? 225?	LA BERGERIE	BRA	UI	997547,7362	6463192,172		ALI	nd
226? 225?	LA DRAILLE	BRA	CP	997442,2414	6463250,332		PRV	nd
272,1 ; 272,2 ; 272,3	LES EVES	VB	CC	991344,4529	6462663,682		AEP	nd
277,1 ; 277,2 ; 277,3	LES AVENIERES	VB	CC	989976,4287	6462256,813		AEP	!Q

Annexe 4 Liste des annexes électroniques jointes au rapport

Cette annexe énumère et décrit sommairement le contenu des « annexes électroniques » (documents sous forme de fichiers) jointes au présent rapport. Ces fichiers permettent d'obtenir des informations plus détaillées sur certains aspects traités dans la présente expertise et analyse.

TELT Resultats TraiteSeriesQ 126pts v211018151018 table AVEC INTERP.xlsx

Classeur Excel (fichier XLSX) composé de plusieurs feuilles :

1. « Indicateurs_et_Qualifications » : Grand tableau de résultats (indicateurs) y compris ceux issus de l'examen visuel des chroniques
2. « Definitions_des_colonnes » : Définition des colonnes du grand tableau
3. « ExamenVisuel_Problemes_parPoint » : Tableau mis en forme présentant seulement les résultats de l'examen visuel, avec quelques colonnes supplémentaires (utilisé pour préparer l'Annexe 2)
4. « EV_Bilan_Problemes_parCommune » : Tableau croisé préparé à partir des résultats de l'examen visuel (utilisé pour préparer le tableau de « Bilan des problèmes » de la section 2.4.3 du rapport)
5. « Points_Infos » : Tableau d'informations sur une liste de points d'eau incluant tous ceux dont une chronique de débits a été analysée dans cette étude, plus quelques autres points

TELT Resultats TraiteSeriesQ 126pts v211018151018 graphs.pdf

Document PDF présentant les fiches de résultats graphiques générées pour chacune des 126 chroniques de débits analysées dans cette étude. Les graphiques présentés sont, de haut en bas :

1. La chronique ~brute (agrégée par mois donc en général 1 seule valeurs → la statistique mensuelle), avec en superposition les séries de statistiques annuelles (seulement pour les années suffisamment complètes : ASC) et, au-dessus du graphique, une indication des périodes de creusement (tous secteurs confondus, essentiellement des descenderies)
2. Test d'homogénéité de Pettitt, effectué sur la série de débits moyens annuels (ASC seulement)
3. Analyse de tendance effectuée sur la série de débits moyens annuels (ASC seulement)
4. Détection des valeurs brutes extrêmes potentiellement aberrantes : en rouge si détectées
5. Périodogramme de Lomb–Scargle obtenu par analyse spectrale des débits moyens mensuels

TELT Synthese Communes

Classeur Excel (fichier XLSX) composé d'une feuille, permettant de retracer les demandes de la DDT et des communes quant à l'évolution du réseau de surveillance des eaux souterraines.

TELT Check ARS

Classeur Excel (fichier XLSX) composé d'une feuille, permettant de retracer les échanges entre l'ARS et el BRGM concernant l'identification des captages situés dans une zone-tampon de 2 km autour du tracé du tunnel.

TELT Reseau BRGM

Classeur Excel (fichier XLSX) composé d'une feuille correspondant au contenu de l'Annexe 3.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Direction régionale Auvergne Rhône Alpes

151 boulevard de la bataille de Stalingrad

69626 VILLEURBANNE

Tél. : 04 72 82 11 50

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm