

SUIVI ET MAINTENANCE DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES DE LA A43

A. BERGERE
Terrasol -, France
a.bergere@terrasol.com
P.L. VEYRON
Setec, France
veyron@tpi.setec.fr

RÉSUMÉ

L'autoroute A43 a été conçue pour s'intégrer dans la vallée de l'Arc en Maurienne. Le tracé a été adapté à un relief montagneux escarpé et très encaissée, une géologie complexe en site rocheux, d'éboulis et d'alluvions. Il croise des voies de circulation et des ouvrages hydrauliques préalablement aménagés. Les ingénieurs ont du faire face à des difficultés majeures pour assurer la stabilité des ouvrages implantés sur des sites en équilibre limite et améliorer l'aspect environnemental de la vallée.

Cet article présente à travers deux exemples d'ouvrages sensibles implantés sur des sites évolutifs, les opérations de suivi et les travaux de maintenance engagés pour maintenir l'autoroute en service. Ces deux ouvrages correspondent à un contexte très différent. Le premier, ponts et remblais d'accès sur couches compressibles dans le secteur du Rieu Sec, ont été conçus pour supporter des tassements de grande amplitude. Le deuxième, tunnel et murs de soutènement du secteur des Sorderettes, concerne un versant abrupt exposé aux instabilités où les conditions hydrogéologiques restent préjudiciables.

Ces ouvrages ont fait l'objet d'adaptations en cours d'exécution puis quelques années après la mise en service. Les dispositifs de suivi et la maintenance ont été dimensionnés et mis en œuvre selon l'évolution de chacun des sites, classés sensibles encore aujourd'hui.

A. PRESENTATION DE L'AUTOROUTE A43

L'autoroute A43 fait partie des grands itinéraires européens reliant la France (Lyon) à l'Italie (Turin). Cette autoroute de montagne débouche sur le tunnel routier international du Fréjus traversant la chaîne des Alpes. La concession de cette autoroute de 65 km a été confiée, pour la partie française, à la Société Française du Tunnel Routier du Fréjus (SFTRF) qui a financé les études, la réalisation du projet et en assure aujourd'hui l'exploitation (cf. Figure 1).

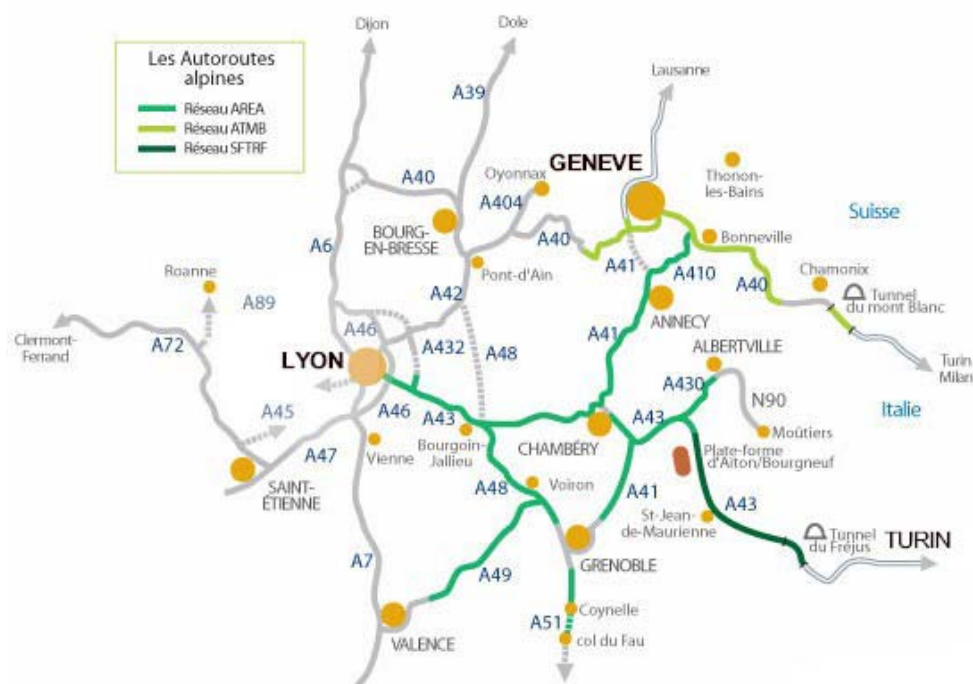


Figure 1 - Implantation géographique de l'autoroute de la Maurienne A43.

Les principales caractéristiques techniques et financières de l'autoroute A43 sont indiquées dans le Tableau 1 :

Sections	Pont d'Aiton Ste Marie de Cuines	Ste Marie de Cuines St Michel de Maurienne	St Michel de Maurienne Le Freney
Maître d'oeuvre	Scetauroute DDE 73	Setec	Setec
Longueur (km)	30.7	19.6	13.5
Dénivelés (m)	165	252	332
Terrassements			
Déblais (M m ³)	2.250	2.940	1.100
Remblais, y compris merlons (M m ³)	3.876	4.370	1.000
Couche de forme (m ³)	600 000	473 000	200 000
Enrochements (m ³)	446 000	423 000	220 000
Ouvrages d'art non courants			
Viaducs	1	5	7
Tunnel / Tranchée couverte	3	-	2
O.A.N.C / Pont canal	3	8	3
Ouvrages d'art courants			
PS / PI	37	20	12
Murs	3 300 ml	8 600 ml	8 100 ml
Coûts par km en M€ (valeur en 1998)	13,9	21,6	41,9

Tableau 1 - Principales quantités des sections d'autoroutes.

1. CONTRAINTES TECHNIQUES

L'autoroute A43 s'intègre dans la vallée de la Maurienne, espace restreint où préexistaient, hors des agglomérations, de nombreux obstacles interférant avec le Projet, traitées au mieux dans le cadre d'une insertion paysagère exemplaire :

- la rivière Arc et ses affluents dont les crues charriant des "laves torrentielles" provoquent d'importants affouillements,
- la Route Nationale RN6 et la voie ferrée Lyon – Turin à forts trafics,

- les ouvrages hydrauliques (barrages, canaux, galeries hydrauliques) du complexe hydroélectrique Arc - Isère,
- les lignes électriques (150 à 400 kV),
- les sites industriels :
 - cinq usines en production à préserver,
 - sept sites industriels anciens à intégrer à l'environnement (friches, dépôts et décharges impliquant la neutralisation d'éléments polluants majeurs),
 - deux sites sous cavés (exploitation souterraine de charbon et galeries hydrauliques abandonnées).

Le projet autoroutier s'inscrit dans un cadre géologique relativement complexe. Les flancs de la vallée de l'Arc sont souvent instables, les lignes de crête dominant la vallée à plus de 1000 m, génèrent des blocs et des masses instables dont les trajectoires potentielles menaçaient l'autoroute.

- éboulis de schistes et déjections torrentielles, riches en particules fines où d'importantes circulations d'eau ont été constatées,
- falaises rocheuses particulièrement fissurées, évolutives sous l'action de la pluie et du gel.

D'importants travaux de protection ont du être réalisés (purgés, filets anti-blocs, constructions de merlons de confinement). Les fondations des ouvrages d'art sont alors dimensionnées en fonction de critères non courants afin de s'adapter au mieux aux risques géotechniques :

- affouillement dans le lit de l'Arc,
- instabilité des versants,
- compressibilité des dépôts lacustres à l'amont des anciens verrous glaciaires,
- réalisation difficile liée à des singularités locales (falaises fossiles, blocs durs, cavités, horizons mous ou bouillants intercalaires) et d'importantes sollicitations sur les outils de forage (déviation, abrasion, poussées horizontales, ...).

Le contexte topographique et morphologique impose des ouvrages exceptionnels par leur hauteur, leur portée et les charges qu'ils auront à subir.

Le contexte sismique (zone Ia et Ib), impose aussi un dimensionnement parasismique des ouvrages conformément aux réglementations en vigueur.

Enfin, les conditions hivernales imposent également une protection particulière des ouvrages contre :

- les avalanches,
- le gel des terrains et des drains au niveau des murs cloués et ancrés,
- l'action des sels de deverglaçage sur le béton.

2. CONSTRUCTIONS, EXPLOITATION ET CONTRÔLES TECHNIQUES

2.1. Délais de réalisation

Les études du projet ont débuté en 1993 et se sont déroulées par étapes jusqu'en 1997. Les travaux, également phasés, ont permis de respecter les échéances mentionnées dans le Tableau 2 :

Section	Pont d'Aiton Ste Marie de Cuines	Ste Marie de Cuines St Michel de Maurienne	St Michel de Maurienne Le Freney
Début des travaux	1994	1995	1995 (1)
Mise en service	1997	1998	2000

(1) Tunnel d'Orelle

Tableau 2 - Durée des travaux de A43.

2.2. Suivi des sites sensibles

Au sein des équipes de Maîtrise d'œuvre, Terrasol a participé à la conception des ouvrages puis au contrôle d'exécution pour la partie géotechnique. A compter de la mise en service des sections Ste Marie / St Michel / Le Freney, Terrasol a réalisé le suivi technique d'une vingtaine de sites sensibles, potentiellement évolutifs, pour le compte de la SFTRF.

Ce suivi comprend :

- l'établissement d'un "dossier d'ouvrages" détaillé, y compris la synthèse des mesures faites pendant les travaux,
- la préconisation de mesures complémentaires nécessaires pour contrôler la stabilité des ouvrages et quantifier des déplacements éventuels,
- l'interprétation de ces mesures et la publication d'un avis technique statuant sur l'évolution des ouvrages, les mesures à poursuivre et, si nécessaire, les travaux de stabilisation ou d'entretien à programmer.

Les sites sensibles soumis à un contrôle particulier sont répertoriés dans le Tableau 3 :

Section	PR	Situation de l'ouvrage	Commentaires
Ste Marie de Cuines - St Michel de Maurienne	159.70	Cône du Fay : murs de soutènement, déblai	Déclassement des sites sensibles en 2002
	160.00	Sommet du Grand Châtelard : masses instables	Déclassement des sites sensibles en 2000
	162.90	Rocher de l'Escalade rive gauche : mur cloué et merlon de protection	Déclassement des sites sensibles en 2001
	167.40	Versant en face de Pechiney : mur cloué	Déclassement des sites sensibles en 2002
	167.80	Mur Pechiney : murs Freyssisol	Déclassement des sites sensibles en 2002
	173.00 à 174.00	Zone du Rieu Sec : zone de tassements - OH n°90 - PI n°91 - OH n°92 - remblai	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	174.40 à 175.00	Zone de St Martin la Porte : - stabilité plate-forme SNCF - murs de soutènement	Secteur encore actif sous contrôle particulier
St Michel de Maurienne – Le freney	178.800 à 178.900	Lit amont du Merderel	Déclassement des sites sensibles en 2003
	179.600 à 179.350	Débouché du Merderel - Soutènement de La Saussaz	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	179.600 à 179.800	Versant de la Saussaz - Viaduc de La Saussaz	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	179.800 à 180.200	Secteur de La Saussaz Mur de 1957 (RN6)	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	180.200 à 181.180	Drainage de l'éperon des Sorderettes - Tunnel des Sorderettes	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	181.180 à 182.050	Versant des Sordières - déblais et grands soutènements	Secteur encore actif sous contrôle particulier
	184.350	Usines de ventilation du tunnel d'Orelle	Déclassement des sites sensibles en 2003
	186.100 à 187.020	Viaduc des Chèvres et digue des Berchettes	Déclassement des sites sensibles en 2003
	189.040 à 189.360	Secteur Combe Noire - Les Teppes	Secteur encore actif sous contrôle particulier

Tableau 3 - Les sites sensibles de l'autoroute A43 de Ste Marie de Cuines à St Michel de Maurienne.

2.3. Publications

La revue Travaux a consacré son n° 745 de Septembre 1998 à l'autoroute de la Maurienne (A43). Par ailleurs, plusieurs articles ont été publiés précisant le contexte et les solutions retenues pour certains ouvrages. Le présent article complète la bibliographie et détaille l'auscultation mise en place pour deux sites sensibles dont l'évolution n'est pas totalement terminée :

- la zone du Rieu Sec entre St Jean de Maurienne et St Michel de Maurienne comprend trois ouvrages d'art et un remblai de grande hauteur sur assise compressible,
- le franchissement de l'éperon des Sorderettes entre St Michel de Maurienne et Le Freney comprend un tunnel de versant sous faible couverture accueillant les voies montantes et un ensemble de soutènement en déblai dégageant l'emprise des voies descendantes.

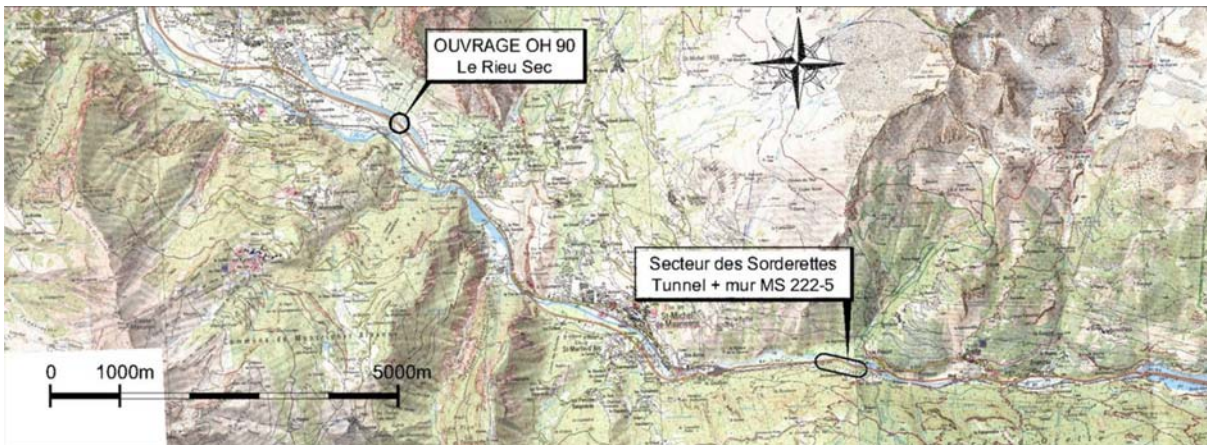


Figure 2 : Implantation des sites sensibles du Rieu Sec et des Sorderettes.

B. SECTEUR DU RIEU SEC (ST JULIEN - MONT DENIS)

1. HISTORIQUE DE L'AMÉNAGEMENT ET CARACTÉRISTIQUES D'ENSEMBLE DU SITE

Avant 1957, la Route Nationale RN6 longeant l'Arc, nécessitait des travaux d'entretien et de rétablissement importants après chaque crue majeure du torrent. La crue de 1957, dont le débit est estimé à 650 - 700 m³/s a submergé la RN6 et l'a détruite sur plusieurs centaines de mètres (cf. Figure 3). La crue centennale (800 à 900 m³/s) serait encore plus destructrice. En 1960, la RN6 a été reconstruite hors crues, à l'emplacement qu'elle occupe encore actuellement. L'ouvrage hydraulique sur le Rieu Sec, fondé superficiellement, ainsi que la plate-forme routière établie en remblai de 7 à 8 mètres datent de cette époque.

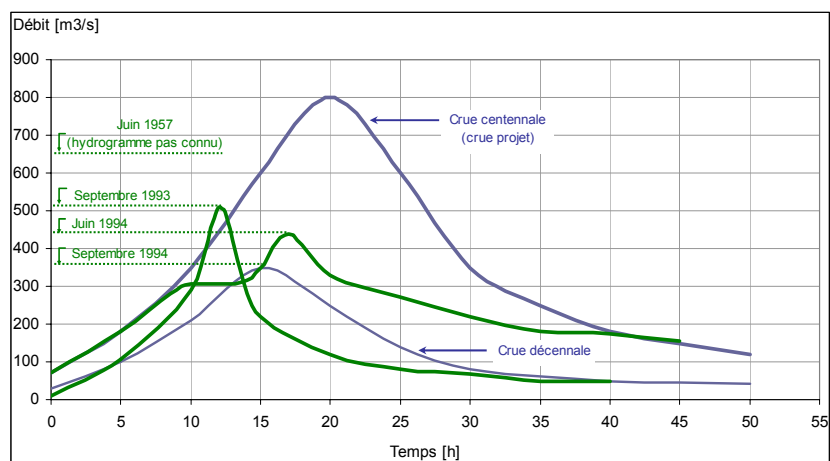


Figure 3 - Histogramme des crues de l'Arc.

Entre 1965 et 1970, Electricité de France a réalisé l'aménagement hydroélectrique Arc - Isère, incluant le canal d'Hermillon construit en remblai à quelques dizaines de mètres au Nord de la RN6. Les digues parallèles, de 12 à 18 m de hauteur maximale, constituant le canal ont subi des déformations importantes : évolution interne et tassement d'assise. Pour contrecarrer ces mouvements et augmenter la sécurité face au risque de grand glissement, les autorités de tutelles (EDF et DDE) ont décidé en 1973, de remblayer la "cuvette" qui subsistait entre la digue Sud du canal d'Hermillon et le remblai de la RN6 puis en 1978, de recharger cet espace de quelques mètres de remblais. Des tassements significatifs de 0,5 cm/an se produisaient encore en 1995 à plus de 26 m de profondeur sous le TN :

- tassement total en crête de 1974 à 1995 : 25 cm,
- tassement total en crête de 1984 à 1995 : 8 cm,
- tassement de l'assise de 1984 à 1995 : 3 cm.



En 1993, les fortes crues (débit de l'Arc de 500 m³/h) ont provoqué le comblement du lit du Rieu Sec et de l'ouvrage hydraulique et une réduction de la section du lit de l'Arc avec érosion de l'assise de la voie ferrée en rive Sud du torrent. La Figure 4, photographie de 1993, caractérise le site après la crue.

La construction de l'autoroute A43 dans ce secteur a débuté en 1995.

Figure 4 - Photographie de la A43 après la crue de 1993.

2. CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DU SITE

Le cône de déjection du Rieu Sec constitue en rive Nord de l'Arc, un glaciis dont la pente globale croit de 10% en rive à 20% au large du torrent. Un sondage réalisé par EDF en 1973 (carottage continu, prolongé en forage destructif) aurait reconnu :

- 60 m environ de matériaux granulaires plus ou moins limoneux compacts, à blocs, (colluvions torrentielles),
- Plus de 30 m de silt noirâtre (dépôt lacustre).

En dépit de l'absence d'échantillonnage et de mesure in situ, EDF a attribué les tassements de l'assise des digues du canal d'Hermillon aux sédiments lacustres. Les sondages réalisés pour les besoins des études et contrôles de A43 ont fourni les indications suivantes :

Phase d'études		Avant projet	Projet	Contrôles d'exécution	
Sondages		Pressiomètre	Pressiomètre	Carottage	Pressiomètre
Epaisseur (m) des déjections torrentielles		> 20	> 21	> 45	> 30
Identification des silts lacustres compressibles		Non faite	Non faite	Non faite	Non faite
Comportement des déjections torrentielles	Pression limite pressiométrique PI* (MPa)	0.7 à > 2.5 ⁽¹⁾ (> 2.0)	1.3 à 3.5 ⁽¹⁾ (2.5)	-	1.0 à 3.6 ⁽¹⁾ (2.5)
	Module pressiométrique E _M (MPa)	6.0 à 34.0 ⁽¹⁾ (19.0)	13.0 à 35.0 ⁽¹⁾ (21.0)	-	9.0 à 50.0 ⁽¹⁾ (26.0)

(1) valeur maximale obtenue en éliminant les mesures concernant des blocs rocheux

Tableau 4 - Caractéristiques pressiométriques projet et exécution.

Deux niveaux piézométriques ont été reconnus lors des investigations pour les contrôles d'exécution :

- Des circulations d'eau suspendues dans les déjections torrentielles à 4 - 5 m de profondeur sous la surface topographique.
- Une nappe de versant située à 12 - 15 m sous la surface topographique se raccordant à la nappe alluviale de l'Arc.

3. CONCEPTION ET CONSTRUCTION DES OUVRAGES

Les déjections torrentielles sont assez résistantes pour porter des ouvrages fondés superficiellement.

A défaut de données précises permettant de calculer des tassements représentatifs, un ordre de grandeur d'une trentaine de centimètres apparaissait plausible. La localisation présumée de l'horizon compressible exclut tout recours à des fondations sur pieux :

- Niveau porteur hors de portée en profondeur et non reconnu,
- Sollicitations parasites sur les pieux (frottement négatif, poussées horizontales) non admissibles en cas de mouvement de l'assise.

Les ouvrages ont donc été fondés sur semelles superficielles protégées contre tout risque d'affouillement au moyen de massifs d'enrochements dans le lit du Rieu sec (cf. Figure 5).



Figure 5 -: Ouvrage OH90 sur le secteur du Rieu Sec (PI91 à droite).

Afin de pouvoir s'adapter à des tassements pluri décimétriques et aux déplacements horizontaux correspondants, induits par le remblai autoroutier (18 m de hauteur maximum), les deux ouvrages, implantés en site sensible, ont été conçus résistants et déformables (structures isostatiques). Le franchissement du Rieu Sec (OH90) comprend deux ouvrages indépendants accolés construits par la société QUILLERY. Ces structures isostatiques à trois travées présentent un tablier en béton à poutres précontraintes et dalle de liaison à joints structurels sur appuis. Le rétablissement du chemin rural sous le remblai est un pont voûte à éléments préfabriqués (PI91 - procédé MATIERE) monté sur un radier en BA coulé en place (voûte à trois articulations : clé et base des piédroits).

Le phasage a été établi en fonction des contraintes géotechniques, en application de la méthode de suivi dite "observationnelle" qui permet, après un délai de contrôle de l'évolution des ouvrages, d'adapter si nécessaire :

- la loi de comportement des terrains,
- la géométrie et la résistance des ouvrages.

Très rapidement, au cours du chantier, des tassements supérieurs aux tassements prévus, ont été observés au niveau du remblai et des ouvrages. La culée C3 de l'OH90 subissait un léger basculement vers l'aval, alors que 7 m de remblai restaient à construire.

Face à cette situation, il a été décidé, en cours de travaux, d'anticiper une partie des tassements au droit de cette culée par application d'une surcharge de remblai avant réalisation du tablier, ceci dans le but de réduire les tassements résiduels pouvant affecter l'ouvrage après sa construction. De plus, afin d'anticiper les déformations que l'ouvrage allait subir en phase d'exploitation et améliorer ainsi le confort des usagers, le tablier Sud a été réalisé 2 cm au-dessus de sa cote théorique et la "ligne rouge" de l'autoroute surélevée jusqu'à 8 cm dans la zone des plus forts tassements.

Le phasage des travaux de l'ouvrage OH90 comprend, à partir de la cote indicative 662 mNG sous la culée C3 (cf. Tableau 5) :

- Le réglage et le compactage des anciens dépôts présents sur site et l'apport de remblais jusqu'à la cote 665 mNG.
- La construction du PI91 (ouvrage Matière situé à quelques dizaines de mètres) et simultanément la réalisation de l'assise de la culée C3 (remblai et massif en grave ciment compactés de façon optimum).
- La construction de la culée C3 et de la pile P2 puis le remblayage complémentaire entre P2 et C3.
- Le contrôle des déplacements de la culée pendant un mois, à compter du réglage des bossages d'appuis des poutres (Oct. à Nov. 1996). Les tassements constatés (5 cm coté Arc et 1,5 cm coté RN6, sans stabilisation définitive) sont largement supérieurs aux prévisions, la décision de précharger l'assise de P2, C3 et du remblai d'accès a été prise.
- La construction des remblais jusqu'à la cote 672 mNG sur l'ensemble du secteur, y compris pour le PI91 et jusqu'à la cote 679 mNG au droit de la culée C3 et sur 30 m à

l'arrière de cette culée (surcharge de 2,0 m de remblai par rapport à la cote finale de l'ouvrage).

- La réalisation d'une banquette provisoire stabilisatrice de 10 m de large et 4 m de hauteur dans le lit du Rieu Sec.
- Le contrôle des déplacements pendant 4 mois. La décision d'arrêter le préchargement, de régler les appareils d'appuis et de mettre en place les poutres sur l'OH90 a été prise le 15 mars 1997 alors que le tassement de l'assise des remblais atteignait environ 20 cm.
- Les travaux de finition des ouvrages d'art des remblais et la construction des chaussées pour une mise en service en janvier 1998. Pendant cette période, un suivi topographique rigoureux des ouvrages d'art et de la chaussée a été pratiqué.

Le Tableau 5 présente les tassements mesurés au cours des différentes phases de travaux :

Dates	Tassements	Phases de travaux
Oct. 1996	< 5 cm	Tassement indicatif – remblai à 666 mNG.
Déc. 1996	11,5 cm	Remblai à 672 mNG
Fév. 1997	17,2 cm	Préchargement à 679 mNG de la culée
Mars 1997	17,8 cm	Déchargement de la culée
Avril 1997	17,9 cm	Réalisation du tablier
Fin avril 1997	18,0 cm	Rechargement à 676,0 mNG

Tableau 5 - Tassements mesurés sur le remblai au droit de la culée C3 en phase travaux.

4. ORGANISATION DES CONTRÔLES APRÈS LA MISE EN SERVICE DE LA A43

Dès que le problème de tassement fut identifié, une instrumentation a été mise en place au cours des travaux pour le suivi de tout le secteur du Rieu Sec dans le but de pouvoir réagir à toute évolution susceptible de mettre en cause la pérennité des ouvrages et la sécurité des usagers (cf.

Figure 6). Elle comprend au niveau de l'ouvrage OH90 :

- deux inclinomètres (de 40 m de profondeur) et trois piézomètres (de 9, 10 et 20 m de profondeur) entre l'A43 et la RN6 aux abords du PI91,
- deux inclinomètres (de 40 et 50 m de profondeur) et deux piézomètres (de 14,5 m de profondeur) en pied de talus de remblai aval entre le Rieu Sec et le PI91,
- deux tassomètres en forage de 60 m de profondeur implantés en bordure de la demi plate-forme autoroutière sens montant,
- de nombreux repères topographiques.



Figure 6 - Implantation des sondages et repères topographiques sur le secteur du Rieu Sec.

Le seuil d'alerte relatif à la déformation du tablier de l'OH90 correspond à un tassement différentiel entre travées de 30 mm (contraintes admissibles à l'ELS). Pour les remblais, le seuil de tassement différentiel entre 2 points de mesure distants de 20 m, est de 5 mm longitudinalement et de 5 mm par mètre transversalement. A l'exception des repères topographiques sur chaussée, implantés dans le cadre de la mission de suivi, l'instrumentation du site a été mise en place pendant les travaux de construction de l'autoroute entre février et mai 1997.

Le suivi effectué avant la mise en service en Février 1998 a montré que :

- La chaussée présentait des tassements importants de l'ordre de 10 cm mais les tassements différentiels restaient acceptables (cf. Figure 7).
- L'OH n°90 a subi des tassements importants qui se ralentissent dans le temps (10+20 = 30 cm pour CO et 18+55 = 73 cm pour C3). Les déformations mesurées ne sont pas homogènes puisque la culée C3 tasse plus que la culée C0 et que, par ailleurs, les tassements sont plus importants côté Sud que côté Nord de l'ouvrage ; ces tassements différentiels introduisent une déformation progressive du tablier de l'ouvrage qui a tendance à se vriller (cf. Tableau 5).
- Le PI91 a subi des tassements importants de 30 à 50 cm en travaux et 150 cm avant la mise en service, qui tendent à se ralentir de manière asymptotique ; ces tassements ont toutefois provoqué la mise en butée de nombreux éléments constitutifs de la voûte et entraîné la fissuration de plusieurs éléments préfabriqués (cf. Figure 9).

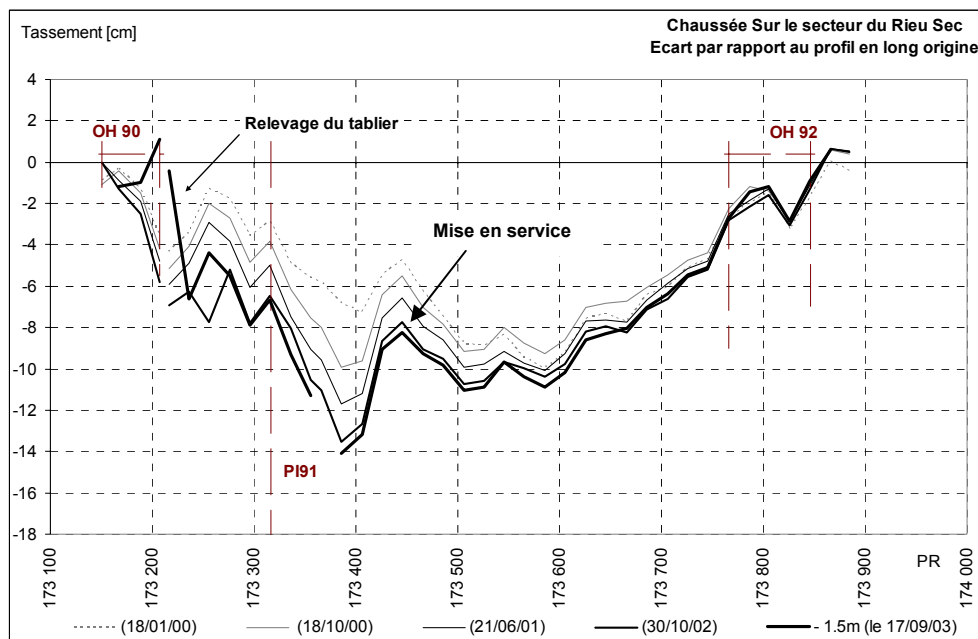


Figure 7 - Tassements mesurés sur la chaussée du secteur du Rieu Sec jusqu'en sept. 2003.

A la suite de ce premier suivi, l'ouvrage avait subi un déplacement vers l'ARC parallèle aux lignes d'appuis de 15 à 30 mm et un tassement relativement important de tous les appuis, à l'exception des piles P1. Il en résultait une distorsion importante des appareils d'appuis. Il est donc nécessaire de procéder au recalage des appuis (année 2001 pour le premier recalage de la culée – cf. Figure 8).

En service, l'extrapolation des données actuellement disponibles indique que le mouvement se poursuit en se ralentissant progressivement. Les tassements suivent une loi de type $s = A + B \cdot \log(T / T_0)$ avec une valeur spécifiques de A et de B pour chaque pile et culée de l'ouvrage. Au niveau de la culée amont, le tassement suit la loi $s = 24 + 52 \log$

$(T / 100)$ et a pour amplitude en septembre 2001 ($T = 1630$ jours) $s = 24 + 52.\log (1630 / 100) = 88$ mm.

L'extrapolation faite à partir de Septembre 2001 (date à laquelle le recalage du tablier), à Septembre 2011 conduit à des tassement de $s = 24 + 52.\log (5280 / 100) = 114$ mm, c'est-à-dire un tassement résiduel affectant le tablier de 27 mm.

Les tassements prévisibles 10 ans après la remise à niveau de la culée amont ne devant pas dépasser $\Delta s \sim 27$ mm, aucun recalage complémentaire n'a été prévu avant au moins 10 ans. Néanmoins, le suivi détaillé de l'ouvrage reste nécessaire.

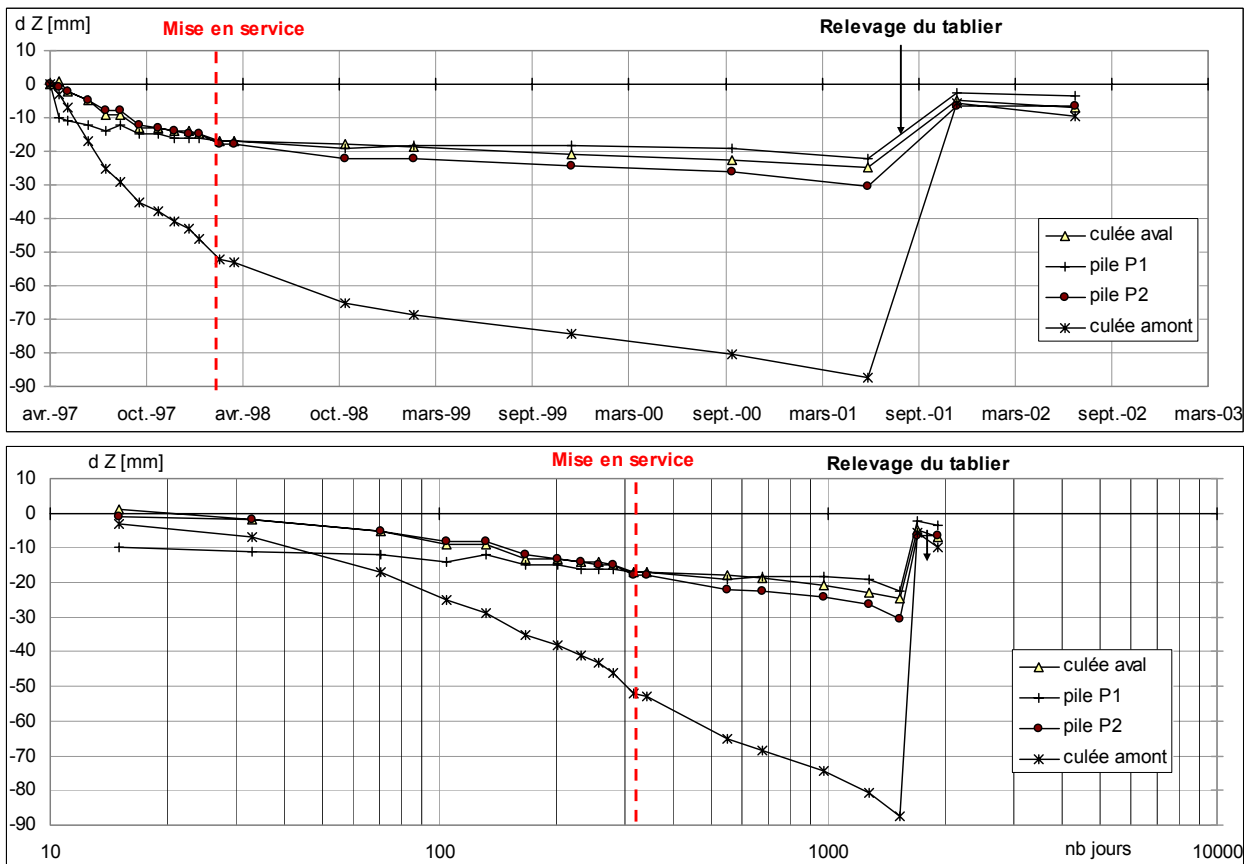


Figure 8 - OH 90 Déplacement en altimétrie – Tablier sens montant – Echelle normale et échelle logarithmique du temps. Le zéro est redéfini en avril 1997, il ne prend pas en compte les tassements de la phase travaux.

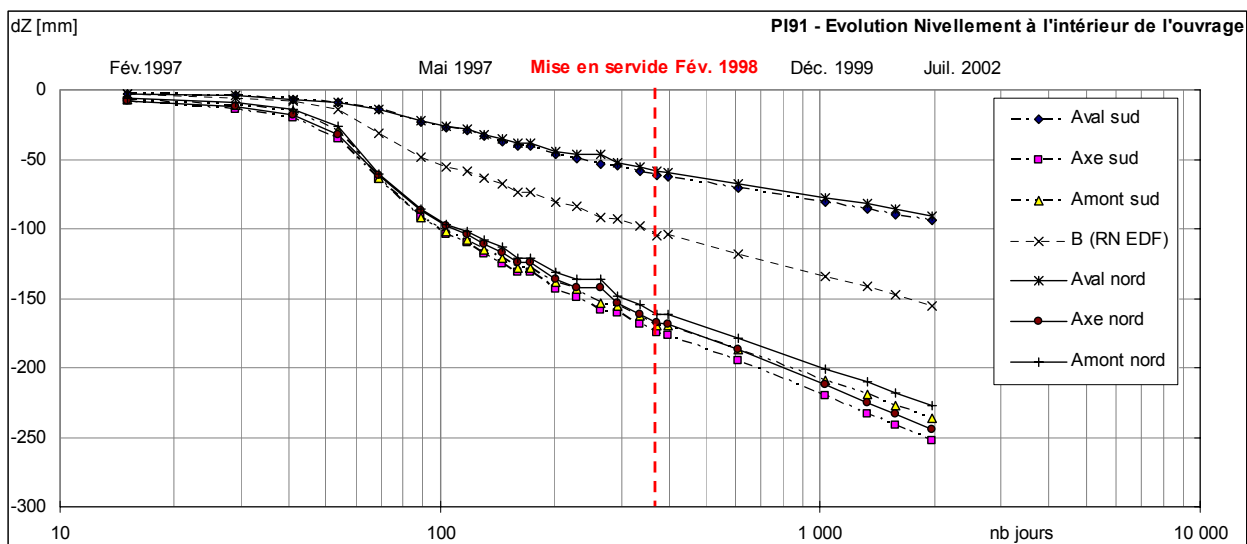


Figure 9 - PI91 Evaluation des tassements à l'intérieur de l'ouvrage. Le zéro est redéfini en Février 1997, il ne prend pas en compte les tassements de la phase travaux.

L'évaluation des déformations des ouvrages et de la chaussée a suscité la poursuite du suivi annuel jusqu'en 2004. Aucune anomalie dans l'évolution du tassement n'a été constatée. Le phénomène évolue vers une stabilisation à long terme comme cela avait été prévu à la mise en service en 2000. Aujourd'hui, le suivi est allégé mais reste toujours d'actualité.

C. SECTEUR DES SORDERETTES

1. HISTORIQUE DE L'AMÉNAGEMENT ET CARACTÉRISTIQUES D'ENSEMBLE DU SITE

La Route Nationale RN6, établie en rive de l'Arc, au pied du versant Sud, a subi des dommages considérables du fait des crues de l'Arc. En particulier, les crues de 1957 (650 m³/s) et de 1968 (450 à 500 m³/s) ayant sapé l'assise de la RN6 sur plusieurs centaines de mètres, la décision a été prise de mettre définitivement hors d'eau, d'élargir et de protéger l'axe routier et la voie ferrée dans le secteur de l'Eperon des Sorderettes.

Les travaux se sont déroulés en 1969 et 1970 avec l'aménagement du cône de déjection du Poucet et la construction de murs en rive Sud de l'Arc soutenant la RN6. La Figure 10 montre l'ensemble du site actuel inscrit dans une vallée étroite particulièrement contrainte du fait de la présence de l'Arc, de la voie ferrée Lyon - Turin et de la RN6.



Figure 10 - : Secteur des Sorderettes à l'état actuel.

Le chantier de 1969 a subi plusieurs ruptures du versant, un éboulement rocheux dans la partie Est de l'éperon (cf. Figure 11), des éboulements répétitifs en sols meubles lors de la construction d'un grand mur maçonné en partie Ouest de l'éperon.



Figure 11 - Eboulement rocheux de l'éperon des Sorderettes en 1969.

Dans ce secteur, les travaux de construction de l'autoroute A43 ont débuté en 1996 pour le tunnel des Sorderettes (voie montante de A43) et en 1998 pour les grands terrassements et soutènements pour la voie descendante à l'air libre.

2. CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES DU SITE

L'éperon des Sorderettes est constitué de deux arrêtes rocheuses visibles dans le lit de l'arc, bordant un sillon fossile comblé d'éboulis. Les masses rocheuses enracinées correspondent aux schistes et grès du "Houiller productif". Elles sont très largement diaclasées et localement broyées. Les éboulis sont hétérogènes, constitués d'horizons entrecroisés, de silts, de silts à fragments de schistes et de grès et de blocaille incluant des éléments de l'ordre du m³.

Pour la conception du projet de tunnel et des grands soutènements, il avait été admis que les écoulements d'eau dans le versant se produisent à la base des éboulis (bocaille) et dans la roche très diaclasée sur plusieurs mètres d'épaisseur. Les informations résultaient :

- de la cartographie des sources, résurgentes au contact rocher-éboulis sur le versant à quelques mètres au dessus de la RN6,
- des données relatives au tunnel SNCF,
- des relevés acquis dans le puits et à la galerie de reconnaissances réalisées en 1994 - 1995 pour valider les méthodes de construction du tunnel.

Depuis la surface, de nombreuses investigations géotechniques et géophysiques ont permis de cartographier le toit rocheux, de préciser le comportement des éboulis et de mesurer les niveaux piézométriques. Ces données complétant les observations mentionnées plus haut, ont permis de localiser au mieux le substratum rocheux parallèlement au versant à environ 25 m de profondeur ainsi que d'importantes circulations d'eau liées au substrat rocheux fracturé et à la base des éboulis.

Toutefois, à l'amont du versant, seules les données géophysiques étaient disponibles, l'accès étant impossible aux équipements de forages sans d'importants travaux d'aménagement préalables. Selon ce schéma géologique, le franchissement de l'éperon nécessitait quelques travaux spécifiques :

- Percement d'un tunnel au rocher de 395 m de longueur (y compris les têtes réalisées à ciel ouvert) nécessitant une excavation de 15 m de largeur entre piédroits et 9,5 m de hauteur en voûte. Ce tunnel étanché en extradors par une membrane en PVC, est équipé de quatre rameaux de drainage de 12 m de longueur, creusés perpendiculairement au tunnel, coté montagne, pour la mise en place en fin de travaux d'auréoles de drains forés captant les circulations d'eau à l'interface rocher / éboulis.
- Réalisation de terrassements dont l'extension, limitée au Sud, permettait de ne pas modifier l'environnement du tunnel ferroviaire (terrassements par tranches en descendant, conformément au phasage de construction des soutènements).
- Mise en œuvre des soutènements étagés entre les cotes 812 et 880 mNG avec des ancrages de longueur courante (clous scellés de 12 à 15 m et tirants précontraints n'excédant pas 45 m) et des drains forés subhorizontaux de 15 à 30 m de profondeur.

L'excavation du tunnel par demi sections était prévue après l'injection en voûte d'une auréole de 5 m d'épaisseur (consolidation et étanchement des terrains) puis le drainage par drains forés ascendants sur 5 m au-delà de l'auréole d'injection. Le soutènement immédiat adopté était constitué de boulons et de béton projeté dans le rocher, de cintres et béton projeté, sous couverture rocheuse insuffisante. Les déblais ont été réalisés à l'explosif selon des plans de tirs séquentiels afin de respecter les seuils vibratoires imposés par le SNCF :

Fréquence Mz	Vitesse particulaire mm/s
0 - 30	10
30 - 150	20

3. DONNÉES NOUVELLES ACQUISES LORS DES CONTRÔLES PENDANT LES TRAVAUX

Les forages pour l'injection et de drainage ont permis de définir plus précisément la topographie du toit rocheux. Sur 225 m, l'excavation de la demi section supérieure a concerné les éboulis (présence d'un sillon d'érosion glaciaire, peu profond que les

investigations de surface n'ont pu reconnaître). La Figure 12 précise la position de cette singularité géologique :

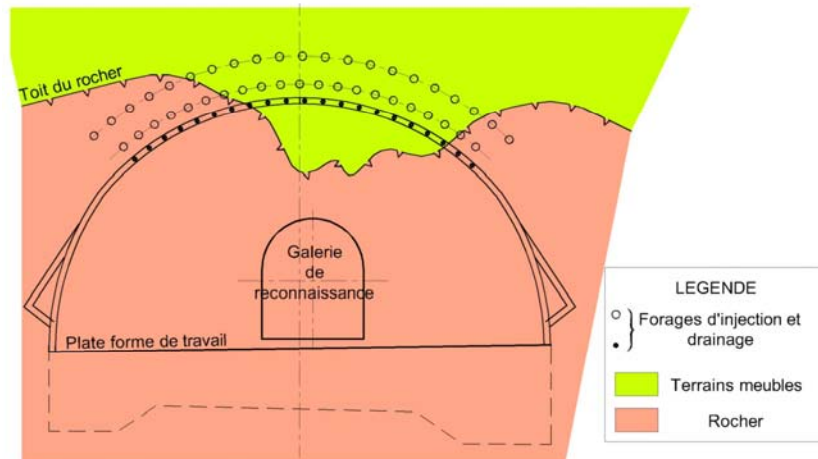


Figure 12 - Zone de pénétration des terrains meubles dans la section excavée.

Certains drains ont recoupé des circulations d'eau intenses dans la masse des éboulis dont la base est apparue souvent argileuse. Au cours des injections, des déplacements et fissures dans le sol, (constatés au moyen de mesures topographiques et contrôle visuel en surface), ont permis de délimiter une vaste zone instable d'extension 160 m dans l'axe du projet et 120 m selon la pente du versant. Le dispositif de suivi comprenant des inclinomètres et des piézomètres a permis de constater les aléas suivants (cf. Figure 13) :

- l'épaisseur des éboulis instables atteint 30 m de telle sorte qu'un éboulement d'ensemble pourrait provoquer des désordres majeurs sur les ouvrages existants :
 - la RN6 en circulation (volume de la masse instable 150 000 à 240 000 m³),
 - le puits d'accès au chantier d'injection (risque de cisaillement entre 20 et 25 m de profondeur),
 - le tunnel en cours d'excavation (base du glissement quasi tangente à la voûte),
- le glissement s'accélère lors des phases d'injection et ralentit lors des phases de drainage, post injection (déplacement cumulé de 25 à 30 cm),
- les sources, à l'aval du tunnel, se sont tariées et les niveaux piézométriques à l'amont du projet se sont élevés de 8 à 12 m (résurgences temporaires en tête de certains piézomètres).

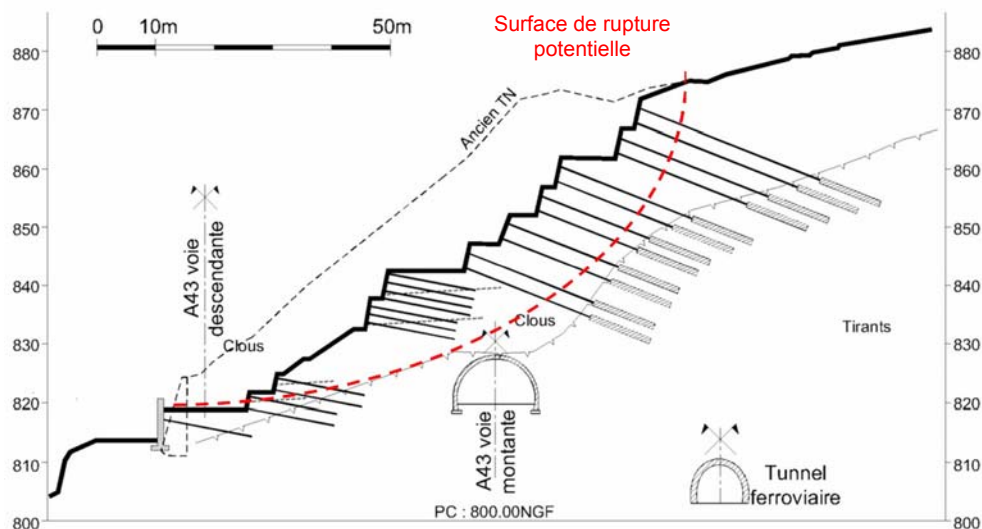


Figure 13 - Déblai des Sorderettes – Modèle projet.

Des investigations complémentaires par sondages carottés ont montré une variabilité très importante du toit rocheux par rapport aux résultats des mesures géophysiques à l'amont du versant (+ 3 / -10 m avec des successions d'arrêtes et de sillons quasi perpendiculaires à l'Arc). Par ailleurs, ces sondages ont mis en évidence la présence de bancs de charbon et mylonite dans le complexe houiller schisto gréseux très diaclasés, et de masses d'éboulis silto graveleux à gros blocs, en contact du rocher, que les mesures géophysiques seules n'avaient pas permis d'identifier.

Le glissement amorcé au dessus du tunnel a permis d'étalonner un calcul précis de stabilité d'ensemble en faisant converger les hypothèses les plus réalistes concernant la stratigraphie des éboulis, la position du toit rocheux, les caractéristiques géomécaniques des éboulis et les écoulements d'eau souterraine par chenaux perméables localisés (captage par drains forés étant aléatoire).

4. ADAPTATION DU PROJET POUR L'EXÉCUTION DES TRAVAUX

Pour poursuivre les travaux souterrains en sécurité dans le cadre géotechnique redéfini alors que les déplacements en surface dépassent 25 cm, en période d'étiage estivale des nappes (Août 1997), les décisions suivantes ont été prises pour stabiliser provisoirement le glissement :

- arrêter définitivement les injections,
- réaliser un drainage complémentaire par drains forés subhorizontaux depuis le pied du glissement (niveau de la RN6) au moyen de forages de 80 m ascendants, débouchant dans le tunnel et depuis la piste d'accès au puits,
- consolider par clouage les soutènements maçonnés et les talus déstabilisés de part et d'autre de l'accès au puits,
- renforcer le soutènement immédiat du tunnel au moyen d'une voûte parapluie en boulons autoforeurs de 8 m de longueur, espacés de 0,50 m (cf. Figure 12).

En ce qui concerne les terrassements et soutènements extérieurs, les deux murs ancrés par tirants précontraints entre les cotes 860 et 880 mNG ont été supprimés et remplacés par un talus incliné en moyenne à 25° sur l'horizontale. Cette décision résulte essentiellement de l'abaissement du toit rocheux par rapport aux données du projet, ce qui conduisait à la mise en œuvre des tirants précontraints de longueur prévisionnelle de plus de 80 m. L'incidence du forage par rapport au toit rocheux de l'ordre de 20 à 30° sur 80 m de longueur impliquait par ailleurs un risque important de déviation à l'attaque de la zone d'ancrage. La stabilisation de ce talus substituée aux murs ancrés a nécessité un assainissement profond, par drains forés, beaucoup plus conséquent qu'en projet initial :

Phase d'étude	Projet	Projet d'exécution	Commentaires
Maille des drains (m)	5 x 20	5 x 10 5 x 5 ⁽¹⁾	(1) si tous les 10 m le débit des drains est fort
Profondeur (m)	10 à 30	20 à 40	Approfondissement en cas d'arrivées d'eau en fond des forages

Les soutènements sous le niveau 860 mNG ont été maintenus, bien qu'ayant nécessité des modifications d'ancrages. Les longueurs des clous ont du être augmentées et la maille a été réduite sur les fronts recoupant les éboulis silteux peu compacts. Une adaptation systématique de la longueur des ancrages actifs en fonction des paramètres de forage a été faite pour s'adapter à la position réelle du toit rocheux, et à la présence de fractures ouvertes, de veines charbonneuses, de mylonite, etc.... La longueur des drains forés est augmentée et la maille est réduite comme pour les talus amont (cf. Figure 14).

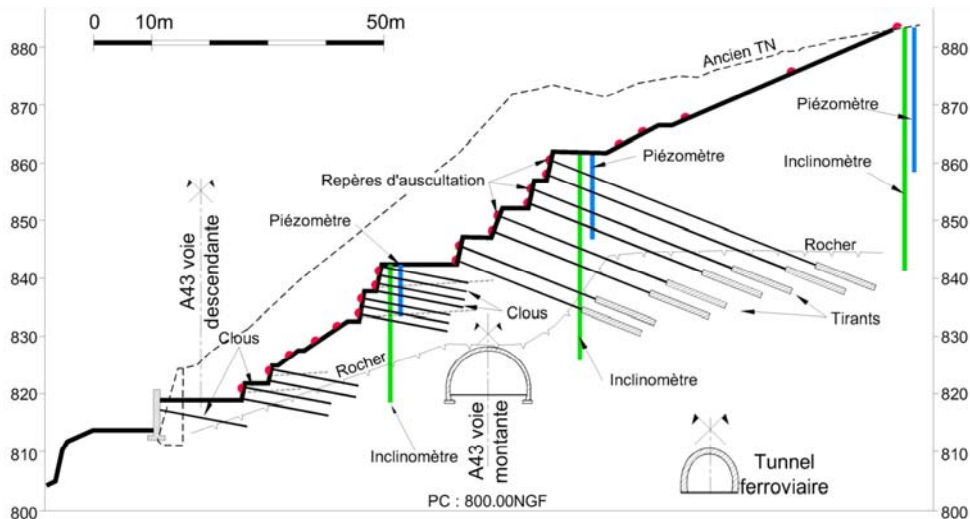


Figure 14 - Déblai des Sorderettes – Adaptation des renforcements en cours d'exécution.

Par souci d'économie, l'épaisseur des murs à ancrages passifs (clous) et à ancrages actifs (tirants précontraints) n'a pas été conçue pour que le terrain d'appui soit mis hors gel. Or la plupart des drains produisent des débits permanents et les éboulis silteux et silto graveleux sont gélifs (classification liée à la constitution granulométrique, confirmée par des tests spécifiques de gel en laboratoire). Afin d'évaluer les risques de colmatage des drains par des bouchons de glace générant des pressions parasites importantes, dues aux remontées de nappe et la formation de ménisques de glace à l'arrière du parement en béton, les ouvrages des Sorderettes ont fait l'objet de contrôles particuliers :

- suivi systématique du débit des drains au cours des hivers 1998 / 1999 et 1999 / 2000,
- détermination de la sensibilité des drains au gel en fonction du débit et de la température de l'eau souterraine, de la température extérieure et de la durée des périodes de gel,
- établissement par le bureau d'étude Hydratec d'un modèle hydrogéologique définissant les débits hivernaux en fonction des conditions météorologiques des 10 mois précédents (alimentation de la nappe) et les remontées potentielles en cas de colmatage des drains par la glace,
- définition des situations de référence et désignation des drains nécessitant une protection particulière (débits inférieurs à 0,03 l/s sur les sites considérés).

Les solutions mettant en œuvre des isolants performants sont apparues peu pratiques, très onéreuses et peu esthétiques. La technique du réchauffement de l'eau dans les exutoires des drains critiques, au moyen de thermistances (pénétration de 5 m dans les drains) a été appliquée, à titre expérimental, sur deux sites à partir de l'hiver 2000 / 2001. L'alimentation électrique des thermistances est activée en fonction de deux paramètres enregistrés :

- la température extérieure ($0 \leq 0^{\circ}\text{C}$),
- la température de l'eau ($0 \leq 2^{\circ}\text{C}$).

Les contrôles exercés par Terrasol en 2001, puis par la SFTRF, n'ont à ce jour détecté aucun indice de dysfonctionnement du procédé, la consommation d'énergie étant très faible.

5. ORGANISATION DES CONTRÔLES APRÈS MISE EN SERVICE DE A43

Une importante instrumentation a été mise en place pour suivre le comportement des murs au cours des différentes phases des travaux. Des déplacements constatés pendant la phase de réalisation des terrassements et des soutènements, ont dépassé 5 cm, voire localement 10 cm sur les murs de soutènements cloués et tirantés. Ces mouvements se sont réduits rapidement en fin de travaux, de telle sorte que la réception des ouvrages a pu être prononcée après stabilisation quasi-complète du site.

Les travaux ont été terminés en mai 2000 sans que subsistent de zones critiques à l'exception d'une bande de 20 à 30 m de largeur ou des mouvements millimétriques vers l'Arc et des tassements sur deux élévations continuaient d'évoluer. Deux problèmes particuliers ont du être traités après mise en service de A43 :

- la protection des drains contre le gel (dispositif expérimental de chauffage mis en place pour l'hiver 2000-2001).
- le contrôle de niveaux piézométriques anormaux sur un des murs de soutènement (piézomètres détériorés par les injections des clous d'ancrage des murs de soutènement ou drains sub-horizontaux peu efficaces).

Les équipements de mesures mis en place pour l'auscultation des ouvrages en phase chantier sont :

- 67 cellules dynamométriques (pesage des tirants),
- 224 cibles topographiques,
- 17 piézomètres,
- 12 inclinomètres,
- 110 drains,
- constat visuel.

Les seuils d'alerte ont été définis comme suit :

Topographie	Planimétrie : ± 20 mm de mouvement cumulé. Altimétrie : 20 mm de mouvement négatif cumulé
Cellules dynamométriques	Variation de ± 10 % par rapport à la tension théorique.
Piézométrie	Toute remontée de nappe supérieure ou égale à la surface piézométrique de calcul (niveau rabattu par drainage, majoré de 4 m).
Débit des drains	Le drainage a pour objectif de stabiliser le niveau de la nappe en condition de crue. C'est donc le débit qui est la variable et qui peut augmenter en périodes de « hautes eaux ». Il n'y a donc pas de seuils fixés. Toutefois, l'assèchement d'un drain qui a toujours généré un débit sera considéré comme indicateur de situation anormale, à examiner en détail, nécessairement.

Le contrôle du site a été maintenu après les travaux. Les dispositifs de contrôle ont été allégés en tenant compte de la stabilisation des paramètres de référence. Les données sont présentées ci-dessous à titre d'exemple, au niveau de la poutre tirantée de l'élévation H et de la piste Forestière (cf. Figure 15).



Figure 15 - Implantation des points de mesures sur le mur de soutènement.

Les mesures topographiques sont représentées sur la Figure 16. Depuis l'opération d'origine de janvier 1999, la poutre a tassé de -11 à -153 mm et s'est déplacée vers l'Arc de -9 à +67 mm. Ces valeurs élevées correspondent à la phase travaux. Ces déplacements sont restés inférieurs aux seuils fixés depuis la mise en service de l'autoroute : tassement de -8 à -12 mm (seuil à -20 mm) et déplacement transversale de -1 à +5 mm (seuil à +/- 20 mm). Pour l'ensemble des points, les écarts moyens sont compris dans la précision des mesures ± 10 mm.

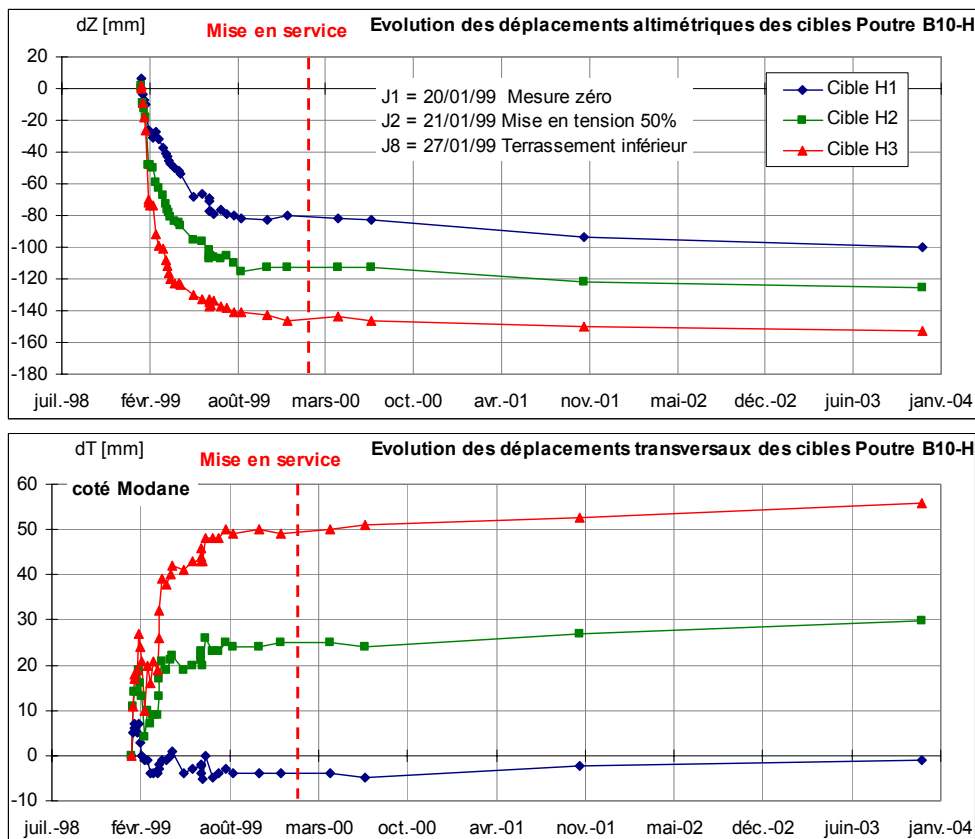


Figure 16 - Mur de soutènement MS 222-5 du secteur des Sorderettes – Mesures topographiques de 3 points sur l'élévation H, depuis la réalisation des travaux, jusqu'au suivi de 2003.

La mise en service des tirants a été réalisée avec une tension théorique de 1274 kN. Les mesures effectuées sur les tirants de contrôle représentées sur la Figure 17, montrent que

les tensions évoluent dans les limites requises avec une légère tendance à diminuer. La cellule B14-2 se distingue par son instabilité depuis la mise en service de l'autoroute alors que les mesures topographiques, y compris en février 2004, ne présentent aucune déformation apparente sur le parement de la poutre H. La prochaine mesure renseignera sur l'évolution de ce tirant (défaut de tension ou détérioration de la cellule dynamométrique). A ce stade, la capacité du tirant n'est pas remise en cause, par contre le remplacement de la cellule devra être envisagée.

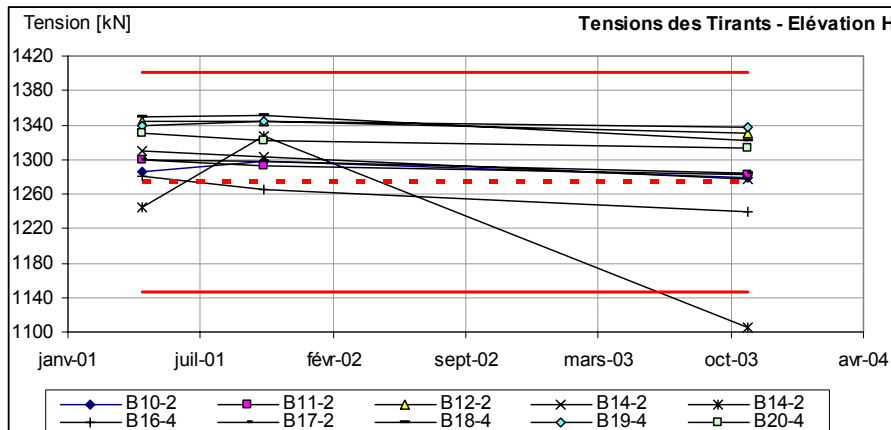


Figure 17 - Mur de soutènement MS 222-5 du secteur des Sorderettes – Mesures de la tension des tirants sur l'élévation H, depuis la mise en service.

Les dernières mesures des drains ont été réalisées en mars 2001 et sont représentées sur la Figure 18. Il est difficile d'interpréter les niveaux piézométriques et de les comparer aux seuils de vigilance définis préalablement, les mesures n'étant pas toujours prises à la même saison. Il est donc difficile de les corréliser car Novembre est en période de hautes eaux et Février est normalement en basses eaux. Le niveau d'eau au droit de la poutre H reste en dessous du niveau mesuré en phase chantier à partir de janvier 2000. Le piézomètre n° 14 montre une nette augmentation en mars 2001, sur une seule valeur alors que les autres piézomètres sont stables. Lors des contrôles topographiques entre 2001 et 2004, aucun déplacement anormal n'a été constaté sur les ouvrages. Cet équipement reste donc à surveiller et le nettoyage des piézomètres a été préconisé. Pour les autres niveaux piézométriques, les seuils d'alerte ne sont pas atteints.

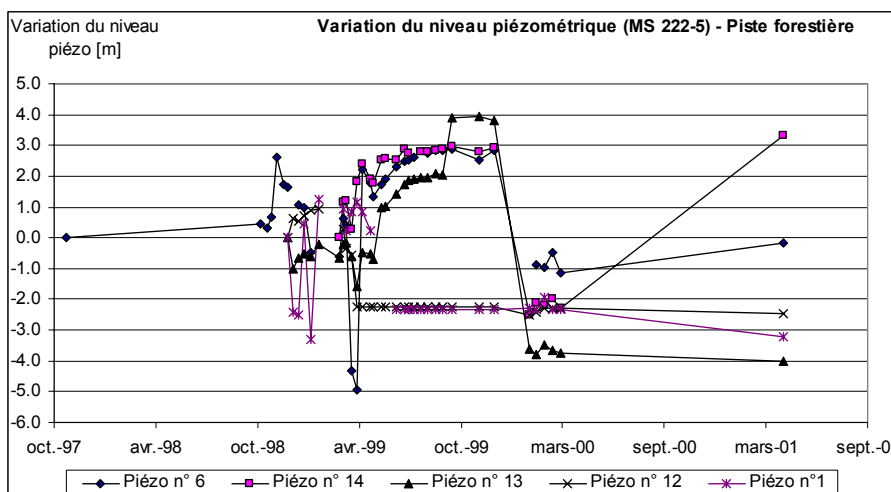


Figure 18 - Mur de soutènement MS 222-5 du secteur des Sorderettes – Mesures de la variation du niveau piézométrique sur l'élévation H.

Les évolutions constatées depuis la mise en service obligent à considérer que l'ouvrage subit encore quelques déplacements. Ces mouvements s'accompagnent de faibles pertes locales de tensions dans les tirants. A la suite des prochaines mesures programmées en 2005, l'analyse détaillée des résultats doit permettre de définir si nécessaire, un programme de maintenance visant à retendre certains tirants, nettoyer les drains et les piézomètres, réaliser des drainages complémentaires.

CONCLUSIONS

L'autoroute de montagne A43 a été conçue pour s'intégrer dans la vallée de l'Arc en Maurienne. Les travaux de réalisation ont exigé des adaptations spécifiques pour chaque ouvrage mises en œuvre selon les conditions géologiques et géotechniques rencontrées. Les ouvrages du secteur du Rieu Sec, fondés sur un terrain compressible de colluvions torrentielles et dépôts lacustres, ont été conçus pour supporter d'importants tassements. L'auscultation de ce secteur a révélé que les déformations dépassaient les seuils requis en service. Les relevages d'une culée et des piles de l'OH90 ont alors été programmés. L'interprétation des mesures a montré que les tassements continuent d'évoluer selon une courbe asymptotique et que les tassements à venir pour les dix prochaines années resteront admissibles. Le suivi des ouvrages reste aujourd'hui d'actualité pour s'assurer de la bonne évolution des déformations.

Le franchissement de l'éperon des Sorderettes a nécessité la réalisation de deux ouvrages particulièrement délicats, le tunnel pour la voie montante de A43 et les grands déblais et soutènements pour la voie descendante. La grande hétérogénéité du site, dont les investigations préalables ne rendaient compte qu'imparfaitement des conditions géotechniques réelles, a conduit à des incidents (déstabilisation du versant en 1997, dégradation du dispositif de drainage). Des adaptations du mode d'exécution des travaux souterrains, des modifications importantes de la répartition du soutènement et des renforcements des ancrages passifs, actifs pour tenir compte des caractéristiques de certains terrains et l'amélioration du système de drainage ont été nécessaires. Ces adaptations, jusqu'à la bonne fin des travaux n'ont été possibles qu'avec la participation décisive des géotechniciens attachés au chantier :

- Terrasol, au sein de la maîtrise d'œuvre,
- Simecsol, pour le compte des entrepreneurs.

Les auscultations nécessaires et la fréquence des mesures ont été définies préalablement à la mise en service de l'autoroute et soumises à l'avis du concessionnaire des autoroutes. L'instrumentation, les modes opératoires, la fréquence de mesures et les seuils d'alertes spécifiques à chaque ouvrage ont permis d'anticiper toute détérioration et d'optimiser le coût de l'entretien des ouvrages, en proposant au concessionnaire, les travaux de renforcement adaptés pour garantir le niveau de sécurité réglementaire.

REFERENCES

1. Marget P., Boeri A., 1998. La traversé en tunnel de l'éperon des Sorderettes. Bulletin Travaux n° 745.
2. Moulin M., 1998. Les fondations des ouvrages d'art. Bulletin Travaux n° 745.
3. Pereira J., 1998. Grands déblais – Soutènements. La traverse des Sorderettes. Bulletin Travaux n° 745.
4. Quivy D., Demorieux J.M.; Boria R., Bremond J., Narcy M., De vivies G., 2000. La traversée de l'éperon des Sorderettes. Un grand chantier de soutènement dans un site difficile. Bulletin Travaux n° 764.
5. Vassiliadis G., Emphoux V., 1998. Face aux risques naturels. Bulletin Travaux n° 745.