



Groupe de travail du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique

RECOMMANDATIONS POUR L'INSTRUMENTATION DES OUVRAGES GÉOTECHNIQUES



VERSION 1.0 - SEPTEMBRE

2025

**Nous remercions Antea Group pour la mise en forme
des illustrations du chapitre 6**

Publication Septembre 2025

Responsable de publication :

CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique)

Tél. : +33 (0)1 41 96 90 80

Fax : +33 (0)1 41 96 91 05

Courriel : cfms.secretariat@geotechnique.org

Site internet : www.cfms-sols.org

Correspondance :

INSAVALOR/CFMS

66 boulevard Niels Bohr - CS52132

69603 VILLEURBANNE Cedex

Siège social :

Ecole des Ponts ParisTech

6 - 8 avenue Blaise Pascal

Cité Descartes

Champs sur Marne

77455 Marne-La-Vallée Cedex 2

Copyright :

© CFMS, Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique. En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans l'autorisation de l'Editeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie, 20 rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

Le Comité français de mécanique des sols et de géotechnique, ses membres, ses administrateurs ou ses représentants déclinent toute responsabilité découlant d'omissions ou d'erreurs dans les documents qu'il émet et ne peuvent être tenus responsables de quelconque dommage lié à l'utilisation des informations contenues dans ces documents, en ce compris les informations fournies par des tiers, ou à l'impossibilité d'accès au site web ou à son contenu et ses documents, sauf en cas de faute grave ou délibérée de leur part.

La responsabilité du CFMS ne saurait davantage être engagée vis-à-vis des tiers, notamment dans le cas où les œuvres agréées par le Conseil après avis de la Commission Scientifique et Technique, donneraient lieu à des poursuites judiciaires sur le fondement de la loi du 11 Mars 1957 et de tous les autres textes protégeant les œuvres de l'esprit.

Conception graphique / mise en page :

Valérie SCOTTO DI CESARE - Studio Graphique VSDCom

GROUPE DE TRAVAIL

Le présent guide a été rédigé dans le cadre d'un groupe de travail du Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS), dont la coordination fut assurée par D. ALLAGNAT et C. CHEVALIER.

Le CFMS remercie les personnes qui ont activement participé au groupe de rédaction de ce document :

Prénom / Nom	Société	
Dominique ALLAGNAT	Anciennement EGIS	Coordination et pilote chapitres 1 et 2
Martin BETH	Sixense Monitoring	
Joséphine BOISSON	SNCF Réseau	
Delphine BOUTHEON	ERG géotechnique	
Laurent BRIANCON	INSA Lyon	Pilote chapitre 3
Christophe CHEVALIER	Université Gustave Eiffel	Coordination et pilote chapitre 5
Jean de SAUVAGE	Université Gustave Eiffel	
Didier DUPUIS	Dynaopt	
Olivier GAY	EGIS	
Arnaud LAFOURCADE	GEOTEC	Co-pilote chapitre 6
Charles Edouard NADIM	Antea Group	Co-pilote chapitre 6
Jérôme SAUSSE	EDF	
Fabien SZYMKIEWICZ	Université Gustave Eiffel	Pilote chapitre 4
Vincent TALFUMIERE	SNCF Réseau	
Eric VERMOOTE	KOMEA	
Zohra ZERFA	Arcadis	

Le CFMS remercie également les personnes qui ont accepté de relire ce document et ont apporté leur expertise :

Prénom / Nom	Société
Dominique BLANC	NGE Fondations
Sylvie BRETELLE	Antea Group
Maxime FONTY	Soletanche Bachy
Sabrina PERLO	Cerema

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION ET LIMITES DES RECOMMANDATIONS	9
1.1	Contexte	10
1.2	Les limites des recommandations	11
1.3	Contextes géotechniques et objectifs généraux de l'instrumentation	12
1.4	Contenu du guide	12
2	RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES PROJET D'INSTRUMENTATION	15
2.1	Préambule	16
2.2	Les problématiques géotechniques les plus courantes	17
2.2.1	Grands ouvrages en terre en remblai	17
2.2.2	Talus de déblais profonds	19
2.2.3	Améliorations et renforcement de sols	20
2.2.4	Écrans de soutènement	21
2.2.5	Pentes naturelles et falaises	22
2.2.6	Ouvrages souterrains	23
2.2.7	Fondations superficielles	25
2.2.8	Fondations profondes	26
2.2.9	Ouvrages existants	27
2.3	Processus d'élaboration du projet d'instrumentation	27
2.4	Contraintes particulières pour le projet d'instrumentation	28
2.4.1	Facteur temps	29
2.4.2	Incertitudes	29
2.4.3	Redondance du système	29
2.4.4	Mesures des contraintes à l'interface sol/structure	29
2.4.5	Mesures des pressions interstitielles	30
2.4.6	Influence de l'environnement sur l'ouvrage géotechnique	30
2.4.7	Arbre de décisions et responsabilités associées	30
2.5	Recommandations pour la maintenance prédictive et curative	30
2.5.1	Considérations générales	30
2.5.2	Maintenance prédictive	31
2.5.3	Maintenance curative	32
2.6	Documentation relative au projet d'instrumentation	32
2.6.1	Documentation pour la conception initiale	32
2.6.2	Documentation pour la conception détaillée	32
2.6.3	Documentation pour l'exécution	33
2.7	Synthèse	33

3	GÉNÉRALITÉS SUR L'INSTRUMENTATION ET LES MESURES	35
3.1	Normalisation	36
3.2	Principaux paramètres mesurés	36
3.2.1	Paramètres géométriques	36
3.2.1.1	Déplacement	36
3.2.1.2	Déformation	36
3.2.1.3	Inclinaison	37
3.2.2	Paramètres mécaniques	37
3.2.2.1	Force	37
3.2.2.2	Contrainte	37
3.2.3	Paramètres hydrauliques	37
3.2.3.1	Niveau piézométrique	37
3.2.3.2	Pression interstitielle	38
3.2.4	Paramètres environnementaux	38
3.2.4.1	Température	38
3.2.4.2	Vibration	38
3.2.4.3	Autres paramètres	39
3.3	Les capteurs	39
3.3.1	Technologie de mesure	39
3.3.1.1	Jauges de déformation	39
3.3.1.2	Capteurs électro-magnétiques	39
3.3.1.3	Capteurs potentiométriques	39
3.3.1.4	Capteurs piézorésistifs	40
3.3.1.5	MEMS	40
3.3.1.6	Corde vibrante	40
3.3.1.7	Fibre optique	41
3.3.2	Capteurs avec ou sans corps d'épreuve	42
3.3.3	Signal de sortie	42
3.3.4	Transformation en mesures physiques	43
3.4	La mesure physique	43
3.4.1	Caractéristiques métrologiques	43
3.4.2	Erreur et correction	45
3.4.3	Incertitude de mesures	45
4	CHOIX DES CAPTEURS ET MESURES INTÉGRANTES	47
4.1	Grandeurs mesurées	48
4.2	Choix de technologie d'instrumentation possible	48
4.3	Ampleur spatiale et temporelle de l'instrumentation	48
4.3.1	Densité spatiale	48
4.3.2	Densité temporelle	49

4.4	Contexte de mise en œuvre et d'exploitation de l'instrumentation	49
4.4.1	Intrusivité	49
4.4.2	Impact des conditions environnementales	49
4.5	Facilité d'usage, de traitement et d'interprétation	49
4.6	Aide au choix des solutions	50
5	GESTION DES MESURES, ANALYSE ET INTERPRETATION	53
5.1	Principes d'acquisition et de gestion des mesures	54
5.1.1	Acquisition des mesures	54
5.1.1.1	Mode d'acquisition	54
5.1.1.2	Fréquence d'acquisition	55
5.1.1.4	Types et interrogation des capteurs installés	55
5.1.1.5	Besoins de l'utilisateur	55
5.1.2	Gestion des mesures	56
5.1.2.1	Maintenance et entretien	56
5.1.2.2	Prétraitement et validation de la mesure	57
5.1.2.3	Mise en forme des données	57
5.2	Méthodes d'analyse	57
5.2.1	Analyses statistiques / probabilistes	57
5.2.1.1	Analyses physico-statistiques utilisées pour les digues et barrages	57
5.2.1.2	Autres analyses statistiques et utilisation de l'intelligence artificielle	58
5.2.2	Analyse inverse	60
5.2.3	Vitesse inverse	61
5.2.4	Méthodes observationnelles / analyse en continu et adaptation	63
5.2.5	Intelligence artificielle: Machine learning / apprentissage automatisé	63
5.2.6	Gestion alarmes / seuils, mesures	65
5.3	Interprétation	66
6	RECOMMANDATIONS PAR TYPE D'OUVRAGE	69
6.1	Principes généraux	70
6.2	Remblais	70
6.3	Barrages en remblai	75
6.4	Déblais pleine masse (déblais seuls)	78
6.5	Rabattements de nappe	79
6.6	Compactage (remblaiement et amélioration de sols)	81
6.7	Écrans de soutènement de déblais	82
6.8	Fondations et murs de soutènement de remblais	84
6.9	Talus naturels (sols meubles / sols rocheux)	84
6.10	Digues en sol meuble	87
6.11	Tunnels	90
6.12	Mines et carrières	95

6.13	Fondations profondes	98
6.14	Ouvrages existants / Impact sur les mitoyens	99
6.15	Ouvrages portuaires	100
7	BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES UTILES	101
8	ANNEXES	105
8.1	Acronymes	106
8.2	Fiches synthétiques d'exemples	107
8.2.1	Préchargement d'un remblai en zone compressible – Bordeaux	107
8.2.2	Instrumentation d'un grand déblai – Application de la méthode observationnelle – Autoroute A40-A404 (APRR)	109
8.2.3	Déblai ferroviaire instable – LGV Méditerranée	111
8.2.4	Murs cloués – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Charmaix	114
8.2.5	Instrumentation d'une falaise instable - RD912 Hendaye	116
8.2.6	Stabilité d'un site historique - Suivi de la Pointe du Hoc	118
8.2.7	Digue en remblais – Suivi du comportement après travaux de réfection par mesures réparties (fibre optique) – Canal de Curbans	120
8.2.8	Tunnel – Suivi des données d'auscultation – Tunnel de Chamoise	122
8.2.9	Fondations – Suivi des données d'auscultation – installation ICEDA à Bugey	124
8.2.10	Fondations – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Monestier	126
8.2.11	Remblais, fondations et structure – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Bardonnex	128
8.2.12	Déblai ferroviaire – Suivi des données d'auscultation – LGV EST	130
8.2.13	Puits de lancement de tunnelier – Puits Glarner, RATP L14 – Instrumentation de la paroi moulée et suivi du rabattement	133



1 INTRODUCTION ET LIMITES DES RECOMMANDATIONS

1.1 CONTEXTE

1.2 LES LIMITES DES RECOMMANDATIONS

1.3 CONTEXTES GEOTECHNIQUES ET OBJECTIFS GENERAUX
DE L'INSTRUMENTATION

1.4 CONTENU DU GUIDE

1 INTRODUCTION ET LIMITES DES RECOMMANDATIONS

1.1 CONTEXTE

A l'image du corps humain suivi par les sciences médicales, les ouvrages de génie civil et en particulier les ouvrages géotechniques en forte interaction avec le sol, nécessitent souvent que l'on ait la capacité d'écouter leur « respiration » pour bien appréhender leur comportement.

Les méthodes disponibles pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques se rapprochent en effet assez souvent des techniques médicales.

L'auscultation, ou l'instrumentation, des ouvrages de génie civil (terme proposé par André Coyne il y a près d'un siècle - Stockholm, 1933), par analogie avec les techniques médicales directes inventées par Laennec (1781-1826) a généralement trois buts principaux :

- piloter les travaux de construction, assurer leur sécurité, et ajuster si nécessaire les dispositions constructives ;
- s'assurer de la sécurité des ouvrages en service et de leur environnement ;
- vérifier le comportement d'un ouvrage et de son environnement pour améliorer la conception des ouvrages similaires futurs.

Les barrages furent probablement les premiers ouvrages de génie civil à faire l'objet d'une instrumentation importante. Dès le premier congrès des Grands Barrages (Stockholm – 1933), André Coyne présentait déjà des résultats expérimentaux intéressants concernant l'utilisation de témoins sonores.

Les travaux souterrains ont également utilisé très tôt l'instrumentation, en particulier avec l'application de la méthode convergence-confinement qui consiste à ajuster, sur la base d'une auscultation systématique, le confinement apporté par le soutènement en fonction des déformations mesurées des terrains.

De même, la construction des remblais sur sols mous a largement fait appel à l'instrumentation pour garantir la sécurité par rapport à la stabilité générale et pour vérifier les hypothèses de consolidation et de fluage des sols support.

Dès lors, les moyens et les méthodes d'instrumentation se sont largement développées, tant sur les capteurs (technologies, électroniques, miniaturisation, mesures à distance) que sur les systèmes d'acquisition (acquisition automatique, télésurveillance) et de stockages des données ou encore sur les méthodes d'analyse (algorithmes informatiques, big data, intelligence artificielle...).

Ce développement a permis d'étendre l'instrumentation aux projets plus courants.

Au même titre que des investigations géotechniques de qualité, l'instrumentation contribue à une meilleure prise en compte du développement durable dans la construction et la gestion des ouvrages géotechniques. En effet, elle permet très souvent une meilleure maîtrise des risques et une optimisation conduisant au « meilleur ouvrage possible » en termes de qualité, durabilité, délais et coût de construction. Elle participe également à la capitalisation de REX et l'optimisation pour les ouvrages futurs du même type, au prolongement de la durée de vie des ouvrages et à une meilleure intégration des effets du changement climatique.

C'est au sein de la CST (Commission Scientifique et Technique) du CFMS (Comité Français de Mécanique des Sols et géotechnique) que s'est exprimé le besoin de recommandations pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques.

A l'exception des tunnels et des barrages, il a été fait le constat d'un défaut de recommandations ou de guides pour réussir un projet d'instrumentation. Par ailleurs, lorsqu'une instrumentation a finalement été mise en place, il a été noté une certaine déception des Maîtres d'Ouvrage ou Maîtres d'Œuvre sur les résultats et les bénéfices apportés par l'instrumentation, notamment sur la fiabilité dans le temps, la pertinence des solutions technologiques, la robustesse ou bien le manque d'analyse ou d'interprétation des mesures disponibles, mesures qui sont pourtant très souvent réalisées aujourd'hui en très grand nombre.

Ces recommandations s'adressent donc :

- aux Maîtres d'Ouvrage pour les guider dans la prise en compte de l'instrumentation dans les projets d'ouvrages géotechniques, tant du point de vue budgétaire que sur les aspects organisationnels (planning, responsabilités, décisions en fonction des résultats des mesures...);

- aux Maîtres d'Œuvre pour bien identifier la problématique géotechnique de l'ouvrage et pour concevoir un projet d'instrumentation adapté, ceci pour toutes les phases de la conception et de la réalisation ;
- aux ingénieurs spécialisés en génie civil et géotechnique pour disposer d'éléments synthétiques permettant de concevoir ou exploiter l'instrumentation des ouvrages géotechniques ;
- aux entreprises de la construction pour bien appréhender et prendre en compte les objectifs de l'instrumentation qui est "au service" de l'ouvrage (objectif du meilleur ouvrage en termes de sécurité, coût et délai).

Il a alors été décidé à la CST du CFMS qu'il appartenait à la communauté géotechnique de s'emparer du sujet et d'établir des recommandations générales permettant d'élaborer un projet d'instrumentation pertinent et répondant parfaitement à la problématique de l'ouvrage à construire.

Pour atteindre un objectif de consensus et un partage suffisamment large des expériences, le groupe de travail, qui s'est ainsi constitué, représente tous les acteurs de la construction ou de la maintenance d'ouvrages géotechniques : Maîtres d'Ouvrage, Maîtres d'Œuvre, Recherche Universitaire, Bureaux d'Études spécialisés en ingénierie géotechnique, Bureaux de Contrôle, Entreprises spécialisées en instrumentation, Entreprises de construction...

1.2 LES LIMITES DES RECOMMANDATIONS

Il est établi que l'instrumentation d'un ouvrage géotechnique doit avant tout être « au service » de l'ingénierie spécialisée (en phase étude comme en phase travaux) et des constructeurs, tout en impliquant le Maître d'Ouvrage et le Maître d'Œuvre, ceci pour :

- valider le comportement de l'ouvrage et de son environnement prévu lors des études ;
- adapter si nécessaire les ouvrages géotechniques complexes (en appliquant la méthode observationnelle lorsque c'est possible) ;
- piloter la construction en garantissant la sécurité de celle-ci ;

- surveiller le comportement à long terme des ouvrages sensibles ;
- permettre une meilleure compréhension du comportement des ouvrages en général afin d'améliorer les modélisations numériques et les méthodes de calcul.

Pour les aspects « maintenance » en particulier pour le patrimoine ancien, seuls les deux derniers points sont à prendre en compte.

Dès lors, les présentes recommandations sont orientées vers le PROJET d'INSTRUMENTATION d'un ouvrage géotechnique, quel que soit le type d'ouvrage. Il ne s'agit donc pas d'un catalogue exhaustif des capteurs ou des méthodes d'instrumentation actuelles. Lorsque des recommandations ou normes existent déjà, telles que celles de l'AFTES [AFTES 2015] pour l'instrumentation des ouvrages souterrains, le lecteur est invité à s'y reporter le plus largement possible (voir Chapitre 7, partie Bibliographie de référence).

A noter que le présent guide ne traite pas les programmes d'instrumentations spécifiques mis en œuvre dans le cadre des projets de R&D (thèses ou autres projets de R&D).

Enfin, le présent guide est dédié à l'instrumentation des ouvrages géotechniques et ne développe pas l'observation visuelle de l'ouvrage et de son environnement, en travaux comme en service. Pour autant, cette observation, qui doit faire partie intégrante de toute surveillance, soit par un œil d'expert, soit par les personnels en charge au quotidien de la construction ou de l'exploitation, reste primordiale et ne doit pas être occultée lorsqu'il est mis en œuvre une instrumentation par capteurs. Il peut s'agir d'observations visuelles diverses telles que l'ouverture de fissures, des déformations localisées anormales, des venues d'eau, des modifications sensibles de débit etc. Ces observations peuvent s'avérer précieuses en termes d'alerte ou bien pour enrichir l'interprétation des mesures.

1.3 CONTEXTES GÉOTECHNIQUES ET OBJECTIFS GÉNÉRAUX DE L'INSTRUMENTATION

Le projet d'instrumentation doit avant tout s'attacher à contribuer au mieux à la résolution d'une problématique géotechnique, dans diverses situations :

- durant toutes les étapes de la vie d'un ouvrage :
 - > avant travaux : caractérisation du site ou des ouvrages géotechniques préexistants ;
 - > pendant les travaux : pilotage des travaux avec dans certains cas, une instrumentation intégrée dans le processus de la méthode observationnelle [Allagnat 2005] ;
 - > après travaux : validation de la stabilité de l'ouvrage construit ;
 - > suivi à long terme : caractérisation du comportement d'un ouvrage en exploitation pour l'aide à l'analyse de risque et à l'organisation de travaux de maintenance.
- complexité particulière du contexte géotechnique, avec des incertitudes sur le comportement des ouvrages géotechniques, notamment au cours de la construction ;
- meilleure maîtrise d'une technologie de travaux, dans le cas d'une solution innovante par exemple.

Le projet d'instrumentation ne prendra donc tout son sens qu'à partir de la définition correcte de la problématique géotechnique.

Les problématiques géotechniques nécessitant un projet d'instrumentation sont nombreuses et très variées. On peut cependant citer les plus courantes :

- évaluation de la stabilité par rapport aux critères de rupture (stabilité des ouvrages en terre, des fondations, des ouvrages de soutènements, d'une cavité souterraine...) ;
- maîtrise des déformations des sols support ou des ouvrages en interaction (déformations d'un écran de soutènement, tassements absolus et différentiels d'un avoisinant, tassements d'un sol compressible sollicité par un remblai...) ;
- limitation des contraintes dans les sols, dans les structures ou à l'interface sol-structure (contrainte dans une structure de soutènement ou contrainte totale à l'interface entre le sol et l'ouvrage) ;

- évaluation des pressions d'eau et/ou des hauteurs d'eau, ou des pressions interstitielles dans les sols (variation de niveau de nappe, rabattement, évolution des pressions interstitielles lors de la consolidation, ou dans le corps d'une digue ou d'un barrage en terre...) ;
- suivi des efforts dans les renforcements de sols (clous, tirants, micropieux...) ;
- comportement des ouvrages géotechniques sous sollicitations dynamiques (séisme, vibrations imposées par les travaux...) ;
- évaluation de l'impact des conditions d'environnement (météo, température, vibrations...).

Chaque problématique présente ses singularités et le projet d'instrumentation doit être adapté en conséquence. Ainsi, il n'existe pas de solution unique ou triviale. C'est pourquoi ces recommandations constituent seulement une aide à l'ingénieur spécialisé en géotechnique ou en génie civil pour élaborer un projet qui répondra au mieux au contexte de l'ouvrage concerné. Il s'agit d'optimiser les bénéfices de l'instrumentation pour construire le meilleur ouvrage en termes de maîtrise des risques, d'économie et de délais.

1.4 CONTENU DU GUIDE

Les présentes recommandations sont organisées en 8 chapitres. Le lecteur y trouvera successivement :

1 - Introduction et limites des recommandations

Ce chapitre présente la genèse de ces recommandations, le contexte général dans lequel elles s'inscrivent ainsi que les limites d'utilisation.

2 - Recommandations générales pour le projet d'instrumentation

Il s'agit ici de préciser le contenu du projet d'instrumentation d'un ouvrage géotechnique en s'assurant que ce projet réponde le plus parfaitement possible à la problématique en jeu pour l'ouvrage géotechnique concerné.

3 - Généralités sur l'instrumentation et les mesures

Ce chapitre rappelle les notions importantes de métrologie avec des définitions précises.

4 - Choix des capteurs et mesures intégrantes

Le lecteur y trouvera les éléments pour le guider dans le choix des capteurs ou des technologies, en fonction du contexte géotechnique, de l'environnement de l'instrumentation, des paramètres à mesurer, des plages de mesures, de la précision sur les mesures etc...

5 - Gestion des mesures, analyse et interprétation

Ce chapitre traite de l'acquisition des mesures d'instrumentation, des traitements qui sont nécessaires pour qualifier les mesures et en tirer tous les bénéfices, ainsi qu'un aperçu des différentes méthodes d'analyse.

6 - Recommandations par type d'ouvrage

Il s'agit de proposer des conseils, basés sur les retours d'expériences, selon le type d'ouvrage à instrumenter : impact sur les mitoyens, remblais, rabattement de nappe, déblais, écrans de soutènement, fondations, pentes naturelles, digues et barrages, ouvrages souterrains, plateformes avec risques cavités...

7 - Bibliographie et 8 - Annexes

Les derniers chapitres sont constitués d'une bibliographie qui se veut la plus complète possible et d'annexes : Lexique et Fiches synthétiques d'exemples illustrant des instrumentations réelles pour les différents types d'ouvrages. Pour chaque exemple sont précisés notamment, la problématique, des schémas types et un descriptif de l'instrumentation, des exemples de résultats et une synthèse du REX.

On recommande de parcourir les chapitres 1 à 5 en entier car ils permettront l'élaboration d'un projet d'instrumentation adapté au mieux à la problématique posée. Les chapitres 6 à 8 sont quant à eux consultables partiellement, en fonction du type d'ouvrage concerné par le projet du lecteur.



2 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES PROJET D'INSTRUMENTATION

- 2.1 PREAMBULE
- 2.2 LES PROBLÉMATIQUES GEOTECHNIQUES LES PLUS COURANTES
- 2.3 PROCESSUS D'ÉLABORATION DU PROJET D'INSTRUMENTATION
- 2.4 CONTRAINTES PARTICULIÈRES POUR LE PROJET D'INSTRUMENTATION
- 2.5 RECOMMANDATIONS POUR LA MAINTENANCE PREDICTIVE ET CURATIVE
- 2.6 DOCUMENTATION RELATIVE AU PROJET D'INSTRUMENTATION
- 2.7 SYNTHÈSE

2 RECOMMANDATIONS GÉNÉRALES – PROJET D'INSTRUMENTATION

2.1 PRÉAMBULE

Il s'agit d'élaborer le meilleur projet d'instrumentation pour un ouvrage géotechnique donné, en se posant les questions préliminaires essentielles suivantes :

- Quelles sont les problématiques géotechniques attendues, les incertitudes ? Quels sont les points sensibles du projet, les risques ?
- Pour chacune des problématiques identifiées, quels sont les objectifs précis de l'instrumentation ? Quels sont les paramètres essentiels à suivre ? Les plages de variation, les seuils ?
- Quelle est l'organisation à mettre en œuvre ? Depuis la conception, l'installation, la réalisation des mesures, la qualification des mesures, l'interprétation des mesures en termes de comportement de l'ouvrage instrumenté, jusqu'à la définition de l'arbre de décision (responsabilité et réaction en fonction des résultats de mesure) ;
- Quelles sont les contraintes à prendre en considération pour assurer la maintenance prédictive et curative, notamment pour le long terme ?
- Quelles sont les précautions spécifiques à prendre par rapport au REX de l'instrumentation d'ouvrages situés dans un contexte similaire, quels sont les points de vigilance à souligner ?
- Quels sont les documents à produire a minima, pour l'établissement du projet d'instrumentation en fonction des différentes phases d'élaboration du projet (AVP, PRO, EXE...récolement) ?

Les réponses à ces questions sont essentielles pour établir le projet d'instrumentation et garantir sa réussite. Ce projet d'instrumentation doit faire partie intégrante du projet global de l'ouvrage géotechnique et ce dès les premières phases d'étude.

A noter que l'instrumentation permet en général d'acquérir de très nombreuses données, qui seules, resteront quantitatives. Il est toujours nécessaire de les rapporter à un référentiel (ou état de référence) afin d'apprécier qualitativement les résultats et permettre leur analyse et leur interprétation. Ce référentiel est temporel ou spatial, par exemple :

- mesure de référence avant travaux ;

- point de référence pris en dehors de la zone d'influence de l'ouvrage ;
- comportement nominal (« respiration ») d'un ouvrage existant...

Dans les présentes recommandations, l'ouvrage géotechnique instrumenté est évoqué au sens large, c'est à dire qu'il intègre également son environnement proche et en particulier les ouvrages existants situés dans sa zone d'influence (Zone d'Influence Géotechnique ou ZIG). C'est pourquoi le projet d'instrumentation intègre également les avoisinants pour lesquels il est nécessaire d'anticiper le suivi.

Par exemple, dans le cadre de travaux pour une fouille urbaine, les déformations d'un écran de soutènement seront appréciées, par rapport à un repère fixe situé à distance des travaux. L'influence des travaux d'excavation sur un ouvrage sensible situé dans la Zone d'Influence Géotechnique (bâti, infrastructure...), ou en profondeur, pourra être observé à partir du suivi de l'instrumentation de celui-ci, sur une durée suffisante précédant les travaux (respiration de l'ouvrage généralement sur une année, idéalement).

Une autre notion générale importante concerne la fréquence des mesurages (Cf. définition au chapitre 3) qui est intimement liée au phénomène géotechnique à suivre. Les phénomènes de fluage et gonflement des argiles ne requièrent évidemment pas les mêmes fréquences que les déplacements générés sur le bâti surmontant le passage d'un tunnelier à faible profondeur.

Pour les structures en interaction avec le sol, l'instrumentation peut s'attacher à suivre le comportement de la structure elle-même (écran de soutènement, soutènement en tunnel, radier, fondation...) ou bien le comportement du sol et son action sur les structures (terrains encaissants pour un tunnel par exemple). Lorsque c'est possible, il est recommandé de concevoir un projet d'instrumentation qui intègre les deux aspects : comportement et action du terrain sur la structure et réaction de la structure. Cette redondance permet en général d'enrichir de manière très significative l'interprétation du comportement de l'ouvrage géotechnique et de son influence sur son environnement.

Le but du présent chapitre est de présenter une démarche méthodologique en vue de faciliter l'organisation et la mise en œuvre d'une instrumentation objective qui permette notamment d'améliorer l'accomplissement des missions géotechniques (au sens de la norme NFP-94500) et les responsabilités dévolues aux Maîtres d'Ouvrage et à leurs partenaires Bureaux d'Études, Maîtres d'Œuvre et Entreprises.

Les détails de mise en œuvre possible des instrumentations sont donnés au chapitre 6.

Ces recommandations sont élaborées pour les ouvrages neufs, pour ce qui concerne leur construction et pour leur suivi à long terme lorsque nécessaire. Elles sont aussi applicables pour les ouvrages existants ayant fait l'objet d'un diagnostic et nécessitant une instrumentation pour compléter celui-ci et/ou pour entreprendre des travaux de réparation ou de confortement, par exemple.

2.2 LES PROBLÉMATIQUES GÉOTECHNIQUES LES PLUS COURANTES

Cette partie du chapitre 2 expose, par type d'ouvrage, les problématiques géotechniques et les risques anticipés les plus courants donnant lieu à un programme d'instrumentation conséquent : écrans de soutènement dans le cadre de la réalisation de fouilles profondes, ouvrages souterrains (tunnels profonds ou peu profonds dans un contexte urbain), grands ouvrages en terre (remblais sur sol compressible, digues, barrages en terre), talus de déblais profonds, pentes naturelles (risques de glissements de terrain ou glissements actifs, falaises), fondations profondes (pieux), fondations superficielles (grands radiers), amélioration et renforcement de sols (traitement préalable, inclusions rigides...), ouvrages existants...

Toutes ces situations doivent tout d'abord faire l'objet d'une bonne maîtrise géotechnique de la part des acteurs (MOE, BE spécialisés, Contrôleurs Techniques, Entreprises...) et ceci quelle que soit la phase d'études ou de réalisation. La problématique géotechnique concernant l'ouvrage est en quelque sorte la première question importante à se poser.

Ce sous-chapitre ne détaille pas l'instrumentation recommandée par type d'ouvrage (Cf. chapitre 6), mais il pointe quelques singularités, issues du REX, invitant le concepteur à une réflexion technique

approfondie, préalablement à l'élaboration du projet d'instrumentation.

2.2.1 GRANDS OUVRAGES EN TERRE EN REMBLAI

Dans cette section, le REX important relatif aux remblais sur sols compressibles constitue un exemple représentatif pour ce type d'ouvrage géotechnique. Les problématiques abordées sont généralement :

- la stabilité du remblai (stabilité externe ou générale) ;
- les tassements de consolidation/fluage des sols compressibles supportant le remblai.

La garantie de la stabilité lors de la construction d'un **remblai sur sol compressible** (sols fins) nécessite de suivre les déformations du sol support (tassements et déformations latérales) mais aussi et surtout l'évolution des pressions interstitielles dans les sols de fondation lors des différentes phases de construction du remblai. A ce sujet, on souligne les difficultés techniques de mise en œuvre des instruments de mesure des pressions interstitielles qui imposent un soin particulier lors de la mise en place (saturation préalable des cellules de mesure).

Pour ce qui concerne le suivi des tassements, il convient de connaître l'ordre de grandeur de l'amplitude des tassements attendus qui peut être très variable (gamme de mesure des instruments), mais aussi la vitesse et la durée d'obtention de ces tassements. En effet, dans le cas de sols susceptibles de fluage, le dispositif de suivi doit être suffisamment précis et robuste pour rester efficace sur des durées qui vont bien au-delà de la durée des travaux de construction.

Pour le cas spécifique des **digues et barrages en terre**, une problématique supplémentaire concerne le comportement interne de l'ouvrage lui-même en termes de déformations et d'écoulements hydrauliques. En conséquence, le projet d'instrumentation devra prévoir l'intégration de dispositifs au sein de l'ouvrage en terre, au fur et à mesure de sa construction, sans toutefois affecter ses caractéristiques physiques (risque d'érosion localisée au droit des tranchées réalisées pour l'installation). Dès lors, le projet d'instrumentation contribue à la maîtrise des risques inhérents au comportement hydraulique interne.



Figure 2.1 - Remblai de préchargement – Bordeaux (crédit photographique : GEOTEC).



Figure 2.2 - Remblai sur sol compressible – Instrumentation pour suivi de la consolidation et du fluage (crédit photographique : EGIS).

2.2.2 TALUS DE DÉBLAIS PROFONDS

Il s'agit là de talus générés par des terrassements réalisés selon une pente assurant la stabilité, sans dispositif lourd de confortement.

La problématique géotechnique principale est centrée sur les risques d'instabilité du talus ainsi créé (risque de rupture superficielle ou plus profonde et plus ou moins régressive vers l'amont). Dans cette situation, le projet d'instrumentation consiste généralement à suivre de près les déformations du talus lui-même et en amont de celui-ci, ainsi que l'évolution de la piézométrie et des pressions interstitielles (rabattement de nappe par exemple).

A noter que les déformations générées par la réalisation du déblai dans les sols meubles sont relativement lentes, tandis que dans les sols raides ou le rocher, les déformations sont plus faibles mais d'une vitesse sensiblement plus grande, imposant la mise en œuvre d'un dispositif d'instrumentation adapté (précis, continu et quasi-« temps réel »).



Figure 2.3 - Déblai LGV Rhin-Rhône Instrumentation par inclinométrie, piézométrie et CPI
(crédit photographique : SNCF RESEAU).

2.2.3 AMÉLIORATIONS ET RENFORCEMENT DE SOLS

Pour cette section, nous regroupons sous le terme « amélioration de sols », toutes les techniques qui consistent à augmenter globalement les caractéristiques mécaniques des sols de fondation comme : le compactage dynamique, les injections solides, les injections, un réseau de colonnes en Jet Grouting, ou en sol traité, les colonnes ballastées etc...

Pour ce type d'ouvrage, la conception considère généralement un sol de fondation homogénéisé avec des caractéristiques mécaniques augmentées. Il s'agit le plus souvent d'une amélioration destinée à augmenter la portance et/ou à limiter les tassements sous des fondations de grande étendue comme les grands radiers, les dallages industriels ou les grands remblais. Les problématiques géotechniques visées par le projet d'instrumentation sont donc en partie similaires à celles évoquées dans la section précédente. Il s'agit en effet de suivre les tassements absolus et différentiels, voire les pressions interstitielles dans les sols fins. En outre, il convient de surveiller les effets indirects des opérations d'amélioration : soulèvements et déplacements latéraux, principalement.

Ces recommandations ne traitent pas des mesures géotechniques réalisées en cours de travaux et consistant à évaluer l'amélioration des sols par rapport à l'état initial. Ces mesures et essais font partie des contrôles indispensables et définis dans les procédures d'exécution du procédé mis en œuvre par l'Entreprise.



Figure 2.4 - Injection de sol - déblai km 87 – LGV Nord Europe – Travaux à la suite de fontis (2020)
(crédit photographique : SNCF RESEAU).



Figure 2.5 – Renforcement de sol par CMC – Remblai ferroviaire – Instrumentation pour suivi des tassements en construction et en service (crédit photographique : EGIS)

2.2.4 ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT

Pour les écrans de soutènement les problématiques les plus courantes sont liées à la maîtrise des déformations des structures assurant la fonction de soutènement mais aussi des terrains situés dans la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG). D'autre part, dans le cas de structures peu déformables (comme des parois moulées épaisses ou les écrans ancrés) il est nécessaire de suivre les efforts appliqués aux structures et les contraintes dans celles-ci (structure constituant l'écran mais aussi les structures assurant sa stabilité comme les butons, les tirants actifs ou passifs).

A noter que dans le cas d'écrans de soutènement de grande hauteur (fouilles urbaines profondes gares souterraines de métro), les structures sont souvent très rigides et l'accès à une mesure précise des déformations peut s'avérer délicat. Dans ce type de situation on a souvent intérêt à mener une étude très détaillée des technologies permettant la mesure des déformations de faible amplitude et d'envisager de coupler les mesures des déformations à des mesures de contraintes/efforts dans les structures de soutènement.

Du point de vue temporel, ces ouvrages doivent faire l'objet d'une instrumentation mise en place au plus tôt (avant les travaux pour les ouvrages situés dans la ZIG) et pendant toute la durée de la construction. En général, il n'y a pas d'évolution sur le long terme et il est assez rare qu'il soit nécessaire de poursuivre les mesures après la mise en service de l'ouvrage. Toutefois, dans certains cas particuliers comme le suivi de sollicitations générées potentiellement par le gonflement des sols sous un radier, ou bien pour un écran ancré par des tirants précontraints permanents, un suivi à long terme peut s'avérer nécessaire.

Dans le cas des écrans de soutènement, pour des problématiques de stabilité de fond de fouille, il est souvent nécessaire de suivre l'évolution des pressions interstitielles et des débits d'exhaure (risque de renard, insuffisance de butée...) ainsi que des vitesses d'écoulement s'il y a un risque d'érosion.



Figure 2.6 - Monitoring fouille urbaine, paroi moulée butonnée
(crédit photographique : SIXENSE)



Figure 2.7 – Puits instrumenté à Aulnay-sous-Bois
avec rétro analyse (crédit photographique : EGIS)

2.2.5 PENTES NATURELLES ET FALAISES

Pour **les pentes naturelles**, la problématique géotechnique essentielle concerne l'évolution des déformations dans le temps et dans l'espace (profondeur, extension), laquelle évolution peut conduire jusqu'à la rupture. Le projet d'instrumentation peut concerner une surveillance géotechnique préalablement à la construction d'un ouvrage ou bien la surveillance continue d'une pente naturelle potentiellement instable, par rapport aux risques d'impact sur l'environnement proche (infrastructure existante, bâti...).

A noter que certaines situations nécessitent la mise en œuvre de dispositifs d'une grande résolution pour bien appréhender les évolutions dans le temps tout en disposant d'une grande amplitude, les mouvements pouvant être importants, notamment dans les phases d'accélération d'un mouvement de versant, par exemple.

Dans la plupart des cas, la surveillance des niveaux d'eau et des pressions interstitielles est essentielle.

Une difficulté souvent rencontrée est la recherche de « points fixes de référence » soit latéralement, soit en profondeur.

Un dernier point d'attention concerne l'évaluation de la vitesse d'évolution par rapport à une instabilité potentielle et ses conséquences, nécessitant parfois la mise en œuvre de dispositifs « temps réel » avec gestion automatique d'alarmes.

Enfin, dans le cas du renforcement d'un glissement de terrain par des pieux ou barrettes de forte inertie, il est nécessaire de suivre les déformations propres aux renforcements structuraux et les comparer à leurs déformations limites acceptables.

Pour **les falaises**, la problématique géotechnique concerne les risques de chutes de blocs et leurs impacts sur les infrastructures ou les bâtis situés en aval.

Ce risque dépend notamment de la taille des blocs et de leur cinétique.

Dans le cas où le risque concerne des blocs de taille modeste (< quelques m³), des ouvrages de protection (filets, merlons...) ou de détection (filets détecteurs, par exemple) sont en général projetés et l'instrumentation concerne plutôt le fonctionnement de ces ouvrages de protection/détection.

En revanche, lorsque les blocs sont de taille plus conséquente (dizaine, voire plusieurs centaines de m³), il est nécessaire de suivre l'évolution de l'équilibre de ces compartiments rocheux. Cette surveillance est souvent assurée par une instrumentation de l'ouverture de fissures (capteurs 2D ou 3D), avec alarmes associées pour signaler des accélérations de mouvements. A noter que cette instrumentation est parfois conçue pour un suivi du type continu avec réponse en "temps réel", ceci pour la gestion de risques importants.



Figure 2.8 - Versant du mur à arcature de Fontan - ligne Coni-Vintimille
(travaux suite à la tempête ALEX – 2020/2021) (crédit photographique : SNCF RESEAU).



Figure 2.9 – Renforcement d'un glissement de terrain – Méthode Observationnelle – Autoroute A404 (crédit photographique : EGIS).

2.2.6 OUVRAGES SOUTERRAINS

Concernant les ouvrages souterrains, il faut distinguer **les ouvrages profonds** de ceux situés en subsurface, le plus souvent dans un contexte urbain.

Pour les ouvrages profonds, la problématique essentielle concerne la stabilité de la cavité créée, lors de l'excavation et de la mise en œuvre des soutènements (Méthode Convergence Confinement, AFTES 2001). On s'intéressera donc aux déformations du terrain autour de la cavité, aux sollicitations de ces terrains sur les structures de soutènement et aux déformations/efforts dans le soutènement. Selon les situations, les conditions hydrauliques doivent être considérées comme un des paramètres clé. Dans certains cas, il peut s'avérer nécessaire de poursuivre l'instrumentation largement au-delà de l'achèvement des travaux de génie civil de l'ouvrage. Les principaux risques à maîtriser sont la rupture de la cavité ou des efforts excessifs dans les soutènements avec un risque de plastification de ceux-ci.

Pour **les ouvrages urbains**, les concepteurs doivent prévoir une instrumentation visant à garantir la stabilité du tunnel excavé et le bon comportement du soutènement mis en place, mais surtout la maîtrise des déformations des terrains dans la ZIG afin de garantir la maîtrise des dommages potentiels sur les avoisinants. Le suivi de l'évolution des pressions interstitielles est également nécessaire, voire indispensable dans certaines configurations. Dans le cas des ouvrages souterrains relatifs aux infrastructures linéaires, comme les lignes de métros, la ZIG peut s'avérer très étendue avec plusieurs centaines d'avoisinants sensibles présentant le risque d'être impactés par les travaux. Le projet d'instrumentation doit alors comporter de très nombreux points de mesures avec une précision très inférieure à la valeur absolue des tassements attendus. Dans ce cas particulier, la vitesse d'avancement des travaux peut être conditionnée aux mesures enregistrées en surface, en temps réel. A noter que les mesures à long terme (au-delà de l'achèvement du génie civil) sont peu courantes. En

revanche, une instrumentation préalable au début des travaux, est nécessaire pour appréhender le comportement initial des avoisinants sensibles, en l'absence de travaux.

A noter, que pour les infrastructures enterrées (gares souterraines, parkings profonds, tunnels...), une des problématiques importantes est la gestion des rabattements de nappes avec par exemple les problématiques de stabilité des fonds de fouille et

aussi de transparence hydraulique de l'ouvrage (non-modification des niveaux de nappe amont et aval, des vitesses d'écoulement à proximité de l'ouvrage) ainsi que la gestion des rabattements de nappe généralisés. Dans ces situations, une instrumentation spécifique, dont l'étendue va largement au-delà de l'ouvrage géotechnique, doit être envisagée.



Figure 2.10 –Monitoring tunnel urbain par topométrie (crédit photographique : SIXENSE).



Figure 2.11 – Tunnel profond instrumenté pour le suivi de la construction et à long terme (crédit photographique EGIS).

2.2.7 FONDATIONS SUPERFICIELLES

Pour les fondations superficielles la problématique majeure concerne l'évolution des tassements (absolus et différentiels) sous le chargement de la structure portée. Dans la plupart des situations on s'intéresse uniquement aux déformations verticales. Dans les cas particuliers de fondations sur pente ou bien avec une forte obliquité du chargement, il peut s'avérer nécessaire d'appréhender l'évolution des déformations en 3D.

Pour ce type d'ouvrage géotechnique, la maîtrise du risque concerne des déformations excessives en regard des limites acceptables par la structure portée.

Dans le cas de fondations de grande extension, comme les grands radiers, la problématique géotechnique est en relation avec l'interaction sol/structure : contrainte à l'interface sol/fondation et répartition de cette contrainte, déformations du radier lui-même et compatibilité avec les sollicitations admissibles par celui-ci. Pour ce type d'ouvrage, il est essentiel de prendre en compte les effets du chargement sur les avoisinants, ce qui impose une instrumentation de ceux-ci.

En définitive, l'instrumentation des fondations superficielles est relativement rare. Elle se limite le plus souvent au suivi de repères topographiques de nivellement. En conséquence ce sujet ne sera pas développé plus en détail au chapitre 6.



Figure 2.12 – Fondations superficielles avec renforcement par clouage – instrumentation pour suivi des déformations et efforts dans les renforcements (crédit photographique : EGIS).

2.2.8 FONDATIONS PROFONDES

Dans cette section nous avons fait le choix de regrouper les fondations classiques sur pieux et les renforcements de sols par inclusions rigides.

Dans le cas des **fondations classiques sur pieux**, la problématique principale est centrée sur la maîtrise des tassements, avec une amplitude qui reste compatible avec la structure portée. Dans la plupart des cas, le projet d'instrumentation se limite au suivi de l'évolution des tassements en tête des pieux. Cependant dans le cadre d'expérimentation comme les essais préalables de chargement de pieu ou dans certains cas spécifiques (micropieux, pieux géothermiques, immeuble de grande hauteur...), le dispositif d'instrumentation peut être beaucoup plus complet pour accéder au comportement du pieu en fonction de la profondeur (par exemple, mobilisation progressive des efforts le long du pieu permettant d'appréhender précisément le frottement latéral et la charge reprise en pointe).

En réalité, les fondations profondes sur pieux sont rarement instrumentées, sauf dans le cas d'essais, d'expérimentations ou bien de projets de R&D (Cf. Chapitre 6.13).

Dans le cas de **renforcement ou d'amélioration de sols** par inclusions rigides, en plus des problématiques évoquées ci-avant, pour les remblais ou radier sur sols compressibles, il convient de suivre les reports de charges sur les inclusions rigides et les sollicitations dans celles-ci. La contribution de l'instrumentation à la maîtrise des risques concerne donc principalement la compatibilité des tassements pour l'ouvrage « porté » ainsi que des sollicitations dans les inclusions par rapport à leur résistance ultime, voire l'évolution des pressions interstitielles dans les sols.



Figure 2.13 – Fondations profondes – Viaduc de Monestier – Instrumentation mesurant l'influence d'un glissement de terrain sur les pieux (crédit photographique : EGIS).

2.2.9 OUVRAGES EXISTANTS

Les ouvrages existants constituent un patrimoine qui peut être très ancien (plusieurs dizaines, voire centaines d'années) et sur lequel la connaissance géotechnique est partielle, voire nulle.

La compréhension des phénomènes susceptibles de déstabiliser les ouvrages anciens, passe par une partie reconnaissance de sols et une partie instrumentation. Elle a deux objectifs principaux :

- connaissance de la géologie/géotechnique/hydro-géologie au droit de l'ouvrage ;
- caractérisation des mécanismes physiques pouvant impacter sa stabilité.

L'expertise de terrain couplée aux résultats des investigations (géotechniques et géophysiques) permettent de définir le besoin en instrumentation.

Dans le cas des ouvrages existants, le projet d'instrumentation rejoint ce qui est évoqué pour les problématiques géotechniques des ouvrages neufs (Cf. paragraphes précédents 2.2.1 à 2.2.8), mais tient également compte de l'existence même de l'ouvrage et de son comportement observé après sa mise en service. L'analyse fine de ce comportement s'avère parfois un atout supplémentaire pour comprendre le phénomène géotechnique observé et concevoir un projet d'instrumentation parfaitement adapté. Cette analyse permet par exemple de distinguer la « respiration » de l'ouvrage (soumis aux variations thermiques), des évolutions irréversibles.

2.3 PROCESSUS D'ÉLABORATION DU PROJET D'INSTRUMENTATION

Ce sous-chapitre fait largement référence à la norme NF EN ISO 18674-1 « Reconnaissance et essais géotechniques – Surveillance géotechnique par instrumentation in situ – Partie 1 : Règles générales ».

Ce texte normatif utilise une terminologie précise, avec en particulier :

- **Surveillance géotechnique** : observation du comportement des terrains et/ou des performances de structures géotechniques avant, pendant et/ou après la construction ;
- **Paramètre géotechnique clé** : paramètre physique indicatif du problème géotechnique

considéré ;

- **Projet de surveillance géotechnique** : ensemble des aspects et des processus qui, dans le cadre d'un projet spécifique, sont pertinents pour la surveillance géotechnique ;
- **Concept de surveillance géotechnique** : plan préliminaire relatif au mesurage des paramètres géotechniques clés dans la phase d'étude conceptuelle, tenant compte du type de mesurage, des emplacements de mesure et du calendrier de réalisation des mesures ;
- **Plan de surveillance géotechnique** : évolution du concept de surveillance dans le cadre de la phase d'étude des spécifications ;
- **Système de surveillance géotechnique** : matériels et logiciels permettant de fournir les données de terrain en termes de surveillance ;
- **Programme de surveillance géotechnique** : ensemble des éléments d'un projet de surveillance qui peuvent être planifiés de façon systématique, consistant en un plan de surveillance et un système de surveillance.

Dans les présentes recommandations le terme « Projet d'instrumentation » regroupe l'ensemble des notions principales précitées et issues de la norme NF EN ISO 18674-1.

Ce projet d'instrumentation est évolutif et doit suivre les différentes étapes du projet géotechnique et du projet général, en s'attachant à exprimer de manière de plus en plus détaillée le concept de surveillance géotechnique.

Les principales exigences du projet d'instrumentation, selon les différentes étapes de réalisation d'un projet de construction ou de suivi d'un ouvrage, peuvent être résumées comme suit :

- **Diagnostic/expertise.** Le Maître d'Ouvrage souhaite étudier un ouvrage existant, avec ou sans sinistre, dans le cadre de sa maintenance ou de sa régénération. La définition de l'instrumentation sera adaptée à la question posée et éventuellement complétée lors des études de conception.
- **Étude préliminaire ou AVP.** La problématique géotechnique est clairement posée, les paramètres clés sont identifiés et une première estimation permet de donner les intervalles de valeurs attendues. Sont également spécifiées

l'exactitude et l'incertitude avec lesquelles les paramètres clés doivent être mesurés ainsi que les limites géotechniques tolérables qui leur sont associées. A noter que ces éléments peuvent paraître difficiles à déterminer dès les premières phases d'étude. Pour autant, la réflexion associée doit être menée en précisant/ajustant les valeurs au fur et à mesure des différentes étapes ultérieures de conception du projet géotechnique.

- **Étude conceptuelle ou PRO.** Le concept de surveillance géotechnique est développé en ce qui concerne la manière de mesurer les paramètres clés associés à la problématique géotechnique considérée. Sont en particulier déterminés : les principaux types d'instruments de mesures, la fréquence des mesurages, la nécessaire redondance du système et la durée d'exploitation prévue du système de surveillance.
- **Étude des spécifications ou DCE / EXE.** Le concept de surveillance géotechnique est affiné pour élaborer un programme de surveillance complet. Ce programme intègre le plan de surveillance et le système de surveillance et ainsi que tous les éléments qui peuvent être planifiés avant les mesurages. Les points importants dans cette phase sont la sélection des instruments, fondée sur des fiches techniques détaillées, et les performances attendues in situ. Il intègre également les spécifications pour la procédure d'installation des instruments. A ce stade on retrouve : les procédures de mesurage : principe physique de mesure et méthode de mesure (numérique, analogique...), l'emplacement des points de mesure, le calendrier de surveillance, le type de collecte des données (relevés manuels, enregistrement des mesures avec ou sans télétransmission).
- **Installation et collecte des données.** Le système d'instrumentation est installé dès que possible, avant le démarrage de la construction, afin de mesurer le comportement global des terrains et des avoisinants, avant toute perturbation apportée par les travaux. L'installation est réalisée de manière à obtenir une conformité satisfaisante des instruments de mesure (on vise une altération négligeable des mesures par la présence du capteur). Les instruments sont utilisés et mis en œuvre en conformité avec les instructions du fabricant. Le système de surveillance est suivi de façon systématique et il bénéficie d'une protec-

tion adaptée aux travaux réalisés. La fréquence des mesures doit être soigneusement adaptée à la problématique géotechnique de l'ouvrage instrumenté. Il s'agit de se caler sur la vitesse d'évolution du phénomène attendu. Des mesures excessivement nombreuses peuvent générer des problèmes de gestion et des traitements inutiles.

- **Traitement des données et analyse.** Compte tenu de l'évolution des technologies (capteurs intelligents, acquisitions automatiques, capacité de stockage des données...) les informations recueillies représentent très souvent un volume de données très conséquent. Ces données de surveillance doivent être prises en compte avec une attention particulière car elles peuvent être affectées, par l'instrument de mesure lui-même, par son installation et par les effets dus à l'environnement, ou bien encore par des dérives temporelles. Des contrôles de plausibilité des données sont donc essentiels. Ces contrôles doivent inclure l'instrument ainsi que les aspects géotechniques. Ils sont intégrés dans un processus de qualification des données préalablement à leur analyse, puis à leur interprétation. La phase d'analyse consiste à une appréciation des évolutions (comparaison des valeurs mesurées à celles du mesurage à zéro ou du mesurage de référence en évaluant les tendances : stabilité, accélération, ralentissement, oscillations...) tandis que la phase d'interprétation consiste en une évaluation par rapport à la problématique géotechnique considérée et aux paramètres géotechniques clés (évolution par rapport au comportement attendu de l'ouvrage géotechnique, comparaison par rapport à des seuils préalablement déterminés...).

2.4 CONTRAINTES PARTICULIÈRES POUR LE PROJET D'INSTRUMENTATION

Ce sous-chapitre expose les contraintes particulières principales à considérer dans le processus d'élaboration du projet d'instrumentation. Il ne s'agit pas d'un recueil exhaustif des contraintes, mais on s'attarde ici, sous forme d'avertissement, aux contraintes importantes issues de différents REX en instrumentation d'ouvrages géotechniques.

2.4.1 FACTEUR TEMPS

Dans le processus d'élaboration du projet d'instrumentation il est essentiel d'appréhender la vitesse du phénomène géotechnique observé. Outre les phénomènes dynamiques bien identifiés, la vitesse probable d'évolution des mesures doit être appréhendée dès les premières phases d'élaboration du projet d'instrumentation de l'ouvrage géotechnique considéré.

Aux phénomènes lents comme le gonflement sous radiers, le fluage des sols mous ou les déformations des pentes argileuses (phénomènes pour lesquels il convient d'être vigilant sur les dérives temporelles du système d'instrumentation), s'opposent les phénomènes plus rapides comme les déformations proches de la rupture des sols raides (talus rocheux, par exemple) ou bien les tassements provoqués par l'excavation d'un tunnel en site urbain ou encore les soulèvements occasionnés par des injections. Dans ces deux situations le projet d'instrumentation devra faire le choix de matériels adaptés au facteur temps, mais aussi élaborer un protocole de décision qui soit en rapport avec la vitesse du phénomène à suivre [ITA 2011].

2.4.2 INCERTITUDES

Les incertitudes de mesure (ceci pour l'ensemble du système constituant la chaîne de mesures) sont souvent difficiles à évaluer, mais elles revêtent une importance primordiale. On peut évoquer ici, à titre illustratif, plusieurs situations :

- en règle générale et notamment lorsque l'instrumentation doit permettre l'évaluation de vitesses d'évolution de déformations ou de contraintes, la plage d'incertitude doit être largement inférieure aux valeurs considérées comme seuils (dans un rapport minimum de l'ordre de 10) ;
- quand la raideur de l'ouvrage géotechnique est importante on se heurte parfois à la difficulté de suivre les déformations de celui-ci ainsi que les efforts ou les contraintes (mesures indirectes) ;
- d'autre part, des plages d'incertitude très étroites, souvent coûteuses, peuvent conduire à des interprétations erronées des phénomènes géotechniques observés.

2.4.3 REDONDANCE DU SYSTÈME

Pour fiabiliser un système d'instrumentation il est nécessaire de prévoir une redondance des mesurages géotechniques, ceci pour de multiples raisons : dysfonctionnement d'un composant conduisant à des mesures erronées, hétérogénéité naturelle des champs de contraintes et de déformations à observer...

Cette fiabilisation peut être d'autant plus nécessaire lorsqu'elle concerne des instrumentations d'ouvrages à fort enjeu (en cours d'exploitation ou participant à la sécurité civile). Certains ouvrages critiques nécessitent une surveillance avec un niveau de sécurité très élevé. L'instrumentation (et son intégration dans un système) doit alors répondre à des exigences en termes de fiabilité tel que le standard international SIL 3 (une défaillance sur 1 million) ou SIL 4 (1 défaillance sur 1 milliard), pour Safety Integrity Level, par exemple pour les systèmes électroniques, IEC 61508 (functional safety of electronical / programmable electronic safety related systems).

Cette redondance (temporelle, spatiale, technologique) peut être assurée par différentes approches, qui peuvent être complémentaires :

- multiplication des mesures ;
- augmentation volontaire du nombre de capteurs d'un même type, dans un même lieu ou duplication de capteurs ayant le même principe de mesure ;
- diversification, en prévoyant différents principes de mesures pour une seule et même grandeur à mesurer ;
- diversification des grandeurs à mesurer et des approches d'instrumentation pour un même phénomène géotechnique à suivre.

2.4.4 MESURES DES CONTRAINTES À L'INTERFACE SOL/STRUCTURE

L'accès aux contraintes totales à l'interface sol/structure (murs de soutènement, soutènements en tunnel, radiers industriels...) est souvent délicat. En général le capteur n'est pas en cause, c'est plutôt sa mise en œuvre qui s'avère difficile. En effet, le capteur lui-même perturbe plus ou moins le champ des contraintes (phénomène de « point dur » ou « point mou »). Une attention particulière doit donc être portée sur le protocole d'installation.

D'autre part, il est souvent nécessaire de multiplier le nombre de points de mesure dans une même zone (3 ou 4 points de mesure) pour obtenir une contrainte moyenne représentative. En effet, même dans le cas où la contrainte totale à l'interface est théoriquement uniforme, il s'avère souvent que la réalité est très différente, avec des variations locales significatives.

2.4.5 MESURES DES PRESSIONS INTERSTITIELLES

Pour de nombreux ouvrages géotechniques, il est primordial de suivre l'évolution des pressions interstitielles dans les sols (consolidation d'un remblai sur sol mou, construction d'un barrage en terre, glissements de terrains...), mais ce type de mesures doit faire l'objet d'une attention particulière afin de garantir une bonne représentativité.

Les points de vigilance principaux à observer sont :

- perméabilité du capteur adaptée à celle du sol environnant (risque de colmatage) ;
- temps de réponse du capteur ou de la chaîne de mesure et fréquence de mesure en lien avec les phénomènes à observer ;
- mise en place permettant d'assurer une saturation du système filtre + capteur de pression, avant, pendant et après la pose.

2.4.6 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT SUR L'OUVRAGE GÉOTECHNIQUE

Plusieurs facteurs externes peuvent exercer une influence sur les mesures géotechniques réalisées et il convient de bien les identifier. Ces influences peuvent être liées à l'ouvrage géotechnique lui-même ou bien au système de surveillance :

- variations de température et de pression atmosphérique ;
- perturbations électromagnétiques d'origine multiple ;
- perturbations générées par les travaux, comme les vibrations par exemple ;
- phasage des travaux réalisés à proximité de l'ouvrage ou partie d'ouvrage instrumenté.

D'autre part, l'environnement doit être pris en compte pour la durabilité de l'instrumentation : corrosion en milieu agressif (salin, chimique...), perturbations électriques (foudre, champ magnétique intense...), vibrations etc.

2.4.7 ARBRE DE DÉCISIONS ET RESPONSABILITÉS ASSOCIÉES

Au-delà de la détermination des seuils, il est indispensable d'anticiper le logigramme des décisions à prendre en cas de dépassement des valeurs seuil préalablement fixées. Un arbre des décisions, associé à la définition précise des responsabilités (MOA, MOE, BE, Entreprises...) doit être considéré comme un point essentiel du projet d'instrumentation, avec, a minima, une réflexion approfondie portant sur :

- la définition des valeurs seuils ;
- la qualification métrologique et la validation des valeurs (fiabilité de la mesure) ;
- les critères de dépassement de seuils (n valeurs dépassant un seuil, définition éventuelle de plusieurs niveaux de seuil...) ;
- les décisions graduelles à prendre en cas de dépassement (vigilance, arrêt, renforcement, évacuation...) ;
- les différents acteurs en responsabilité de ces décisions (MOA/MOE, comité d'experts mobilisable en urgence...).

Le rôle du responsable de la réalisation des mesures est primordial pour éviter une prestation de faible qualité. Cette situation conduirait en effet à des prises de décision peu fiables, voire erronées. Cette exigence doit faire partie intégrante de la contractualisation de la mission d'instrumentation.

2.5 RECOMMANDATIONS POUR LA MAINTENANCE PRÉDICTIVE ET CURATIVE

2.5.1 CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

Les systèmes d'instrumentation des ouvrages géotechniques sont le plus souvent soumis à des conditions particulières (conditions de température et pressions hydrauliques, conditions de chantier, capteurs inaccessibles après leur installation car enfouis dans le sol ou noyés dans les structures en béton...) qui doivent être prises en compte dans le projet d'instrumentation. Il convient donc de bien mettre en avant les critères de robustesse et fiabilité dans le choix des capteurs et des systèmes de mesures associés.

Le projet doit définir un objectif précis en termes de durée de vie de l'ensemble du système constituant l'instrumentation.

Les éléments constitutifs d'un système de surveillance géotechnique doivent être suffisamment robustes vis-à-vis de ces conditions sévères régnant dans l'environnement et sur le site de construction. Les exigences concernent principalement :

- les matériaux utilisés (qualité des câbles de liaison, résistance à l'environnement chimique des capteurs dont la corrosion...);
- les caractéristiques techniques des unités installées (étanchéité, résistance aux chocs et aux vibrations...);
- la sécurité de l'ensemble du système (protections vis-à-vis des surtensions ou de la foudre, protections vis-à-vis de l'activité des travaux ou du vandalisme)
- les objectifs de durabilité.

Lorsque des dommages sont envisageables malgré tous les dispositifs de protection, il convient d'anticiper le besoin de réparation ou de remplacement de l'équipement, ou de prendre en considération des équipements en surnombre (pourcentage de pertes), voire d'envisager des systèmes « relais » qui permettront de poursuivre l'instrumentation de l'ouvrage géotechnique. Cela peut être également le cas lorsque la durée d'instrumentation dépasse celle de vie des capteurs. Toutes ces dispositions sont à intégrer en amont dans le projet d'instrumentation.

Des vérifications de fonctionnement et/ou des étalonnages des instruments de mesure doivent être effectués et documentés aux différentes étapes de l'instrumentation :

- étalonnage par le fabricant avant expédition. Celui-ci est réalisé sous la responsabilité du fabricant et fait l'objet d'un certificat d'étalonnage ;
- vérification du fonctionnement avant l'installation pour vérifier que les instruments n'ont subi aucun dommage pendant le transport ;
- vérification du fonctionnement immédiatement après l'installation de l'instrument et après l'installation du système rassemblant l'ensemble des instruments.

Dans la situation où le projet d'instrumentation a pour objectif d'étendre le système mis en place lors de la construction au suivi à long terme de l'ouvrage (digues et barrages, murs de soutènement, tunnels profonds, pentes naturelles...), la question de la garantie de fonctionnement sur le très long terme (>10 ans) doit se poser dès la phase de conception. Dans ce type de projet, il est souvent nécessaire de surdimensionner au départ le système d'instrumentation ou d'envisager des compléments au cours de la vie de l'ouvrage, lorsque c'est possible. Dans tous les cas, il est nécessaire de prévoir une maintenance du système d'instrumentation.

Enfin, il s'avère souvent nécessaire de sensibiliser les acteurs de la construction, en particulier le Maître d'Ouvrage, sur l'importance d'une maintenance du dispositif d'instrumentation et ce y compris pour les systèmes de mesures automatiques. Cette maintenance impose la programmation de moyens humains et financiers conséquents pour assurer une fiabilité à long terme du système d'instrumentation. La bonne prise en considération d'une maintenance prédictive s'avère souvent préférable à des solutions correctives ou curatives lourdes pour rétablir le bon fonctionnement d'un système d'instrumentation.

2.5.2 MAINTENANCE PRÉDICTIVE

Pour les systèmes d'instrumentation des ouvrages géotechniques, la maintenance prédictive consiste généralement à réaliser un contrôle périodique du dispositif d'instrumentation (capteurs, connections, acquisition des mesures...). Il s'agit de détecter le plus rapidement possible toute anomalie qui pourrait générer une dégradation du système et donc une altération des mesures réalisées.

Par exemple, dans les systèmes de surveillance automatique, il est nécessaire d'envisager des alarmes de défaillance de la communication et de niveaux de faible puissance permettant de détecter au plus tôt une anomalie de transmission.

Concernant les capteurs eux-mêmes qui sont souvent enfouis dans les sols ou les structures en béton, il est difficilement envisageable de réaliser un réétalonnage. En conséquence une attention particulière doit être portée à la stabilité du signal de mesure, ceci pendant toute la durée du suivi de l'ouvrage.

En revanche, tous les composants accessibles doivent faire l'objet d'un rééquilibrage périodique. L'intervalle entre deux rééquilibrages doit être intégré dans les spécifications techniques du projet d'instrumentation. Ces spécifications doivent prendre en compte les recommandations du fabricant, ainsi que l'usage et l'environnement particulier du composant concerné.

2.5.3 MAINTENANCE CURATIVE

La maintenance curative consiste généralement au remplacement des composants jugés défectueux à l'issue d'un diagnostic détaillé. Ce remplacement, lorsque l'accès au composant concerné le permet, peut être assuré par un élément identique ou équivalent.

Pour les capteurs enfouis dans le sol ou la structure, ce remplacement s'avère souvent impossible et on doit s'orienter sur une conception d'instrumentation différente : par exemple la mesure du comportement d'une structure accessible plutôt que le suivi des actions du terrain sur celle-ci.

En revanche, les éléments constituant le système de mesure (intégration, acquisition, transmission) doivent rester facilement accessibles pour leur maintenance curative.

2.6 DOCUMENTATION RELATIVE AU PROJET D'INSTRUMENTATION

Une documentation détaillée est essentielle pour la réussite de l'instrumentation des ouvrages géotechniques. Cette documentation est évolutive en fonction des différentes phases du projet de construction.

Il est nécessaire avant tout que celle-ci fasse référence aux études géotechniques disponibles (études géotechniques réalisées dans le cadre des missions normalisées NF P94500). En effet, la conception du projet d'instrumentation fait partie intégrante des études de conception géotechnique et l'ensemble de la documentation doit faire l'objet d'une vérification de parfaite cohérence de ce projet avec la ou les problématiques géotechniques étudiées.

2.6.1 DOCUMENTATION POUR LA CONCEPTION INITIALE

Dans cette phase, la documentation principale est élaborée dans le cadre des investigations géotechniques et études AVP associées. Il s'agit d'un avant-projet d'instrumentation comprenant :

- un rapport d'études intégrant le détail de la problématique géotechnique avec les phénomènes géotechniques en présence et le type de mesures à envisager (comportement de l'ouvrage géotechnique, paramètres clés, ordre de grandeur des valeurs attendues, points de vigilance...) ;
- schémas et plans de principe du système d'instrumentation ;
- planning général de l'instrumentation avec en particulier, l'instrumentation à anticiper avant le démarrage effectif des travaux (avoisinants, respiration initiale...) ;
- évaluation quantitative et financière du système d'instrumentation.

2.6.2 DOCUMENTATION POUR LA CONCEPTION DÉTAILLÉE

Cette documentation fait référence aux investigations et études géotechniques PRO avec en particulier les valeurs attendues issues du dimensionnement géotechnique (y compris les modélisations numériques éventuelles) ainsi que les valeurs seuil.

Elle comprend :

- un rapport justificatif s'appuyant sur les études géotechniques et définissant le système d'instrumentation avec le choix des capteurs, le programme des mesures (fréquence et calendrier par rapport au phasage des travaux, par exemple) ;
- les plans détaillés de l'instrumentation avec le nombre et la localisation précise des points de mesure, le principe de câblage d'installation et de protection des unités de mesures, de transmission et de stockage ;
- les spécifications techniques détaillées du système d'instrumentation (capteurs, câblage, centralisation, acquisition, transmission, maintenance...) ;

- les spécifications techniques pour l'analyse et l'interprétation des mesures (méthodes de qualification, d'analyse, d'interprétation et de gestion des alarmes) ;
- l'organigramme décisionnel en cas de dépassement de seuils ainsi que les mesures correctives à entreprendre sur les travaux ;
- un budget détaillé de l'instrumentation.

2.6.3 DOCUMENTATION POUR L'EXÉCUTION

A ce stade, la documentation doit être suffisamment précise pour garantir la bonne installation des instruments de mesure et autres matériels associés et leur exploitation (mesurages, analyse et interprétation).

Elle rassemble :

- le dossier des plans d'exécution avec : la position des capteurs dans l'ouvrage ou son environnement, le cheminement des câbles de liaison, les unités de mesurage, de transmission et de stockage ;
- le dossier des matériels et instruments de mesure (métrologie, électronique, alimentation, environnement...) ;
- les plans de maintenance et consignes particulières d'entretien ;
- les procédures détaillées pour l'installation des éléments constituant l'ensemble du système d'instrumentation ;
- le calendrier de mesurage qui peut être ajusté en fonction de l'avancement de la construction et des nouvelles connaissances acquises au cours de l'instrumentation ;
- les procédures détaillées pour la réalisation des mesurages, de leur transmission et leur stockage selon des normes précises ;
- les procédures pour la qualification, l'analyse et l'interprétation des mesurages ;
- le sommaire détaillé des rapports de mesures à établir ainsi que des représentations graphiques.

A l'issue de l'installation, un dossier de récolement doit être établi. Il comprend tous les éléments de la documentation établie pour les études d'exécution avec en outre :

- le relevé précis de la position des points de mesure ainsi que l'orientation de l'élément sensible des

instruments de mesure (ces instruments sont situés au niveau de surfaces libres, au niveau de l'interface entre deux milieux, à l'intérieur d'un milieu ou bien dans le sol et dans des forages) ;

- les rapports d'installation avec reportages photographiques ;
- les fiches d'étalonnages des matériels et notices techniques des fabricants ;
- les mesures initiales, mesures zéro, mesures du bruit de fond ;
- les tests et contrôles réalisés lors des phases d'installation du système d'instrumentation.

2.7 SYNTHÈSE

Le projet d'instrumentation géotechnique fait partie intégrante du projet de l'ouvrage à construire. Il est en général établi par le Maître d'Œuvre en rassemblant les compétences et expériences des spécialistes en géotechnique et en instrumentation, et en associant les spécialistes en Génie Civil chaque fois que nécessaire (comportement de la structure portée lorsqu'il s'agit de fondations). Il s'agit d'un projet qui suit de manière progressive les mêmes étapes que le projet général de l'ouvrage géotechnique à construire.

Il s'agit donc d'un véritable projet dont les points sensibles sont :

- une réflexion approfondie sur la problématique géotechnique, les objectifs de l'instrumentation, les paramètres clés, les points sensibles et les risques ;
- des procédures et plans d'exécution avec un niveau de détail en accord avec les phases d'étude ;
- la mise en œuvre par un personnel qualifié et expérimenté ;
- un protocole d'enregistrement des valeurs mesurées ;
- la définition préalable de l'arbre de décision, notamment dans le cas de dépassement de seuils fixés à l'avance.
- une analyse des mesures en intégrant les particularités du site et le déroulement précis des travaux ainsi que les limites inévitables d'une instrumentation sur site par rapport à une expérimentation en laboratoire ;

- l'interprétation par rapport au comportement attendu de l'ouvrage géotechnique, en utilisant des outils simples, rapides et robustes.

Le logigramme ci-après synthétise les phases essentielles pour l'élaboration du projet d'instrumentation d'un ouvrage géotechnique.

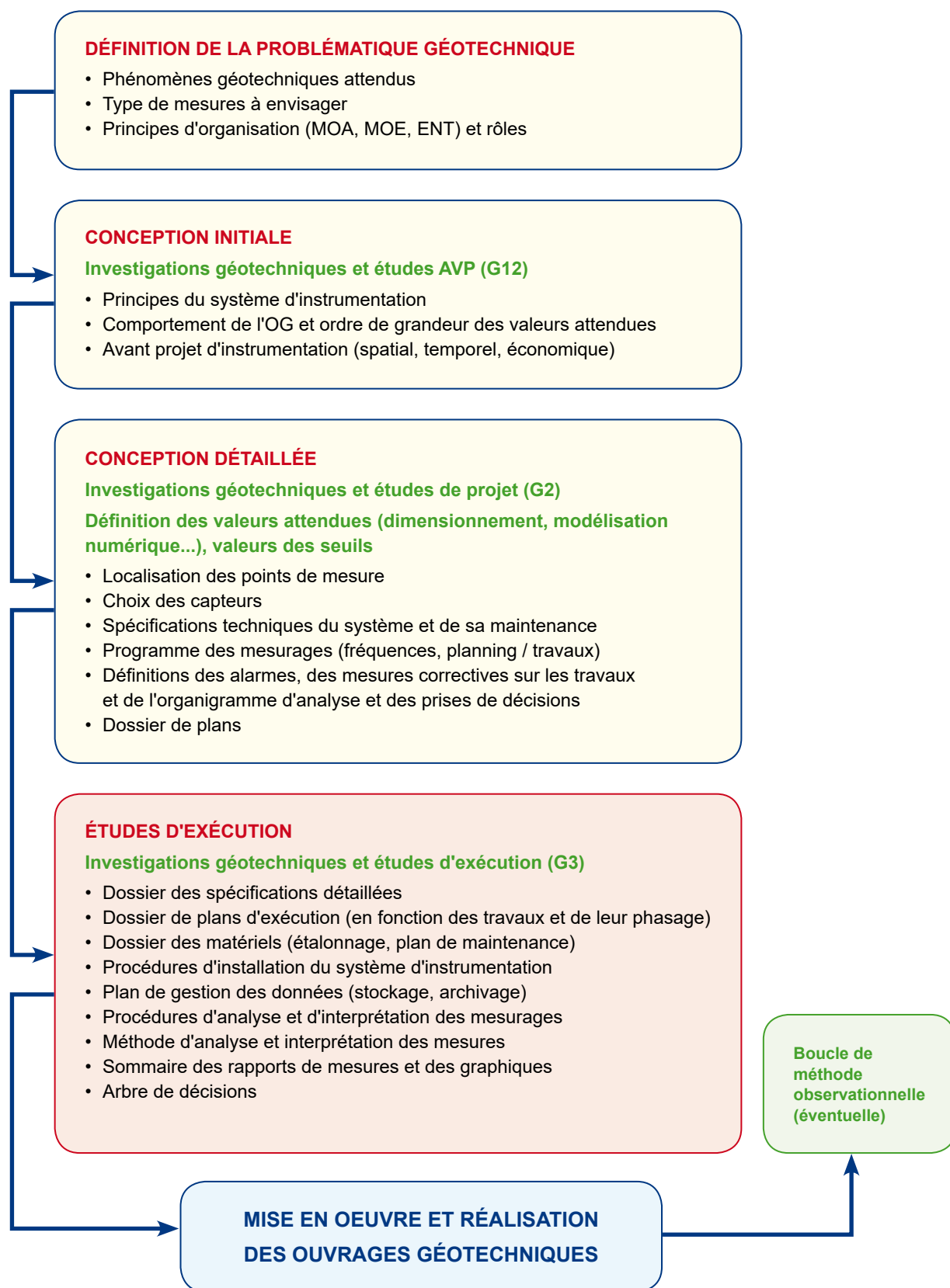


Figure 2.14 - Logigramme des phases essentielles pour l'élaboration du projet d'instrumentation d'un ouvrage géotechnique

3 GÉNÉRALITÉS SUR L'INSTRUMENTATION ET LES MESURES

3.1 NORMALISATION

3.2 PRINCIPAUX PARAMETRES MESURES

3.3 LES CAPTEURS

3.4 LA MESURE PHYSIQUE

3 GÉNÉRALITÉS SUR L'INSTRUMENTATION ET LES MESURES

3.1 NORMALISATION

Pendant de nombreuses années, seules les mesures inclinométriques bénéficiaient d'une norme (NF P 94-156 en 1995 - annulée). En 2015, une norme européenne EN ISO 18674-1 a établi les règles générales d'exécution de la surveillance du sol, des structures interagissant avec le sol, des remblais géotechniques et des travaux géotechniques. Depuis, plusieurs normes spécifiques à certains paramètres mesurés ont été proposées :

- EN ISO 18674-2 (2016) : mesurage des déplacements le long d'une ligne : extensomètres ;
- EN ISO 18674-3 (2019) : mesurage des déplacements perpendiculaires à une ligne par inclinomètre ;
- EN ISO 18674-4 (2020) : mesure de la pression interstitielle : piézomètres ;
- EN ISO 18674-5 (2019) : mesure de la variation de pression par cellules de pression totale (CPT) ;
- EN ISO 18474-6 (en cours de rédaction) : mesurage des tassements par systèmes hydros-tatiques ;
- EN ISO 18474-7 (en cours de rédaction) : mesurage des micro-déformations par jauges ;
- EN ISO 18474-8 (2023) : mesurage des forces par cellules de charge ;
- EN ISO 18474-9 (en cours de rédaction) : mesurage des déplacements par moyens géodésiques.

3.2 PRINCIPAUX PARAMÈTRES MESURÉS

Les paramètres les plus couramment suivis en géotechnique se classent en quatre catégories principales : géométriques, mécaniques, hydrauliques et environnementaux.

3.2.1 PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES

3.2.1.1 Déplacement

Un déplacement représente une variation de distance entre un point mobile et un point fixe (Figure 3.1). Le point mobile peut être lié au capteur

(capteur de déplacement à fil) ou indépendant (bague magnétique d'un tassomètre en forage, cible topométrique). Son unité est le mètre (m) mais le millimètre (mm) peut être utilisé dans le cas de faibles amplitudes de déplacement mesurées. Lorsqu'un sol est soumis par exemple à une surcharge verticale, le déplacement vertical mesuré est le tassement. Lorsque le sol est par exemple soumis à un déchargement vertical, le déplacement vertical mesuré est le soulèvement (Figure 3.2). Les déplacements sont notés δ ou s (settlement) lorsqu'il s'agit d'un tassement.

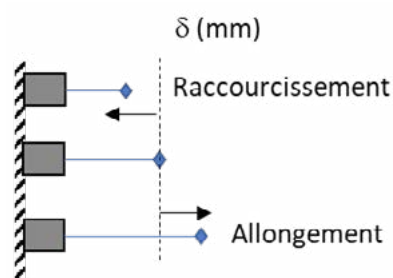


Figure 3.1 - Représentation de la mesure d'un déplacement selon un axe.

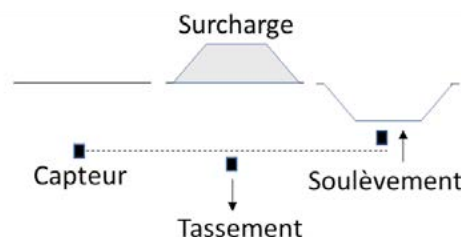


Figure 3.2 - Représentation de la mesure du tassement/soulèvement.

3.2.1.2 Déformation

La déformation est un allongement ou un raccourcissement relatif entre deux points mobiles ou entre un point fixe et un point mobile (Figure 3.3). La déformation est égale au rapport entre le déplacement mesuré entre deux points et la distance initiale entre ces deux points. Cette grandeur, notée ϵ peut être utilisée pour mesurer indirectement la contrainte qui est un paramètre moins aisé à mesurer (sous réserve de connaître le module permettant de passer de la déformation à la contrainte). Cette grandeur est sans dimension, on utilise le m/m ou plus souvent le $\mu\text{m}/\text{m}$ ou microdef (10^{-6} m/m) pour tenir compte des très faibles allongements ou raccourcissements par rapport à la distance initiale entre les deux points.

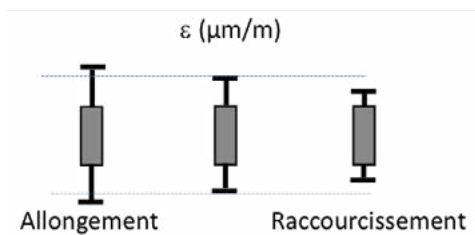


Figure 3.3 - Représentation de la mesure d'une déformation.

3.2.1.3 Inclinaison

L'inclinaison (ou encore rotation) est une variation d'angle dans le temps par rapport à une position initiale (Figure 3.4). Son unité est celle d'un angle : le radian, le mm/m et le degré sont les plus couramment utilisés.

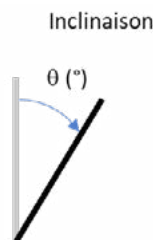


Figure 3.4
Représentation de la mesure d'une inclinaison.

3.2.2 PARAMÈTRES MÉCANIQUES

3.2.2.1 Force

La force qui s'applique en un point est mesurée de façon indirecte par la déformation d'un corps d'épreuve sur lequel l'effort est exercé. Le corps d'épreuve subit un allongement élastique lorsqu'un effort de traction est appliqué et un raccourcissement élastique dans le cas d'une compression (Figure 3.5). L'unité de la force est le Newton (N), le kilo-Newton (kN) étant plus couramment utilisé en géotechnique.

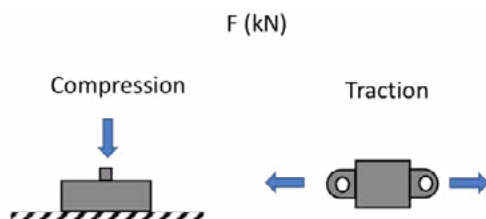


Figure 3.5 - Représentation de la mesure d'une force.

3.2.2.2 Contrainte

Une contrainte est une force appliquée sur un milieu par unité de surface. Comme pour la mesure d'une force, une mesure indirecte est nécessaire. Elle consiste le plus souvent, à mesurer les variations de pression d'un liquide contenu entre deux plaques de même surface (Figure 3.6). Son unité est le Pascal (Pa), le kilo-Pascal (kPa) étant plus couramment utilisé en géotechnique.

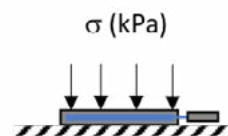


Figure 3.6 - Représentation de la mesure d'une contrainte.

Dans un sol saturé, on distingue la contrainte totale σ et la contrainte effective σ' qui s'exerce uniquement sur le squelette du sol sans prendre en compte la pression d'eau u . La contrainte effective ne peut pas être mesurée ; elle est déduite des mesures de contrainte totale et de pression interstitielle [Terzaghi 1943].

3.2.3 PARAMÈTRES HYDRAULIQUES

3.2.3.1 Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique est un paramètre important en géotechnique. Il correspond à la hauteur à laquelle l'eau s'élèvera dans un piézomètre à tube ouvert et à laquelle la pression de l'eau dans le terrain est égale à celle de l'atmosphère ambiante (NF EN ISO 18674-4 - Figure 3.7) et est mesuré depuis la surface en général par une sonde mise en place dans un tube vertical qui détecte le contact de l'eau. Cette mesure devient délicate si le point de référence en surface est perdu ou si le sol tasse. Dans ce cas, la position de la nappe est mesurée à l'aide de capteur de pression interstitielle (3.1.3.2). Il est exprimé soit par rapport au sol en mètre, soit par rapport à l'altitude zéro du niveau de la mer en mètre NGF (Nivellement Général Français), soit en mètre par rapport à un référentiel à préciser (ex : mce – mètre de colonne d'eau- par rapport à un fond de forage).



Figure 3.7 - Représentation de la mesure d'un niveau d'eau dans le sol.

3.2.3.2 Pression interstitielle

La pression interstitielle (noté u) est la pression exercée par l'eau contenue dans un sol saturé (Figure 3.8). Son unité est le Pascal (Pa), le kilo-Pascal (kPa) étant plus couramment utilisé en géotechnique. En condition hydrostatique, la pression interstitielle peut-être mesurée pour donner la hauteur du niveau piézométrique dans un sol.

En phase de consolidation, la connaissance de ses variations est importante car elles peuvent traduire un changement de comportement, voire un signe de rupture.

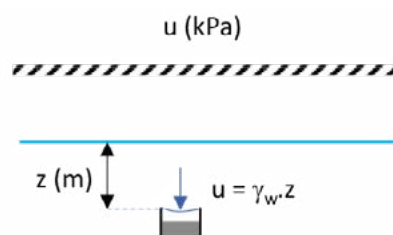


Figure 3.8 - Représentation de la mesure de la pression interstitielle.

3.2.4 PARAMÈTRES ENVIRONNEMENTAUX

3.2.4.1 Température

La température est un paramètre qui influence le comportement de certains ouvrages. Une caractérisation des processus Thermo-Hydro-Mécanique (THM) peut être nécessaire pour la compréhension des mécanismes tels que l'influence du gel/dégel sur la stabilité d'un flanc rocheux ou celui de la déformation thermique des butons métalliques d'une fouille.

Ce paramètre peut aussi influencer la mesure, certains capteurs étant sensibles à la température.

Il est nécessaire de connaître précisément les variations de température pour appliquer une correction aux mesures brutes des capteurs ou pour analyser les processus thermo-hydro-mécaniques.

L'unité couramment utilisée pour la température est le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

3.2.4.2 Vibration

La mesure des vibrations au voisinage des structures sensibles est couramment réalisée dans le cadre de chantiers (ouvrages souterrains, fouilles urbaines) ou de suivi d'ouvrages et de leur environnement.

Cette surveillance s'effectue sur des bâtiments en place, des éléments de génie civil, des machines ou des formations géologiques particulières en installant des géophones et/ou des accéléromètres trois axes. Elle a pour but de prévenir les dégâts éventuellement induits par les émissions vibratoires liées aux opérations de construction (battage de pieux, compactage dynamique, emploi d'explosifs...).

La vibration se mesure le plus souvent en vitesse particulaire (mm/s) lorsque l'objectif est de vérifier l'impact d'événements extérieurs sur un ouvrage, et en accélération (mm/s²) lorsqu'on étudie l'effet des secousses sismiques. La fréquence de vibration (en Hz) est un paramètre clé qui doit obligatoirement être lié à la mesure des vitesses ou des accélérations.

La mesure de la vibration peut aussi donner la fréquence propre d'un ouvrage et son suivi dans le temps peut donner des indications précieuses sur le vieillissement de l'ouvrage dû à une dégradation de ses propriétés mécaniques et structurales ou bien à un changement de ses conditions aux limites.

Les vélocimètres (capteurs de vitesse) et les accéléromètres sont généralement utilisés pour mesurer les vibrations. Les vélocimètres, appelés aussi communément géophones, sont constitués d'un boîtier qui mesure le mouvement absolu de la structure ou du sol sur lequel il est fixé. Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté. Une tension est générée de façon proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine dans son champ magnétique.

Un accéléromètre piézoélectrique est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce

sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération.

3.2.4.3 Autres paramètres

D'autres paramètres environnementaux peuvent être utiles selon les besoins de l'instrumentation. Il s'agit notamment des paramètres météorologiques : pression atmosphérique, vitesse du vent, pluviométrie, hauteur de neige...

3.3 LES CAPTEURS

Un capteur est l'élément d'un appareil mesureur servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. Selon cette définition, le capteur constitue le premier élément d'un transducteur qui sert à transformer, suivant une loi déterminée, la grandeur mesurée en une autre grandeur ou une autre valeur de la même grandeur avec une précision spécifiée et qui constitue un ensemble pouvant être utilisé séparément [Parmentier & Kratz 2022].

Certains capteurs peuvent fonctionner sans apport d'énergie (Cristal piézoélectrique, couple thermo-électrique...), d'autres nécessitent un apport d'énergie extérieur (capteur résistif, capteur capacitif, corde vibrante...).

3.3.1 TECHNOLOGIE DE MESURE

De nombreuses technologies existent pour les capteurs couramment utilisés en auscultation géotechnique.

3.3.1.1 Jauges de déformation

Les jauges de déformation (aussi appelées « jauges de contrainte » dans le cadre de mesures indirectes) sont des capteurs électriques de type extensomètres à fils résistants. Ces capteurs (Figure 3.9) furent inventés pour mesurer la déformation des structures afin d'évaluer leur état de contrainte. Ces capteurs sont constitués de circuits électriques très fins qui sont collés sur les structures. Les déformations subies par la structure génèrent des variations de résistance électrique des circuits qui peuvent mesurer des variations de déformation de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{m}$.

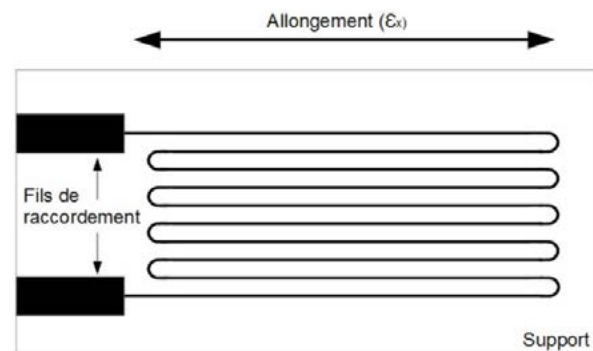


Figure 3.9 – Jauge de déformation
(source : <https://www.dmesures.fr>).

3.3.1.2 Capteurs électro-magnétiques

Les capteurs électro-magnétiques (Figure 3.10) tels que les jauges extensométriques de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer) permettent de mesurer des déplacements avec une très grande répétabilité de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$ et une longue durée de vie. Cette grande capacité est due à l'absence de contact entre le transformateur, composé de trois bobines, et le noyau magnétique qui assure la mesure du déplacement.

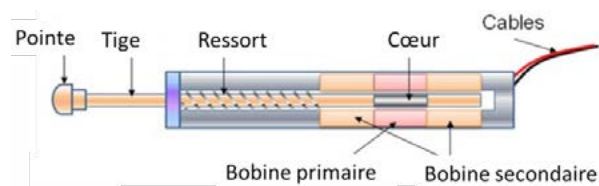


Figure 3.10 – LVDT.

3.3.1.3 Capteurs potentiométriques

Un capteur potentiométrique (Figure 3.11) est constitué d'une piste résistante R_h sur laquelle se déplace un curseur qui est relié mécaniquement à une pièce en mouvement (déplacement à mesurer). La tension U_s mesurée entre le curseur et une extrémité de la résistance est proportionnelle au déplacement mécanique. De conception simple et sans électronique complexe, le capteur potentiométrique est très économique et simple d'installation.

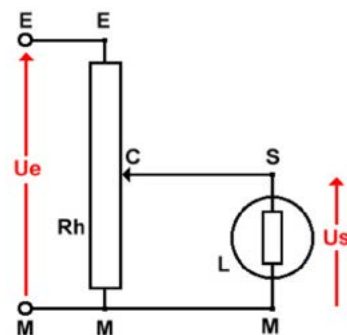


Figure 3.11 – Capteur potentiométrique
(source : <https://www.dmesures.fr>).

3.3.1.4 Capteurs piézorésistifs

Les capteurs piézorésistifs (Figure 3.12) sont des dispositifs qui utilisent les changements de résistivité de certains matériaux semi-conducteurs, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, pour effectuer une action électronique. Lorsqu'ils sont déformés mécaniquement sous l'effet d'une pression par exemple, ces matériaux changent de résistivité ce qui provoque une modification de tout courant électrique traversant l'appareil. Les matériaux semi-conducteurs couramment utilisés dans les dispositifs piézorésistifs peuvent être collés sur des membranes déformables et permettent de mesurer des signaux de courant (milli Ampère) représentatifs de la déformation de la membrane. De nombreux capteurs de pression d'eau dans les sols (piézomètres) sont équipés de capteurs piézorésistifs.



Figure 3.12 – Capteur de pression piézorésistif (source : Keller)

intégrés dans les smartphones permet de disposer d'une multitude de capteurs pouvant être utilisés en auscultation géotechnique.

Dans les applications géotechniques, des accéléromètres ou des inclinomètres « MEMS » sont souvent utilisés ; Ils apportent généralement une réduction de taille et de coût.

3.3.1.6 Corde vibrante

Une autre technologie, spécifiquement développée pour les besoins d'auscultation géotechnique, est largement diffusée et toujours couramment utilisée, il s'agit de l'extensomètre à corde vibrante. Ce capteur a été inventé par André Coyne en 1931 pour mesurer la déformation des barrages en béton, dont notamment le barrage de Marège [Rosin-Corre et al. 2012]. Le capteur à corde vibrante (Figure 3.14) est constitué d'une corde en acier tendue entre deux points de fixation. La fréquence de vibration de la corde varie en fonction de sa tension, c'est-à-dire de la longueur entre ses deux points extrémités. Une variation de la distance entre ces deux points entraîne une variation de fréquence de la corde qui est mesurée par une bobine (électro-aimant). La corde peut être excitée en régime amorti ou entretenu par une autre bobine.

Basé sur la même technologie, des capteurs piézoélectriques à corde vibrante permettent de mesurer précisément des pressions d'eau dans des piézomètres. Le capteur, plongé dans le tube piézométrique ou directement dans le sol, est équipé d'une membrane déformable en fonction de la pression d'eau du milieu. La corde vibrante, solidaire de la membrane, permet de mesurer via la fréquence de vibration, la déformation de la membrane qui dépend de la pression d'eau (piézométrie).

3.3.1.5 MEMS

Les microsystèmes électromécaniques MEMS (Micro Electro Mechanical System) ont été développés dans les années 90 en tirant avantageusement profit du développement de la micro-électronique. Un MEMS (Figure 3.13) est un circuit intégré électronique comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques. Comme pour les capteurs électriques, la transduction peut se faire de façon capacitive, piézoélectrique, piezorésistive ou chimique. Le développement des MEMS



Figure 3.13 – Capteur inclinométrique MEMS (source : Meggitt sensorex)

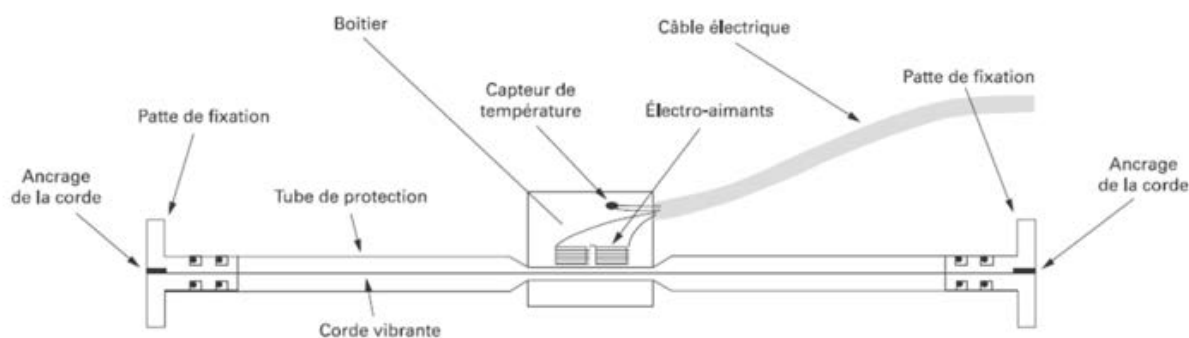


Figure 3.14 – Extensomètre à corde vibrante (source : Telemac)

3.3.1.7 Fibre optique

Une technologie plus récente voit ses applications se développer ces dernières années : celle des capteurs optiques. Les déformations et températures peuvent être mesurées directement, et les contraintes et déplacements indirectement, par différentes technologies permettant d'effectuer des mesures ponctuelles par réseaux de Bragg, ou réparties (réflectométrie Raman, Brillouin et Rayleigh).

Un réseau de Bragg (Figure 3.15) est constitué par une variation périodique de l'indice de réfraction inscrite le long du cœur d'une fibre optique. Un réseau de Bragg est identifié par sa longueur d'onde λ . Les effets de l'inscription d'un réseau de Bragg le long d'une fibre optique sont de réfléchir une longueur d'onde prédéterminée du faisceau lumineux tout en se laissant traverser par les autres longueurs d'onde. La longueur d'onde réfléchie satisfait les conditions de Bragg faisant intervenir des paramètres sensibles aux variations de température et de déformation auxquelles est soumise

la fibre optique. Ainsi en imposant un faisceau lumineux le long d'une fibre optique sur laquelle des réseaux de Bragg ont été inscrits, il est possible de mesurer les variations de déformation et de température du milieu environnant la fibre optique.

Les rétrodiffusions Brillouin, Rayleigh et Raman sont des processus de diffusion naturels associés à la propagation de la lumière dans un matériau tel que la fibre optique (Figure 3.16). L'interaction entre la lumière incidente et le milieu dans lequel elle se propage génère de la lumière diffuse qui se traduit soit par une modification de la fréquence (ou longueur d'onde) pour la diffusion Brillouin, soit par une modification d'amplitude du signal pour la diffusion Raman, par rapport au rayon lumineux incident. L'analyse des pics de rétrodiffusion Brillouin, Rayleigh ou Raman de la lumière dans les fibres optiques permet ainsi de réaliser des mesures de déformation et de température en tout point de la fibre.

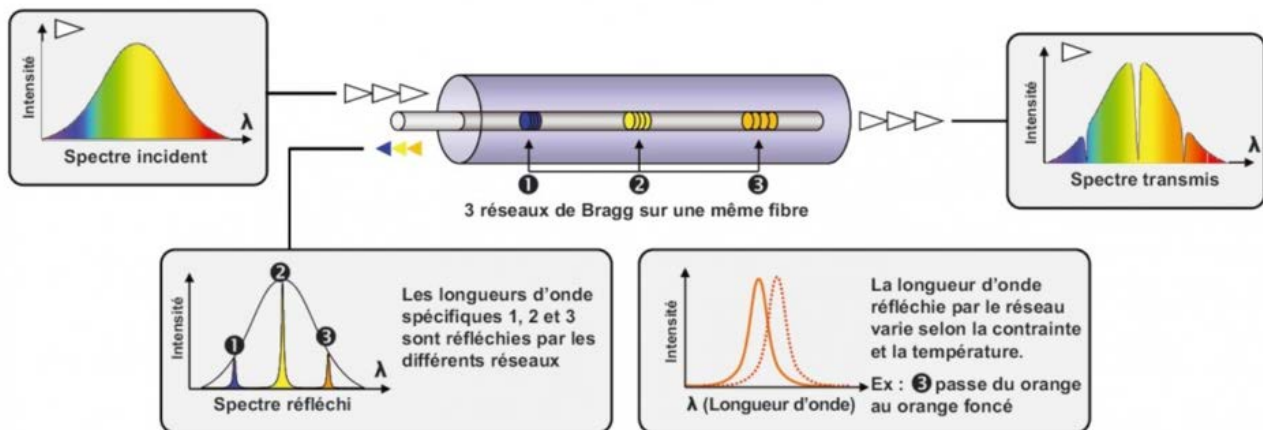


Figure 3.15 – Fonctionnement d'un réseau de Bragg

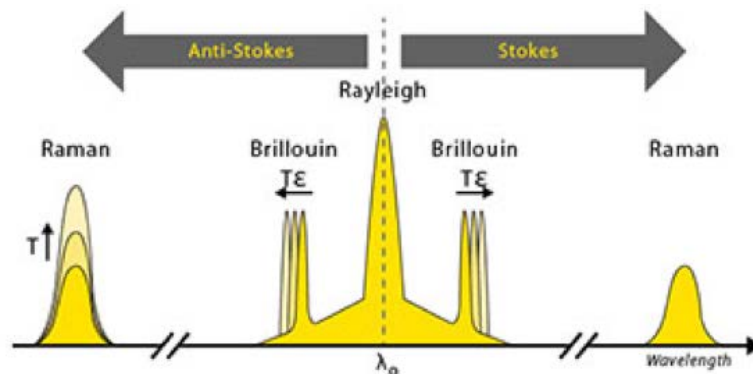


Figure 3.16 – Principe de la rétrodiffusion optique

Les technologies de rétrodiffusion Brillouin et Rayleigh sont utilisées pour détecter les déformations et les variations de température, respectivement, sur de longues distances avec une résolution spatiale métrique et sur des distances inférieures à 100 m avec une résolution spatiale millimétrique. Ces technologies ne nécessitent pas l'utilisation de capteurs individuels puisque les mesures de déformation et de température sont fournies par une fibre optique standard. Il est possible de mesurer des déformations à partir de 0,01 % et des variations de température inférieures à 1°C.

La technologie de rétrodiffusion Raman est quant à elle utilisée pour détecter de très faibles variations de température (0,1 °C) avec une résolution spatiale inférieure au mètre sur des distances de plus de 10 km.

Une autre technique basée sur la fibre optique peut être utilisée pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques ; il s'agit de la technologie Distributed Acoustic Sensor (DAS). Le principe est d'exploiter les défauts présents intrinsèquement dans la fibre optique pour rétrodiffuser une partie du signal lumineux lorsque la fibre est soumise à une vibration. La fibre est, dans ce cas, utilisée comme un capteur d'onde acoustique ou sismique (géophones...). Cette technique peut être utilisée pour caractériser les vitesses sismiques des terrains constituant l'ouvrage. Elle peut ainsi mettre en évidence des zones de décompression et caractériser leur évolution dans le temps.

3.3.2 CAPTEURS AVEC OU SANS CORPS D'ÉPREUVE

Certains capteurs peuvent directement mesurer une grandeur physique : un extensomètre à corde vibrante par exemple peut mesurer directement une variation de longueur entre deux points. Une même corde vibrante peut aussi être installée sur un corps d'épreuve : une membrane qui se déforme sous l'action d'une pression par exemple pour mesurer indirectement cette pression. Les appareils à corps d'épreuve doivent être étalonnés en laboratoire pour établir la relation entre la membrane qui se déforme et la grandeur à mesurer qui agit sur la membrane.

3.3.3 SIGNAL DE SORTIE

Les signaux de mesure diffèrent selon les technologies de capteurs employées. Sont principalement utilisés en géotechniques : les signaux en tension, en courant, en fréquence, optiques....

Les capteurs en tensions couramment utilisés dans l'industrie pour leur simplicité d'exploitation s'avèrent parfois moins adaptés en géotechnique où les longueurs de câbles sont souvent importantes, ce qui entraîne une atténuation qui est source d'erreurs de mesure, augmentant l'incertitude.

Le signal en courant 4-20 mA est très peu sensible aux perturbations électromagnétiques, et n'est pas altéré par la longueur du câble. L'alimentation (en tension) du capteur peut cohabiter sur le même câble et une variation de la tension d'alimentation n'a pas d'influence sur le signal de mesure. Le talon de 4 mA permet d'assurer l'alimentation du capteur et d'avoir une information de fonctionnement. Cette technique a cependant un coût énergétique qu'il faut considérer dans la conception d'un système d'instrumentation autonome.

La mesure de fréquence (variation de fréquence) utilisée par exemple dans les dispositifs à corde vibrante présente de nombreux avantages, comparée à la mesure de tension. D'un point de vue métrologique, la fréquence est une des grandeurs électriques les mieux maîtrisées. Les perturbations électromagnétiques agissant sur l'amplitude du signal n'ont aucun effet sur la valeur de la fréquence du signal. Comme pour le courant, ce signal peut être exploité sur de grandes longueurs de câble, avec des limitations au moment où l'amplitude ou la forme du signal sont trop altérées.

Les signaux numériques sont utilisables pour des capteurs spécifiques ayant une électronique embarquée. Ces capteurs « intelligents » apportent un autre mode de transmission de la mesure. Ils s'appuient sur la numérisation et des protocoles de communication standardisés (par exemple ModBus, SDI-12, Hart, FieldBus...). Ces signaux sont très bien adaptés pour l'industrie car ils ont un réel intérêt pour une grande densité de capteurs. Cette densité est moins fréquente dans l'auscultation géotechnique courante rendant l'utilisation de ces capteurs numériques moins intéressante, sauf dans certains cas spécifiques, par exemple, ceux des chaînes inclinométriques automatiques.

Les signaux optiques sont des signaux réfléchis par des capteurs ponctuels photo-inscrits sur la fibre : une longueur d'onde réfléchie dans le cas d'un réseau de Bragg, ou par la lumière rétrodiffusée d'une onde incidente sur les imperfections de la silice dans le cas des technologies optiques continues. Ces signaux sont directement proportionnels aux variations de longueurs subies par la fibre optique localement engendrées par des variations de température et/ou des actions mécaniques.

3.3.4 TRANSFORMATION EN MESURES PHYSIQUES

Le passage de la mesure électrique, fréquentielle, optique... enregistrée par le capteur à la mesure physique (déformation, contrainte, pression...) est un point essentiel. Il requiert de connaître la courbe d'étalonnage du capteur et de sa sensibilité aux paramètres environnementaux. Les Figures 3.17a et 3.17b présentent respectivement une courbe d'étalonnage d'un capteur de pression totale 4-20 mA et l'équation de transformation utilisée pour un extensomètre à corde vibrante. La courbe d'étalonnage est donnée à une température et une pression contrôlées (Figure 3.17a). Si un ou des facteurs affectent la mesure, une correction doit être apportée par exemple pour la mesure d'un extensomètre à corde vibrante sensible aux variations de température (Figure 3.17b).

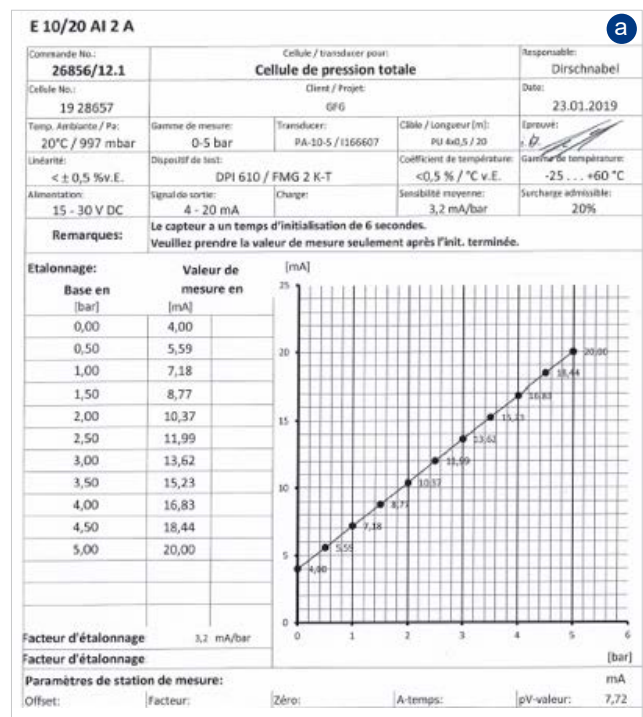
3.4 LA MESURE PHYSIQUE

3.4.1 CARACTÉRISTIQUES MÉTROLOGIQUES

Il est important de définir quelques termes métrologiques pour comprendre les fiches techniques des capteurs et des systèmes d'acquisition qui sont données dans les rapports d'installation. On retrouve toutes les définitions détaillées dans le Guide ISO - IEC Guide 99(2007) - International Vocabulary of Metrology (versions française et anglaise).

La sensibilité d'un appareil est le rapport entre le déplacement de l'indicateur du capteur et la variation de la grandeur qu'il mesure.

La résolution est la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante.



$$\Delta \mu \varepsilon = [((f_i - f_0)^2 \cdot 10^{-3}) \times G] - [(T_i - T_0) \times F_T]$$

f_i = fréquence de vibration de la corde en Hertz pour la mesure
 f_0 = fréquence de vibration de référence de la corde en Hertz
 G : facteur de jauge usine indiqué sur le certificat du capteur
 F_T : facteur thermique
 T_0 : Température de référence
 T_i : Température lors de la mesure

Figure 3.17 - a) courbe d'étalonnage d'un capteur de pression, b) équation pour un extensomètre à corde vibrante.

Des tests de qualification pour justifier les capteurs à utiliser peuvent s'avérer utiles afin de s'assurer que les exigences métrologiques requises par le projet d'instrumentation sont bien respectées par le capteur. Il s'agit par exemple de contrôler en laboratoire ou sur le terrain le respect des caractéristiques fournisseur en matière de répétabilité, exactitude, sensibilité thermique, robustesse vis-à-vis des conditions d'utilisation projetées...

Pour qualifier les mesures et les instruments de mesure, plusieurs dizaines de termes existent. Pour faciliter la lecture de ce document, nous définissons ici les principaux.

Le **mesurage** est l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur.

Le **mesurande** est la grandeur que l'on veut mesurer.

La **précision** permet de définir la qualité globale d'une mesure.

Le terme précision, couramment utilisé dans le langage commun, n'existe pas en métrologie. Il s'agit d'un faux-ami du terme anglais « precision », qui est traduit en français par fidélité.

La **fidélité** définit la qualité d'un instrument de mesure qui, pour une même grandeur, mesurée de façon répétée dans des conditions spécifiées, donne un même résultat.

L'**exactitude** ou **justesse** (« accuracy » en anglais) définit la conformité de la mesure par rapport à la valeur vraie. Il s'agit d'une notion qui n'est pas vraiment nécessaire en monitoring, puisque nous mesurons les variations par rapport à un état initial. Ainsi dans le cas d'un capteur inclinométrique sur une structure, nous mesurons les variations d'inclinaison par rapport à la position initiale ; nous ne mesurons généralement pas l'inclinaison absolue de la structure.

La **résolution** est, de manière simplifiée, le nombre de chiffres après la virgule (nombre de chiffres significatifs). Il s'agit de la plus petite variation de la grandeur mesurée qui produit une variation perceptible de l'indication correspondante. La résolution des capteurs est généralement très élevée. Cependant, dans le cadre du monitoring, cette indication est peu utile. On évitera donc de comparer les capteurs sur la base de leur résolution.

La Figure 3.18 présente de façon schématique les différences entre la justesse et la fidélité des mesures.

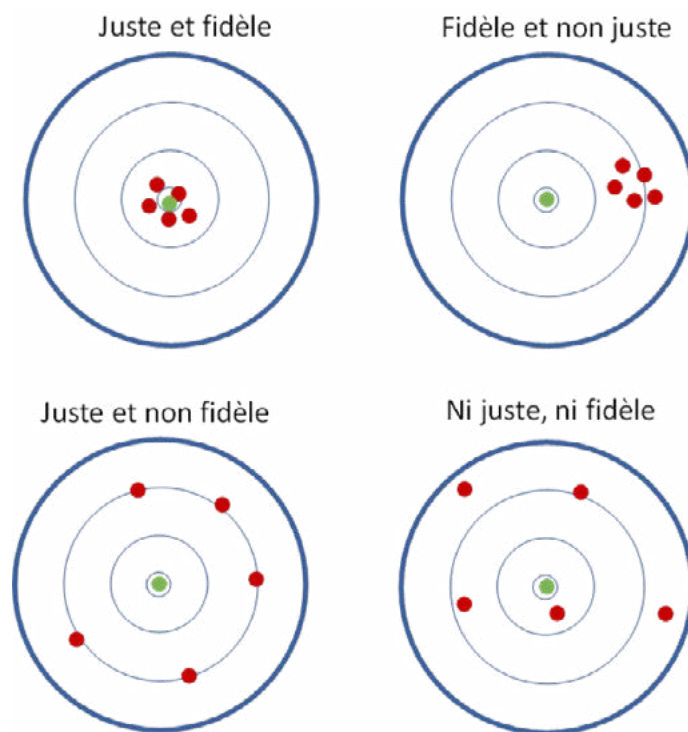


Figure 3.18 - Représentation des caractéristiques métrologiques.

Les ouvrages géotechniques sont parfois suivis sur une grande période et il est important de considérer dans ce cas la possible dérive métrologique des capteurs installés. Dans l'industrie, pour compenser ce phénomène, il est possible de calibrer les capteurs régulièrement en les réétalonnant. Cela est moins possible dans les ouvrages géotechniques pour lesquels les capteurs sont souvent inaccessibles. C'est donc l'analyse des mesures en fonction du comportement de l'ouvrage qui peut permettre de détecter une dérive et de la corriger.

Dans l'exemple de la Figure 3.19, le capteur était accessible : la cellule piézométrique a subi une dérive d'environ 2 m sur le niveau piézométrique en 8 ans, puis a fait l'objet d'un recalage en 2011 et a été changée en 2016.

3.4.2 ERREUR ET CORRECTION

Une erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée d'une grandeur et une valeur de référence. Cette erreur a deux composantes :

- l'erreur systématique qui demeure constante, elle s'estime par un biais de mesure, elle peut être corrigée par un simple décalage du zéro ou une double mesure (retournement d'une sonde inclinométrique lors du second passage par exemple),
- l'erreur aléatoire qui varie de façon imprévisible et qui peut être réduite en multipliant les mesures.

3.4.3 INCERTITUDE DE MESURES

L'incertitude de mesure est un terme normalisé : « paramètre associé au résultat d'un mesurage qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande ». Ce paramètre est investigué sur la base de plusieurs composantes influant sur le résultat de la mesure : main d'œuvre, méthode, moyen, environnement...

La connaissance de l'incertitude globale de la mesure, une fois qu'elle a été estimée par une démarche métrologique sur les principaux paramètres surveillés, permet une interprétation pertinente.

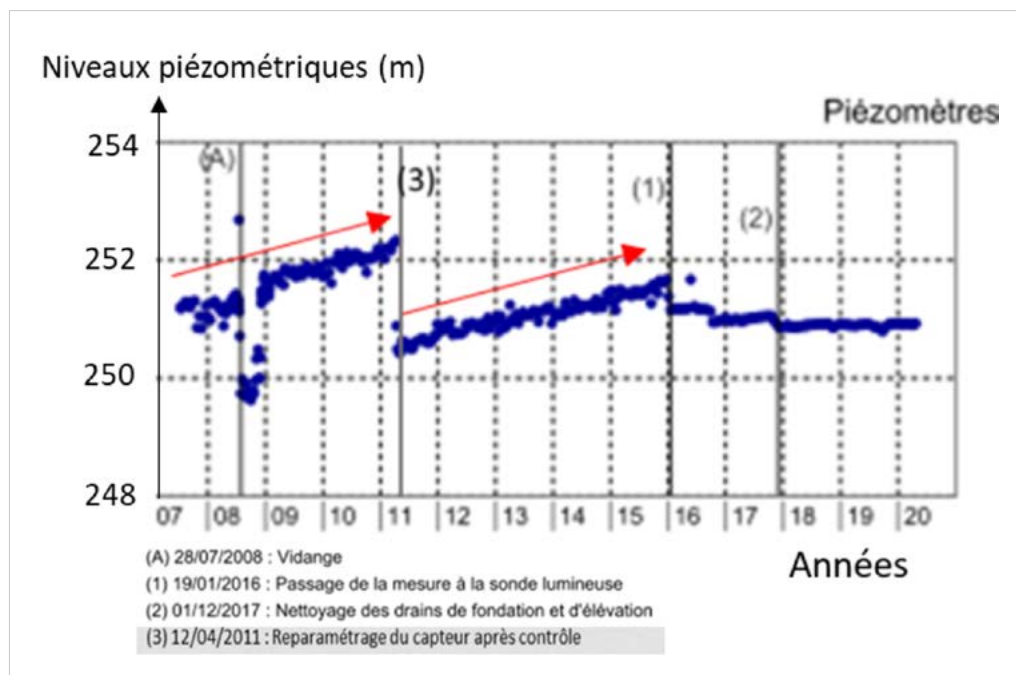


Figure 3.19 - Exemple de la dérive d'une cellule piézométrique.



4 CHOIX DES CAPTEURS ET MESURES INTÉGRANTES

- 4.1 GRANDEURS MESURÉES
- 4.2 CHOIX DE TECHNOLOGIE D'INSTRUMENTATION POSSIBLE
- 4.3 AMPLEUR SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'INSTRUMENTATION
- 4.4 CONTEXTE DE MISE EN ŒUVRE ET D'EXPLOITATION DE L'INSTRUMENTATION
- 4.5 FACILITE D'USAGE, DE TRAITEMENT ET D'INTERPRETATION
- 4.6 AIDE AU CHOIX DES SOLUTIONS

4 CHOIX DES CAPTEURS ET MESURES INTÉGRANTES

Dans un projet d'instrumentation, il est important de définir avec soin les besoins, notamment en termes de plage de mesure mais également de fidélité de la mesure (définie au chapitre précédent). On se référera ici aux chapitres 2 et 6 pour la définition de l'instrumentation en fonction des objectifs et du type d'ouvrage.

Il est bien sûr nécessaire de prendre en compte un ensemble de paramètres pouvant impacter le choix ultime du chef de projet. Parmi ces paramètres, on retiendra la technologie, le type de mesure (avec une mesure directe ou bien indirecte, en dérivant une autre valeur mesurée), le contexte de l'opération, tenant compte de la durée des observations (phase travaux / phase exploitation), la densité (spatiale comme temporelle) des mesures, l'intrusivité de la solution et les conditions du chantier / projet (coactivité notamment, mais aussi conditions climatiques).

La mise en œuvre de la solution, en termes de simplicité et de rapidité notamment, ainsi que sa facilité d'utilisation et du traitement de la mesure et de l'interprétation des données sont également des critères de choix.

Enfin, le coût de la solution est à prendre en compte également : il est néanmoins difficile de communiquer des informations précises à ce sujet et valables durant plusieurs années, le prix des solutions de monitoring dépendant à la fois de la technologie, de son niveau de maturité et de démocratisation, mais aussi de la disponibilité des composants, des frais de transports, des quantités commandées, etc.

Après une partie descriptive, ce chapitre synthétise sous forme de trois tableaux les avantages et les inconvénients de chaque type de capteurs, pour les trois grandes familles de mesures identifiées, à savoir les mesures dites géométriques (déplacements, déformations, inclinaisons), les mesures mécaniques (forces, contraintes), ainsi que les mesures hydrauliques (niveau piézométrique, teneur en eau, succion, pression...).

4.1 GRANDEURS MESURÉES

Les grandeurs mesurées, les plages de mesures usuelles et la fidélité en conditions de chantier, sont les premiers paramètres d'entrée de tout projet d'instrumentation. Les grandeurs mesurées néces-

saires au monitoring des principaux ouvrages sont listées dans le chapitre 6, tandis que les principes de mesures sont détaillés dans le chapitre 3.

4.2 CHOIX DE TECHNOLOGIE D'INSTRUMENTATION POSSIBLE

Le choix de la technologie retenue se fait selon les besoins du projet et le contexte de celui-ci. En effet, pour une même mesure attendue, il est possible d'utiliser plusieurs technologies différentes, comme discuté au chapitre 3.

Pour des raisons de facilité et/ou d'intrusivité notamment, il est possible de réaliser des mesures dites directes, ou bien indirectes, ce qui sous-entend de dériver une première valeur pour en obtenir la valeur finale.

4.3 AMPLEUR SPATIALE ET TEMPORELLE DE L'INSTRUMENTATION

La durée d'utilisation des moyens de mesure déployés est une donnée d'entrée importante. Il est crucial de prévoir des opérations de maintenance préventives et curatives dès l'installation et sur la durée du suivi. Toutefois, au-delà d'un certain temps de déploiement (considéré comme de l'ordre de 2 ans dans les tableaux), il peut être nécessaire de prévoir un remplacement de certains systèmes ou au moins des opérations de maintenance spécifiques.

4.3.1 DENSITÉ SPATIALE

Il est parfois nécessaire de réaliser des mesures en différents points d'une structure ou sur un site. Si la densité spatiale est importante, un certain nombre de solutions seront à privilégier, pour différentes raisons :

- intrusivité excessive (1 capteur = 1 câble), pouvant par exemple entraîner localement des défauts de bétonnage, ou plus simplement une occupation trop importante et complexe de l'espace du projet ;
- mise en œuvre trop longue et/ou trop compliquée et également trop coûteuse (temps de préparation et d'instrumentation) ;
- temps d'interrogation trop importants pour un grand nombre de capteurs, et nécessitant donc soit une dégradation de la densité temporelle, soit la présence d'une deuxième station d'acquisition.

4.3.2 DENSITÉ TEMPORELLE

Il peut être nécessaire de faire un suivi en continu à des fréquences relativement élevées de structures ou de leur environnement. Dans ce cas, certaines solutions devront être écartées, pour des questions de temps d'interrogation trop importants notamment.

Les solutions électriques avec mesures locales restent dans ce cas de figure les plus pertinentes.

4.4 CONTEXTE DE MISE EN ŒUVRE ET D'EXPLOITATION DE L'INSTRUMENTATION

4.4.1 INTRUSIVITÉ

La notion d'intrusivité abordée ici est à appréhender sous deux angles différents. On parlera d'intrusivité métrologique lorsque la taille des capteurs sera suffisamment importante pour impacter la mesure, ou la réponse de l'élément instrumenté, et au contraire d'intrusivité spatiale lorsque la présence des capteurs ou des éléments connexes est susceptible d'impacter les travaux et leur qualité. Il peut s'agir aussi de l'intrusivité visuelle dans le cas par exemple, d'ouvrages ou de sites classés.

Certaines solutions présentent l'avantage d'être des solutions de mesures déportées. Leur intrusivité est pour ainsi dire nulle, mais d'autres inconvénients apparaissent avec la distance :

- perte de précision ;
- influence des conditions météorologiques ;
- influence de l'environnement chantier.

En revanche, les mesures locales sont souvent bien plus fidèles, mais nécessitent la présence d'un capteur au niveau du point de mesure. Cela peut être problématique, puisque souvent chaque capteur doit être alimenté. Dans le cas où le projet nécessiterait une densité de mesure spatiale importante (voir 4.3), il peut être difficile de gérer une solution à mesure locale.

Il est également possible, afin de limiter l'intrusivité de l'instrumentation, de réaliser des mesures dites indirectes : par exemple, il peut être judicieux de mesurer des déformations pour ensuite revenir aux efforts et/ou aux contraintes par le biais du module de déformation du matériau dans lequel le capteur est placé, les solutions de mesures de déformations étant bien moins intrusives que les solutions de mesure des efforts et des contraintes. La nature de la mesure (au sens locale / globale) devra être

également prise en compte, celle-ci influençant grandement le choix du module) [Szymkiewicz et al. 2021].

4.4.2 IMPACT DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Les points suivants devront être étudiés avec attention :

- la présence d'activités connexes durant la phase d'instrumentation ainsi que pendant toute la phase de monitoring et qui pourront engendrer de multiples nuisances : vibrations, évolution de l'implantation des ateliers de travail, passages fréquents d'engins ou de personnes aux alentours de l'instrumentation et sur les câbles, rendant parfois impossibles telle ou telle solution de monitoring ;
- les conditions météorologiques ou d'exposition, susceptibles de varier très fortement et pouvant donc induire la nécessité d'une correction en température des mesures, ou exclure certaines méthodes de mesures déportées.

D'autres points tels que la taille (superficie) de l'opération doivent être pris en compte, afin de recommander des solutions adaptées.

Enfin, la situation géographique du projet et son accessibilité devront être considérées lors de la définition de la solution de monitoring : en effet, dans des environnements difficiles d'accès ou très éloignés des bureaux de l'entreprise, il sera nécessaire de penser à la fois à la solution de monitoring, mais également aux moyens de l'alimenter (panneaux solaires, batteries...) et à la récupération des données régulièrement, voire en temps réel (carte 4G, IoT...).

4.5 FACILITÉ D'USAGE, DE TRAITEMENT ET D'INTERPRÉTATION

Ces trois notions sont essentielles pour le projet d'instrumentation, et sont forcément intrinsèquement liées.

La facilité d'usage (déploiement et interrogation) est un des tout premiers critères de choix : une solution peut être simple à déployer mais nécessiter un grand temps de traitement ainsi qu'une formation du personnel poussée, tandis qu'une autre peut être beaucoup plus difficile à déployer mais plus simple d'interprétation.

4.6 AIDE AU CHOIX DES SOLUTIONS

Les trois tableaux 4.1 à 4.3 ci-dessous sont destinés à permettre aux acteurs du projet de choisir les solutions de monitoring les plus adaptées à leurs besoins.

Les différentes abréviations intégrées dans ces tableaux sont présentées ci-dessous :

cv	cordes vibrantes
fo	fibre optique
e	électrique (LVDT, potentiomètre, servo...)
m	mesure manuelle
a	mesure automatique

Les critères d'évaluation dans ces tableaux sont ceux cités précédemment, et se lisent comme suit :

--	très mauvais / vraiment non adapté
-	mauvais / peu adapté
+	bon / adapté
++	très bon / très adapté

Tableau 4.1a : Solutions de mesures des grandeurs physiques géométriques : déplacements

Grandeur mesurée	Plage de mesure usuelle	Ordre de grandeur de fidélité sur site	Choix possibles		Type de mesure	Adapté suivi long terme (> 2 ans) sans maintenance	Densité temporelle	Densité spatiale	Intrusivité	Impact des conditions environnementales et du projet sur la mesure	Facilité d'usage, de traitement et d'interprétation	Prix	Commentaire
Déplacement	250 mm max	0,25 % P.E.	Comparateur, fissuromètre	Électrique, corde vibrante ou fibre optique	directe	- (e) / + (cv)(fo)	++ (a) / -- (m)	-	-	-	++	+	
	2 m	0,5 % P.E.	Capteur à fil		directe	-	++ (a) / -- (m)	--	--	--	+	+	
	50 m	0,2 mm	Distancemètre optique		directe	-	++	-	+	--	++	+	
	100 m	1 mm (a) / 3 mm (m)	Station totale		directe	-- (a) / ++ (m)	+ (a) / -- (m)	++	++	--	-	-	Prix faible / point fort, maintenance régulière nécessaire
	2 m	0,5 mm	Nivellement		directe	++	--	++	++	--	+	+	
	100 mm	1 mm sur durée courte	Laser tournant avec cellules actives		directe	--	++	+	-	--	++	--	Adaptée au suivi court (< 1 jour) et phénomènes rapides
	1 m	1 mm	Tassomètre hydraulique	de structure	indirecte	+	+	+	-	-	+	-	
	10 m	5 mm		enterré	indirecte	-	+	-	-	+	+	-	
	10 m	10 mm		profilomètre	indirecte	+	--	+	-	+	+	+	
	100 mm	1 mm	Extensomètre de forage	à tige	directe	+	++ (a) / -- (m)	-	-	+	-	-	
	plusieurs mètres	5 mm		magnétique	directe	+	--	-	-	+	-	+	
	plusieurs mètres	5 mm	GPS de monitoring		indirecte	+	-	-	-	--	-	--	très hautes fréquences possibles au détriment de la précision
	plusieurs mètres	2-3 mm	INSAR (radar satellite)		indirecte	++	--	++	++	++	--	-	mesure dans l'axe de visée du satellite
	1 m	0,1 mm	Radar sol		indirecte	--	+	++	++	++	--	--	mesure dans l'axe de visée de l'appareil
	plusieurs mètres	1 à 2 mm	LIDAR (scanner)		indirecte	-	-	++	++	+	--	--	mesure dans l'axe de visée de l'appareil

Tableau 4.1b : Techniques de mesures des grandeurs physiques : déformations, inclinaisons et vibrations

Grandeur mesurée	Plage de mesure usuelle	Ordre de grandeur de fidélité sur site	Choix possibles		Type de mesure	Adapté suivi long terme (> 2 ans) sans maintenance	Densité temporelle	Densité spatiale	Intrusivité	Impact des conditions environnementales et du projet sur la mesure	Facilité d'usage, de traitement et d'interprétation	Prix	Commentaire
Déformation	3000 µdef	2 à 3 µdef	Jauge de déformation électrique		indirecte	-	++	-	-	+	-	+	mise en place délicate
	3000 µdef	2 à 3 µdef	Jauge de déformation à corde vibrante		indirecte	+	++	-	-	+	+	+	
	3000 µdef	2 à 3 µdef	Fibre optique	Bragg	indirecte	++	++	-	-	+	-	-	
	10000 µdef	2 à 3 µdef		Rayleigh	indirecte	++	++	++	-	-	--	--	mesure continue tous les mm sur 100 m max
	10000 µdef	20 µdef		Brillouin	indirecte	++	+	+	-	-	--	--	mesure continue tous les 200mm sur 1 km max, et 500 mm jusque 10 km
Inclinaison	+/- 15°	0,005 °	Clinomètre	Mems	indirecte	++	++	-	-	-	-	+	
	+/- 30°	1 à 2 mm / 30 m	Inclinomètre de forage	Mems / servo	indirecte	+ (a) / ++ (m)	+ (a) / -- (m)	- (a) / + (m)	-	+	-	-	
Vibration			Accéléromètre	Mems	directe								
	+/- 50 mm/s	0,1 mm/s	Géophone	Mems		++	++	-	-	++	+	-	

Tableau 4.2 : Techniques de mesures des grandeurs physiques : efforts et contraintes

Grandeur mesurée	Plage de mesure usuelle	Ordre de grandeur de fidélité sur site	Choix possibles		Type de mesure	Adapté suivi long terme (> 2 ans) sans maintenance	Densité temporelle	Densité spatiale	Intrusivité	Impact des conditions environnementales	Facilité d'usage, de traitement et d'interprétation	Prix	Commentaire
Effort	5000 kN	1 à 2 % P.E.	Capteur de force		directe	++	+	-	--	-	+	-	Le capteur est nettement plus précis que la fidélité annoncée ici mais les problèmes d'alignement/ planéité impactent fortement la mesure
		2 à 3 µdef	Jauge de déformation électrique		indirecte	-	++	-	-	+	-	+	
		2 à 3 µdef	Jauge de déformation à corde vibrante		indirecte	++	+	-	-	+	+	+	
		2 à 3 µdef		Bragg	indirecte	++	+	-	-	+	-	-	-
		2 à 3 µdef	Fibre optique	Rayleigh	indirecte	++	++	++	-	-	--	--	--
		20 µdef		Brillouin	indirecte	++	+	+	-	-	--	--	--
Contrainte	10 MPa	1% P.E.	Cellule de pression totale		directe	++	+	-	-	+	-	+	Capteur controversé dans le sol : difficile de ne pas modifier le champ de contraintes
		2 à 3 µdef	Jauge de déformation à corde vibrante		indirecte	+	+	-	-	+	+	+	
		2 à 3 µdef		Bragg	indirecte	++	+	-	-	+	-	-	
		2 à 3 µdef	Fibre optique	Rayleigh	indirecte	++	++	++	-	-	--	--	
		20 µdef		Brillouin	indirecte	++	+	+	-	-	--	--	

Tableau 4.3 : Techniques de mesures des grandeurs physiques : niveaux d'eau et pressions interstitielles

Grandeur mesurée	Plage de mesure usuelle	Ordre de grandeur de fidélité sur site	Choix possibles		Type de mesure	Adapté suivi long terme (> 2 ans) sans maintenance	Densité temporelle	Densité spatiale	Intrusivité	Impact des conditions environnementales	Facilité d'usage et de traitement et d'interprétation	Prix
Niveau d'eau	plusieurs mètres	1 cm	Sondes de niveau d'eau			++	--	-	-	+	++	++
	30 m	0,5 % P.E.	Piézomètre automatique			++	++	-	-	+	++	+
Pression interstitielle	5 MPa	0,5 % P.E.				++	++	-	-	+	++	+
Débit	0-100 m ³ /h	5 à 10 % du débit	Compteur volumétrique à hélice		indirecte					+	++	+
			Débitmètre électromagnétique	Ultrason	directe							
				Faraday	directe							
			Par caméra		indirecte	-	+	-	++	--	++	

5 GESTION DES MESURES, ANALYSE ET INTERPRETATION

5.1 PRINCIPES D'ACQUISITION ET DE GESTION DES MESURES

5.2 METHODES D'ANALYSE

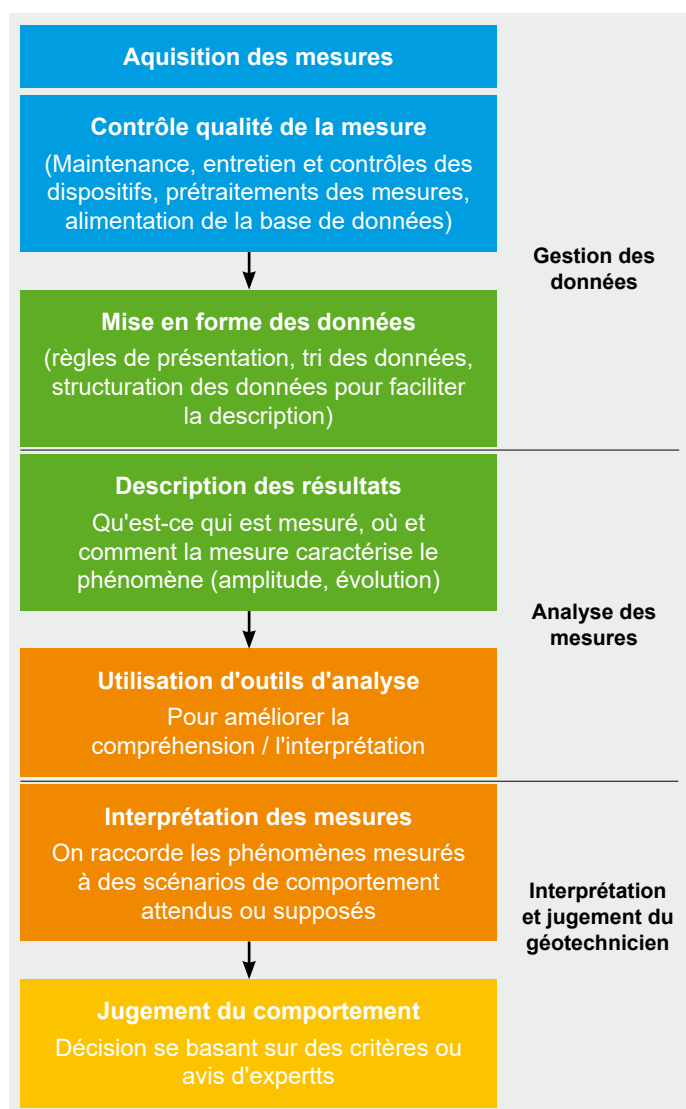
5.3 INTERPRETATION

5 GESTION DES MESURES, ANALYSE ET INTERPRÉTATION

Ce chapitre s'intéresse à l'ensemble de la chaîne de la mesure, de l'acquisition de la donnée jusqu'à l'interprétation de la mesure.

Les différentes étapes sont présentées sous forme de logigramme à la Figure 5.1 et détaillées dans les parties suivantes :

- acquisition et gestion des mesures (5.1) ;
- méthodes d'analyse des mesures (5.2) ;
- Interprétation (5.3).



Ces trois étapes ont pour objectif, par exemple dans le cas de l'instrumentation d'un barrage ou d'une digue, d'examiner, de manière automatique, l'évolution de nombreux paramètres. Après la sélection des paramètres à mesurer (par exemple tassements, pressions interstitielles, débit de fuite, ...),

de la fréquence des mesures, du choix des capteurs et de leurs emplacements viennent les trois étapes citées ci-contre qui consistent en :

- **Étape d'acquisition et de gestion des mesures** : initialement acquises sous forme de signaux électriques et/ou magnétiques, les mesures saisies automatiquement sont stockées puis transférées vers un ordinateur où elles sont converties en grandeurs physiques compréhensibles et exploitables par l'ingénieur. Les mesures sont ordonnées sous forme d'une base de données de type « coordonnées-tassements-pressions interstitielles-débit-temps » afin de pouvoir les visualiser sous des formes graphiques (courbes d'évolution de chaque paramètre avec le temps, isovaleurs, ...).
- **Étape d'analyse des mesures** : dans cette étape, il s'agit de mettre en forme les mesures, de vérifier leur cohérence, de les représenter graphiquement et d'analyser les sens de variation de chaque paramètre (augmentation ou stabilisation des tassements, diminution des pressions interstitielles, ...).
- **Étape interprétation des mesures** : dans cette étape, il s'agit d'interpréter les résultats en termes de comportement de l'ouvrage, de comparer les mesures à ce qui est calculé et attendu, de comprendre éventuellement les différences, de repérer les zones critiques d'augmentation des tassements ou de dissipation anormale des pressions interstitielles et de conclure vis-à-vis du comportement futur de l'ouvrage et des dispositions à mettre en œuvre (par exemple diminuer/ augmenter la fréquence des mesures, compléter l'instrumentation, arrêter le suivi, prévoir des dispositions constructives permettant de stabiliser l'ouvrage si nécessaire).

5.1 PRINCIPES D'ACQUISITION ET DE GESTION DES MESURES

5.1.1 ACQUISITION DES MESURES

5.1.1.1 Mode d'acquisition

Il n'y a pas de mesure d'auscultation géotechnique sans acquisition de données fournies par des capteurs implantés sur l'ouvrage et à proximité.

On retiendra deux grands principes d'acquisition de mesures : **manuelle ou automatique**. Dans le

premier cas (acquisition manuelle), un opérateur réalise les mesures in situ en utilisant s'il le faut des modules d'interrogations et des terminaux de saisie de données portatifs. Dans le second cas, l'acquisition automatique est réalisée par des centrales d'acquisition sur site qui réalisent les mesures, les stockent et peuvent les transmettre à distance. Récemment beaucoup de capteurs intelligents (IoT – « Internet of Things ») embarquent de façon intégrée leur propre système d'acquisition automatique. On note aussi l'existence de l'acquisition **semi-automatique** : la centrale d'acquisition mesure seule et à une fréquence donnée, mais elle ne transmet pas automatiquement les résultats, un opérateur vient les télécharger sur la centrale.

Les modes d'acquisition vont principalement dépendre :

- de l'implantation et des contraintes associées ;
- des types de capteurs installés ;
- des besoins ou des contraintes de l'utilisateur.

5.1.1.2 Fréquence d'acquisition

La fréquence d'acquisition des mesures sera définie par le géotechnicien en fonction des enjeux et notamment l'estimation de la cinétique des phénomènes surveillés. Cette fréquence peut être variable en fonction de la période. La fréquence d'acquisition pourra également orienter sur le mode d'acquisition, sachant qu'il peut être retenu beaucoup d'options selon les cas :

- une mesure à périodicité journalière ou au-delà peut être faite manuellement par un opérateur en direct ou de manière déportée ;
- une mesure horaire ou infra-horaire nécessite une acquisition automatique ou semi-automatique (une centrale récupère les données vidées périodiquement par l'utilisateur) ;
- un suivi automatique en continu permet de gérer des alarmes lorsque la situation l'exige.

Les systèmes d'acquisition automatique offrent beaucoup de souplesse et de possibilité de paramétrage des acquisitions (à fréquence fixe ou déclenchée sur dépassement de seuil ; sur une durée d'acquisition définie...).

5.1.1.3 Implantation des capteurs

Le nombre de capteurs sur un ouvrage peut varier de quelques unités à plusieurs centaines (voir chapitre 6). Ainsi, selon le cas, le temps nécessaire

à l'acquisition des mesures peut fortement varier, de sorte qu'il est parfois préférable de l'automatiser.

Lorsque les capteurs sont inaccessibles, il est nécessaire de prévoir une acquisition (manuelle ou automatique) distante, pouvant se faire via des liaisons filaires ou sans-fil.

5.1.1.4 Types et interrogation des capteurs installés

De nombreux capteurs peuvent être utilisés pour la surveillance des ouvrages géotechniques (voir chapitres 3 et 4). Leur mode de fonctionnement (ou d'interrogation) impose généralement une technologie spécifique pour l'acquisition. Les signaux produits par les capteurs sont de type analogique ou numérique et s'il existe des standards que pratiquement tous les systèmes d'acquisition peuvent interroger (comme le signal tension 0-10V –par exemple- ou le signal courant 4-20 mA), il faudra s'assurer de disposer d'une acquisition compatible avec le type (ou l'ensemble des types) de capteurs installés.

Les mesures de phénomènes dynamiques demandent également des modes d'acquisition très spécifiques (comparativement aux capteurs statiques) car ces modes exigent des modules d'interrogation à haute fréquence. De même, certaines technologies sont très spécifiques comme les systèmes optoélectroniques permettant l'acquisition de mesure d'auscultation par fibre optique.

Il conviendra ainsi d'être particulièrement vigilant sur la robustesse du système d'acquisition (centrales d'acquisition) notamment dans le cas où différents types de capteurs et/ou modes d'acquisition sont mis en œuvre pour la surveillance d'un même ouvrage géotechnique.

5.1.1.5 Besoins de l'utilisateur

Selon l'usage souhaité, on pourra s'orienter vers des acquisitions manuelles (peu de capteurs, fréquence de mesure assez faible, durée d'instrumentation réduite) car on évite ainsi des coûts d'automatisation et de maintenance des systèmes électroniques. Ceci est également valable pour une instrumentation de courte durée limitée à quelques semaines par exemple (même si désormais les capteurs intelligents autonomes de type IoT semblent capables de proposer des solutions assez bon marché).

Dès que l'on souhaite faire une surveillance avec un nombre important de capteurs, à fréquence rapprochée, sur un ouvrage ou avec des capteurs difficiles d'accès, ... l'acquisition automatique sera privilégiée. Cela est vrai, a fortiori en cas de besoin de suivi dynamique avec des mesures en temps réel capables de générer des alarmes. L'automatisation est également à envisager s'il est souhaité d'instrumenter un ouvrage géotechnique d'importance, dans le cadre de son suivi long terme sur plusieurs années voire sur des décennies.

La fiabilité des systèmes dépend entre autres de leur niveau de complexité. En cas d'automatisation des mesures et de leur transmission (et de fait, un fort niveau de « disponibilité » de la donnée), il est nécessaire d'étudier le fonctionnement des systèmes d'alimentation des capteurs, des centrales d'acquisition, des voies de transmission des données, d'accès aux serveurs de stockage des données, ... et de prévoir le cas échéant des modes de fonctionnement redondants (en manuel, avec des alimentations de secours, des voies de transmission redondantes, ...). Dans cette analyse, la durée de vie attendue de l'instrumentation est un paramètre essentiel à prendre en compte.

5.1.2 GESTION DES MESURES

Le contrôle de la qualité de la mesure passe par des actions de maintenance et de contrôle à réaliser durant toute la période d'exploitation du système de mesure.

5.1.2.1 Maintenance et entretien

Dès la mise en place du dispositif de mesure, il est nécessaire de contrôler son fonctionnement ainsi que la qualité métrologique des mesures qu'il délivre depuis le capteur jusqu'à la base de données qui va archiver les données.

Une maintenance régulière, avec des actions et une périodicité définies, permet de maintenir le système en conditions opérationnelles, et ce même pour des mesures automatiques. On veillera à contrôler l'alimentation des capteurs, l'absence de dérive métrologique, l'absence de dégradations diverses qui pourraient fausser les mesures (notamment en cas de coactivité sur les chantiers pouvant causer l'endommagement, voire la destruction de capteurs, de câbles d'alimentation ou de transmission). Globalement le niveau d'exigence de cette

maintenance/surveillance du système doit être en adéquation avec :

- la fréquence retenue des mesures (un système automatique faisant une acquisition continue doit être capable d'alerter en cas de dysfonctionnement du système par perte d'alimentation par exemple) ;
- la sensibilité de la mesure (capteurs redondés ou non, précision / fidélité recherchée du capteur par rapport au phénomène surveillé...) ;
- la durée de l'instrumentation : un suivi long terme entraîne en effet un risque accru de dérive des capteurs, de pannes et de dégradations.

Au niveau de l'installation sur site, elle aura intérêt à être conçue de manière à éviter autant que possible des pannes usuelles avec l'usage de systèmes de protection (contre le vandalisme, l'humidité et l'entrée d'eau, la foudre, le gel via un chauffage, carter de protection contre les projections, les chutes de pierres, ...) qui améliorent nettement le niveau de fiabilité intrinsèque du système de mesure.

Ces actions de maintenance et d'entretien concernent l'ensemble de la chaîne de mesure.

En particulier, il sera essentiel de :

- nettoyer régulièrement la base de données (supprimer les mesures erronées, ne conserver que celles étant utiles) ;
- vérifier les capacités de stockage des données et les sauvegardes (sur site et/ou sur serveur) de façon permanente (par principe ou par sécurité) ou bien temporaire (pour/avant télétransmission) ;
- s'assurer du bon fonctionnement des transmissions des données (attention à la disponibilité des réseaux et au volume des données) ;
- s'assurer du bon fonctionnement de l'outil de (pré) visualisation (interface Homme Machine) ;
- avoir une attention sur la traçabilité des données (de la donnée brute à la mesure interprétée – qui peuvent être stockées sur site et/ou sur serveur) et des méta données associées à la mesure (date et heure, type d'acquisition, référencement du capteur associé...) ;
- veiller à la pérennité de l'accès à la base de données et aussi à sa cyber-sécurité.

5.1.2.2 Prétraitement et validation de la mesure

Une fois la donnée acquise, son exploitation nécessite des phases de traitement et d'analyse que l'on assimile souvent au « cycle de vie de la mesure ».

Le prétraitement constitue le prérequis nécessaire à l'exploitation de la donnée :

- Origine de la mesure : localisation, implantation du capteur, horodatage, paramètres de calibration du capteur permettant le passage de la mesure au phénomène physique recherché (exemple passage d'une mesure de courant par le capteur 4-20 mA d'une cellule piézorésistive à une pression en bar) ;
- Fiabilité de la mesure : les capteurs en place sont susceptibles de dysfonctionnements pouvant conduire à des mesures erronées (dérive, mesure aberrante...), les erreurs humaines de retranscriptions de mesures sont également possibles en cas d'acquisitions manuelles. Des tests de « normalité » et des contrôles d'appareillages périodiques permettent de maîtriser le système et garantir un certain niveau de fiabilité des mesures ;
- Facteurs d'influence : les mesures de phénomènes physiques (déformations, déplacements, pressions...) peuvent être influencées par des facteurs climatiques extérieurs qu'il convient de prendre en compte (en particulier la température du milieu, mais aussi les précipitations, l'humidité, le vent...). Ces mesures pourront parfois être corrigées (voir paragraphe 5.2.1, par exemple) notamment si on sait quantifier l'impact de ces facteurs extérieurs en les mesurant. Des influences liées à l'environnement de l'ouvrage peuvent également être présentes (fluctuation de nappes phréatiques, coefficients de marée, présence de trafic routier, travaux à proximité...).

En sortie de cette phase de prétraitement, les mesures peuvent ainsi être considérées comme fiables et validées métrologiquement et fonctionnellement.

5.1.2.3 Mise en forme des données

Les mesures ne pourront pas être interprétées si elles ne sont pas rigoureusement mises en forme

avec des principes d'édition tels que :

- le choix des modes de représentation graphiques ;
- le respect des échelles et des unités de mesures ;
- la transformation de la donnée capteur en donnée physique du phénomène suivi (voir Chapitre 3) ;
- le plan de localisation des capteurs ;
- la définition des règles de représentation des mesures (sens d'une valeur positive/négative par exemple).

La valorisation de la mesure passe également par son exploitation dans des outils de représentation qui facilitent l'analyse. On citera par exemple l'usage de traitements (méthode de krigeage, transformées de Fourier rapide...) conduisant, à des courbes d'iso-valeurs, des densités de puissances spectrales...

5.2 MÉTHODES D'ANALYSE

Afin de mener une interprétation fine des mesures d'auscultation, la mise en forme seule des données ne suffit pas toujours. En effet, selon la complexité du système étudié (interdépendance des données, volumétrie, variabilité temporelle et spatiale des mesures, incertitudes, ...) l'usage d'outils d'analyse des données va faciliter leur interprétation finale.

Plusieurs méthodes d'analyse sont succinctement décrites dans cette partie pour en donner les principes et en illustrer l'usage.

5.2.1 ANALYSES STATISTIQUES / PROBABILISTES

5.2.1.1 Analyses physico-statistiques utilisées pour les digues et barrages

La méthode d'analyse dite « HST : Hydrostatique Saisonnier Temporel », communément admise dans le domaine de l'auscultation des barrages depuis la fin des années 60 [Willm & Beaujoint 1967] est un exemple de traitement physico-statistique des données d'auscultation. Il vise à déterminer les effets hydrostatiques et saisonniers sur la mesure par recherche de corrélations multiples.

Le principe met à profit les mesures déjà réalisées, souvent assez nombreuses dès le début de l'exploitation d'un ouvrage, pour déterminer les effets sur les mesures des mouvements du plan d'eau et des

variations de température. Toute mesure d'auscultation de barrage Y_0 résulte ainsi de la superposition de 3 états, modélisés par trois fonctions additives dans le modèle :

- un état irréversible : l'évolution du phénomène dans le temps est une fonction $f_1(t)$ de type linéaire ou exponentielle du temps ;
- des états réversibles :
 - > l'effet de la charge hydrostatique h est une fonction $f_2(h)$ du type polynomial de la charge hydraulique ;
 - > l'effet de la répartition des températures T dans l'ouvrage est une fonction $f_3(S)$ de type trigonométrique afin de traiter la réponse thermique de l'ouvrage par une simple fonction saisonnière du temps (S = angle valant 0° le 1er janvier et 360° le 31 décembre).

Soit :

$$\begin{aligned}
 Y_0(t) &= f_1(t) + f_2(h) + f_3(S) + \varepsilon \\
 &= a_0 \\
 &\quad + a_1 e^{-t} + a_2 t \\
 &\quad + a_3 h + a_4 h^2 + a_5 h^3 + a_6 h^4 \\
 &\quad + a_7 \cos(S) + a_8 \sin(S) + a_9 \sin(2S) + a_{10} \cos(2S) \\
 &\quad + \varepsilon
 \end{aligned}$$

La détermination des coefficients a_i est obtenue par régression linéaire (réduction des moindres carrés) à partir d'un échantillon de mesures suffisant, ainsi que les données de cote de retenue h et date au jour des mesures (variables explicatives nécessaires à l'établissement du modèle).

Le modèle permet ainsi de déterminer à partir d'une chronique de mesures "brutes", des mesures "corrigées" des effets hydrostatiques et saisonniers comme illustré à la Figure 5.2 sur des mesures de déplacements d'un barrage.

5.2.1.2 Autres analyses statistiques et utilisation de l'intelligence artificielle

Des analyses statistiques similaires à celle décrite ci-avant peuvent être utilisées pour, par exemple, isoler l'effet de la température sur des structures autres que des barrages.

La multiplication des puissances de calcul permet aussi de développer des méthodes utilisant l'intelligence artificielle. Cette appellation fait référence à des outils d'analyse statistique puissants, purement mathématiques ou algorithmiques. En réalité on parle plutôt de « Machine Learning » (apprentissage automatisé) plutôt que d'intelligence artificielle dans son sens le plus noble.

En machine learning, des sachants/experts donnent à l'ordinateur des indications sur les relations possibles, et l'algorithme détecte et affine le poids relatif de ces relations adaptant son algorithme.

Sans aucune donnée d'entrée autre qu'un grand ensemble de mesures, on est dans le domaine du « Deep Learning » (apprentissage profond), l'ordinateur devant se charger de trouver les éventuelles corrélations sans aucune indication préalable.

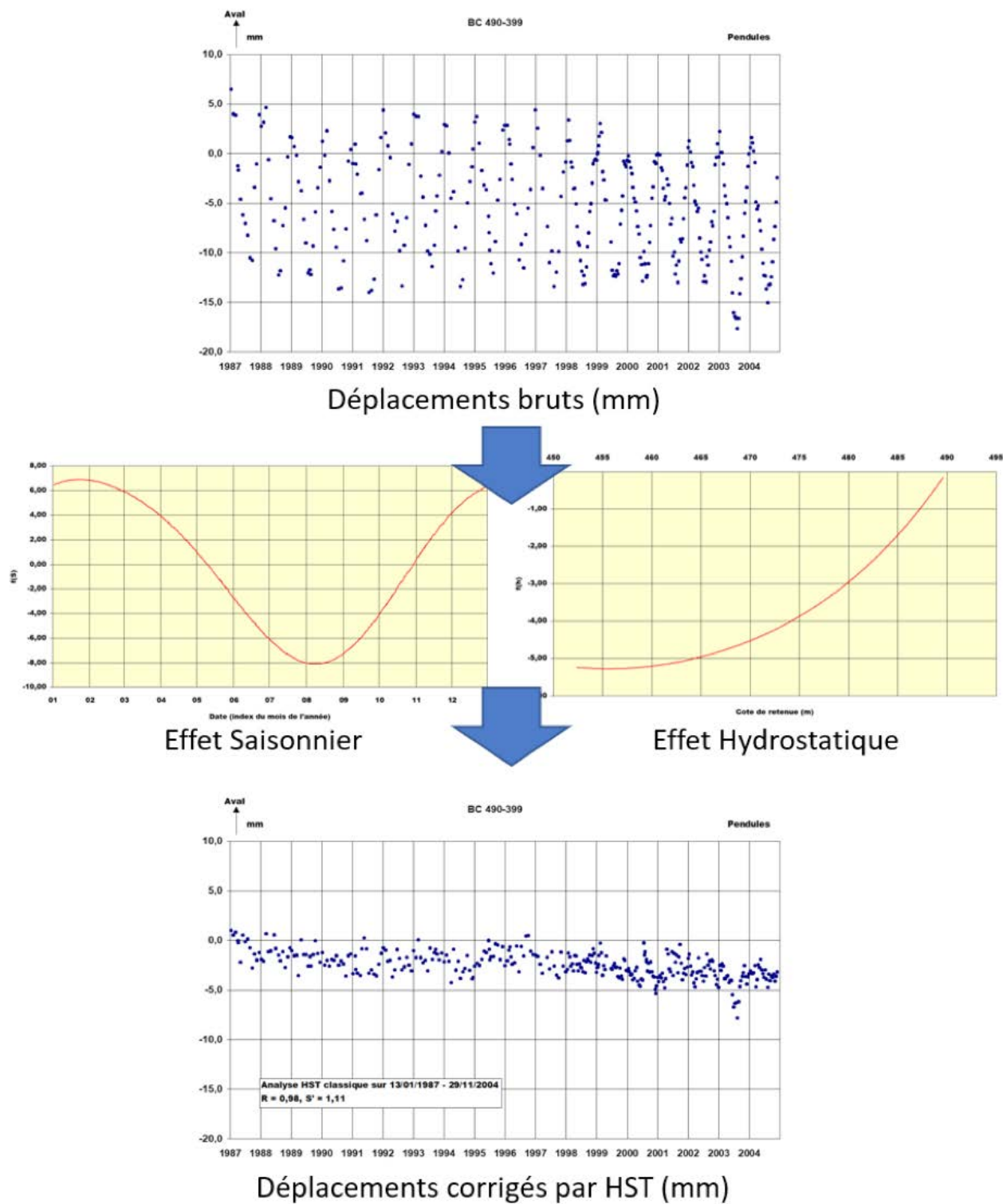


Figure 5.2 - Mesures de déplacements d'un barrage : mesures brutes, corrections en température et côte de retenue, mesures corrigées (données EDF).

5.2.2 ANALYSE INVERSE

L'analyse inverse est utilisée pour optimiser l'**estimation de paramètres non mesurés ou mesurables** de l'environnement (naturel) d'un ouvrage [Honjo et al. 1994, par exemple]. Cela est notamment le cas des modèles constitutifs de sol lorsque les essais in situ ou de laboratoire sont en nombre insuffisant (pour des raisons de coût de réalisation ou de complexité du modèle par exemple).

Le schéma de principe est représenté à la Figure 5.3 et un exemple d'utilisation est donné à la Figure 5.4.

À partir de sollicitations et de paramètres (de l'ouvrage et de son environnement) dont une partie est estimée « a priori », un calcul numérique (éléments finis) est mené et donne une réponse « numérique » de l'ouvrage aux sollicitations.

Cette réponse est alors comparée aux mesures expérimentales et une optimisation des paramètres estimés « a priori » est proposée avant de mener à nouveau un calcul numérique dont la réponse

devrait se rapprocher alors des mesures expérimentales.

Cette démarche dite d'analyse inverse est reproduite tant que le calcul numérique ne se rapproche pas suffisamment des mesures. Cela nécessite d'avoir une mesure de l'écart entre résultats de modélisation et mesures expérimentales et d'avoir défini un ou des critères d'arrêt.

L'analyse inverse repose ainsi sur :

- des mesures expérimentales ;
- des calculs numériques (éléments finis ou autres) ;
- des méthodes d'optimisation.

C'est une méthode itérative approchée simple en lien direct avec les mesures. Pour être pratiquée, elle nécessite cependant l'expertise du géotechnicien, tant pour établir le modèle numérique (modèle de sols et ouvrages) que pour estimer les paramètres « a priori ». Elle nécessite également des outils d'optimisation numériques plus ou moins poussés.

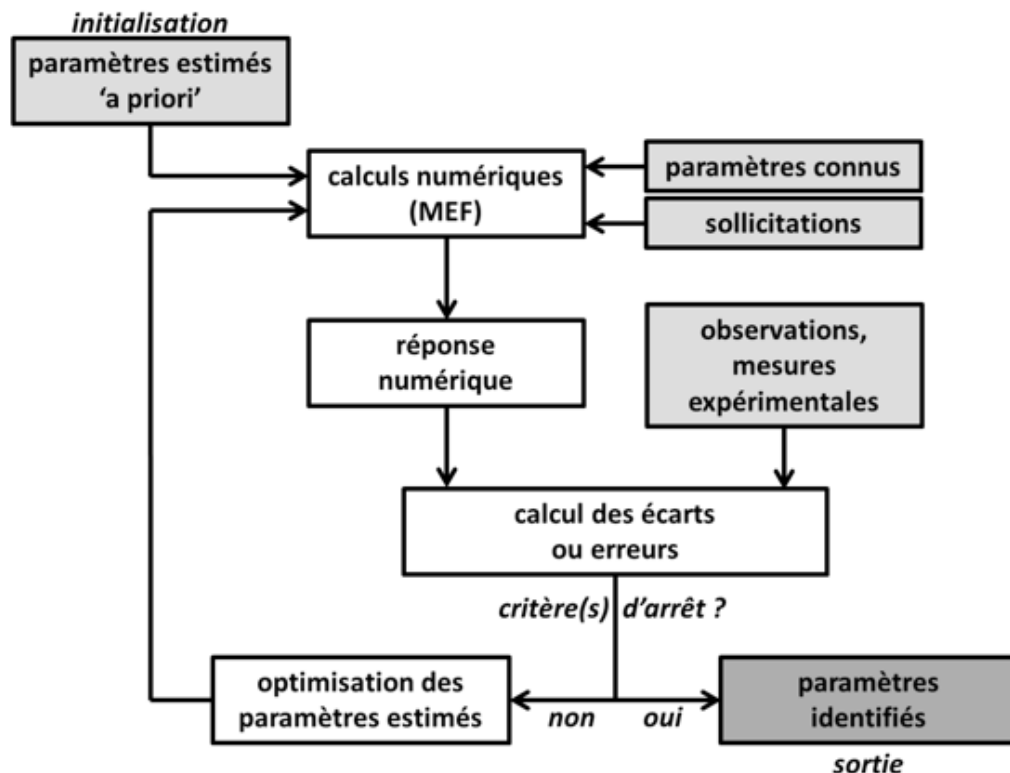
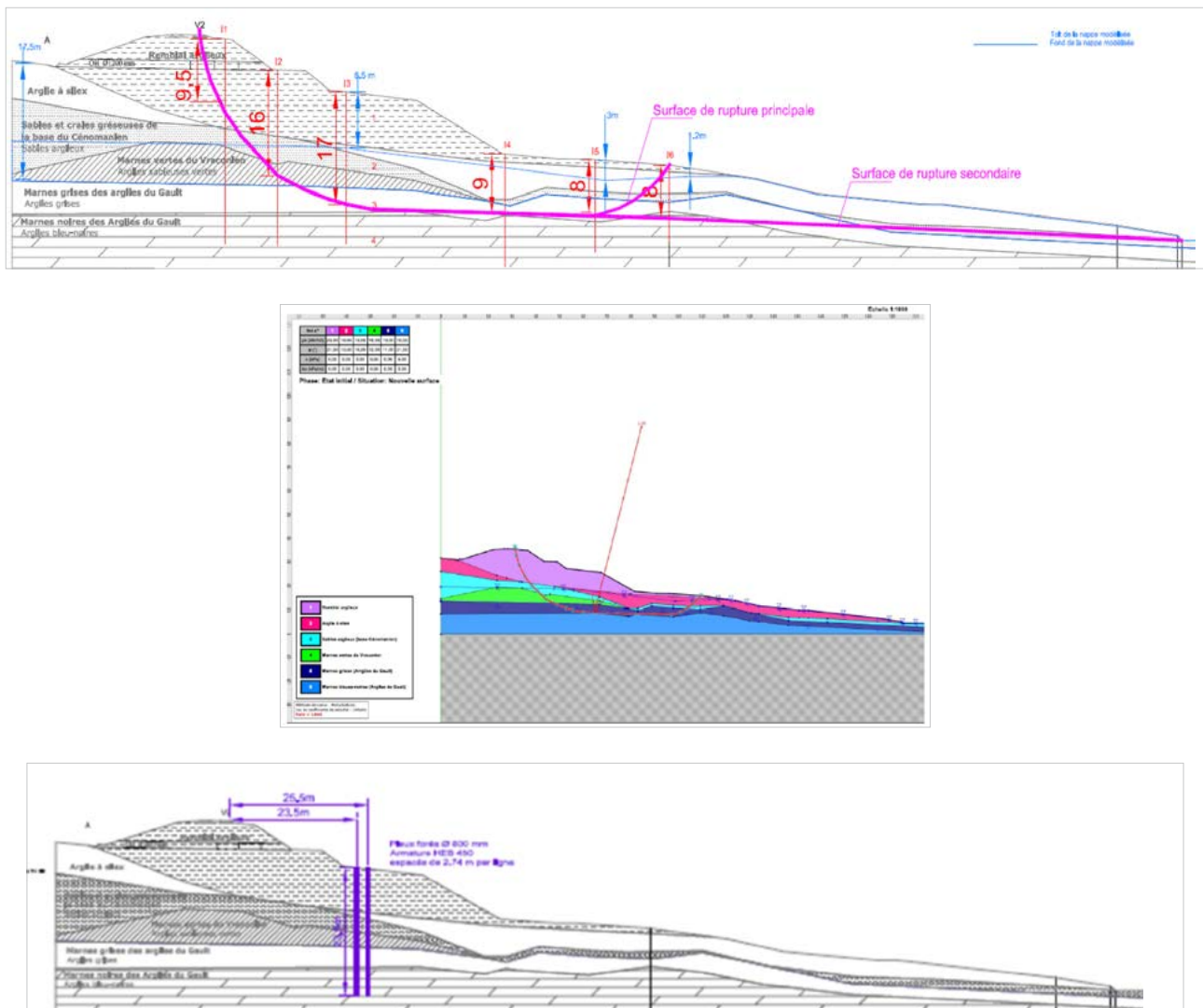


Figure 5.3 - Schéma de principe de l'analyse inverse



Le modèle est construit à partir des sondages géologiques, des profondeurs de rupture des tubes inclinométriques, des niveaux de nappe dans les piézomètres. Le calage des caractéristiques de sol (C'et Phi') est assuré pour un coefficient de sécurité global proche de 1.00 (analyse inverse). L'objectif de l'amélioration de la stabilité apportée par les pieux forés armés est défini par le MOE avec l'accord du MOA (ici +17% recherché)

Figure 5.4 – Exemple d'utilisation de l'analyse inverse : ajustement des paramètres de sol par analyse inverse pour un renforcement par pieux (données SNCF réseau)

5.2.3 VITESSE INVERSE

Les analyses en vitesse inverse sont utilisées dans le cadre **des glissements de terrain** [Fukuzono 1985]. Elles permettent d'estimer à l'avance la date de rupture éventuelle d'une pente. Il s'agit d'une analyse graphique (qui peut bien sûr être mise en algorithme). On regarde l'évolution dans le temps du paramètre $1/V$, c'est à dire l'inverse de la vitesse V du glissement (dérivée du déplacement). Un glissement à vitesse constante à un $1/V$ constant et

n'est pas spécifiquement dangereux. Un glissement dont le $1/V$ augmente est en stabilisation. Un glissement dont le $1/V$ diminue est dangereux. Lorsque $1/V$ atteint zéro, on a rupture de la pente. Avec des méthodes de projection on peut déterminer la date de rupture future (voir Figure 5.5).

Cette méthode est très utilisée dans le domaine minier, sur les mines à ciel ouvert. On trouve dans la littérature des analyses fines, portant notamment sur la forme de courbe $1/V$ (qui peut être concave ou

convexe comme indiqué sur la figure 5.5). Un exemple d'utilisation de la méthode est présenté à la figure 5.6.

De nombreux cas sont documentés et prouvent le bon fonctionnement de la méthode. Il existe bien sûr aussi des cas d'échec, notamment lorsque le massif de sol se réagence avant la rupture.

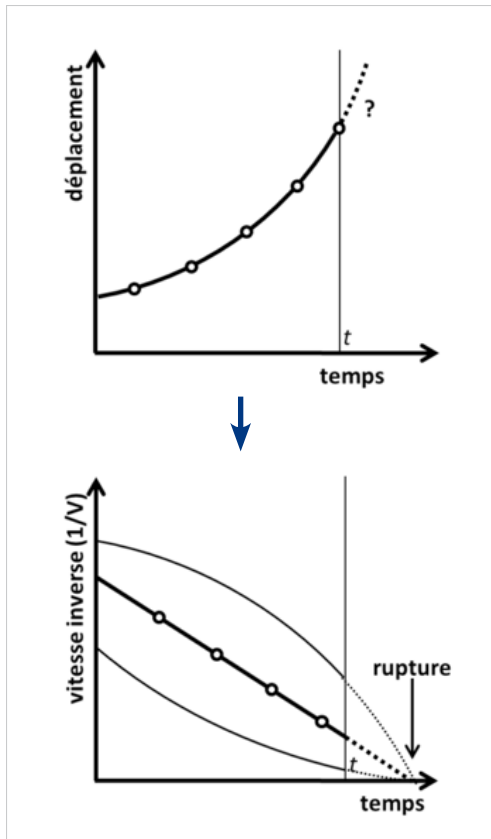


Figure 5.5 – Principe de la méthode de vitesse inverse pour l'analyse de rupture de pente : exemple de mesure (point) et application de la méthode (différents cas possibles d'évolution de $1/V$ en fonction du temps).

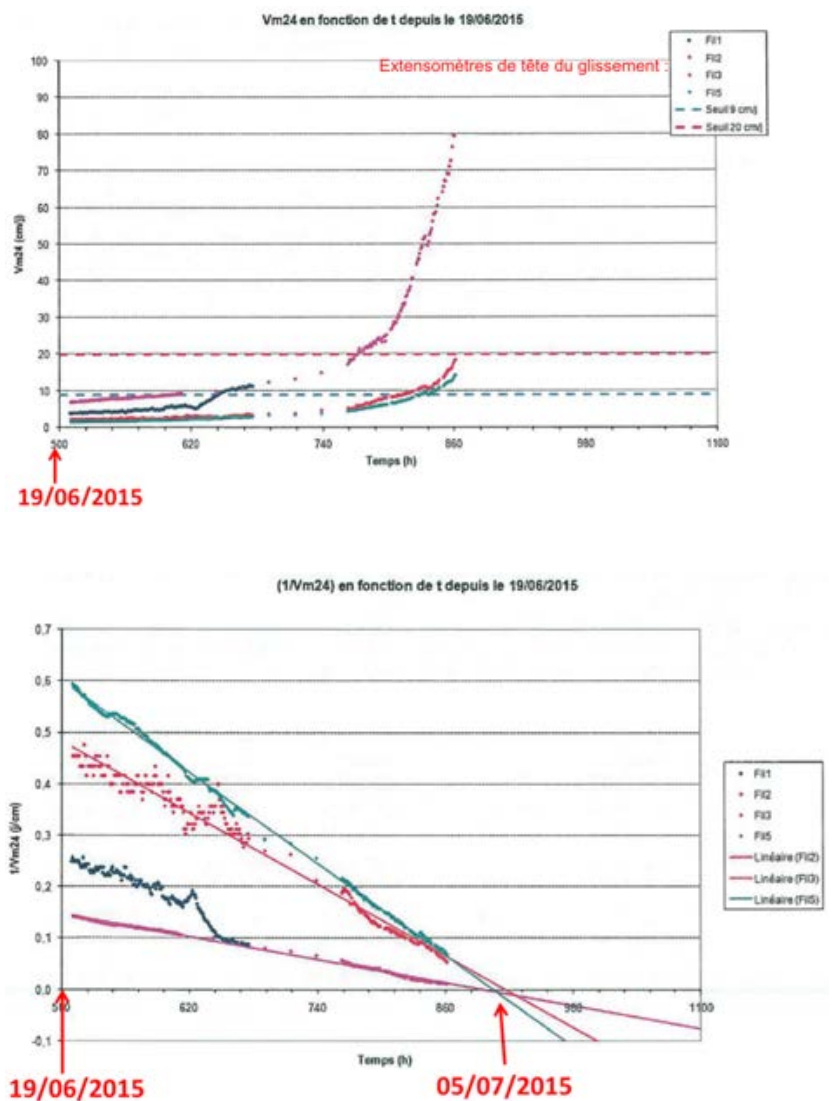


Figure 5.6 – Suivi du glissement de terrain (données CEREMA et EDF) au droit du grand tunnel du Chambon en 2015 - La méthode $1/V$ a permis de prédire la date du paroxysme du glissement [Dubois et al. 2016].

5.2.4 MÉTHODES OBSERVATIONNELLES / ANALYSE EN CONTINU ET ADAPTATION

La méthode observationnelle en construction géotechnique, connue depuis des dizaines d'années [Peck 1969], mais peu utilisée hors cas spécifiques (injection de compensation par exemple) jusqu'aux années 2000, a été officialisée par les Eurocode 7.

Elle consiste à prédéfinir en amont des travaux un certain nombre de scénarii de dimensionnement. En fonction des résultats de l'instrumentation en cours de travaux, il est alors possible de choisir le scénario de dimensionnement qui correspond le mieux au comportement réel de l'ouvrage, conformément aux scénarii prédéfinis lors des études de conception.

La méthode nécessite, plus que toute autre, des mesures fiables, justes et denses géographiquement et temporellement. En contrepartie, des économies importantes sont possibles car un dimensionnement plus adapté est possible.

Trois exemples typiques :

- La construction du second tube de l'autoroute A52 sous Toulon entre 2007 et 2012. Construction en méthode traditionnelle avec plusieurs sections types de soutènement prévues, les plus renforcées étant bien sûr les plus onéreuses à fournir et à mettre en œuvre. Tout au long des trois années de creusement, la section la plus légère suffisante pour le sol rencontré est choisie en fonction des mesures de tassements enregistrées en surface et dans le sol ;
- Un exemple théorique plus simple : soutènement d'une fouille prévu avec deux lits de butons, un troisième lit étant conçu et préparé, il ne sera mis en place que si les mesures montrent une déformation du soutènement dépassant un seuil prédéfini ;
- À la suite de la réalisation d'un écran de soutènement et d'un dispositif de pompage (scénario 1), il est réalisé un essai de rabattement (instrumentation par piézomètres et débitmètres) permettant d'extrapoler le débit d'exhaure nécessaire à la mise hors d'eau de la fouille. En fonction du résultat et du respect des seuils autorisés de débit d'exhaure, des travaux d'injection (scénario 2, jupe ou fond injecté) peuvent être entrepris pour réduire les venues d'eau.

5.2.5 INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : MACHINE LEARNING / APPRENTISSAGE AUTOMATISÉ

Les modèles présentés au 5.2.1 ou au 5.2.3 se basent sur des descriptions analytiques (équations) pour exprimer le lien entre signal d'auscultation et variables explicatives. Cela a l'avantage d'avoir un modèle simple à interpréter. Cependant, ce type de modèle ne permet pas de représenter toutes les façons dont les variables interagissent pour aboutir au résultat final, et donc ne capture pas toutes les dynamiques du système.

Une alternative est d'utiliser d'autres types de modèles avec des capacités de représentation plus élevées. Appelées "machine learning" ou "apprentissage automatisé" ces méthodes sont liées à **l'augmentation de la quantité de données à traiter** (big data) et tirent parti de la puissance de calcul offerte par les ordinateurs actuels.

Plusieurs modèles ont été développés dans ce cadre, notamment au cours des 20 dernières années : réseaux de neurones par couche, forêts aléatoires...

Les réseaux de neurones artificiels, un type de modèle très utilisé en Intelligence Artificielle, sont considérés comme des approximateurs universels de fonctions. Cette haute capacité prédictive se fait au prix d'une faible interprétabilité. On parle donc de modèle "black box". Les réseaux neuronaux sont bio-inspirés, et correspondent à des graphes d'unités de calculs basées sur des formulations simplifiées des neurones biologiques. Ces "neurones" sont interconnectés entre eux par différentes topologies de réseaux, suivant le type de modèle.

Le modèle le plus classique suit une topologie en couches (« feed-forward layers ») contenant chacune une collection de neurones prenant en entrée les sorties de la couche précédente et connectés aux entrées des neurones de la couche suivante. Ce type de réseau est appelé « Perceptron Multi-Couches » (MLP : « Multi-Layer Perceptron »).

Un autre modèle classique et d'expressivité élevée pour représenter des signaux temporels complexes est d'utiliser des "réseaux de neurones récurrents". Ce sont des réseaux de neurones qui comportent des connexions récurrentes - contrairement aux réseaux de neurones « feed-forward », comme

les MLP, qui n'en comportent pas. Ces connexions récurrentes permettent de capturer des états internes qui permettent de mieux représenter l'évolution de phénomènes temporels de pas de temps en pas de temps.

Cependant, ces réseaux sont généralement plus difficiles à entraîner que de simples réseaux feed-forward (problème de "disparition du gradient" en utilisant un apprentissage par "rétropropagation du gradient"). Des architectures particulières permettent d'adresser partiellement ce problème - en particulier les réseaux de type "Long Short-Term Memory" (ou LSTM) qui contiennent des mécanismes pour propager les erreurs aux pas d'apprentissage antérieurs, et éviter la plupart des problèmes de disparition du gradient. Ce type de réseau est constitué d'unités computationnelles modélisant des états internes de court et long terme.

Une autre technique est appelée « forêts aléatoires » (« Random forests » en anglais : « RF »). Il s'agit d'un autre modèle par apprentissage automatique, qui s'inspire d'un autre modèle prédictif : les arbres de décisions.

Ces derniers lient de façon explicite les valeurs des variables cibles et les variables d'entrée par recombinaisons à l'intérieur d'une structure d'arbres (chemins). Ils peuvent être utilisés pour des tâches de régression (ce qui correspond au cas où les variables d'entrée et les variables cibles sont des valeurs continues). Pour pouvoir les calibrer pour un problème donné, les arbres de décision peuvent être entraînés par apprentissage supervisé : on

utilise un ensemble de données pour lesquelles on connaît les valeurs des variables cibles pour construire l'arbre, puis on extrapole les résultats à l'ensemble des données de test. Les arbres de décision font partie des algorithmes les plus populaires en apprentissage automatique.

Les forêts aléatoires regroupent les résultats d'une collection d'arbres de décisions, chacun entraîné sur un sous-ensemble différent des données. Ensuite, les prédictions des forêts aléatoires sont obtenues par vote majoritaire des arbres de décision (« ensemble learning »). Cette approche par ensemble permet d'obtenir des capacités de représentation et de prédiction (par rapport au coefficient de détermination) généralement supérieures à celles obtenues par de simples arbres de décisions uniques.

A titre d'exemple, ces méthodes sont notamment utilisées dans l'analyse de données d'auscultation des barrages pour prendre en compte les phénomènes non-linéaires. L'exemple de la piézométrie est le plus commun puisque ce paramètre dépend de la charge hydrostatique du réservoir mais aussi de la perméabilité de la fondation qui peut varier en fonction des sollicitations transmises par le barrage. Or, en fonction des saisons et de la température ambiante, les mouvements du barrage diffèrent, il en résulte donc que la piézométrie de fondation a une réponse à la charge hydrostatique qui peut évoluer différemment selon les saisons. Les réseaux de neurones permettent de le mettre assez facilement en évidence (Figure 5.7).

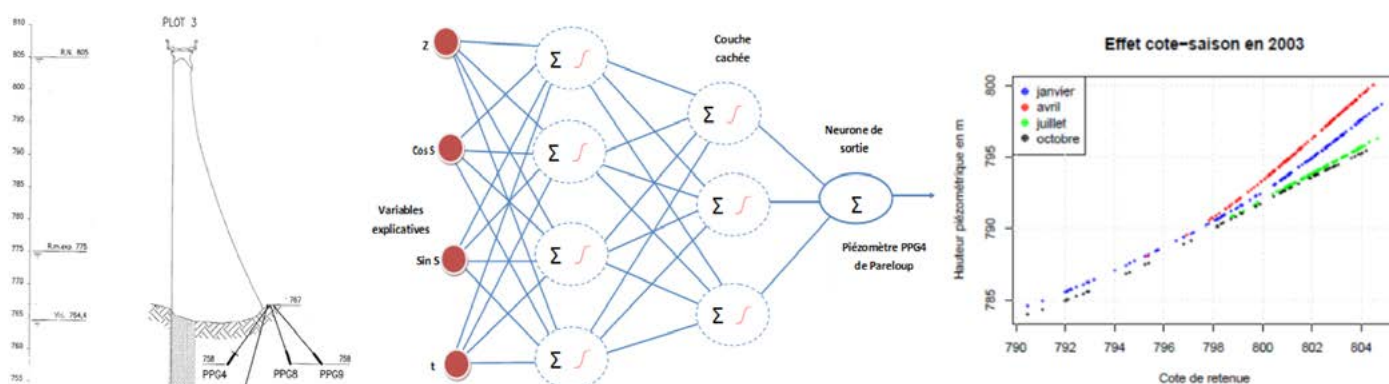


Figure 5.7 – Réseaux de neurones appliqués pour mieux comprendre la réponse de la piézométrie au niveau de remplissage de la retenue selon les saisons [Simon et al. 2012].

5.2.6 GESTION ALARMES / SEUILS, MESURES

Le choix des alarmes est crucial dans un projet d'instrumentation.

Il est très important de comprendre que « trop d'alarme tue l'alarme ». Un ingénieur qui reçoit 5 alarmes par jour (ou par nuit !) arrêtera rapidement de les regarder. La méthode de déclenchement de l'alarme et le choix des seuils doit donc répondre à une réflexion poussée afin que seules de vraies alarmes, avec un besoin réel d'analyse ou d'action par l'ingénieur, soient déclenchées.

La « précision » (en réalité la « répétabilité ») et le bruit des mesures doivent être pris en compte.

Il existe plusieurs méthodes, qui doivent être utilisées, pour réduire le bruit et les fausses alarmes.

Par exemple :

- lissage statistique avec une médiane glissante sur les dernières N valeurs ou N heures. Attention, cette méthode entraîne un retard d'alarme de N/2 valeurs ou N/2 heures ;
- bande morte : Pour éviter les déclenchements multiples, une zone sous le seuil est considérée comme non active, une valeur qui oscille au-dessus et en dessous du seuil ; sans repasser sous la bande morte, ne déclenche qu'au premier franchissement ;
- alarmes diffusées à différentes personnes en fonction des seuils ;
- alarmes intelligentes, avec vérification des valeurs proches avant de déclencher ;
- alarmes différentielles ;
- alarmes sur accélération.

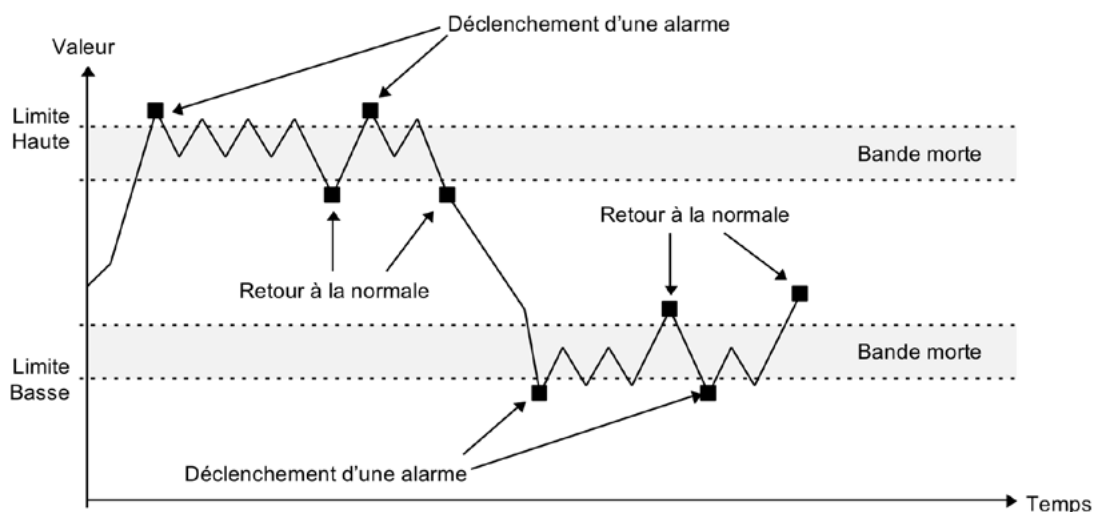


Figure 5.8 – Fonctionnement d'une alarme avec bande morte. Ce dispositif permet de réduire le nombre de déclenchements d'alarme, en filtrant les éventuelles oscillations de la mesure proche du seuil.

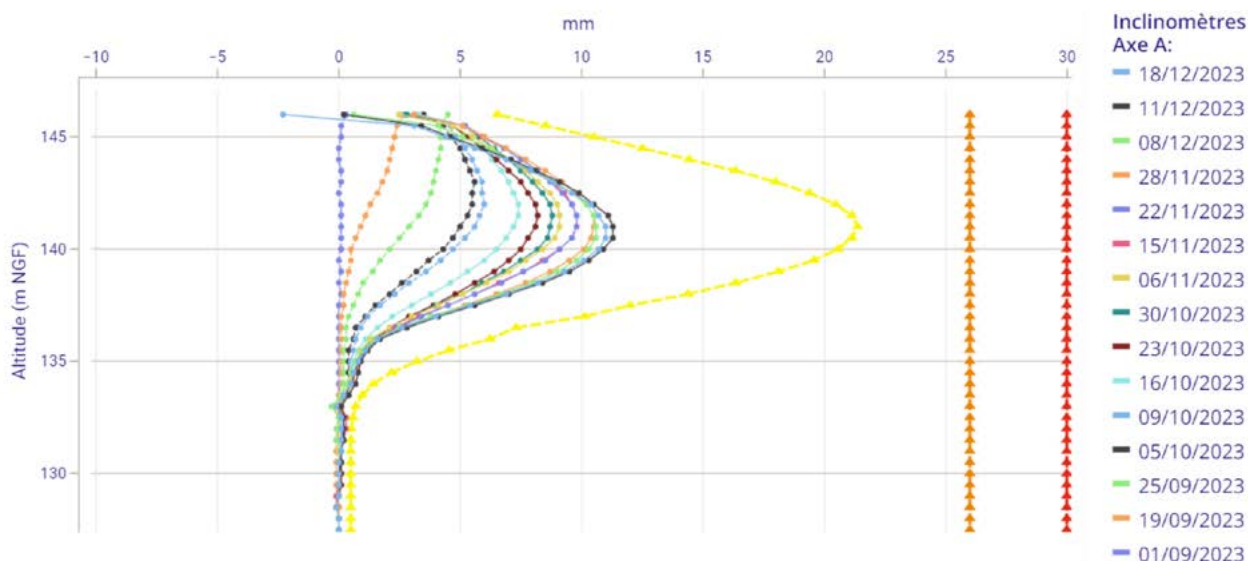


Figure 5.9 – Seuils d'alarme sur un inclinomètre de forage. Les seuils d'alarme peuvent être variables au cours du temps ou par point de mesure le seuil d'attention (jaune) est variable en fonction de la profondeur et correspond en général aux déformations d'étude, et les seuils d'alerte et d'action (orange et rouge ici) sont fixes (données SIXENSE).

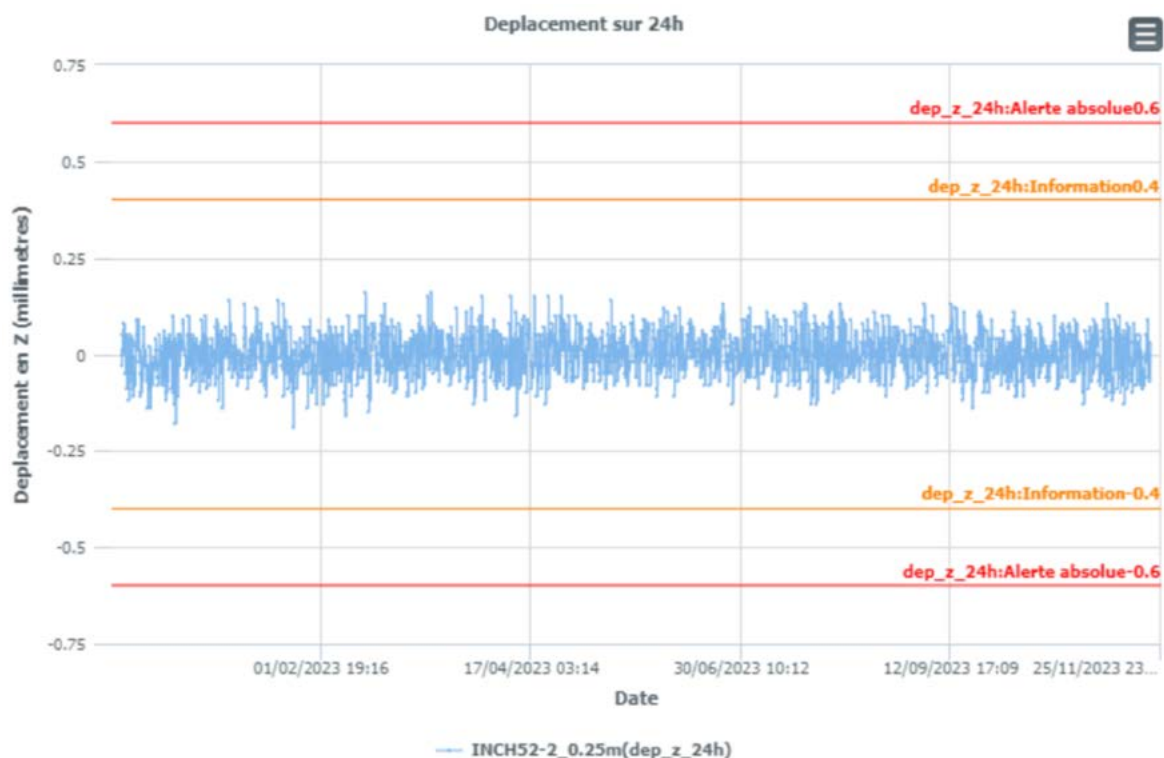


Figure 5.10 – Suivi inclinométrique d'une falaise à Hendaye : seuils de déclenchement d'« information » et d'« alerte absolue ». Le seuil d'« alerte absolue » entraîne une fermeture de la chaussée (données GEOTEC).

5.3 INTERPRÉTATION

L'interprétation des mesures doit permettre de répondre à des questions précises qui ont conduit à instrumenter un site ou un ouvrage géotechnique. Ce travail de la part du géotechnicien nécessite donc de bien connaître les problématiques et les spécificités de l'instrumentation : où est-elle implantée, pour surveiller quel paramètre, quels sont les limites des mesures collectées (incertitudes, critique des valeurs obtenues...) ?

C'est une démarche incrémentale qui part tout d'abord de la description des phénomènes auscultés : localisation de l'instrumentation, valeur mesurée, évolution dans le temps. L'exercice permet une bonne compréhension de la problématique et sera d'autant facilité que les données auront été mises en forme au préalable (voir paragraphe 5.1.2.2 et chapitre 3) et traitées de manière adaptée (voir partie 5.2).

Ensuite, la phase à proprement parler d'interprétation doit être le moment de réflexion sur le résultat des mesures et des éventuelles analyses réalisées. Il s'agit d'un travail de vérification d'une situation mesurée par rapport à une situation attendue

(d'après un modèle, d'après des règles de conception, des règles normatives ou tout simplement des avis d'experts). Cela s'apparente à un travail de diagnostic géotechnique pouvant émettre des hypothèses pour expliquer une situation observée et in fine porter un avis argumenté sur le comportement de l'ouvrage. Ce travail d'ingénierie doit être réalisé avec méthode, et suivant une démarche suffisamment robuste, de manière à pouvoir argumenter et justifier les conclusions de l'avis donné sur le comportement ausculté de l'ouvrage. Ces conclusions engagent l'ingénieur en charge de cette analyse et seront suffisamment claires sur la situation observée (par exemple, l'ouvrage a un comportement satisfaisant / à surveiller / préoccupant) pour servir d'aide à la décision auprès du Maître d'Ouvrage et de l'exploitant sur la suite à donner.

Les situations où les incertitudes sont trop importantes ou bien les mesures obtenues sont trop proches des limites attendues (seuils déterministes, valeurs limites issues des calculs de conception...) peuvent amener à revoir par le calcul le comportement de l'ouvrage (rétro-engineering) en adaptant le cas échéant des paramètres de modélisation de

celui-ci (hypothèses de perméabilité, de densité,...) de manière à mieux reproduire ce qui est observé par l'auscultation et aider à porter un avis sur le diagnostic.

Enfin, l'interprétation des mesures d'auscultation de l'ouvrage inclut de façon plus ou moins implicite une part de prédiction. En effet, un ouvrage dont le comportement jugé « satisfaisant » à un instant « t » supposera qu'en se projetant sur une certaine durée (qui dépend de la temporalité et la périodicité du suivi de l'ouvrage), cet avis ne sera pas remis en cause sauf incident imprévisible. Cependant, l'exercice formel de prédiction pourra être tenté à l'aide des outils de modélisation et des approches probabilistes. L'objectif sera en définitive d'anticiper des situations qui nécessiteraient une maintenance préventive.

Par exemple, on peut citer le suivi de paramètres tels que les débits de drainage et la piézométrie dans un barrage en terre, qui dans certains cas (lente diminution des débits associée à une lente augmentation de la piézométrie) peuvent être interprétées comme un lent colmatage du système de drainage qui nécessitera son nettoyage ou sa réhabilitation.



6 RECOMMANDATIONS PAR TYPE D'OUVRAGE

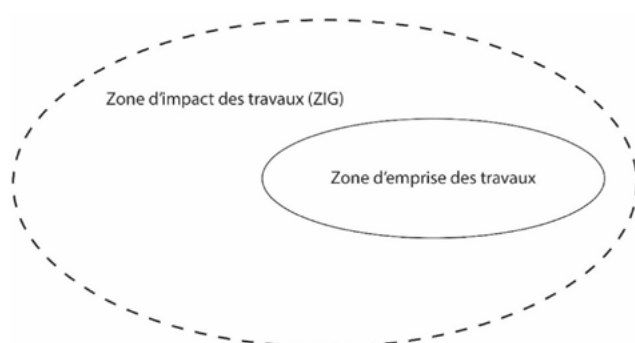
- 6.1 PRINCIPES GENERAUX
- 6.2 REMBLAIS
- 6.3 BARRAGES EN REMBLAI
- 6.4 DEBLAIS PLEINE MASSE (DEBLAIS SEULS)
- 6.5 RABATTEMENTS DE NAPPE
- 6.6 COMPACTAGE (REMBLAIEMENT ET AMELIORATION DE SOLS)
- 6.7 ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT DE DEBLAIS
- 6.8 FONDATIONS ET MURS DE SOUTÈNEMENT DE REMBLAIS
- 6.9 TALUS NATURELS (SOLS MEUBLES / SOLS ROCHEUX)
- 6.10 DIGUES EN SOL MEUBLE
- 6.11 TUNNELS
- 6.12 MINES ET CARRIERES
- 6.13 FONDATIONS PROFONDES
- 6.14 OUVRAGES EXISTANTS / IMPACT SUR LES MITOYENS
- 6.15 OUVRAGES PORTUAIRES

6 RECOMMANDATIONS PAR TYPE D'OUVRAGE

6.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX

Le choix de l'instrumentation doit être envisagé en fonction de :

- la surface et du volume à instrumenter (en relation avec la ZIG définie par les études de conception) ;
- l'information recherchée par rapport aux risques géotechniques provoqués par les travaux ;
- la densité d'instrumentation ;
- la durée de l'instrumentation envisagée et la temporalité du suivi (durée/fréquence).



Nous ne considérerons ici pour instrumentation que les mesures répétitives sur la durée des travaux ou la durée de vie de l'ouvrage intéressé.

Nous présentons dans la suite du chapitre une synthèse par famille d'ouvrages. L'utilisateur devra donc dans le cadre d'ouvrages multiples se reporter aux différents paragraphes correspondants.

La synthèse se veut simplifiée pour être assimilable par le plus grand nombre. Les points évoqués y sont :

- l'usage correspondant au phénomène physique qui est mesuré ;
- l'outil de mesure correspondant au phénomène à analyser ;
- les points clés relatifs à la mise en œuvre de l'outil de mesure ;
- importance du phénomène physique à mesurer dans le cadre de l'ouvrage envisagé ;
- la densité d'outils de mesure préconisée.

6.2 REMBLAIS

La mise en œuvre de remblais sur des sols naturels est associée à une réorganisation des terrains sous-jacents. Cette réorganisation plus ou moins rapide en fonction de la nature des sols d'assise conduit à des déformations plus ou moins importantes tant verticalement qu'horizontalement pour les sols les plus compressibles.

L'instrumentation aura ici pour objectif de suivre les impacts associés à ce remblaiement.

L'instrumentation envisagée sous remblais sera directement liée au niveau de compressibilité des sols d'assise. Nous pouvons ainsi définir des sols déformables (tassement inférieur à 5 cm) et des sols compressibles (tassement supérieur à 5 cm). Ce seuil de déformation ne doit pas être retenu comme une valeur référence mais plutôt comme un ordre de grandeur devant guider l'utilisateur sur les choix de ses appareillages (et sur les incertitudes de mesures associées).

La définition de l'instrumentation à envisager doit donc être menée au regard du projet de remblaiement, des déformations associées mais également de la ZIG et des contraintes de suivi de chantier.

Nous présentons ci-après un tableau de recommandations des instrumentations envisageables pour le contrôle des remblais.

Nous recommandons de coupler les méthodes de suivis (2 à 3 minimum) afin de comparer les techniques les unes aux autres, ce qui permet de limiter les incertitudes associées aux mesures.

SOLS DÉFORMABLES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement vertical inférieur à 5 cm (sols déformables)				
Mesure ponctuelle	Piges topographiques	Bien assurer leur protection au fur et à mesure de la montée du remblai	Obligatoire	forte
Mesure longitudinale le long d'un profil	Fibre optique	La base de référence doit être située hors de la zone d'influence des remblais		moyenne
Mesure ponctuelle	Tassomètre de surface (hydraulique ou électrique)	Difficulté de mise en œuvre associée à la chasse correcte des bulles d'air dans les tubulures. La base de référence doit être située hors de la cuvette de tassement (lecture électrique uniquement)	Recommandé	moyenne 3 par profil analysé (axe et bords de remblais)
Contrainte				
Vérification de la dissipation des pressions interstitielles				faible
Capteur de pression totale	Utilisation en présence d'ouvrages enterrés sensibles	Attention à l'installation, ne pas créer de point dur		faible

SOLS COMPRESSIBLES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement vertical supérieur à 5 cm (sols compressibles)				
Mesure ponctuelle	Piges topographiques	Bien assurer leur protection au fur et à mesure de la montée du remblai	Obligatoire	forte
Mesure ponctuelle	LIDAR	Solution envisageable pour des surfaces importantes		
Mesure ponctuelle	Tassomètre de surface (hydraulique ou électrique)	Difficulté de mise en œuvre associée à la chasse correcte des bulles d'air dans les tubulures La base de référence doit être située hors de la cuvette de tassement (lecture manuelle ou électrique)	Recommandé	moyenne 3 par profil analysé (axe et bords de remblais)
Mesure longitudinale le long d'un profil	Profilomètre hydraulique	La base de référence doit être située hors de la zone d'influence des remblais	Obligatoire	moyenne
Mesure longitudinale le long d'un profil	Fibre optique	La base de référence doit être située hors de la zone d'influence des remblais	Recommandé dans le cas de remblai sur sols compressibles améliorés	moyenne
Mesure sur un profil vertical (1 bague tous les 3 m maximum)	Tassomètre magnétique en forage	Le positionnement des points de mesure doit être mené dans les faciès intéressés par la déformation		faible

SOLS COMPRESSIBLES				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement horizontal				
Mesure des effets G(z)	Inclinomètre vertical de forage		Obligatoire dans le cas d'un risque de poinçonnement des sols d'assise	Fonction des risques de poinçonnement et/ou présence d'avoisinant
Mesure X/Y	Piges topographiques			Fonction des risques de poinçonnement et/ou présence d'avoisinant
Contraintes				
Vérification de la dissipation des pressions interstitielles	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]		Obligatoire dans le cas d'un risque de poinçonnement des sols d'assise	Moyenne à forte
Vérification et suivi des contraintes internes	Capteur de pression totale	Utilisation en présence d'ouvrages enterrés sensibles		faible
Mesure du niveau d'eau	Piézomètre ouvert ou sélectif [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre]	Peut être remplacé par une CPI hors emprise de remblai	Obligatoire	faible

- A. Piges topographiques
- B. Cibles topographiques
- C. Profilomètre
- D1. Capteur de tassement de référence
- D2. Capteur de tassement hydraulique

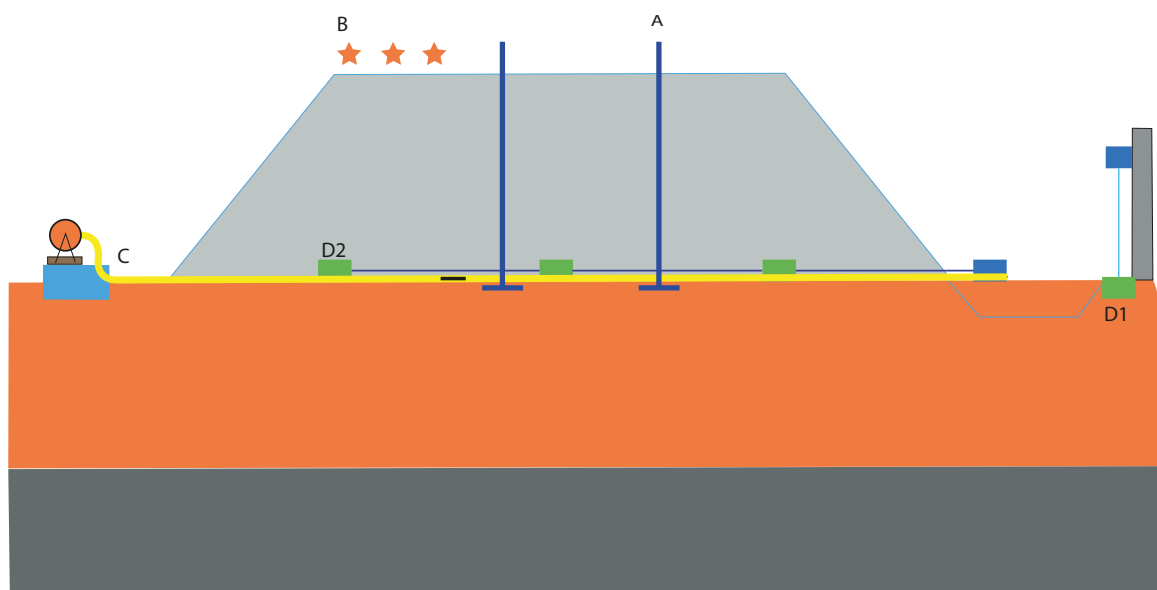


Figure 6.1 - Exemple d'instrumentation d'un remblai sur sol compressible (suivi des tassements)

- A. Piézomètre (ouvert ou sélectif)
- B. Cellule de pression interstitielle
- C. Inclinomètre vertical
- D. Tassomètre multipoint en forage
- E. Extensomètre multipoint

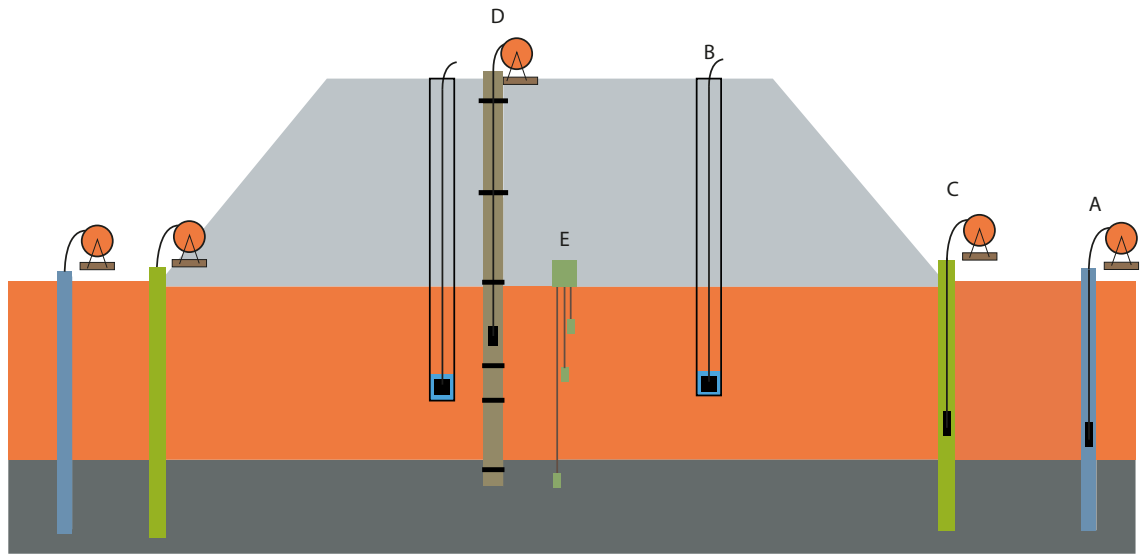


Figure 6.2 - Exemple d'instrumentation d'un remblai sur sol compressible (installation sous remblai)

- A. Capteur de tassement
- B. Capteur de déformation à fibres optiques
- C. Capteur de contrainte
- D. Tassomètre multipoint en forage
- E. Géogrilles
- F. Inclusion rigide

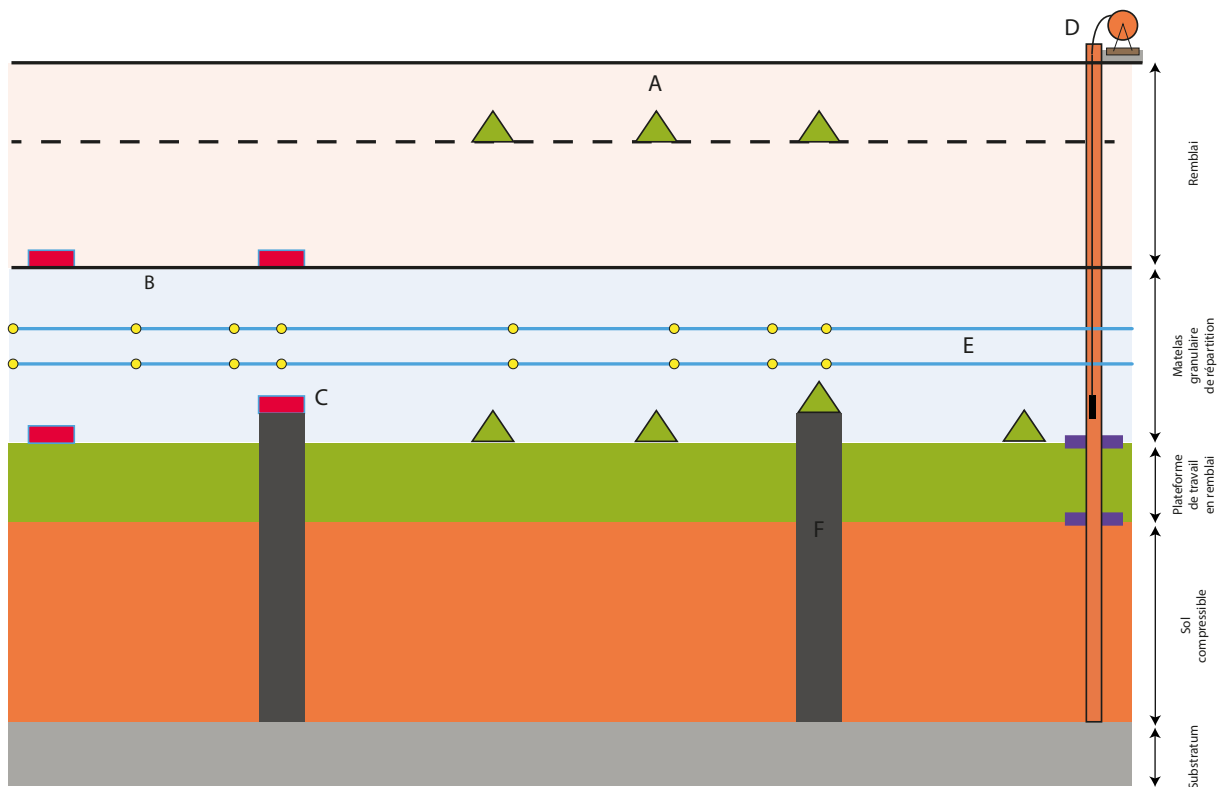


Figure 6.3 - Exemple d'instrumentation d'un remblai sur sol compressible renforcé par inclusions rigides



Figure 6.4 - Pige topographique (crédit photographique : GEOTEC)



Figure 6.5 - Tranchée et extrémité d'un profilomètre (crédit photographique : GEOTEC)



Figure 6.6 - Tranchée et extrémité de boules tassométriques (crédit photographique : GEOTEC)



Figure 6.7 - Bagues de tassomètres magnétiques pour pose en forage (crédit photographique : GEOTEC)

6.3 BARRAGES EN REMBLAI

Sont concernés dans le présent paragraphe les ouvrages de stockage d'eau n'entrant pas dans le champ des digues et pour lesquels une défaillance présente un risque très important.

BARRAGES EN REMBLAI				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure de déplacement vertical				
Mesure ponctuelle En crête du barrage essentiellement et en parement aval	Piges topographiques	Bien assurer leur protection au fur et à mesure de la montée du remblai	Obligatoire	forte
Mesure sur un profil vertical (1 bague tous les 3 m maximum)	Tassomètre magnétique en forage	Le positionnement des points de mesure doit être mené dans les faciès intéressés par la déformation		faible
Mesure longitudinale le long d'un profil	Profilomètre	Réservé aux grands barrages		faible
Mesure longitudinale le long d'un profil				
Mesures planimétriques	Cibles (cocardes ou prismes) visés depuis un réseau de piliers implantés à l'aval du barrage	Besoin de références de visées topographiques considérées « fixes »	Obligatoire	forte
Mesure sur un axe vertical	Inclinomètre vertical de forage	Réalisé dans des forages verticaux dans le cas de risques d'instabilité du corps du barrage ou des versants de la retenue	Recommandé en cas de risque suspecté	faible
Relevé géométrique en XYZ	Mesures LIDAR / photogrammétrie / point fixe (cocarde) / théodolite	Suivi des versants de la retenue ou suivi du parement aval de barrage	Recommandé en cas de risque suspecté	Mesure étendue
Mesures piézométriques				
Piézomètres	En forage tubé avec chambre de pression délimitée dans les zones à ausculter du barrage ou sa fondation (étanchéités, drains, filtres, recharges aval, particularités, voiles injection, horizons géologiques...)	A implanter sur des profils amont /aval	Implantation fonction de la problématique à analyser	Moyenne
	Cellules de Pression Interstitielle	Noyées dans le corps du remblai à la construction	Implantation fonction de la problématique à analyser	Moyenne

BARRAGES EN REMBLAI				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Débits de fuites ou de drainage				
Mesures de débit par capacité jaugée		En fonction des zones d'exutoires des fuites/drains et du débit. Adapté jusqu'à quelques litres par minutes	Obligatoire	À chaque exutoire / résurgence de drainage
	Mesure du débit sur seuil déversant calibré	Mesure pouvant être automatisée et alarmée. Adapté jusqu'à plusieurs milliers de litres par minute	Obligatoire	À chaque exutoire / résurgence de drainage
Mesure de température répartie	Détection de zones de fuites par Mesure Fibre optique	Adaptée aux barrages de grande longueur ou aux canaux (plusieurs kilomètres)	Obligatoire	Forte
	Bac de décantation / Mesure de turbidité de l'eau	Détection d'eau chargée dans les fuites (signe d'érosion interne)	Recommandée	En cas de risque suspecté, à chaque exutoire/ résurgence de drainage
Mesure du niveau de la retenue du barrage				
	Echelle limnimétrique	Définition de la hauteur d'eau dans la retenue	Obligatoire	moyenne

Points d'attention : dans un contexte de sols compressibles, le référentiel topographique doit être situé hors de la zone impactée par le remblaiement sous peine d'une analyse incorrecte des mesures.

Dysfonctionnements : une appréciation incorrecte du niveau de déformation estimée peut conduire à un choix erroné de l'instrumentation à envisager.

Le cas des barrages/retenues miniers n'est pas présenté ici. On se reportera plus loin à la partie 6.10 « digue ».

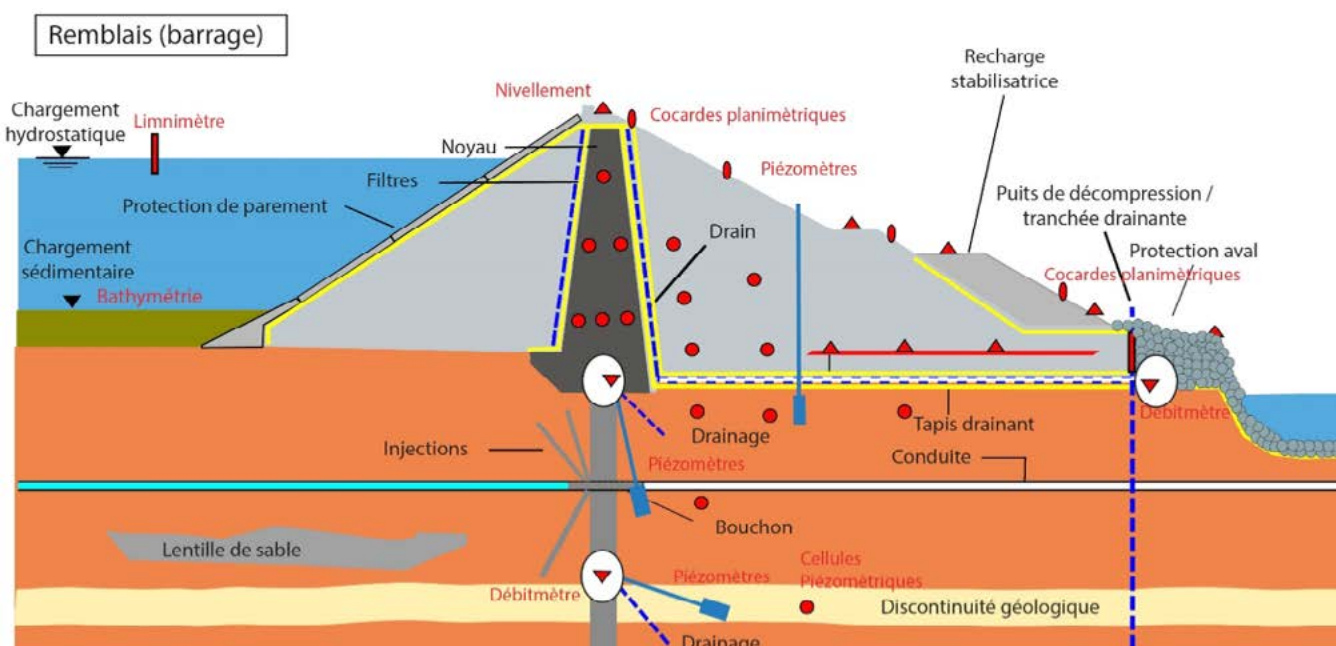


Figure 6.8 - Exemple d'instrumentation d'un barrage en remblais (EDF)



Figure 6.9 - Mesure au piézomètre avec une sonde lumineuse
(crédit photographique : EDF)



Figure 6.10 - Mesure à la sonde inclino-
métrique (crédit photographique : EDF)



Figure 6.11 - Pilier pour mesure planimétrique
(crédit photographique : EDF)



Figure 6.12 - Cocardes planimétriques en parement aval
(crédit photographique : EDF)



Figure 6.13 - Pose fibre optique (crédit photographique : EDF)

6.4 DÉBLAIS PLEINE MASSE (DÉBLAIS SEULS)

L'exécution des travaux de terrassement en déblais dans des cas singuliers peut nécessiter la mise en œuvre d'une instrumentation de contrôle de l'impact des travaux (excavation en milieu urbain, excavation avec une pente non justifiable théoriquement ou dans une pente instable, déblai de grande profondeur...).

L'instrumentation aura ici pour objectif de suivre les impacts associés à ce déblaiement ou de vérifier l'absence d'impact des terrassements sur sa ZIG.

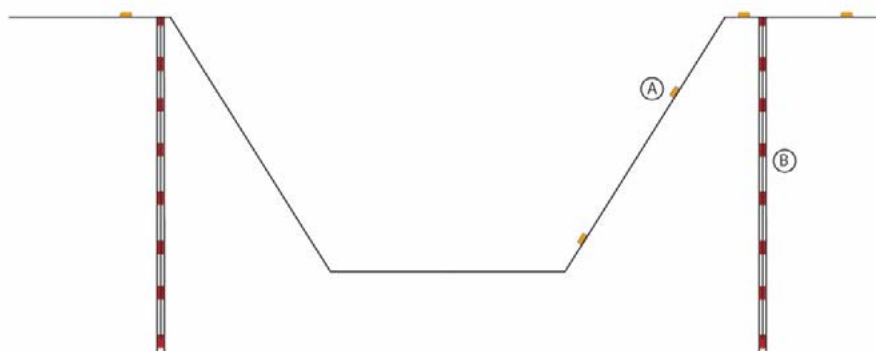
EXCAVATION DE FAIBLE VOLUME / FAIBLE PROFONDEUR				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déformations				
Mesure X/Y	Piges topographiques	Bien assurer leur protection lors des travaux	Obligatoire	forte
Mesure X/Y	LIDAR	Cas des excavations dans des zones de glissements anciens. Définition de l'emprise des glissements à analyser	A envisager en présence de glissement ancien	
Mesure X/Y	Inclinomètre vertical de forage	Cas des excavations dans des zones de glissements anciens	Obligatoire en présence de glissement ancien	Fonction des interactions envisagées

Rabattement de nappe - Cf. chapitre spécifique 6.5

EXCAVATION DE PROFONDEUR IMPORTANTE				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déformations				
Mesure X/Y/Z	Cibles topographiques	Bien assurer leur protection lors des travaux	Obligatoire	forte
Mesure X/Y/Z	LIDAR	Cas des excavations dans des zones de glissements anciens. Définition de l'emprise des glissements à analyser	Obligatoire en présence de glissement ancien	
Mesure X/Y	Inclinomètre vertical de forage	Cas des excavations dans des zones de glissements anciens	Obligatoire en présence de glissement ancien	Fonction des interactions envisagées
Mesure des libérations de contraintes	Extensomètre de forage suivi (analyse du gonflement)	Cas des excavations profondes sous forte couverture ou dans des faciès gonflants	Obligatoire pour les cas cités	Fonction des impacts envisagées

Rabattement de nappe - Cf. chapitre spécifique 6.5

Déblais pleine masse (hors rabattement de nappe)



Déblais pleine masse (hors rabattement de nappe)

A. Pige de tassement ou point de référence topographique
B. Inclinomètres

Figure 6.14 – Exemple d'instrumentation d'un déblai en pleine masse

6.5 RABATTEMENTS DE NAPPE

Le rabattement de nappe est une pratique usuelle et nécessaire sur les chantiers nécessitant une excavation.

Préalablement aux travaux de terrassement l'objectif de l'instrumentation (piézométrie intérieure et extérieure à la fouille, débit d'exhaure...) est surtout de vérifier l'adéquation du dispositif avec les besoins en rabattement.

Pendant les travaux, l'instrumentation mise en œuvre a essentiellement pour objet de vérifier

l'absence d'impact des pompages sur les avoisinants ainsi que l'absence d'érosion provoquée par le pompage.

La définition de l'instrumentation sera donc essentiellement liée à la présence de mitoyens mais peut également être liée à la présence d'une nappe polluée.

Nous présentons ci-après un tableau de recommandations des instrumentations envisageables pour le contrôle des rabattements (Cf. CFMS-SFEG 2022).

RABATTEMENT DE NAPPE				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Suivi du rabattement				
Vérification de l'absence de fines	Bac de décantation		Obligatoire	
Mesure du niveau de nappe (sol perméable)	Piézomètre (ouvert ou sélectif)	La base de référence doit être située hors de la zone impactée par le rabattement	Obligatoire	
Mesure du niveau de nappe (sol peu perméable et compressible)	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	Mise en œuvre dans les faciès peu perméables	Obligatoire	

RABATTEMENT DE NAPPE				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Suivi du débit d'exhaure / Suivi de la ré-infiltration				
Mesure des débits extraits / réinjectés	Compteur volumétrique		Recommandé voire obligatoire / loi sur l'eau	
Impact sur les mitoyens				
Mesure de tassement	Points de référence topographique		Obligatoire dans le cas d'un ouvrage sensible	
Mesure d'ouverture de fissures / mitoyens	Fissuromètres	Positionnement en fonction des indications du référé préventif	Recommandé	
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre ouvert ou sélectif]		Fonction de la problématique	

Points d'attention : la protection des outils de mesure doit être assurée

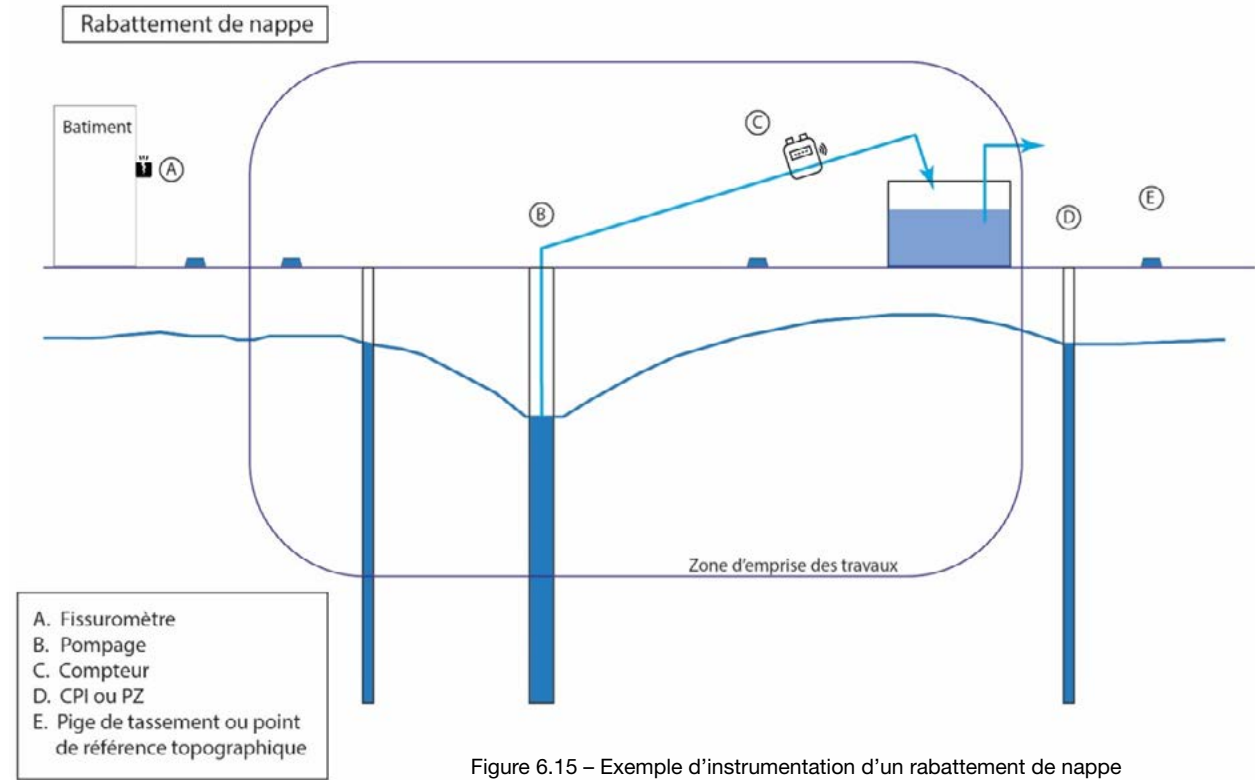


Figure 6.15 – Exemple d'instrumentation d'un rabattement de nappe

6.6 COMPACTAGE (REMBLAIEMENT ET AMÉLIORATION DE SOLS)

L'évolution des techniques et matériels de chantier conduit à la nécessité de s'interroger sur l'impact des méthodes de compactage, qu'elles soient réalisées dans le cas de la mise en œuvre de remblais de pleine de masse (emploi de cylindres vibrants, ...) ou dans le cas de l'amélioration des sols (compactage dynamique, plots ballastés pilonnés, ...).

Dans ce contexte, l'instrumentation pourra avoir pour objectif le contrôle des travaux exécutés ou l'analyse des impacts sur les mitoyens.

Nous présenterons ci-après un tableau de recommandations des instrumentations envisageables dans le cadre de compactage.

REMBLAIEMENT COURANT				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Impact sur les mitoyens				
Mesure d'ouverture de fissures / mitoyens	Fissuromètres	Positionnement en fonction des indications du référent préventif	Recommandé en milieu urbain	
Déformations	Suivi topographique	Positionnement en fonction des indications du référent préventif	Recommandé en milieu urbain	
Mesure de vibrations	Géophones / accéléromètres		Recommandé sur ouvrages sensibles	

Contrôle des travaux (cf. sols déformables)

COMPACTAGE DYNAMIQUE / SUBSTITUTION DYNAMIQUE / VIBROFLOTTATION				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Impact sur les mitoyens				
Mesure d'ouverture de fissures / mitoyens	Fissuromètres	Positionnement en fonction des indications du référent préventif	Recommandé	
Mesures de vibration	Géophones accéléromètres	Référent préventif précisant les ouvrages à instrumenter et les seuils vibratoires acceptables	Obligatoire en présence d'ouvrages sensibles dans la ZIG	
Impact sur la liquéfaction du sol saturé				
Mesure de la charge hydrostatique	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	Protection des câblages vis-à-vis des impacts de masse	Obligatoire en présence de sols liquéfiables	
Contrôle des travaux				
Mesure des déformations	Topographie	Fonction des objectifs recherchés	Obligatoire	
Mesure des compacités	Essais in-situ et/ou essais de chargement	Fonction des objectifs recherchés	Obligatoire	

Points d'attention : la protection des outils de mesure doit être assurée

Amélioration de sol (compactage dynamique/Substitution dynamique / Vibroflottaison)

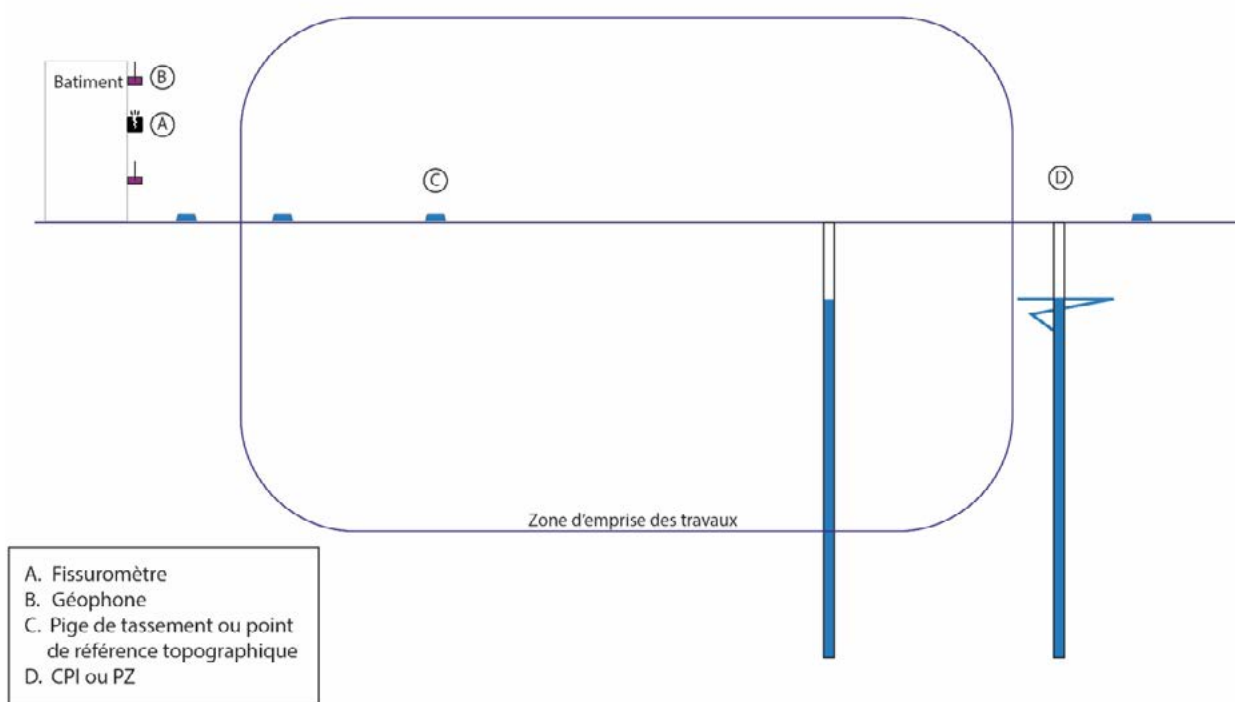


Figure 6.16 – Exemple d'instrumentation dans le cadre d'une amélioration de sol induisant des vibrations

6.7 ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT DE DÉBLAIS

La réalisation d'une excavation profonde en déblais profonds nécessite souvent la mise en œuvre d'un écran de soutènement afin de limiter l'emprise des travaux.

Nous présentons ici l'instrumentation à envisager pour ce type d'ouvrages.

- Actions de l'eau :
 - > Nappe : PZ (ouvert, sélectif), CPI ;
 - > Pression en interface sol/écran : CPT, CPI ;
- Soutènement : comportement et sollicitations :
 - > Déformations : inclinomètres/chaine inclinométrique (hauteur du soutènement), extensomètres (faces opposées), fibre optique ;
 - > Déplacements (tête, ventre, pied) par cibles topographiques ;
 - > Sollicitations : mesure des déformations (jauges de déformation à corde vibrante ou électriques ou fibre optique) ;

- Éléments stabilisateurs du soutènement : comportement et sollicitations :
 - > Tirants : cellules de charge/cales dynamométriques, mesure des déformations (jauges de déformation à corde vibrante ou électriques ou fibre optique) ;
 - > Butons : mesure des efforts (vérins hydrauliques et manomètres) et /ou mesure des déformations (jauges de déformation à corde vibrante ou électriques ou fibre optique) ;
- Effet sur l'environnement : cf. avoisinants ou ouvrages géotechniques spécifiques présents dans la ZIG.

ÉCRANS DE SOUTÈNEMENT EN DÉBLAIS

Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déplacement et sollicitations de l'écran				
Mesure des déplacements dans les 3 directions	Cibles topographiques	Position à adapter en fonction des déplacements maximaux attendus (tête, ventre, pied)	Obligatoire	forte
Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement	Inclinomètre vertical et/ou horizontal (chaîne inclinométrique en forage)	Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur servant de référence	Recommandé	faible
Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe	Extensomètre		Fonction de la problématique identifiée	Équipement des fissures existantes
Mesure des sollicitations (efforts, contraintes) dans des éléments de structure	Jauge de déformation		Fonction de la problématique identifiée	Fonction de la problématique identifiée
Déformations et sollicitations des éléments stabilisateurs de l'écran (tirants, butons)				
Vérification de la valeur de l'effort dans les ancrages et de son évolution dans le temps	Cellules de charge / cales dynamométriques	Se référer aux recommandations TA2020 pour la mise en œuvre	Obligatoire	moyenne
Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe	Extensomètre		Recommandé	Fonction de la problématique identifiée
Mesure longitudinale le long d'un profil	Fibre optique	La fibre doit être correctement protégée, idéalement au sein d'une tranchée. Elle doit être installée transversalement au déplacement attendu.		faible
Mesure des (petites) déformations des butons	Jauges de déformation		Recommandé	forte
Mesure des sollicitations (efforts, contraintes) dans des éléments de structure	Jauges de déformation		Recommandé	forte
Action de l'eau sur l'écran				
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre ouvert ou sélectif] ou CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	Le suivi de la piézométrie peut être manuel ou automatique. La sonde de pression utilisée doit être adaptée à la charge hydraulique attendue et aux éventuelles pollutions suspectées.	Recommandé, en fonction du contexte hydrogéologique	faible
Mesure des pressions interstitielles	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	A mettre en œuvre dans des horizons peu perméables		faible
Impact sur les mitoyens				
Vérification de l'absence ou de la limitation des déformations sur les avoisinants	Points de référence topographique		Fonction de la ZIG et de la sensibilité des avoisinants aux déformations	forte
Mesure d'ouverture de fissures / mitoyens	Fissuromètre	Positionnement en fonction des indications du référent préventif	Fonction de la problématique identifiée	Fonction de la ZIG

6.8 FONDATIONS ET MURS DE SOUTÈNEMENT DE REMBLAIS

Vis à vis de la construction de nouvelles fondations les problématiques de mise en œuvre sont essentiellement liées aux contraintes d'exécution avec les ouvrages existants (avoisinants dans la ZIG). On se reportera donc au domaine "mitoyen" présenté plus loin.

La partie tassement des remblais présentée plus haut n'est pas rappelée ici.

SOUTÈNEMENT EN REMBLAIS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déplacement et sollicitations de l'écran				
Mesure des déplacements dans les 3 directions	Cibles topographiques	Position à adapter en fonction des déplacements maximaux attendus	Obligatoire	forte
Analyse d'un basculement de soutènement	Inclinomètre vertical en forage sur ouvrage ou cibles topographiques		En fonction de la problématique identifiée	faible
Impact sur les mitoyens				
Vérification de l'absence ou de la limitation des déformations sur les avoisinants	Points de référence topographique		Fonction de la ZIG et de la sensibilité des avoisinants aux déformations	forte
Mesure d'ouverture de fissure des fissures existantes	Fissuromètre	Positionnement en fonction des indications du référé préventif	Fonction de la ZIG	Fonction de la problématique identifiée

6.9 TALUS NATURELS (SOLS MEUBLES / SOLS ROCHEUX)

Nous distinguons ici les sols meubles des sols rocheux.

Si les déformations des sols meubles sont généralement progressives, la brutalité des déformations des roches impose la mise en œuvre d'une instrumentation automatique. Les conditions d'accès souvent délicates aux talus rocheux militent également pour la mise en œuvre d'une instrumentation automatique avec télétransmission.

TALUS NATUREL – SOLS MEUBLES / SOLS ROCHEUX				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure du niveau de nappe				
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre ouvert ou sélectif]	Le suivi du piézomètre peut être manuel ou automatique. La sonde de pression utilisée doit être adaptée à la charge hydraulique.	Obligatoire	Forte (amont et aval)
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre multipoint	Mesure du niveau de nappe dans différents aquifères au sein d'un forage unique La méthode utilisée pour isoler les différents capteurs (cimentation, packers, etc.) doit être parfaitement réalisée et adaptée au milieu étudié pour assurer la représentativité des mesures.	Selon le contexte hydrogéologique	Forte (amont et aval)
Mesure du niveau de nappe	CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	Mesure du niveau de nappe (sol peu perméable)	Selon contexte hydrogéologique	

TALUS NATUREL – SOLS MEUBLES

Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations en surface				
Mesure des déplacements en surface	Borne topographique	Mesure directe des déplacements dans les trois directions. A réaliser de préférence par un géomètre agréé.	Obligatoire	Importante
Mesure des déplacements en surface	Fibre optique (déformation)	Mesure des déformations sur de grands linéaires. La fibre doit être correctement protégée, idéalement au sein d'une tranchée. Elle doit être installée transversalement au déplacement attendu.		Moyenne
Mesure des déplacements en surface	LiDAR / Radar / Scanner / Photogrammétrie	Mesure possible sur des surfaces étendues. Peut être réalisé par drone, aéronef ou satellite en fonction de la superficie à traiter et des fréquences de mesure. Selon les techniques, peut mal s'appliquer en zone arborée ou végétalisée.	Recommandé hors zone urbaine	Mesure étendue
Mesure d'inclinaison d'éléments singuliers (ouvrages, bâtiments, etc.) ou sur piquet	Clinomètre de surface (tiltmètre)	Sensibles aux variations de température, les clinomètres doivent être abrités ou isolés thermiquement.	Obligatoire en présence de mitoyen sensible	Faible
Mesure des déformations en profondeur				
Mesure des déplacements en profondeur	Extensomètre	Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe. On privilégiera des forages horizontaux ou subhorizontaux, dans le sens du déplacement attendu.	Recommandé ou Equipement des fissures existantes	
Mesure d'inclinaison en profondeur	Inclinomètre vertical et/ou horizontal (chaîne inclinométrique en forage)	Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement. Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur, qui va servir de référence.	Recommandé	Faible
Suivi environnemental				
Mesure des conditions climatiques	Station météorologique dédiée	Mesure de la pluviométrie, température. Positionnement hors des zones instables.	Recommandé en complément du dispositif d'auscultation et en l'absence de données fiables	Faible

TALUS NATURELS ROCHEUX				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations en surface				
Mesure des déplacements en surface	Cible topographique	Mesure directe des déplacements en surface dans les trois directions. A réaliser de préférence par un géomètre agréé.	Obligatoire	Importante
Mesure des déplacements en surface	Fissuromètre	Mesure des déplacements de blocs rocheux ou ouvertures de fractures. Les appareillages doivent être protégés des chutes de pierre.	Recommandé	Moyenne
Mesure des déplacements en surface	Extensomètre	Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe. On privilégiera des forages horizontaux ou subhorizontaux, dans le sens du déplacement attendu.		Fonction de la problématique identifiée
Mesure des déplacements en surface	LiDAR / Radar / Scanner	Mesure possible sur des surfaces étendues. Peut être réalisé par drone, aéronef ou satellite en fonction de la superficie à traiter et des fréquences de mesure.	Recommandé hors zone urbaine	Mesure étendue
Mesure des déplacements en surface	Photogrammétrie	Mesure possible sur des surfaces étendues. S'applique mal en zone arborée ou végétalisée.	Recommandé hors zone urbaine	Mesure étendue
Mesure d'inclinaison d'éléments rocheux singuliers	Clinomètre de surface (tiltmètre)	Sensibles aux variations de température, les clinomètres doivent être abrités ou isolés thermiquement.	Obligatoire sur des blocs sensibles	Faible
Mesure des déformations en profondeur				
Mesure des déplacements en profondeur	Extensomètre automatique	Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe. Mesure automatique nécessaire. On privilégiera des forages horizontaux ou subhorizontaux, dans le sens du déplacement attendu.	Equipement des fissures existantes	Faible
Mesure d'inclinaison en profondeur	Inclinomètre vertical et/ ou horizontal automatique (chaîne inclinométrique en forage)	Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement. Mesure automatique nécessaire. Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur, qui va servir de référence.	Recommandé	Faible
Suivi environnemental				
Mesure des conditions climatiques	Station météorologique dédiée	Mesure de la pluviométrie, température gel/dégel notamment). Positionnement hors des zones instables.	Recommandé en complément du dispositif d'auscultation et en l'absence de données fiables	Faible
Suivi vibratoire	Accéléromètre / Géophone automatique	Recherche de signes précurseurs à un décrochement rocheux, tel qu'une accélération de la fissuration.	Recommandé	Importante

Points d'attention : la protection des outils de mesure doit être assurée, notamment en milieu rocheux

Dysfonctionnements : en milieu rocheux les conditions extrêmes peuvent conduire à des pannes. Il est recommandé de densifier l'instrumentation pour éviter une maintenance trop fréquente.

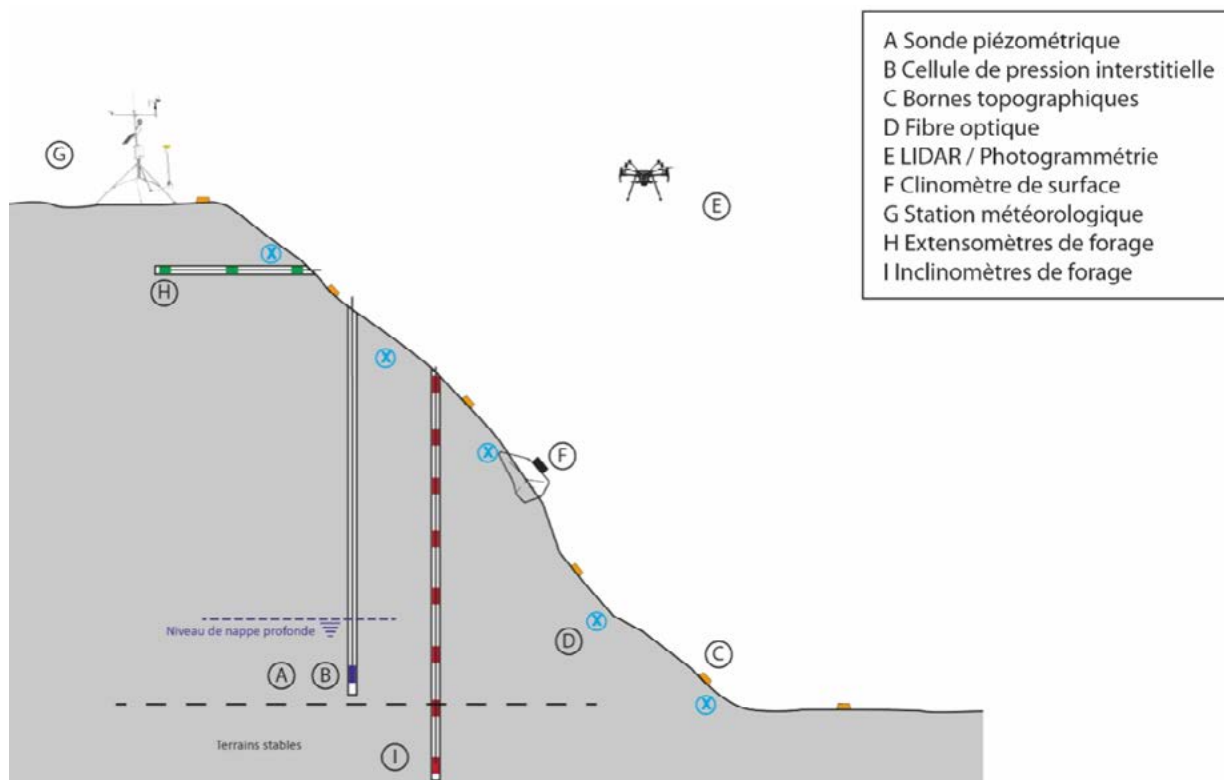


Figure 6.17 – Synthèse des techniques d'instrumentation d'un talus naturel

6.10 DIGUES EN SOL MEUBLE

Les digues en sol meuble, éventuellement protégées par un enrochement, ont deux fonctions distinctes décrites ci-dessous.

Digue de protection contre les inondations (fluvial, maritime) :

Les digues sont, par définition, des ouvrages à long linéaire. Celles édifiées dans le cadre de la défense contre les inondations sont, en France tout au moins, anciennes (19^{ième} siècle) à très anciennes (Moyen Âge) dans leur grande majorité, c'est-à-dire construites avec des exigences de conception, et de mise en œuvre très éloignées des standards géotechniques actuels.

Fragiles ou sujettes à d'inévitables surverses, les levées ont en outre subi de nombreuses brèches, ayant endommagé leur fondation et qui ont été plus ou moins bien réparées. Constituant un obstacle entre le cours d'eau et la plaine agricole ou les zones urbaines, les digues fluviales sont traversées par de multiples canalisations de prise ou de rejet d'eau. Finalement et à la différence de nombreux barrages, les remblais des digues de protection sont en général très hétérogènes. Cette hétérogénéité, multipliée par leur grande longueur, rend

particulièrement difficile le suivi d'auscultation de toutes les singularités potentiellement dangereuses pour la structure.

A contrario, leur hauteur est, sauf rare exception, inférieure à 7 m et leur fondation ne supporte finalement qu'une charge hydraulique modérée (et, de plus, transitoire le temps d'une crue), équivalente à celle des très petits barrages.

Digues « industrielles » :

Ces ouvrages sont relativement similaires aux digues de rétention d'eau/protection contre l'inondation, avec cependant quelques singularités :

- la nature du produit stocké conduit usuellement à l'étanchéification en parement interne par géosynthétiques (ex : géomembrane) ;
- il peut s'agir d'ouvrage significativement plus hauts que des ouvrages hydrauliques. C'est notamment le cas des digues de fermeture des crassiers implantés en vallons ;
- l'historique de certains de ces ouvrages peut être peu documenté.

Pour autant les mesures de surveillance et d'instrumentation de ce type d'ouvrage restent comparables à celles des autres digues en sol meuble, avec des adaptations relatives aux éléments ci-dessus.

Le tableau ci-après est élaboré à partir des conclusions de Mériaux et al. [Mériaux et al. 2012] :

DIGUES DE PROTECTION				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations				
Relevé géométrique en XYZ	Mesures LIDAR/photogrammétrie	Suivi des déformations de la géométrie de la digue sur son linéaire	Recommandé en cas de risque suspecté	Mesure étendue
Relevé géométrique en XYZ	Topographie classique	Suivi des déformations de la géométrie de la digue sur une zone singulière	Recommandé en cas de d'instabilité constatée	Mesure localisée
Mesures piézométriques				
Piézomètres	En forage tubé avec chambre de pression délimitée dans les zones à ausculter de la digue, dépendant de sa conception (étanchéités, drains, filtres, recharges aval, particularités, voiles injectés, géologiques...)	A implanter sur des profils amont/aval mais exige de faire des relevés manuels durant les crues ou juste après	Implantation fonction de la problématique à analyser	Moyenne
Piézomètres	Capteurs de pressions automatiques	Permettent d'enregistrer les périodes de courte durée durant lesquelles la digue sera mise en eau (crue)	Cibler les piézomètres clé à équiper	Faible
Débits de fuites ou de drainage				
Mesures manuelles de débit par capacité jaugée ou seuil calibré		En fonction des zones d'exutoires des fuites/drains et du débit	Recommandé	À chaque exutoire/résurgence de drainage
		Exige de faire des relevés manuels durant les crues ou juste après (ouvrages de protection des inondations)		
Mesure automatique du débit	Capteurs automatiques	Permettent d'enregistrer les périodes de courte durée durant lesquelles la digue sera mise en eau (crue pour les ouvrages de protection des inondations)	Recommandé	À chaque exutoire/résurgence de drainage
Détection de zones de fuites	Mesure de température répartie par fibre optique	Adaptée aux grandes longueurs	Fonction du linéaire à surveiller	Mesure continue
Détection de zones de fuites	Mesure de température par une chaîne de capteurs classiques	Peu adaptée aux grandes longueurs	Fonction du linéaire à surveiller	Mesure continue
Détection des pertes de matériaux	Bac de décantation / Mesure de turbidité de l'eau	Détection d'eau chargée dans les fuites (signe d'érosion interne)	Recommandé	En cas de risque suspecté, à chaque exutoire/résurgence de drainage

DIGUES DE PROTECTION				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure du niveau de fluide retenu				
Mesure de niveau	Echelle limnimétrique	Définition de la hauteur d'eau retenue	Obligatoire	moyenne
Mesure de niveau	Ouvrages industriels : Capteurs de pressions automatiques ou distancemètre (capteurs radars ou ultrasons) ou flotteur avec positionnement satellitaire	Définition de la hauteur de fluide retenue	Obligatoire	1 ou 2 sondes par ouvrage
Mesure des déformations en profondeur				
Mesure des déplacements en profondeur	Extensomètre automatique	Mesure d'allongement entre 2 points (monopoint) ou plusieurs (multipoint) sur un axe. Mesure automatique nécessaire. On privilégiera des forages orientés, dans le sens du déplacement attendu.	Equipement des fissures existantes	Faible
Mesure d'inclinaison en profondeur	Inclinomètre vertical et/ou horizontal automatique (chaîne inclinométrique en forage)	Mesure des variations angulaires relatives suivant un axe vertical ou horizontal permettant de préciser le volume instable et son mouvement. Mesure automatique nécessaire. Le forage inclinométrique doit être ancré dans une zone stable en profondeur, qui va servir de référence.	Recommandé	Faible
Suivi environnemental				
Mesure des conditions climatiques	Station météorologique dédiée	Mesure de la pluviométrie, température gel/dégel notamment). Positionnement hors des zones instables	Recommandé en complément du dispositif d'auscultation et en l'absence de données fiables	Faible

Un point particulier d'attention : lors de l'installation de l'instrumentation, il convient de se prémunir du risque d'érosion interne susceptible de se développer à proximité des câbles enterrés en tranchée.

6.11 TUNNELS

Faire un tunnel, c'est "décharger un milieu discontinu, anisotrope, hétérogène et dont les discontinuités sont souvent remplies d'eau" [Londe 1977].

C'est dans ce contexte de difficulté à prévoir le comportement du massif meuble ou rocheux au déchargement, aussi bien à court terme que pour le long terme, qu'intervient le rôle de l'auscultation (mesures in situ).

L'auscultation intervient aux trois stades de la vie d'un tunnel : avant exécution, pendant les travaux, en cours d'exploitation [AFTES 2005].

Avant exécution, le but est la reconnaissance générale. Il s'agit de :

- déterminer les propriétés géotechniques significatives pour l'ouvrage (en termes de déformabilité, de résistance mécanique, de contraintes naturelles, de direction d'anisotropie, de perméabilité...);
- réduire les aléas du projet.

***Remarque :** les mesures réalisées à ce stade "Avant exécution" correspondant principalement à des essais ne sont pas abordées dans ce document.*

Pendant travaux, l'objectif principal de l'auscultation est la maîtrise des risques d'instabilité à court terme.

En phase d'exploitation, le but des mesures sur un tunnel est d'assurer la pérennité de l'ouvrage et par là même, assurer la sécurité des usagers.

La maîtrise des risques d'instabilité à court terme (phase travaux) et à long terme (phase exploitation) passe prioritairement par :

- le suivi des déplacements en souterrain et en surface, avec, en milieu urbain, la quantification de l'impact de ces déplacements sur les avoisinants (fissures, inclinaison du bâti, vibration...) [AFTES 2018] ;
- le suivi des déformations dans l'ouvrage (pour contrôler l'état de contrainte) ;
- le suivi des conditions hydrauliques.

L'importance de ces différents types de paramètres (géométrique, mécanique et hydraulique) à mesurer varie avec le type d'ouvrage, la méthode d'exécution et la nature du terrain. On peut cependant définir deux grands cas :

- les tunnels réalisés par des méthodes conventionnelles ;
- les tunnels réalisés au tunnelier

Les tunnels réalisés par des méthodes conventionnelles sont souvent utilisés pour "des tunnels profonds" et dont la réalisation nécessite "soutènement" et "revêtement"

Dans ce cas l'instrumentation type est synthétisée dans le schéma ci-dessous : elle est principalement réalisée à partir du tunnel lui-même.

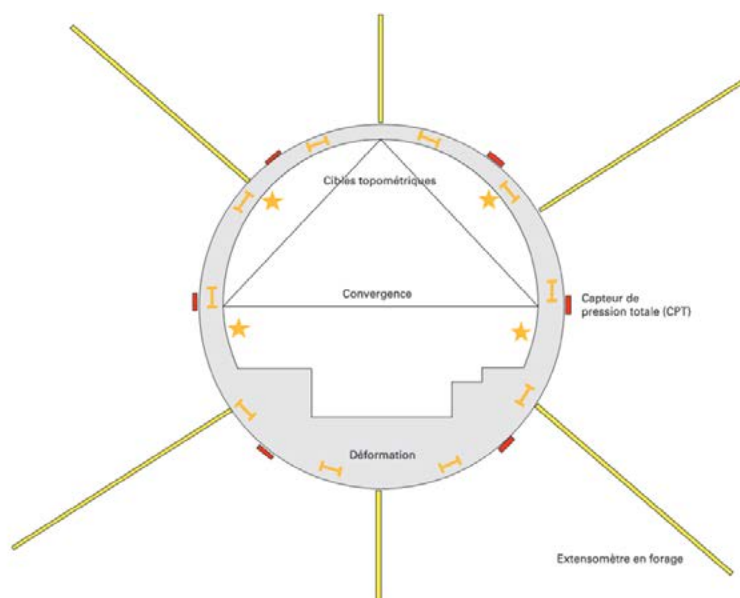


Figure 6.18 - Instrumentation type d'un ouvrage souterrain profond (extrait doc. Technique de l'ingénieur)

TUNNELS : MESURES EN PHASE TRAVAUX

Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Tunnel excavé par méthode conventionnelle - Mesure des paramètres géométriques				
Déplacement du front de taille	Mesure topométrique extrusomètre	La mesure topométrique peut être systématisée. La mise en place d'extrusomètre dépend de la nature et du comportement attendu des terrains traversés.	recommandé	Faible
Convergence	Distancemètre à fil Invar convergence optique	La convergence à fil n'est plus utilisée que pour des tunnels de "petit diamètre". La convergence optique est systématisée.	obligatoire	Forte
Tassement en surface	Mesure topographique Mesure GPS INSAR Téléniveaux hydrauliques	L'utilisation des téléniveaux est rare (dans certain cas d'injection par exemple).	Uniquement si la profondeur du tunnel et la nature du terrain exigent ce suivi.	Moyenne. Forte si existence de "structures sensibles"
Déplacement en forage	Extensomètres (à tiges, à barres...) avec capteurs électriques ou à lecture "manuelle") Tassomètre magnétique en forage Inclinomètre (lecture "manuelle") ou chaîne inclinométrique en place	Forages réalisés dans le tunnel : la technique permet une mesure de convergence et d'appréhender l'épaisseur de terrain impacté par la réalisation du tunnel. Forage à partir de la surface : pour tunnel peu profond principalement en milieu urbanisé. Forage à partir de la surface : pour tunnel peu profond principalement en milieu urbanisé.	recommandé	Moyenne
Rotation en surface	Clinomètre Electronivelle nivelle "manuelle" Mesure topographique sur bâtiment	En milieu urbain (cf. : chapitre avoisinant)	Uniquement si la profondeur du tunnel et la nature du terrain exigent ce suivi	Moyenne
Evolution des fissures	Fissuromètres	En milieu urbain (cf. : chapitre avoisinant)	Uniquement si la profondeur du tunnel et la nature du terrain exigent ce suivi	Faible
Tunnel excavé par méthode conventionnelle - Mesure des paramètres hydrauliques				
Piézométrie du terrain	CPI ou piézomètre ouvert ou sélectif		obligatoire	Moyenne. Forte si existence de "structures sensibles"
Débit d'exhaure	Débitmètre		recommandé	Faible
Pluviométrie en surface	Pluviomètre	Paramètre rarement mesuré	faible	Faible
Température des venues d'eau	Thermomètre		faible	Faible

TUNNELS : MESURES EN PHASE TRAVAUX				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Tunnel excavé par <u>méthode conventionnelle</u> - Mesure des paramètres mécaniques				
Force (tirant, boulon, pied de cintre...)	Cale dynamométrique ou cellule de charge	Mise en œuvre complexe	recommandé	Moyenne
Contrainte dans le terrain	Cellule de déformation en forage	Mise en œuvre complexe		Faible
Contrainte dans le soutènement/ revêtement	Cellule de pression totale extensomètres jauges de contraintes	Utilisation de cellule de pression totale et de jauges de déformation les jauges de contrainte sont peu utilisées	recommandé	Moyenne
Tunnel excavé par <u>méthode conventionnelle</u> - Autres Paramètres				
Température du terrain	Thermomètre Thermocouple Fibre optique		faible	Faible
Température de l'air dans le tunnel	Thermomètre	Important pour les problèmes de ventilation	moyenne	
Pression de l'air du tunnel		Important pour les problèmes de ventilation	moyenne	
Hygrométrie du tunnel	Hygromètre			Faible
Vibrations	Géophones accéléromètres	Indispensables en cas d'utilisation d'explosif essai de convenance et suivi vibratoire - impact du chantier sur les avoisinants	obligatoire	Moyenne à Forte

TUNNELS : EN EXPLOITATION				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des paramètres géométriques				
Tassement en surface	Points de référence topographique Insar		secondaire	faible
Déplacement en forage depuis la surface	Tassomètre magnétique en forage Inclinomètre	Mesures faites sur du matériel posé en phase travaux	secondaire	faible
Rotation en surface	Clinomètre		secondaire	faible
Convergence	Convergence optique	Sur certains profils en fonction de l'ouvrage, de la géologie ou des travaux réalisés à proximité de l'ouvrage	recommandé	moyenne
Déformation du revêtement	Extensomètre Fibre optique	Mesures faites sur du matériel posé en phase travaux	recommandé	faible
Evolution des fissures	Fissuromètres	Mesures uniquement sur fissures du revêtement	recommandé	faible
Mesure des paramètres hydrauliques				
Piézométrie du terrain	CPI ou piézomètre ouvert ou sélectif	Utilisation du matériel mis en œuvre pendant la phase travaux	recommandé	faible
Débit d'exhaure	Débitmètre		recommandé	faible
Pluviométrie en surface	Pluviomètre		secondaire	
Température des venues d'eau	Thermomètre		secondaire	

TUNNELS : EN EXPLOITATION				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des paramètres géométriques				
Tassement en surface	Points de référence topographique Insar		secondaire	faible
Déplacement en forage depuis la surface	Tassomètre magnétique en forage Inclinomètre	Mesures faites sur du matériel posé en phase travaux	secondaire	faible
Rotation en surface	Clinomètre		secondaire	faible
Convergence	Convergence optique	Sur certains profils en fonction de l'ouvrage, de la géologie ou des travaux réalisés à proximité de l'ouvrage	recommandé	moyenne
Déformation du revêtement	Extensomètre Fibre optique	Mesures faites sur du matériel posé en phase travaux	recommandé	faible
Evolution des fissures	Fissuromètres	Mesures uniquement sur fissures du revêtement	recommandé	faible
Mesure des paramètres hydrauliques				
Piézométrie du terrain	CPI ou piézomètre ouvert ou sélectif	Utilisation du matériel mis en œuvre pendant la phase travaux	recommandé	faible
Débit d'exhaure	Débitmètre		recommandé	faible
Pluviométrie en surface	Pluviomètre		secondaire	
Température des venues d'eau	Thermomètre		secondaire	
Tunnel excavé par méthode conventionnelle - Mesure des paramètres mécaniques				
Force (tirant, boulon, pied de cintre...)	Cale dynamométrique ou cellule de charge	Sur du matériel mis en place en phase travaux	secondaire	faible
Contrainte dans le terrain	Cellule de déformation en forage	Mise en œuvre délicate	secondaire	essais ponctuels
Contrainte dans le soutènement/revêtement	Cellule de pression totale	Sur du matériel mis en place en phase travaux	recommandé	faible
Tunnel excavé par méthode conventionnelle - Autres Paramètres				
Température du terrain	Thermomètre Thermocouple Fibre optique		secondaire	très faible
Température de l'air dans le tunnel	Thermomètre		secondaire	
Pression de l'air du tunnel			secondaire	
Hygrométrie du tunnel	Hygromètre		secondaire	
Vibrations	Accéléromètre / géophone	Fonction de l'exploitation du tunnel cf. paragraphe "avoisinant"	recommandé	essais ou densité faible

Les tunnels réalisés au tunnelier sont des tunnels de subsurface situés le plus souvent en milieu urbain

Dans ce cas, l'instrumentation type est synthétisée dans le schéma ci-dessous : elle est principalement réalisée à partir de la surface, des zones particulières pouvant toutefois être instrumentées au sein du tunnel.

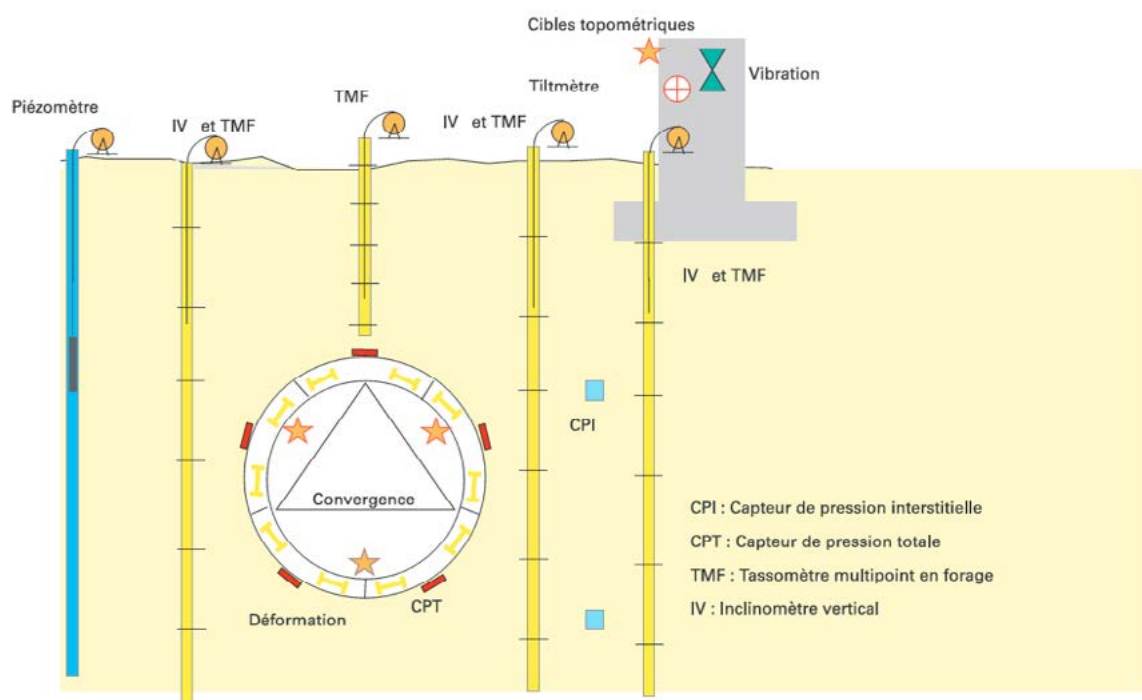


Figure 6.19 - Instrumentation type d'un ouvrage souterrain en zone urbaine
(extrait doc. Technique de l'ingénieur)

TUNNELS : MESURES EN PHASE TRAVAUX				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Tunnel excavé par tunnelier - Mesure des paramètres géométriques				
Déplacement du front de taille		D'une mise en œuvre très complexe	Généralement non nécessaire	
Convergence	Distancemètre à fil Invar Convergence optique	A faire dans des zone particulière (jonction tunnel / rameaux...)	recommandé	faible
Tassement en surface	Mesure topographique Mesure GPS INSAR Téléniveaux hydrauliques	La détermination de la taille et le suivi des pentes de la cuvette de tassement sont prioritaires L'utilisation des téléniveaux est exceptionnelle	obligatoire	forte
Déplacement en forage	Jauges de déformation à corde vibrante ou électriques ou fibre optique Tassomètre magnétique en forage Inclinomètre (lecture "manuelle") ou chaîne inclinométrique en place	Mise en place en forages uniquement à partir de la surface Réalisation de profils instrumentés transversaux par rapport à l'axe du tunnel	recommandé	moyenne
Rotation en surface	Clinomètre Electronivelle Nivelle "manuelle" Mesure topographique sur bâtiment	cf. : chapitre "avoisnants"	fortement recommandé	forte
Evolution des fissures	Fissuromètres	cf. : chapitre "avoisnants"	recommandé	

TUNNELS : MESURES EN PHASE TRAVAUX				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Tunnel excavé par tunnelier à confinement - Mesure des paramètres hydrauliques				
Piézométrie du terrain	CPI ou piézomètre ouvert ou sélectif		recommandé	faible
Débit d'exhaure	Débitmètre	Non mesuré		
Pluviométrie en surface	Pluviomètre	Paramètre rarement mesuré		
Température des venues d'eau	Thermomètre	Non mesuré		
Tunnel excavé par tunnelier à confinement - Mesure des paramètres mécaniques				
Force (tirant, boulon, pied de cintre...)	Cale dynamométrique ou cellule de charge	Sans objet		
Contrainte dans le terrain	Cellule de déformation en forage	Très rarement mesuré		
Contrainte dans le soutènement	Extensomètre	Mise en place des capteurs à l'usine de préfabrication des voussoirs	secondaire	faible
Tunnel excavé par tunnelier à confinement - Autres Paramètres				
Température du terrain	Thermomètre Thermocouple Fibre optique	Rarement mesuré		
Température de l'air dans le tunnel	Thermomètre	Rarement mesuré	secondaire	
Pression de l'air du tunnel		Rarement mesuré	secondaire	
Hygrométrie du tunnel	Hygromètre	Rarement mesuré	secondaire	
Vibrations	Accéléromètre/géophone	Mesuré en surface sur des structures "sensibles"	recommandé	faible

6.12 MINES ET CARRIÈRES

Les problématiques d'instrumentation des mines et carrières sont radicalement différentes selon qu'il s'agit de mines ou carrières souterraines ou à ciel ouvert.

Dans le cas des ouvrages souterrains, l'attention sera surtout portée sur les instabilités en paroi et au toit : fissuration, risque de chute de blocs rocheux, fluage des parois, venues d'eau, remontée de fontis, poinçonnement des piliers, etc. Bien que des mouvements de terrain de grande ampleur puissent être observés (par exemple un affaissement généralisé), il s'agira souvent de phénomènes locaux. Les mouvements de terrain en surface (subsidence, affaissement, effondrement localisé) sont aussi considérés, surtout pour les ouvrages les plus superficiels.

Dans le cas des ouvrages à ciel ouvert, les problématiques concerneront toujours les risques d'instabilités mais doivent être considérées parfois à plus grande échelle. En effet aux cas déjà évoqués, des mouvements plus larges peuvent se produire sur un front de taille : glissement de terrain, décrochement du massif, éboulement, etc. Les approches d'instrumentation seront donc très différentes des ouvrages souterrains et seront similaires à celles concernant les talus naturels rocheux, même si contrairement à ces derniers, l'exploitation du gisement fait que le front de taille évolue souvent dans le temps.

MINES ET CARRIÈRES SOUTERRAINES

Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations au fond				
Mesure de déplacements	Fissuomètre	Le suivi de fissures soigneusement choisies permet de suivre finement des déplacements locaux, par exemple le décrochement d'un bloc, l'ouverture d'une fracture, etc. Il pourra s'agir de simples jauges à lecture manuelle ou de capteurs électroniques. Dans ce second cas, il conviendra de les protéger notamment contre les chocs (ex : chute de pierre).	Recommandé	Selon les points spécifiques à suivre
	Extensomètre en forage	L'extensomètre permet de suivre finement la distance entre deux points. Installé dans un forage et fixé au fond, cette mesure permet de suivre l'éventuel déplacement d'une paroi (instabilité ou fluage). Permet de suivre le fluage.	Recommandé	Selon les points spécifiques à suivre
	Canne de convergence	Une canne de convergence permet de suivre la distance entre 2 points, typiquement le sol et le toit d'une galerie. Installé en zone à risque d'effondrement ou de poinçonnement.	Facultatif	Selon les points spécifiques à suivre
Mesure des déformations en surface				
Mesure de déplacements	Borne topographique	S'agissant d'une mesure peu invasive et généralement économique, elle est très souvent mise en œuvre. Elle permet une mesure directe des déplacements en surface dans les trois directions. La mesure est à réaliser de préférence par un géomètre agréé, qui utilisera soit une mesure de positionnement (type GPS), soit une mesure par théodolite avec référence. Elle permettra de suivre la subsidence en surface, voire un affaissement ou effondrement généralisé.	Recommandé	Importante
Mesure de déplacement à grande échelle	Fibre optique	La fibre optique permet de mesurer des déformations sur de grands linéaires. Elle peut être installée transversalement au déplacement attendu. La fibre doit être correctement protégée, idéalement au sein d'une tranchée.	Facultatif	Moyenne Mesure continue
Mesure de déplacement à grande échelle	LiDAR RADAR Scanner	Mesure possible sur des surfaces étendues. Peut être réalisé par drone, aéronef ou satellite en fonction de la superficie à traiter et des fréquences de mesure.		Mesure étendue
Mesure de déplacement à grande échelle	Photogrammétrie	Mesure possible sur des surfaces étendues. S'applique mal en zone arborée ou végétalisée		Mesure étendue
Mesure de déplacement à grande échelle	GPS			

MINES ET CARRIÈRES SOUTERRAINES

Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Suivi vibratoire				
Mesure sismique	Accéléromètre / Géophone automatique	La mesure sismique (ou microsismique) permet d'enregistrer les vibrations liées à la fissuration de la roche (libération de contraintes, instabilité) ou à des chutes de bloc (impact au sol). Les capteurs (géophones ou accéléromètres) seront installés soit au fond soit en forage depuis la surface. Il s'agit d'une mesure globale et continue qui permet de surveiller indirectement de grands espaces. L'interprétation des mesures est cruciale, notamment pour exclure les vibrations liées à l'exploitation de la mine ou de la carrière ou issue de l'environnement proche (circulation, travaux, etc.)	Très spécifique	Importante Mesure étendue
Mesure acoustique	Microphone	La mesure acoustique repose sur la même approche que la mesure sismique. L'objet est dans ce cas d'enregistrer les émissions acoustiques provoquées par la fissuration (rarement sonore) mais surtout par les chutes de blocs. Là aussi une clé de l'efficacité de la mesure réside dans la capacité à exclure les bruits parasites. S'agissant de sons audibles, la possibilité d'écouter les mesures facilite grandement le travail.	Très spécifique	Importante Mesure étendue
Suivi environnemental				
Suivi de la qualité d'air	Hygromètre	Mesure du taux d'humidité pour détecter des arrivées d'eau importunes	Facultatif	Faible
Mesure du niveau de nappe				
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre ouvert ou sélectif] ou CPI [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre fermé]	Le suivi du piézomètre peut être manuel ou automatique. La sonde de pression utilisée doit être adaptée à la charge hydraulique attendue et aux éventuelles pollutions suspectées.	Obligatoire	Forte (amont et aval)
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre multipoint	Mesure du niveau de nappe dans différents aquifères au sein d'un forage unique. La méthode utilisée pour isoler les différents capteurs (cimentation, packers, etc.) doit être parfaitement réalisée et adaptée au milieu étudié pour assurer la représentativité des mesures.	Selon le contexte hydrogéologique	Forte (amont et aval)

Mines et carrières à ciel ouvert : voir les recommandations sur les talus naturels.

- A Sonde piézométrique
- B Accéléromètres / géophones
- C Bornes topographiques
- D Fibre optique
- E LIDAR / Photogrammétrie
- F Fissuromètres
- G Hygromètre
- H Extensomètres de forage
- I Canne de convergence
- J Microphone

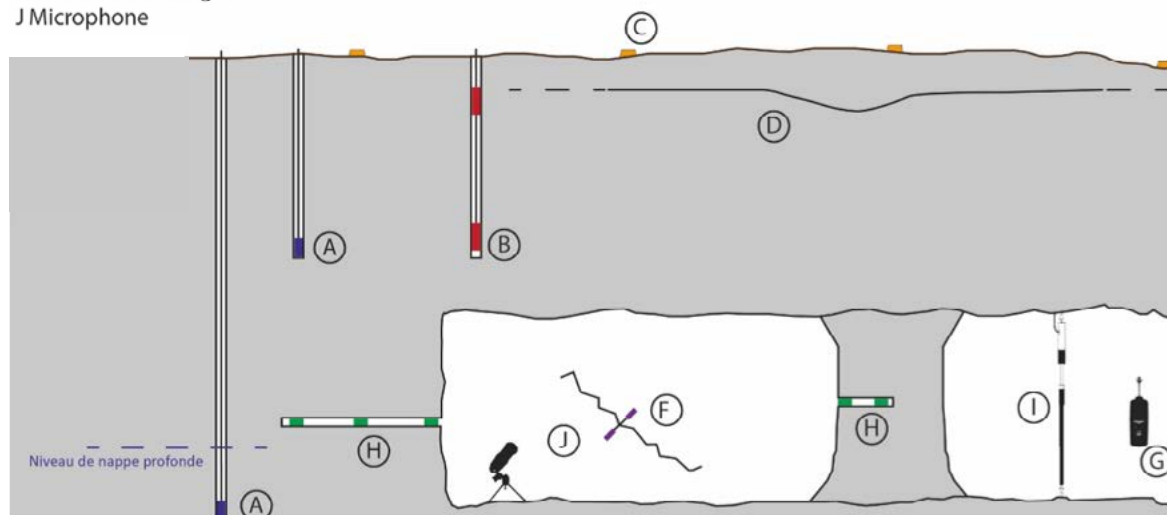


Figure 6.20 – Synthèse des techniques d'instrumentation d'une mine ou carrière souterraine

6.13 FONDATIONS PROFONDES

Les fondations profondes ne sont que très rarement instrumentées, sauf dans le cadre de projets R&D.

En conséquence, l'instrumentation des fondations profondes n'est pas traitée dans ce guide, qui pourrait être complété si ce type d'instrumentation venait à être davantage mis en œuvre, hors R&D.

En revanche, des essais de conformité sont réalisés sur les fondations profondes (portance, flexion sous efforts latéraux, essais de traction, vérification de l'intégrité, etc.). Dans ce cas, une instrumentation spécifique est mise en œuvre (cellules de chargement, extensomètres mécaniques, jauges de déformation, fibres optiques...)

Des programmes de recherche ont été menés pour étudier le comportement de pieux après réalisation (exemple du projet de recherche Fondasilex qui a instrumenté 6 pieux de la tour Silex 2 (La Part-Dieu, Lyon) avec des extensomètres, jauges de déformation et de la fibre optique), ou bien le programme de recherche TULIP (comportement des pieux existants au passage d'un tunnelier), mais il ne s'agit pas d'une pratique courante.

Le lecteur pourra utilement se référer aux normes et règlements en vigueur pour les essais de chargement et aux articles traitant d'expérimentations dans le cadre des projets de R&D.

6.14 OUVRAGES EXISTANTS / IMPACT SUR LES MITOYENS

Le présent paragraphe ne s'intéresse qu'aux ouvrages existants dans le cas d'interactions avec un projet et devra être couplé à l'instrumentation relative à la technique de travaux envisagée.

IMPACT SUR MITOYENS / SUR OUVRAGES EXISTANTS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déformations				
Mesure de déformations	Points de référence topographique	A ne pas négliger dans le cas d'un rabattement de nappe	Obligatoire dans le cas d'un ouvrage sensible	forte
Mesure d'ouverture de fissure des fissures existantes	Fissuromètres	Positionnement en fonction des indications du référent préventif A ne pas négliger dans le cas de travaux générant des vibrations	Recommandé	faible
Niveau de nappe				
Mesure du niveau de nappe	Piézomètre [Sonde de niveau d'eau au sein d'un piézomètre ouvert ou sélectif]		Fonction de la problématique	faible
Vibration				
Mesures de vibration	Géophones accéléromètres	Référent préventif précisant les ouvrages à instrumenter et les seuils vibratoires acceptables	Obligatoire en présence d'ouvrages sensibles dans la ZIG	faible

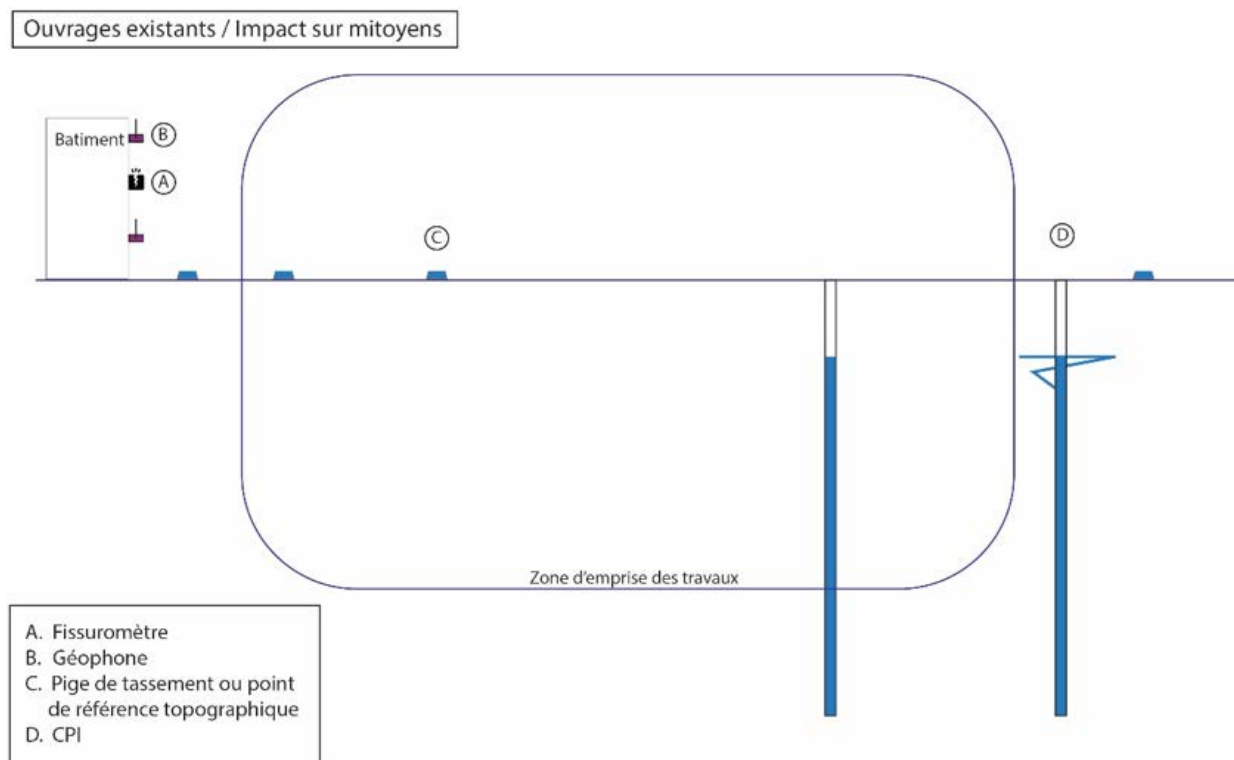


Figure 6.21 – Exemple d'instrumentation dans le cas d'une interaction avec des ouvrages existants

6.15 OUVRAGES PORTUAIRES

Les ouvrages portuaires pouvant être instrumentés correspondent à des ouvrages maritimes tels que ducs d'albe, quais, jetées, mais aussi à des enrochements.

QUAIS				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Déplacement et sollicitations du quai				
Mesure des déplacements dans les 3 directions	Cibles topographiques	Position à adapter en fonction du déplacement maximum attendu	Obligatoire	forte
Analyse d'un basculement de soutènement	Inclinomètre vertical sur ouvrage ou cibles topographiques		En fonction de la problématique identifiée	faible
Points de référence topographique	Vérification de l'absence ou de la limitation des déformations sur les avoisinants		Fonction de la ZIG et de la sensibilité des avoisinants aux déformations	
Mesures de vibration	Géophones accéléromètres	Définition des impacts de houle		faible
ENROCHEMENT				
Usage	Outil	Points clés / Mise en œuvre	Importance	Densité
Mesure des déformations en surface				
Mesure des déplacements en surface	LiDAR RADAR Scanner Photogrammétrie	Mesure possible sur des surfaces étendues. Peut être réalisé par drone, aéronef ou satellite en fonction de la superficie à traiter et des fréquences de mesure.		Mesure étendue

7 BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES UTILES

7 BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES UTILES

Chapitre 1 et bibliographie de référence

- AFNOR (2015). NF EN ISO 18674-1 Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ – Partie 1 : Règles générales
- AFTES (2005). Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains. Recommandations de l'AFTES – GT19R2F1
- AFTES (2001). La méthode convergence confinement. Recommandations de l'AFTES –GT7R6F1
- AFPS (2024). Guide relatif aux mesures de vibrations sous bruit ambiant et à leur exploitation pour la caractérisation dynamique des structures. Cahier technique 50
- Allagnat D. (sous la direction de) (2005). La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages – Presses des Ponts et Chaussées
- Briançon L., Cazeaudumec B., Pincet B. (2016). Auscultation géotechnique. Techniques de l'ingénieur
- CFMS (2020). Tirants d'ancrage TA 2020 – Règles professionnelles relatives à la conception, au calcul, à l'exécution, au contrôle et à la surveillance
- CFMS-SFEG (2022). Recommandations pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes
- Dunnicliff J. (1993). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance
- IMGC (2022). Maîtrise des risques par l'instrumentation. Guide GT5 IMGC <https://www.imgc.fr>
- LCPC-SETRA (2000). Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles. Guide technique
- Magnan J.P., C Mieussens C. (1981). Remblais sur sols compressibles : instrumentation et exploitation des mesures. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées

Chapitre 2

- AFNOR (2013). NF P94-500 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications
- AFNOR (2015). NF EN ISO 18674-1 Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 1 : règles générales
- AFNOR (2019). NF EN ISO 18674-5 Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 5 : mesures de la variation de pression par cellules de pression totale (TPC)
- ITA (2011). Monitoring and control in Tunnel construction. ITA Report #9

Chapitre 3

- AFNOR (2015). NF EN ISO 18674-1 : Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 1 : règles générales
- AFNOR (2016). NF EN ISO 18674-2 : Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 2 : mesurage des déplacements le long d'une ligne : extensomètres
- AFNOR (2017). NF EN ISO 18674-3 : Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 3 : mesurage des déplacements perpendiculaires à une ligne par inclinomètre
- AFNOR (2020). NF EN ISO 18674-4 : Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 4 : mesure de la pression interstitielle : piézomètres
- AFNOR (2019). NF EN ISO 18674-5 : Reconnaissance et essais géotechniques - Surveillance géotechnique par instrumentation in situ - Partie 5 : mesure de la variation de pression par cellules de pression totale (CPT)
- ISO/IEC (2007). Guide 99:2007(fr) Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés

- Parmentier Y., Kratz, F. (2022). Capteurs : principes de constitution, Techniques de l'ingénieur n°R401v1
- Rosin-Corre N., Noret C., Bordes J.L. (2012). L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry
- Terzaghi K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York

Chapitre 4

- Szymkiewicz F., Le Kouby A., Sanagawa T., Nishioka H. (2021). Feedback on static axial pile load tests for better planning and analysis. Proceedings of the Second International Conference on Press-in Engineering, 105-115

Chapitre 5

- Dubois L., Dauphin S., Rul G. (2016) Le glissement du Chambon : évolution du phénomène et gestion de crise. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-8 Juillet 2016, Nancy
- Fukuzono T. (1985). A Method to Predict the Time of Slope Failure Caused by Rainfall Using the Inverse Number of Velocity of Surface Displacement. Landslides, 22:2, 8-13
- Honjo Y., Wen-Tsung L., Guha S. (1994). Inverse analysis of an embankment on soft clay by extended Bayesian method. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 18:10, 709–734.
- Peck RB. (1969). Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. Geotechnique 19:2, 171-187
- Simon A., Royer M., Mauris F., Fabre J.P. (2012). Analyse des mesures d'auscultation des barrages avec les réseaux de neurones. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry

- Willm, G., Beaujoint, N. (1967). Les méthodes de surveillance des barrages au service de la production hydraulique d'Électricité de France. Problèmes anciens et solutions nouvelles. In: Proc. of the Ninth International Congress on Large Dams, Istanbul

Chapitre 6

- AFTES (2005). Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains. Recommandations AFTES – GT19R2F1
- AFTES (2018). Prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains – GT16R2F1
- Belut F., Mandour H., Maridet J., Talfumiere F. (2016) Retour d'expérience de 40 ans d'instrumentation inclinométrique sur le Réseau Ferré National. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, 6-8 Juillet 2016, Nancy
- Briançon L., Cazeaudumec B., Pincet B. (2016). Auscultation géotechnique. Techniques de l'ingénieur
- CFMS-SFEG (2022). Recommandations pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes
- LCPC SETRA (2000). Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles. Guide technique
- Londe P. (1977). Les mesures in-situ dans les tunnels. Conférence au CFMR du 20 octobre 1977
- Meriaux P., Monier P., Tourment R., Mallet T., Palma Lopes S., Maurin J., Pinhas M. (2012). L'auscultation des digues de protection contre les inondations : un concept encore à inventer. Colloque CFBR : « Auscultation des barrages et des digues - Pratiques et perspectives », 27-28 Novembre 2012, Chambéry



8 ANNEXES

8.1 ACRONYMES

8.2 FICHES SYNTHÉTIQUES D'EXEMPLES

- 8.2.1 Préchargement d'un remblai en zone compressible – Bordeaux
- 8.2.2 Grand déblai – Application de la méthode observationnelle – Autoroute A40-A404 (APRR)
- 8.2.3 Déblai ferroviaire instable – LGV Méditerranée
- 8.2.4 Murs cloués d'un viaduc – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Charmaix
- 8.2.5 Falaise instable - RD912 Hendaye
- 8.2.6 Stabilité d'un site historique – Suivi de la Pointe du Hoc
- 8.2.7 Digue en remblais – Suivi du comportement après travaux de réfection par mesures réparties (fibre optique) – Canal de Curbans
- 8.2.8 Tunnel – Suivi des données d'auscultation – Tunnel de Chamoise
- 8.2.9 Fondations – Suivi des données d'auscultation – installation ICEDA à Bugey
- 8.2.10 Fondations – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Monestier
- 8.2.11 Remblais, fondations et structure – Suivi des données d'auscultation – Viaduc de Bardonnex
- 8.2.12 Déblai ferroviaire – Suivi des données d'auscultation – LGV EST
- 8.2.13 Puits de lancement de tunnelier – Puits Glarner, RATP L14 – Instrumentation de la paroi moulée et suivi du rabattement

8 ANNEXES

8.1 ACRONYMES

- AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
- AFPS : Association Française du Génie Parasismique
- AVP : AVant Projet
- BE : Bureau d'Études
- CFMS : Comité Français de Mécanique des Sols et géotechnique
- CST : Commission Scientifique et Technique
- DCE : Dossier de Consultation des Entreprises
- EN : Norme Européenne
- ENT : Entreprise
- EXE : Exécution
- GT : Groupe de Travail ou Groupe Technique
- IA/AI : Intelligence Artificielle
- IMGC : Ingénierie de la Maintenance du Génie Civil
- IPI : chaîne inclinométrique automatique
- IR : Inclusion Rigide ou Infra Rouge en fonction du contexte
- ISO : International Organization for Standardization
- ITA : International Tunneling Association
- LVDT : Linear Variable Differential Transformer
- MEMS : Micro Electro Mechanical System
- MOA : Maître d'Ouvrage
- MOE : Maître d'Œuvre
- MTBF : Mean Time Between Failures
- NF : Norme Française
- OG : Ouvrage Géotechnique
- PRO : Projet
- REX : Retour d'Expérience
- SIL : Safety Integrity Level
- THM : Thermo-Hydro-Mécanique
- TMF : Tassomètre Multipoint en Forage
- ZIG : Zone d'Influence Géotechnique

8.2 FICHES SYNTHÉTIQUES D'EXEMPLES

8.2.1 PRÉCHARGEMENT D'UN REMBLAI EN ZONE COMPRESSIBLE – BORDEAUX

**Lieu :**

BORDEAUX ZAC

Période d'auscultation :

12/2018 à 11/2019

Maître d'ouvrage :

BORDEAUX
EURATLANTIQUE

Maître d'Œuvre :

GEOTEC

Entreprises :

NGE

Equipe d'Auscultation

NGE

Missions :

Suivi du préchargement
d'une zone compressible en
préalable à l'aménagement
d'un espace urbain

Coût de l'instrumentation :

Environ 10% / construction
ouvrage

Projet / Problématique :

BORDEAUX EURATLANTIQUE a la charge du pilotage de l'aménagement des quartiers situés en bord de Garonne à proximité de la gare St Jean, dans le cadre de l'accompagnement de l'arrivée de la LGV.

Dans cette optique, l'aménagement de la zone « Belvédère » en rive droite projetait la construction d'une place en remblais de 4 à 5 m d'épaisseur entre de futures constructions sur pieux.

La présence de sols argilo-vasards Quaternaires fortement compressibles était associée à l'impossibilité de mettre en œuvre le remblai en une seule phase et à des estimations de déformations importantes (supérieures au mètre).

Il a été décidé de réaliser un préchargement de la zone de remblaiement, en profitant des délais disponibles, avant le début des travaux d'aménagement.

La vérification du non poinçonnement des terrains lors du remblaiement et l'amplitude des déformations ont donc nécessité la mise en œuvre d'une instrumentation du site.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

L'instrumentation mise en œuvre a intégré :

- des sondes de mesure de pression interstitielle (CPI) afin de s'assurer de l'absence de risque de rupture lors de la montée des remblais ;
- des profilomètres sous l'emprise du remblai afin de suivre les déformations des terrains sous remblais ;
- des piges tassométriques dans l'emprise du remblai et sur des points sensibles proches afin de suivre les déformations des terrains sous remblais et dans la ZIG.

REX et Synthèse :

L'amplitude de déformation maximale envisagée était de l'ordre de 1,2 m.

Le suivi de l'instrumentation a permis d'observer une déformation globale de l'ordre du mètre permettant de confirmer le modèle géotechnique envisagé et de valider le déchargement après avoir obtenu le niveau de consolidation projeté.



Pige tassométrique en cours de montée du remblai



Pige tassométrique en fin de montée du remblai



Réalisation des tranchées pour pose des profilomètres



Forage pour pose de CPI

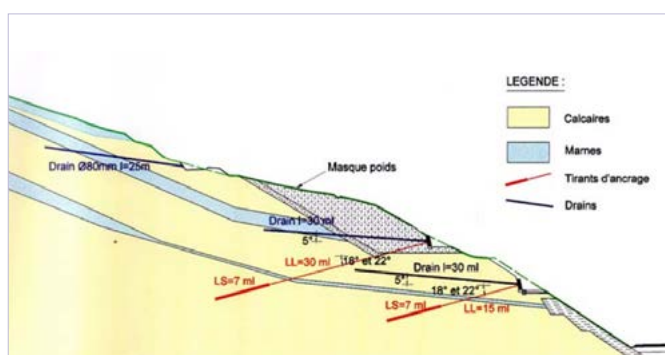
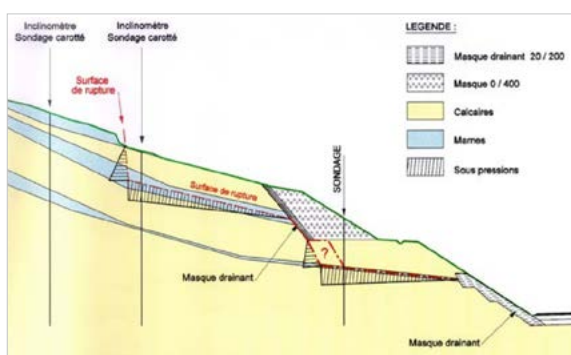


Mesure profilométrique



Connectique des CPI avec sa protection

8.2.2 INSTRUMENTATION D'UN GRAND DÉBLAI – APPLICATION DE LA MÉTHODE OBSERVATIONNELLE – AUTOROUTE A40-A404 (APRR)



Lieu :

Autoroute A40-A404

Période d'auscultation :

2003 à nos jours

Maître d'ouvrage :

APRR

Maître d'Œuvre :

Scetauroute - EGIS

Entreprises :

Demathieu et Bard
Soletanche-Bachy

Auscultation

EGIS / Dept. Instrumentation

Missions :

Conception, réalisation et pose de l'instrumentation

Coût de l'instrumentation :

Environ 4 % du coût des travaux de confortement

Projet / Problématique :

Lors de la réalisation d'un grand déblai en 1996 sur l'autoroute A40-A404 (réseau APRR), un glissement fossile a été réactivé suite à la suppression de la butée en pied. Afin d'empêcher une régression du glissement d'envergure vers l'amont, il a été décidé la mise en œuvre de dispositions confortatives progressives (drainage en phase 1 puis poutres et tirants précontraints avec possibilité de rajouter de la précontrainte additionnelle) basée sur les résultats du suivi instrumental (piézométrie, inclinométrie, topographie). La méthode observationnelle a été déployée.

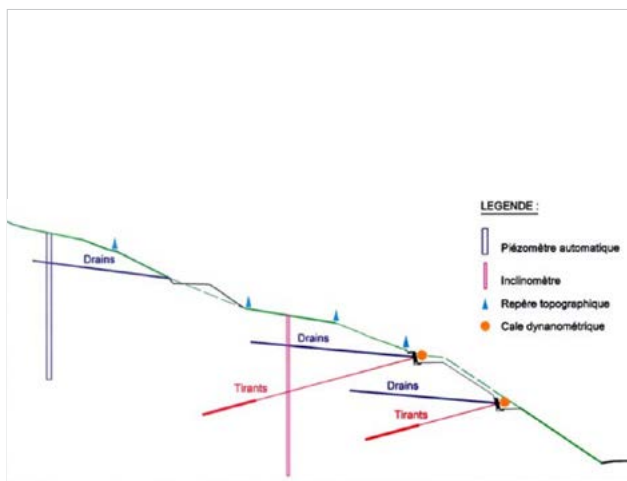
Schéma et descriptif de l'instrumentation :

Afin de surveiller ce grand déblai, des mesures inclinométriques (7 tubes de 20 à 30 ml), piézométriques (6 unités automatiques), topographiques (58 repères), d'efforts sur tirants (10 cales dynamométriques), ainsi que le suivi des débits des drains ont été mis en œuvre dans le cadre d'un plan de surveillance renforcé.

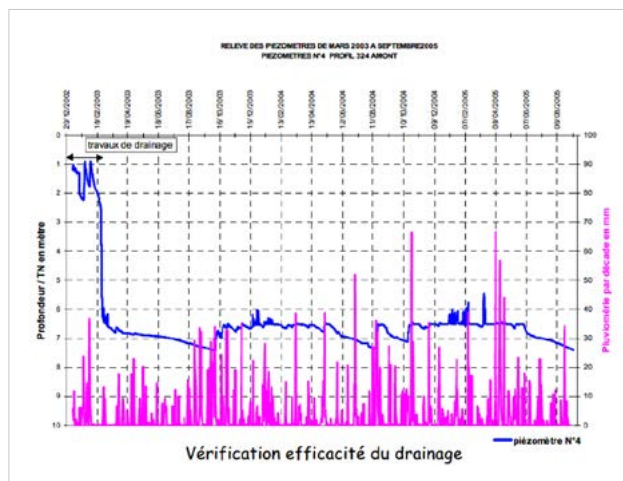
REX et Synthèse :

La mise en œuvre de la méthode observationnelle à travers le confortement du déblai D23 a été lancée contractuellement avec un phasage d'opération (avec drainage préalable et travaux de confortements) sous forme d'une tranche ferme (55% du nombre total des tirants) et d'une tranche conditionnelle (non engagée à ce jour).

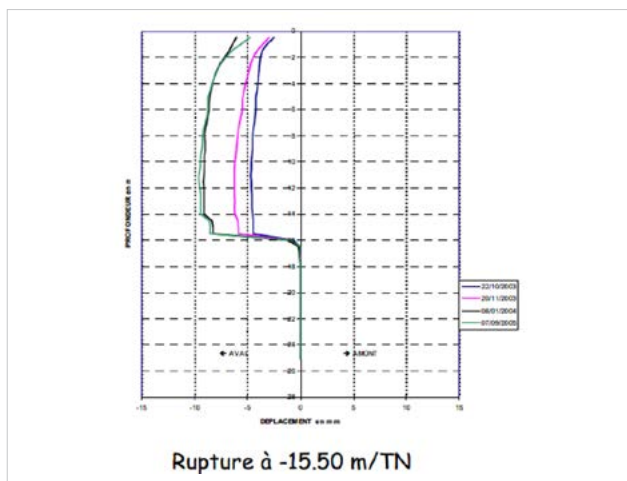
20 ans après les travaux, la poursuite du suivi de l'ouvrage a permis de valider le choix de la méthode, en présentant une économie globale sur les coûts et les délais de réalisation des travaux de confortement, tout en obtenant un bon niveau de sécurité.



Coupe de principe du confortement et de l'instrumentation



Contrôle piézométrique suite à la réalisation des drains en 2003



Localisation de la profondeur de glissement

Plan de surveillance après travaux

	2005	2006	2007
Inclinomètres	4 mesures	2 mesures	2 mesures
Piezomètres	automatiques en continu	automatiques en continu	automatiques en continu
Tension d'ancrage	6 mesures	4 mesures	2 mesures
Topographie	4 mesures	2 mesures	2 mesures
Suivi des drains	4 mesures	2 mesures	2 mesures

- 7 inclinomètres de 20 à 30 m
- 6 piézomètres automatiques
- 58 repères topographiques
- 10 cales dynamométriques/tirants
- Suivi débit drains

Proposition du plan de surveillance renforcé après travaux



Photographies en cours de travaux



Vue d'ensemble du déblai D23 après travaux de confortement

8.2.3 DÉBLAI FERROVIAIRE INSTABLE – LGV MÉDITERRANÉE

Lieu :

Déblai des AYASSES
LGV MEDITERRANEE
DROME

Période d'auscultation :

En cours depuis 2003

Maître d'ouvrage :

SNCF RESEAU

Maître d'Œuvre :

SNCF RESEAU

Mise en œuvre et suivi d'Auscultation :

SNCF RESEAU

Missions :

Suivi de l'évolution d'un déblai contigu à la ligne ferroviaire en mouvement depuis sa construction en 2001



Projet / Problématique :

Au sud de Valence, la plateforme de la LGV Méditerranée est affectée par la proximité d'un grand glissement au niveau du déblai des Ayasses. La singularité géologique du site a nécessité un volume important de reconnaissances et d'instrumentations pour bâtir une modélisation complète du glissement. Enfin, un modèle prédictif de l'impact de la pluviométrie sur l'activité a été établi pour optimiser les modalités de surveillance du site.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

L'instrumentation manuelle mise en œuvre pour le suivi de stabilité a intégré :

- suivi des déformations des sols en surface par un réseau de points tant sur le talus de déblai que sur la plateforme ferroviaire ;
- suivi des déformations des sol en profondeur par une vingtaine d'inclinomètre de 15 à 40 m de profondeur ;
- suivi de la nappe aquifère par plusieurs piézomètres montrant un battement de plus de 6m du niveau piézométrique

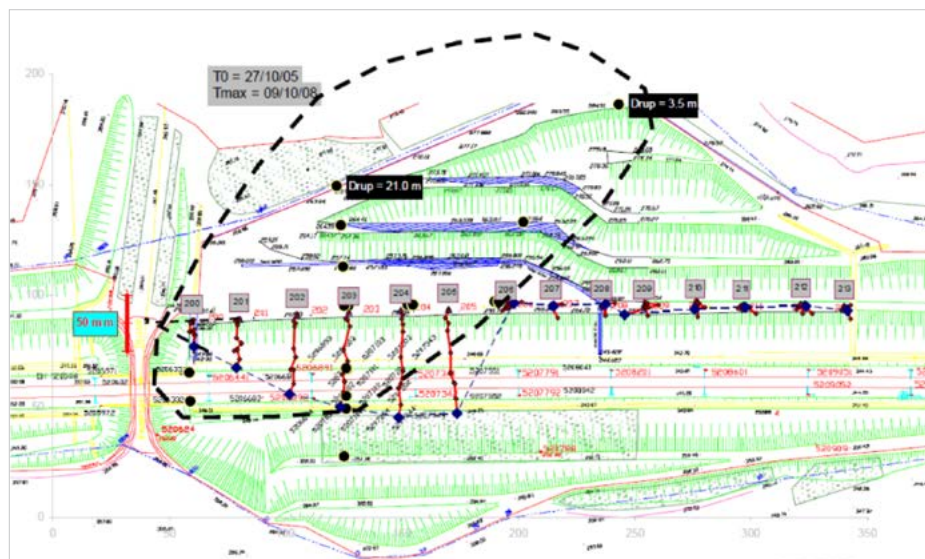
Le pas de mesure de l'instrumentation a été défini entre 1 mois et 3 mois suivant les appareillages et les périodes de mesure (phases d'accélération et phases de décélération).

REX et Synthèse :

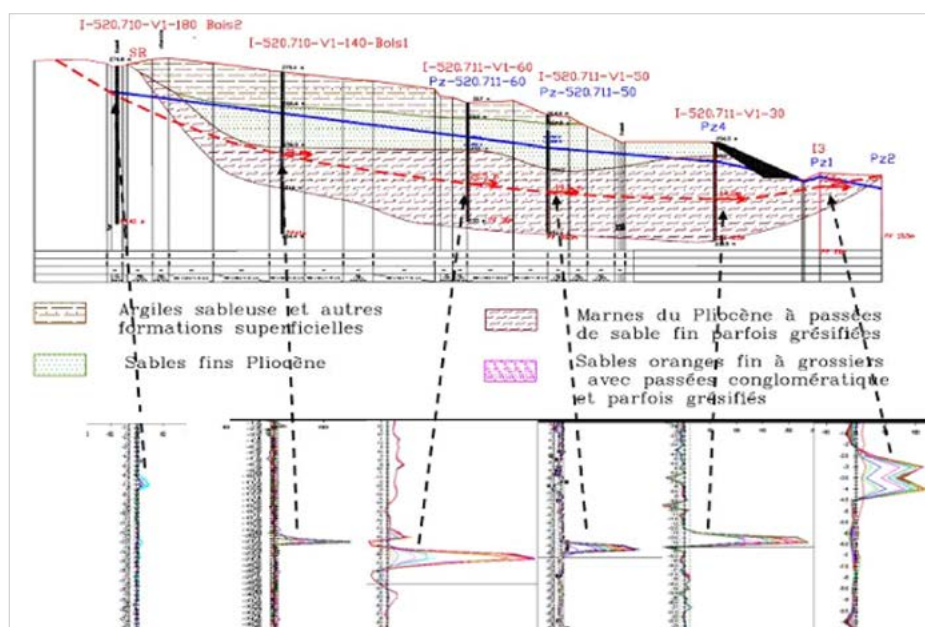
Le suivi a permis de définir la cinématique du glissement et sa cinétique. Il a ainsi été démontré qu'un volume de l'ordre de 600 000 m³ de matériaux était en mouvement, avec une longueur de 100 m, une largeur de 200 m et une profondeur pouvant aller jusqu'à plus de 20 m. La voie ferrée la plus proche a ainsi été déplacée de plus de 700 mm en planimétrie en une dizaine d'année.

Il a pu être démontré que les mouvements étaient corrélés avec la pluviométrie.

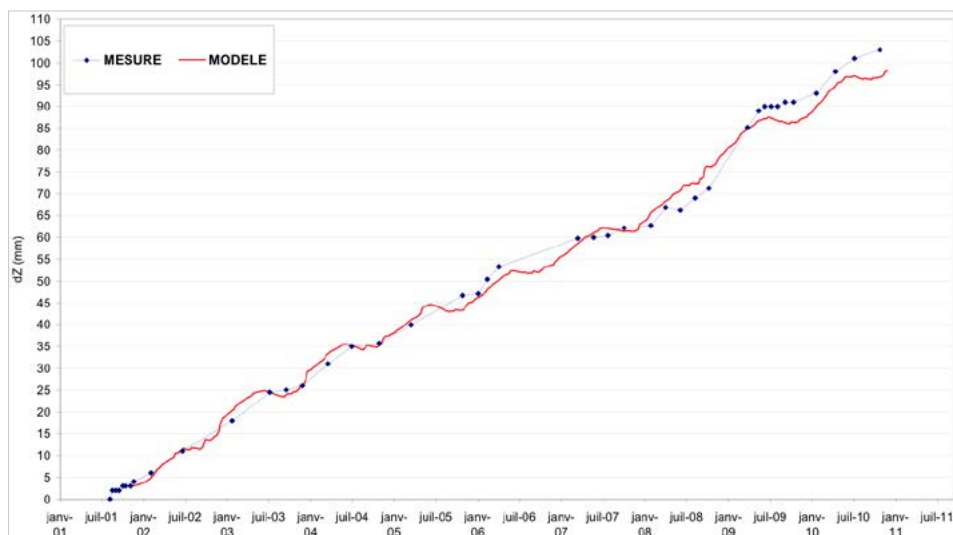
Compte tenu de l'évolution et du risque pour les circulations ferroviaires, des travaux de terrassements avec enlèvement de 400 000 m³ ont été réalisés en 2015 et ont permis de stabiliser la plateforme ferroviaire de façon presque immédiate. Un suivi est maintenu après travaux pour juger de la bonne stabilisation du site avec une diminution de la fréquence des mesures. Un complément de suivi a été entrepris par utilisation de la technique de l'In'SAR, avec laquelle il a été possible de faire une étude historique confirmant les mesures de terrain.



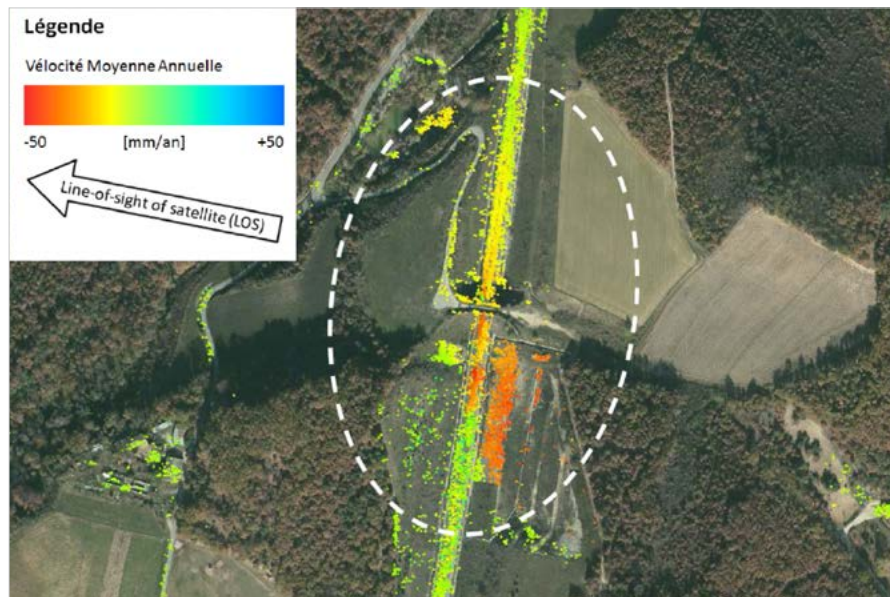
Corrélation entre le suivi de repères topographiques (déplacements totaux) en risberge et l'extension de la lentille pliocène



Profil en travers géotechnique avec report des pics de déformations mesurées sur les tubes inclinométriques



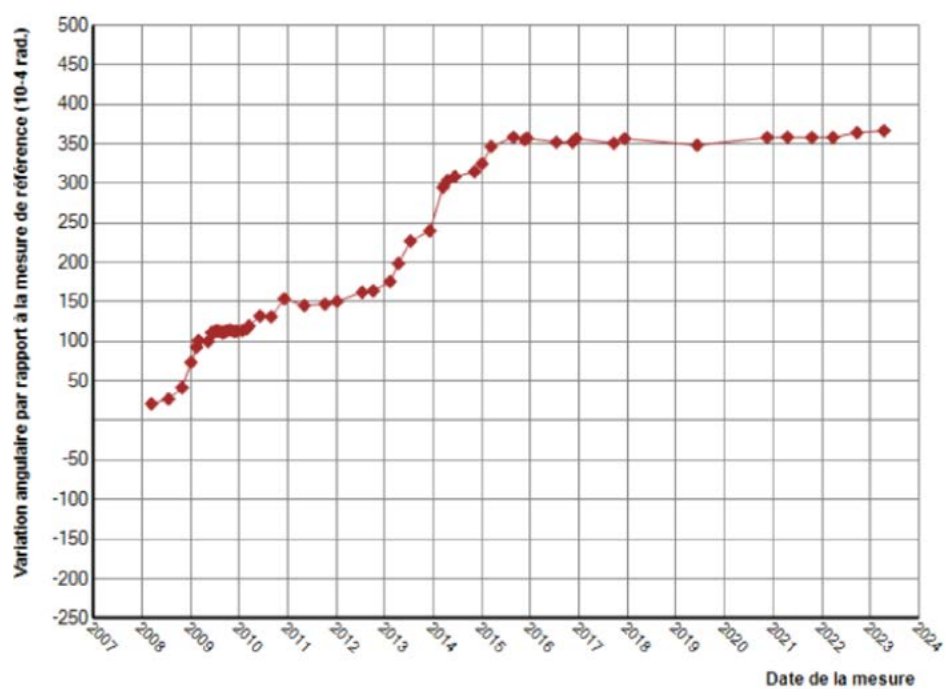
Modélisation du soulèvement d'un poteau caténaire en fonction de la pluviométrie



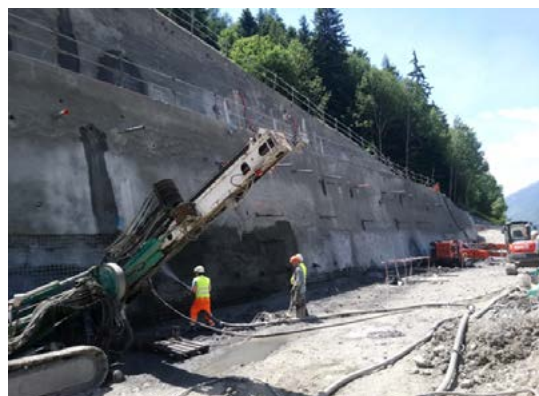
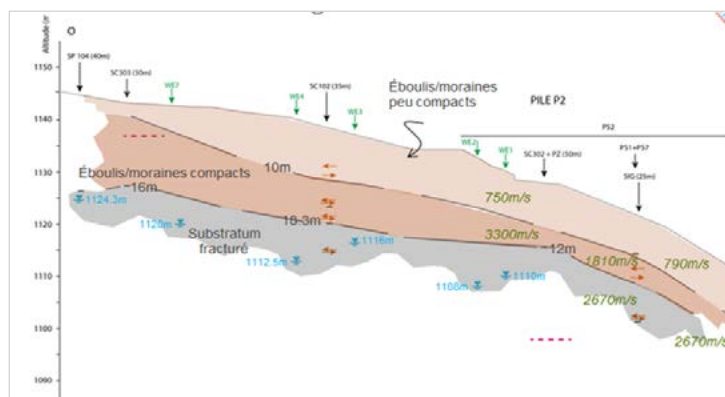
Etude historique du déblai par interférométrie radar satellitaire



Situation en cours de terrassement en 2015



Suivi inclinométrique après travaux



Autoroute A43

2016 à nos jours

SFTRF

EGIS

Bouygues TP
Matière
Despe
Benedetti Guelpa

EGIS

Conception, réalisation et pose de l'instrumentation

Environ 1.5%

Le viaduc du Charmaix est un pont autoroutier (A43) situé à Fourneaux (Savoie). Ce viaduc permettant le franchissement du torrent du Charmaix a été construit en 1978. Les fondations reposent sur un versant instable composé d'une couche d'éboulis/moraines et d'un substratum fracturé. Un glissement de terrain avec un déplacement vers l'aval de l'ordre de 4mm/an en rive gauche et 11mm/an en rive droite a été observé. Ces déplacements ont réduit la durée de vie de l'ouvrage de 100 ans à 40 ans. Dans ce contexte, la construction d'un nouveau viaduc et de murs de soutènement a débuté en 2016.

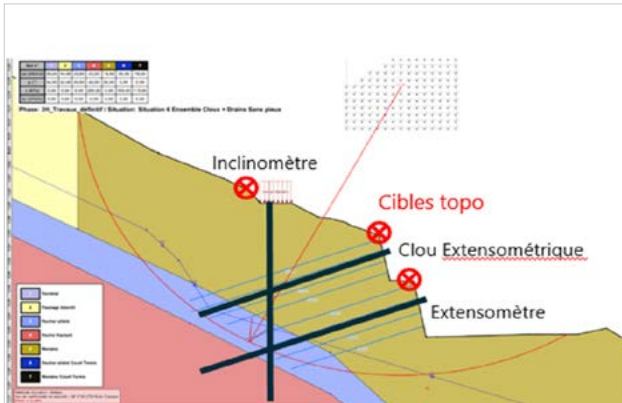
Afin de surveiller les déplacements des murs pendant la phase d'excavation, de construction et d'exploitation, différents dispositifs ont été mis en place.

Le contrôle de la zone dans sa globalité est assuré par un système de suivi par interférométrie radar. Cette méthode permet de suivre, en temps réel, des mouvements de terrain ou des structures avec une précision d'ordre millimétrique à partir du versant opposé.

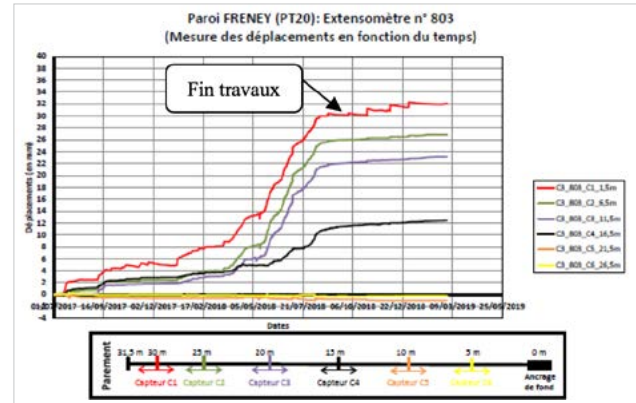
A l'échelle du mur, le contrôle des déplacements structuraux est réalisé par un suivi topographique et extensométrique. Les mouvements de terrain sont quant à eux suivis par des inclinomètres en forage. Enfin les efforts dans les barres d'ancrage sont suivis à l'aide de clous extensométriques.

L'exemple de ce viaduc construit sur un glissement de terrain nous permet de mettre en avant l'importance de la mise en place d'une auscultation préalable à la construction afin de comprendre les mécanismes et la cinématique des mouvements de terrain pour réaliser une conception adaptée au site.

La comparaison des paramètres mesurés avec des seuils de criticité pendant la construction et l'exploitation de l'ouvrage a permis de mieux comprendre le comportement des parois clouées, soumises à l'activité des glissements et d'adapter les renforcements en conséquence ainsi que les méthodes de travaux (méthodes de forage notamment).



Coupe de principe de l'instrumentation sur un mur de soutènement



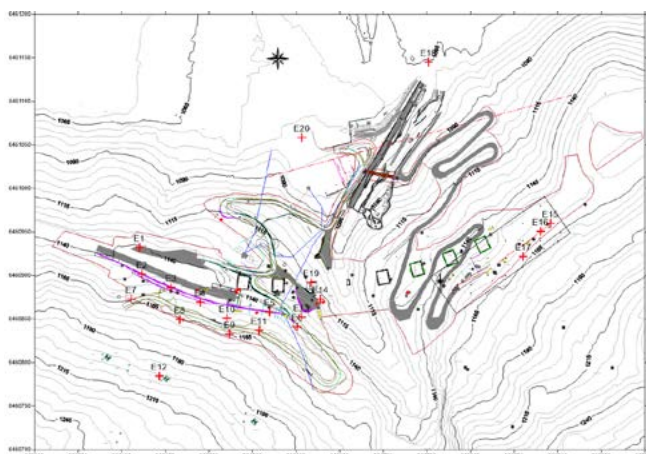
Mesures des capteurs d'un extensomètre
Visualisation de fin de travaux



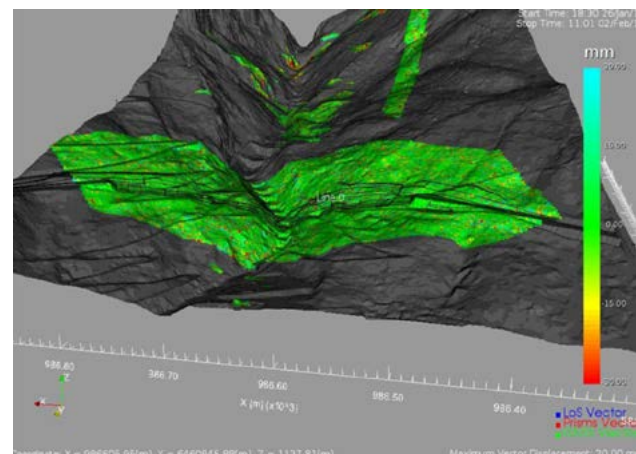
Photo de clou
Extensométrique instrumenté



Photo de machine de forage
et clou extensométrique instrumenté



Implantation des trièdres
Pour la mesure interférométrie radar



Déplacements mesurés
Par interférométrie radar

8.2.5 INSTRUMENTATION D'UNE FALAISE INSTABLE - RD912 HENDAYE

Lieu :

Département des
PYRENEES ATLANTIQUES
RD912

Période d'auscultation :

En cours depuis avril 2020

Maître d'ouvrage :

Département des
PYRENEES ATLANTIQUES

Maître d'Œuvre :

Direction des routes
et Infrastructures – CD 64

Mise en œuvre et suivi d'Auscultation :

GEOTEC / SOLEXPRT

Missions :

Suivi des falaises
sous-jacentes à la RD912



Projet / Problématique :

La route de la Corniche est un tronçon de 4,2 km de la RD912 reliant les communes de CIBOURE et HENDAYE.

Cette route située en limite des falaises bordant l'Océan ATLANTIQUE est directement affectée par le recul du trait de côte.

Afin de pouvoir maintenir la circulation sur ce tracé routier, le Conseil départemental des PYRÉNÉES ATLANTIQUES a fait le choix de mettre en place une instrumentation automatique de suivi du secteur considéré comme le plus à risque.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

L'instrumentation automatique mise en œuvre pour le suivi de stabilité a intégré :

- suivi des déformations des sol meubles de surface : 2 inclinomètres verticaux de 28 et 35 m de profondeur ;
- suivi des déformations des sol rocheux des falaises :
 - > 2 inclinomètres horizontaux de 20 m de longueur depuis le parement de falaise ;
 - > 4 extensomètres de 20 m de longueur depuis le parement de falaise.

Le pas de mesure de l'instrumentation a été défini entre 1 h et 4 h suivant les appareillages.

Le transfert des mesures se fait via réseau téléphonique mobile.

Les appareillages nécessitent un changement annuel des batteries.

REX et Synthèse :

Le suivi de stabilité est en cours.

Ce suivi a permis d'observer la rupture d'une plaque superficielle en avril 2021 n'impactant pas la chaussée de la RD et ses abords.



Extensomètre de surface



Logger acquisition Extensomètre de surface



Positionnement synthétique de l'instrumentation



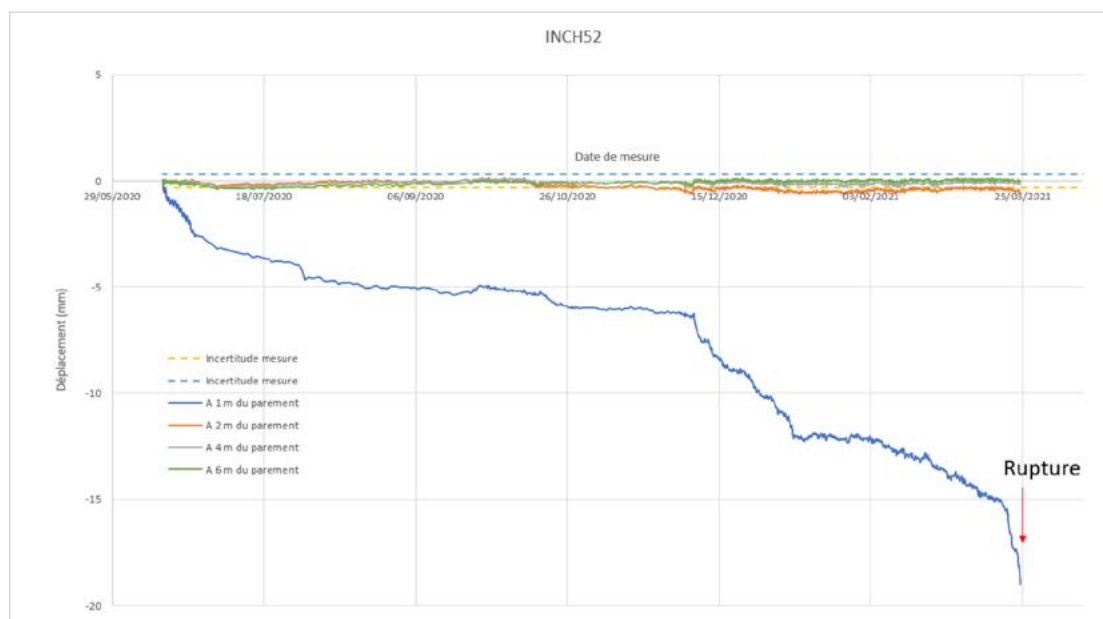
Regards d'installation des logger en tête de falaise



Positionnement d'un extensomètre et d'un inclinomètre horizontal sur la falaise



Inclinomètre horizontal après la rupture d'une dalle superficielle (épaisseur <1,0 m)



Suivi d'un inclinomètre horizontal avec observation de rupture de surface

8.2.6 STABILITÉ D'UN SITE HISTORIQUE - SUIVI DE LA POINTE DU HOC



Lieu :

Cricqueville-en-Bessin

Période d'auscultation :

2010 à aujourd'hui

Maître d'ouvrage :

American Battle Monuments Commission

Maître d'Œuvre :

Antea Group

Entreprises :

GTS / Egis / Géolithe

Equipe d'Auscultation :

Egis puis Antea Group

Missions :

Surveillance

Coût de l'instrumentation :

N/A

Projet / Problématique :

La Pointe du Hoc se situe dans un ensemble homogène de falaises de calcaires du Bathonien moyen. Il s'agit de falaises vives, en érosion, notamment en raison d'une base plus argileuse (marnes de Port-en-Bessin) creusée par la mer et provoquant parfois des effondrements importants.

Haut lieu de la seconde guerre mondiale, la Pointe du Hoc a été le théâtre d'une partie du débarquement des troupes alliées en 1944. En effet, elle abritait des bunkers et surtout des pièces d'artillerie, qui devaient impérativement être mises hors service pour permettre le débarquement sur les plages normandes voisines.

Aujourd'hui le site est possédé et géré par l'ABMC (American Battle Monuments Commission) qui l'ouvre au public, jusqu'au bunker situé en limite du plateau, en direction de l'aiguille rocheuse, qui a connu plusieurs effondrements majeurs, dont le dernier en 2022.

Afin d'assurer la sauvegarde de ce patrimoine historique et la sécurité du parcours de visite, l'ABMC a fait réaliser en 2010 des travaux de confortement de la falaise et de mise en place d'une instrumentation.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

Une instrumentation importante a été mise en œuvre :

- des cales dynamométriques vérifiant la précontrainte des tirants d'ancrage ;
- des chaînes inclinométriques verticales suivant la déformation potentielle d'un rideau d'inclusions rigides, avec en outre une comparaison avec une zone non renforcée ;
- des extensomètres horizontaux à mi-hauteur de la falaise ;
- une nivelle bidirectionnelle sur le bunker, ainsi que plusieurs piézomètres à proximité.

Au total plus de 80 capteurs ont été installés et sont reliés à une unique centrale de d'acquisition (modèle Datataker) placée au sein du bunker, qui offre protection et accès au réseau électrique.

REX et Synthèse :

A ce jour une majorité des capteurs est encore en fonctionnement, quelques pertes ayant été subies au fil des années, démontrant la robustesse des modèles employés. Le suivi du site se poursuit, notamment motivé par les effondrements récurrents aux abords de la Pointe, même si à ce jour aucun impact n'a été constaté dans la zone instrumentée.

Afin de compléter la vision offerte par l'instrumentation, un levé LiDAR/photogrammétrie a été réalisé pour servir de référence en cas d'évolution des mesures.



Rangers américains escaladant la Pointe du Hoc en 1944



Erosion en pied de falaise : bloc de protection manquant



Visualisation des zones instrumentées (1)



Visualisation des zones instrumentées (2)



Centrale d'acquisition et multiplexeurs associés



Cales dynamométriques

8.2.7 DIGUE EN REMBLAIS – SUIVI DU COMPORTEMENT APRÈS TRAVAUX DE RÉFECTION PAR MESURES RÉPARTIES (FIBRE OPTIQUE) – CANAL DE CURBANS

Lieu :

Canal Curbans

Période d'auscultation :

Suivi par fibre optique depuis 2011

Maître d'ouvrage :

EDF Hydro Méditerranée

Maître d'Œuvre :

EDF CIH

Entreprises :

EDF DTG

Geophy consult

Equipe d'Auscultation :

EDF DTG

Missions :

Conception, réalisation et pose de l'instrumentation par fibre optique sous le revêtement bitumineux du canal (durant les travaux de réfections)

Auscultation initiale du canal de Curbans : depuis sa mise en eau en 1966

Coût de l'instrumentation :

N/A



Projet / Problématique :

Le canal de Curbans fait partie des aménagements hydroélectriques de la Durance, situé directement à l'aval des barrages de Serre-Ponçon et Espinasse. D'une longueur de 5,2 km il est constitué de digues en remblai pouvant atteindre au maximum 23 m de haut sur TN. Les remblais en alluvions sont revêtus d'un béton bitumineux d'étanchéité et reposent sur une fondation mixte alternant alluvions de la Durance, marnes, limons avec tronçons de gypses.

Ausculté depuis sa mise en service en 1966, son comportement mettait en évidence un vieillissement du système d'étanchéité du canal au bout de 45 ans d'exploitation.

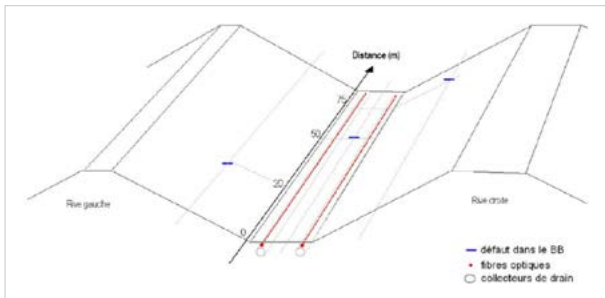
En 2011, le canal de Curbans a fait l'objet d'une réfection complète de son système d'étanchéité et de drainage basé sur le principe de double étanchéité (étanchéité principale et secondaire) et sur un réseau de drainage étendu à l'intégralité du canal. En parallèle, 11 km de capteurs d'auscultation à fibres optiques ont été installés au-dessus des buses de drainage dans le béton drainant.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

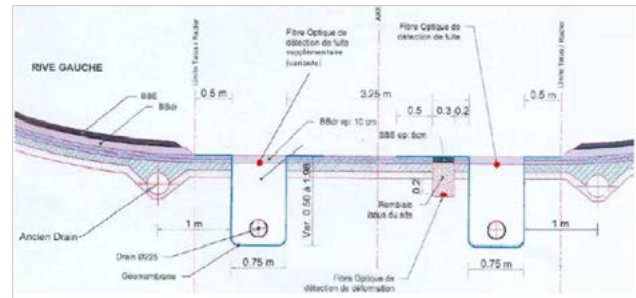
La fibre optique est utilisée comme outil permettant la détection de fuites. Le principe de détection se base sur la mesure des variations de température de l'ouvrage en terre. En effet la présence d'un écoulement modifie le champ de température de la digue et les modes de transfert thermique responsables de ces modifications sont fonctions de la vitesse de la fuite. La fibre optique installée dans les tranchées drainantes sous l'étanchéité du fond du canal, sert de capteur de température avec une précision de 0.1°C et une résolution spatiale métrique.

REX et Synthèse :

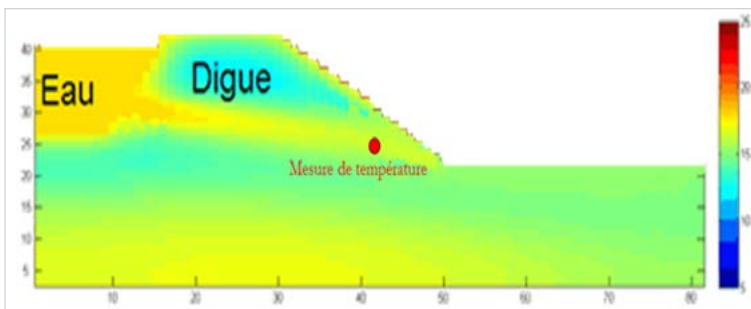
Le capteur à fibre optique permet la détection précise au mètre près des fuites du canal à la remise en eau après travaux, facilitant ainsi la localisation et la reprise rapide des défauts du béton-bitumineux. Cette instrumentation a permis un gain de temps et le respect des plannings de remise en service de l'usine hydroélectrique. Sur le long terme, les mesures de température réparties du canal permettent un suivi localisé du vieillissement de l'étanchéité du canal, en complément de son auscultation traditionnelle.



Principe de pose de la fibre optique en fond de canal



Détail de pose de la fibre optique dans les tranchées drainantes



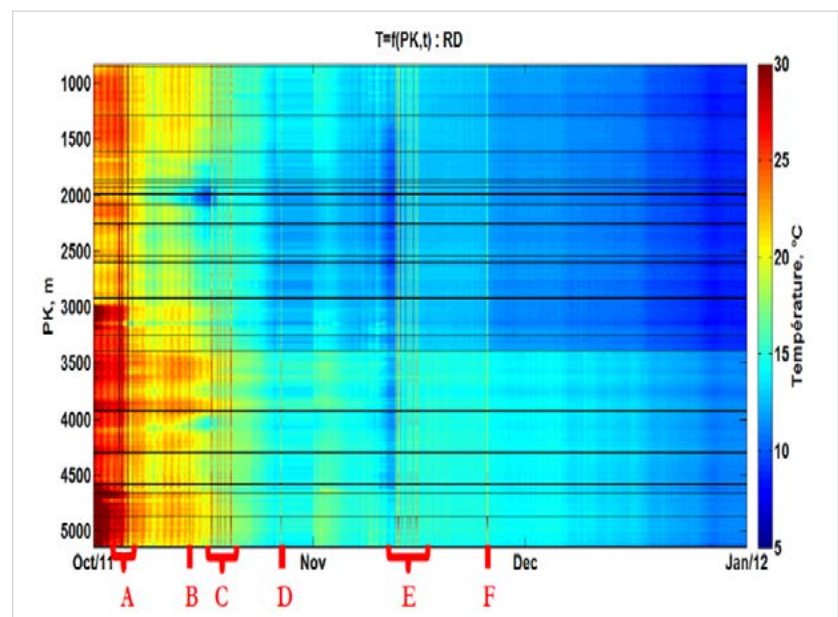
Simulation numérique du champ thermique en cas de fuite pour optimiser la position de la fibre optique



Pose de la fibre optique dans les tranchées drainantes

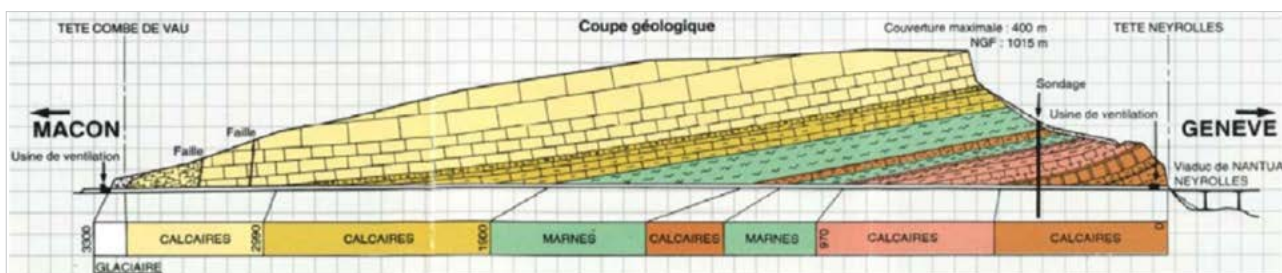


Baie d'acquisition des données de températures DTS (Distributed Temperature Sensor)



Restitution des données de température spatiales sur l'ensemble du linéaire au fil du temps

8.2.8 TUNNEL – SUIVI DES DONNÉES D'AUSCULTATION – TUNNEL DE CHAMOISE



Lieu :

Autoroute A40

Période d'auscultation :

1983 à nos jours

Maître d'ouvrage :

APRR

Maître d'Œuvre :

Scetauroute / EGIS

Entreprises :

Nord : Fougerolle, GTM
Forgal, Citra, Campenon-
Bernard

Sud : Spie-Batignolles,
Sotrabas

Equipe d'Auscultation :

EGIS

Missions :

Conception, réalisation
et pose de l'instrumentation
en tunnel : Suivi d'auscultation
du tunnel de Chamoise
depuis 1983

Coût de l'instrumentation :

N/A

Projet / Problématique :

Le tunnel de Chamoise se situe sur l'autoroute A40, entre Macon et Genève. Le tube Nord (3192 ml) a été réalisé à partir de 1983 et ouvert à la circulation en 1986, le tube Sud (3165 ml) entre 1992 et 1995.

Le profil en long géologique montre une couverture maximale de 400m et une alternance de calcaires et marnes (engendrant un comportement différé de type fluage à long terme). Ces spécificités ont conduit à proposer un programme d'instrumentation significatif pour suivre le comportement des marnes lors de la construction et des contraintes à long terme attendues dans le revêtement définitif. Ces données (de plus de 30 ans) constituent une source d'information précieuse pour la compréhension du comportement à long terme de ce type d'ouvrage.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

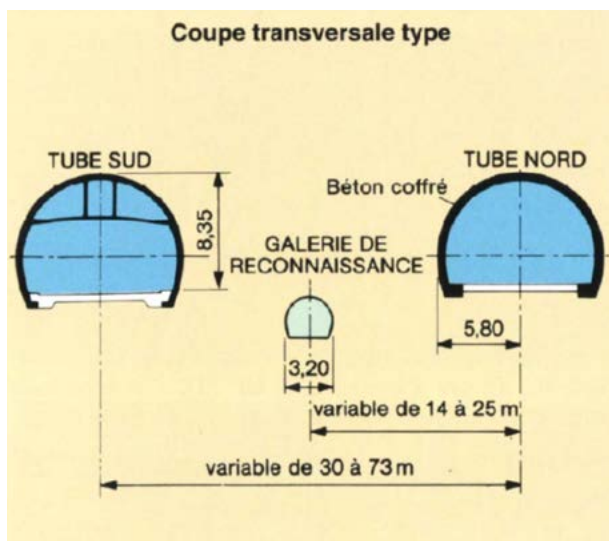
Un profil type est présenté ci-après. L'auscultation est de type extensomètres multipoints dans le massif, CPT à l'interface massif / revêtement, cordes vibrantes dans le revêtement puis mesures de convergence à partir du revêtement. 440 capteurs équipent les tubes Nord et Sud, avec un taux de perte actuel très limité (environ 10%).

Tous les capteurs sont reliés à des centrales d'acquisition télésurveillées (missions de maintenance).

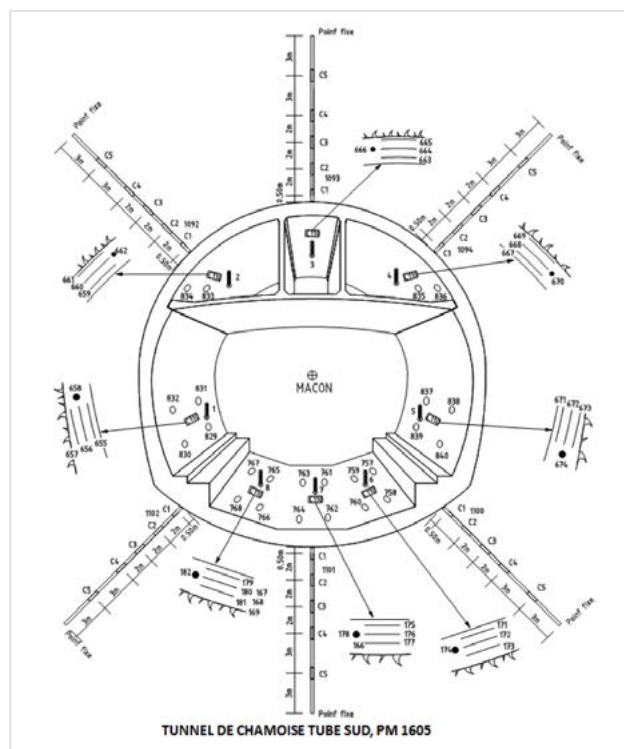
REX et Synthèse :

L'ouvrage reste suivi dans le cadre de plans de surveillance pluriannuels et les mesures (voir ci-après) permettent d'observer que le fluage différé des marnes / argilites n'est pas encore parfaitement stabilisé.

Le succès de ce suivi à long terme repose sur l'implication de spécialistes en instrumentation de la phase de conception, puis de pose et enfin de suivi.



Coupe transversale des tubes du tunnel de Chamoise et Galerie de sécurité



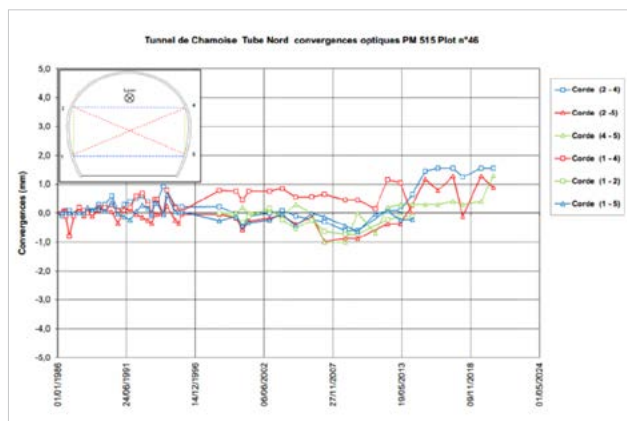
Profil type d'instrumentation dans le tunnel de Chamoise / Tube Sud PM 1605



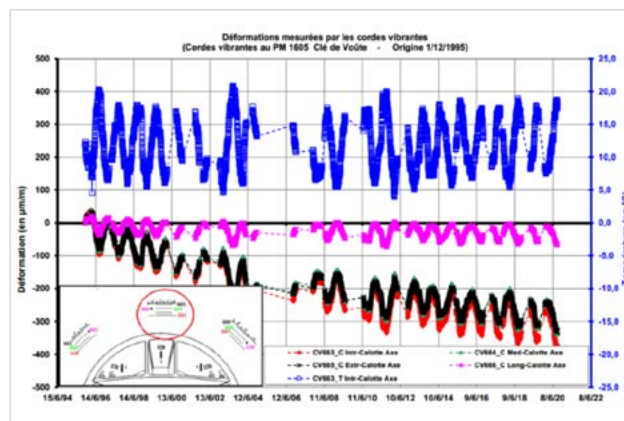
Cellules de pression Totale



Cordes vibrantes (déformations) noyées dans le béton

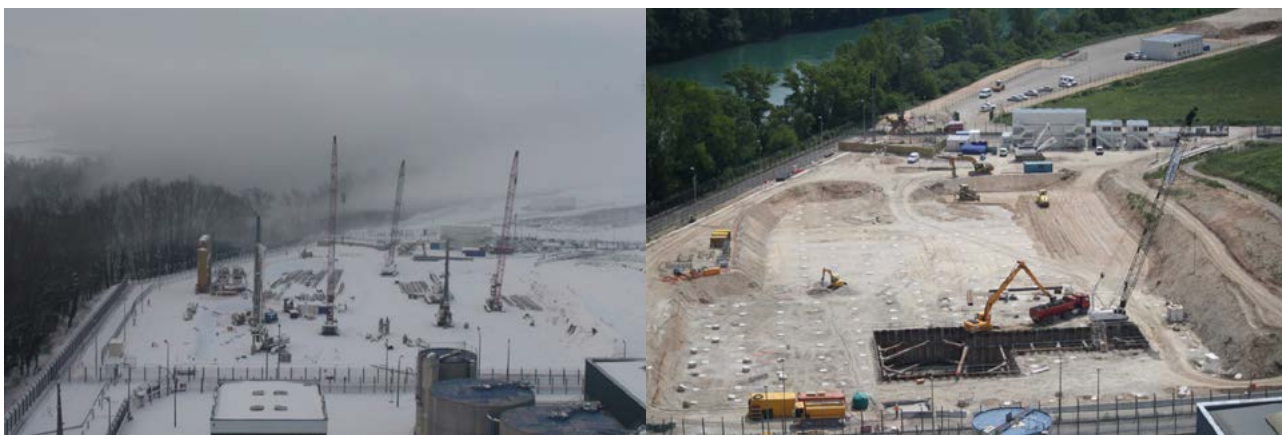


Profil de convergence
Tube Nord PM 515



Cordes Vibrantes dans revêtement / Clé de voûte
Tube Sud PM1605

8.2.9 FONDATIONS – SUIVI DES DONNÉES D'AUSCULTATION – INSTALLATION ICEDA À BUGEY



Lieu :

Centrale du Bugey (01)

Période d'auscultation :

2010 à nos jours

Maître d'ouvrage :

EDF

Maître d'Œuvre :

Scetauroute / EGIS

Entreprises :

Franki Fondations

Equipe d'Auscultation :

EGIS / Cnam / INSA Lyon

Missions :

Conception, réalisation et pose de l'instrumentation du sol de fondation :
Suivi d'auscultation pendant la construction de l'ouvrage et au cours de l'installation des colis

Projet / Problématique :

L'installation ICEDA est située en zone sud du site EDF de Bugey. ICEDA est composé de bâtiments indépendants dont un bloc d'entreposage de déchets faiblement radioactifs qui a été choisi pour l'instrumentation. Avec une masse de l'ordre de 43000 tonnes, à laquelle s'ajoutent 13000 tonnes de colis entreposés lorsque les halls sont pleins, le bâtiment entreposage exerce une contrainte au sol de 15 t/m² environ. En raison de l'épaisseur de l'horizon argileux variant de 35 à 55 m sous le bâtiment d'ICEDA, EDF a décidé de limiter les tassements en utilisant une technique de renforcement de sol par inclusions rigides. Sous le bloc d'entreposage, les inclusions rigides de 1 m de diamètre et de hauteur variable (55 m maximum) sont disposées dans un maillage carré de 6 m de côté. La plateforme de transfert de charge (PTC) de 2 m d'épaisseur est composée d'alluvions compactées ; elle est surmontée d'un radier de 1,5 m d'épaisseur

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

L'instrumentation a été installée pour permettre de mesurer les paramètres suivants dans deux zones distinctes :

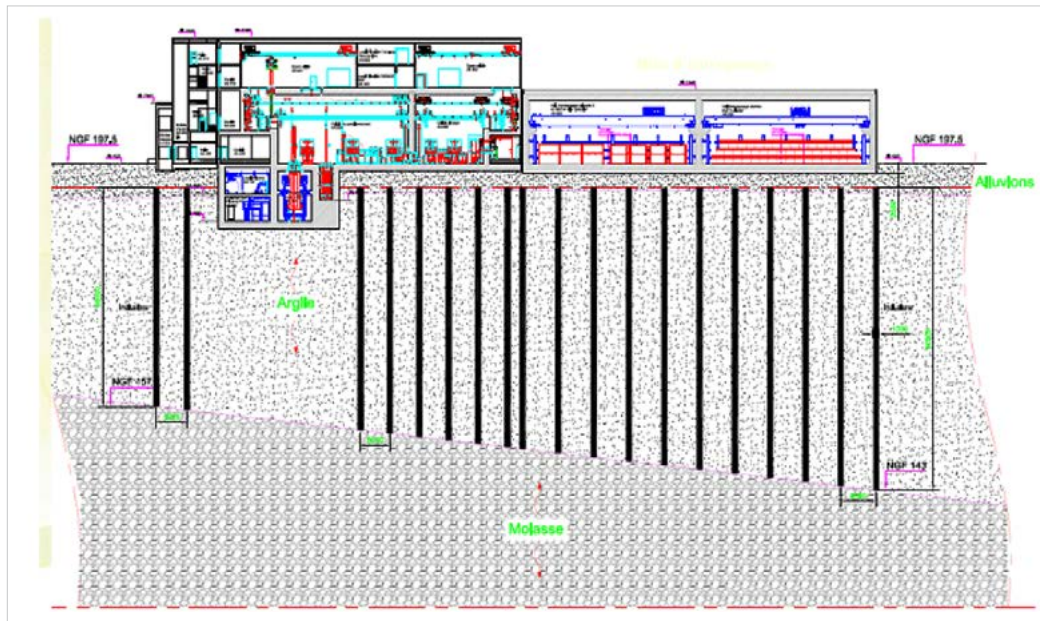
- la déformée des inclusions ;
- la déformée du sol au centre d'une maille ;
- le tassement en tête d'inclusion ;
- la déformée du matelas ;
- la pression interstitielle dans l'argile ;
- les contraintes sous le radier et en tête d'inclusion.

REX et Synthèse :

Après 12 ans d'auscultation, l'instrumentation est toujours opérationnelle. La redondance de l'instrumentation (deux zones distinctes instrumentée dans la même configuration) a permis de contrôler la répétabilité des mesures. Cette instrumentation a permis de mettre en évidence le bon report de charge vers les inclusions rigides et les faibles tassements au niveau du sol au cours de la construction de l'ouvrage. Elle sera très suivie lors de l'entreposage des colis dans le bâtiment.

La bonne insertion des actions de pose des capteurs dans le phasage de réalisation des travaux a permis une mise en œuvre sans aucune perte de capteur.

Le succès de ce suivi à long terme repose sur l'implication de spécialistes en instrumentation de la phase de conception, puis de pose et enfin de suivi.



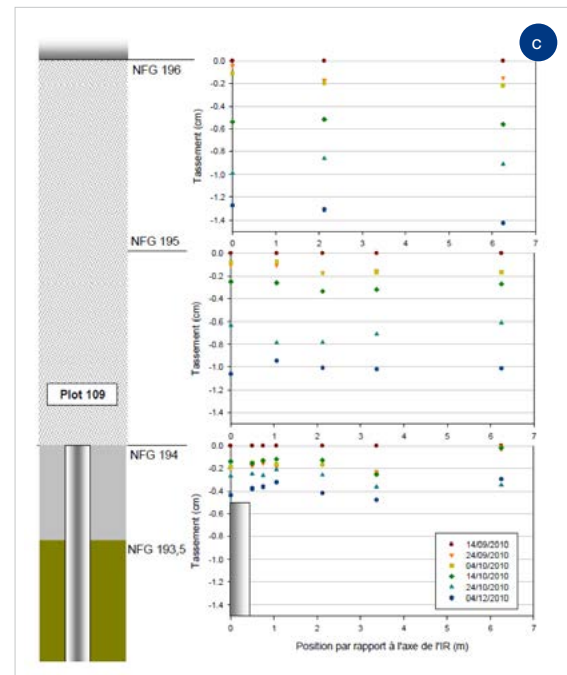
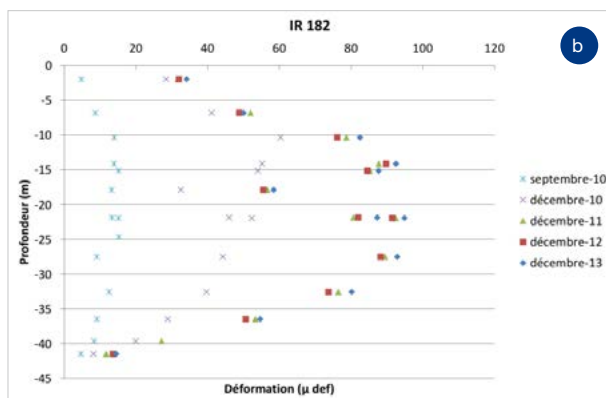
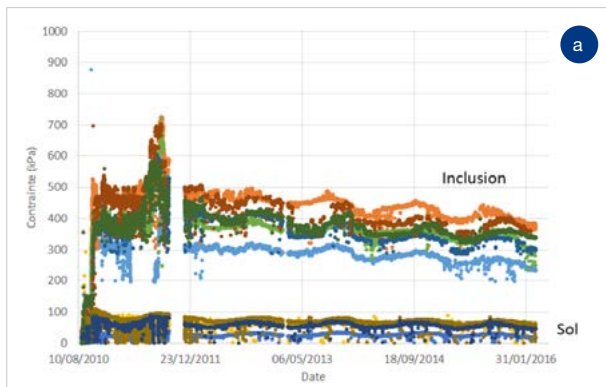
Coupe des fondations du bâtiment ICEDA



Cellules de pression totale sur les têtes d'inclusions



Instrumentation des cages d'armature pour mesurer la déformation

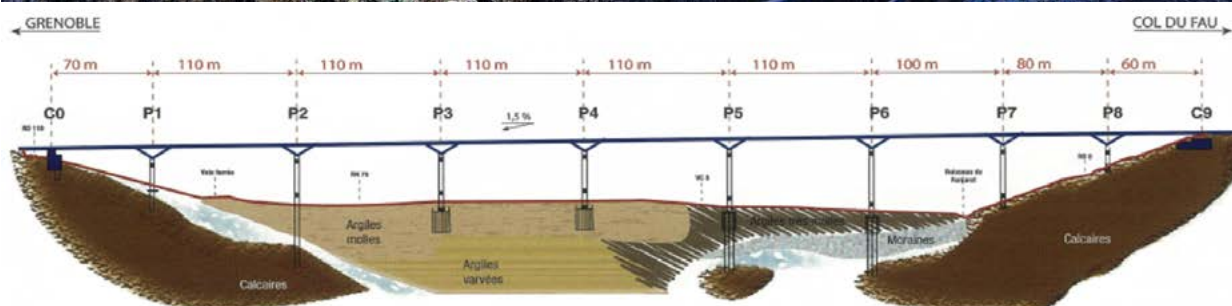


a/ Mesure de la contrainte

b/ Mesure de la déformation des inclusions

c/ Mesure du tassement

8.2.10 FONDATIONS – SUIVI DES DONNÉES D'AUSCULTATION – VIADUC DE MONESTIER



Lieu :

Autoroute A51

Période d'auscultation :

2001 à nos jours

Maître d'ouvrage :

AREA

Assistance Maître d'ouvrage :

Scetauroute / EGIS

Architecte :

STRATES

Maître d'Œuvre :

Scetauroute / EGIS
Concours
Conception-Construction

Entreprises :

GTM Génie civil

Equipe d'Auscultation :

EGIS

Missions :

Suivi d'auscultation du viaduc depuis 2006

Coût de l'instrumentation :

Environ 3 %

Projet / Problématique :

Le viaduc de MONESTIER est situé à Monestier de Clermont (Isère) sur l'autoroute A51. La construction est de type ossature mixte acier-béton.

L'ouvrage est un viaduc autoroutier de 860m de longueur qui assure le franchissement d'une vallée glaciaire profonde avec une épaisse couche d'argiles molles en partie centrale (> 70m).

L'instrumentation mise en place 5 ans avant la construction du viaduc, a permis de caractériser la présence d'un glissement avec des déplacements de quelques mm/an.

Pour s'affranchir des effets du glissement sur les piles, des enceintes de protection au niveau de la tête des pieux ont été réalisées.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

Le suivi géotechnique a été assuré lors des différentes phases. Une trentaine de forages ont été réalisés permettant l'installation d'inclinomètres de grande profondeur et de piézomètres. Pendant la construction, les relevés inclinométriques et piézométriques ont été poursuivis avec une fréquence de mesures plus importante.

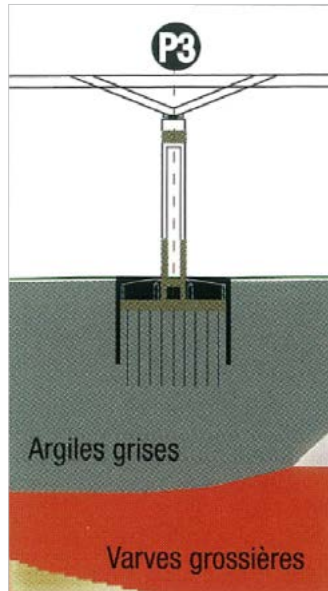
Enfin, en exploitation, la surveillance du viaduc est assurée par 12 piézomètres (dont 2 sous des piles, ajoutés pendant la construction), 15 inclinomètres, 4 cellules de pression interstitielle, des cibles topographiques (nivellement sur tablier et cibles sur les piles) ainsi qu'un contrôle du niveau d'eau dans la structure des fondations sur caissons.

REX et Synthèse :

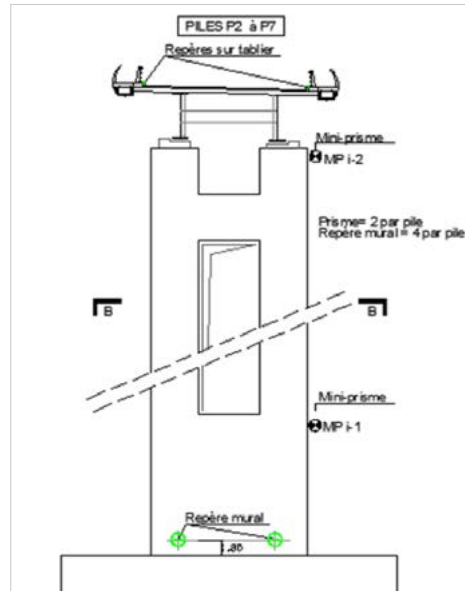
Depuis la mise en service de l'ouvrage en 2006, une évolution des tassements et du glissement sont observés avec suivi d'auscultation des fondations, avant pendant et après la mise en service, qui restent globalement conformes aux prévisions.

A noter qu'une conception robuste n'a été possible qu'avec la mise en œuvre d'une instrumentation importante des glissements pendant près de cinq ans avant le démarrage des travaux.

L'ouvrage fait l'objet d'un suivi dans le cadre des plans de surveillance pluriannuels.



Conception de la fondation de la pile P3



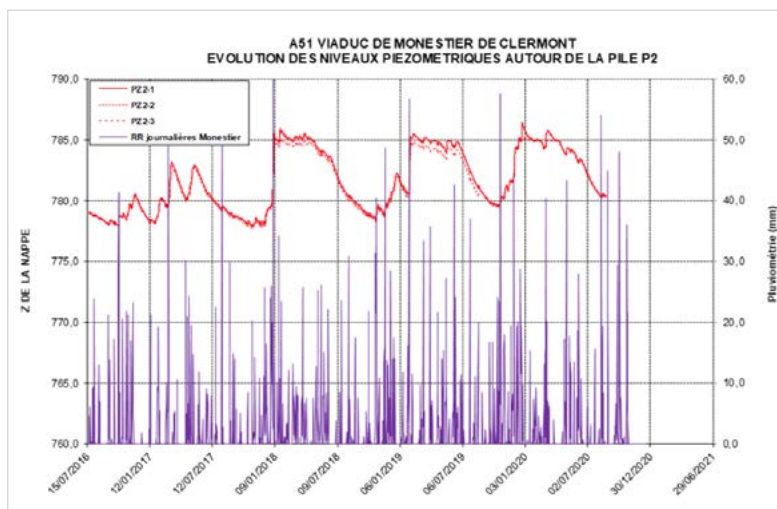
Implantation des mini prismes sur les piles



Têtes de pieux avec protection par enceinte circulaire



Photo d'un piézomètre équipé d'un IoT

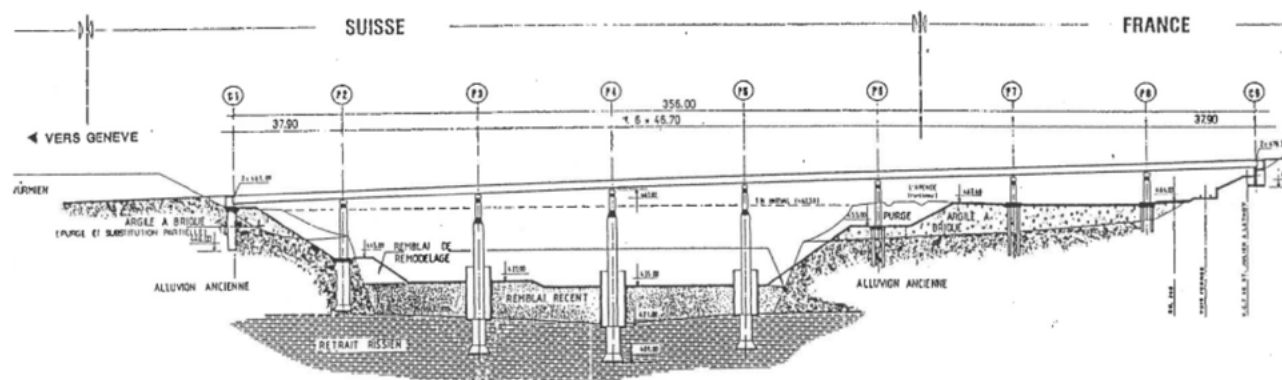


Evolution des niveaux piézométriques autour de la pile P2



Représentation des vecteurs de déplacement sur une vue aérienne

8.2.11 REMBLAIS, FONDATIONS ET STRUCTURE – SUIVI DES DONNÉES D'AUSCULTATION – VIADUC DE BARDONNEX



Lieu :

Autoroute A41

Période d'auscultation :

1991 à nos jours

Maître d'ouvrage :

ATMB

Architecte :

Cabinet STRATES

Maître d'Œuvre :

Scetauroute / EGIS

Entreprises :

Victor Buyck Steel
Construction
GTM construction

Equipe d'Auscultation :

EGIS

Missions :

Conception, réalisation et pose de l'instrumentation :
Suivi d'auscultation du viaduc de bardonnex depuis 1991

Coût de l'instrumentation :

N/A

Projet / Problématique :

Le viaduc de BARDONNEX est situé à Saint Julien en Genevois (Haute Savoie) sur l'autoroute A41. La construction est de type pont poussé.

L'ouvrage est un viaduc autoroutier de 365m de longueur qui assure le franchissement d'une ancienne gravière partiellement comblée par des matériaux de décharge et donc sensible à une problématique de tassements.

L'ouvrage est donc suivi depuis sa mise en service en 1991.

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

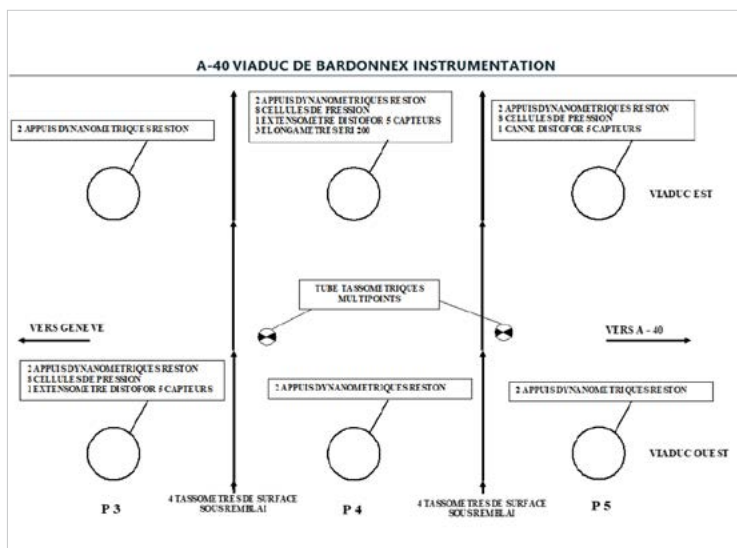
Le synoptique de repérage de l'instrumentation est présenté ci-après. Le suivi de tassement du sol est assuré par des tassomètres de surface sous remblai ainsi que des tubes tassométriques multipoints. En ce qui concerne les fondations, elles sont équipées d'extensomètres multipoints composés de 5 capteurs ainsi que des cellules de pressions totales. Le suivi des réactions d'appui sur les piles est assuré par des appuis dynamométriques Reston. Enfin, des profils topographiques permettent de suivre le nivellement de la chaussée.

REX et Synthèse :

Au cours de l'hiver 1994-1995, une phase de remblaiement (de l'ancienne gravière) non contrôlée a été effectuée coté Est, générant des mouvements et contraintes sur les fondations, constatés grâce au dispositif d'auscultation et permettant de stopper le remblaiement.

L'ouvrage reste suivi dans le cadre de plans de surveillance pluriannuels et les mesures (voir exemple ci-après) permettent d'observer une stabilisation des contraintes le long et sous les fondations. Le tassement général tend à se stabiliser. Une approche complémentaire d'analyse des mesures et interprétation des données par réseau de neurones est en cours.

Le succès de ce suivi à long terme repose sur l'implication de spécialistes en instrumentation de la phase de conception, puis de pose et enfin de suivi.



Synoptique de repérage de l'instrumentation

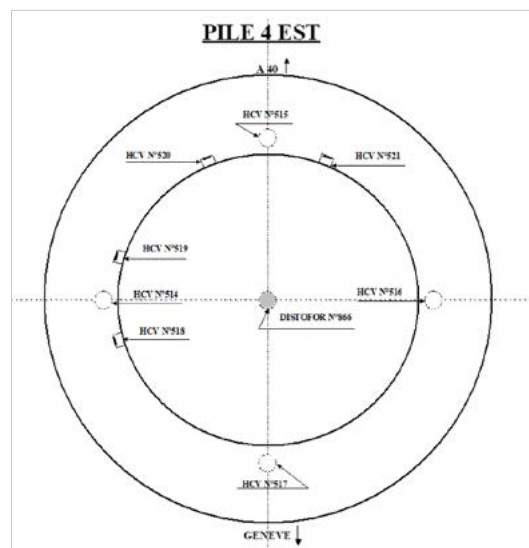
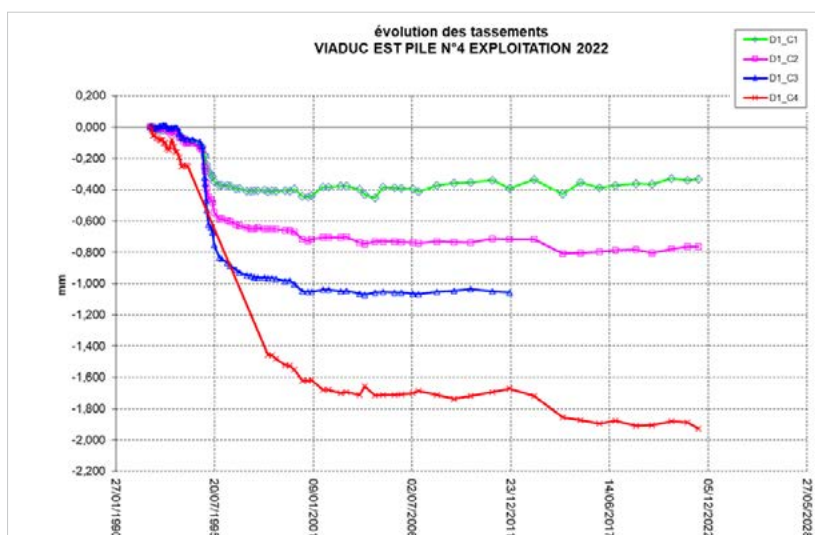


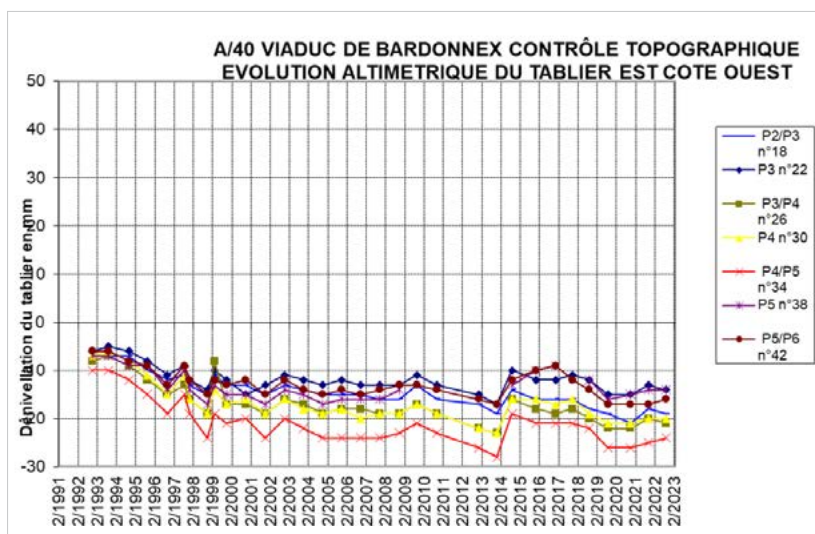
Schéma de l'instrumentation mis en place pile 4



Evolution des tassements suivis par des extensomètre au niveau de la pile 4



Mesures des cellules de pression Totale



Suivie topographique du tablier



Mesures des appuis dynamométriques Reston

8.2.12 DÉBLAI FERROVIAIRE – SUIVI DES DONNÉES D'AUSCULTATION – LGV EST

Lieu :

Déblai de LUPFLENMATT
LGV EST - Phase 2
BAS RHIN

Période d'auscultation :

Septembre 2020
à décembre 2021

Maître d'ouvrage :

SNCF RESEAU

Maître d'Œuvre :

SNCF RESEAU

Mise en œuvre et suivi d'Auscultation :

SNCF RESEAU

Missions :

Suivi de l'évolution d'un déblai contigu à la ligne ferroviaire suite au déraillement d'un TGV lié à un glissement du talus le 5 mars 2020



Projet / Problématique :

Le 5 mars 2020 à l'Est du tunnel de Saverne, un glissement de terrain de près de 12 000 m³ de matériaux, survenu en déblai, a entraîné le déraillement d'un TGV circulant à 284 km/h. Des travaux de confortement par masque poids drainant ont été réalisés et la superstructure de la voie a été remplacée (rail, traverse, ballast). Néanmoins, dans l'attente d'un diagnostic complet du tronçon concerné par l'accident (~30 km), la ligne a été remise en service avec mise en place de deux actions provisoires pour traiter le risque : un ralentissement des trains à 80 km/h et une instrumentation en continu de 4 km de talus par des tiltmètres (inclinomètres + accéléromètres).

Schéma et descriptif de l'instrumentation :

L'instrumentation automatique par tiltmètres a été déployée de la manière suivante :

- Mise en place de plus de 480 tiltmètres (soit 16 centrales d'acquisition) sur piquets en partie inférieure au niveau de 4 déblais (plus de 4 km de talus) ;
- Chaque groupe de 30 tiltmètres est relié à une centrale d'acquisition par réseau LoRaWAN, avec panneaux solaires et caméras infrarouge permettant la levée de doute.

Le protocole d'alerte/alarme a été défini comme suit :

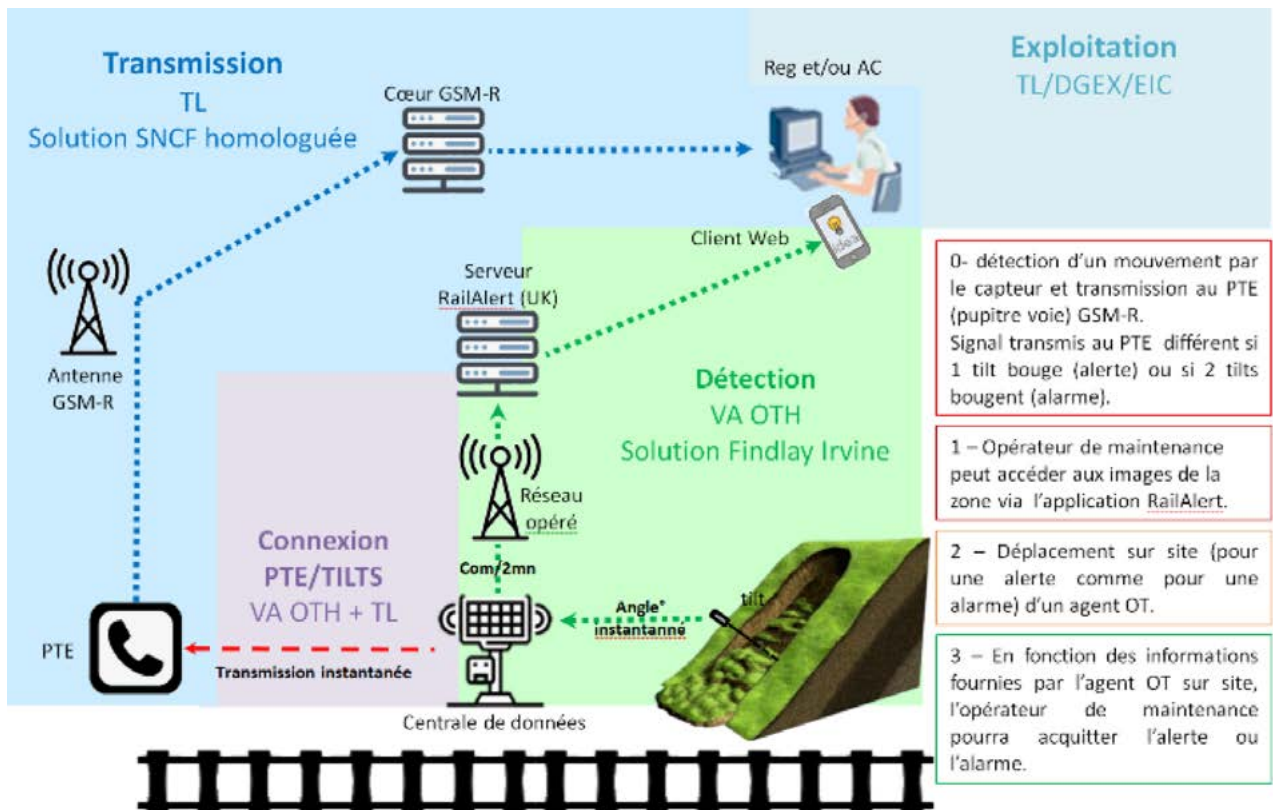
- Si un tilt s'incline de plus de 5°, une alerte est envoyée, via un téléphone d'alerte (PTE) sur un réseau de télécommunication interne SNCF Réseau (GSM-R), au centre de supervision de la ligne (le mainteneur). Cette alerte téléphone est doublée d'un email (envoyé via le réseau opéré GSM).
- Si deux tilts ou plus, s'inclinent de plus de 5°, le même processus que lors de l'émission d'une alerte se met en place. Mais, au-delà du centre de supervision, le Poste de Commande à Distance (PCD) ainsi que le Centre Opérationnel de Gestion des Circulations (COGC) sont aussi destinataires de l'appel d'urgence (émis par le PTE) et de l'email d'alarme. En parallèle, le PTE lance une alerte radio dite « alerte radio GSM-R » ce qui a pour conséquence d'arrêter les trains dans la zone (l'alarme s'affiche dans la cabine du conducteur).
- Chaque centrale d'acquisition envoie une alerte au mainteneur en cas de dysfonctionnement du système.

REX et Synthèse :

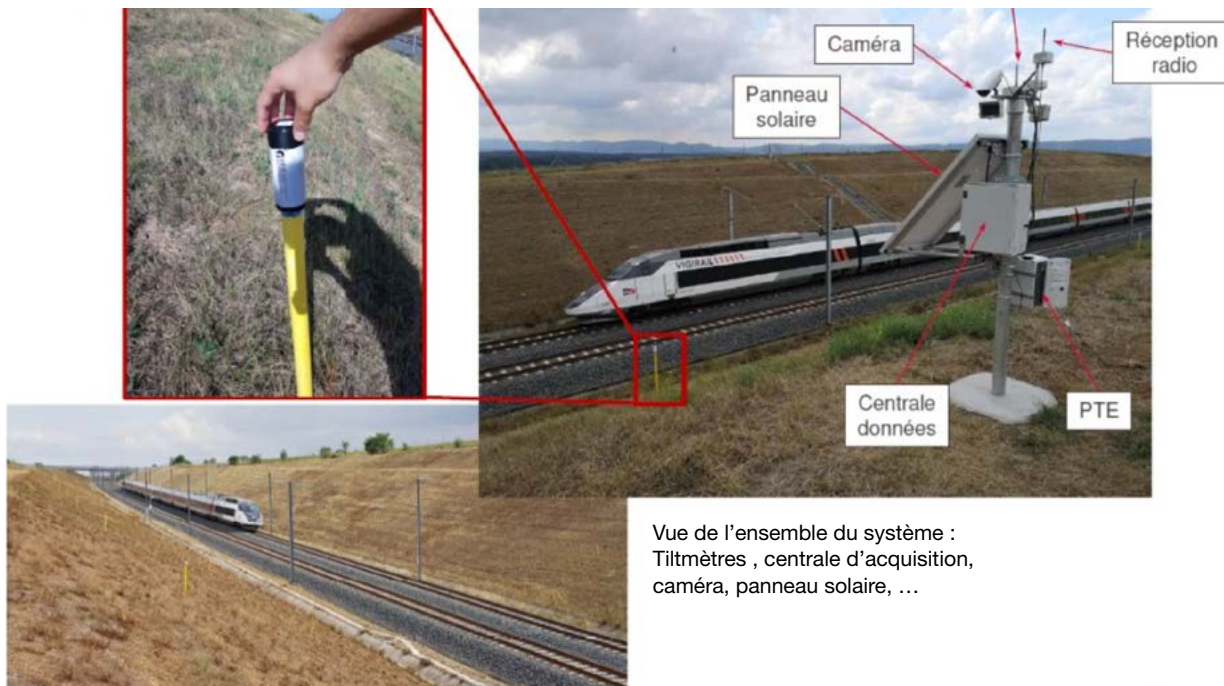
Excepté quelques dysfonctionnements en lien avec des arrêts de maintenance du réseau public opéré, le système a fonctionné de façon nominale et n'a pas détecté de mouvement sur les talus suivis. Il a permis de remettre en circulation ce tronçon de ligne fermé après le déraillement et de ne perdre que quelques minutes sur le trajet PARIS – STRASBOURG. Ces dispositifs ont été déployés dans l'attente du diagnostic de la stabilité des déblais concernés (sondages et essais géotechniques) et de travaux complémentaires de confortement d'une partie des talus par masques poids. Le système a depuis été déployé sur deux autres ouvrages avec relais des alertes et alarmes au COGC via le réseau public opéré (sans liaison à un PTE). Il est envisagé, dans les prochaines années, d'instrumenter d'autres ouvrages en terre sur le réseau ferré national et d'homologuer le système d'alarme dans le contexte de la signalisation ferroviaire.



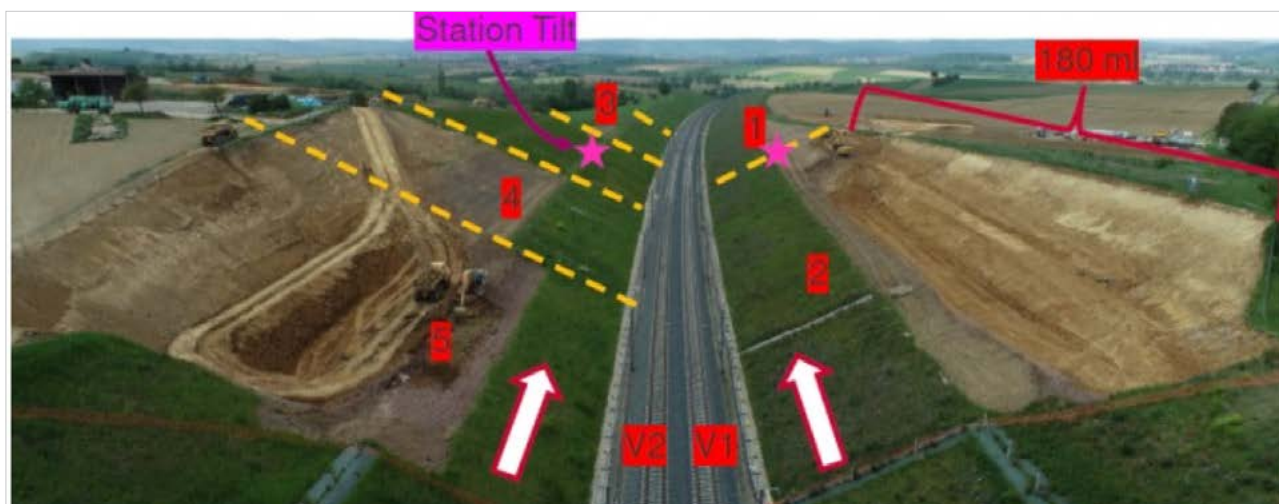
Glissement du talus de déblai côté voie 2 ayant entraîné le déraillement du TGV



Principe d'alerte et d'alarme du système de suivi des talus



Positionnement des tiltmètres et vue du site par les caméras de la centrale d'acquisition



8.2.13 Puits de lancement de tunnelier – Puits Glarner, RATP L14 – Instrumentation de la paroi moulée et suivi du rabattement

Lieu :

Saint-Ouen, Av. Capitaine
Glarner

Période d'auscultation :

En cours de travaux (2015)

Maître d'ouvrage :

RATP

Maître d'Œuvre :

SYSTRA

Entreprises :

Bouygues TP / Soletanche
Bachy / Bessac

Equipe d'Auscultation :

Bouygues TP / Soletanche
Bachy / Bessac

Missions :

Suivi des déplacements du
soutènement et des indi-
cateurs du rabattement de
nappe

Coût de l'instrumentation :

NC



Projet / Problématique :

L'ouvrage Glarner a été réalisé en 2015 dans le cadre de la prolongation de la ligne 14 de métro au nord de Paris, sur la commune de Saint-Ouen. Cet ouvrage de débranchement, de forme trapézoïdale (longueur de 54 m et largeur de 11 à 24 m), doit également servir, lors des travaux, de puits de départ au tunnelier. La fouille est excavée jusqu'à 26 m de profondeur, à l'abri de parois moulées butonnées.

Les horizons géologiques rencontrés sont principalement les sables de Beau-champs, et les formations du Lutétien (Marnes et Caillasses et Calcaire Grossier). Les aquifères du Bartonien et du Lutétien sont en communication au droit du site, et le niveau piézométrique s'établit à environ 5 m de profondeur. Les excavations nécessitent donc un rabattement d'une vingtaine de mètres, facilité par la réalisation préalable d'un fond injecté, engagé entre les parois moulées ancrées dans

le Calcaire Grossier. Ce dispositif doit permettre de respecter le débit maximal autorisé par l'administration (80m³/h sur ce site). Le contexte urbain, les dimensions importantes de l'ouvrage ont conduit à prévoir une auscultation significative des parois moulées lors des travaux. Un essai de pompage à l'intérieur de l'enceinte a également été mené avant la réalisation du fond injecté, pour en confirmer ou non la nécessité.

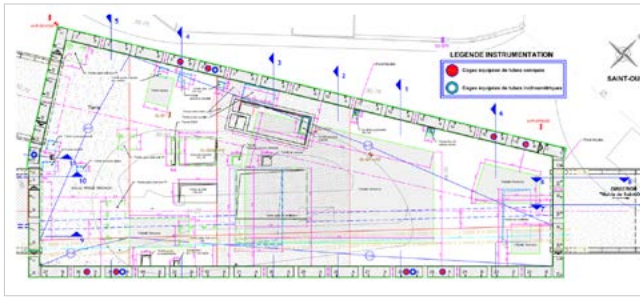
Schéma et descriptif de l'instrumentation :

Une vue en plan de l'ouvrage présente ci-après les panneaux de paroi moulée faisant l'objet d'une auscultation sonique (vérification de l'intégrité du béton) et ceux équipés d'un inclinomètre. Un suivi topographique en continu de la paroi moulée et des avoisinants est réalisé en complément du suivi inclinométrique. Quelques jauges de déformations ont également été positionnées sur des boutons métalliques provisoires. Le suivi géologique et piézométrique de la fouille ainsi que la mesure régulière du débit d'exhaure permettent de vérifier l'adéquation des hypothèses retenues lors du dimensionnement et le bon comportement du dispositif de pompage au cours des terrassements.

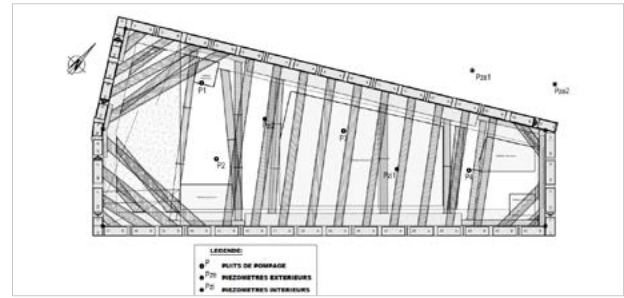
REX et Synthèse :

Le suivi du comportement de la paroi moulée a fait l'objet de travaux de rétro-analyse, mettant en évidence sur ce site la bonne estimation des déplacements du soutènement par la méthode de calcul aux coefficients de réaction.

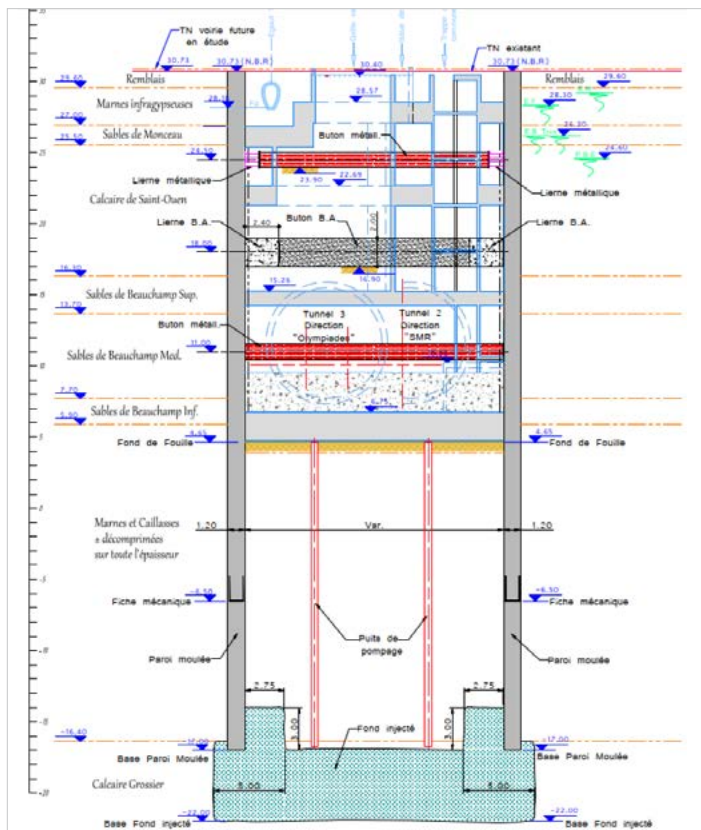
L'essai de pompage a permis de démontrer que le fond injecté, initialement prévu au marché, n'était pas nécessaire offrant un gain planning, économique et environnemental.



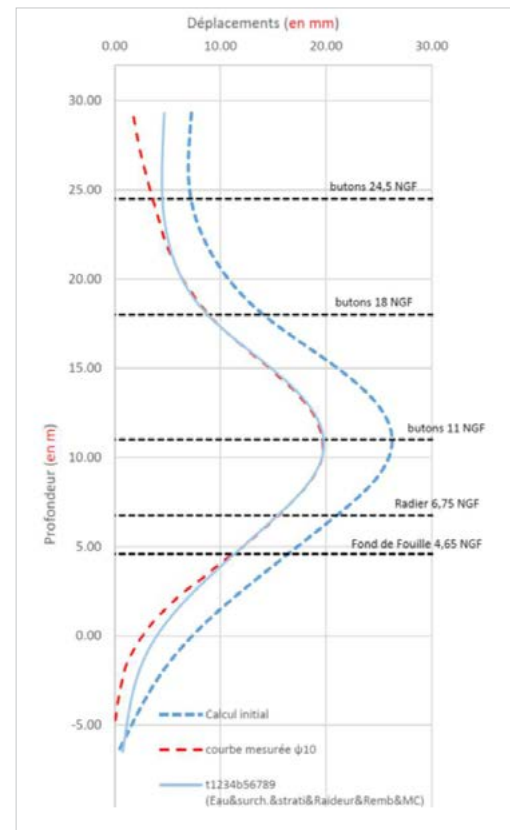
Vue en plan et position des inclinomètres



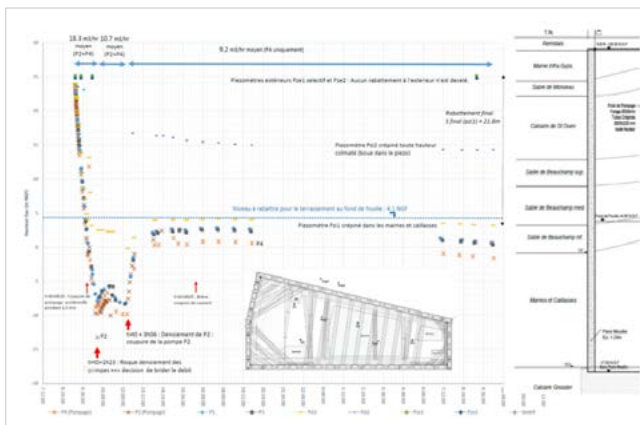
Dispositif de pompage



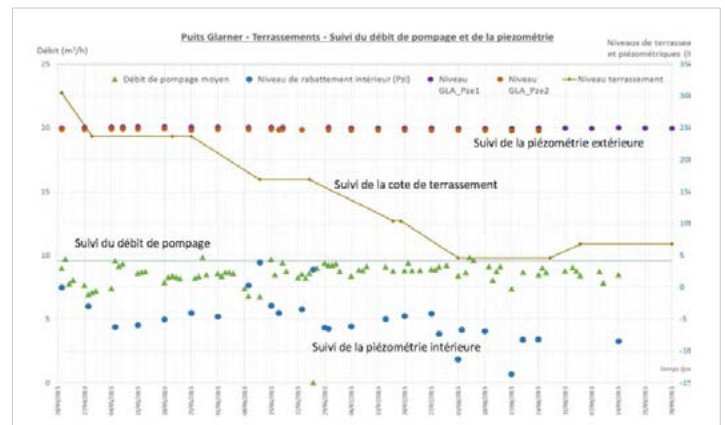
Coupe type de l'ouvrage



Déplacements mesurés (en rouge) et calculés



Essai de pompage préalable au terrassement



Suivi de la piézométrie et du débit lors de l'excavation



VERSION 1.0 - SEPTEMBRE

2025

