

Recommandations CFMS pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques

CFMS recommendations for instrumentation in geotechnical works

Christophe CHEVALIER¹, Dominique ALLAGNAT²

1 Univ Gustave Eiffel, GERS-SRO, F-77454 Marne-la-Vallée, France

2 Anciennement EGIS, Grenoble, France

**christophe.chevalier@univ-eiffel.fr*

RESUME : 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 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.

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, constitué de 16 membres, 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... Le groupe de travail a œuvré pendant près de cinq ans pour établir des recommandations générales sur le sujet qui ont été publiées en septembre 2025.

Après une présentation générale, il sera proposé des illustrations sur plusieurs sujets traités dans les recommandations : mesures, interprétation, exemples de situation et retours d'expérience.

ABSTRACT: Alongside quality geotechnical investigations, instrumentation contributes to a better inclusion of sustainable development in construction and management of geotechnical works. It contributes to a better control of risk and allows for an optimization leading to the "best possible work" in terms of quality, sustainability, time and cost of construction.

It also contributes to the ability to capitalize on feedback and optimize future works of the same type, to the extension of the lifespan of existing works, and to a better adaptation to the effects of climate change.

At the scientific and technical commission (CST) of the French committee of soil mechanics and geotechnics (CFMS) it was decided that the geotechnical community should take up this subject and establish general recommendations that would enable an instrumentation project to be drawn up that is both relevant and fully suited to the challenges of a construction work.

A working group was formed, consisting of 16 members, representing all involved parties in the construction or maintenance of geotechnical works, with the goal to achieve a consensus reflecting a sufficiently broad experience of the subject. It comprises contractors, project managers, university researchers, specialist geotechnical engineering consultancies, control offices, specialist Instrumentation companies, construction companies, etc.

The general recommendations have been published in September 2025, following 5 years of work by the working group.

After a general presentation, illustrations will be provided on a number of subjects covered in the recommendations: measurements, interpretation, examples of case studies and feedback.

Mots-clés : ouvrages géotechniques, instrumentation, recommandations, projet

Keywords: geotechnical structures, monitoring, recommendations, project

1 INTRODUCTION

1.1 Historique et 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.

1.2 Genèse des recommandations

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.

En effet, à 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 assez souvent, 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 réalisées en très grand nombre.

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, constitué de 16 membres, représente tous les acteurs de la construction ou de la maintenance d'ouvrages géotechniques

Il est établi par le groupe de travail, 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 et optimiser leur maintenance ;
- permettre une meilleure compréhension du comportement des ouvrages en général afin d'améliorer les modélisations numériques et les méthodes de calcul.

1.3 Présentation des recommandations

Les recommandations sont organisées en huit chapitres.

1.3.1 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.

1.3.2 Recommandations générales pour le projet d'instrumentation

On précise 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.

1.3.3 Généralité sur l'instrumentation et les mesures

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

1.3.4 Choix des capteurs et mesures intégrantes

Le lecteur y trouve 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

1.3.5 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.

1.3.6 Recommandations par type d'ouvrage

Il s'agit de proposer des conseils, sous forme de tableaux et schémas types, basés sur les retours d'expériences, selon le type d'ouvrage à instrumenter.

1.3.7 Bibliographie (7) et Annexes (8)

Les derniers chapitres sont constitués d'une bibliographie et de fiches synthétiques d'exemples illustrant des instrumentations réelles pour les différents types d'ouvrages. Pour chaque exemple sont précisés, la problématique, des schémas types et un descriptif de l'instrumentation, des résultats et une synthèse du REX.

2 LE PROJET D'INSTRUMENTATION

2.1 Préambule

Les recommandations sont résolument 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.

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 de l'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 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 :

- 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, butons, inclusions...) ;
- comportement des ouvrages géotechniques sous sollicitations dynamiques (séisme, vibrations imposées par les travaux...) ;

- évaluation de l'impact des conditions d'environnement (météo, pression atmosphérique, 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 les 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.

2.2 Elaboration du projet d'instrumentation

Il convient d'élaborer le meilleur projet d'instrumentation pour un ouvrage géotechnique donné, en se posant les questions 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 à suivre ? Les plages de variations, les seuils ?
- Quelle est l'organisation à mettre en œuvre ? Depuis la conception, l'installation, la réalisation des mesures, la qualification des mesures, l'analyse et l'interprétation des mesures en termes de comportement de l'ouvrage instrumenté, jusqu'à la définition de l'arbre de décision (responsabilités et actions en fonction des résultats de l'instrumentation) ;
- Quelles sont les contraintes à prendre en considération pour assurer la maintenance prédictive et curative, notamment pour le long terme ?
- Quelles sont les précautions à prendre par rapport au REX de l'instrumentation d'ouvrages situés dans un contexte similaire ? Quels sont les points de vigilance à traiter ?
- Quels sont les documents à produire 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 et ce dès les premières phases d'étude. 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. Il s'agit d'un projet qui suit de manière progressive les mêmes étapes que le projet général de l'ouvrage géotechnique à construire et à exploiter.

3 CHOIX DES CAPTEURS

Pour le choix des capteurs ou des technologies utilisés 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 en lien avec le projet général d'instrumentation adaptés à l'ouvrage et aux objectifs visés.

Il est bien sûr nécessaire de prendre en compte un ensemble de paramètres pouvant impacter le choix final. Parmi ces paramètres, on retiendra la technologie, le type de mesure (avec une mesure directe ou bien indirecte, en dérivant une valeur mesurée autre), 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 de la matière première, des frais de transports, des quantités commandées, etc.

Après une partie descriptive, le chapitre des recommandations dédié aux capteurs propose une synthèse sous la forme de tableaux. Ces tableaux recensent les avantages et les inconvénients de chaque type de capteurs, pour trois grandes familles de mesures identifiées : mesures géométriques (déplacements, déformations, inclinaisons), mesures mécaniques (forces, contraintes) et mesures hydrauliques (niveau piézométrique, teneur en eau, succion, pression...).

4 METHODES D'ANALYSE ET D'INTERPRETATION – EXEMPLES

4.1 Préambule

L'analyse et l'interprétation des données d'instrumentation se place dans le cadre plus large de l'ensemble de la chaîne de la mesure : de l'acquisition de la donnée jusqu'à l'interprétation de la mesure.

Les étapes ainsi présentées dans les recommandations couvrent :

- l'acquisition et la gestion des mesures incluant notamment les questions de prétraitement, validation et mise en forme des données ;
- les méthodes d'analyse des mesures ;
- leur interprétation.

Il est proposé dans cette partie d'illustrer les approches menées autour de 3 cas pratiques.

4.2 Analyses statistiques et probabilistes

De nombreuses approches statistiques peuvent être menées lorsqu'il s'agit de traiter un grand nombre de données pour en faire ressortir des tendances ou des indicateurs d'évolution spatiale ou temporelle.

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 et 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 est ainsi supposée résulter de la superposition de 3 états, modélisés par des fonctions additives dans le modèle :

- un état irréversible : l'évolution du phénomène dans le temps par une fonction linéaire ou exponentielle du temps ;
- des états réversibles :
 - l'effet de la charge hydrostatique par une fonction polynomiale de la charge hydraulique ;
 - l'effet de la répartition des températures dans l'ouvrage par une fonction trigonométrique de période 1 an (variation saisonnière).

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 1 sur des mesures de déplacements d'un barrage.

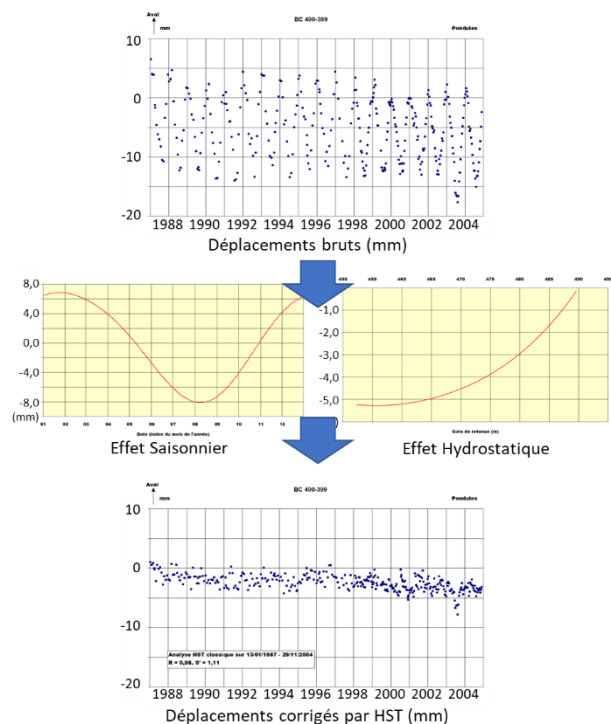


Figure 1. Mesures de déplacements d'un barrage : mesures brutes, corrections en température et côte de retenue, mesures corrigées (données EDF).

Des analyses statistiques similaires à celle décrite ci-avant peuvent aussi être utilisées pour 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. Ainsi, 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.

Ces méthodes sont ainsi aussi utilisées dans l'analyse de données d'auscultation des barrages pour prendre en compte les phénomènes non-linéaires (Simon et al., 2012).

4.3 Gestion des alarmes

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 arrêtera rapidement de les regarder. La méthode de déclenchement de l'alarme et le choix des seuils (voir Figure 2 pour illustration) 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.

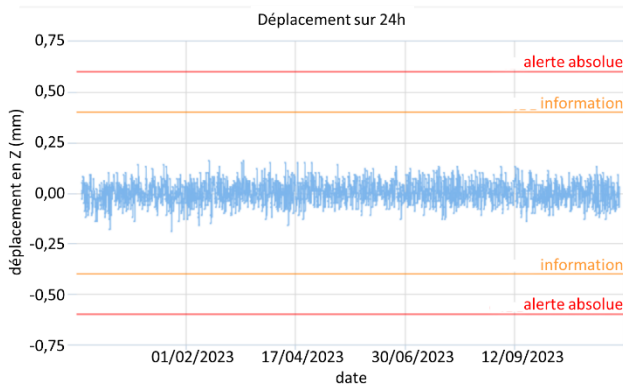


Figure 2. Suivi inclinométrique d'une falaise à Hendaye : seuils de déclenchement d'« information » et d'« alerte absolue ». Le seuil d'« alerte absolue » entraîne une fermeture de chaussée (données GEOTEC).

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 ;
- bande morte ;
- alarmes diffusées à différentes personnes en fonction des seuils ;
- alarmes intelligentes, avec vérification des valeurs proches avant de déclencher ;
- alarmes différentielles ;
- alarmes sur accélération.

La Figure 3 présente le principe de 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.

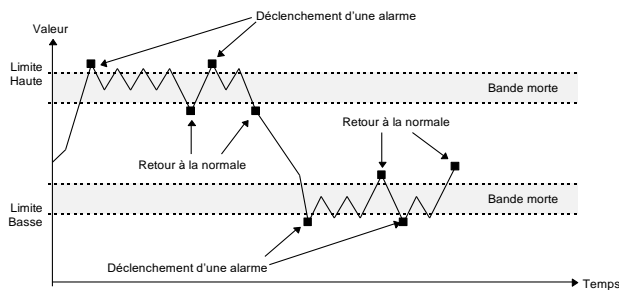


Figure 3. Fonctionnement d'une alarme avec bande morte.

4.4 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). 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 difficulté de réalisation ou de complexité du modèle par exemple).

Le schéma de principe est représenté à la Figure 4 et un exemple d'utilisation est donné au paragraphe 5.3 dans le cadre du confortement d'un glissement.

A 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.

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.

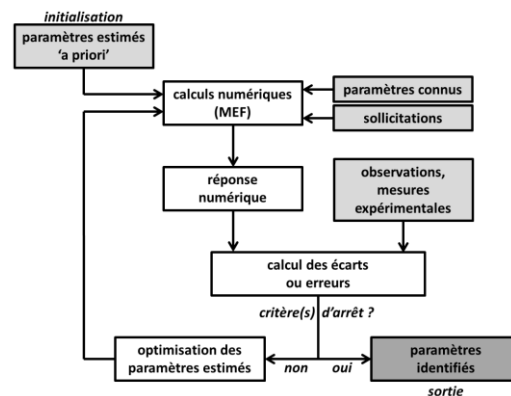


Figure 4. Schéma de principe de l'analyse inverse.

5 INSTRUMENTATION PAR TYPE D'OUVRAGE – EXEMPLES

5.1 Préambule

Les recommandations sont déclinées selon 14 types d'ouvrage différents. Elles se présentent sous forme de tableaux avec les principales rubriques suivantes :

- l'usage, concerne le phénomène physique à mesurer ;

- l'outil de mesure, approprié au phénomène à étudier ;
- les points clés, relatifs à la mise en œuvre de l'outil de mesure ;
- l'importance du phénomène physique à mesurer pour l'ouvrage concerné ;
- la densité d'outils de mesure préconisée.

A titre d'exemple sont présentés ci-après, de manière très synthétique, quatre types d'ouvrage pour lesquels une instrumentation adaptée au contexte a été mise en œuvre. On s'attache surtout à développer le REX pour chacun de ces exemples.

5.2 Ecran de soutènement

Cet exemple concerne une fouille excavée jusqu'à 26 m de profondeur, à l'abri de parois moulées butonnées (RATP L14, puits Glaner, Figure 5).

Les horizons géologiques rencontrés sont principalement les sables de Beauchamps 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 piézométriques s'établit à environ 5 m de profondeur.

Le projet prévoit 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

Le contexte urbain, et les dimensions importantes de l'ouvrage, ont conduit à prévoir une instrumentation significative :

- Inclinomètres dans les parois moulées ;
- Repères topographiques ;
- Jauges d'extensométrie / butons provisoires ;
- Piézomètres dans la ZIG ;
- Mesure des débits d'exhaure.

Le suivi rigoureux de l'instrumentation mise en place a permis de faire une rétro-analyse mettant en évidence une bonne estimation des déformations du soutènement (Figure 5).

L'essai de pompage, réalisé à l'intérieur de l'enceinte avant la réalisation du fond injecté a permis de démontrer que celui-ci n'était finalement pas nécessaire, offrant ainsi un gain en termes de planning, d'économie et environnemental.

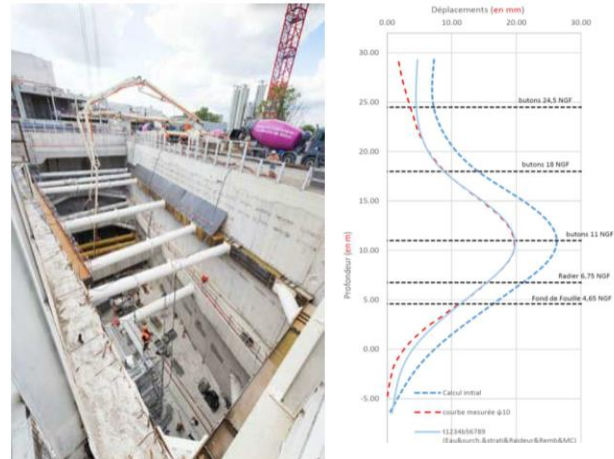


Figure 5. Photographie des parois moulées butonnées et déformées mesurées par tubes inclinométriques (données Soletanche Bachy).

5.3 Confortement d'un glissement

Lors de la réalisation d'un grand déblai (A404, Réseau APRR), un glissement fossile de type structural a été réactivé. Afin d'empêcher une régression dans le versant surplombant l'autoroute, il a été décidé la mise en œuvre de dispositions confortatives progressives (drainage et tirants précontraints) en se basant sur une instrumentation composée de :

- Inclinomètres de 20 à 30 m (7u) ;
- Piézomètres automatiques (6 u) ;
- Repères topographiques (58 u) ;
- Cales dynamométriques (10 u) ;
- Mesure des débits des drains.

Le suivi a permis de préciser la géométrie du glissement et sa cinétique en fonction des pressions interstitielles saisonnières (Figure 6).

La méthode observationnelle a été déployée, permettant ainsi de faire l'économie d'une précontrainte additionnelles (- 45 %) compte tenu de l'efficacité mesurée du drainage et des tirants en première phase (Figure 7). Vingt ans après les travaux, la poursuite du suivi de l'instrumentation a permis de confirmer la méthodologie appliquée.

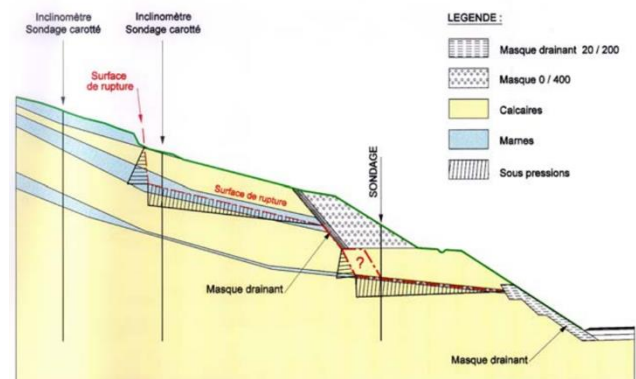


Figure 6. Modèle de rupture et pressions interstitielles (données EGIS).

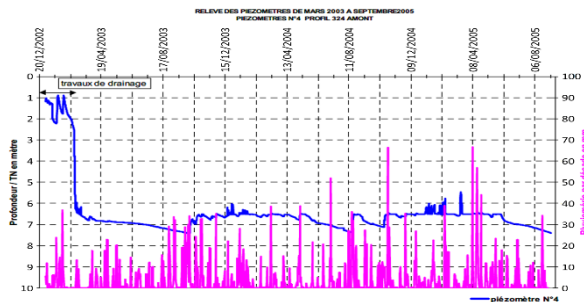


Figure 7. Corrélation piézométrie-pluviométrie. Effet du drainage sur la piézométrie (données EGIS).

5.4 Déblai ferroviaire instable

Au sud de Valence, la plateforme de la LGV Méditerranée est affectée par la proximité d'un grand glissement lent affectant le déblai des Ayasses. La complexité géologique du site a nécessité des reconnaissances et une instrumentation importante afin d'élaborer une modélisation complète du phénomène.

Un modèle prédictif de l'impact de la pluviométrie sur l'activité du glissement a été établi pour optimiser le protocole de surveillance du site.

Le dispositif d'instrumentation est assez classique :

- Repères topographiques sur le talus de déblai et la plateforme ferroviaire ;
- Inclinomètres en forage (20 u) de 15 à 40 m de profondeur ;
- Piézomètres

La fréquence des mesures est variable de 1 à 3 mois.

Le suivi de l'instrumentation a permis de définir la cinématique du glissement et sa cinétique (Figure 8) avec une bonne approximation des volumes en mouvements et des travaux à réaliser, consistant à l'excavation de 400 000 m³ de matériaux en amont de la plateforme.

L'analyse des séquences pluviométriques et leur impact sur la vitesse des déplacements a permis d'établir des corrélations et de disposer d'un outil de prévision fiable pour établir les modalités de surveillance pendant et après les travaux de terrassement.

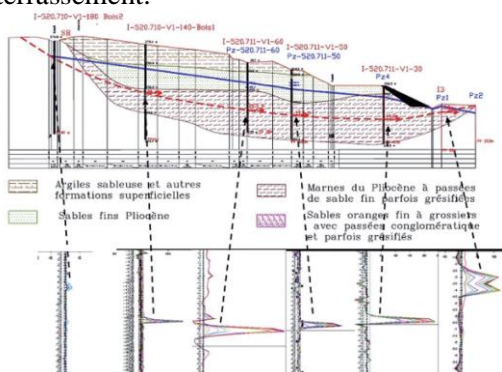


Figure 8. Modélisation du glissement à partir des mesures inclinométriques (données SNCF).

5.5 Tunnel profond

Le tunnel de Chamoise (A40, Macon-Genève), construit à partir de 1983, présente une couverture de 400 m et traverse, dans sa partie centrale, des marnes susceptibles d'un comportement différé marqué. Ces spécificités ont conduit à un programme d'instrumentation renforcé pour suivre le comportement des marnes lors de la construction et les contraintes attendues dans le revêtement définitif en béton armé.

Il a été privilégié de concentrer l'instrumentation sur des profils types (Figure 9) avec :

- extensomètres multipoints en forage dans le massif rocheux ;
- CPT à l'interface massif / revêtement ;
- Extensomètres CV dans le béton du revêtement ;
- Capteurs de température associés à chaque point de mesure ;
- Mesures de la convergence.

Ce tunnel fait l'objet d'un suivi automatique depuis une quarantaine d'années, avec un taux de perte des capteurs évalué à 10-15 %. Le suivi à très long terme permet de constater que les déformations ne sont pas encore parfaitement stabilisées.

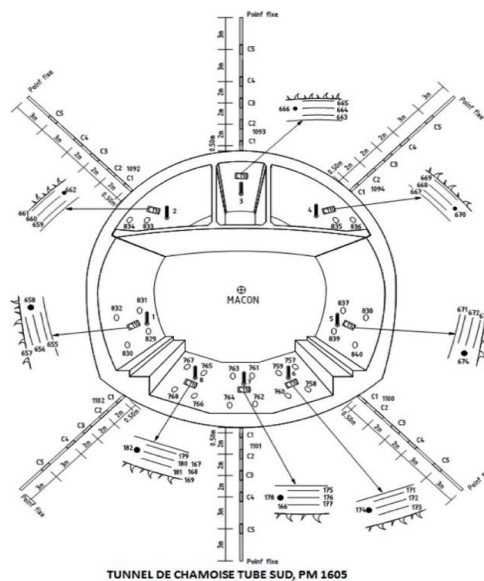


Figure 9. Exemple de section instrumentée renforcée avec 180 points de mesure (données EGIS).

6 CONCLUSIONS

Ces recommandations (CFMS, 2025), qui s'appuient largement sur les REX de l'ensemble du groupe de travail, devraient permettre d'élaborer des projets d'instrumentation pertinents et adaptés au mieux aux enjeux des différents ouvrages géotechniques. Elles devraient ainsi contribuer à l'optimisation des constructions en termes de maîtrise des risques,

qualité, coût, délai et à l'optimisation des travaux d'entretien sur le long terme, conduisant ainsi à la réalisation du « meilleur ouvrage possible ».

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ensemble des membres du groupe de travail ayant œuvré pour la rédaction des recommandations : les responsables de chapitre : L. BRIANCON, A. LAFOURCADE, C.E. NADIM, F. SZYMKIEWICZ ainsi que les contributeurs et les auteurs d'exemple d'instrumentation : M. BETH, J. BOISSON, D. BOUTHEON, S. COUHNIL, J. de SAUVAGE, D. DUPUIS, M. FONTY, O. GAY, J. SAUSSE, V. TALFUMIERE, E. VERMOOTE et Z. ZERFA.

Le CFMS est également vivement remercié pour son soutien à l'édition.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allagnat, D. (sous la direction de) (2005). La méthode observationnelle pour le dimensionnement interactif des ouvrages – Presses des Ponts et Chaussées
- CFMS (2025). Recommandations pour l'instrumentation des ouvrages géotechniques, GT sous la coordination de D. Allagnat et C. Chevalier, <https://www.cfms-sols.org/recommandations/recommandations-pour-linstrumentation-des-ouvrages-geotechniques>
- Honjo, Y., Wen-Tsung, L. and 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.
- Simon, A., Royer, M., Mauris, F. and 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. and 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