

RETOUR D'EXPERIENCE DE 40 ANS D'INSTRUMENTATION INCLINOMETRIQUE SUR LE RESEAU FERRE NATIONAL

40 YEARS FEEDBACK IN INCLINOMETRIC MEASUREMENTS ON FRENCH RAILWAY

Florence BELUT¹, Houcine MANDOUR¹, Jérémie MARIDET¹, Vincent TALFUMIERE¹.

¹ SNCF RESEAU – Direction I&P – LA PLAINE ST DENIS

RÉSUMÉ – Dans le domaine ferroviaire, les ouvrages en terre meubles sont suivis depuis une quarantaine d'années par des instrumentations inclinométriques. Initialisées par l'IFSTTAR, la technique de suivi et l'interprétation des mesures ont été progressivement améliorées. L'article passe en revue le retour d'expérience que SNCF-RESEAU a pu cumuler depuis la fin des années 1970.

ABSTRACT – Since forty years, the french railway company used to monitor the earthworks with the inclinometric measurement technic. This method, developped by IFSTTAR, had been gradually improved. This paper presents SNCF RESEAU feedback from the seventies to the present day.

1 Introduction

Le réseau ferré national comporte un linéaire d'ouvrages en terre de l'ordre de 29 000 km. Une bonne part sont des ouvrages meubles (plus de 80 %). Ils peuvent être le siège d'instabilités qui touchent les talus de déblai ou de remblai. Les plus graves peuvent avoir un impact sur la plate-forme et donc sur la sécurité et la régularité des circulations ferroviaires. Ces instabilités, une fois détectées, peuvent être suivies par topographie, ce qui permet d'avoir une connaissance des mouvements en surface ; mais la connaissance des mouvements en profondeur est parfois indispensable pour appréhender la cinématique et la cinétique des glissements. C'est pourquoi SNCF RESEAU depuis une quarantaine d'années a mis en place un réseau de suivi basé sur de l'inclinométrie (Talfumière, 2011 et fig. 1).



Figure 1. Exemple d'instrumentation d'un ouvrage ferroviaire.

2 Principe de la mesure

Comme les autres MOE, MOA ou bureaux d'études de sols, SNCF RESEAU suit la réglementation nationale en matière d'inclinométrie, en appliquant la norme NF P 94-156.

Il s'agit de mesurer l'évolution de la verticalité du tube inclinométrique (fig. 2) par rapport à une mesure de référence et selon un pas de temps, de préférence régulier. Ce tube de faible inertie et scellé dans le sol, présente à cet effet des rainures formant deux plans perpendiculaires permettant le passage de la sonde.

Comme imposée par la norme, la mesure de l'angle du tube avec la verticale est réalisée à la remontée par pas de 50 cm et deux fois par plan (en tournant la sonde à 180 degrés). L'angle est assimilé à son sinus (faible valeur d'angle) et le déplacement du tube à chaque profondeur est obtenu en sommant les déplacements de chaque segment de sonde, projetés sur l'horizontale.

Par rapport à la norme SNCF RESEAU impose :

- une orientation du tube de façon à ce qu'un des plans soit perpendiculaire aux voies (composante principale des glissements affectant les ouvrages simples),
- quatre séries de mesures par plan (remontée et descente) pour une meilleure précision lors du dépouillement. Ces quatre séries peuvent être réduites à deux selon les résultats obtenus (après un an de suivi par exemple).

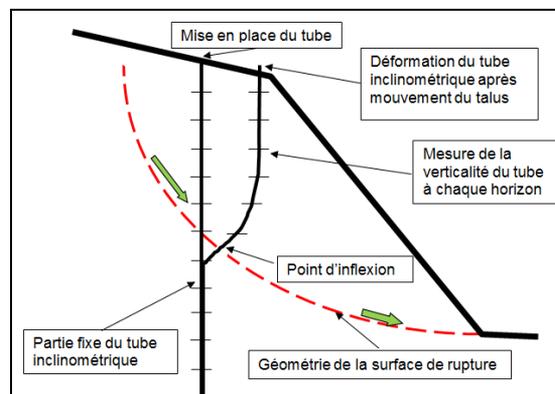


Figure 2. Schéma de principe de la mesure inclinométrique.

3 Historique

Sur le réseau ferré national, la mise en place de tubes inclinométriques a débuté au milieu des années 1970. Sous l'impulsion de l'IFSTTAR (ex LCPC) qui avait, à l'époque une mission d'assistance auprès de SNCF RESEAU, des tubes métalliques de section carrée, mesurables par un matériel spécifique, ont été mis en places sur les sites dont les experts du laboratoire avaient la charge d'études.

Quelques dizaines de sites ont ainsi été instrumentés. Ce développement allait de pair avec la création d'un protocole de mesures et la mise au point des formules de dépouillement et d'interprétation. Cela a ensuite constitué la base d'un texte normatif à l'origine de la norme actuelle.

Dès la fin des années 1970, SNCF RESEAU a commencé à faire poser puis à poser pour son propre compte des tubes inclinométriques en aluminium, mesurables avec un matériel standard. Ainsi, le parc de tubes mesurés a augmenté rapidement dans les années 1980 et 1990 pour atteindre plus de 3000 unités, réparties sur toute la France.

La majorité des tubes était mesurée puis dépouillée par les correspondants régionaux des pôles ingénieries, qui se sont progressivement équipés en sondes, ceci succédant à une période de centralisation à Paris. Un logiciel interne a également été développé pour tenir compte des spécificités des mesures et des besoins en matière de courbes interprétatives.

Actuellement, le parc de tubes inclinométriques mesurés est proche de 1000 unités, l'immense majorité en aluminium. Les longueurs vont de 5 à 40 m de profondeur ; certains sont mesurés depuis près de 30 ans.

Les mesures et leur dépouillement sont effectués essentiellement par SNCF RESEAU, le reste étant sous-traité. Mais l'interprétation reste du domaine du Maître d'Ouvrage ou de son assistant qui doivent avoir une analyse fine et globale de l'ensemble des informations sur un site instrumenté pour pouvoir donner un avis sur l'évolution d'un ouvrage et lancer une alerte en cas d'évolution significative.

4 REX sur l'instrumentation inclinométrique

L'analyse des mesures inclinométriques et de leur dépouillement, réalisée depuis une quarantaine d'années, est riche d'enseignements sur les différentes sources d'erreurs de mesures et d'interprétation, ainsi que sur les pathologies détectées (types de mouvements et évolutions). Elle donne des clefs pour une bonne exploitation de la mesure inclinométrique.

La qualité des résultats attendus dépend du respect des procédures mises en place et des précautions prises depuis la pose de l'instrumentation inclinométrique jusqu'à l'interprétation des mesures.

4.1 Erreurs et incertitudes de mesures : origines et parades

4.1.1 Contrôle du matériel de mesures

La sensibilité de l'appareil (boîtier, sonde inclinométrique mais aussi câble de raccord) nécessite des vérifications annuelles comme stipulé dans la norme NF P 94-156 (étalonnage auprès du fabricant, contrôle avant déplacement par exemple sur un tube témoin) et un entretien régulier.

Certaines mesures se sont ainsi révélées faussées du fait d'un changement de câble (fig. 3a), d'une sonde mal étalonnée. Cette origine d'erreur est détectable par sa répétition d'un tube à l'autre et à différentes dates de mesures ; elle est indépendante de l'opérateur (même décalage des courbes dépouillées, notamment des courbes d'erreur de mesure).

4.1.2 Tubes et pose

L'équipement utilisé est important pour une bonne qualité de mesure. Plusieurs types de tubes existent sur le marché : en Aluminium, en ABS ou en PVC. Les tubes Aluminium, dont l'efficacité a été démontrée au fil du temps, sont les plus utilisés et recommandés lors de l'instrumentation des ouvrages en terre. A l'inverse, les tubes en PVC sont proscrits car peu pérennes et trop fragiles. Ceux en ABS sont tolérés pour des mesures limitées dans le temps (déformation plus rapide).

Les prescriptions de forage et de pose du tube sont essentielles pour une bonne qualité de mesure. Sur le terrain, cela nécessite une réception du chantier exigeante : pose verticale avec tolérance de 6°, scellement correct du tube pour un déplacement associé représentatif de celui du sol, pose correcte du tube sans espace entre les éléments (cas contraire illustré par la courbe de la fig.3b).

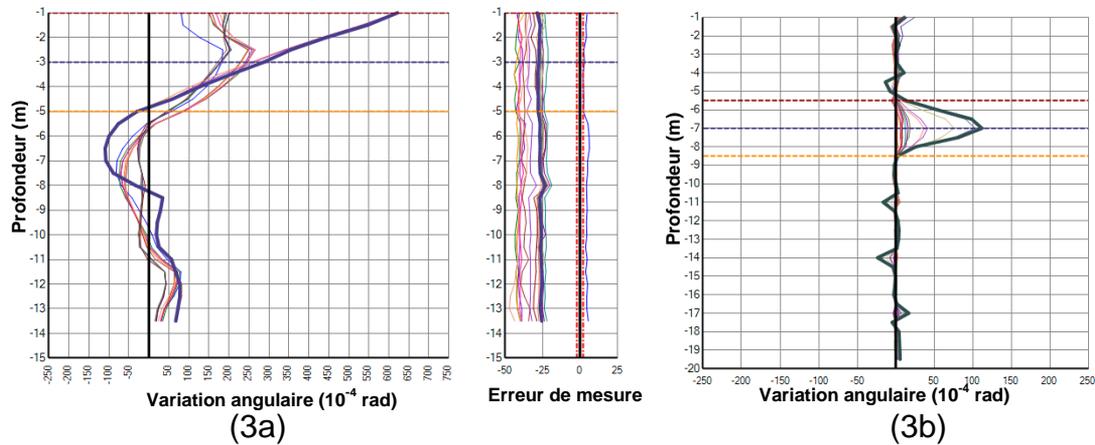


Figure 3. Exemples d'erreurs de mesures liées a) au matériel, b) à un défaut de pose.

La tête et le pied du tube doivent être aménagés pour assurer une bonne protection et maintenir sa pérennité. Le tube doit en théorie rester étanche, mais c'est rarement le cas en pratique. Cela ne pose pas vraiment de problème tant qu'aucun élément solide ne rentre à l'intérieur du tube.

Les non conformités lors de la pose des tubes inclinométriques provoquent des déformations parasites des tubes et des difficultés lors du dépouillement des mesures, lorsqu'elles n'entraînent pas le blocage de la sonde :

- absence de bouchon de pied ou de tête, ou bouchon mal vissé : risque de coincer la sonde ou de réaliser une mesure supplémentaire en fond de tube et de décaler les mesures,
- absence de rivets, déboîtement des manchons : artéfacts lors du dépouillement,
- défauts de scellement et infiltrations des coulis dans les tubes : déformations des tubes différentes de celles du sol.

Le contrôle par la fausse torpille et la mesure initiale sont indispensables pour vérifier la longueur du tube, d'éventuels défauts géométriques ou de nettoyage.

4.1.3 Réalisation de la mesure inclinométrique

Pour obtenir une mesure exploitable, les procédures doivent être respectées, ce qui nécessite de former les agents chargés des mesures sur le terrain ou de veiller au respect de ces procédures par le sous-traitant.

Il est notamment important d'attendre la stabilisation de la sonde en température (sous peine d'avoir des incertitudes de mesures trop élevées voire des courbes inexploitables).

Faire 4 mesures au lieu de deux par plan permet de pallier une part de cette erreur (la deuxième série de montée-descente sera au moins en température) ; en contrepartie, la série de mesures dans le plan parallèle à la voie est souvent inutile et n'est réalisée qu'en cas d'indice de glissement biais par rapport à la plateforme (versant, quart de cône).

Ces erreurs de mesures sont très préjudiciables dans le sens où elles rendent le résultat inexploitable et ne permettent pas d'apprécier l'évolution du site instrumenté.

Outre, l'application des procédures, l'opérateur est formé pour être attentif à tout changement (tête de protection, tête de tube) pour assurer une mesure précise d'une campagne à l'autre (même position du câble et même orientation de la sonde) et éviter des erreurs suivantes :

- mesure dans le sens inverse,
- mesure supplémentaire en plus au fond du tube et décalage lors du dépouillement,
- mesure importée sur le mauvais tube.

Ces erreurs peuvent être facilement corrigées lors de l'interprétation

4.2 Interprétation des courbes

L'interprétation des mesures est régie par des paramètres (profondeur d'ancrage du tube, niveau de rupture, calcul de l'activité) permettant d'obtenir, à partir des mesures d'angles, les niveaux de ruptures, les déplacements du tube (déformée) et l'activité du site. Ces paramètres doivent être choisis avec attention par l'opérateur.

Au moment du dépouillement, il est important de constater la validité de la mesure, en calculant des moyennes et des écarts types qui permettent de juger de la dérive de la sonde, et d'erreurs de mesures ponctuelles.

L'analyse poussée des différents résultats et notamment des mesures d'angle est propre à SNCF RESEAU et n'est pas présente dans la majorité des dépouillements faits à l'extérieur de l'entreprise. Elle permet une finesse d'interprétation qui assure la détection de mouvements significatifs dès leur initialisation et même de détecter un mouvement dès la première mesure.

C'est grâce au développement d'un logiciel interne amélioré au fil des années que cette méthode a pu être utilisée et enseignée à l'ensemble des agents assurant des suivis inclinométriques au sein de SNCF RESEAU.

4.2.1 Types de mouvements et évolution dans le temps

Les courbes de variation angulaire et de déformée, issues des mesures sont souvent typiques d'une surface de rupture (fig. 4) : pic angulaire et déformation en forme de baïonnette.

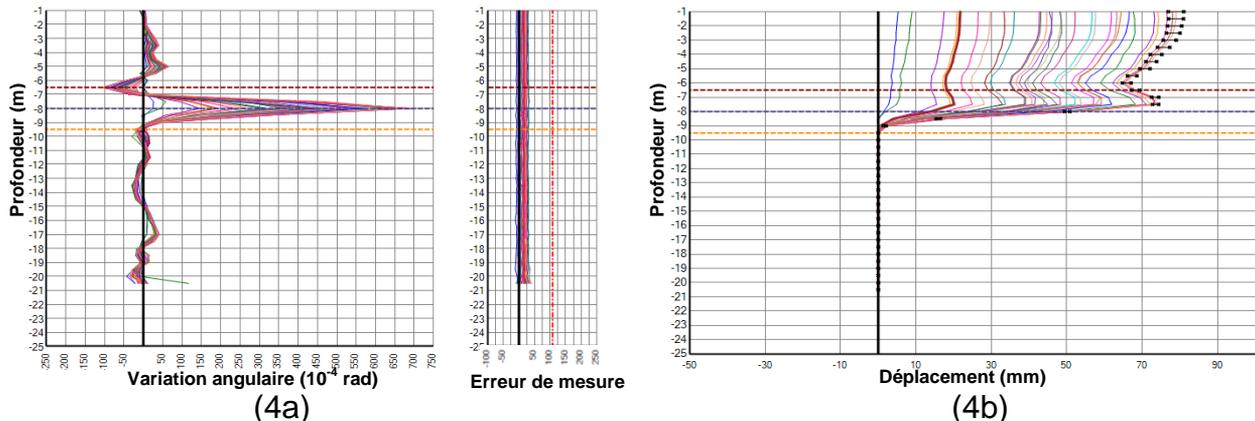


Figure 4. Courbes typiques d'une surface de rupture : a) variation angulaire et b) déplacement.

Mais leur aspect peut également traduire d'autres types de mouvements : surfaces de rupture emboîtées (fig. 5a), phénomènes de tassement (flambement du tube), fluage des terrains superficiels (déversement en tête), combinaison des différents types de mouvements (tassement et rupture, fig. 5b), surface de rupture non ponctuelle (influence sur plusieurs mètres de sol). D'autres ne trouvent pas d'explication directe et, s'il s'avère qu'elles ne sont pas erronées, l'analyse du site instable dans son ensemble peut permettre de les expliciter.

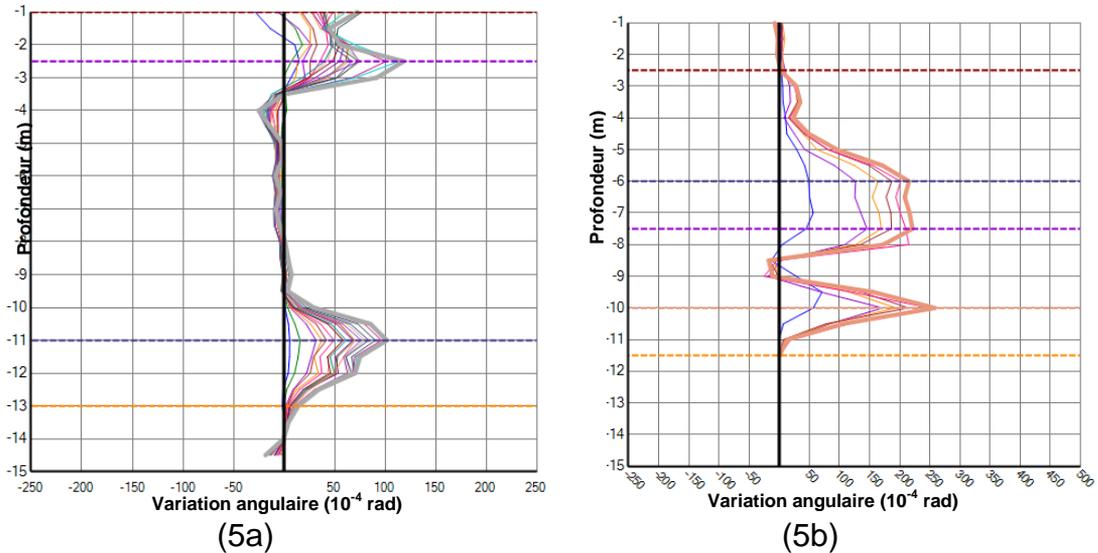


Figure 5. Courbes de variations angulaires avec a) ruptures emboîtées et b) rupture et fluage.

Le suivi inclinométrique permet également de quantifier les mouvements au travers de l'évolution dans le temps des variations angulaires au niveau de la surface de rupture (fig. 6) et des déplacements, par le calcul induit de la déformée du tube (activité en mm par mois ou par an). Le retour d'expérience des sites instables montre qu'à partir de 1mm/mois l'activité est significative pour le réseau ferré et qu'il faut envisager un renforcement du suivi voire un confortement à plus ou moins court terme.

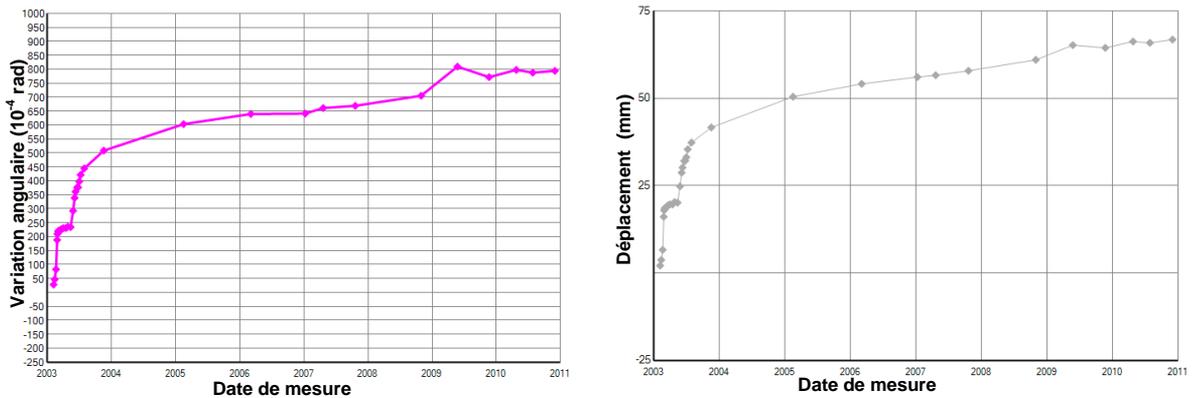


Figure 6. Courbes d'évolution dans le temps avant et après confortement (2004).

4.2.2 Difficultés et erreurs d'interprétation rencontrées

L'erreur de mesure n'est parfois pas prise en compte dans l'interprétation et certains peuvent évoquer des déplacements négatifs (qui correspondraient à une remontée du sol ce qui est impossible). Ces activités négatives sont généralement en rapport avec des incertitudes de mesures plus importantes que d'habitude, voire dans certains cas le reflet d'un scellement tube/sol défaillant (élasticité du tube).

Une mesure est considérée comme fautive lorsque la différence entre les 2 mesures réalisées à une même profondeur est supérieure à 10×10^{-4} radians (répétabilité des mesures). Il est en de même lorsque l'erreur de mesure est supérieure à 25×10^{-4} radians. En dehors des erreurs de mesures, certaines courbes se révèlent difficiles à interpréter voire inexploitable et ont pu être analysées sans recul. Ainsi, une grande différence entre

deux mesures successives (dont une fausse) peut être interprétée comme une accélération des mouvements et donc comme l'indice d'une rupture imminente.

Lorsqu'un tube est endommagé/cassé, et que les mesures ne peuvent plus être réalisées, plusieurs cas peuvent se présenter. Le non remplacement doit être justifié :

- soit le tube évoluait de manière importante et il sera remplacé,
- soit le tube ne montrait pas d'évolution significative et son remplacement sera analysé en fonction des paramètres du site.

En cas de remplacement de tube, la reprise des anciennes mesures ne peut pas être effectuée. L'interprétation du nouveau tube sera faite en corrélation avec les mesures de l'ancien tube.

4.2.3 Clés d'une bonne interprétation

Outre le respect des spécifications stipulées dans la norme NF P 94-156 et dans le référentiel SNCF RESEAU, une meilleure interprétation des mesures inclinométriques ne peut se faire sans :

- connaître les objectifs visés par le suivi mesure et le contexte de la mesure (connaissance du site, comparaison avec les mesures précédentes...),
- avoir suffisamment d'expérience pour déceler facilement d'éventuels défauts de pose/mesure et bien interpréter les résultats (variation angulaire, évolution en fonction du temps, types de mouvements).

Enfin, les mesures issues d'un tube inclinométrique ne doivent pas être analysées seules ; elles doivent toujours être remises dans le contexte de l'environnement du tube.

4.2.4 Croisement avec les autres données

Généralement un site est équipé de plusieurs tubes inclinométriques. L'objectif est de disposer d'un ou plusieurs profils en travers instrumentés avec au moins deux tubes inclinométriques par profil, généralement en crête et dans le tiers inférieur du talus.

Des tubes supplémentaires sont ajoutés dans certains cas, pour identifier correctement la surface de rupture (remblai sur versant (fig.7), grand déblai (Deherripont *et al.*, 2011)).

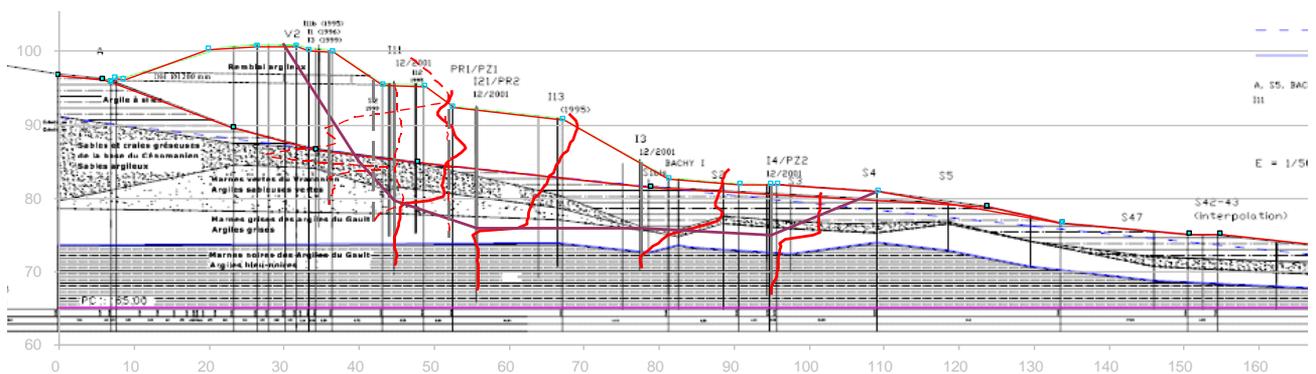


Figure 7. Exemple d'instrumentation de remblai sur versant : croisement des données inclinométriques et géologiques.

Les mesures inclinométriques sont systématiquement replacées sur un profil en travers topographique et croisées avec les observations réalisées sur sites (déformation de talus, bombements, ...) et les données issues des sondages et essais géotechniques, afin de

bien préciser la géométrie de la surface de rupture éventuelle et d'interpréter dans le contexte du site les mouvements observés sur un tube. Cela est particulièrement important lorsque les courbes inclinométriques ne sont pas caractéristiques.

La surface de rupture identifiée se développe généralement dans l'horizon de caractéristiques géotechniques les plus faibles. A noter que les profondeurs de rupture sont précises à plus ou moins 25 cm (sonde de 50 cm), sous réserve de bien prendre en compte la hauteur hors sol du tube.

Ces profils de synthèse servent de base pour dimensionner le confortement.

Les activités inclinométriques sont comparées aux différents suivis existant sur l'ouvrage notamment les suivis topographiques en piste et/ou en voie (repère ou installations ferroviaires en place), de façon à évaluer le caractère évolutif du site et les suites à donner. Les évolutions de la géométrie de la voie sont également analysées (défauts de voie, bourrages mécaniques, reprises manuelles, ...).

Les mesures prises ensuite (travaux de confortement, urgence, suivi, ...) sont adaptées en fonction de l'activité du site et de la zone concernée (voie impactée ou non).

5 Conclusions

La réalisation des mesures inclinométriques participe à 2 missions distinctes :

- en AMOA : elles permettent de connaître l'état des ouvrages (et de leur activité) et d'anticiper la réalisation de travaux de confortement,
- en MOE : elles sont une donnée d'entrée pour la réalisation d'étude de confortement. Elles permettent de connaître précisément les profondeurs de ruptures sur les tubes et d'aider au dimensionnement du confortement.

Comme tout suivi, les mesures inclinométriques doivent donc être réalisées dans les règles de l'art par des personnes formées car elles participent indirectement à la sécurité des circulations ferroviaires. Elles doivent être interprétées rapidement après réalisation et croisées avec les autres indices d'évolution du site afin d'évaluer correctement son activité.

Cette interprétation nécessite également une compétence géotechnique et un recul par rapport aux données fournies, compte tenu des différentes sources d'incertitudes que la mesure comporte.

En effet, une mauvaise interprétation peut aboutir à une mauvaise estimation de l'évolution du site ou à la réalisation d'un confortement inadapté (notamment si celui-ci est sous-dimensionné), qui pourrait avoir un impact sur la sécurité des circulations (considérant les faibles déplacements d'ordre millimétrique tolérés par le transport guidé).

Le retour d'expérience ici capitalisé met en évidence les points principaux à respecter et les bonnes pratiques à utiliser pour une mesure inclinométrique efficace et pertinente pour la gestion du patrimoine ouvrages en terre d'une infrastructure.

6 Références bibliographiques

- NF P94-156 (1995): *Sols. Reconnaissance et essais - Mesures à l'inclinomètre* – P 23.
- DEHERRIPONT J.L., BLONDEAU F., LUCAS F. (2011). *Etude d'un glissement hors norme en déblai ferroviaire. Symposium International GEORAIL 2011. IFSTTAR Ponts Formation Edition*. P 798, pp. 539-546.
- TALFUMIERE V. (2011). *Maintenance des ouvrages en terre sur le Réseau ferré national. Revue Française de Géotechnique*. P 115, pp. 7-14.