

Exploitation des relevés inclinométriques en tubes rainurés avec le logiciel CAPITOUL

Nicole BETS

Chef de section principal des Travaux publics de l'État

Claude MIEUSSENS

Ingénieur ENSHG

Docteur de spécialité de l'université de Grenoble

Chef de l'unité technique Expertise

et recherche appliquée en géotechnique

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Toulouse

RÉSUMÉ

Une procédure d'analyse tridimensionnelle des mesures effectuées dans les tubes inclinométriques rainurés (à guidage de sonde) a été développée et programmée dans le logiciel CAPITOUL. Elle permet de reconstituer le déplacement dans l'espace du tube inclinométrique, facilitant ainsi l'analyse des déplacements des sols et des ouvrages dans les configurations complexes. La méthode d'analyse répond à la norme française NF P 94-156, permet l'analyse et la correction des erreurs de mesure, fournit des documents graphiques directement exploitables et permet la gestion d'une base de données de mesures.

MOTS CLÉS : 42 - Mouvement - Sol - Ouvrage d'art (gén.) - Angle - Appareil de mesure - Analyse (math.) - Rotation - Profondeur - Capteur - Logiciel - Conduite (tube).

Introduction

La mesure inclinométrique est très largement utilisée en géotechnique, en particulier pour la surveillance des ouvrages et des pentes. Depuis plus de vingt années, les matériels disponibles sur le marché ont des performances tout à fait remarquables, l'appréciation d'une rotation de l'ordre de 1 à $4 \cdot 10^{-4}$ radian étant couramment obtenue.

La résolution des accéléromètres qui équipent la plupart des sondes inclinométriques est largement supérieure à cette valeur de 10^{-4} radian. Mais celle de la chaîne de mesure dépend aussi de la qualité de la pose du tube scellé dans le sol et des liaisons entre la sonde et ce tube, de sorte que, globalement, le domaine d'incertitude de la mesure inclinométrique reste proche de cette valeur, soit l'équivalent d'un déplacement de 1 à 4 mm pour 10 m de longueur de tube.

La méthode d'exploitation recommandée est donnée en annexe A (informative) de la norme française « Mesures à l'inclinomètre » du mois d'octobre 1995 (NF P 94-156). Elle est basée pour l'essentiel sur le principe d'une double mesure à 0 et à 180°, qui permet de s'affranchir de la dérive du zéro de la chaîne de mesure et de définir un domaine de précision. Cette méthode, développée par M. Virollet au Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Toulouse et B. Pinent au Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), a été d'abord appliquée au LRPC de Toulouse dans le logiciel CLINO852, qui a servi de base aux programmes CLINEX79 puis CLINEX82, largement diffusés par le LCPC. Elle a été décrite par B. Pinent et al. (1978).

Les sondes inclinométriques modernes sont généralement équipées de deux accéléromètres disposés à 90°, ce qui permet de mesurer les rotations selon deux directions orthogonales. Les programmes d'interprétation classiques des résultats, tels que ceux cités précédemment, permettent une exploitation indépendante des deux voies de mesures.

Cet article présente une méthode de calcul et un logiciel d'exploitation, « CAPITOUL », qui permettent de faire la combinaison spatiale des deux mesures, l'analyse des domaines de précision et la représentation graphique des résultats.

Au-delà de la simple résolution d'un problème de trigonométrie, ce programme de traitement s'inscrit dans une chaîne complète de qualité de la mesure en offrant :

- un transfert facile des données enregistrées sur le chantier,
- la possibilité d'un traitement immédiat sur le site, soit pour vérifier la qualité des mesures, soit pour donner des informations rapides,
- un traitement standard d'édition rapide des résultats, à l'écran ou sur imprimante,
- un traitement approfondi permettant une bonne analyse des domaines de précision, de la représentativité des résultats, des anomalies et des corrections éventuelles tout en préservant les données initiales,
- un système d'archivage.

La chaîne de mesure inclinométrique des laboratoires des Ponts et Chaussées

Cette chaîne de mesure inclinométrique comprend d'abord une sonde « CLINO RC3 », équipée de deux accéléromètres disposés à 90°, dont la résolution est de 10^{-5} radian. Sa longueur est de 0,5 m entre roulettes et le faible diamètre du corps central permet l'auscultation du tube jusqu'à un rayon de courbure de 3 m. La plage de mesure est de $\pm 14^\circ$ par rapport à la verticale. Les roulettes de guidage sont conçues pour ausculter des tubes de section carrée de 40 mm de côté. Le choix se porte généralement sur des tubes en aluminium, qui sont simplement reliés sur le terrain par des manchons carrés. Le câble standard a une longueur de 32 m, mais une rallonge de même longueur peut être utilisée. La limite d'investigation correspond à la garantie d'étanchéité de la sonde, soit 60 m d'eau.

La valise « CLINOVAT » permet l'acquisition et le stockage des mesures sur le site. L'autonomie et la place mémoire permettent normalement l'acquisition des mesures dans dix tubes de 30 m (une mesure tous les 0,5 m avec retournement).

Un menu conversationnel permet de programmer à l'avance l'auscultation de douze tubes pour faciliter ensuite l'archivage et le travail sur le chantier. Une étude spécifique a été faite par le Centre d'études et de construction de prototypes (CECP) d'Angers pour concevoir un matériel conforme aux normes AFNOR pour les problèmes de vibrations, de chocs, de secousses, de chutes et de variations de température. L'étanchéité est conforme aux consignes de l'IP54. À chaque point de mesure, un test automatique de stabilité de la mesure est effectué avant la validation et l'enregistrement.

À la fin des mesures d'un ou plusieurs tubes, les données enregistrées peuvent être transmises sur un micro-ordinateur, par exemple portable, si l'on souhaite faire une vérification de la qualité des mesures ou une exploitation immédiate des résultats. Un logiciel spécifique permet le transfert et le formatage des fichiers au moyen d'une liaison standard RS 232.

Le logiciel CAPITOUL a été conçu pour traiter directement les fichiers en provenance de la valise CLINOVAT, mais une adaptation simple du format des fichiers de données permet son utilisation avec tout autre matériel.

Principes de l'exploitation des mesures inclinométriques dans l'espace

La procédure d'exploitation des mesures permet de passer d'un système d'axes $V_s\{Z_s, X_s, Y_s\}$ lié à la sonde, donc incliné, à un système de référence fixe, $V_l\{Z_l, X_l, Y_l\}$ où Z_l est la verticale du lieu, et X_l et Y_l deux directions qui peuvent être choisies par l'opérateur. Le programme de calcul a été mis au point dans le cadre d'un travail de fin d'études de l'ENTPE (Jolly, 1986) (fig. 1).

Les matrices de passage du repère V_l au repère V_s sont les suivantes :

A_1 : matrice de passage de V_l à V_1

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}$$

A_2 : matrice de passage de V_1 à V_2

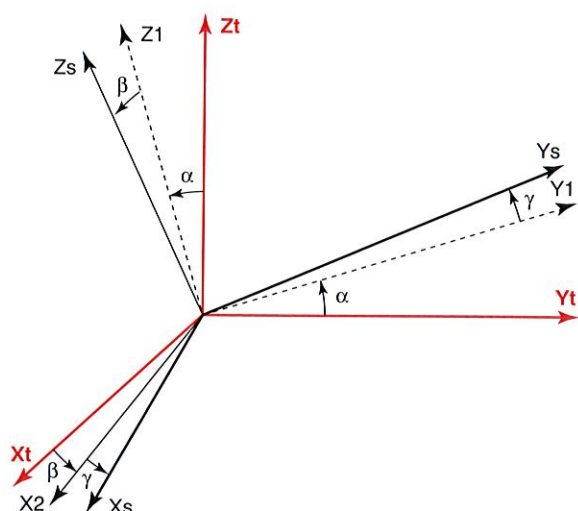
$$A_2 = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}$$

A_3 : matrice de passage de V_2 à V_s

$$A_3 = \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice de passage de V_l à V_s a donc pour expression :

$$A = A_3 \cdot A_2 \cdot A_1$$



$V_t = (X_t, Y_t, Z_t)$: repère terrestre
 $V_1 = (X_t, Y_1, Z_1)$: déduit de V_t par une rotation autour de X_t de l'angle α
 $V_2 = (X_2, Y_1, Z_s)$: déduit de V_1 par une rotation autour de Y_1 de l'angle β
 $V_s = (X_s, Y_s, Z_s)$: déduit de V_2 par une rotation autour de Z_s de l'angle γ repère lié à la sonde

Fig. 1 - Principe des trois rotations pour passer du repère terrestre au repère lié à la sonde.

On en déduit l'expression de la transformée inverse qui permet de passer du repère lié à la sonde V_s au repère fixe V_t .

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\beta\cos\gamma & -\cos\beta\sin\gamma & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma + \cos\alpha\sin\gamma & -\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma + \sin\alpha\sin\gamma & \cos\alpha\sin\beta\sin\gamma + \sin\alpha\cos\gamma & \cos\alpha\cos\beta \end{pmatrix}$$

On note que l'angle γ correspond à la rotation autour de l'axe Z_s lié à la sonde. S'il n'y a pas de vrillage, c'est une valeur constante qui permet de choisir l'orientation du repère de référence, par exemple :

- $\gamma = 0$, si le tube est bien orienté par rapport aux orientations souhaitées pour l'exploitation (par exemple, ligne de plus grande pente pour Y_s),
- $\gamma = \text{autre valeur}$, si l'on souhaite une exploitation par rapport au nord magnétique ou une autre direction.

Le programme permet également d'introduire un tableau de valeurs $\gamma(Z_s)$, correspondant à une mesure éventuelle du vrillage. Les valeurs implicites correspondent à un vrillage nul du tube.

Le traitement des mesures permet de donner la position absolue du tube dans l'espace, par rapport au repère fixe choisi. Par contre, en géotechnique, l'exploitation la plus courante consiste à étudier les variations de position, rotations et déplacements par rapport à la position initiale. Ces variations sont également analysées par rapport à un repère fixe.

Une des fonctions importantes du logiciel est de donner le domaine de précision des mesures. Cette analyse est faite à chaque niveau de calcul, pour les rotations et les déplacements, dans le repère fixe ou en projection sur des plans caractéristiques.

Chronologie des mesures et de leur exploitation

La procédure standard d'une mesure inclinométrique avec la valise CLINOVAT des laboratoires des Ponts et Chaussées comporte la programmation préalable de l'unité de mesure pour le transfert des données en vue d'un traitement avec le programme CAPITOUL.

Ensuite, pour la plupart des matériels actuellement utilisés, conformément à la norme française **NF P 94-156**, les principales phases de la mesure et de l'exploitation des résultats sont les suivantes :

- descente de la sonde en fond de tube pour une première direction de mesure, par exemple amont-aval (dans le sens du mouvement présumé), que l'on appellera direction « zéro » ;
- attente de la stabilisation de l'affichage en fond de tube (souvent liée à des problèmes de température) ;
- remontée de la sonde selon un pas égal à la longueur de la sonde (0,5 m) ;
- dans le cas du matériel CLINOVAT, le logiciel interne effectue, pour chaque niveau de mesures, un calcul de moyenne et d'écart type sur des séries de quarante mesures successives, et la moyenne n'est validée automatiquement que si la valeur de l'écart type est satisfaisante ;
- la sonde ayant deux accéléromètres disposés à 90° , la première direction de mesure correspond à la création de deux fichiers, désignés par V11 (voie 1) et V21 (voie 2), pour la direction « zéro » ;
- les mêmes opérations sont réalisées après une rotation de 180° de la sonde, ce qui permet de créer les fichiers V12 et V22.

En fin de mesures dans un tube donné, quatre fichiers se trouvent donc dans la mémoire de l'unité de mesure. Le transfert des données peut être fait immédiatement sur un PC portable, ou bien de façon différée. Le programme CAPITOUL ne devient fonctionnel qu'après ce transfert. Il peut être adapté à n'importe quel matériel inclinométrique et, en particulier, au traitement de mesures acquises manuellement. Dans le cas d'une sonde inclinométrique à une seule voie, l'artifice du traitement consiste à introduire un fichier de zéros pour la direction orthogonale.

Gestion et classement des données

Le système d'archivage des données assure la gestion des informations avant et après traitement, en respectant les règles suivantes :

- les données brutes de chantier, sans correction, sont archivées et toujours récupérables,
- un tube de mesure est entièrement décrit par une étiquette, qui est rattachée à un dossier, désigné par un numéro et un nom de site ;
- un ensemble de dossiers, qui peut comprendre plusieurs tubes, est regroupé dans une entité plus grande appelée département ;
- les données des mesures successives dans un même tube doivent pouvoir être traitées sur n'importe quel micro-ordinateur, ce qui nécessite un archivage indépendant de l'ordinateur ; notre choix s'est porté sur des disquettes, que l'on peut amener pour un traitement sur le site ou bien utiliser sur différents postes de travail en laboratoire ;
- la représentation des mesures faites à des dates différentes doit pouvoir se faire sans nouveau calcul, par un simple rappel des résultats antérieurs.

Avant tout traitement des données de chantier, il faut donc créer une nouvelle « étiquette » qui sera mémorisée sur une disquette. D'une façon générale, il est recommandé de prévoir une disquette par chantier, la limite étant de cent tubes par chantier. Parmi les paramètres enregistrés, figure un paramètre de repérage des graduations du câble qui sert à mesurer la position de la sonde, pour pouvoir faire des corrections en cas de réparation de ce câble.

Transfert des fichiers sur le micro-ordinateur

La connexion RS 232 entre la valise et le micro-ordinateur permet la récupération des fichiers de chantier, qui sont stockés dans un répertoire spécifique. Le programme CAPITOU assure ensuite la transformation des fichiers de chantier en fichiers de calcul, qui sont stockés automatiquement sur la disquette de travail. Des options permettent d'intégrer automatiquement les caractéristiques de divers matériels de mesure.

Calculs

La disquette contenant les fichiers de données étant en place, on choisit la mesure à exploiter. En cours de calcul, le programme propose un certain nombre d'options correspondant à des corrections :

- corrections de rejets,
- correction de pied sur les angles,
- correction de longueur de tube.

Correction des rejets

La notion de rejet d'une mesure avait été définie lors de la mise au point des logiciels antérieurs. Elle est explicitée dans l'annexe A de la norme **NF P 94-156**. On rappellera que la demi-somme algébrique des mesures à un niveau n donné, avant et après retournement à 180° , désignée par :

$$(\beta_i)_n = \{ \sin(A) + \sin(B) \} / 2,$$

serait nulle, en l'absence de mouvements du tube entre les deux mesures, si le zéro électrique de l'accéléromètre correspondait strictement à la verticale. Le principe du retournement permet de s'affranchir de ce décalage de zéro. La série des $(\beta_i)_n$ permet de définir un domaine d'incertitude à partir du calcul de l'écart type σ_n . Cet écart type n'est significatif qu'après avoir écarté les mesures aberrantes, c'est-à-dire celles dont les valeurs de $(\beta_i)_n$ sont supérieures à deux ou trois écarts types. Cette analyse est normalement faite en laboratoire où l'on dispose d'une imprimante pour analyser les résultats et éventuellement les corriger.

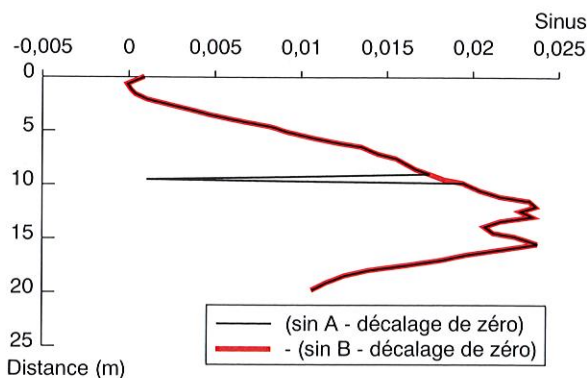
Le programme CAPITOU donne la possibilité de détecter les risques de rejets par une observation rapide de la qualité d'une mesure sur l'écran d'un ordinateur portable. L'opérateur pourra ainsi décider, sur le chantier, de la nécessité de nettoyer un tube et de refaire une mesure si le nombre de rejets est excessif. On rappellera que les rejets sont généralement dus à une dissymétrie de la mesure, à cause d'un défaut de contact d'une des roulettes de la sonde ou d'une altération locale du tube.

La figure 2 donne un exemple de rejet local important dont la correction pourra être faite en laboratoire. On observe dans le tableau I que l'élimination de la valeur anormale diminue sensiblement l'écart type des mesures. Comme les autres mesures sont parfaitement superposées, la reprise des mesures n'est pas justifiée, mais un nettoyage du tube sera nécessaire avant la mesure suivante.

La correction ponctuelle se fera au laboratoire, après édition du tableau de mesure dont un extrait est donné sous la figure 2. La valeur $\sin(A) = 0,0008$ à 9,57 m de distance sera donc remplacée par $\sin(A) = 0,0145$ en sorte que $\{ \sin(A) + \sin(B) \} / 2 = -0,0002$ (moyenne du décalage de zéro sans rejet).

TABLEAU I
Effet du rejet sur la qualité
des résultats de la figure 1

Moyenne du décalage de zéro avec rejet	- 0,0004
Moyenne du décalage de zéro sans rejet	- 0,0002
Écart type avec rejet	- 0,0014
Écart type sans rejet	- 0,0001



Dist (m)	SinA	SinB	(SinA-sinB)/2	(SinA+sinB)/2	Test S1	Rejet
8,07	0,0159	-0,0162	0,0160	-0,0002	0,1	
8,57	0,0163	-0,0168	0,0165	-0,0003	0,1	
9,07	0,0172	-0,0177	0,0175	-0,0002	0,1	
9,57	0,0008	-0,0185	0,0096	-0,0088	3,2	Rejet
10,07	0,0192	-0,0193	0,0193	0,0000	0,1	
10,57	0,0201	-0,0206	0,0204	-0,0003	0	
11,07	0,0215	-0,0219	0,0217	-0,0002	0,1	
11,57	0,0230	-0,0233	0,0231	-0,0001	0,1	

Fig. 2 - Exemple de rejet important à corriger.

Verticalité du tube

En géotechnique, les principales applications de l'inclinométrie n'analysent que les variations de la position des tubes inclinométriques. Cependant, l'étude de la position absolue du tube peut s'avérer intéressante dans les cas suivants :

- contrôle de verticalité d'une fondation profonde, en particulier pour des éléments préfabriqués dont on veut vérifier la position ;
- mise en évidence d'un défaut de pose du tube, dont le rayon de courbure peut être localement trop petit ;
- inclinaison excessive du forage par rapport à la plage de mesure de l'appareillage ($\pm 14^\circ$ pour la sonde des LPC). L'analyse statistique de la verticalité de 126 tubes (fig. 3) a montré que la valeur moyenne est satisfaisante, mais le risque d'utiliser la sonde en limite de plage existe et, par ailleurs, la précision de l'accéléromètre diminue lorsque la mesure s'écarte du zéro.

Analyse des variations de rotation et du déplacement du tube

L'analyse des rotations locales en fonction de la profondeur, par rapport à la position initiale du tube, permet de localiser les niveaux les plus affectés par les déformations. La figure 4 donne un exemple de résultats de mesures et du domaine de précision correspondant (barre d'erreur à chaque niveau de mesure).

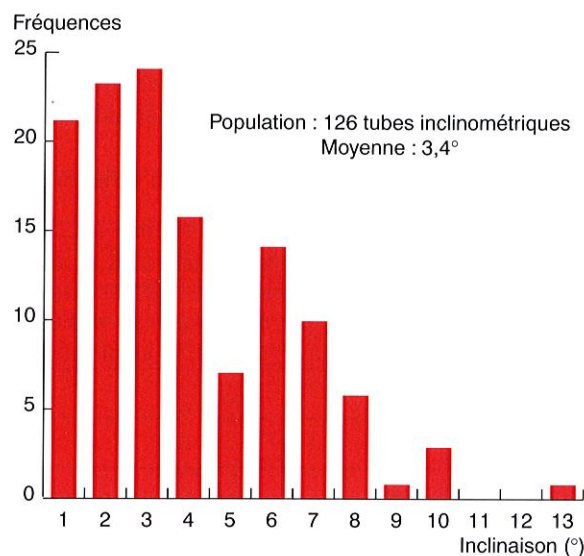


Fig. 3 - Analyse statistique de la verticalité de tubes inclinométriques.

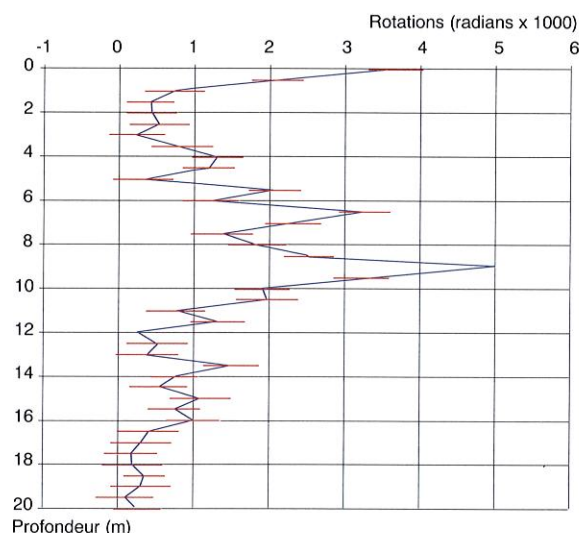


Fig. 4 - Valeurs absolues de la rotation du tube par rapport à la position initiale.

Cette représentation donne une bonne information sur l'amplitude maximale des rotations dans l'espace, mais ne permet pas de visualiser la direction de ces rotations. Le programme permet de représenter sur un même graphique l'azimut et le gisement de ces variations en fonction de la profondeur. Une autre possibilité, plus conforme aux habitudes actuelles d'exploitation, consiste à représenter la projection des rotations locales sur deux plans orthogonaux, par exemple les plans perpendiculaires et parallèles aux courbes de niveaux. La figure 5 donne un exemple de ce type d'exploitation.

La figure 5 montre qu'un phénomène de flambage du tube se superpose au déplacement horizontal, ce qui s'observe assez souvent sur des tubes placés en crête de remblai à cause de l'influence du tassement sur la déformation du tube.

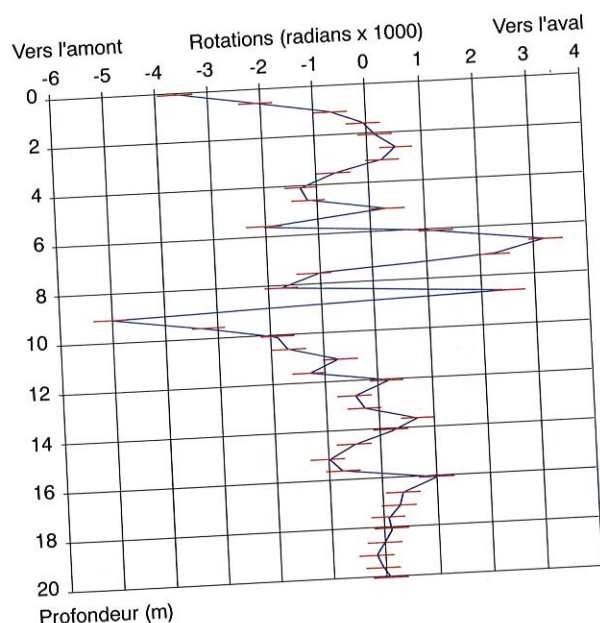


Fig. 5 - Projection des rotations ponctuelles sur le plan amont-aval.

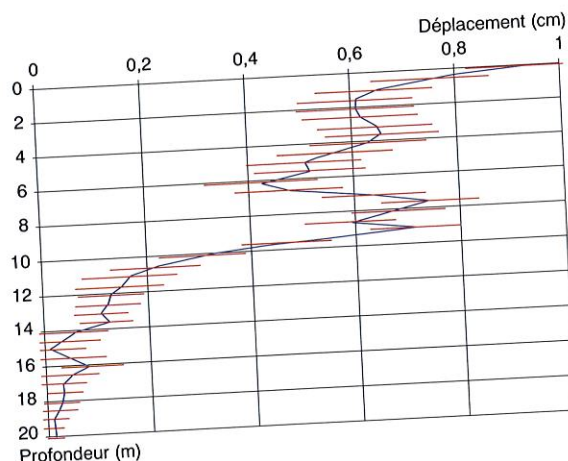


Fig. 6 - Module du vecteur déplacement en fonction de la profondeur.

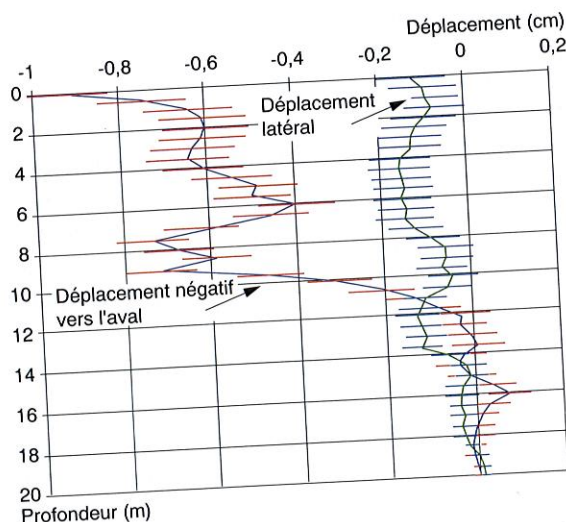


Fig. 7 - Déplacements du tube en projection sur le plan amont-aval et le plan parallèle aux courbes de niveau.

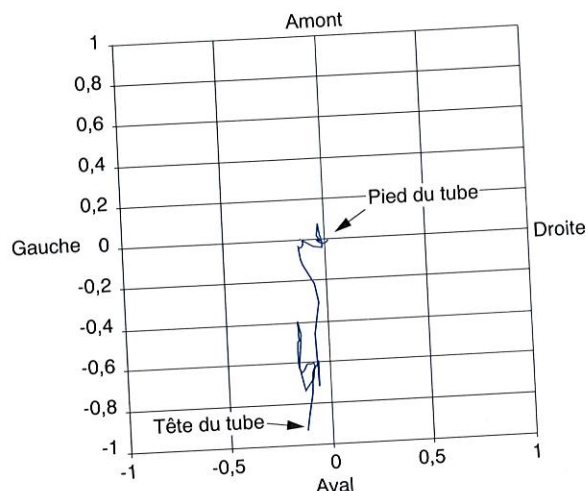


Fig. 8 - Vue de dessus du déplacement du tube.

L'intégration des rotations locales à partir du pied du tube permet de calculer le module du vecteur de déplacement horizontal du tube en fonction de la profondeur (fig. 6) et ses projections sur les plans de référence (fig. 7).

Pour mieux visualiser la direction des mouvements, le programme donne une représentation en vue de dessus des déplacements du tube, le point fixe de référence correspondant au pied du tube (fig. 8).

Correction de pied sur les angles

Les tubes inclinométriques sont normalement ancrés dans un substratum stable, sur une longueur de plusieurs mètres (2 m au minimum, de 3 à 5 m dans beaucoup de cas). Dans cette zone d'ancrage, les résultats des mesures devraient donc rester dans le domaine de précision. L'expérience montre que cette condition n'est pas toujours vérifiée. Lorsque l'opérateur est sûr du niveau d'ancrage et de sa qualité, l'observation d'un décalage systématique peut justifier une correction. Le programme CAPITOU permet d'effectuer cette correction de pied selon le principe utilisé pour les logiciels antérieurs. Cette correction peut être faite pour une des deux voies de mesures ou pour les deux voies.

Connaissant la longueur de la zone d'ancrage en pied de tube, le programme détermine la valeur moyenne des rotations locales dans la zone d'ancrage. Cette moyenne est ensuite retranchée de l'ensemble des mesures, ce qui revient à annuler le déplacement à la limite de la zone supposée stable et à décaler les autres mesures d'une même valeur. Ce faisant, on admet que l'erreur systématique est la même pour l'ensemble du tube. Il n'y a pas, à notre connaissance, d'explication physique satisfaisante de ce décalage des mesures, qui peut souvent disparaître lors de la mesure suivante. Il pourrait s'agir d'un dysfonc-

tionnement des ressorts de rappel des roulettes de guidage, qui créeraient une dissymétrie artificielle et temporaire du dispositif de mesure lors du retournement de la sonde.

Correction de la longueur du tube

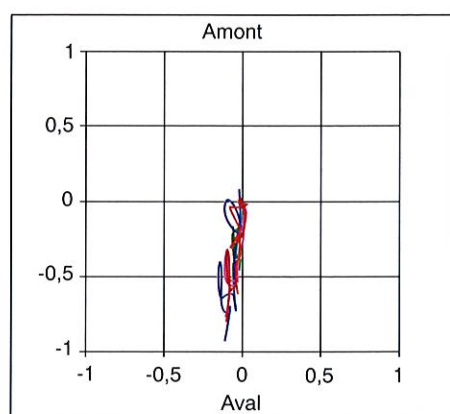
Il peut arriver que le fond d'un tube se bouche sur une certaine longueur ou bien que le cisaillement à un niveau donné ne permette plus d'effectuer les mesures au-delà d'une certaine profondeur. Le programme CAPITOUL permet de

modifier la longueur du tube en sorte que les anciennes mesures, et le zéro en particulier, soient utilisables sans difficultés dans la manipulation des fichiers.

Sauvegarde des données d'origine

Lors du traitement des données du chantier, les fichiers issus de la valise de mesure font l'objet d'une sauvegarde spécifique. Il est donc toujours possible de reprendre un traitement à partir de ces données initiales.

Vue de dessus du tube



Chantier A999 - remblai de la rivière - PK 150.8

Dossier : 11/99-98/027

Mesure de zéro :	19 mars 1996
Mesure 1 :	26 novembre 1996
Mesure 2 :	17 juillet 1997
Mesure 3 :	17 décembre 1997
Mesure 4 :	11 août 1998

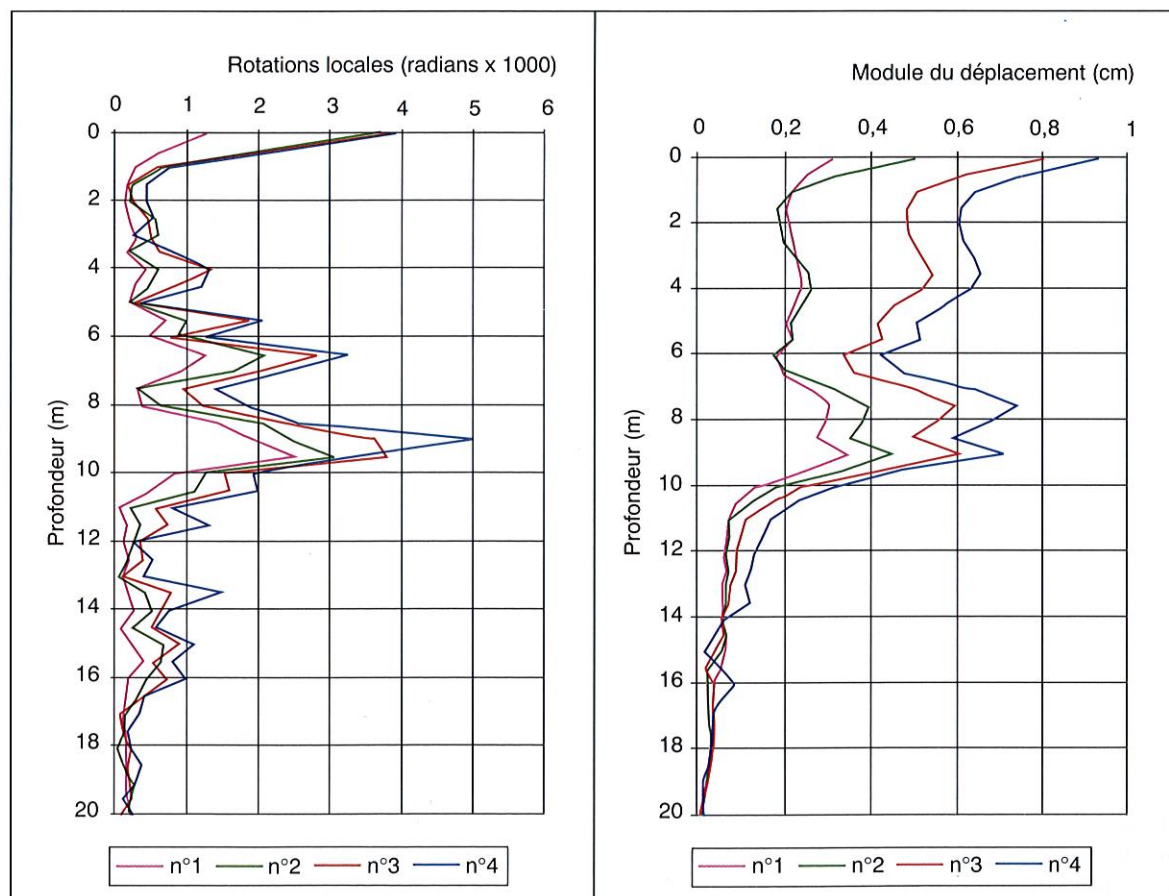
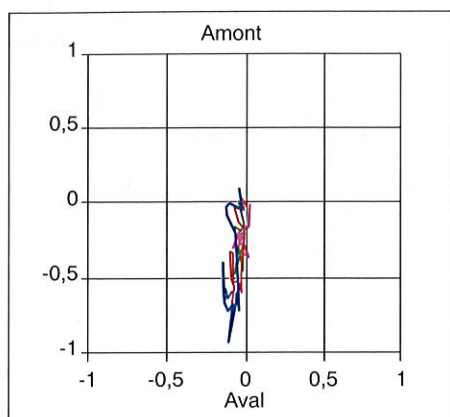


Fig. 9 - Synthèse des mesures de rotation et des modules de déplacement.

Vue de dessus du tube



Chantier A999 - remblai de la rivière - PK 150.8

Dossier : 11/99-98/027

Mesure de zéro :	19 mars 1996
Mesure 1 :	26 novembre 1996
Mesure 2 :	17 juillet 1997
Mesure 3 :	17 décembre 1997
Mesure 4 :	11 août 1998

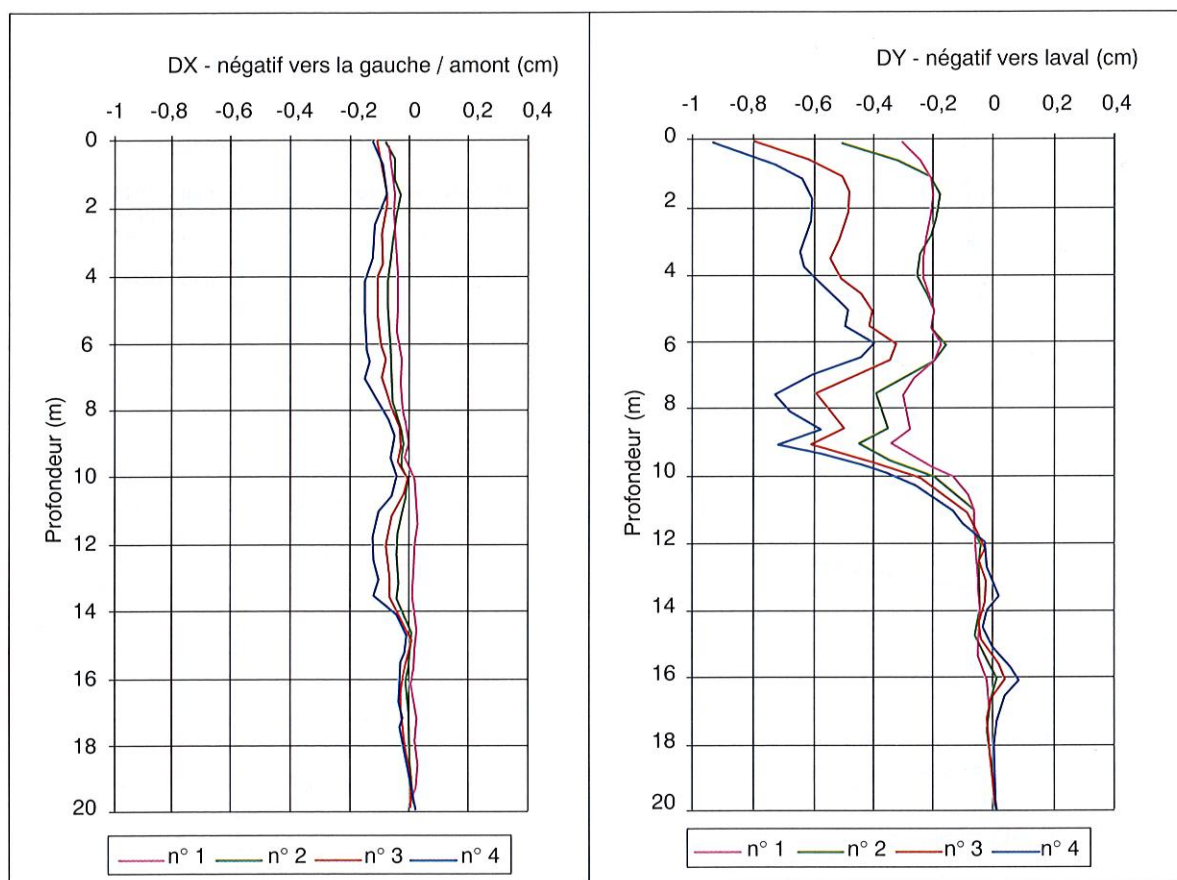


Fig. 10 - Synthèse des mesures de déplacement en projection sur deux plans perpendiculaires.

Nous rappellerons que ces fichiers de chantier sont ensuite traités et formatés de façon spécifique pour permettre le traitement avec le logiciel CAPITOU.

Pour tout traitement ultérieur, il n'est donc plus nécessaire de reprendre les fichiers de chantiers. Si l'opérateur effectue une correction, telle que la suppression d'un rejet, une correction de pied ou de longueur de tube, un message apparaît lors d'un traitement ultérieur, précisant qu'il s'agit d'un fichier corrigé. Dans ce cas, il existe une sauvegarde du fichier

« non corrigé », indépendant du fichier de chantier, que l'on peut récupérer par une commande spécifique du logiciel.

Présentation des résultats dans les rapports

La chronologie et l'analyse des résultats présentées précédemment correspondent au travail de validation d'une mesure. Le programme CAPITOU est donc un outil de vérification de la qualité et de la représentativité d'une mesure.

Certains points n'ont d'ailleurs pas été présentés ici, comme par exemple la vérification de la représentativité de la direction du mouvement, appelé « azimut ». Le principe est le même que pour les mesures fondamentales, à savoir que l'azimut est donné graphiquement, ou dans un tableau de résultats, avec la définition d'un domaine de précision.

Une analyse complète d'une mesure est donc une opération relativement longue et qui n'est pas nécessaire pour toutes les mesures. Pour une exploitation rapide et, en particulier, pour l'édition des résultats graphiques qui seront mis dans le rapport, le programme permet de représenter sur deux feuilles les rotations et modules de déplacement à différentes dates, par rapport à la mesure de zéro (fig. 9), et les projections des déplacements sur deux plans perpendiculaires (fig. 10).

La figure 9 donne les informations suivantes :

- valeurs des rotations locales (valeur non algébrique), en fonction de la profondeur,
- amplitude du module de déplacement en fonction de la profondeur,
- vue de dessus de la déformée du tube.

La figure 10 donne les informations suivantes :

- projections des déplacements DX et DY, respectivement sur les plans parallèles et perpendiculaires aux courbes de niveau,
- un rappel de la vue de dessus du tube.

Les figures 9 et 10 donnent une représentation synthétique des résultats d'un ensemble de mesures. Mais l'analyse de la représentativité et du mécanisme des phénomènes nécessite un minimum d'exploitation plus approfondie, comme par exemple la représentation des domaines de précision pour la dernière acquisition ou l'examen des variations angulaires en projection sur un plan pour mettre en évidence des phénomènes de flambage de tube, qui se superposent aux déplacements et peuvent rendre la mesure inexploitable.

Conclusion

La méthode d'exploitation des mesures décrite dans cet article et le logiciel CAPITOUL sont actuellement utilisés dans plusieurs laboratoires des Ponts et Chaussées. Ce logiciel répond à la norme de la mesure inclinométrique, fournit une interprétation des déplacements du tube dans l'espace qui s'avère utile dans le cas de mouvements complexes, permet l'analyse des erreurs de mesure, donne l'évolution des déplacements relatifs du tube au cours du temps sous une forme graphique directement utilisable dans les rapports et offre un moyen de gestion des données. Il évoluera en fonction des remarques des utilisateurs, notamment pour faciliter le transfert des fichiers et simplifier le dialogue entre l'utilisateur et le logiciel. L'évolution principale prévue à court terme est de pouvoir utiliser CAPITOUL sous l'environnement Windows 95 ce qui permettra, en particulier, l'édition des graphiques sur tout type d'imprimante et pas seulement sur une imprimante « Postscript ».

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BETS N., MIEUSSENS C. (1994), *Exploitation et représentation des mesures inclinométriques*, Notice d'utilisation du programme CAPITOUL, Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Toulouse.
- JOLLY F. (1986), *CAPITOUL l'inclinométrie dans l'espace, étude et programmation*, Mémoire de travail de fin d'études à l'École nationale des Travaux publics de l'État, Lyon.
- PINCENT B., BLONDEAU F. (1978), *Détection et suivi des glissements de terrain*, Comptes rendus, 3e Congrès international de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur, Madrid, Section 1, vol. 1, pp. 252-266.
- PINCENT B., MEIGNEN D. (1982), *Exploitation des mesures inclinométriques*, Programme CLINEX 82, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Document interne.

ABSTRACT

The exploitation of inclinometer measurements in grooved casing using the CAPITOUL software program

N. BETS, Cl. MIEUSSENS

A three-dimensional procedure for analyzing measurements taken in grooved inclinometer casings (used to guide the probe) has been developed and programmed using the CAPITOUL software program. This allows us to reconstruct the spatial movement of the inclinometer casing which facilitates the analysis of the displacement configurations of soils and structures. The analysis method complies with the French standard NF P 94-156 and is able to analyze and correct measurement errors, produce graphic documents that can be used directly and manage a measurement database.