

Les mesures à l'inclinomètre

Gérard BIGOT

Secrétaire de la commission de Normalisation sols : reconnaissance et essais (CNSRE)
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de l'Est parisien
Centre de Melun

Normalisation

Contexte Les mesures inclinométriques sont utilisées dans le domaine de la géotechnique afin de :

- déterminer la position d'un forage ou d'un tubage mis en place dans le terrain,
- connaître le comportement (inclinaison et déplacement) dans le temps d'éléments d'ouvrages (pieux, écrans de soutènement, parois moulées), d'estimer le déplacement de massifs en terre ou de massifs rocheux,
- suivre l'évolution en fonction du temps des mouvements d'une pente instable et de servir d'alarme si besoin.

Cette note a pour objectif de fournir une information sur le contenu de la norme **NF P 94-156 Sols : reconnaissance et essais. Mesures à l'inclinomètre** qui a été publiée par l'AFNOR en tant que norme homologuée en octobre 1995.

Rappel L'usage a consacré l'emploi du mot inclinomètre pour désigner le capteur qui mesure l'inclinaison par rapport à la verticale (c'est-à-dire celle qui serait donnée par le fil à plomb, fig. 1a).

Terminologie celle qui serait donnée par le fil à plomb, fig. 1a).

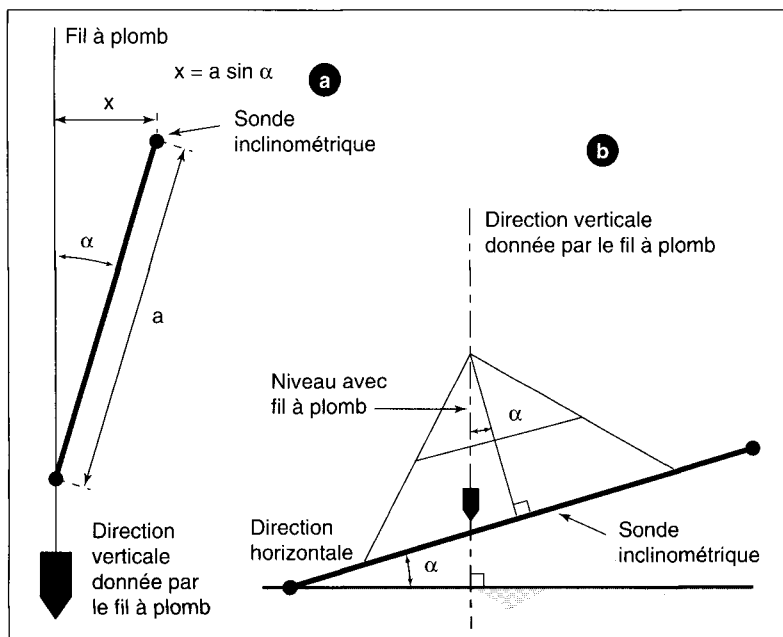


Fig. 1 - Principe de mesure des capteurs. a. Inclinomètre. b. Clinomètre.

Le mot clinomètre est utilisé lorsque le capteur fournit l'inclinaison d'un support par rapport à l'horizontale (le principe de la mesure est alors analogue à celui du niveau, comme schématisé sur la figure 1b, qui donnerait la direction orthogonale à celle indiquée par le fil à plomb).

L'inclinomètre, qui désignait à l'origine le capteur, puis l'appareillage nécessaire à la mesure, est devenu par extension (abus de langage !) le tube mis en place dans le terrain ou solidarisé à une structure dans lequel est introduite une sonde mobile munie d'un capteur inclinométrique, d'où les expressions :

- « poser des inclinomètres » : pour désigner l'action qui consiste à mettre en place les tubes de réservation dans lesquels sera introduite une sonde munie de capteurs inclinométriques destinée à effectuer des mesures,
- « suivre l'évolution d'un phénomène avec un inclinomètre » : pour indiquer que l'observation est faite à partir des auscultations périodiques d'un tube inclinométrique.

Cette remarque sur la terminologie n'a pas pour but de s'opposer à l'usage que fait la profession de ce mot, mais de faciliter le dialogue entre différents intervenants.

Technique Les mesures inclinométriques sont issues soit d'un capteur placé à poste fixe, soit d'une auscultation d'un tube sensiblement vertical dans lequel circule une sonde munie de capteurs inclinométriques.

Lorsque la mesure est faite au moyen d'une sonde mobile, la position de la sonde dans le tube est définie par trois paramètres.

- ❶ La distance par rapport au sommet du tube, mesurée par un instrument indépendant de la sonde elle-même.
- ❷ L'orientation θ dans un plan horizontal, déterminée en général par référence au nord magnétique (fig. 2).
- ❸ L'inclinaison α par rapport à la verticale du lieu, connue grâce à un capteur inclinométrique.

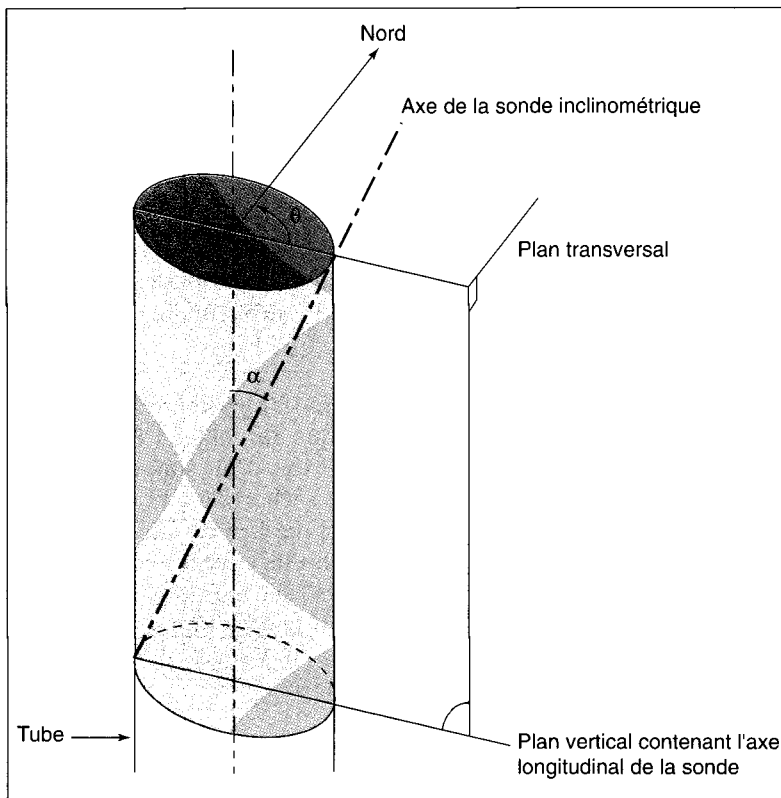


Fig. 2 - Sonde inclinométrique à deux degrés de liberté.

Deux types d'appareillage associant la sonde et le tube d'auscultation ont été développés.

❶ Le premier appareillage comprend :

- un tube lisse à section transversale circulaire ;
- une sonde à deux degrés de liberté (c'est-à-dire mesure de α et θ) ;
- un dispositif de mesure de la distance de la sonde au sommet du tube.

❷ Le second appareillage est constitué :

- d'un tube d'auscultation, qui impose l'orientation du plan vertical (θ) dans lequel va se déplacer la sonde ;
- d'une sonde à un seul degré de liberté donnant l'inclinaison α par rapport à la verticale ;
- d'un dispositif de mesure de la distance de la sonde au sommet du tube.

Dans ce dernier cas, la sonde est plus simple, mais elle doit être introduite dans des tubes ne présentant aucun vrillage. Les tubes sont soit à section transversale carrée (les deux directions de mesure possible sont seulement les plans verticaux définis par les diagonales du carré), soit à section transversale circulaire avec des rainures diamétralement opposées pour matérialiser la direction du plan vertical de mesure.

La sonde peut être soit maintenue à une profondeur donnée dans le tube, soit déplacée sur toute la longueur du tube en imposant un espacement des mesures égal à la distance entre les deux points de la sonde en contact avec le tube.

Quel que soit l'appareillage utilisé, la mesure n'est faite que lorsque la sonde est immobilisée dans le tube à la profondeur choisie. Elle correspond donc à une information à un instant précis.

La circulation d'une sonde de longueur fixée avec un pas de mesure égal à celui de la sonde permet de mesurer l'inclinaison de la sonde par rapport à la verticale à chaque pas. En calculant, à chaque pas de mesure, l'écart que fait l'extrémité supérieure de la sonde par rapport à la verticale passant par l'extrémité inférieure et en cumulant les déplacements élémentaires, on détermine, à un instant donné, la position du tube par rapport à la verticale issue du pied du tube (fig. 3).

En renouvelant le passage de la sonde dans le tube, à intervalles de temps fixés, on peut en déduire par calcul :

- les variations d'inclinaison, entre deux auscultations, à un niveau donné ;
- les déplacements du tube à chaque niveau entre deux auscultations.

Notons que si l'une des extrémités du tube n'est pas fixe dans le temps, la détermination du déplacement absolu de tous les points du tube nécessite la mesure du déplacement absolu d'une de ses extrémités.

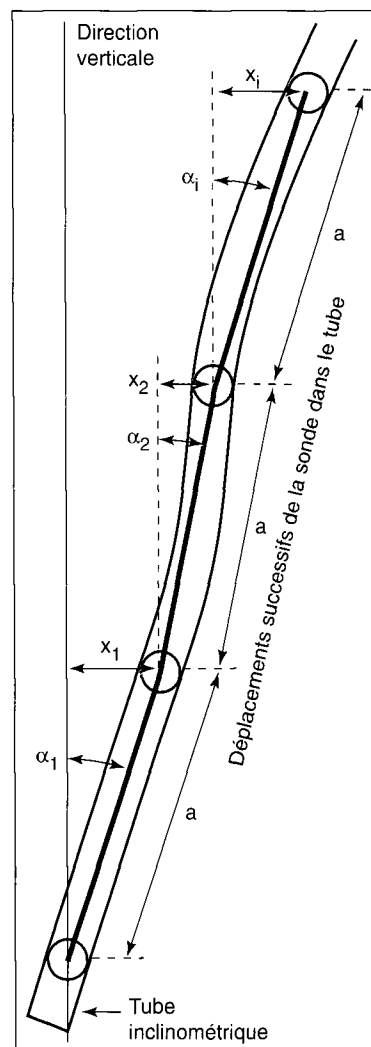


Fig. 3 - Détermination de la position du tube inclinométrique.

Mesures inclinométriques selon la norme NF P 94-156

Cette norme ne traite que des mesures au moyen d'une sonde à un seul degré de liberté, munie d'un capteur donnant l'inclinaison par rapport à la verticale et se déplaçant dans un tube à section transversale carrée ou circulaire comportant des rainures. Le tube d'auscultation est, selon le cas, fixé à la structure ou placé au préalable dans le massif à ausculter.

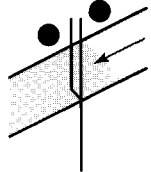
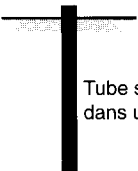
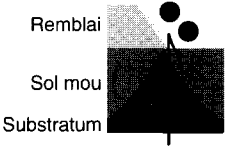
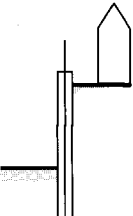
Le tableau I présente les principaux points traités dans la norme, qui contient également, dans une annexe informative, une manière d'exploiter les mesures en fonction de l'objectif défini, c'est-à-dire du phénomène à détecter.

Il est à noter également que, dans cette annexe, est donnée une méthode d'évaluation et de prise en compte de l'incertitude des mesures.

En effet, les causes d'erreur sont multiples ; elles sont liées :

- au mode de solidarisation du tube au massif ou à la structure à ausculter :
 - mouvement du tube dû à un mauvais scellement dans le terrain ou à une fixation à la structure mal adaptée,
 - inclinaison initiale du tube trop grande ;
- à la géométrie du tube :
 - altération du tube au cours du temps, modifiant sa géométrie ou créant des aspérités au point de contact de la sonde avec le tube,
 - défauts géométriques de l'intérieur du tube de mesure,

TABLEAU I
Les mesures inclinométriques de la norme NF P 94-156

But des mesures	<ul style="list-style-type: none"> — Position du tube de mesure par rapport à la verticale du lieu — Localisation d'un déplacement relatif entre deux blocs ou massifs — Déplacements d'un massif ou d'une structure dans le temps 		
Procédure générale	<ul style="list-style-type: none"> — Placer dans le massif à ausculter ou sur une structure un tube de réservation — Introduire dans le tube de réservation une sonde inclinométrique — Mesurer, à une distance connue du sommet du tube, l'angle que fait l'élément du tube guide de la sonde avec la verticale — Déplacer la sonde dans le tube guide avec un pas constant égal à la longueur de la sonde 		
Préparation	<ul style="list-style-type: none"> — Installer le tube de forme adaptée à la sonde utilisée, soit par fixation sur la structure, soit par scellement dans un forage au moyen d'un coulis — Passer un gabarit avant introduction de la sonde <p>Précautions à prendre :</p> <ul style="list-style-type: none"> — Vérifier l'absence de vrillage du tube lors de la pose — Mettre en place le tube sensiblement verticalement — Repérer la tête du tube — Protéger la tête du tube 		
Mesures	<ul style="list-style-type: none"> • En partant de la base du tube, mesurer, à chaque pas : <ul style="list-style-type: none"> — la distance de la sonde au bord supérieur du tube — l'inclinaison de la sonde • Pour chaque direction, faire les mesures, pas à pas, dans un sens puis dans l'autre sens en positionnant la sonde à la même distance du sommet du tube • Éventuellement, déterminer les coordonnées de la tête de tube par rapport à un repère fixe <p><i>NB : Les mesures ne sont exploitables que si elles sont effectuées avec la même sonde</i></p>		
Exploitation des mesures selon l'objectif (exemples)	Recherche de la surface de glissement dans le massif		Comparaison des variations des inclinaisons de la sonde à chaque niveau en fonction du temps
	Position d'un forage par rapport à la verticale passant par le sommet du tube scellé	 <p align="center">Tube scellé dans un forage</p>	Intégration de la courbe des inclinaisons
	Déplacement d'un massif de sol		<ul style="list-style-type: none"> — Intégration des inclinaisons de la sonde — Calcul du déplacement dans le temps
	Déplacement d'une structure		<ul style="list-style-type: none"> — Intégration des inclinaisons de la sonde — Calcul du déplacement

- dépôts sur la paroi intérieure du tube dus à une mauvaise étanchéité au raccord par manchonnage entre deux éléments de tube,
- positionnement des points de contact de la sonde avec le tube au droit d'un joint entre deux éléments de tubes ;

- à la mesure :

- positionnement à des niveaux différents de la sonde lors des passages successifs,
- dysfonctionnement de la chaîne de mesure et des capteurs inclinométriques ;

- mouvements importants du massif ou de la structure sur lequel est fixé le tube :

- courbure du tube,
- déformation du tube par flambage du fait du tassement d'une partie du massif.

Parmi ces erreurs, certaines sont aléatoires, d'autres systématiques.

◆ **Les erreurs systématiques** peuvent être diminuées :

- en effectuant, pour une profondeur donnée et une direction choisie, une mesure dans chaque sens (ce qui revient à faire une première auscultation sur toute la longueur du tube, puis une seconde après avoir fait faire à la sonde un demi-tour par rapport à son axe longitudinal) ;
- en procédant toujours avec la même sonde ;
- en vérifiant le réglage de la chaîne de mesure avant utilisation ;
- en étalonnant périodiquement la sonde afin de déterminer les corrections éventuelles à appliquer.

◆ **Les erreurs aléatoires** peuvent être estimées en répétant les mesures.

➤ mais la répétition des mesures a une incidence économique importante sur l'opération. De plus, elle suppose que le phénomène n'évolue pas pendant la répétition des mesures.

➤ Aussi, il est préférable, dans le cas où le tube possède une partie fixe, c'est-à-dire une partie qui conserve la même inclinaison pendant toute la durée du phénomène à observer, de remplacer l'analyse statistique d'une répétition de la mesure par une exploitation des mesures de la partie fixe du tube. L'annexe A de la norme fournit, à titre informatif, une méthode utilisable dans ce cas.

En conclusion, il nous faut constater qu'à l'heure actuelle, du fait de la grande sensibilité des capteurs électroniques, la qualité de la mesure dépend beaucoup plus :

- du soin apporté à la pose du tube (le plus verticalement possible, à l'absence de tout vrillage) et au scellement du tube,
- de l'état de la surface intérieure du tube,
- de la fidélité du positionnement de la sonde, à la même distance par rapport au sommet du tube lors des mesures successives,
- de l'absence de déplacements verticaux du massif dans lequel est scellé le tube, tassements qui peuvent conduire au flambage du tube, que du capteur lui-même.

Avant de décider de la pose d'un tube inclinométrique, il faut également se souvenir que, pour détecter des mouvements lents, il est nécessaire de procéder à des observations sur de longues périodes (des mois, voire des années). Pour en donner une illustration, signalons qu'une incertitude de $4 \cdot 10^{-4}$ radian (soit 4 min d'arc) sur la mesure de l'inclinaison de la sonde se traduirait par une erreur de 1 cm sur l'estimation du déplacement de l'extrémité d'un tube de 25 m de longueur. Pratiquement, cela reviendrait, pour cet exemple, à ne pouvoir conclure sur le mouvement d'un massif qui se déplacerait à une vitesse de 1 cm par an, qu'après une observation de plus d'un an.