



HAL
open science

Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique - Prototype final et tests en milieu contrôlé

Jean-Pierre Rajot, Yannick Fargier, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel,
Christophe Pruvost

► To cite this version:

Jean-Pierre Rajot, Yannick Fargier, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel, Christophe Pruvost. Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique - Prototype final et tests en milieu contrôlé. Université Gustave Eiffel. 2022, pp.42. hal-04434581

HAL Id: hal-04434581

<https://hal.science/hal-04434581>

Submitted on 2 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Convention DGPR-Université Gustave Eiffel 2021 n°2201285435 du 30 mars 2021

Action 11

Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique

—

Prototype final et tests en milieu contrôlé

Date : 30 Juin 2022

Auteurs : J.P. Rajot¹, Y. Fargier¹, P. Joffrin¹, N. Vermorel¹, C. Pruvost¹

¹ Université Gustave Eiffel,
Département Géotechnique Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS),
Laboratoire Risques Rocheux et Ouvrages Géotechniques (RRO)

Nomenclature d'activité ... : RP3-J21052

Confidentialité..... : Diffusion libre

Destinataires :

Organisme	Service et personne	Exemplaires
Ministère de la transition écologique (MTECT – MTE)	DGPR/SRNI/SDCAP/BRNT : - M. Rodolphe Van Vlaenderen - Mme Margaret Herbaux	Version électronique
Université Gustave Eiffel	Mme Céline Bourdeau-Lombardi	Version électronique

Suivi des versions :

Version	Date	Modification	Préparé par	Contrôlé par
0	26/07/2022	Version initiale	J.P. Rajot	P. Joffrin, & Y. Fargier

RESUME

Sur la base des enseignements de l'étude de faisabilité menée en 2021, la conception du dispositif d'observation des déplacements dans les sols et les roches le long d'une ligne a été finalisée. Pour éviter une rupture technologique trop importante, ce dispositif est constitué d'un profilé support en PEHD extrudé comportant quatre ailettes radiales, à 90° les unes des autres, qui coulissent dans les quatre gorges internes des tubes inclinométriques usuels. Une fibre optique est collée à l'axe neutre du profilé et quatre fibres périphériques parallèles à l'axe neutre, une par ailette, sont collées à une distance de 10 mm de l'axe neutre.

Des essais de flexion plane quatre points ont été réalisés en laboratoire sur un tube inclinométrique long de 15 m parcouru par le profilé support équipé des fibres optiques. Des courbures croissantes relativement faibles (rayon de courbure compris entre 5 et 26 m) ont été appliquées au tube lors des essais. Pour chaque courbure, les déformées du tube ont été directement observées et les déformations dans les fibres optiques mesurées dans des sections droites espacées de 2.6 mm. Ces essais ont montré les points suivants :

- La direction des ailettes du dispositif par rapport à la direction du déplacement imposé est sans influence sur la déformée calculée en 3D par analyse inverse à partir des déformations mesurées par fibres optiques le long de la structure support.
- Les déformations mesurées apparaissent relativement « bruitées » entre sections successives distantes de 2.6 mm, tout comme par conséquent, la courbure déduite des mesures de déformations par analyse inverse.
- Par contre les déformées obtenues par analyse inverse des déformations coïncident très bien avec les déformées observées directement pendant les essais, une courbure excessive dans une section étant compensée par une courbure sous-estimée dans la suivante.

À l'automne 2022, en vue d'une évaluation *in situ*, le nouveau dispositif d'observation des déplacements dans les sols par fibre optique sera avec le Cerema mis en place dans un tube inclinométrique scellé en forage dans le grand glissement de terrain de Charlaix affectant la RN 85 près de La Mûre (38).

MOTS-CLES

Mouvements de terrain ; Fibre optique ; Plan de courbure ; Plan neutre ; Courbes dans l'espace ; Théorie de Frenet-Serret ; Tests en vraie grandeur ; Flexion plane quatre points.

Table des matières

1	Introduction	7
2	Enseignements tirés de l'étude de faisabilité	8
3	Conception du prototype opérationnel	11
3.1	Analyse de conception	11
3.2	Présentation et spécifications du prototype final.....	12
3.3	Considérations pour la mise en œuvre ultérieure sur le terrain	15
4	Évaluation des déplacements le long de la ligne du capteur.....	17
4.1	Centre et moments d'inertie de la section de la structure support	17
4.2	Relation entre déformée et déformations dans une section droite	19
4.3	Reconstruction de la trajectoire de l'axe neutre	22
5	Performance du nouveau dispositif	25
5.1	Introduction.....	25
5.2	Flexion plane en conditions contrôlées.....	26
5.2.1	Conditions d'essai et déformée théorique du tube instrumenté.....	26
5.2.2	Approche pour l'évaluation de la performance du dispositif	30
5.2.3	Programme d'essais et mesures.....	31
5.2.4	Déformations observées dans les fibres optiques pendant les essais	32
5.2.5	Dépouillement et interprétation.....	36
5.3	Conclusion	38
6	Conclusion et perspectives.....	40
	Annexe A : Références bibliographiques	42

1 Introduction

L'identification de la pathologie des mouvements de terrains, ou la surveillance d'ouvrages relevant de la sécurité publique (digues, barrages, réservoirs...), repose notamment sur l'observation de la cinématique à l'intérieur de massifs de sol ou de roche. Deux techniques sont couramment employées pour observer les mouvements à l'intérieur d'un massif de sol ou de roche : les inclinomètres¹ et les extensomètres².

Avec le soutien de la DGPR, un projet a été engagé par l'Université Eiffel visant à développer un nouveau dispositif pour observer en trois dimensions les mouvements à l'intérieur d'un massif reposant sur la mesure de déformations par fibres optiques. Ce dispositif pourra être installé dans toute direction. À terme, une telle instrumentation permettra de faire progresser les connaissances sur l'influence de la cinématique dans la stabilité des glissements de terrains et de développer de nouveaux systèmes de suivi.

Dans le cadre de la convention DGPR – Université Eiffel de 2020, une première étude a démontré la faisabilité du développement d'un tel dispositif (Rajot et al. (2021)). Le tout premier prototype développé pour cette étude, une structure linéique de quelques mètres composée de cornières en PVC supportant les fibres optiques, a permis :

- (a) D'établir les bases scientifiques et techniques du dispositif,
- (b) De réaliser quelques mesures pour tester l'algorithme d'inversion calculant la déformée du dispositif à partir des déformations observées le long des fibres optiques et
- (c) D'identifier les limitations en vue de concevoir un dispositif opérationnel et performant.

Ce rapport présente la conception finale du dispositif opérationnel retenu. Les tests réalisés en vraie grandeur, mais en conditions contrôlées au laboratoire, sont également exposés. Ces tests visent à quantifier la performance et la précision du dispositif de mesure et de l'algorithme d'inversion et d'intégration. La dernière étape sera la mise en œuvre sur le terrain.

La suite de ce rapport est organisée en cinq Chapitres. Le Chapitre 2 tout d'abord résume les enseignements tirés de l'étude de faisabilité réalisée en 2021 (Rajot et al. (2021)). Le Chapitre 3 ensuite décrit les étapes de conception du dispositif définitif et donne les spécifications techniques. Le Chapitre 4 rappelle les bases scientifiques nécessaires au développement de l'analyse inverse de reconstruction de la trajectoire à partir des déformations mesurées par fibres optiques en différents points des sections droites le long de la structure support. Le Chapitre 5 présente les essais réalisés en vraie grandeur au laboratoire, pour comparer les déformées directement observées aux déformées déduites par analyse inverse des mesures de déformations. Le Chapitre 6 résume les conclusions de cette étude et identifie, outre les tests in situ à venir, deux perspectives d'applications.

¹ Les inclinomètres sont basés sur la mesure par pendule inverse de la variation d'inclinaison le long d'un tube scellé dans un forage vertical. Par intégration, ils permettent d'observer les déplacements perpendiculaires à l'axe du forage. Pour passer la sonde inclinométrique rectiligne longue de 50 cm à l'intérieur du tube, le rayon de courbure du tube doit être supérieur à environ 1 m. En conséquence, en cas de cisaillement localisé excessif, un nouveau forage équipé d'un tube inclinométrique doit être réalisé pour poursuivre les mesures.

² Les extensomètres sont basés sur la mesure du déplacement de points d'ancrage scellés localement à différentes distances dans un forage et reliés à la tête de forage par des tiges coulissantes. Le forage peut être orienté dans toute direction, mais l'installation des extensomètres est alors délicate. Le nombre de points d'ancrage est limité par le diamètre du forage. En cas de glissement de terrain, comme les inclinomètres, les extensomètres sont soumis à un cisaillement qui perturbe l'analyse des déplacements mesurés le long du forage.

2 Enseignements tirés de l'étude de faisabilité

L'objectif est de développer un dispositif linéique, à installer dans un forage géotechnique de direction quelconque, pour caractériser précisément les déplacements en trois dimensions ultérieurs du sol ou de la roche le long de la ligne du dispositif.

Un tel dispositif peut être constitué d'une structure support linéique sur laquelle sont collées des fibres optiques, constituant des capteurs répartis de mesure de la déformation³. En assimilant la structure support comme une poutre-barre et en supposant l'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli vérifiée (voir la Section 0 relative à la conception), au minimum quatre fibres optiques sont nécessaires pour caractériser les déformations dans une section de la structure sollicitée en traction-compression, cisaillement-flexion et torsion, permettant alors par intégration de calculer sa déformée tridimensionnelle.

La Figure 2.1 montre le schéma de principe de la section du dispositif développé dans le cadre de l'étude de faisabilité par Rajot et al. (2021). Dans une section transversale à l'axe du dispositif d'observation linéique, trois fibres périphériques (a, b et c dans la figure) sont positionnées à une même distance de la fibre centrale de la structure support ($r_a = r_b = r_c$), chacune selon un rayon orienté à 120° des deux autres ($\theta_a = \theta_b = \theta_c = 120^\circ$).

Une fibre centrale complète le dispositif, permettant de mesurer l'allongement de la structure support résultant d'efforts de traction-compression et d'identifier la part de la déformation mesurée dans les fibres a, b et c résultant d'une éventuelle torsion de la structure.

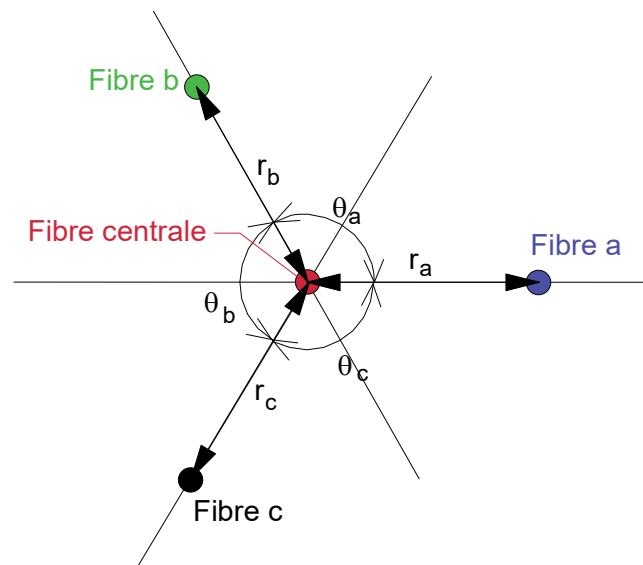


Figure 2.1. Localisation des fibres optiques dans un schéma de principe de la section du dispositif linéique développé dans le cadre de l'étude de faisabilité

Pour déterminer les orientations locales du plan neutre et du plan de courbure de la structure support à partir des déformations locales des fibres a, b et c, il apparaît que la précision de l'analyse augmente avec la distance à l'axe neutre des fibres périphériques. Le diamètre des

³ Il est possible d'employer une unique fibre optique, comportant plusieurs cœurs conduisant la lumière, mais la précision de la déformée à partir des déformations des différents cœurs repose sur la maîtrise de la distance des cœurs à l'axe neutre de la fibre dans le processus de fabrication. Les travaux de recherche sur ce sujet sont très récents et nécessitent des développements technologiques (thèse en cours (2022) à l'Université Eiffel, Département Composants et Systèmes (COSYS)).

tubes inclinométriques usuels installés en forage étant voisin de 60 mm, il avait semblé pertinent lors de l'étude de faisabilité d'installer les fibres optiques périphériques à une distance maximale raisonnable, de l'ordre de 30 mm.

Pour fabriquer le prototype de l'étude de faisabilité, des cornières en PVC de 28 mm avaient été déformées à chaud puis collées entre elles. La Figure 2.2 montre un tronçon de la structure support et la Figure 2.3 la position des fibres optiques, de couleur bleue, en extrémité des trois ailettes de la structure lors d'un essai de flexion au laboratoire. La distance à l'axe neutre des fibres optiques périphériques était donc égale à 28 mm ($r_a = r_b = r_c = 28 \text{ mm}$).

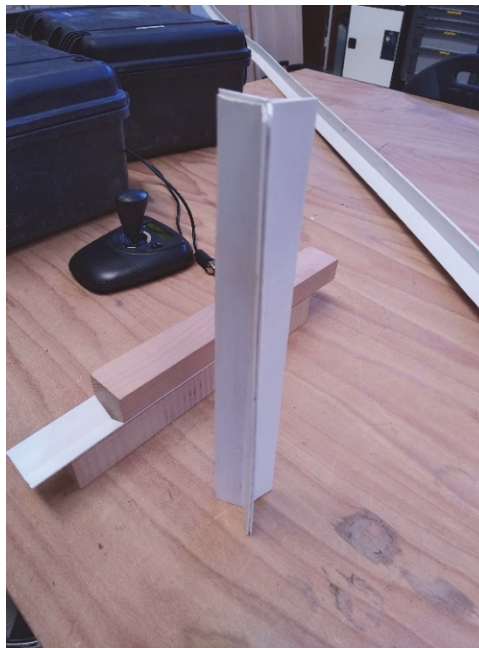


Figure 2.2. Assemblage de validation de la structure support du prototype de faisabilité

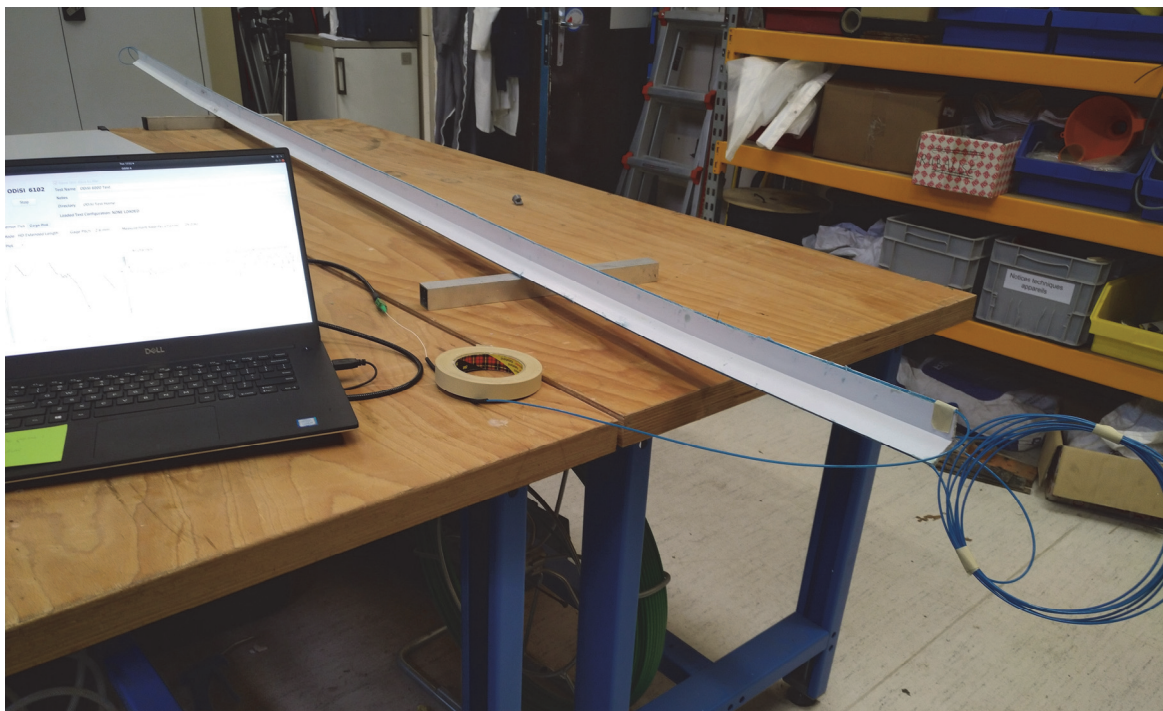


Figure 2.3. Fibres installées sur le prototype de faisabilité et connectées à l'interrogateur optique (derrière l'écran de l'ordinateur portable servant à l'enregistrement des mesures)

La mise en œuvre du prototype de faisabilité et l'analyse inverse des déformations mesurées le long des fibres optiques lors des tests a conduit aux conclusions suivantes :

(1) La précision du dispositif dépasse largement les attentes

En effet, la précision des mesures de déformation par fibre optique étant très élevée, de l'ordre du micro *strain* ($1 \mu\epsilon$), les mesures de déformations à une distance de 28 mm de l'axe neutre permettent de calculer les angles définissant la courbure et la direction de courbure avec une précision dépassant toute attente.

Par ailleurs, le long d'une fibre optique, les déformations étant mesurées sur des tronçons contigus de fibre longs de 0.6 mm, la déformée reconstituée par intégration depuis une extrémité de la structure ne présentait pas de différence significative par rapport aux mesures directes des flèches (précision millimétrique sur la mesure directe de la flèche pendant les essais).

(2) Le rayon de courbure minimal admissible par le dispositif est trop élevé

La fibre optique en elle-même tolère sans dommage des rayons de courbure relativement faibles, jusqu'à 5 cm. La limitation de la courbure du dispositif en fait provient de la déformation maximale admissible par le cœur de la fibre, de l'ordre de 1 % pour les cœurs en silice (verre). En effet, lors d'une flexion du dispositif, la déformation des fibres en périphérie est proportionnelle à la distance à l'axe neutre, i.e. la largeur des ailettes dans ce premier prototype. Pour des ailettes larges de 28 mm, une déformation de la fibre de 1 % est atteinte pour un rayon de courbure de l'ordre de 2.5 m, ce qui n'est pas satisfaisant pour l'application visée.

(3) Mise en œuvre sur site dans un forage

Pour répondre aux besoins des géotechniciens, la longueur des forages d'observation des déplacements dans les sols est couramment de plusieurs dizaines de mètres. Or le dispositif développé dans l'étude de faisabilité, trop rigide avec rupture fragile et de longueur limitée à la longueur des cornières PVC du commerce, n'est pas adapté au transport sur site et installation en forage géotechnique. Entre outre, les fibres optiques doivent être collées sur la structure support dans des conditions atmosphériques contrôlées et avec précision, donc de préférence au laboratoire.

Par ailleurs, à l'installation du dispositif dans un forage, la localisation initiale des fibres sur leur support doit pouvoir être déterminée.

Ces enseignements sont à l'origine des réflexions présentées dans la suite pour développer un prototype final, en vue d'un déploiement opérationnel. La conception de ce nouveau dispositif est présentée en Section suivante.

3 Conception du prototype opérationnel

3.1 Analyse de conception

Les enseignements tirés de l'étude de faisabilité ont conduit à modifier la conception du dispositif pour répondre aux trois objectifs suivants : (1) Réduire le rayon de courbure minimal admissible, (2) Pouvoir transporter le dispositif équipé de ses fibres optiques et (3) Faire le lien avec la pratique actuelle pour faciliter le transfert à la profession.

Premièrement, pour diminuer le rayon de courbure admissible du dispositif sans produire des déformations irréversibles dans les cœurs des fibres optiques, étant donné la très grande précision obtenue avec le premier dispositif lors de l'étude de faisabilité, il a été décidé de diminuer la distance à l'axe neutre des fibres optiques périphériques de 28 mm à 10 mm. Pour une déformation maximale admissible par le cœur de la fibre de l'ordre de 1 % (cœur en silice) et une distance à l'axe neutre de la structure support des fibres optiques de 10 mm, le rayon de courbure admissible du dispositif se trouve réduit à 90 cm.

Cette valeur minimale de rayon de courbure du dispositif est du même ordre que celle atteignable avec les sondes inclinométriques usuelles, contrainte par la distance de 50 cm entre les roulettes d'appui et de guidage dans le tube inclinométrique (et par les diamètres du tube inclinométrique et de la sonde). Toutefois, il est probable qu'en réalité des rayons de courbure plus faibles puissent être observés sans endommager le dispositif, la déformation maximale admissible des fibres optiques incluant un facteur de sécurité (non précisé).

Une autre solution envisagée, consistant à employer des fibres optiques à base de polymères, supportant des déformations très supérieures aux fibres à cœurs de silice, a été écartée en raison de la faible maturité et de la durabilité encore incertaines de cette technologie.

Remarque structurale importante

Pour relier les déformations observées le long de quatre fibres à la déformée de l'élément de structure linéique, l'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli doit être vérifiée : « lors de la déformation, les sections planes perpendiculaires à la fibre moyenne restent planes et perpendiculaires à la fibre moyenne. » Cette hypothèse est valide pour les poutres en petites déformations, ce qui en pratique est considéré être le cas lorsque le rayon de courbure en flexion est supérieur à dix fois la hauteur de la section. Par conséquent, une hauteur de section de 60 mm permet d'observer des déformées dont le rayon de courbure est supérieur à 60 cm, tout en restant dans le cadre de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli.

Avec une hauteur de section support de l'ordre de 60 mm, le dispositif développé (avec un rayon de courbure minimal de 90 cm imposé par l'allongement admissible des fibres optiques) reste donc bien dans le cadre de la théorie mécanique permettant de relier les déformations de trois fibres périphériques à la déformée de la structure support. Pour des rayons de courbure inférieurs à 60 cm, davantage d'information serait nécessaire pour tenir compte par exemple des déformations de cisaillement dans la section d'une structure support de hauteur 60 mm.

Deuxièmement, pour pouvoir transporter le dispositif équipé de fibres optiques, de longueur égale à la longueur du forage à instrumenter, la meilleure solution est de l'enrouler sur un tambour. Une autre solution, consistant à assembler sur site des éléments rectilignes successifs, a été abandonnée en raison, soit des risques d'endommagement des fibres aux jonctions entre éléments, soit de faible durabilité dans le terrain de connecteurs à installer.

Pour enrouler le dispositif sur un tambour sans risquer d'endommager les fibres situées sur les ailettes perpendiculaires à l'axe du tambour, ni produire de déformations plastiques dans la structure support par flambement des ailettes, la structure support doit permettre le pliage

des ailettes, dans un plan ortho-radial à l'axe du tambour, et leur redéploiement à l'installation en forage sur site après transport.

Enfin, **troisièmement**, pour faciliter le transfert aux entreprises de la nouvelle technologie, le saut technologique doit être compréhensible et acceptable par la profession. Les évolutions en termes de mise en œuvre doivent donc être limitées et facilement assimilables. Lors d'un point sur ce développement en cours avec les agents du Cerema Centre Est à Lyon en charge du suivi de grands glissements de terrain, avec lesquels nous nous associerons dans la phase ultérieure de validation finale sur le terrain, la question a été posée de l'éventuel équipement préalable du forage pour installer le nouveau dispositif.

Cette question de l'équipement du forage a conduit à l'idée que le nouveau dispositif par fibres optiques devait être compatible avec les tubes inclinométriques actuels⁴, adaptés au passage des sondes inclinométriques à pendule inverse. En effet, le nouveau dispositif pourra ainsi s'appuyer sur la filière existante de production industrielle et de commercialisation des profilés actuels pour l'inclinométrie en forage.

En outre, pour les entreprises du domaine géotechnique, toute la partie réalisation des forages et équipement par tube inclinométrique sera ainsi inchangée. Seuls le dispositif de mesure mis en place dans le tube inclinométrique, la matériel (interrogateur optique), la procédure de relevé inclinométrique (et extensométrique) et le dépouillement des mesures pour calculer la déformée du tube seront différents. Or, nécessitant des qualifications différentes, les relevés inclinométriques sont généralement réalisés et dépouillés par des personnes différentes de celles qui réalisent les forages et installent les équipements en forage. Les premières seront en mesure d'absorber le saut technologique.

3.2 Présentation et spécifications du prototype final

À l'issue des réflexions présentées en Section précédente, la section du profilé support des fibres optiques respectant les nouvelles spécifications a été mise au point à l'automne 2021, en lien avec une entreprise de fabrication de profilés en polymères par extrusion. La photo en Figure 3.1 montre une tranche de tube inclinométrique (de couleur rouge) dans lequel coulisse un tronçon de profilé support des fibres optiques du nouveau dispositif, obtenu par impression 3D (de couleur blanche). Avant de lancer la production industrielle de plusieurs centaines de mètres du profilé, la fabrication d'un tronçon par impression 3D était le point d'arrêt pour valider la géométrie de la filière au travers de laquelle le polymère serait extrudé.

Ce modèle de tube inclinométrique a été retenu pour définir la géométrie de la structure support de fibres optiques du nouveau dispositif d'observation des déplacements des sols pour deux raisons. Premièrement, ce modèle de tube inclinométrique est commercialisé et très couramment employé en instrumentation géotechnique. Deuxièmement, ce modèle de tube inclinométrique a été installé en 2021 par le Cerema pour suivre le grand glissement de Charlaix menaçant la RN 85 près de La Mûre (38). Il est prévu fin 2022 d'installer le nouveau dispositif de mesure dans un forage équipé d'un tel tube, dans l'objectif de comparer entre deux forages adjacents les déplacements observés avec le nouveau dispositif à ceux obtenus par inclinomètre à pendule inverse conventionnel.

⁴ Ceci au moins dans un premier temps, avant de vérifier que l'usage de tubes inclinométriques courants, adaptés à l'observation des déplacements transverses au forage, permet aussi d'observer les déplacements dans son axe (caractère intrusif du dispositif à évaluer pour l'observation de déplacements axiaux dans le terrain).

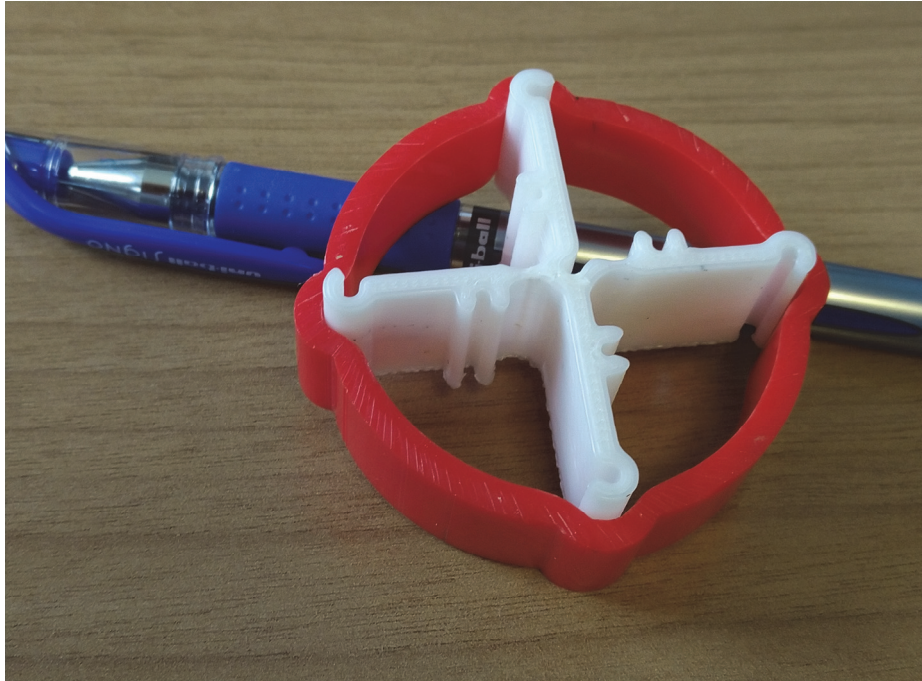


Figure 3.1. Élément de profilé support couissant dans un tube inclinométrique usuel

La Figure 3.2 précise les caractéristiques de la section du tube inclinométrique à sceller dans le terrain pour observer les déplacements dans les sols avec le nouveau dispositif par Fibres Optiques. Ce tube est composé d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Il est produit par éléments de longueur 3 m raccordés par manchons extérieurs collés.

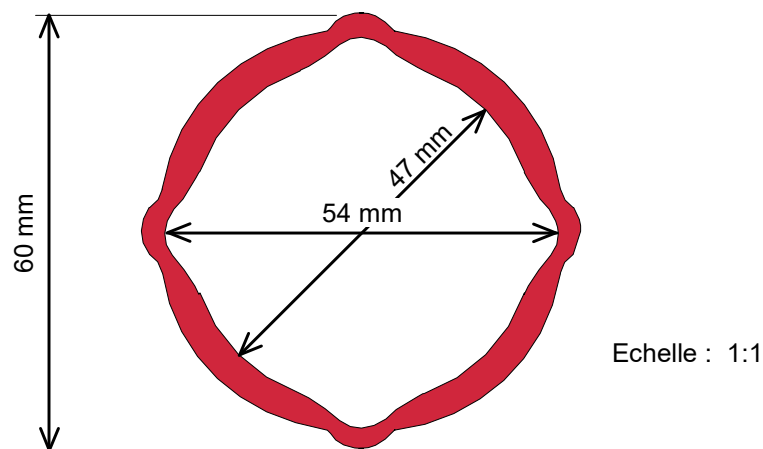


Figure 3.2. Section du tube inclinométrique retenu pour la conception du nouveau dispositif

Les caractéristiques géométriques de la section du profilé support des fibres optiques sont données en Figure 3.3. Ce profilé est produit par extrusion à chaud de Polyéthylène Haute Densité (PEHD) au travers d'une filière en acier de géométrie complémentaire, fabriquée pour cette étude. La section comporte quatre ailettes épaisses de 2 mm. Ces ailettes sont orientées à 90° les unes des autres. La hauteur du profilé est de 53.1 mm, laissant un jeu de 0.45 mm de part et d'autre pour que les ailettes, arrondies en extrémité, coulissent à l'intérieur du tube inclinométrique. Chaque ailette comporte une gorge permettant de positionner de manière précise une fibre optique périphérique (de couleur bleue dans la figure) à une distance de 10 mm de la fibre neutre du profilé ($r_a = r_b = r_c = r_d = 10 \text{ mm}$) et selon un rayon orienté à 90° des deux rayons adjacents ($\theta_a = \theta_b = \theta_c = \theta_d = 90^\circ$).

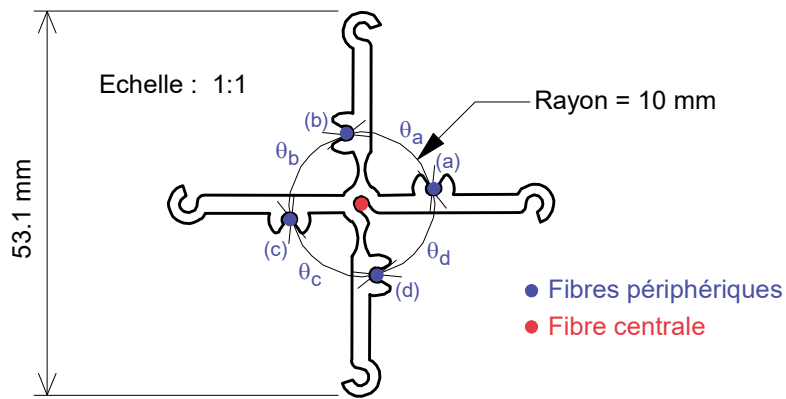


Figure 3.3. Section du profilé support des fibres optiques du nouveau dispositif

Pour être transporté sur site en un seul élément, de la longueur du forage et équipé des fibres optiques collées au laboratoire, le profilé doit pouvoir être enroulé sur un tambour de diamètre de l'ordre de 1 m. En fait le bobinage est susceptible (1) de plastifier les ailettes par extension excessive ou flambement et (2) d'endommager la fibre optique par extension dépassant son seuil de déformation admissible. La Figure 3.4 montre les déformations plastiques causées aux ailettes du profilé lorsque celui-ci est enroulé sur lui-même sans précaution. Les ailettes doivent alors être redressées sur le terrain pour supprimer les ondulations qui augmentent le frottement des ailettes dans les rainures du tube inclinométrique, rendant difficile sa mise en place. La section du profilé a donc été adaptée pour permettre un bobinage sans dommage.



Figure 3.4. Flambement des ailettes produit par un enroulement du profilé sans précaution

La section du profilé en Figure 3.3 montre que deux ailettes opposées comportent à leur base un amincissement. Ces amincissements sont conçus pour permettre de replier chacune de ces deux ailettes sur la suivante dans un même sens de rotation. Une fois repliées, le profilé forme une bande qui peut être enroulée pour transport sur le terrain. Située dans un plan défini par l'axe de bobinage et une direction ortho-radiale à cet axe, la bande ne subit que très peu de déformations, proportionnelles seulement à son épaisseur. Une fois sur le site, le profilé peut être débobié et les deux ailettes réorientées à 90° des autres avant introduction dans le tube inclinométrique. Les ailettes ne présentent ainsi pas d'ondulation et les fibres optiques n'ont pas été potentiellement exposées à des déformations excessives.

À l'installation sur le terrain, le profilé support équipé de fibres optiques est glissé à l'intérieur du tube inclinométrique scellé dans le forage. Les quatre ailettes radiales coulisent dans les rainures internes du tube inclinométrique. Ceci garantit que les ailettes du nouveau dispositif

(donc les fibres optiques périphériques) sont réparties radialement à 90° les unes des autres dans le tube et à une distance de 10 mm de l'axe neutre du profilé support et du tube. **Le dépouillement des mesures de déformations pour reconstituer en 3D la déformée du tube repose sur ces deux seules conditions : fibres optiques périphériques réparties radialement selon des angles connus et distances à l'axe neutre connues.**

La Fibre Optique utilisée pour cette application est la fibre DNS-5553 fabriquée par l'entreprise AFL. La Figure 3.5 montre une coupe schématique de cette fibre extraite de la fiche technique fournie par l'entreprise. Le diamètre total de la fibre est de 2.1 mm, correspondant au diamètre extérieur de la gaine de protection (de couleur bleu). Cette fibre comporte six cœurs en silice, revêtus pour canaliser la lumière laser de l'interrogateur optique. Ces cœurs sont dits « monomode », interrogeables qu'avec une seule fréquence à la fois. De diamètre très faible et de nature fragile, les cœurs sont noyés dans une couche de silicone épaisse de 0.7 mm et protégés des elongations excessives par un câble central de diamètre 0.4 mm.

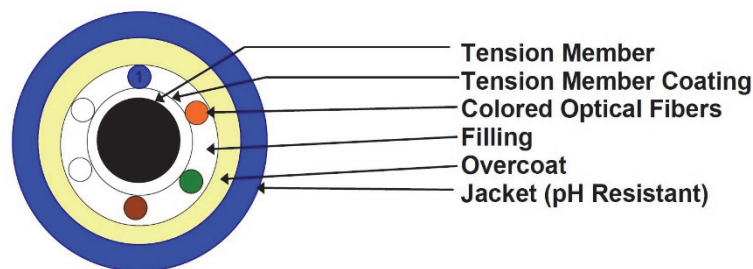


Figure 3.5. Section de la fibre optique utilisée, de diamètre extérieur 2.1 mm (schéma extrait de la fiche technique de la fibre DNS-5553 fabriquée par AFL)

Pour cette application, un seul cœur de la fibre est utilisé (interrogé). Le phénomène physique de rétrodiffusion de Rayleigh, influencé par l'indice de réfraction qui varie avec l'élongation du cœur, est utilisé pour déterminer précisément la déformation du cœur optique à une distance donnée de l'extrémité d'interrogation de la fibre. La rétrodiffusion de Rayleigh est le phénomène optique d'intensité le plus grand et pour lequel la relation entre la déformation de la fibre et le décalage du pic de rétrodiffusion est peu sensible à la température.

L'interrogateur optique utilisé est un appareil fabriqué par la société Luna, de la série ODiSI 6000. La configuration actuelle de l'appareil de l'Université Eiffel permet l'interrogation sur une longueur maximale de 100 m. En termes de résolution, la déformation longitudinale du cœur optique peut être déterminée sur des tronçons de cœur de longueur très faible, jusqu'à 0.6 mm. La précision de la mesure de déformation sur un tronçon de cœur est très élevée, de l'ordre de 1 μ -strain.

Comme représenté dans la coupe du nouveau dispositif en Figure 3.3, les déformations mesurées le long de cinq fibres, quatre périphériques et une centrale, sont utilisées pour caractériser les déformations dans une section de la structure support, permettant alors par intégration de calculer sa déformée tridimensionnelle. En théorie, en supposant l'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli vérifiée, trois fibres périphériques suffisent pour déterminer les déformations dans une section de la structure. L'ajout d'une fibre périphérique, résultant en fait de l'ajout d'une ailette pour s'adapter aux tubes inclinométriques actuels, apporte une surdétermination qui permet d'améliorer et d'estimer la précision de l'analyse.

3.3 Considérations pour la mise en œuvre ultérieure sur le terrain

Pour interroger correctement les fibres optiques, leur terminaison à l'opposé de l'interrogateur doit empêcher toute réflexion de lumière dans la fibre. Ainsi, dans la mesure du possible,

aucune terminaison de fibre, susceptible de s'altérer dans le temps au contact de l'eau et du terrain, ne sera située en fond de forage. En pratique, le dispositif sera en fait parcouru de six fibres, les cinq fibres de mesure représentées en Figure 3.3, plus un retour en tête de forage. Chaque longueur continue de fibre optique peut être interrogée depuis ses deux extrémités. Par conséquent, en cas de rupture d'une longueur de fibre, l'interrogation pourra néanmoins se poursuivre en interrogeant les deux extrémités, toutes deux situées en tête de forage.

La longueur maximale d'interrogation avec l'appareil de l'Université Eiffel étant de 100 m, la fibre optique sera installée sur la structure support en un, deux ou trois longueurs continues, suivant la longueur du forage à instrumenter, comme indiqué dans le Tableau 3.1. Le relevé de mesure devra alors être réalisé en interrogeant chacune des longueurs de fibre continues, en une seule, deux ou trois fois. Cela reste gérable, d'autant que l'interrogateur optique de l'Université Eiffel dispose de plusieurs voies d'interrogation simultanées. En acceptant le risque lié à une terminaison dans le terrain, un forage de 100 m pourra être équipé du nouveau dispositif, l'acquisition étant alors réalisée en interrogeant cinq longueurs de fibre continues.

Tableau 3.1. Nombre de longueurs de fibre optique continues suivant la longueur du forage

Longueur de forage	Nombre de longueurs continues de fibre optique (pour interrogateur avec longueur d'interrogation maximale de 100 m)
Inférieur à 15 m	1 (une fibre faisant trois aller-retours)
Jusqu'à 24 m	2 (la première fibre fait deux aller-retours, la seconde un seul)
Jusqu'à 49 m	3 (chaque fibre ne fait qu'un aller-retour)

La détermination des déplacements du sol par sonde inclinométrique conventionnelle repose sur la position initiale et l'orientation des rainures internes du tube inclinométrique servant à guider la sonde. En pratique, la position initiale du tube est généralement définie en supposant le forage rectiligne. Son extrémité dans le terrain est considérée fixe pour intégrer le long du tube les rotations par rapport aux mesures à l'installation du tube et ainsi en déduire les déplacements par rapport à la position initiale. En supposant que le tube inclinométrique n'a pas subi de torsion à l'installation et pendant les déplacements du sol, l'orientation des rainures est généralement considérée constante le long du tube et dans le temps, définie par leur position observée en sommet de tube. Une sonde directionnelle peut toutefois être passée dans le forage avant la sonde inclinométrique.

De la même manière, la détermination des déplacements dans le sol avec le nouveau dispositif nécessite de connaître la position initiale du tube inclinométrique dans le terrain et l'orientation initiale de ses rainures. Avec le nouveau dispositif par fibres optiques, la trajectoire du forage (du tube inclinométrique) et l'orientation des ailettes peut être déterminée lors de l'introduction du dispositif dans le forage, par analyse des déformations des fibres pendant une introduction incrémentale au travers d'une filière de guidage rectiligne et orientée, placée en sommet de forage. Ensuite, à chaque relevé, les déplacements des terrains le long de cette ligne initiale seront déduits de l'évolution des déformations des fibres le long du profilé support, par rapport aux déformations mesurées à l'installation du dispositif.

Enfin, le nouveau dispositif a été conçu pour supporter sans dommage des rayons de courbure supérieurs à 90 cm. Le dispositif sera cependant testé pour vérifier si un endommagement de la fibre externe se produit pour des rayons de courbure plus faibles. Pour ces faibles rayons de courbure, l'ailette interne est également susceptible de subir un flambement, perturbant le dépouillement des mesures de déformations. Une contre-mesure au flambement des ailettes lors d'une forte flexion du dispositif pourrait être, après insertion du dispositif dans le tube inclinométrique, de le remplir d'un coulis de ciment-bentonite empêchant l'ailette de se voiler. Cette disposition de mise en œuvre n'a pas été étudiée à ce stade de l'innovation.

4 Évaluation des déplacements le long de la ligne du capteur

Le Chapitre précédent a présenté en détail la conception et les spécifications du nouveau dispositif d'observation des déplacements dans les sols et les roches le long d'une ligne. Ce dispositif est basé sur l'observation des déformations en plusieurs points de la section droite d'une structure support linéique, par fibres optiques collées parallèlement à différentes distances de son axe neutre. L'objet de ce nouveau Chapitre est de présenter l'analyse permettant de relier déformations mesurées et trajectoire de la déformée de la structure.

La suite de ce Chapitre est organisée en trois principales Sections. La Section 4.1 tout d'abord présente l'analyse mécanique de la structure linéique support du nouveau dispositif. La Section 4.2 ensuite donne la méthode de dépouillement des mesures de déformations locales pour déterminer les caractéristiques de la déformée en un point (déformation axiale, direction du plan de courbure dans la section droite de la structure et valeur de la courbure). La Section 4.3 enfin précise la théorie employée pour décrire et déterminer la trajectoire de la structure linéique support à partir des caractéristiques locales déduites des mesures de déformations dans les sections droites.

4.1 Centre et moments d'inertie de la section de la structure support

L'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli est supposée vérifiée : lors de la déformation, les sections planes perpendiculaires à la fibre moyenne restent planes et perpendiculaires à la fibre moyenne. Cette hypothèse est valide pour les poutres en petites déformations, ce qui en pratique est considéré être le cas lorsque le rayon de courbure en flexion est supérieur à dix fois la hauteur de la section (soit 53 cm pour le profilé support du prototype développé dans le cadre de cette étude).

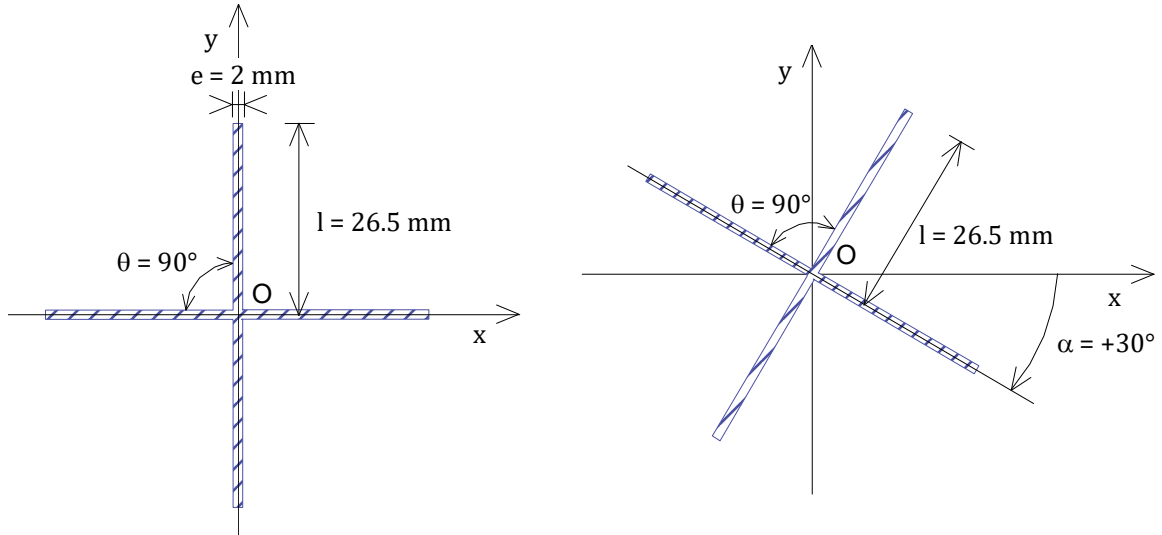
Avec cette hypothèse, a minima, les déformations longitudinales de la structure support en quatre points d'une même section sont nécessaires pour reconstituer la déformée de la structure support sous une sollicitation quelconque, combinant traction, torsion et flexion dans deux directions du plan perpendiculaire à l'axe du profilé support. Comme représenté en Figure 3.3 montrant la coupe transversale de la structure support, en Section 3.2 sur la conception du dispositif final, les déformations seront en fait mesurées le long de cinq fibres, quatre périphériques et une centrale, apportant une faible surdétermination.

Pour simplifier l'analyse mécanique et géométrique, la section de la structure linéique support des fibres optiques a été choisie telle que la position de l'axe neutre en flexion (et en rotation) coïncide avec le centre de symétrie radiale de la section. La Figure 4.1(a) représente une section simplifiée de la structure support du dispositif final, composée de quatre ailettes épaisses de 2 mm, larges de 26.5 mm et orientées à 90° les unes des autres.

La section de cette structure linéique présente une symétrie radiale périodique autour du point O, qui est donc le barycentre de la section. L'axe neutre en flexion et en torsion de la section coïncide ainsi avec le centre géométrique, situé à l'origine des quatre ailettes (point O dans la Figure 4.1(a)), à la même distance des quatre fibres optiques périphériques.

Le moment d'inertie en flexion est cependant susceptible de dépendre de la position des ailettes par rapport à la direction de flexion. Un moment d'inertie variable suivant la direction de flexion rendrait l'interaction mécanique entre le terrain et le dispositif dépendant de la direction de sollicitation. Même si le dispositif est supposé suivre les déplacements du terrain, il est préférable que l'interaction entre le dispositif et le terrain soit indépendante de l'orientation des ailettes par rapport aux déplacements du sol.

Considérant une flexion dans une direction fixe, autour de l'axe Ox (Figure 4.1(b)), qui coïncide alors avec la trace du plan neutre dans la section, le moment d'inertie est susceptible de varier avec l'angle α selon une périodicité de 90° . En effet, une rotation de l'orientation des ailettes d'un angle α égal à 90° ramène à une géométrie dont l'inertie de flexion par rapport à l'axe Ox est identique à l'inertie de flexion dans la position initiale (pour $\alpha = 0$).



(a) Section simplifiée du profilé support

(b) Rotation des ailettes par rapport au plan de flexion

Figure 4.1. Ailettes du profilé support formant un angle α avec le plan de flexion de trace Ox

L'inertie de flexion par rapport à l'axe Ox de la section du profilé support représentée en Figure 4.1(b) peut être calculée pour différentes valeurs de l'angle α comprises entre 0 et 90° . Pour une section de nature de matériau homogène, l'inertie de flexion correspond au moment quadratique de la section par rapport à la trace du plan de flexion considéré. Pour une flexion autour de l'axe Ox, l'inertie de flexion autour de cet axe, notée I_x , est donc donnée par l'équation suivante :

$$I_x = \iint_S y^2 dS \quad 4.1$$

Où S représente la surface de la section (zone hachurée en Figure 4.1) et y la distance à l'axe Ox de l'élément dS de section considéré.

En décomposant la surface selon chacune des quatre ailettes, l'Équation 4.1 devient :

$$I_x = \int_0^l 2e \{(r \cos(\alpha))^2 + (r \sin(\alpha))^2\} dr \quad 4.2$$

$$\Rightarrow I_x = \int_0^l 2e r^2 dr$$

Où e représente l'épaisseur des ailettes et l leur largeur.

Par intégration, cette équation donne :

$$I_x = \frac{2}{3}el^3, \quad \forall \alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right] \quad 4.3$$

Par conséquent, **le comportement mécanique du dispositif est indépendant de la direction des ailettes par rapport à la direction du moment fléchissant appliqué.** L'inertie de la section représentée en Figure 4.1 par rapport à une direction de flexion quelconque est de 24813 mm^4 .

Un majorant de l'inertie de flexion du profil support des fibres optiques peut être estimé en considérant le module d'Young du PEHD de l'ordre de 1000 MPa , pour de faibles contraintes de traction, à 20°C et à court terme (sans tenir compte du fluage). Cette inertie de flexion est probablement beaucoup plus faible que celle du tube inclinométrique en ABS utilisé pour équiper les forages géotechniques.

En résumé, pour la section de structure support choisie, formée de quatre ailettes de directions réparties de manière homogène depuis un même centre, l'axe neutre (en torsion et en flexion) coïncide avec ce centre géométrique et le comportement mécanique en flexion de la structure support est indépendant de la direction de flexion.

Pour reconstituer la déformée de la structure linéique à partir des déformations données par les fibres optiques, l'analyse inverse présentée en Section suivante reposera ainsi uniquement des considérations géométriques constantes, indépendantes de l'orientation de la trace du plan de flexion pour la sollicitation de flexion exercée : la distance entre les fibres optiques et le centre d'inertie de la section du profilé (point O en Figure 4.1) et les angles entre un axe Ox et les directions des ailettes, à 90° les unes des autres.

4.2 Relation entre déformée et déformations dans une section droite

Lorsque l'axe neutre de la structure linéique support n'est pas rectiligne, il décrit localement une courbe plane (courbe qui définit un plan dans lequel l'axe neutre s'inscrit). Ce plan tangent à l'axe neutre et incluant la direction de sa variation locale de direction est appelé « plan de courbure. » La Figure 4.2 montre la position du plan de courbure (P_{ni}) dans un schéma tridimensionnel. Ce plan inclut l'axe neutre, de couleur rouge dans la figure, sur une longueur courbe infinitésimale (ds), entre les sections planes perpendiculaires à l'axe neutre aux abscisses curvilignes s et $s + ds$.

La droite d'intersection de ce plan de courbure avec la section plane de la structure indique la direction de flexion de la structure. Cette direction forme un angle θ_i avec l'axe Ox d'un repère local de la section plane au point O_i , à la distance s de l'origine du dispositif. Dans le plan de courbure, la courbure (notée φ_i dans la figure, en m^{-1}) est définie par la variation d'orientation de l'axe neutre (normal à la section plane) divisée par la longueur de l'arc ds . Par définition, son inverse est le « rayon de courbure ».

La Figure 4.3 montre la position des fibres optiques du dispositif linéique développé dans cette étude dans un schéma de principe de sa section plane perpendiculaire à l'axe neutre. Quatre fibres optiques sont placées à une même distance de l'axe neutre de la section de la structure ($r_a = r_b = r_c = r_d = 10 \text{ mm}$) et selon des directions radiales de distribution homogène ($\theta_a = \theta_b = \theta_c = \theta_d = 90^\circ$). La cinquième fibre, appelée fibre centrale, en rouge dans la figure, coïncide avec l'axe neutre, comme le montre la section réelle de la structure support en Figure 3.3, Section 3.2 présentant les spécifications techniques du dispositif final.

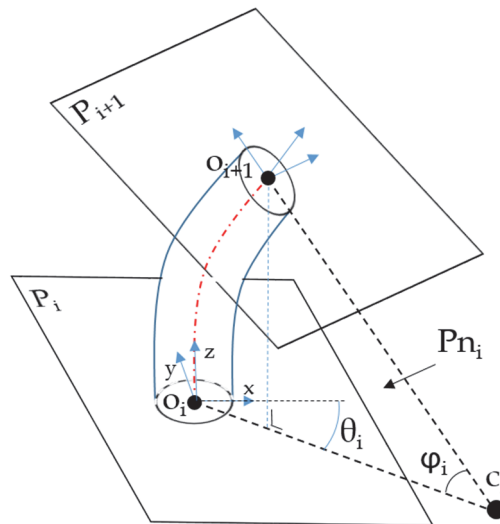


Figure 4.2. Plan de courbure (P_{ni}) incluant la fibre neutre sur une longueur ds (en rouge)

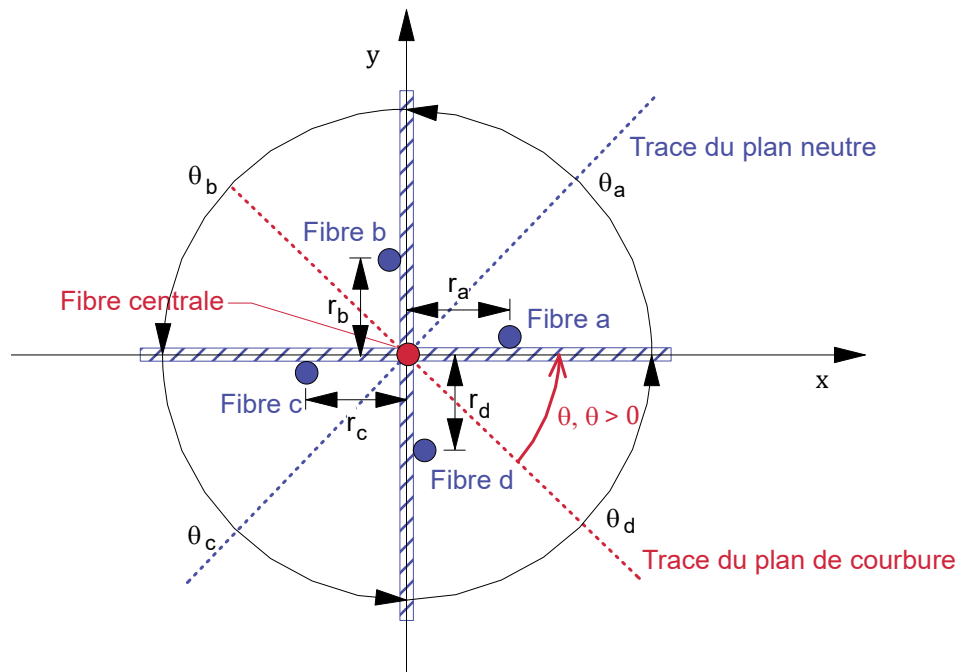


Figure 4.3. Localisation des fibres dans la section plane perpendiculaire à l'axe neutre

Dans cette section, le repère local a été choisi tel que l'axe Ox coïncide avec la direction de l'ailette supportant la Fibre a. L'axe Oy dans la direction perpendiculaire est orienté dans le sens trigonométrique direct lorsque l'observateur regarde dans la direction des coordonnées curvilignes décroissantes. Même si les fibres périphériques sont situées sur des rayons effectivement à 90° les uns des autres, il peut être noté un faible décalage angulaire constant entre positions des ailettes et positions des fibres optiques, les fibres étant placées sur les ailettes de la structure support. Ce faible décalage angulaire pourra avoir une incidence dans le dépouillement des mesures de déformation, pour calculer la direction la trace du plan de courbure et l'amplitude de la courbure du profil en un point.

Dans cette Figure 4.3, la trace du plan de courbure a été représentée par une droite en trait discontinu de couleur rouge. La trace du plan de courbure dans la section plane, qui définit la direction de flexion du dispositif, forme un angle θ avec l'axe Ox (la direction de l'ailette supportant la Fibre a). La rotation de la section plane se produit autour de la perpendiculaire

à la trace du plan de courbure, c'est-à-dire autour de la trace du plan neutre, représentée dans la figure en trait discontinu de couleur bleu. Lors d'une flexion dans le plan de courbure de la structure linéique, l'allongement ou le raccourcissement d'une fibre de la section parallèle à l'axe neutre est proportionnel à la distance de la fibre à la trace du plan neutre.

Une sollicitation quelconque de la structure linéique se décompose en un effort longitudinal, un couple de flexion (autour d'un axe dans la section plane) et un couple de torsion (autour de l'axe neutre de la section). Lors d'une torsion, les quatre fibres périphériques du dispositif, à la même distance de l'axe neutre, subissent le même allongement (donc la même déformation), alors que la longueur de la fibre centrale est inchangée (déformation nulle). Lors d'une traction ou d'une compression, les cinq fibres subiront la même déformation. Enfin, une flexion simple ne produit pas de déformation de la fibre centrale, mais des différences de déformations entre fibres périphériques, proportionnelles aux distances respectives des fibres à la trace du plan neutre, permettant de calculer la rotation de la section plane autour de la trace du plan neutre.

Les fibres étant deux à deux diamétralement opposées, lors d'une flexion simple, la moyenne des déformations des fibres périphériques est nulle. Par conséquent, la moyenne des déformations des quatre fibres périphériques a, b, c et d correspond à la somme de (1) La déformation causée par l'effort de traction-compression, égale à la déformation de la fibre centrale, et de (2) La déformation causée par la torsion autour de l'axe neutre (identique pour les quatre fibres périphériques) :

$$\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c + \varepsilon_d}{4} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{\text{torsion}} \quad 4.4$$

Où ε_a , ε_b , ε_c et ε_d représentent respectivement les déformations des fibres périphériques a, b, c et d, ε_0 la déformation de la fibre centrale (coïncidant avec l'axe neutre) et $\varepsilon_{\text{torsion}}$ la déformation des fibres périphériques causée par la torsion.

La torsion de la structure support peut donc être calculée à partir de la contribution de la torsion à la déformation des fibres périphériques ($\varepsilon_{\text{torsion}}$), donnée par l'équation suivante :

$$\varepsilon_{\text{torsion}} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c + \varepsilon_d}{4} - \varepsilon_0 \quad 4.5$$

La fibre centrale a été introduite dans le dispositif pour, avec l'équation 4.5, évaluer la torsion du dispositif autour de l'axe neutre. Des développements complémentaires seraient nécessaires pour exposer comment le sens de rotation est déterminé à partir du signe de $\varepsilon_{\text{torsion}}$ donnée par l'Équation 4.5.

Ensuite, pour une sollicitation de flexion composée de la structure support (traction-compression et flexion autour d'un axe quelconque dans la section plane), les déformations observées dans les quatre fibres périphériques suffisent pour déterminer la déformation à l'axe neutre de la section (ε), la direction de courbure (angle θ) et la courbure (angle φ) de l'axe neutre, c'est-à-dire la position de la section plane après déformation de la structure.

La Figure 4.4 représente une longueur infinitésimale de la structure support dans le plan de courbure. L'axe neutre est par définition inclus dans ce plan et la Fibre a, périphérique à la structure linéique, a été projetée dans ce plan. Sur cette longueur, la traction-compression produit une déformation ε , identique pour toutes les fibres. Par contre, la flexion produit une courbure φ de l'élément de structure, sans influence sur la longueur le long de l'axe neutre, mais allongeant ou réduisant la longueur des autres fibres proportionnellement à leur distance algébrique au plan neutre. C'est-à-dire, dans le plan de courbure (Figure 4.4), proportionnellement à la différence de rayon de courbure entre la projection de la fibre dans le

plan de courbure et l'axe neutre. Pour la Fibre a, en notant que sa distance au plan neutre vaut $r_a \cos \theta$ (cf. Figure 4.3), la déformation de la Fibre a causée par la rotation de la section plane est donnée par :

$$\varepsilon_a - \varepsilon = \frac{(R - r_a \cos \theta) \times \varphi - R\varphi}{R\varphi} = -\varphi r_a \cos \theta \quad 4.6$$

En considérant en outre l'influence de la torsion sur la déformation des fibres, le même raisonnement pour les quatre fibres périphériques conduit aux quatre équations suivantes :

$$\varepsilon_a - \varepsilon_{\text{torsion}} = \varepsilon - \varphi r_a \cos \theta \quad 4.7 \quad (a)$$

$$\varepsilon_b - \varepsilon_{\text{torsion}} = \varepsilon - \varphi r_b \cos(\theta + \theta_a) \quad 4.8 \quad (b)$$

$$\varepsilon_c - \varepsilon_{\text{torsion}} = \varepsilon - \varphi r_c \cos(\theta + \theta_a + \theta_b) \quad 4.9 \quad (c)$$

$$\varepsilon_d - \varepsilon_{\text{torsion}} = \varepsilon - \varphi r_d \cos(\theta + \theta_a + \theta_b + \theta_c) \quad 4.10 \quad (d)$$

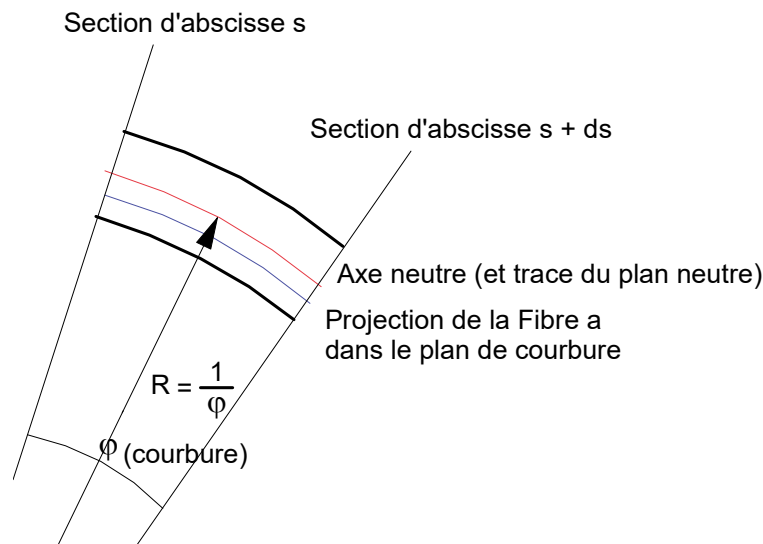


Figure 4.4. Longueur élémentaire de structure linéique dans le plan de courbure

En chaque point le long de l'axe neutre, à partir de l'observation de la déformation des Fibres a, b, c et d corrigée de l'effet de la torsion donné par l'Équation 4.5, les équations 4.7 à 4.10 permettent de calculer la déformation à l'axe neutre (ε), causée par l'effort de traction-compression, la direction du plan de courbure (θ) et la valeur de la courbure (φ), causée par la flexion. Il est intéressant de noter qu'en théorie, en supposant l'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli vérifiée, trois fibres périphériques suffisent pour déterminer les déformations en tout point de la section d'une structure linéique. L'ajout d'une quatrième fibre périphérique, induit en fait par l'ajout d'une ailette pour s'adapter aux tubes inclinométriques actuels, apporte une surdétermination qui permet d'améliorer l'analyse et d'en estimer l'erreur.

4.3 Reconstruction de la trajectoire de l'axe neutre

Connaissant la déformation longitudinale et la direction et amplitude de courbure en tout point le long de la structure, plusieurs cadres théoriques existent pour permettre une reconstruction tridimensionnelle de la position de l'axe neutre (Cui et al. (2018)). Ces cadres théoriques ont

été développés pour décrire une courbe régulière (tangente variant de manière continue) dans un espace tridimensionnel.

Paloshi et al. (2020) opposent une méthode matricielle aux méthodes basées directement sur le cadre théorique Frenet, exposé ci-après. Ils notent cependant l'avantage d'une approche basée sur la représentation de Frenet lorsque la courbure entre deux points d'abscisses curvilignes croissantes successives (correspondant aux points successifs de mesure de la déformation des fibres) n'est pas uniforme, donc lorsque la distance entre points de mesure est importante.

Dans la présente étude, la théorie dite de Frenet-Serret a été employée car considérée la plus pertinente dans la littérature pour construire dans l'espace l'axe neutre de la structure support à partir des mesures de déformations par fibres optiques (Moore et al. (2012) ; Jäckle et al. (2019)). En effet, ce cadre théorique pour l'étude des courbes dans l'espace repose sur la définition d'un repère local le long de la courbe, lequel est lié à la direction de courbure et son amplitude, qui sont directement déduits de l'observation des déformations le long des fibres, comme exposé dans ce qui précède. Ce cadre, adapté pour représenter une courbe dans l'espace, ne permet cependant pas de traiter de la torsion du dispositif (rotation autour de l'axe neutre de la structure linéique support).

Les formules de Frenet-Serret décrivent les propriétés d'une courbe continue et différentiable définie dans un espace Euclidien, dans notre cas l'espace vectoriel \mathbf{R}^3 défini sur \mathbf{R} et muni du produit scalaire usuel permettant de mesurer distances et angles. La Figure 4.5 montre une courbe continue et différentiable quelconque, le long de laquelle est défini un repère local attaché à la courbe et qui, à partir d'une extrémité, la décrit. Dans cette figure, ce repère, composé des vecteurs unitaires \mathbf{T} , \mathbf{N} et \mathbf{B} , a été représenté en trois points le long de la courbe. Les équations de Frenet-Serret, qui définissent ces vecteurs, sont données ci-après.

Le vecteur \mathbf{T} , défini par l'Équation 4.11, est tangent à la courbe :

$$\frac{d\mathbf{T}}{ds} = \varphi \mathbf{N} \quad 4.11$$

Où s est l'abscisse curviligne et φ la courbure, représentée dans les Figure 4.2 et Figure 4.4.

Le vecteur \mathbf{N} , défini par l'équation 4.12, pointe dans la direction de la courbure.

$$\frac{d\mathbf{N}}{ds} = -\varphi \mathbf{T} + \tau \mathbf{B} \quad 4.12$$

Où τ , décrivant le gauchissement de la courbe (sa sortie du plan défini au point d'abscisse s par les directions des vecteurs \mathbf{T} et \mathbf{N}), est relié à la variation avec l'abscisse curviligne s de l'angle θ décrivant, dans ce qui précède (cf. Figure 4.2 et Figure 4.3), la direction de flexion :

$$\tau = \frac{d\theta}{ds} \quad 4.13$$

Enfin, le vecteur \mathbf{B} , est le vecteur bi-normal aux deux précédents. Il sert à décrire la direction de sortie de la courbe du plan de courbure défini par \mathbf{T} et \mathbf{N} . Le gauchissement de la courbe est ainsi décrit par l'équation 4.14.

$$\frac{d\mathbf{B}}{ds} = -\tau \mathbf{N} \quad 4.14$$

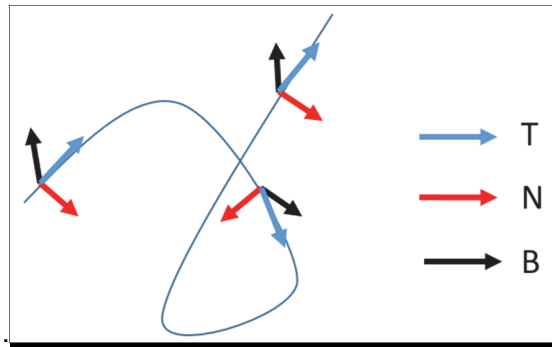


Figure 4.5. Représentation en trois points d'une courbe du repère local défini par les vecteurs unitaires Tangent, Normal et Binormal associés à la courbe.

Un code basé sur les éléments théoriques exposés précédemment a été développé sous Matlab. Deux fonctions principales ont été implémentées. La première concerne la modélisation du problème dit « direct, » c'est-à-dire la simulation des déformations le long des fibres optiques de l'inclinomètre pour une trajectoire de l'axe neutre connue, définie par la courbure (φ) et le gauchissement (τ) le long de la courbe dans l'espace, depuis une extrémité où l'orientation de la courbe (vecteur **T**) et sa courbure (vecteur **N**) sont donnés.

La seconde fonction concerne la modélisation du problème dit « inverse » qui consiste, à partir des déformations observées le long des fibres optiques, à déterminer les valeurs de courbure et de gauchissement le long du dispositif, permettant ensuite de définir depuis une extrémité la courbe décrite dans l'espace par l'axe neutre de la structure support. En Section suivante, sur les essais réalisés en milieu contrôlé, c'est cette seconde fonction qui sera utilisée pour dépouiller les mesures de déformations et calculer la déformée de la structure support.

Dans les deux cas, les déformations des fibres optiques sont calculées (problème direct) ou observées (problème inverse) en différents points d'abscisses curvilignes s_i discrètes. Pour le problème direct, les déformations pourraient être déterminées analytiquement et représentées graphiquement de manière continue. Cependant, pour le problème inverse, l'observation des déformations doit être réalisée en un nombre fini de points discrets, selon un pas de coordonnées curvilignes croissantes entre points ou « jauges » de mesure, qui dépend des caractéristiques de l'interrogateur de fibres optiques et de la capacité de stockage.

La durée des calculs d'inversion dépend aussi du pas de mesure des déformations. Dans les essais présentés dans la suite, un pas de mesure de 2.6 mm a été utilisé, soit par fibre environ 5 750 points de mesure sur la longueur de 15 m d'inclinomètre sollicité dans les essais.

5 Performance du nouveau dispositif

5.1 Introduction

Des essais en milieu contrôlé ont été réalisés pour évaluer la performance du nouveau dispositif d'observation des déplacements le long d'une ligne dans les sols et roches. Une longueur de 20 m de profilé support a été équipée de fibres optiques, puis introduite dans un tube inclinométrique de longueur 15 m. Deux longueurs de fibres optiques ont été utilisées, la première de plus de 80 m correspondant aux quatre fibres périphériques du profilé support (deux allers-retours) et la seconde à la fibre centrale plus le retour en tête de profilé, d'où seront réalisées les mesures de déformations par interrogateur optique.

La photographie en Figure 5.1 (a) montre l'étape de soudure de terminaisons aux extrémités des longueurs de fibres optiques, en vue de leur connexion à l'interrogateur optique pour effectuer les mesures depuis la tête du dispositif. Un contrôle de leur fonctionnement sur toute la longueur est également réalisé à cette occasion. La photographie en Figure 5.1 (b) montre, à l'opposé, le pied du dispositif, où la fibre optique est retournée pour parcourir une autre gorge de positionnement des fibres le long du profilé support. À cette extrémité du dispositif, qui correspondrait sur le terrain au fond de forage, il peut être noté qu'une sur-longueur de profilé non équipée de fibre optique a été ménagée pour protéger la fibre optique en pied de dispositif (sur le terrain, lors de son introduction dans le forage et en fond de forage).



(a) Soudure des terminaisons et contrôle



(b) Tube inclinométrique équipé du dispositif

Figure 5.1. Préparation et introduction du dispositif dans un tube inclinométrique pour les essais

La photographie en Figure 5.1 (b) montre également l'ensemble du tube inclinométrique, parcouru du nouveau dispositif, prêt à être testé. Différentes sollicitations ont alors été appliquées au tube inclinométrique instrumenté pour produire des déformées observables

directement dans le hall d'essais. Parallèlement les déformations le long des fibres optiques ont été mesurées pour reconstruire indirectement la déformée du tube par analyse inverse, comme exposé en Section précédente. Dans ces essais, la longueur des tronçons de fibre optique considérés pour mesurer la déformation a été prise égale 2.6 mm.

Une seule condition de sollicitation du tube inclinométrique instrumenté a été considérée : la flexion plane, facilitant l'interprétation des mesures et l'évaluation du dispositif. La suite de ce Chapitre présente les différentes sollicitations appliquées, les déformées attendues, les déformées directement observées et leur comparaison avec les déformées déduites des mesures de déformations le long des fibres optiques. Une conclusion sur la performance du dispositif est donnée en fin de chapitre sur la base de ces comparaisons.

5.2 Flexion plane en conditions contrôlées

5.2.1 Conditions d'essai et déformée théorique du tube instrumenté

La Figure 5.2 montre les conditions de sollicitation considérées dans le plan de sollicitation. Ce plan est horizontal, le tube avec prototype à l'intérieur reposant sur la dalle d'essai pour s'affranchir de la sollicitation par le poids propre. Dans ce plan, le tube équipé est sollicité en « flexion quatre points ». Deux appuis simples autorisent le glissement dans la direction du tube, mais pas le déplacement dans la direction y , perpendiculaire à la direction initiale du tube. Deux forces égales, de direction y , sont appliquées à une même distance de chacun des deux appuis. En raison de la configuration des points fixes sur la dalle d'essai, les points d'appuis et d'application des efforts ont été pris équidistants comme représenté dans la figure.

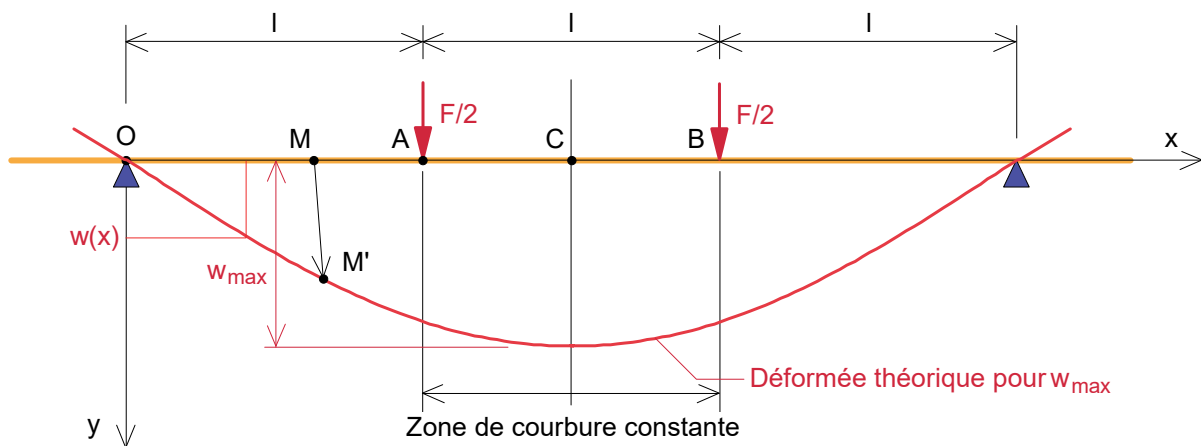


Figure 5.2. Sollicitation en flexion quatre points du tube inclinométrique équipé du dispositif

Dans le schéma en Figure 5.2, la position initiale du tube inclinométrique parcouru du dispositif de mesure est représenté par la droite de couleur orange. Lors de l'essai, l'effort appliqué (F) est augmenté jusqu'à produire une déformée pour laquelle la flexion maximale du tube, située par symétrie au centre du dispositif de chargement (point C), atteint une valeur donnée, w_{max} . Pour atteindre cette déformée, de couleur rouge dans le schéma, le tube fléchit et peut coulisser sur ses deux appuis. Le vecteur du point M au point M' représente le déplacement du point M du tube pendant la flexion. Les efforts appliqués restent cependant positionnés respectivement aux abscisses (x) des points A et B.

La photographie en Figure 5.3 est une vue d'ensemble du dispositif de chargement en cours d'essai. Les photographies en Figure 5.4 et Figure 5.5, correspondant à des efforts de chargement croissants, permettent de voir le détail du dispositif d'essais. Les lignes au sol,

perpendiculaires à la ligne formée par les deux appuis simples, servent de repères pour mesurer la flèche à différentes abscisses.



Figure 5.3. Dispositif de chargement en flexion plane quatre points du tube instrumenté



Figure 5.4. Détail du dispositif d'essai en flexion plane quatre points



Figure 5.5. Détail du dispositif d'essai en flexion plane quatre points – Flèche imposée maximale

Dans ces conditions, en fonction de l'abscisse (x) du point considéré le long du tube, déformé ou non, le moment fléchissant appliqué à la section est défini par le schéma en Figure 5.6. Depuis une extrémité du tube déformé, ce moment fléchissant est tout d'abord nul entre l'extrémité du tube et le premier appui, puis augmente linéairement jusqu'au point où s'applique le premier effort ($F/2$), est ensuite constant entre les deux points d'application des efforts et enfin, diminue à zéro au second appui et jusqu'à l'autre extrémité.

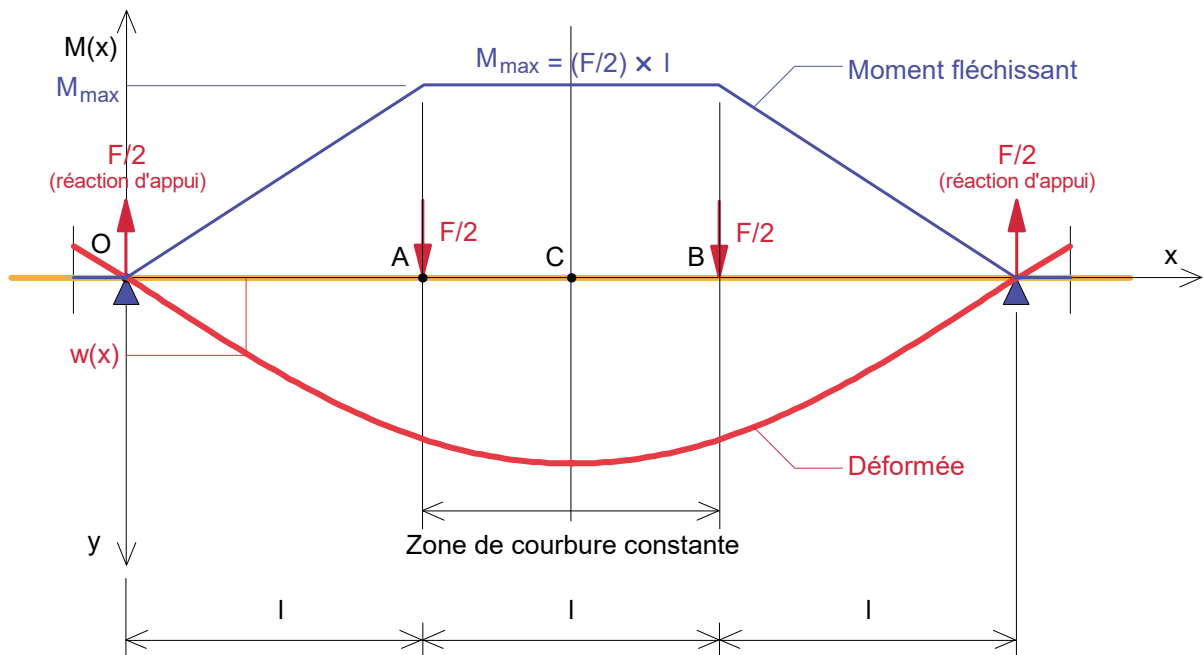


Figure 5.6. Distribution du moment fléchissant le long du tube instrumenté

En supposant vérifiée l'hypothèse de la théorie des poutres d'Euler-Bernoulli, localement en tout point le long du tube équipé du prototype, la flèche du tube (w) est liée au moment fléchissant (M) par l'équation suivante :

$$-EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = M(x) \quad 5.1$$

Où EI est l'inertie de flexion du tube et de la structure support des fibres optiques à l'intérieur. En notant que les axes neutres du tube inclinométrique et de la structure support coïncident, cette inertie de flexion est la somme des inerties de flexion des deux composants.

NB concernant les grands déplacements :

En tout point, l'équation de la flexion des poutres (Équation 5.1) peut également s'écrire en termes d'abscisse curviligne (s), tangente à la déformée, et de déflexion dans la direction transverse à cette déformée (w_t). Il peut être démontré que cette équation locale se ramène à l'équation 5.1, en abscisse x et flèche w dans la direction perpendiculaire à l'axe des abscisses (Oy). Le moment fléchissant au point considéré est le même dans les deux repères, local ou fixe.

En introduisant l'expression du moment fléchissant, l'équation 5.1 s'écrit :

- $x \in [0, l]$,

$$-EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = \frac{F}{2} x \quad 5.2$$

- $x \in [l, \frac{3}{2}l]$,

$$-EI \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = \frac{Fl}{2} \quad 5.3$$

Ces deux équations différentielles peuvent être intégrées en considérant les conditions limites suivantes :

$$w(x = l^-) = w(x = l^+) \quad 5.4$$

$$\frac{dw}{dx}(x = l^-) = \frac{dw}{dx}(x = l^+) \quad 5.5$$

$$w(x = 0) = 0 \quad 5.6$$

$$\frac{dw}{dx}\left(x = \frac{3l}{2}\right) = 0 \quad 5.7$$

Les équations 5.4 et 5.5 expriment respectivement la continuité des flèches et des rotations au point d'abscisse $x = l$. L'équation 5.6 spécifie que la flèche est nulle au droit du point d'appui en $x = 0$ et l'équation 5.7 que la tangente à la déformée est nulle au point de déflexion maximale, en $x = 2l/3$.

Dans la partie du tube située entre l'appui et le premier point d'application de charge, la flèche du tube (w), la rotation du tube (α), i.e. l'angle entre la direction du tube et l'axe des abscisses, et sa courbure sont respectivement données par les équations suivantes :

- $x \in [0, l]$,

$$w(x) = -\frac{F}{12 EI} x^3 + \frac{Fl^2}{2 EI} x \quad 5.8$$

$$\alpha = \frac{dw}{dx}(x) = -\frac{F}{4 EI} x^2 + \frac{Fl^2}{2 EI} \quad 5.9$$

$$\text{Courbure} = \varphi = \frac{d\alpha}{dx}(x) = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} = -\frac{F}{2 EI} x \quad 5.10$$

De même, dans la partie centrale du tube, entre le premier point d'application de charge et le point à mi-distance des deux charges, la flèche du tube (w), la rotation du tube (α) et sa courbure sont respectivement données par les équations suivantes :

- $x \in \left[1, \frac{3l}{2}\right]$,

$$w(x) = -\frac{Fl}{4EI}x^2 + \frac{3Fl^2}{4EI}x - \frac{Fl^3}{12EI} \quad 5.11$$

$$\alpha = \frac{dw}{dx}(x) = -\frac{Fl}{2EI}x + \frac{3Fl^2}{4EI} \quad 5.12$$

$$\text{COURBURE} = \varphi = \frac{d\alpha}{dx}(x) = \frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{Fl}{2EI} \quad 5.13$$

5.2.2 Approche pour l'évaluation de la performance du dispositif

Pour rappel, la méthode d'inversion, présentée en Section 4.2, repose sur l'évaluation de deux angles à partir des déformations normales à la section de la structure support des fibres optiques, mesurées en différents points de la section : (1) L'angle (noté θ) de la trace du plan de courbure dans la section plane de la structure (perpendiculaire à l'axe neutre) et (2) La courbure (notée φ) qui désigne, dans le plan de courbure, la variation de direction de la normale à la section pour un incrément infinitésimal d'abscisse curviligne le long de la fibre neutre (variation d'angle par longueur d'arc parcouru sur l'axe neutre).

Dans les conditions d'essai présentées précédemment, l'angle de la trace du plan de courbure (θ) est constant puisque la flexion du tube est plane horizontale (le plan de courbure est horizontal, donc le plan de flexion de la section vertical). Par ailleurs, l'Équation 5.13 montre que ces conditions de sollicitation produisent, entre les points d'application des deux efforts, en partie centrale, une courbure constante du tube instrumenté.

Les performances du dispositif peuvent donc être évaluées en contrôlant la prédiction par la méthode d'inversion d'une valeur constante de la courbure (φ) entre les points d'application des efforts. En utilisant les Équations 5.11 et 5.13, il peut être démontré que, comme toute la déformée en partie centrale, cette valeur constante de la courbure est liée par l'équation suivante à l'amplitude maximale de la flèche (w_{\max}) obtenue au centre du dispositif d'essai :

$$\text{COURBURE} = \varphi = \frac{24}{23} \frac{w_{\max}}{l^2} \quad 5.14$$

Où l représente la distance entre chacun des deux points d'appui et le dispositif d'application en partie centrale des deux charges égales (courbure alors constante entre les deux charges).

Entre les points d'application des deux charges (charges nécessaires pour déformer le tube instrumenté jusqu'à atteindre la valeur souhaitée de flèche maximale au centre), toute variation de courbure donnée par la méthode d'inversion indiquera une imprécision du dispositif. Cette imprécision sera liée à la détermination des déformations à différentes distances de l'axe neutre par les fibres optiques donc, étant donné la très grande précision de mesure de déformation par fibre optique, essentiellement à la précision du positionnement des fibres et de la méthode d'inversion. L'erreur cumulative due à l'intégration depuis une extrémité pour déduire la déformée, laquelle est similaire pour les inclinomètres conventionnels par pendule inverse, n'intervient pas dans cette évaluation de la précision du dispositif.

Une autre source de variation de la courbure pourra cependant provenir de la présence des manchons de raccordement des longueurs de tube qui localement influent sur l'inertie du profil, donc sur la courbure. Les mesures pourraient donc mettre en évidence la position des manchons le long du tube.

5.2.3 Programme d'essais et de mesures

La détermination de la trajectoire du tube déformé à partir des mesures de déformations, le long du profil support des fibres optiques, en plusieurs points de sa section, est indépendante de l'orientation dans l'espace des différentes ailettes du profilé qui seulement doivent être orientées à 90° les unes des autres. La déformée tridimensionnelle est directement déterminée par l'analyse inverse des déformées des quatre fibres périphériques et de la fibre centrale (servant à identifier une éventuelle elongation ou torsion du profilé support). Toutefois, comme expliqué ci-après, la précision du dispositif (mesures et analyse inverse) pourrait être affectée par l'orientation des ailettes du profil support des fibres optiques.

Par conséquent, pour cette sollicitation en flexion plane, deux orientations des ailettes par rapport au plan de courbure ont été considérées, dans l'objectif d'évaluer l'influence de la direction des ailettes par rapport à la direction des déplacements sur la précision de la déformée obtenue par analyse inverse. La Figure 5.7 décrit ces deux orientations, notées respectivement « 0-90 » et « 45-45. » Dans la première, deux ailettes opposées sont placées dans le plan de courbure (horizontal). Lors de la flexion, la fibre optique sur l'ailette en extrados (a) subira une elongation et la fibre optique en intrados (c) une compression. En supposant vérifiée l'hypothèse d'Euler-Bernoulli (les sections droites restent planes), ces deux valeurs suffisent à déterminer la courbure. Les fibres sur les deux autres ailettes ((b) et (d) dans la figure), par définition dans le plan neutre, en principe ne subiront aucune déformation.

Dans la seconde, les quatre ailettes sont placées à 45° par rapport au plan flexion. Les quatre ailettes seront déformées. Les deux fibres côté extrados ((a) et (d)) subiront une même elongation et les des fibres côté intrados ((b) et (c)) une même compression. Si l'hypothèse de la flexion des poutres d'Euler-Bernoulli est respectée (les sections droites restent planes), la déformation des deux fibres allongées devrait être de l'ordre de $\sqrt{2}/2$ fois la déformation de la fibre en extension dans la première configuration d'orientation des ailettes (0-90). Idem pour les fibres en compression. En réalité, comme le montre la figure, les fibres optiques étant en réalité positionnées en surface des ailettes, ces considérations ne seront pas strictement vérifiées. Cependant détermination de la courbure et analyse inverse pour reconstruire la déformée ne devraient pas être affectées de manière significative par l'orientation des ailettes.

Dans ces essais de flexion plane en conditions contrôlées, le tube ne subit aucune torsion ni allongement. L'orientation des ailettes est fixée par la position des gorges internes du tube inclinométrique, qui guident les ailettes lors de l'introduction du profilé support dans le tube. Le tube instrumenté a donc été mis en place une première fois avec deux gorges (et ailettes) dans le plan horizontal et une seconde fois avec les gorges (et ailettes) formant un angle de l'ordre de 45° avec le plan horizontal.

Pour chacune des orientations des ailettes, la sollicitation de flexion quatre points a été appliquée pour atteindre cinq valeurs croissantes de flèche maximale au centre du dispositif, gouvernant la géométrie complète de la déformée (en fait, correspondant à des flèches imposées au droit des deux points d'application des efforts de l'ordre de 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m et 2.5 m). Pour chaque valeur de flèche maximale imposée, la flèche réelle a directement été mesurée à différentes abscisses le long du tube. Par ailleurs, les déformations des fibres optiques le long du profilé en différents points de sa section ont été enregistrées en vue de déterminer la courbure et reconstituer la déformée par analyse inverse.

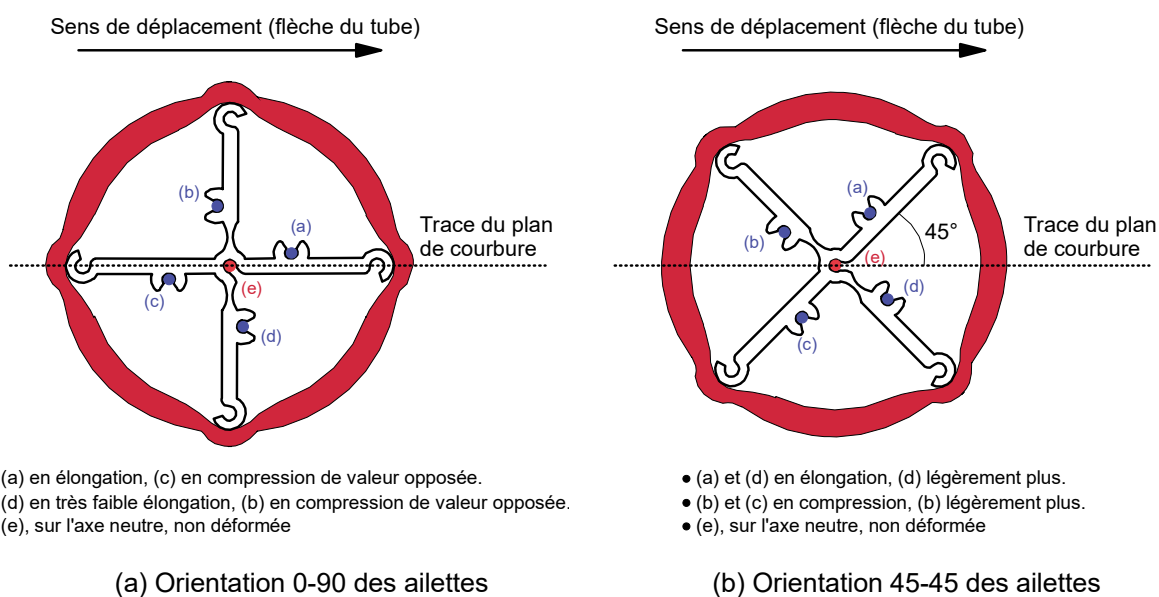


Figure 5.7. Orientations des ailettes par rapport au plan de flexion (de courbure)

5.2.4 Déformations observées dans les fibres optiques pendant les essais

Les essais ont montré que les mesures de déformations le long des fibres optiques pour les deux orientations des ailettes de la structure support par rapport au plan de flexion (0-90 ou 45-45) conduisaient par analyse inverse à des distributions de courbure et des déformées de structure support très proches. Cette conclusion permet d'attester de la robustesse du dispositif à déterminer les déformées d'une structure linéique par fibres optiques. En fait, le dispositif peut être installé en forage quelle que soit la direction du déplacement transverse (en supposant que le tube inclinométrique ne subisse pas de torsion à l'installation et pendant sa sollicitation dans le terrain). Dans la suite, seules les mesures et leur interprétation pour l'orientation 45-45 des ailettes n'est présentée.

Comme indiqué en Section 3.3, sur la mise en œuvre des fibres pour interrogation depuis une seule extrémité de la structure support, deux longueurs continues de fibre ont été employées pour instrumenter la structure support longue de 20 m. La Figure 5.8 permet de repérer le trajet des deux longueurs de fibre pour constituer l'ensemble des six fibres qui parcourent la structure support parallèlement à son axe neutre. La première longueur fait un seul aller-retour, l'aller étant une fibre périphérique distante de 24 mm de l'axe neutre (dans la figure, notée 1 et de couleur jaune) et le retour correspondant à la fibre placée à l'axe neutre (notée 2 et de couleur rouge). La seconde longueur fait deux aller-retours pour constituer les quatre fibres périphériques situées à 10 mm de l'axe neutre (dans la figure notées 3, 4, 5 et 6 et de couleurs respectives vert, orange, bleu et gris).

Le sens de déplacement du tube inclinométrique (contenant la structure support équipée des fibres optiques) pendant les essais a été représenté en Figure 5.8(a), au-dessus de la section droite de la structure support. Comme présenté dans la suite, la fibre 1, de couleur jaune, subira ainsi pendant les essais de flexion une élévation, supérieure à celle de la fibre 4 d'un facteur de l'ordre de $26.5/10$ (soit 2.65), liée à la distance de ces fibres au plan neutre.

Enfin, il peut être observé que la fibre 1 (en jaune), à 24 mm de l'axe neutre, ne figure pas dans l'analyse présentée en Section 4.2 sur la relation entre la déformée de la structure support et les déformations correspondantes en différents points des sections droites le long de la structure. En fait, les mesures de déformation le long de cette fibre étant disponibles, ces

dernières ont toutefois également été intégrées dans l'analyse inverse pour calculer l'orientation du plan de courbure, la valeur de la courbure et la déformation axiale et, par suite, reconstruire la géométrie de la déformée de l'axe neutre.

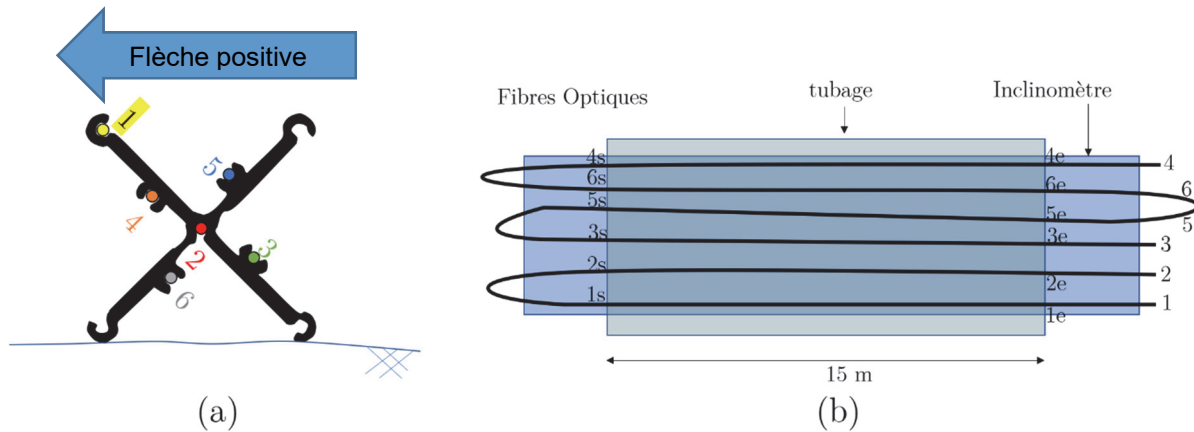


Figure 5.8. Repérage sur les longueurs continues de fibre optique des brins correspondant aux mesures de déformations dans les sections droites

Une étape préalable à la réalisation des essais et des mesures est donc de repérer, le long des brins continus de fibre optique, l'abscisse curviligne le long des brins des points d'entrée et de sortie du tube inclinométrique long de 15 m pour chacune des six fibres. Pour déterminer ces abscisses curvilignes, la fibre optique est légèrement pincée en ces points, générant un signal observé par l'interrogateur, lequel est repéré par sa distance depuis le connecteur optique. En outre, les mesures de déformation étant réalisées tous les 2.3 mm dans le sens croissant des abscisses curvilignes le long d'un brin continu de fibre optique, les portions de fibre dans le sens « retour », i.e. de l'extrémité opposée à l'interrogateur à l'extrémité où les fibres sont connectées à l'interrogateur, doivent être inversées pour coïncider à la même distance depuis l'extrémité du tube que pour les fibres dans le sens « aller ».

Le Tableau 5.1 donne les distances depuis le connecteur optique, le long des deux brins continus de fibre optique, des points d'entrée et de sortie du tube inclinométrique de chacune des six fibres optiques qui seront utilisées pour calculer la déformée du tube inclinométrique. Les déformations observées le long des deux brins continus de fibre optique peuvent ainsi être localisées pour être mises en parallèle et correspondre aux mesures de déformations dans une même section, à l'abscisse x d'un point du tube inclinométrique. La dernière colonne donne la longueur de fibre détectée entre les extrémités du tube inclinométrique. Ces longueurs sont supérieures à la longueur du tube (15 m), correspondant probablement au cumul de légères ondulations de la fibre le long de la structure support (au plus de 1 %).

Tableau 5.1. Repérage des points d'entrée et de sortie du tube inclinométrique des six fibres optiques le long des deux brins continus de fibre utilisés

Brin continu	Fibre optique	Distance depuis le connecteur optique		Longueur de fibre entre entrée et sortie (mm)
		Point d'entrée (mm)	Point de sortie (mm)	
1	1	5240	20430	15010
1	2	40110	25110	15000
2	3	6440	21500	15060
2	4	83500	68400	15100
2	5	41250	26120	15130
2	6	48500	63650	15150

Enfin, pour reconstruire une courbe dans l'espace connaissant, en tout point le long de cette courbe, de la direction de son plan de courbure et sa courbure, il est nécessaire de connaître au moins un point de passage. Dans les essais de flexion réalisés, le tube inclinométrique subissant de grands déplacements glisse sur ses appuis à abscisse (x) fixe. Les positions des points d'appuis le long du tube (où la flèche (y) sera nulle) varient donc avec l'amplitude de flèche maximale appliquée.

Pour chaque valeur de flèche appliquée au droit des deux points d'appui, le Tableau 5.2 donne la longueur libre de tube inclinométrique entre l'extrémité côté interrogateur (entrée) et le premier appui simple rencontré depuis cette extrémité. De même côté opposé à l'interrogateur (sortie). Pour calculer la déformée par analyse inverse à partir des déformations dans les fibres, ces longueurs seront employées pour identifier la section du dispositif où la flèche sera imposée nulle. Il peut être observé que la symétrie du dispositif d'essai est conservée pour les différentes valeurs de flèche maximale appliquées.

Tableau 5.2. Longueurs libres mesurées de tube inclinométrique au-delà des points d'appui pour les différentes valeurs de flèche appliquée

Flèche appliquée au droit des deux points de chargement (cm)	Longueur libre côté « entrée » (cm)	Longueur libre côté « sortie » (cm)
0	159	160
50	155.4	155
100	144	143
150	126.6	126.2
200	103.8	102.9
250	76.3	75

La Figure 5.9 montre, à partir de la position initiale du tube, l'accroissement de déformations mesurées dans les six fibres optiques le long des 15 m de tube inclinométrique, pour les cinq valeurs de flèche appliquée au droit des deux points de chargement. La numérotation des fibres est la même que celle indiquée précédemment, en Figure 5.8(a), représentant la section de la structure support équipée des six fibres. Sur la longueur de 15 m de tube inclinométrique, chaque courbe comporte de l'ordre de 6500 points de mesure de déformation.

La fibre 1, en extrados et la plus éloignée de l'axe neutre, subit les plus grandes déformations d'allongement (positif). Sa déformation maximale, de l'ordre de 0.35 %, est admissible sans dommage pour la fibre optique. Les déformations dans la fibre 2, à l'axe neutre, sont quasiment nulles entre les appuis simples pour toutes les valeurs de flèche appliquée. Les déformations mesurées aux extrémités peuvent être liées à des efforts parasites exercés par la structure support qui dépasse à chaque extrémité du tube inclinométrique.

Enfin, les fibres 3 et 4 (comme les fibres 5 et 6), quasiment symétriques par rapport au plan neutre subissent des déformations d'allongement ou de raccourcissement opposées, du même ordre de grandeur en valeur absolue. La faible différence provient probablement du fait que les plans comportant deux fibres périphériques opposées ne sont pas exactement à 45° du plan de courbure, car collées en surface des ailettes, elles-mêmes effectivement à 45° du plan de courbure pendant les essais. Les variations localisées de manière identique dans ces quatre fibres (repérés dans le graphe de la fibre 3) traduisent l'influence de la variation de la rigidité de flexion du tube inclinométrique causée par la présence des manchons.

Comme exposé dans ce qui précède, la détermination de la trajectoire du tube déformé à partir des mesures de déformations est cependant indépendante de l'orientation dans l'espace des différentes ailettes du profilé qui seulement doivent être orientées à 90° les unes des autres. Les résultats du dépouillement de ces mesures de déformation (pour déterminer la direction du plan de courbure et la valeur de la courbure dans chaque section de la structure support, puis pour reconstruire la déformée) sont donnés en Section suivante.

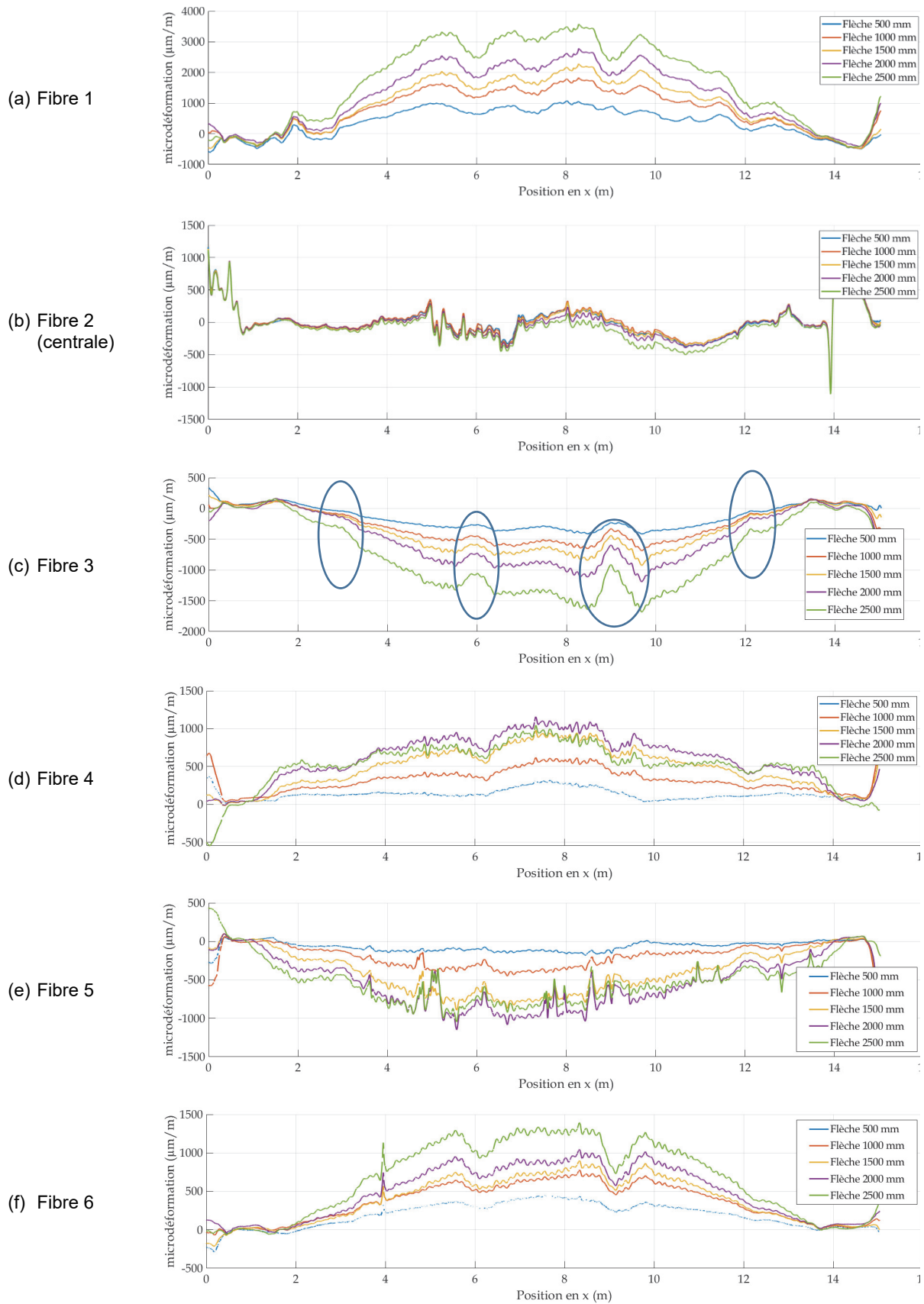


Figure 5.9. Déformations observées dans les six fibres le long des 15 m de tube inclinométrique (déformations à partir de la position initiale du tube inclinométrique)

5.2.5 Dépouillement et interprétation

Pour les sollicitations de flexion plane quatre points appliquées au tube inclinométrique, la déformation axiale est nulle et, aux incertitudes du dispositif de mesure près, la direction du plan de courbure est constante. Dans ce cas, le dépouillement des mesures de déformation dans les fibres optiques consiste donc, d'une part, à déduire les valeurs de courbure le long de la structure support et, d'autre part, à reconstruire sa déformée. La suite de cette Section présente les résultats de ce dépouillement et les compare aux valeurs théoriques ou, pour la déformée, directement à celle observée lors des essais.

Concernant la courbure, pour les cinq valeurs de flèche imposée, la Figure 5.10 montre le résultat brut de l'inversion donnant la courbure au droit des 5770 sections de mesures sur la longueur du tube inclinométrique. La valeur de la courbure déduite des mesures de déformations dans les fibres optiques présente un « bruit » relativement important entre sections de mesure des déformations distantes de 2.6 mm. En fait les mesures de déformation présentées en Section précédente étaient bruitées, tout comme le sont en conséquence les valeurs de courbure obtenues par analyse inverse.

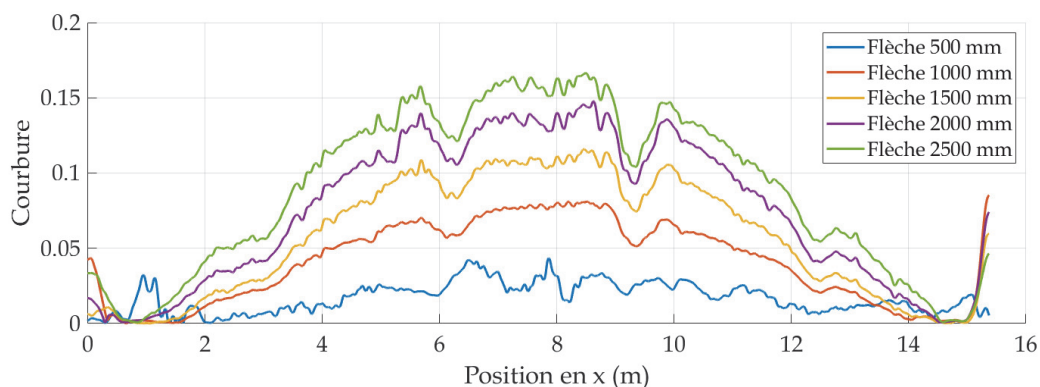


Figure 5.10. Courbure de long du tube inclinométrique déduite des mesures de déformations dans les fibres optiques pour les cinq valeurs de flèche imposées

NB concernant les grands déplacements : Ce graphe représente la courbure en fonction de l'abscisse curviligne du point considéré le long du tube inclinométrique long de 15 m. Le tube glisse sur ses appuis, donc l'abscisse des points d'appuis et d'application des charges de l'essai de flexion quatre points varient suivant les flèches imposées.

Dans la Figure 5.10, les extrémités du tube inclinométrique de part et d'autre des appuis simples correspondent aux portions où la courbure est quasiment nulle. Comme indiqué par la théorie, pour chacune des courbes, à partir des appuis, la courbure augmente approximativement linéairement jusqu'aux points d'application des charges et enfin est pratiquement constante dans la partie centrale, entre les points d'application des charges. Ces considérations permettent de localiser les appuis et les points d'application des charges le long du tube inclinométrique instrumenté. Enfin, les deux diminutions de courbure localisées dans ces graphes correspondent aux emplacements des deux manchons du tube inclinométrique qui localement raidissent le tube dans la zone d'essai.

Pour chacune des cinq valeurs de flèche maximale imposée dans les essais (correspondant à 0.5 m, 1 m, 1.5 m, 2 m et 2.5 m au droit des points d'application des efforts), les Tableau 5.3 à Tableau 5.7, pages suivantes, respectivement donnent aux différents points d'abscisses (x), les valeurs de flèche et courbure mesurées, théoriques ou déduites par analyse inverse des mesures de déformation dans les fibres optiques. L'essai étant symétrique, les points considérés vont de l'abscisse 0, correspondant à l'un des appuis simples, à l'abscisse 6 m, au centre du dispositif d'essai, où la flèche est maximale. Le point d'abscisse 4 m correspond à l'un des deux points d'imposition des charges. Les lignes grisées correspondent aux points situés dans la portion du tube où la courbure est en théorie constante.

Tableau 5.3. Valeurs de flèche et de courbure – $w_{\text{Point-F}} = 0.50 \text{ m}$

Abscisse x (m)	Flèche (cm)			COURBURE (1/m)	
	Observée	Théorique	Analyse inverse	Théorique	Analyse inverse
0	0.0	0.00	1.42	0.0000	0.0009
1	16.5	14.84	16.0	0.0094	0.0083
2	29.1	28.75	29.6	0.0187	0.0151
3	41.4	40.78	41.8	0.0281	0.0295
4	50.5	50.00	51.2	0.0375	0.0291
5	56.1	55.63	57.2	0.0375	0.0491
6	57.9	57.50	59.1	0.0375	0.0435

Tableau 5.4. Valeurs de flèche et de courbure – $w_{\text{Point-F}} = 1.00 \text{ m}$

Abscisse x (m)	Flèche (cm)			COURBURE (1/m)	
	Observée	Théorique	Analyse inverse	Théorique	Analyse inverse
0	0.0	0.00	1.0	0.0000	0.0033
1	31.5	29.69	32.8	0.0188	0.0199
2	58.1	57.50	60.5	0.0375	0.0395
3	81.7	81.56	84.0	0.0562	0.0572
4	100.0	100.00	101.4	0.0750	0.0655
5	111.1	111.25	112.5	0.0750	0.0696
6	115.4	115.00	116.5	0.0750	0.0776

Tableau 5.5. Valeurs de flèche et de courbure – $w_{\text{Point-F}} = 1.50 \text{ m}$

Abscisse x (m)	Flèche (cm)			COURBURE (1/m)	
	Observée	Théorique	Analyse inverse	Théorique	Analyse inverse
0	0.00	0.00	5.5	0.0000	0.0040
1	47.7	44.53	49.4	0.0281	0.0258
2	88.4	86.25	90.7	0.0562	0.0538
3	123.5	122.34	125.6	0.0844	0.0833
4	150.5	150.00	151.5	0.1125	0.0990
5	166.1	166.88	167.3	0.1125	0.1004
6	172.4	172.50	172.9	0.1125	0.1074

Tableau 5.6. Valeurs de flèche et de courbure – $w_{\text{Point-F}} = 2.00 \text{ m}$

Abscisse x (m)	Flèche (cm)			COURBURE (1/m)	
	Observée	Théorique	Analyse inverse	Théorique	Analyse inverse
0	0.00	0.00	7.5	0.0000	0.0081
1	61.9	59.38	69.1	0.0375	0.0398
2	118.6	115.00	122.8	0.0750	0.0729
3	165.2	163.13	169.3	0.1125	0.1107
4	202.0	200.00	202.8	0.1500	0.1270
5	220.6	222.50	222.6	0.1500	0.1275
6	227.9	230.00	229.7	0.1500	0.1346

Tableau 5.7. Valeurs de flèche et de courbure – $w_{\text{Point-F}} = 2.50 \text{ m}$

Abscisse x (m)	Flèche (cm)			COURBURE (1/m)	
	Observée	Théorique	Analyse inverse	Théorique	Analyse inverse
0	0.00	0.00	10.4	0.0000	0.0080
1	81.0	74.22	90.1	0.0469	0.0560
2	150.3	143.7	158.9	0.0937	0.0966
3	206.7	203.9	214.2	0.1406	0.1370
4	248.6	250.0	252.4	0.1875	0.1476
5	274.6	278.1	275.5	0.1875	0.1476
6	283.9	287.5	283.2	0.1875	0.1578

Les tableaux de résultats précédents montrent que les valeurs de courbure déduites des mesures de déformations par fibre optique sont généralement inférieures aux valeurs théoriques. Le bruitage de la courbure apparaît beaucoup plus marqué pour la plus faible valeur de flèche imposée, où la courbure le long du tube en fait est relativement faible. Il est possible que ce résultat soit lié à la présence de manchons qui tous les trois mètres augmentent la raideur du tube. Dans le Tableau 5.3 (pour la plus faible flèche), la courbure indiquée pour chaque abscisse est en fait une valeur moyenne sur une dizaine de points autour de l'abscisse considérée, soit sur une longueur de l'ordre de 3 cm du dispositif.

Concernant la déformée du tube inclinométrique, la Figure 5.11 compare les déformées observées pendant les essais (courbes avec puces) à celles reconstruites par analyse inverse à partir des mesures de déformations (courbes « continues », avec un point tous les 2.3 mm). Il peut être noté que les positions des appuis simples, à 0 et 12 m dans les essais, ne semblent pas parfaitement localisées le long du tube inclinométrique : les points de flèche nulle calculés apparaissent légèrement avant le point d'appui d'abscisse nulle et légèrement après le point d'appui d'abscisse 12 m. Il est possible que cela soit dû à l'influence des appuis sur les mesures, ou à une prise en compte incorrecte du glissement du tube sur les appuis simples. Toutefois, de telles conditions limites, avec des appuis simples sur lesquels le tube inclinométrique est susceptible de glisser, ne seront pas rencontrées en pratique pour l'observation des mouvements dans les sols.

Néanmoins, pour ces essais en conditions contrôlées, il apparaît nettement que les déformées directement observées tous les 0.50 cm pendant les essais coïncident relativement précisément avec les déformées calculées à partir des mesures de déformations dans les fibres optiques. En fait, l'intégration des courbures depuis une extrémité du tube permet de lisser les résultats : une courbure localisée excessive déduite des mesures de déformation dans une section étant compensée par une courbure insuffisante dans la section suivante.

5.3 Conclusion

Les essais de flexion simple quatre points réalisés ont confirmé que la direction des ailettes du dispositif par rapport à la direction du déplacement imposé était sans influence sur la déformée calculée par analyse inverse à partir des déformations mesurées par fibres optiques le long de la structure support.

Pour les relativement faibles courbures appliquées lors des essais (rayon de courbure compris entre 5 et 26 m), les déformations mesurées sont relativement « bruitées » entre sections distantes de 2.3 mm, tout comme par conséquent la courbure déduite des mesures de déformations par analyse inverse.

Par contre, les déformées obtenues par analyse inverse des déformations correspondent très bien aux déformées observées directement pendant les essais, une courbure excessive dans une section étant compensée par une courbure sous-estimée dans la suivante.

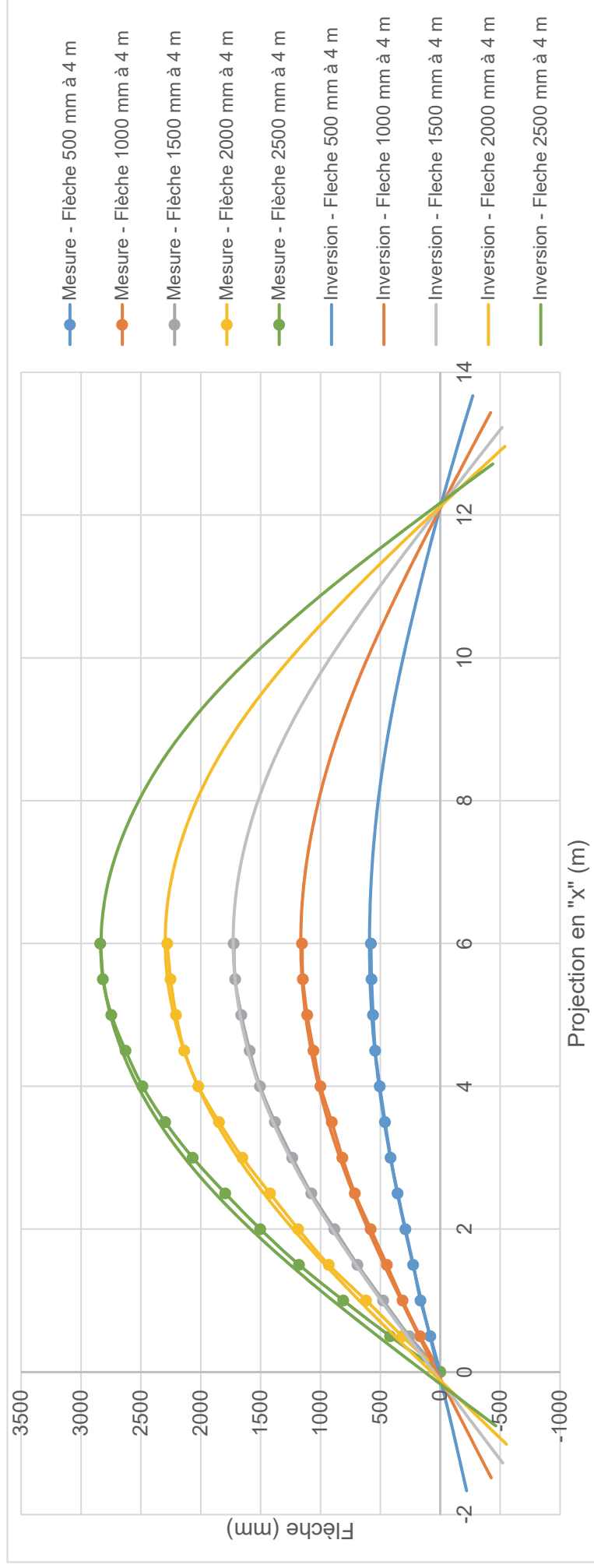


Figure 5.11. Comparaison des déformées observées et calculées par analyse inverse des déformations dans les fibres optiques

6 Conclusion et perspectives

Suite à l'étude de faisabilité (Rajot et al. (2021)), la conception du dispositif d'observation des déplacements dans les sols et les roches le long d'une ligne a été finalisée. Pour éviter une rupture technologique trop importante, ce dispositif est constitué d'un profilé support en PEHD comportant quatre ailettes radiales, à 90° les unes des autres, qui coulissent dans les quatre gorges internes des tubes inclinométriques usuels. Une fibre optique est collée à l'axe neutre du profilé et quatre fibres périphériques parallèles à l'axe neutre, une par ailette, sont collées à une distance de 10 mm de l'axe neutre. Cette distance est un compromis adapté à la technologie actuelle des fibres optiques et aux courbures maximales à observer dans les sols.

En pratique les tubes inclinométriques actuels peuvent donc être scellés dans des forages de direction quelconque, puis équipés du nouveau dispositif avec fibres optiques pour suivre les déformées des tubes. Une filière métallique a été fabriquée pour produire le profilé support des fibres optiques par extrusion de PEHD. Une longueur de 100 m de profilé support des fibres optiques a été produite pour tester le nouveau dispositif en conditions contrôlées et ainsi évaluer ses performances.

L'analyse permettant de reconstituer la déformée du profilé à partir des déformations locales mesurées par fibres optiques a été décrite en détail. En supposant vérifiée l'hypothèse de la théorie des poutres de Bernoulli (les sections droites perpendiculaires à l'axe neutre restent planes pendant la flexion), les fibres optiques périphériques permettent de mesurer les déformations en plusieurs points d'une section droite et, par analyse inverse, de déterminer l'orientation du plan de courbure et la valeur de la courbure. La fibre située à l'axe neutre permet de caractériser la déformation axiale et de détecter une éventuelle torsion de la structure support. La déformation axiale et ces descripteurs géométriques locaux de l'axe neutre peuvent alors être intégrés pour, de proche en proche, reconstituer la déformée de la structure support par rapport à sa position initiale.

Des essais de flexion plane quatre points ont été réalisés en laboratoire sur un tube inclinométrique long de 15 m parcouru par le profilé support équipé des fibres optiques. Des courbures croissantes relativement faibles (rayon de courbure compris entre 5 et 26 m) ont été appliquées au tube lors des essais. Pour chaque courbure, les déformées du tube ont été directement observées et les déformations dans les fibres optiques mesurées dans des sections droites espacées de 2.6 mm. Ces essais ont montré les points suivants :

- La direction des ailettes du dispositif par rapport à la direction du déplacement imposé est sans influence sur la déformée calculée par analyse inverse à partir des déformations mesurées par fibres optiques le long de la structure support.
- Les déformations mesurées apparaissent relativement « bruitées » entre sections distantes de 2.6 mm, tout comme par conséquent la courbure déduite des mesures de déformations par analyse inverse.
- Les déformées obtenues par analyse inverse des déformations correspondent très bien aux déformées observées directement pendant les essais, une courbure excessive dans une section étant compensée par une courbure sous-estimée dans la suivante.

Les résultats étant concluants, le nouveau dispositif d'observation des déplacements dans les sols par fibre optique sera évalué *in situ*, dans le grand glissement de terrain de Charlaix affectant la RN 85 près de La Mûre (38). Il sera introduit dans un tube inclinométrique de longueur 20 m scellé dans un forage vertical, à proximité d'un second tube servant aux relevés par sonde inclinométrique courante, basée sur pendule inverse.

En termes de perspective également, la conception et la mise en œuvre du dispositif en grandeur réelle au laboratoire a montré que, suivant application considérée, il serait plus judicieux et économique de développer deux dispositifs complémentaires :

- (1) Trajectographie de forage et déplacements perpendiculaires à une ligne. Un profilé support de longueur réduite (de l'ordre de 2 m) équipé de fibres optiques faciliterait le transport sur site et supprimerait les difficultés sur le terrain d'introduction dans un tube inclinométrique.

Ce dispositif de longueur réduite serait introduit de manière incrémentale dans le tube, avec mesure des déformations à chaque incrément, de manière à reconstituer de proche en proche la déformée complète. Ce dispositif utilisable dans une direction quelconque remplacerait la sonde inclinométrique actuelle pour les forages verticaux.

Par rapport à l'équipement du forage sur toute sa longueur, qui n'est pas utile pour cette application, la longueur de fibre optique nécessaire serait fortement réduite. Le coût d'achat actuel (2022) de la fibre optique est de l'ordre de 3 €/HT/m. Pour une longueur de profilé de 20 m, l'instrumentation représente plus de 120 m de fibre optique, soit 360 €/HT, sans compter la colle spécifique et sa mise en œuvre par l'équipe technique.

- (2) Extensométrie en forage. Par contre, le dispositif développé dans cette étude peut être avantageusement employé pour l'extensométrie en forage. Pour cette application, le dispositif doit être scellé sur toute la longueur du forage, sans tubage. Dans ce cas, l'orientation initiale des ailettes dans le forage doit être déterminée, ce qui suppose de traiter la question de la torsion possible du dispositif à la mise en œuvre et dans le temps.

Les extensomètres actuels à câbles supposent que les déplacements observés en tête proviennent des déplacements dans la direction du forage des ancrages de scellement des câbles de différentes longueurs utilisés. En fait, pour les mouvements de terrains, des déplacements transversaux peuvent contribuer aux déplacements mesurés en tête et, par conséquent, être pour partie assimilés à des déplacements longitudinaux. L'utilisation du nouveau dispositif de mesure basé sur la mesure de déformation par fibre optique renseignerait sur le champ de déplacement réel, dans l'axe du forage et transverse.

Annexe A : Références bibliographiques

Cui, J., Zhao, S., Yang, C., Tan, J., 2018. Parallel Transport Frame for Fiber Shape Sensing. IEEE Photonics Journal 10, 1–12. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2782736>

Jäckle, S., Eixmann, T., Schulz-Hildebrandt, H., Hüttmann, G., Pätz, T., 2019. Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation. Int J Comput Assist Radiol Surg 14, 2137–2145. <https://doi.org/10.1007/s11548-019-02059-0>

Moore, J.P., Rogge, M.D., 2012. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions. Opt. Express, OE 20, 2967–2973. <https://doi.org/10.1364/OE.20.002967>

Paloschi, D., Korganbayev, S., Bronnikov, K., Wolf, A., Dostovalov, A., Saccomandi, P., 2020. Transformation matrices for 3D shape sensing with polyimide-coated multicore optical fiber, in: 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT. Presented at the 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT, pp. 250–254. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138221>

Rajot, J.P., Fargier, Y., Joffrin, P., Kadhour, A., Vermorel, N., Pruvost, C., 2021, Dispositif d'observation 3D des déplacements internes d'un massif de sol ou de roche par fibre optique – Faisabilité, Convention DGPR – Université Gustave Eiffel 2020 no. 2201239477 du 8 Juin 2020, Rapport Action 11, 35p.