



HAL
open science

Inclinométrie en tubes rainurés Aspects pratiques

Jean François Serratrice

► **To cite this version:**

Jean François Serratrice. Inclinométrie en tubes rainurés Aspects pratiques. Cerema Méditerranée. 2022. hal-04166775

HAL Id: hal-04166775

<https://hal.science/hal-04166775>

Submitted on 20 Jul 2023

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.

Inclinométrie en tubes rainurés

Aspects pratiques



Inclinométrie en tubes rainurés

Aspects pratiques

date : 27/09/2022

auteur : Jean François Serratrice

responsable de l'étude :

participants :

sous-traitants :

résumé de l'étude :

L'inclinométrie en sondage consiste à détecter et à mesurer des déplacements horizontaux dans un massif de sol ou de roche ou à proximité d'un ouvrage. Après un rappel des principes de la procédure, de nombreux exemples sont présentés pour illustrer la méthode d'exploitation des données. D'autres exemples mettent l'accent sur plusieurs problèmes rencontrés dans la pratique. Enfin, des exemples d'utilisation sont donnés dans le cadre du suivi de glissements de terrain ou de l'auscultation de différents types d'ouvrages. Partant de ces exemples, quelques recommandations sont préconisées pour un meilleur usage de l'inclinométrie en tubes rainurés.

nombre de pages : 108

n° d'affaire :

maître d'ouvrage :

référence :

citation :

Serratrice J.F., 2022. Inclinométrie en tubes rainurés. Aspects pratiques. Rapport Cerema Méditerranée, Septembre 2022, 108 p.

Inclinométrie en tubes rainurés

Aspects pratiques

J.F. Serratrice

Résumé

L'inclinométrie en sondage consiste à détecter et à mesurer des déplacements horizontaux dans un massif de sol ou de roche ou à proximité d'un ouvrage à l'aide d'un tube vertical scellé dans le massif, puis ausculté à l'aide d'une sonde de mesure angulaire. L'auscultation consiste à mesurer les variations angulaires de la pente du tube en différentes stations équiréparties sur sa longueur et au cours de relevés effectués à des dates successives. La technique s'applique ici à des tubes rainurés dont quatre génératrices disposées à 90 degrés forment des rainures de guidage de la sonde de mesure. Les mesures inclinométriques sont entachées d'erreurs et de dérives instrumentales. Il est d'usage de procéder à des doubles mesures en station par retournement de la sonde dans chacune des deux directions orthogonales du tube, afin de qualifier la qualité des relevés et afin d'évaluer l'incertitude qui affecte les variations angulaires. Ce calcul est amélioré avec la présence d'une partie encastrée du tube en profondeur. Après un rappel des principes de la procédure, de nombreux exemples sont présentés pour illustrer la méthode d'exploitation des données. D'autres exemples mettent l'accent sur plusieurs problèmes rencontrés dans la pratique. Enfin, des exemples d'utilisation sont donnés dans le cadre du suivi de glissements de terrain ou de l'auscultation de différents types d'ouvrages. Partant de ces exemples, quelques recommandations sont préconisées pour un meilleur usage de l'inclinométrie en tubes rainurés.

Mots clefs – inclinométrie, tube rainuré, variation angulaire, incertitude, flambement

Citation : Serratrice J.F., 2022. Inclinométrie en tubes rainurés. Aspects pratiques. Rapport Cerema Méditerranée, Septembre 2022, 108 p.

Présentation

Ce document reprend le paragraphe 5.2 "Etudes sur l'inclinométrie" du mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches intitulé " Étude expérimentale du comportement des sols, des roches et des ouvrages géotechniques" présenté en Mai 2009 à l'Université de Caen / Basse Normandie (Serratrice, 2009). Un extrait du dossier de présentation de ce mémoire, se rapportant au paragraphe 5.2, est reproduit ci-après.

[Dans le chapitre 5 relatif à la surveillance d'ouvrages géotechniques ou de pentes instables], une première "étude sur l'inclinométrie" est remarquable par la rigueur de la démarche développée et l'abondance des données expérimentales prises en compte, relatives à différents glissements de terrains ou ouvrages géotechniques. Ce sujet est plus complexe qu'on ne le pense en général et on peut se réjouir que la rédaction de ce mémoire soit l'occasion de faire le point sur ces techniques qui visent principalement, à l'aide de tubes rainurés installés dans le massif et d'une sonde inclinométrique, à identifier la présence ou l'apparition d'une surface ou d'une zone de cisaillement ou viennent se localiser préférentiellement les déformations du massif. Les différentes sources d'erreur pouvant affecter les mesures inclinométriques sont bien passées en revue, suivant une démarche expérimentale rigoureuse. De nombreuses illustrations issues de cas réels bien documentés viennent convaincre le lecteur. Il s'en suit diverses recommandations quant à la mise en œuvre de ces dispositifs. Des éléments technologiques (raccords entre tubes, différents types de flambements possibles des tubes rainurés, influence de la température sur les mesures, ...) apparaissent susceptibles de jouer un rôle important dans les résultats de mesures inclinométriques. Comme on recherche de plus en plus à caractériser des mouvements lents ou à surveiller des ouvrages géotechniques avec l'idée de détecter des seuils d'alerte fiables, la qualité des mesures inclinométriques et de leur interprétation doit être exemplaire. Ce chapitre constitue un "manuel" qui devrait être mis à la disposition de tous les bureaux d'étude qui font installer des dispositifs inclinométriques et interprètent des données inclinométriques. ...

Sommaire

Introduction

1. Inclinométrie en tubes rainurés

- 1.1 – Généralités
- 1.2 – Sources d'erreur
- 1.3 – Exemples d'illustration
- 1.4 – Comparaison de relevés successifs d'un même tube inclinométrique
- 1.5 – Comparaison simultanée de plusieurs relevés

2. Forme du tube inclinométrique

- 2.1 – Éléments géométriques du tube rainuré en station
- 2.2 – Approximation de la forme du tube dans le massif

3. Problèmes rencontrés

- 3.1 – Erreur d'étalonnage du capteur de mesure angulaire
- 3.2 – Influence de la pente moyenne du tube rainuré
- 3.3 – Problèmes aux raccords des éléments de tube
- 3.4 – Décalage en z
- 3.5 – Changement du pas de mesure

4. Flambement des tubes inclinométriques

- 4.1 – Flambement sans déplacement
- 4.2 – Flambement dans une couche "molle" du massif
- 4.3 – Flambement dans un remblai
- 4.4 – Flambement sous un remblai
- 4.5 – Flambement par défaut de scellement

5. Exemples particuliers

- 5.1 – Vitesse d'évolution variable
- 5.2 – Zone de cisaillement épaisse
- 5.3 – Plusieurs surfaces de rupture
- 5.4 – Flambement et rupture
- 5.5 – Déformation continue
- 5.6 – Déformation au pied d'un remblai sur sol mou
- 5.7 – Glissement et rotation
- 5.8 – Flambement par gonflement et retrait du massif
- 5.9 – Déformations de deux parois moulées
- 5.10 – Déformations au voisinage d'un tunnel

Conclusion

Références

Rapports

Inclinométrie en tubes rainurés

Aspects pratiques

Introduction

L'inclinométrie en sondage consiste à détecter et à mesurer des déplacements horizontaux dans un massif de sol ou de roche ou à proximité d'un ouvrage. Un tube vertical est scellé dans le massif, puis il est ausculté à l'aide d'une sonde de mesure angulaire qui donne la pente de l'axe du tube en différentes stations réparties à pas constant le long du tube. L'auscultation consiste à effectuer des relevés de ces pentes à des dates successives. La variation angulaire, c'est à dire la différence de pente mesurée entre deux relevés, permet de déterminer les éventuels mouvements du massif qui ont déformé le tube inclinométrique.

La mesure de la déformation du tube inclinométrique par comparaison de deux relevés successifs appelle à déterminer la position dans l'espace et à chacun des relevés de toutes les stations réparties le long du tube. Il faut donc mesurer la plus grande pente de l'axe du tube et son azimut en chacune des stations. Les sondes inclinométriques pour tube lisse fonctionnent selon ce principe. Cette technique permet ainsi de trouver la position du pied du tube par rapport à sa tête. Mais cette technique a été supplantée par l'utilisation de tubes rainurés dont quatre génératrices disposées à 90 degrés forment des rainures de guidage de la sonde de mesure. En chaque station du tube, le relevé consiste à mesurer les pentes dans les deux plans orthogonaux formés par les rainures.

Les mesures inclinométriques sont entachées d'erreurs dont les origines sont diverses et liées à la qualité du scellement du tube au terrain, à la coaxialité de la sonde, à la qualité du tube, à son vieillissement et à la perte de ses caractéristiques géométriques du fait du mouvement et enfin à des dérives instrumentales d'un relevé à l'autre. Les problèmes liés à ces dérives ont rendu nécessaire de procéder à des doubles mesures en station par retournement de la sonde dans chacune des deux directions orthogonales du tube. Ainsi, l'auscultation d'un tube rainuré au moyen d'une sonde dotée d'un capteur angulaire nécessite d'effectuer quatre passages par relevé (double mesure dans les deux plans orthogonaux des rainures). Cette double mesure de pente offre aussi la possibilité de qualifier les relevés, ainsi que la variation angulaire, par un calcul d'incertitude (Pincent et Blondeau, 1978 ; AFNOR, 1995).

Les diverses sources d'erreur qui entachent les mesures inclinométriques ont déjà fait l'objet d'une étude détaillée d'après l'expérience acquise au LRPC d'Aix-en-Provence (Serratrice, 1994). La qualité des mesures dépend de nombreux facteurs, essentiellement géométriques (guidage, positionnement en station de la sonde inclinométrique) et instrumentaux (bruit, dérive). Dans le cas des mouvements lents ou de la surveillance d'ouvrage, la qualité des mesures détermine

directement le délai de réponse du tube inclinométrique et donc sa capacité à jouer son rôle d'alerte. Cette synthèse a montré que l'incertitude sur la variation angulaire augmente avec la pente des tubes et leur courbure. Plus généralement, la qualité géométrique des tubes, une fois mis en place dans le massif, détermine pour une large part la qualité des mesures et par conséquent le délai de réponse du dispositif. Aussi, parmi les recommandations pour le bon usage de l'inclinométrie en sondage, celles relatives à l'installation des tubes dans le massif sont d'une grande importance, en appelant à mettre en place des tubes verticaux et rectilignes, bien scellés au terrain, exempts de défauts (intégrité des tubes, propreté des rainures, qualité des raccords entre les éléments de tube, orientation optimale par rapport aux mouvements attendus, etc.). Cette synthèse mettait aussi l'accent sur les problèmes de flambement des tubes inclinométriques.

Le présent travail prolonge l'étude précédente. Il s'appuie sur la mise au point d'une nouvelle version du logiciel Climul sous Windows, logiciel qui trouve son origine dans la méthode Clinex du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ; Pincet et Meignen, 1982) et permet d'exploiter simultanément plusieurs relevés effectués dans un tube rainuré (Serratrice, 1993). De nombreux exemples sont présentés pour illustrer le principe de l'exploitation des données (forme approximative du tube rainuré, courbes des variations angulaires et des déplacements relatifs dans les deux directions du tube en fonction de la profondeur, calcul des incertitudes, encastrement du tube, évolution des déformations en fonction du temps, etc.). D'autres exemples mettent l'accent sur plusieurs problèmes rencontrés dans la pratique (pente de tubes, raccords des éléments de tube, décalage en z, flambement, etc.). Enfin, des exemples d'utilisation de l'inclinométrie sont donnés dans le cadre du suivi de glissements de terrain (diverses formes de rupture, surfaces de rupture superposées, etc.) ou de l'auscultation de différents types d'ouvrages (remblais, murs, parois, tunnels). Partant de ces exemples, quelques recommandations sont préconisées pour un meilleur usage de l'inclinométrie en tubes rainurés.

1. Inclinométrie en tubes rainurés

1.1 – Généralités

L'inclinométrie en sondage consiste à détecter et à mesurer des déplacements horizontaux dans un massif de sol ou de roche ou à proximité d'un ouvrage. La mise en œuvre de cette technique d'auscultation commence par la foration d'un trou vertical dans le massif et l'installation d'un tube parfaitement scellé à la paroi du trou. La mesure de la pente du tube s'effectue à l'aide d'une sonde suspendue à un câble et qui s'adapte parfaitement à la paroi intérieure du tube. La sonde est équipée de capteurs de mesures angulaires (pendules, accéléromètres, gyromètres). Pour un tube inclinométrique donné, un relevé à une date donnée consiste à enregistrer ces mesures angulaires α_i du bas du sondage vers le haut, en différentes stations réparties le long du tube à pas constant. Le câble gradué donne la position de la sonde en chaque station par rapport à la tête du tube.

L'auscultation du tube inclinométrique comprend plusieurs relevés successifs dans le temps. Ces relevés sont comparés au relevé de référence, le relevé 01 par exemple, en effectuant la différence des mesures angulaires en chaque station, pour obtenir la variation angulaire $\Delta\alpha_i$. Si, dans une zone donnée du tube, les variations angulaires dépassent une certaine limite liée à la précision des mesures, il y a mouvement du tube. Si celui-ci est correctement scellé au terrain, ce mouvement révèle un déplacement horizontal du massif.

Cette technique d'inclinométrie en tubes rainurés a connu de larges développements à la fin des années 1970. Cette technique est couramment employée pour la détection des glissements de terrain (localisation de la surface de cisaillement en profondeur, vitesse d'évolution dans le temps) ou la surveillance de massifs après renforcement ou la surveillance d'ouvrages de soutènement en cours de construction.

Les problèmes liés aux dérives instrumentales ont rendu nécessaire de procéder à des doubles mesures en station par retournement de la sonde dans chacune des deux directions du tube. Ainsi, l'auscultation d'un tube rainuré au moyen d'une sonde dotée d'un capteur angulaire nécessite d'effectuer quatre passages par relevé (double mesure dans les deux plans orthogonaux des rainures). Cette double mesure de pente offre aussi la possibilité de qualifier les relevés, ainsi que la variation angulaire, par un calcul d'incertitude (Pincent et Blondeau, 1978). Dans la suite, on notera AA' le plan principal des rainures (situé le plus souvent dans la direction des mouvements attendus) et BB' le plan orthogonal.

La détection d'un mouvement éventuel du massif et l'interprétation de mesures reposent sur la comparaison des variations angulaires $\Delta\alpha_i$ aux bornes d'un intervalle de confiance calculé à partir des demi-sommes. L'intégration de $\Delta\alpha_i$ sur le pas des stations, du bas du sondage vers le haut ou à partir du sommet d'une zone réputée fixe en profondeur, permet de calculer le déplacement relatif Δd_i du tube inclinométrique entre les deux relevés considérés. Cette méthode s'applique à toutes les techniques d'inclinométrie en sondage et en particulier à l'inclinométrie en tubes rainurés. La détection des mouvements s'opère à partir des variations angulaires, et non pas à partir du déplacement relatif, et, dans tous les cas, il s'agit de connaître l'incertitude par rapport à laquelle on peut conclure à l'existence ou non d'un mouvement du massif.

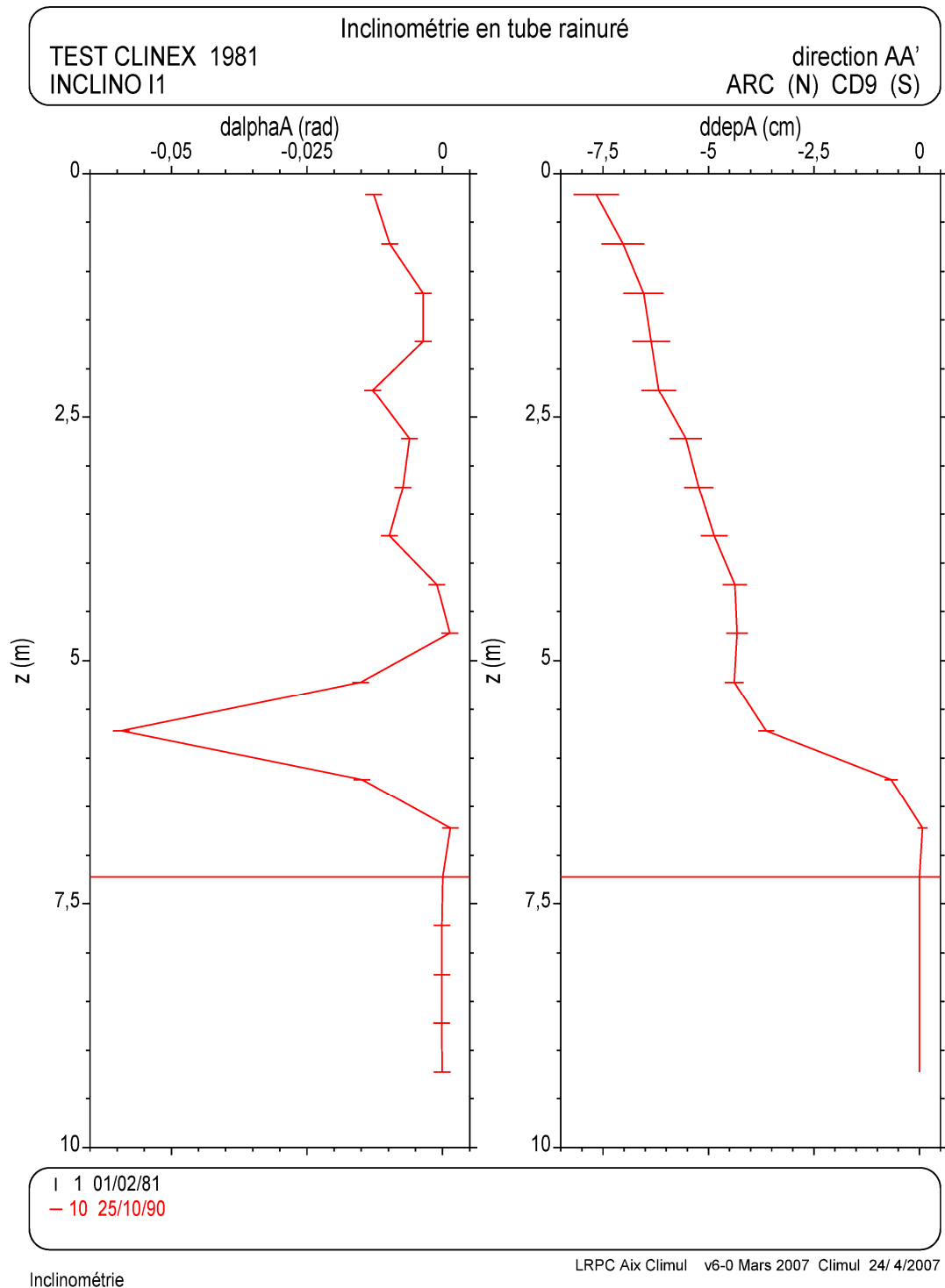


Figure 1a : Exemple 1.

Comparaison de deux relevés inclinométriques (01 et 10). Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 10 porte les barres d'incertitude.

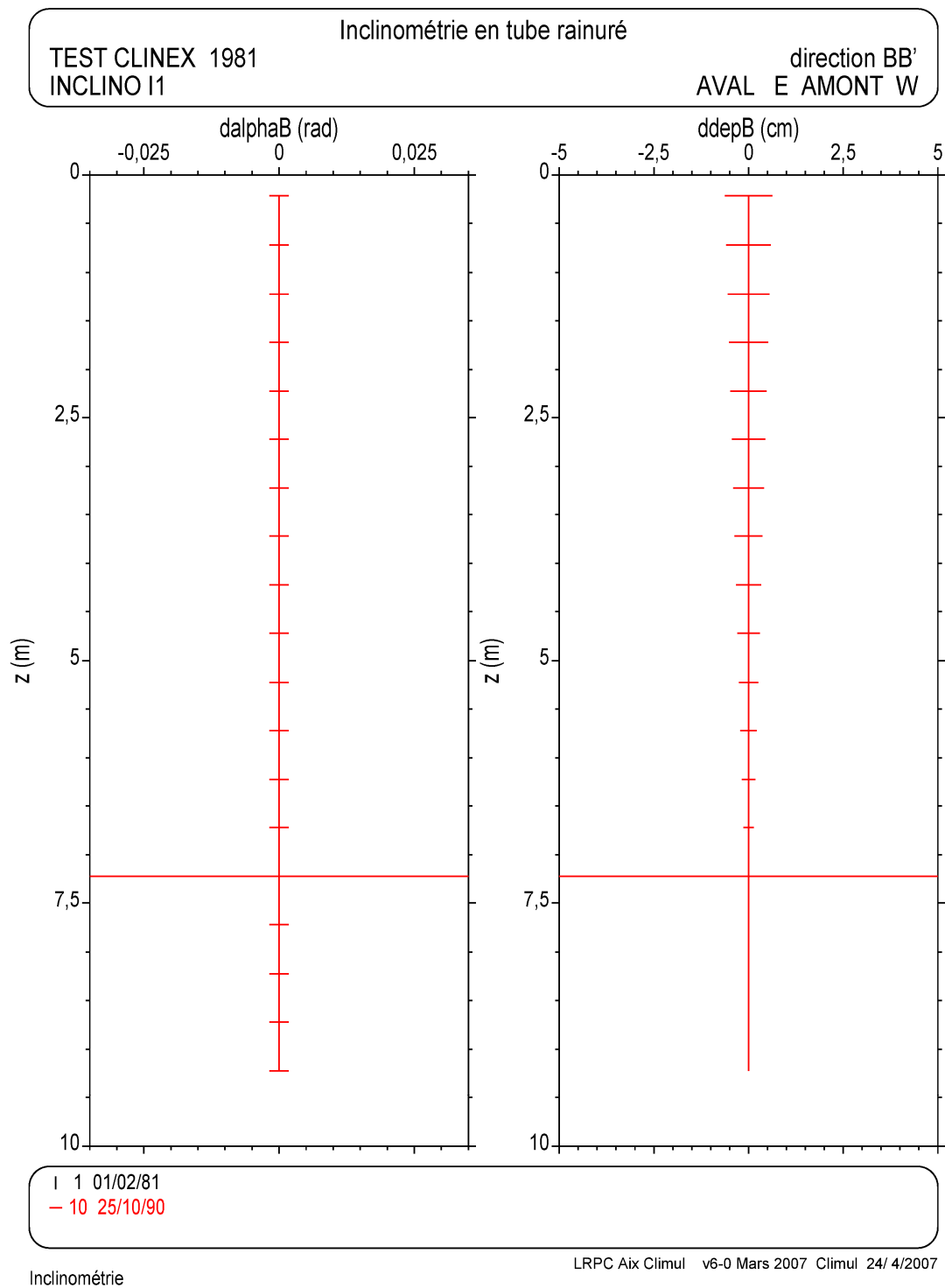


Figure 1b : Exemple 1.

Comparaison de deux relevés inclinométriques (01 et 10). Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 10 porte les barres d'incertitude.

Tableau 1 : Illustration de quelques éléments de la méthode

Problème	Paragraphe dans le texte	Graphiques et tableaux	Commentaires
Méthode	1.1, 1.4	1	Exemple type avec deux relevés (Clinex LCPC, 1982)
	1.3, 1.5	2, 3	Exemple type avec plusieurs relevés (Climul)
Forme du tube	2.1, 2.2	4	Forme et position du tube rainuré (approximation)

Tableau 2 : Illustration de quelques problèmes rencontrés

Problème	Paragraphe dans le texte	Graphiques et tableaux	Commentaires
Étalonnage	3.1		Erreur d'étalonnage sur les mesures angulaires
Pente du tube	3.2	5, 6	Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale
Raccord du tube	3.3	7	Défauts de raccordement des éléments de tube
Décalage en z	3.4	8,9 Tab 5	Effet du décalage en z entre deux relevés
Pas de mesure z	3.5	10	Effet du changement du pas de mesure
Flambement	4.1	11	Flambement sans déplacement
	4.2	12	Flambement dans une couche molle
	4.3	13	Flambement dans un remblai
	4.4	14	Flambement sous un remblai
	4.5	15	Flambement par défaut de scellement
	5.4	22	Flambement et rupture
	5.8	29	Flambement par gonflement et retrait du massif

Tableau 3 : Différents exemples de suivis d'ouvrages

Ouvrages	Paragraphe dans le texte	Graphiques et tableaux	Commentaires
Glissements de terrain	1.1, 1.4	1	Exemple type avec deux relevés (Clinex LCPC, 1982)
	1.3, 1.5	2, 3	Exemple type avec plusieurs relevés (Climul)
	5.1	16	Vitesse d'évolution variable
	5.2	17	Zone de cisaillement épaisse
	5.3	18, 19, 20, 21	Plusieurs surfaces de rupture
	5.4	22	Flambement et rupture
	5.5	23, 24, 25	Déformation continue
	5.8	29	Flambement par gonflement et retrait du massif
Remblais	4.3	13	Flambement dans un remblai
	4.4	14	Flambement sous un remblai
	5.6	26, 27	Evolution en pied d'un remblai
Murs	5.5	25	Déformation continue (paroi clouée)
	5.7	28	Glissement et basculement
Parois	5.9	30, 31, 32	Déformations des parois moulées formant un quai
Tunnels	5.10	33	Déformations au voisinage d'un tunnel

1.2 – Sources d'erreur

En fait, les mesures inclinométriques sont entachées d'erreurs dont les origines sont diverses et liées à la qualité du tube, à la qualité du scellement du tube au terrain, à la perte de ses caractéristiques géométriques du fait du vieillissement ou du mouvement imprimé par le massif, au défaut de coaxialité de la sonde dans le tube et enfin au bruit de mesure et à la dérive instrumentale. On exclut ici les questions de dysfonctionnement des chaînes de mesure, facilement identifiables pendant la réalisation d'un relevé, soit à l'aide des doubles mesures en station, soit en référence aux relevés déjà effectués dans le tube au cours de l'auscultation.

L'étude rapportée ici a porté sur :

- la pente des tubes,
- les raccords des éléments de tube,
- les erreurs sur l'étalonnage des capteurs de mesure angulaire et leur zéro,
- les décalages en z de la sonde de mesure,
- le changement du pas de mesure.

Les deux premiers sujets avaient été discutés par Serratrice (1983).

1.3 – Exemples d'illustration

Les paragraphes suivants présentent de nombreux exemples pour illustrer le principe d'exploitation des données avec la méthode Clinex du LCPC (Pincent et Meignen, 1982), concernant la forme approximative du tube rainuré, la représentation des courbes des variations angulaires et des déplacements relatifs dans les deux directions du tube en fonction de la profondeur, les calculs des incertitudes, l'encastrement du tube, l'évolution des déformations en fonction du temps, etc. D'autres exemples mettent l'accent sur divers problèmes rencontrés dans la pratique, en liaison avec la pente de tubes, les raccords des éléments de tube, le décalage en z des mesures. De nombreux cas de flambement sont examinés, dans des circonstances diverses du point de vue des massifs auscultés. Le [tableau 1](#) renvoie à la méthode d'exploitation des données inclinométriques et aux tests de calcul à partir d'exemples validés.

Le [tableau 2](#) rassemble des exemples d'illustration des principaux problèmes rencontrés.

Enfin des exemples d'utilisation de l'inclinométrie sont donnés dans le cadre du suivi de glissements de terrain (diverses formes de rupture, plusieurs surfaces de rupture superposées, etc.) ou dans le cadre de l'auscultation de différents types d'ouvrages (remblais, murs, parois, tunnels). Le [tableau 3](#) classe les différents exemples d'illustration en fonction des types d'ouvrages auscultés.

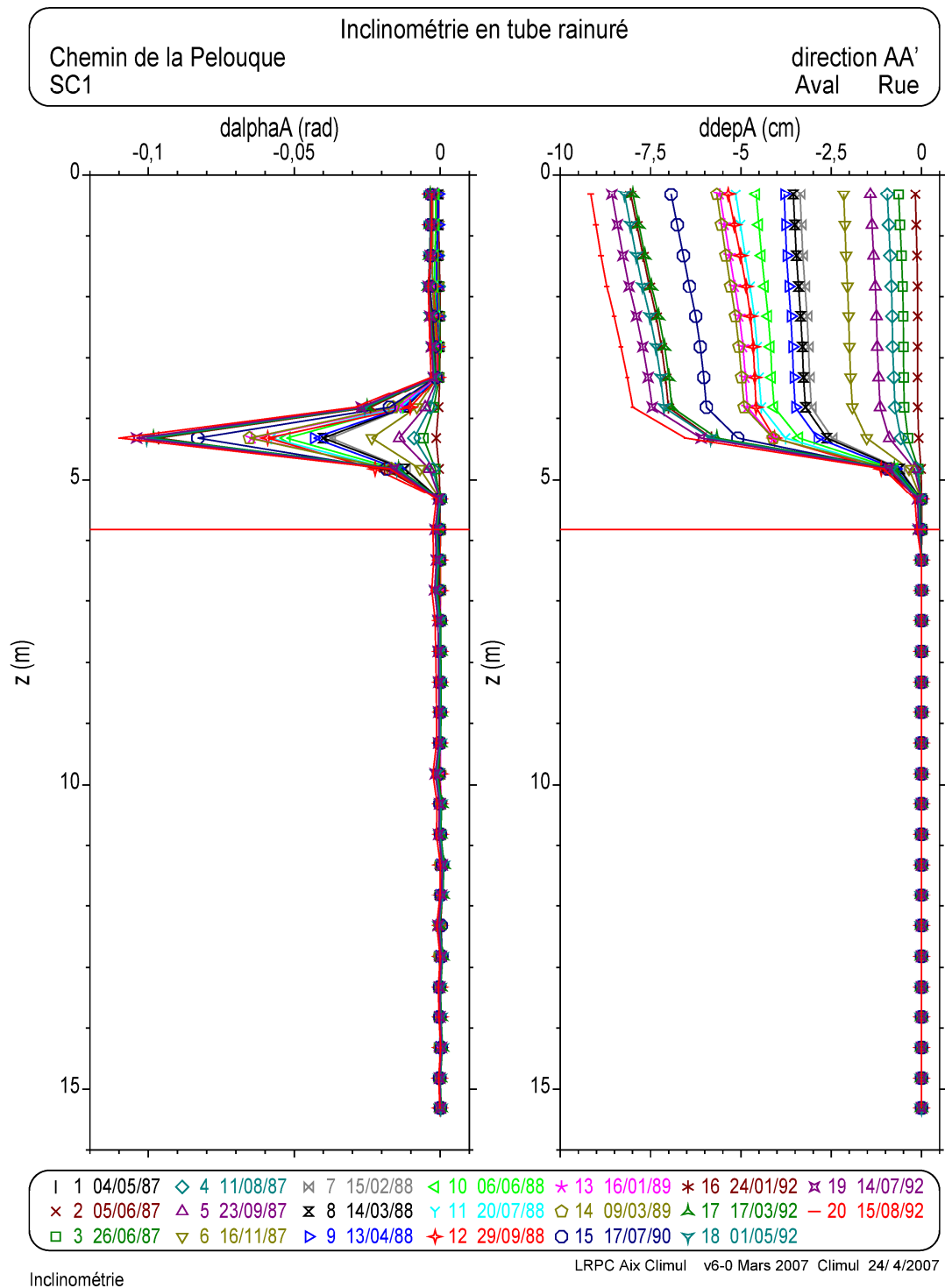


Figure 2a : Exemple 2.

Comparaison de vingt relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 20 porte les barres d'incertitude.

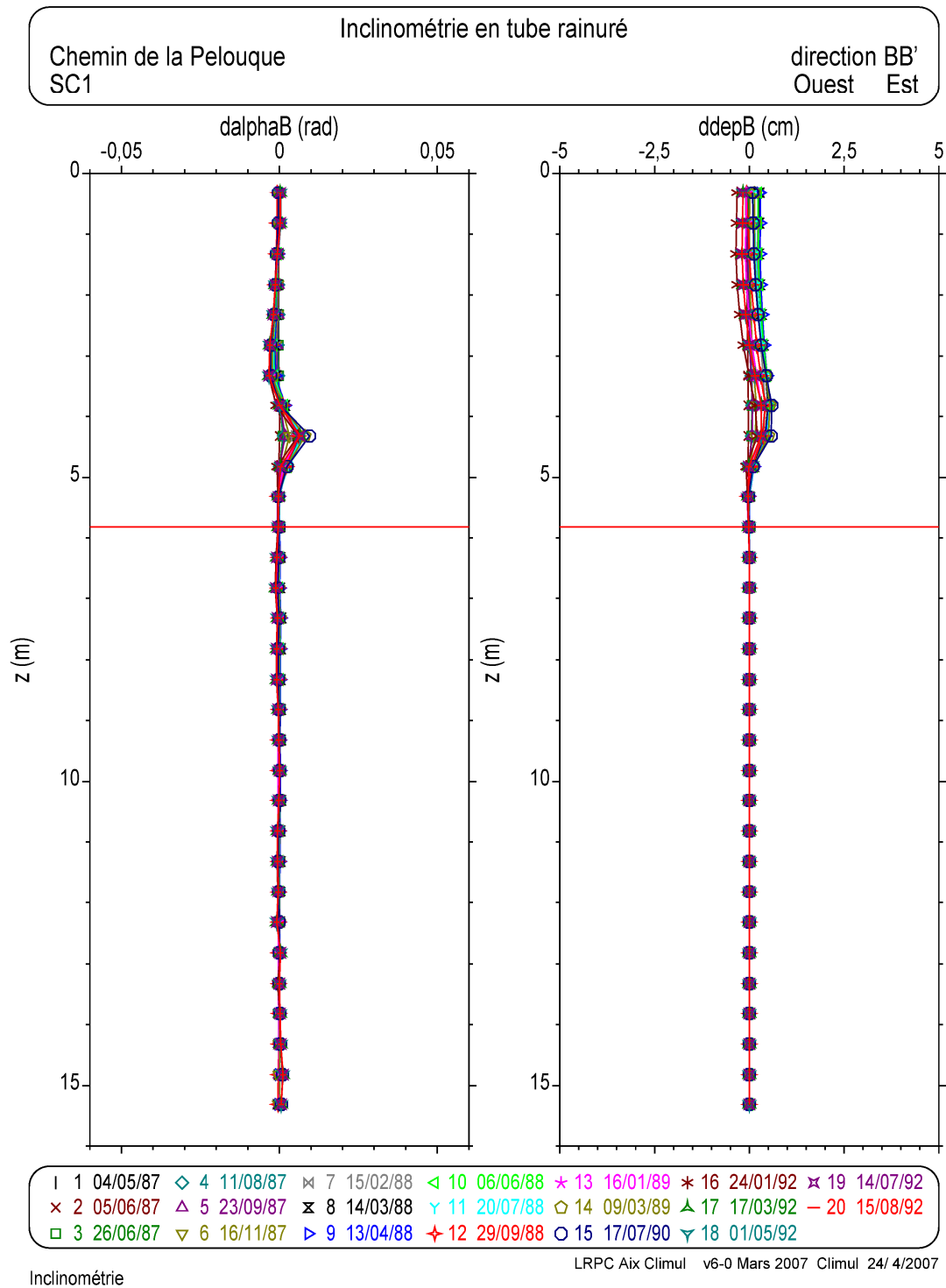
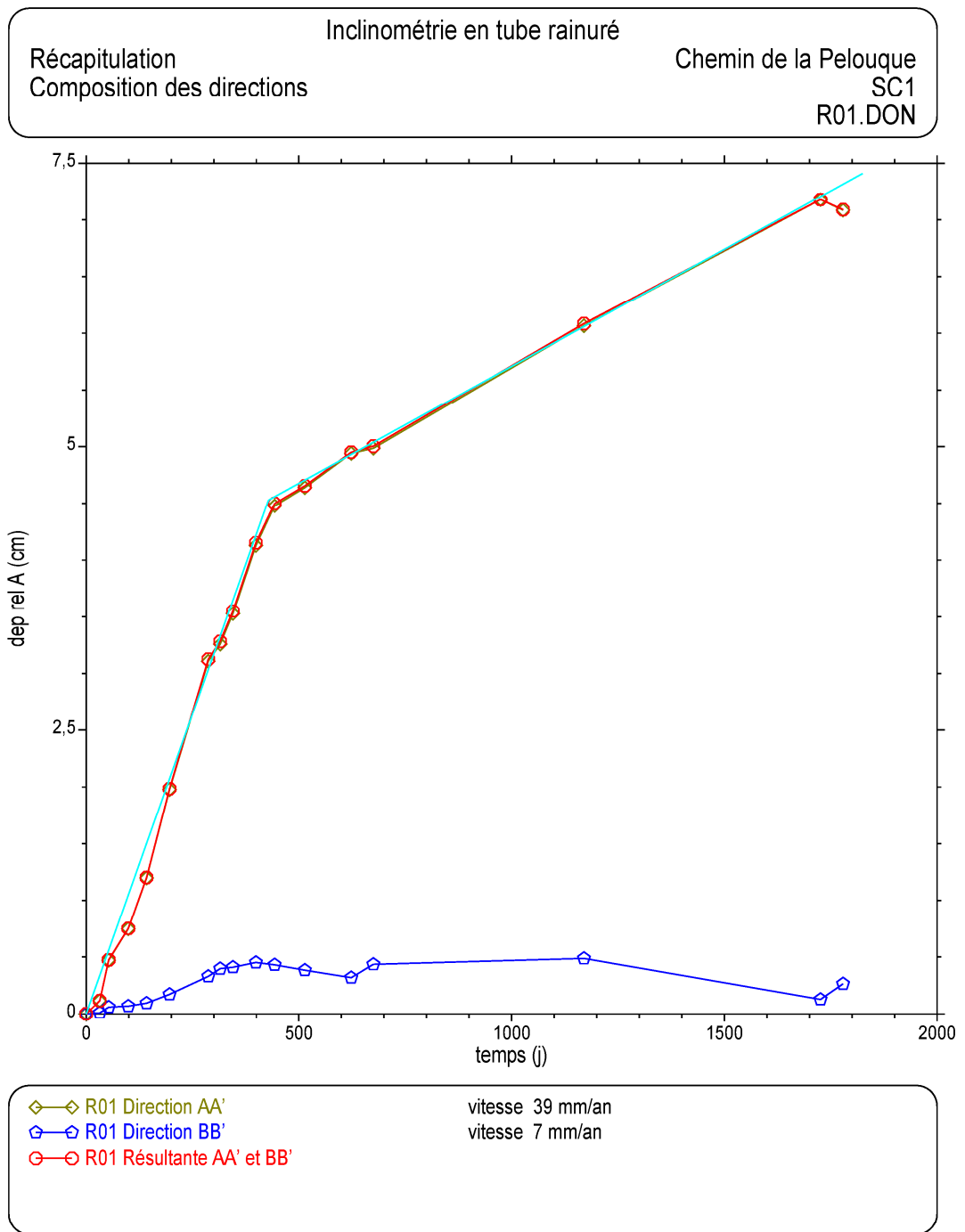


Figure 2b : Exemple 2.

Comparaison de vingt relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 20 porte les barres d'incertitude.



Déplacements relatifs en fonction du temps.

Inclino

LRPC Aix Dta v3-0 Jul 2005 101 25/ 4/2007

Figure 3 : Exemple 2.

Comparaison de vingt relevés inclinométriques. Evolution dans le temps du déplacements relatifs entre 0,3 et 5,8 m de profondeur. Directions AA', BB' et résultante.

1.4 – Comparaison de relevés successifs d'un même tube inclinométrique

Les figures 1a et 1b comparent les relevés inclinométriques effectués à deux dates (le premier relevé sert de référence) dans les directions AA' et BB' respectivement. La partie inférieure du tube est ancrée dans une couche stable sous-jacente à partir de 7,2 m de profondeur. Cette profondeur est matérialisée par le trait horizontal rouge sur les graphiques. Les barres d'incertitude sur le dernier relevé sont issues des calculs effectués sur les mesures en station dans les deux couples de sens opposés du tube rainuré.

1.5 – Comparaison simultanée de plusieurs relevés

Les figures 2a et 2b comparent plusieurs relevés inclinométriques effectués pendant une période de quatre ans, pour un tube installé dans un glissement de terrain. Cet exemple donne une illustration de l'utilisation de logiciel Climul. Les graphiques sont donnés pour les deux directions AA' et BB'.

Une surface de rupture apparaît vers 4,3 m, sans stabilisation pendant la période d'observation. La récapitulation des déplacements relatifs dans les directions AA' et BB' et leur résultante est donnée sur la figure 3 (entre 0,3 et 5,8 m de profondeur). Le coude qui marque l'évolution des déplacements indique la mise en place d'un renforcement. Celui-ci a permis de réduire la vitesse du glissement de 39 mm/an à 7 mm/an.

2. Forme du tube inclinométrique

Le calcul de la forme du tube inclinométrique au sein du massif dans lequel il est scellé peut trouver diverses applications pratiques, comme la recherche de la position du pied du forage par rapport à la tête, par exemple. Mais, dans l'utilisation courante de l'inclinométrie en tubes rainurés, ce type d'exploitation est aussi rendu nécessaire pour confirmer la qualité de la pose du tube, en termes de pente moyenne et de continuité. En effet, il a été prouvé que la qualité des mesures inclinométrique est altérée quand la pente du tube augmente et en présence de discontinuités de pente (Serratrice, 1994). Des exemples sont donnés dans la suite. On s'intéresse d'abord à la solution directe du problème d'après les mesures angulaires dans les directions AA' et BB', puis à une méthode approchée.

2.1 – Éléments géométriques du tube rainuré en station

La direction de l'axe du tube rainuré dans une station donnée peut être définie par ses coordonnées polaires (φ , θ). Pour fixer la position des deux plans orthogonaux qui portent les rainures du tube, il faut se donner un angle supplémentaire, noté ω , et défini dans le plan de la section du tube. Ces trois angles permettent de déterminer tous les éléments géométriques du tube à la station considérée. Les calculs ne sont pas développés ici. Les angles α_e et α_f mesurés dans les deux plans des rainures AA' et BB' se déduisent de φ , θ et ω .

Inversement, la connaissance de α_e α_f par la mesure ne permet pas de trouver la direction de l'axe du tube. Pour cela, il faut effectuer une mesure supplémentaire en station, telle que la mesure de la direction horizontale d'un des plans de mesure par exemple (azimut). A défaut, il faut se donner une hypothèse supplémentaire. Une hypothèse courante consiste à mesurer la direction horizontale de l'un des plans des rainures en tête du tube et supposer que cette direction se conserve en profondeur, en admettant que le tube rainuré n'a pas été vrillé au cours de la pose ou du fait de la déformation du massif et que les plans des rainures restent conformes aux orientations visibles en tête.

Une méthode approximative de détermination de la forme du tube inclinométrique est présentée ci-après, sur des exemples. Cette méthode a été validée par comparaison avec la solution théorique.

Cette exploitation doit être accompagnée d'un schéma indiquant le repérage des directions des rainures par rapport au nord et par rapport à la plus grande pente du site (ou la direction des principaux mouvements attendus).

2.2 – Approximation de la forme du tube dans le massif

Dès le premier relevé (01), les doubles mesures effectuées en station dans les deux directions orthogonales AA' et BB' d'un tube rainuré permettent de donner une approximation de la forme du tube au sein du massif dans lequel il a été scellé. Pour obtenir cette approximation, une méthode consiste à comparer ce relevé 01 à un relevé fictif représentant la verticale (relevé 00). Ce relevé est obtenu en chacune des stations du tube en affectant une valeur nulle aux mesures angulaires.

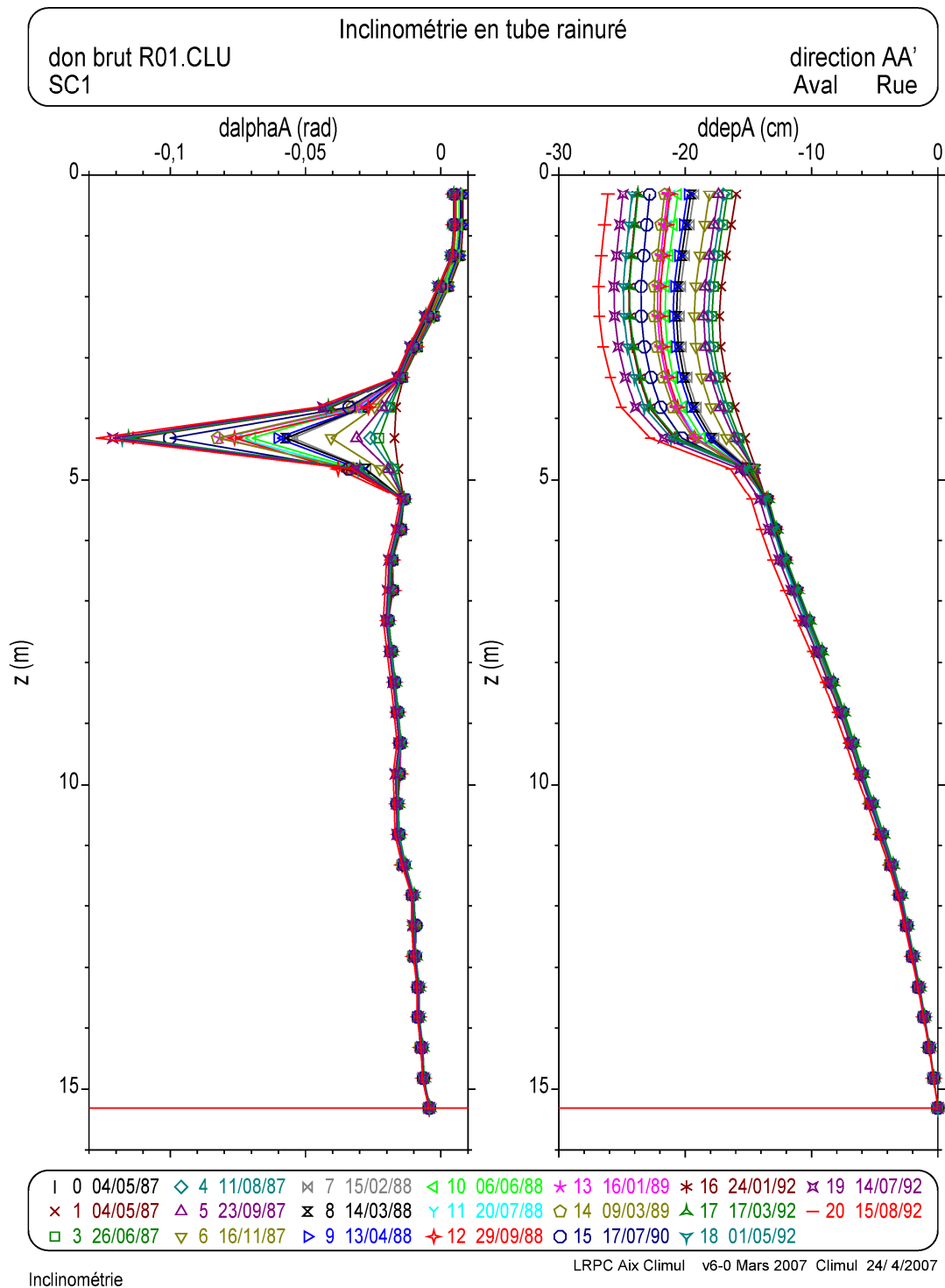


Figure 4a : Exemple 3.

Comparaison de vingt relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00).

Le relevé 02 a été écarté. Direction AA'.

Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.

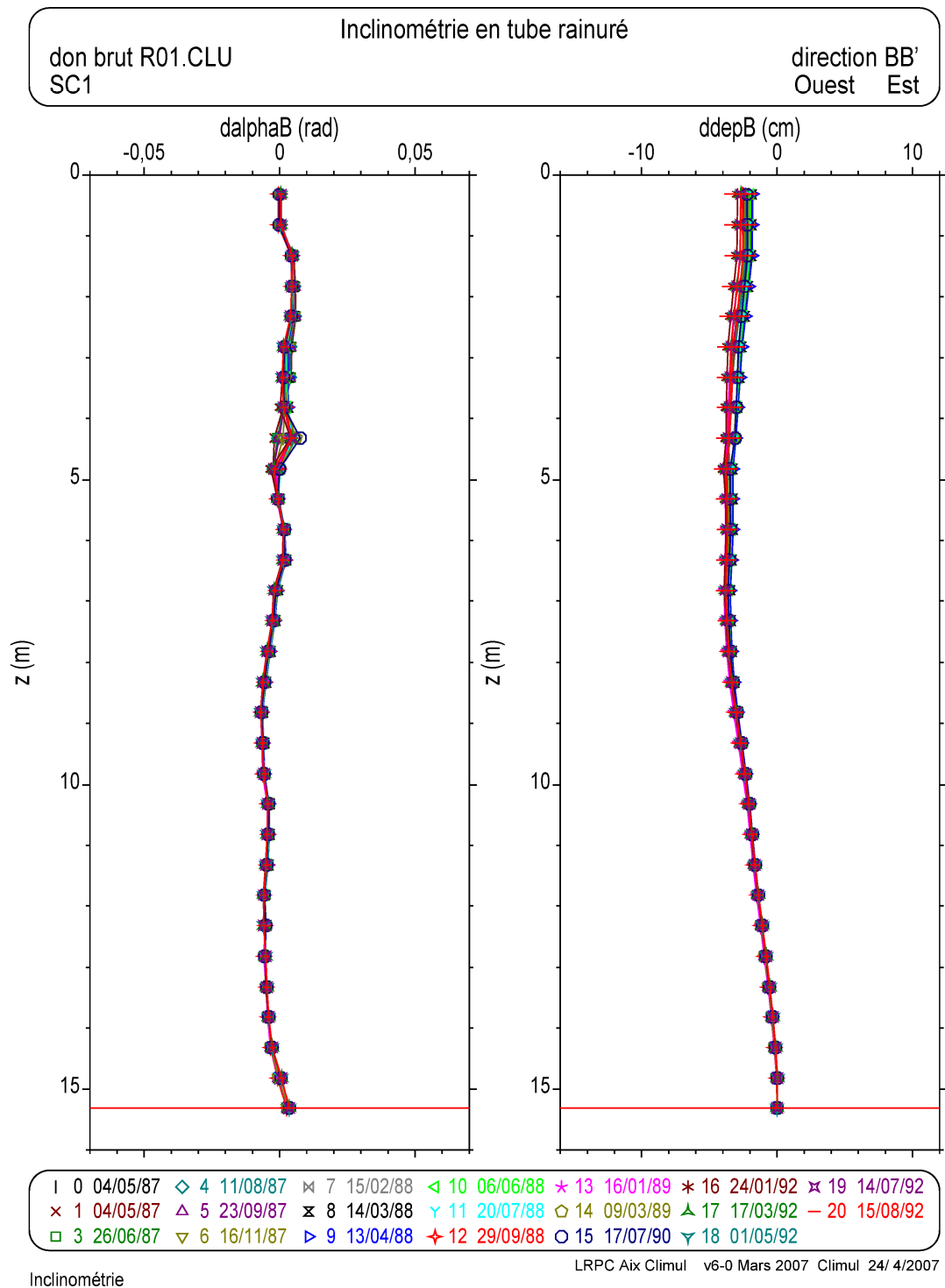


Figure 4b : Exemple 3.

Comparaison de vingt relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00).

Le relevé 02 a été écarté. Direction BB'.

Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.

Les figures 4a et 4b montrent une telle approximation pour l'ensemble des vingt relevés effectués sur un site instable. Le relevé fictif 00 est représenté par une droite verticale passant par le pied du tube. Compte tenu des conventions de signe adoptées (les variations angulaires de signe négatif indiquent un déplacement vers A ou vers B), la tête du tube est située approximativement à 16 cm du pied du tube vers l'aval du versant et à 2 cm vers l'ouest. La surface de rupture déjà détectée vers 4,3 m de profondeur par l'analyse comparative du relevé 01 avec les suivants (figure 2) apparaît à nouveau. Ici, la comparaison de tous les relevés à la verticale permet de montrer approximativement l'évolution de la forme du tube inclinométrique pendant la déformation du massif.

3. Problèmes rencontrés

Les problèmes rencontrés en pratique dans la mise en œuvre de l'inclinométrie en tubes rainurés sont liés presque exclusivement au comportement des tubes rainurés et leur grande sensibilité à la composante verticale des déplacements du massif environnant. Une autre source de difficulté tient au positionnement précis de la sonde inclinométrique en station, pendant les doubles mesures d'un relevé, puis d'un relevé sur l'autre (décalages en z). D'autres questions sont discutées aussi, mais, avant de les aborder, un premier paragraphe est consacré à l'erreur d'étalonnage du capteur de variation angulaire.

3.1 – Erreur d'étalonnage du capteur de mesure angulaire

Ces problèmes peuvent être liés à un défaut d'alimentation électrique ou à des effets de la température. On suppose que, pendant les relevés, la pente α est déduite de la mesure m au moyen d'une relation d'étalonnage dont la forme est linéaire :

$$\alpha = C (m - m_0)$$

où C est le coefficient d'étalonnage et m_0 la mesure correspondant à une pente nulle (décalage de zéro). Dans ce cas, les doubles mesures $m_{\alpha_i}^n$ et $m'_{\alpha_i}^n$ à la station i au cours du relevé n et dans une direction donnée du tube sont respectivement :

$$m_{\alpha_i}^n = \alpha_i^n / C^n + m_{\alpha_0 i}^n \qquad m'_{\alpha_i}^n = -\alpha_i^n / C^n + m_{\alpha_0 i}^n$$

puis les demi-sommes et les demi-différences :

$$s_i^n = (m_{\alpha_i}^n + m'_{\alpha_i}^n) / 2 = m_{\alpha_0 i}^n$$

$$d_i^n = (m_{\alpha_i}^n - m'_{\alpha_i}^n) / 2 = \alpha_i^n / C^n$$

Les demi-sommes s_i^n permettent de déterminer l'écart $m_{\alpha_0 i}^n$. En pratique l'exploitation des données inclinométriques appelle à calculer la moyenne et l'écart type des s_i^n pour le relevé n . Cet écart type est utilisé ensuite dans le calcul de l'incertitude sur la variation angulaire.

La variation angulaire à la station i entre les relevés n et $n+1$ est donnée par :

$$\Delta\alpha_i = d_i^{n+1} - d_i^n = \alpha_i^{n+1} / C^{n+1} - \alpha_i^n / C^n = (C^n \alpha_i^{n+1} - C^{n+1} \alpha_i^n) / C^n C^{n+1}$$

Elle dépend de la pente du tube. Si la pente a changé d'un relevé à l'autre, les relevés indiquent une déformation du tube. Mais elle dépend aussi du coefficient d'étalonnage lors des deux relevés C^n et C^{n+1} . Si le coefficient n'a pas varié $C^{n+1} = C^n$:

$$\Delta\alpha_i = (\alpha_i^{n+1} - \alpha_i^n) / C^n$$

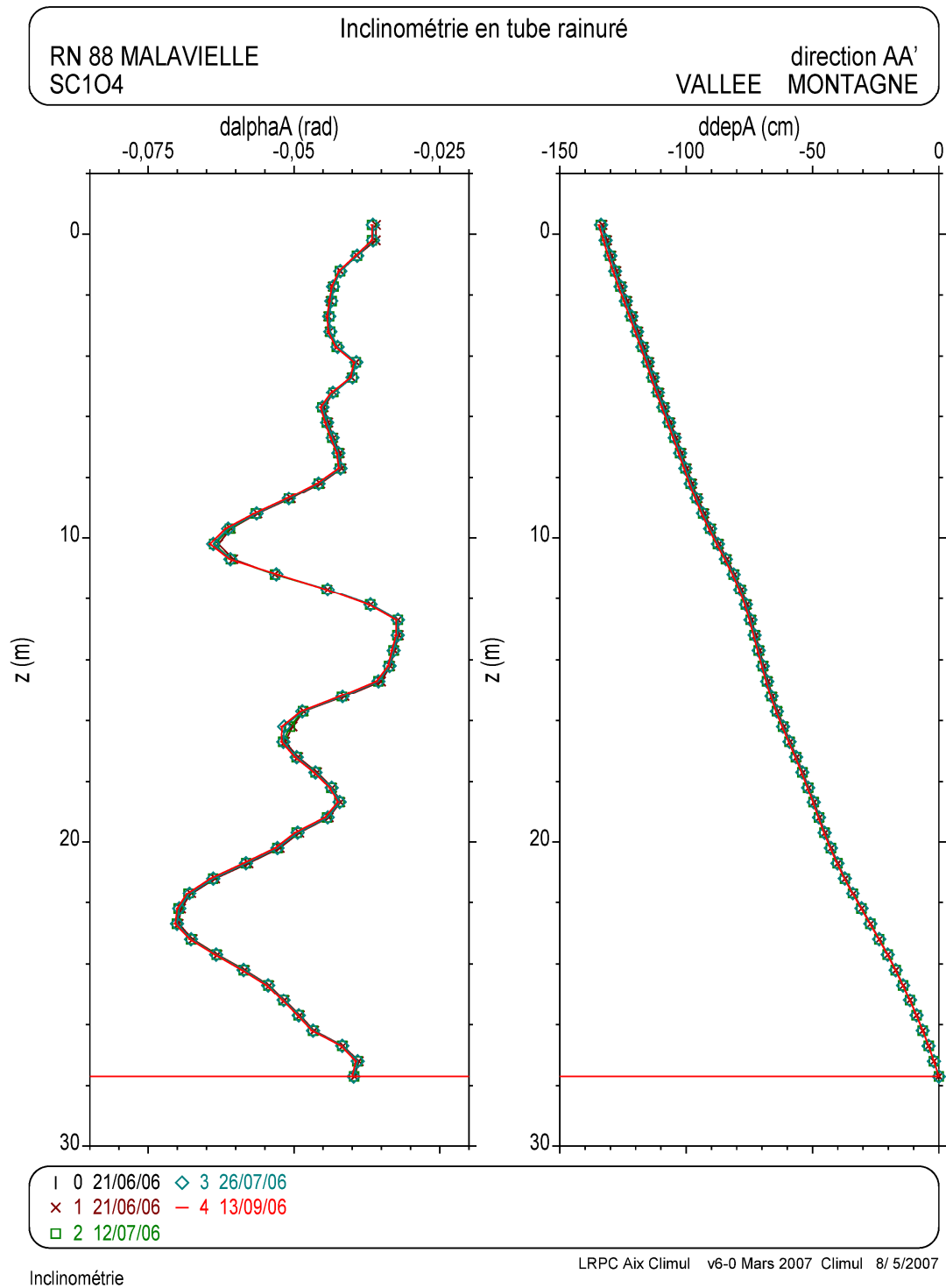


Figure 5a : Exemple 4.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'.
Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.
Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

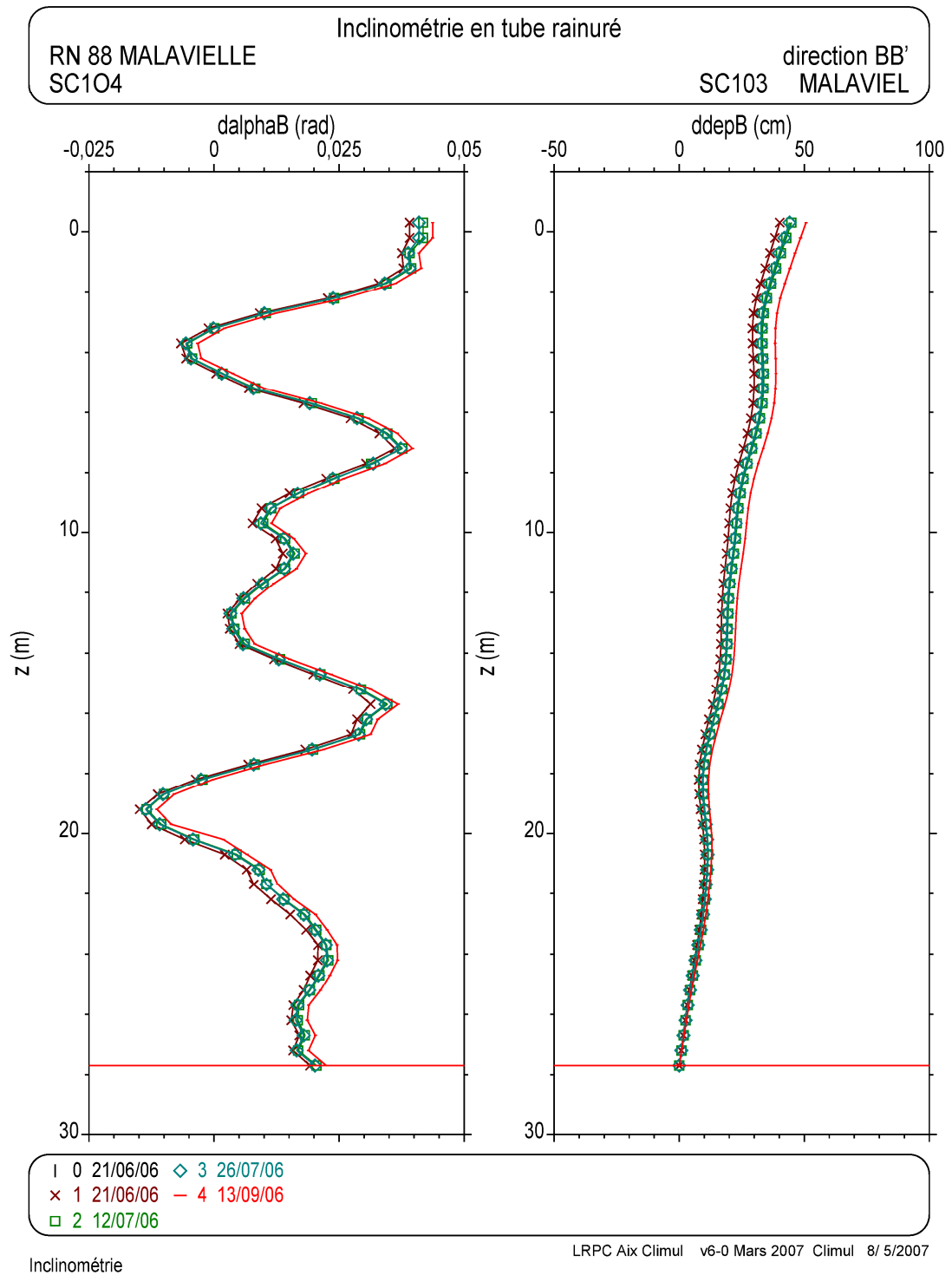


Figure 5b : Exemple 4.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'.
 Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.
 Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

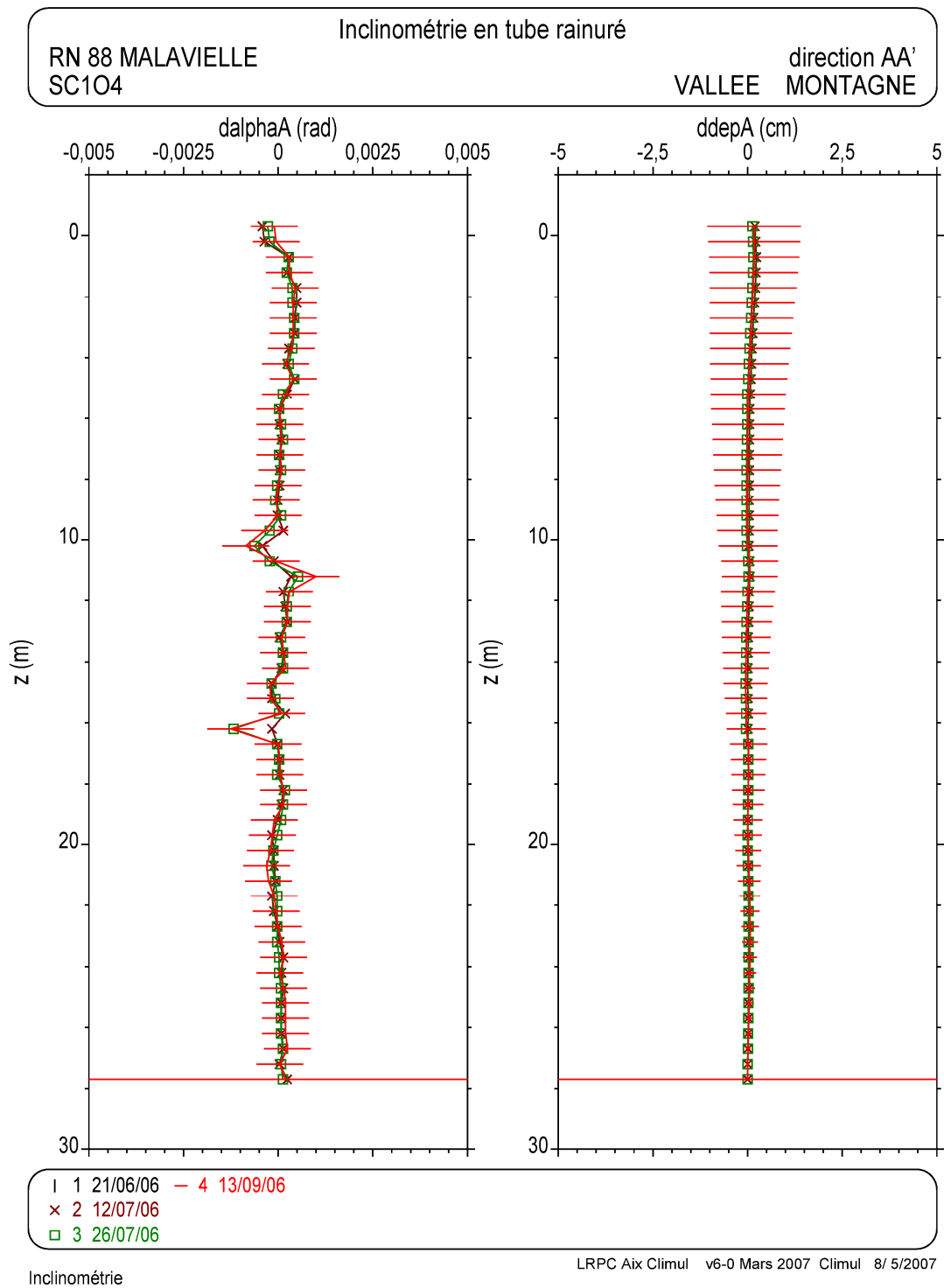


Figure 5c : Exemple 4.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude. Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

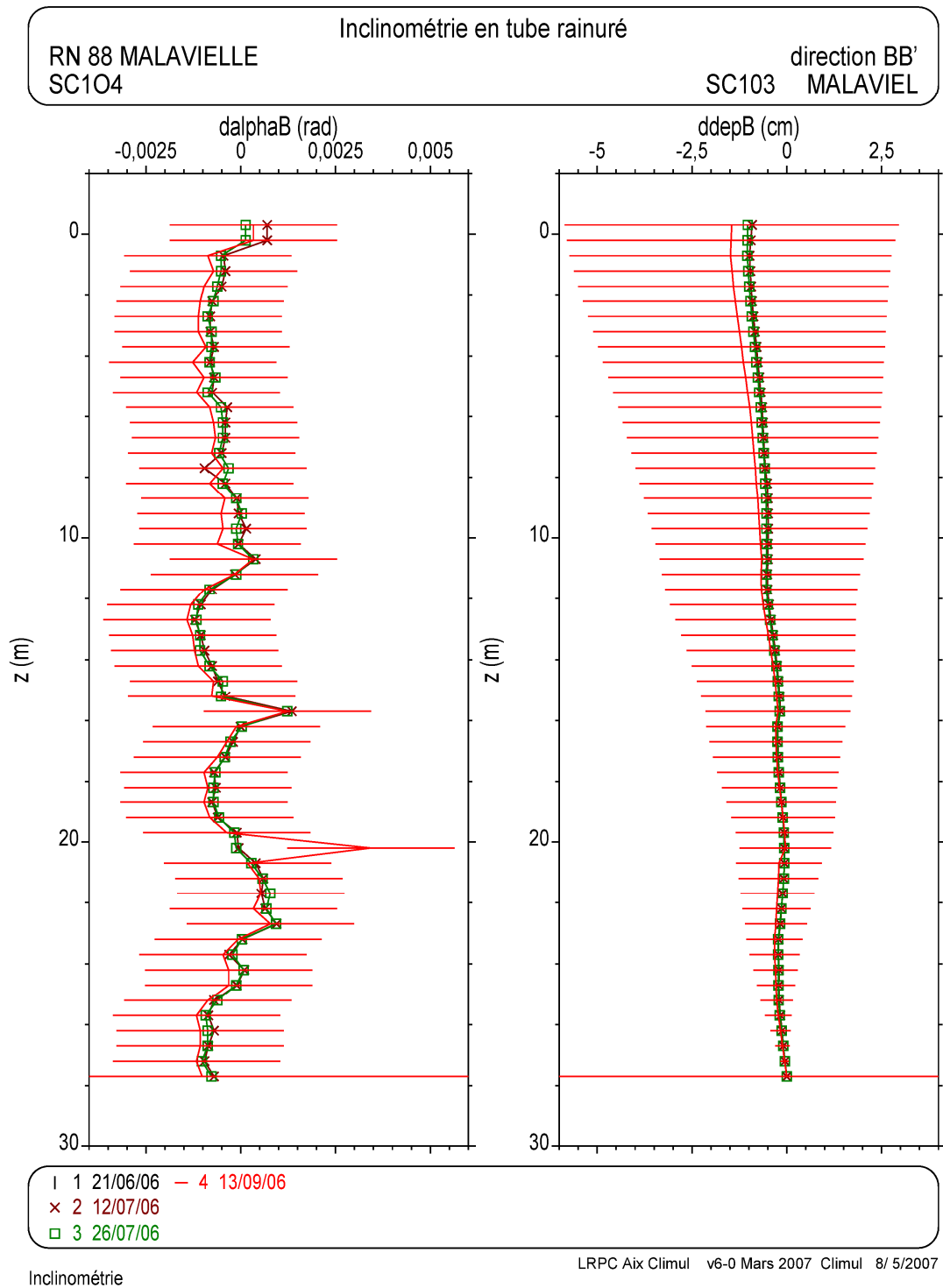


Figure 5d : Exemple 4.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.
Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

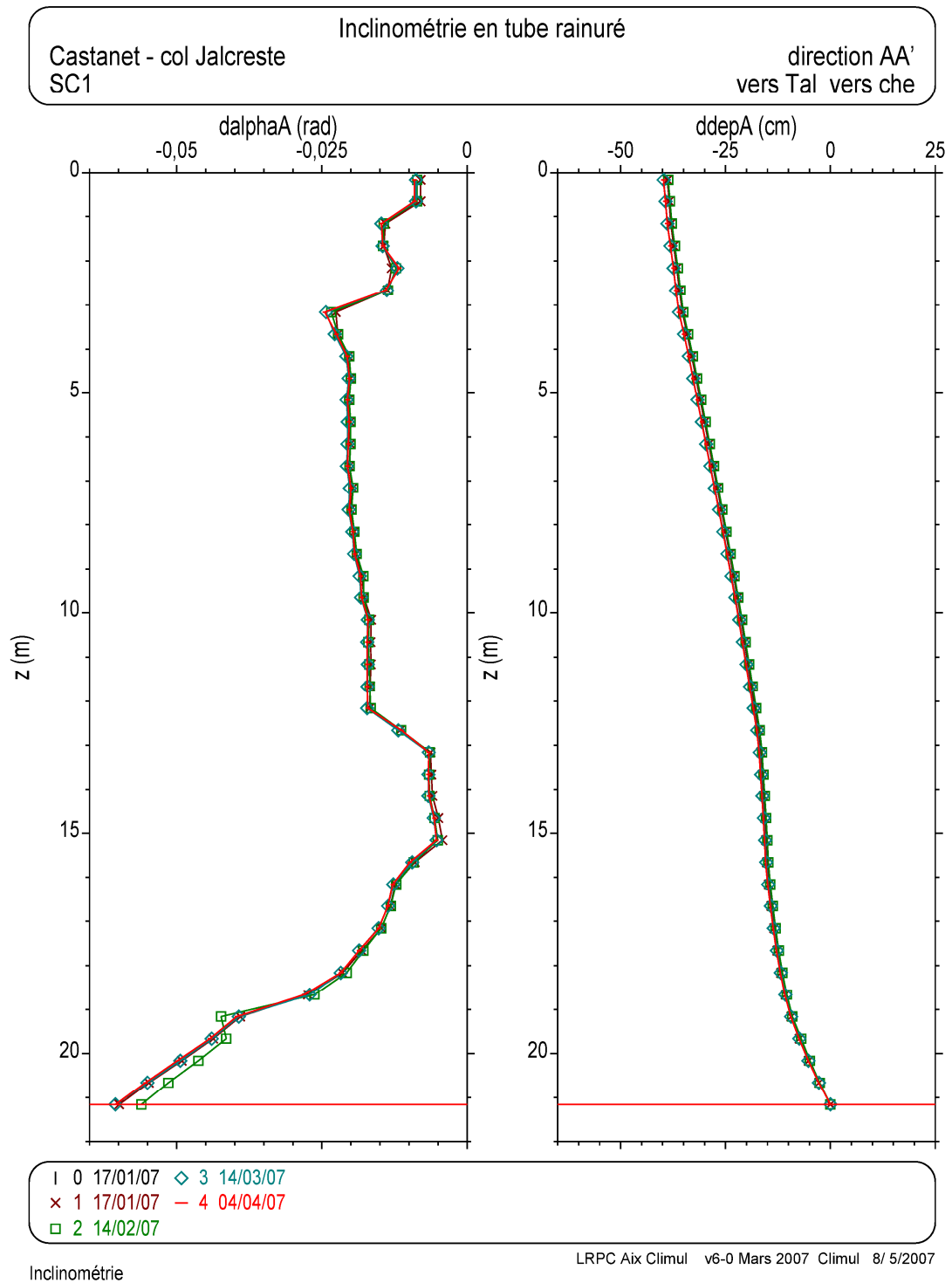


Figure 6a : Exemple 5.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'.
Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.
Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

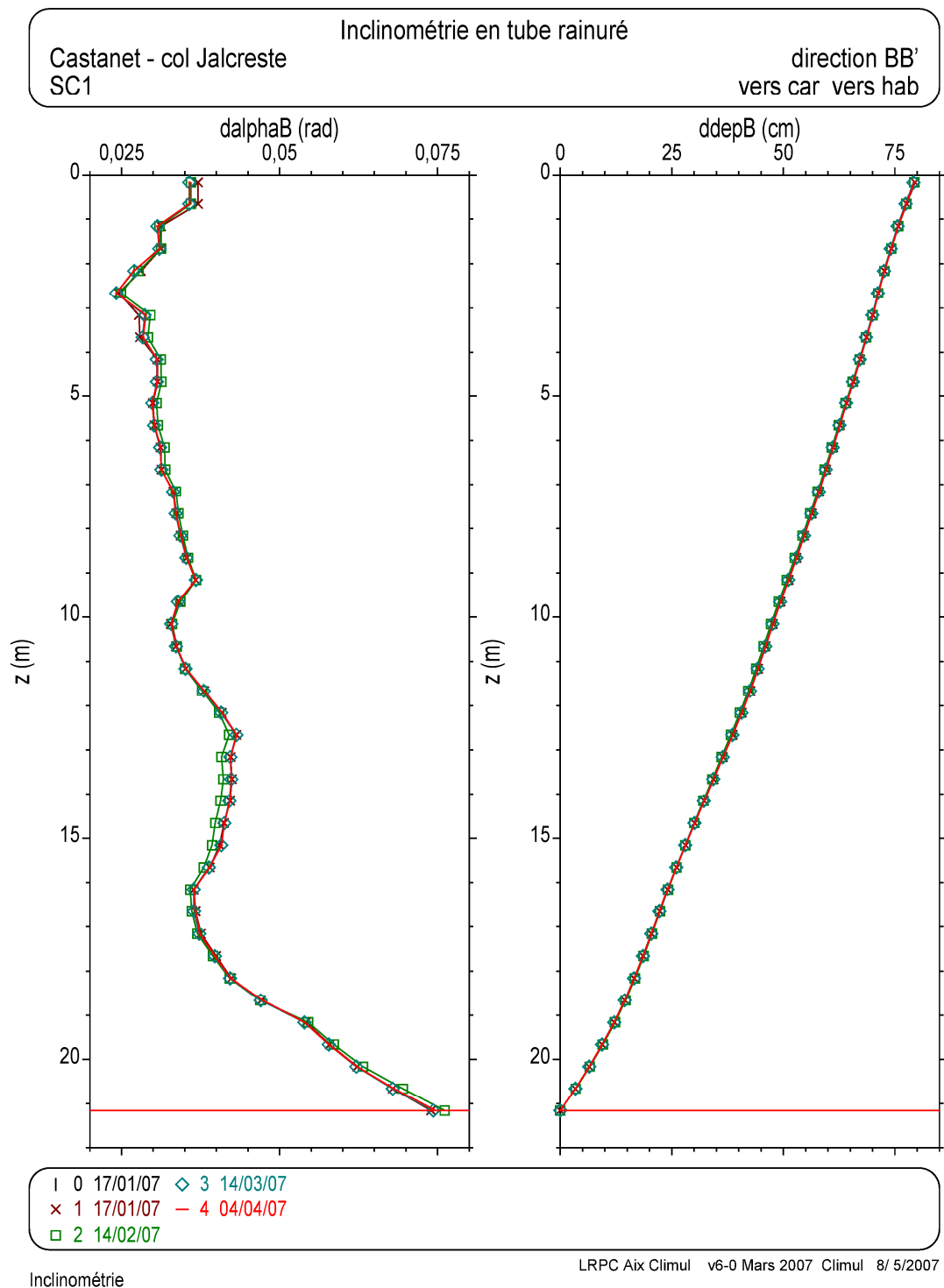


Figure 6b : Exemple 5.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction BB'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

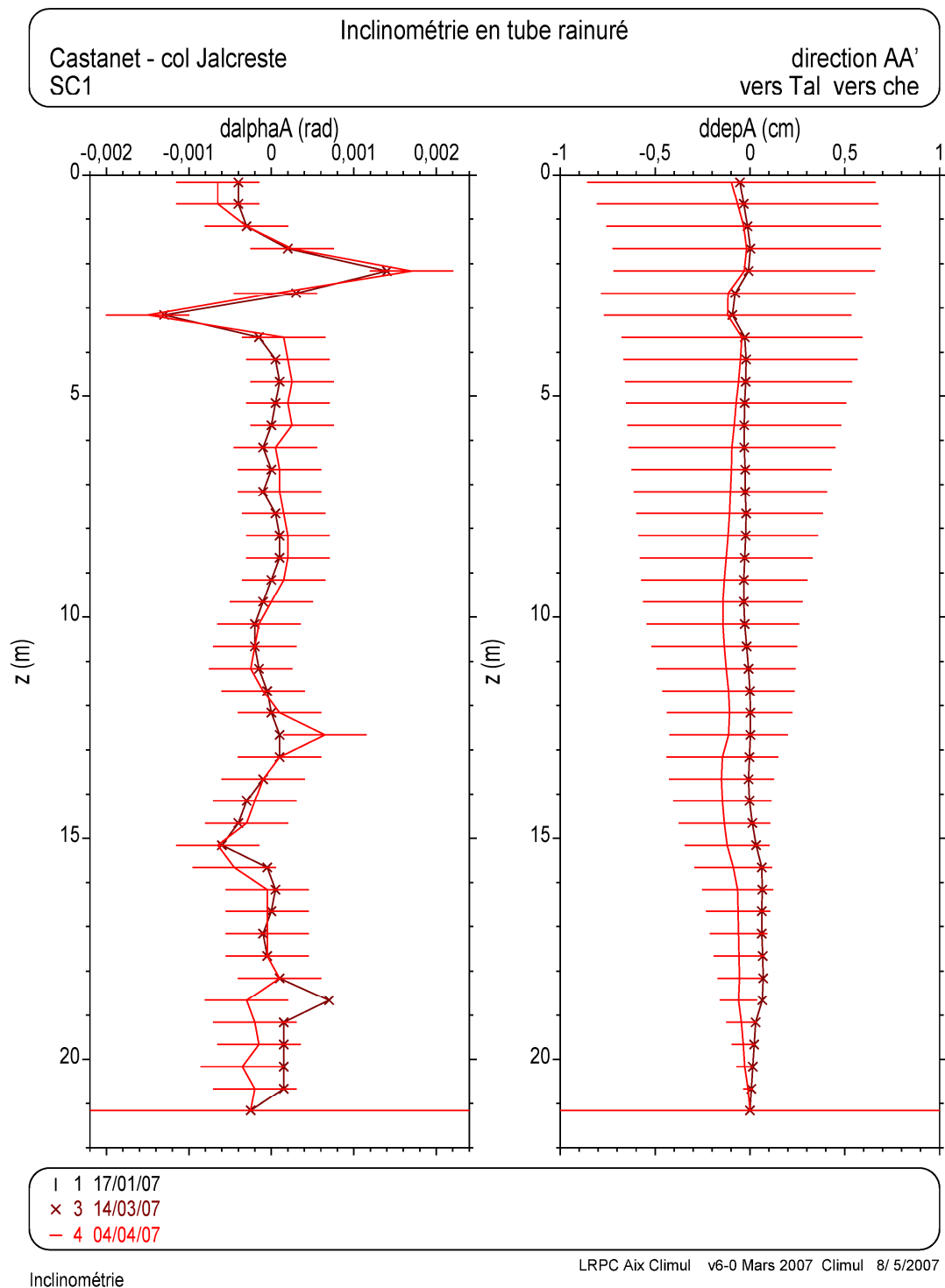


Figure 6c : Exemple 5.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude. Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

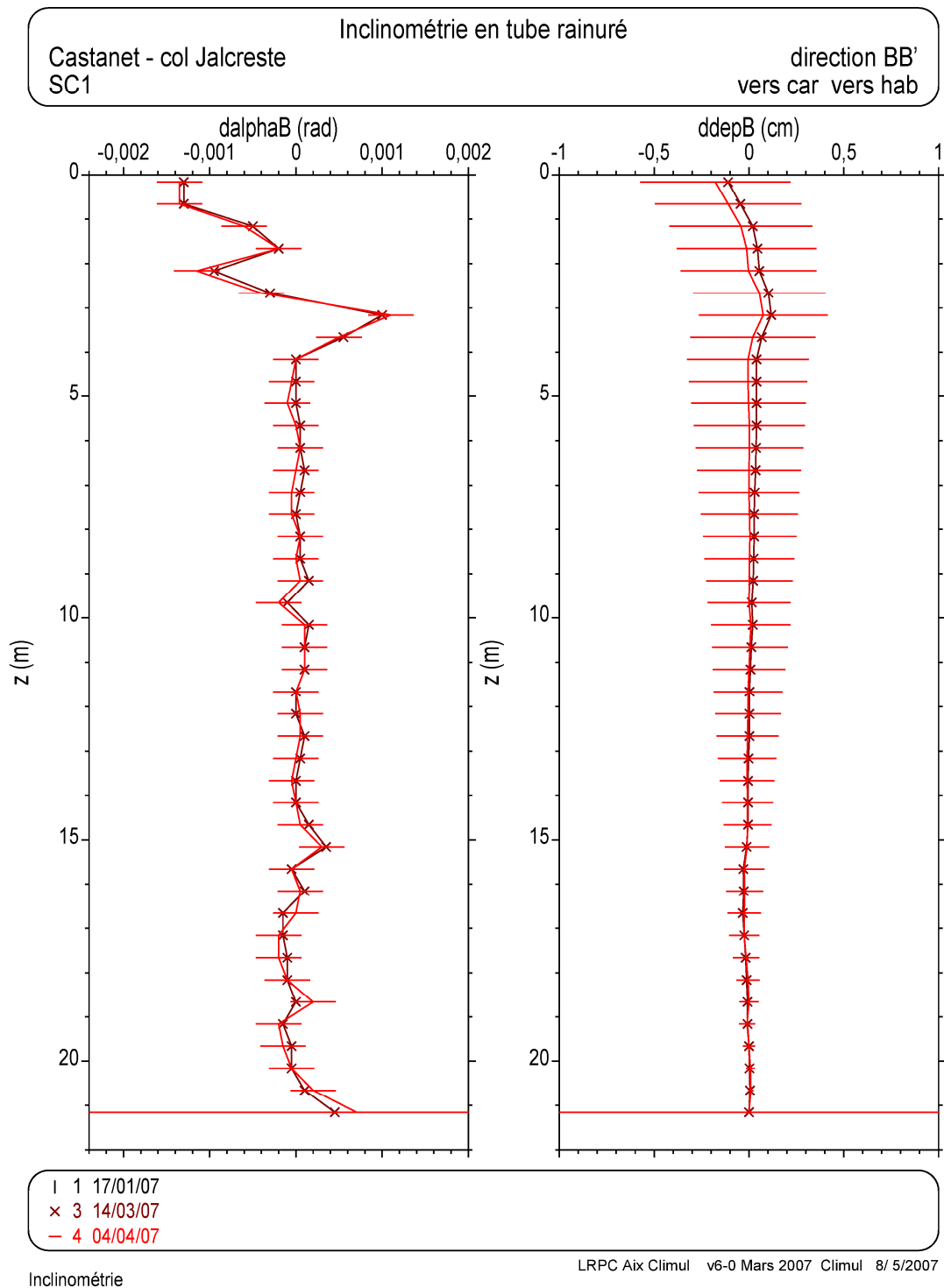


Figure 6d : Exemple 5.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.
Effet de la pente du tube dans la direction orthogonale.

Dans le cas contraire, et si le tube n'a pas été déformé entre les relevés n et n+1, $\alpha_i^{n+1} = \alpha_i^n$ et :

$$\Delta\alpha_i = \alpha_i^n (C^n - C^{n+1}) / C^n C^{n+1}$$

le changement du coefficient d'étalonnage de C^n à C^{n+1} introduit une variation angulaire erronée proportionnelle à la pente du tube. Cette erreur peut être détectée en comparant α_i et $\Delta\alpha_i$ dans une région fixe du tube. En admettant que $C^n = 1$ rad/rad, le coefficient de proportionnalité est $(1 - C^{n+1}) / C^{n+1}$. Ces erreurs sont atténuées quand le tube inclinométrique est presque vertical ($\alpha_i \approx 0$).

3.2 – Influence de la pente moyenne du tube rainuré

Étude antérieure

Dans la synthèse des données inclinométriques enregistrées dans des tubes rainurés effectuée en 1994 (Serratrice, 1994), le travail a consisté à comparer l'écart type des demi-sommes des mesures angulaires à d'autres grandeurs caractéristiques des relevés en tubes rainurés. Il est apparu que, dans les conditions de mise en œuvre de la technique inclinométrique et avec l'appareillage employé, la limite inférieure des écarts types est de l'ordre de 0,000025 rad ($2,5 \cdot 10^{-5}$) et que les valeurs courantes des écarts types se situent autour de 0,00010 rad (10^{-4}). Mais des écarts types supérieurs à 0,00020 ont été obtenus pour de nombreux relevés. Ainsi, ces écarts conduisent à une incertitude sur la variation angulaire supérieure à 0,001 rad/m (10^{-3}). Dans ces conditions, un mouvement lent (1 mm/an pour une zone cisailée de 1 m) n'est pas décelable en moins d'un an de suivi.

Il est apparu aussi une augmentation globale des écarts-types au cours de la vie du tube inclinométrique. Cette augmentation globale peut être attribuée à la déformation des tubes ou au vieillissement de ceux-ci. Enfin, l'étude a montré que les écarts-types dépendent de l'inclinaison des tubes. En effet, en reportant les écarts types déterminés dans les directions AA' et BB' en fonction du maximum de la valeur absolue de la pente mesurée au cours du relevé dans les directions BB' et AA' respectivement, il apparaît que l'écart type dans une direction donnée est d'autant plus grand que la pente est grande dans la direction orthogonale du tube rainuré. Cette analyse indique que les incertitudes dépendent du guidage de la sonde dans le plan du tube orthogonal au plan de mesure et que, en conséquence, l'écart type ne peut être inférieur à une certaine limite liée à la pente du tube.

Exemples

Les exemples des figures 5 et 6 montrent l'effet de la pente moyenne des tubes rainurés sur la qualité des mesures inclinométriques. L'exploitation commence par une comparaison des relevés à la verticale (relevé 00), qui donne une approximation de la forme du tube scellé dans le massif (figures 5a, 5b, 6a, 6b). Puis une exploitation des mesures est proposée en comparant les relevés successifs au premier relevé disponible (figures 5c, 5d, 6c, 6d).

Il apparaît clairement, en examinant les incertitudes sur les variations angulaires et leur représentation graphique par une barre d'erreur, que l'incertitude est d'autant plus grande dans une direction donnée que la pente moyenne est grande dans la direction orthogonale du tube

(Serratrice, 1994). Dans le premier exemple (figure 5), la déviation du forage est de 1,35 m dans la direction AA' pour une profondeur totale de 28 m, soit une pente moyenne égale à 0,0482 (2,8 degré), et de 0,40 m dans la direction BB', soit une pente moyenne égale à 0,0143 (0,8 degré). Les incertitudes sur les variations angulaires sont respectivement égales à 0,00062 et 0,00221 pour la comparaison du relevé 04 au relevé 02.

Dans le second exemple (figure 6), les déviations du forage sont égales à 0,40 m et 0,80 m dans les directions AA' et BB', soit des pentes moyennes égales à 0,0190 (1,1 degré) et 0,0381 (2,2 degré) respectivement (longueur du tube 21 m). Les incertitudes sur les variations angulaires sont égales à 0,00051 et 0,00026 pour la comparaison du relevé 04 au relevé 01. La pente plus forte dans la direction BB' produit une incertitude plus grande dans la direction AA'.

Spécifications pour la réception des tubes à la pose

Face aux problèmes récurrents posés par la pente des tubes rainurés, des tolérances d'acceptabilité ont été fixées pour sensibiliser les opérateurs à ce problème et tenter d'améliorer la qualité de pose des tubes. Le tableau 4 donne les tolérances de pente des tubes en fonction de la profondeur, sachant que les déviations de forage sont de plus en plus difficiles à maîtriser quand la profondeur augmente.

Tableau 4 : Tolérances sur les pentes moyennes des tubes en fonction de la profondeur

longueur du tube (m)	pente moyenne maximale tolérée (%)	déviations maximale tolérée (cm)
inférieure à 15 m	2	30 cm à 15 m
inférieure à 30 m	3	90 cm à 30 m
inférieure à 60 m	4	240 cm à 60 m

3.3 – Problèmes aux raccords des éléments de tube

Étude antérieure

L'étude des fluctuations des demi-sommes le long des tubes inclinométriques avait montré que la dispersion des demi-sommes augmente quand le tube inclinométrique contient de nombreux changements de pente (Serratrice, 1994). Pour cela, la quantité suivante, qualifiée d'anomalie de courbure, a été calculée en chaque station i du tube au relevé n et dans la direction AA' :

$$a_{iA}^n = \alpha_{iA}^n - (\alpha_{i+1A}^n + \alpha_{i-1A}^n) / 2$$

puis la direction BB' et :

$$a_i^n = [(a_{iA}^n)^2 + (a_{iB}^n)^2]^{1/2}$$

par composition des anomalies dans les deux directions du tube.

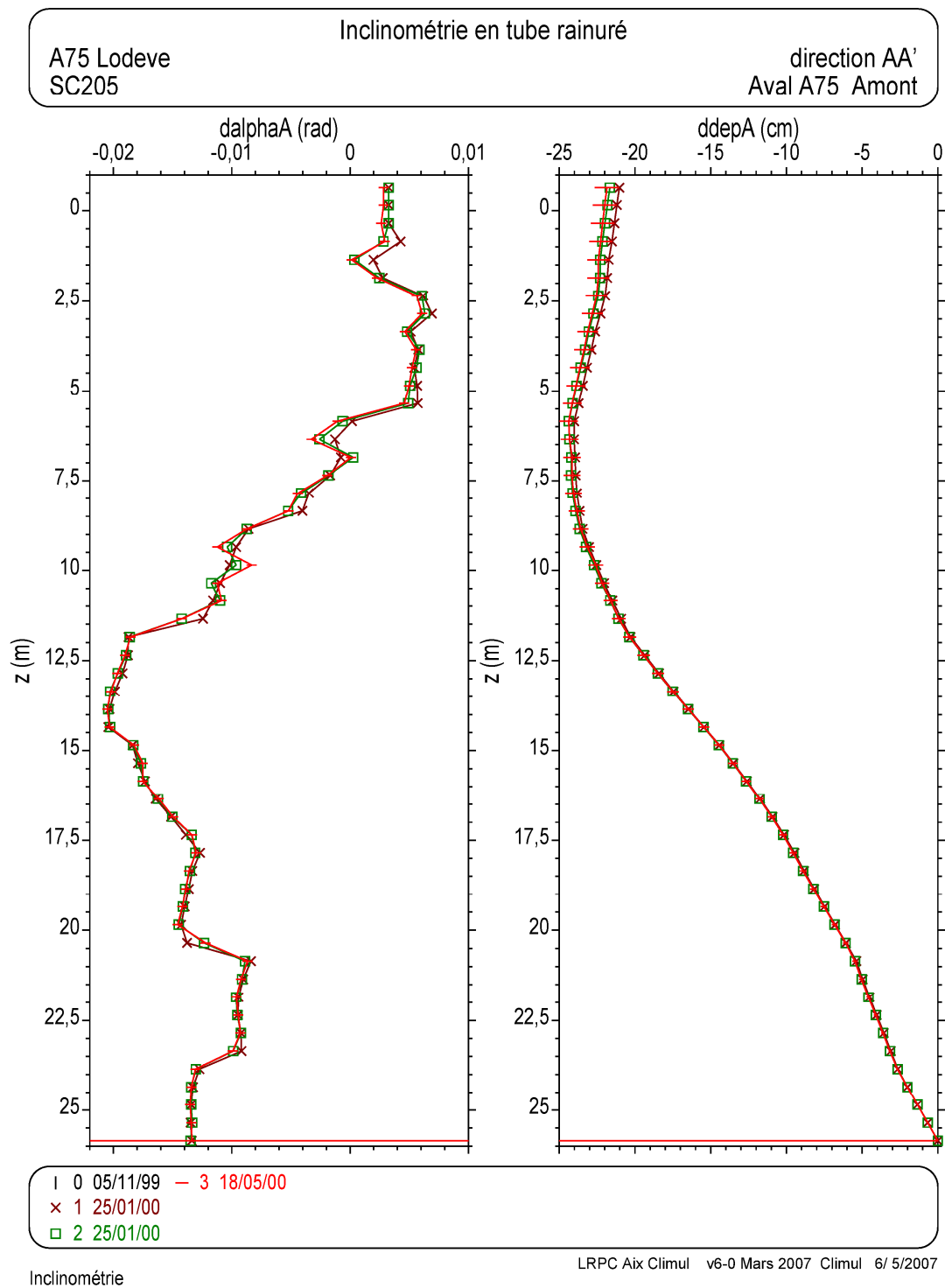


Figure 7a : Exemple 6.

Comparaison de trois relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Défauts de raccordement des éléments de tube.

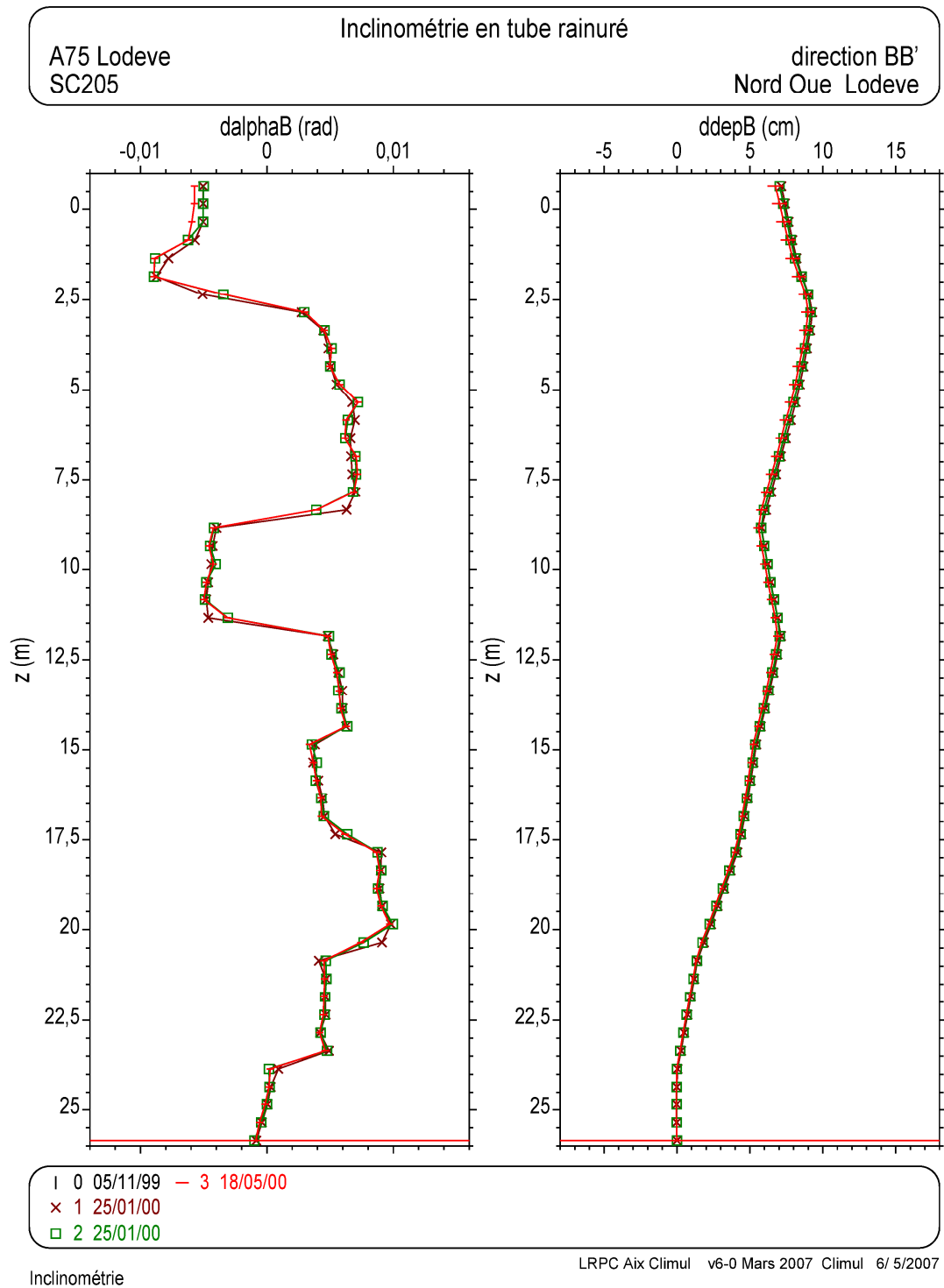


Figure 7b : Exemple 6.

Comparaison de trois relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction BB'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Défauts de raccordement des éléments de tube.

Les anomalies a_i^n étant exprimées en fonction de la profondeur z_i en chaque station et à pas constant (0,5 m dans le cas des tubes rainurés), une méthode d'analyse harmonique approchée permet de déterminer le spectre constitué par des raies d'amplitude associées à des fréquences des anomalies de courbure. Le calcul effectué sur des tubes de grande longueur a fait apparaître une raie d'amplitude maximale pour une période de 3 m, égale à la longueur des éléments du tube inclinométrique assemblés par manchonnage. L'application de cette méthode à 1301 relevés a montré que 20 % des relevés font apparaître un tel maximum à 3 m (soit 20 % des tubes inclinométriques approximativement) et que dans 69 % des relevés, l'amplitude du pic à 3 m est supérieure à la moyenne des raies. Cette analyse montre à quel point la méthode de l'inclinométrie en tube rainuré est dépendante de la qualité des tubes inclinométriques et surtout de la qualité de leur installation en sondage (foration du trou, raccord des éléments de tube, pose, scellement au terrain, etc.).

Exemples

La [figure 7](#) montre la comparaison de relevés inclinométriques à des relevés fictifs représentant la verticale passant par le pied des tubes (relevés 00). Représentées en fonction de la profondeur z , les variations angulaires montrent des successions de sauts qui se répètent tous les 3 m environ, coïncidant ainsi avec les raccords des différents éléments constitutifs des tubes rainurés. Les déplacements relatifs, qui représentent ici la distance horizontale de chacune des stations au pied du tube, donnent une image lissée de ces variations du fait de la pente moyenne des tubes.

Ces relevés inclinométriques indiquent une mauvaise qualité de la pose des tubes rainurés, qui s'exprime ici en termes de variations angulaires. Mais des problèmes similaires sont à soupçonner en termes de vrillage.

Pour résumer, les écarts-types des demi-sommes dépendent en premier lieu de la qualité des parois des tubes inclinométriques, de l'inclinaison des tubes et enfin de leur courbure. D'où l'intérêt est de placer des tubes verticaux et rectilignes, avec un manchonnage précis des éléments de tube et la limitation du vrillage. La précision de la chaîne de mesure n'intervient qu'alors et la possibilité de détection des mouvements dans de brefs délais n'est pas liée à la seule précision de l'appareillage (sonde et boîtier de mesure).

3.4 – Décalage en z

Les doubles mesures en station, d'une part, puis la comparaison des relevés successifs au relevé de référence (le relevé 01 généralement, si sa qualité le permet), d'autre part, imposent une mise en place rigoureuse de la sonde en station à chaque étape de l'auscultation. Le repérage s'effectue à l'aide des graduations du câble auquel est suspendue la sonde et d'un repère placé sur la tête du tube rainuré.

La pratique des mesures montre que les conditions d'un bon positionnement en station ne sont pas toujours respectées :

- quand le câble doit être remplacé,
- quand la tête du tube a été transformée entre deux relevés.

Si le tube inclinométrique n'est pas rectiligne et vertical, des variations angulaires se trouvent entachées d'erreurs supplémentaires dont l'amplitude adopte une allure similaire à la forme du tube inclinométrique. En voici une estimation.

Décalage en z entre deux relevés

La forme du tube dans une direction des rainures peut être représentée en fonction de la profondeur z par la variation de l'angle α entre l'axe du tube et la verticale :

$$\alpha = f(z)$$

Le pas de mesure est Δz (0,5 m). En l'absence d'un mouvement du tube, si un décalage δz se produit au relevé n, l'angle α mesuré et affecté à la station concernée sera $f(z+\delta z)$. Si le tube n'est pas vertical, une variation angulaire erronée va apparaître dans la comparaison au relevé de référence et égale à :

$$\Delta\alpha(z) = f(z+\delta z) - f(z)$$

qui, par intégration, aboutira à un déplacement relatif égal à :

$$\Delta d(z) = \sum_{\text{pied}}^z [f(z+\delta z) - f(z)] \Delta z$$

si l'on suppose que le décalage en z affecte tout le tube inclinométrique du pied vers le haut. Une expression identique vaut pour un tronçon de tube, avec des bornes appropriées. Si δz n'est pas nul, cette expression peut être écrite aussi :

$$\Delta d(z) = \sum_{\text{pied}}^z \delta z [(f(z+\delta z) - f(z)) / \delta z] \Delta z$$

dans laquelle le terme entre crochet représente la courbure du tube, c'est à dire la dérivée f' de f :

$$\Delta d(z) = \sum_{\text{pied}}^z \delta z [f'(z)] \Delta z$$

Si le décalage δz est constant, alors :

$$\Delta d(z) = \delta z \sum_{\text{pied}}^z [f'(z)] \Delta z = \delta z [f(z) - f(z_{\text{pied}})] = \delta z [\alpha - \alpha_{\text{pied}}]$$

si bien que le déplacement relatif induit par le décalage en z se trouve être proportionnel à la forme initiale du tube définie par la pente α . Le terme de proportionnalité n'est autre que le décalage δz , ce qui donne un moyen d'évaluer ce dernier dans le tronçon considéré. Cette estimation peut être rendue plus difficile si le décalage ne se produit que dans une partie réduite du tube ou s'il varie avec la profondeur pendant le relevé.

Deux exemples sont donnés à titre d'illustration sur les [figures 8 et 9](#). Le décalage en z est attribué ici à un changement du câble de suspension de la sonde inclinométrique (les graduations du nouveau câble sont décalées par rapport à l'ancien). Comme précédemment, l'exploitation commence par une comparaison des relevés 01 et 02 à la verticale (relevé 00), qui donne une approximation de la forme du tube. Le décalage en z s'aperçoit sur les graphiques. Puis une exploitation des mesures est proposée en comparant le relevé 02 au relevé 01 qui sert de référence. Ces deux relevés ont été effectués le même jour, avant et après changement du câble, ce qui permet de supposer que le tube n'a pas été déformé entre les deux relevés. Il apparaît clairement, en comparant les graphiques ([figure 9](#)), que le déplacement relatif calculé entre les relevés 02 et 01 prend la forme de la variation des angles α avec la profondeur.

Le [tableau 5](#) récapitule les variations observées sur les graphiques.

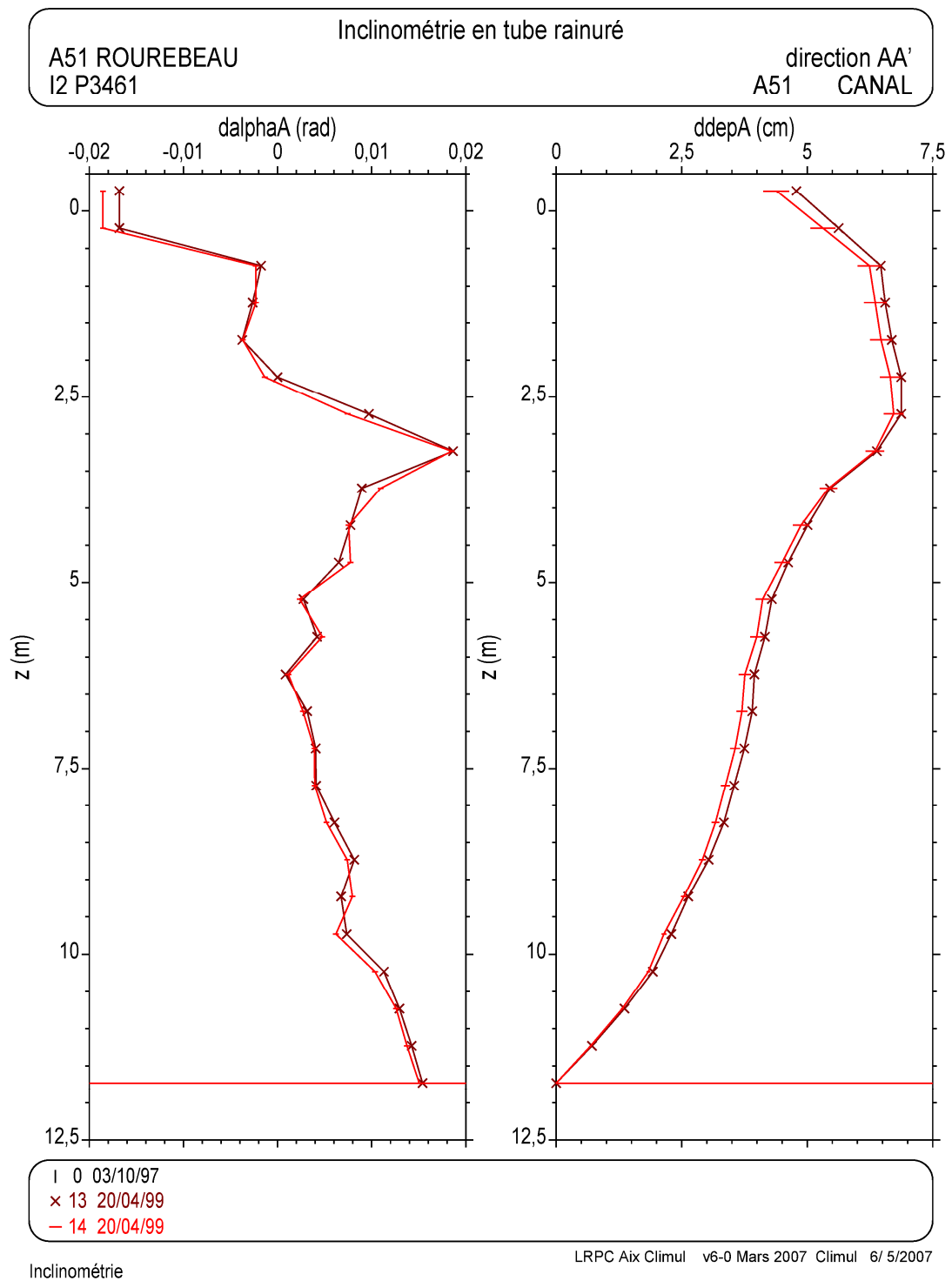


Figure 8a : Exemple 7.

Comparaison de deux relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'.
 Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.
 Effet du décalage en z entre deux relevés.

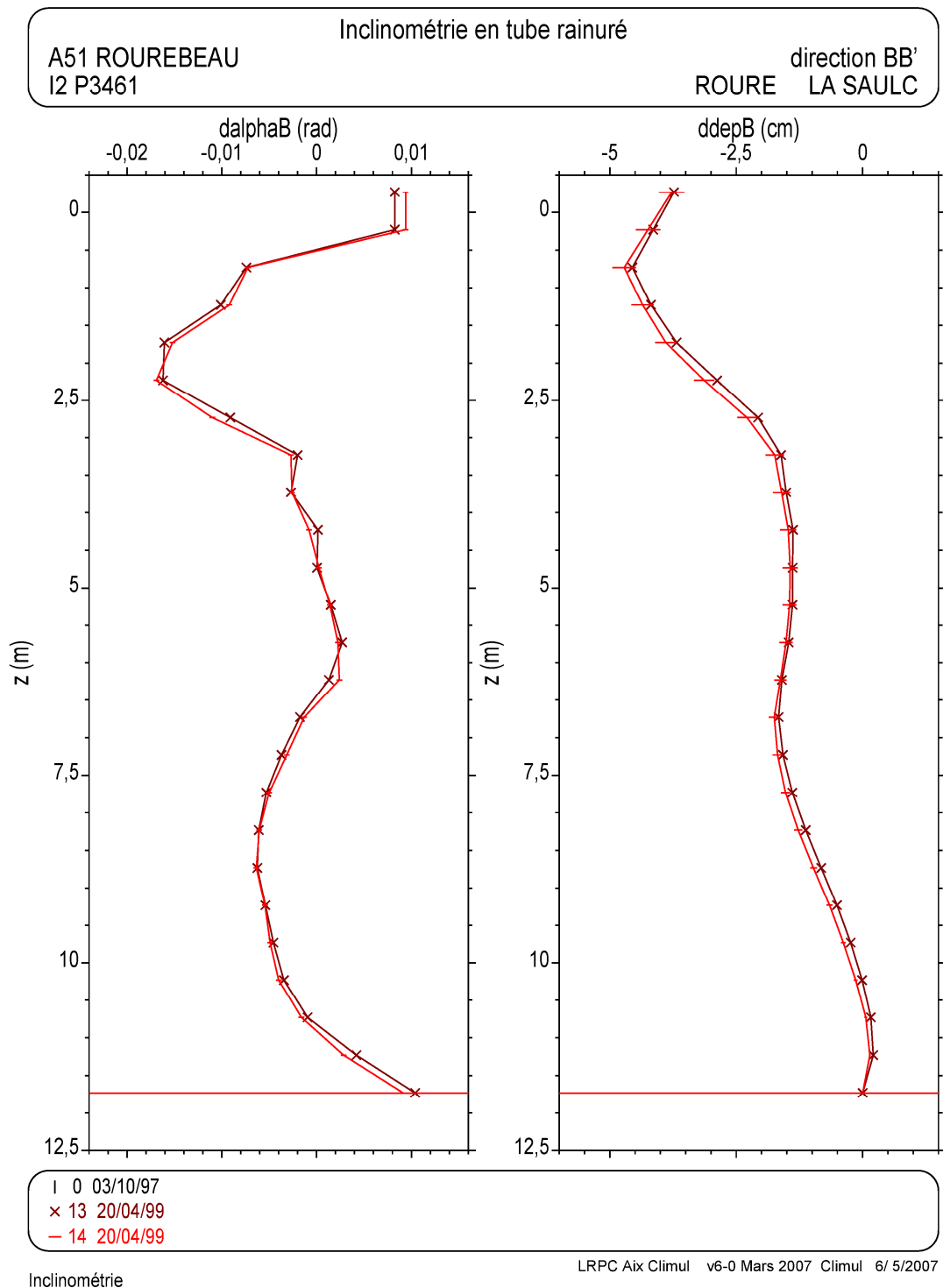


Figure 8b : Exemple 7.

Comparaison de deux relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction BB'.
 Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur.
 Effet du décalage en z entre deux relevés.

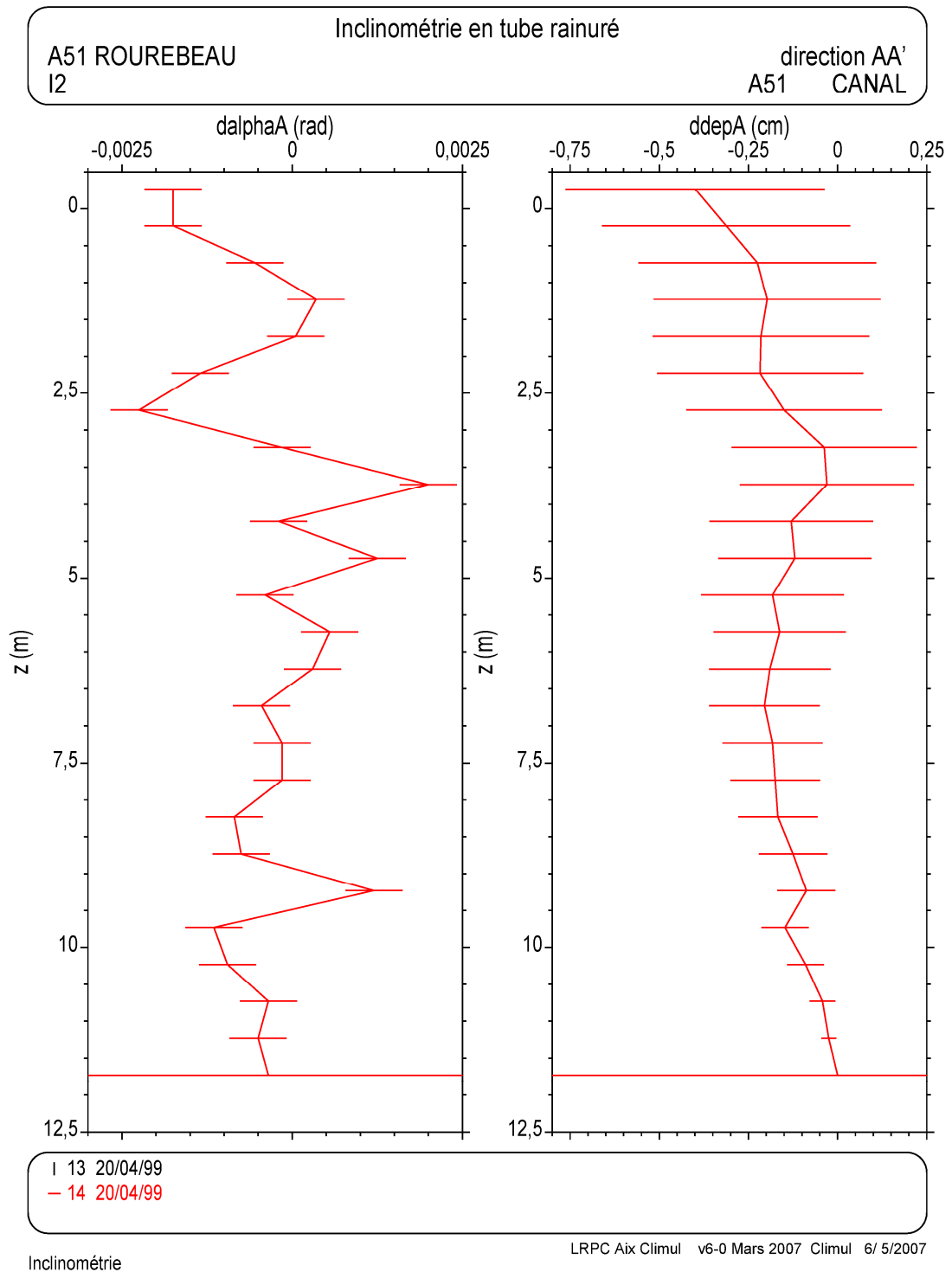


Figure 8c : Exemple 7.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
 Le relevé 13 sert de référence. Le relevé 14 porte les barres d'incertitude.
 Effet du décalage en z entre deux relevés.

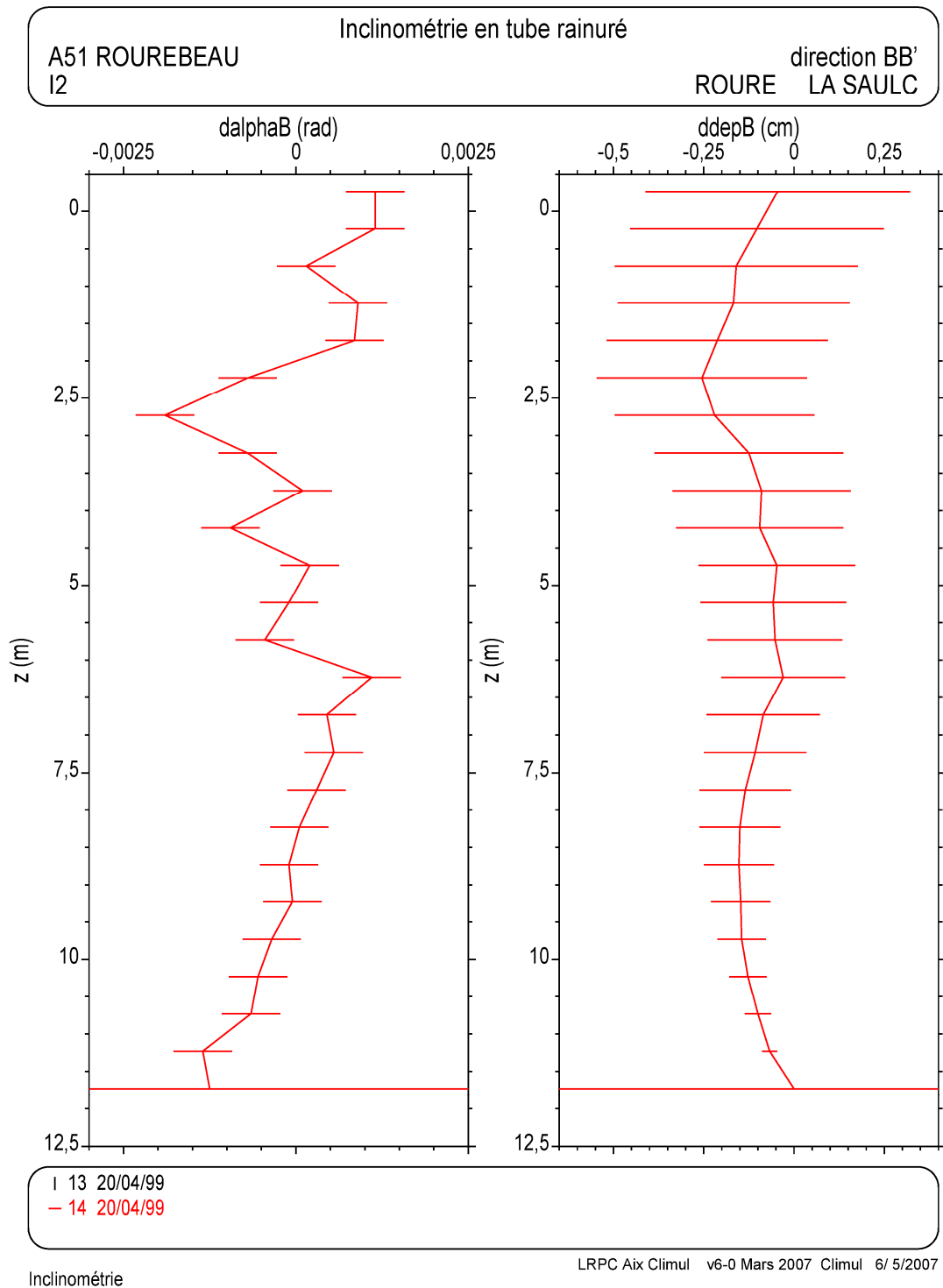


Figure 8d : Exemple 7.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.

Le relevé 13 sert de référence. Le relevé 14 porte les barres d'incertitude. Effet du décalage en z entre deux relevés.

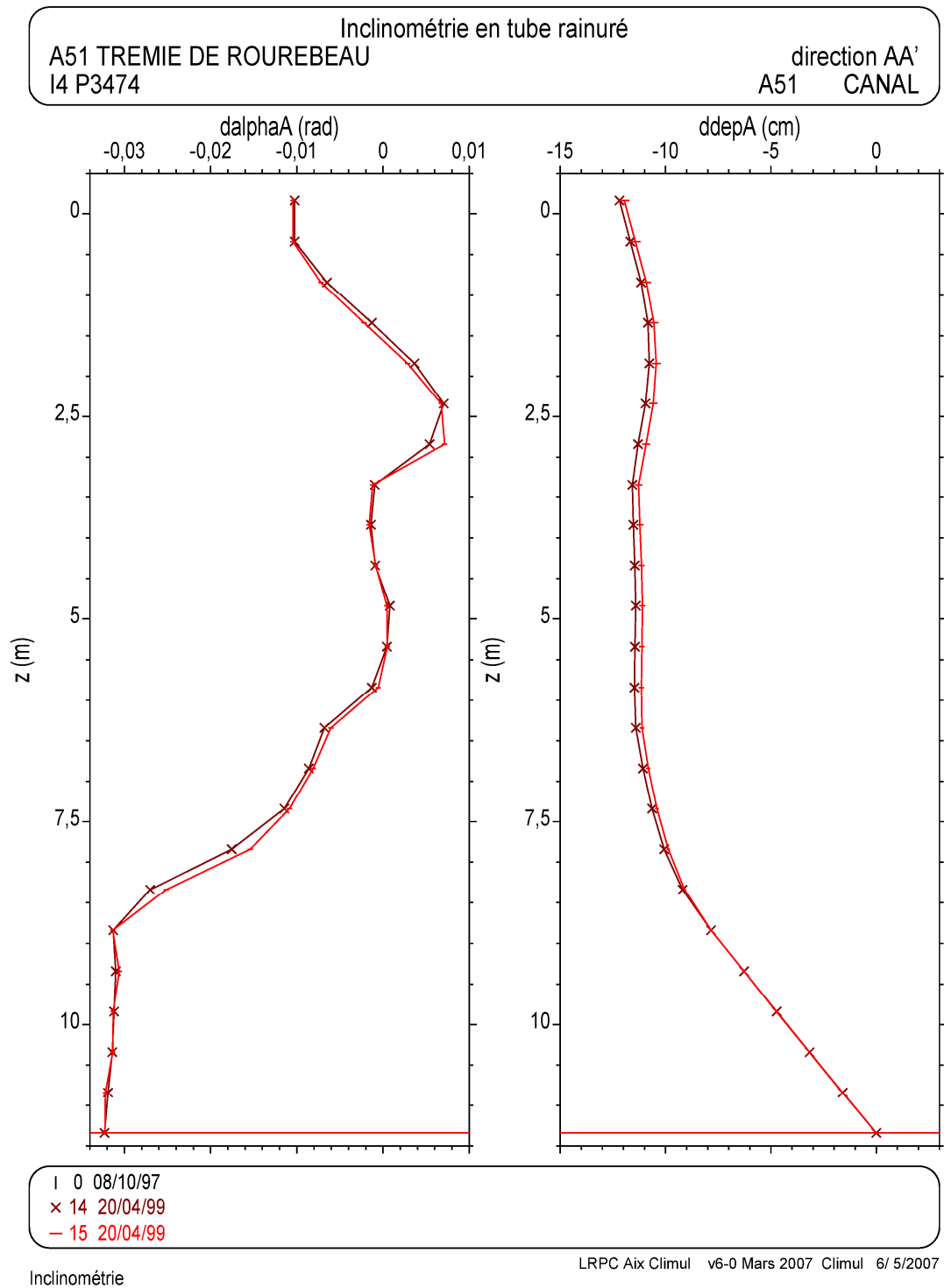


Figure 9a : Exemple 8.

Comparaison de deux relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Effet du décalage en z entre deux relevés. Avant et après le changement du câble.

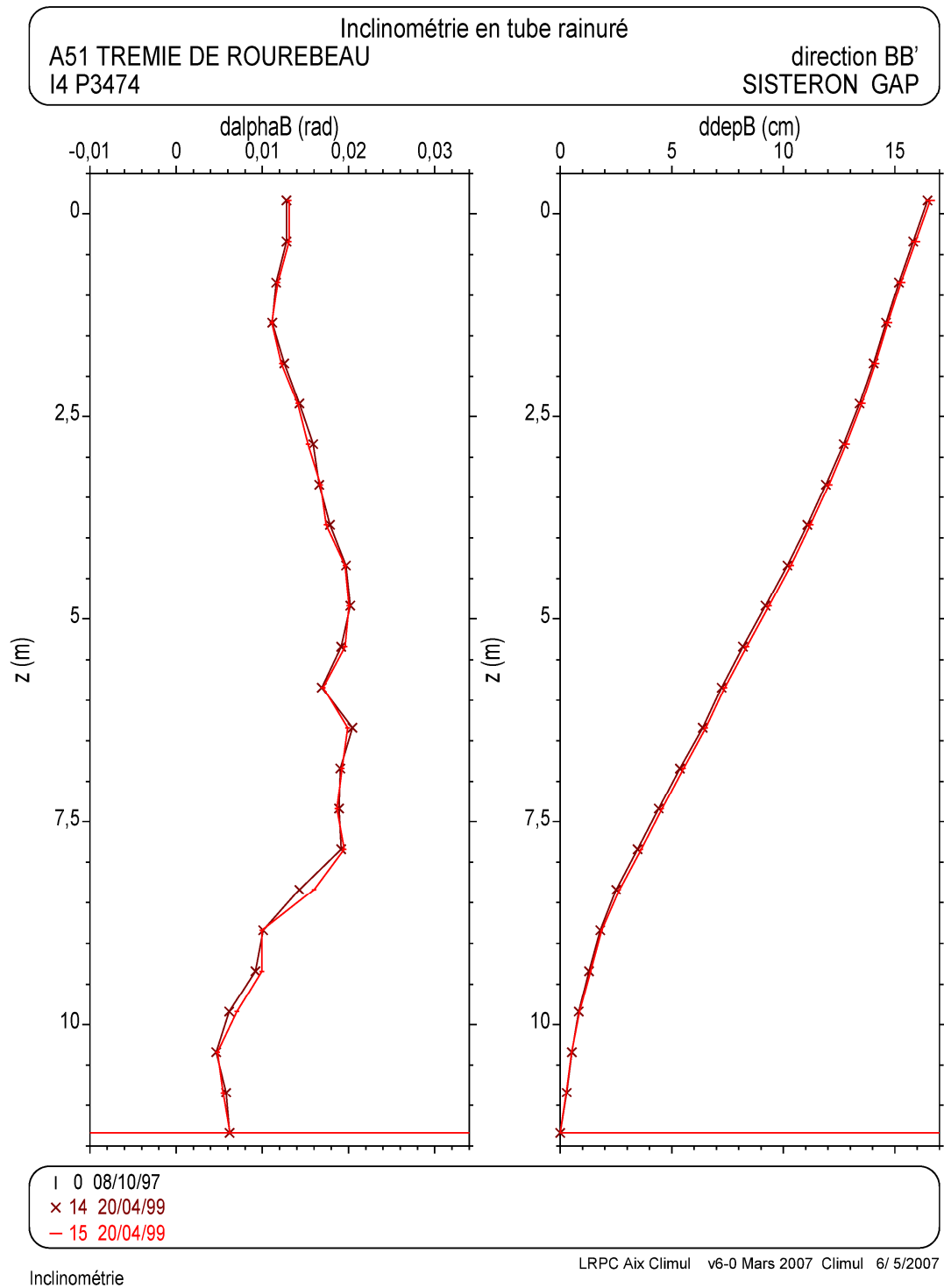


Figure 9b : Exemple 8.

Comparaison de deux relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction BB'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Effet du décalage en z entre deux relevés. Avant et après le changement du câble.

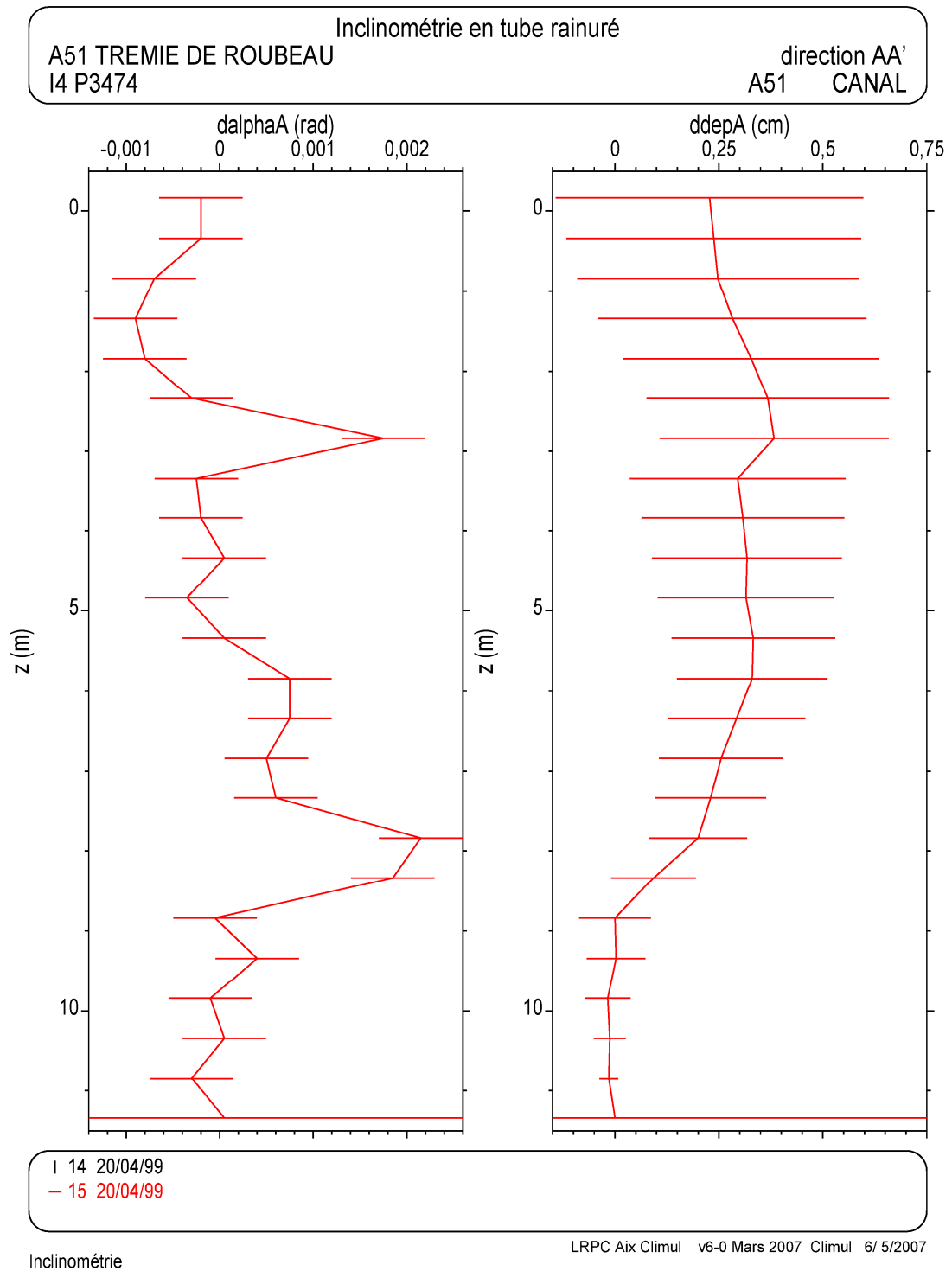


Figure 9c : Exemple 8.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'. Le relevé 14 sert de référence. Le relevé 15 porte les barres d'incertitude. Effet du décalage en z entre deux relevés. Avant et après le changement du câble.

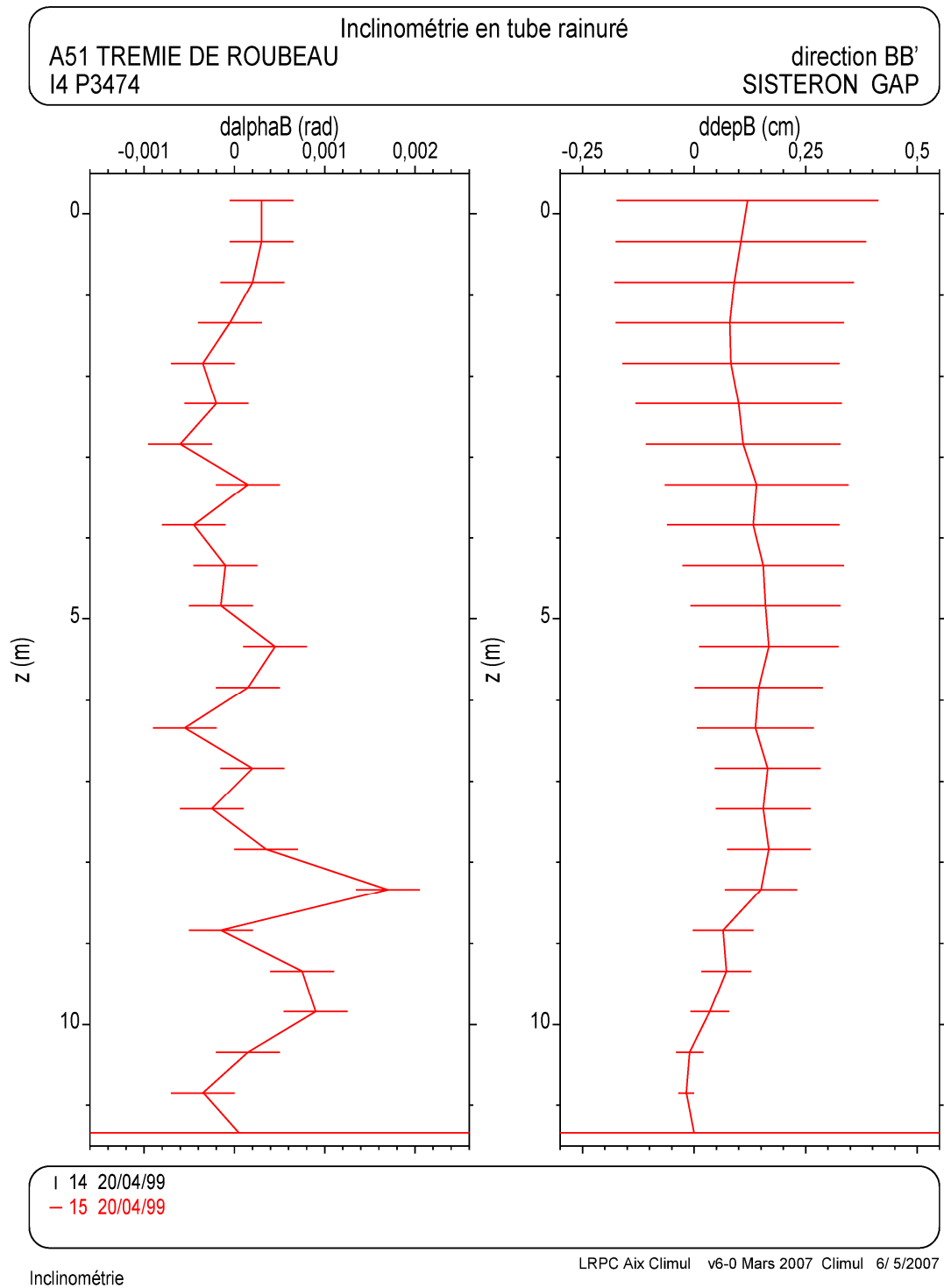


Figure 9d : Exemple 8.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.

Le relevé 14 sert de référence. Le relevé 15 porte les barres d'incertitude.

Avant et après le changement du câble.

Effet du décalage en z entre deux relevés. Avant et après le changement du câble.

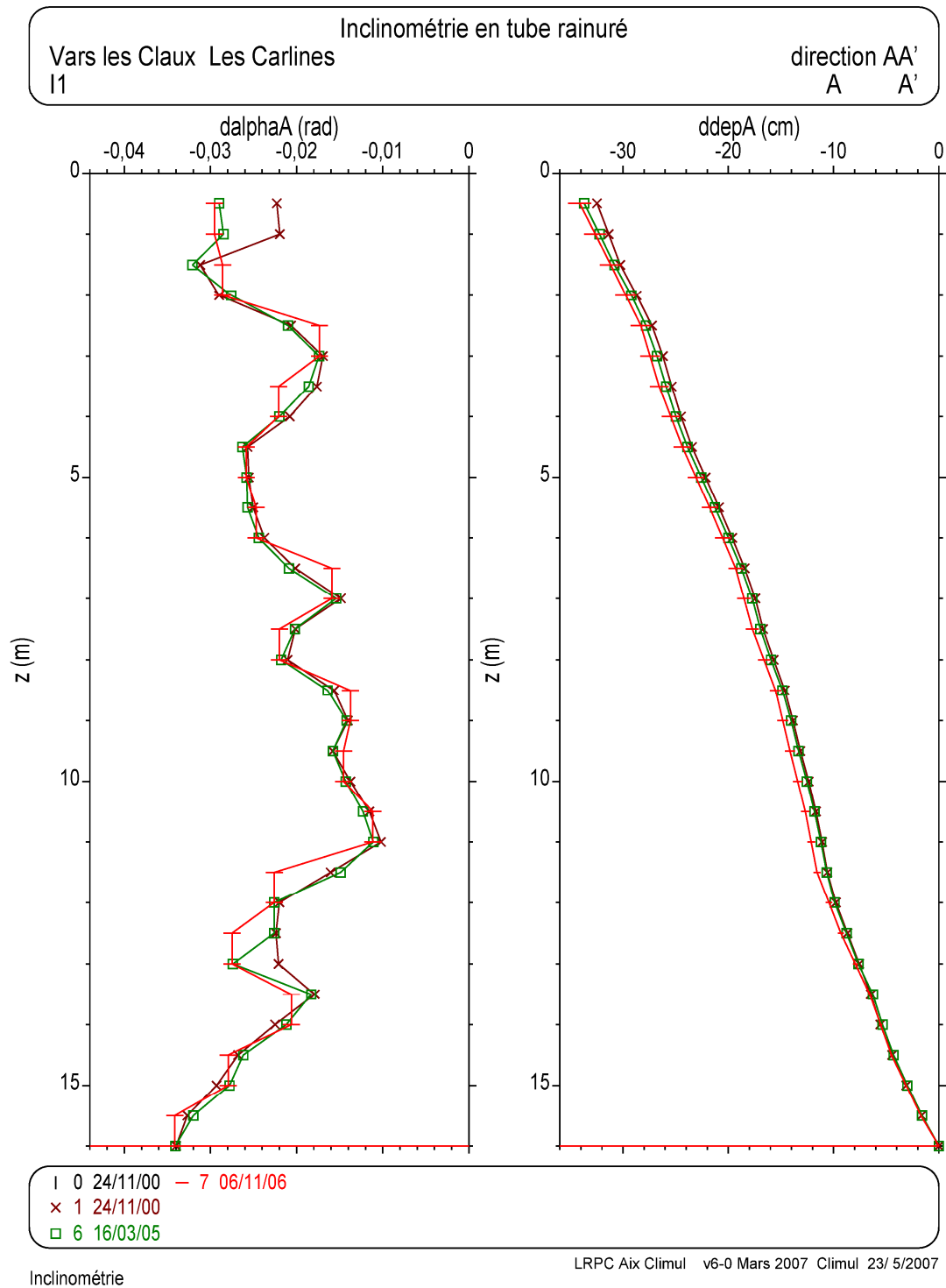


Figure 10a : Exemple 9.

Comparaison de trois relevés inclinométriques pour obtenir une approximation de la forme du tube. Comparaison à la verticale (relevé fictif 00). Direction AA'. Pente du tube et distance par rapport au pied en fonction de la profondeur. Effet d'un changement du pas de mesure en z de 0,5 m (relevés 01 et 06) à 1 m (relevé 07, où la mesure à la station intermédiaire est supposée égale à la mesure à la station précédente).

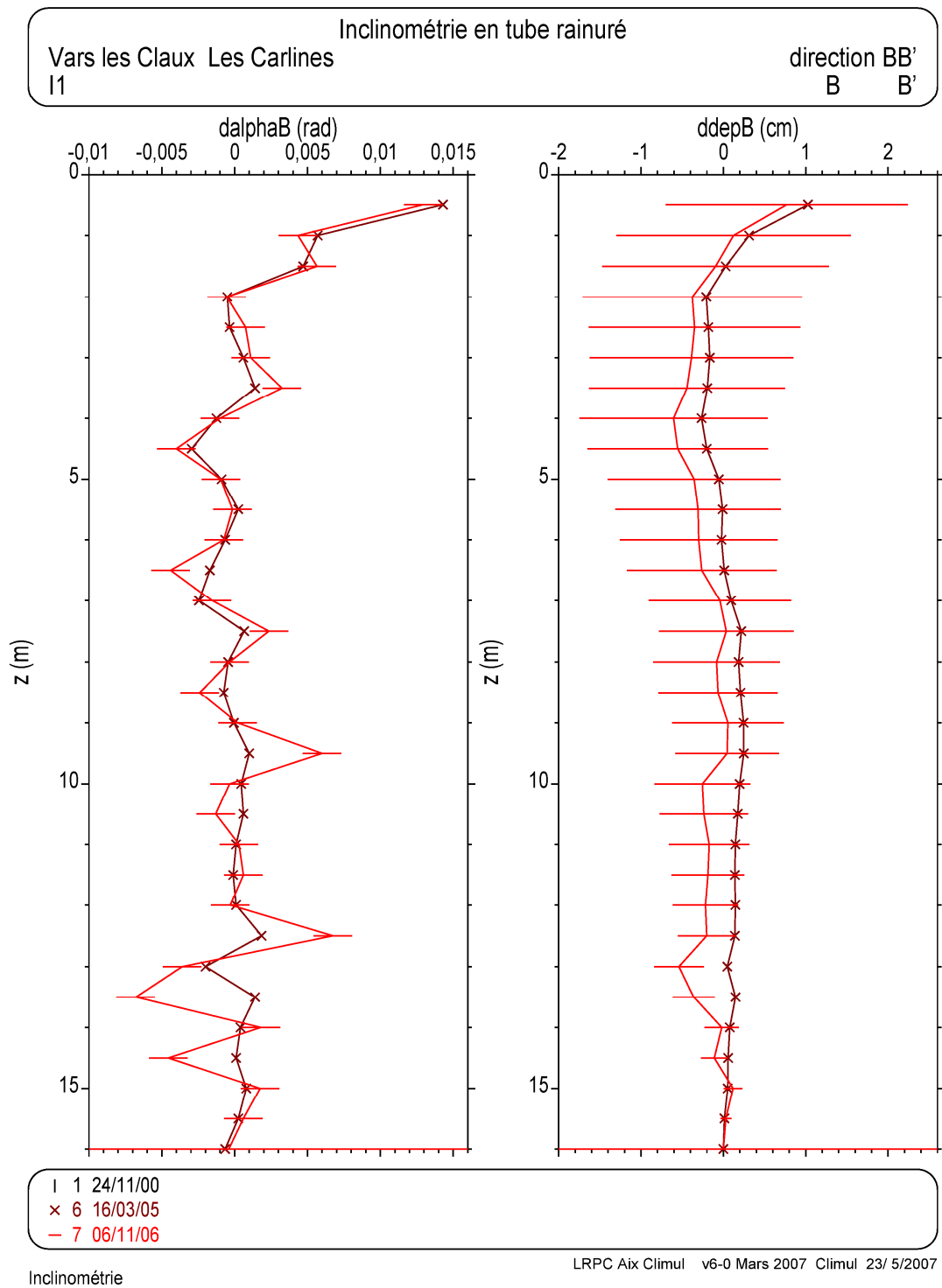


Figure 10d : Exemple 9

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 07 porte les barres d'incertitude.

Effet d'un changement du pas de mesure en z de 0,5 m (relevés 01 et 06) à 1 m (relevé 07, où la mesure à la station intermédiaire est supposée égale à la mesure à la station précédente).

Tableau 5 : Variations dues à un décalage en z entre deux relevés

tube	direction	plage de α (rad)	variation de α (rad)	plage de Δd (cm)	variation de Δd (cm)
I2 (fig. 8)	AA'	-0,02 à 0,02	0,04	0 à -0,4	0,40
	BB'	-0,02 à 0,01	0,03	0 à -0,25	0,25
I4 (fig. 9)	AA'	-0,03 à 0,01	0,04	0 à 0,35	0,35
	BB'	0,005 à 0,02	0,015	0 à 0,10	0,10

Le rapport entre Δd et α est égal à 10 cm environ, de qui représente approximativement le décalage δz . L'expression $\Delta d = \delta z [\alpha - \alpha_{\text{pied}}]$ montre que ce type d'erreur ne peut être réduit que si δz est nul ou si le tube est vertical et rectiligne ($\alpha = \alpha_{\text{pied}} = 0$).

Décalage en z pendant un relevé

Si un décalage en z affecte les doubles mesures en station, un raisonnement analogue permet de montrer que les erreurs introduites sur la variation angulaire adoptent une allure proche de la forme du tube inclinométrique. Comme précédemment, ces erreurs ne peuvent être réduites qu'en présence d'un tube rectiligne et proche de la verticale. Toutes les déformations subies ultérieurement par le tube, du fait des déplacements horizontaux produits par le massif, concourent à augmenter l'incertitude sur la variation angulaire.

3.5 – Changement du pas de mesure

Le changement du pas de mesure pendant l'auscultation d'un tube inclinométrique constitue aussi une source d'erreur. On considère un premier relevé effectué dans deux stations successives, séparée par le pas d'auscultation p . Les variations angulaires mesurées à ces deux stations sont $\Delta\alpha_1$ et $\Delta\alpha_2$. Si, pendant le relevé suivant, on ne mesure que la variation angulaire de la station 1, avec un pas de mesure égal à $2p$, la comparaison avec le relevé précédent ne peut être effectuée qu'en supposant que $\Delta\alpha_2 = \Delta\alpha_1$. Le déplacement relatif calculé avec ces deux relevés vaut respectivement :

$$\Delta d_p = p \sum (\Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2) \qquad \Delta d_{2p} = 2p \sum \Delta\alpha_1$$

La différence des déplacements relatifs vaut :

$$\Delta d_{2p} - \Delta d_p = p \sum (\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2) \qquad = p \sum [(\Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2) / p] p$$

de la forme :

$$\Delta d_{2p} - \Delta d_p = \sum f'(z) dz = p [f(z) - f(z_0)]$$

où $\alpha = f(z)$ représente la variation de la pente du tube inclinométrique avec la profondeur et $f(z_0)$ la pente du pied du tube. Cet écart est nul si $f(z) = f(z_0)$, c'est à dire si la pente α est constante, ou, autrement dit, si le tube est rectiligne. Si le tube n'a pas été déformé entre les deux relevés et s'il est courbe, la comparaison des deux relevés introduit une erreur sur le déplacement relatif qui est proportionnelle à la variation de la pente du tube.

Un exemple est donné sur la [figure 10](#). La comparaison des relevés porte alors sur les relevés 01, 06 et 07, Les deux premiers ont été effectués avec un pas égal à 0,5 m, le dernier avec un pas égal à 1 m. Les variations angulaires, qui apparaissent entre 11 et 14 m sur AA' et entre 12 et 15 m sur BB', sont proportionnelles aux écarts angulaires avec la verticale, dans cette région où le tube est le plus courbé.

4. Flambement des tubes inclinométriques

Les relevés inclinométriques montrent fréquemment le flambement des tubes rainurés. Ces déformations inattendues trouvent comme origine des déplacements verticaux d'amplitude limitée qui sollicitent le tube dans sa direction axiale, traduisant ainsi la manifestation de phénomènes variés au sein du massif ausculté (tassements, déplacements à forte composante verticale, fluctuations saisonnières du massif, etc.). Le flambement est associé à des défauts de scellement des tubes le plus souvent.

4.1 – Flambement sans déplacement

La [figure 11](#) donne un premier exemple où le déplacement horizontal de la tête du tube est nul. Avec une amplitude de près d'un centimètre dans les deux directions des rainures, cette déformation ne semble pas attribuée à un mouvement du massif, mais plutôt à un réajustement du tube dans l'espace annulaire du forage imparfaitement rempli de coulis de scellement.

4.2 – Flambement dans une couche "molle" du massif

L'exemple de la [figure 12](#) montre deux zones de flambement d'un tube rainuré, dont la plus importante est située entre 27 et 36 m de profondeur. La coupe de terrain au droit du tube est la suivante :

- de 0,0 à 10,5 m argile,
- de 10,5 à 28,5 m calcaire,
- de 28,5 à 34,0 m argile et blocs,
- de 34,0 à 42,5 m calcaire.

La zone principale de flambement (27 à 36 m) est située dans la couche formée par des argiles et des blocs, vraisemblablement plus molle que les autres parties du massif, mais qui peut être aussi à l'origine de difficultés de scellement du tube (pertes de coulis).

4.3 – Flambement dans un remblai

Cet exemple montre le flambement d'un tube rainuré installé dans un remblai formé d'éléments rocheux et dans lequel des difficultés de scellement du tube ont été rencontrées vraisemblablement ([figure 13](#)).

4.4 – Flambement sous un remblai

Dans cet exemple ([figure 14](#)), le tube inclinométrique traverse le corps d'un remblai puis le sol de fondation. La coupe des terrains est la suivante :

- de 0 à 12,5 m remblai,
- de 12,5 à 17 m limon,
- de 17 à 28,5 m alluvions.

Le remblai a été édifié plusieurs années avant la pose du tube inclinométrique. Le flambement se situe dans la couche de limon qui forme la partie supérieure du massif de sol et qui tasse progressivement sous le poids du remblai (quatre années d'observation).

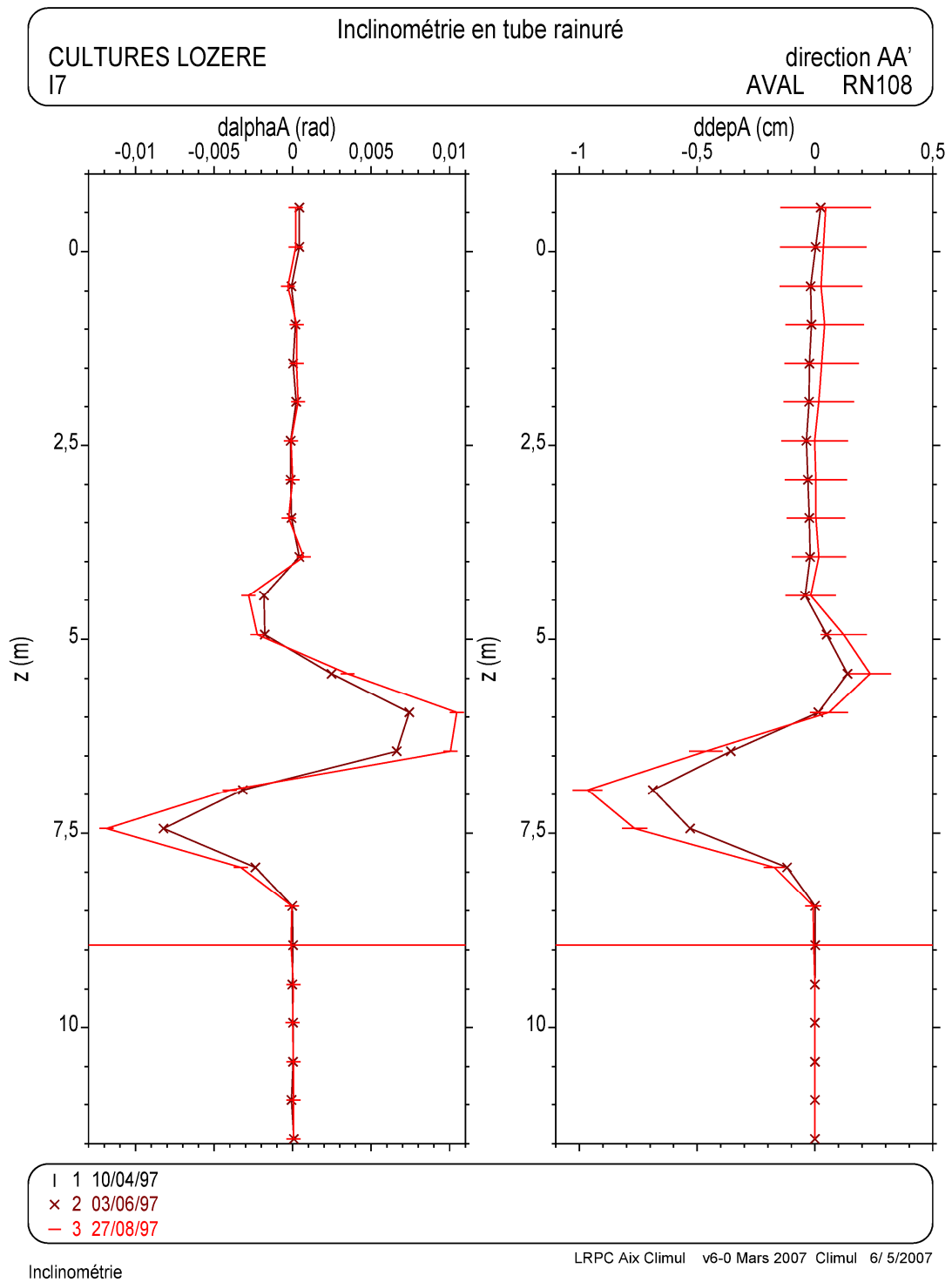


Figure 11a : Exemple 10.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 03 porte les barres d'incertitude.
Flambement sans déplacement.

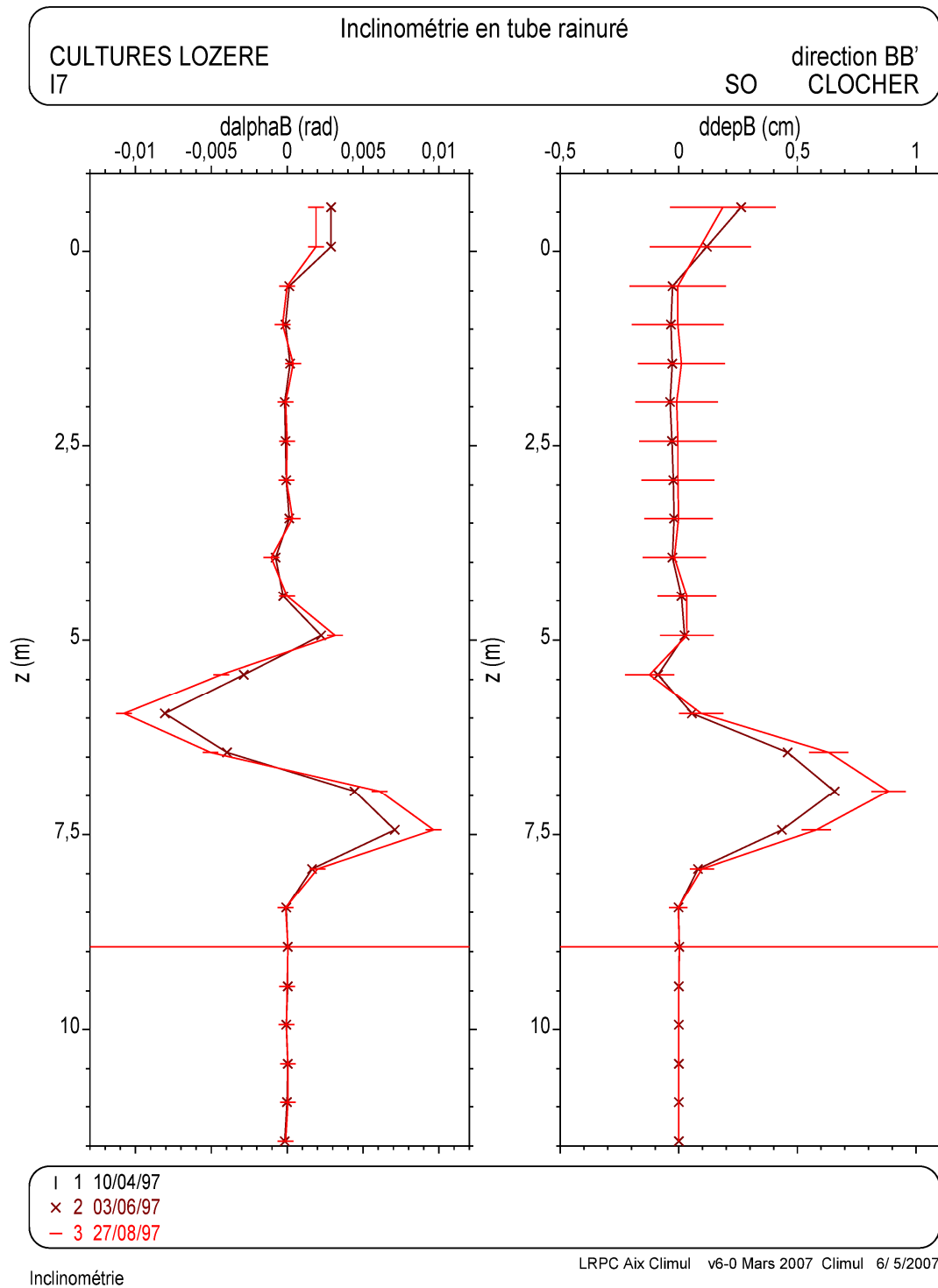


Figure 11b : Exemple 10.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 03 porte les barres d'incertitude.
Flambement sans déplacement.

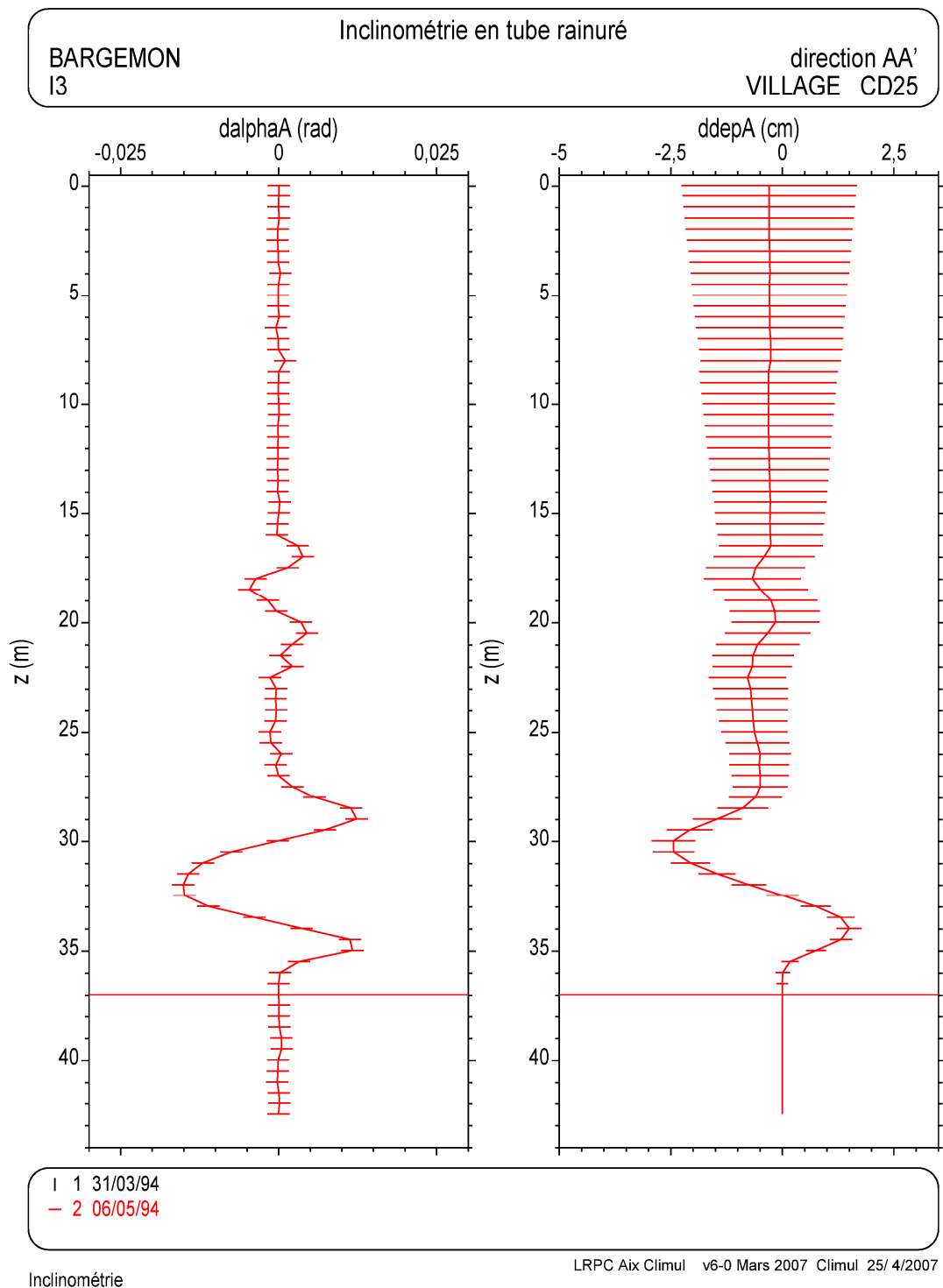


Figure 12a : Exemple 11.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 02 porte les barres d'incertitude.
Flambement dans une couche molle.

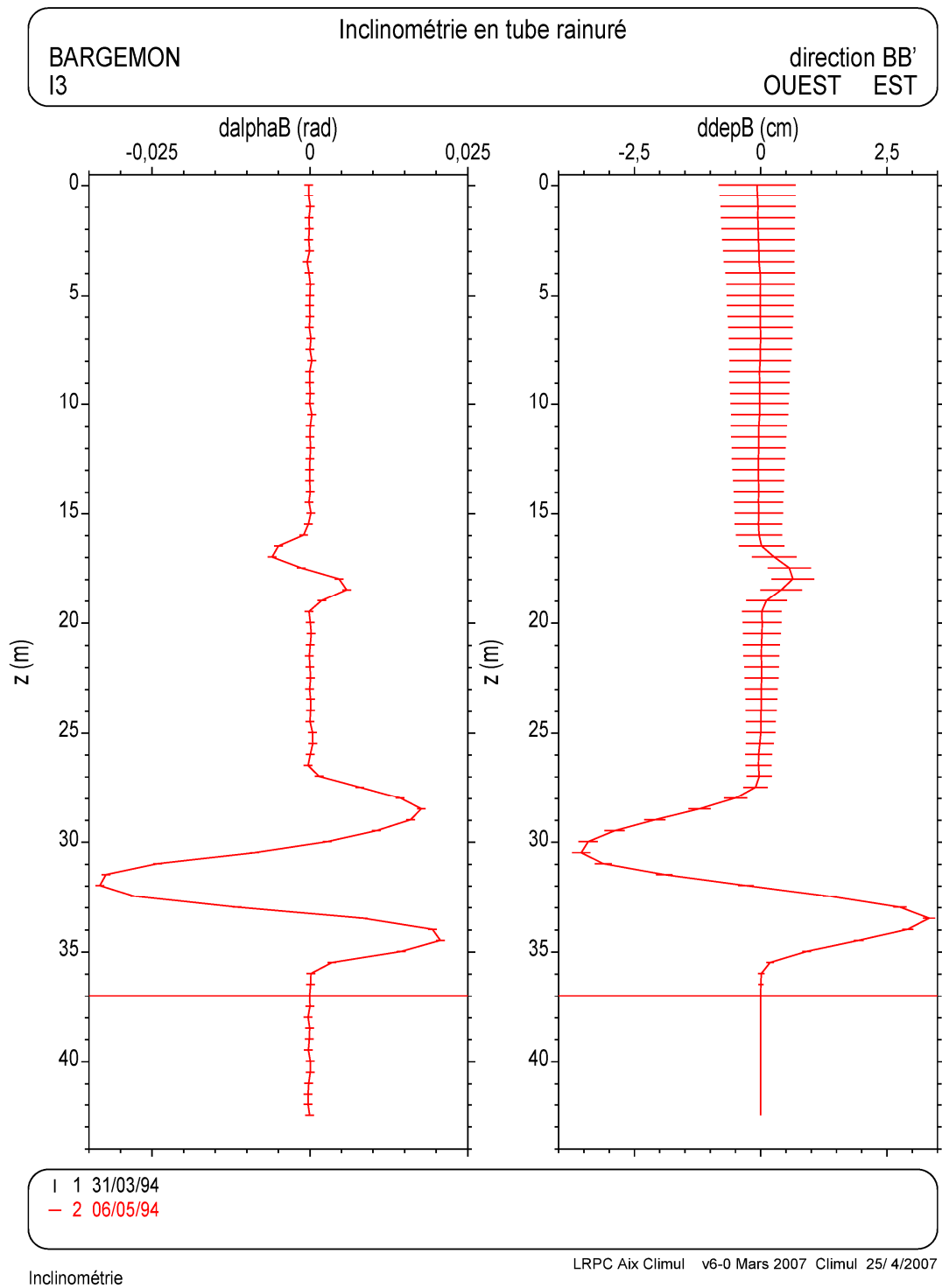


Figure 12b : Exemple 11.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 02 porte les barres d'incertitude.
Flambement dans une couche molle.

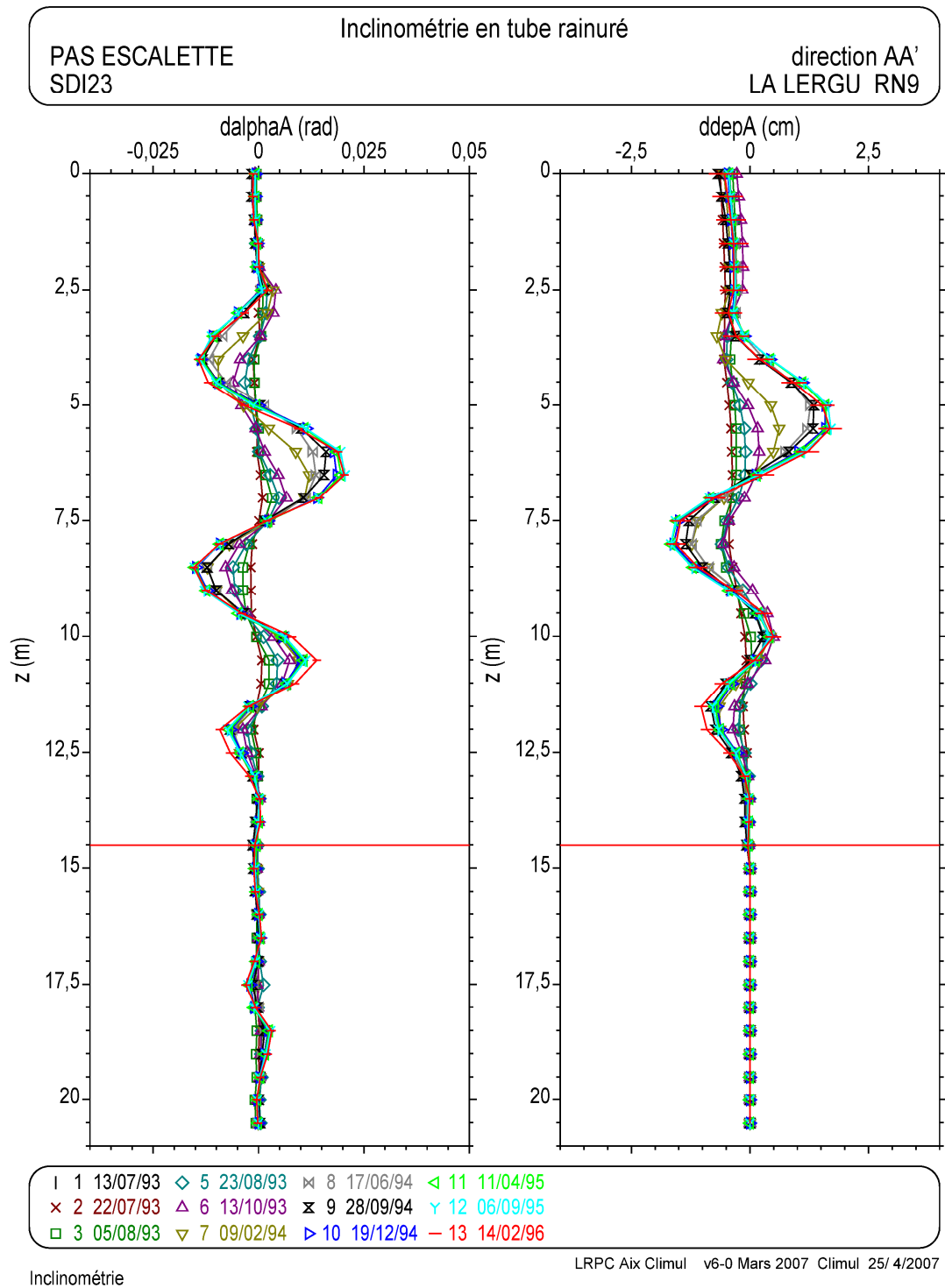


Figure 13a : Exemple 12.

Comparaison de douze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.

Flambement dans un remblai.

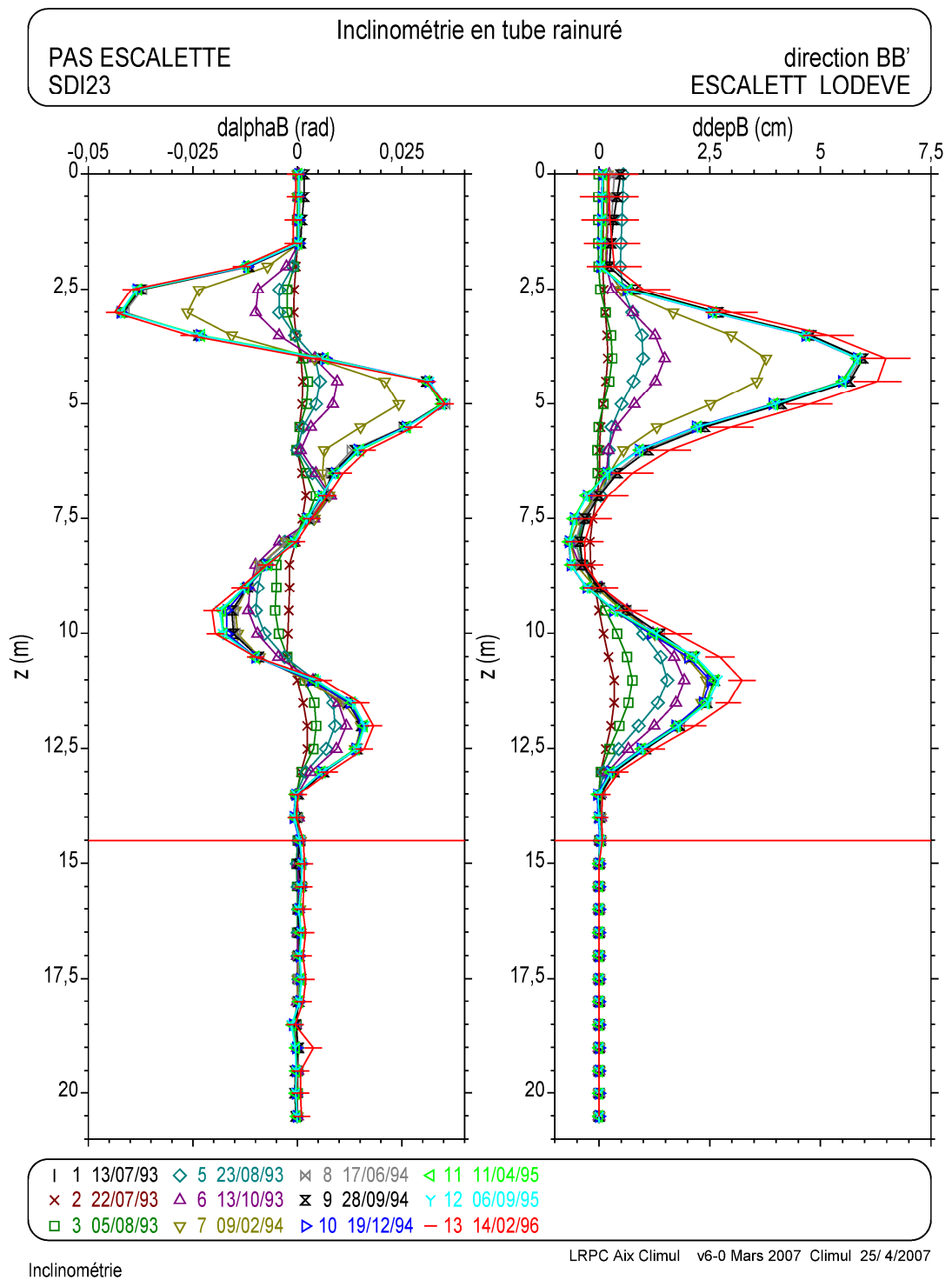


Figure 13b : Exemple 12.

Comparaison de douze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Flambement dans un remblai.

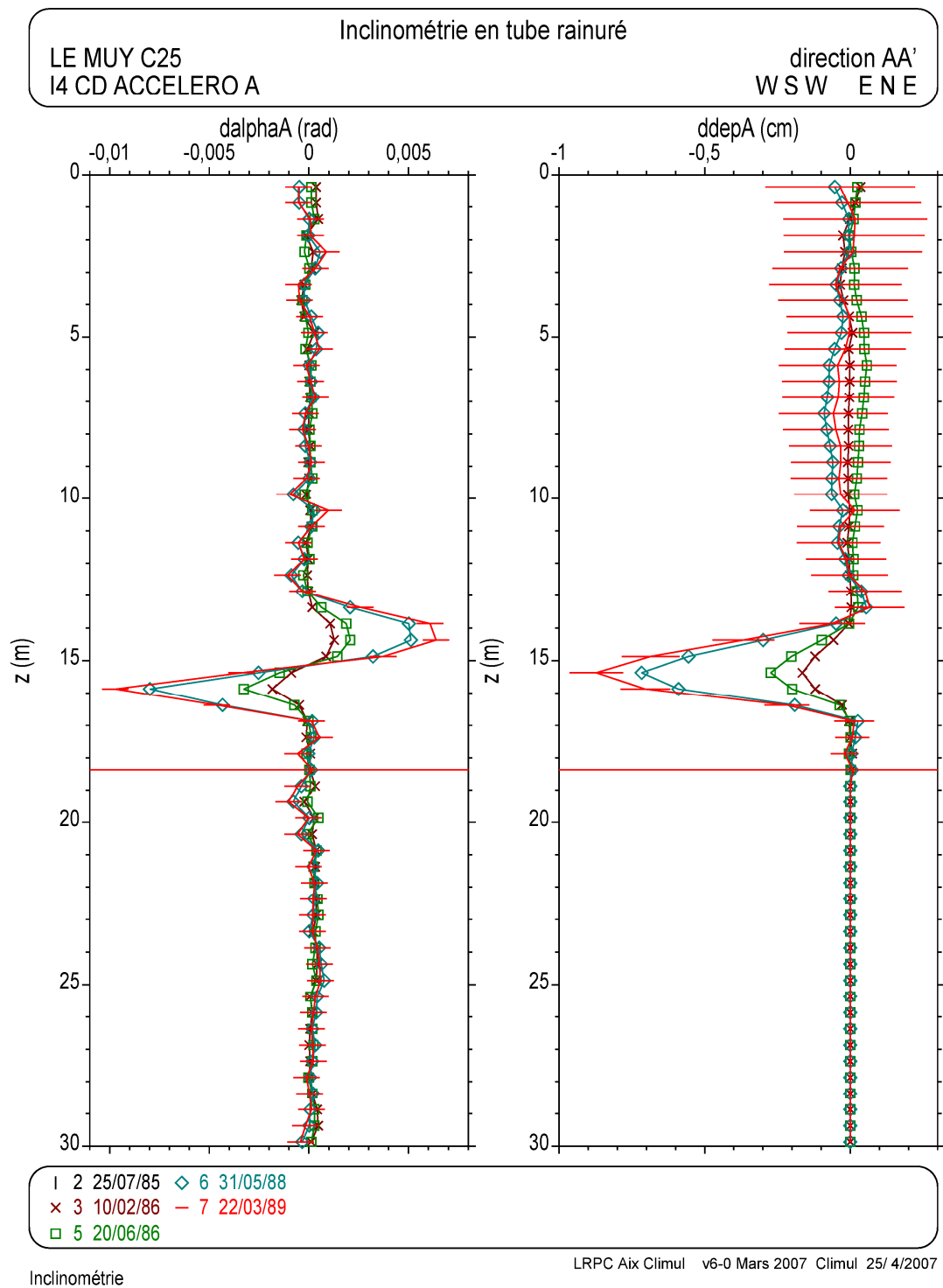


Figure 14a : Exemple 13.

Comparaison de six relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 02 sert de référence. Le relevé 07 porte les barres d'incertitude.
Flambement sous un remblai.

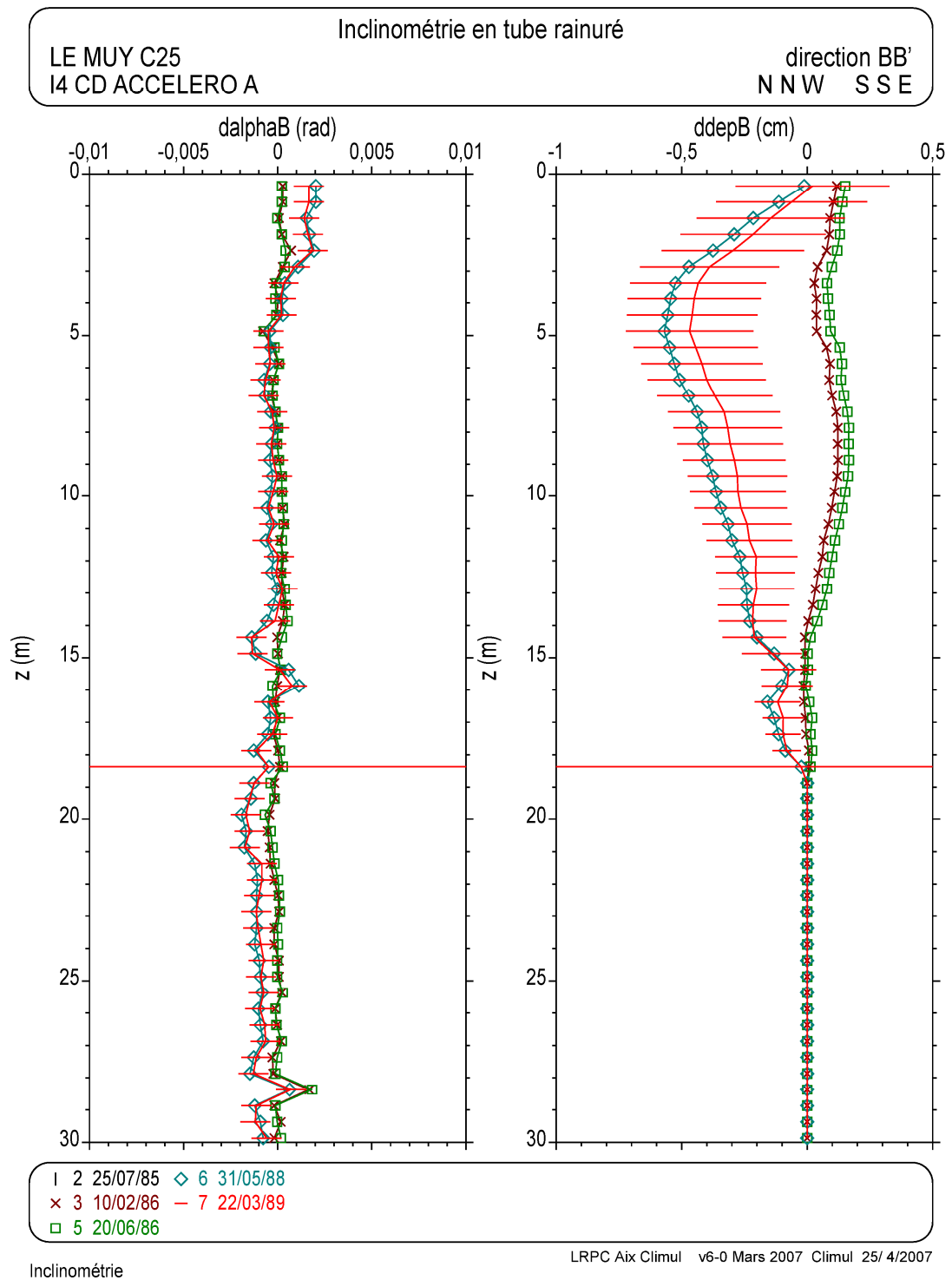


Figure 14b : Exemple 13.

Comparaison de six relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'. Le relevé 02 sert de référence. Le relevé 07 porte les barres d'incertitude. Flambement sous un remblai.

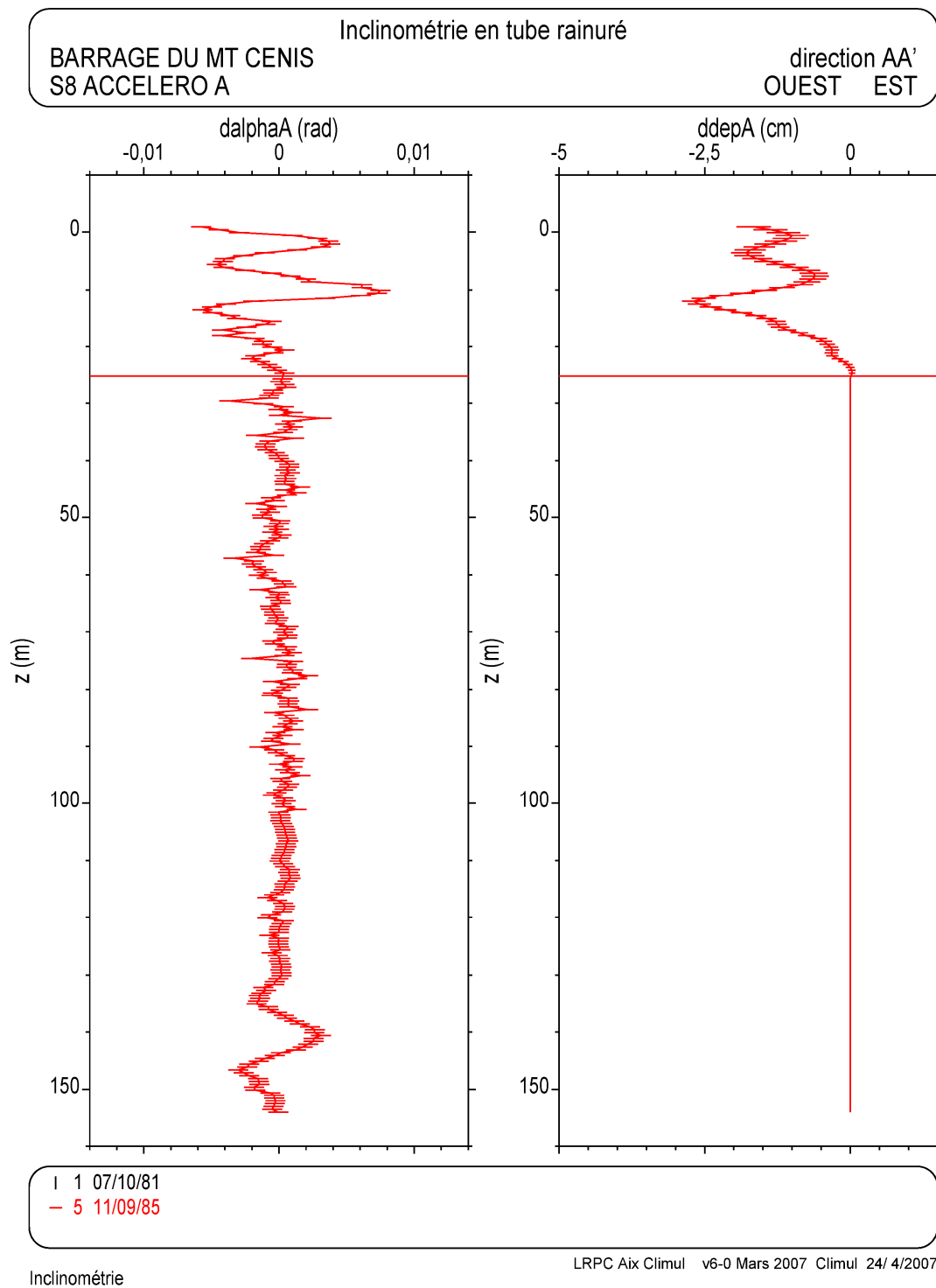


Figure 15a : Exemple 14.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 05 porte les barres d'incertitude.
Flambement par défaut de scellement.

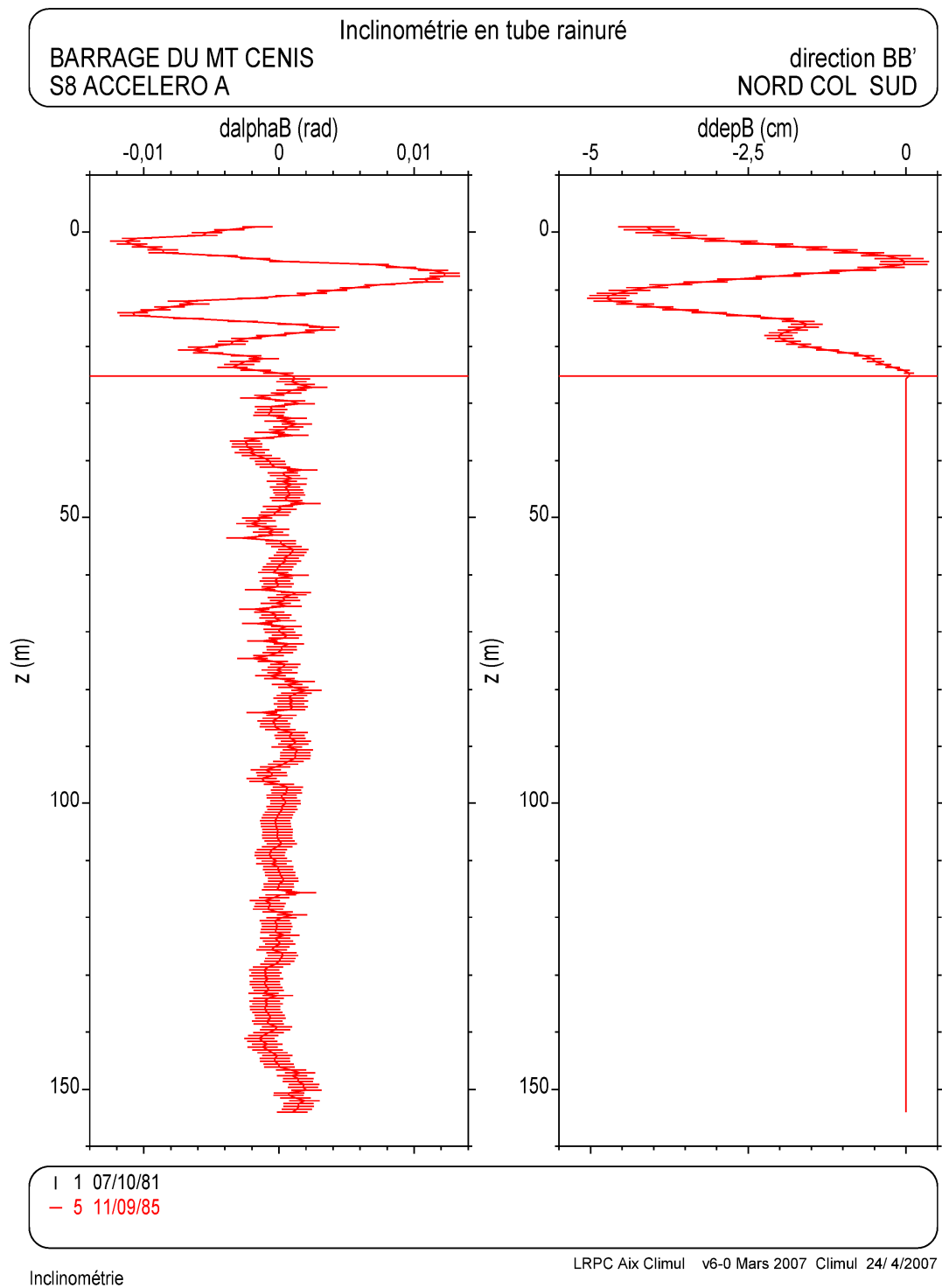


Figure 15b : Exemple 14.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 05 porte les barres d'incertitude.
Flambement par défaut de scellement.

4.5 – Flambement par défaut de scellement

De grandes difficultés avaient été rencontrées pour tenter de sceller ce tube rainuré à grande profondeur (154 m). Un dispositif de centreurs avait été mis en œuvre pour maintenir le tube dans l'axe du forage, sans autre forme de scellement. Mais ce dispositif s'est avéré insuffisant pour prévenir le flambement ([figure 15](#)).

5. Exemples particuliers

Les exemples suivants donnent différentes illustrations de déformations mesurées dans des tubes inclinométriques rainurés.

5.1 – Vitesse d'évolution variable

L'exemple de la [figure 16](#) montre l'évolution des déplacements sur une surface de rupture située entre 12 et 14,5 m de profondeur, pendant une période d'observation de douze ans. Trop discret dans le temps, le suivi inclinométrique ne permet pas de décrire en détail la vitesse d'évolution du glissement ([figure 16c](#)).

5.2 – Zone de cisaillement épaisse

Cet exemple ([figure 17](#)) montre une zone de cisaillement relativement épaisse (3 m), entre 10,5 et 13,5 m de profondeur. De telles constatations sont plutôt rares en matière de glissement de terrain, car les surfaces de rupture généralement observées n'intéressent que quelques stations le plus souvent (0,5 à 2 m). Contrairement à l'exemple précédent, la vitesse de cisaillement augmente dans la période d'observation.

5.3 – Plusieurs surfaces de rupture

La présence de plusieurs surfaces de rupture dans un versant n'est pas courante. Néanmoins, plusieurs exemples de ce type ont été rencontrés :

- exemple 17, [figure 18](#) ;
- exemple 18, [figure 19](#) ;
- exemple 19, [figure 20](#) ;
- exemple 20, [figure 21](#).

Dans ces exemples, les vitesses de cisaillement apparaissent comme globalement constantes, sur des périodes d'observation de plusieurs années. L'exemple 4 montre une zone de flambement entre 29 et 41 m de profondeur, au sommet de laquelle apparaît ensuite une surface de cisaillement. Dans la surface supérieure, située vers 19 m de profondeur, le tube présente aussi des signes de flambement.

5.4 – Flambement et rupture

L'exemple de la [figure 22](#) montre un flambement important du tube inclinométrique entre 8 et 17 m de profondeur. Cette exploitation montre aussi un déplacement en tête de l'ordre de 2 cm dans la direction AA' (vers l'aval). Mais la présence des déformations de flambement du tube ne permet pas de localiser une surface de rupture.

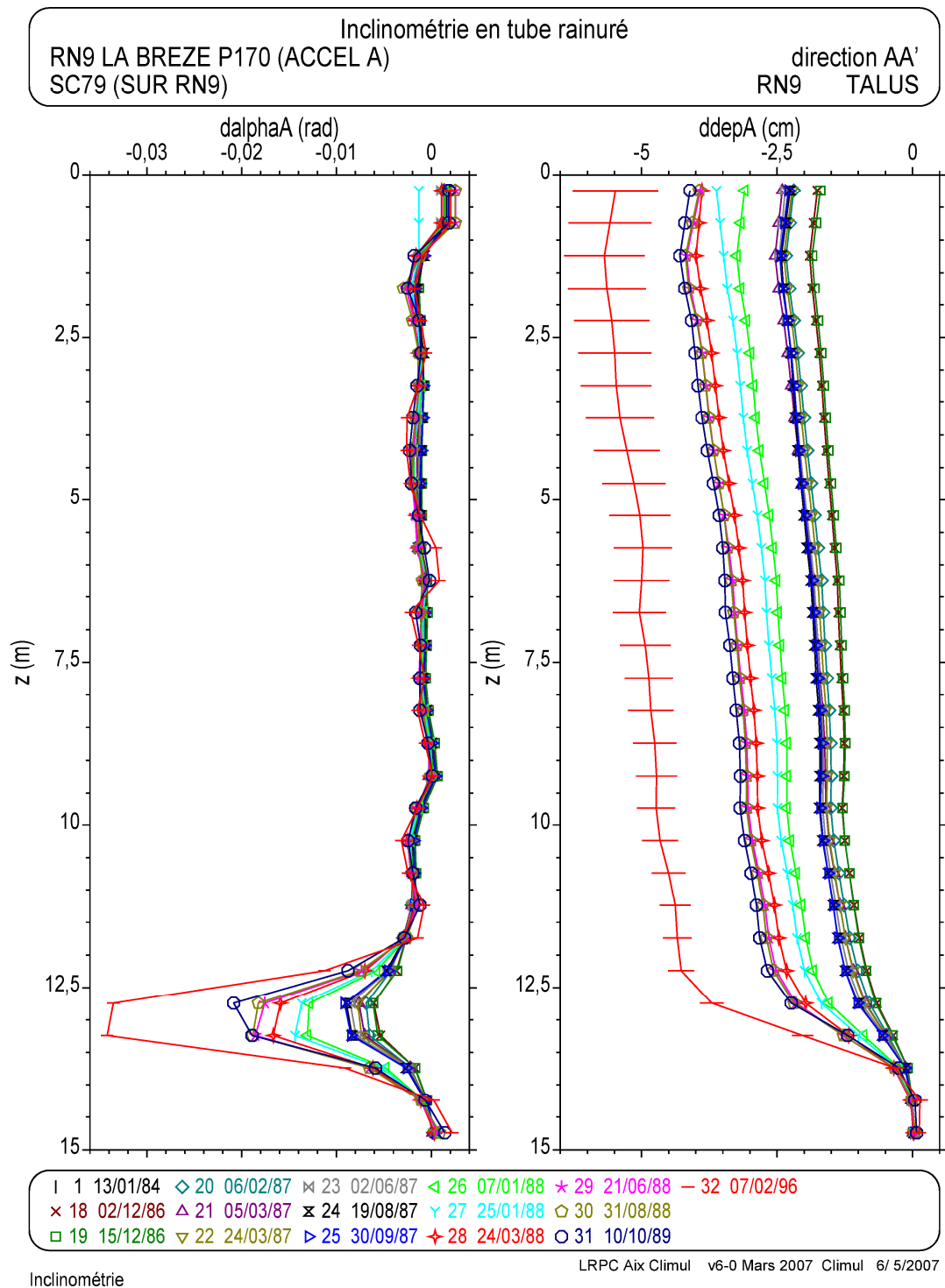


Figure 16a : Exemple 15.
 Comparaison de seize relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 32 porte les barres d'incertitude.
 Vitesse d'évolution variable.

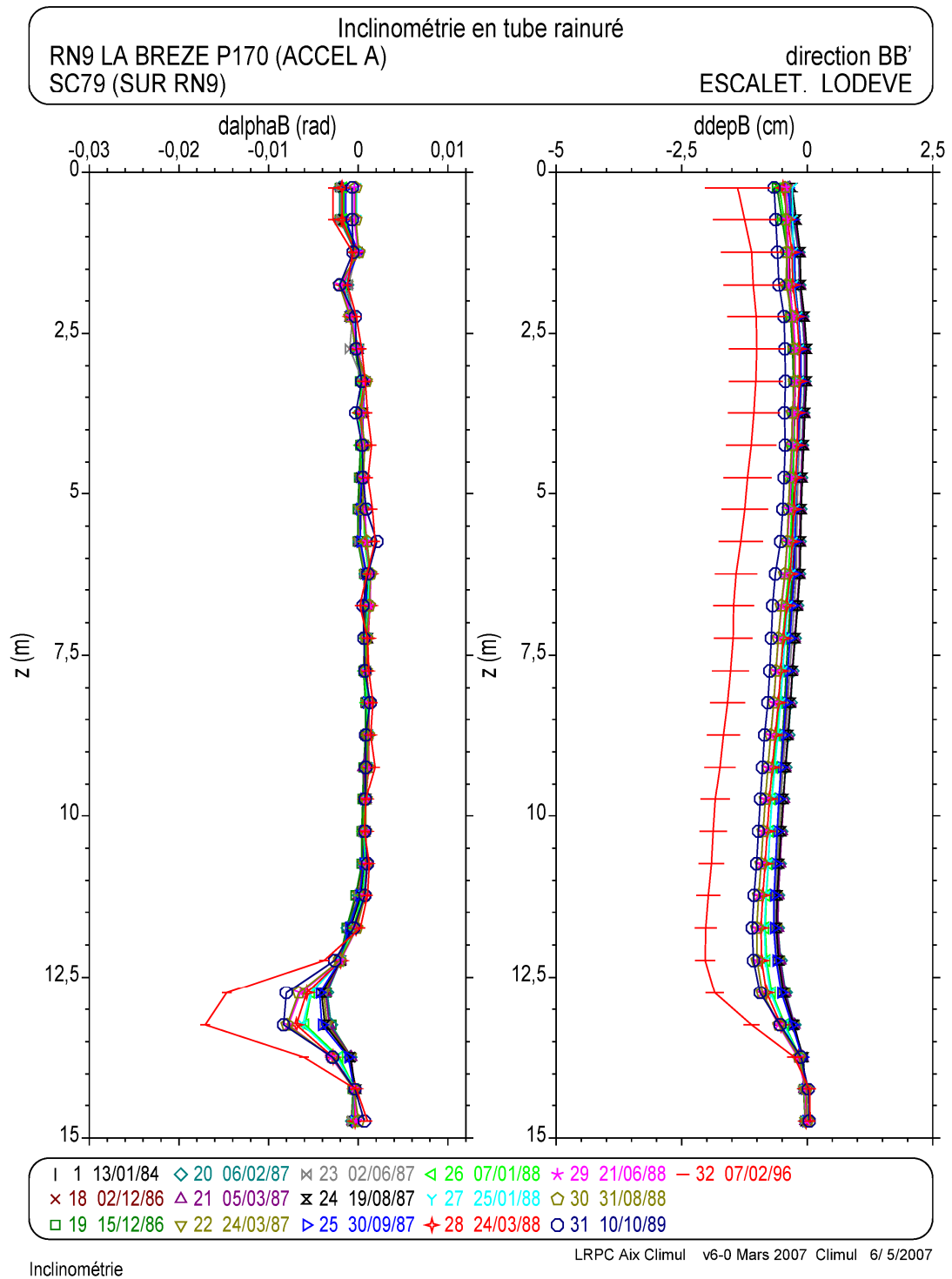


Figure 16b : Exemple 15.

Comparaison de seize relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 32 porte les barres d'incertitude.
 Vitesse d'évolution variable.

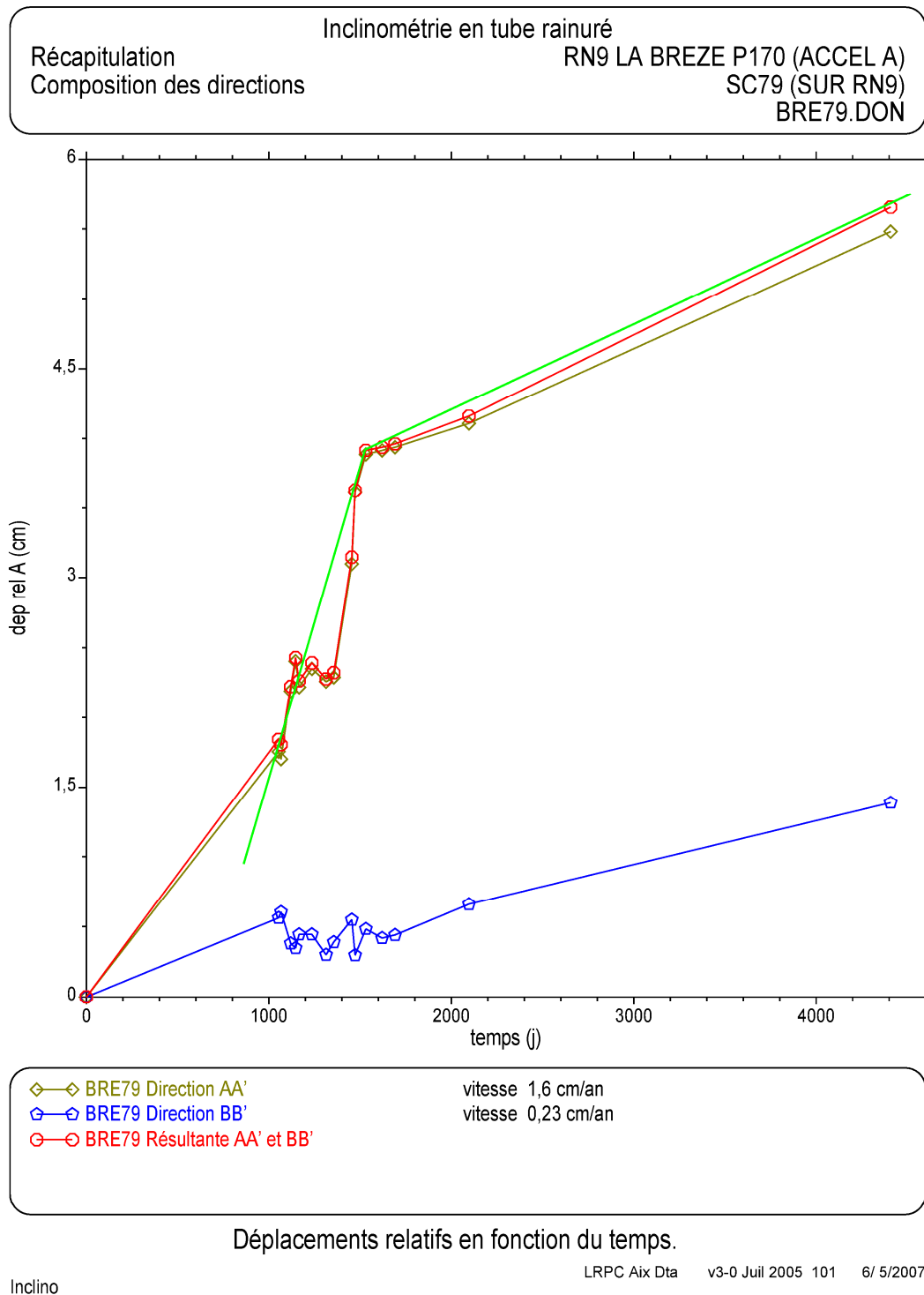


Figure 16c : Exemple 15.

Comparaison de seize relevés inclinométriques. Evolution dans le temps du déplacements relatifs entre 0,2 et 14,7 m de profondeur. Directions AA', BB' et résultante. Échelle de temps linéaire. Vitesse d'évolution variable.

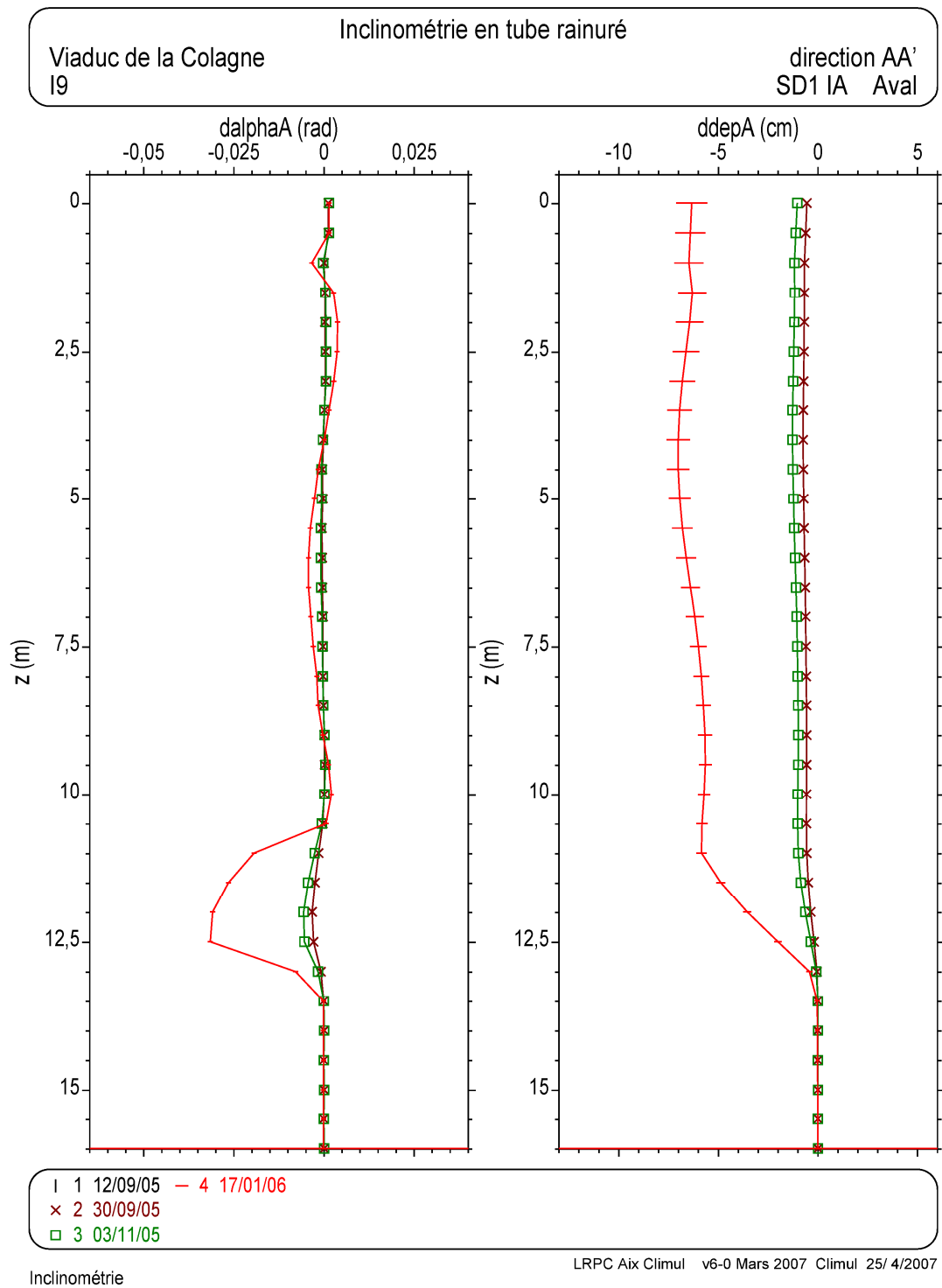


Figure 17a : Exemple 16.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.

Zone de cisaillement épaisse.

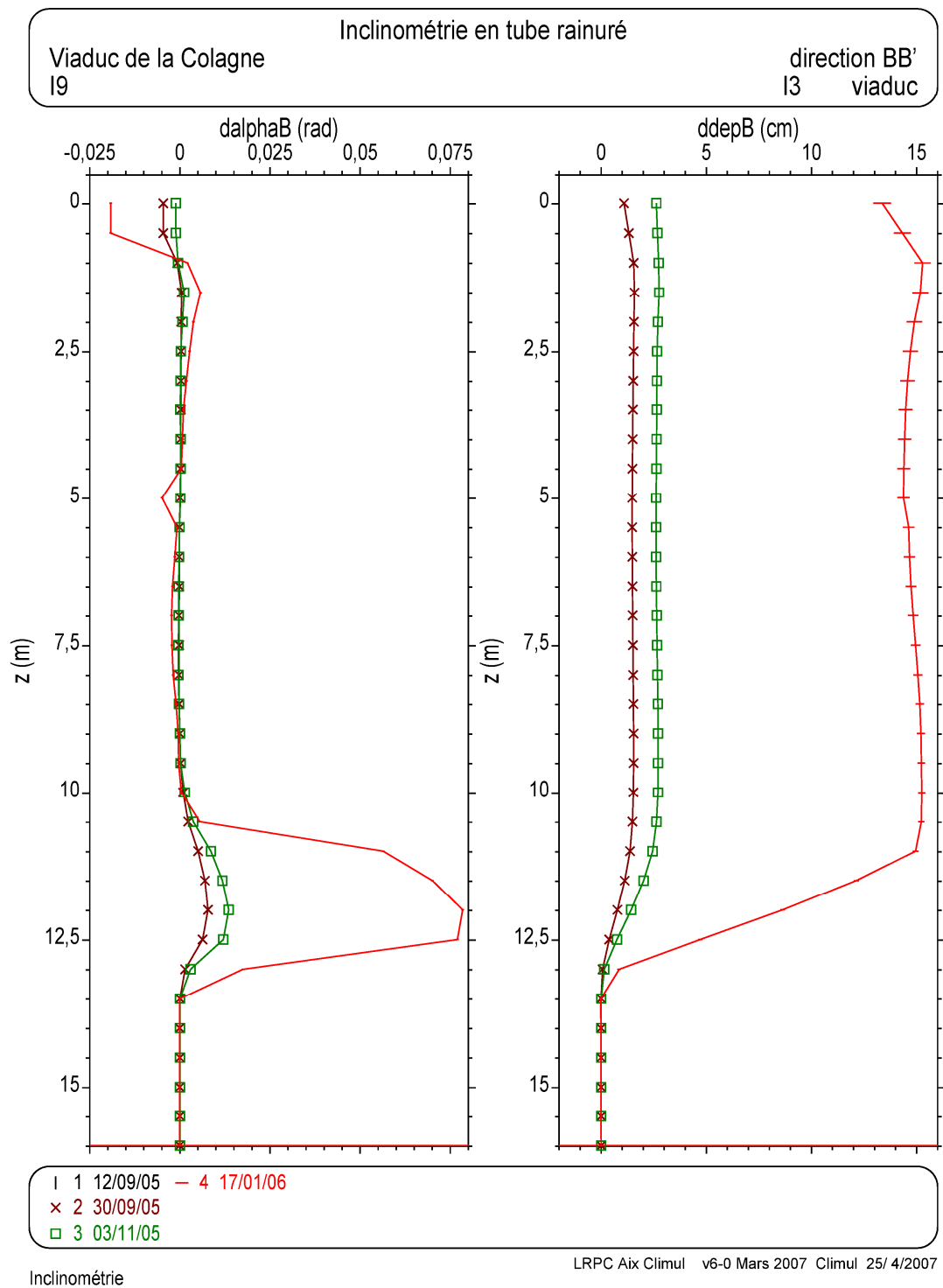


Figure 17b : Exemple 16.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.
 Zone de cisaillement épaisse.

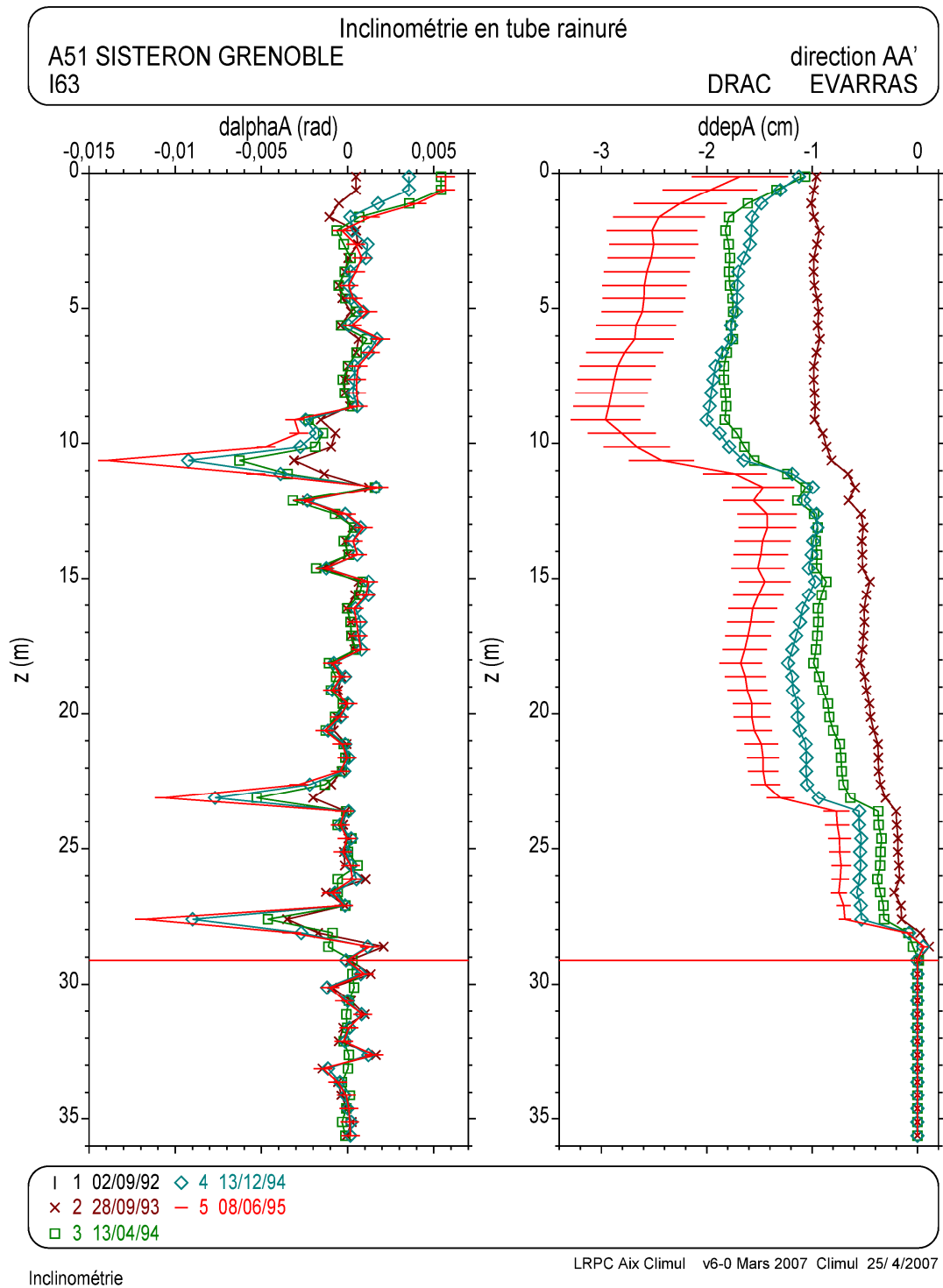


Figure 18a : Exemple 17.

Comparaison de cinq relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 05 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

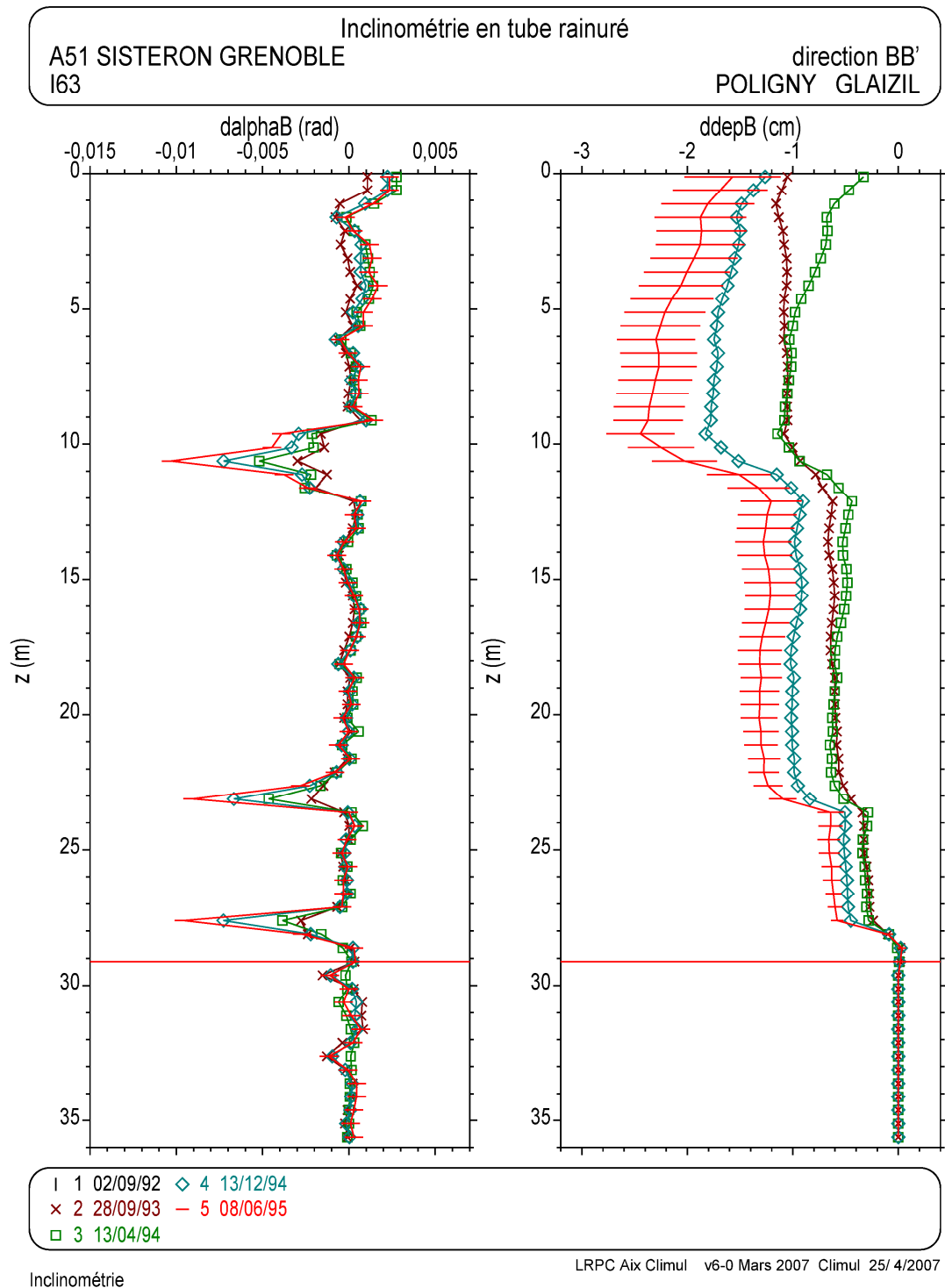


Figure 18b : Exemple 17.

Comparaison de cinq relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 05 porte les barres d'incertitude.
 Plusieurs surfaces de rupture.

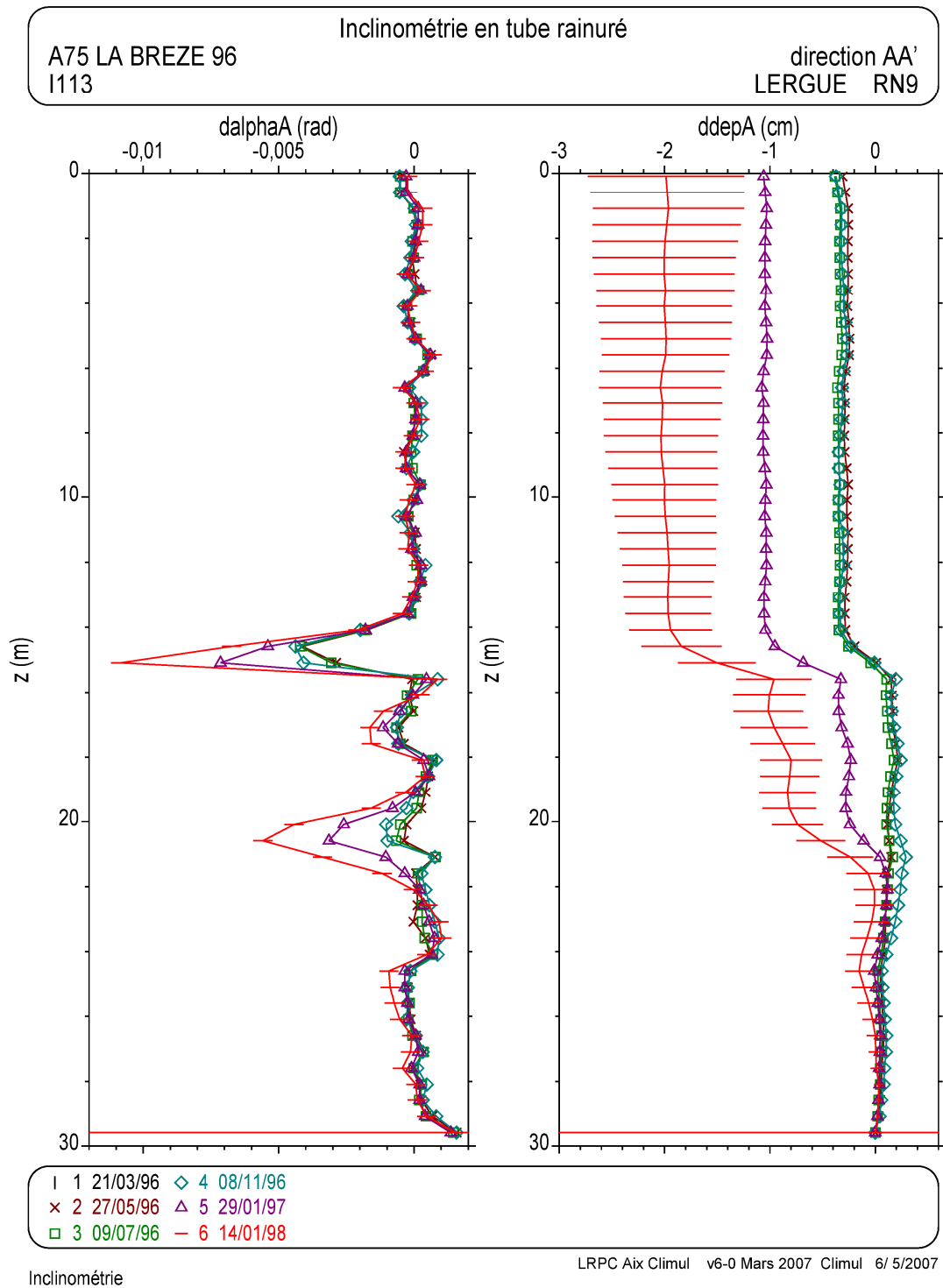


Figure 19a : Exemple 18.

Comparaison de six relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 06 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

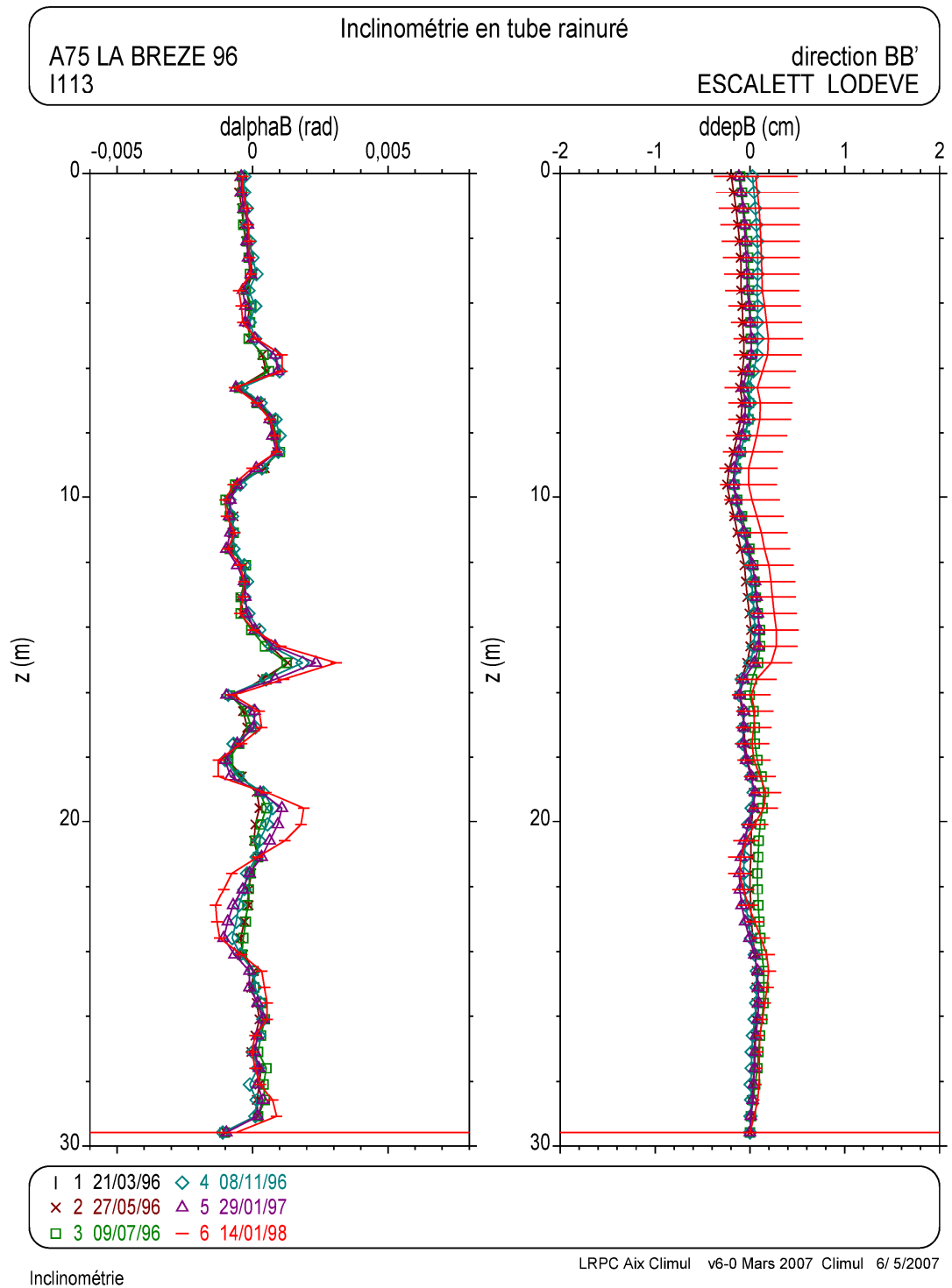


Figure 19b : Exemple 18.

Comparaison de six relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 06 porte les barres d'incertitude. Plusieurs surfaces de rupture.

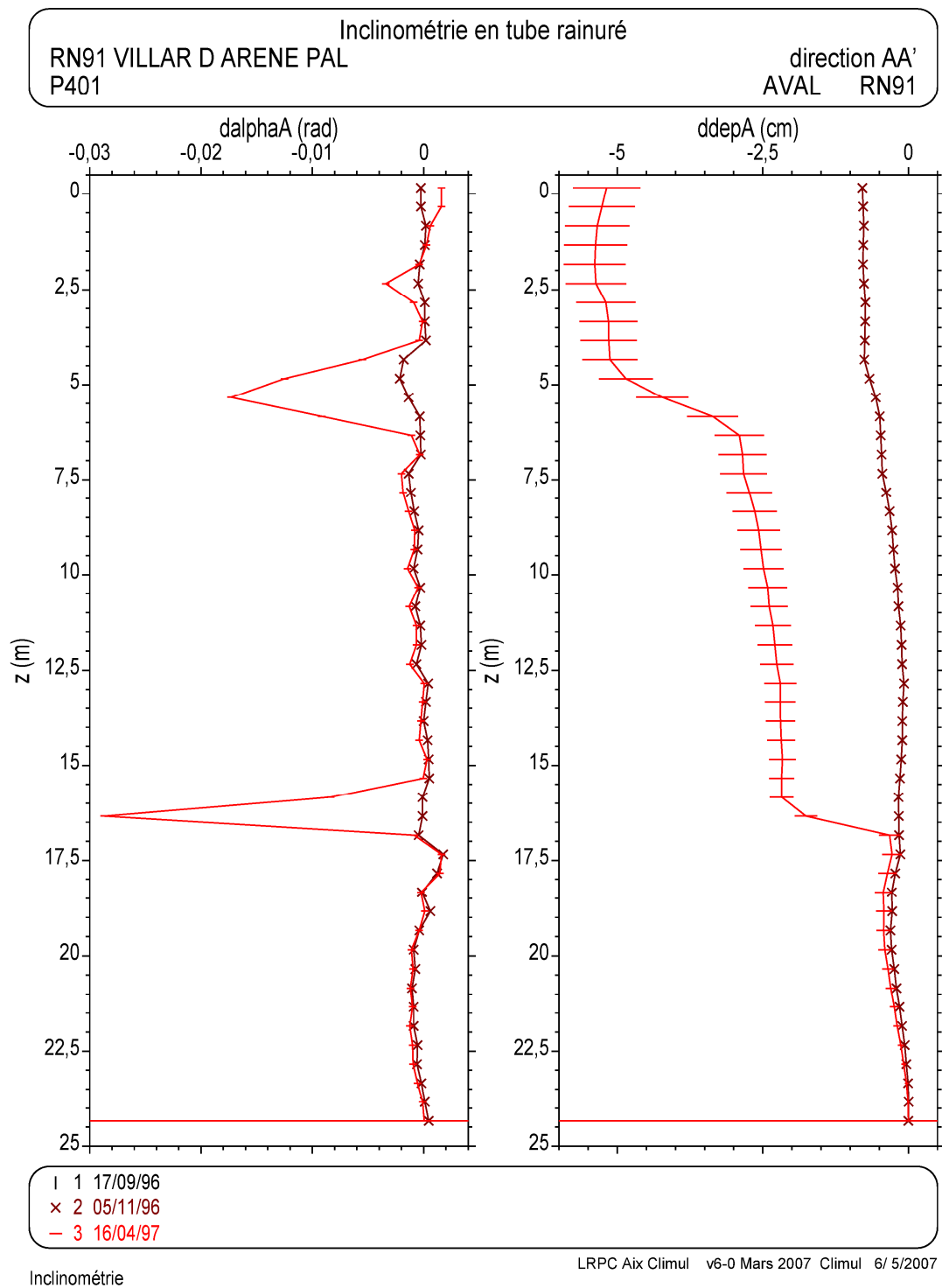


Figure 20a : Exemple 19.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 03 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

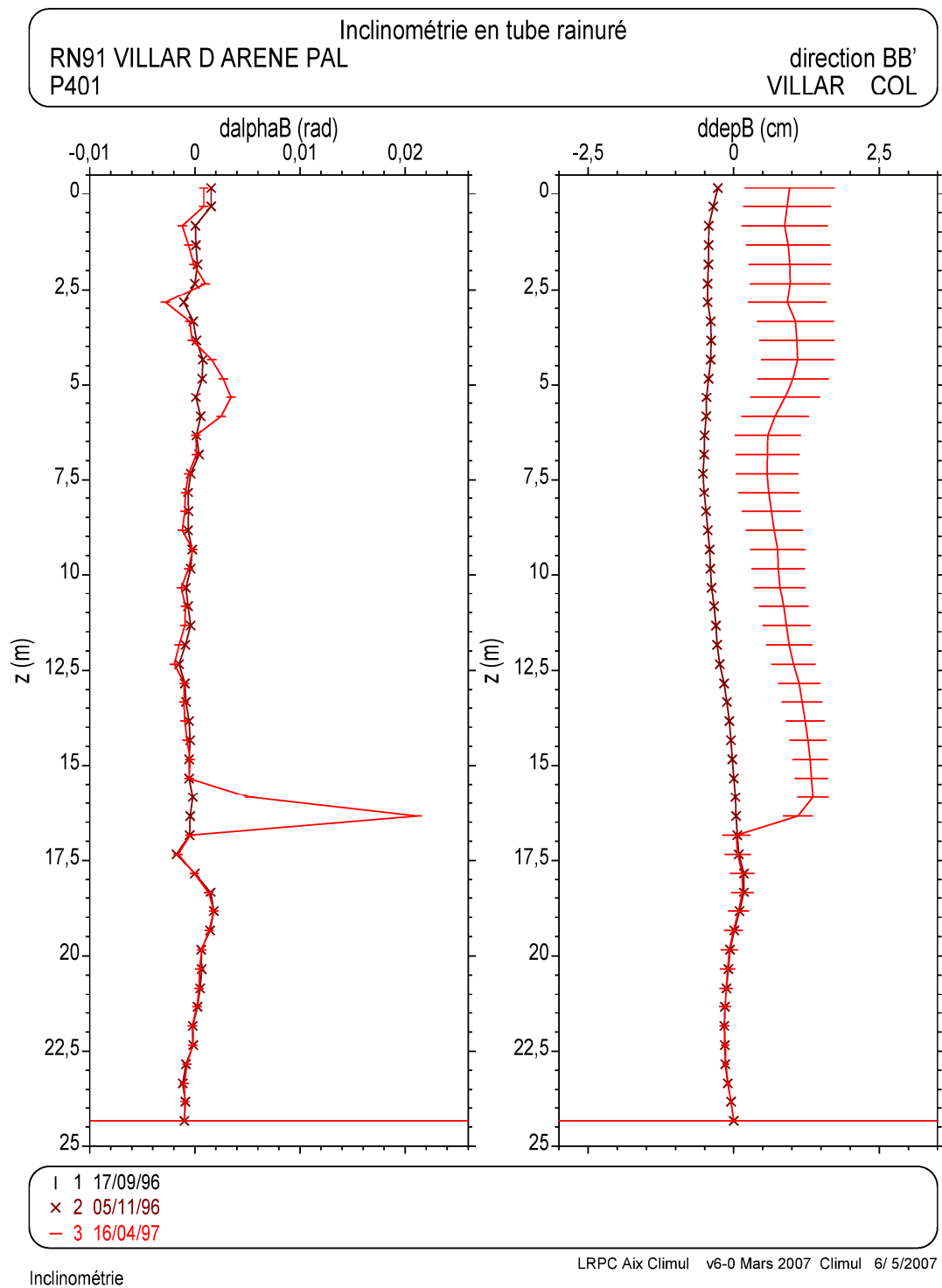


Figure 20b : Exemple 19.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 03 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

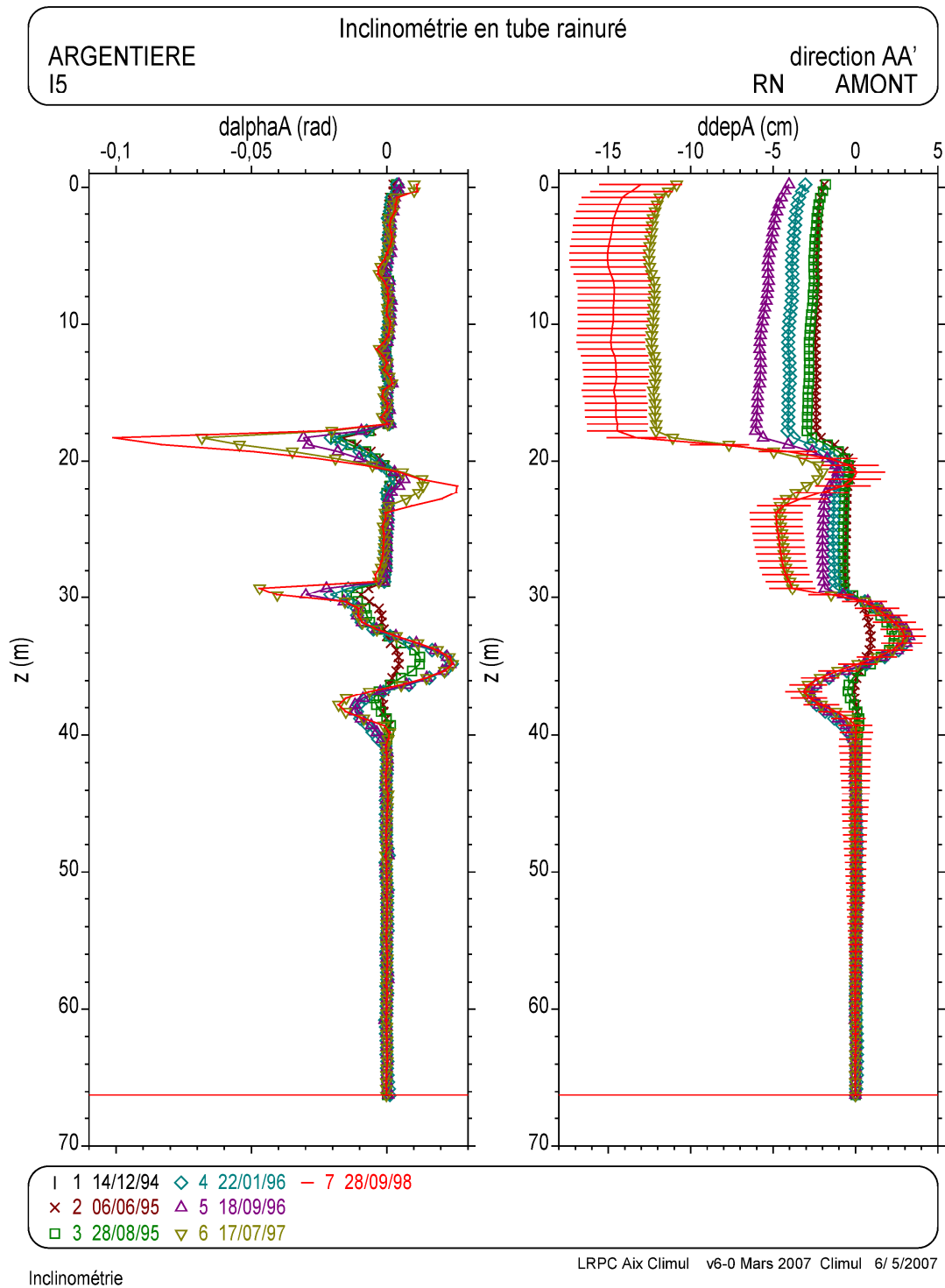


Figure 21a : Exemple 20.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 07 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

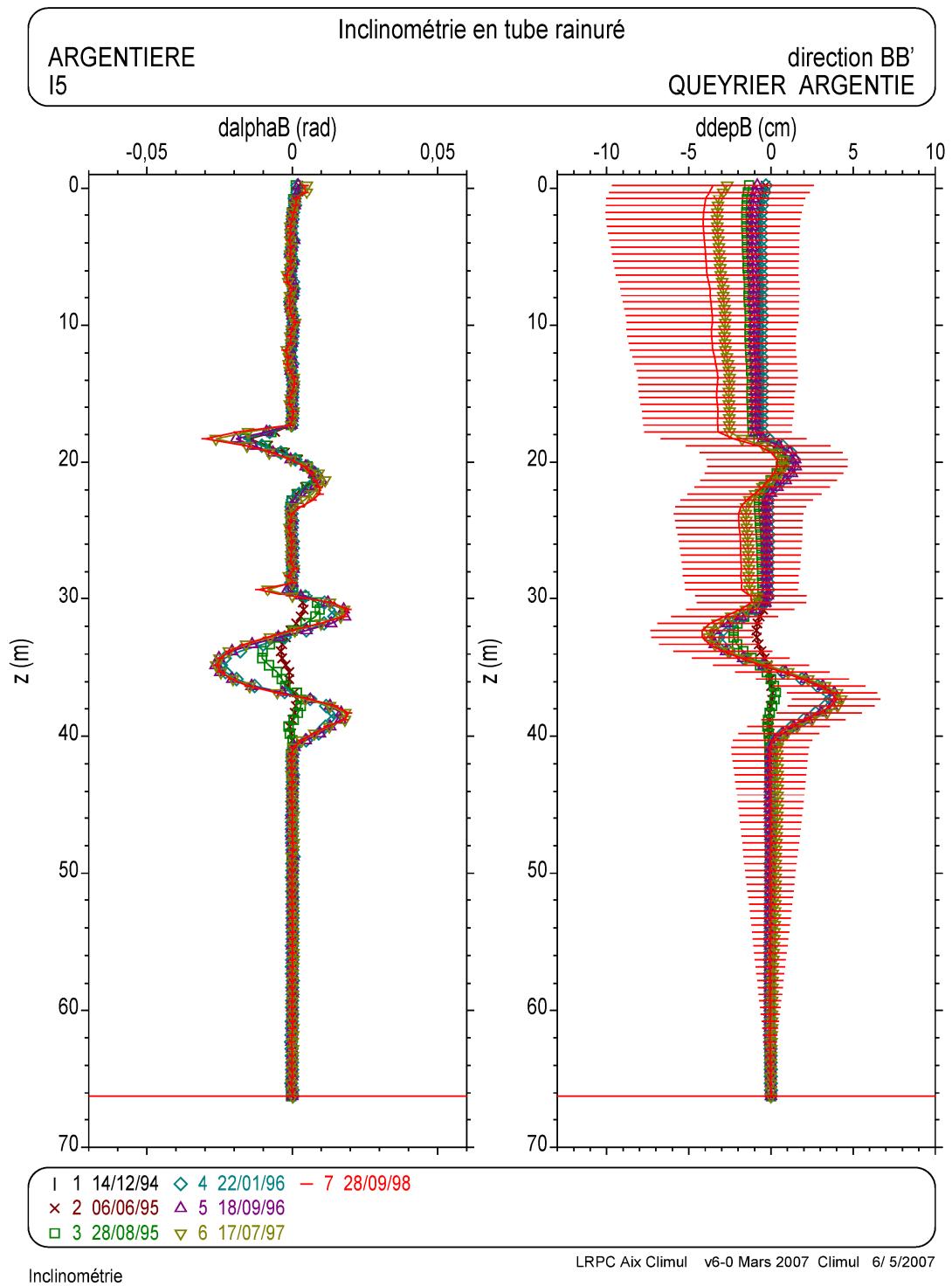


Figure 21b : Exemple 20.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 07 porte les barres d'incertitude.
Plusieurs surfaces de rupture.

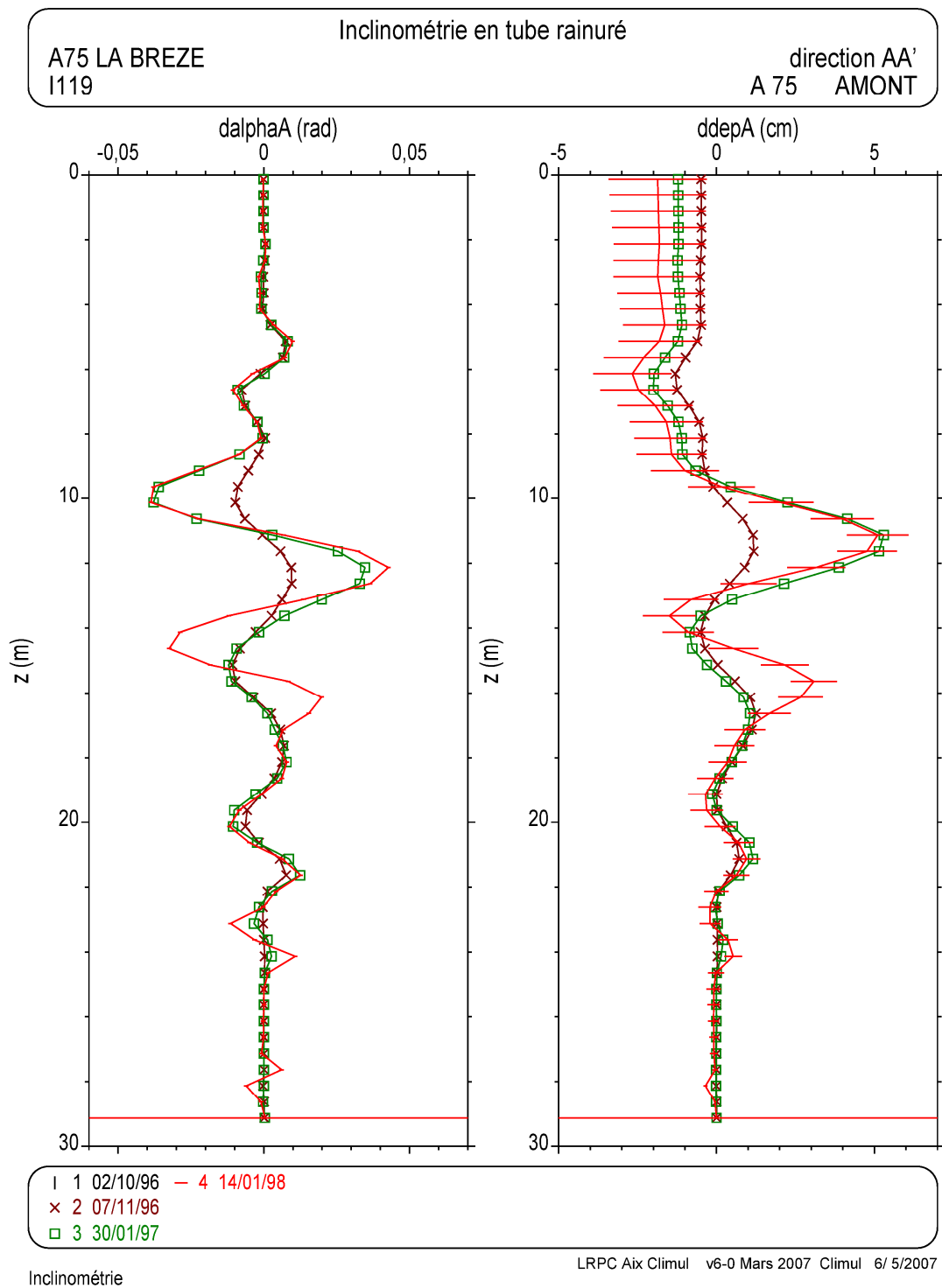


Figure 22a : Exemple 21.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude. Flambement et rupture.

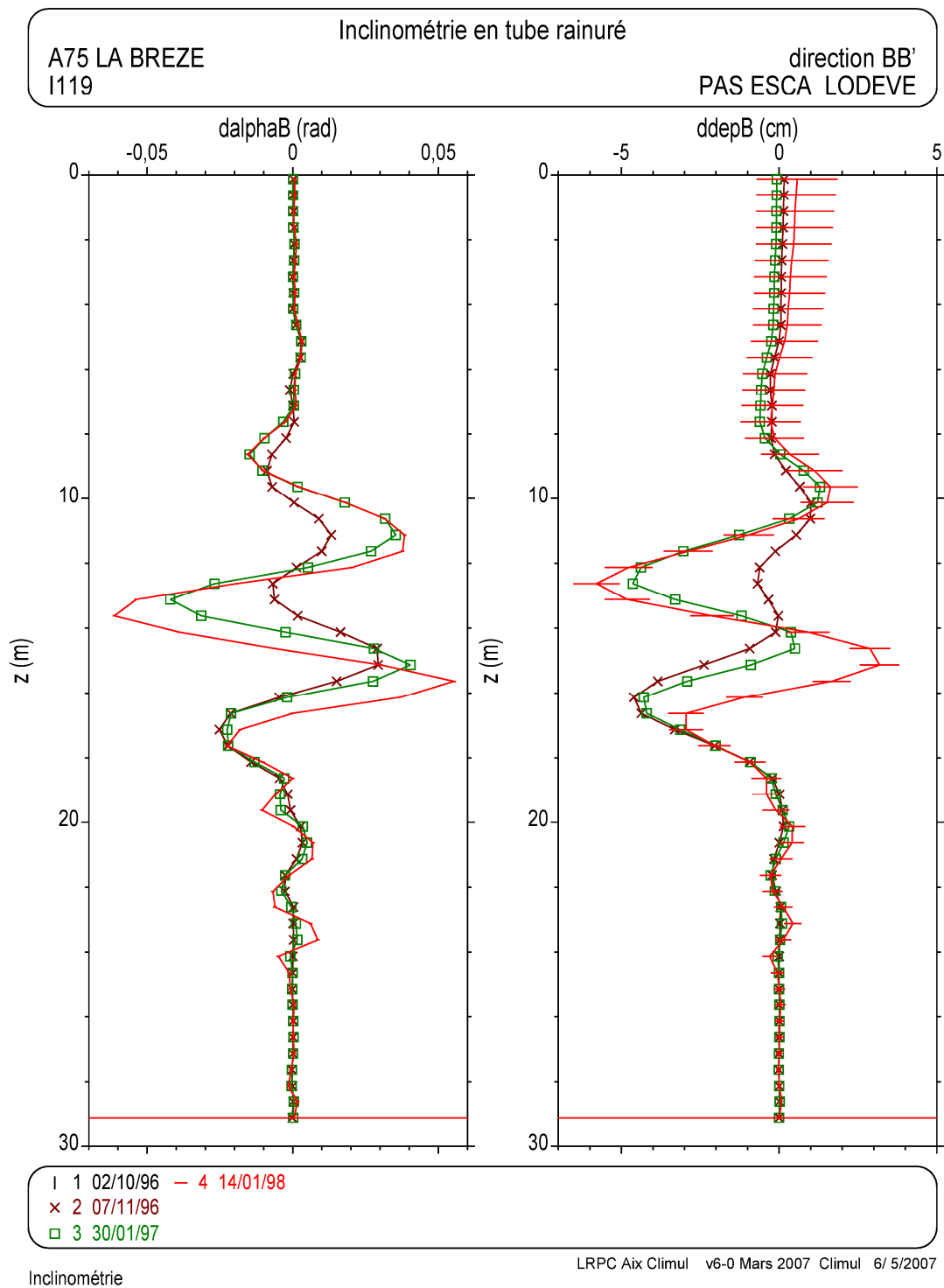


Figure 22b : Exemple 21.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.
Flambement et rupture.

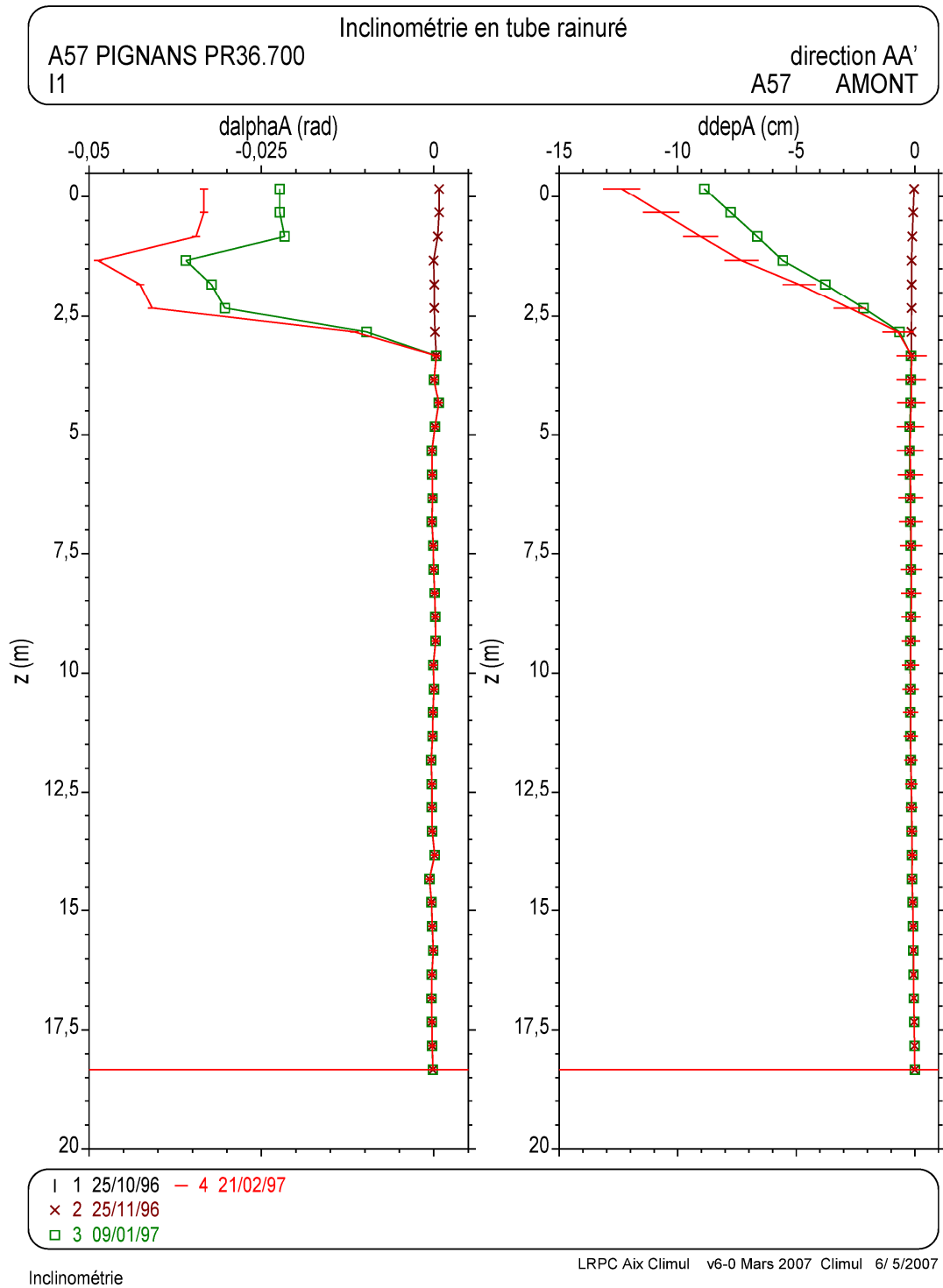


Figure 23a : Exemple 22.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.

Déformation continue.

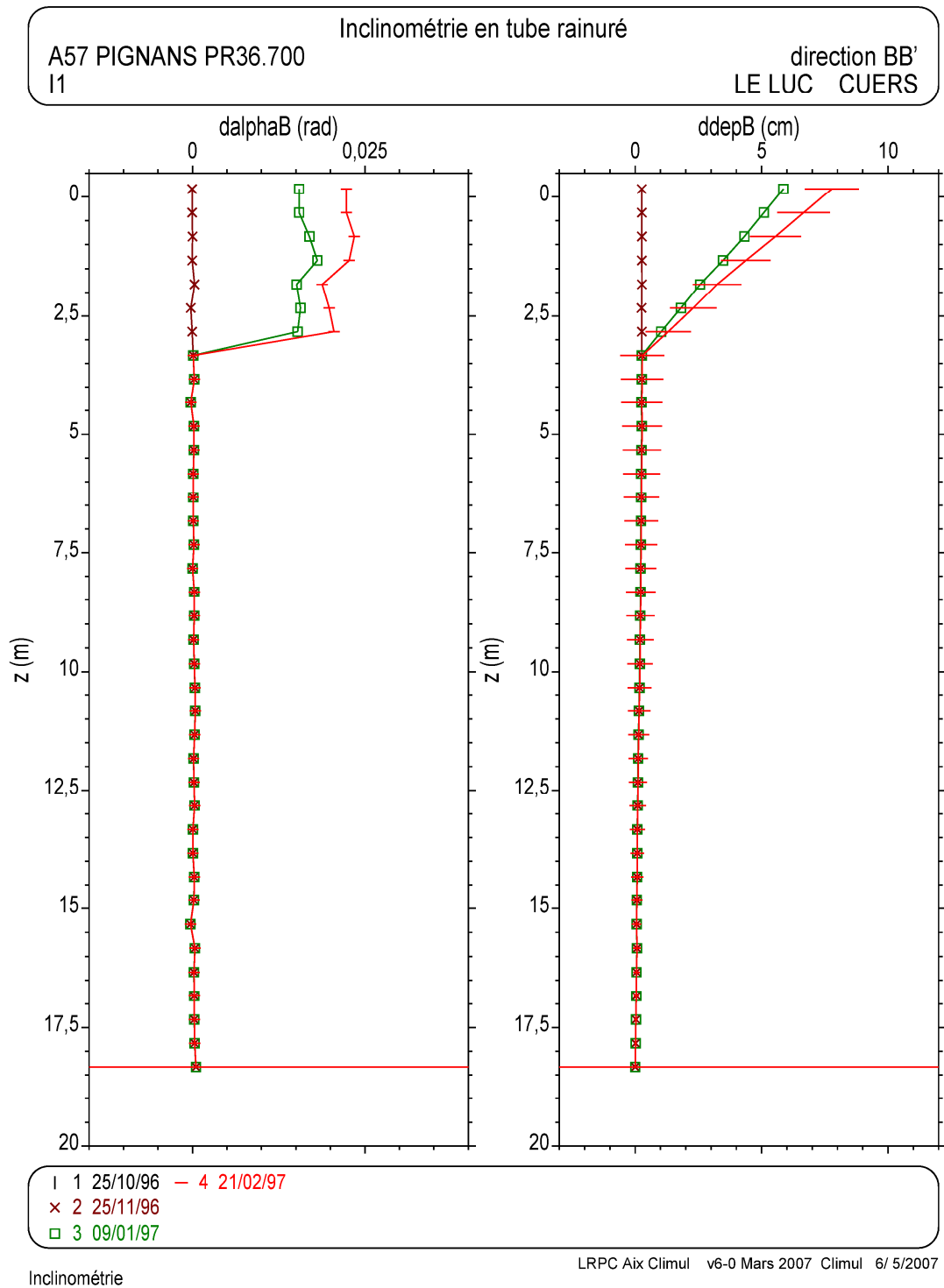


Figure 23b : Exemple 22.

Comparaison de quatre relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 04 porte les barres d'incertitude.
 Déformation continue.

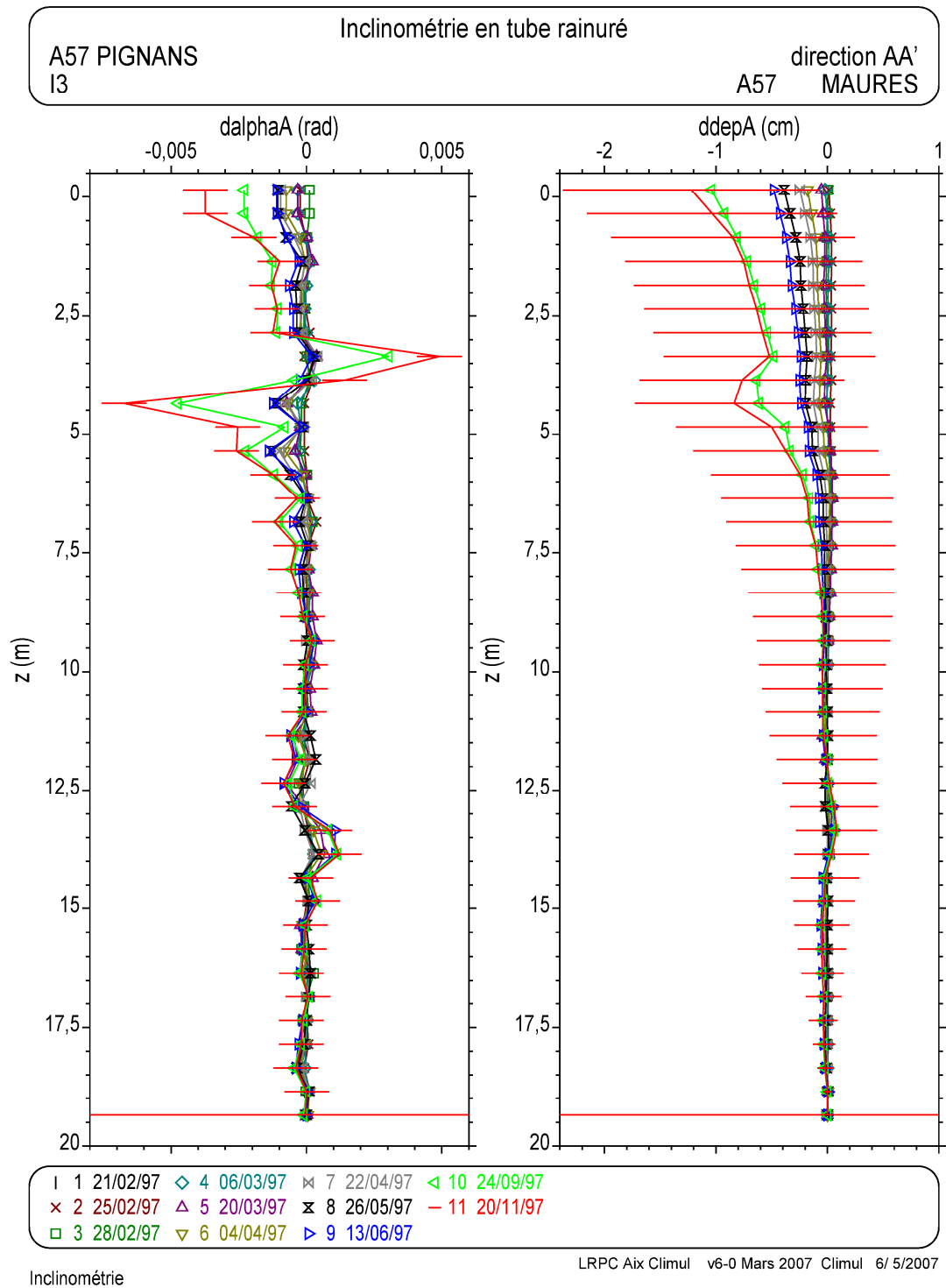


Figure 24a : Exemple 23.
 Comparaison de onze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 11 porte les barres d'incertitude.
 Déformation continue.

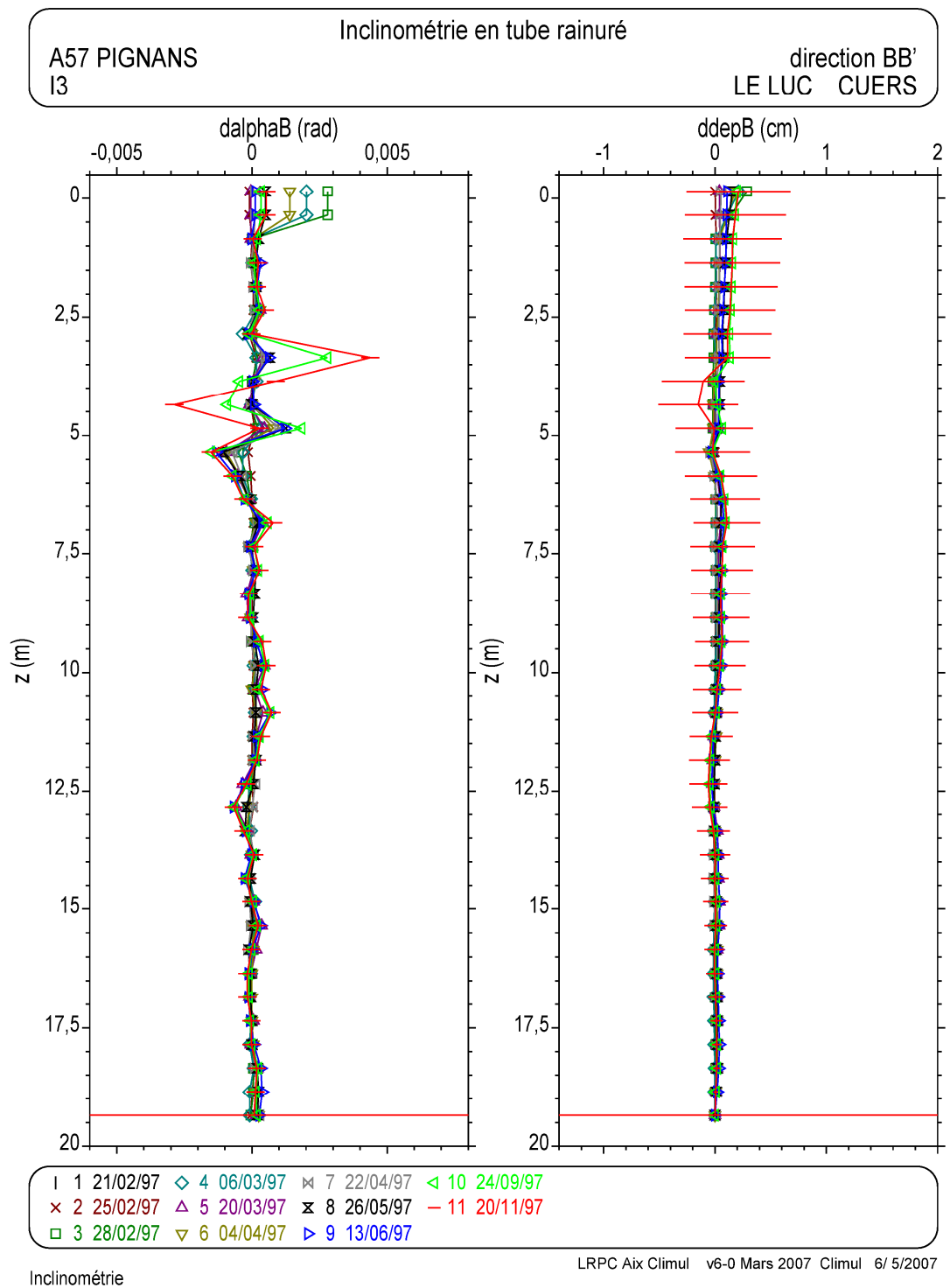


Figure 24b : Exemple 23.

Comparaison de onze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 11 porte les barres d'incertitude.
Déformation continue.

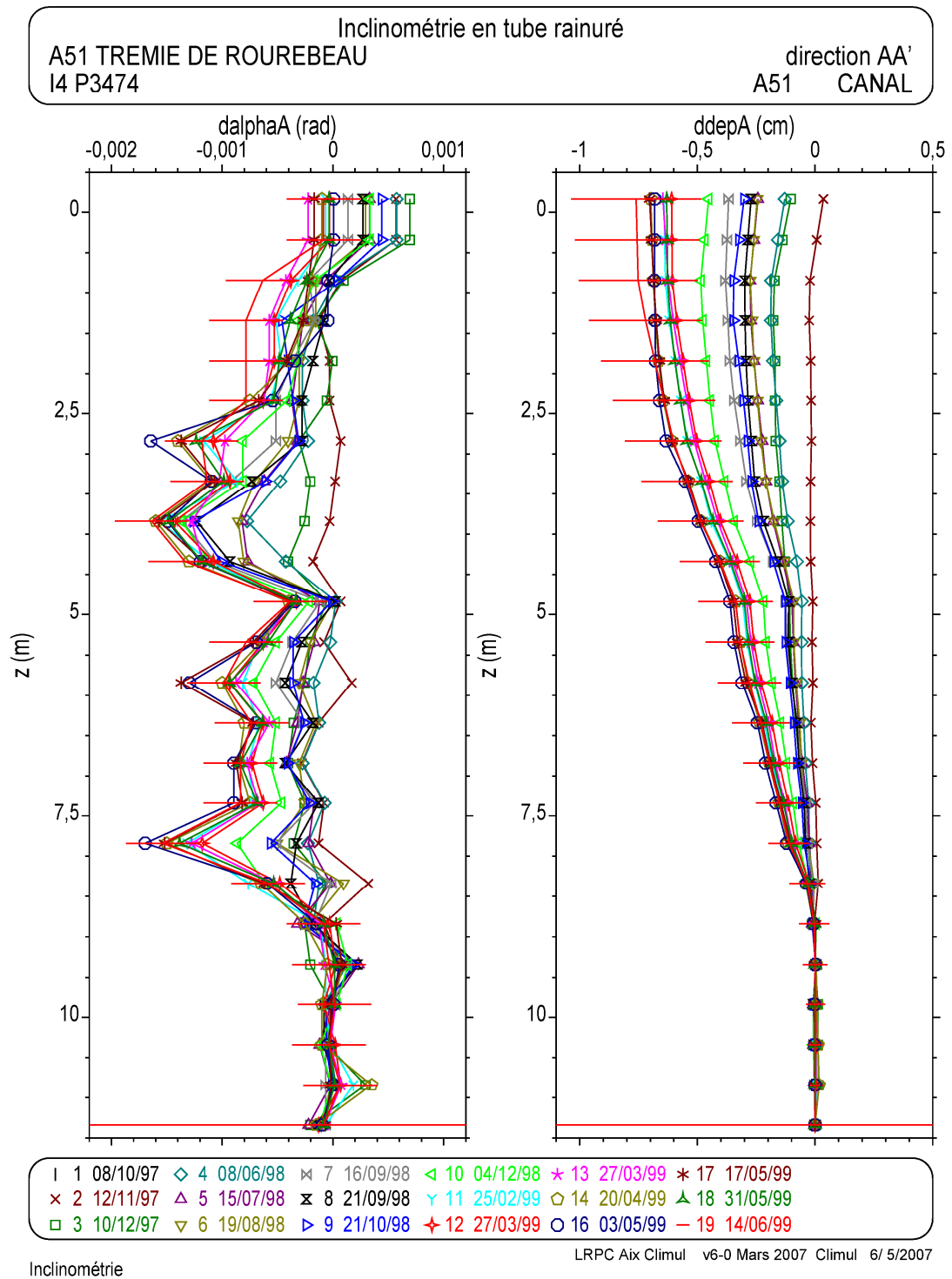


Figure 25a : Exemple 24.

Comparaison de dix-huit relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 19 porte les barres d'incertitude.

Déformation continue (paroi clouée).

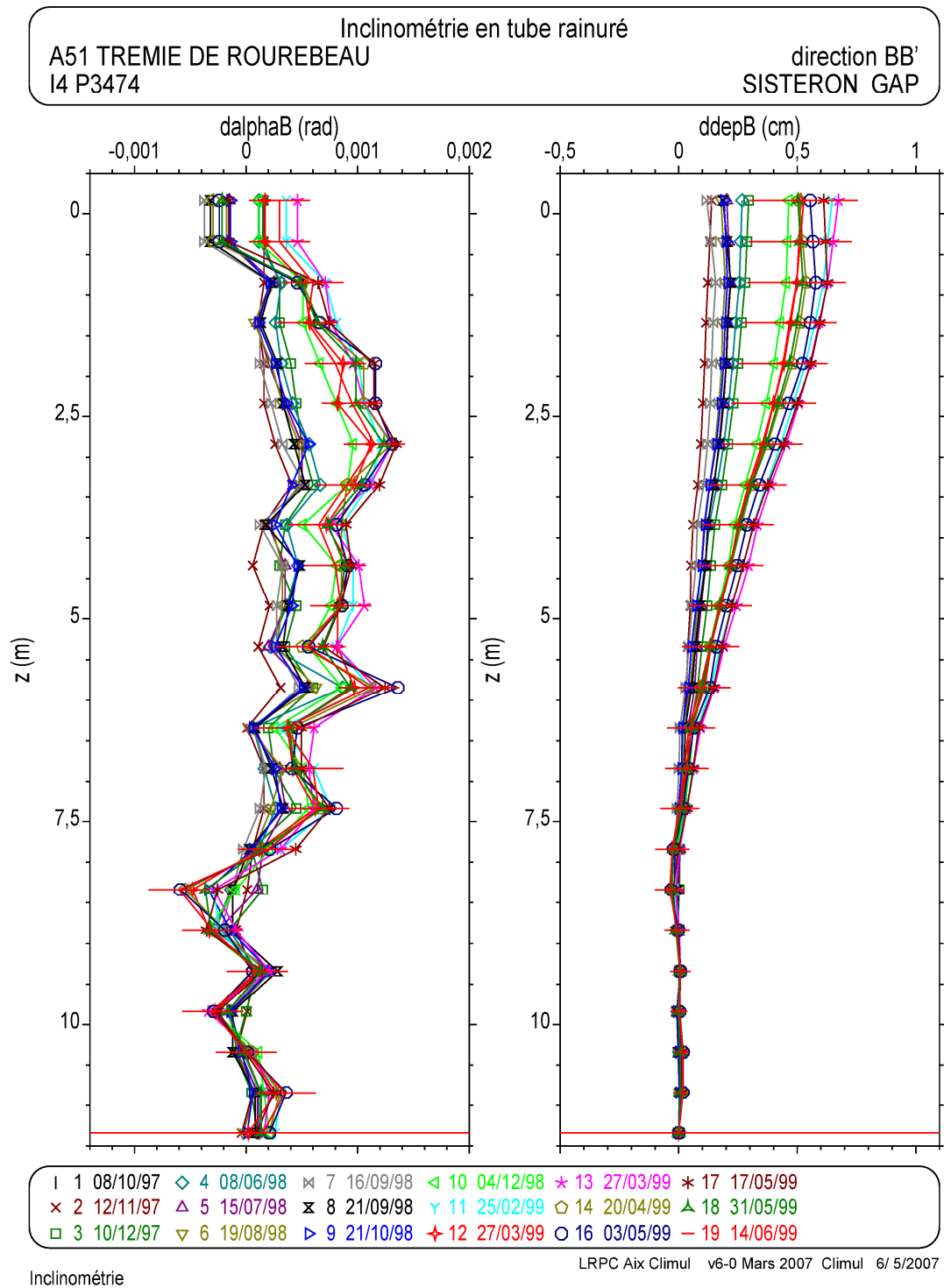


Figure 25b : Exemple 24.

Comparaison de dix-huit relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 19 porte les barres d'incertitude.
Déformation continue (paroi clouée).

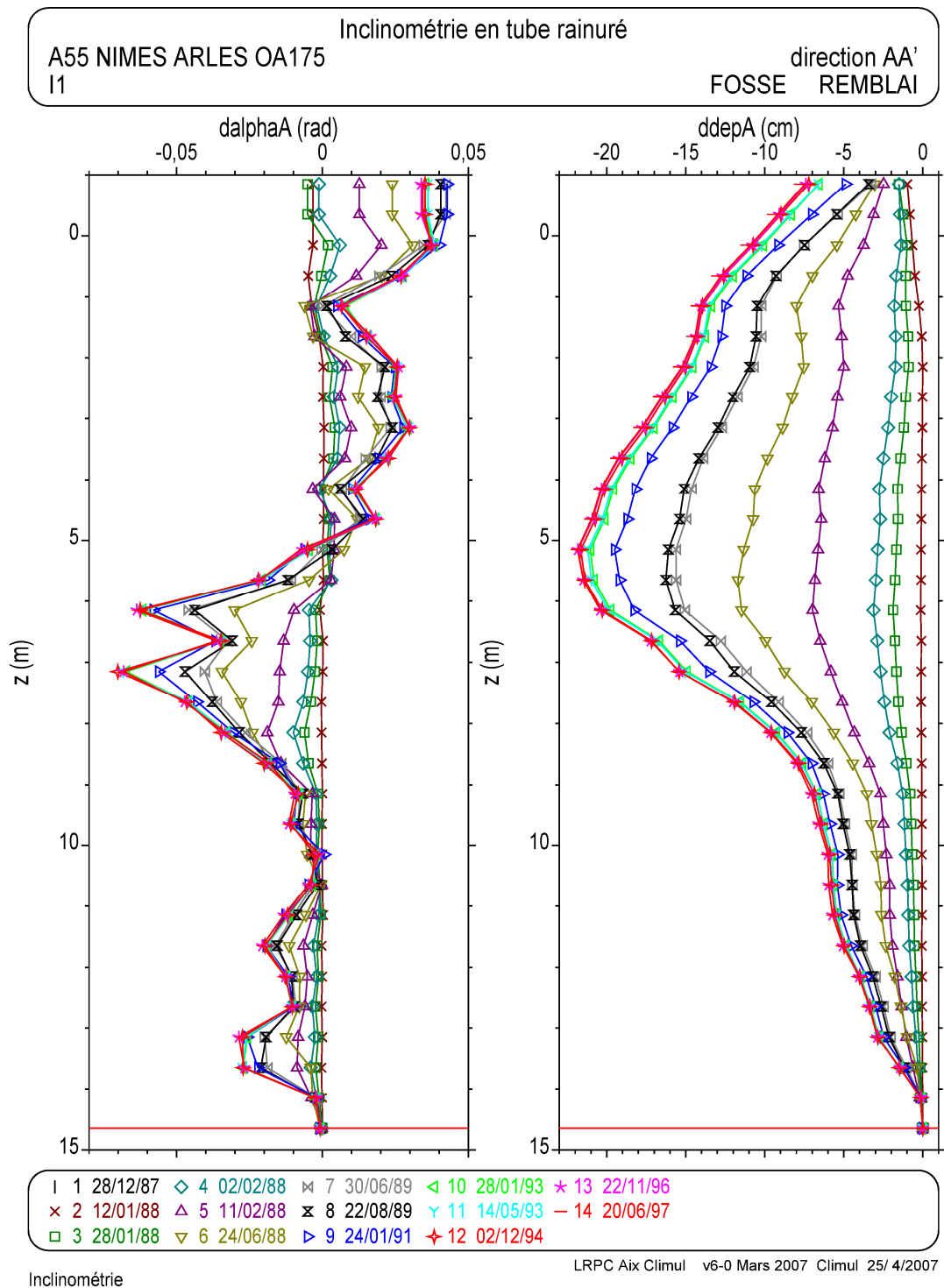


Figure 26a : Exemple 25.
 Comparaison de quatorze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
 Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 14 porte les barres d'incertitude.
 Evolution en pied d'un remblai.

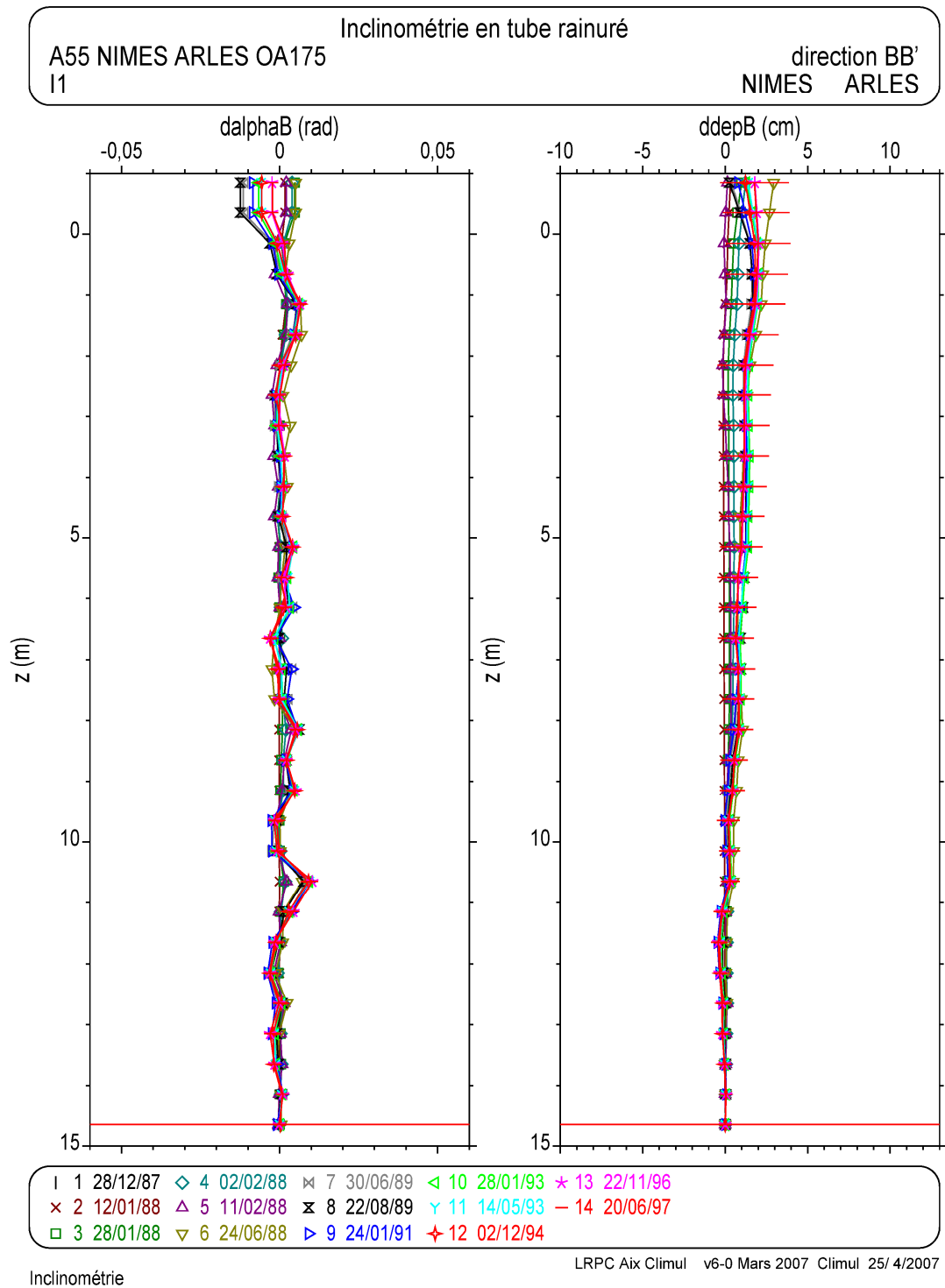


Figure 26b : Exemple 25.

Comparaison de quatorze relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 14 porte les barres d'incertitude.
Evolution en pied d'un remblai.

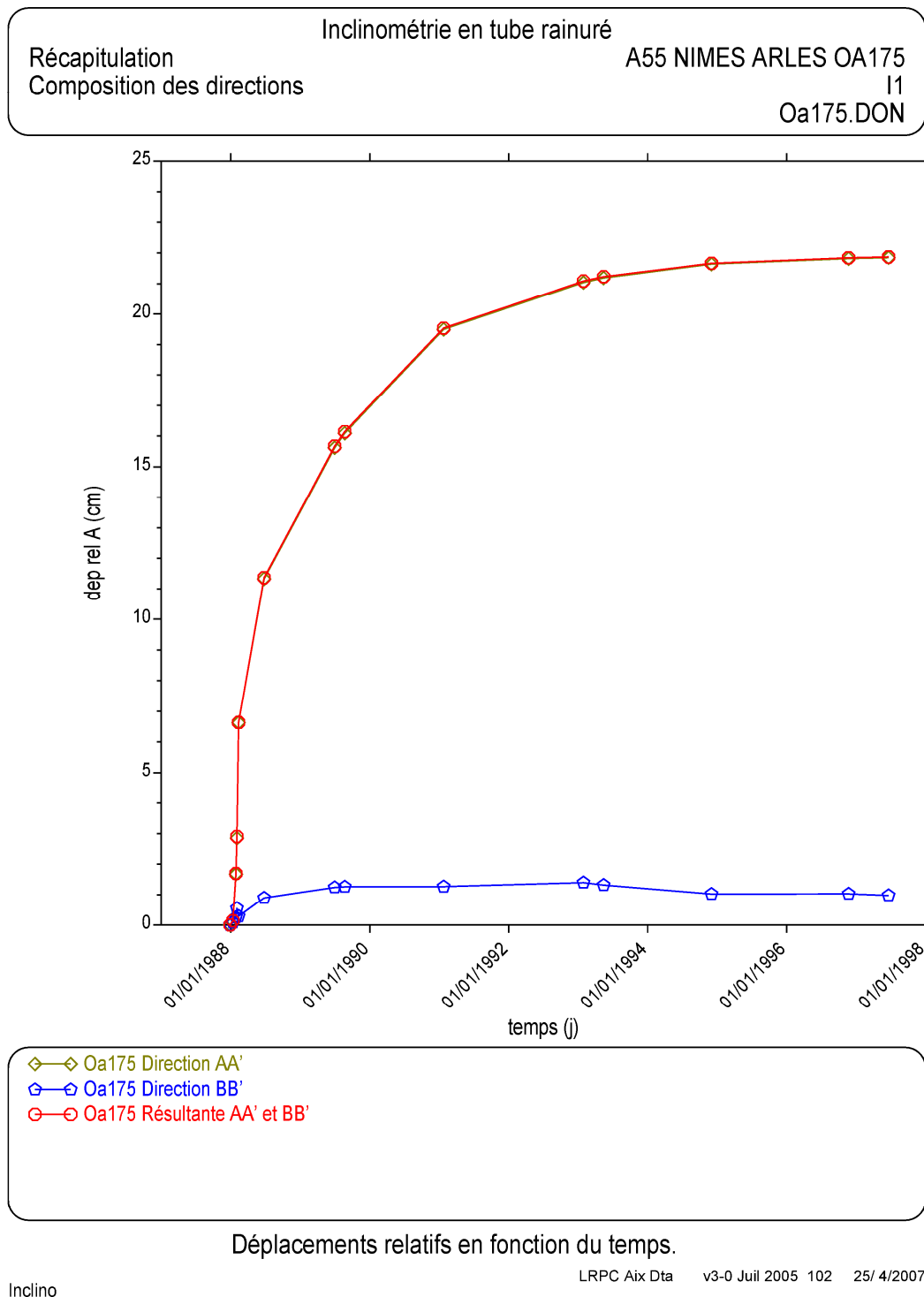
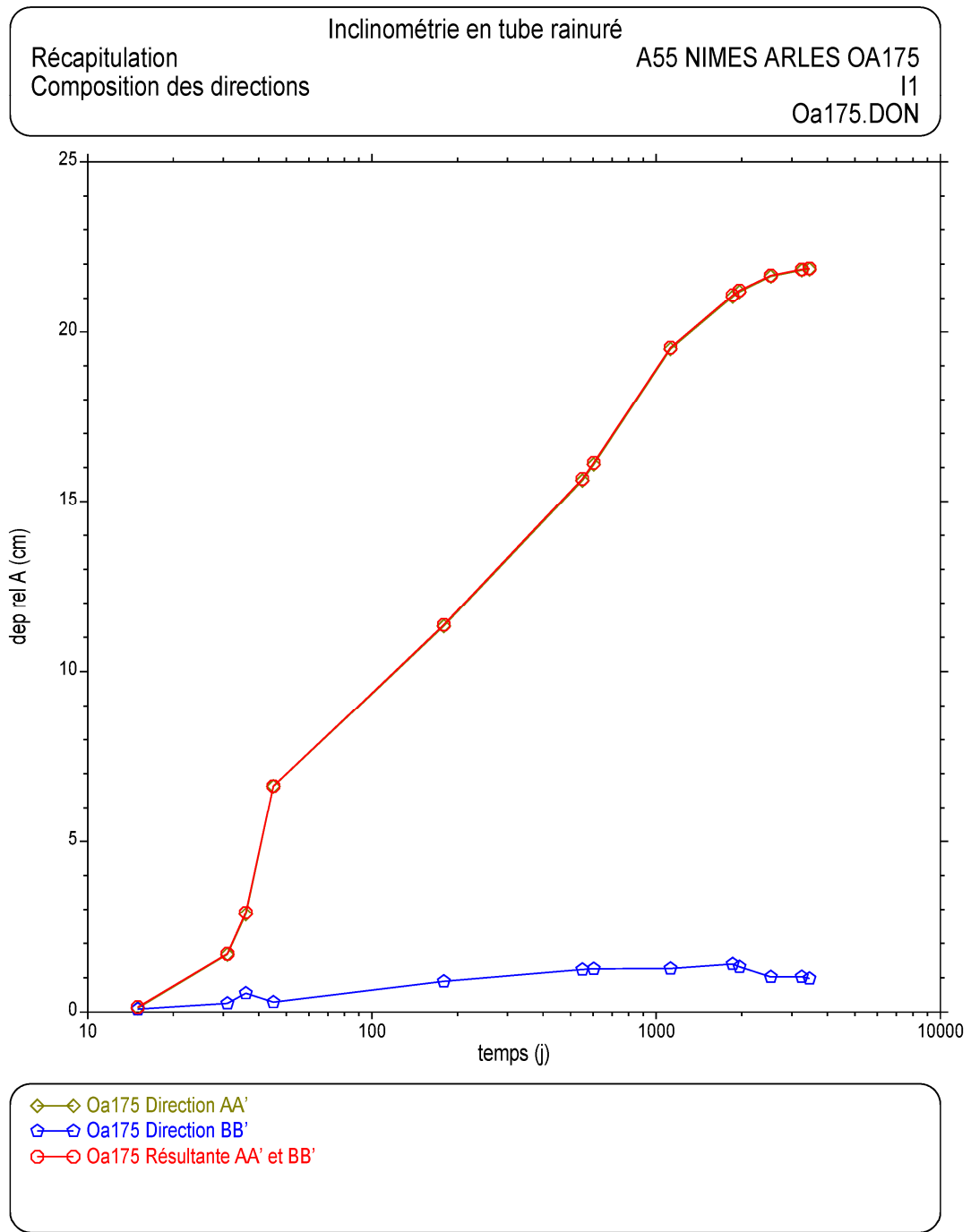


Figure 27a : Exemple 25.

Comparaison de quatorze relevés inclinométriques. Evolution dans le temps du déplacements relatifs entre 0,1 et 14,6 m de profondeur. Directions AA', BB' et résultante. Échelle de temps linéaire. Evolution en pied d'un remblai.



Inclino

Figure 27b : Exemple 25.

Comparaison de quatorze relevés inclinométriques. Evolution dans le temps du déplacements relatifs entre 0,1 et 14,6 m de profondeur.

Directions AA', BB' et résultante. Échelle de temps logarithmique.

Evolution en pied d'un remblai.

5.5 – Déformation continue

Divers exemples de déformation continue de massifs sont présentés sur les exemples suivants (par opposition à une surface de rupture localisée) :

- exemple 22, [figure 23](#) ;
- exemple 23, [figure 24](#) ;
- exemple 24, [figure 25](#).

Les deux premiers exemples traduisent une cinématique de rupture assez complexe dans un massif quasi-rocheux qui est doté d'une structure particulière (Bescond et al., 1999). Le troisième exemple concerne le suivi d'un talus renforcé par clouage.

5.6 – Déformation au pied d'un remblai sur sol mou

Cet autre exemple de déformation continue concerne un tube inclinométrique situé au pied d'un remblai édifié sur des sols mous ([figure 26](#)). La déformation intéresse toute la couche molle entre 0 et 14 m de profondeur et au-dessus du substratum. La récapitulation des déplacements relatifs à 5 m de profondeur, c'est à dire au ventre du déplacement ([figure 27a](#)) montre une stabilisation progressive des déformations (10 ans d'observation). La [figure 27b](#) montre l'allure de cette stabilisation en fonction du logarithme du temps. L'allure de ces courbes s'apparente à celle des courbes de consolidation.

5.7 – Glissement et rotation

Le tube inclinométrique rainuré est scellé à l'arrière immédiat d'un mur de quai dont la fondation est située vers 6 m de profondeur ([figure 28](#)). Les relevés montrent à la fois un glissement sous la fondation du mur et un basculement de celui-ci. La vitesse de déplacement de la tête du mur est quasiment constante dans le temps (10 mm/an environ), avec une tendance à une augmentation dans la dernière période (cinq ans et demi d'observations).

5.8 – Flambement par gonflement et retrait du massif

Le tube inclinométrique est scellé dans un massif de marnes bleues formant une pente et dont la région superficielle est plus ou moins altérée ([figure 29](#)). Le flambement n'apparaît pas de façon continue ici. La récapitulation du déplacement relatif en fonction du temps vers 4 m de profondeur (au maximum de l'amplitude des déplacements relatifs dans les directions AA' et BB') montre des variations saisonnières sur une durée d'observation de cinq ans ([figure 29c](#)). Les amplitudes maximales du flambement apparaissent plutôt en fin d'été ou en automne (d'août à octobre), alors que le minimum du flambement apparaît au printemps. Ces variations peuvent s'expliquer par des mouvements verticaux de retrait gonflement des marnes en surface, qui entraînent des déformations de flambement en fonction des saisons. Il apparaît aussi une dérive permanente du déplacement horizontal vers l'aval, preuve d'un mouvement lent de la couverture altérée vers l'aval, qui accompagne les déformations de retrait-gonflement.

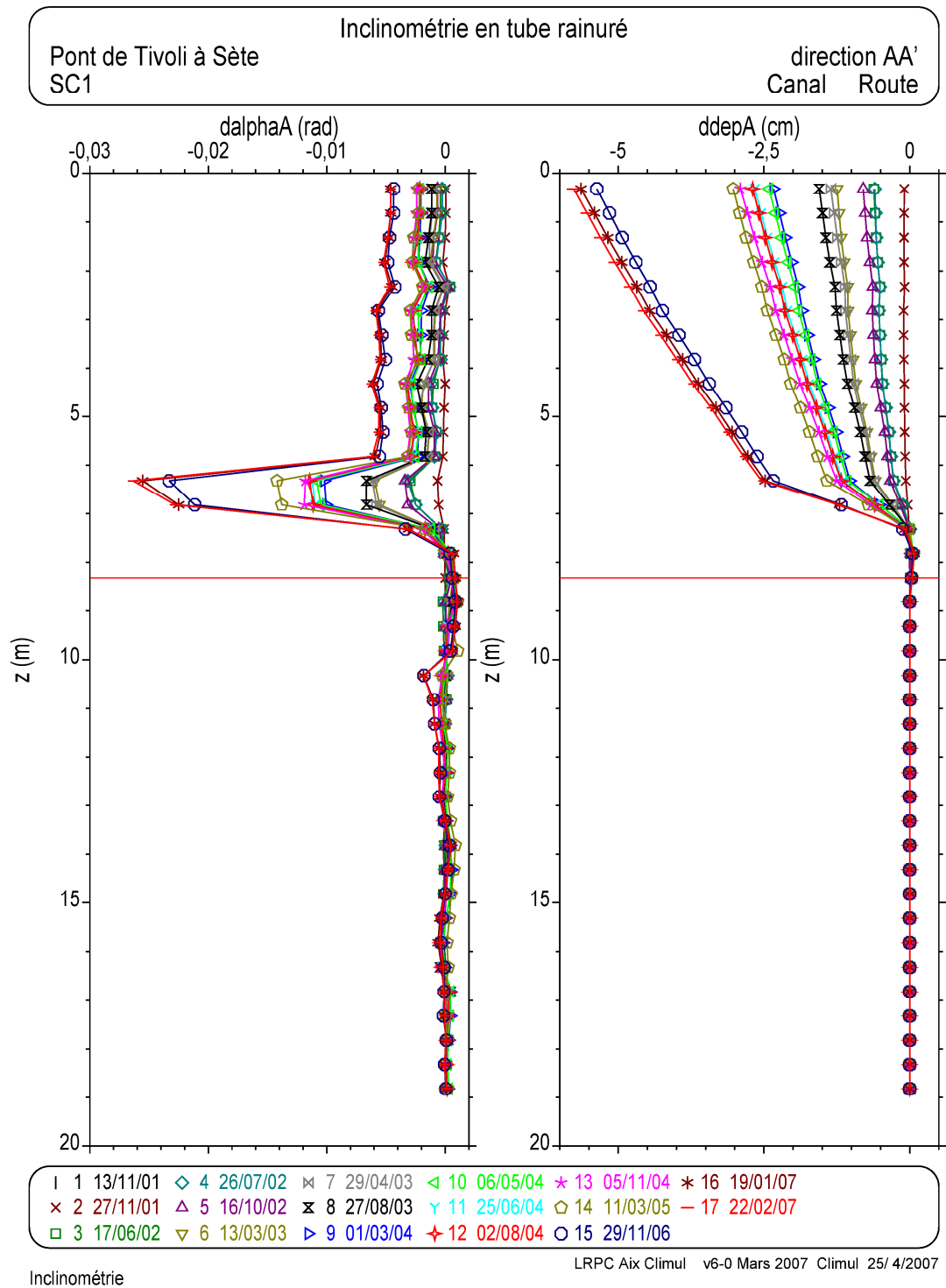


Figure 28a : Exemple 26.

Comparaison de dix-sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 17 porte les barres d'incertitude.
Glissement et basculement.

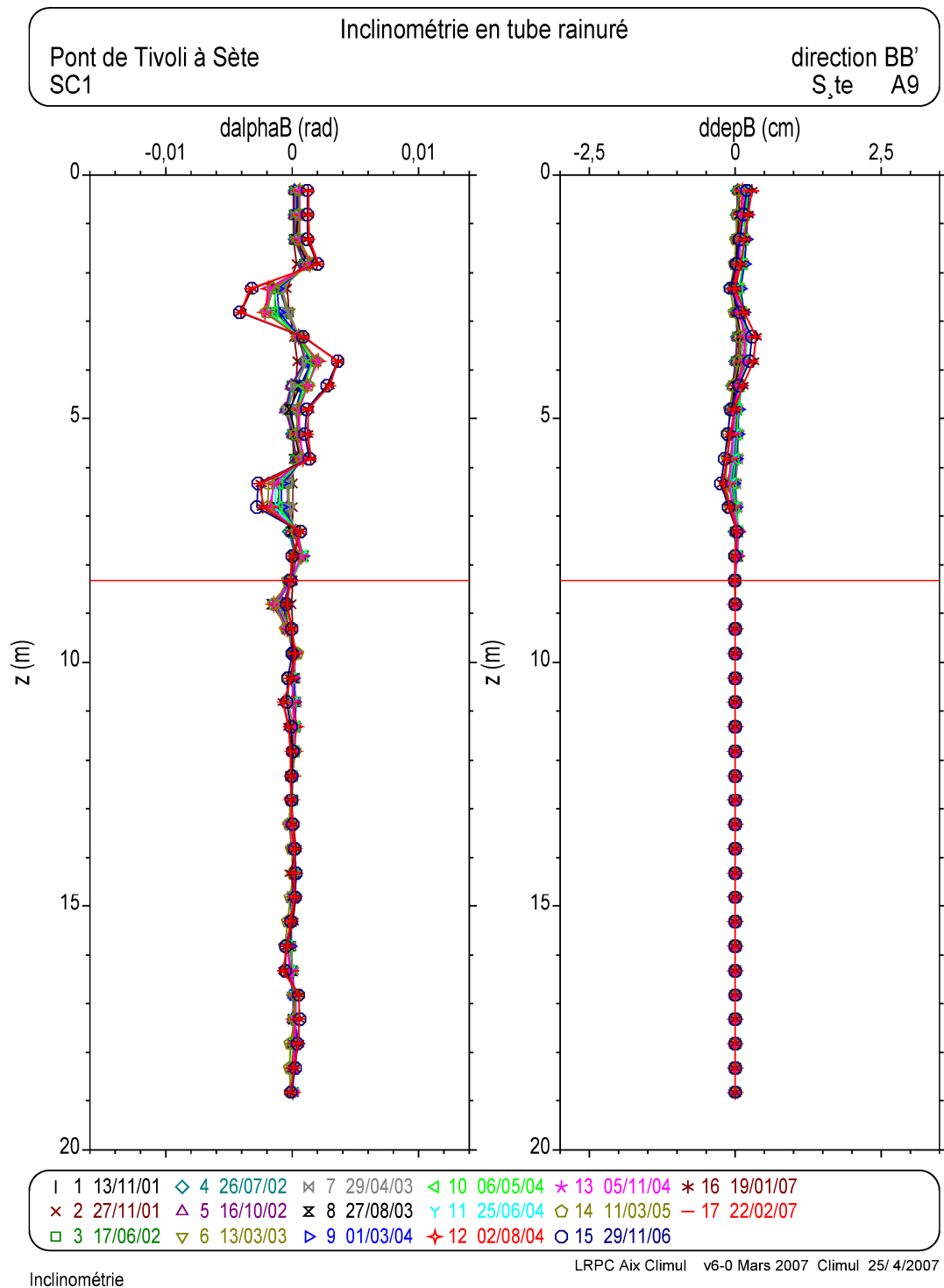


Figure 28b : Exemple 26.

Comparaison de dix-sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.

Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 17 porte les barres d'incertitude.

Glissement et basculement.

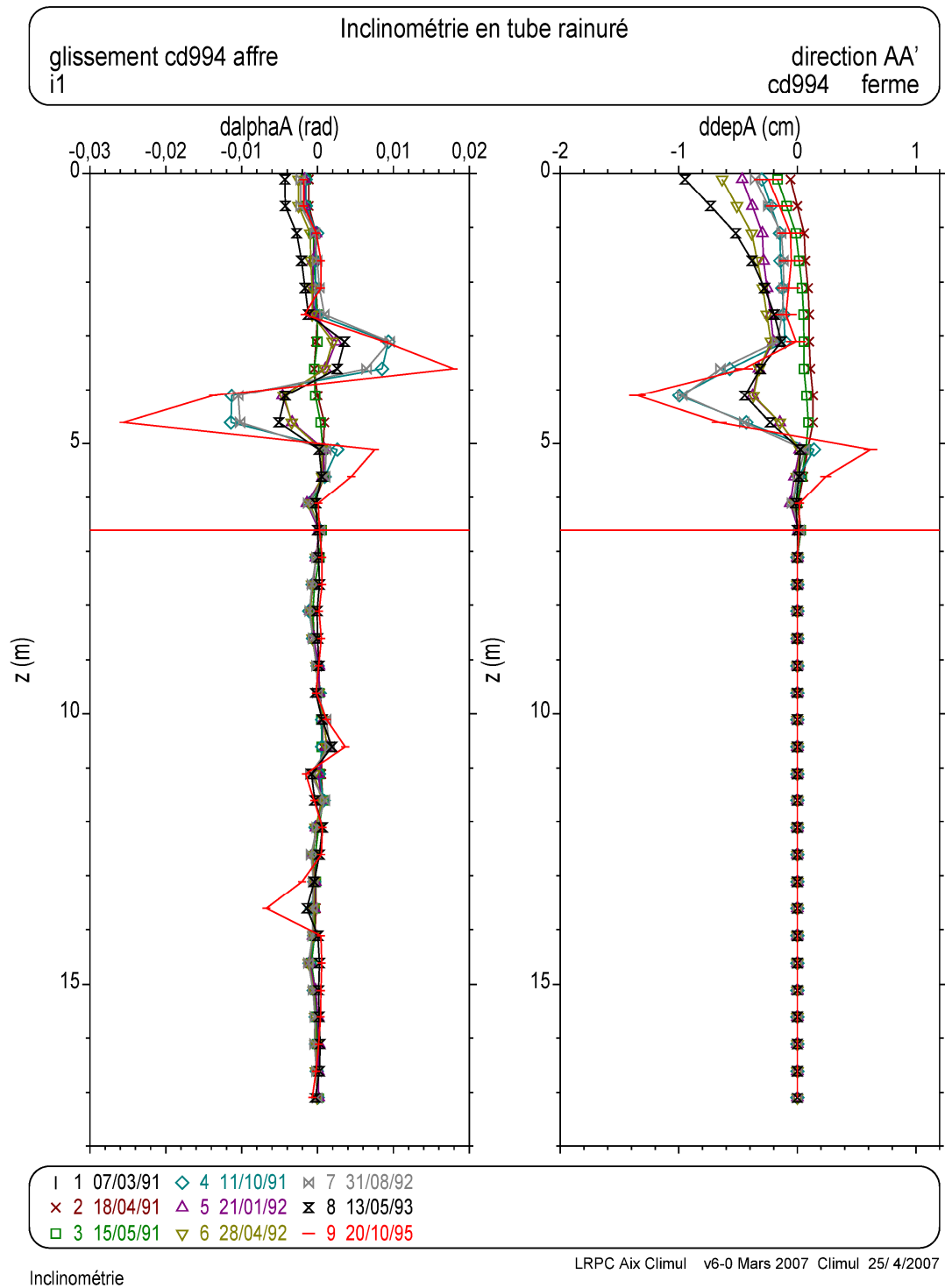


Figure 29a : Exemple 27.

Comparaison de neuf relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 09 porte les barres d'incertitude.
Flambement par gonflement et retrait du massif.

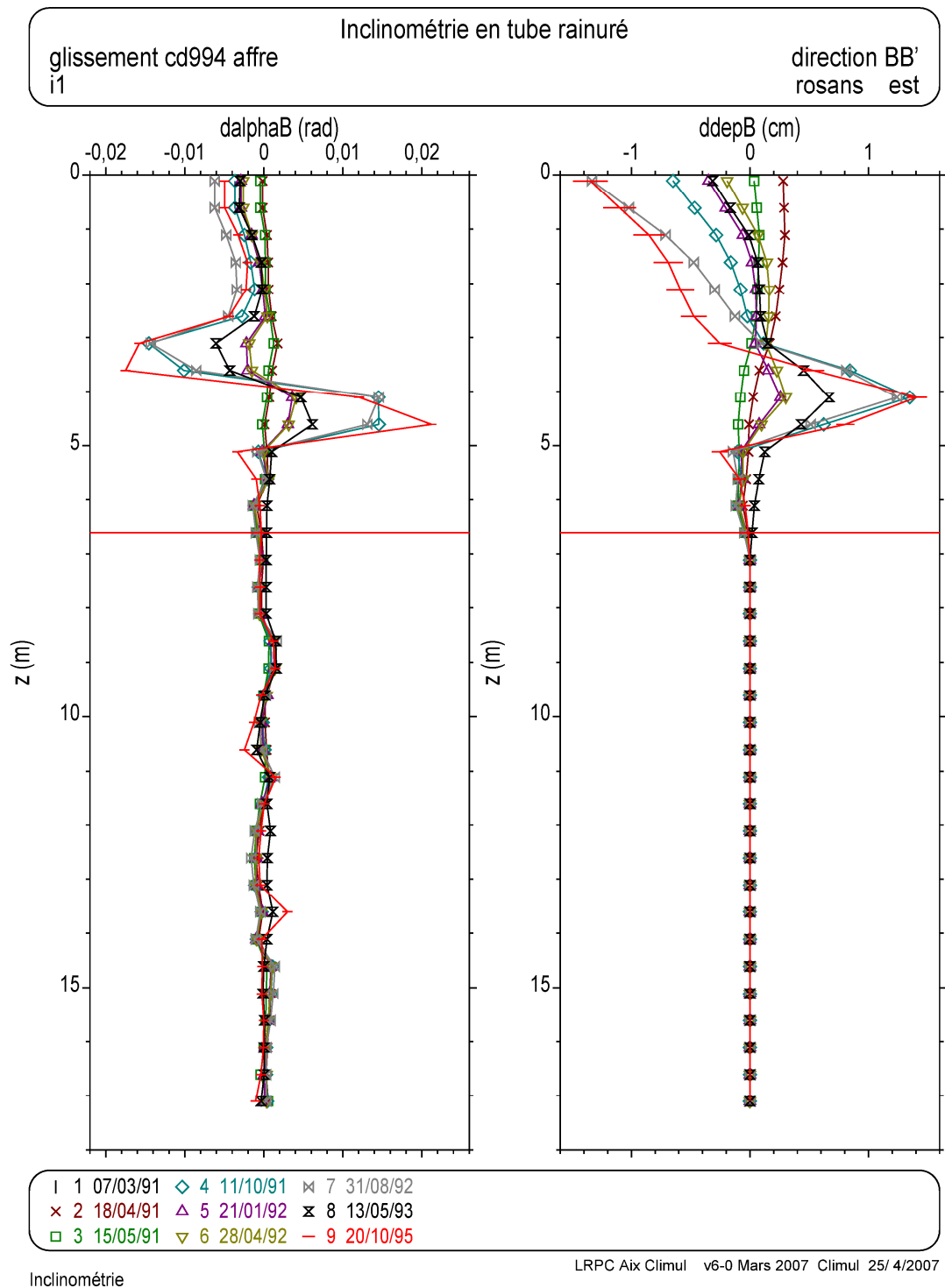
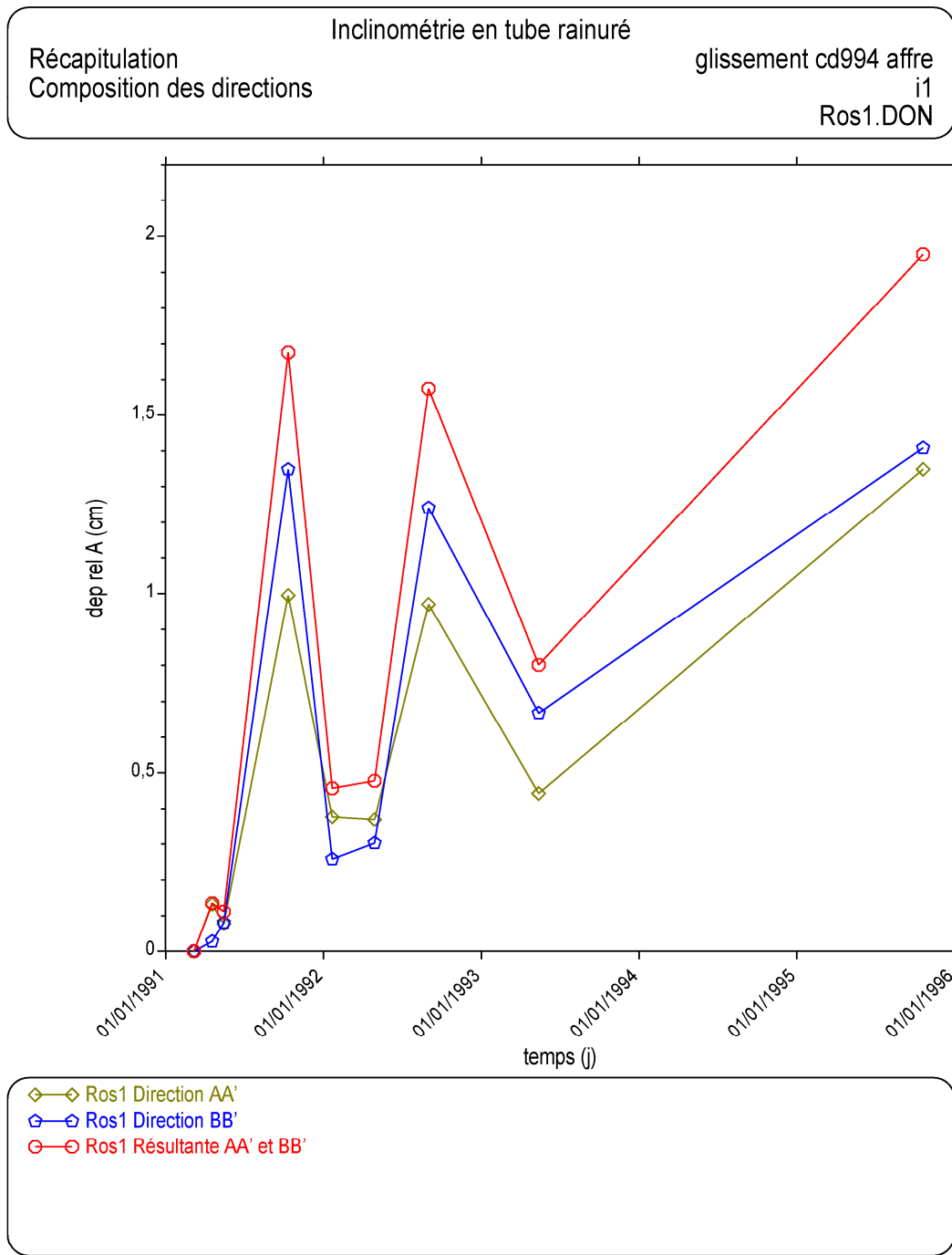


Figure 29b : Exemple 27.

Comparaison de neuf relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 09 porte les barres d'incertitude.
Flambement par gonflement et retrait du massif.



Déplacements relatifs en fonction du temps.

Inclino

LRPC Aix Dta v3-0 Juil 2005 102 25/ 4/2007

Figure 29c : Exemple 27.

Comparaison de neuf relevés inclinométriques. Evolution dans le temps du déplacements relatifs entre 0,1 et 6,6 m de profondeur. Directions AA', BB' et résultante. Échelle de temps linéaire. Flambement par gonflement et retrait du massif.

5.9 – Déformations de deux parois moulées

Les deux tubes inclinométriques I1TC et I3TC ont été mis en place dans des parois moulées pour la construction d'un quai. Ces deux tubes appartiennent à un même profil transversal de l'ouvrage (profil 1). La hauteur de la paroi principale est égale à 27,4 m, entre les cotes -25,0 et +2,4 m NGF environ. L'ancrage arrière du quai est réalisé par une paroi moulée de 10,7 m de hauteur (entre les cotes -9,5 et 1,2 m NGF environ), située à 35 m en arrière de la paroi principale. L'épaisseur de deux parois moulées est de 0,82 m. Elles sont reliées par des barres en acier de 95 mm de diamètre espacées de 2,90 m (de la cote -3,1 m NGF au nœud avec l'écran arrière à la cote -5 m NGF au nœud avec la paroi principale).

La coupe de terrain simplifiée comprend, à partir de la surface (vers 1,2 m NGF) : 2 m de galets et sables, 5,5 m de limon, 1,5 m de sable, 21,5 m de limon, puis le substratum (cailloutis, vers -29,3 m NGF). Le tube inclinométrique I1TC est installé dans la paroi principale, en traverse le pied et descend jusqu'à la cote -35,5 m NGF environ. Le tube I3TC est installé dans la paroi arrière, puis se prolonge sous la paroi jusqu'à la cote -35,5 m NGF environ. L'instrumentation comprend un second profil d'auscultation (tubes I5TC et I7TC dans les parois, non exploités ici). Chaque profil comprend deux inclinomètres supplémentaires, scellés dans le massif (entre les deux parois et à l'arrière de l'écran arrière. Après construction des parois moulées, une excavation provisoire est réalisée entre les deux parois pour la pose des barres en acier. Cette excavation est remblayée ensuite, puis le dragage est effectué par phases successives devant la paroi principale et jusqu'à la cote -14,3 m NGF environ.

Les relevés inclinométriques ont été effectués avec une sonde TC40 adaptée pour des tubes Glötzl (les rainures des tubes sont disposées à 45 ° par rapport aux plans principaux des parois moulées). L'exploitation d'une partie des relevés inclinométriques effectués dans les tubes I1TC et I3TC est présentée sur les [figures 30 à 32](#) (comparaison des relevés successifs au relevé 01). Les relevés 01 à 08 couvrent la période de construction du quai. Les relevés 09 à 13 couvrent la période de dragage devant la paroi principale. Les déplacements les plus grands apparaissent entre les relevés 01 et 02, avec une convergence des deux parois vers l'excavation provisoire. Les comparaisons sont effectuées sans encastrement et ne tiennent pas compte de la présence des cailloutis en profondeur. Seule une correction de dérive est appliquée sur les derniers relevés du tube I1TC (relevés 12 et 13), qui va de pair avec une dégradation de la qualité des relevés.

Cette exploitation montre que la paroi principale fléchit en direction de l'excavation provisoire, avec rotation en pied pendant la phase de construction ([figures 30](#) et détail [figure 31](#)). La paroi arrière montre une rotation d'ensemble vers l'excavation provisoire. La phase de dragage ramène la paroi principale vers la mer selon un mouvement principal de translation et une faible rotation. Les relevés inclinométriques semblent indiquer que cette translation affecte le pied de la paroi avec un déplacement du sol entre le pied de la paroi et le toit des cailloutis. La paroi arrière subit une petite rotation supplémentaire.

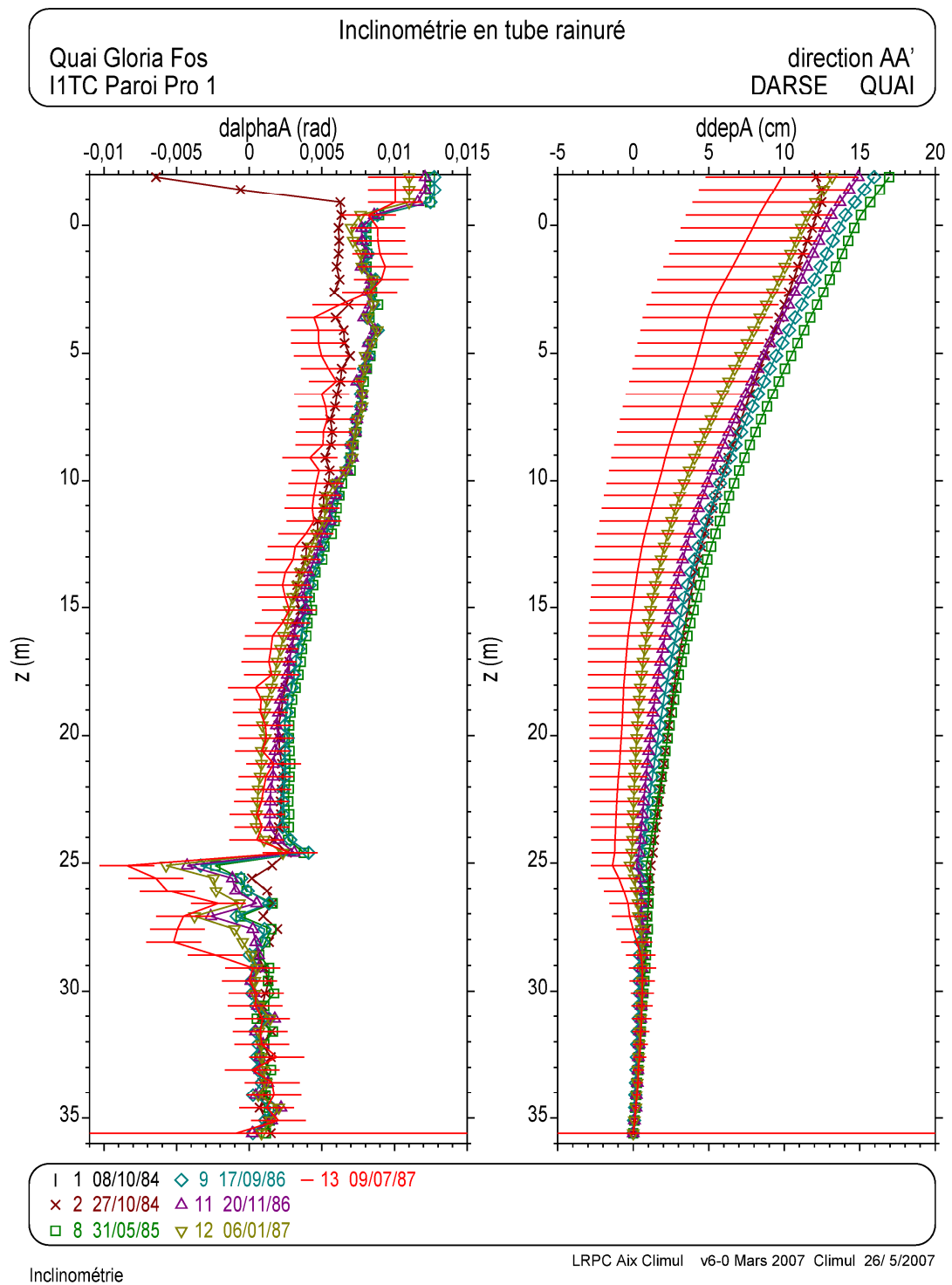


Figure 30a : Exemple 28.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Déformations des parois moulées formant un quai.

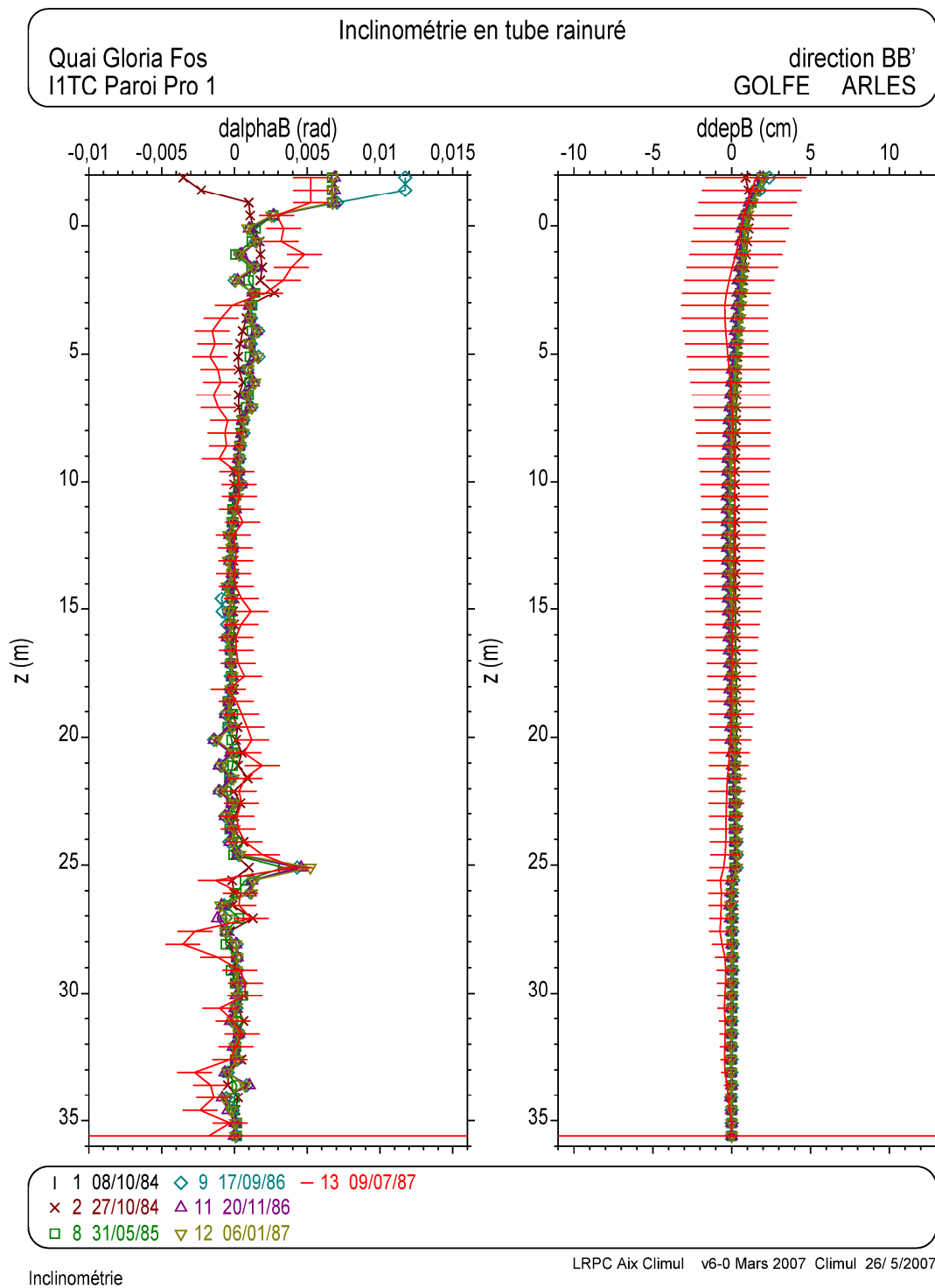


Figure 30b : Exemple 28.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Déformations des parois moulées formant un quai.

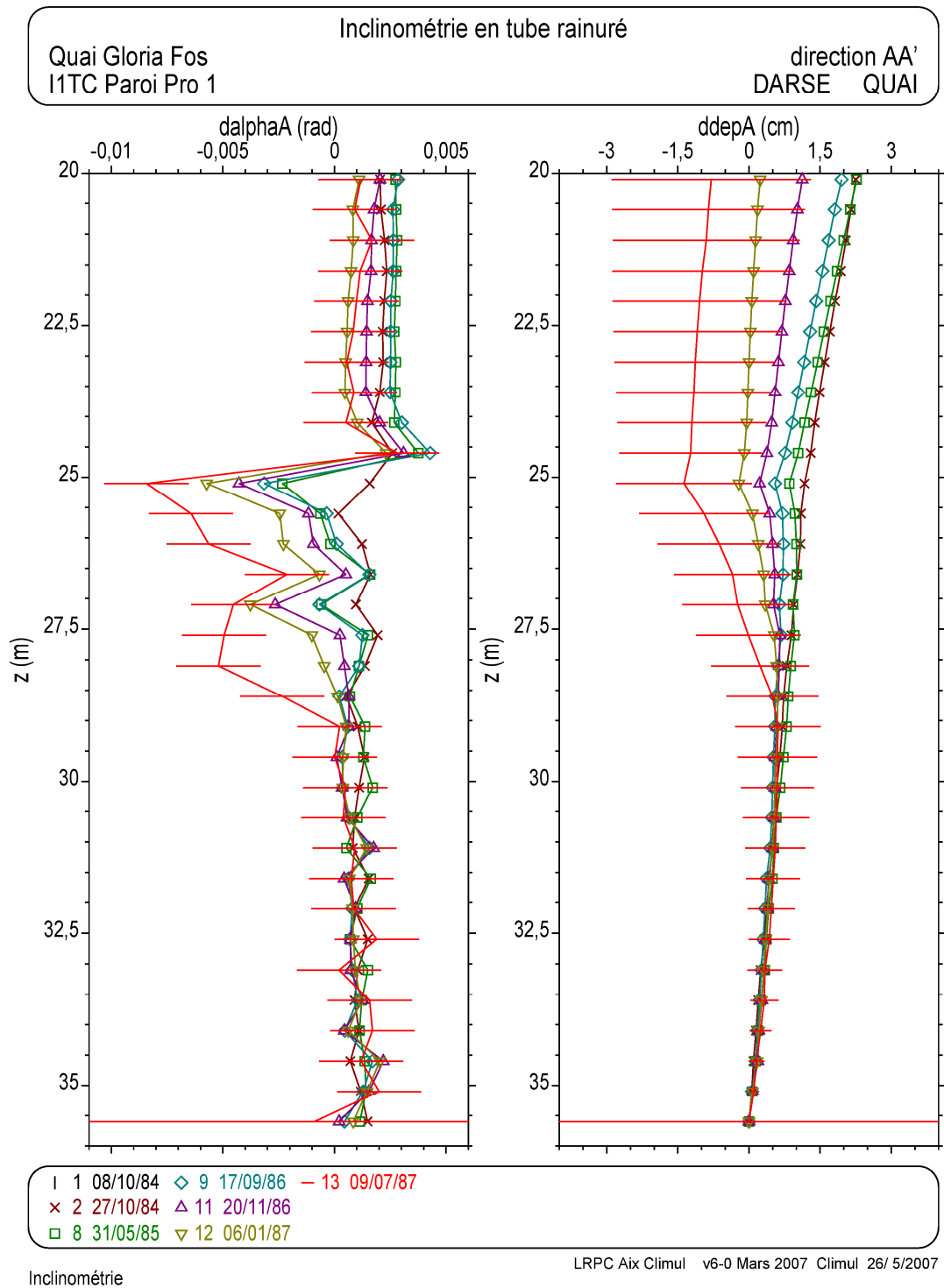


Figure 31a : Exemple 28.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude. Déformations des parois moulées formant un quai. Détails.

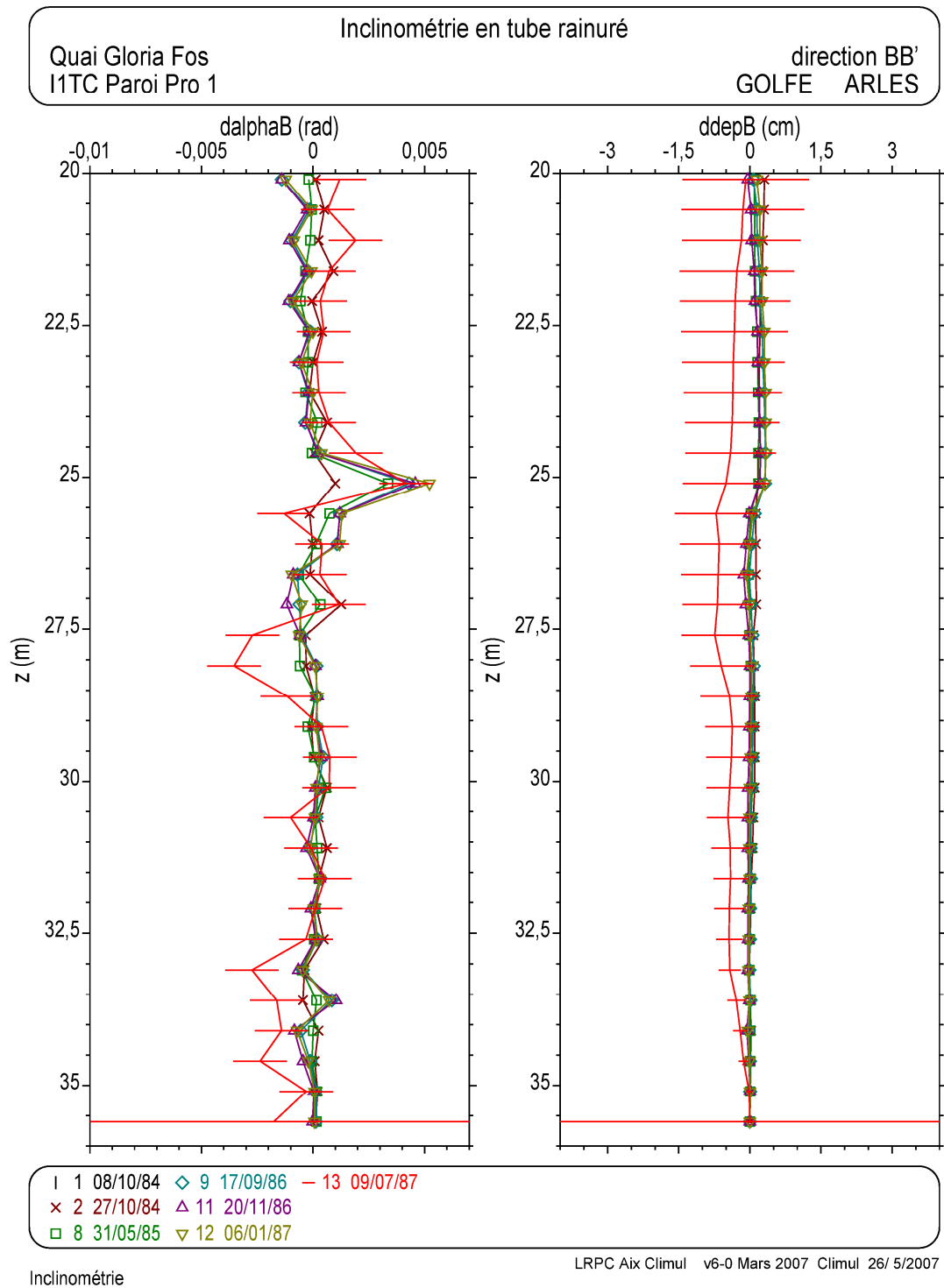


Figure 31b : Exemple 28.

Comparaison de sept relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude. Déformations des parois moulées formant un quai. Détails.

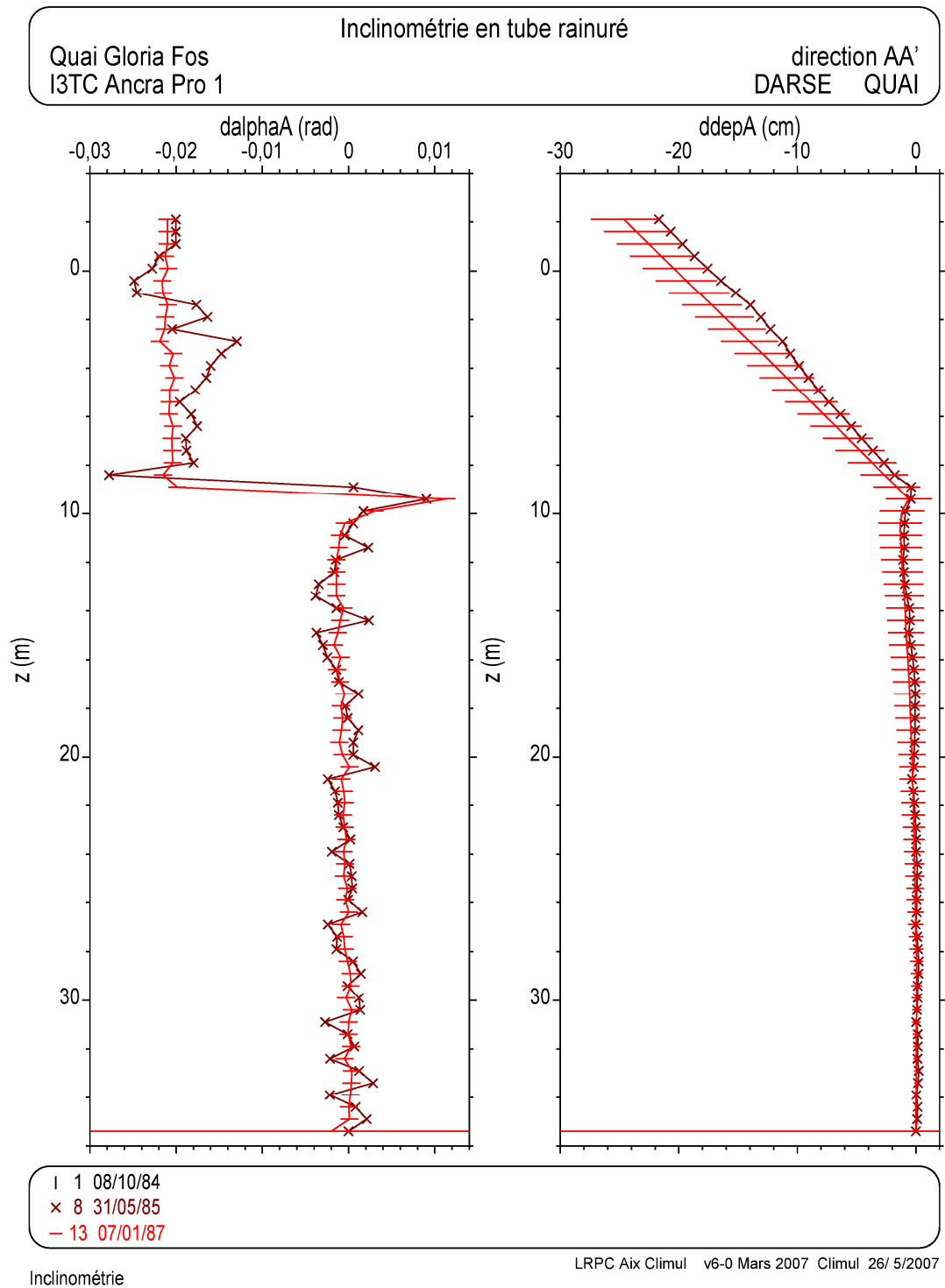


Figure 32a : Exemple 29.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Déformations des parois moulées formant un quai.

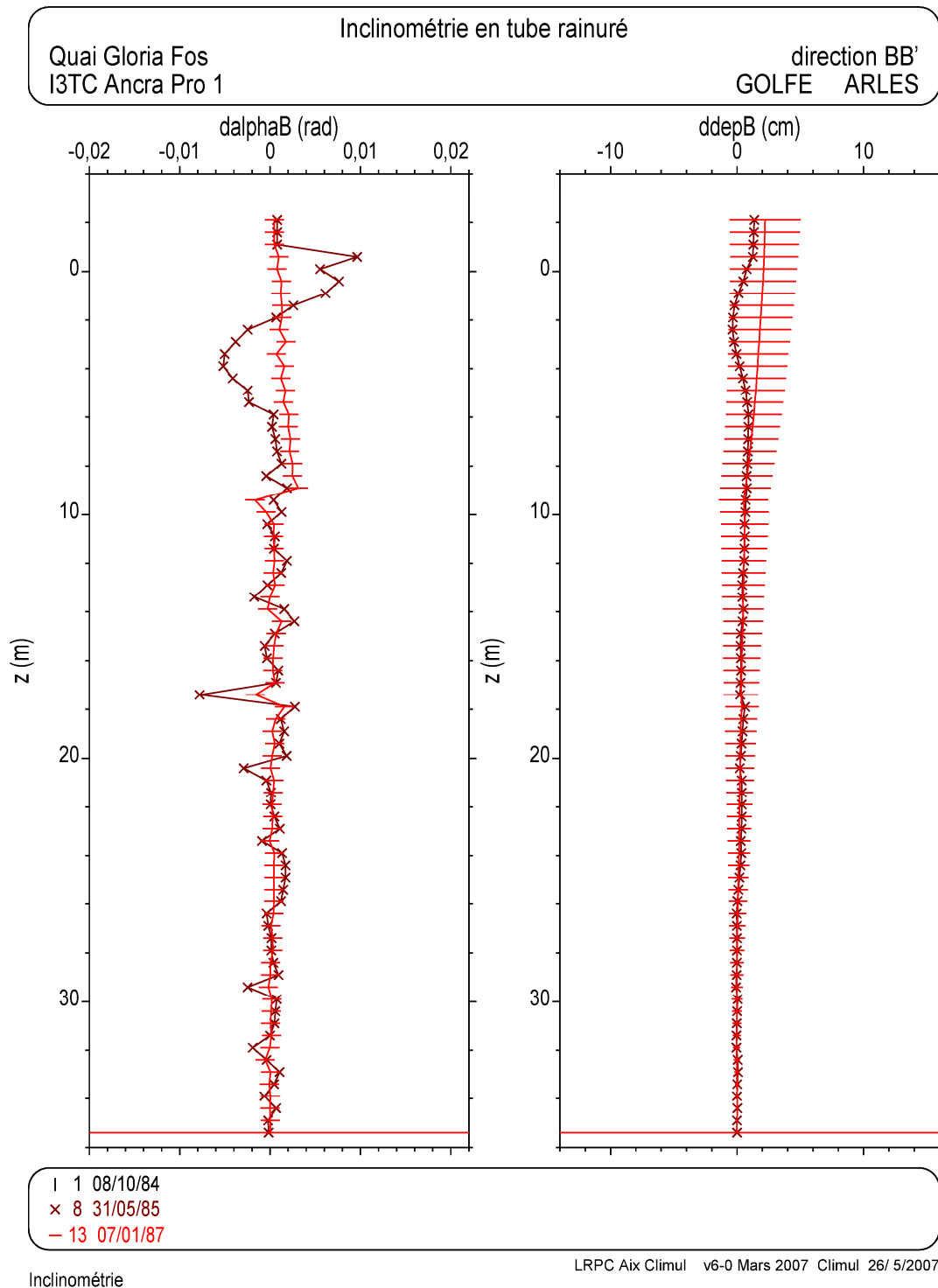


Figure 32b : Exemple 29.

Comparaison de trois relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Déformations des parois moulées formant un quai.

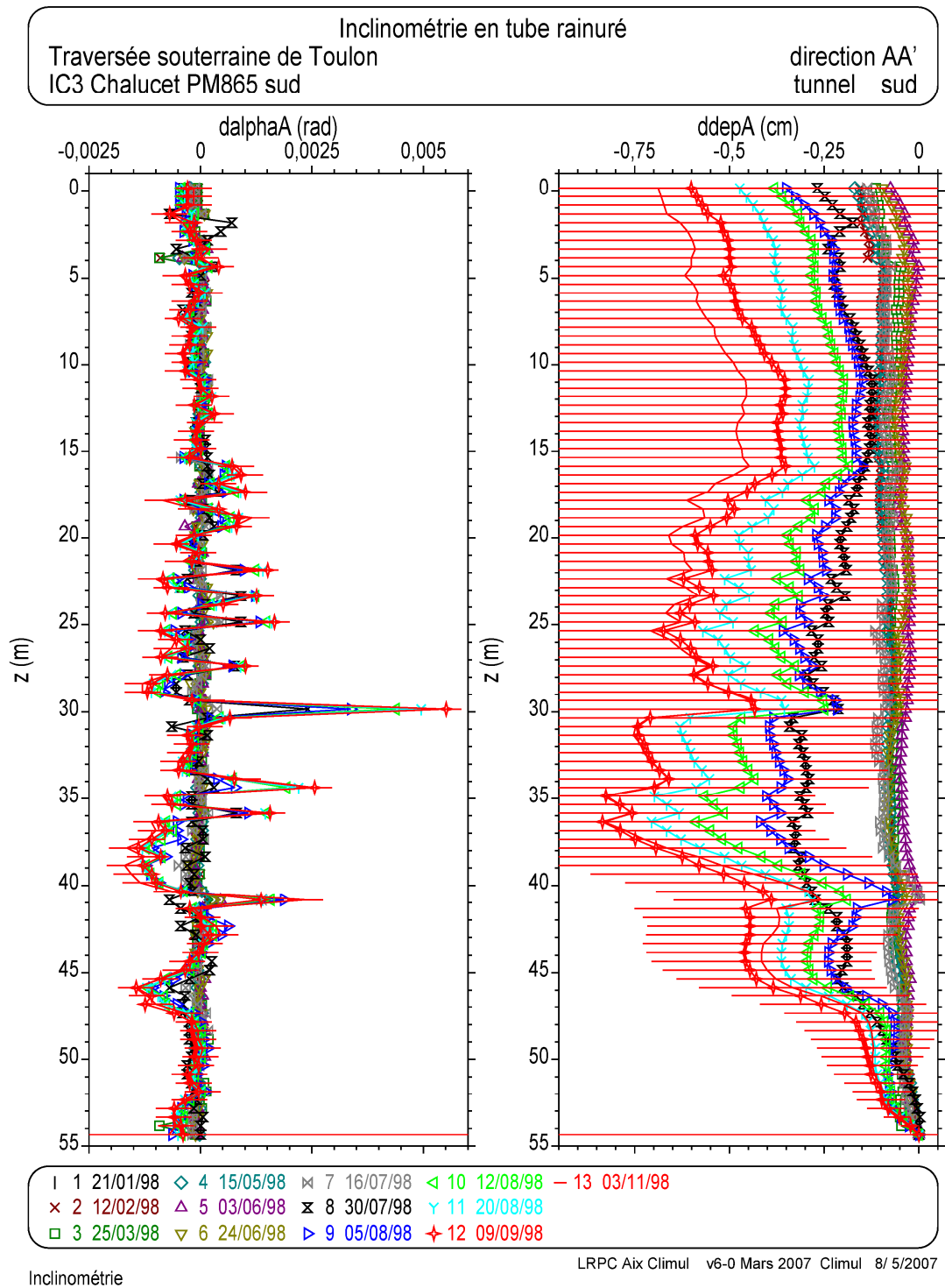


Figure 33a : Exemple 30.

Comparaison de treize relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction AA'. Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude. Déformations au voisinage d'un tunnel.

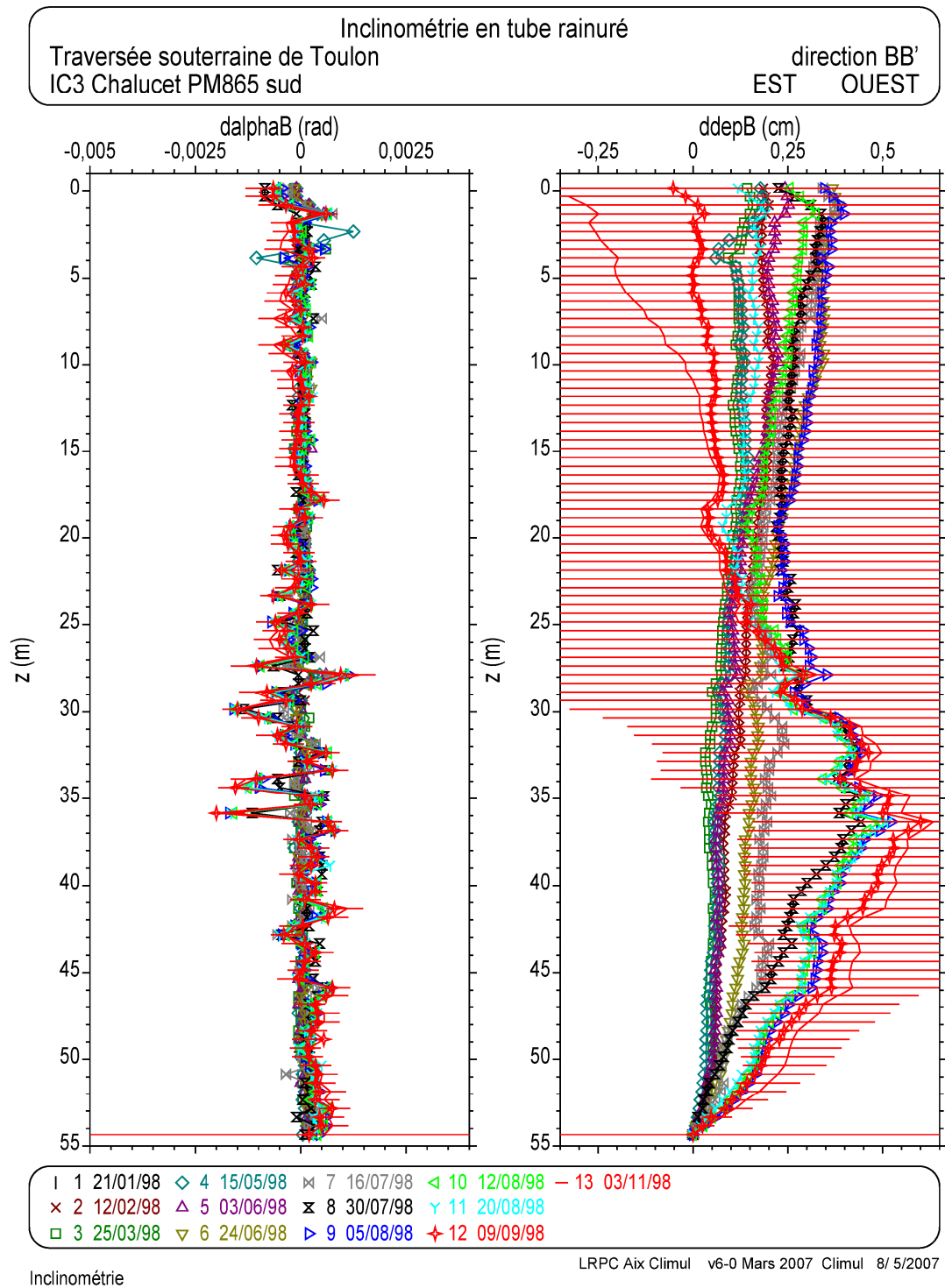


Figure 33b : Exemple 30.

Comparaison de deux relevés inclinométriques. Variations angulaires et déplacements relatifs en fonction de la profondeur. Direction BB'.
Le relevé 01 sert de référence. Le relevé 13 porte les barres d'incertitude.
Déformations au voisinage d'un tunnel.

5.10 – Déformations au voisinage d'un tunnel

Cet exemple montre les déformations d'un tube inclinométrique profond installé à proximité du tunnel nord de la Traversée Souterraine de Toulon : tube IC3, plot Chalucet (1998-1999) (figure 33).

Les relevés inclinométriques montrent que les déplacements sont dirigés vers le front du tunnel qui progresse pendant la période d'observation. Les zones intéressées par les déplacements horizontaux sont très vastes. Dans le détail, les déformations du tube sont discontinues, en liaison avec la fracturation du massif rocheux ausculté.

Conclusion

En reproduisant quelques exemples particuliers, cette étude a voulu illustrer la pratique de l'inclinométrie en tubes rainurés, d'une part, et attirer l'attention sur quelques problèmes rencontrés couramment, d'autre part.

Les premiers exemples proposés présentent la méthode d'exploitation des données inclinométriques d'après la méthode Clinex 82 et son utilisation pour l'exploitation simultanée de plusieurs relevés (Climul). Puis, la méthode directe de calcul de la forme du tube est présentée, ainsi qu'une méthode approchée utilisable pour les tubes quasi verticaux. Des exemples sont rassemblés alors pour illustrer différents problèmes rencontrés en pratique, et, notamment, celui du flambement. Enfin d'autres exemples montrent l'utilisation de l'inclinométrie pendant l'auscultation de différents types d'ouvrages.

La qualité des relevés inclinométriques dépend de nombreux facteurs qui sont essentiellement géométriques (guidage, positionnement en station de la sonde inclinométrique) et instrumentaux (bruit, dérive), mais elle dépend aussi de la qualité globale des tubes rainurés dès leur mise en place dans le terrain. Dans le cas des mouvements lents ou de la surveillance d'ouvrages, la qualité des mesures détermine directement le délai de réponse de l'installation et donc sa capacité à jouer son rôle d'alerte.

La dérive instrumentale en cours de relevé doit être aussi petite que possible, malgré les variations de température et les fluctuations éventuelles des alimentations électriques des capteurs. Des précautions doivent donc être prises avec l'utilisation des mêmes éléments de la chaîne de mesure d'un relevé à l'autre (boîtier, câble, sonde), la stabilisation en température de la sonde en fond de trou, avant de commencer l'acquisition des mesures d'un relevé, etc. Par contre, la dérive entre deux relevés est inévitable. Pour traiter cette difficulté, il est nécessaire de disposer d'une partie encastrée du tube en profondeur. Aussi, la dérive entre deux relevés pourra être évaluée dans cette zone fixe, pour corriger les variations angulaires dans la partie supérieure du tube. Enfin, d'autres sources d'erreurs doivent être minimisées, tel que le décalage en z, en veillant au respect rigoureux du positionnement de la sonde en station, pendant chacun des relevés (double mesure) et d'un relevé à l'autre.

L'expérience montre que la pente des tubes inclinométriques contribue à réduire la précision des doubles mesures et, par conséquent, la précision des comparaisons entre les relevés. Les imperfections géométriques des tubes rainurés vont dans le même sens, avec en particulier les défauts de raccordement entre les éléments de tube. Les déviations de forage doivent être limitées au mieux en utilisant des outils adaptés et une mise en œuvre soignée, pour aboutir à la pose du tube le plus vertical et le plus rectiligne possible, non vrillé, et un scellement homogène sur toute la longueur. Des spécifications peuvent être avancées quant aux limites admissibles des déviations.

Concernant les ouvrages, et en particulier les ouvrages de soutènement, l'installation des tubes inclinométrique doit prévoir une longueur encastrée importante en profondeur, car, d'après les exemples présentés ici, les tubes inclinométriques font souvent apparaître des déformations mesurables, à défaut d'être réelles, à des distances éloignées des ouvrages.

Références

- AFNOR (Association Française de Normalisation), 1995. Sols : reconnaissance et essais. Mesure à l'inclinomètre. Norme française NF P 94-156, Octobre 1995, 23 p.
- Asté J.P. (1983). Perfectionnement et développement des méthodes inclinométriques. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°26-27, pp. 5-15.
- Bescond B., Lyon G., Serratrice J.F. (1999). Désordres et confortement d'un talus de déblai dans des phyllades. Autoroute A57. Journées de mécanique des sols et des roches des LPC, Aix en Provence, Mai 1999.
- Blondeau F. (1980). Étude du flambement d'un inclinomètre dans son forage. Note, 29 juillet 1980, 8 pages.
- Gaudin B., Lecreux M. (1984). Ariège : dans le mille à 200 m sous terre. Échange, Informations du CETE Méditerranée, n° 17, Novembre-Décembre 1984.
- Peignaud M. (1982). Le tube inclinométrique carré 40×40 des LPC. Problèmes de corrosion. Journée Inclinométrie de LPC, Nantes, 20-21 octobre 1982, 8 pages.
- Pincent B., Blondeau F. (1978). Détection et suivi des glissements de terrain. Proceedings, 2nd International Congress of the International Association of Engineering Geology, Madrid, 4-8 september 1978, sec 1, vol. 1, pp. 252-266.
- Pincent B., Meignen D. (1982). Exploitation des mesures inclinométriques. Programme Clinex 82. Rapport LCPC, Octobre 1982, 59 pages.
- Pincent B. (1982). Inclinométrie. Exercices. Journée Inclinométrie des LPC, Nantes, 20-21 octobre 1982, 23 p.
- Pincent B., Cartier G., Pilot G. (1983). Mesures en place des mouvements de terrain des versants naturels. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur (AIGI), n° 26-27, pp. 107-111.
- Serratrice J.F. (2009). Étude expérimentale du comportement des sols, des roches et des ouvrages géotechniques. Mémoire de HDR, Université de Caen / Basse Normandie, Caen, 07 mai 2009.
- Ch 1 Présentation générale des activités de recherche.
 - Ch 2 Le laboratoire de mécanique des sols et des roches du LRPC d'Aix en Provence.
 - Ch 3 Propriétés mécaniques des sols raides et des roches tendres.
 - Ch 4. Étude du comportement des massifs rocheux.
 - Ch 5 Instrumentation, mesures et fonctionnement des ouvrages.

Rapports

- Gaudin B. (1980). Inclinomètre Télécline. Notice d'utilisation. Note, CETE d'Aix en Provence, Janvier 1980, 10 pages.
- Gaudin B., Serratrice J.F. (1981). Inclinomètre Glötzl. Notice d'utilisation. Note, CETE d'Aix en Provence, Février 1981, 12 pages.
- Gaudin B., Serratrice J.F. (1983). Inclinométrie en sondage. Comparaison de deux procédés de mesure. Rapport, CETE Méditerranée, Octobre 1983, 72 pages.
- Serratrice J.F. (1991). Inclinométrie en sondage. Clinex. Comparaison de deux relevés. Note, CETE Méditerranée, Février 1991, 80 pages.
- Serratrice J.F. (1991). Inclinométrie en sondage. Saisie manuelle des données sur chantier. Note, CETE Méditerranée, Février 1991, 68 pages.
- Serratrice J.F. (1994). Inclinométrie en sondage. Quelques enseignements tirés de la pratique. Journée "Inclinométrie" des LPC, Toulouse, Décembre 1994.

- Serratrice J.F. (1995). Inclinométrie en sondage. 1. Quelques enseignements tirés de la pratique. 2. Sonde Télécline pour tube lisse. LCPC CT24 2-24-03-4, rapport CETE Méditerranée, jfs i95-082, 04/04/1995, 66 pages.
- Serratrice J.F. (1997). Traversée souterraine de Toulon. Plot d'essai Premec. Relevés extensométriques. Relevés inclinométriques. LCPC Thème GEO33 1-33-04-6, rapport CETE Méditerranée, jfs i97-225, 18/09/1997, 87 pages.
- Serratrice J.F. (1998). Traversée Souterraine de Toulon. Suivi et interprétation des mesures du plot Chalucet. LCPC Thème GEO 33, 1-33-04-7/8, rapport CETE Méditerranée, jfs i98-318, 18/12/98, 118 pages.
- Serratrice J.F. (2000). Traversée Souterraine de Toulon. Suivi et interprétation des mesures du plot Dumont d'Urville. LCPC CT 24/25, 2-25-32-9, rapport CETE Méditerranée, jfs i00-021, 24/01/00, 77 pages.
- Serratrice J.F. (2007). Inclinométrie en tubes rainurés. Aspects pratiques. LCPC Opération 11P081, rapport CETE Méditerranée, jfs i07-092, 30/05/2007, 42 p. Annexe 1, 160 p. Annexe 2, 144 p.