

Thèse de Doctorat de l'Université de Savoie

**EVOLUTION DES ESCARPEMENTS CALCAIRES INSTABLES.
QUANTIFICATION DES MOUVEMENTS ACTUELS PAR G. P. S. ET
INCLINOMETRIE DANS LES ALPES DU NORD (FRANCE).**

Auteur : Jean-François MARCONNET

Laboratoire de Géodynamique des Chaînes Alpines

RESUME

Les escarpements des massifs calcaires alpins sont particulièrement sensibles aux instabilités à cause de leur structure stratifiée alternant des couches de compétences différentes, et des nombreux facteurs favorisant leur érosion, tels que la présence d'eau ou de glace dans les fissures de la roche. L'instabilité des escarpements calcaires se manifeste par des éboulements ou des mouvements progressifs de masses rocheuses. Ces derniers mouvements ont été quantifiés sur deux escarpements à lithologie comparable situés en Haute-Savoie, grâce à deux types de méthodes.

Le G. P. S. (Global Positioning System) a permis de mesurer des mouvements significatifs sur le versant d'Allèves entre 1996 et 1998, grâce à un réseau de 18 repères. Des prismes implantés sur l'escarpement Valanginien des Tours Saint-Jacques ont permis d'effectuer des visées distancemétriques à partir de certains points du réseau G. P. S., et de quantifier les mouvements de l'escarpement grâce à la combinaison du G. P. S. et de la distancemétrie. Un traitement fin des données G. P. S. a été réalisé avec le logiciel BERNESE, afin de corriger les biais liés essentiellement aux effets de masque et troposphériques. Les coordonnées horizontales des repères ont ainsi été obtenues à 5 millimètres près.

Sur l'escarpement de Passy, des inclinomètres en silice fournissent des mesures de basculement de l'abrupt au pas horaire. L'analyse de six années d'enregistrement (1991-1996) a nécessité l'emploi de techniques de traitement du signal, afin d'isoler l'influence de la température, et les périodicités présentes dans les données.

Le versant d'Allèves présente un raccourcissement horizontal révélé par G. P. S. de 1 cm/an orienté au SSE, par rapport au village d'Allèves, situé au pied du versant. Ce déplacement suggère un glissement sur une surface structurale présentant une inflexion le long d'un axe plongeant vers l'W. Une accélération significative des mouvements a été observée sur le versant durant la période 1997-98 par rapport à 1996-97. Elle pourrait traduire l'influence du séisme d'Epagny (1996) avec retard. Alors que les escarpements sommitaux montrent des déplacements horizontaux suggérant la déstabilisation du rebord des abrupts, les Tours Saint-Jacques révèlent des mouvements traduisant leur dislocation actuelle. La tour amont semble divisée en deux compartiments au moins séparés par des fractures verticales d'azimut N140°. Un décrochement dextre peut rendre compte des déplacements relatifs des prismes. Les mouvements des prismes implantés sur la tour du milieu, de part et d'autre d'une fracture verticale d'azimut N120° parcourant toute la face NW, traduisent également le comportement actuel de deux compartiments évoluant indépendamment. Enfin, les déplacements des prismes de la tour aval peuvent traduire l'ouverture actuelle de fractures verticales d'azimut N135°, parallèles aux faces NE et SW de la tour.

Sur le site de Passy, aucune corrélation n'a été observée entre les précipitations et les signaux inclinométriques, mais de fortes corrélations lient la température et les données inclinométriques dans le domaine des basses fréquences. Malgré ces corrélations, la dérive du signal montre que l'escarpement subit un basculement vers l'amont. Un axe de rotation horizontal orienté N60° peut rendre compte de ces basculements. Ceux-ci suggèrent un glissement de type rotationnel.

Mots-Clés :

Mouvement de terrain – versant – escarpement – instabilité – calcaire – monolithe – basculement – Global Positioning System – distancemétrie – inclinométrie – traitement du signal – fréquence – spectre de cohérence – spectre de phase.

UNIVERSITE DE SAVOIE

THESE J-F. MARCONNET

Le 21/07/99

VOL. 2

ANNEXES

ANNEXE 1 : COMPLÉMENTS SUR LES METHODES D'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Nous nous intéresserons aux méthodes d'auscultation *in situ*. Nous pouvons classer les nombreuses méthodes existantes en trois catégories selon la nature physique de l'information souhaitée (Bonnard, 1990) :

- évaluation des mouvements du sol et du sous-sol ;
- détermination des paramètres hydrologiques ;
- détermination des efforts mécaniques ;

METHODES DE DETERMINATION DES MOUVEMENTS D'UNE MASSE INSTABLE

1. - Déplacements en surface

Ces techniques permettent de déterminer la position de repères à une époque donnée. La détermination des déplacements s'effectue par comparaison de mesures de position entre différentes époques.

1.1. - Photogrammétrie

La comparaison de jeux de photographies aériennes prises à différentes époques permet dans certains cas favorables d'évaluer l'évolution de la topographie et de quantifier le déplacement de points facilement identifiables. Par exemple, l'affaissement de 50 m en trois ans du plateau sommital du Friolin (Savoie) a été mis en évidence par cette technique (Goguel, 1989 ; Girault, 1992 ; Girault *et al.*, 1995). Une précision d'environ 20 cm sur le positionnement permet ainsi de déceler des déplacements supérieurs à 3 cm/an en moyenne (Bonnard, 1990). La plupart des pays d'Europe disposent de jeux de photographies aériennes depuis les années 60, ce qui permet de réaliser des comparaisons sur différents intervalles de temps (Noverraz *et al.*, 1998 ; Fig. 1). Enfin, des Modèles Numériques de Terrains (MNT) peuvent aujourd'hui être calculés grâce à des logiciels adaptés. La position de points de calage doit être connue précisément, ce qui peut être réalisé avec l'emploi du G. P. S. La technique s'applique maintenant également aux scènes satellitaires (Vidal *et al.*, 1997 ; Thoué *et al.*, 1997).

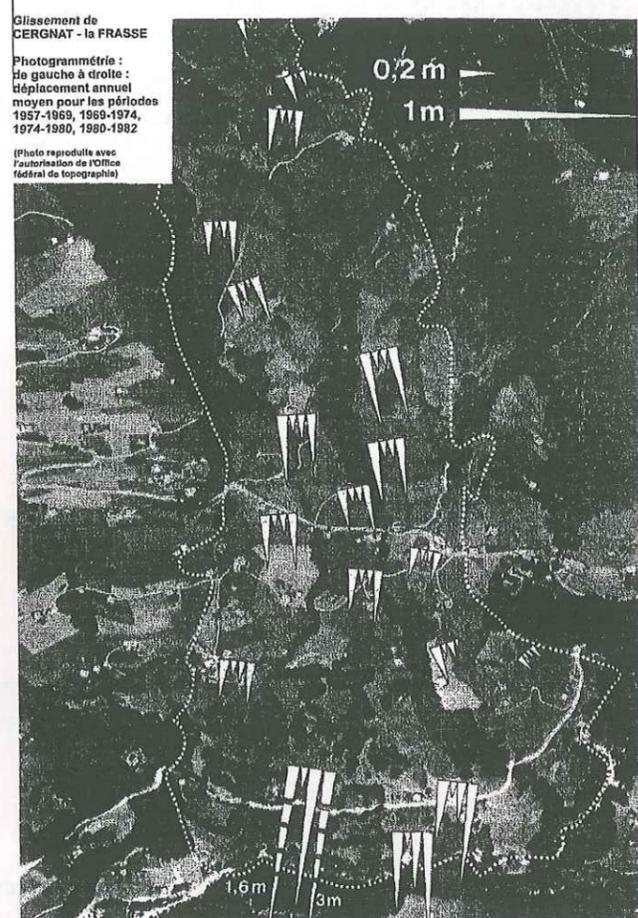


Fig. 1 – Déplacements horizontaux obtenus par photogrammétrie aérienne pour différentes périodes de temps sur le glissement de Cernat-La Frasse (Suisse) (Noverraz et al., 1998).

1.2. - Plans cadastraux

Nous pouvons citer comme technique annexe la comparaison de plans cadastraux. Les documents graphiques en vigueur sont généralement anciens (un siècle) et ont pu être (ou non) révisés. Des mesures récentes de topométrie permettent de comparer la position de certains édifices ou ouvrages à un siècle d'intervalle. L'incertitude des documents anciens est compensée par le long intervalle de temps servant à la comparaison, ce qui permet de détecter des déplacements significatifs relativement lents (supérieurs à 1.5 cm/an en moyenne, Bonnard, 1990).

1.3. - Interférométrie S. A. R. (Synthetic Aperture Radar)

1.3.1. - Principe

Le principe du radar est d'envoyer une onde électromagnétique de fréquence connue sur un objet, et d'analyser le signal renvoyé par celui-ci. L'information fournie par le signal du radar à ouverture synthétique (Synthetic Aperture Radar) est double. D'une part, une information de type radiométrique (amplitude du signal rétrodiffusé) permet des applications directes en cartographie par exemple. Les longueurs d'onde centimétriques des radar ($\lambda = 5.6$ cm pour le radar du satellite

ERS-1) rendent l'atmosphère terrestre pratiquement transparente. D'autre part, la phase du signal est liée à la nature du sol et au temps de parcours aller-retour de l'onde. La différence de phase mesurée entre deux signaux peut être utilisée :

- pour calculer un *Modèle Numérique de Terrain* (MNT). Ceci nécessite des points de vue différents. Ces derniers peuvent être obtenus grâce à l'acquisition simultanée de deux antennes spatialement distinctes embarquées sur un avion (interférométrie aéroportée), ou grâce à deux acquisitions distinctes dans le temps d'une même antenne (interférométrie satellitaire) ;
- pour mesurer des *déplacements du sol* (interférométrie différentielle). Ceci nécessite des points de vue peu séparés, et l'utilisation d'un MNT. Seule l'interférométrie satellitaire permet la mesure de déplacements. Cette application paraît donc très intéressante pour l'étude des instabilités de versant.

1.3.2. - Limitations de la méthode

La précision des méthodes interférométriques dépend de la précision avec laquelle la *position de la plateforme radar* est connue. L'interférométrie aéroportée ne permet pas de déterminer de mouvements à cause du manque de répétabilité des trajectoires des avions. Seule l'interférométrie satellitaire est donc utile en ce qui concerne les instabilités de versant. Aujourd'hui, seuls les satellites ERS-1, ERS-2, JERS, et RADARSAT permettent de telles applications.

La méthode de l'interférométrie différentielle présente un certain nombre de limitations qui lui sont propres :

- une limitation importante est liée à l'orientation des mouvements détectables. *Les mouvements horizontaux orientés E-W peuvent être détectés. Des déplacements orientés N-S ne peuvent pas être détectés ;*
- deux points ne peuvent être distingués en altitude que si leur différence d'altitude est *supérieure à l'altitude d'ambiguïté*. Celle-ci dépend de la longueur d'onde, de l'angle d'incidence des signaux ($\theta = 23^\circ$ avec la verticale pour le satellite ERS-1), de la distance radiale antenne-cible, de la distance horizontale entre deux positions successives du satellite (base). Par exemple pour le satellite ERS-1, une base de 100 m induit une altitude d'ambiguïté de 100 m, une base de 1000 m conduit à une altitude d'ambiguïté de 10 m (Trouvé, 1996) ;
- les mouvements du sol ne peuvent être détectés si la structure physique de ce dernier change. Seules des déformations sans modification des caractéristiques de rétrodiffusion du terrain sont repérables (Carnec, 1996). Par exemple, des mouvements très hétérogènes dans le périmètre d'une masse instable ne peuvent être quantifiés.

La Fig. 2 présente un exemple d'interférogramme obtenu sur le site de glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes).

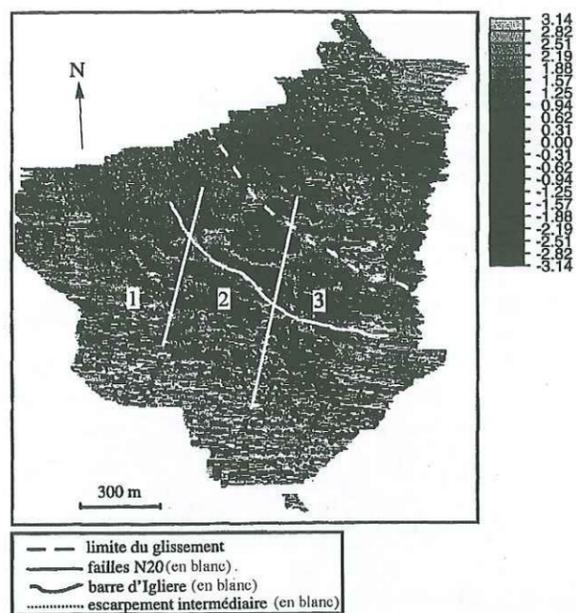


Fig. 2 – Interférogramme du glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes) obtenu par interférométrie satellitaire différentielle (temps entre les images : 9 jours), et projeté grâce à un MNT du site (d'après Fruneau & Achache, 1995 ; explications dans le texte).

La partie W du glissement (zone 1) est constituée d'éboulis actifs et l'interférogramme présente des franges régulières et parallèles, traduisant un mouvement cohérent vers le bas. L'interfrange correspond à un déplacement de 3.5 cm suivant la ligne de plus grande pente. Au centre de la masse instable (zone 2) l'écartement entre les franges augmente et leur parallélisme disparaît, traduisant une diminution du gradient de déplacement. Enfin, la zone 3 (SE) présente des franges moins contrastées et l'interfrange augmente. Les seules franges visibles se situent entre la barre d'Iglière et l'escarpement intermédiaire, l'interfrange restant constant dans cette zone, ce qui exprime une translation en bloc rigide de l'ordre de 1.7 cm pour 100 m dans le sens de la pente. Au-dessus de l'escarpement intermédiaire les franges ne sont plus visibles. Ceci peut être dû à des interfranges extrêmement courtes traduisant des gradients de déplacements importants, ou à des changements des caractéristiques de rétrodiffusion du terrain. La deuxième hypothèse est ici retenue compte tenu des déplacements révélés par la topométrie (Fruneau & Achache, 1995).

1.4. - Le G. P. S.

Toutes ces techniques sont fondamentalement *relatives*, c'est-à-dire qu'elles permettent d'obtenir la position (ou le déplacement) d'un point par rapport à un autre. Elles peuvent devenir absolues si les mesures en un point sont rattachées à la position d'un ou de plusieurs points connus dans un référentiel absolu. La seule technique utilisable sur un versant instable et conduisant directement à un positionnement *absolu* est le G. P. S. Mais la détermination du déplacement d'un point grâce à cette méthode nécessite d'avoir une très bonne précision sur la position du point (à chaque époque de mesure) comparée à la valeur du déplacement, faute de quoi il est nécessaire d'exprimer la vitesse (déterminée de manière absolue) par rapport à un point du réseau (point *pivot*). Le résultat est alors relatif. Cette méthode de détermination relative a été employée pour le traitement des mesures G. P. S. sur le site d'Allèves, cf. chapitre III.

Un récepteur dont l'antenne est positionnée sur un repère capte les signaux émis par une constellation de satellites sur deux fréquences précises L1 et L2. Une acquisition est faite périodiquement (30 s généralement) pendant plusieurs heures. Le fichier ainsi obtenu est traité à l'aide de logiciels spécifiques pour obtenir la position du point à quelques millimètres près (cf 2.1.2.11). Les vitesses de déplacement détectables sont inférieures au cm/an en technique relative. L'ensemble de la méthode est présenté en détail au paragraphe 1.2. du chapitre II.

1.5. - Inclinométrie de surface

Les inclinomètres en silice sont les appareils les plus précis existants. Ils permettent de mesurer la rotation d'un pendule solidaire de la roche (précision de 10^{-7} à 10^{-10} rad), donnant l'inclinaison dans un plan. Ils peuvent être installés sur des surfaces verticales ou horizontales, et sont groupés par 2 ou 3 pour obtenir le déplacement dans un plan ou dans les trois dimensions de l'espace. Leur matériau de constitution (silice) et leur mode de fixation (directement dans la roche) en font des appareils peu sensibles aux variations thermiques (Lesage, 1981). Leurs mesures ayant été exploitées sur le site de Passy, ces appareils seront présentés en détail en 2.2.

1.6. - Continuité temporelle des mesures

1.6.1. - Adaptation des méthodes existantes

Les méthodes mentionnées sont généralement discontinues dans le temps. Les déplacements déterminés par comparaison de positions à deux époques données fournissent des valeurs moyennes sur l'intervalle de temps considéré. Or, l'évolution d'une masse instable connaît des variations qui peuvent être brutales et généralement discontinues. Le coût de l'augmentation de la fréquence des mesures dépend de la technique utilisée. En ce qui concerne la topométrie par exemple, il est intéressant de signaler l'apparition récente de théodolites programmables motorisés. Ces appareils peuvent être laissés à demeure sur le site et fonctionnent automatiquement. Le surcoût doit prendre en compte l'appareil lui-même, mais également les travaux nécessaires à sa protection (réalisation d'un abris avec une surface vitrée, protection contre les chutes de pierres...). Les données sont transmises périodiquement à un centre de contrôle (la transmission des données pour qu'elle soit fiable nécessite de gros investissements).

1.6.2. - Méthodes intrinsèquement continues

Des techniques mécaniques de mesures en continu existent cependant. Par exemple, un fil insensible aux variations de température (en invar ou kevlar) peut être tendu entre un point supposé fixe et un point situé sur la zone perturbée. Les déplacements relatifs sont mesurés grâce à la rotation d'une poulie de renvoi. Les deux extrémités du fil peuvent également être implantées sur les deux lèvres d'une fracture afin de suivre son ouverture en continu. Un enregistreur mécanique ou électronique stocke le signal. Cette technique est utilisable entre deux points espacés d'au plus 200 m environ, et possède de nombreux inconvénients dus à la dégradation du fil par des agents extérieurs (chutes de pierres, de bois...). Elle est donc souvent utilisée en complément de l'une des techniques mentionnées précédemment.

2. - Déplacements en profondeur

L'identification d'une (ou plusieurs) surface de glissement éventuelle, ainsi que la connaissance des déplacements relatifs à l'intérieur de la masse instable nécessitent de recueillir des informations sur les déplacements en profondeur.

2.1. - Tubes inclinométriques

Le principe consiste à introduire dans un forage un tube métallique parcouru régulièrement par une sonde inclinométrique (Fig. 3). Cette sonde mesure les inclinaisons du tube selon deux dimensions. Si l'on désire obtenir des variations absolues d'inclinaison, il est nécessaire de fixer l'extrémité inférieure du tube dans la roche en place, ce qui suppose de traverser entièrement la masse instable¹. Les forages peuvent donc être relativement profonds, et la technique est utilisable jusqu'à une profondeur de 200 m environ. La mesure est effectuée en descendant la sonde dans le tube. On enregistre ainsi l'inclinaison du tube par tronçons successifs. La comparaison du profil du tube avec une mesure ultérieure permet de quantifier la variation de son inclinaison en fonction de la profondeur. Des zones de cisaillement peuvent alors être mises en évidence. La projection des inclinaisons dans un plan permet de déterminer des déplacements, dont la précision est de l'ordre de 0.15 à 0.25 mm par mètre de tube (Bonnard, 1990). La simplicité et la fiabilité de cette méthode en font une technique très utilisée (Maugeri *et al.*, 1981 ; Blake & Clarke, 1992). Des exemples d'applications peuvent être trouvés par exemple dans Vibert (1987) ; Antoine *et al.* (1992) ; Cancelli *et al.* (1992) ; Angeli *et al.* (1992).

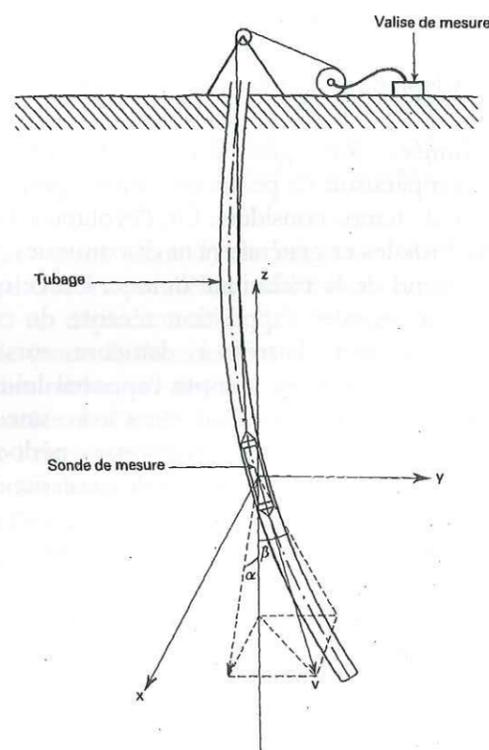


Fig. 3 - Tube inclinométrique. Schéma de principe de l'appareillage (Rochet in Panet & Fourmaintraux, 1976).

2.2. - Extensométrie de forage

Cette méthode permet de mesurer le déplacement dans la direction de l'axe du tube. Il existe deux techniques de mesures.

¹ Des informations indépendantes sont nécessaires pour être sûr que le forage atteint le soubassement en place.

- L'extensomètre à sonde repose sur le principe du tube inclinométrique (les mesures peuvent être couplées). Une sonde extensométrique est introduite dans un tube, et permet de mesurer les variations de longueurs de celui-ci.

- L'extensomètre fixe relie un ou plusieurs points situés à différentes profondeurs, à l'extrémité du forage, et permet de déterminer les variations de longueur entre ces points (Fig. 4; Angeli *et al.*, 1992).

La longueur maximale des extensomètres est de plusieurs centaines de mètres (extensomètres à câbles). La précision d'une mesure peut atteindre 0.01 mm (Bonnard, 1990).

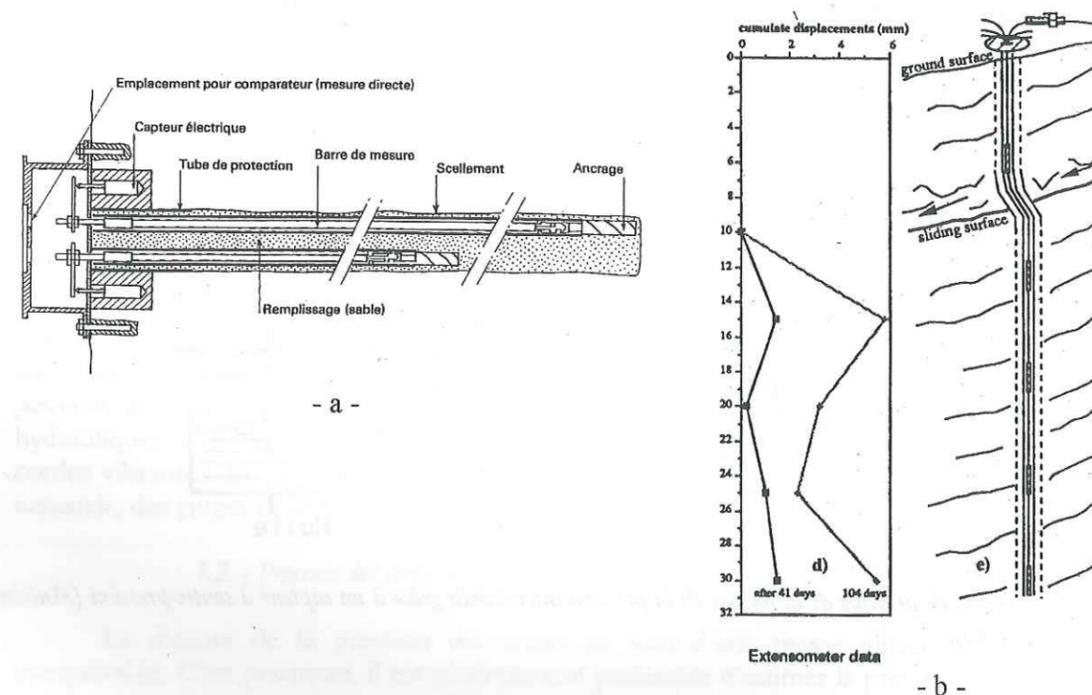


Fig. 4 - Schémas de principe d'un extensomètre à points multiples. (a) : extensomètre à barre à plusieurs points de mesure installé dans un forage horizontal (Rochet in Panet & Fourmaintraux, 1976) ; (b) : appareil installé dans un forage vertical sur une zone instable (Cancelli *et al.*, 1992).

2. - Méthodes d'évaluation des paramètres hydrologiques

L'eau constitue l'un des facteurs fondamentaux de déstabilisation des masses rocheuses (chapitre I). La mesure des niveaux, pressions, et débits d'eau est donc fondamentale pour l'étude des masses instables.

2.1. - Piézomètres en forage

Le niveau d'eau dans un terrain peut être déterminé par une sonde piézométrique introduite au fond d'un tube installé dans un forage. Le haut du forage est rendu étanche pour éviter l'intrusion de toute précipitation. L'inconvénient majeur d'un tel dispositif est la mise en contact de toutes les couches de terrain, qui peuvent présenter des perméabilités très différentes. La couche la plus perméable déterminera le niveau observé, qui n'est alors pas représentatif de l'ensemble des terrains. Différentes améliorations à cette technique ont été développées pour

pallier cet inconvénient, et réduire le poids relatif des couches les plus perméables. Les systèmes de lecture du niveau d'eau les plus courants sont la sonde électrique, le capteur de pression, le flotteur (permettant un enregistrement automatique), le capteur acoustique (émission d'un son dans le tube). Tous ces systèmes donnent une précision au moins égale au cm sur le niveau d'eau (Bonnard, 1990), ce qui est largement suffisant dans le cas d'un glissement de terrain.

2.2. - Mesure de la pression intersticielle

Dans des terrains peu perméables une augmentation de la pression d'eau n'entraînera pas une augmentation immédiate du niveau lu dans les piézomètres en forage. Cette augmentation de pression peut cependant avoir une importance considérable sur la stabilité du glissement. Il est donc nécessaire de mesurer la pression intersticielle au sein des terrains. Les dispositifs existants se répartissent en deux catégories selon le principe utilisé (Bonnard, 1990).

- Les piézomètres hydrauliques fermés et les piézomètres pneumatiques utilisent la mise en contact direct au point considéré de l'eau souterraine avec un circuit indépendant en pression. La création d'un équilibre des pressions permet la mesure (Fig. 5).

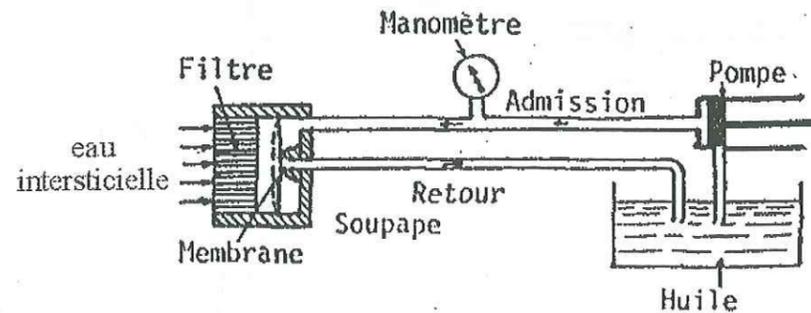


Fig. 5 - Schéma de principe de la mesure de la pression intersticielle grâce à un capteur à contre-pression (Antoine & Fabre, 1980).

- Les piézomètres à corde vibrante et les piézomètres électriques sont munis d'un diaphragme qui se déforme sous l'effet de la pression. La déformation du diaphragme est mesurée dans le premier cas par les variations de tension d'une corde vibrante, et dans le second par une jauge de déformation à résistance électrique.

La fiabilité de ces appareils est très variable. Les plus fiables sont aussi les plus simples, ce sont les instruments mécaniques. Puis dans l'ordre de fiabilité décroissante viennent les piézomètres hydrauliques, pneumatiques, et enfin électriques. Ces derniers sont également les plus délicats à calibrer.

Les piézomètres à points multiples permettent de mesurer la pression intersticielle à plusieurs profondeurs dans un même forage. Certains systèmes fonctionnent en isolant un niveau grâce à deux obturateurs, et peuvent être combinés avec une mesure inclinométrique. Ces instruments se révèlent très utiles dans certaines formations stratifiées hétérogènes, où la pression d'eau ne varie pas linéairement avec la profondeur et où l'indication d'un piézomètre simple n'est pas suffisante. Leur application est donc intéressante dans le cas de grands glissements de terrain (Bonnard, 1990).

2.3. - Mesure de débit d'eau

La mesure de débit fournit des indications précieuses pour déterminer les variations temporelles et spatiales des circulations d'eau à l'intérieur de la masse glissée. Par exemple, des corrélations peuvent être mises en évidence ou non avec les précipitations, avec ou sans retard. La fonte du manteau neigeux peut se traduire avec un retard plus ou moins long sur la mesure de débit. Lorsque des drains ont été réalisés, le débit est une indication essentielle pour contrôler leur efficacité. La circulation de cours d'eau à proximité de la zone instable peut également avoir une incidence sur le glissement (cas de la source du Nant des Pénys sur le site de Passy par exemple, voir chapitre IV). L'instrument de mesure le plus répandu est le moulinet, qui permet de déterminer le débit en mesurant la vitesse du fluide. Des micro-moulinets de forage permettent des mesures en profondeur.

La mesure de débits solides dans les ruisseaux est très importante dans le cas de risques de coulées boueuses, mais beaucoup plus délicate à réaliser directement. Elle s'effectue le plus souvent par analyse de la matière en suspension contenue dans des échantillons.

3. - Méthodes de détermination des efforts mécaniques

3.1. - Mesure de force

Le contrôle de l'efficacité de dispositifs de stabilisation comprend l'évaluation des forces s'exerçant sur les ancrages de tels dispositifs. Plus que la force elle-même, l'évolution de celle-ci au cours du temps renseigne sur l'évolution du versant. Les systèmes de mesure développés peuvent être des cellules de charge mécanique utilisant un levier de torsion, des cellules hydrauliques avec capteur de pression (électrique), des cellules à résistances électriques ou à cordes vibrantes. Ils fournissent une mesure de la force totale. Dans le cas où la contrainte est uniaxiale, des jauges de déformation permettent également d'évaluer la force (Bonnard, 1990).

3.2. - Pression des terres et contraintes

La mesure de la pression des terres au sein d'une masse glissée est difficilement interprétable. C'est pourquoi, il est généralement préférable d'estimer la pression des terrains sur un ouvrage tel un mur de soutènement par exemple. Les cellules de pression de terres sont constituées de deux disques plats parallèles dont l'écartement est fonction de la pression. Le choix d'un emplacement adéquat, et le principe même de l'appareil en font une mesure délicate à réaliser (Bonnard, 1990).

Dans le cas de blocs rocheux instables, les contraintes peuvent être mesurées grâce à des vérins plats utilisés comme jauges de contraintes. La roche doit être percée pour permettre leur pose à l'intérieur du bloc. L'évolution de la contrainte dans le temps fournit une indication sur l'évolution de l'instabilité (Bonnard, 1990).

Les méthodes présentées ne constituent pas une liste exhaustive. De nombreux autres paramètres peuvent fournir des informations complémentaires utiles. En particulier, des méthodes géophysiques telles que l'écoute du bruit d'un massif rocheux (fractures, chutes de blocs), la mesure des vibrations, les accélérations sismiques, peuvent guider la compréhension des phénomènes et le déclenchement d'une alerte éventuelle. En ce qui concerne les eaux, outre les traçages, des mesures de température, de résistivité, aident à comprendre leurs circulations. Enfin, des corrélations peuvent être établies avec des paramètres tels que les précipitations pluvieuses, l'évaporation, la température de l'air...

ANNEXE 2 : COMPLEMENTS SUR LE G. P. S.

FONCTIONNEMENT DU SYSTEME NAVSTAR GPS

Le système comprend trois «secteurs» : le secteur de contrôle est chargé de la surveillance et du pilotage du système ; le secteur spatial est constitué par les satellites ; le secteur utilisateur comprend les applications du dispositif.

Le contrôle du système

Il est assuré par 5 stations au sol (Colorado Springs, Hawaï, Ascencion, Diego Garcia, Kwajalein), Fig. 1. Ces stations enregistrent en continu les signaux des satellites, effectuent des mesures météorologiques, et envoient les données à la station principale de Colorado Springs. Celle-ci contrôle le bon fonctionnement des satellites, calcule leurs éphémérides, les paramètres d'horloge, prédit leur évolution, fabrique les messages à destination des satellites. Ces informations sont envoyées aux satellites via les stations de transmission (Ascencion, Diego Garcia, Kwajalein).

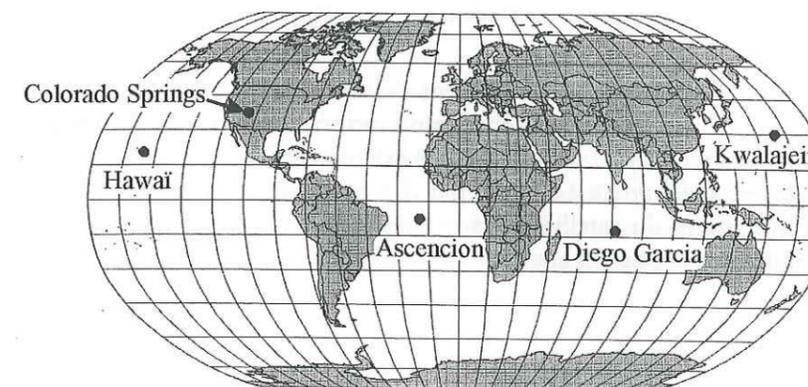


Fig. 1 – Les stations de contrôle du dispositif G. P. S.

Les satellites

La constellation comprend 24 satellites répartis de telle sorte que 4 à 8 d'entre eux soient visibles simultanément de n'importe quel point de la surface terrestre au-dessus de 15° d'élévation. Ils sont répartis dans 6 plans orbitaux inclinés de 55° par rapport à l'équateur terrestre (Fig. 2). Leur orbite est pratiquement circulaire et ils sont situés à une altitude d'environ 20200 km. Leur période de rotation est d'environ 12h.

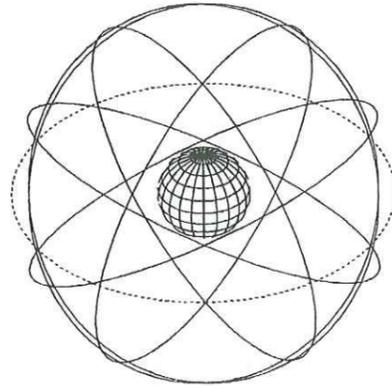


Fig. 2 - Orbites des satellites de la constellation G. P. S. (Rothacher & Mervart, 1996).

Plusieurs types de satellites ont été lancés depuis une vingtaine d'années :

- les satellites du Block I (11 satellites lancés entre 1978 et 1985) ont servi à la mise au point du dispositif. Ils ne sont plus en service ;
- les satellites du Block II constituent l'essentiel de la constellation actuelle (lancés à partir de 1989). Chacun d'entre eux comprend un émetteur-récepteur radio, des horloges atomiques très précises (césium et rubidium), des calculateurs, et divers équipements destinés aux applications militaires. L'énergie est fournie par des panneaux solaires, et des moteurs d'appoint permettent le réajustement du satellite sur son orbite et le contrôle de sa stabilité (Fig. 3). Leur durée d'activité nominale est de 7.5 ans ;

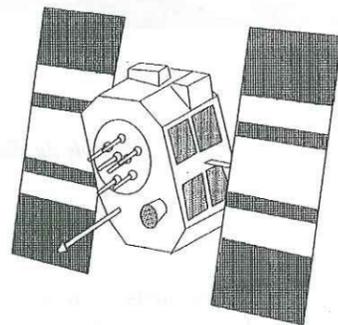


Fig. 3 - Satellite du Block II (Rothacher & Mervart, 1996).

- les satellites du Block IIR (Replace) sont destinés au remplacement de ceux du Block II. Leur durée d'activité nominale est de 10 ans. Ils embarquent des horloges encore plus précises que celles de la génération précédente (masers à hydrogène). Ils sont équipés d'un

système de communication inter-satellite, ce qui permet d'intervenir sur un satellite via un autre satellite.

DONNEES COMPLEMENTAIRES SUR LES STRATEGIES DE DEPLOIEMENT DU G. P. S. SUR LE TERRAIN

Les méthodes de déploiement sur le terrain dépendent de l'objectif recherché.

1. - Positionnement en temps réel : navigation

Le but premier du G. P. S. est la détermination en temps réel de la position d'objets fixes ou mobiles. La technique la plus simple est d'utiliser le positionnement absolu grâce aux mesures de codes. Il est possible d'affiner la précision en utilisant un récepteur fixe, et d'autres à bord de véhicules (navigation différentielle). Si les stations possèdent des équipements de transmission de données, le résultat est accessible quasiment en temps réel (la précision est de l'ordre de 5 m pour une distance de 500 km).

2. - Positionnement statique

Deux variantes existent à la stratégie que nous avons utilisée sur le site d'Allèves (statique, chapitre II, 2.1.3).

A. - Statique rapide

Un récepteur réalise des observations depuis une station fixe pendant que d'autres se déplacent de station en station, en effectuant des mesures de quelques minutes sur chacune d'elle. Il est souhaitable de pouvoir observer au moins 5 satellites. Cette méthode fonctionne essentiellement sur des bases courtes (inférieures à 15 km). La précision est comprise entre quelques millimètres et quelques centimètres. Cette technique rapide est très adaptée aux petits réseaux (topométrie, cadastre).

B. - Réoccupation

Cette méthode ressemble à la précédente, mais les observateurs mobiles vont revenir occuper les stations qu'ils ont déjà mesurées une première fois. La redondance des observations permet de réduire à 3 le nombre de satellites nécessaires. La précision est de quelques millimètres à quelques centimètres.

3. - Méthode cinématique

Deux stations effectuent des mesures de phase sur 4 satellites au moins simultanément. Une initialisation est faite en résolvant les ambiguïtés, puis l'une des stations se déplace en stationnant quelques secondes sur certains points. Tant que le signal n'est pas interrompu les ambiguïtés sont les mêmes et le positionnement précis est connu. Dans le mode cinématique continu le positionnement des points est calculé à des intervalles de temps définis à l'avance. Dans le mode Stop and Go, les mesures sont effectuées à certains points et la continuité du signal est conservée entre les points. Cette technique est très efficace pour effectuer des levés topométriques et déterminer la trajectoire de véhicules. Son inconvénient majeur est que le signal ne doit pas être interrompu (éviter les obstacles).

4. - Trajectographie

Un récepteur est fixe, un autre parcourt une trajectoire en stationnant quelques secondes sur chaque point. Les mesures ont été effectuées sur la pseudodistance et sur la phase, ce qui permet d'éviter une initialisation. La précision est de quelques dizaines de cm sur un parcours de 500 km. Cette technique est utilisée en photogrammétrie aérienne pour connaître précisément le positionnement du centre des clichés, avec un récepteur au sol, et un autre embarqué.

CALCUL DE LA POSITION DU POINT PIVOT (SJ05) GRACE AUX DONNEES DES STATIONS MEMBRES DE L'I. G. S.

Les options de calcul du logiciel BERNESE sont indiquées par les chiffres en italique (ex : 4.1)

- *Code Check* : vérification des mesures de code, 4.1, effectué sur toutes les stations ;
- *Codespp* : calcul de position grâce aux mesures de code, 4.2. Seules les coordonnées du point SJ05 sont sauvées. Calcul effectué en 2 itérations ;
- *Sngdif* : formation des simples différences sur la phase, 4.3 ;
- *Mauprp* : nettoyage de la phase, 4.2.
- Frequency to check : COMBINED
- Mark unpaired : YES
- Triple difference solution : L3
- Seuil Iono : 400%
- *Gpsest* : estimation de la position du point SJ05, 4.5.
- Pre-run : L3 Free
 - Frequency : L3
 - Strategy : NO
 - Stations I. G. S. fixées
 - Coordonnées sauvées
 - Correlations : CORRECT
 - Estimation de paramètres troposphériques locaux (4 paramètres par session)
 - Etude des résidus : répétition du Pré-run et du nettoyage de la phase tant que les résidus sont supérieurs à 3 cm
- Calcul en QIF : résolution des ambiguïtés
 - Frequency : L1 & L2
 - Introduction d'un modèle ionosphérique global
 - Strategy : QIF

- Stations I. G. S. fixées
- Ambiguïtés sauvées
- Correlations : CORRECT
- Estimation de paramètres troposphériques locaux (4 paramètres par session)
- Calcul en L3 Free :
 - Frequency : L3
 - Strategy : NO
 - Stations I. G. S. fixées
 - Introduction des ambiguïtés : INTRODUCE L1 & L2, INTRODUCE WIDE-LANE
 - Ambiguïtés sauvées
 - Coordonnées sauvées
 - Correlations : CORRECT
 - Estimation de paramètres troposphériques locaux (4 paramètres par session)
 - Etude des résidus : répétition du calcul en L3 Free et du nettoyage de la phase tant que les résidus sont supérieurs à 3 cm
- Coordonnées finales :
 - Frequency : L3
 - Stations fixées : aucune. Stations I. G. S. pondérées à 0.0001 m ; station SJ05 pondérée à 1 m
 - Strategy : ELIMIN
 - Introduce L1 & L2 : YES
 - Correlations : CORRECT
 - Estimation de paramètres troposphériques locaux (4 paramètres par session)
 - Coordonnées finales sauvées
 - Equations normales sauvées

CALCUL DE LA POSITION DES REPERES DU RESEAU LOCAL

- *Code Check* : vérification des mesures de code, 4.1, effectué sur toutes les stations ;
- *Codespp* : calcul de position grâce aux mesures de code, 4.2. Seules les coordonnées des points du réseau local sont sauvées. Calcul effectué en 2 itérations ;
- *Sngdif* : formation des simples différences sur la phase, 4.3 ;
- *Mauprp* : nettoyage de la phase, 4.2.
- Frequency to check : L1
- Mark unpaired : NO

- Triple difference solution : L1
- Seuil Iono : 100%
- Modèle ionosphérique *local*, calculé à partir de la phase du point pivot, 4.7
- *Gpsest* : estimation de la position des points du réseau local grâce au point pivot SJ05, 4.5 :
- Pré-run :
 - Frequency : L1
 - Strategy : NO
 - Coordonnées du point pivot fixées
 - Introduction du modèle ionosphérique local
 - Correlations : BASELINE
 - Estimation de paramètres troposphériques (4 paramètres par session)
 - Coordonnées sauvées
 - Etude des résidus : répétition du calcul du Pré-run et du nettoyage de la phase tant que les résidus sont supérieurs à 3 cm
- Résolution des ambiguïtés :
 - Frequency : L1
 - Strategy : SIGMA
 - Coordonnées du point pivot fixées
 - Introduction du modèle ionosphérique local
 - Correlations : BASELINE
 - Estimation de paramètres troposphériques (4 paramètres par session)
 - Coordonnées sauvées
 - Ambiguïtés sauvées
- Coordonnées finales :
 - Frequency : L1
 - Introduction du modèle ionosphérique local
 - Stations fixées : aucune. Point pivot pondéré à 0.0001 m ; stations du réseau local pondérées à 1 m
 - Strategy : ELIMIN
 - Introduit L1 & L2 : YES
 - Estimation de paramètres troposphériques locaux (4 paramètres par session)
 - Correlations : CORRECT
 - Coordonnées finales sauvées
 - Equations normales sauvées

ANNEXE 3 : COMPLEMENTS SUR LA GEOLOGIE DU MASSIF DES BAUGES

GRANDS TRAITÉS STRATIGRAPHIQUES DU MASSIF

Classiquement, trois cycles sédimentaires sont distingués dans les Bauges (Fig. 1), du Trias à l'Oligocène. Nous rappelons ici les principales formations, et nous indiquons leur épaisseur pour la partie occidentale du massif, lorsque celles-ci ont été déterminées (Gidon *et al.*, 1970).

Du Trias à l'Aptien inférieur : la « fosse » dauphinoise :

- Le Trias, de type *germanique réduit* (~10 m), est composé de microconglomérats et grès blancs à quartz roses, de dolomies rouges et de cargneules, de gypse et de schistes verts ou jaunes qui n'affleurent qu'au contact du socle cristallin, et en discordance sur ce dernier et sur le houiller.
- Le Jurassique forme un puissant ensemble vaseux à Céphalopodes :
 - du Lias à l'Oxfordien (n'affleurant que dans la vallée de l'Isère, Fig. 2), les principales formations sont formées de marnes ou de calcaires argileux noirs schisteux (215 à 270 m) ;
 - après l'Oxfordien, la sédimentation reste fine mais en devenant de plus en plus calcaire. La fin du Jurassique est marquée par des calcaires sublithographiques clairs en gros bancs (Kimméridgien supérieur et Portlandien : faciès Tithonique, Fig. 1 et Fig. 2). L'épaisseur varie de 185 à 300 m.
- La partie *occidentale* des Bauges (chaînes du Nivolet - Revard - Bange - Semnoz, dénommés Nt, Rd, Bange, Semnoz sur la Fig. 2) est soumise aux **influences jurassiennes**, le Crétacé inférieur (*Aptien inférieur compris*) présente une alternance de marnes et calcaires argileux et de calcaires zoogènes et biodétritiques plus littoraux (Fig. 1, certains auteurs parlant alors d'unités pré-subalpines, tels Steinhauser (1969) ; Guellec *et al.* (1990)). Dans le détail :
 - le Berriasien inférieur est marneux, les affleurements sont rares ;
 - le Berriasien supérieur - Valanginien (80 à 100 m) est composé de calcaires biodétritiques le plus souvent clairs, grossiers, spathiques, localement récifaux à Polypiers et Rudistes. Le sommet est chargé de Silex. Au centre et à l'E du massif, une sédimentation de mer plus profonde remplace cette corniche calcaire par un puissant talus marneux ;
 - l'Hauterivien est formé de marnes à Toxaster et Exogyra Couloni (40 à 60 m) ;
 - le Barrémien - Aptien inférieur est une puissante formation urgonienne à Rudistes et Polypiers (200 m).

De l'Aptien supérieur à la fin du Crétacé, une sédimentation épicontinentale :

- Après une lacune de sédimentation couvrant une bonne partie de l'Aptien supérieur, à l'Aptien supérieur - Albien se déposent des grès et sables glauconieux verts ou noirs, de faible épaisseur (Fig. 1) ;

- le Crétacé supérieur est composé de calcaires lithographiques plus ou moins schisteux, blancs, à pâte fine, témoins d'une mer plus profonde, calme, sans apports terrigènes (Fig. 1).

Le Nummulitique :

- l'Eocène inférieur renferme des poches de sables et argiles ferrugineux rouges ou ocres continentaux, témoignant de l'émersion de la zone ;

- De l'Eocène moyen à l'Oligocène, les transgressions marines forment des alternances de conglomérats et calcaires :

- au Lutétien (transgressif), des conglomérats et calcaires à grandes Nummulites se déposent. Des épisodes fluviolacustres ou saumâtres sont fréquents entre le Lutétien et le Priabonien ;

- du Priabonien au Stampien (transgressif) se dépose la « trilogie priabonienne », avec de la base au sommet : des calcaires à petites Nummulites et Pectens (faciès littoral), des marnes à écailles de poissons (Meletta), de faciès plus profond, enfin des grès (faciès de comblement). Le Stampien marque la fin définitive de la sédimentation marine dans les Bauges (Debelmas, 1963), Fig. 1 et Fig. 2.

Cette série présente de nombreuses alternances de formations compétentes et ductiles. Par exemple, les formations marneuses et calcaires de la fin du Jurassique, celles du Crétacé inférieur, mais également les alternances de calcaires et de grès du Crétacé supérieur ou de l'Oligocène. Ceci produit un empilement de formations aux propriétés mécaniques très différentes. La conséquence est que la série présente une prédisposition à la déstabilisation.

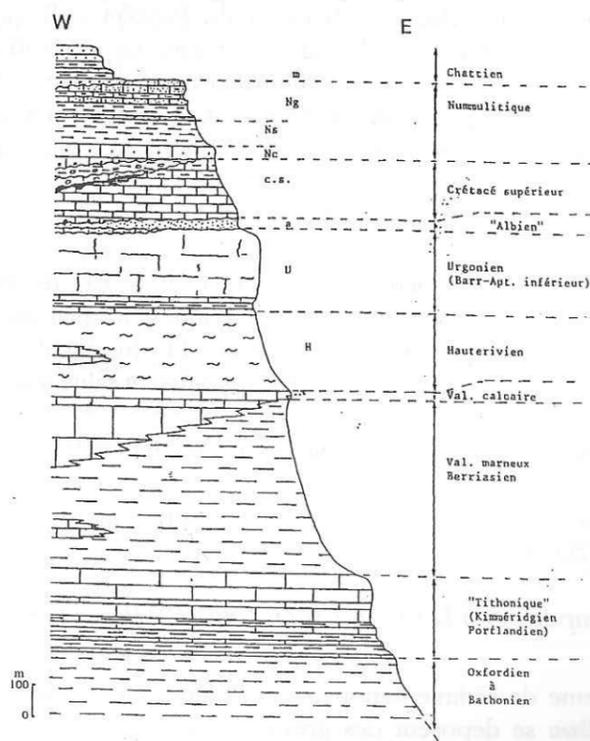


Fig. 1 – Log stratigraphique synthétique du massif des Bauges (Doudoux, communication personnelle).

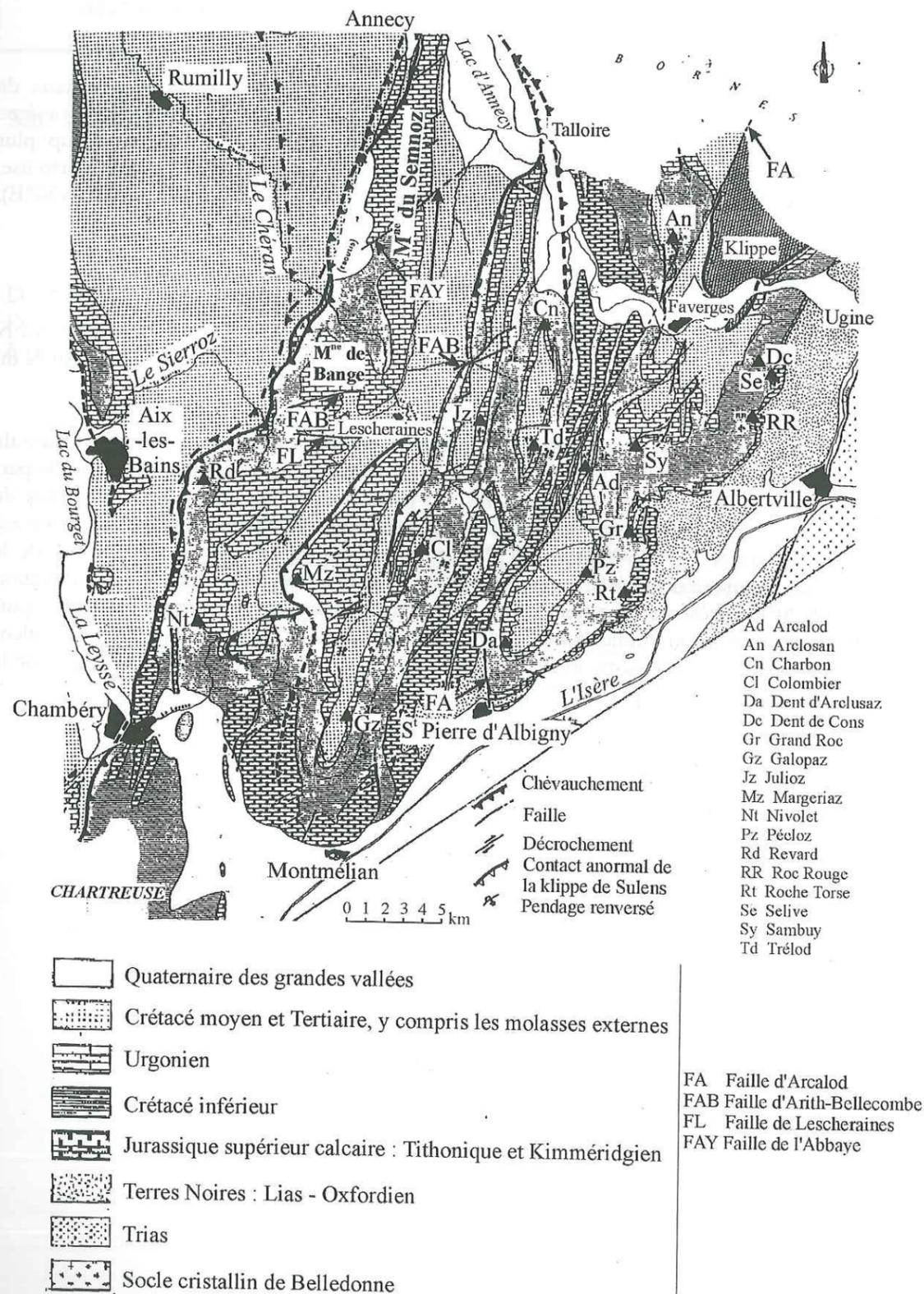


Fig. 2 – Carte géologique simplifiée du massif des Bauges (d'après Doudoux, communication personnelle).

RELATIONS AVEC LES MASSIFS DE CHARTREUSE ET DES BORNES

Similitudes Bauges - Chartreuse

Les plis occidentaux des Bauges (N20°) semblent correspondre aux plis orientaux de Chartreuse (Gidon, 1964). Nous retrouvons en Chartreuse des décrochements dextres de même direction que dans les Bauges (N60°). Les rejets horizontaux sont toutefois beaucoup plus importants en Chartreuse. Des failles extensives N20°E sont également présentes en Chartreuse, mais Gidon (1996) réfute l'hypothèse d'un lien quelconque avec la faille d'Arcalod (N30°E), celle-ci étant beaucoup plus récente (Gidon, 1992).

Lien Bauges - Bornes

Les plis orientés N20° deviennent subméridiens à proximité de la cluse d'Annecy. Au N de la cluse, la direction des plis est la même puis amorce une large virgation vers le NE. Au N du massif des Bornes, les plis sont orientés N60°E.

Les structures sont identiques dans les Bauges et les Bornes internes de part et d'autre de la cluse de Faverges, à l'E de Talloire (Fig. 2). A l'W, les structures ne correspondent pas. De part et d'autre de la cluse d'Annecy, les formations (en particulier le Nummulitique) et les taux de raccourcissement (plus importants dans les Bauges externes que dans les Bornes externes) varient. Rampnoux & Carrillo-Martinez (1978) attribuent ces différences au jeu sénestre de la faille du Vuache, qui aurait déplacé le compartiment N vers l'avant-pays. Cette faille de direction générale N120°E, présente une tectonique polyphasée extensive (extension N20°E), puis décrochante (compression subhorizontale N110°E ; Delaunay & Rampnoux, 1981). La valeur minimale de ce déplacement horizontal est de 10 à 15 km entre le Semnoz et la Montagne de la Mandallaz, (Delaunay & Rampnoux, 1981).

ANNEXE 4 : SITE D'ALLEVES, COMPLEMENTS SUR LES MESURES
TOPOMETRIQUES

AMPLITUDE DES CORRECTIONS ATMOSPHERIQUES

La distance corrigée s'exprime par :

$$D = D_0(1 + \delta \cdot 10^{-6}) \text{ (Documentation technique Leica®)}$$

D : distance corrigée (m)

D₀ : distance mesurée (m)

δ : terme correctif (ppm)

Le terme correctif δ dépend de l'état de l'atmosphère lors de la mesure, c'est-à-dire de la température, de la pression, et de l'humidité relative de l'air. Il s'exprime en ppm, soit par exemple en mm/km.

Les valeurs suivantes ont été obtenues pour les différentes campagnes de mesure :

Campagne de mesure	Station de mesure	Terme correctif δ (ppm)
96/2 (août 96)	SJ24	+30.3
	SJ23	+31.1
	SJ05	+29.0
97/1 (février 97)	SJ24	-2.0
	SJ23	+9.1
	SJ05	+12.4
97/2 (juin 97)	SJ24	+20.6
	SJ23	+28.6
	SJ05	+22.7
98/1 (mars 98)	SJ24	+2.6
	SJ23	+11.2
	SJ05	+14.1

néologisme hardi

SIGNIFICATIVITE DES VARIATIONS DE LA DISTANCE PRISME - STATION DE MESURE

Les tableaux suivants indiquent les déplacements significatifs (68% de confiance) obtenus lors de la mesure des distances horizontale et verticale prisme - station de mesure, et facilitent la lecture des Fig. III.32 et Fig. III.33.

Distance horizontale :

Station SJ24 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P1	NS	S	S
P3	NS	L	S
P5	NS	NS	NS

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

Station SJ23 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P2	S	NS	S
P4	NS	NS	NS
P6	L	NS	L

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

Station SJ05 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P2	S	NS	S
P4	S	S	L
P6	S	NS	S

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

Distance verticale :

Station SJ24 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P1	S	S	NS
P3	S	S	NS
P5	S	S	NS

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

Station SJ23 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P2	NS	NS	NS
P4	NS	NS	NS
P6	NS	NS	NS

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

Station SJ05 :

	96/2 - 97/2	97/2 - 98/1	96/2 - 98/1
P2	NS	NS	NS
P4	NS	NS	NS
P6	S	S	S

NS : variation non significative (les barres d'erreur à 68% de confiance se recourent) ; L : variation limite (les barres d'erreurs sont tangentes ou se recourent faiblement) ; S : variation significative.

ANNEXE 5 : SITE DE PASSY, SIGNAUX INCLINOMETRIQUES

SIGNAUX BRUTS

Présentation des signaux

Les signaux bruts (au sens indiqué en 2.3, chapitre IV) sont récapitulés ci-dessous, avec un découpage temporel en années civiles.

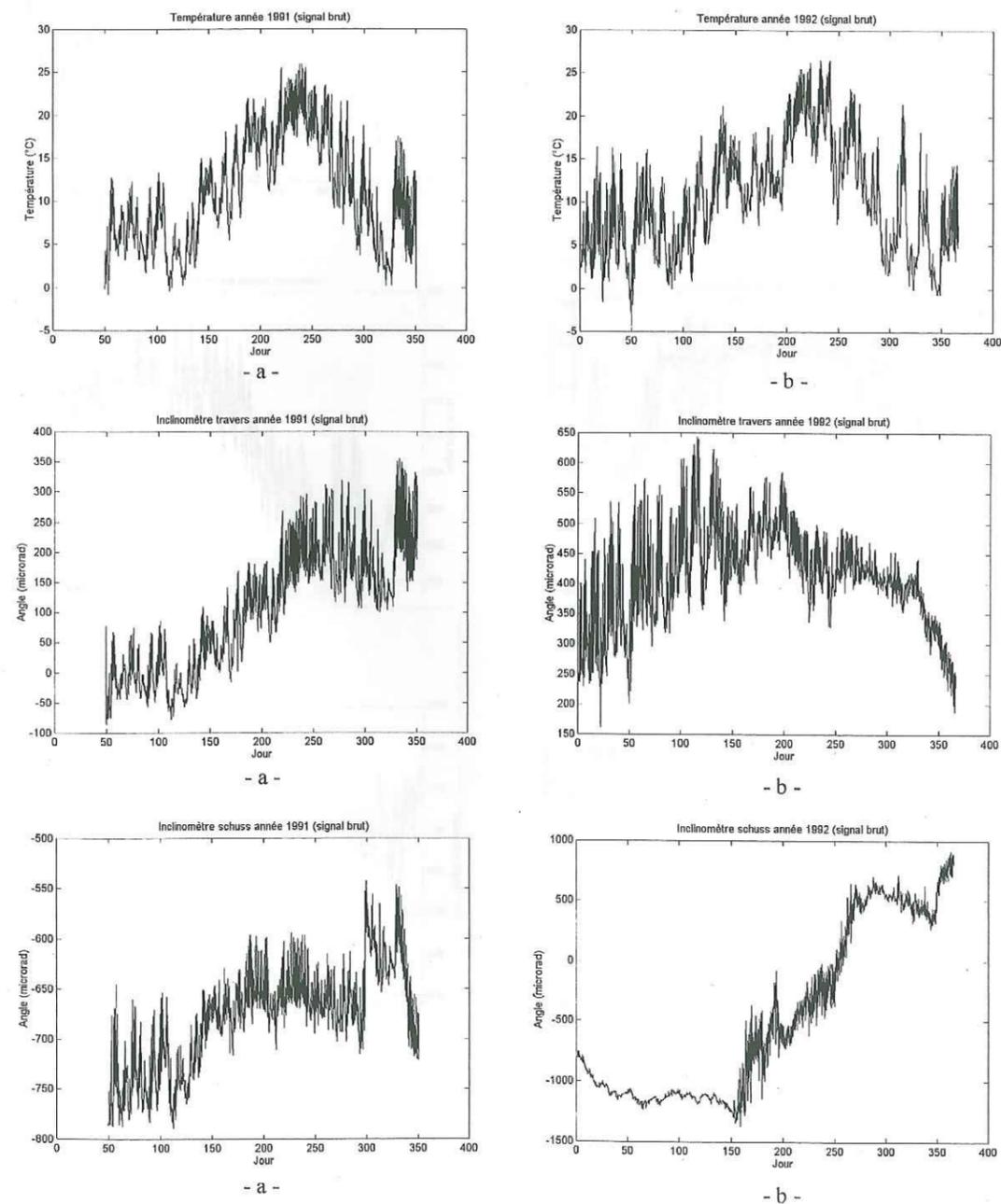
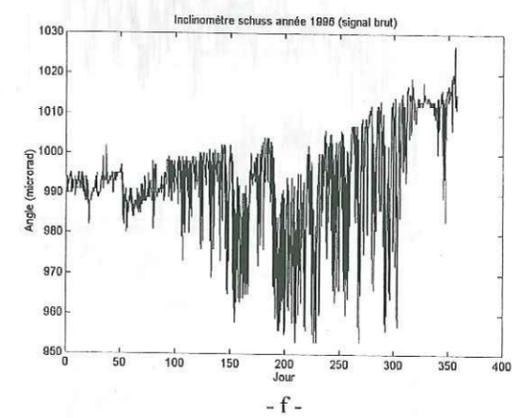
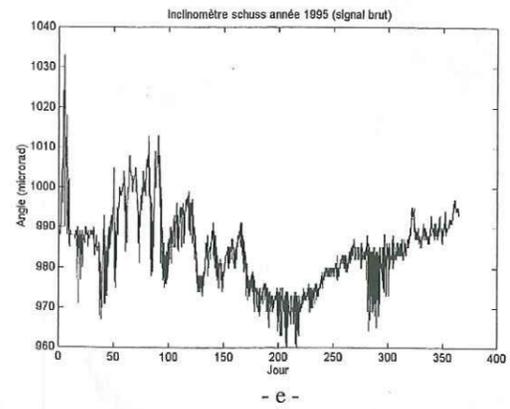
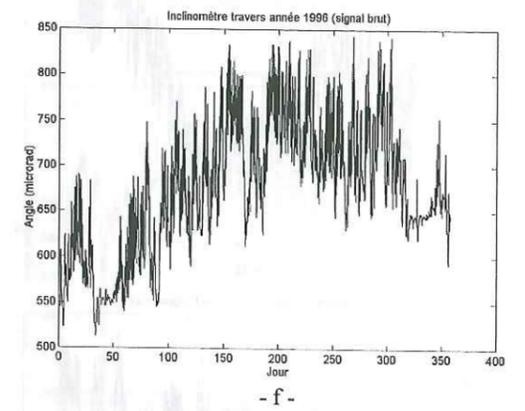
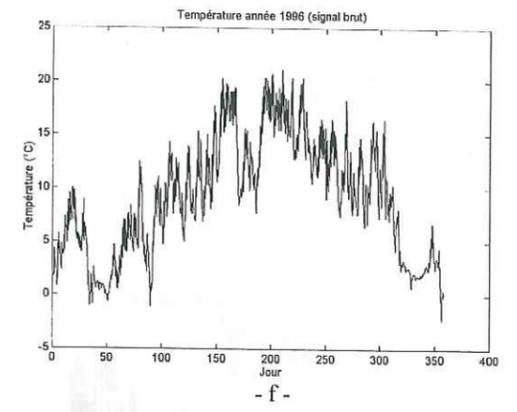
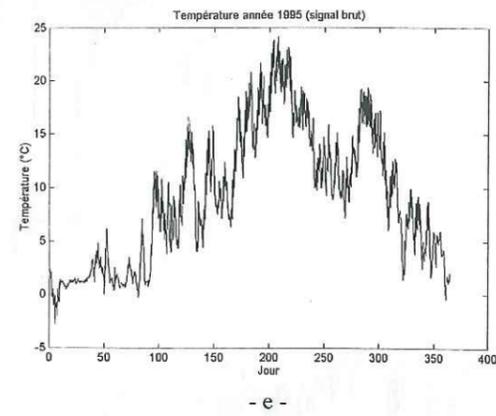
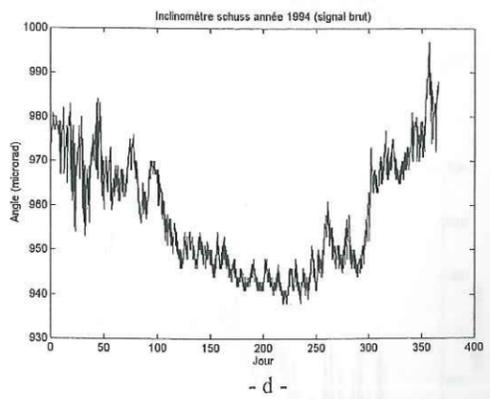
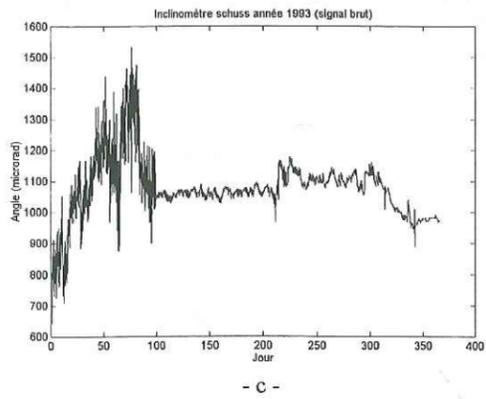
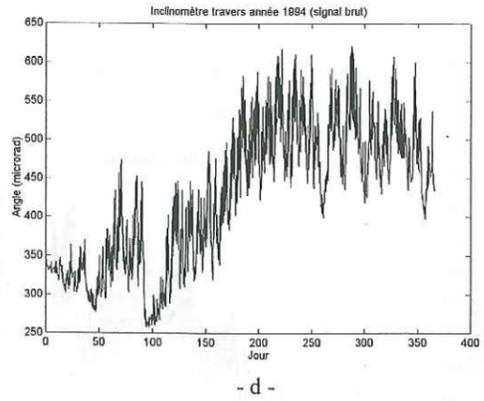
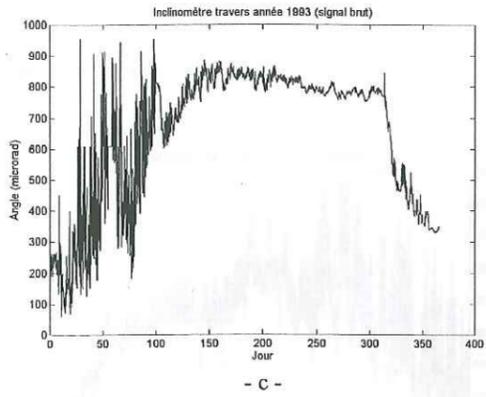
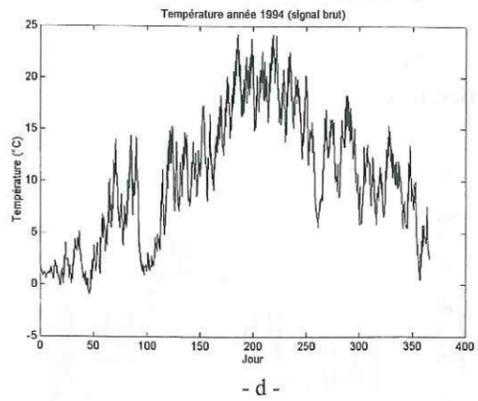
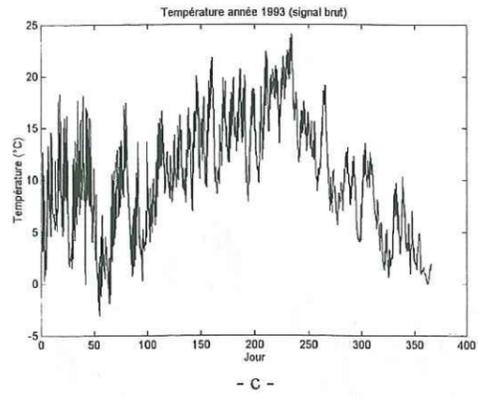


Fig. 1 – Signaux de température et inclinométriques bruts annuels de 1991 à 1996, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 (absence de signal sur travers) ; (f) : 1996.



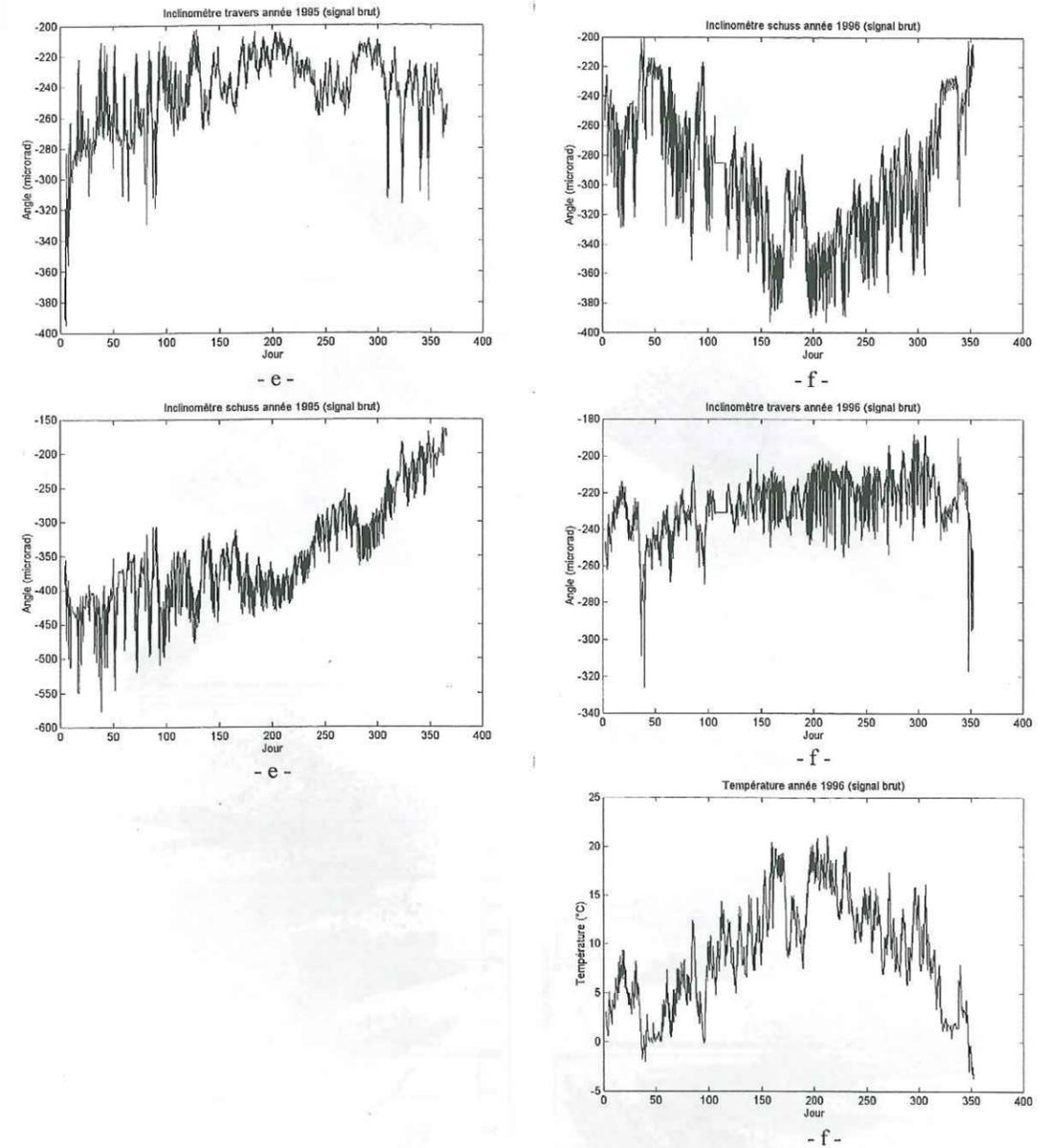
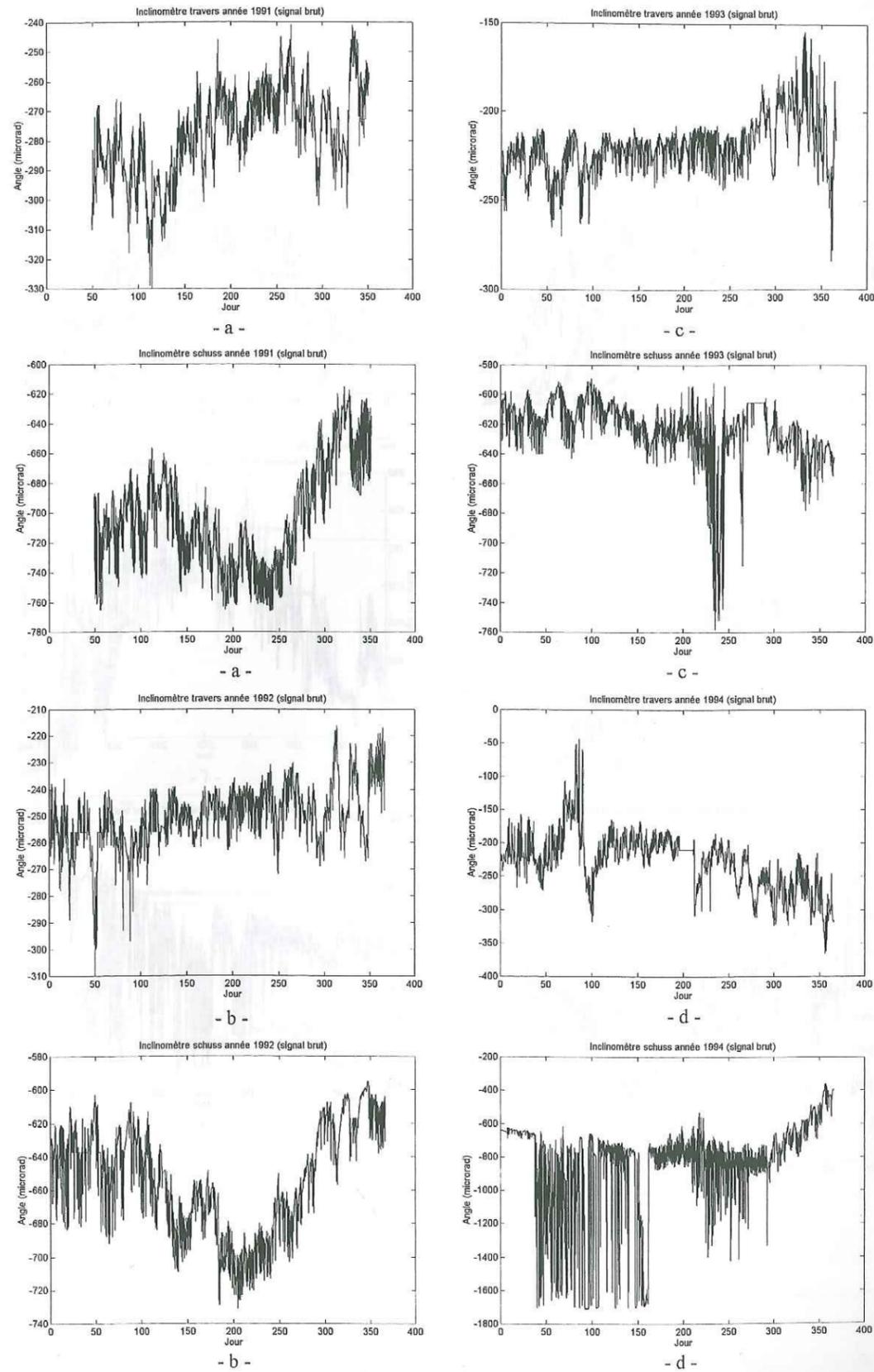


Fig. 2 – Signaux inclinométriques bruts annuels de 1991 à 1996, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996 (signal de température acquis simultanément).

Corrélations avec la température

La Fig. 3 présente les corrélations des signaux bruts avec la température pour la station FALW. La Fig. 4 présente ces corrélations pour la station FALE.

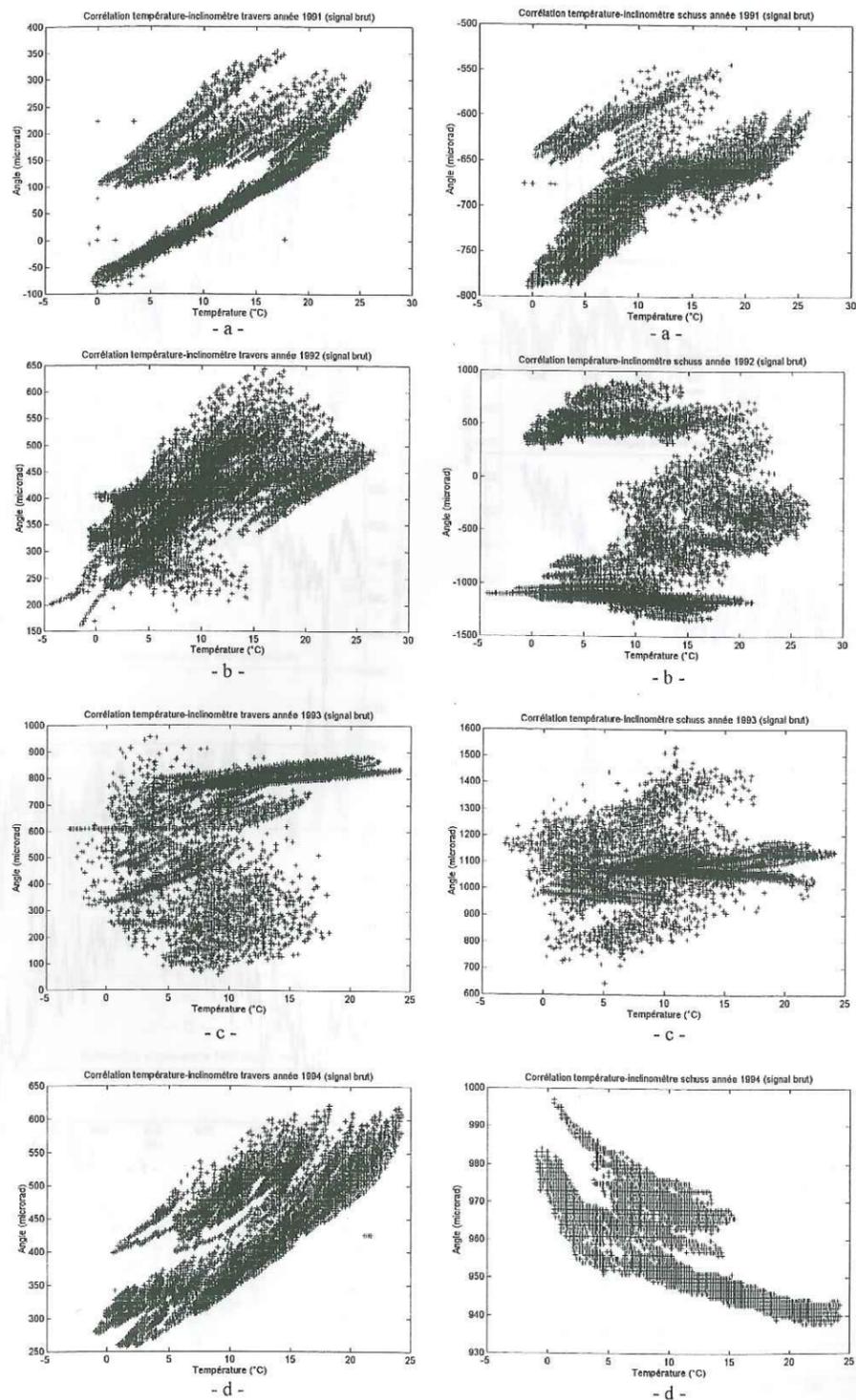
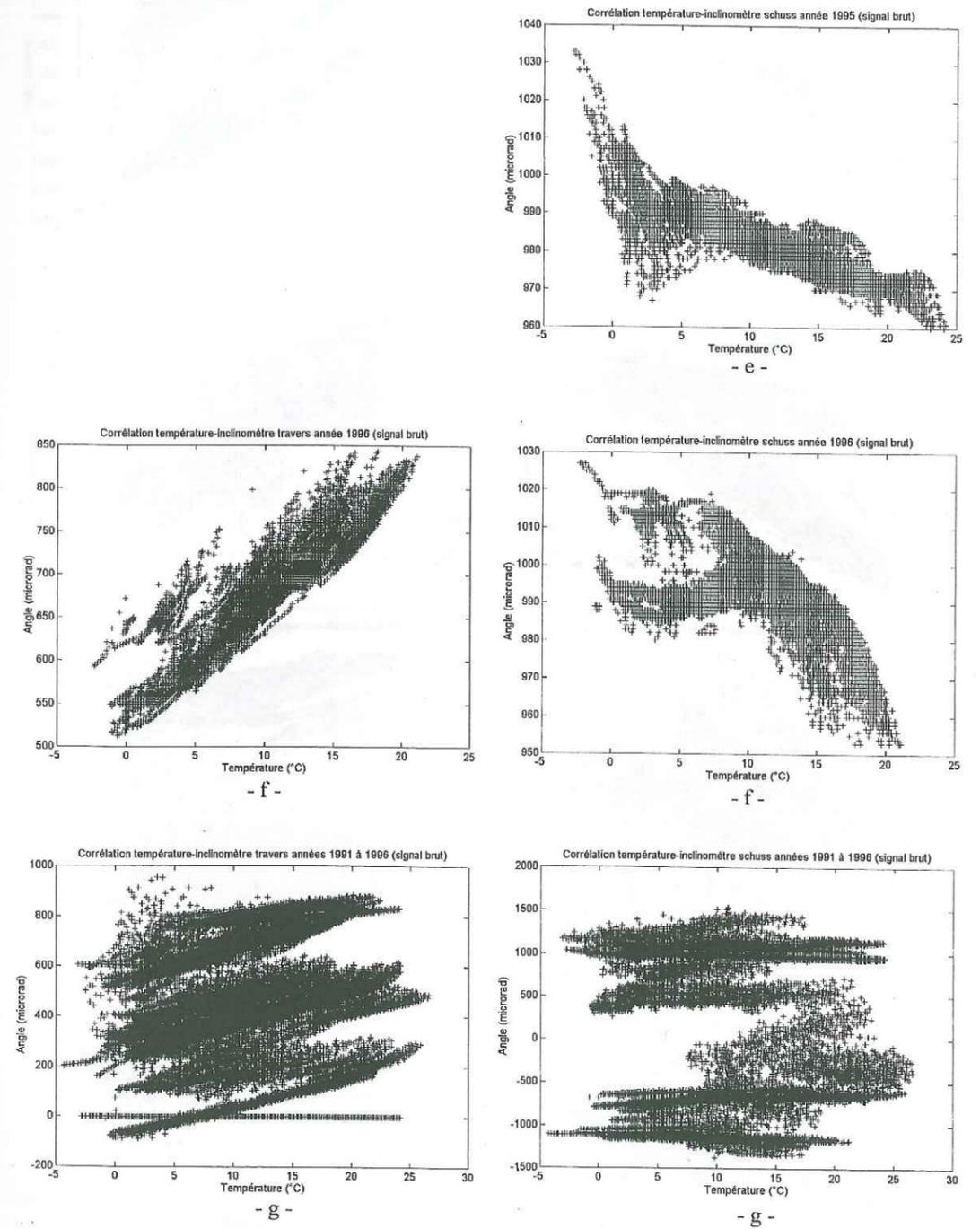


Fig. 3 – Corrélations entre température et signal inclinométrique, station FALW, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996 ; (g) : 1991 à 1996.



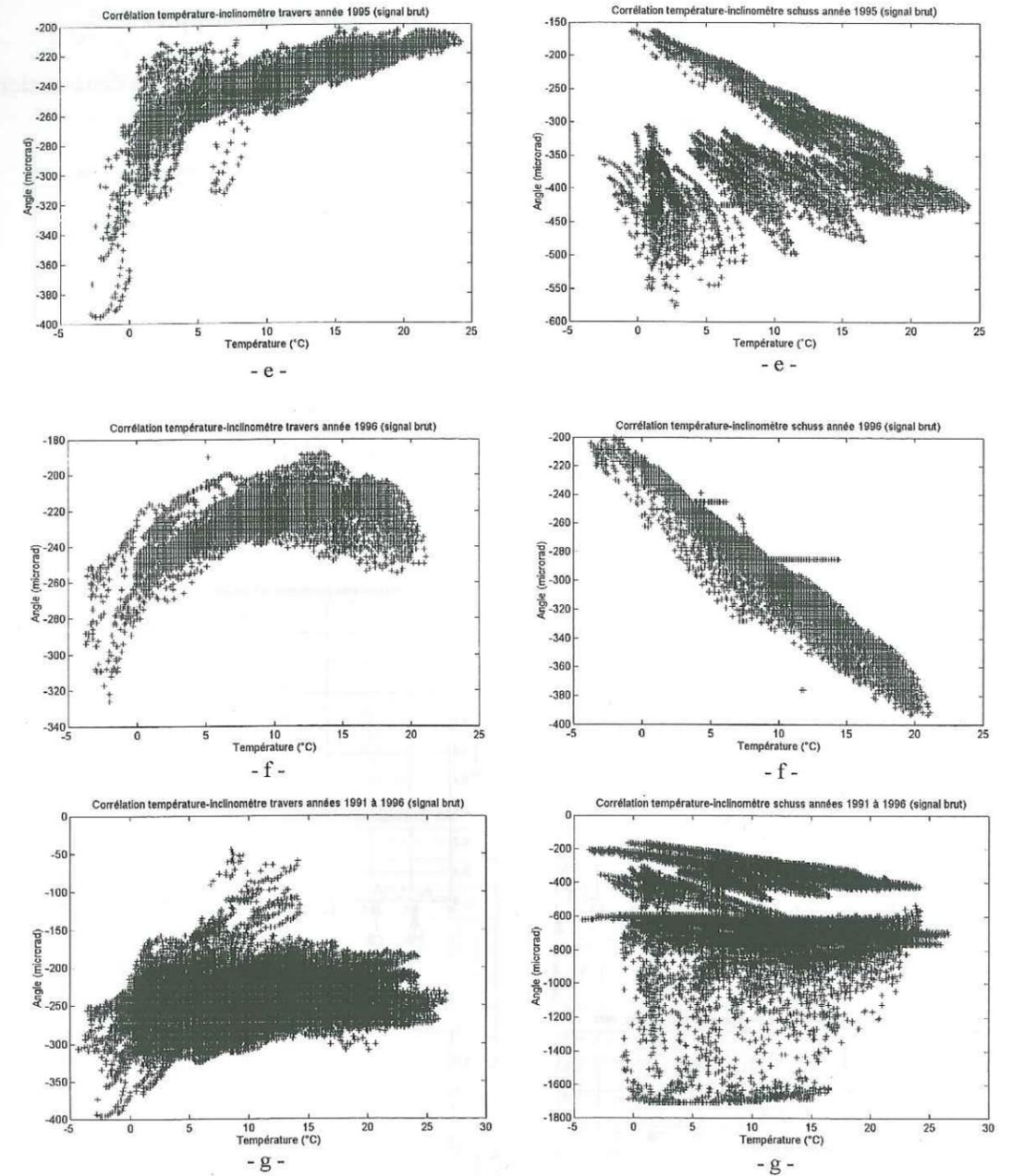
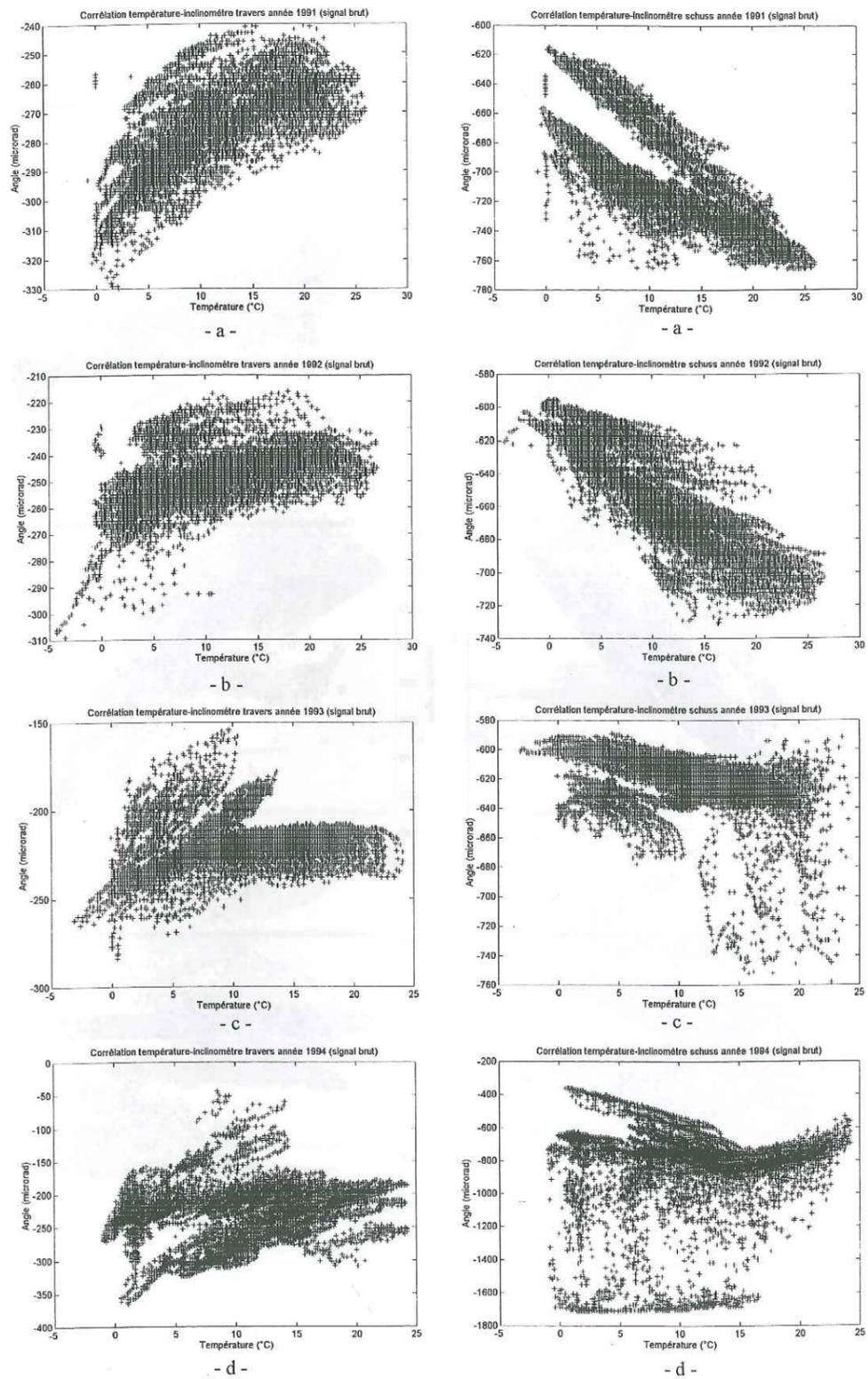


Fig. 4 – Corrélations entre température et signal inclinométrique, station FALE, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996 ; (g) : 1991 à 1996.

Spectres de cohérence entre température et signaux inclinométriques

Les figures suivantes rassemblent les spectres de cohérence annuels pour les deux stations FALW (Fig. 5) et FALE (Fig. 6).

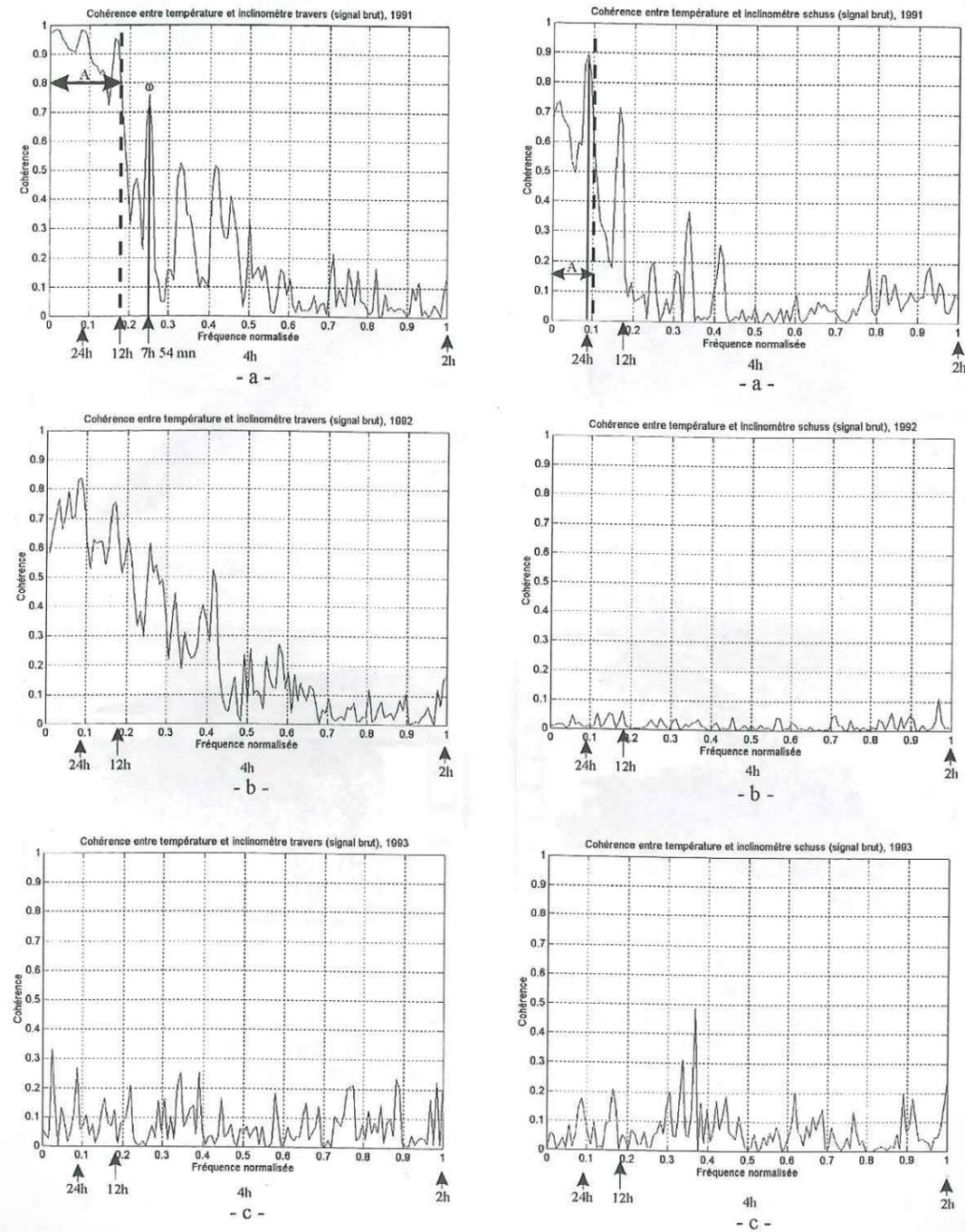
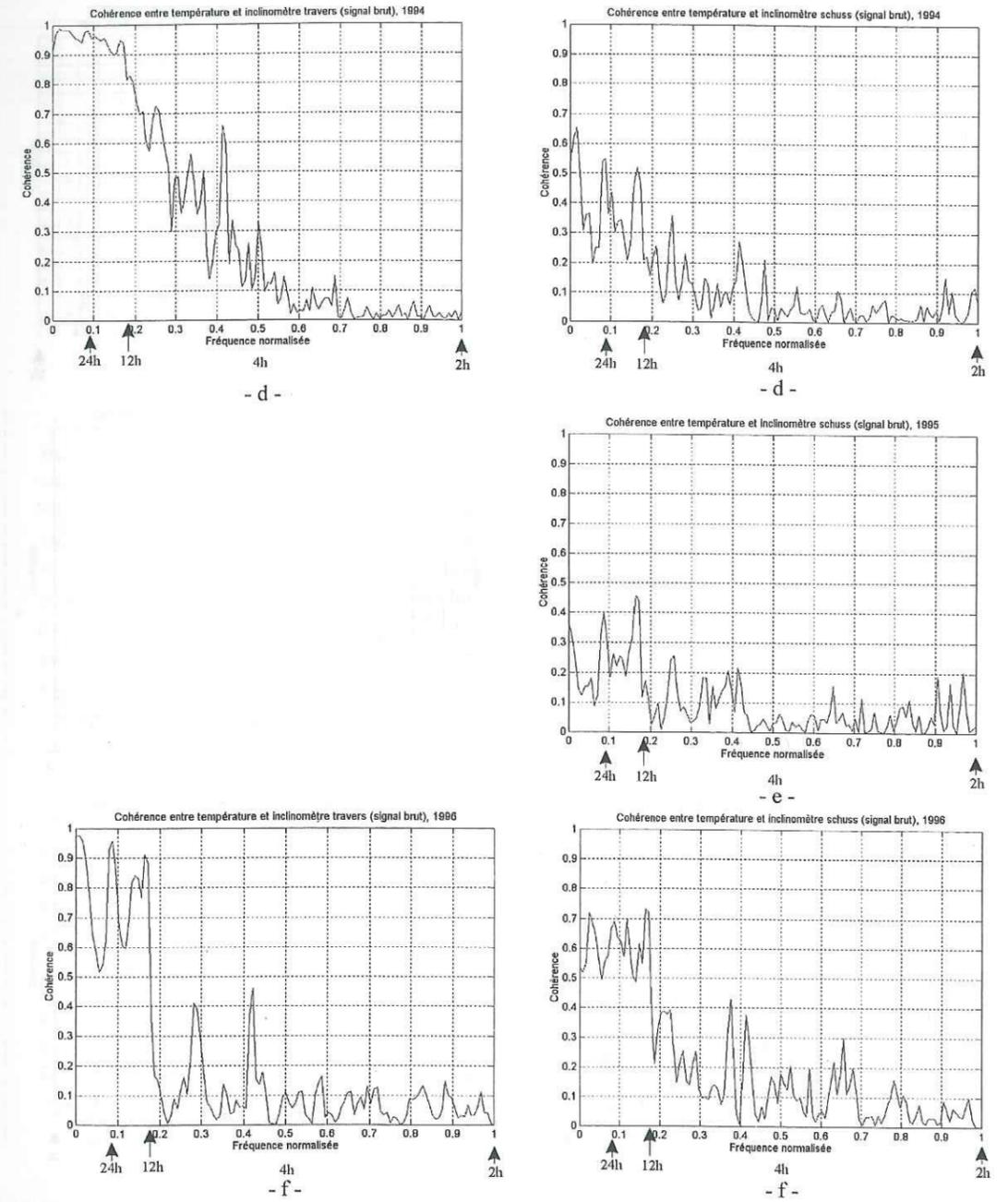


Fig. 5 – Spectres de cohérence annuels entre signaux de température et inclinométriques, station FALW, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.



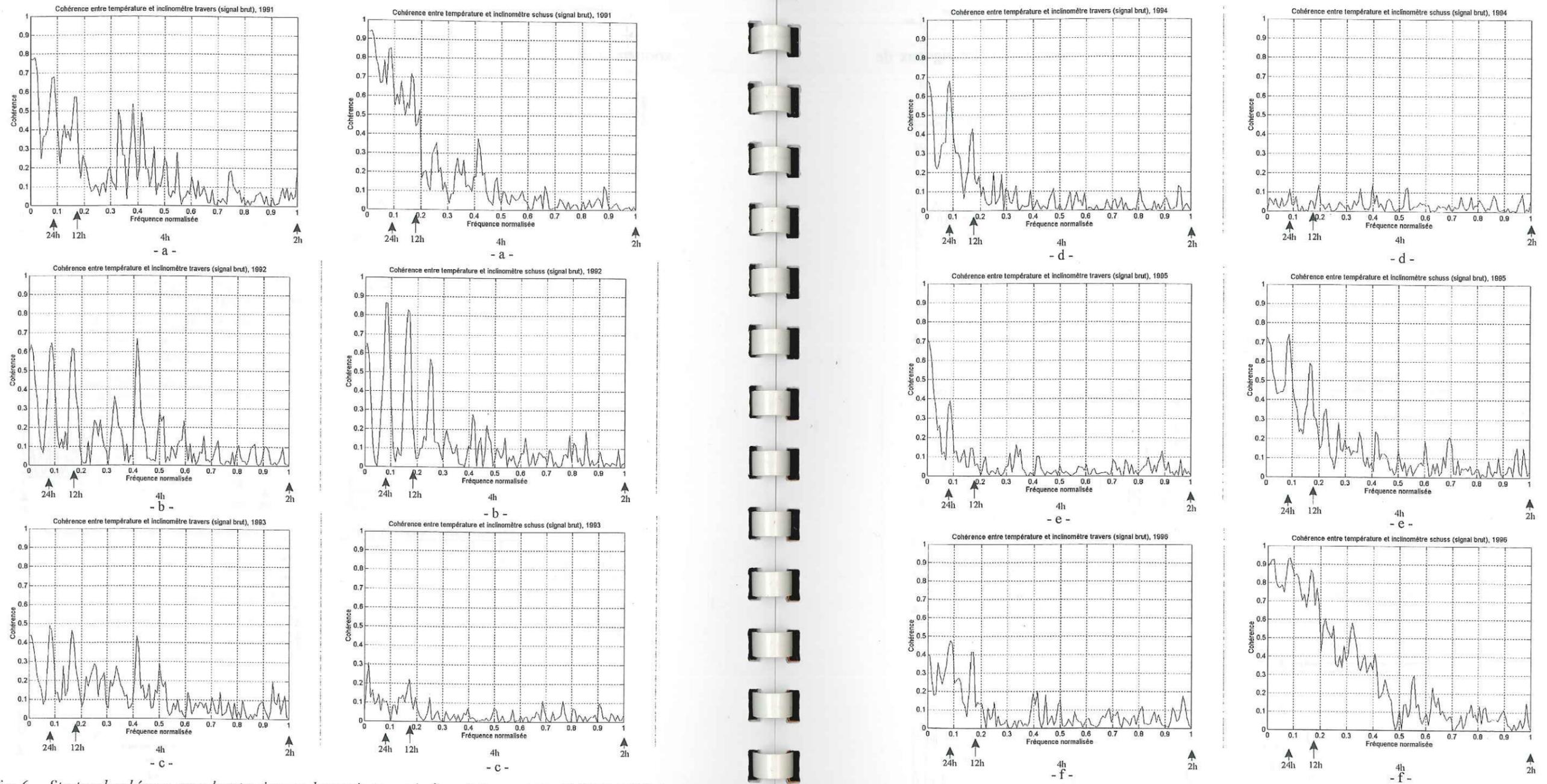


Fig. 6 – Spectres de cohérence annuels entre signaux de température et inclinométriques, station FALE, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

Phase de l'interspectre température – signal inclinométrique

Les Fig. 7 et Fig. 8 présentent les spectres de phase de l'interspectre entre signaux de température et inclinométriques.

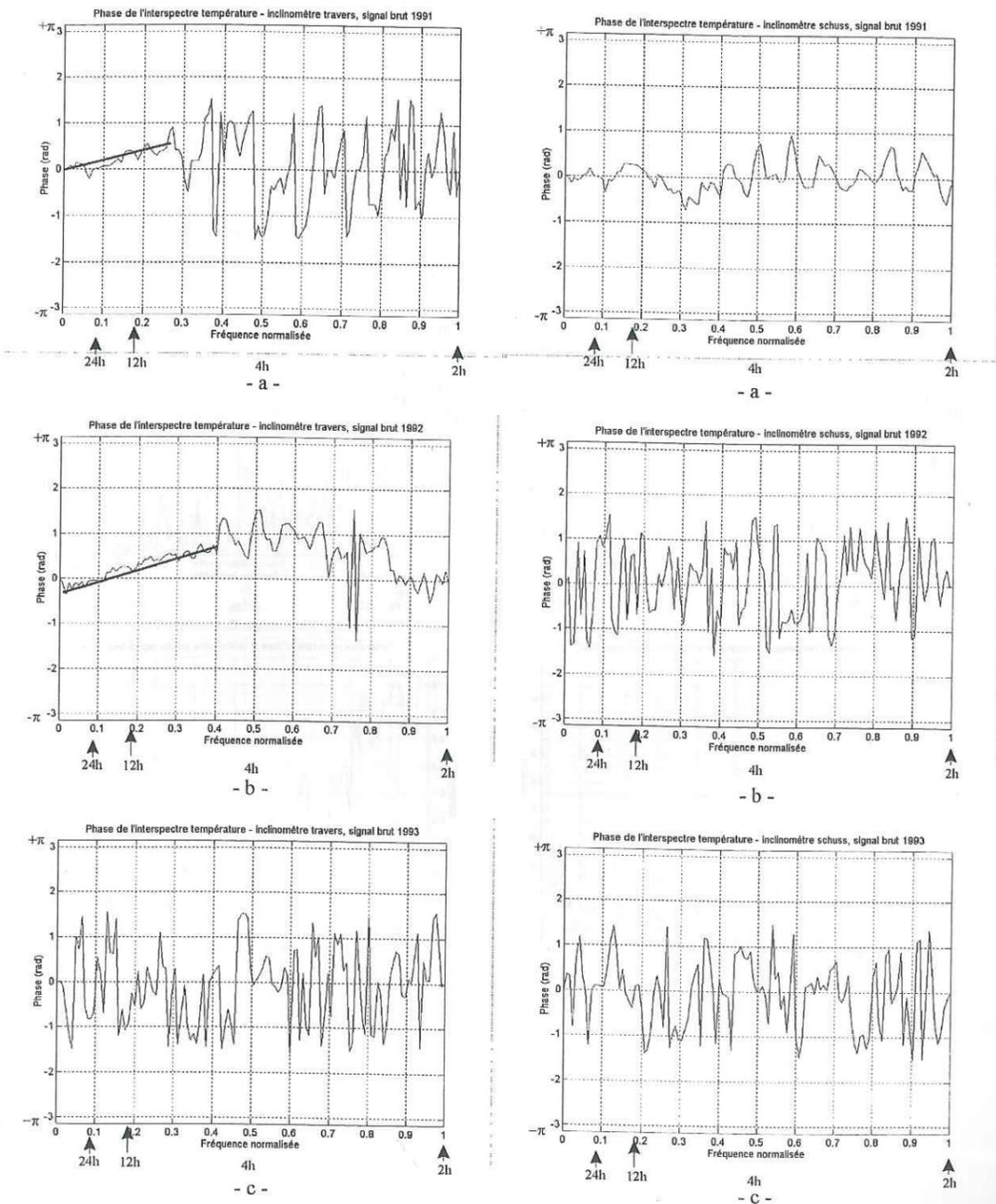
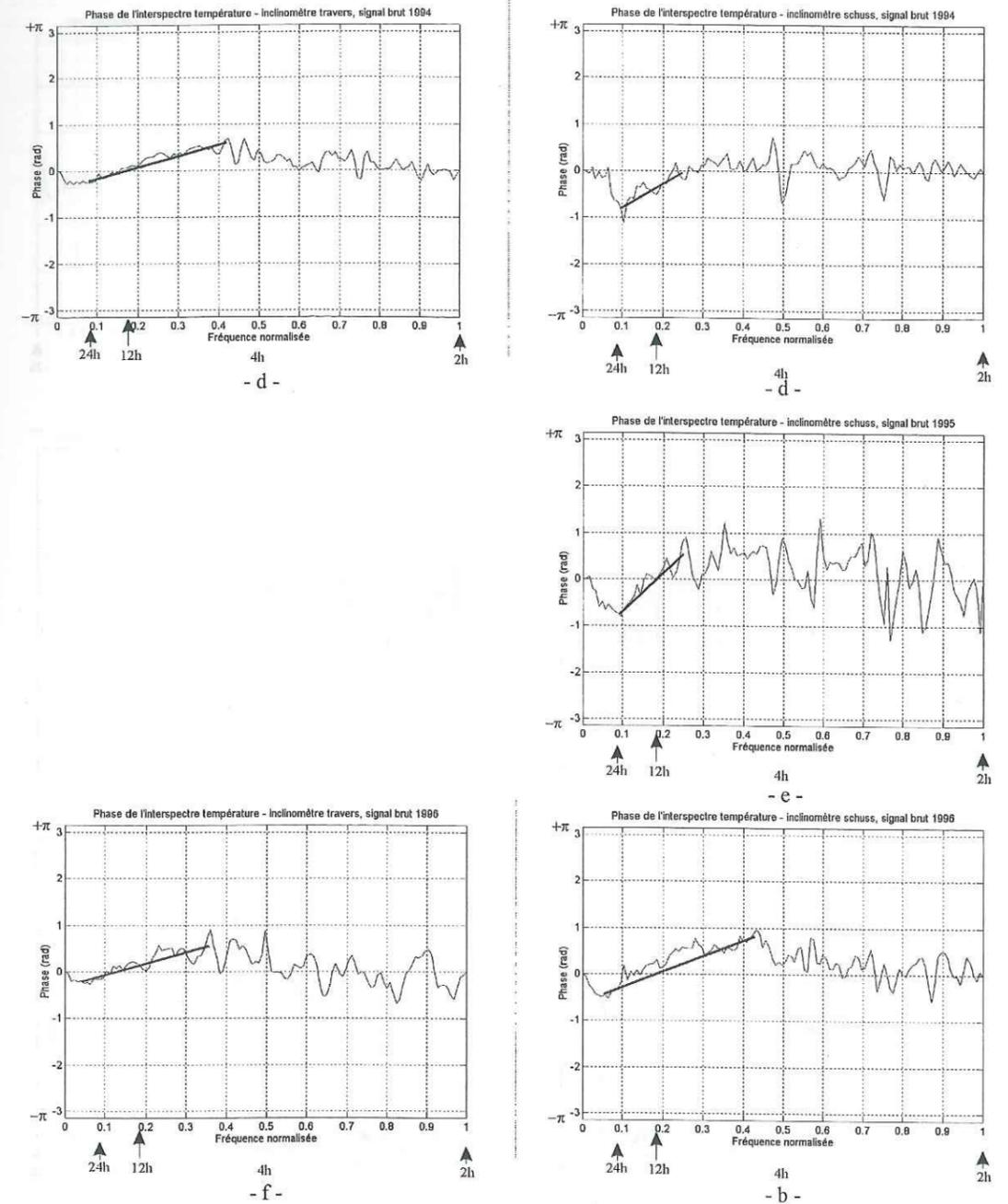
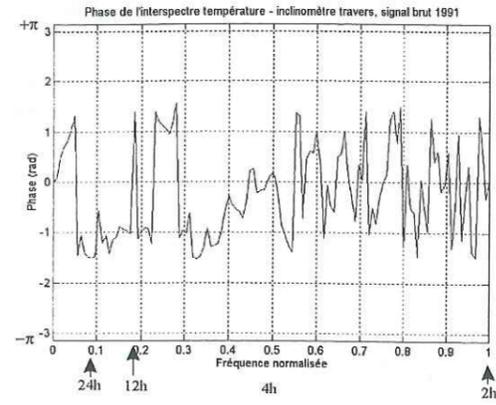
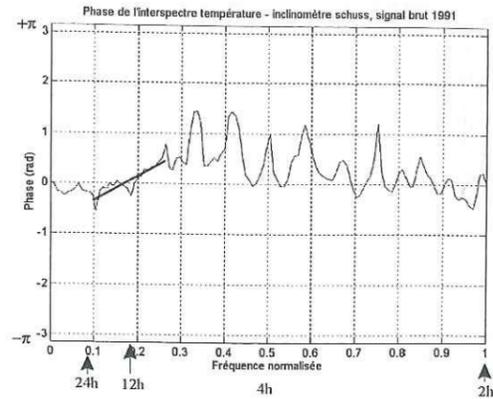


Fig. 7 – Phase des interspectres annuels entre signaux de température et inclinométriques, station FALW, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

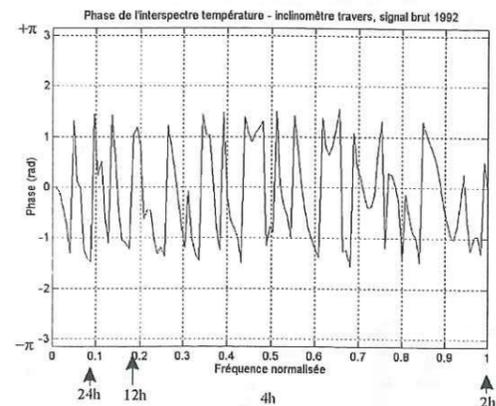




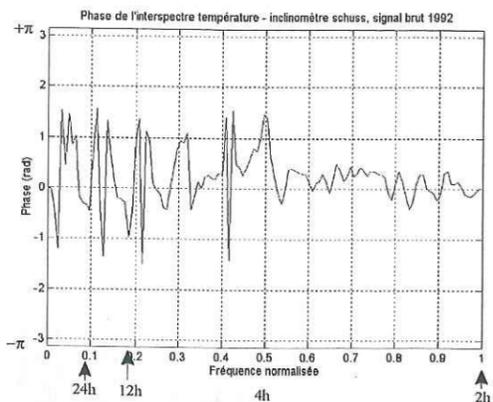
- a -



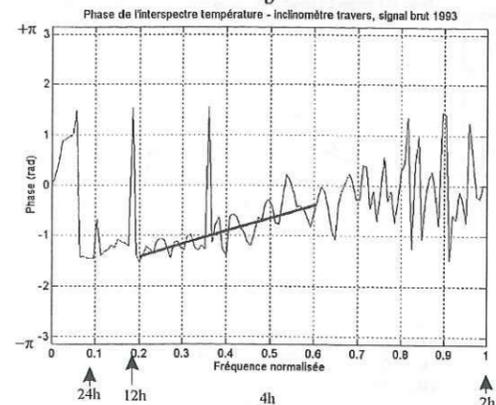
- a -



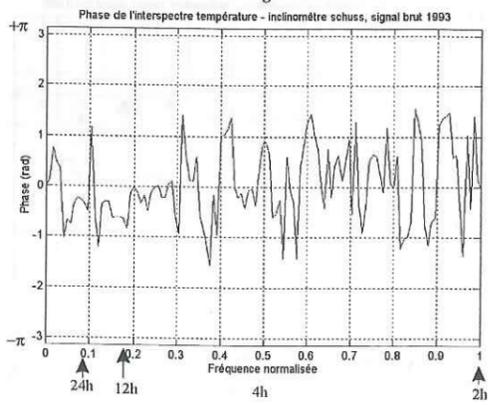
- b -



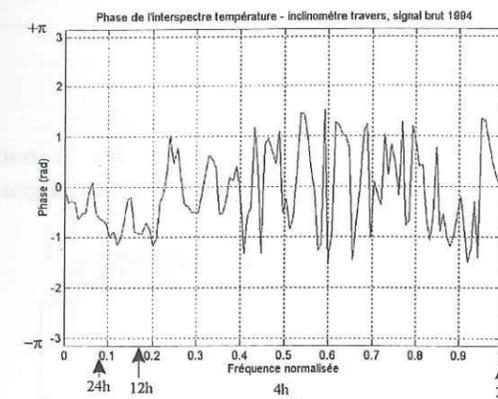
- b -



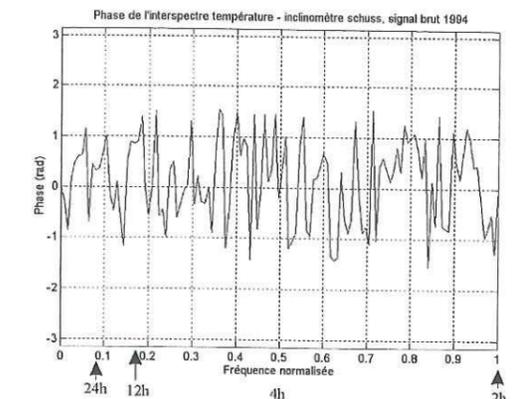
- c -



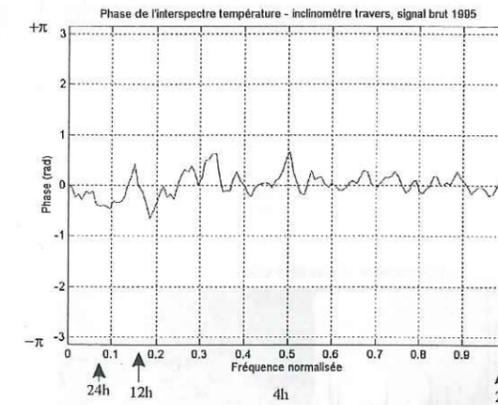
- c -



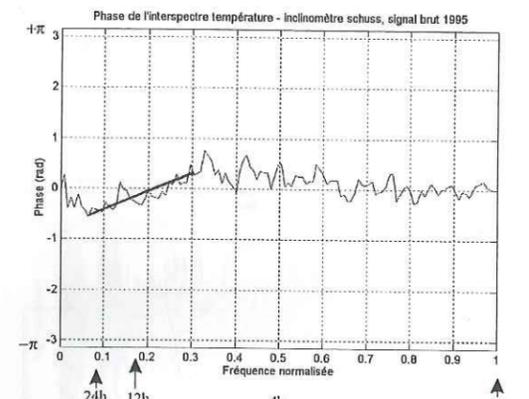
- d -



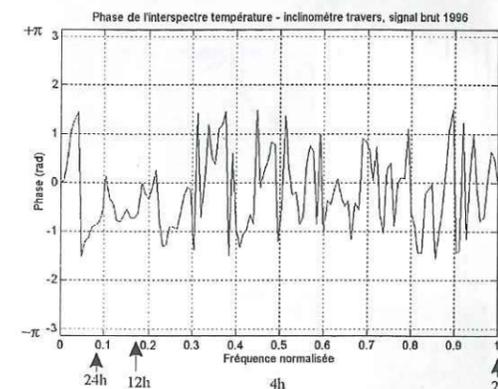
- d -



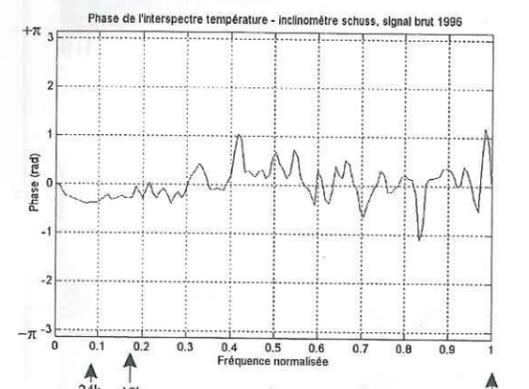
- e -



- e -



- f -



- f -

Fig. 8 – Phase des interspectres annuels entre signaux de température et inclinométriques, station F.A.L.E, 1991 à 1996. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

FILTRAGE BASSES FREQUENCES

Signaux filtrés

Les Fig. 9 (station FALW) et Fig. 10 (station FALE) présentent les signaux inclinométriques après filtrage des basses fréquences (élimination de la tendance). Ces signaux sont centrés sur 0.

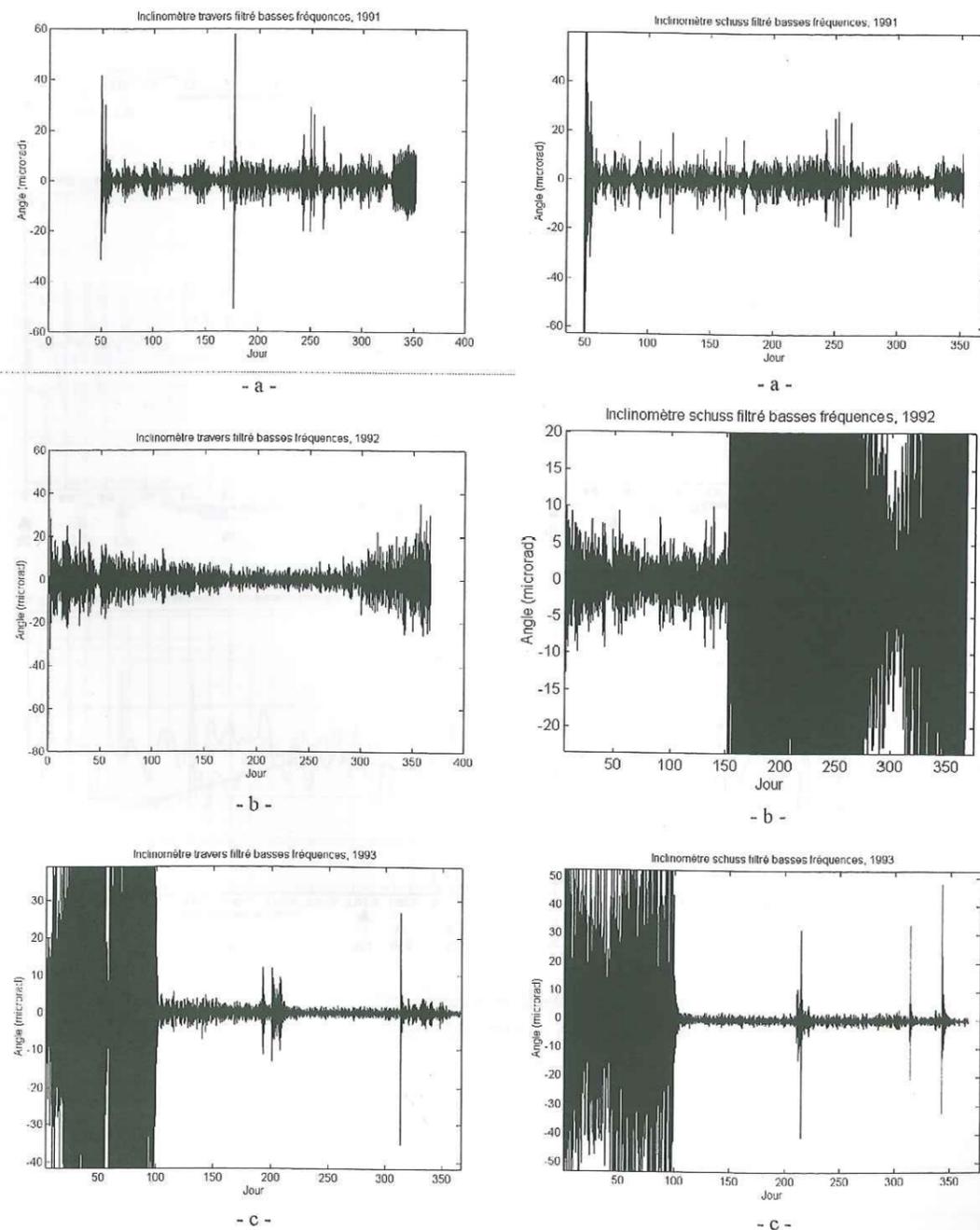
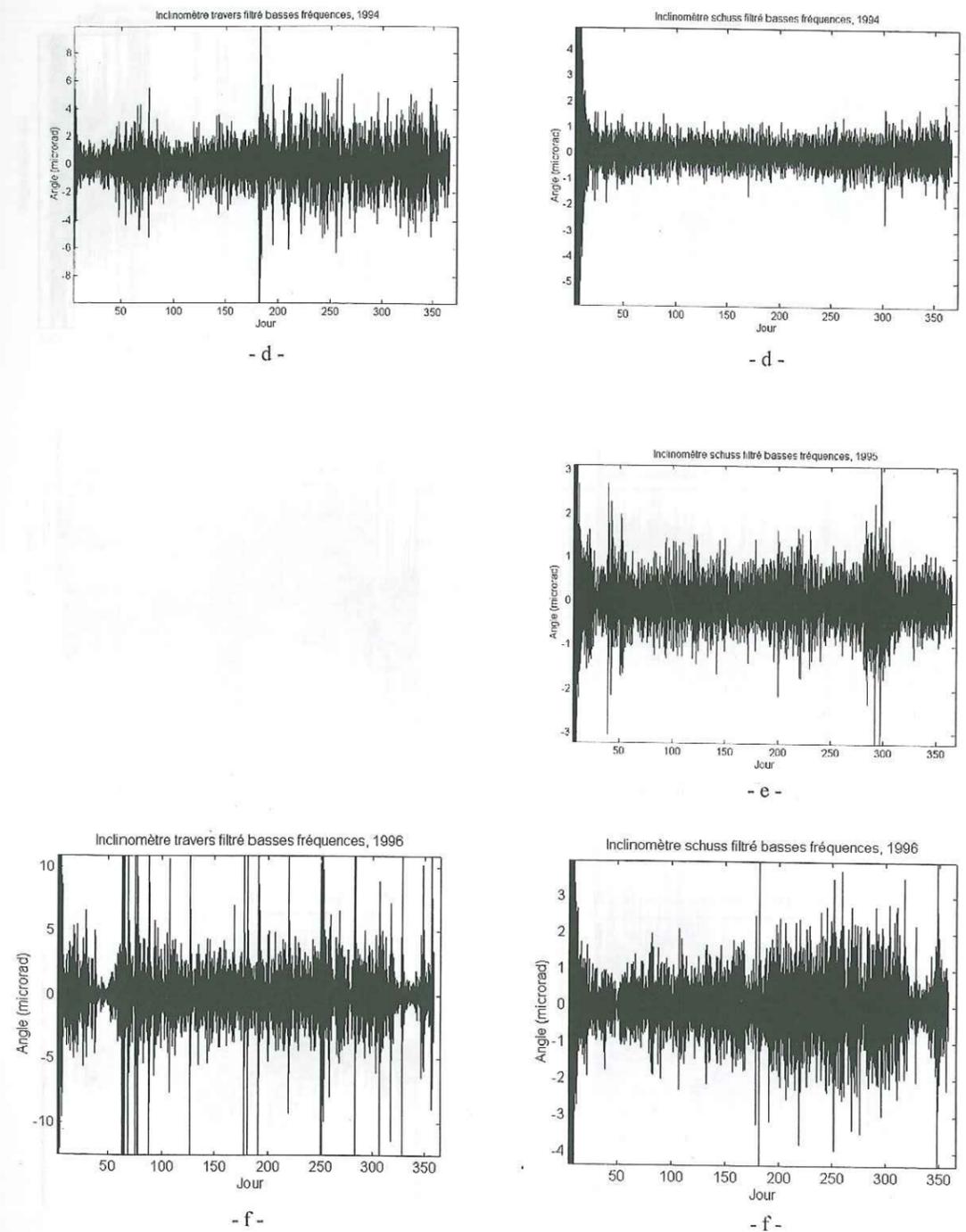
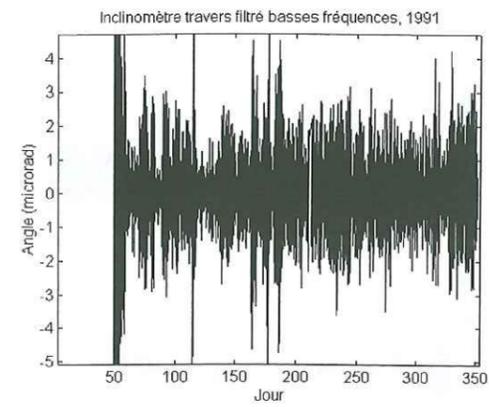
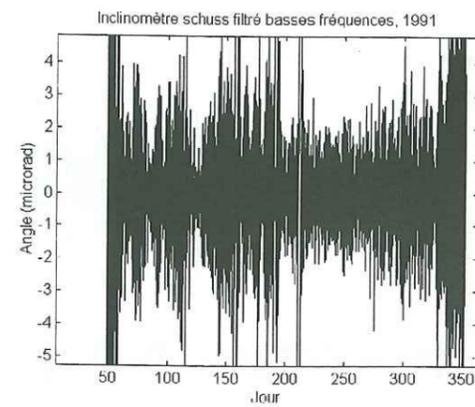


Fig. 9 – Signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

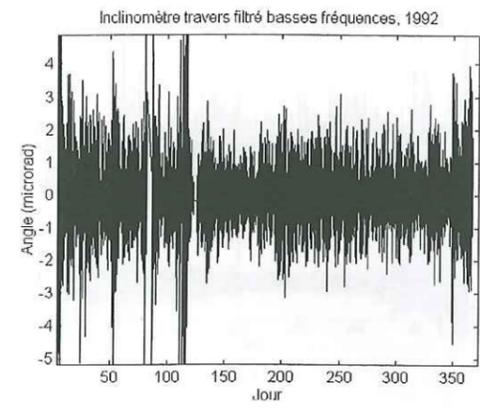




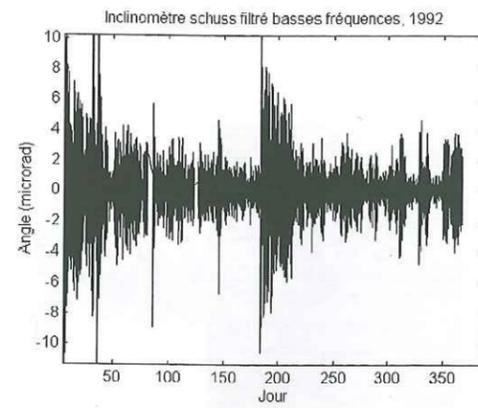
- a -



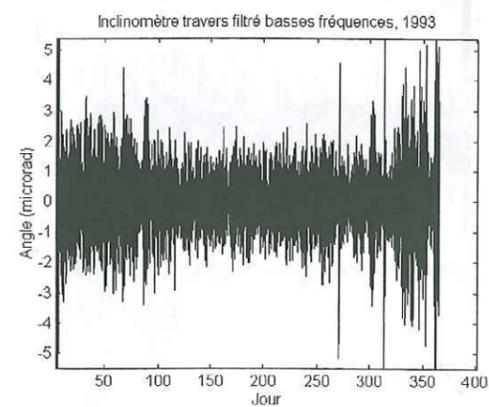
- a -



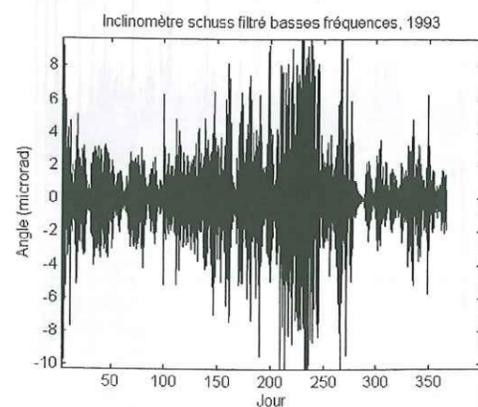
- b -



- b -

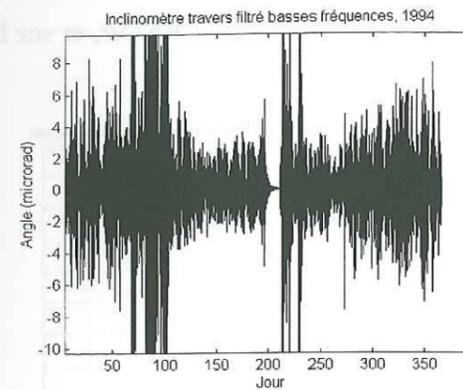


- c -

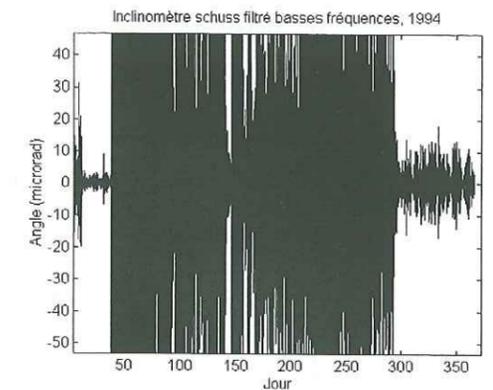


- c -

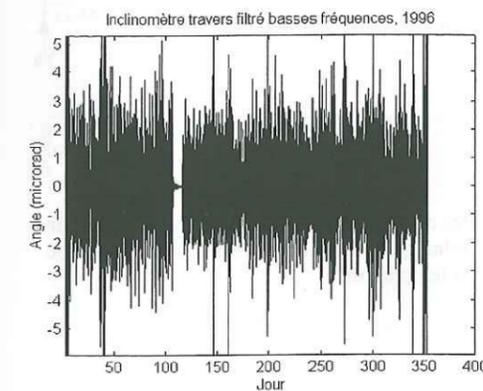
Fig. 10 - Signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.



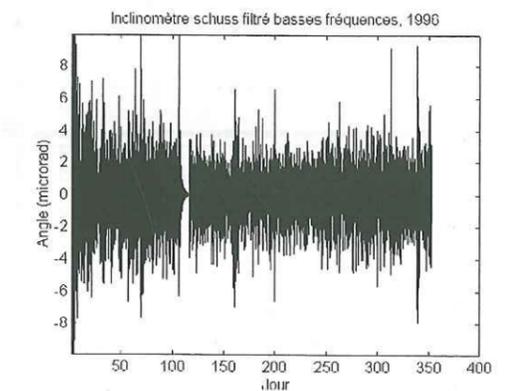
- d -



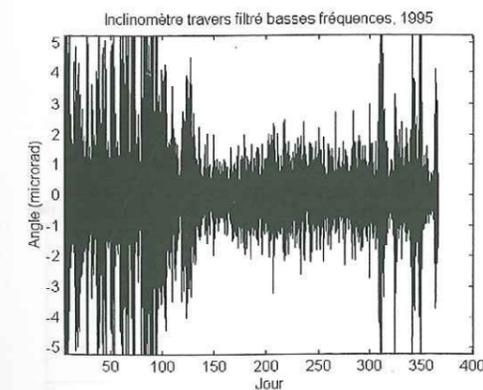
- d -



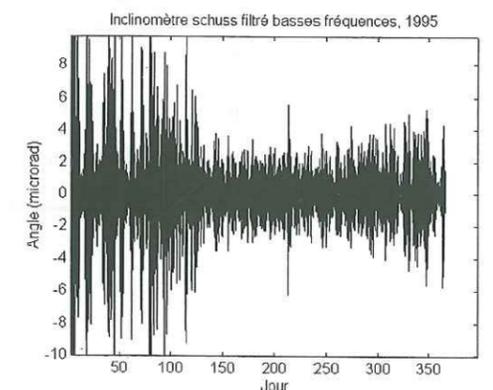
- e -



- e -



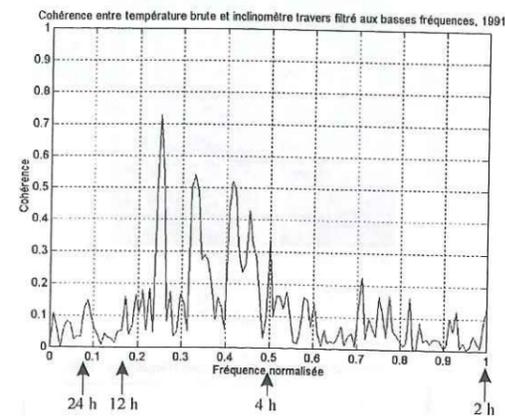
- f -



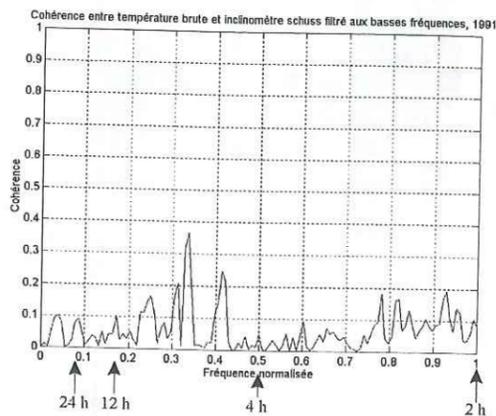
- f -

Cohérence entre signaux de température bruts et inclinométriques filtrés des basses fréquences

Les spectres de cohérence sont présentés sur la Fig. 11 pour la station FALW, et sur la Fig. 12 pour la station FALE.



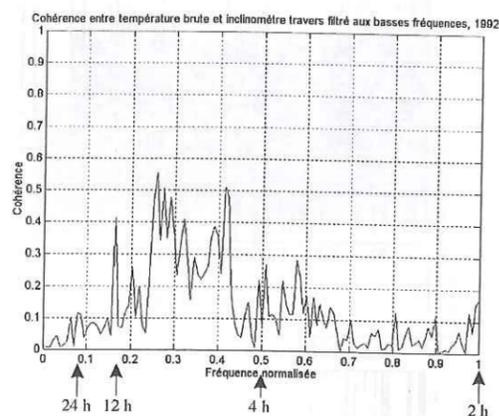
- a -



- a -

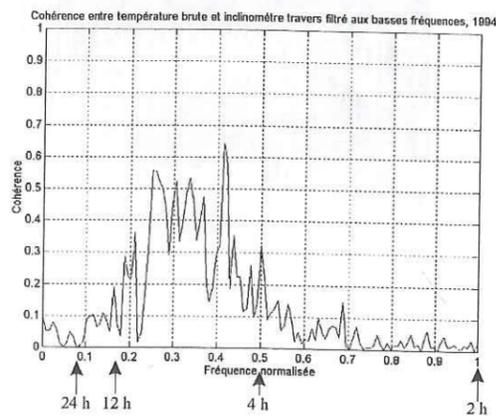
Pas de filtrage basses fréquences effectué sur schuss, 1992 car absence de corrélation avec la température.

- b -

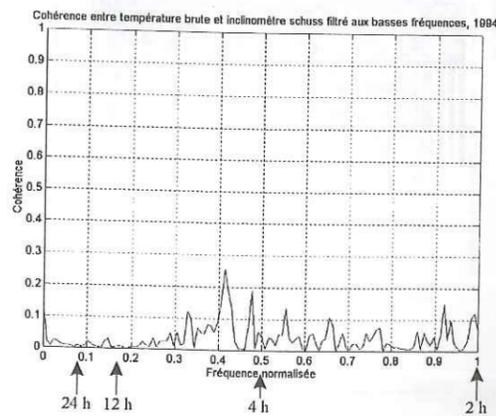


- b -

Pas de filtrage basses fréquences effectué en 1993 car absence de corrélation avec la température.

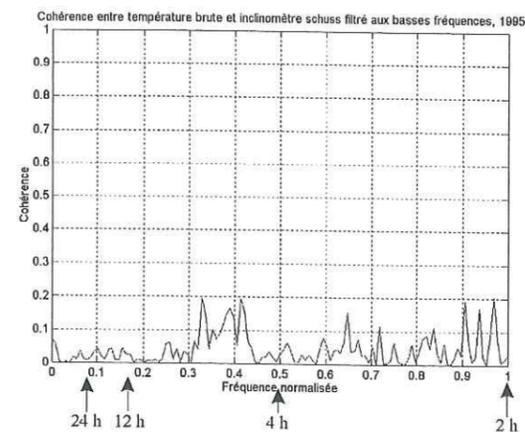


- c -

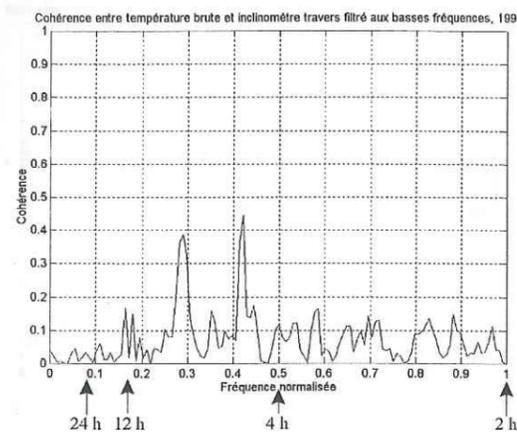


- c -

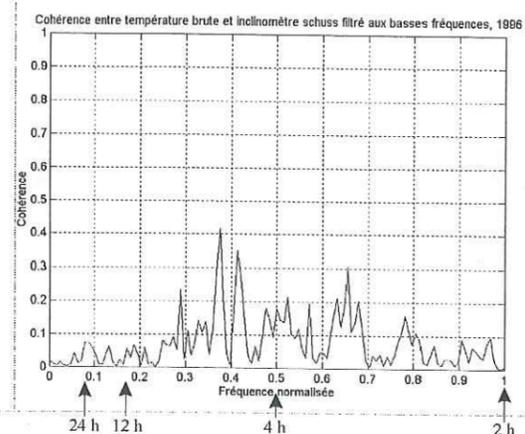
Fig. 11 - Spectres de cohérence entre signaux de température (bruts) et inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1994 ; (d) : 1995 ; (e) : 1996.



- d -



- e -



- e -

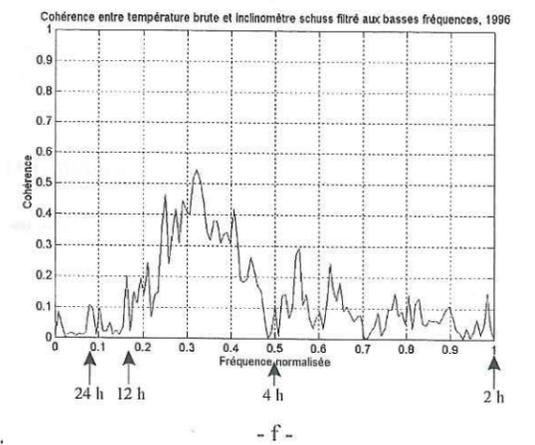
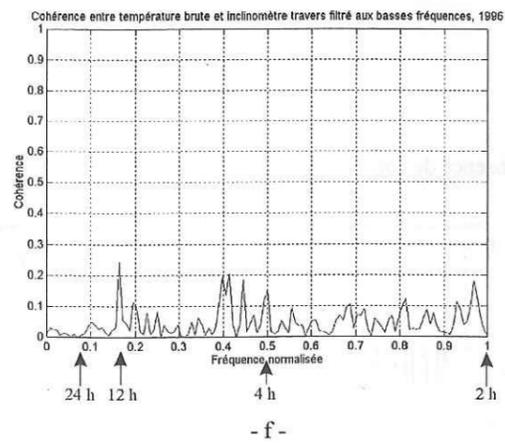
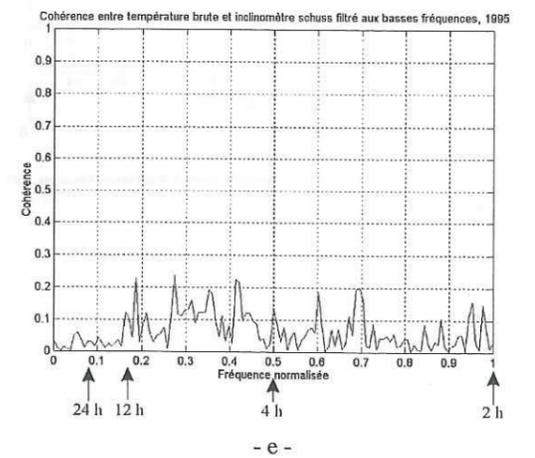
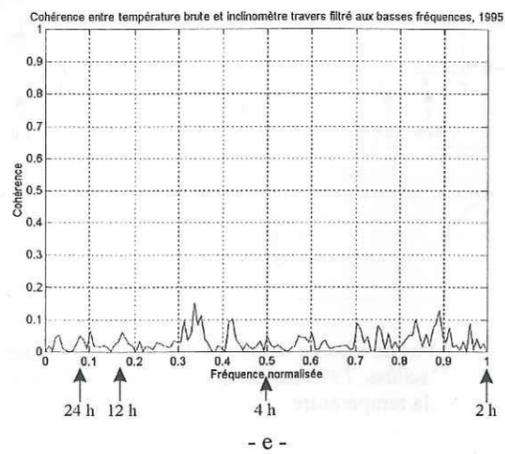
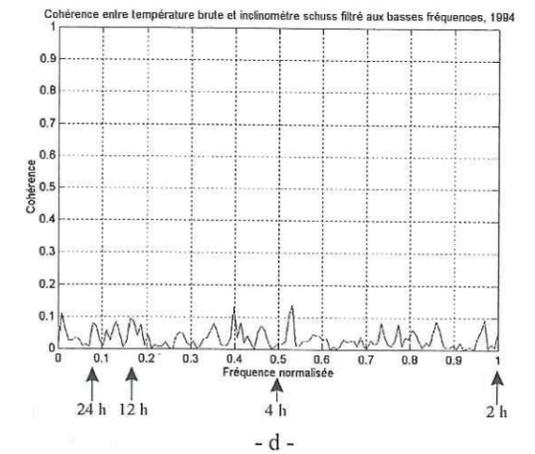
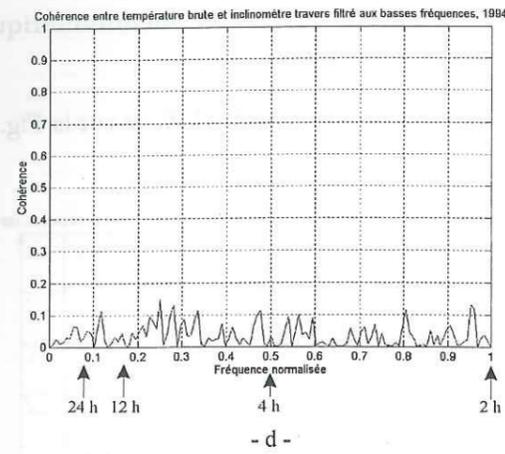
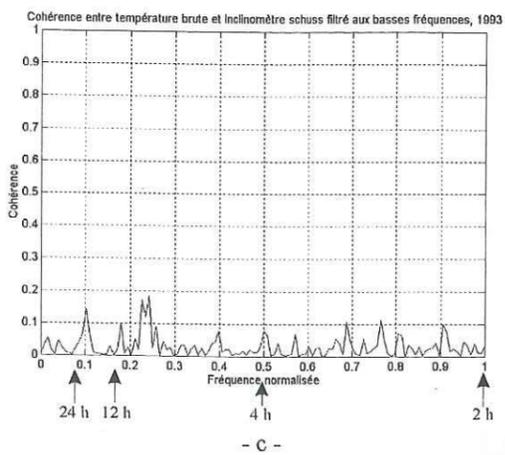
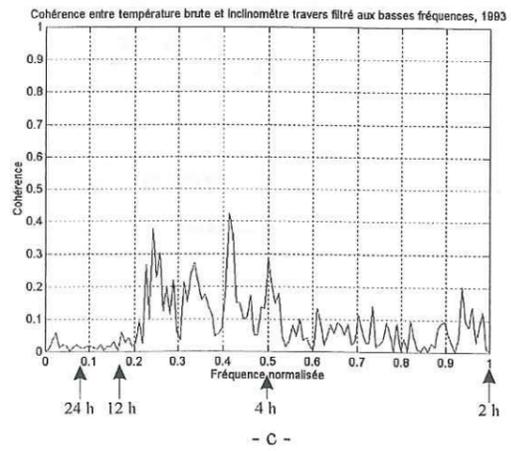
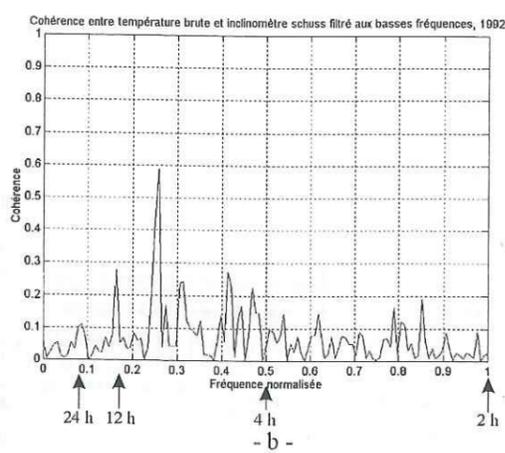
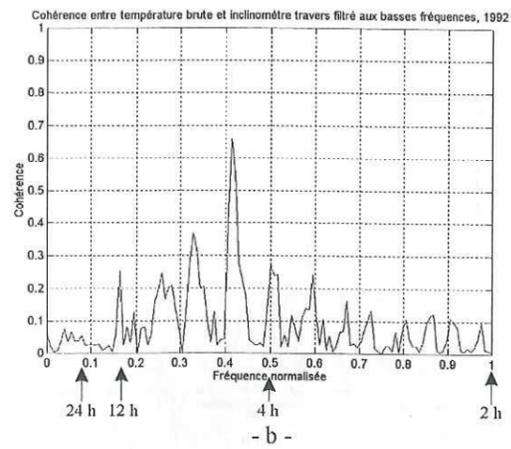
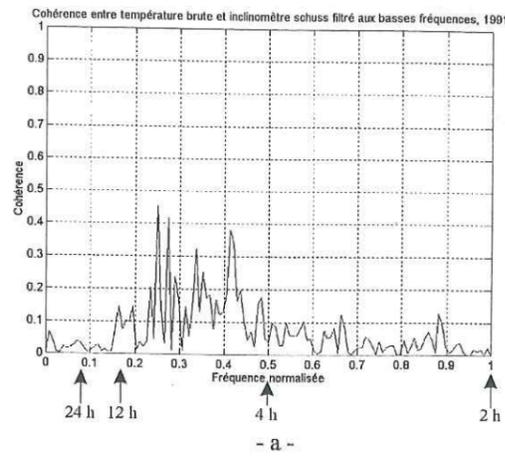
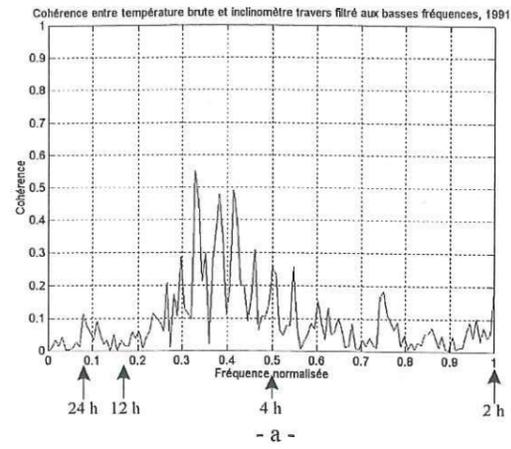


Fig. 12 - Spectres de cohérence entre signaux de température (bruts) et inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

Phase de l'interspectre des signaux de température bruts et inclinométriques filtrés des basses fréquences

Les spectres de phase sont présentés sur la Fig. 13 pour la station FALW, et sur la Fig. 14 pour la station FALE.

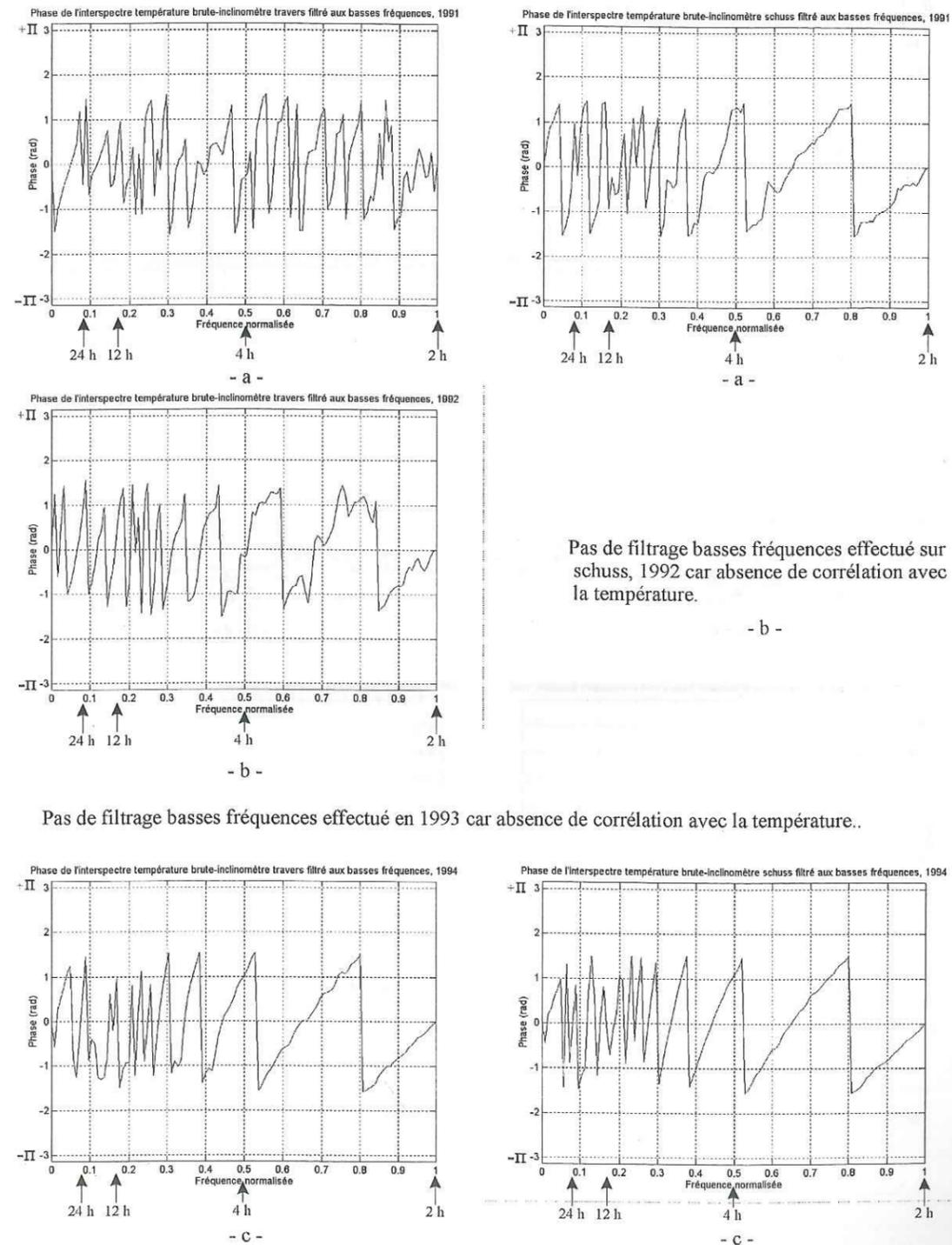
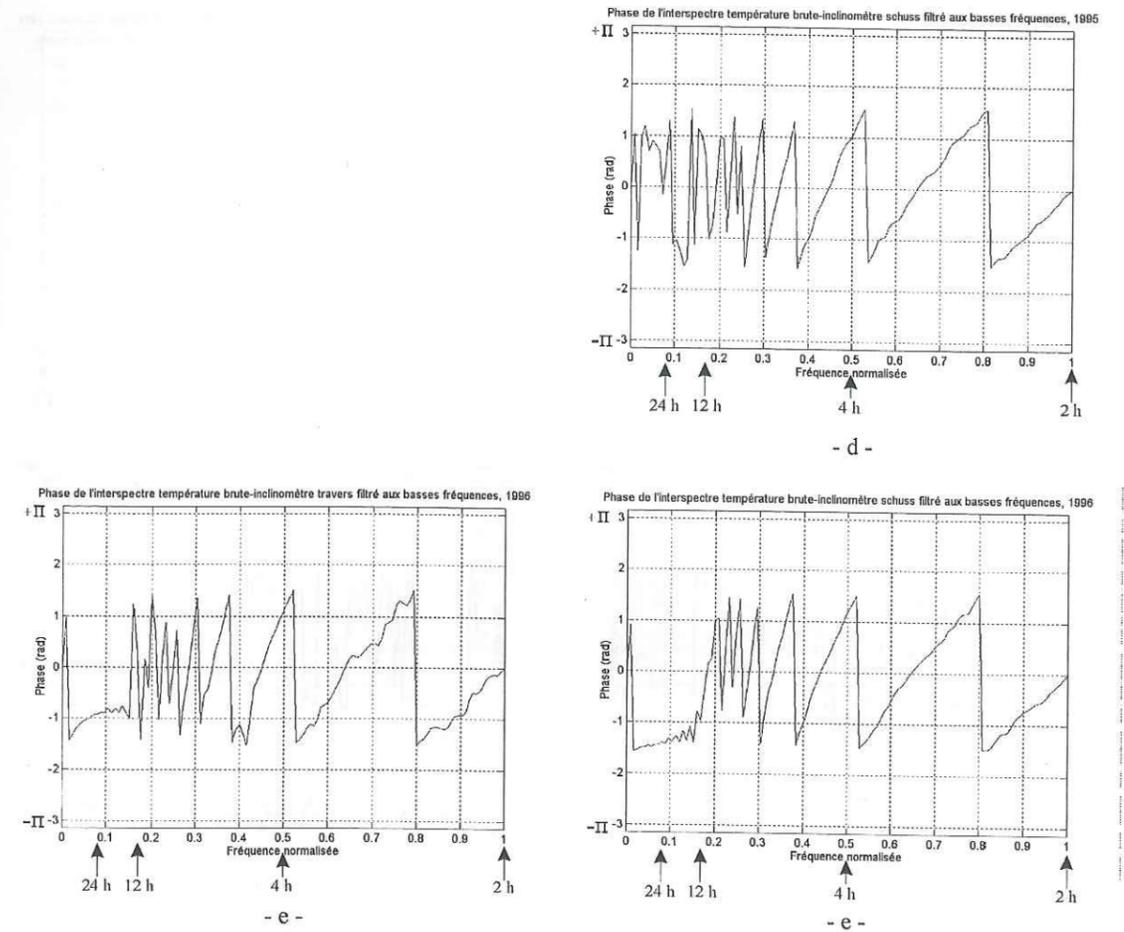


Fig. 13 – Spectres de phase de l'interspectre des signaux de température (bruts) et inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1994 ; (d) : 1995 ; (e) : 1996.



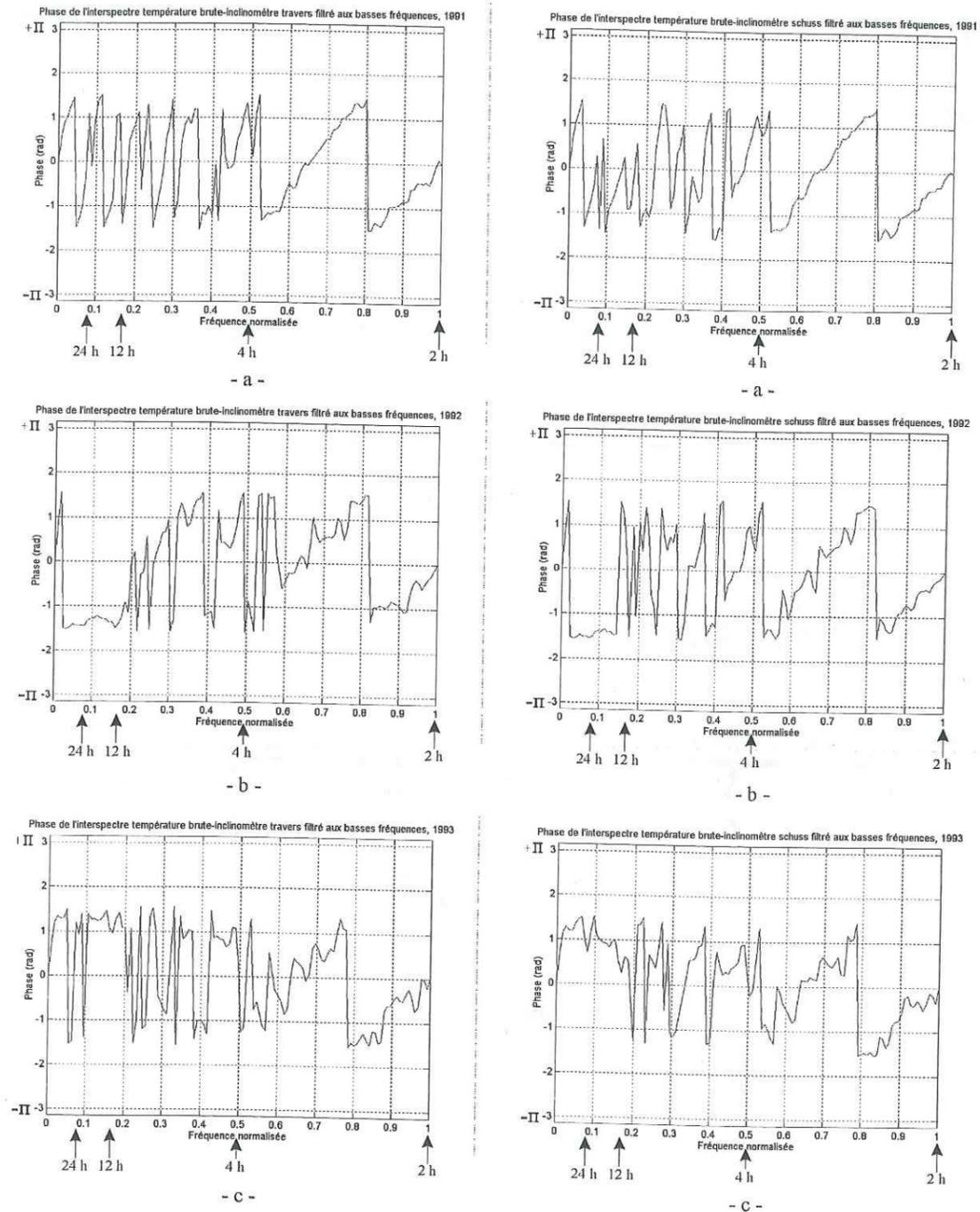
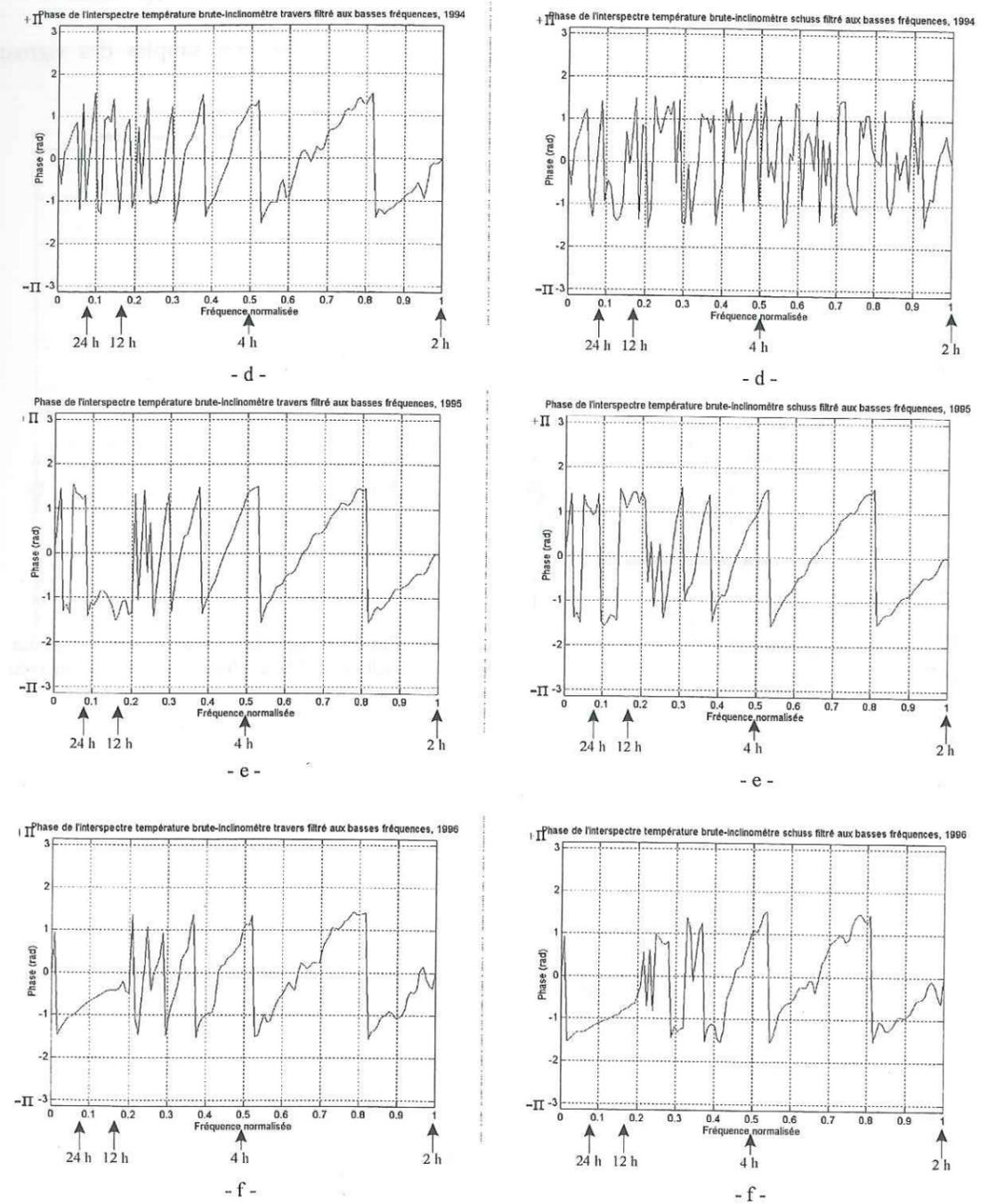
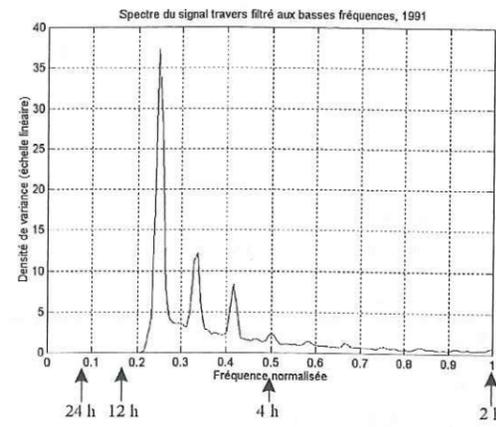


Fig. 14 - Spectres de phase de l'interspectre des signaux de température (bruts) et inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1995 ; (e) : 1996.

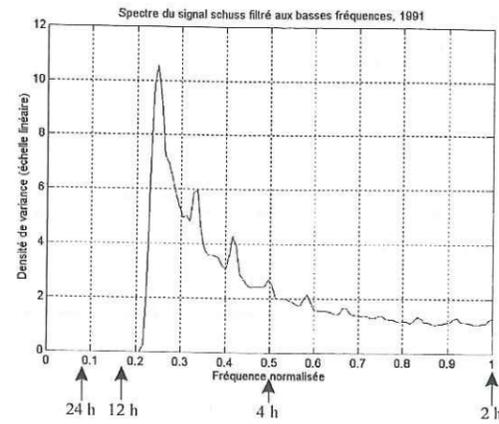


Spectres simples des signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences

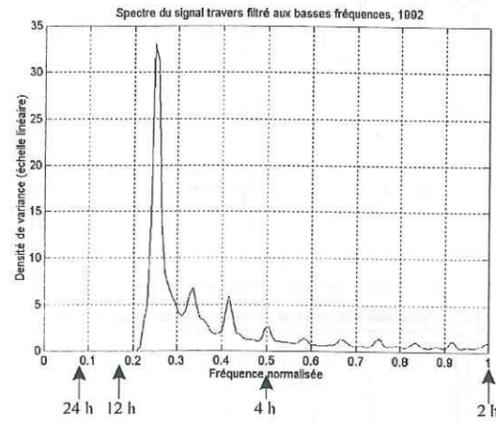
Les Fig. 15 (station FALW) et Fig. 16 rassemblent les spectres simples des signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences.



- a -



- a -

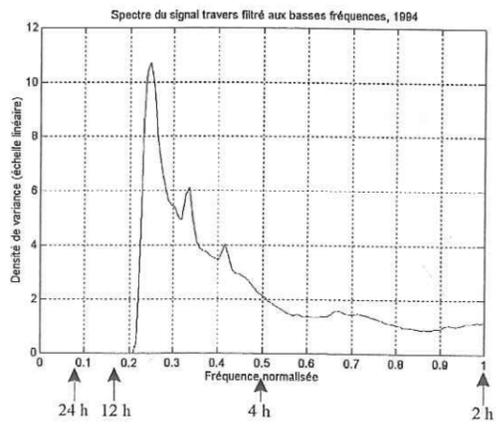


- b -

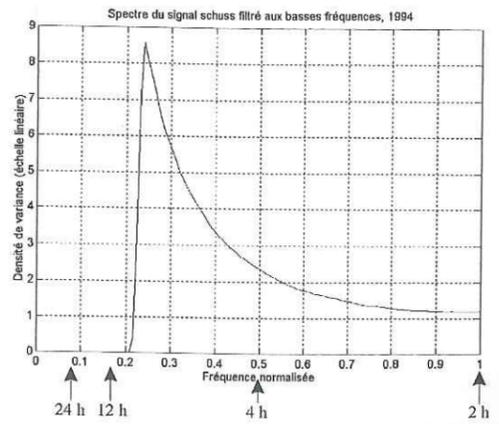
Pas de filtrage basses fréquences effectué sur schuss, 1992 car absence de corrélation avec la température.

- b -

Pas de filtrage basses fréquences effectué en 1993 car absence de corrélation avec la température.

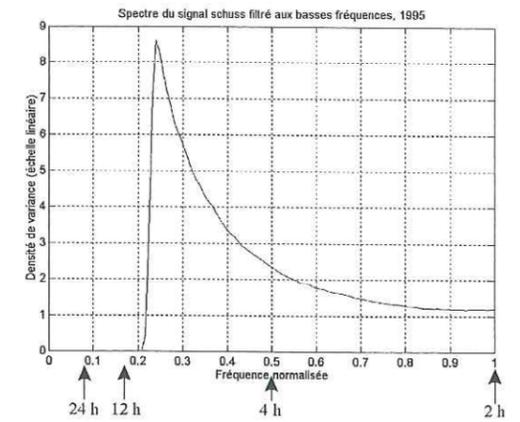


- c -

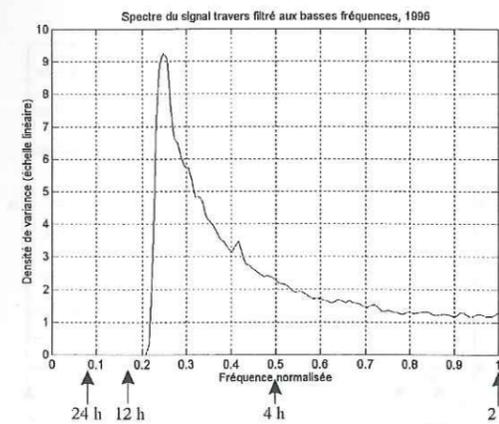


- c -

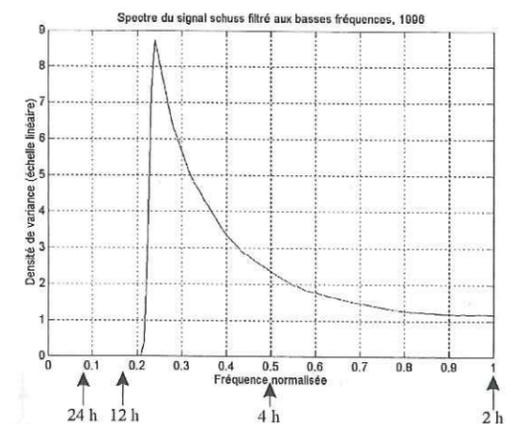
Fig. 15 – Spectres simples des signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1994 ; (d) : 1995 ; (e) : 1996.



- d -



- e -



- e -

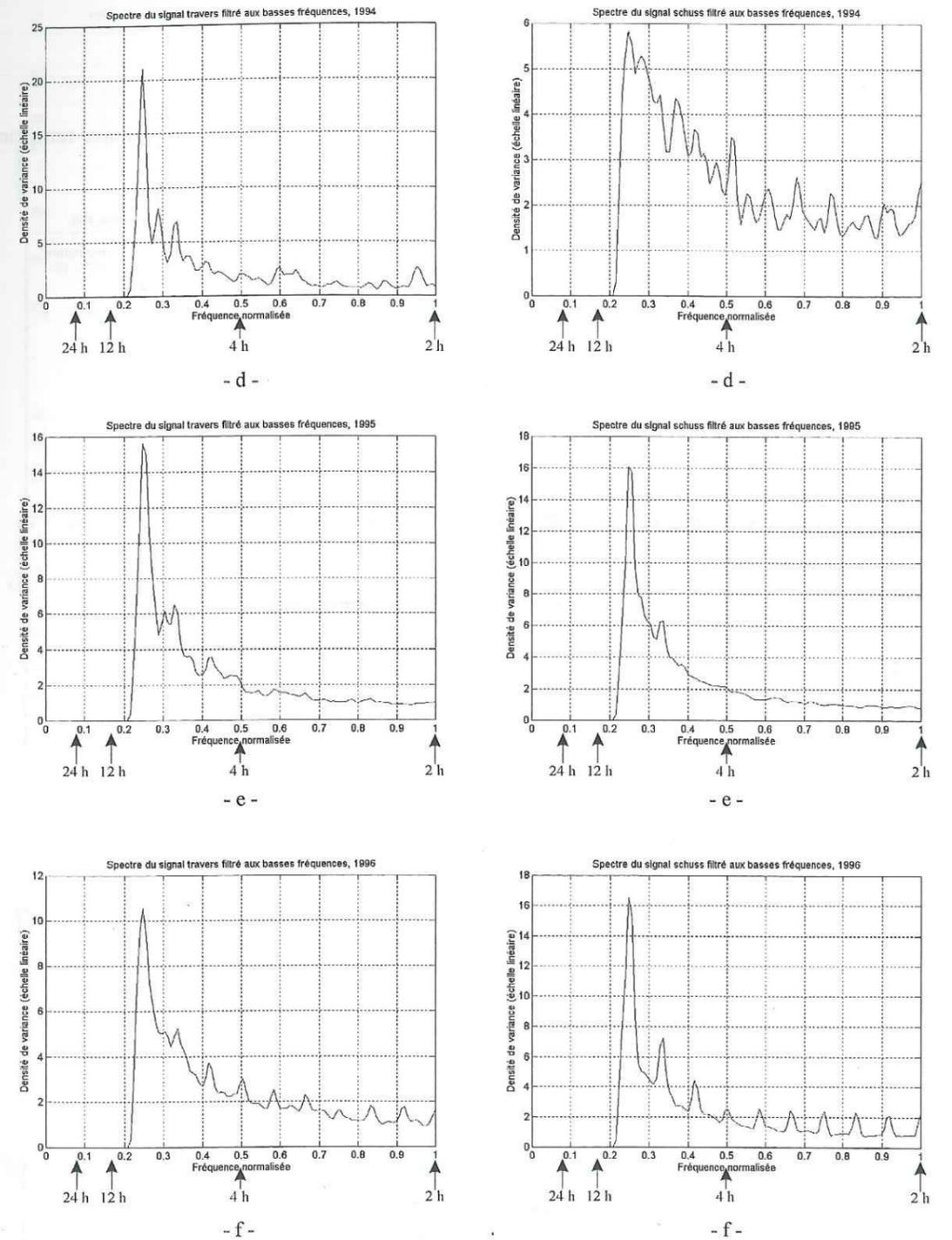
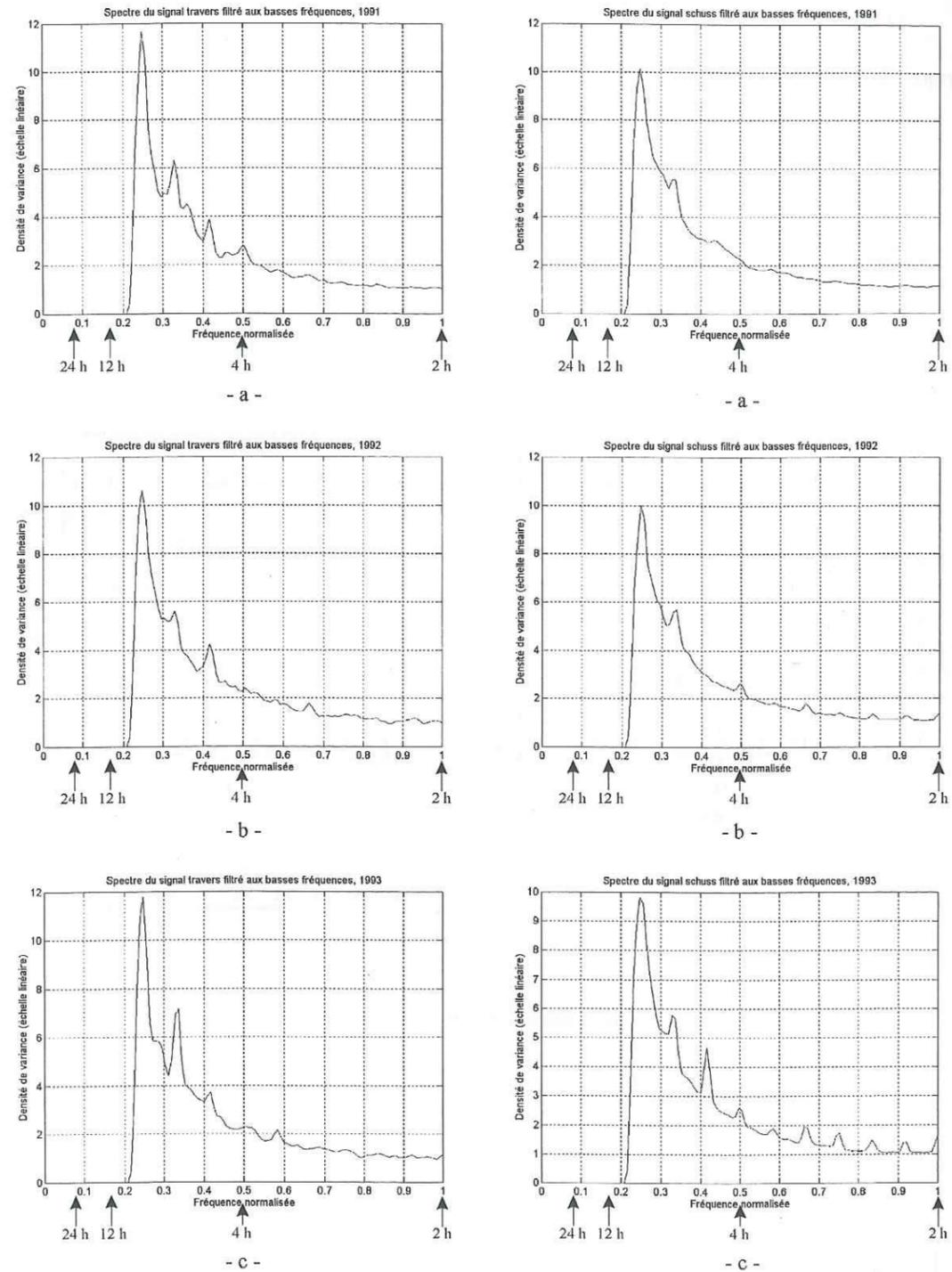


Fig. 16 - Spectres simples des signaux inclinométriques filtrés des basses fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

FILTRAGE HAUTES FREQUENCES

Signaux filtrés des hautes fréquences

Les Fig. 17 (station FALW) et Fig. 18 (station FALE) regroupent les signaux temporels après filtrage des hautes fréquences.

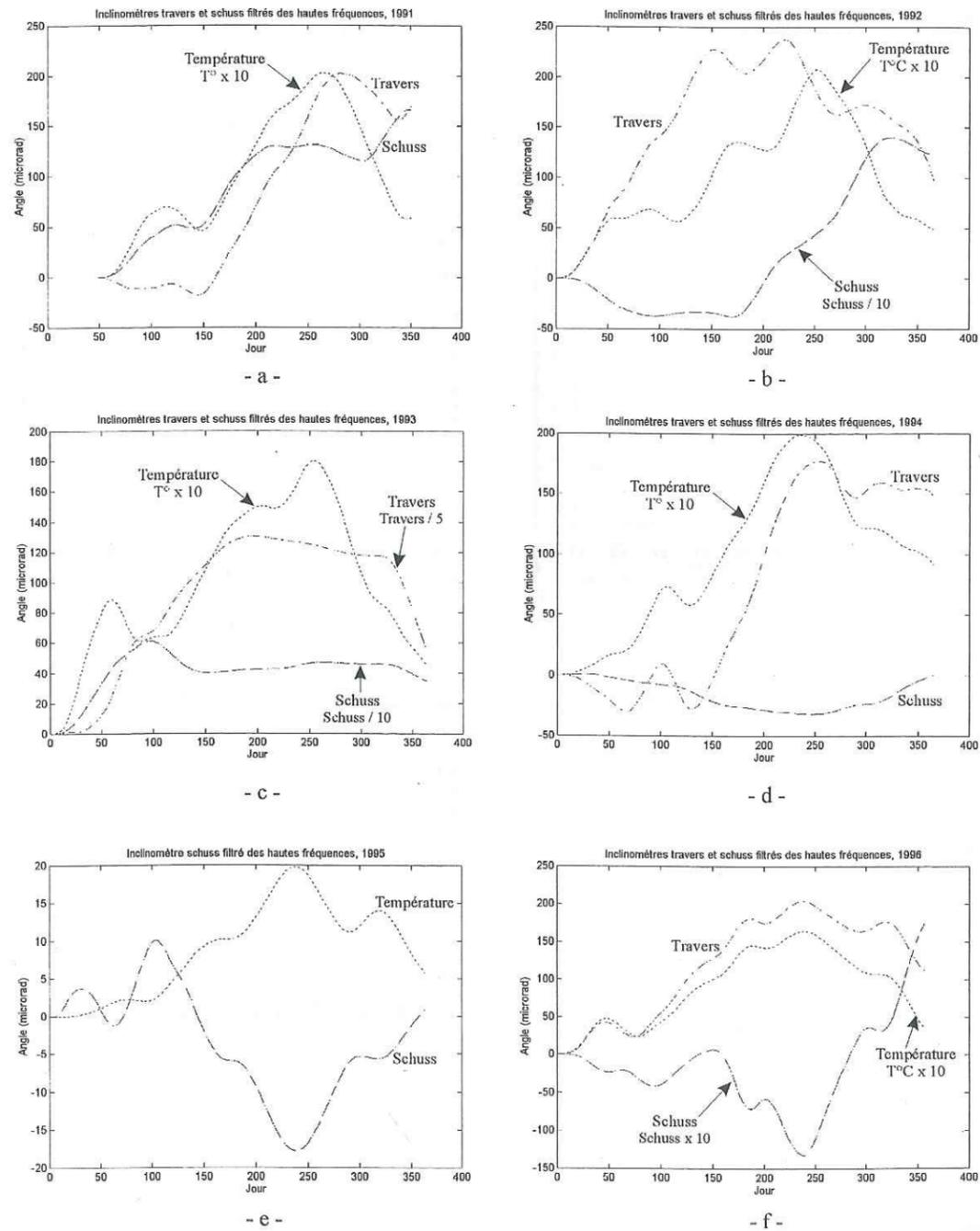


Fig. 17 - Signaux temporels filtrés des hautes fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

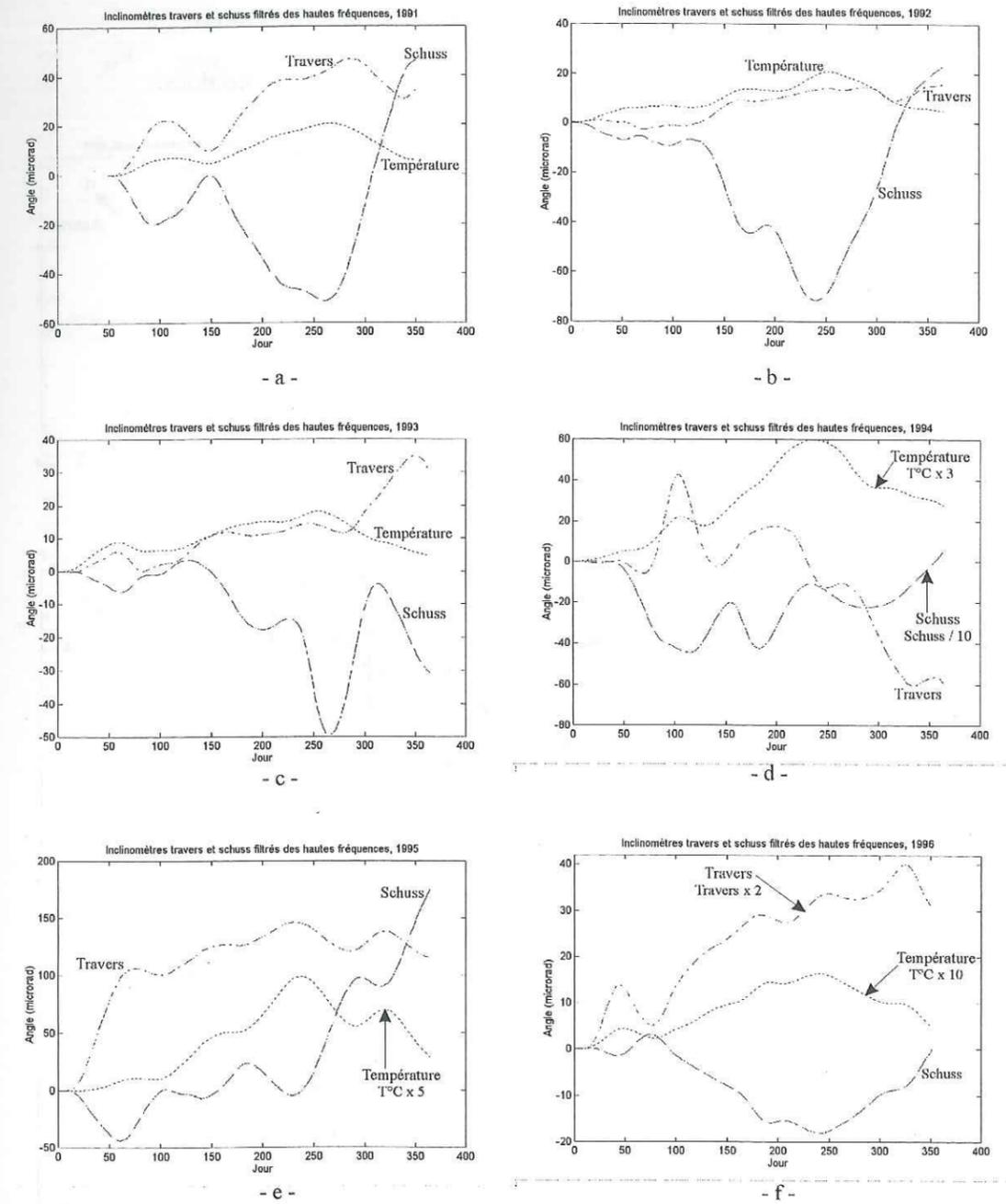


Fig. 18 - Signaux temporels filtrés des hautes fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996.

Projections des signaux inclinométriques dans le plan horizontal

Les Fig. 19 (station FALW) et Fig. 20 (station FALE) rassemblent les projections.

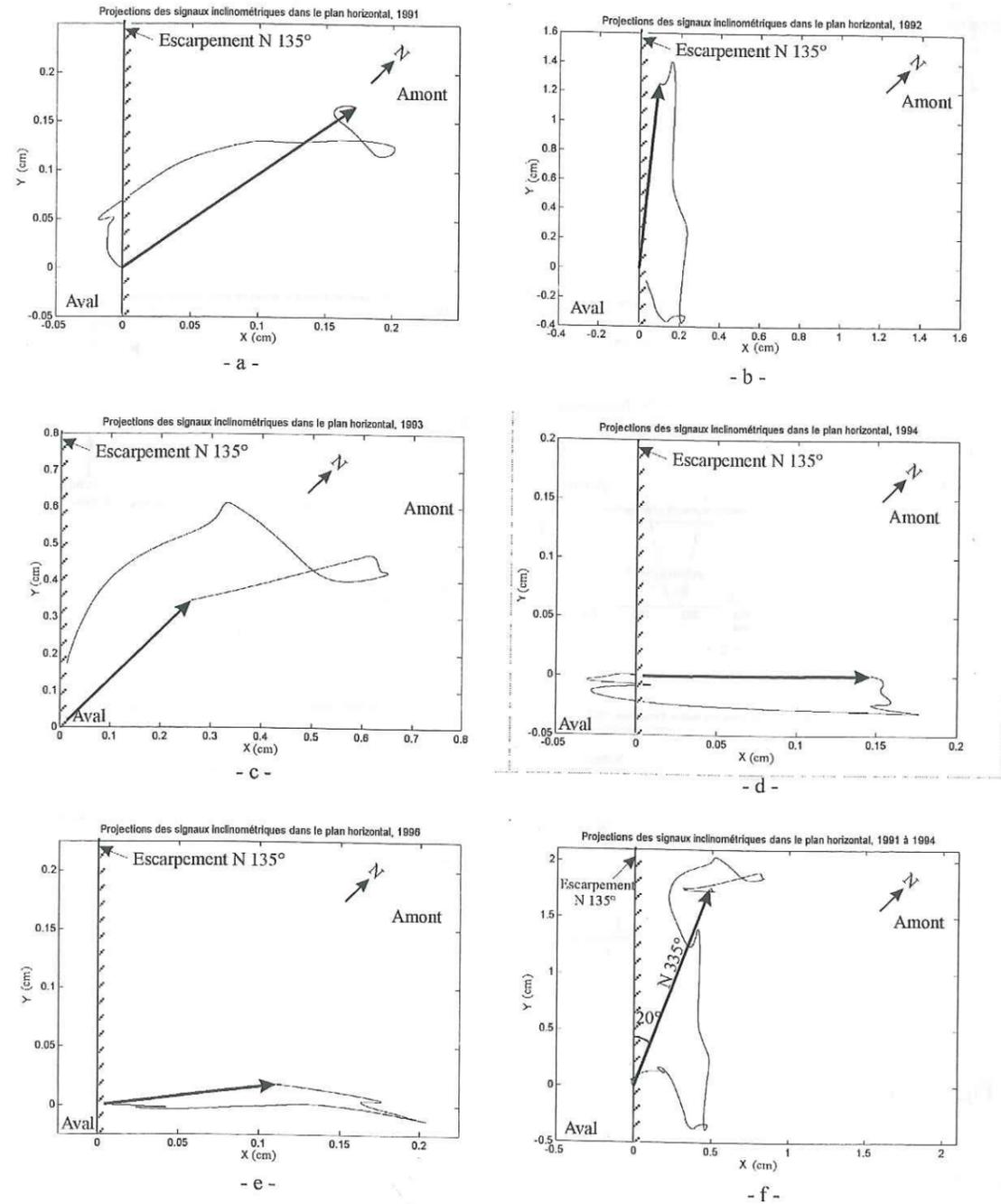


Fig. 19 - Projections dans le plan horizontal des signaux inclinométriques filtrés des hautes fréquences, station FALW. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1996 ; (f) : 1991 à 1994.

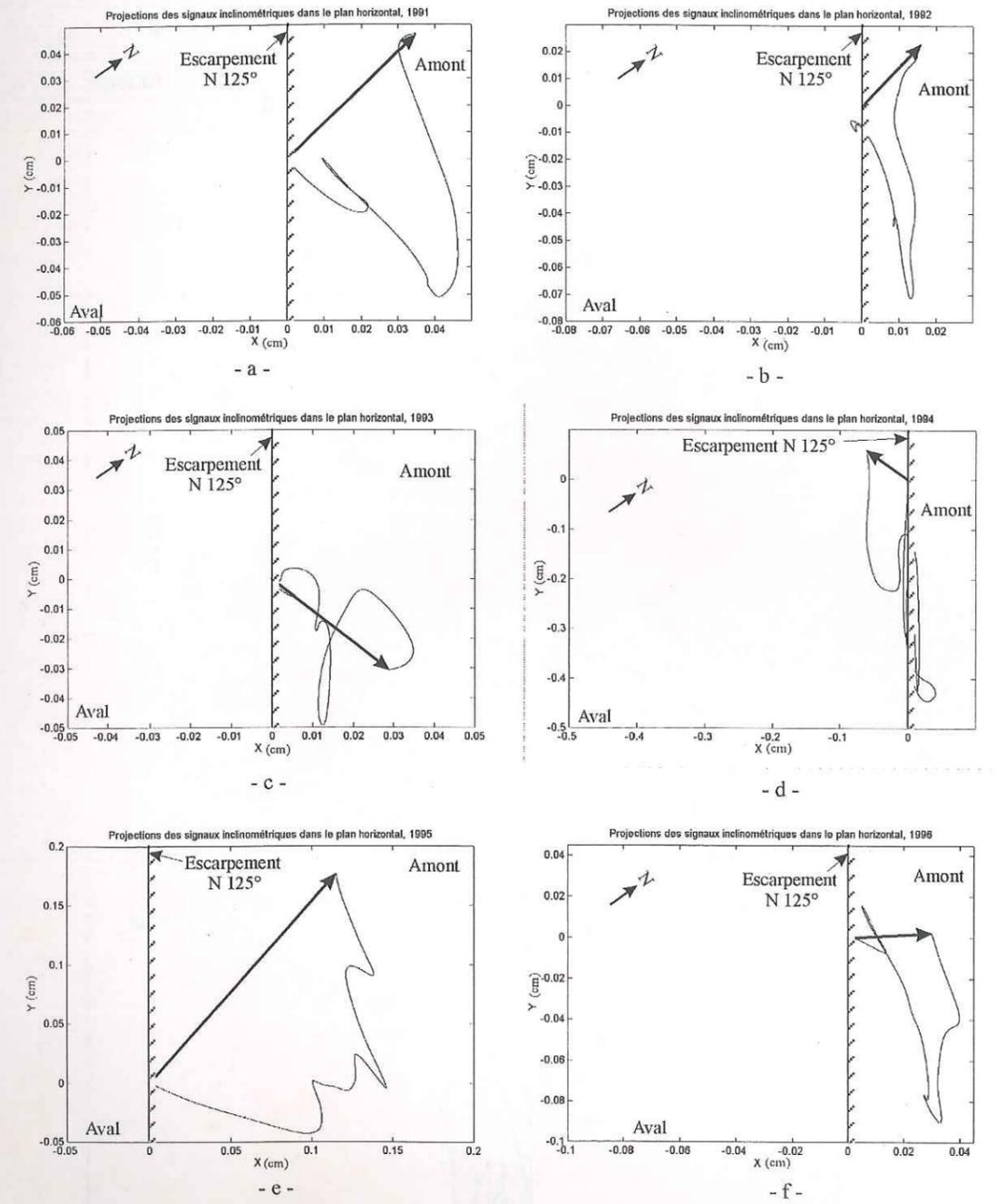
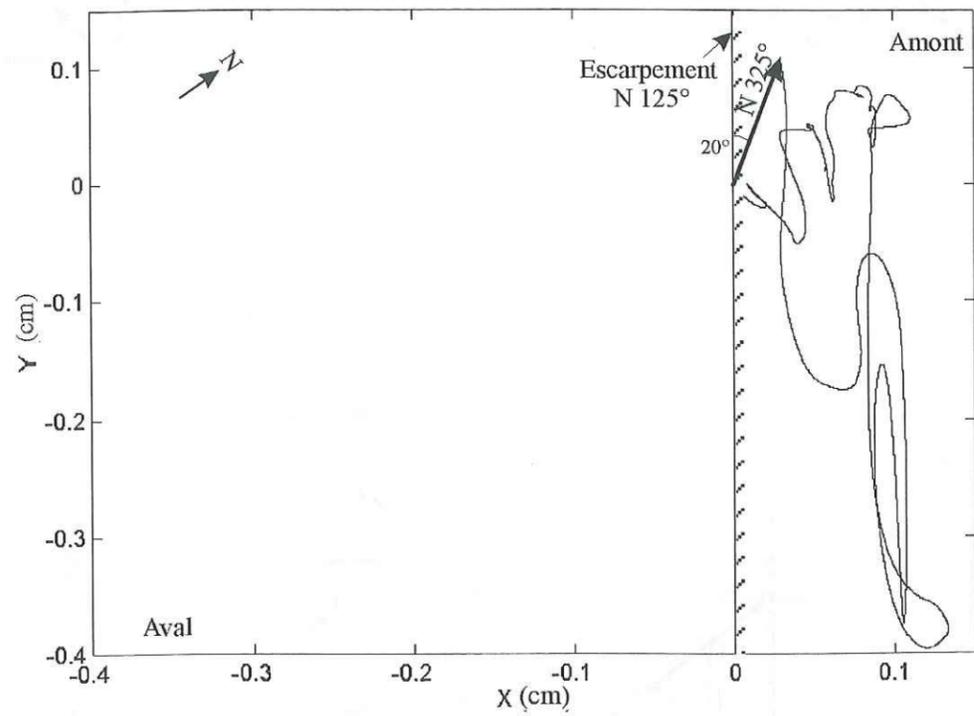


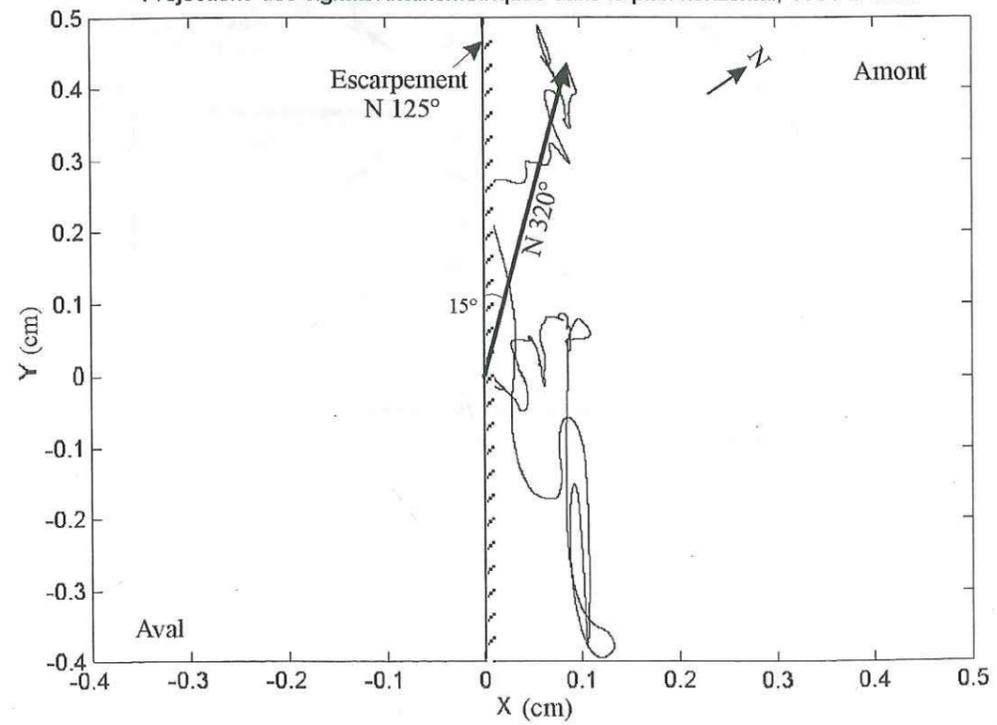
Fig. 20 - Projections dans le plan horizontal des signaux inclinométriques filtrés des hautes fréquences, station FALE. (a) : 1991 ; (b) : 1992 ; (c) : 1993 ; (d) : 1994 ; (e) : 1995 ; (f) : 1996 ; (g) : 1991 à 1994 ; (h) : 1991 à 1996.

Projections des signaux inclinométriques dans le plan horizontal, 1991 à 1994



- g -

Projections des signaux inclinométriques dans le plan horizontal, 1991 à 1996



- h -