

Auscultation génie civil des conduites forcées du parc hydraulique EDF

Civil engineering monitoring of EDF penstocks portfolio

Philippe Bryla, Alexis Piron, Marion Parise, Yannick Abadie
EDF/DTG, 21 avenue de l'Europe, BP41, 38040 GRENOBLE
philippe.bryla@edf.fr, alexis.piron@edf.fr, marion.parise@edf.fr, yannick.abadie@edf.fr

MOTS CLÉS

Topographie, extensométrie, canne invar, mouvement de terrain, massif, pilette, conduite forcée, détensionnement, calcul, contrainte.

RÉSUMÉ

Sur le parc EDF, quelques conduites forcées sont soumises à des mouvements du terrain et font en conséquence l'objet d'une surveillance particulière. Cette communication décrit les moyens de mesure mis en œuvre dans cette surveillance, notamment la topographie et l'extensométrie.

On décrit ensuite de façon générale les différents types de mouvements de terrain susceptibles d'occasionner des désordres sur les conduites forcées ainsi que les critères d'admissibilité des contraintes.

Le processus de surveillance est ensuite explicité sur le cas de la conduite forcée d'Eygliers, qui fait l'objet d'une surveillance particulière au pas annuel depuis 1994. On illustre cette surveillance, dans le cas d'Eygliers, par quelques résultats de calcul et quelques mesures topographiques et extensométriques : ces résultats montrent comment se complètent les mesures topographiques, les calculs et les mesures extensométriques. Ce processus de surveillance implique de coordonner dans la durée des compétences en génie civil, en topographie et en mécanique.

ABSTRACT

Some EDF penstocks undergo ground movements and deserve therefore a specific monitoring. This paper describes the devices used in this monitoring, including topography and extensometers.

The different types of landslides susceptible to cause disorders in the penstock and the criteria for allowable stresses are then generally described.

The monitoring process is then explained in the case of the Eygliers penstock, which has been specifically monitored yearly since 1994. This surveillance is illustrated, in the case of Eygliers, by presenting some calculation results and some topographic and extensometric measurements : these results show how topographic measurements, calculations and strain gauge measurements complement each other. This monitoring process also implies to coordinate and maintain over time skills in civil engineering, topography and mechanics.

1. INTRODUCTION

Le parc EDF comprend environ 550 « conduites forcées », pour un total de 320 km de linéaire dont 260 km pour les seules conduites forcées (CF) principales en aérien ou en souterrain. La maintenance et la surveillance de ces ouvrages sont définies au niveau national par le métier hydromécanique, en coordination avec le métier génie civil.

Depuis de nombreuses années, quelques conduites forcées (moins de 5% du parc) soumises à des mouvements de terrain font l'objet d'une surveillance particulière. Au total, sur le parc EDF, ce type de surveillance concerne moins d'une quinzaine d'ouvrages.

Un groupe de travail national piloté par le STEEGB, et auquel a participé EDF, a été chargé de réfléchir à l'amélioration de la sûreté des conduites forcées. Ce groupe de travail a émis des recommandations [3] qui devraient être transformé ultérieurement en une réglementation concernant les conduites forcées dans l'esprit de celle définie depuis 2007 sur les barrages et leurs organes de sécurité. En parallèle, des critères d'acceptabilité des contraintes ont été mis à jour dans le référentiel interne EDF. Ces critères permettent de traiter les cas d'augmentation progressive de contrainte liés à des déplacements de massifs ou d'appuis.

Cette communication rappelle tout d'abord les principales techniques de mesure mises en œuvre pour la surveillance des conduites forcées affectées par un déplacement du terrain. Elle décrit ensuite le processus général de traitement des données en explicitant les critères d'admissibilité des contraintes. Enfin, elle illustre cette surveillance et plus globalement le processus comprenant la mesure, le stockage des données et leur traitement sur le cas de la conduite forcée d'Eygliers (conduite forcée mécano-soudée à coudes libres).

2. EFFETS DES MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LES CONDUITES FORCEES

Les effets de mouvements de terrain sur une conduite forcée induisent principalement des accumulations de contraintes dans la tôle qui se traduisent par des déformations localisées ou globales de la conduite. Suivant les situations, on peut trouver plusieurs cas de figure. Le tableau ci-après fait le lien entre les désordres du supportage et des massifs d'ancrage résultant directement des mouvements de terrain et les accumulations de contraintes et de déformations au niveau de la tôle de la conduite forcée.

Si ces déformations ou accumulations de contraintes ne sont pas maîtrisées, les conséquences redoutées peuvent être l'apparition d'un « pli » dans un coude ou à la sortie d'un encastrement ou une déformation plastique d'ensemble d'une section ayant pour effet de réduire la réserve plastique du matériau, donc sa marge à la rupture. Ainsi, dès lors qu'un mouvement de terrain est connu ou suspecté sur une conduite forcée, il est essentiel de surveiller l'évolution de ce mouvement et de son effet sur la déformation de la tôle de la conduite.

N°	Désordre affectant les massifs et/ou le supportage	Effets sur les tronçons	
		Tronçon à coudes ancrés	Tronçons à coudes libres
1.1	Glissement des massifs suivant la pente avec différentiel de vitesse Le massif aval descend plus rapidement que le massif amont	Accumulation de traction pure dans les tuyaux	Accumulation de traction pure dans les tuyaux Tendance au décollement des coudes « rentrants »
1.2	Glissement des massifs suivant la pente avec différentiel de vitesse Le massif aval descend plus lentement que le massif amont	Accumulation de compression pure dans les tuyaux	Accumulation de compression pure dans les tuyaux Tendance au décollement des coudes « sortants »
1.3	Glissement d'un ou plusieurs massifs suivant une direction différente de l'axe de la conduite	Accumulation de contrainte de flexion longitudinale, maximale en sortie de massif	
2	Poussée latérale du sol (via les berceaux/pilettes) sur un tronçon de conduite entre 2 massifs	Accumulation de contrainte de flexion longitudinale	
3	Basculement d'un massif	Accumulation de contrainte de flexion longitudinale, maximale à l'encastrement Poinçonnement local à la 1 ^{ère} pilette du côté où le massif bascule vers le sol	
4.1	Tassement différentiel du terrain sous une pilette	Perte du supportage du tuyau par la pilette Augmentation de la contrainte de flexion longitudinale (non reprise du poids)	
4.2	Gonflement du terrain sous une pilette	Risque de concentration de la reprise du poids sur cette pilette (avec décollement pilettes-tuyau de part et d'autre) Augmentation de la contrainte de flexion longitudinale	

Tableau 1 : Liens entre les désordres affectant le terrain et augmentation des contraintes dans les tronçons de conduite

3. TECHNIQUES D'AUSCULTATION DES CONDUITES FORCEES EN GENIE CIVIL ET MECANIQUE

L'essentiel du suivi consiste en des mesures topographiques, de déformation (extensométrie par cannes invar par exemple), d'écartement de fissure (en galerie ou sur des massifs en béton), de relaxation de joint lors d'opérations de détensionnement, de mesure de tension dans des tirants d'ancrage dans certains cas particuliers.

Les sections qui suivent décrivent les principales technologies employées pour l'auscultation génie civil des conduites forcées.

3.1 Topographie

Les mesures topographiques [1] sont généralement réalisées sur les massifs bétons d'appui et de blocage des CF, sur des ouvrages (exemple : usine), ou sur le terrain. Des mesures de planimétrie et de nivellement peuvent ainsi être réalisées pour déterminer les déplacements (angles et distances) à partir d'un canevas de piliers, ou de polygonation le long de la conduite dans les zones boisées. Sur les conduites de grande longueur et suffisamment dégagées, le système GPS statique peut également être utilisé.

Pendant une opération de détensionnement de la CF, un suivi peut être réalisé en effectuant une mesure en continu avec théodolite motorisé et logiciel d'auscultation.

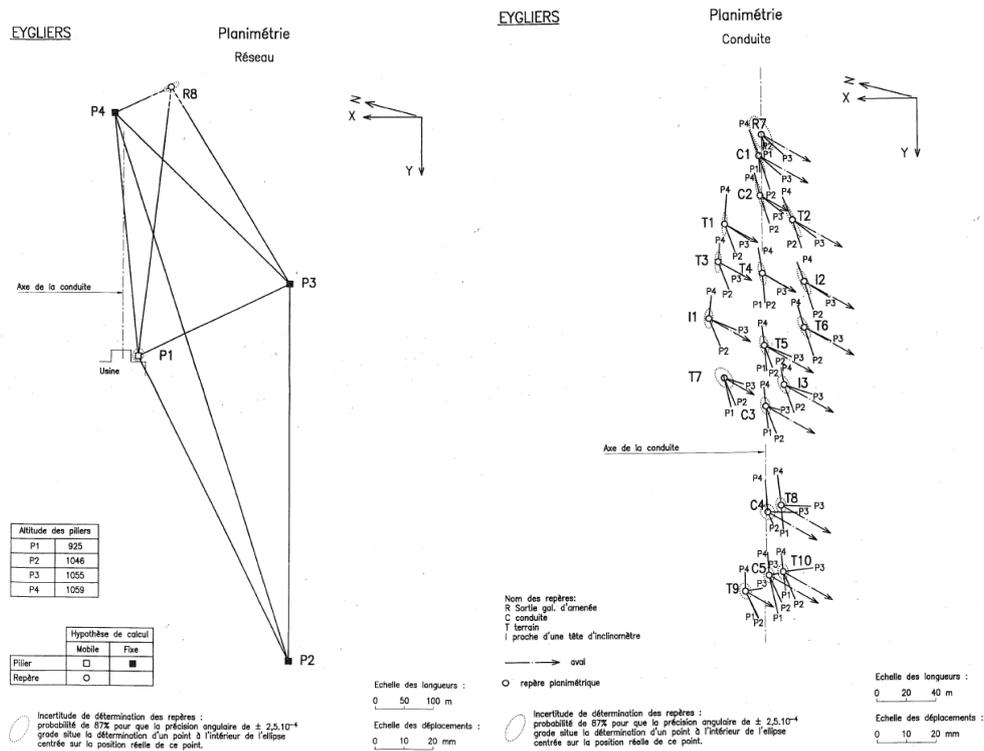


Figure 1 : Exemple de dispositif topographique de planimétrie : cas de la CF d'Eygliers

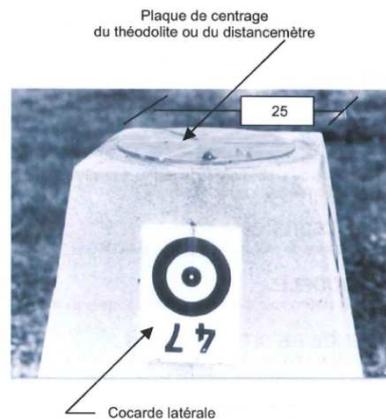


Figure 2 : Pilier-station pour théodolite - modèle normalisé EDF

Les schémas de la figure 1 décrivent le dispositif planimétrique de la CF d'Eygliers. La détermination des déplacements planimétriques et verticaux des repères topographiques de la CF nécessite la mesure et le calcul des coordonnées :

- d'un réseau de piliers,
- de l'ensemble des repères sur le versant et la conduite.

Dans cet exemple, les piliers sont équipés de plaques de centrage pour théodolite et de cocardes latérales pour les visées d'intersection. Les visées sur chaque repère (en inox) sont prises sur le sommet de tiges soudées sur la conduite ou scellées dans des massifs pyramidaux en béton.

La fréquence de ces mesures de planimétrie et de nivellement peut varier d'une CF à une autre : annuelle ou pluriannuelle. Elles sont réalisées par le Centre Régional d'Auscultation d'EDF/DTG. Elles renseignent sur les différents déplacements radiaux (amont/aval) et tangentiels (rive droite/rive gauche) : accélération, ralentissement, orientation.

Lorsque l'incertitude de mesure résultant de ce type de positionnement est jugée trop importante pour les besoins du suivi, on peut être amené à effectuer des mesures topographiques plus spécifiques. Par exemple, pour des conduites forcées ne comportant pas de coudes libres (comme c'est le cas à Malgovert), il peut être

plus avantageux de se limiter à une mesure de l'évolution de la distance entre massifs : la mesure est plus simple et plus précise pour les besoins du calcul mécanique.

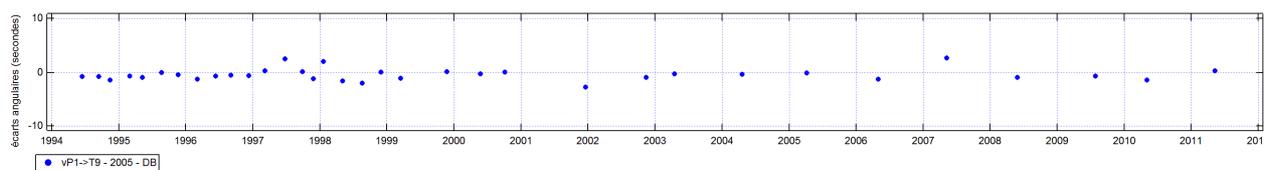


Figure 3 : Exemple de série chronologique sur une mesure planimétrique à Eygliers

3.2 Extensométrie

Les mesures de déplacement relatif et de déformation des conduites sont réalisées par extensométrie essentiellement à l'aide de cannes en acier invar, matériau possédant un coefficient de dilatation très faible. Le principe de ce dispositif consiste à mettre en place des sections de mesure de 1 m de longueur puis à relever périodiquement, à l'aide d'une canne de convergence, les variations de longueur des sections de mesure.

Ce type de dispositif est essentiellement utilisé pour les mesures de déformations mécaniques. Des cannes invar sont alors réparties de façon équidistante (à 90°) sur la circonférence de la conduite forcée : voir figure 3. C'est à partir de ces déformations longitudinales que l'on peut déduire les contraintes mécaniques longitudinales supportées par l'acier de la conduite.

LEGENDE: (conduite vue d'aval)

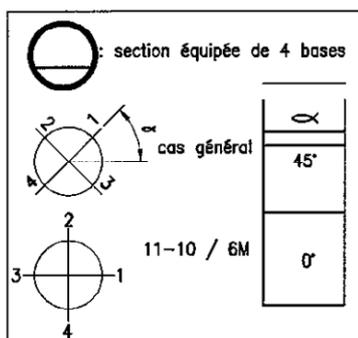


Figure 4 : Repérage des bases invar sur une section de conduite forcée

Généralement, les sections équipées de bases invar sont situées de part et d'autre des massifs d'ancrage lorsque ces derniers ont un mouvement de translation et/ou de basculement susceptible d'occasionner une contrainte de traction/compression ou de flexion maximale à l'encastrement. Sur des tronçons comportant des coudes libres, des sections sont également équipées de part et d'autre des coudes, comme c'est le cas sur la CF d'Eygliers (Fig. 11 du §5.1).

Les caractéristiques techniques de la canne invar sont les suivantes :

- longueur : 1 m
- course de mesure : $\pm 12,5$ mm
- résolution : 0,01 mm
- précision : $\pm 0,15$ mm
- poids : 2,5 kg



Figure 5 : Canne invar et extensomètre de parement modifié sur CF

Les cannes invar peuvent aussi servir à la surveillance génie civil des CF comme c'est le cas à Nentilla (Fig. 6) où les extensomètres de parement utilisés pour les bâtiments des centrales nucléaires, basés sur le même principe, ont été légèrement modifiés pour suivre, provisoirement, le déplacement d'un massif par rapport au rocher. Ici, la mesure est réalisée avec un micromètre : voir figure 3.



Figure 6 : Mesure de déplacement massif/rocher à Nentilla

3.3 Inclinomètres

Les inclinomètres permettent de mesurer au cours du temps des inclinaisons à différentes profondeurs dans le terrain. Ce dispositif est constitué d'un capteur (clinomètre) mono-axial ou bi-axial, qu'on va introduire le long d'un tube inclinométrique (tronçons raccordés entre eux par des manchons) lors de la mesure. Placé dans un forage, le tube inclinométrique est rendu solidaire du terrain et suit ainsi le mouvement des couches. Plusieurs capteurs peuvent être utilisés au travers d'une chaîne clinométrique, afin de réaliser des mesures d'angles en plusieurs points. Ils permettent notamment de suivre d'éventuels glissements de terrain et des basculements de massifs.

3.4 Suivi des fissures

Des structures en béton ou maçonneries de la conduite forcée (galeries, massifs, pilettes) peuvent faire l'objet d'une fissuration qui doit être auscultée. Pour cela, des fissuromètres type vinchon sont la plupart du temps employés. Ces dispositifs permettent de mesurer selon 3 axes orthogonaux les déplacements relatifs de deux structures ou parties rapprochées de structure, séparées par un joint ou une fissure. Comme illustré sur la photo 4 ci-dessous, l'écartement d'ergots à calotte sphérique est mesuré au pied à coulisse qui doit être vérifié métrologiquement. Cet appareil existe en version télémesurable.

Les principales caractéristiques techniques des dispositifs de suivi de fissures sont les suivantes :

- dimensions : 201 x 180 x 60 mm
- mesures exécutées sur des ergots usinés constituant 3 bases de dimensions approximatives 100, 80 et 60 mm
- précision de la mesure : $\pm 0,1$ mm



Figure 7 : Vinchon sur massif d'ancrage à Eyglies

3.5 Auscultation des tirants d'ancrage

Des tirants d'ancrage peuvent être réalisés pour permettre la stabilisation des massifs de la CF dans le terrain. Le suivi de la tension résiduelle dans ces tirants [2] est généralement réalisé avec des cellules de charges et/ou un pesage (technique d'évaluation de la tension résiduelle dans un tirant par soulèvement de la tête d'ancrage avec un vérin hydraulique). Cette opération de pesage n'est possible que si le tirant possède de la partie libre.

Deux technologies principales existent concernant ces capteurs, pour lesquels certains fabricants annoncent une précision inférieure à 0,1% de la pleine échelle :

- capteurs hydrauliques,
- capteurs électriques (à corde vibrante ou jauge de déformation).



*Figure 8 : Exemples de cellules de charge - cellule à corde vibrante
manufacturée par Géo Instrumentation (gauche) et cellule hydraulique manufacturée par Glötzl (droite)*

4. METHODOLOGIE POUR LA SURVEILLANCE DES CONDUITES FORCES SOUMISES A DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

4.1. Organisation du processus de surveillance

Le processus de surveillance d'une conduite forcée est rythmé sur une périodicité dépendant de la cinétique du mouvement de terrain et généralement comprise entre 1 et 5 ans. La figure 9 ci-après détaille les principales étapes de la surveillance.

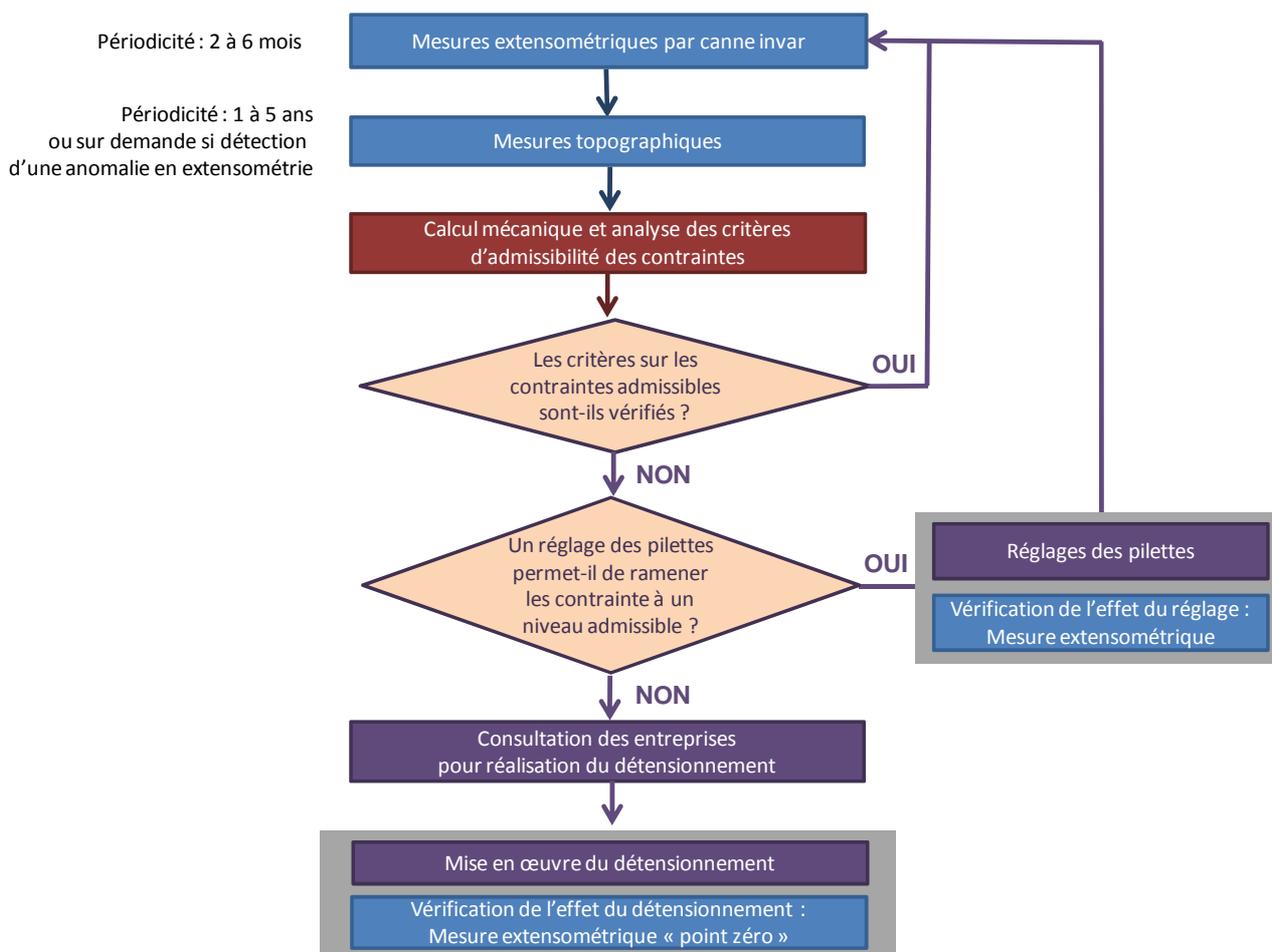


Figure 9 : Processus de surveillance

Les mesures extensométriques, effectuées à des pas de temps plus rapprochés (en général 2 à 10 mesures par période), assurent un suivi permettant d'être alerté suffisamment tôt d'une éventuelle accélération du mouvement de terrain. La période de surveillance topographique est adaptée à la cinétique du mouvement de terrain et est généralement comprise entre 1 et 5 ans.

Les mesures topographiques sont effectuées une fois par période. Cependant, lorsqu'une anomalie est détectée à l'issue d'une mesure extensométrique, une mesure topographique et une inspection visuelle attentive des supports peut être déclenchée afin d'identifier l'origine du désordre. On cherche alors à identifier ou à confirmer au moins qualitativement l'origine de l'anomalie : mouvement de translation ou de rotation d'un massif, apparition d'un point dur au niveau d'un ou plusieurs appuis, translation ou basculement d'une pilette...

Dès lors que les mesures topographiques ont été réalisées, un calcul des contraintes peut être effectué et la tenue des critères sur les contraintes est examinée. On calcule l'état de contrainte dans la conduite en tenant compte des déplacements constatés des massifs depuis le dernier détensionnement, auxquels on ajoute le déplacement extrapolé sur une période supplémentaire, afin de vérifier que les critères seront toujours respectés à la fin de la période suivante d'exploitation.

Si le respect des critères sur les contraintes n'est pas vérifié, on examine dans un premier temps si des réglages de pilettes peuvent suffire à relaxer une partie des contraintes de flexion pour revenir dans les critères. Pour ce faire, des calculs paramétriques sont effectués pour comparer différents scénarios de réglages des pilettes. Si le calcul est satisfaisant, l'exploitant se charge de régler les pilettes conformément aux prescriptions de l'ingénierie et effectue une mesure extensométrique *a posteriori* afin de vérifier que la relaxation des contraintes est effective et suffisante.

Si le réglage des pilettes n'est pas suffisant pour satisfaire les critères sur les contraintes, un détensionnement doit être effectué. Suivant les cas, ce détensionnement peut consister :

- en un simple desserrage de joints réglables suivi d'un resserrage (cas de la plupart des tronçons des conduites forcées de Malgovert équipés de joints réglables, pour certains avec possibilité de rattraper la flexion) ;
- en une coupe de la conduite, avec enlèvement d'une couronne de tôle dans le cas d'un tronçon en compression ou ajout d'une couronne de tôle dans le cas d'un tronçon en traction.

Avant et immédiatement après le détensionnement, des mesures extensométriques sont réalisées successivement conduite vide et conduite pleine afin de vérifier que les contraintes ont été correctement relaxées.

4.2. Critères d'acceptation des contraintes

Des critères d'admissibilité des augmentations de contraintes ont d'abord été définis en s'appuyant sur la démarche d'analyse des contraintes du CODAP (code français des appareils à pression). Ces critères ont été élaborés de façon à limiter les variations de contraintes entre les différents états de chargement de la conduite forcée et afin d'éviter un cumul de plastification en membrane sur le long terme. Dans cette analyse des contraintes, on distingue les contraintes primaires résultant d'efforts imposés (pression, poids propre) et les contraintes secondaires dont la principale caractéristique est qu'elles « s'autolimitent » dès que se produit une déformation plastique de la structure.

En général, les contraintes résultant des déplacements imposés dus à des mouvements du terrain sont de nature secondaire : lorsque le déplacement conduit à une plastification, cette dernière limite l'augmentation de la contrainte par adaptation plastique de la structure. Cependant, cette classification n'est pas systématique. Par exemple, un mouvement de terrain conduisant à faire décoller la conduite de ses appuis peut conduire à modifier la contrainte de flexion de la conduite due au poids entre appui, or il s'agit là d'une contrainte primaire.

Les contraintes résultant des mouvements du terrain sont essentiellement longitudinales. Elles peuvent être décomposées en :

- des contraintes de traction ou compression pure, résultant des mouvements de translation des massifs suivant l'axe de la conduite ;
- des contraintes de flexion de poutre résultant des mouvements des pilettes dans le plan vertical et de l'éventuel basculement des massifs ;
- des contraintes locales de flexion de coque survenant principalement dans les plis des coudes.

La contrainte de référence en pleine tôle est définie conformément au référentiel de diagnostic des conduites forcées interne EDF et tient compte des caractéristiques mécaniques des matériaux.

Le tableau ci-après résume ces critères appliqués pour l'analyse des contraintes :

- f désigne la contrainte de référence, correspondant à la contrainte admissible en situation normale ;
- σ_{eq} désigne la contrainte équivalente (de Tresca ou de Von-Mises) ;
- P_m désigne la contrainte primaire de membrane résultant de la pression interne, de l'effet de fond ou de Poisson (suivant les conditions de bridage) et du poids de l'eau et du tuyau ;
- P_b désigne la contrainte primaire de flexion ;
- $Q_{m,M}$ désigne la contrainte secondaire d'origine mécanique due aux déplacements du terrain ;
- $Q_{m,th}$ désigne la contrainte d'origine thermique, considérée comme secondaire ;
- Q_b désigne la contrainte secondaire de flexion, correspondant généralement à des zones singulières ou de raccordement (proximité d'un raidisseur, bride, frette, sortie de massif...).
- R_e et R_m désignent respectivement la limite d'élasticité et la limite à rupture de l'acier,
- R et e désignent respectivement le rayon du tuyau et son épaisseur.

N° du critère	Chargements pris en compte	Nature des contraintes calculées	Inégalités à respecter
1	Pression interne, effet de Poisson ou effet de fond, poids du tuyau et de l'eau (P_m)	Contrainte primaire générale de membrane	$\sigma_{eq}(P_m) \leq f$
2	Chargements du cas 1 (P_m) Déplacement imposé ($Q_{m,M}$)	Contrainte de membrane locale	$\sigma_{eq}(P_m + Q_{m,M}) \leq 1,5.f$ en tout point $\sigma_{eq}(P_m + Q_{m,M}) \leq 1,1.f$ sur $L < \sqrt{R.e}$
3	Chargements du cas 1 (P_m) Déplacement imposé ($Q_{m,M}$)	Contrainte totale (membrane + flexion) locale hors thermique	$\sigma_{eq}(P_m + Q_{m,M} + P_b) \leq 1,5.f$
4	Chargements du cas 1 (P_m) Déplacement imposé ($Q_{m,M}$) Ecart thermique ($Q_{m,th}$)	Variation de la contrainte totale (primaire + secondaire) entre 2 situations	$\Delta\sigma_{eq}(P_m + Q_{m,M} + Q_{m,th} + P_b + Q_b) \leq 3.f$
4.bis	Chargements du cas 1 (P_m) Déplacement imposé ($Q_{m,M}$) Ecart thermique ($Q_{m,th}$)	Contrainte totale (primaire + secondaire) locale	$\sigma_{eq}(P_m + Q_{m,M} + Q_{m,th} + P_b + Q_b) \leq 1,5.f$

Tableau 2 : Critères d'amissibilité des contraintes

Pour une conduite soumise à mouvements de terrain, il est nécessaire de vérifier que l'ensemble des critères (1, 2, 3, 4) ou (1, 2, 3, 4.bis) sont vérifiés. En pratique, le critère 4.bis sur la contrainte totale locale est plus sévère que le critère 4. Ce critère présente cependant deux avantages sur le critère 4 :

- Il est plus facile à appliquer, car il ne nécessite pas de calculer une contrainte équivalente portant sur la différence entre 2 états de chargement pour lesquels les conditions aux limites peuvent différer (par exemple nombre de pilettes en contact avec la CF différent suivant le chargement) ;
- Il permet d'éviter tout risque de plastification, même locale, entre deux détensionnements et donc tout cumul de déformation plastique sur le long terme.

4.3. L'application des critères : deux approches complémentaires

En fonction du type d'instrumentation en place sur la conduite forcée, l'application des critères explicités au §4.2. peut nécessiter la mise en œuvre d'un modèle de calcul. Dans ce cas, les données topographiques constituent des données d'entrée du modèle mécanique : il s'agit de déplacements imposés au niveau des encastremets aux massifs.

Lorsqu'on dispose de mesures extensométriques sur des sections instrumentées pour les cannes invar, on obtient une mesure directe de la déformation de la conduite sur ces sections qui permet de calculer une variation de contrainte longitudinale locale. Si σ_i désigne la contrainte calculée à l'instant t sur une génératrice d'une section instrumentée (voir repérage de la figure 3) et σ_{i0} la contrainte calculée juste après le dernier détensionnement précédent l'instant t (les deux étant prises conduite pleine), on peut alors calculer :

- $\sigma_m = \frac{1}{4}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4)$, contrainte moyenne brute à l'instant t ,
- $\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{i0}$, l'écart de contrainte sur une génératrice depuis le dernier détensionnement,
- $\Delta\sigma_m = \frac{1}{4}(\Delta\sigma_1 + \Delta\sigma_2 + \Delta\sigma_3 + \Delta\sigma_4)$, l'incrément de contrainte moyenne axiale cumulée sur une section instrumentée depuis le dernier détensionnement,
- $\Delta\sigma_f = \frac{1}{2}\sqrt{(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_4 - \Delta\sigma_2)^2}$, l'incrément de contrainte de flexion cumulée depuis le dernier détensionnement, sur une section instrumentée.

Cependant, ces données extensométriques ne peuvent pas toujours être exploitées seules directement pour porter un jugement sur l'admissibilité des contraintes dans la conduite forcée, notamment en présence de coudes libres, pour les raisons suivantes :

- Les contraintes maximales susceptibles de dépasser les critères énoncés au §4.2 se trouvent généralement dans les coudes ou aux encastremets, donc en dehors des sections instrumentées en cannes invar ;
- Les déformations enregistrées par les cannes invar peuvent être perturbées par des variations « saisonnières » dépendantes des conditions de température de la tôle (laquelle dépend de la température de l'air, de la température de l'eau et du débit turbiné).

C'est pourquoi on applique en général en 1^{ère} ligne le modèle mécanique de calcul permettant d'évaluer les contraintes dans la tôle en fonction des déplacements des massifs déduits des mesures topographiques. Les mesures extensométriques par cannes invar constituent alors une donnée redondante permettant de vérifier le modèle mécanique, notamment les hypothèses concernant les conditions aux limites. Les mesures extensométriques, effectuées avec une périodicité plus rapprochée (en général tous les 2 mois), permettent alors de détecter précocement une accélération brutale du mouvement de terrain.

5. EXEMPLE DE LA SURVEILLANCE DE LA CONDUITE FORCEE D'EYGLIERS

5.1. Présentation de la conduite forcée d'Eyglers et son instrumentation

La conduite forcée d'Eyglers, d'un diamètre de 2400 mm est en acier E355 (Re = 355 MPa, Rm > 510 MPa). Elle comporte deux tronçons aériens (M1M2 et M3M4) et un tronçon enterré (M2M3) : voir photo 6 et figure 5. Chacun de ces tronçons est encasté entre deux massifs à ses extrémités. On distingue :

- Le tronçon inférieur, d'une longueur de 180 m environ, situé entre les massifs M1 et M2 et comportant deux coudes notés S1 et S2. Ce tronçon comporte une quinzaine de pilettes régulièrement espacées.
- Le tronçon supérieur, d'une longueur de 40 m, situé entre les massifs M3 et M4, comportant un seul coude noté S6. Ce tronçon comportait à l'origine 2 appuis situés de part et d'autre du coude S6.
- Entre ces 2 tronçons aériens, un tronçon enterré d'une longueur de 135 m environ comporte deux coudes peu marqués, notés S3 et S4.

La conduite repose sur un terrain qui subit un glissement. Ce glissement affecte une lentille de terrain principalement comprise entre les massifs M3 (aval du tronçon supérieur) et M2 et dans une moindre mesure la zone comprise entre M2 et M1 avec une décroissance de l'amplitude du mouvement lorsqu'on s'approche du massif M1. Au niveau des massifs M2 et M3, le mouvement du terrain est perçu comme la combinaison d'une dérive du terrain dans une direction d'environ 52° par rapport à l'axe de la conduite et d'un tassement. Le mouvement du terrain est suivi depuis 1994 par des mesures topographiques (planimétrie et nivellement) complétées par des bases extensométriques invar sur plusieurs sections de la conduite.

La photo 6 matérialise la direction du glissement dans la zone M2M3.

La figure 5 décrit le positionnement de l'instrumentation liée aux 2 tronçons aériens de la CF. Au total, cette instrumentation se compose des éléments suivants :

- 9 bases extensométriques, chacune constituée de 4 paires de plots sur la tôle de la conduite ;
- 5 repères topographiques liés à la conduite ou aux massifs (notés C1 à C5) permettant la mesure des déplacements (planimétrie et nivellement) ;
- 10 repères topographiques (repérés T1 à T10) permettant la mesure du déplacement (planimétrie et nivellement) de points du terrain à proximité de la CF ;
- 3 inclinomètres (repérés I1 à I3) ;
- 2 dispositifs de suivi des fissures sur le massif supérieur.

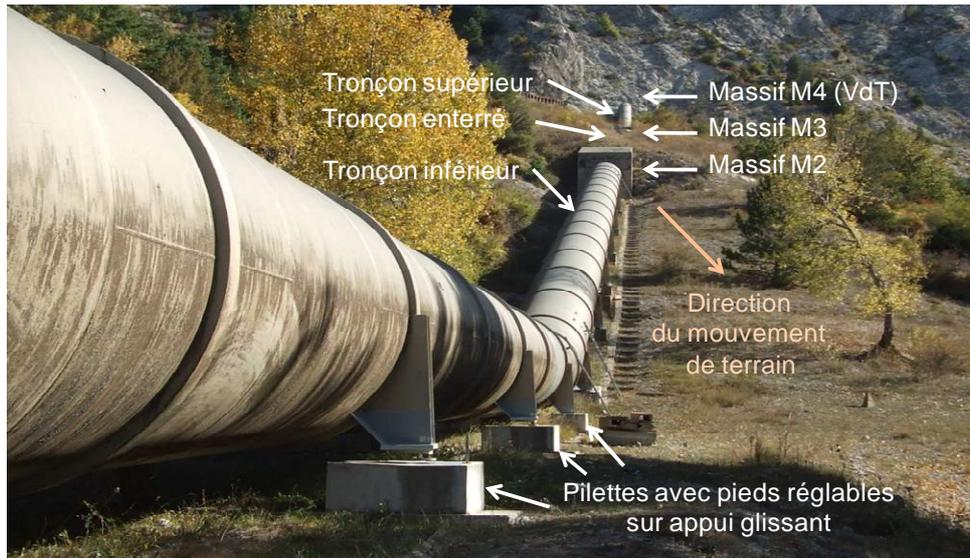


Figure 10 : Conduite forcée d'Eygliers – vue vers l'amont depuis l'aval du coude S2 (tronçon inférieur)

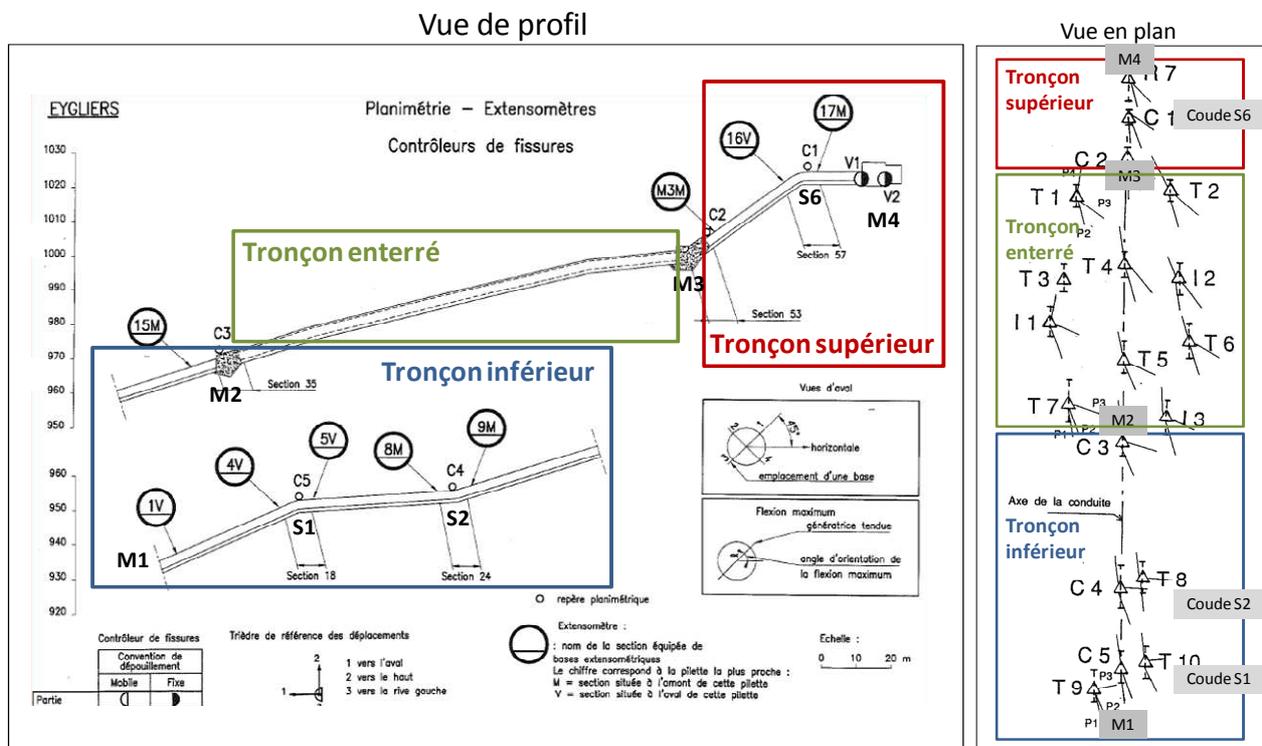


Figure 11 : Instrumentation de la conduite forcée d'Eygliers

5.2. Organisation du processus de surveillance de la conduite forcée d'Eygliers

Au début des années 2000, des irrégularités de mouvement du terrain d'une année sur l'autre, semblant corrélées à la pluviométrie, ont été constatées. Un mouvement annuel plus rapide a été noté sur la période 1999-2001 par rapport à la période 1995-1999 : voir figure 6. L'organisation de la surveillance, qui obéissait initialement à une périodicité fixe de détensionnement, a par conséquent été modifiée depuis cette période. Le choix de réaliser ou non un détensionnement ne répond pas à une périodicité fixée mais dépend de l'état mécanique de la conduite qui est réévalué chaque année.

Depuis 2002, le processus de surveillance de la conduite forcée d'Eygliers respecte donc le processus décrit sur le diagramme de la figure 4. Compte tenu de la cinétique du mouvement de terrain, les mesures topographiques sont effectuées au pas annuel, généralement au printemps. Les mesures extensométriques, effectuées tous les 2 mois, assurent un suivi permettant d'être alerté suffisamment tôt d'une éventuelle accélération du mouvement de terrain. Cependant, lorsqu'une anomalie est détectée à l'issue d'une mesure extensométrique, une mesure topographique peut être déclenchée afin d'identifier l'origine du désordre.

Dès lors que les mesures topographiques ont été réalisées, le calcul des contraintes peut être effectué et la tenue des critères sur les contraintes est examinée. On calcule l'état de contrainte dans la conduite en tenant compte des déplacements constatés des massifs depuis le dernier détensionnement, auxquels on ajoute le déplacement extrapolé sur une année supplémentaire, afin de vérifier que les critères seront toujours respectés à la fin de la prochaine période d'exploitation. Si le respect des critères sur les contraintes n'est pas garanti jusqu'à l'année suivante, un détensionnement doit être effectué.

En général, le détensionnement est réalisé à l'automne. Avant et immédiatement après ce détensionnement, des mesures extensométriques sont réalisées successivement conduite vide et conduite pleine afin de vérifier que les contraintes ont été correctement relaxées lors de la coupe de la conduite.

5.3. Évolution des déplacements et variations des déformations mesurées

La figure 6 ci-dessous fait la synthèse des principales mesures topographiques réalisées sur la CF d'Eygliers depuis 1994. On constate globalement :

- Un rapprochement des massifs M1 et M2 (en moyenne 15,6 mm/an) induisant une mise en compression du tronçon inférieur ;
- Un éloignement des massifs M2 et M3 (en moyenne 3,3 mm/an) induisant une mise en traction progressive du tronçon enterré M2M3 ;
- Un éloignement progressif des massifs M3 et M4 (en moyenne 16,0 mm/an) induisant une mise en traction du tronçon supérieur.

La vitesse du mouvement est globalement régulière, bien que l'on identifie quelques périodes d'accélération du glissement, notamment la période 2000-2002.

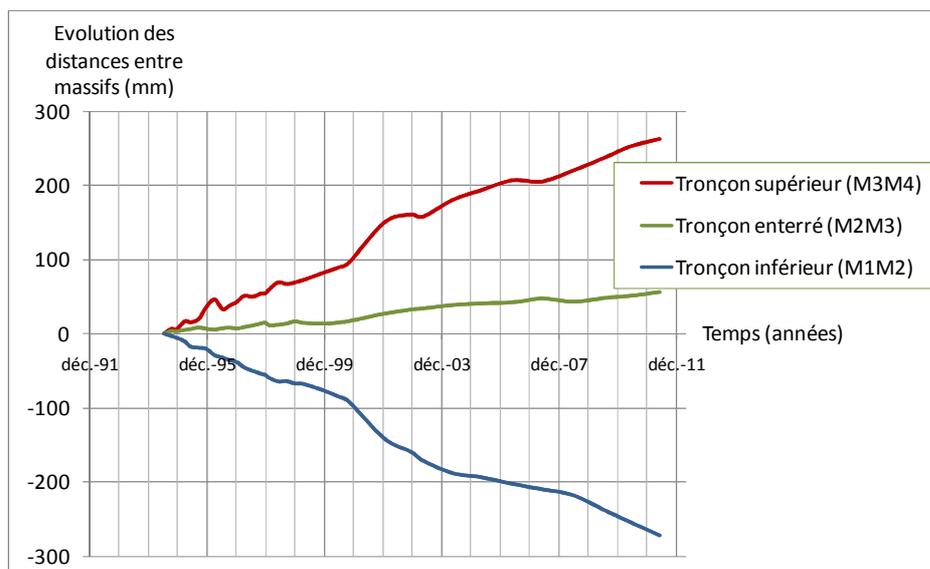


Figure 12 : Évolution des distances entre massifs sur les 3 tronçons de la CF d'Eygliers

5.4. Exemple d'analyse des contraintes

Un modèle de calcul aux éléments finis de type « coque quadratique » a été élaboré pour chacun des tronçons aériens de conduite forcée. Les raidisseurs ont été modélisés par des éléments de poutre. Le modèle de calcul tient compte de non linéarités de comportement dues aux grands déplacements de la structure.

Les figures 13 et 14 montrent un exemple de résultat de calcul après un cumul de 4 années de mouvement de terrain. Pour chacun des tronçons inférieur (figure 13) et supérieur (figure 14), on représente la contrainte équivalente de Tresca totale en peau résultant de l'application simultanée des chargements suivants :

- le chargement normal de la conduite forcée (pression, poids) ;
- le déplacement cumulé depuis le dernier détensionnement imposé par les massifs ;
- l'extrapolation d'une année supplémentaire de déplacement « moyen » des massifs ;
- le chargement thermique dont le cumul avec le mouvement du terrain est le plus défavorable pour la conduite :
 - une variation de température de +10°C au dessus de la température de clavage pour le tronçon inférieur ;
 - une variation de température de -20°C au dessous de la température de clavage pour le tronçon supérieur

Les déplacements des massifs M2 et M3 imposés dans les 2 modèles aux éléments finis sont directement déduits des mesures topographiques. Les massifs M1 et M4 sont considérés fixes. Le mouvement de terrain a tendance à mettre le tronçon inférieur en compression, le massif M1 restant stable et le massif M2 ayant tendance à descendre. Le modèle de calcul montre que les deux coudes S1 et S2 ont tendance à se refermer.

La CF se décolle de ses appuis, et ce de façon plus marquée autour du coude S1. Le calcul met en évidence des décollements d'appuis :

- CF pleine, la CF ne porte plus sur les quatre appuis situés de part et d'autre du coude S1 (du 3^{ème} au 6^{ème} appui à partir du massif M1),
- CF vide, les 8 premiers appuis en partant du massif M1 sont décollés.

A l'inverse, le tronçon supérieur se met progressivement en traction, le coude S6 ayant tendance à s'ouvrir (le massif supérieur M4 étant stable et le massif M3 ayant tendance à descendre).

Sur les résultats de calcul présentés ci-après, on constate que la contrainte totale risque de dépasser localement la limite d'élasticité R_e de la tôle après une année supplémentaire de mouvement de terrain sur 2 zones :

- Au niveau du coude S1 en partie basse du tronçon inférieur ;
- Au niveau de l'encastrement de la conduite dans le massif M4 en haut du tronçon supérieur.

Compte tenu des résultats de ce calcul, un détensionnement sera préconisé pour chacun des tronçons.

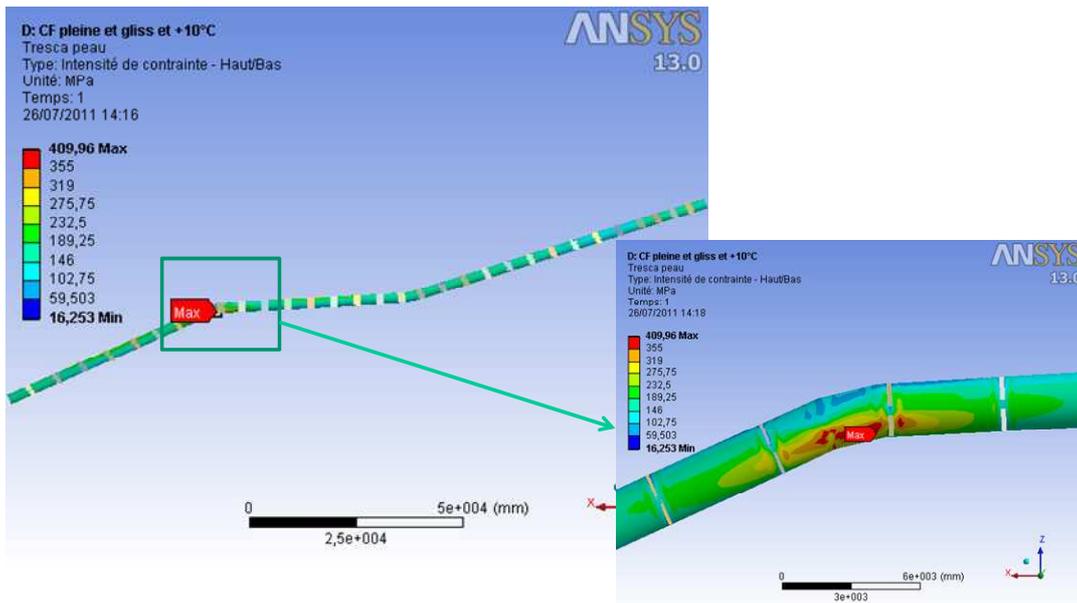


Figure 13 : Résultat de calcul du modèle aux éléments finis sur le tronçon inférieur
Contrainte équivalente de Tresca en peau

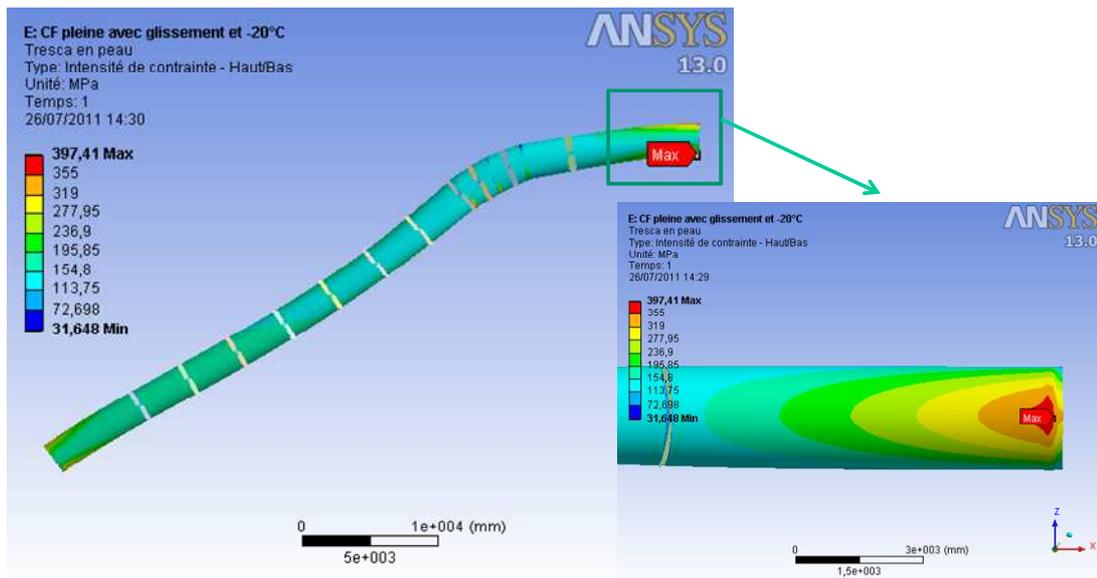


Figure 14 : Résultat de calcul du modèle aux éléments finis sur le tronçon supérieur
Contrainte équivalente de Tresca en peau

5.5. Exemple d'effet d'une modification de condition d'appui

La figure 15 suivante illustre le comportement du tronçon supérieur pour lequel le glissement du massif M3 conduit à un cumul progressif de flexion à l'amont immédiat du coude S6. On constate une augmentation de la contrainte de flexion d'environ 75 MPa entre le détensionnement de 1999 et début 2002. Le modèle de calcul a montré qu'une suppression de la pilette située à l'amont immédiat du coude S6 pouvait permettre une relaxation des contraintes de flexion au niveau de ce coude. Le retrait de la pilette effectué début 2002 s'est effectivement traduit par une relaxation de la contrainte de flexion. La totalité de la contrainte résiduelle a ensuite été relaxée lors du détensionnement de 2002.

Cet exemple illustre bien qu'au-delà des mouvements de massifs, il est également important que l'exploitant ajuste régulièrement les pieds réglables des pilettes afin de limiter les « points durs » et corriger les pertes d'appui susceptibles de conduire à des flexions localement importantes sous l'effet du poids.

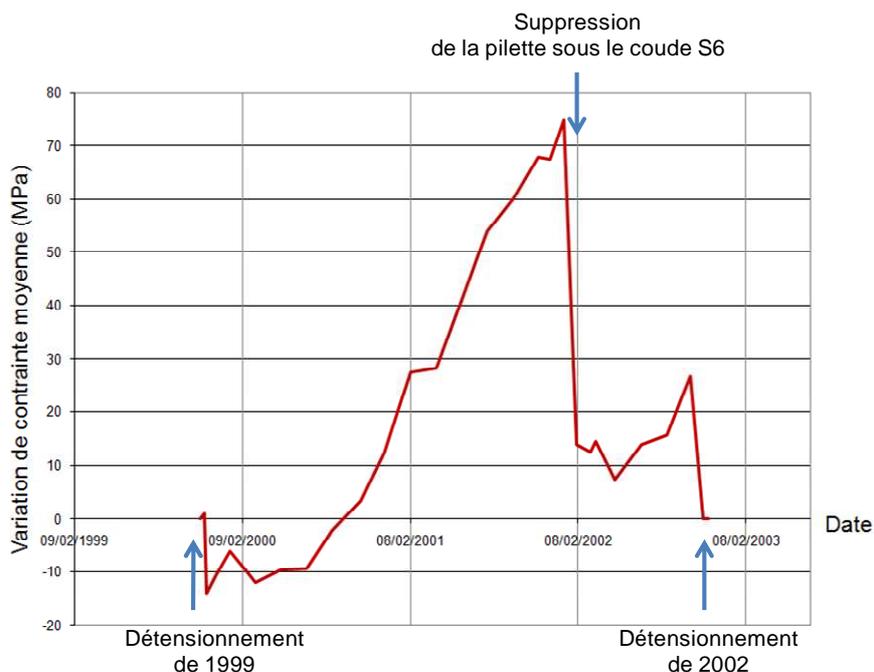


Figure 15 : Exemple de variation de contrainte de flexion au niveau du coude S6 (tronçon supérieur)

6. CONCLUSIONS

La surveillance des rares conduites forcées soumises à des mouvements de terrain repose sur différentes techniques de mesure complémentaires. L'expérience acquise par EDF au travers de la surveillance de plusieurs conduites forcées permet de maîtriser ces techniques dans la durée. Sur certaines de ces conduites, un processus général de surveillance périodique a été mis en place impliquant l'exploitant et l'ingénierie. En règle générale, on constate qu'il est nécessaire de définir une surveillance combinant :

- un suivi extensométrique rapproché, généralement mis en œuvre par l'exploitant, permettant de détecter des discontinuités de comportement pouvant nécessiter des actions immédiates (ajustement des hauteurs de pilettes, mesures topographiques supplémentaires...);
- un suivi topographique périodique moins fréquent permettant à l'ingénierie de mettre à jour un modèle de calcul et de réexaminer périodiquement les niveaux de contrainte et le respect des critères d'admissibilité. Suivant la cinétique du mouvement, la périodicité de ces mesures est à adapter : le pas annuel se justifie par la forte cinétique du glissement dans le cas particulier d'Eyglis.

Le modèle de calcul mécanique et l'analyse des contraintes sont également des composantes essentielles du processus de surveillance. Ce modèle s'avère souvent nécessaire à la bonne compréhension du phénomène. Son utilité est multiple :

- Il permet de déduire l'évolution des contraintes dans la tôle à partir des mesures topographiques du terrain lors de chaque période de surveillance, notamment dans les zones singulières telles que les coudes qu'il est impossible d'instrumenter en cannes invar.
- Il permet également de vérifier la cohérence entre les données topographiques et extensométriques. Une perte de cohérence peut permettre de révéler une modification des conditions d'ancrage ou de supportage de la conduite forcée : par exemple, perte de fonction d'un massif, point dur au niveau d'une pilette...
- Enfin, ce modèle rend possibles des analyses de sensibilité pour quantifier l'effet de modifications des conditions d'appui ou des conditions thermiques sur le niveau de contrainte atteint dans la tôle, ainsi que la vérification des critères de contraintes en extrapolant les déplacements à la fin de la prochaine période de contrôle topographique.

Afin d'améliorer le suivi extensométrique à périodicité courte en remplacement des cannes invar, un effort de recherche et développement a été engagé. Des tests doivent être lancés afin d'évaluer la faisabilité d'un suivi extensométrique en utilisant des fibres optiques. Les principaux avantages de cette technique seraient

de faciliter la réalisation des mesures, probablement d'améliorer leur précision et permettre la mesure directe des déformations dans des zones où existe une concentration géométrique de contraintes (par exemple dans les coudes). La durée de vie de dispositif sera également un élément essentiel à prendre en compte avant une quelconque généralisation.

7. REFERENCES

- [1] Trouillet, M., Boudon, R. « La surveillance des ouvrages à EDF » - Revue XYZ – n°128 - 3^{ème} trimestre 2011 Collier, J. G., & Thome, J. R. (1994). *Convective boiling and condensation*. troisième éd. Oxford: Clarendon Press.
- [2] Piron, A., Chulliat, O., Morel, F. « Suivi de la tension résiduelle par auscultation des tirants d'ancrage du parc hydraulique EDF » - colloque CFBR 2012
- [3] « Sécurité des conduites forcées principales et des matériels annexes », Guide STEEGBH, 09/2009.