

Estimation optimale temps-espace de la courbure de structures tubulaires via un réseau d'accéléromètres mono-axiaux

Mikael CARMONA¹, Regis PERRIER¹, Laurent JOUANET¹, Nathalie SAGUIN-SPRYNSKI¹, Olivier DELCROIX²

¹CEA, Leti, 17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex, France

²Technip, Flexifrance, Le Trait Cedex, France

mikael.carmona@cea.fr, nathalie.saguin@cea.fr, o.delcroix@technip.fr

Résumé – Le papier s'intéresse à l'estimation optimale en temps et en espace de la courbure d'une structure tubulaire instrumentée par des couronnes d'accéléromètres MEMS mono-axiaux. Cette problématique provient du domaine de la surveillance des pipelines flexibles dont la spécificité implique de revisiter les algorithmes et architectures classiques du domaine de l'estimation d'attitude. Après une introduction du contexte et de la technologie utilisée, le papier décrit les modèles de mesure en jeu ainsi que les bornes de Cramer-Rao associées. Ces dernières font parties intégrante de l'algorithme d'estimation de courbure. La méthodologie a été complètement évaluée en simulations, le papier présente une illustration sur des données réelles obtenues sur un banc d'essai de Technip/Flexifrance.

Abstract – The focus of this paper is the space-time estimation of the curvature of a tubular structure instrumented by rings composed of 1-axis accelerometers MEMS. This issue is related to the monitoring of flexible risers and implies to though again classical architectures and algorithms related to attitude estimation. The paper begins by introducing the context and the used technology. Then, measurement models are described with their associated Cramer-Rao lower bounds. Those latter are directly used by the algorithm of curvature estimation. This methodology has been fully evaluated in simulations. The paper illustrates it for a real-data experiment obtained with a Technip/Flexifrance test platform.

1 Introduction

Les pipelines flexibles sont des structures complexes destinées à transporter pétroles et gaz sur des zones proches des plateformes pétrolières. En fonctionnement, ces structures subissent continuellement des sollicitations dynamiques provoquées par les différents états de mer. La surveillance de leur état de santé, leur fatigue, est essentielle pour garantir qu'une structure n'est pas sortie de sa plage nominale d'utilisation au cours de sa vie, et, en cas de très fortes sollicitations (lors de tempêtes par exemple). Dans cet objectif, la mesure de la courbure du flexible dans des zones critiques, cumulée à d'autres informations (tension, température, pression, etc.), permet de remonter à la fatigue du flexible.

La courbure est un paramètre qui varie dans le temps et l'espace. Sa mesure implique un réseau de capteurs déployés le long de la zone critique, intégré dans le pipeline et qui acquiert en continu. Une solution basée sur les fibres optiques a été développée dans les années 2000 [1]. Le présent papier s'intéresse à une solution à base d'accéléromètres MEMS utilisés en tant qu'inclinomètres. L'état de l'art sur ces technologies montre que les solutions qui répondent aux fortes exigences de performances, justifiées par le fait que le calcul de fatigue s'établit sur de nombreuses années, sont mono-axial et de dimensions centimétriques. Les contraintes d'intégration très sévères pour les pipelines flexibles impliquent qu'un noeud de mesure ne peut accueillir qu'un seul capteur de cette technologie. De plus, l'utilisation de magnétomètres et de gyromètres

est exclue (environnement magnétique non maîtrisé et recalibration impossible du biais du gyromètre, entre autres). Les algorithmes et architectures classiques de l'estimation d'attitude et de la capture de mouvements [2, 3] ne sont pas applicables dans ce contexte. La solution proposée, basée sur les travaux de [4], réside dans le déploiement de rubans de capteurs 1-axe. Le réseau forme des couronnes virtuelles (cf. figures 1 et 2) qui, via l'inversion d'un modèle, mesurent une version échantillonnée en temps et en espace de l'angle de la tangente de l'axe central de la structure. La version continue de l'inclinaison est obtenue par filtrage spatio-temporel et propagation des bornes de Cramer-Rao (BCR) associées aux modèles de mesure en jeu. Enfin, dans le cadre de structures planes (*i.e.* contenues dans un plan vertical), ce qui est le cas d'une zone critique d'un pipeline flexible, la courbure est la dérivée de l'inclinaison par rapport à l'abscisse curviligne. La méthodologie développée a été complètement testée en simulations et validée sur des données réelles. Elle est applicable pour tout type de structures tubulaires planes et quasi-statiques : pipelines flexibles, câbles de ponts, poutres, etc.

Le papier est organisé en deux sections. La première présente l'échantillonnage spatio-temporel de la fonction inclinaison en introduisant le modèle de mesure d'une couronne et la BCR associée. La deuxième section présente le filtrage temps-espace de l'inclinaison, les BCR associées et enfin l'estimation de la courbure. La méthodologie est illustrée sur des données réelles obtenues sur le site de test de Technip/Flexifrance.

2 Modèle de mesure d'une couronne et BCR associée

On fixe un repère orthonormé (OX, OY, OZ) où l'axe (OZ) est parallèle à l'axe dirigé par la gravité terrestre \underline{g} ¹ (cf. figure 2). Sauf mention contraire, tous les vecteurs seront exprimés dans ce repère.

On considère une structure tubulaire instrumentée par N couronnes d'inclinomètres 1-axe dont les centres sont localisés sur l'axe central (virtuel) de la structure aux abscisses curvilignes s_1, \dots, s_N (l'origine de définition de ces abscisses est arbitraire), supposées connues et invariantes dans le temps (cf. figure 2). Pour toute couronne $i = 1, \dots, N$ et pour tout échantillon $k = 1, \dots, N_e$ où N_e est le nombre d'échantillons stockés, on note $\underline{u}_i(t_k)$ le vecteur unitaire dirigeant la tangente au point d'abscisse s_i de l'axe central à l'instant de mesure discret t_k . Ce vecteur est normal au plan défini par la couronne. On note $\phi(s_i, t_k)$ l'angle entre $\underline{u}_i(t_k)$ et \underline{g} . $\phi(s_i, t_k)$ est l'inclinaison de la couronne, c'est également l'angle de la tangente au point s_i et à l'instant t_k . On complète le repère de la couronne avec les vecteurs $\underline{v}_i(t_k)$ et $\underline{w}_i(t_k) = \underline{u}_i(t_k) \wedge \underline{v}_i(t_k)$ où \wedge est le produit vectoriel, et où $\underline{v}_i(t_k)$ est un vecteur unitaire quelconque dans le plan de la couronne. Les vecteurs $\underline{v}_i(t_k)$ pour $i = 1, \dots, N$ sont tels que si la zone instrumentée était verticale, les repères de toutes les couronnes seraient identiques. On verra l'intérêt de cette convention ci-après.

Soit $\underline{z}(t_k) = z_u \underline{u}_i(t_k) + z_v \underline{v}_i(t_k) + z_w \underline{w}_i(t_k)$ le vecteur de mesure à l'instant t_k d'un capteur de la couronne i . z_u, z_v, z_w sont les coordonnées de $\underline{z}(t_k)$ dans le repère de la couronne, elles sont supposées connues et invariantes dans le temps. Les contraintes d'intégration dans la structure impliquent que l'axe de mesure de tout capteur 1-axe soit parfaitement dans le plan de la couronne à laquelle il appartient *i.e.* $z_u = 0$. En pratique, on a $0 < |z_u| \ll 1$. Le modèle de la mesure $m(t_k)$ d'un inclinomètre 1-axe correspond à la projection de la gravité sur son axe de mesure [5], d'où :

$$m(t_k) = [z_u \ z_v \ z_w] \underline{F}(\phi(s_i, t_k), \eta(s_i, t_k)) + b(t_k) \quad (1)$$

avec :

$$\underline{F}(\phi, \eta) = [\cos(\phi) \ -\sin(\phi) \sin(\eta) \ -\sin(\phi) \cos(\eta)]^T \quad (2)$$

et où $b(t_k)$ est le bruit de mesure du capteur supposé stationnaire, gaussien et centré. L'angle $\eta(s_i, t_k)$ est l'angle qui repère le vecteur $\underline{v}_i(t_k)$ parmi tous les vecteurs unitaires du plan défini par la couronne. La convention décrite ci-dessus implique qu'en l'absence de roulis/torsion autour de l'axe central, les angles $\eta(s_1, t_k), \dots, \eta(s_N, t_k)$ sont tous égaux à chaque instant t_k . Ceci a le double avantage de fournir une information sur la variation de torsion dans le temps, et, va permettre de rejeter les 3 solutions fantômes de l'équation de mesure (1). En effet, cette dernière ne distingue pas les 4 couples : (ϕ, η) , $(-\phi, \eta + \pi)$, $(\pi - \phi, \eta)$ et $(\phi + \pi, \eta + \pi)$. Les deux derniers couples ne sont pas des solutions en présence d'un accéléromètre 3-axes car

le $\cos(\phi)$ qui apparaît dans la première composante de $\underline{F}(\phi, \eta)$ est observable. Or, dans le présent contexte, tous les vecteurs de mesure des capteurs 1-axe sont quasiment coplanaires ($|z_u| \ll 1$), le $\cos(\phi)$ et donc son signe ne sont pas observables (de manière robuste). Dans le contexte des pipelines flexibles, c'est l'hypothèse $|\phi| < \pi/2$ qui permet de rejeter ces solutions. En revanche, la solution fantôme $(-\phi, \eta + \pi)$ est toujours présente même pour des 3-axes. C'est donc l'estimation du roulis $\eta(s, t)$ via les couronnes qui permet de sélectionner la bonne solution en choisissant celle qui minimise l'écart entre les roulis estimés à des temps consécutifs et des couronnes consécutives. La réjection des solutions fantômes n'est pas détaillé davantage dans ce papier.

A partir de l'équation de mesure (1) d'un capteur, on déduit l'équation de mesure de toute couronne i pour tout instant t_k :

$$\underline{M}_i(t_k) = \underline{A}_i \underline{F}(\phi(s_i, t_k), \eta(s_i, t_k)) + \underline{B}_i(t_k) \quad (3)$$

avec $\underline{M}_i(t_k) \in \mathbb{R}^{n_i}$ le vecteur contenant les mesures à l'instant t_k des n_i capteurs de la couronne, $\underline{A}_i \in \mathbb{R}^{n_i \times 3}$ la matrice des coordonnées des vecteurs de mesure des n_i capteurs, et, $\underline{B}_i(t_k) \in \mathbb{R}^{n_i}$ les bruits de mesure des n_i capteurs dont la matrice de covariance est notée $\underline{\Gamma}_i$. Une estimation $(\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_k), \hat{\eta}_i^{\text{sta}}(t_k))^2$ du couple $(\phi(s_i, t_k), \eta(s_i, t_k))$ est obtenue par maximisation de la vraisemblance attachée au modèle (1) [6]. Cette maximisation revient à la minimisation suivante :

$$(\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_k), \hat{\eta}_i^{\text{sta}}(t_k)) = \arg \min_{(\phi, \eta)} \left(\underline{M}_i(t_k) - \underline{A}_i \underline{F}(\phi, \eta) \right)^T \times \underline{\Gamma}_i^{-1} \left(\underline{M}_i(t_k) - \underline{A}_i \underline{F}(\phi, \eta) \right) \quad (4)$$

Cette optimisation est réalisée par un algorithme de gradient-conjugué. Ce dernier calcule également la matrice Hessienne $\underline{H}_i(\phi, \eta)$ du critère (4) qui, au point de convergence, fournit une estimation de l'opposé de la matrice d'information de Fisher [6] dont l'expression est :

$$\underline{F}_i(\phi, \eta) = \begin{bmatrix} \underline{R}_i(\phi, \eta)^T \underline{R}_i(\phi, \eta) & \underline{R}_i(\phi, \eta)^T \underline{S}_i(\phi, \eta) \\ \underline{S}_i(\phi, \eta)^T \underline{R}_i(\phi, \eta) & \underline{S}_i(\phi, \eta)^T \underline{S}_i(\phi, \eta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

avec $\underline{R}_i(\phi, \eta) = \tilde{\underline{\Gamma}}_i^{-1} \underline{A}_i \frac{\partial \underline{F}(\phi, \eta)}{\partial \phi}$, $\underline{S}_i(\phi, \eta) = \tilde{\underline{\Gamma}}_i^{-1} \underline{A}_i \frac{\partial \underline{F}(\phi, \eta)}{\partial \eta}$ et $\tilde{\underline{\Gamma}}_i^T \tilde{\underline{\Gamma}}_i = \underline{\Gamma}_i$. La BCR σ_ϕ sur l'angle ϕ est l'inverse du coefficient $(1, 1)$ de la matrice d'information de Fisher (5). Ce coefficient témoigne de la "confiance" sur l'inclinaison estimée ϕ . Ainsi, l'inversion du modèle de mesure (3) pour chaque couronne fournit un échantillonnage spatio-temporel $(\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_k))_{i=1, \dots, N}^{k=1, \dots, N_e}$ de la fonction inclinaison $\phi(s, t)$ ainsi que les BCR associées $(\sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_k)})_{i=1, \dots, N}^{k=1, \dots, N_e}$.

1. Les vecteurs sont soulignés et les matrices sont doublement soulignées.

2. L'exposant sta indique que le modèle inversé ne prend pas en compte de filtrage temporel ou spatial.

3 Filtrage temps-espace de l'inclinaison et estimation de la courbure

Le filtrage temps-espace de la fonction inclinaison $\phi : (s, t) \mapsto \phi(s, t)$ est réalisé en deux étapes : filtrage temporel puis filtrage spatial. Le filtrage temporel se base sur l'hypothèse de quasi-staticité du mouvement de la structure. Pour un temps discret donné t_k , il existe une fenêtre d'observation $[t_k - T, t_k + T]$ sur laquelle l'inclinaison $t \mapsto \phi(s, t)$ peut être considérée constante *i.e.* pour tout entier $r = k - K, \dots, k + K$:

$$\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_r) = \phi(s_i, t_k) + b_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r) \quad (6)$$

où $K = \max \{r \in \mathbb{N} \mid t_{k+r} \leq t_k + T\}$ et où $b_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r)$ est approchée par une variable aléatoire centrée gaussienne d'écart-type $\sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r)$. Dans ce cas, l'estimateur optimal de $\phi(s_i, t_k)$ est l'estimateur de Nadaraya-Watson [7]. Pour des variables circulaires, comme les angles, cet estimateur prend la forme suivante³ :

$$\hat{\phi}_i^{\text{qs}}(t_k) = \text{atan2} \left(\sum_{r=k-K}^{k+K} \sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r)^{-2} \sin(\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_r)), \sum_{r=k-K}^{k+K} \sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r)^{-2} \cos(\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_r)) \right) \quad (7)$$

La BCR des $\hat{\phi}_i^{\text{sta}}(t_k)$ se propage sur les $\hat{\phi}_i^{\text{qs}}(t_k)$ comme suit :

$$\sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{qs}}}(t_k)^{-2} = \sum_{r=k-K}^{k+K} \sigma_{\hat{\phi}_i^{\text{sta}}}(t_r)^{-2} \quad (8)$$

Pour la suite, on notera $\hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}(t_k) = [\hat{\phi}_1^{\text{qs}}(t_k), \dots, \hat{\phi}_N^{\text{qs}}(t_k)]^T$ les inclinaisons estimées des couronnes filtrées en temps, et, $\underline{B}_{\hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}}$ le vecteur gaussien centré des incertitudes sur $\hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}(t_k)$ de matrice de covariance $\hat{\underline{\Sigma}}^{\text{qs}}(t_k) = \text{diag}(\sigma_{\hat{\phi}_1^{\text{qs}}}(t_k)^2, \dots, \sigma_{\hat{\phi}_N^{\text{qs}}}(t_k)^2)$.

Le filtrage spatial est réalisé, pour tout instant t , par régression polynômiale de la fonction $s \mapsto \phi(s, t)$. C'est un modèle valide dans le cadre des pipelines flexibles où cette fonction peut être approchée dans la zone critique avec une très bonne précision par un polynôme de degré 5. Soit d le degré du polynôme d'approximation, le modèle de la régression polynômiale s'écrit :

$$\underline{S} \underline{C}(t_k) = \hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}(t_k) + \underline{B}_{\hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}}(t_k) \quad (9)$$

avec $\underline{S} \in \mathbb{R}^{N \times (d+1)}$ la matrice dont le coefficient (i, j) vaut s_i^{j-1} , $\underline{C}(t_k) = [c_0(t_k), \dots, c_d(t_k)]^T$ le vecteur des coefficients du polynôme cherché. L'équation (9) est linéaire en $\underline{C}(t_k)$. L'estimation du maximum de vraisemblance est analytique [7] :

$$\hat{\underline{C}}(t_k) = \left(\underline{S}^T \hat{\underline{\Sigma}}^{\text{qs}}(t_k)^{-1} \underline{S} \right)^{-1} \left(\underline{S}^T \hat{\underline{\Sigma}}^{\text{qs}}(t_k)^{-1} \hat{\underline{\Phi}}^{\text{qs}}(t_k) \right) \quad (10)$$

Finalement, la fonction inclinaison $\phi : (s, t) \mapsto \phi(s, t)$ estimée pour tout instant t^4 et toute abscisse curviligne s s'écrit :

$$\hat{\phi}(s, t) = \sum_{j=0}^d \hat{c}_j(t) s^j \quad (11)$$

La courbure $\kappa : (s, t) \mapsto \kappa(s, t)$ étant la dérivée de l'inclinaison par rapport à l'abscisse curviligne, l'estimateur s'écrit :

$$\hat{\kappa}(s, t) = \sum_{j=0}^{d-1} (j+1) \hat{c}_{j+1}(t) s^j \quad (12)$$

La méthodologie a été complètement testée en simulations. Elle est exacte en l'absence de toute perturbation, et, robuste en présence de bruit de mesure et d'une faible dynamique (< 1 g). On présente ici une application de l'algorithme sur des données réelles d'une campagne de mesures menée sur un banc d'essai de Flexifrance (cf. figure 2). Le réseau utilisé forme 5 couronnes, espacées de 80 cm chacune composée de 2 capteurs espacés de 130° *i.e.*⁵ : $s_1 = 0$ m, $s_2 = 0.8$ m, $s_3 = 1.6$ m, $s_4 = 2.4$ m, $s_5 = 3.2$ m et :

$$\underline{A}_1 = \dots = \underline{A}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos(130^\circ) & \sin(130^\circ) \end{bmatrix}$$

Le réseau est installé près de l'extrémité fixe d'un flexible. La deuxième extrémité du flexible est attachée à un balancier piloté en angle pour réaliser des cyclages (de quelques cycles à des millions de cycles). A titre illustratif, la figure 2 présente l'estimation et le filtrage temporel ($T = 0.5$ s pour un échantillonnage à 10 Hz) des inclinaisons des couronnes 3 et 5 pendant une phase de cyclage. La figure présente également l'évolution de la courbure maximale, déduite de la courbure estimée après le filtrage temps-espace de l'inclinaison, et qui est un paramètre d'intérêt pour la surveillance des flexibles. Les valeurs retrouvées sont en très bon accord avec les données attendues et obtenues par simulations par Technip.

4 Conclusion

Ce papier a présenté un algorithme d'estimation de courbure d'une structure tubulaire instrumentée par un réseau d'accéléromètres MEMS mono-axiaux. L'algorithme est basé sur trois modèles de mesure : couronne (échantillonnage spatio-temporel), quasi-statique (filtrage temporel) et régression polynômiale (filtrage spatial), ainsi que sur la propagation des bornes de Cramer-Rao associées à ces modèles. L'algorithme est robuste aux bruits de mesure et à la présence d'une faible dynamique (< 1 g). Il a été complètement évalué en simulation et testé sur des données réelles provenant du contexte des pipelines flexibles. Des variantes à cet algorithme sont envisageables, par exemple la substitution du filtrage de Nadaraya-Watson par un filtrage de Kalman étendu pour des applications temps-réel ou encore l'utilisation de splines cubiques plutôt que des polynômes pour le filtrage spatial comme étudié dans [8].

4. le passage d'un temps discret à un temps continu s'établit classiquement par une interpolation d'ordre 1.

5. Les valeurs indiquées sont simplifiées.

3. L'exposant qs indique que le modèle quasi-statique est pris en compte.

Références

- [1] R. Roberts, S. Garnham, B. D'All, *Fatigue Monitoring Of Flexible Risers Using Novel Shape Sensing Technology*, Offshore Technology Conference, 2007.
- [2] G. Wahba, A Least Squares Estimate of Satellite Attitude, *SIAM Review* 7 (1965), pp. 409-409.
- [3] F. L. Markley, D. Mortari, Quaternion Attitude Estimation Using Vector Observations, *Journal of the Astronautical Sciences* 48 (2000), pp. 359-380.
- [4] N. Sprynski, D. David, B. Lacolle, L. Biard, *Curve Reconstruction via a Ribbon of Sensors*, 14th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, ICECS - 2007, December, 2007.
- [5] CW. Tan, S. Park, Design of accelerometer-based inertial navigation systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 54 (2005), pp. 2520-2530.
- [6] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part I*, Wiley-Interscience, 2001.
- [7] T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman, *The elements of statistical learning*, second edition, Springer, 2009.
- [8] M. Carmona, R. Perrier, N. Sprynski, *Estimation de courbure via un réseau d'accéléromètres*, GRETSI 2013.

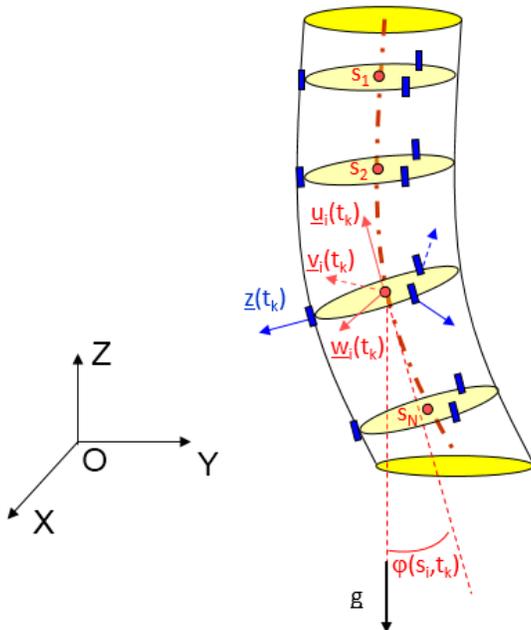


FIGURE 1 – Schéma d'une structure tubulaire instrumentée. L'inclinaison de l'axe central (trait mixte) est échantillonnée en temps et en espace par les couronnes de capteurs 1-axe.

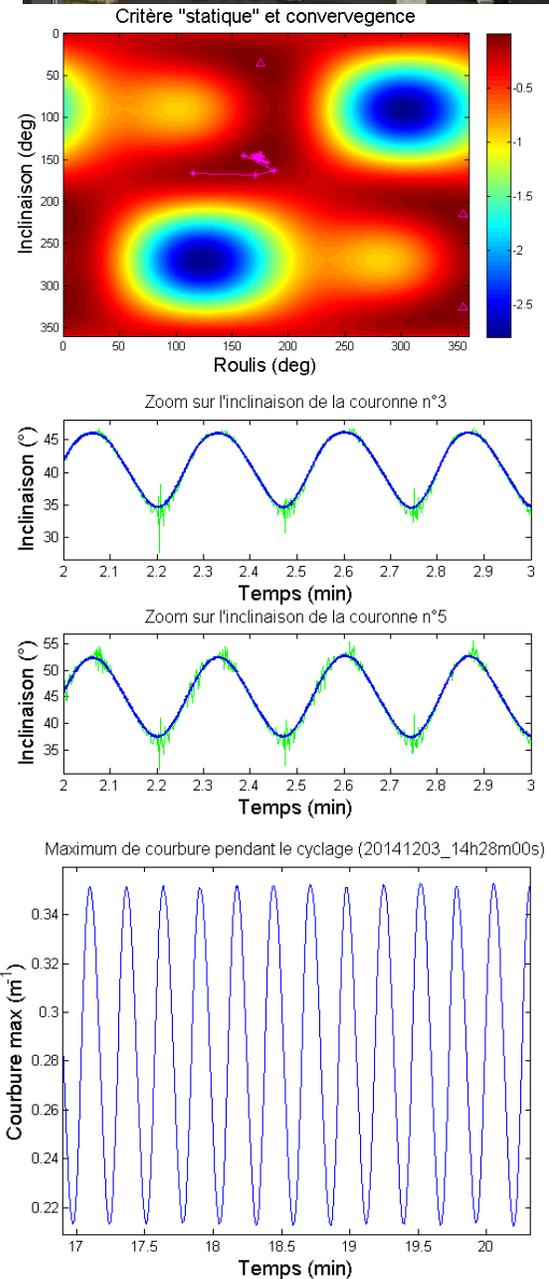


FIGURE 2 – 1) photo de l'expérimentation. 2) maximisation de (4) pour la couronne 5 pour le premier échantillon, les 4 solutions sont marquées par un triangle magenta et les itérations de l'algorithme de gradient-conjugué sont les étoiles en magenta. 3) zoom sur les inclinaisons avant (en vert) et après (en bleu) filtrage temporel des couronnes 3 et 5. 4) zoom en temps sur le maximum de courbure pendant le cyclage.