

Simulation de la propagation d'ondes guidées dans des conducteurs aériens

Vahan Baronian¹, Alexandre Charau¹, Guillemette Ribay¹, Julien Said²,
Stephane Heurtault²

¹Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120, Palaiseau, France;

²RTE-France, 92073, Paris La défense Cedex, France

*Vahan Baronian, E-mail: vahan.baronian@cea.fr

Résumé

L'utilisation des ondes guidées pour inspecter des structures élancées s'est intensifiée ces dernières années. Compte tenu de leur nature multimodale et dispersive, le développement d'outils de simulation s'est révélé crucial pour mieux comprendre les phénomènes de génération, propagation et mesure des ondes guidées, afin d'optimiser de potentielles nouvelles méthodes de contrôle. Ce papier synthétise des travaux de modélisation réalisés dans le but d'évaluer la faisabilité de simuler la génération et la propagation d'ondes guidées dans le cœur acier du câble aluminium – acier CROCUS 228. Ces câbles torsadés, utilisés dans les réseaux de conducteurs aériens déployés par RTE pour le transport de l'énergie électrique, sont des structures complexes constituées de plusieurs brins hélicoïdaux soumises à un chargement statique qui va accroître la pression de contact entre les différents brins. La propagation d'ondes guidées au sein de ces structures est influencée par ces différents mécanismes (géométrie hélicoïdale, contacts), lesquels sont pris en compte par le modèle.

1. Introduction

Le câble CROCUS 228 représenté Figure 1 est composé d'un cœur en acier qui assure la tenue mécanique de l'ensemble, enrobé par une couronne bi-hélicoïdale en aluminium dont la fonction principale est de conduire l'énergie, mais qui n'est pas prise en compte dans le travail présenté. Le cœur en acier illustré Figure 2 est composé d'un brin droit central entouré par six brins périphériques torsadés dont les sections sont toutes identiques. Compte tenu de la géométrie de la structure, des contacts entre les différents brins existent que ce soit entre le brin central et les brins périphériques ou encore entre deux brins périphériques adjacents. Ces contacts peuvent être de nature linéique ou surfacique en fonction du niveau de chargement de la structure, comme illustré Figure 3.

L'existence de modes guidés a été démontrée [1] sur des câbles torsadés à 7 brins (1 droit + 6 hélicoïdaux) mais dont les brins périphériques sont de section légèrement plus petite que celle du brin central ; ce qui conduit à une absence

de contact entre brins périphériques adjacents. Cette structure torsadée nécessite de choisir un paramétrage en géométrie dite « twistées » afin de garantir l'hypothèse d'invariance par translation sur laquelle repose l'existence des modes guidés. L'étude présentée s'appuie sur la modélisation proposée dans [1] [2] [3] avec prise en compte de contacts entre les brins périphériques adjacents.

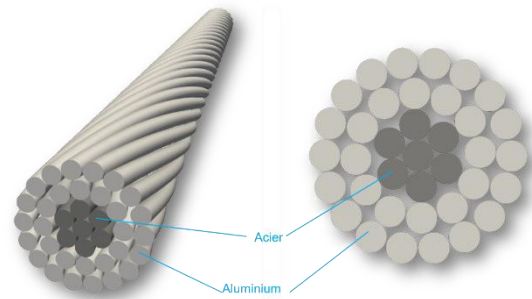


Figure 1 : Schéma du câble CROCUS 228 constitué d'un cœur acier (1 brin droit + 6 brins torsadés à droite) et d'une couronne bi-hélicoïdale en aluminium (12 brins torsadés à gauche + 18 brins torsadés à droite).

La première partie de cette étude est dédiée au rappel de la méthode Semi Analytical Finite Element (SAFE) adaptée en géométrie twistée pour le calcul des modes guidés dans la structure multibrin. La seconde partie est consacrée à l'analyse des contacts entre les différents brins. Dans cette modélisation des contacts ponctuels dans la section (linéiques dans la géométrie 3D) ont été considérés entre le brin central et les brins périphériques. Par ailleurs, nous avons illustré l'effet de différentes conditions de contact (libres, ponctuels et écrasés) entre brins périphériques adjacents, ce qui a permis de montrer sur les courbes de dispersion comment le mode fondamental (non dispersif) T_{01} était affecté.

L'état précontraint n'a pas été pris en compte dans notre modélisation dans un souci de simplification. Il a été montré [4] [5] que ce dernier influençait les caractéristiques de propagation en basse fréquence principalement. Seul l'effet

de la géométrie de la zone de contact qui est le plus dominant est pris en compte dans la modélisation. La troisième partie est consacrée au calcul de champ ultrasonore généré par une ou plusieurs sources localisées sur la surface latérale des brins périphériques. Les courbes de dispersion associées aux excitabilités modales ont été obtenues pour différentes conditions de contact et sources (position, étendue spatiale, sollicitation). Dans la quatrième partie, nous avons synthétisé les formes d’ondes temporelles pour des signaux d’excitation basses fréquences (100 kHz).

2. Modélisation des câbles torsadés à 7 brins

La méthode SAFE [6] [7] combine une représentation par éléments finis (EF) du champ élastodynamique dans la section avec un propagateur modal analytique selon l’axe de propagation. Le système de coordonnées twistées [1] [2] [3] qui est un cas particulier du système de coordonnées hélicoïdales [8], est bien adapté pour l’analyse modale des guides d’ondes hélicoïdaux et cylindriques. La structure multibrin représentée Figure 2 étant constituée d’un brin cylindrique central et de brins périphériques hélicoïdaux peut être analysée dans le système de coordonnées twistées.

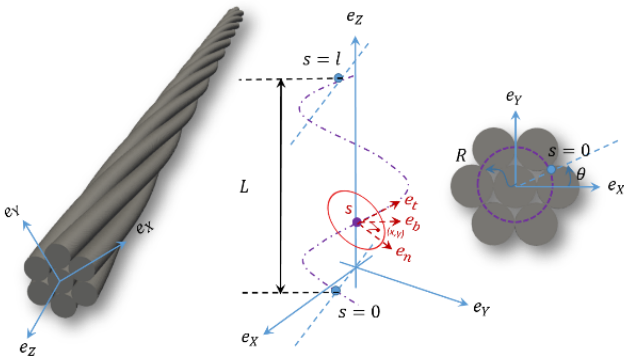


Figure 2 : Représentation du cœur en acier sur le câble CROCUS228

2.1. Formulation SAFE

Dans cette section, nous rappelons les points clés de la méthode SAFE en coordonnées hélicoïdales. On note (x, y) les coordonnées de la section transverse et s le chemin curviligne de propagation (Figure 2). On désigne par κ et τ respectivement la courbure et la torsion de l’hélice.

La méthode de séparation des variables conduit à chercher le champ de déplacement sous la forme :

$$\mathbf{u}(x, y, s) = \tilde{\mathbf{u}}(x, y)e^{iks}. \tag{1}$$

Après discrétisation par EF de $\tilde{\mathbf{u}}(x, y)$, on obtient le système aux valeurs propres suivant dont les solutions sont les modes guidés :

$$\{\mathbf{K}_1 - \omega^2\mathbf{M} + ik(\mathbf{K}_2 - \mathbf{K}_2^T) + k^2\mathbf{K}_3\}\tilde{\mathbf{U}} = \tilde{\mathbf{F}}. \tag{2}$$

où $\tilde{\mathbf{F}}$ correspond au terme de forces extérieures. L’expression des matrices élémentaires est détaillée dans [1].

2.2. Système de coordonnées twistées

Dans le système de coordonnées twistées la courbure devient nulle ($\kappa = 0$) et l’axe de propagation s est confondu avec l’axe z . La longueur curviligne l et le pas de l’hélice L coïncident ($l = L$) et la tortuosité devient $\tau = 2\pi/L$.

La section de la structure multibrin est déformée [1] dans ce nouveau paramétrage. En la twistant (rotation d’angle $2\pi +$ extrusion de longueur L) autour de l’axe z , on obtient une période de la structure 3D.

L’implémentation de la méthode SAFE en coordonnées twistées a été réalisée afin de calculer numériquement les modes guidés dans la structure multibrin.

3. Influence des contacts

Les paramètres géométriques du cœur en acier sont les suivants : la section circulaire de rayon $a = 1.4 \text{ mm}$, le rayon d’hélice $R = 2a$, l’angle d’hélice $\varphi = 6.29^\circ$ et le pas de câblage $L = 159.6 \text{ mm}$.

Les caractéristiques matérielles de l’acier sont : la masse volumique $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$, le module d’Young $E = 210 \text{ GPa}$ et le coefficient de poisson $\nu = 0.29$.

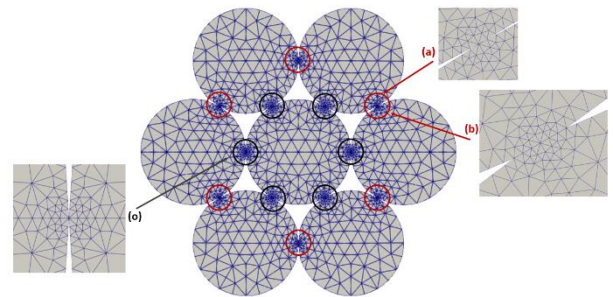


Figure 3 : Zoom sur le contact ponctuel (o) entre les brins périphériques et central en bas à gauche - Zoom sur les différents types de contact entre brins périphériques adjacents : (a) ponctuel, (b) écrasement 4µm.

Les différents brins du cœur en acier sont couplés entre eux par l’intermédiaire des zones de contact. L’étendue de ces zones de contact est influencée par le niveau de mise en tension du câble. Le maillage EF est représenté Figure 3, sur lequel on identifie deux types de contact :

- Contacts « inter-couches » entre le brin central et les 6 brins périphériques
- Contacts « intra-couches » entre les brins périphériques adjacents.

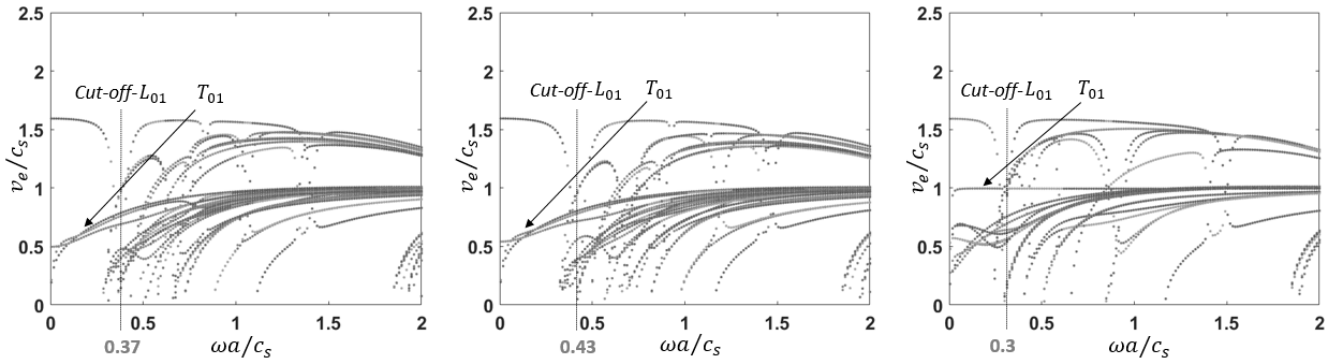


Figure 4 : Courbes de dispersion en vitesse d'énergie pour les différents types de contacts intra-couches : (a) ponctuel – (b) écrasement 4 μm – (c) libre

Lorsque la structure est non chargée tous les contacts restent ponctuels dans la section. En service, les câbles sont tendus avec un effort de traction, ce qui accentue l'écrasement au niveau des contacts intra-couches du fait de la géométrie hélicoïdale des brins périphériques. Les contacts inter-couches restent ponctuels. Dans notre modélisation nous supposons un contact parfaitement collé, ce qui implique que les brins sont tous solidaires par l'intermédiaire des zones de contact.

La simulation d'un chargement statique en traction de 20kN répartis sur l'ensemble des sept brins (25% de la RTS (Rated Tensile Strength) du CROCUS228) a permis de montrer que les pressions maximales aux contacts sont de l'ordre de 150 MPa, pour une zone de contact d'une largeur totale de 4 μm . L'utilisation d'un modèle de Hertz entre deux cylindres droits parallèles conduit à la même valeur de largeur de contact.

Cette analyse nous conduit donc à envisager plusieurs configurations de zone de contact :

- Contacts ponctuels pour les contacts inter-couches et intra-couches, représentatifs de la structure non chargée.
- Contacts inter-couches ponctuels et intra-couches écrasés de largeur 4 μm , représentatifs de la structure chargée.
- Contacts inter-couches ponctuels et intra-couches libres.

Les caractéristiques modales de propagation ont été obtenues pour ces trois configurations. La dernière configuration correspond à un cas limite (similaire à la référence [2]), où les couplages entre brins périphériques adjacents ont été supprimés. Les courbes de dispersion en vitesse d'énergie adimensionnées v_e/c_s en fonction de la fréquence adimensionnée $\Omega = \omega a/c_s$ sont représentées Figure 4.

On observe un décalage de la fréquence de coupure ($\Omega_a = 0.37$) du mode L_{01} vers les hautes fréquences ($\Omega_b = 0.43$) lorsque l'étendue de la zone de déformation au contact

augmente. Cette dernière est logiquement la plus faible ($\Omega_c = 0.3$) dans le cas d'une condition libre (c) entre brins périphériques adjacents.

On constate également une transformation du mode fondamental de torsion T_{01} . En effet, lorsque la condition libre est imposée sur les brins périphériques adjacents, ce dernier à une vitesse d'énergie adimensionnée v_e/c_s proche de 1 et constante dans toute la gamme de fréquence, à l'instar du mode T_{01} dans un barreau cylindrique. Lorsque le contact est pris en compte au niveau des brins périphériques adjacents, la rigidité globale du cœur augmente ; ce mode subit une perturbation et sa vitesse diminue en basse fréquence. Nous identifierons ce mode comme le mode « T_{01} perturbé ».

Les conditions de contact les plus pertinentes sont celles de type (a) contact ponctuel et de type (b) contact linéique avec écrasement de 4 μm . Dans la suite de l'étude nous conserverons uniquement la condition de type (b) pour des raisons de concision.

4. Excitation depuis la surface latérale du câble

En exploitation, les câbles de transport d'énergie électrique sont suspendus et tendus entre deux pylônes (sur une voire plusieurs centaines de mètre), ce qui implique que la seule partie accessible depuis l'extérieur est la surface latérale au niveau de la couronne d'aluminium. Nous avons proposé une modélisation simplifiée en considérant des sources positionnées directement sur la surface latérale du cœur.

Les supports de source représentés Figure 6 sont répartis sur chaque brin périphérique aux positions suivantes : $[0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ, 240^\circ, 300^\circ]$. L'étendue angulaire de chaque source dans la section du cœur est de 60°. Nous avons considéré 3 types de sollicitation uniforme : cisaillement en torsion, cisaillement axial et pression radiale. Enfin, pour ces trois types de sollicitation on peut exciter un nombre quelconque de sources parmi les six.

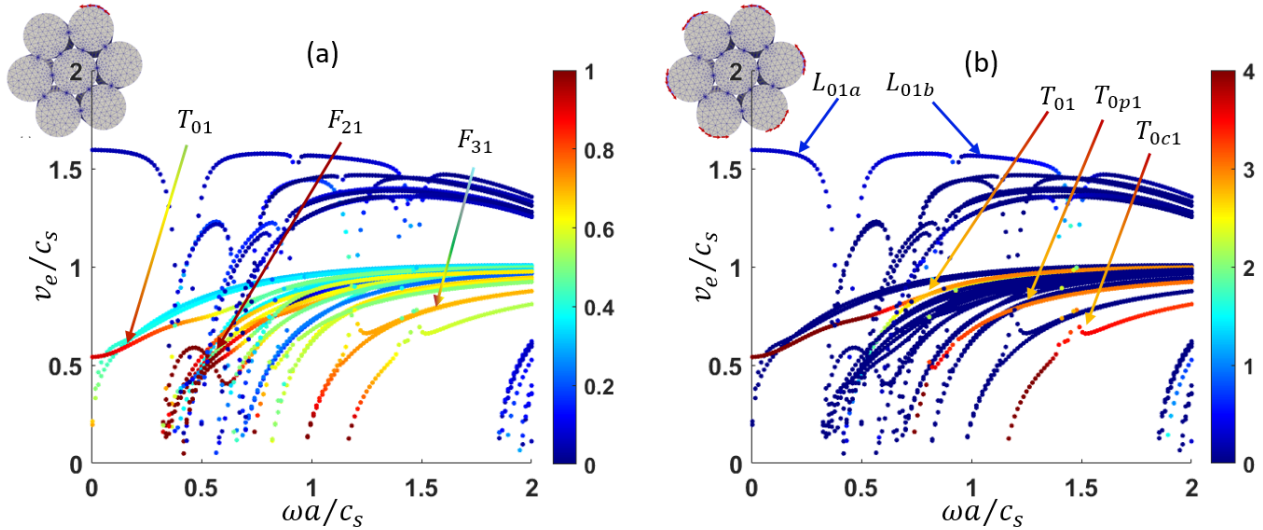


Figure 5 : Courbes de dispersion en vitesse d'énergie avec les excitabilités modales en échelle de couleur pour des contacts intra-couches de 4 μ m. Cisaillement en torsion (a) monobrin (b) multibrin

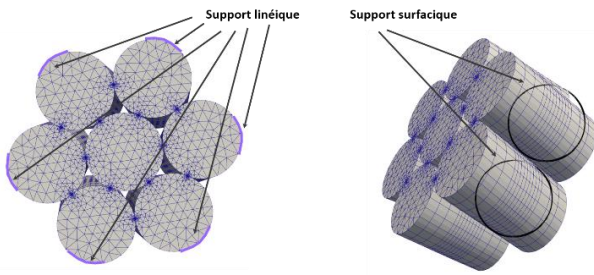


Figure 6 : Illustration du support spatial des sources sur la surface latérale – vue du support linéique dans la section à gauche, du support surfacique dans la géométrie 3D à droite

La source va exciter des modes guidés qui vont se propager de part et d'autre de cette dernière. Dans le domaine fréquentiel (ω fixé), la solution associée à la propagation selon $z > 0$ (à droite de la source) se décompose sur la base des modes guidés de la manière suivante :

$$\mathbf{U}(z) = \sum_{m=1}^M \alpha_m \frac{\mathbf{U}_m}{\sqrt{P_{mm}}} e^{ik_m z}. \quad (3)$$

Dans l'approximation champ lointain, M désigne le nombre de modes « propagatif » se propageant vers la droite. La formule d'excitabilité modale α_m est la suivante :

$$\alpha_m = \frac{i\omega}{4\sqrt{P_{mm}}} \mathbf{U}_m^{T*} \tilde{\mathbf{F}}(k_m) \quad (4)$$

où $\tilde{\mathbf{F}}(k_m)$ désigne la transformée de Fourier de la distribution de force imposée par la source surfacique (2), \mathbf{U}_m le champ transverse du mode d'indice m se propageant vers la droite et P_{mm} le flux de puissance associé au mode d'indice m .

Dans la suite, nous supposons que la distribution de force surfacique est localisée en $z = 0$ (le cas d'une étendue axiale non nulle a été étudié mais ne présente pas de différences significatives). Les excitabilités modales sont représentées sous la forme de courbes de dispersion, calculées sur la bande de fréquence adimensionnée $\Omega = \omega a / c_s$ sur l'intervalle $[0 : 2]$.

Nous avons calculé les excitabilités modales pour les trois types de sollicitation ; cependant pour des raisons de clarté, nous avons représenté Figure 5 les résultats de cisaillement en torsion uniquement. Afin de mieux identifier les modes principalement excités, nous avons représenté les excitabilités modales sur les courbes de dispersion en vitesse d'énergie. Enfin, nous avons comparé les excitabilités modales pour une source active seulement Figure 5a, puis pour toutes les sources simultanément Figure 5b.

En analysant les excitabilités modales sur les courbes de dispersion en vitesse d'énergie Figure 5a on peut voir quels sont les principaux modes excités. Les déformées modales avec les modules du champ de déplacement des modes sont représentés Figure 7 à des fréquences particulières. L'observation des déformées modales indique une vibration dont les composantes tangentielles sont dominantes par rapport à la composante axiale (caractéristique des modes de torsion), pour les trois modes cités ci-dessous :

- Le mode de torsion T_{01} perturbé dont l'excitabilité diminue lorsque la fréquence augmente.
- Un mode combiné de torsion/flexion F_{21} qui a une excitabilité élevée en basse fréquence $\Omega = [0.3 - 0.6]$. La déformée montre une torsion qui agit sur deux groupes de trois brins périphériques alternés, qui vibrent en sens opposé.

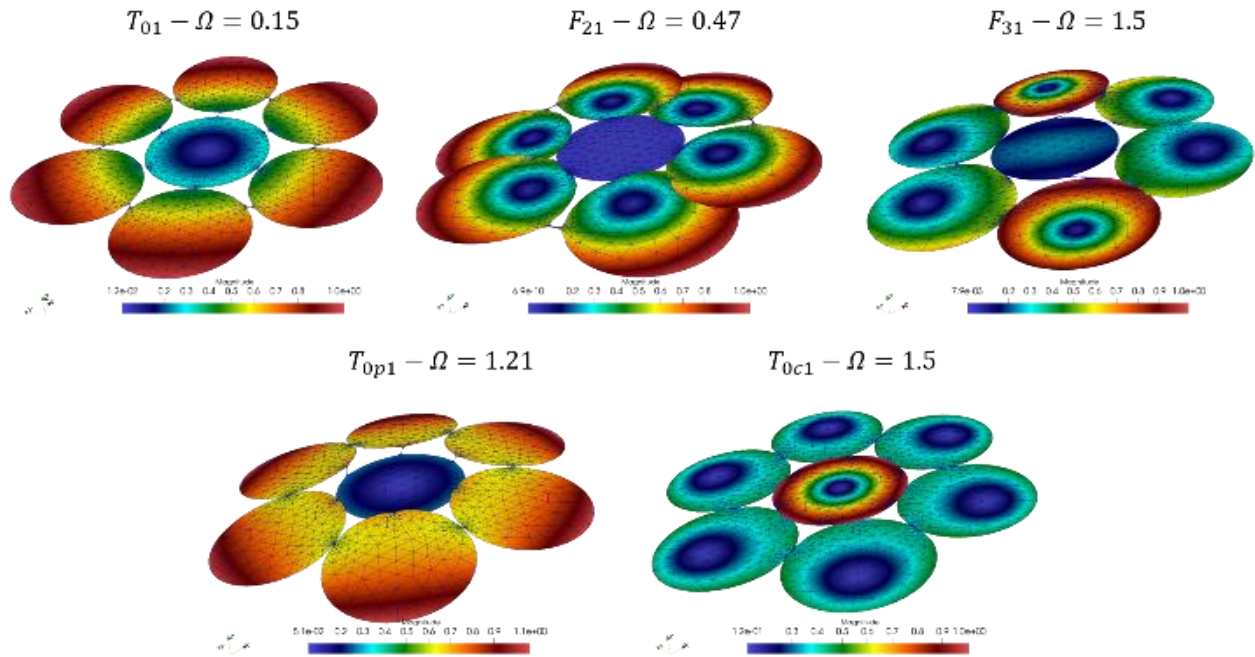


Figure 7 : Déformées modales avec module du champ de déplacement pour les modes principalement excités par une source de cisaillement en torsion.

- Un mode combiné de torsion/flexion F_{31} qui présente la plus forte excitabilité dans la plage $\Omega = [1 - 2]$. La déformée montre une torsion qui agit sur trois groupes constitués de deux brins périphériques diamétralement opposés.

Lorsque l'excitation est imposée sur tous des brins périphériques simultanément, on peut voir Figure 5b que moins de modes sont excités compte tenu de la spatialisation de la source, mais dont les niveaux d'excitabilité sont plus importants (proportionnels au nombre de source) :

- Le mode de torsion T_{01} dont l'excitabilité diminue lorsque la fréquence augmente.
- Un mode de torsion T_{0p1} qui a une excitabilité élevée à partir des moyennes fréquences $\Omega = [0.75 - 2]$. La déformée montre une torsion localisée principalement sur tous les brins périphériques (indice p).
- Un mode de torsion T_{0c1} qui présente la plus forte excitabilité vers les hautes fréquences $\Omega = [1.2 - 2]$. La déformée montre une torsion localisée principalement dans le brin central (indice c).

Cette analyse permet d'identifier quels sont les modes sensibles aux différents types de sollicitation sur une gamme de fréquence relativement importante. De plus, la représentation des déformées modales montre les différents motifs de vibration existants dans une structure multibrin. Ces vibrations peuvent être réparties dans l'ensemble de la section, ou alors localisées soit dans le brin central, soit au niveau des brins périphériques.

5. Synthèse temporelle

A partir des excitabilités modales le champ ultrasonore est calculé dans le domaine fréquentiel à ω fixé et à une distance z donnée à partir de (3). En pratique, la solution est calculée pour toutes les fréquences appartenant au spectre de l'excitation. Enfin, la prédiction du champ ultrasonore dans le domaine temporel est obtenue par synthèse de Fourier, limitée à la bande passante du signal temporel.

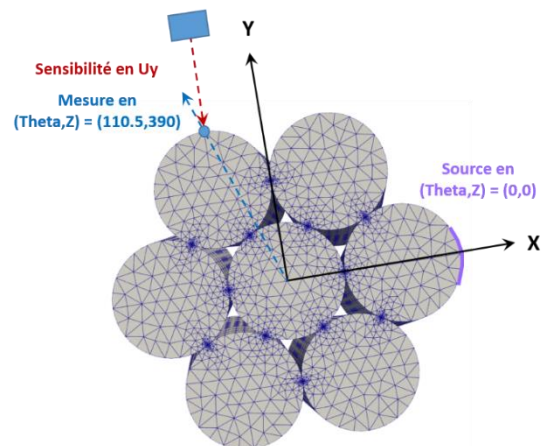


Figure 8 : Schéma du positionnement de la source et de la mesure selon la composante U_y

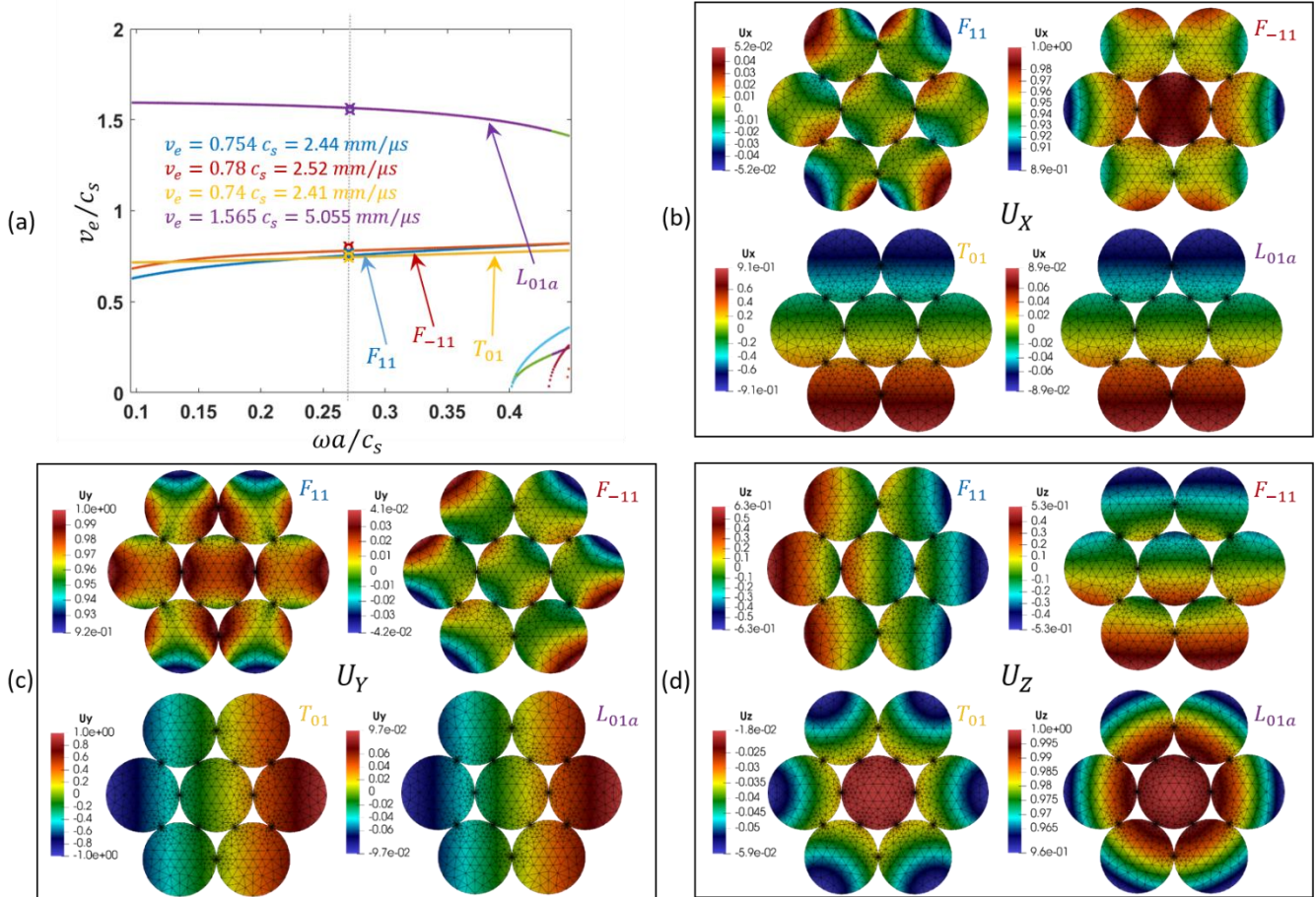


Figure 9 : Courbe de dispersion en vitesse d'énergie adimensionnée sur la bande passante de la source (a) – Composantes U_x (b) - U_y (c) - U_z (d) des 4 premiers modes F_{11} , F_{-11} , T_{01} et L_{01a}

Dans cette section, nous considérons le cas d'une excitation relativement basse fréquence ($\Omega_c = 0.272$, $F_c = 0.1 \text{ MHz}$) avec une bande passante $Bp_{-6dB} = 50\%$. La source (d'étendue axiale nulle) est positionnée sur la surface latérale d'un des brins périphériques en $(\theta, z) = (0, 0)$. On suppose une mesure du champ ultrasonore en $(\theta, z) = (110.5, 390)$ qui est sensible à la composante U_y , afin de simuler une mesure par interféromètre laser. La Figure 8 illustre le positionnement de la source et du dispositif de mesure.

Enfin, nous considérons le cas d'une source imposant des sollicitations uniforme en cisaillement selon l'axe z .

Nous avons représenté Figure 9a les courbes de dispersion en vitesse d'énergie adimensionnée sur la bande passante fréquentielle de la source. On peut voir que dans cette gamme de fréquence il existe quatre modes propagatifs : les modes de flexion F_{11} et F_{-11} , le mode de torsion T_{01} et le mode de compression L_{01a} . Le mode L_{01a} est le plus rapide ($v_e = 5.055 \text{ mm}/\mu\text{s}$ à la fréquence centrale), alors que les trois autres modes F_{11} , F_{-11} et T_{01} ont des vitesses d'énergie relativement proches ($v_e = 2.44 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $v_e = 2.52 \text{ mm}/\mu\text{s}$ et $v_e = 2.41 \text{ mm}/\mu\text{s}$).

Les composantes $U_x - U_y - U_z$ des modes sont représentées Figure 9(b-c-d). Les modes de flexion sont caractérisés par un déplacement principal selon un axe du plan de la section (selon l'axe U_y pour le mode F_{11} et selon l'axe U_x pour le mode F_{-11}) quasi uniforme dans toute la section. Le mode de torsion se caractérise par une composante de vibration U_z très faible devant les composantes tangentielles $U_x - U_y$.

Le mode L_{01a} possède une composante axiale U_z dominante devant les composantes $U_x - U_y$. L'analyse des polarisations pour les quatre modes montre que leur répartition d'énergie est bien distribuée dans l'ensemble de la section.

Nous avons simulé les A-scan à une distance de 390 mm de la source qui impose une sollicitation en cisaillement selon l'axe z . On peut voir sur la Figure 10a les excitabilités modales représentées sur la bande passante de la source. Le mode de compression L_{01a} est le mieux excité, suivi des deux modes de flexion F_{11} et F_{-11} . Enfin le mode de torsion T_{01} possède la plus petite excitabilité, compte tenu de la polarisation de la source.

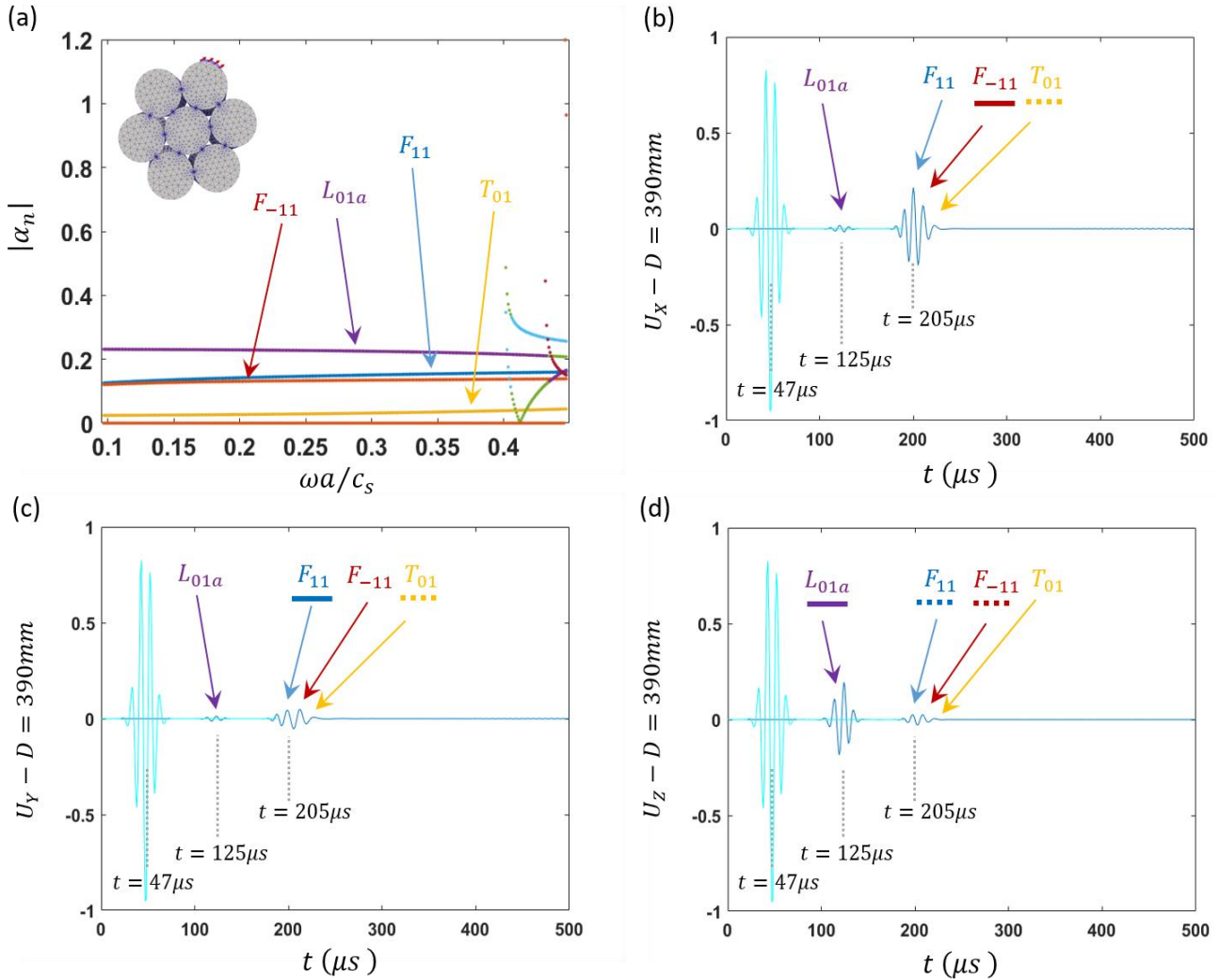


Figure 10 : Source en cisaillement axial selon l'axe z - Excitabilités modale sur la bande passante de la source (a) – A-scan simulé à une distance de 390 mm – (b) composante U_x - (c) composante U_y - (d) composante U_z

On distingue Figure 10(b-c-d) trois formes d'ondes. La première (bleu ciel) ne fait pas partie du A-scan, elle représente le signal temporel associé à l'excitation centré sur $t = 47\mu\text{s}$. Un premier paquet ($t = 125\mu\text{s}$) correspondant au mode le plus rapide L_{01a} et un second paquet ($t = 205\mu\text{s}$) qui mixe les contributions des trois autres modes F_{11} , F_{-11} et T_{01} .

L'amplitude des paquets d'onde est gouvernée conjointement par l'intensité de l'excitabilité modale d'une part et l'amplitude de la composante associée au champ de déplacement mesurée d'autre part. Ceci permet d'expliquer pourquoi les paquets associés au mode L_{01a} pour les composantes $U_x - U_y$ sont de faibles amplitudes, alors que la composante U_z (polarisation dominante pour le mode L_{01a}) est d'amplitude élevée.

Le second paquet au niveau de la composante U_x fait intervenir principalement le mode F_{-11} et T_{01} dont les polarisations sont dominantes pour cette composante et

dans la direction de mesure. Bien que le mode F_{11} possède une excitabilité plus importante que le mode T_{01} , ce dernier ne contribue pas à cause d'une polarisation trop faible sur sa composante U_x .

L'analyse de la composante U_y est presque similaire à la composante U_x . En effet, bien que le mode T_{01} possède une polarisation d'intensité égale pour les composantes $U_x - U_y$, on peut voir Figure 9b que la polarisation en U_y du mode T_{01} est de faible intensité au niveau du point de mesure, ce qui explique que le paquet soit de plus faible amplitude que celui associé à la composante U_x . On retrouve la contribution du mode F_{11} à la place du mode F_{-11} compte tenu de l'inversion des composantes dominantes.

Enfin, la composante U_z associée au second paquet est de très faible amplitude, compte tenu du profil des modes F_{11} et F_{-11} .

6. Conclusions

Ce papier synthétise des travaux de modélisation basés sur la méthode SAFE, dans le but de simuler la génération et la propagation d'ondes guidées dans une structure multibrin torsadée. L'influence des contacts entre les brins périphériques a été mise en évidence sur les caractéristiques modales des modes pouvant se propager dans cette structure. La génération d'ondes guidées par différents types de sollicitation imposée sur la surface latérale d'un ou plusieurs brins périphériques a été simulée dans le domaine fréquentiel. Les résultats d'excitabilités modales ont été présentés sur une large bande fréquentielle afin d'identifier les modes les plus sensibles à une sollicitation donnée. L'analyse des déformées modales a permis de montrer quelques modes de vibration particuliers (global, central ou périphérique) au sein de la structure multibrin.

Finalement, des simulations dans le domaine temporel enrichies par l'analyse modale pour identifier les temps de vol et les amplitudes des différents paquets de modes ont été réalisées.

L'exploitation de ces résultats est en cours dans une démarche de validation expérimentale dont le but est de mettre en œuvre des potentielles applications de CND.

Références

- [1] F. Treyssède et L. Laguerre, «Investigation of elastic modes propagating in multi-wire helical waveguides», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, pp. 1702-1716, 2010.
- [2] F. Treyssède, «Dispersion curve veering of longitudinal guided waves propagating inside prestressed seven-wire strands», *Journal of Sound and Vibration*, 2016.
- [3] F. Treyssède, «Investigation of the interwire energy transfer of elastic guided waves inside prestressed cables», *JASA*, 2016.
- [4] A. Frikha, P. Cartraud et F. Treyssède, «Mechanical modeling of helical structures accounting for translational invariance. Part 1: Static behavior», *International Journal of Solids and Structures*, vol. 50, n° 19, pp. 1373-1382, 2013.
- [5] A. Frikha, P. Cartraud et F. Treyssède, «Mechanical modeling of helical structures accounting. Part 2 : Guided wave propagation under axial loads», *International Journal of Solids and Structures*, 2013.
- [6] L. Gavric, «Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique», *Journal of Sound and Vibration*, n° 1185, p. 531–543, 1995.
- [7] T. Hayashi, W.-J. Song et J. L. Rose, «Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example», *Ultrasonics*, n° 141, p. 175–183, 2003.
- [8] F. Treyssède, «Elastic waves in helical waveguides», *Wave Motion*, n° 145, pp. 457-470, 2008.