

Propagation des ondes mécaniques dans les câbles ombilicaux destinés aux EMR en vue de leur évaluation non destructive

F. Treyssède, P. Cartraud, L. Laguerre, C. Zhou

Projet : OMCEND

Durée : 36 mois

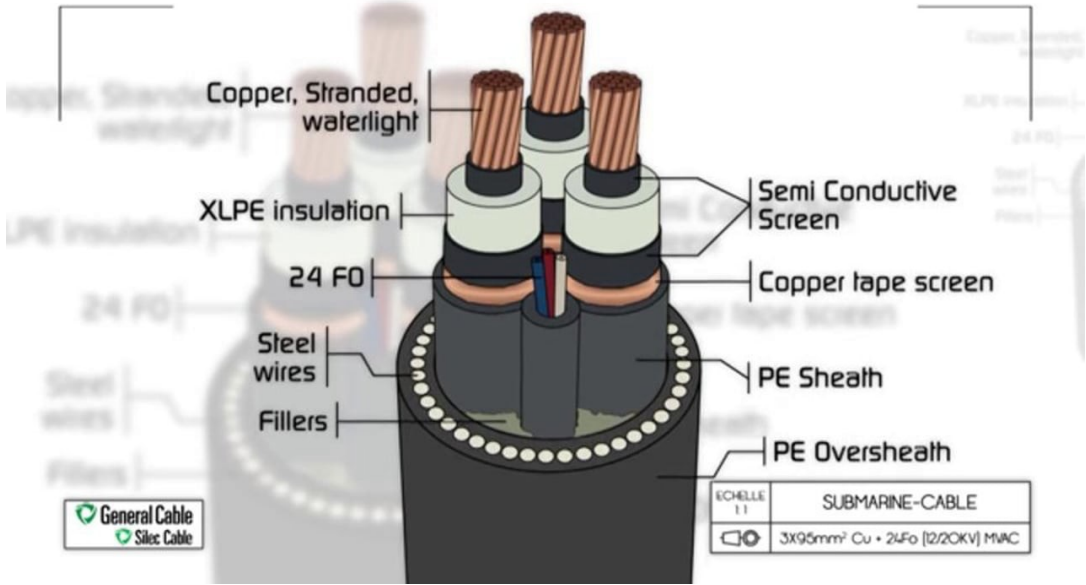


Consortium : IFSTTAR (GERS/GeoEND), ECN (GeM/MS)

Objectif : évaluer la faisabilité des ondes guidées pour le SHM/END des câbles de transport d'électricité de l'éolien flottant

OMCEND

Contexte et besoins : détection d'endommagements dans l'armure (~plastification des brins acier), pour anticiper la détérioration de la partie interne du câble (conducteurs)



Applications visées : développement de méthodes END/SHM robustes et faible coût

Pourquoi utiliser les ondes guidées ?

- Propagation sur de longues distances → moins de capteurs
- Sensibilité à des défauts de taille petite → diagnostic précoce

Mais... un phénomène physique complexe :

- Ondes guidées = ondes multimodales, dispersives
- Modèles de propagation : indispensables à une mise en œuvre END
- Hautes fréquences : recours à des simulations 3D rédhibitoire

Pourquoi utiliser les ondes guidées ?

- Propagation sur de longues distances → moins de capteurs
- Sensibilité à des défauts de taille petite → diagnostic précoce

Mais... un phénomène physique complexe :

- Ondes guidées = ondes multimodales, dispersives
- Modèles de propagation : indispensables à une mise en œuvre END
- Hautes fréquences : recours à des simulations 3D rédhibitoire

Verrou scientifique = difficultés de modélisation des câbles :

- Structures hélicoïdales, multi-brins, précontraintes, avec contacts mécaniques, en interaction avec d'autres milieux environnants (gaines, eau)...
- Nécessité d'un projet de recherche amont pour initier l'activité (TRL~2,3)

Approche proposée dans le projet :


- ✓ Développement de méthodes numériques pour la propagation des ondes mécaniques guidées dans les câbles de transport d'électricité
- ✓ Validations expérimentales des modèles
- ✓ Dimensionnement d'une instrumentation permettant d'évaluer la faisabilité des ondes mécaniques pour l'END de l'armure des câbles

OMCEND : complémentarité des partenaires

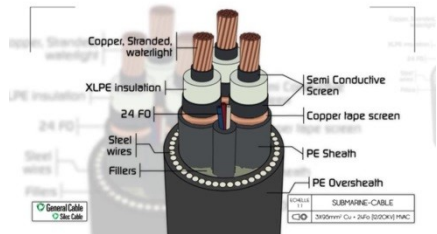


**Besoins
Spécifications**


Dynamique des câbles

Modélisation numérique ←  IFSTAR → Propagation des ondes guidées

↓
Expérimentation



Statique des câbles

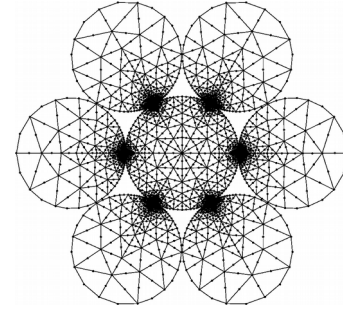
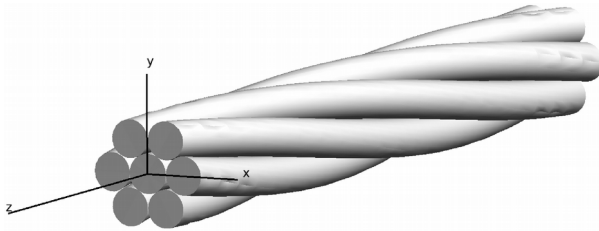
Modélisation numérique ←  CENTRALE NANTES → Homogénéisation Contact

↓
Tests mécaniques

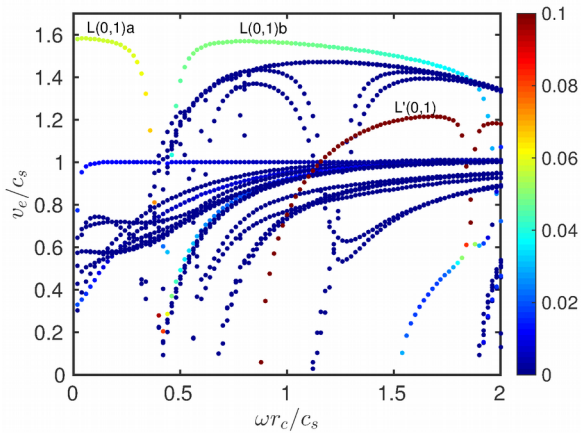
Support industriel
Besoins
Spécifications



Savoir-faire initial du consortium : le toron à 7 brins



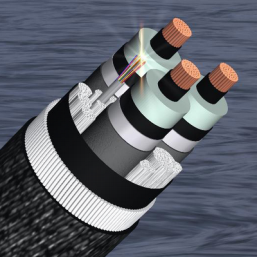
- Développements numériques pour les ondes guidées : modèles **SAFE** (Semi-Analytical Finite Element) prenant en compte la **symétrie hélicoïdale continue** (3D → 2D)
- Expérimentations en labo : dispositifs de mesure, bancs de traction,...
- Publications (*), projets ANR, expertises sur sites, brevet, co-développement techno.



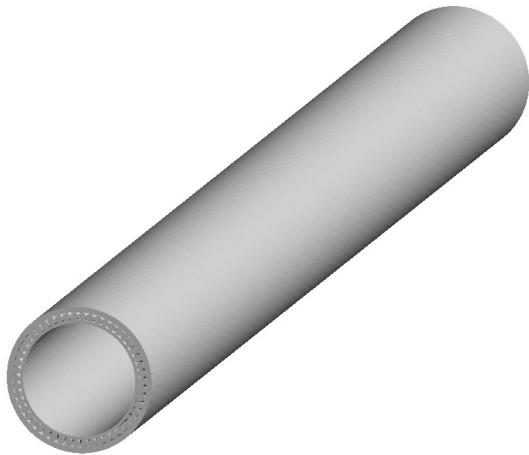
Calculs des courbes de dispersion :
 → détermination des {modes;fréquences}
 minimisant atténuation par dispersion + pertes
 → dimensionnement d'une instrumentation
 (fréquences, excitation, espacement capteurs,...)

(*) *Treysède and Laguerre JSV 2010*
Frikha, Cartraud and Treysède IJSS 2013
Treysède, Frikha and Cartraud IJSS 2013
Treysède JSV 2015...

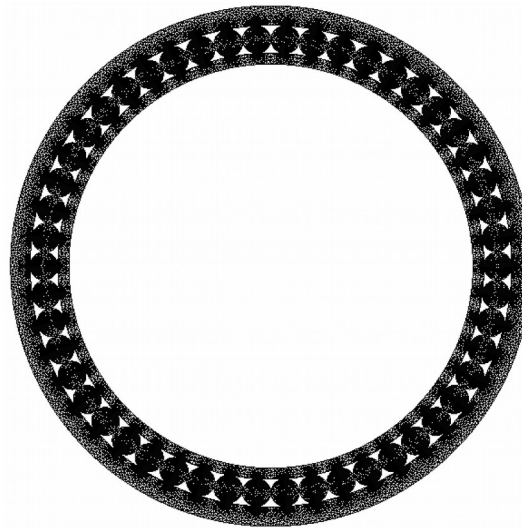
Cas des câbles statiques (i.e. armure simple)



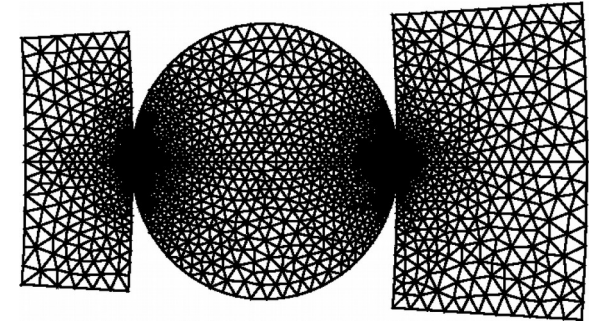
Méthode numérique permettant la prise en compte des symétries



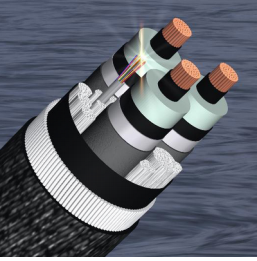
Approche 3D complète
→ > 1 milliard de dds
(pour un pas d'hélice complet)



Transformée de Fourier hélicoïdale
(modélisation 'SAFE')
→ ~ 1 000 000 dds...



Développements OMCEND :
SAFE + symétrie rotationnelle par
application de CL de Bloch-Floquet
→ ~ 20 000 dds



Cas des câbles statiques (i.e. armure simple)

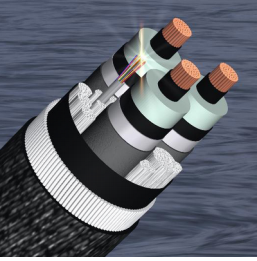
Paramètres géométriques et mécaniques retenus

- 50 brins : rayon $a=2.25$ mm, angle d'hélice 12° (pas \sim 117cm), acier ($E=215$ GPa, $\nu=0.3$, $\rho=7800$ kg/m³)
- gaine externe : épaisseur 3.2mm, MDPE ($E=0.67$ GPa, $\nu=0.4$, $\rho=1000$ kg/m³)
- gaine interne : épaisseur 1.8mm, MDPE (idem)
- rayon total du câble : 45mm

- chargement statique : élongation axiale 0.1 %, pression externe équivalente 20 bars (issue d'une évaluation gaine coupée) ^[*]

- hypothèses : âme homogène ($\nu=0.3$), **pas de contacts inter-brins**

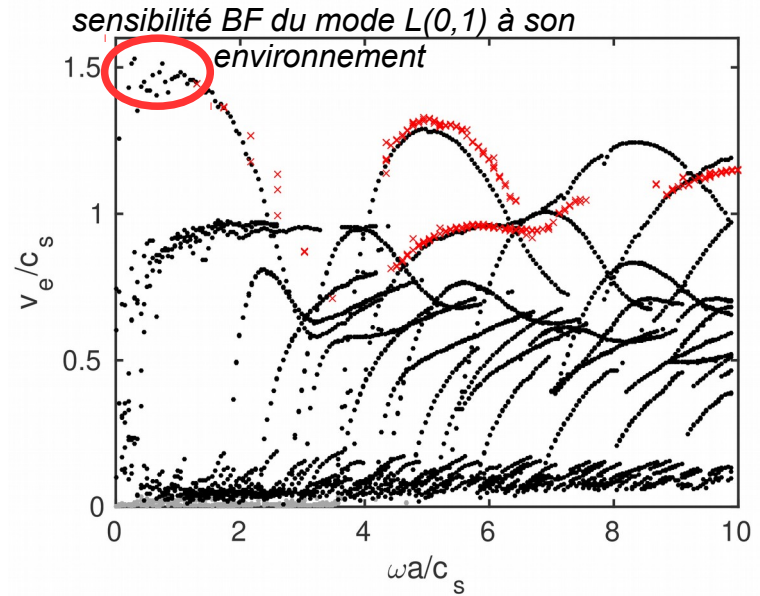
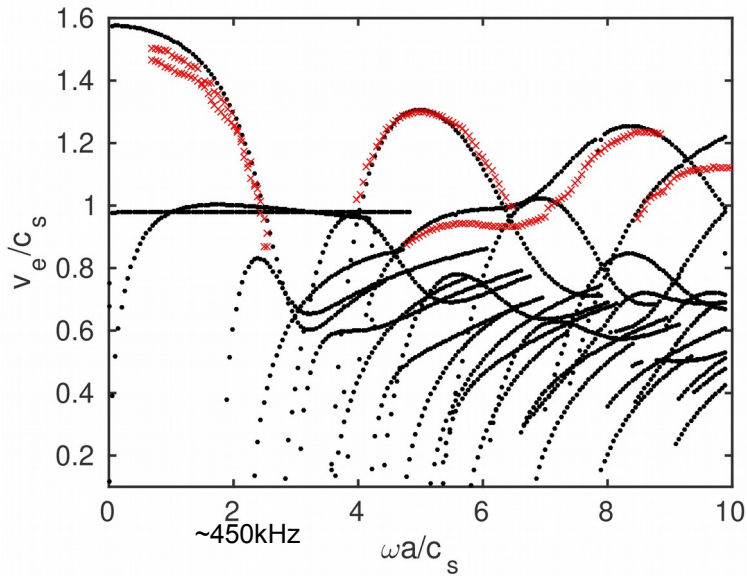
[] note : sans pression externe, les résultats de calculs aboutissent à un décollement brins / gaine externe*



Cas des câbles statiques (i.e. armure simple)

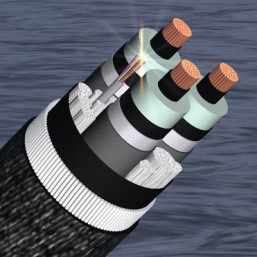
Comparaison calculs-mesures : courbes HF en vitesse d'énergie

Coefficients d'atténuation. Acier : $\kappa_L=0.003$, $\kappa_S=0.008$ Np/ λ , PE : $\kappa_L=0.02$, $\kappa_S=0.16$ Np/ λ



Vitesse d'énergie en fonction de la fréquence pour un brin seul déconnecté (à gauche) et la structure complète (à droite), points noirs : simulations ($n=0$), croix rouges : mesures

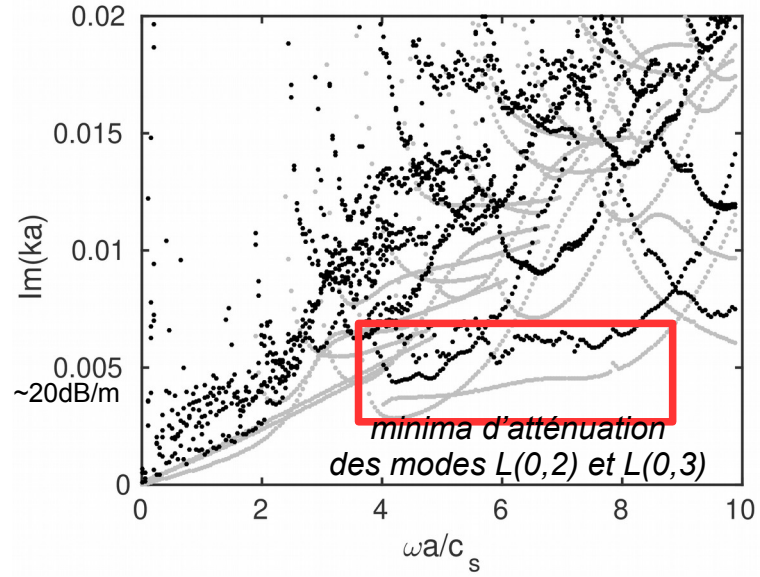
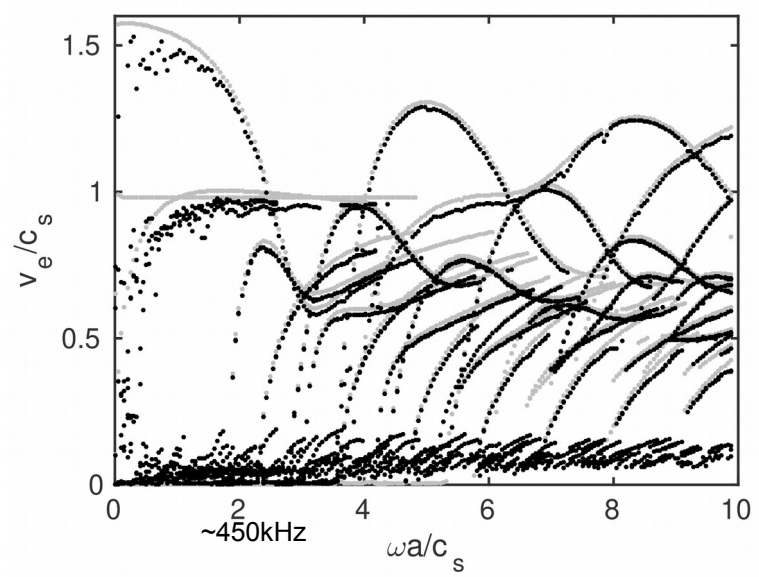
La propagation des ondes dans les brins apparaît comme peu sensible à la présence des gaines au-delà d'une certaine fréquence (qui \sim augmente avec l'aire de contact)



Cas des câbles statiques (i.e. armure simple)

Résultats numériques : courbes HF en vitesse d'énergie et atténuation

Coefficients d'atténuation. Acier : $\kappa_L=0.003$, $\kappa_S=0.008$ Np/ λ , PE : $\kappa_L=0.02$, $\kappa_S=0.16$ Np/ λ

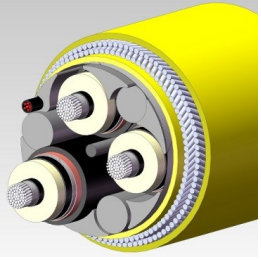


Vitesse d'énergie (à gauche) et atténuation (à droite) en fonction de la fréquence, points noirs : structure complète (n=0), points gris : brin seul

L'atténuation est plus importante que dans un brin seul (elle augmente avec l'aire de contact)

- Modes potentiellement intéressants pour le CND : modes de compression $L(0,n)$
 - **$L(0,3)$** : distances de 2 à 3m
 - $L(0,2)$: comparable à $L(0,3)$ mais moins excitable
 - $L(0,n)$, $n > 3$: trop atténués
 - **$L(0,1)$** : plus longue distances, mais basse fréquence (nécessite un dispositif expé autre) et donc potentiellement plus sensible à l'environnement
- Travaux en cours et futurs :
 - expérimentations avec défauts (en cours)
 - expérimentations spécifique basse fréquence pour une excitation plus optimale du $L(0,1)$
- Fin du projet : courant 2020

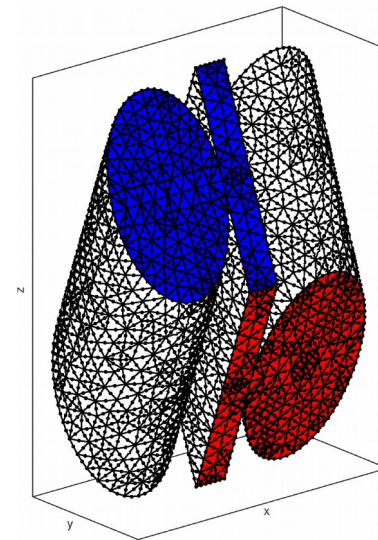
Cas des câbles dynamiques (i.e. armure double)



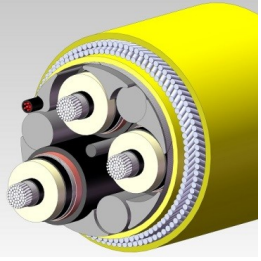
Méthode numérique permettant la prise compte des symétries



- Modélisation 3D complète : inenvisageable (~100 brins dans chaque couche)
- SAFE : inapplicable (les hélices tournent en sens opposés)



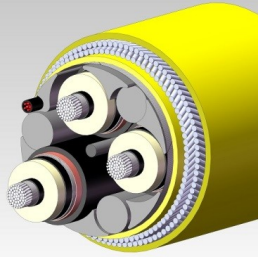
- Développements OMCEND : méthode WFEM bi-hélicoïdale**
- **réduction du modèle 3D à la cellule unitaire répétitive du problème (ondes de Bloch)**



Cas des câbles dynamiqués (i.e. armure double)

Paramètres géométriques et mécaniques retenus

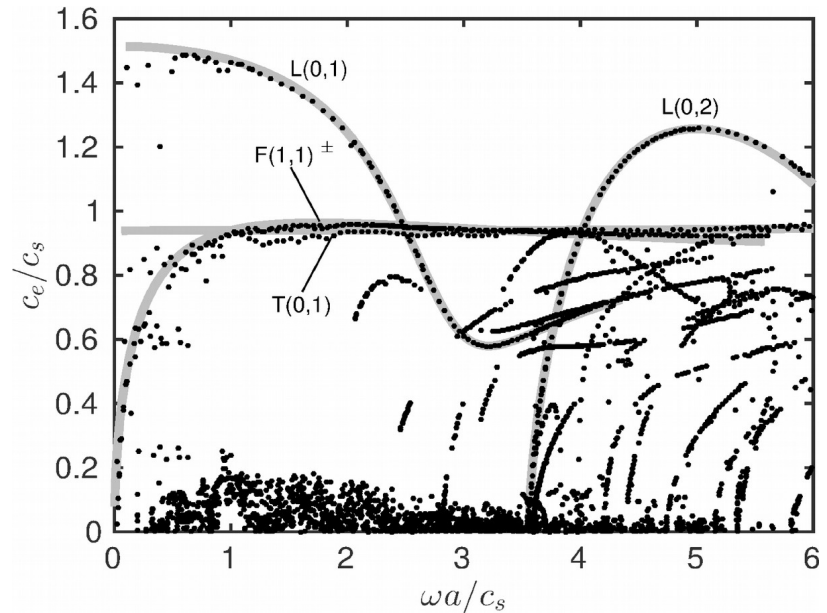
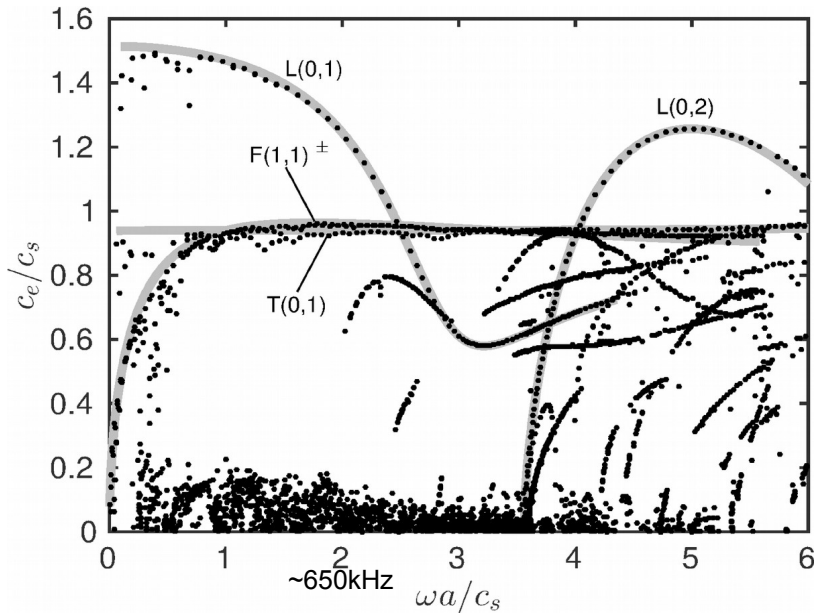
- brins : diamètre $2a=3.15$ mm, angles d'hélice $\pm 20^\circ$, acier ($E=210\text{GPa}$, $\nu=0.3$, $\rho=7800\text{kg/m}^3$)
- 112 brins pour la couche externe, 106 pour la couche interne
- gaine intermédiaire : épaisseur 0.8mm, choix d'un matériau PE plus rigide que le fluoroélastomère pour raisons numériques ($E=1\text{GPa}$, $\nu=0.4$, $\rho=1000\text{kg/m}^3$)
- diamètre total du câble : 141.6mm (gaine externe incluse)
- simplifications : gaines ext. (MDPE) et int. (HDPE) non modélisées, pas de chargement statique
- hypothèse : pas de contacts inter-brins, contact linéique avec la gaine
- stratégie de calcul : recherche des solutions, avec atténuation (visco.), centrées autour des modes du brin seul



Cas des câbles dynamiques (i.e. armure double)

Résultats numériques : courbes en vitesse d'énergie

Coefficients d'atténuation. Acier : $\kappa_L=0.003, \kappa_S=0.008 \text{ Np}/\lambda$, PE : $\kappa_L=0.02, \kappa_S=0.16 \text{ Np}/\lambda$



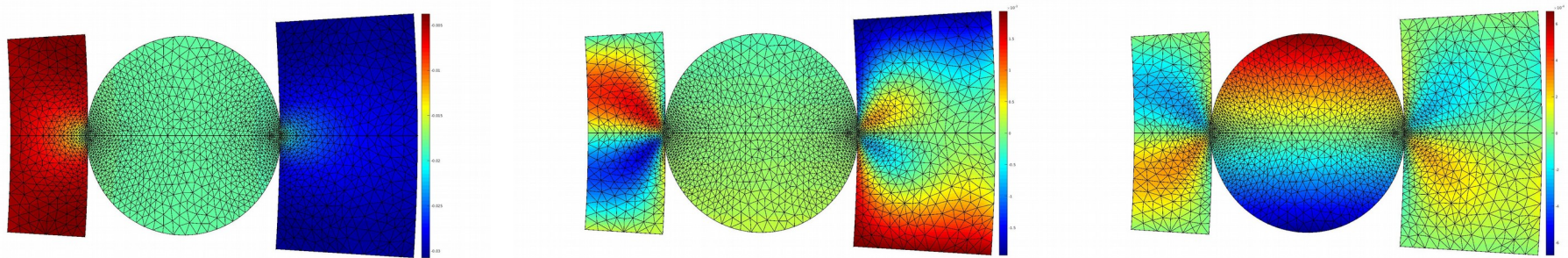
Vitesse d'énergie en fonction de la fréquence pour $n=0$ (à gauche) et $n=50$ (à droite),
points noirs : structure complète, points gris : brin seul

Annexes

Résultats statiques

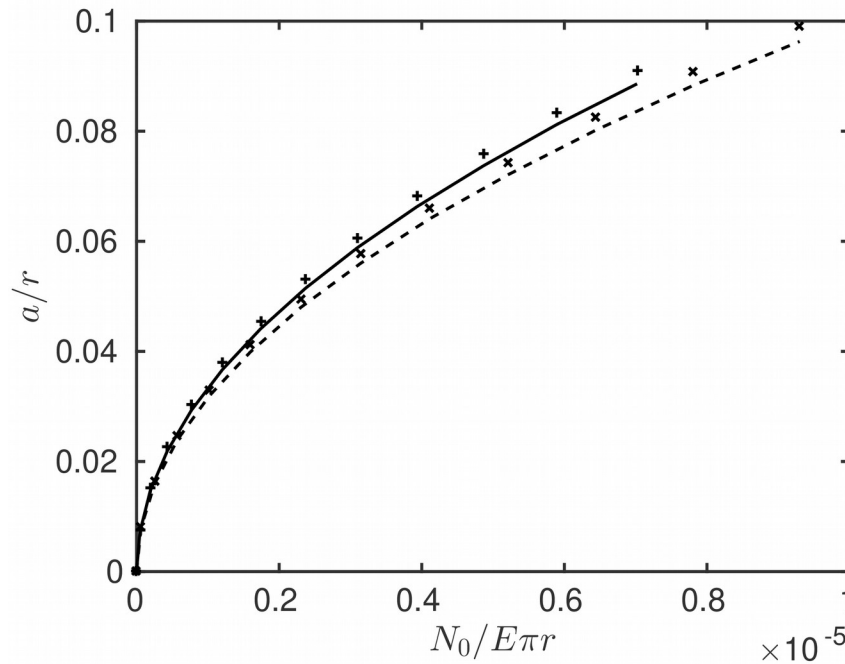
Efforts résultants : $T = 2,9\text{kN/brin} \times 50 = \mathbf{145\text{ kN}}$, $M = 24,9\text{N.m/brin} \times 50 = \mathbf{1245\text{ N.m}}$

Aires de contact brin/gaines : validée par théorie de Hertz (cylindre-cylindre)



Champs de déplacement micro normalisés U_x/a , U_y/a , U_z/a

Validation du contact par la théorie de Hertz (deux cylindres droits)



Demi-largeur de contact en fonction de l'effort normal. Traits plein et pointillé : résultats pour le contact avec la gaine externe et la gaine interne respectivement.