

Étude de l'endommagement d'un accouplement élastomère en grande déformation : Analyse de la génération de forces axiales parasites.

L. FLACELIERE^a, E. ROULLAND^b

a. Cabinet LF, lf.cabinetlf@gmail.com

b. Icam, Site de Vendée, elodie.roulland@icam.fr

Résumé :

Les accouplements élastomères sont couramment employés pour l'amortissement des vibrations et la compensation des désalignements entre arbres. Cet article présente l'analyse d'un accouplement entraîné par un moteur Diesel présentant des fissurations visibles sur les plots d'élastomère, potentiellement génératrices d'efforts axiaux parasites. À partir d'une étude expérimentale visuelle et d'une première simulation statique linéaire (SolidWorks Simulation), nous dressons un premier bilan des déplacements axiaux induit par ces endommagements.

*Afin de décrire plus fidèlement le comportement du matériau, des simulations en **grande déformation** ont été conduites en considérant une loi constitutive **hyperélastique** appropriée et une formulation d'endommagement scalaire inspirée de la **Mécanique du Dommage Continu (MEC) de Lemaitre** et des approches de **Chaboche** pour la prise en compte des effets cycliques. L'endommagement est quantifié par un paramètre "d" traduisant la réduction effective du module selon la loi :*

$$E_{eff} = E_0(1-d)$$

Les résultats de la confrontation entre l'approche linéaire et la modélisation en grandes déformations montrent une convergence des résultats avec un écart inférieur à 4%. Cette similitude démontre que, tant que l'élastomère travaille dans son domaine élastique, le modèle linéaire bien paramétré constitue un outil de diagnostic robuste et suffisant. L'étude confirme que les dégradations observées, dépassant les seuils critiques du constructeur, transforment l'accouplement en un "générateur de forces" axiales capables de provoquer une usure anormale des paliers d'arbres de transmission. Ces conclusions soulignent l'importance cruciale de la maintenance préventive et du respect des inspections visuelles périodiques pour garantir l'intégrité de la chaîne cinématique

Afin de confronter la partie calculatoire de cet article à la réalité du terrain, nous avons par la suite mené des tests sur un accouplement neuf ainsi qu'un accouplement endommagé afin d'en tirer les déplacements axiaux réels en fonction d'un couple. Ces tests corroborent les résultats obtenus dans la partie calculatoire.

Mots clefs :

Mécanique, Endommagement, Élastomère, Grande Déformation, Éléments Finis, Lemaitre, Chaboche.

1 - Introduction

Les accouplements élastomères jouent un rôle essentiel dans les transmissions mécaniques industrielles, en assurant la liaison entre arbres tout en amortissant les vibrations et les désalignements. Leur comportement est largement dicté par les propriétés des blocs d'élastomère, qui présentent de fortes capacités d'allongement réversible et des réponses mécaniques intrinsèquement non linéaires. La formation de fissures ou d'altérations locales, sous sollicitations répétées ou conditions sévères d'exploitation, entraîne une diminution progressive des performances et peut compromettre la tenue mécanique de l'ensemble.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à un accouplement de type Diesel installé sur un moteur de bateau, dont les plots d'élastomère présentent des fissures macroscopiques. L'objectif principal est de déterminer si ces dégradations génèrent des efforts axiaux parasites " F_z " significatifs, susceptibles d'avoir provoqué l'endommagement anormal des paliers d'arbres de transmission. Pour quantifier l'impact de cet endommagement, nous utilisons l'approche de Lemaitre, enrichie des effets cycliques de Chaboche, où le module d'élasticité effectif est défini par la loi : $E_{eff} = E_0(1-d)$.

Cette loi d'endommagement est appliquée à deux étapes de modélisation numérique sous SolidWorks Simulation :

- Une première approche en statique linéaire pour établir un diagnostic rapide des zones de concentration de contraintes et de la perte de raideur.
- Une phase de consolidation en grandes déformations, visant à vérifier si la non-linéarité géométrique influence l'estimation des efforts axiaux.

Cette seconde étape constitue une démarche de vérification approfondie. Bien que l'on puisse anticiper des similitudes de résultats puisque le matériau travaille principalement dans son domaine élastique, cette confrontation de modèles est indispensable pour valider la robustesse de l'approche simplifiée et garantir la pertinence des recommandations de maintenance.

2 - Modélisation de l'Endommagement et Justification de l'Approche Non-Linéaire

2.1 - Mécanique de l'Endommagement Continu (MEC) de Lemaitre

La dégradation des plots élastomères par fissuration se traduit par une diminution de la section porteuse et, par conséquent, un affaiblissement mécanique. La Mécanique de l'Endommagement Continu (MEC), formalisée par Jean Lemaitre [Lemaitre, 1985 ; 1996], fournit le cadre pour quantifier cet effet.

La MEC introduit la variable d'endommagement scalaire d ($0 \leq d \leq 1$), qui est une mesure statistique de la perte d'intégrité de la matière. L'effet le plus direct et exploitable dans cette étude est la réduction du module d'élasticité initial (E_0) vers le module effectif endommagé (E_{eff}) :

$$E_{\text{eff}} = E_0(1-d)$$

Cette relation permet de lier directement l'observation des fissures sur le site à une modification des propriétés du matériau dans la simulation. Pour l'accouplement étudié, le paramètre “ d ” est estimé à partir de la géométrie des fissures visibles, par exemple en reliant la profondeur de fissure (a) à l'épaisseur totale de l'élastomère (t) : $d \approx a/t$. L'étude numérique consiste à tester l'impact de ce paramètre “ d ” sur la raideur globale et la génération de forces axiales.

2.2 - Modélisation Hyperélastique et Grande Déformation (Nécessité)

La simulation statique initiale repose sur l'hypothèse de l'élasticité linéaire et des petites déformations. Cependant, les élastomères sont des matériaux quasi-incompressibles opérant sous grandes déformations. L'approche linéaire est donc limitée.

Pour obtenir une prédiction physique robuste, notamment des concentrations de contraintes autour des fissures, la modélisation doit intégrer une loi constitutive hyperélastique et une formulation en grandes déformations. Ce cadre est nécessaire pour coupler correctement l'endommagement de Lemaitre avec le comportement non-linéaire du caoutchouc, expliquant ainsi les efforts parasites observés.

2.3 - Perspectives : Rôle des Modèles de Chaboche

Pour les applications futures, il est pertinent de mentionner l'impact du cycle de vie et de la fatigue. Les travaux de Jean-Louis Chaboche [Chaboche, 2008] sont une référence pour la modélisation du comportement élasto-viscoplastique et de l'endommagement évolutif. Bien que l'étude actuelle se concentre sur l'état de dommage statique, l'intégration des modèles de Chaboche serait l'étape suivante pour prédire la durée de vie de l'accouplement sous sollicitations dynamiques et cycliques (fatigue, effet Mullins).

Les modèles de Chaboche permettraient notamment de décrire l'évolution du comportement mécanique au fil des cycles, en tenant compte de la perte progressive de rigidité (via le coefficient “ d ”). Ils offriraient également un cadre adapté pour intégrer les effets dépendants du temps, tels que le fluage ou l'hystérèse caractéristique des élastomères. Enfin, leur utilisation ouvrirait la voie à une approche véritablement prédictive du vieillissement mécanique et du scénario d'endommagement de l'accouplement en service.

3 - Caractéristiques de modélisation

Cette section décrit la méthodologie utilisée pour construire le modèle numérique de l'accouplement élastomère et définit les paramètres clés, en distinguant ceux de l'étude statique initiale et ceux de l'approche avancée.

3.1 - Géométrie et Approche Numérique

L'objet de l'étude est un accouplement élastomère installé sur un moteur diesel marin. L'accouplement étant hors service, nous ne pouvons pas aller sur ce bateau pour faire nos mesures, l'accouplement est ancien, il date de 1999 la géométrie du modèle 3D a été reconstituée à partir de photographies de plans fournies par la compagnie maritime.

En l'absence de fichiers numériques, les dimensions manquantes ont été déterminées par une approche de **règle de trois** à partir des côtes tirées de la **Fig. 1 : Plan de l'accouplement**. Il est reconnu que cette méthode introduit une incertitude due à la perspective photographique et aux plis du document. Le modèle CAO a été créé initialement sous **SolidWorks**. Pour l'étude avancée (§ 6), cette géométrie a été exportée vers un solveur par éléments finis capable d'intégrer la **non-linéarité géométrique** et les **grandes déformations**.

Le solveur FFE+ de SolidWorks Simulation, utilisé lors de la simulation linéaire, est un solveur itératif qui procède par approximations successives : il commence par supposer une solution, calcule l'erreur associée, puis ajuste cette solution jusqu'à ce que le niveau d'erreur devienne acceptable. Il utilise des techniques de réordonnancement de matrices, particulièrement intéressantes pour les modèles comportant un très grand nombre de degrés de liberté et les grandes études linéaires.

Le solveur Newton–Raphson de SolidWorks Simulation repose sur une incrémentation temporelle, où la charge est appliquée progressivement. À chaque incrément, il cherche l'équilibre entre les forces internes et externes en suivant un processus itératif. Il commence par une estimation initiale du déplacement, puis évalue le résidu, c'est-à-dire l'écart entre les forces internes générées par la déformation et les forces appliquées. Grâce à cette estimation, il construit la matrice de raideur tangentielle, qui représente la réponse instantanée du système, puis calcule une correction du déplacement pour se rapprocher de l'équilibre. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que le résidu devienne suffisamment faible. Grâce à cette mise à jour continue au cours du temps, le solveur Newton–Raphson est capable de gérer efficacement les comportements non linéaires liés aux grandes déformations, aux matériaux hyper-élastiques ou aux contacts évolutifs.

3.2 - Photographies d'Endommagement et Documentation Constructeur

L'analyse visuelle **Fig. 4.2 : Photographies de l'accouplement endommagé** a révélé une dégradation importante des plots élastomères.



Fig. 1 Photographies de l'accouplement élastomère

La documentation constructive obtenue [Stromag, 2019] confirme que cette usure excède les limites de service, comme l'illustre le **Tableau 4 : Fissures maximales admissibles** (tiré du document TM 871.00007).

Table 1: Max. admissible crack depth of the rubber elements

Coupling size	S- Segment X [mm]	T- Segment Y [mm]
2000	18	9
3150	14	7
5000	16	8
8000	14	7
10000	15	8
12500	17	9
16000	18	9
20000	19	10
25000	21	11
31500	23	12
40000	24	12
50000	26	13
63000	29	14
80000	31	16
100000	34	17
125000	36	18

Fig. 3 Tableau extrait de la documentation constructive



Fig. 4 Sections « T » avec fissures dans la zone Y (traits jaunes)

Le constructeur précise que le remplacement de l'élément est impératif en cas de fissures profondes dans le volume de caoutchouc, ce qui est le cas observé. La fissuration, visiblement supérieure à 10 mm, justifie l'hypothèse que la section transversale de transmission du couple a été significativement affaiblie.

Contraintes sur les éléments élastomères :

Texte extrait de la documentation constructeur et traduit :

Le couple est transmis par une déformation par cisaillement du volume de caoutchouc non seulement avec l'élément S mais également avec l'élément T. La transmissibilité est basée sur la taille, la géométrie et les caractéristiques du matériau de ce volume.

En raison des différents taux de service et indices de contrainte, le caoutchouc présente des traces d'utilisation après plus ou moins temps de service. Les traces les plus fréquentes sont :

- a) **Durcissement de la surface du caoutchouc (porosité).***
- b) **Déformation permanente du volume de caoutchouc dans le sens de la torsion avec accouplement déchargé.***
- c) **Fissures naissantes à la surface du caoutchouc.***
- d) **Fissures dans le volume de caoutchouc.***
- e) **Décollements entre le volume de caoutchouc et les pièces métalliques vulcanisées.***

Les traces visibles d'utilisation telles que les fissures naissantes sur la surface du caoutchouc ou les déformations permanentes n'affectent pas la transmissibilité des éléments flexibles.

*En cas de traces d'usure importantes telles que des **fissures profondes dans le volume de caoutchouc** ou sur **toute la largeur de l'élément**, la section transversale de **transmission du couple est affaiblie**.*

*De telles fissures peuvent notamment apparaître aux points marqués par « X » ou « Y ». **L'élément en caoutchouc doit être remplacé** si une telle fissure apparaît sur toute la largeur de l'élément et si la profondeur de la fissure mesurée dépasse la valeur « X ». Si la profondeur de fissure mesurée dépasse la valeur « X » ou « Y » (tableau 1), alors l'élément élastomère doit être absolument remplacé sur l'ensemble de la bague d'accouplement.*

Ce paragraphe montre que le constructeur prescrit de remplacer les éléments en élastomère en cas de surface poreuse (a), de fissures naissantes à la surface de l'élastomère (c) ou s'il y a des fissures dans le volume du caoutchouc (en profondeur) (d).

Ces 3 conditions ont été remplies, le changement de l'élastomère aurait été impératif. Il est donc probable que des forces axiales inhabituelles sont présentes dans le système.

4 – Études Statiques Initiales : Bilan des Modèles Linéaires

Le but de cette première série de simulations statiques est d'évaluer si l'endommagement de l'élastomère peut, dans le cadre d'une approche linéaire, engendrer les efforts axiaux anormaux suspectés d'avoir causé la rupture des cales du vilebrequin.

4.1. Protocole de Simulation et Conditions aux Limites

Deux simulations initiales ont été réalisées sur le modèle CAO SolidWorks, en régime d'élasticité linéaire :

1. **Cas de Référence** : Élastomères considérés comme non-dégradés.
2. **Cas 2** : Élastomères intégrant la géométrie des fissures observées sur site.

Ces deux cas d'étude sont réalisés à température constante sans prise en compte de l'échauffement relatif.

Pour ces deux simulations, le couple maximal du moteur a été appliqué à $T_{\max} = 18\,580 \text{ N.m}$ (valeur fournie par le client) sur les perçages de fixation. Le flasque opposé, au niveau de la liaison avec la transmission, a été fixé en translation. Les contraintes appliquées à cette pièce empêchent sa translation sur les axes X, Y et Z ainsi que sa rotation sur les axes X, Y et Z.

- Le schéma de l'application du chargement et des conditions aux limites, fusionnant les informations des anciennes **Fig. 6 et Fig. 7**.



Fig. 5 Accouplement modélisé avec une face bloquée (face bleue)

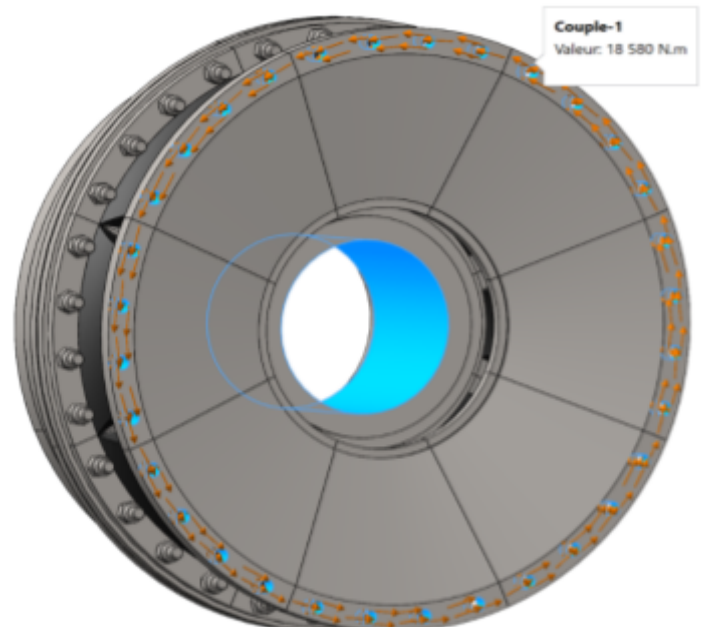


Fig. 6 Application du couple (flèches orange)

- o *Référence* : "Le couple moteur est appliqué sur les perçages (voir **Fig. 7 : Application du couple**)."

4.2. Cas de Référence : Limites du Modèle Linéaire Simplifié

Le module d'élasticité $E_0 = 50$ MPa a été utilisé pour ces études.

4.2.1. Élastomères Non-Dégradés (Cas 1)

Avec des éléments élastomères non dégradés et un comportement linéaire, la déformation maximale observée est de 1,6%, ce qui est faible et cohérent avec l'hypothèse d'une élasticité linéaire.

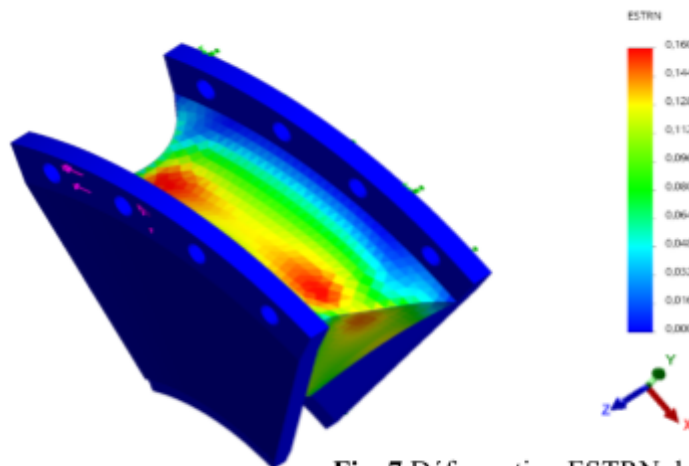


Fig. 7 Déformation ESTRN de l'élément T

Le déplacement résultant observé au travers de cette étude nous servira de base de comparaison pour les tests avec un matériau élastomère endommagé.

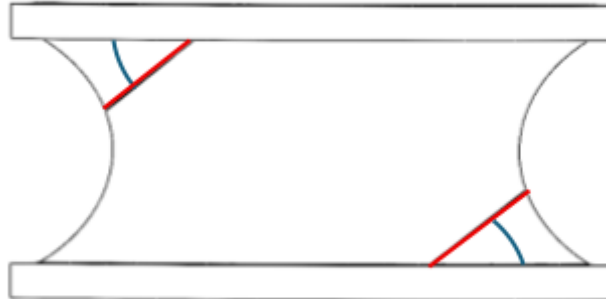
4.3. Étude de Sensibilité : Influence Croisée du Dommage Matière et Géométrique

Afin d'évaluer la sensibilité de la raideur axiale dans le cadre du modèle élastique linéaire, une **étude de conception paramétrique** exhaustive a été menée. Cette démarche couple l'effet de deux facteurs de dégradation majeurs : le vieillissement du matériau et l'évolution géométrique des fissures.

L'étude se base sur deux variables principales :

1. **Dommage Matière (Module d'Élasticité E_{eff})** : Simulant le vieillissement du polymère, le module de Young initial E_0 a été fixé à 50 MPa (valeur haute de référence pour ce type de caoutchouc). Il a ensuite été réduit progressivement par paliers de 10% jusqu'à 50% de sa valeur initiale. Cette variation simule l'effet d'un paramètre de dommage "d" variant de 0 à 0.5, conformément à la loi de Lemaitre/Chaboche : $E_{\text{eff}} = E_0(1-d)$.

2. **Dommage Géométrique (Fissures) :** L'influence de la géométrie de la fissure est explorée en faisant varier l'**Angle de Fissure (bleu)** ($12,5^\circ$, 25° , $37,5^\circ$) et la **Longueur de la Fissure (rouge)** (45 mm, 55 mm, 65 mm).



L'analyse est réalisée sur les **déplacements maximaux** dans la zone de fixation (déplacement axial u_z et radial u_r , dont l'évolution progressive est analysée en fonction de la dégradation de la matière et des variations géométriques. L'objectif est de vérifier si le modèle linéaire est apte à prédire une raideur axiale suffisamment faible pour expliquer les efforts axiaux anormaux.

4.3.1. Influence de l'Endommagement Matière sur la Raideur Axiale u_z

L'analyse du déplacement axial u_z est primordiale, car il est directement lié à la force parasite F_z recherchée. L'évolution de ce déplacement illustre la diminution de la raideur du système à mesure que le dommage progresse, traduisant le ramollissement de la matière élastomère.

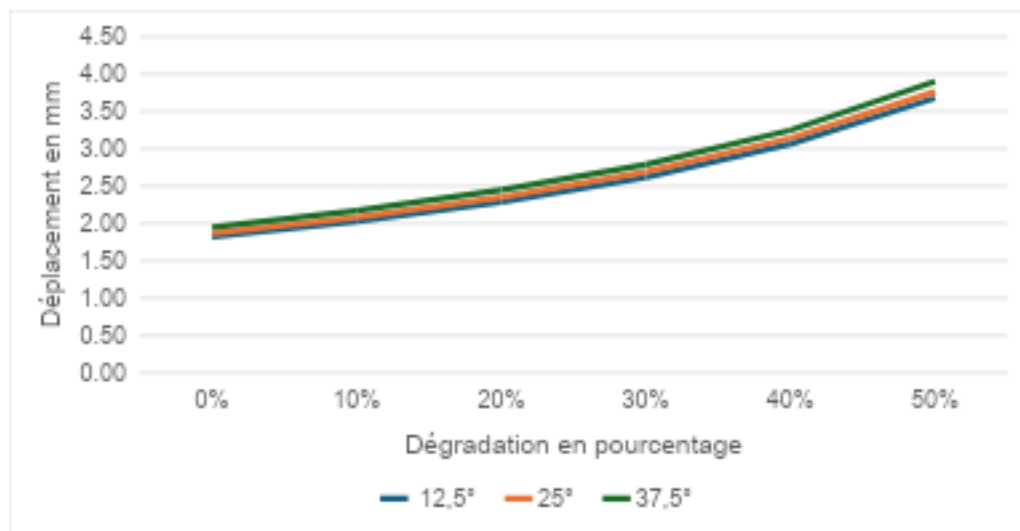


Fig. 8.a : Déplacement axial u_z en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 45 mm.

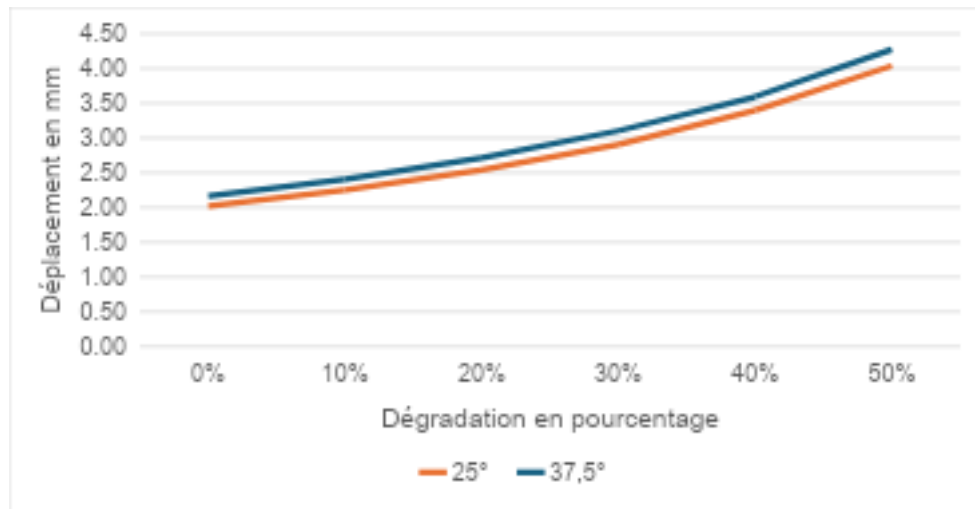


Fig. 8.b : Déplacement axial u_z en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 55 mm.

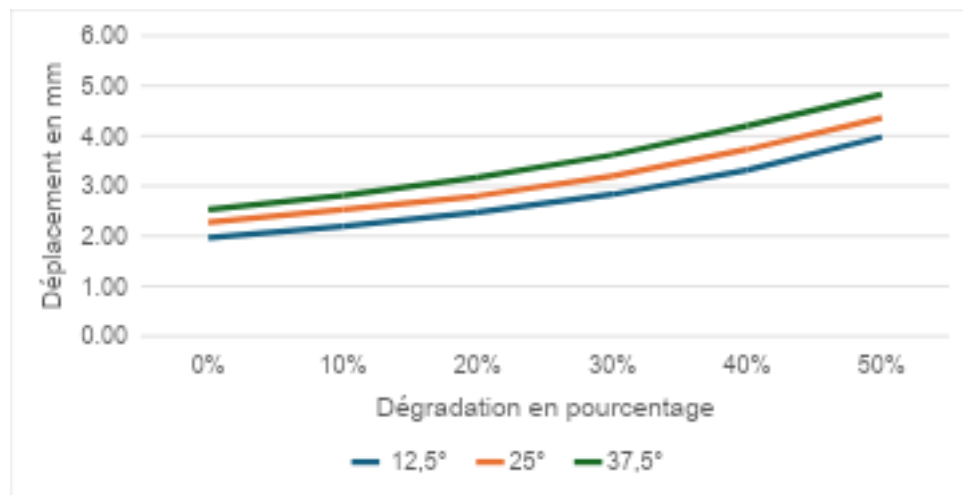


Fig. 8.c : Déplacement axial u_z en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 65 mm.

Analyse des Résultats u_z :

Comme l'illustrent les **Fig. 9.a à 9.c**, le déplacement axial u_z augmente de manière non linéaire à mesure que le module d'élasticité se dégrade (passant de 100% à 50% de sa rigidité initiale).

1. **Impact de la Profondeur de Fissure :** L'augmentation de la profondeur de fissure (passant de 45mm à 65mm) conduit à une amplification marquée de u_z , notamment pour les modules les plus faibles. Ceci confirme l'impact prépondérant du facteur géométrique $d \approx a/t$ (perte de section) dans la diminution de la raideur axiale du système.
2. **Impact de l'Angle de Fissure :** L'angle de fissure exerce une influence notable, notamment pour les forts niveaux d'endommagement matière. L'écart entre les courbes des différents angles s'accroît lorsque le module descend, indiquant une interaction croisée significative entre les deux composantes du dommage.

Le déplacement u_z étant **inversement proportionnel** à la **raideur axiale** du système ($K_z = F_z / u_z$), son amplification sous l'effet du dommage confirme la perte de rigidité (réduction de K_z) et la pertinence d'étudier ce phénomène pour expliquer la défaillance.

4.3.2. Influence de l'Endommagement Matière sur la Déformation Transverse u_r

Le déplacement radial u_r est un indicateur de la déformation transversale de l'accouplement.

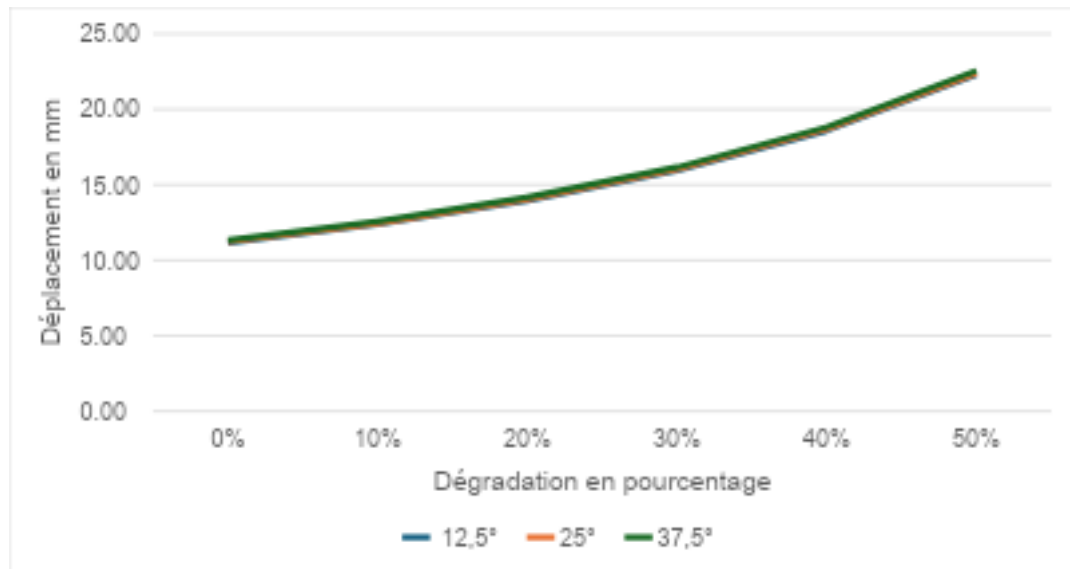


Fig. 9.a : Déplacement radial u_r en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 45 mm.

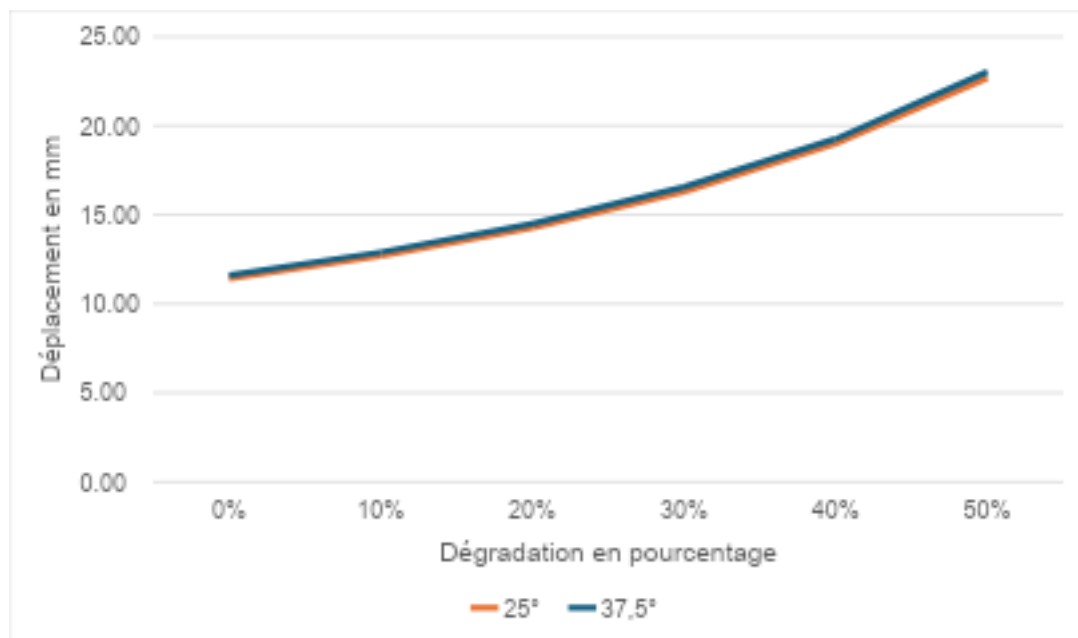


Fig. 9.b : Déplacement radial u_r en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 55 mm.

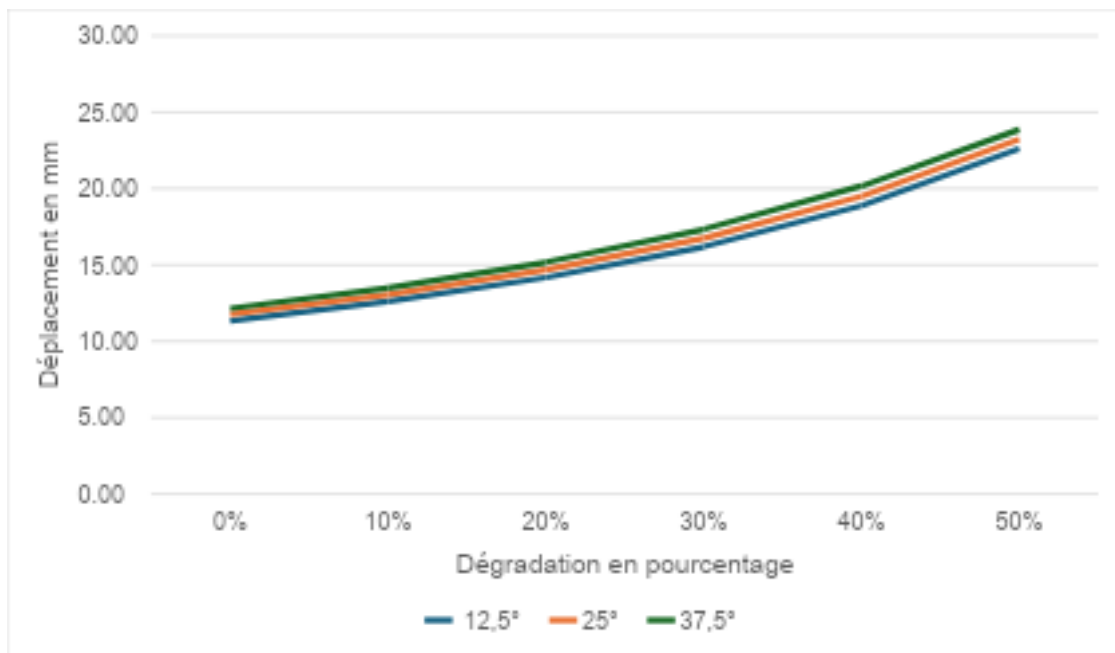


Fig. 9.c : Déplacement radial u_r en fonction de la dégradation du module E (avec variations d'angle) pour une profondeur de fissure de 65 mm.

Analyse des Résultats u_r :

Les **Fig. 10.a à 10.c** montrent une tendance similaire à celle de u_z : le déplacement radial u_r augmente systématiquement avec la dégradation du module et l'augmentation de la profondeur de fissure. Ceci indique que la dégradation de la raideur n'est pas confinée à l'axe de transmission mais impacte également la capacité de l'accouplement à résister aux déformations transverses et au désalignement.

4.4. Conclusion

L'étude statique linéaire a confirmé que le système est sensible au dommage (via la réduction de E et les variations géométriques). Cependant, notre méthode de calcul "statique linéaire" reste dans le domaine des petites déformations ce qui est, non cohérents avec les observations initiales de l'élastomère fissuré. Le modèle linéaire n'est pas apte à capter l'amplification des contraintes locales de manière réaliste.

De plus, ces simulations ont été menées dans des **conditions de chargement simplifiées** (couple moteur seul), sans prendre en compte les sollicitations réelles de service qui peuvent engendrer une force axiale, notamment :

- Le **désalignement** des axes du moteur et des arbres (générant un effort axial).
- Le **déséquilibre dynamique** et les vibrations (impliquant des efforts axiaux potentiels).
- La **poussée axiale** générée par l'hélice du bateau et transmise à la chaîne cinématique.

Cette double limitation (loi constitutive linéaire et conditions aux limites simplifiées) justifie la mise en œuvre de l'étude en **grande déformation hyperélastique couplée à l'endommagement de Lemaitre/Chaboche** (§5), afin d'approcher un état de contrainte plus réaliste de l'accouplement endommagé.

5. Étude en Grandes Déformations et Validation du Modèle

Afin de s'assurer que les hypothèses du modèle linéaire ne sous-estiment pas les efforts axiaux, une analyse intégrant les grands déplacements a été réalisée. L'enjeu était de vérifier si la déformation géométrique des plots fissurés modifiait radicalement la direction ou l'intensité des efforts transmis à l'arbre de transmission.

5.1 - Analyse des similitudes et domaine élastique

Les simulations montrent que les résultats obtenus en grandes déformations sont sensiblement identiques à ceux de l'étude linéaire initiale. Cette convergence s'explique par le fait que, malgré l'endommagement marqué du matériau (d), les sollicitations maintiennent l'élastomère dans son domaine de réponse élastique. En l'absence de comportement plastique, la relation entre l'endommagement et l'effort axial reste stable, confirmant que le modèle linéaire capture l'essentiel du phénomène physique.

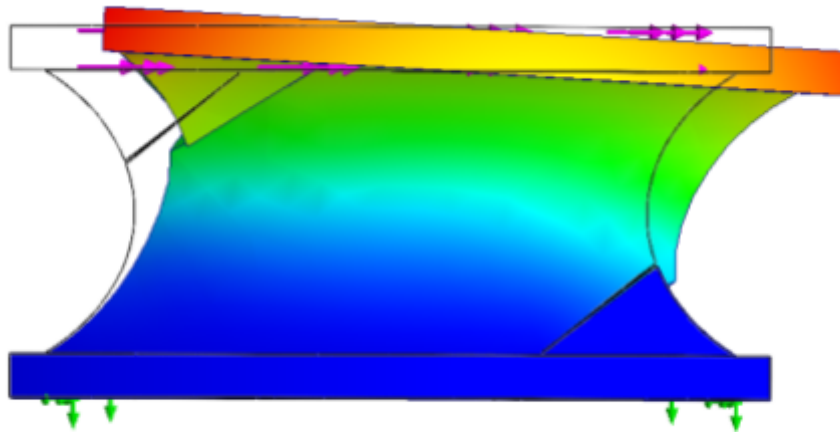


Fig. 10 : Visualisation de l'impact de l'endommagement sur la géométrie du plot : superposition du modèle nominal et du modèle dégradé sous sollicitation

5.2. Synthèse et fermeture de la branche d'exploration

La comparaison s'est focalisée sur le déplacement axial u_z , car il est le moteur de la force parasite F_z transmise au vilebrequin. L'écart de déplacement entre les deux modèles étant négligeable (inférieur à 4%), nous considérons que la "branche d'exploration" concernant la modélisation non-linéaire avancée peut être refermée. Cette étape a permis de démontrer qu'un modèle statique linéaire bien paramétré avec la loi de Lemaitre suffit à diagnostiquer la dangerosité de l'accouplement.

Comparaison des déplacement axiaux u_z :

État du plot	Modèle Linéaire	Modèle Grandes Déformations
Sain (d=0)	2.57mm	2.14mm
Fissuré (d=0.5)	4.83mm	4.21mm

6. Tests des systèmes d'accouplement élastomères

Dans une volonté de corrélation et de validation des résultats obtenus précédemment par simulation, une série d'essais sur un banc de test ont été réalisés. Les enjeux derrière ses tests sont dans un premier temps de comparer la déformation réelle entre un accouplement élastomère neuf et endommagé. Dans un second temps, valider les déplacements obtenus via les différentes simulations.

6.1 - Test du système d'accouplement neuf

6.1.1 Résultats des tests :

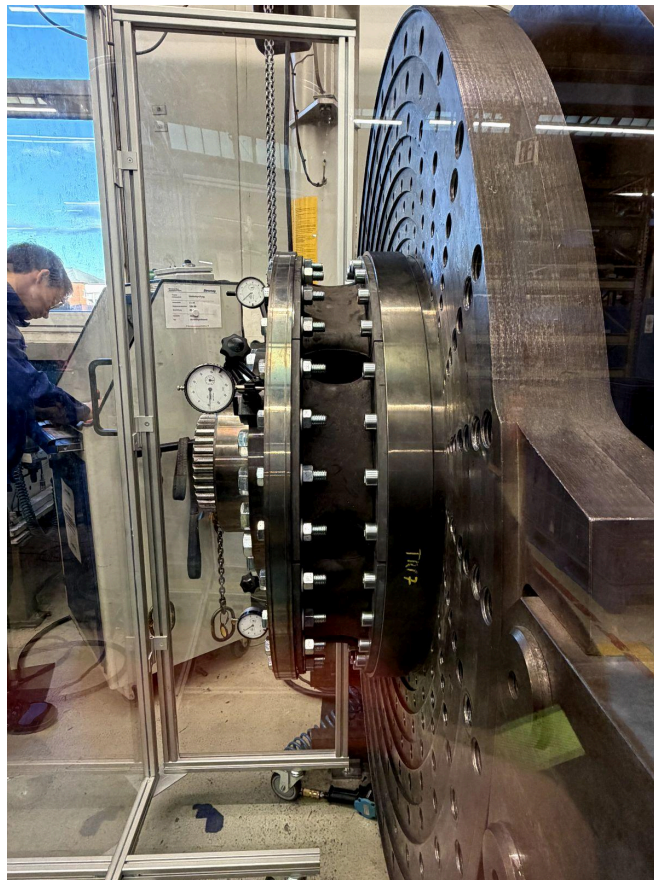


Fig. 11 : Test de déformation sous charge de l'accouplement neuf

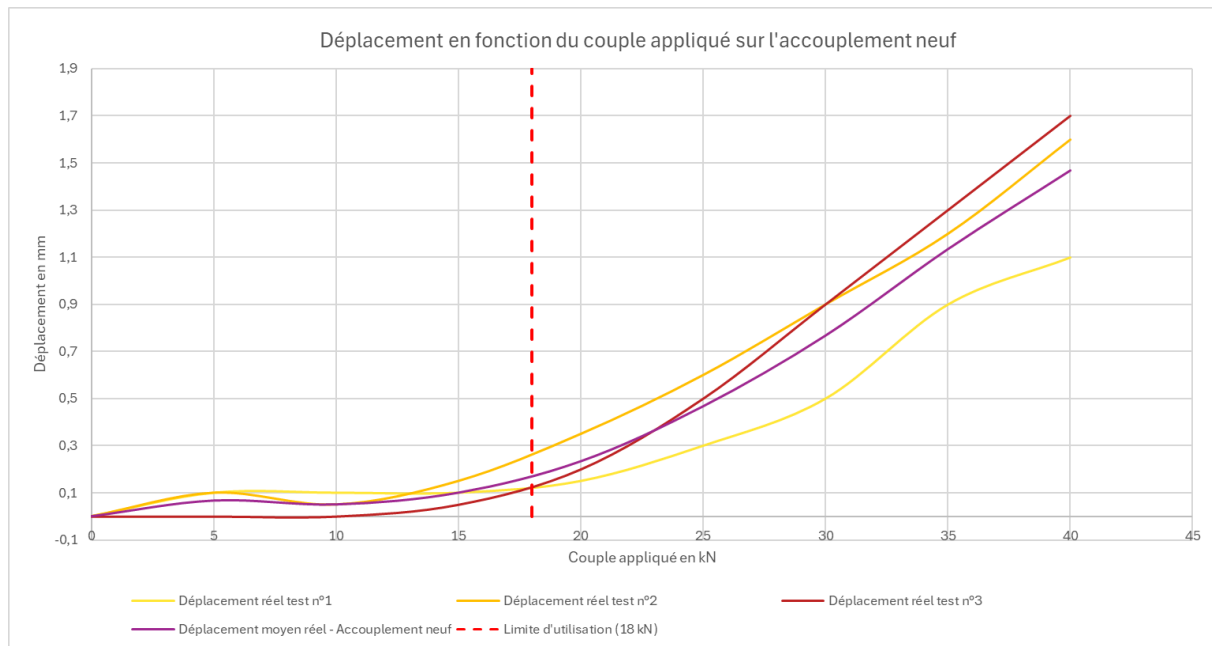


Fig. 12 : Résultat des test de déformation sous charge de l'accouplement neuf

6.1.2 Analyse des Résultats :

La courbe moyenne met en évidence une augmentation progressive du déplacement en fonction du couple appliqué, traduisant le comportement typique d'un matériau élastomère soumis à une sollicitation croissante. Dans les faibles niveaux de couple, la déformation reste limitée, correspondant à la zone où l'élastomère répond essentiellement par élasticité réversible. Au-delà d'environ 15 à 20 kN, la courbe adopte une croissance plus marquée, indiquant l'entrée dans une phase de déformation non linéaire caractéristique de l'augmentation progressive de la rigidité tangentielle. Lorsque le couple atteint les valeurs les plus élevées, la déformation atteint 1,47 mm en moyenne, reflétant une compression significative mais cohérente avec le comportement viscoélastique des matériaux souples utilisés dans les accouplements. Cette évolution globale démontre la capacité de l'élastomère à absorber les efforts tout en présentant une réponse mécaniquement stable dans l'ensemble de la plage de sollicitation étudiée.

6.2 - Test du système d'accouplement endommagé

6.2.1 Résultats des tests :

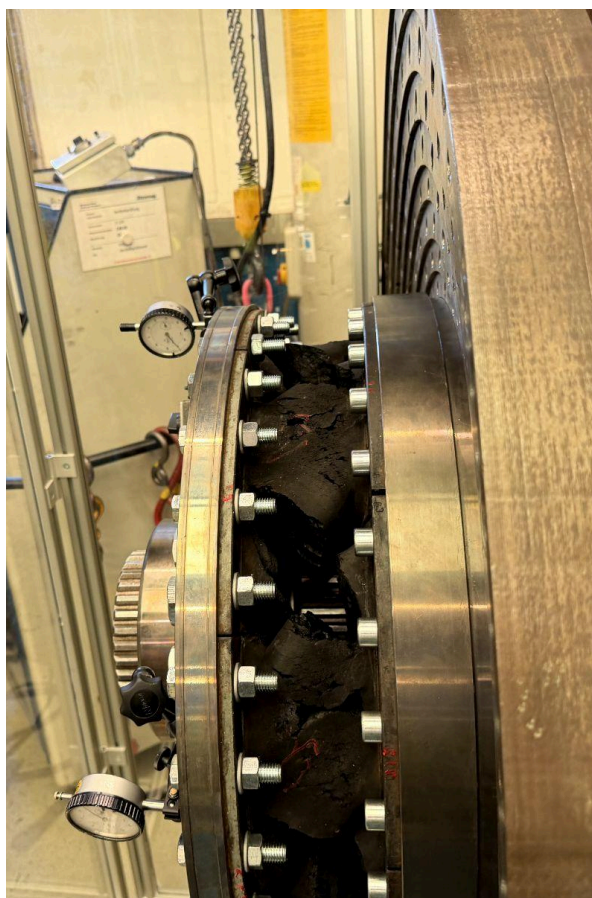


Fig. 13 : Test de déformation sous charge de l'accouplement endommagé

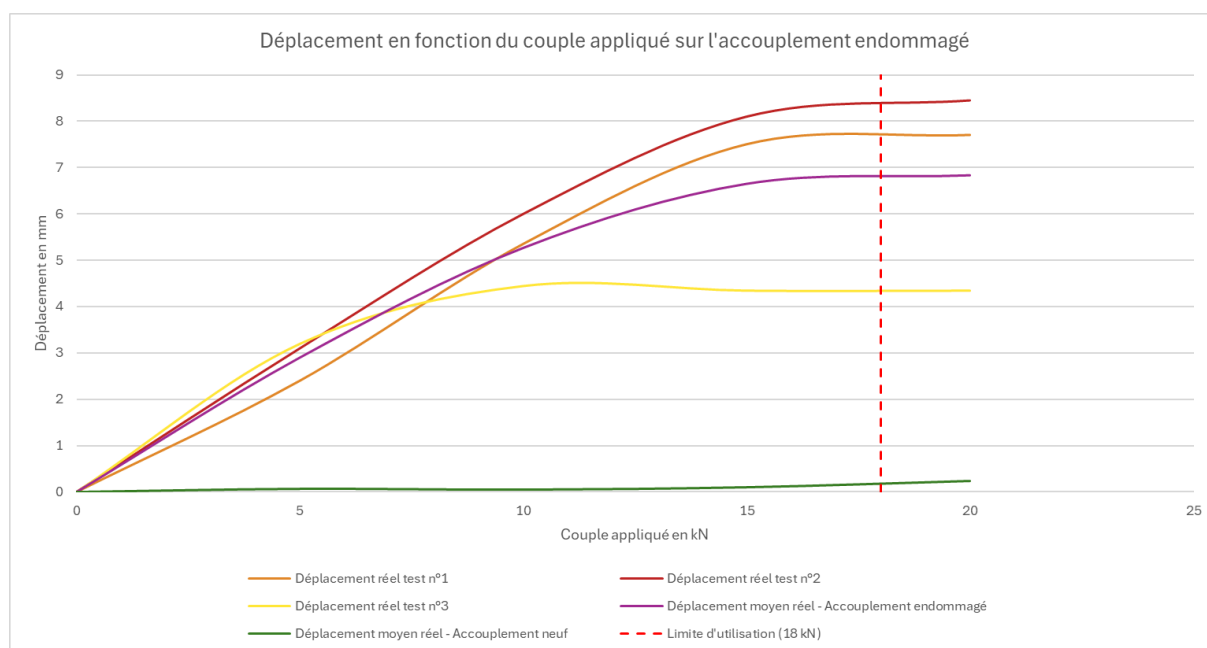


Fig. 14 : Résultat des test de déformation sous charge de l'accouplement endommagé

6.2.2 Analyse des Résultats :

La courbe moyenne montre une augmentation rapide et soutenue du déplacement axial dès les premiers niveaux de couple appliqué, révélant un comportement fortement dégradé des pièces en élastomère. Dès 5 kN, la déformation atteint plusieurs millimètres et progresse ensuite de manière quasi linéaire mais avec une pente élevée, signe d'une rigidité très faible et d'une absence de zone réellement élastique. Entre 10 et 15 kN, le déplacement continue d'augmenter sans signe de stabilisation, ce qui traduit une réponse dominée par une déformation non linéaire, liée à une structure interne du matériau fortement compromise. À 20 kN, la courbe se situe autour de 7 mm de déplacement, indiquant que l'élastomère n'offre plus de résistance significative au chargement. L'allure générale met ainsi en évidence un matériau incapable de reprendre ou dissiper l'effort appliqué, illustrant une perte marquée de tenue mécanique dès les premières sollicitations, même avec un faible niveau d'intensité.

6.3 - Conclusions quant au test du système d'accouplement endommagé et neuf

La comparaison des deux courbes met en évidence un contraste marqué de rigidité axiale de l'accouplement neuf présente. Une pente faible caractéristique d'un matériau rigide, dont le déplacement augmente très peu sous l'effort, tandis que l'accouplement endommagé montre une courbe nettement plus raide, révélant une déformation importante pour une faible augmentation de couple. Cette différence de pente traduit directement la perte de tenue mécanique de l'élastomère dégradé et son incapacité à résister efficacement à la sollicitation.

Cette expérimentation confirme les résultats obtenus par le calcul par éléments finis démontrant ainsi qu'un accouplement endommagé engendre des déplacements axiaux parasites.

7. Conclusion

L'étude approfondie de cet accouplement a permis de lever le voile sur un phénomène mécanique sous-estimé : l'influence directe de la dégradation structurelle des élastomères sur la génération d'efforts axiaux parasites (Fz). En combinant l'analyse théorique de l'endommagement selon la loi de Lemaitre et la simulation numérique, ce travail apporte une réponse concrète à une problématique de terrain complexe.

Le passage par une modélisation en grandes déformations a constitué une étape clé de notre démarche scientifique. Bien que cette "branche d'exploration" ait révélé des résultats sensiblement identiques à l'approche linéaire, elle a rempli un rôle de validation indispensable. Cette convergence de résultats prouve que, tant que le matériau évolue dans son domaine de réponse élastique, la linéarisation reste un outil de diagnostic robuste et suffisant pour l'ingénieur. Cette validation croisée sécurise les conclusions de l'article en confirmant que les efforts axiaux calculés ne sont pas des approximations numériques, mais bien la conséquence physique de la perte de raideur induite par les fissures.

Les essais en laboratoire ont permis d'établir une corrélation directe entre les déplacements axiaux mesurés et ceux prédits par le modèle éléments finis. Les courbes couple - déplacement axial ont montré une corrélation satisfaisante avec les résultats numériques, confirmant la justesse des paramètres matériaux et des conditions aux limites retenus.

Ces résultats ont aussi confirmé la représentativité du modèle dans la reproduction des déformations axiales réelles.

Sur le plan industriel et de la maintenance, les enseignements sont majeurs :

- Diagnostic de l'état réel : Les fissures observées, dépassant par endroits les 10 mm de profondeur, placent l'accouplement bien au-delà des seuils de tolérance critiques définis par le constructeur Stromag. À ce stade, le composant ne remplit plus sa fonction d'amortisseur.
- Conséquences mécaniques : L'élastomère dégradé agit désormais comme un "générateur de forces". L'effort axial Fz identifié par nos modèles valide l'hypothèse de départ : les sollicitations anormales transmises à l'arbre de transmission sont suffisantes pour provoquer un endommagement anormal de ses paliers. Le lien entre le défaut d'entretien de l'accouplement et l'avarie moteur est ainsi établi de manière formelle.
- Préconisations : Ce travail souligne l'impérieuse nécessité de respecter les inspections visuelles périodiques. Le remplacement préventif des éléments élastiques, bien que coûteux, reste un investissement dérisoire face aux conséquences d'une rupture de la chaîne cinématique ou d'une avarie majeure sur le bloc moteur.

En conclusion, si la complexité numérique nous a permis de sécuriser nos hypothèses, c'est la rigueur de la surveillance humaine et le respect des critères d'usure constructeur qui demeurent les seuls garants de la longévité des installations. Cette étude démontre qu'une approche numérique simplifiée, une fois validée, devient un puissant levier d'aide à la décision pour optimiser les stratégies de maintenance préventive en milieu marin.

Références

- [1] Stromag, *Evaluation of Flexible Elements in Stromag TRI-Couplings*, TM 871.00007 (2019)
- [2] M. Bouslema, T. Fakhfakh, R. Nasri, M. Haddar, *Effect of Elastic Couplings on the Dynamic Behavior of Transmission Systems*, Comptes Rendus Mécanique, Vol. 350, pp. 1–14 (2022)
- [3] A. Anssari-Benam, G. Saccomandi, *A Strain Energy Function for Large Deformations of Compressible Elastomers*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 176, 105203 (2023)
- [4] S. Cantournet, R. Desmorat, *Thermodynamic Modelling of Internal Friction and Hysteresis of Elastomers under Large Strains*, Comptes Rendus Mécanique, Vol. 331, pp. 515–524 (2003)
- [5] A. Anssari-Benam, G. Saccomandi, *Large Isotropic Elastic Deformations of Compressible Rubber-Like Materials*, Journal of Elasticity, Vol. 151, pp. 1–27 (2025)