

Comparaison de conditions de raccord 1D-3D pour l'analyse multi-échelle des défauts dans les pales d'éoliennes

T. Barottin^{1,2}, A. Filiot², D. Lemosse¹

¹ LMN (Laboratoire de Mécanique de Normandie), INSA Rouen Normandie, {theo.barottin, didier.lemosse}@insa-rouen.fr

² EDF R&D, Département Électrotechnique et Mécanique des Structures, astrid.filiot@edf.fr

Résumé — Les pales sont des composants critiques dont il convient de surveiller la santé structurelle pour optimiser la durée de vie d'une éolienne. Pour y modéliser des défauts et leur évolution, les modèles numériques de pales complètes sont trop coûteux. La modélisation à l'échelle de sous-composants, rend possible la modélisation de défauts locaux pour des temps de calcul plus abordables. Pour obtenir des états de contrainte pertinents, nous cherchons ici à déterminer les meilleures conditions aux limites permettant d'appliquer des chargements réalistes au sous-composant.

Mots clés — Modélisation multi-échelle, Condition de raccord, Fissuration.

1 Contexte

L'énergie éolienne constitue une ressource clé qui permet, en complément aux autres moyens de production décarbonés, de répondre aux besoins croissants en électricité tout en disposant d'un mix énergétique résilient. En Europe, environ 20% des turbines éoliennes ont plus de 15 ans, se rapprochant de la fin de leur durée de vie typique de 20 à 25 ans. Or, les coûts d'exploitation et de maintenance des parcs éoliens terrestres ont tendance à augmenter avec l'âge des turbines. En vieillissant, certaines pales peuvent présenter des dommages sous-critiques, tels que l'érosion du bord d'attaque ou des fissurations du matériau composite constitutif [2]. Des réparations doivent être effectuées avant que ces dommages ne s'aggravent. Nous nous interrogeons sur notre capacité à prédire par modélisation numérique la propagation des défauts locaux, une fois initiés.

Les pales d'éoliennes sont soumises à des sollicitations complexes, transitoires et aléatoires. Elles subissent une multiplicité de chargements de diverses natures : aérodynamiques, gravitaires et inertiels, tandis que la répétition des cycles de chargement génère de l'endommagement en fatigue. Afin d'être capable de calculer l'effet de l'ensemble de ces sollicitations sur une pale, on utilise généralement des codes de simulation aéro-élastiques, comme OpenFAST [11], où l'ensemble de la turbine est modélisé de manière simplifiée avec des éléments de poutre.

Toutefois, ces codes ne permettent pas de modéliser explicitement une fissure ou un phénomène local, pour lequel une description plus précise est requise, typiquement une géométrie 3D. Afin d'étudier ce type de phénomènes locaux avec des temps de calcul raisonnables, nous adoptons une approche multi-échelle. Une simulation aéro-élastique de la turbine, modélisée en éléments poutres pour sa structure, permet d'obtenir les chargements s'appliquant sur la pale, sous forme de torseur. Ce chargement est ensuite appliqué sur un tronçon de pale, modélisé de manière détaillée en éléments volumiques (Figure 1).

L'enjeu est alors de déterminer les chargements et conditions aux limites à appliquer sur ce sous-composant pour que l'état de contrainte qui s'y développe soit représentatif de celui dans une pale. En effet, c'est bien la contrainte qui va piloter localement l'endommagement. Le transfert des chargements issus du calcul aéro-élastique vers le modèle éléments finis 3D peut être réalisé avec différentes méthodes (Load Application Method, ou LAM). Des recherches précédentes ont étudié l'impact de différentes LAM pour une pale d'éolienne complète : sur le dépassement de critères de contrainte [3] et sur la sensibilité des champs à la géométrie de la pale [12]. La littérature offre quelques cas où le transfert de chargement vers un tronçon de pale est réalisé avec des conditions aux limites impliquant des sections rigides. Cependant, les études en question cherchent à reproduire numériquement des campagnes expérimentales sur un tronçon isolé en environnement contrôlé [4, 10]. Les auteurs ne cherchent donc pas à appliquer un chargement représentatif d'un tronçon de pale en conditions fonctionnement.

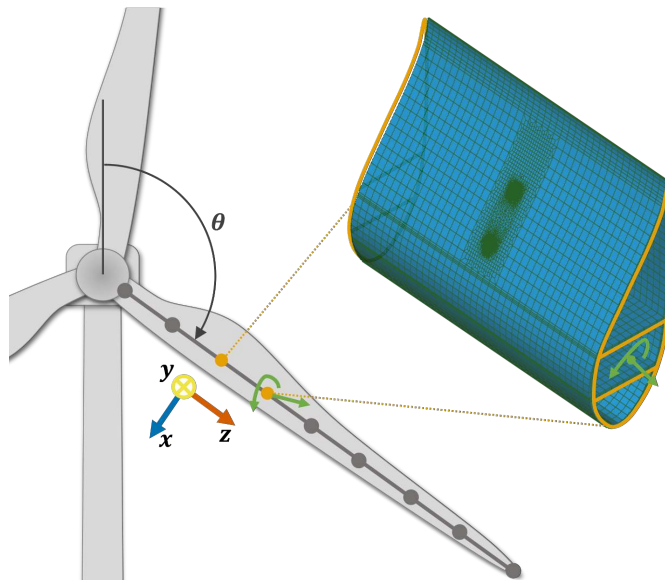


FIGURE 1 – Tronçon d'intérêt maillé en volumique pour l'étude de défaut.

De fait, dans une pale en conditions réelles, les sections extrémités, délimitant le tronçon peuvent présenter des déformations. Ce mouvement est bloqué si l'on utilise des conditions de raccord solide rigide, ce qui altère l'état de contrainte calculé dans le tronçon. Il convient donc de dresser un inventaire des différentes conditions de raccord possibles aux extrémités du tronçon, puis de proposer une méthode de validation numérique des états de contrainte calculés dans le sous-composant afin de sélectionner le meilleur raccord possible. Cette validation devra être menée pour des conditions de chargement représentatives du fonctionnement de l'éolienne.

2 Méthodologie

On cherche à juger la pertinence des différentes conditions de raccord disponibles dans le code éléments finis `code_aster`, suivant leur capacité à transmettre les efforts et donc produire les bons champs de contraintes dans le sous-composant.

La validité des champs de contraintes calculés va être évaluée en comparant les résultats obtenus sur une structure élancée complètement modélisée en éléments volumiques (dit modèle de référence) et un tronçon de cette structure. Les deux systèmes seront chargés de manière équivalente.

2.1 Géométrie

Deux configurations vont être considérées, obtenues à partir de deux sections différentes. On étudiera d'abord une poutre à section rectangulaire, géométrie bien maîtrisée, puis une poutre représentant une pale simplifiée à section constante. Dans les deux cas, nous considérerons des répartitions de matériaux successivement homogène et hétérogène. Les deux sections, ainsi que la répartition des matériaux pour le cas hétérogène, sont présentées sur la Figure 2.

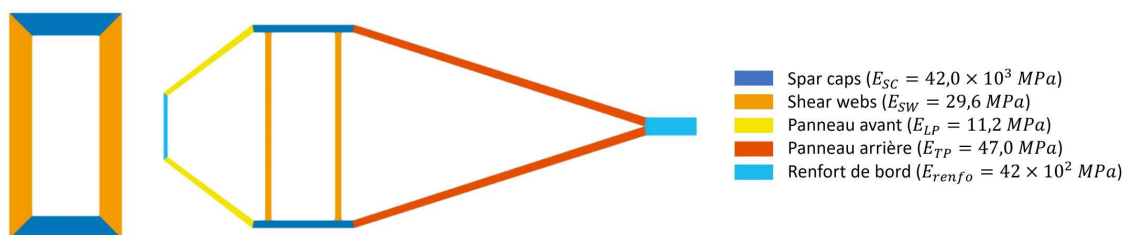


FIGURE 2 – Section rectangulaire et section pale simplifiée. Répartitions matériaux pour cas hétérogène.

La longueur L de la poutre est fixée à 40 mètres. Le tronçon d'intérêt représente 10% de la longueur totale de la poutre, soit 4 mètres. Son centre est positionné à 14 mètres de l'extrémité encadrée de la poutre. Il est modélisé avec des éléments finis volumiques standards. Le modèle complet servant de référence, est également constitué d'éléments volumiques. Il est obtenu par extrusion de la section choisie sur toute la longueur L . Les modèles de référence, associés aux deux types de section, sont présentés en Figure 3. Ils sont accompagnés de la définition des axes du repère de travail.

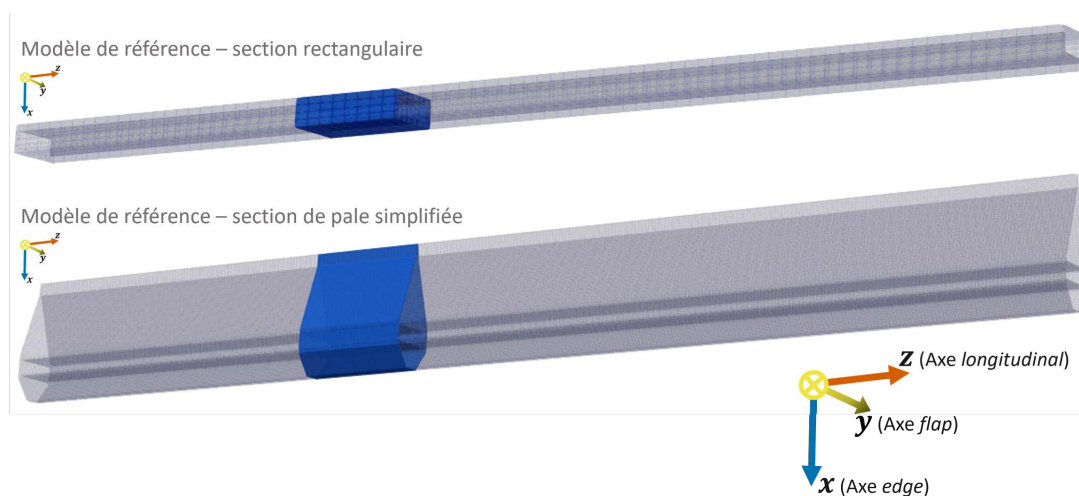


FIGURE 3 – Modèles de référence et tronçons d'intérêt associés accentués en bleu.

2.2 Chargements

Une pale d'éolienne subit essentiellement des efforts aérodynamiques sous la forme d'un champ de pression et des efforts volumiques liés à la répartition de masse, comme la gravité ou l'effort centrifuge. Néanmoins, dans notre étude, la zone d'intérêt se trouve relativement proche de la racine de la pale. Nous considérons donc que l'essentiel du chargement correspond aux efforts résultants qui transitent depuis le bout de la pale. En d'autres termes, les chargements extérieurs s'appliquant sur le tronçon et sur le reste de la pale côté racine peuvent être négligés.

Sur la base de cette hypothèse, nous appliquerons les chargements de la manière suivante :

- Sur le tronçon, le chargement est appliqué *via* deux nœuds maîtres notés P_1 et P_2 situés aux centres élastiques des sections, comme représentés sur la Figure 4. Le nœud maître P_1 côté racine de la pale est encadré. Un torseur d'efforts \mathcal{T}_{eq} résultant des efforts s'appliquant sur le reste de la pale de l'autre côté du tronçon est appliqué sur un nœud maître en P_2 . Ces deux nœuds sont liés aux sections extrémités correspondantes grâce à diverses conditions de raccord présentées ci-après.
- Sur le modèle complet de référence, on encastre la racine de la poutre. Le chargement est appliqué au centre élastique de l'extrémité libre de la poutre, avec le torseur \mathcal{T}_{eq} qu'on aura transporté. Le torseur est ici appliqué suffisamment loin du tronçon d'intérêt pour y obtenir un état de contrainte indépendant de la condition de chargement (Saint-Venant).

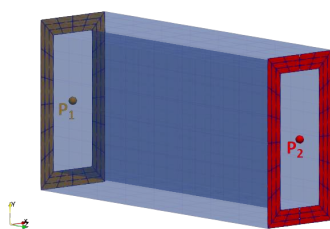


FIGURE 4 – Tronçon d'intérêt à section rectangulaire, nœuds maîtres et sections extrémités associées.

Pour la configuration de pale simplifiée, nous cherchons à déterminer un torseur d'effort \mathcal{T}_{eq} représentatif de ce que subit une pale en fonctionnement. Une définition précise des chargements d'une pale d'éolienne peut-être trouvée dans [8]. Pour notre étude, nous effectuerons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Les pales balayent un disque vertical et leur prise au vent est maximale.
- Les efforts produits par le vent sur la pale sont réduits à l'effort de poussée, agissant sur l'axe flap de la pale. Chaque pale reçoit 1/3 de la poussée totale s'appliquant sur le rotor. Cette force est répartie triangulairement sur la longueur de la pale (Figure 5).
- Les efforts produits par la gravité sur la pale agissent sur les axes edge et longitudinal de la pale. La répartition de masse de la pale est approximée par une distribution triangulaire (Figure 6).
- Les autres forces sont négligées.

Sous nos hypothèses, nous définissons les deux chargements simplifiés sous forme de torseurs d'efforts cumulés \mathcal{T}_{vent} et \mathcal{T}_{grav} . Ces torseurs seront évalués au point P_2 du tronçon d'intérêt, puis déplacés pour être appliqués à l'extrémité libre de la poutre sur le modèle de référence.

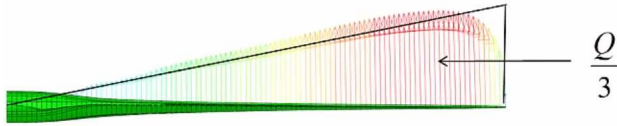


FIGURE 5 – Chargement du vent simplifié (crédit DTU)

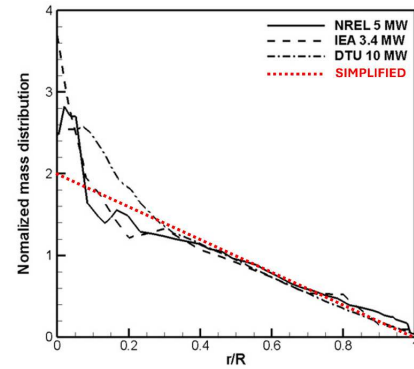


FIGURE 6 – Répartition de masse de pales de référence et simplification (adapté de [9])

2.2.1 Chargement du vent

La poussée totale Q du vent sur l'éolienne peut être grossièrement approchée par :

$$Q = \frac{\mathcal{P}}{U_{vent}(1-a)}, \quad (1)$$

avec \mathcal{P} la puissance mécanique produite, U_{vent} la vitesse moyenne du vent et a le facteur d'induction. On répartit triangulairement cette poussée sur les trois pales, comme montré sur la Figure 5. Pour un point P situé à une distance $z \in [0, L]$ de la base de la pale, on obtient alors le torseur des efforts cumulés de la forme :

$$\mathcal{T}_{vent}(z) = \begin{Bmatrix} 0 & M_x(z) \\ F_y(z) & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_P, \quad (2)$$

$$\text{avec } F_y(z) = \frac{Q}{3} \frac{L^2 - z^2}{L^2} \quad \text{et} \quad M_x(z) = -\frac{Q}{9} \frac{2L^3 - 3L^2z + z^3}{L^2}. \quad (3)$$

2.2.2 Chargement de la gravité

On note θ l'angle d'azimut, entre l'axe longitudinal de la pale et l'axe vertical. On prend $\theta = 0^\circ$ pour la pale pointant vers le haut. En supposant la répartition de masse triangulaire le long de la pale, on peut définir la masse linéique locale $\mu(z)$ comme :

$$\mu(z) = \frac{2m_{pale}}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right), \quad (4)$$

avec m_{pale} la masse totale de la pale. Ce qui donne, pour la gravité :

$$\mathcal{T}_{grav}(z, \theta) = \left\{ \begin{array}{cc} F_x(z, \theta) & 0 \\ 0 & M_y(z, \theta) \\ F_z(z, \theta) & 0 \end{array} \right\}_P, \quad (5)$$

$$\text{avec } F_x(z, \theta) = +mg \sin(\theta) \frac{L^2 - 2Lz + z^2}{L^2}, \quad F_z(z, \theta) = -mg \cos(\theta) \frac{L^2 - 2Lz + z^2}{L^2} \quad (6)$$

$$\text{et } M_y(z, \theta) = \frac{mg}{3} \sin(\theta) \frac{L^3 - 3L^2z + 3Lz^2 - z^3}{L^2}. \quad (7)$$

2.3 Conditions de raccord

Les conditions aux limites et chargements sont appliqués sur le tronçon *via* des éléments ponctuels OD localisés aux points P_1 et P_2 . Nous allons étudier trois conditions de raccords différentes entre ces éléments OD et les éléments volumiques du tronçon :

- LIAISON_SOLIDE [5] : aussi connue sous le nom de RBE, pour « Rigid Body Elements ». Les déplacements relatifs d'un groupe de nœuds sont liés à l'aide d'une relation cinématique, de telle manière à ce que les distances et angles entre les nœuds restent constants.
- LIAISON_RBE3 [6] : cette liaison est construite pour distribuer le torseur d'effort appliqué sur un nœud « maître » sur l'ensemble des nœuds dits « esclaves ». Dans la pratique, le problème est renversé et cette distribution est réalisée à partir d'une relation cinématique entre les degrés de liberté maîtres et esclaves.
- 3D_POU [7] : option de LIAISON_ELEM qui réalise la liaison en « réduisant » les contraintes et les déplacements de la section et l'égalise au sens des moindres carrés avec les torseurs d'effort et de déplacement du point de la jonction.

3 Résultats

Pour comparer la performance des conditions de raccords, nous présenterons les cartographies de contraintes longitudinales σ_{ZZ} . Nous nous intéressons à cette composante en particulier, car c'est la contrainte qui pilote le mode d'ouverture d'une fissure transverse par rapport à la direction longitudinale de la pale. Nous exposerons également les champs de différence relative locale des contraintes d_r . La différence absolue relative d_r est définie sur le tronçon d'intérêt comme :

$$d_r = \frac{|\sigma_{ZZ} - \sigma_{ZZ,ref}|}{\sigma_{ZZ,ref}}. \quad (8)$$

3.1 Section rectangulaire homogène, chargements élémentaires

Les Figures 7 et 8 présentent la comparaison des contraintes longitudinales σ_{ZZ} obtenues à l'aide de différentes conditions de raccord, respectivement pour un effort tranchant selon Y et pour un moment fléchissant autour de l'axe X . Pour toutes les liaisons, les erreurs relatives les plus importantes sont observées le voisinage des sections extrémités, puis l'erreur diminue à mesure qu'on s'en éloigne. Notons que sur les zones d'annulation des contraintes, le critère de comparaison relatif a une pertinence limitée. Nous utiliserons également un autre critère, normalisé par une contrainte moyenne, critère que nous ne présentons pas ici. La liaison 3D_POU permet de retrouver exactement le champ de référence pour les sollicitations unitaires de traction pure, non présenté ici, et de moments fléchissants. Les moins bonnes performances sont observées sur les chargements provoquant du cisaillement : effort tranchant et surtout moment de torsion.

3.2 Section rectangulaire hétérogène, chargements élémentaires

Les Figures 9 et 10 présentent les cartographies de contrainte longitudinale et d'erreur, respectivement pour un effort tranchant selon l'axe X et un moment fléchissant autour de l'axe X . Nous comparons

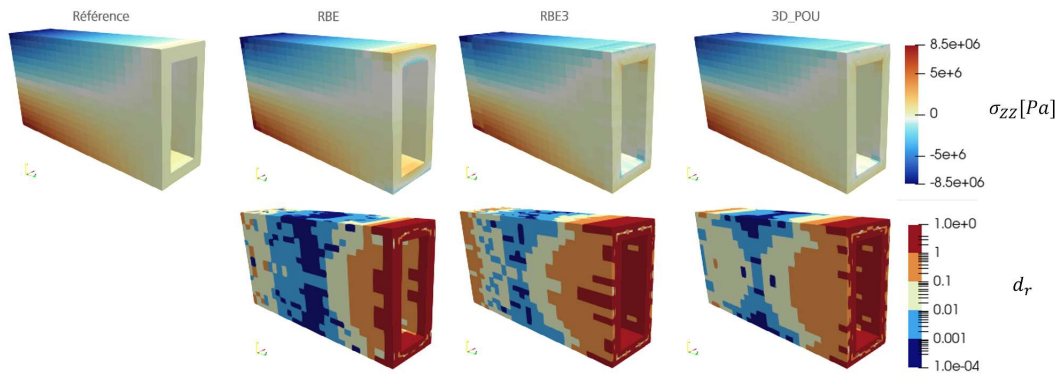


FIGURE 7 – Cartographies pour un effort tranchant selon Y , section rectangulaire homogène.

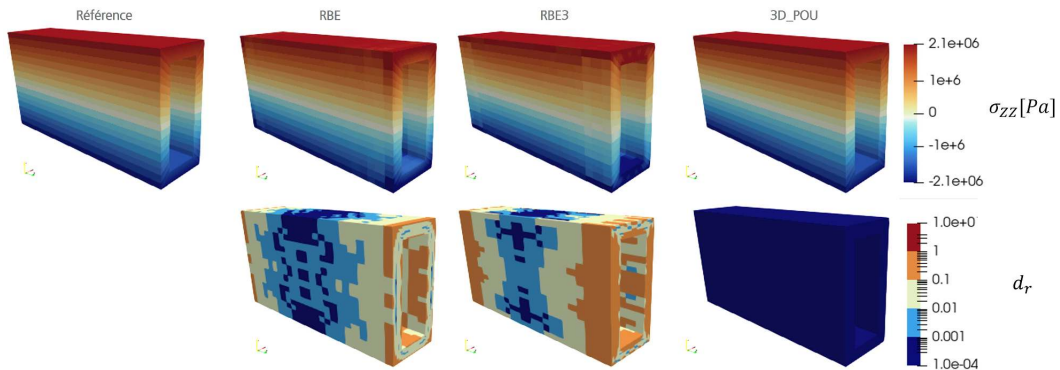


FIGURE 8 – Cartographies pour un moment fléchissant autour de X , section rectangulaire homogène.

ici la performance des liaisons RBE et RBE3 uniquement. La liaison RBE3 est déclinée en deux configurations : dans le premier cas, les nœuds esclaves sont tous les nœuds des sections extrémités ; dans le second cas, les nœuds esclaves sont uniquement les nœuds des « spar caps » (Figure 2).

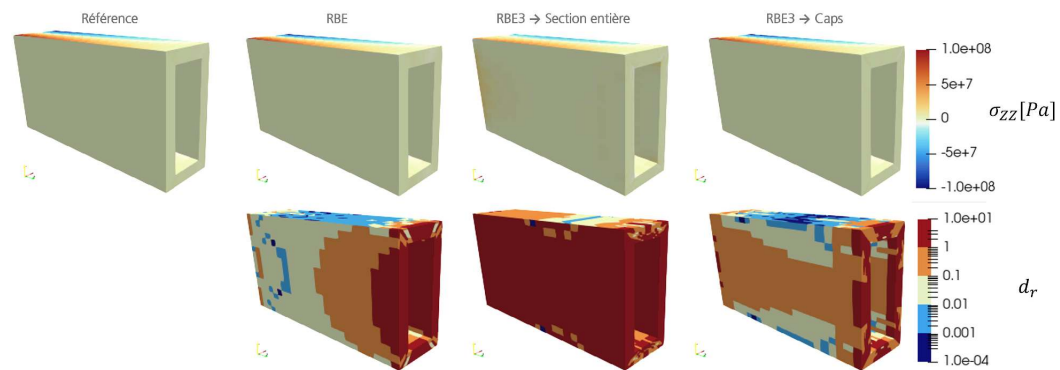


FIGURE 9 – Cartographies pour un effort tranchant selon X , section rectangulaire hétérogène.

On constate que transférer les chargements *via* RBE3 uniquement sur les zones les plus rigides, destinés à reprendre les efforts en réalité, permet de significativement réduire l'erreur sur la contrainte longitudinale. Du reste, pour une section composée de plusieurs matériaux de raideurs différentes, la liaison de corps solide RBE donne ici qualitativement les meilleurs résultats, bien que théoriquement plus contraignante sur la cinématique. À propos des autres chargements unitaires non montrés ici, nous pouvons faire les mêmes observations que pour le cas homogène : les raccords ont tendance à produire des erreurs plus importantes pour les chargements générant du cisaillement.

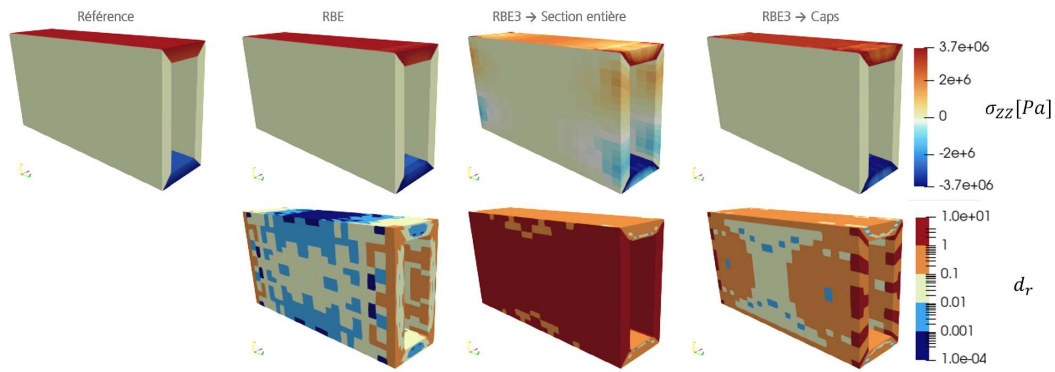


FIGURE 10 – Cartographies pour un moment fléchissant autour de X , section rectangulaire hétérogène.

3.3 Section type pale hétérogène, chargement mixte représentatif

Nous présentons ici la comparaison des champs de contrainte pour un chargement représentatif, déterminé par les formules présentées en Section 2.2. Sur la Figure 11, on affiche les résultats pour une inclinaison de la pale à $\theta = 45^\circ$, et un torseur calculé à $z = 16m$. Comme précédemment, nous présentons les comparaisons entre RBE et RBE3 pour étudier l'impact du choix des nœuds « esclaves ». La liaison RBE3 est appliquée pour deux configurations différentes de nœuds esclaves : seulement les nœuds des spar caps de sections extrémités, ou alors les nœuds des spar caps ainsi que ceux des renforts en bord d'attaque et bord de fuite. On constate ici que les erreurs relatives sont très élevées, presque exclusivement supérieures à 10% et dépassant même 100% par endroit.

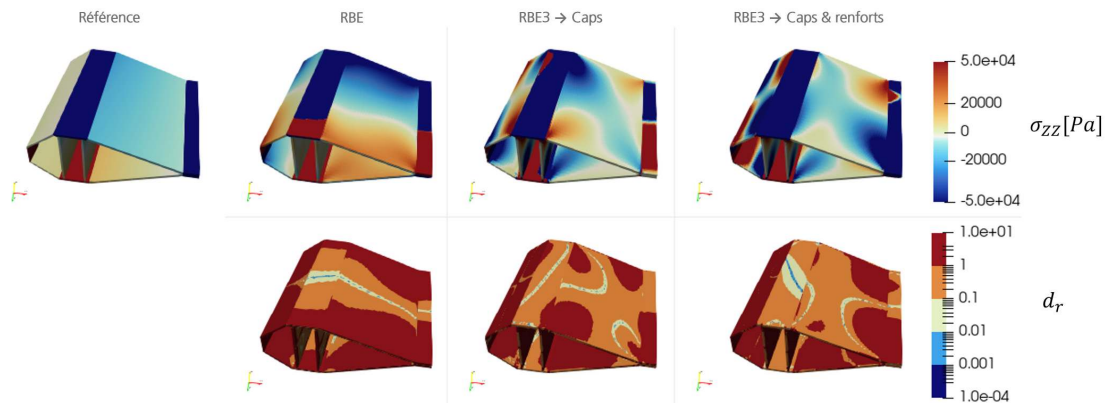


FIGURE 11 – Cartographies pour un chargement d'une pale inclinée à $\theta = 45^\circ$

3.4 Synthèse des résultats

À l'issue de ces observations, nous pouvons faire plusieurs remarques :

- La cartographie des écarts relatifs est très dépendante du chargement appliqué.
- De manière générale, les efforts générant du cisaillement sont ceux induisant les plus grandes erreurs. C'est particulièrement le cas pour les chargements en torsion.
- Pour un unique matériau homogène, on retrouve bien que la liaison 3D_POU donne la répartition exacte de contraintes pour les chargements unitaires de moments fléchissants et de traction.
- Sur une section hétérogène, la liaison RBE3 ne doit pas être appliquée hors considération de rigidité des matériaux. Cela viendrait charger excessivement les zones de moindre rigidité qui ne sont pas destinées à reprendre les efforts.

4 Conclusion et perspectives

Parmi un choix de raccords disponibles dans le code éléments finis `code_aster`, nous recherchons le raccord qui permet de calculer des champs de contrainte dans un tronçon de pale d'éolienne les plus représentatifs possibles de ceux se développant dans une pale en fonctionnement. Nous menons une étude numérique comparative sur une poutre à section constante pour évaluer les différentes solutions. Deux sections de poutre sont considérées : une section rectangulaire et une section de pale simplifiée. Pour chacune, on étudie les deux cas d'une section homogène et hétérogène. La comparaison est faite sur la base d'un critère relatif sur la contrainte longitudinale σ_{ZZ} .

Pour une répartition de matériaux homogènes, les raccords *via* liaison `3D_POU` offrent l'erreur la plus basse pour les chargements unitaires de moments fléchissants et de traction. Il est difficile de tirer des conclusions aussi claires pour les autres types de chargements unitaires : efforts tranchants et moment de torsion.

Pour une répartition de matériaux hétérogène, le choix des nœuds esclaves est crucial. Dans le cas de la liaison `RBE3`, il est judicieux de ne piloter le tronçon que *via* les nœuds des « spar caps », zone destinée à reprendre les efforts. Les liaisons de corps solide `RBE` donnent les écarts relatifs les plus faibles au centre de la section. C'est dans cette zone centrale que nous insérerons le phénomène local à étudier.

La pertinence du choix de liaison de raccord semble pour le moment liée à de nombreux facteurs : section, zone d'intérêt, chargement et répartition des matériaux. En l'état, les liaisons de `code_aster` ne permettent pas d'être très précis avec un tronçon de dimensions si réduites. La liaison `RBE` est une bonne candidate si l'on s'intéresse uniquement aux contraintes longitudinales σ_{ZZ} . En effet, les déplacements engendrant cette contrainte sont globalement bien reproduits par un mouvement de corps solide. Finalement, on pourrait imaginer une liaison intermédiaire entre `RBE` et `RBE3`, qui permettrait de garder la condition de planéité de la section tout en libérant les degrés de liberté dans le plan pour autoriser les déplacements dus à l'effet Poisson. Le post-traitement des déplacements et des réactions (ou forces) nodales pourrait éclairer cette réflexion, et permettre de sélectionner plus judicieusement l'une des liaisons cinématiques existantes, ou motiver l'implémentation d'une liaison plus complexe.

Références

- [1] P. Bortolotti et al. *IEA Wind TCP Task 37 : Systems Engineering in Wind Energy - WP2.1 Reference Wind Turbines*, Technical Report, International Energy Agency, 2019.
- [2] K. Branner, A. Ghadirian. *Database about Blade Faults*, DTU Wind Energy E, 2014.
- [3] D. Caous, N. Lavauzelle, J. Valette, J.-C. Wahl. *Load Application Method for Shell Finite Element Model of Wind Turbine Blade*, Wind Engineering, 467-482, 2018.
- [4] X. Chen, P. Berring, S.H. Madsen, K. Branner, S. Semenov. *Understanding Progressive Failure Mechanisms of a Wind Turbine Blade Trailing Edge Section through Subcomponent Tests and Nonlinear FE Analysis*, Composite Structures, 422-438, 2019.
- [5] Électricité de France. *Conditions de liaison de corps solide*, Documentation `code_aster`, R3.03.02, open-source sur `code-aster.org`.
- [6] Électricité de France. *Relations cinématiques linéaires de type RBE3*, Documentation `code_aster`, R3.03.08, open-source sur `code-aster.org`.
- [7] Électricité de France. *Raccords 3D-Poutre, 2D-Poutre*, Documentation `code_aster`, R3.03.03, open-source sur `code-aster.org`.
- [8] L.-C. Forcier, S. Joncas. *On the wind turbine blade loads from an aeroelastic simulation and their transfer to a three-dimensional finite element model of the blade*, Wind Engineering, 577-595, 2020.
- [9] K.-H. Jang, K.-W. Ryu. *Blade Design and Aerodynamic Performance Analysis of a 20 MW Wind Turbine for LCoE Reduction*, Energies, 577-595, 2023.
- [10] F. Lahuerta, N. Koorn, D. Smislaert. *Wind turbine blade trailing edge failure assessment with sub-component test on static and fatigue load conditions*, Composite Structures, 755-766, 2018.
- [11] J. Jonkman et al. *OpenFAST*, Version 4.1.0., NREL, 2025. github.com/OpenFAST/openfast.
- [12] W.J. Veloz Parra, Y. Aoues, D. Lemosse. *Sensitivity Analysis of Load Application Methods for Shell Finite Element Models*, WCGO 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 991, Springer, 2019.