

Étude dynamique inertielle simplifiée de scénarios de chute

Carter cylindrique de ventilateur imprimé en PETG-CF

Projet carter de ventilateur – SALOME / Code_Aster / ParaView

28 juin 2026

Abstract

Ce rapport révisé présente une analyse dynamique inertielle comparative appliquée au carter cylindrique d'un ventilateur imprimé en PETG-CF. La formulation est volontairement précise: le modèle actuel ne constitue pas une simulation complète de chute avec contact sol-pièce, rebond, frottement et endommagement. Il immobilise une zone supposée en contact et applique une impulsion inertielle au reste de la structure. Cette approche permet d'identifier les zones sensibles et de comparer des scénarios, mais pas de certifier la tenue à la chute. Le calcul 3D Code_Aster utilise 95 358 noeuds et 312 777 tétraèdres TETRA4. Trois orientations sont étudiées: choc latéral $Y-$, choc latéral $Y+$ et choc oblique $Y - +Z$. Après révision du post-traitement, les résultats sont présentés avec maxima bruts, maxima hors bande de contact et percentiles p95/p99. Les maxima hors contact restent élevés (79.8 MPa to 116.6 MPa), mais les p99 hors contact sont beaucoup plus faibles (12.2 MPa to 17.1 MPa), ce qui indique des concentrations très localisées. La conclusion défendable est donc qualitative: la couronne cylindrique et les jonctions bras-carter doivent être protégées et adoucies géométriquement; l'efficacité quantitative d'un bumper reste à confirmer par une comparaison de variantes.

Mots-clés: dynamique transitoire, choc simplifié, Code_Aster, PETG-CF, impression 3D, Von Mises, percentiles de contrainte, ParaView.

1 Objectif et statut de l'étude

Le ventilateur étudié comporte une base, un bras support, un moyeu moteur et un carter cylindrique entourant les pales. L'objectif initial est de comprendre si un choc accidentel, par exemple lors d'une chute depuis une table, sollicite principalement la base ou le carter cylindrique.

Après revue critique, le statut scientifique du modèle est reformulé ainsi:

il s'agit d'une analyse dynamique inertielle simplifiée avec zone d'impact immobilisée, utile pour localiser les zones sensibles et guider la conception, mais insuffisante pour valider une tenue réelle à la chute.

Cette distinction est centrale. Une vraie simulation de chute devrait représenter un plan rigide ou déformable, laisser le contact se fermer progressivement, calculer le rebond, le glissement, le frottement, l'écrasement local et éventuellement l'endommagement. Ici, la zone de contact est directement bloquée en translation. Cela peut amplifier les contraintes locales et créer des singularités au voisinage immédiat des noeuds imposés.

2 Chaîne de calcul

La géométrie nettoyée et orientée est maillée en volume, exportée en MED, calculée dans Code_Aster, puis post-traitée en CSV et VTM/PVD. Les vues scientifiques sont générées depuis les fichiers VTM afin que les figures du rapport soient reproductibles.

Table 1: Hypothèses principales et effet attendu sur l’interprétation.

Item	Valeur utilisée	Impact sur l’interprétation
Unités	mm, tonne, N, s, MPa	Coherent avec Code_Aster et les contraintes en MPa.
Geometrie	Base dans XY , hauteur suivant $+Z$	Les plans $Y-$, $Y+$ et oblique sont lisibles dans ParaView.
Maillage mecanique	95 358 noeuds, 312 777 TETRA4	Maillage de travail; aucune convergence maillage n’est encore demonstree.
Materiau carter	PETG-CF elastique isotrope, $E = 6\,000$ MPa, $\nu = 0.35$	Approximation; l’impression 3D reelle est anisotrope.
Masses embarquees	Densite equivalente dans le moyeu et la base	Reproduit l’inertie globale, sans detail des composants.
Contact sol	Noeuds de contact bloques en translation	Equivalent a une zone immobilisee rigide, pas a un vrai contact avec rebond.

2.1 Géométrie et maillage

Le maillage de référence est:

`06_MAILLAGE_REFERENCE/carter_socle_xy_z_netgen.med`

La base est placée dans le plan XY et la hauteur du ventilateur suit $+Z$. Les logs Code_Aster indiquent 95 358 noeuds, 549 603 mailles dans le fichier MED et 312 777 éléments TETRA4 affectés au modèle mécanique 3D.

Ce maillage n’a pas encore fait l’objet d’une étude de convergence. En particulier, les tétraèdres linéaires TETRA4 peuvent être trop raides en flexion pour des parois relativement minces. Les valeurs absolues de contrainte doivent donc être considérées comme des indicateurs de localisation et de comparaison, pas comme une preuve de rupture.

2.2 Matériau et masses embarquées

Le carter est représenté par un PETG-CF équivalent, élastique isotrope:

$$E = 6\,000 \text{ MPa}, \quad \nu = 0.35, \quad \rho = 1.30 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3. \quad (1)$$

Ce choix est une approximation forte. Les pièces FDM sont généralement anisotropes: les propriétés dépendent de l’orientation des filaments, du taux de remplissage, de la température et de l’adhésion entre couches [1, 2]. Le critère de Von Mises est donc utilisé ici comme indicateur mécanique global, mais il n’est pas un critère de rupture adapté à lui seul à une pièce PETG-CF imprimée.

Les masses du moteur et de l’électronique sont intégrées par densité équivalente dans deux zones:

- moyeu avant: densité équivalente $2.063 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$;
- base électronique: densité équivalente $2.160 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$.

Cette méthode reproduit une partie de l’inertie globale, mais pas nécessairement le centre de gravité exact, les moments d’inertie, la rigidité du moteur, les vis ou les efforts locaux de fixation. Une version plus fidèle devrait utiliser des masses ponctuelles ou des corps rigides reliés aux interfaces de fixation.

3 Modèle de choc

3.1 Principe physique

Le calcul utilise `DYNA_NON_LINE` avec un schéma de Newmark [3]. Le contact est approximé par un groupe de noeuds bloqué en translation. Une impulsion inertielle triangulaire est ensuite appliquée au volume de la pièce.

Pour une chute libre depuis une hauteur h , la vitesse avant contact vaut:

$$v_0 = \sqrt{2gh}. \quad (2)$$

Pour $h = 0.8$ m, on obtient $v_0 \simeq 3.96$ m/s. Si cette vitesse est arrêtée sur une distance $s = 5$ mm, l'ordre de grandeur de l'accélération moyenne équivalente est:

$$a_s \approx \frac{v_0^2}{2s} = \frac{gh}{s} \approx 160 g. \quad (3)$$

Cependant, le pulse réellement appliqué dans les fichiers `.comm` n'est pas strictement cohérent avec cette chute de 0.8 m. Son amplitude maximale est 2.465×10^6 mm/s², soit environ 251 g , et sa durée est 2.524 ms. L'intégrale du pulse triangulaire vaut approximativement:

$$\Delta v \simeq \frac{1}{2} a_{\max} T \simeq 3.11 \text{ m/s}. \quad (4)$$

Cela correspond à une hauteur cinématique équivalente d'environ 0.49 m, pas 0.8 m. Le rapport ne doit donc plus affirmer que le chargement reproduit exactement une chute de 0.8 m. Il représente un pulse inertiel sévère, utile pour comparer les zones critiques, mais non calibré expérimentalement.

Table 2: Cohérence cinématique du pulse appliqué.

Grandeur	Valeur	Interpretation
Hauteur visée au départ	0.8 m	Scenario de conception initial, pas exactement reproduit par le pulse actuel.
Vitesse theorique a 0.8 m	3.96 m/s	Vitesse avant contact si chute libre sans frottement.
Acceleration maximale appliquée	2.465×10^6 mm/s ²	Environ 251 g au pic de l'impulsion triangulaire.
Duree du pulse	2.524 ms	Fenetre imposee par la fonction temporelle <code>Code_Aster</code> .
Impulsion equivalente Δv	3.11 m/s	Integrale du pulse: $\Delta v \simeq \frac{1}{2} a_{\max} T$.
Hauteur equivalente en vitesse	0.49 m	$h_{\text{eq}} = \Delta v^2 / (2g)$; le pulse ne reproduit pas strictement 0.8 m.

Table 3: Paramètres solveur et sorties disponibles.

Parametre	Valeur	Commentaire
Solveur Code_Aster	DYNA_NON_LINE	Dynamique transitoire non lineaire geometrique possible, utilisee ici avec comportement elastique.
Schema temps	Newmark, formulation deplacement	Schema implicite robuste pour une premiere etude transitoire.
Pas de calcul	1.0×10^{-4} s	Pas interne de resolution.
Instants archives	Tous les 5.0×10^{-4} s, de 0 a 2.5×10^{-3} s	Six instants exportes; un pic entre deux sorties peut etre manque.
Chargement	Impulsion triangulaire, amplitude 2.465×10^6 mm/s ²	Pulse severe, mais pas strictement coherent avec une chute de 0.8 m.
Champs exportes	DEPL, SIEF_ELGA, SIEQ_ELGA	Deplacements, contraintes elementaires et Von Mises.

3.2 Scénarios calculés

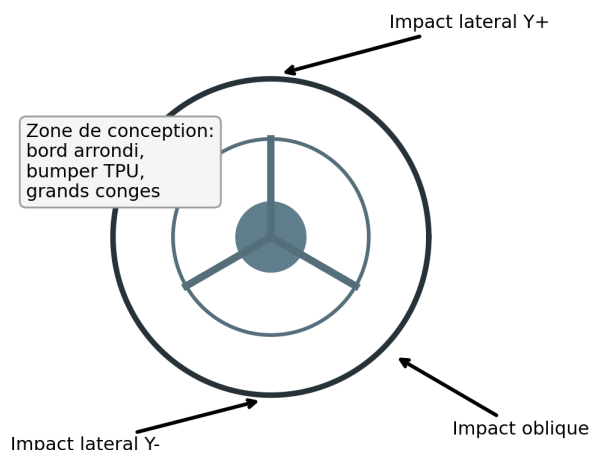


Figure 1: Définition des trois scénarios inertiels. Les flèches indiquent les directions d'impact idéalisées; elles ne représentent pas un vrai plan de sol en contact.

Table 4: Cas de choc simulés et rôle physique.

Cas	Idealisation du contact	Noeuds contact	Temps (ms)	pic	Role physique
Lateral Y-	plan pres du bord Y-	63	2.5		choc lateral sur la couronne
Lateral Y+	plan pres du bord Y+	63	2.5		choc lateral oppose
Oblique Y- +Z	plan incline traversant la couronne	1091	2.0		choc combine lateral et vertical

Les deux cas latéraux utilisent 63 noeuds bloqués. Le cas oblique utilise 1091 noeuds bloqués, soit environ 17 fois plus. Les trois cas ne sont donc pas strictement comparables comme trois directions d'impact à contact identique. Le cas oblique combine une direction différente et une zone immobilisée beaucoup plus large.

4 Post-traitement révisé

4.1 Maxima, percentiles et filtrage

La première version du rapport utilisait essentiellement le maximum brut et un maximum “hors bande de contact”. La revue a correctement pointé que ce filtrage était trop vague. La méthode est maintenant documentée:

- la distance d est calculée entre le centre de chaque tétraèdre et le plan de contact;
- le filtrage principal conserve uniquement les éléments tels que $d > 8$ mm;
- une sensibilité est fournie pour $d > 4$ mm, $d > 8$ mm et $d > 12$ mm;
- en plus des maxima, les percentiles p99 et p95 sont calculés hors bande de contact.

Le maximum reste utile pour localiser un point chaud, mais il peut être dominé par un seul élément. Les percentiles p95/p99 décrivent mieux le niveau de sollicitation d’une zone étendue.

5 Résultats

5.1 Synthèse robuste

Table 5: Indicateurs robustes par scénario. $d > 8$ signifie que les éléments situés à moins de 8 mm du plan de contact idéalisé sont exclus. Le déplacement u_{\max} est le maximum sur toute la fenêtre temporelle archivée.

Cas	Noeuds contact	VMIS brut (MPa)	VMIS $d > 8$ (MPa)	p99 $d > 8$ (MPa)	p95 $d > 8$ (MPa)	u_{\max} (mm)
Y- lateral	63	88.4	79.8	12.2	7.1	4.24
Y+ lateral	63	116.6	116.6	17.1	11.3	3.68
Oblique	1091	867.1	91.0	13.6	6.1	1.87

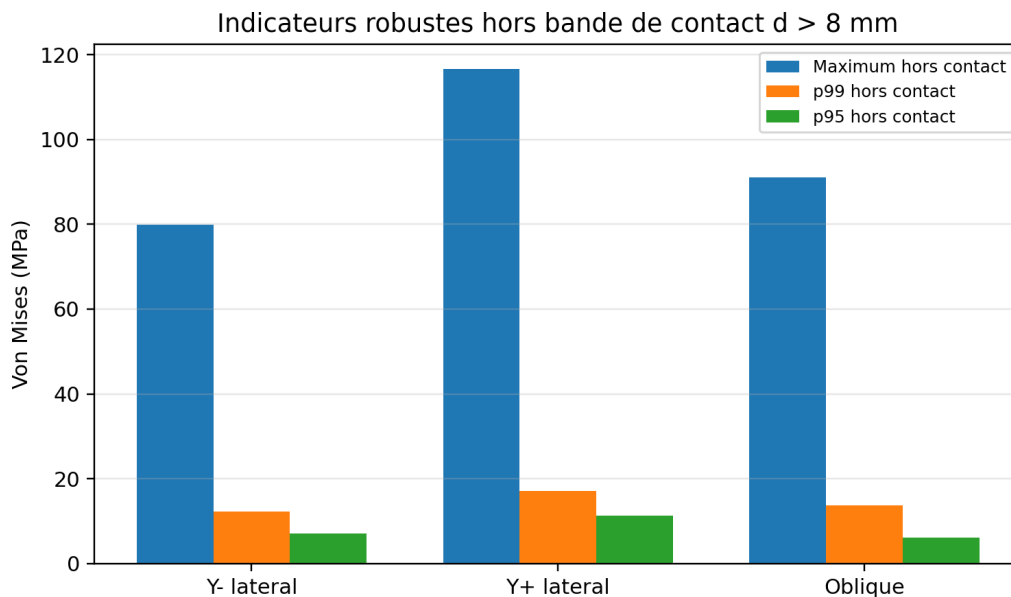


Figure 2: Comparaison des maxima, p99 et p95 hors bande de contact $d > 8$ mm. Les percentiles beaucoup plus faibles indiquent que les fortes contraintes sont localisées.

La lecture change par rapport à une analyse basée uniquement sur le maximum. Les maxima hors contact restent élevés: 79.8 MPa pour Y-, 116.6 MPa pour Y+ et 91.0 MPa pour l’oblique. En

revanche, les p99 hors contact sont seulement 12.2 MPa, 17.1 MPa et 13.6 MPa. Le choc ne met donc pas tout le carter à un niveau de contrainte élevé; il crée surtout des concentrations locales.

Le déplacement maximal du cas oblique est 1.87 mm sur la fenêtre temporelle complète. La valeur 1.69 mm visible dans l'ancienne table correspondait au déplacement à l'instant du pic de contrainte brute (2.0 ms), pas au maximum temporel atteint à 2.5 ms.

5.2 Sensibilité du filtrage

Table 6: Sensibilité du maximum hors contact à la largeur de la bande exclue.

Cas	max $d > 4$ mm (MPa)	max $d > 8$ mm (MPa)	max $d > 12$ mm (MPa)	p99 $d > 8$ mm (MPa)
Y- lateral	79.8	79.8	79.8	12.2
Y+ lateral	116.6	116.6	116.6	17.1
Oblique	152.7	91.0	69.1	13.6

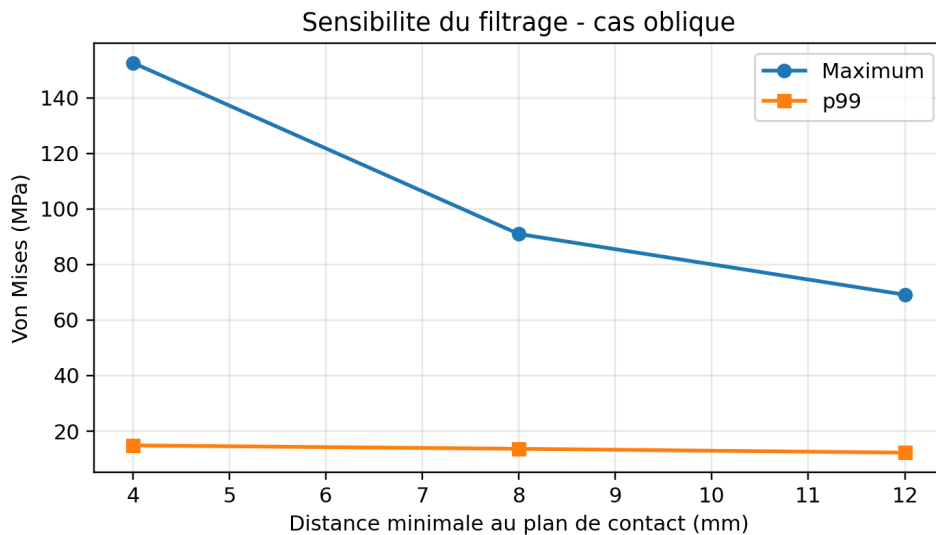


Figure 3: Cas oblique: sensibilité du maximum et du p99 à la distance minimale au plan de contact. Le maximum varie fortement, ce qui confirme qu'il reste lié au voisinage du contact; le p99 est beaucoup plus stable.

Le cas oblique est le plus sensible au choix de filtrage: son maximum passe de 152.7 MPa pour $d > 4$ mm à 69.1 MPa pour $d > 12$ mm. Cette variation montre que le pic est encore très influencé par la zone de contact imposée. À l'inverse, le p99 reste bas, ce qui renforce l'idée d'une concentration locale plutôt que d'une sollicitation généralisée du carter.

5.3 Évolution temporelle

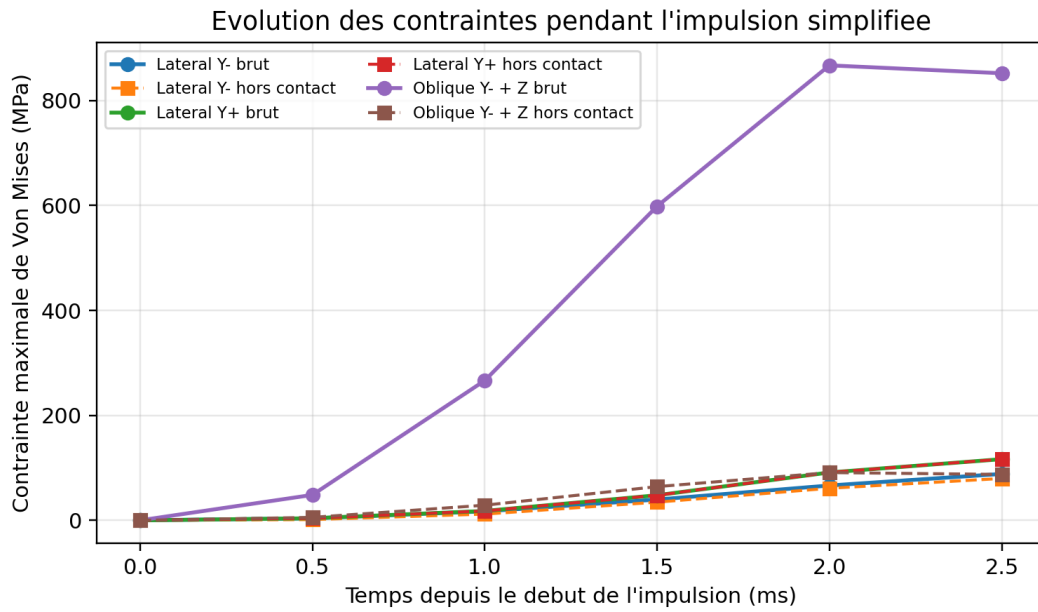


Figure 4: Évolution temporelle des maxima bruts et filtrés. Six instants seulement sont archivés; un maximum plus fin entre deux sorties ne peut pas être exclu.

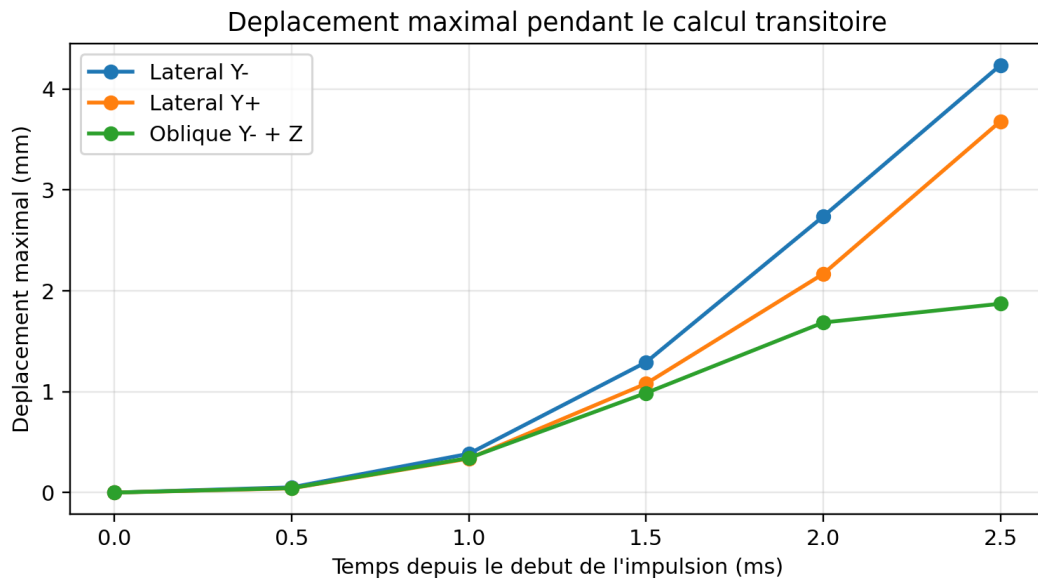


Figure 5: Évolution du déplacement maximal. Les valeurs réelles sont de l'ordre du millimètre à quelques millimètres; les vues ParaView peuvent amplifier visuellement ces déplacements.

Le pas interne du calcul est 1.0×10^{-4} s, mais les résultats ne sont archivés que tous les 5.0×10^{-4} s. Les courbes doivent donc être lues comme une tendance. Une étude plus fiable devrait archiver au moins tous les 0.1 ms, voire chaque pas interne, et comparer avec un pas de calcul deux fois plus fin.

5.4 Vues spatiales

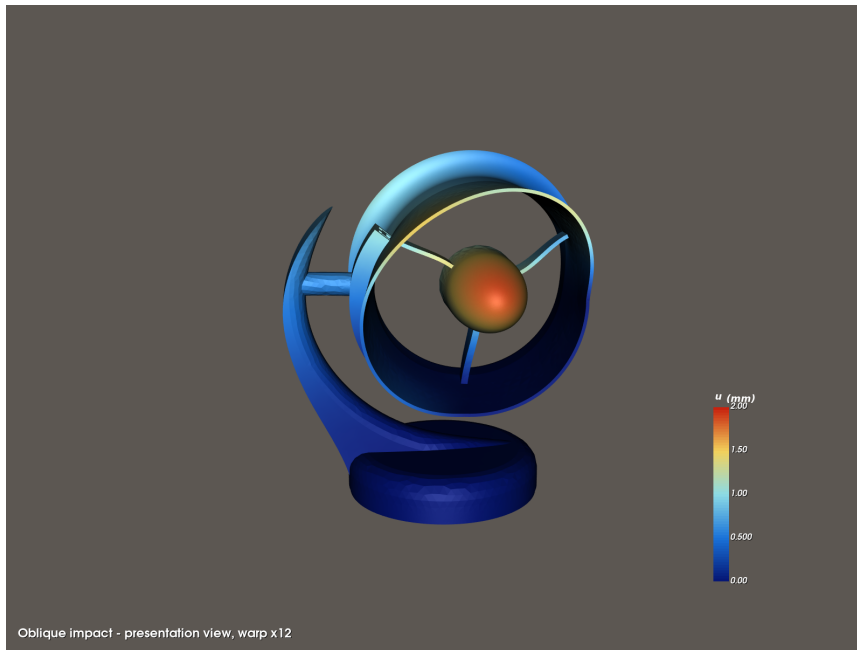


Figure 6: Cas oblique, champ DEPL_MAG_mm et déformation amplifiée pour la lecture. La couleur représente le déplacement en mm; la forme déformée ne correspond pas à l'échelle réelle lorsque le facteur de warp est supérieur à 1.

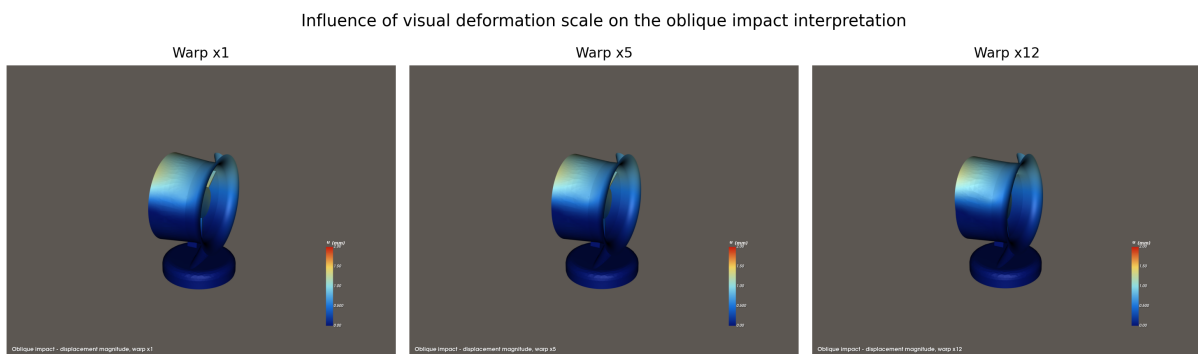


Figure 7: Même résultat avec trois échelles visuelles de déformation. Cette figure évite de confondre amplification graphique et déplacement physique réel.

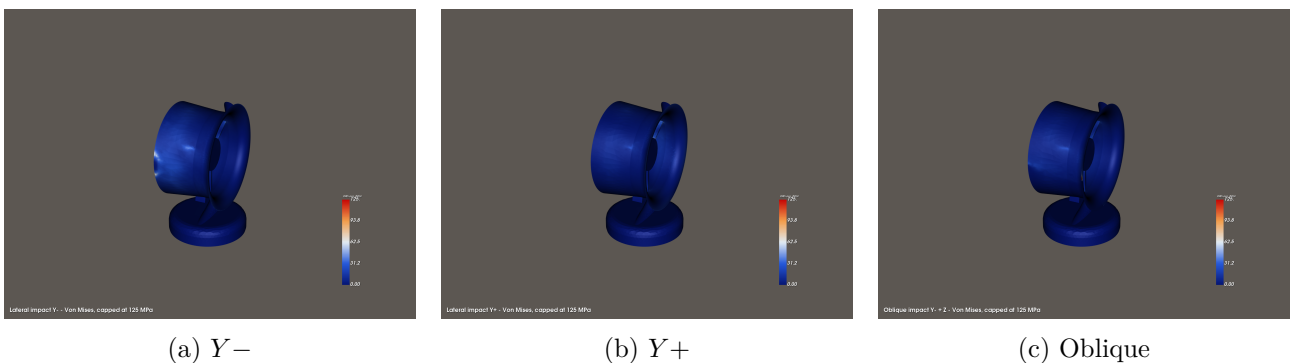


Figure 8: Cartes de Von Mises aux instants de pic. L'échelle est volontairement limitée pour rendre les zones de 0 MPa to 125 MPa lisibles; le pic brut oblique dépasse cette plage.

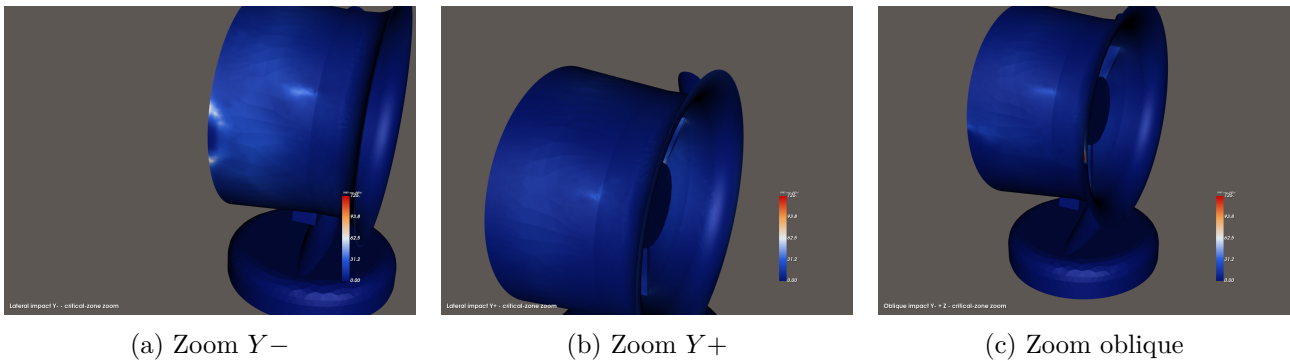


Figure 9: Vues rapprochées des zones de concentration. Les points chauds se trouvent sur la couronne et près des jonctions avec les bras.

6 Interprétation physique

6.1 Ce que l'étude permet de dire

Les résultats sont pertinents pour:

1. identifier les zones sensibles sous un pulse inertiel sévère;
2. comparer qualitativement les scénarios étudiés;
3. définir les variantes de conception à tester ensuite.

La zone à protéger n'est pas seulement la base. Le carter cylindrique, ses lèvres et les jonctions bras-carter apparaissent comme les zones mécaniquement les plus sensibles lorsque la couronne est impliquée dans le contact.

6.2 Ce que l'étude ne démontre pas

Le calcul ne démontre pas:

- que le ventilateur résiste à une chute de 0.8 m;
- qu'une fissure réelle apparaîtra exactement au point du maximum;
- que le bumper est quantitativement validé;
- que les contraintes de Von Mises peuvent être comparées directement à une résistance générique PETG-CF.

Pour conclure sur une rupture, il faudrait un matériau anisotrope calibré, un critère de rupture ou d'endommagement, un vrai contact sol-pièce et une convergence numérique. Les méthodes de mécanique de l'impact montrent justement que la durée de contact, la raideur locale et le rebond sont déterminants [4].

7 Conséquences de conception

Table 7: Décisions de conception proposées à partir de l'étude.

Action	Effet attendu	Priorite
Ajouter un jonc/bumper souple autour du carter cylindrique	Reduit directement l'acceleration locale et evite le contact dur sur la couronne.	Tres haute
Augmenter les rayons des levres du carter	Diminue les concentrations sur les bords de la couronne.	Haute
Agrandir les congés bras-carter et bras-moyeu	Abaisse les pics aux raccordements et repartit mieux les efforts.	Haute
Epaissir localement la couronne	Augmente la rigidite locale, mais ajoute de la masse et peut deplacer les pics.	Moyenne
Joint uniquement sous la base	Utile pour une chute sur le socle, peu efficace pour un impact lateral du cylindre.	Moyenne a faible
Essai physique de chute instrumente	Calibre l'acceleration reelle et valide le modele numerique.	Necessaire avant validation finale

La recommandation prioritaire reste un jonc ou bumper souple autour du carter cylindrique. Cette conclusion est qualitative mais mécaniquement cohérente: un bumper augmente la durée de contact, augmente la distance d'arrêt locale et réduit l'accélération transmise à la couronne.

La formulation correcte est donc:

le modèle simplifié identifie le bumper comme la modification la plus directement cohérente avec le mécanisme observé; son efficacité quantitative doit être confirmée par une comparaison de variantes.

Un joint uniquement sous la base est utile pour un choc sur le socle, mais il ne protège pas le cylindre si la couronne touche directement le sol. Pour répondre au scénario étudié, l'élément souple doit être périphérique ou placé de manière à toucher avant la couronne rigide.

8 Travaux nécessaires pour une validation

Les critiques scientifiques conduisent aux actions suivantes, classées par priorité:

1. rendre le chargement cinématiquement cohérent avec une hauteur donnée, ou annoncer explicitement un pulse arbitraire calibré;
2. modéliser un plan rigide de contact avec frottement/rebond, au lieu de bloquer des noeuds;
3. comparer trois maillages et idéalement des TETRA10 ou un modèle coque;
4. archiver plus d'instantés et vérifier la sensibilité au pas de temps;
5. mesurer les masses réelles, centres de gravité et moments d'inertie du moteur et de l'électronique;
6. tester une variante avec bumper, une variante avec rayons augmentés et une combinaison;
7. réaliser au moins un essai physique de chute pour calibrer l'accélération réelle.

Les grandeurs à comparer pour les variantes devraient être: p95/p99 de contrainte hors contact, déplacement maximal, énergie de déformation, réaction totale au contact, masse ajoutée et volume de matière.

9 Reproductibilité

Le livrable contient:

- 01_RAPPORT_LATEX: rapport, figures, tables et bibliographie;
- 02_RESULTATS_CSV: historiques, synthèses de pics et métriques robustes;
- 03_VISUALISATION_PARAVIEW: fichiers .pvd/.vtm/.vtu;
- 04_CODE_ASTER: fichiers .comm, .export et scripts de lancement;
- 05_SCRIPTS_REPRODUCTIBLES: extraction, figures, métriques robustes et rendus VTK;
- 06_MALLAGE_REFERENCE: maillage MED;
- 07_LOGS_CALCUL: logs Code_Aster avec DIAGNOSTIC JOB : OK;
- 08_ANNEXES: notes de présentation et réponse aux critiques.

Commandes de reproduction principales:

```
python 05_SCRIPTS_REPRODUCTIBLES/postprocess_cylindrical_drop_results.py
python 05_SCRIPTS_REPRODUCTIBLES/make_report_figures.py
python 05_SCRIPTS_REPRODUCTIBLES/compute_robust_metrics.py
python 05_SCRIPTS_REPRODUCTIBLES/render_scientific_views.py
```

10 Conclusion

L'étude révisée doit être présentée comme une analyse exploratoire de conception. Elle montre que les scénarios latéraux et obliques sollicitent prioritairement la couronne cylindrique et les raccordements bras-carter. Les maxima hors contact atteignent environ 80 MPa to 117 MPa, mais les p95/p99 hors contact restent bien plus bas, ce qui indique des concentrations locales plutôt qu'une mise en contrainte uniforme du carter.

La conclusion de conception reste utile mais prudente: ajouter un bumper périphérique, augmenter les rayons des lèvres et agrandir les congés sont les modifications les plus cohérentes avec le mécanisme observé. En revanche, la tenue réelle à une chute donnée n'est pas validée. Pour cela, il faut un chargement cohérent avec la hauteur de chute, un vrai contact sol-pièce, une convergence maillage/temps, un matériau PETG-CF calibré et au moins un essai physique.

References

- [1] Sung-Hoon Ahn, Michael Montero, Dan Odell, Shad Roundy, and Paul K. Wright. Anisotropic material properties of fused deposition modeling abs. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4):248–257, 2002.
- [2] B. M. Tymrak, M. Kreiger, and J. M. Pearce. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-d printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58:242–246, 2014.
- [3] Nathan M. Newmark. A method of computation for structural dynamics. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 85(3):67–94, 1959.
- [4] Werner Goldsmith. *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Edward Arnold, 1960.
- [5] EDF. *Code_Aster: Structures and Thermomechanics Analysis for Studies and Research*. Finite element solver used for the transient mechanical calculations.
- [6] CEA and EDF. *SALOME Platform*. Pre-processing and scientific visualization platform used in the workflow.

- [7] James Ahrens, Berk Geveci, and Charles Law. Paraview: An end-user tool for large data visualization. *The Visualization Handbook*, 2005. Visualization software used for VTK/VTM post-processing.