



RAPPORT DE TP

Structures composites

Killian RENOU
William GUILBERT

Date : 12/04/2025

ENIT - École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

Encadrant : Christian GARNIER



Table des matières

1	Introduction	2
2	Plaque 4 plis sans symétrie miroir sous chargement mécanique	3
2.1	Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique	3
2.2	Mise en place du modèle numérique sous Abaqus	3
2.3	Résultats obtenus sous Abaqus	4
2.4	Résultats obtenus avec la feuille de calcul composite	6
2.5	Conclusion vis-à-vis du dimensionnement de la plaque 1	7
2.6	Optimisation de la plaque pour répondre au cahier des charges.	7
3	Plaque 4 plis avec symétrie miroir sous chargement mécanique	8
3.1	Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique	8
3.2	Mise en place du modèle numérique sous Abaqus	8
3.3	Résultats obtenus sous Abaqus	9
3.4	Résultats obtenus avec la feuille de calcul composite	11
3.5	Conclusion vis-à-vis du dimensionnement de la plaque 2	11
3.6	Optimisation de la plaque pour répondre au cahier des charges	11
4	Plaque en acier sous chargement mécanique	12
4.1	Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique	12
4.2	Mise en place du modèle numérique sous Abaqus	13
4.3	Résultats obtenus sous Abaqus	13
4.4	Comparaison avec les résultats des autre modèles	13
4.5	Critique des modèles de calculs	14
5	Conclusion	14

1 Introduction

Ce rapport présente une analyse comparative de différentes configurations de plaques soumises à un chargement mécanique, dans le cadre du cours de structures composites. L'objectif principal est d'évaluer les performances mécaniques de plaques composites asymétriques et symétriques, ainsi que d'une plaque en acier, en utilisant des outils numériques tels qu'Abaqus et une feuille de calcul dédiée.

Le contexte de cette étude s'inscrit dans la conception de structures légères et résistantes, où les matériaux composites jouent un rôle clé grâce à leur rapport résistance/poids élevé et leur capacité à être optimisés pour des applications spécifiques. Cependant, leur comportement complexe nécessite une modélisation précise et une validation rigoureuse.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Définir les hypothèses nécessaires à la mise en place des modèles numériques.
- Comparer les résultats obtenus sous Abaqus avec ceux issus de la feuille de calcul composite.
- Identifier les limites des configurations initiales et proposer des optimisations pour répondre aux critères de résistance.
- Comparer les performances des plaques composites avec celles d'une plaque en acier.

Cette étude permettra de mieux comprendre les avantages et les inconvénients des matériaux composites par rapport aux matériaux traditionnels comme l'acier, tout en mettant en lumière les défis liés à leur dimensionnement.

2 Plaque 4 plis sans symétrie miroir sous chargement mécanique

2.1 Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique

Formulation	Structure, coque 2D
Espace de modélisation	3D (Courbure induite par l'asymétrie de la structure soumise à de la traction)
Géométrie	Plaque de William (L=150mm, l=400mm), plaque de Killian (L=400mm, l=400mm)
Matériau	Pli composite UD, Loi de comportement : linéaire élastique isotrope transverse ($E_l = 38 \text{ GPa}$, $E_t = 9 \text{ GPa}$, $\nu_{lt} = 0,32$, $G_{lt} = 3,6 \text{ GPa}$)
Comportement de structure	Coque 2D composite, Lay-Up
Type d'analyse	Statique, temps d'analyse : 1s
Cas de chargement	Pas de conditions initiales ni de conditions aux limites Force linéique N_{xx} (l.a : l1+l2, direction x, sens : +x (l1), -x (l2), Amplitude = 1000 N.mm^{-1}) , Force linéique N_{yy} (L.a : L1+L2, direction y, sens : +y (L1), -y (L2), Amplitude = 500 N.mm^{-1}) , Force linéique N_{xy} (L.a : L1+L2, direction x, sens : +x (L1), -x (L2), Amplitude = 250 N.mm^{-1}) , Force linéique N_{xy} (l.a : l1+l2, direction y, sens : +y (l1), -y (l2), Amplitude = 250 N.mm^{-1}) ,
Maillage	Famille d'éléments : coque Bibliothèque d'éléments : standard Forme d'éléments : quadrilatère Nombre de nœuds par élément : 4 (interpolation linéaire) Nombre de DDL par noeud : 5 Intégration réduite Taille d'éléments optimisée
Donnée de sortie	U, σ , ε , Critère de rupture

TABLE 1 – Hypothèses pour la plaque 1

2.2 Mise en place du modèle numérique sous Abaqus

Les hypothèses nous ont permis de mettre en place le modèle numérique de la plaque 1 en considérant l'empilement suivant :

N° pli	Orientation (°)	Epaisseur (mm)
4	15	1,5
3	-30	1
2	-15	1,5
1	30	1

TABLE 2 – Lay-up de la plaque 1 asymétrique

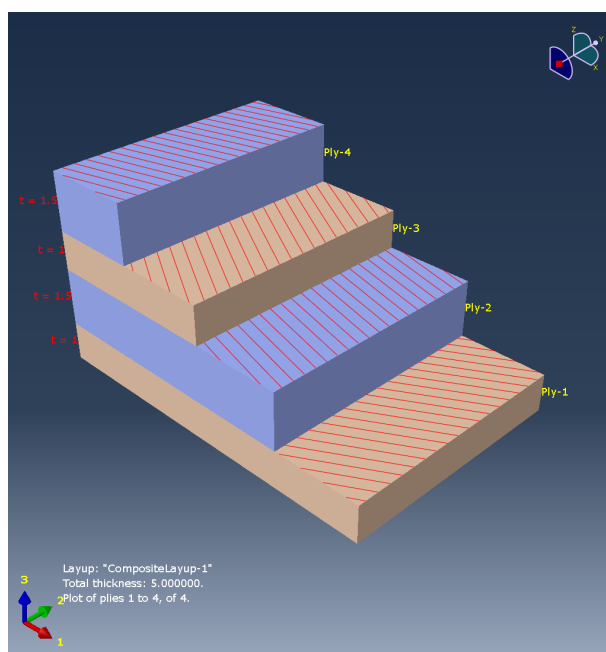


FIGURE 1 – Lay-up de la plaque 1 visualisé sous Abaqus.

2.3 Résultats obtenus sous Abaqus

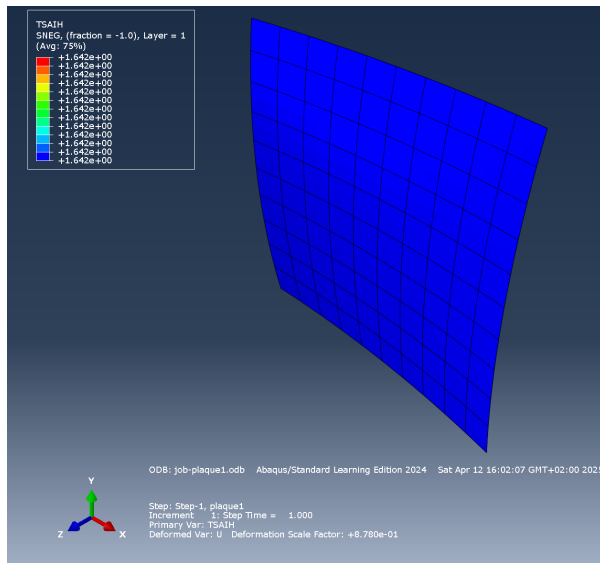


FIGURE 2 – Couche 1, plaque carrée (Killian)

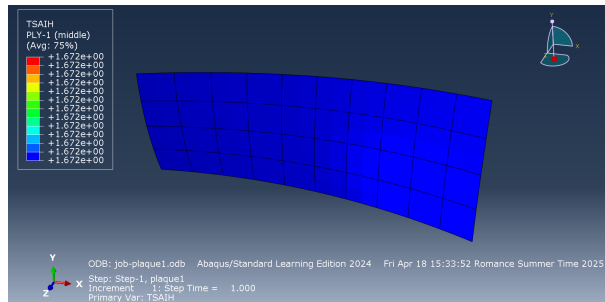


FIGURE 3 – Couche 1, plaque rectangle (William)

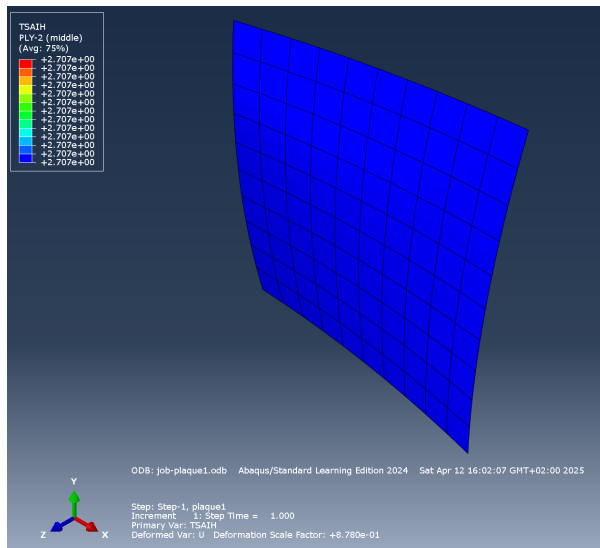


FIGURE 4 – Couche 2, plaque carrée (Killian)

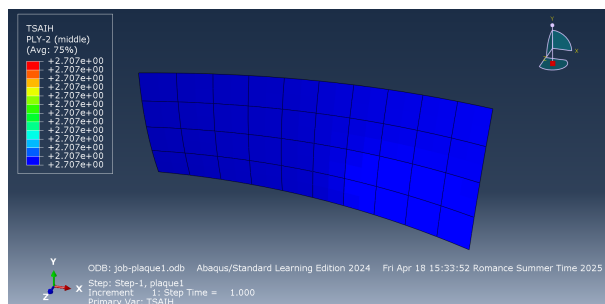


FIGURE 5 – Couche 2, plaque rectangle (William)

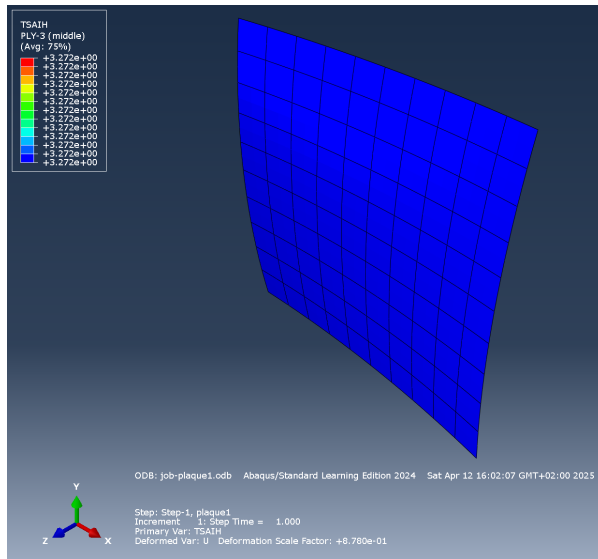


FIGURE 6 – Couche 3, plaque carrée (Killian)

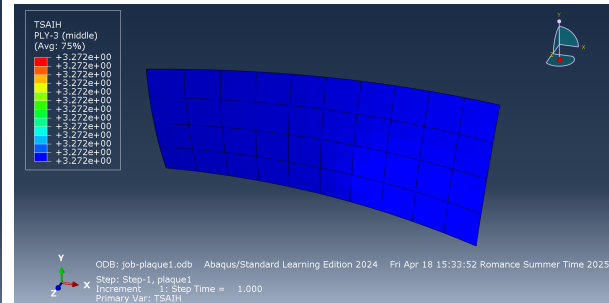


FIGURE 7 – Couche 3, plaque rectangle (William)

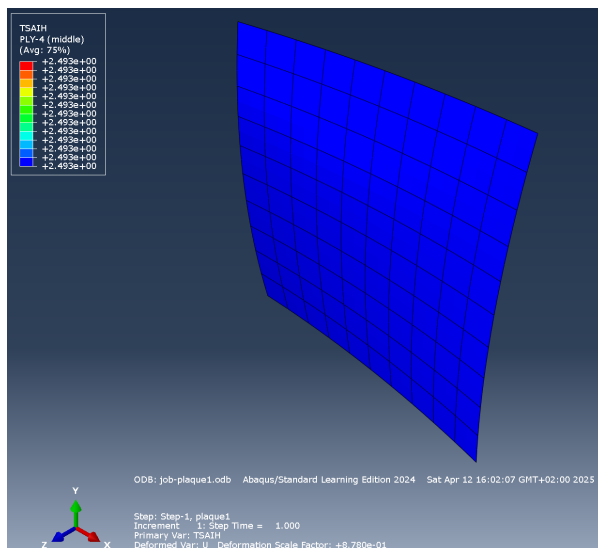


FIGURE 8 – Couche 4, plaque carrée (Killian)

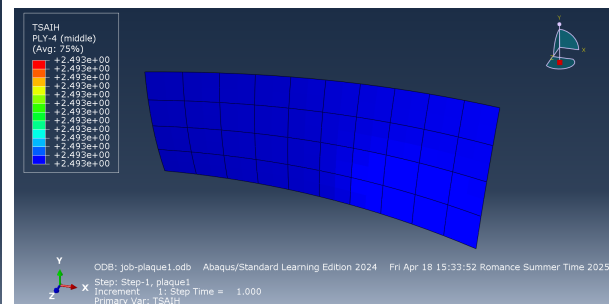


FIGURE 9 – Couche 4, plaque rectangle (William)

2.4 Résultats obtenus avec la feuille de calcul composite

Nous allons maintenant comparer les valeurs du critère de Tsai-Hill obtenues sous Abaqus avec celles obtenues avec la feuille de calcul composite conçue lors du premier TP de structures composites.

Il est important de remarquer que la feuille de calcul nous donne les valeurs du critère de Tsai-Hill pour les surfaces supérieures et inférieures de la plaque, alors qu'Abaqus nous donne les valeurs pour le milieu de la couche. Cependant les résultats sont

Couche	1		2		3		4	
Orientation (°)	30		-15		-30		15	
z (mm)	2.5	1.5	1.5	0	0	-1	-1	-2.5
Résultats Abaqus								
Tsai-Hill (milieu)	1.642		2.707		3.272		2.493	
Résultats feuille calcul TP1								
Tsai-Hill (sup./inf.)	1.642	1.704	2.443	2.927	3.131	3.451	2.381	2.696

TABLE 3 – Comparaison des résultats pour la plaque carrée (Killian)

cohérents car la valeur du critère de rupture en milieu de couche est toujours comprise entre les valeurs de la surface supérieure et inférieure.

2.5 Conclusion vis-à-vis du dimensionnement de la plaque 1

Nous constatons que le critère de Tsai-Hill est dépassé (>1) pour toutes les couches de la plaque 1, ce qui signifie que la plaque 1 ne peut pas être utilisée dans ces conditions de chargement. Il est donc nécessaire de modifier l'orientation des couches ou d'augmenter l'épaisseur de la plaque pour respecter le critère de rupture.

2.6 Optimisation de la plaque pour répondre au cahier des charges.

Si nous voulons atteindre le critère de rupture inférieur à 1 pour toutes les couches nous avons dans un premier temps essayé de faire varier l'épaisseur de celles-ci. Nous avons donc pris la plaque 1 et nous avons modifié l'épaisseur de chaque couche dans la feuille de calcul pour obtenir le tableau suivant :

N° pli	Orientation (°)	Epaisseur (mm)
4	15	6.5
3	-30	1.5
2	-15	1
1	30	4.5

TABLE 4 – Lay-up de la plaque 1 asymétrique supportant le chargement

Il est donc nécessaire d'avoir une plaque d'épaisseur 13.5 mm pour que celle-ci résiste au chargement sans changer l'orientation des couches. C'est à dire qu'il faut presque doubler son épaisseur, ce qui peut être un lourd inconvénient en terme d'espace utilisé. Nous allons donc essayer d'obtenir une épaisseur plus faible en changeant l'orientation des couches.

N° pli	Orientation (°)	Epaisseur (mm)
4	-10	2
3	55	1
2	55	3
1	-10	2

TABLE 5 – Lay-up optimisé de la plaque 1 asymétrique supportant le chargement

Cette combinaison de paramètres nous permet donc d'obtenir environ 8 mm d'épaisseur total, soit 5,5 mm de moins que la plaque où nous avons seulement modifié l'épaisseur. On peut donc clairement conclure sur le fait que l'orientation des couches joue un rôle majeur dans la solidité des plaques.

3 Plaque 4 plis avec symétrie miroir sous chargement mécanique

3.1 Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique

Les hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique de la plaque 2 sont les mêmes que pour la plaque 1, à l'exception que la plaque 2 est symétrique par rapport au plan médian. (Table 1)

3.2 Mise en place du modèle numérique sous Abaqus

Les hypothèses nous ont permis de mettre en place le modèle numérique de la plaque 2 en considérant l'empilement suivant :

N° pli	Orientation (°)	Epaisseur (mm)
1'	30	1
2'	-15	1,5
3'	-30	1
4'	15	1,5
Symétrie miroir		
4	15	1,5
3	-30	1
2	-15	1,5
1	30	1

TABLE 6 – Lay-up de la plaque 1 asymétrique

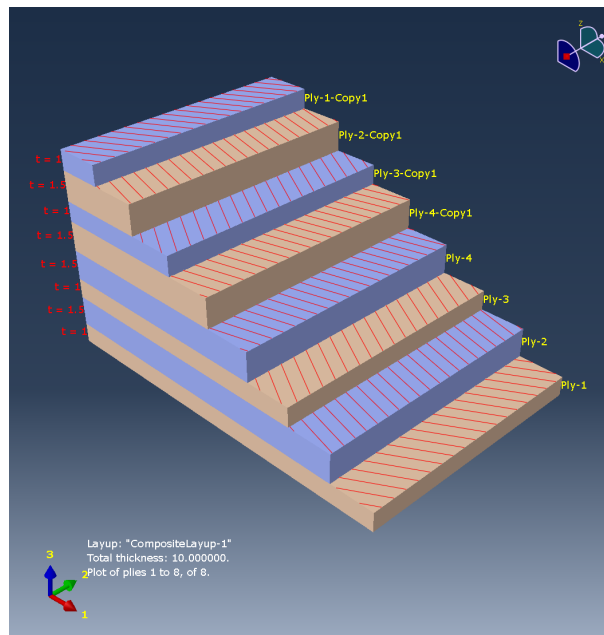


FIGURE 10 – Lay-up de la plaque 2 visualisé sous Abaqus.

3.3 Résultats obtenus sous Abaqus

La plaque étant symétrique nous allons simplement afficher les résultats des couches 1 à 4, les valeurs du critère de Tsai-Hill étant identiques pour les couches conjuguées ($4=4'$, $3=3'$, $2=2'$, $1=1'$).

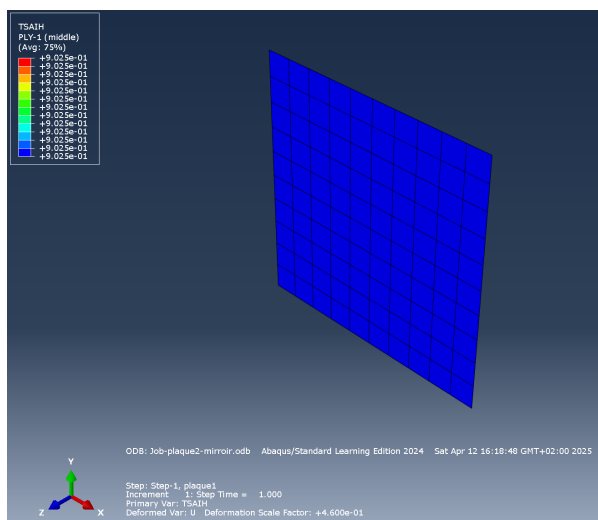


FIGURE 11 – Couche 1, plaque carrée (Killian)

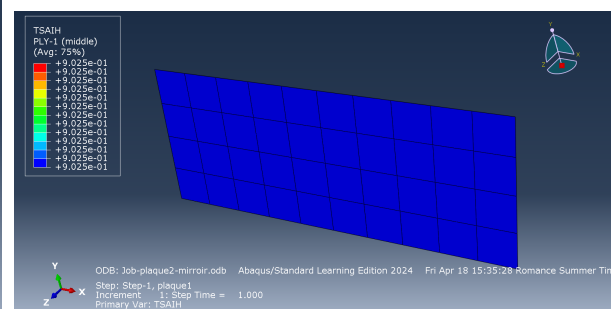


FIGURE 12 – Couche 1, plaque rectangle (William)

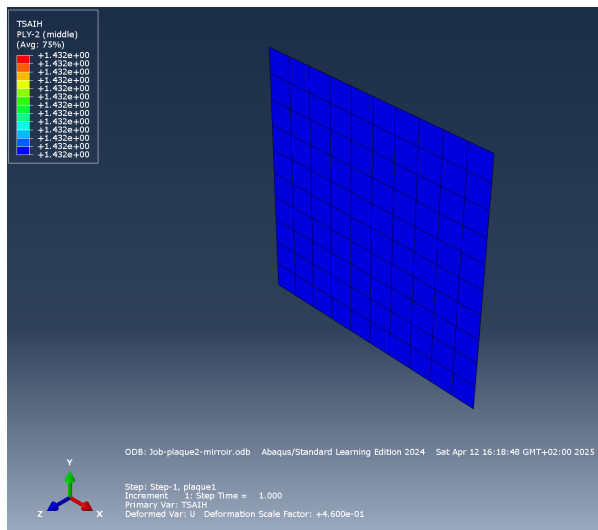


FIGURE 13 – Couche 2, plaque carrée (Killian)

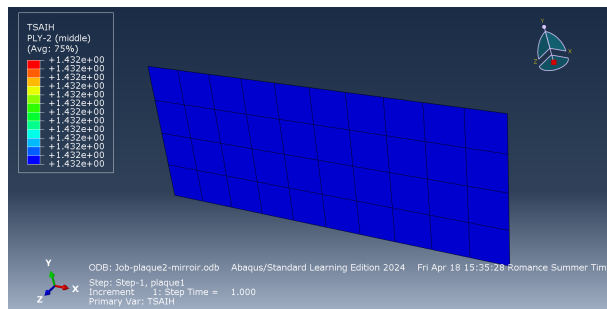


FIGURE 14 – Couche 2, plaque rectangle (William)

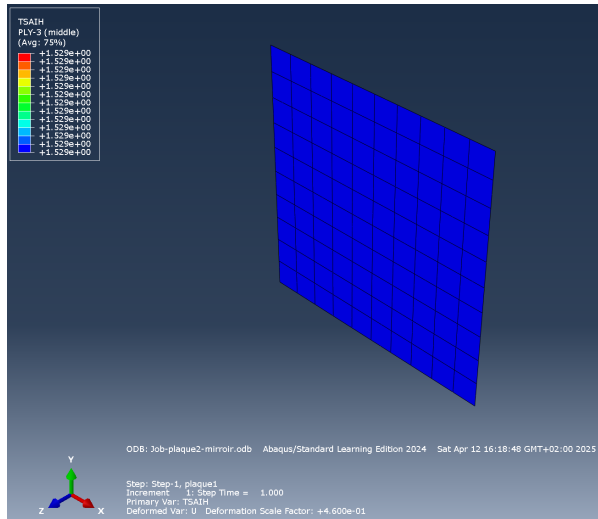


FIGURE 15 – Couche 3, plaque carrée (Killian)

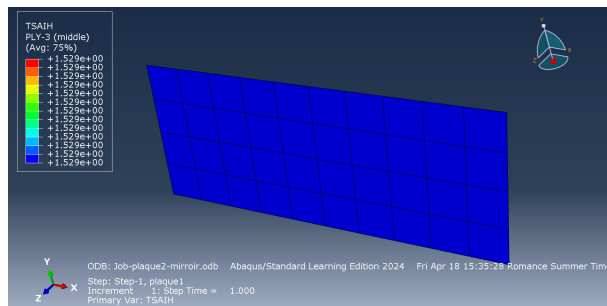


FIGURE 16 – Couche 3, plaque rectangle (William)

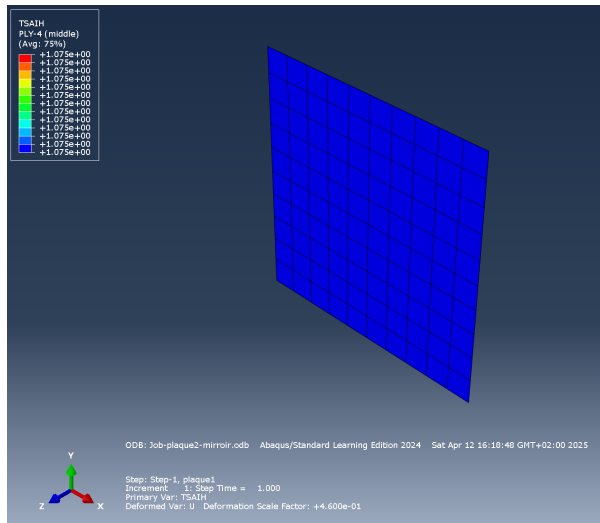


FIGURE 17 – Couche 4, plaque carrée (Killian)

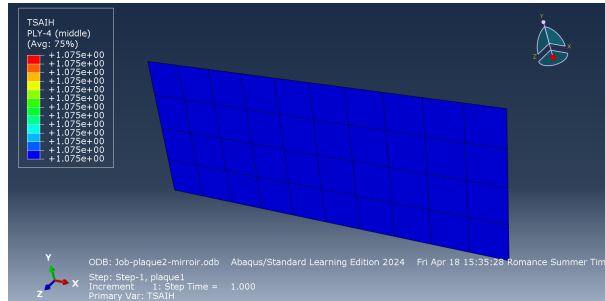


FIGURE 18 – Couche 4, plaque rectangle (William)

3.4 Résultats obtenus avec la feuille de calcul composite

Nous allons maintenant comparer les valeurs du critère de Tsai-Hill obtenues sous Abaqus avec celles obtenues avec la feuille de calcul composite conçue lors du premier TP de structures composites.

Couche	1 - 1'		2 - 2'		3 - 3'		4 - 4'	
Orientation (°)	30		-15		-30		15	
z (mm)	2.5	1.5	1.5	0	0	-1	-1	-2.5
Résultats Abaqus								
Tsai-Hill (milieu)	0.902		1.432		1.529		1.07	
Résultats feuille calcul TP1								
Tsai-Hill (sup./inf.)	0.902	0.902	1.432	1.432	1.529	1.529	1.075	1.075

TABLE 7 – Comparaison des résultats pour la plaque carrée

3.5 Conclusion vis-à-vis du dimensionnement de la plaque 2

Nous constatons que le critère de Tsai-Hill est dépassé (>1) pour certaines couches de la plaque, ce qui signifie que la plaque 2 ne peut pas être utilisée dans ces conditions de chargement. Il est donc nécessaire de modifier l'orientation des couches ou d'augmenter l'épaisseur de la plaque pour respecter le critère de rupture.

3.6 Optimisation de la plaque pour répondre au cahier des charges

Si nous voulons atteindre le critère de rupture inférieur à 1 pour toutes les couches nous avons dans un premier temps essayé de faire varier l'épaisseur de celles-ci. Nous

avons donc pris la plaque 2 et nous avons modifié l'épaisseur de chaque couche dans la feuille de calcul pour obtenir le tableau suivant :

N° pli	Orientaion (°)	Epaisseur (mm)
1'	30	2.5
2'	-15	1
3'	-30	1
4'	15	2
4	15	2
3	-30	1
2	-15	1
1	30	2.5

TABLE 8 – Lay-up de la plaque 2 symétrique supportant le chargement

Il est donc nécessaire d'avoir une plaque d'épaisseur 13 mm pour que celle-ci résiste au chargement sans changer l'orientation des couches.

N° pli	Orientaion (°)	Epaisseur (mm)
1'	55	1
2'	55	1
3'	-10	1
4'	-10	1
4	-10	1
3	-10	1
2	55	1
1	55	1

TABLE 9 – Lay-up optimisé de la plaque 2 symétrique supportant le chargement

Cette variante des paramètres nous permet d'obtenir environ 8mm d'épaisseur, soit 5mm de moins que la dernière. Encore une fois, cela démontre bien l'importance de l'orientation des fibres dans chaque couches. De plus, on n'augmente que de 3mm l'épaisseur de la plaque originale pour qu'elle supporte le chargement.

4 Plaque en acier sous chargement mécanique

4.1 Hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique

Les hypothèses nécessaires à la mise en place du modèle numérique de la plaque 3 sont les mêmes que pour la plaque 1 (Table 1), à l'exception des éléments suivants :

Matériau	Acier Loi de comportement : linéaire élastique isotrope ($E = 210 \text{ GPa}$, $\nu = 0,28$)
Section	Coque Homogène, épaisseur 5 mm
Donnée de sortie	U, σ, ε , Critère de rupture (Von Mises)

TABLE 10 – Hypothèses pour la plaque 3

4.2 Mise en place du modèle numérique sous Abaqus

Les hypothèses nous ont permis de mettre en place le modèle numérique de la plaque 3.

4.3 Résultats obtenus sous Abaqus

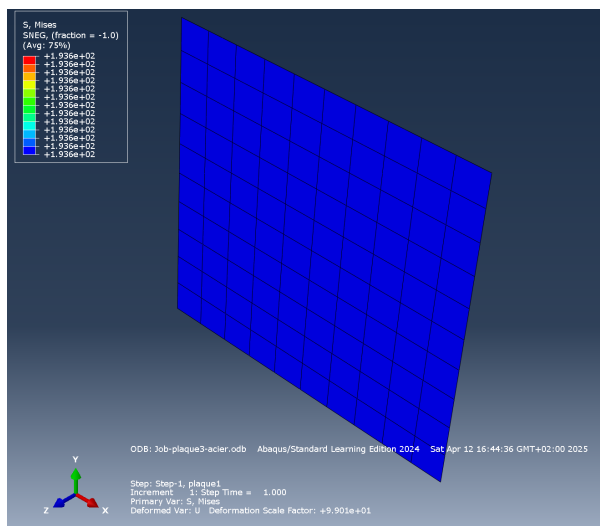


FIGURE 19 – Plaque en acier carrée (Killian)

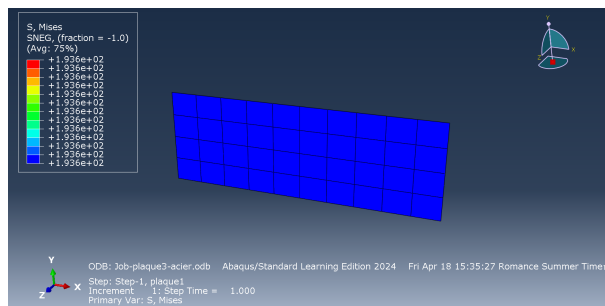


FIGURE 20 – Plaque en acier rectangle (William)

Contrainte de Von-Mises σ_e	R_e	Critère
194 Mpa	400 Mpa	$194 < 400$

TABLE 11 – Evalutation de la résistance de la plaque 3 en acier

La plaque en acier est donc surdimensionnée pour résister au chargement appliqué.

4.4 Comparaison avec les résultats des autre modèles

Nous constatons que dans cette situation (géométrie et chargement de la plaque), la plaque en acier offre de meilleures performances pour une même épaisseur que la

plaque en composite. Cependant, il est important de noter que les plaques en composites sont généralement plus légères et peuvent offrir d'autres avantages en termes de résistance à la corrosion et de fatigue.

4.5 Critique des modèles de calculs

Les résultats obtenus sur les optimisations des paramètres du matériaux pour les plaques 1 et 2, ont été obtenus avec un programme python se basant sur le fonctionnement de la feuille de calcul. Ce programme que nous avons développé nous permet de calculer l'ensemble des critères de Tsai-Hill pour chaque combinaison de paramètres possibles. Or tester toutes les combinaison est demandant en ressource de calcul. En effet, si on considère 10 valeurs d'angle ainsi que 10 valeurs d'épaisseur, on obtient déjà plus de 100 millions de possibilités. Il a donc fallu réduire les champs possibles, ce qui fait que l'on a une précision d'environ 5° pour les angles, et de 0.5mm pour l'épaisseur de la solution optimale. Une solution à ce problème aurait pu être l'utilisation de la méthode du simplex ou du plan d'expérience.

5 Conclusion

Dans ce rapport, nous avons étudié trois configurations de plaques soumises à un chargement mécanique : une plaque asymétrique en composite, une plaque symétrique en composite, et une plaque en acier. Pour chaque configuration, nous avons défini les hypothèses nécessaires, mis en place un modèle numérique sous Abaqus, et comparé les résultats obtenus avec ceux calculés à l'aide d'une feuille de calcul composite.

Pour la plaque asymétrique, nous avons constaté que le critère de Tsai-Hill était dépassé, indiquant une défaillance sous le chargement appliqué. Une optimisation a été réalisée en augmentant l'épaisseur des couches, mais cela a conduit à une épaisseur totale importante, ce qui peut être un inconvénient en termes de poids et d'encombrement. Une optimisation supplémentaire basée sur l'orientation des plis a été effectuée, permettant de réduire l'épaisseur totale, tout en respectant le critère de rupture. Cela souligne l'importance de l'orientation des plis dans la conception des structures composites.

La plaque symétrique a également montré des dépassements du critère de Tsai-Hill pour certaines couches. Bien que la symétrie améliore les performances globales, des ajustements d'épaisseur ou d'orientation des plis sont nécessaires pour répondre aux exigences de résistance. On constate tout de même que la plaque symétrique se déforme moins que la plaque asymétrique, ce qui est un avantage pour la conception. Enfin, la plaque en acier a démontré une résistance suffisante au chargement appliqué, avec une contrainte de Von Mises bien inférieure à la limite élastique. Cependant, l'acier présente d'autres inconvénients, comme une masse volumique plus élevée ($\rho_{\text{acier}} \approx 4 \cdot \rho_{\text{composite}}$) et une susceptibilité à la corrosion, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines applications.

En conclusion, le choix du matériau pour la conception de structures dépend fortement des contraintes spécifiques de l'application. Les composites offrent des avantages

en termes de légèreté et de personnalisation des propriétés mécaniques, mais nécessitent une optimisation rigoureuse pour répondre aux critères de résistance. L'acier, bien que plus lourd, reste une solution robuste et fiable pour des applications où le poids n'est pas une contrainte majeure. Une analyse multicritère intégrant les performances mécaniques, le poids, le coût et la durabilité est essentielle pour faire un choix éclairé.