

CHAPITRE 5

MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS DES COMPOSITES HYBRIDES

Le chapitre précédent conclut que les matériaux utilisés ne sont pas tout à fait adaptés à notre application. Un modèle d'éléments finis sera construit, validé et utilisé pour appuyer cette constatation. En se basant sur les résultats déjà obtenus, ce modèle permettra de bien représenter le potentiel d'intégration des AMF dans les composites suite à la validation du programme. Ce chapitre explique en détail l'élaboration, l'utilisation et l'interprétation des résultats du modèle d'éléments finis.

5.1 Définition des éléments, constantes réelles et matériaux utilisés dans le logiciel *Ansys*

Ansys offre plusieurs types d'éléments qui peuvent définir les composites multiplis. Dû à la géométrie simple du modèle et à l'hypothèse d'une réponse linéaire, l'élément structural linéaire *shell99* a été sélectionné. Acceptant jusqu'à 250 couches différentes, cet élément de type coque comporte 8 nœuds qui permettent 6 degrés de liberté chacun, 3 en translations et 3 en rotation. Ce type d'élément a été préféré au type *solid46* qui requiert moins de temps de calcul, mais permet uniquement de la translation. Ce choix tient compte du désir futur d'appliquer des chargements complexes en flexion par exemple.

Une fois le type d'élément choisi, il faut lui donner toutes les caractéristiques nécessaires pour représenter le comportement du matériau modélisé. Dans *Ansys*, cette opération est réalisée en utilisant les constantes réelles. Pour le *shell99*, les constantes réelles contiennent les propriétés des matériaux, le nombre de couches, leur orientation et leur épaisseur. L'orientation du pli est définie par la direction axiale des fibres de carbone par rapport au système de coordonnées global du modèle. Enfin, il peut avoir autant de constantes réelles que nécessaire pour représenter la plaque.

L'élément uniaxial *link1* modélise les fils d'AMF. Cet élément à deux dimensions est composé de deux nœuds qui permettent deux translations. Il est possible de faire de la tension ou de la compression. Les entrées, conservées par les constantes réelles, sont la rigidité du matériau et l'aire de la section du fil. Pour imposer la contrainte de compression initiale ou représenter l'activation des fils, il suffit d'entrer la valeur de la déformation correspondant à la bonne contrainte. Ce calcul est déduit de la loi de Hooke ($\sigma/E = \varepsilon$). Cette méthode simplifie la modélisation du comportement complexe des AMF. L'hypothèse simplificatrice implique que l'AMF est représenté seulement lorsqu'il est activé ou non. La transition entre ces deux états n'est pas considérée. Donc, la contrainte est appliquée avant de débiter la simulation. Par la suite, les fils se comportent de façon linéaire élastique jusqu'à leur rupture. Ils sont ajoutés au centre de la plaque de composite et ne modifient pas la géométrie de celle-ci. La solution retenue pour bien modéliser l'adhérence fil / composite consiste à attribuer les mêmes numéros de nœuds aux fils et au composite. Par exemple, le nœud 125 appartient à l'élément de type *link1* qui représente le fil et à l'élément de type *shell99* qui représente le composite. De cette façon, les déplacements des deux matériaux sont identiques, donc, aucun décollement n'est possible.

5.2 Description physique du modèle utilisé

Le but consiste à modéliser, à l'aide du logiciel *Ansys*, l'éprouvette de composite identique à celle utilisée dans les tests de traction du chapitre 4. Les dimensions hors tout de la plaque de référence sont de 95 mm de longueur par 35,84 mm de largeur et une épaisseur de 2,56 mm. L'empilement angulaire des 8 plis respecte la séquence [45,90,-45,0]_s. Chaque pli mesure 0,32 mm (2,56 mm/8) d'épaisseur. La proportion volumique de fibre V_f est de 60 %.

Les composantes de bases du composite ont été caractérisées individuellement afin de représenter le plus fidèlement possible son comportement. À l'aide de la machine de traction *Enduratec*, la valeur de rigidité des constituants est présentée au tableau XI.

Tableau XI

Rigidité expérimentale des composantes du stratifié

Rigidité	(GPa)
Matrice (E_m)	1,83
Fibre de carbone dir. 1 (E_{f1})	95,05

L'estimation de la rigidité des fibres de carbone dans la direction 2 (E_{f2}) se fait en appliquant un rapport de référence (R). À l'aide des propriétés mécaniques tabulées [3], un rapport de référence E_{f1}/E_{f2} pour les fibres de carbone T300 est calculé comme suit:

$$R = E_{f1}/E_{f2} = 16 \quad (4.1)$$

Selon l'hypothèse que les fibres carbone utilisées se comportent mécaniquement de la même façon que la fibre de carbone T300, on trouve que:

$$E_{f2} = E_{f1}/R = 95,05/16 = 5,94 \text{ GPa} \quad (4.2)$$

Ensuite, les valeurs manquantes ou non recueillies par les essais expérimentaux ont été trouvées dans la littérature [3] et elles sont résumées au tableau XII.

Tableau XII

Coefficient de Poisson de la matrice et de la fibre de carbone [3]

Coefficient de Poisson	Matrice (ν_m)	0,43
	Fibre (ν_f)	0,2

Puisque la matrice présente un comportement isotrope, la rigidité en cisaillement (G_m) se trouve de la façon suivante:

$$G_m = \frac{E_m}{2*(1+\nu_m)} = \frac{1,829}{2*(1+0,43)} = 0,64 \text{ GPa} \quad (4.3)$$

De la même manière, *Berthelot* [5] propose de calculer la rigidité en cisaillement de la fibre (G_f) comme:

$$G_f = \frac{E_f}{2*(1+\nu_f)} = \frac{95,05}{2*(1+0,2)} = 39,6 \text{ GPa} \quad (4.4)$$

Une fois les propriétés mécaniques des constituants du composite déterminées, le calcul des propriétés mécaniques d'un pli peut alors être effectué. La rigidité dans la direction des fibres (E_1) est déterminée par une loi des mélanges comme suit:

$$E_1 = E_f * V_f + E_m * (1 - V_f) = 95,05 * 0,6 + 1,829 * (1 - 0,6) = 57,8 \text{ GPa} \quad (4.5)$$

La rigidité dans la direction perpendiculaire aux fibres (E_2) se calcule par une équation développée par *Hopkins-Chamis* [3] telle que:

$$E_2 = E_m * \left[\left(1 - \sqrt{V_f}\right) + \frac{\sqrt{V_f}}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{f2}}\right)} \right] \quad (4.6)$$

$$E_2 = 1,829 * \left[\left(1 - \sqrt{0,6}\right) + \frac{\sqrt{0,6}}{1 - \sqrt{0,6} \left(1 - \frac{1,829}{5,94}\right)} \right] = 3,5 \text{ GPa}$$

La valeur de la rigidité dans la direction 3 (E_3) est considérée identique à la rigidité de la direction 2 (E_2). Cette hypothèse est respectée et utilisée par plusieurs auteurs. Développée par *R. Hill* et *Z. Hashin* [5], l'équation 4.7 permet de calculer le module de cisaillement du composite:

$$G_{12} = G_m * \frac{G_f * (1 + V_f) + G_m (1 - V_f)}{G_f * (1 - V_f) + G_m (1 + V_f)} \quad (4.7)$$

$$G_{12} = 0,64 * \frac{39,604 * (1 + 0,6) + 0,64(1 - 0,6)}{39,604 * (1 - 0,6) + 0,64(1 + 0,6)} = 2,4 \text{ GPa}$$

Ensuite, le coefficient de Poisson se détermine par une loi des mélanges:

$$\nu_{12} = \nu_f * V_f + \nu_m * (1 - V_f) = 0,43 * 0,6 + 0,2 * (1 - 0,6) = 0,3 \quad (4.8)$$

En résumé, le tableau XIII fournit les propriétés mécaniques utilisées dans le modèle d'éléments finis.

Tableau XIII

Propriétés mécaniques d'un pli de composite

E_1	$E_2 = E_3$	G12	ν_{12}
GPa	GPa	GPa	
57,8	3,5	2,4	0,3

Les propriétés mécaniques des fils AMF utilisés ont été prises à partir des tests de traction et de génération de contrainte effectués au chapitre 4. L'élément *link1* représentant les AMF nécessite une rigidité et une déformation de départ. Pour représenter le comportement mécanique du fil AMF, un résumé des valeurs utilisées dans le modèle d'éléments finis est présenté au tableau XIV.

Tableau XIV

Propriétés mécaniques des fils AMF

E	ν	σ_u	contrainte de compression initiale du fil	
			non activé	activé
GPa		MPa	MPa	MPa
10	0,3	1000	100	470

La contrainte ultime est nécessaire pour déterminer la limite ou le bris du fil à l'intérieur du programme.

5.3 Maillage et conditions aux frontières

Les conditions aux frontières sont appliquées sur le modèle pour simuler la plaque en tension. Tout d'abord, pour diminuer le temps de calcul, seulement un quart de plaque est représenté (figure 51). L'axe vertical et l'axe horizontal qui coupent le trou sont considérés comme étant des plans de symétrie. De plus, le composite est symétrique à travers l'épaisseur, alors seulement quatre des huit plis sont modélisés. Pour l'élément *shell99*, la symétrie est spécifiée à travers les constantes réelles. La figure 51 représente donc, les conditions aux frontières, l'orientation des plis et la direction de déplacement de la plaque.

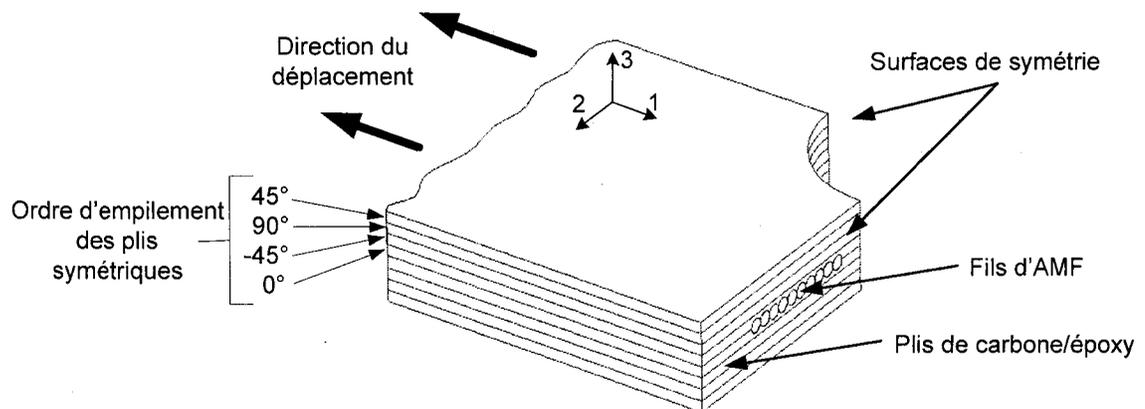


Figure 51 Conditions frontière du modèle éléments finis

Un des nœuds de la plaque doit être bloqué dans la direction z (direction 3 à la figure 51) pour éviter la divergence de la solution. Finalement, les nœuds de l'extrémité de la plaque sont bloqués en "y" (direction 1 à la figure 51) pour simuler un ancrage rigide. Le contrôle du chargement de la plaque s'effectue par la variation du déplacement. En appliquant un déplacement sur l'extrémité de la plaque, la contrainte interne augmente.

Un maillage permet de diviser une surface ou un volume en plusieurs éléments. Pour bien évaluer l'efficacité d'un maillage, l'étude de convergence de la solution en fonction du raffinement du maillage devient essentielle. Deux modèles sont à l'étude, celui avec un concentrateur de contrainte et l'autre avec un concentrateur de contrainte et les fils AMF. La figure 52 résume les résultats pour la contrainte de rupture en fonction du nombre d'élément du maillage.

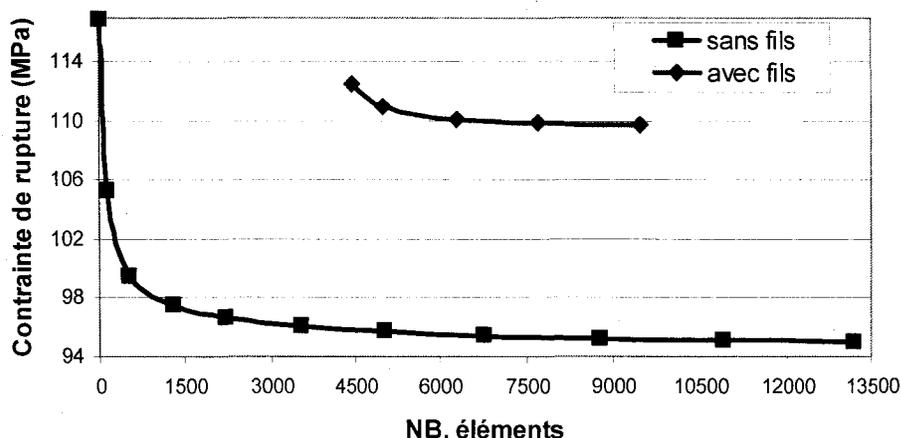


Figure 52 Convergence du maillage

Le choix du nombre d'éléments utilisés dans les prochaines simulations repose sur un compromis entre le temps requis pour compléter les calculs et la précision des résultats. Un maillage raffiné proche du trou permet d'obtenir une solution plus juste tandis qu'un maillage plus grossier permet d'optimiser le temps de calcul. La plaque sans fil comprend 4200 éléments répartis non uniformément (figure 53).

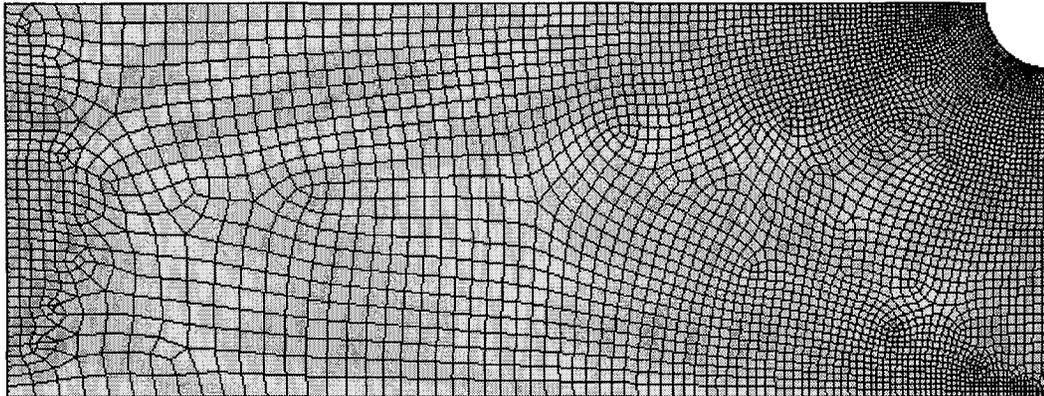


Figure 53 Maillage de la plaque sans fil

Le deuxième modèle nécessite plus d'éléments que le précédent. Pour obtenir une même précision dans la réponse, en plus du composite, les fils doivent aussi être maillés finement. Enfin, avec un peu plus de 6500 éléments répartis non uniformément (figure 54), le maillage permet une résolution relativement rapide sans compromettre la précision des résultats.

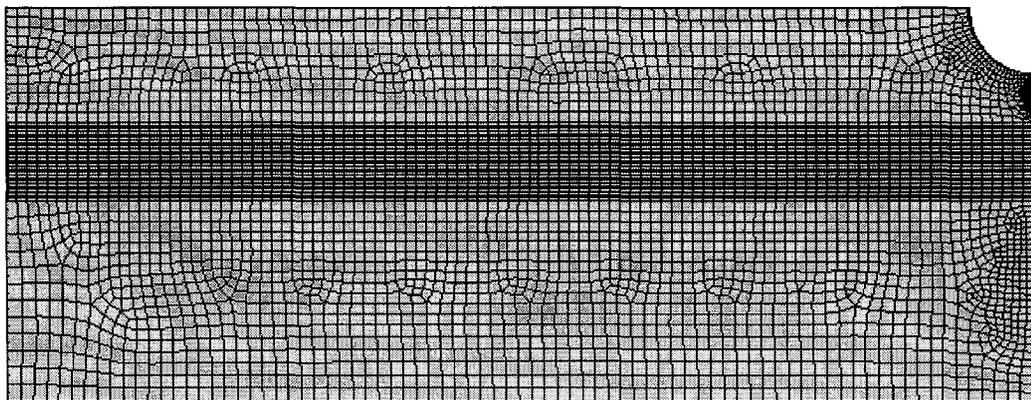


Figure 54 Maillage de la plaque avec fils

5.4 Simulation des dommages

La façon simplifiée de simuler un dommage dans un composite consiste à changer le module de rigidité et de cisaillement par une valeur proche de zéro. Suite à ce changement, cette région ne contribue plus à la résistance mécanique de la pièce. En

fonction du pli brisé, les propriétés mécaniques sont modifiées comme l'indique le tableau XV.

Tableau XV

Propriétés mécaniques des plis brisés

Angle pli brisé (degré)	E_1 GPa	E_2 GPa	E_3 GPa	G_{12} GPa	ν_{12}
90	57,8	1	3,5	1 e-5	0
45	1	1	3,5	1 e-5	0
0	1	3,5	3,5	1 e-5	0

Lorsque la charge augmente dans le matériau, les éléments vont briser selon une limite établie par un critère de rupture. *Ansys* propose trois critères de rupture pour les composites dans sa version 8.0 : le critère de la déformation maximale, la contrainte maximale et un critère énergétique de Tsai-Wu. Le choix s'est arrêté sur le troisième puisque c'est le plus conservateur. Ce critère prend en compte les contraintes normales et de cisaillements du matériau. Tout comme le critère de Tsai-Hill présenté au chapitre 1 (équation 1.7), il faut spécifier les limites de rupture d'un pli de composite. Les valeurs des contraintes de rupture ont tout d'abord été prises dans la littérature [5] pour un composite de carbone / époxy. Par la suite, ces valeurs sont adaptées, tout en gardant le même rapport entre eux, pour s'ajuster aux résultats expérimentaux sur la même plaque trouée. De cette façon, ces paramètres reflètent le comportement réel du matériau. Voici présentées au tableau XVI les valeurs nécessaires au critère de rupture pour déterminer le bris de la plaque. Cette étape consiste à la calibration du modèle éléments finis. Elle est faite uniquement pour le cas de la plaque avec un concentrateur de contrainte et sans fils AMF.

Tableau XVI

Contrainte ultime du pli de composite utilisé dans le critère de rupture

S_L^+	S_T^+	S_Z^+	S_{LT}
MPa	MPa	MPa	MPa
4800	120,75	120,75	155,25

5.5 Hypothèses simplificatrices du modèle

Certains facteurs sont négligés et des hypothèses sont formulées afin de rendre les modèles moins complexes. C'est le cas en particulier pour la délamination. Avec la programmation actuelle, les seuls défauts représentés sont la fissuration ou le bris de la matrice et la rupture des fibres. Bien que la délamination ne soit pas directement prise en compte à travers le critère de rupture, l'ajustement de la limite de rupture du composite par rapport au test de traction implique que la délamination est indirectement considérée dans l'analyse.

La présence de défauts tels que les vides, les microfissures, les zones riches en résines et le mauvais collage des plis sont parmi les facteurs qui déterminent la résistance ultime du composite. Bien entendu, l'analyse par éléments finis de ce travail ne vise pas la simulation de ces détails, mais plutôt le comportement global du matériau. Voici donc pourquoi le test de traction avec concentrateur de contrainte et sans fil AMF est la référence pour les tests comparatifs.

Une hypothèse simplificatrice est liée à l'intégration des fils AMF dans le composite. Ils sont considérés comme parfaitement liés au composite sans jamais subir de décollements. Cette approche peut être valable si l'influence des décollements et des redistributions de contrainte à travers les fils sont négligeables. De plus, une estimation grossière est faite sur le comportement en traction de l'AMF. Pour des résultats plus précis, qui ne sont pas nécessaires à ce stade-ci, une programmation complète du comportement de l'AMF peut alors être implémentée dans le présent programme.

La troisième analyse implique le chauffage des fils AMF dans le but de les activer pour qu'ils produisent une contrainte de compression. Par le fait même, le composite chauffe lui aussi. Comme il a été mentionné dans le chapitre 4, la résine utilisée présente une température de ramollissement assez basse qui amène de grandes modifications sur le comportement mécanique du composite hybride. La modélisation d'un matériau anisotrope qui présente de la plastification et une baisse de rigidité en fonction du gradient de température devient un défi de taille. Les effets thermiques ne font donc pas partie du programme de la plaque activée par les fils AMF à ce stade du travail.

5.6 Description du programme et précision sur la technique de simulation des dommages

La façon de procéder pour expliquer les programmes *Ansys*, (annexe 1 et 2), consiste à exposer l'algorithme des boucles. Pour bien comprendre la méthodologie utilisée, la figure 55 schématise les étapes importantes de l'interaction des différentes boucles nécessaires à la simulation complète de la détérioration d'une plaque de composite.

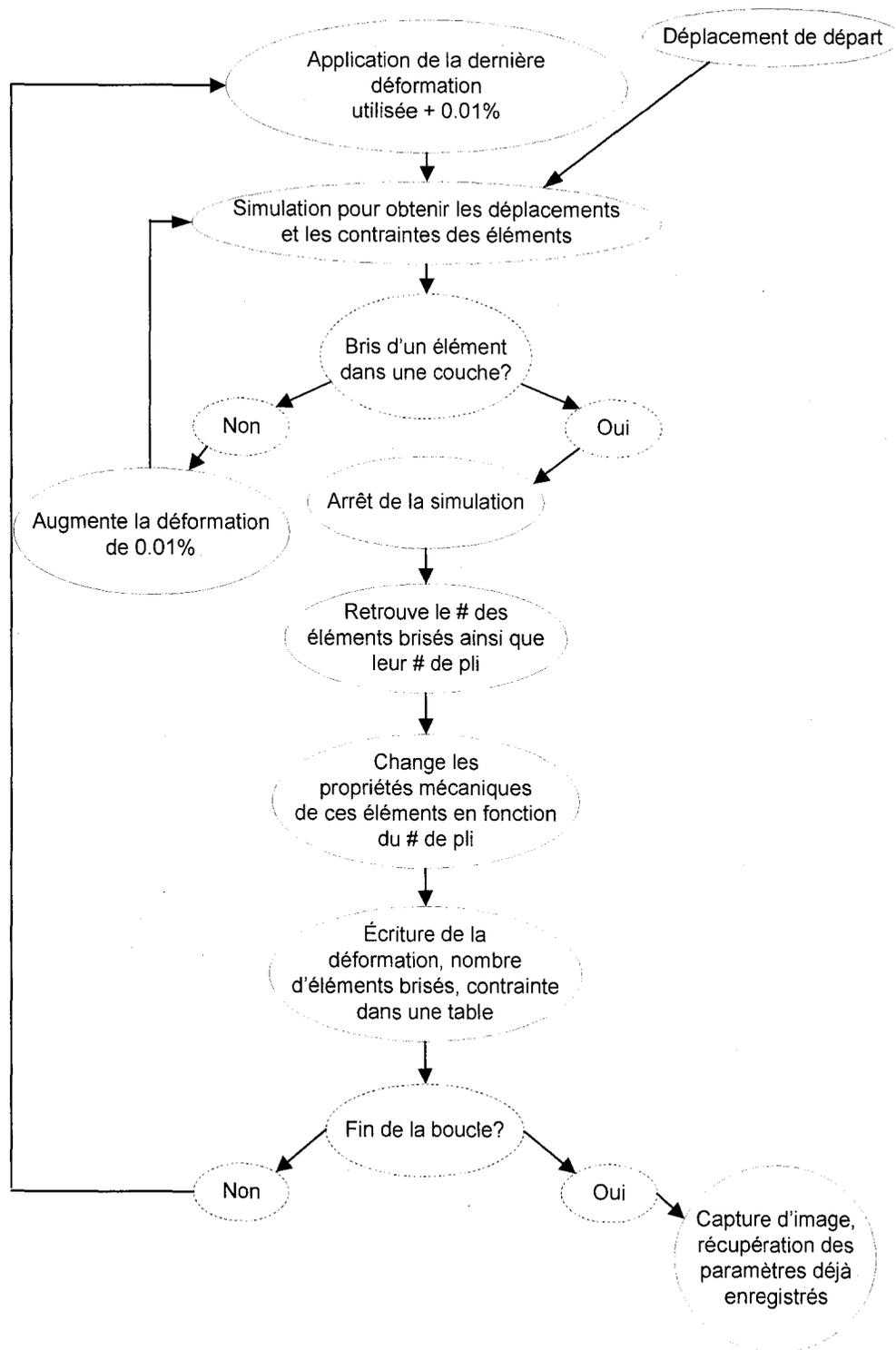


Figure 55 Boucles du programme de simulation des défauts d'une plaque de composite

Une fois que la géométrie, les propriétés des matériaux, les constantes réelles, les limites de rupture et les paramètres du maillage sont établis, la simulation peut débuter. Le processus de détérioration est modélisé par itération des solutions. L'utilisation des boucles *do* et *if* sont la façon d'automatiser cette démarche. Un déplacement de départ est donné, générant ainsi des contraintes dans le matériau. Les contraintes obtenues dans toutes les directions, pour tous les éléments et à travers tous les plis, sont vérifiées par le critère de rupture. S'il n'y a aucune rupture, une boucle réalise l'incrément du déplacement jusqu'à ce qu'une rupture d'au moins un élément se produise. Lorsque les éléments atteignent la limite du critère de rupture (≥ 1), il faut retrouver ces éléments ainsi que le numéro du pli brisé. Ces recherches s'effectuent automatiquement en parcourant les tables des résultats (*elements tables*) qui donnent la valeur du critère de rupture maximal ainsi que le numéro du pli, et ce, pour chaque élément. Une fois trouvées, les propriétés mécaniques des différents éléments brisés en fonction de l'orientation du pli sont changées pour les valeurs inscrites dans le tableau XV. Cette technique a déjà été utilisée avec succès par différents auteurs [48].

Finalement, un code de couleur est attribué pour visualiser, à chaque fin de simulation, le nombre de plis brisés de chaque élément. Le remplacement des propriétés mécaniques se fait par le biais des constantes réelles. Il faut expliquer qu'un élément du maillage contient les informations des huit plis du stratifié. La difficulté vient lorsqu'il faut changer les propriétés mécaniques d'un élément en particulier et ce, au bon pli, sans rien changer dans d'autres éléments. La façon de contourner ce problème consiste à assigner un numéro de constante réelle à l'aide d'une autre boucle *do* à chaque élément du maillage. Ensuite, en choisissant la constante réelle associée au bon élément du maillage, il est alors facile de changer les propriétés mécaniques du pli brisé. Après, les informations utiles à l'analyse telles que la déformation, le nombre d'éléments brisés et la contrainte sont écrites dans une table des résultats. Ce processus de simulation est ensuite répété le nombre de fois souhaité en augmentant d'un incrément de 0,01 %. Une fois cette boucle terminée, une capture d'image est prise pour suivre l'évolution visuelle de la propagation des défauts et, enfin, la sauvegarde des paramètres emmagasinés dans la table des résultats est réalisée. Les

boucles ne doivent pas être trop grandes, environ 10 fois, pour enregistrer de bonnes images des détériorations puisqu'il n'y a pas de moyen d'automatiser cette procédure.

L'arrêt final des simulations se fait lorsque la pièce est mécaniquement brisée. Deux façons permettent de déterminer cette fin. Premièrement, lorsque la valeur de la contrainte chute près d'une valeur nulle et que la plaque continue à se déformer. Cela veut dire qu'une section complète de la plaque a été brisée et a été transformée en rigidité nulle. La deuxième façon représente ce phénomène mais de façon visuelle, lorsque les éléments complètement brisés traversent la largeur de la pièce.

Deux programmes nécessaires à la simulation des défauts de la plaque de composite avec fil se trouvent à l'annexe 1 et à l'annexe 2. Le premier programme sert à attribuer les propriétés de base, spécifier la géométrie et les conditions aux frontières du modèle et effectuer une ou quelques simulations jusqu'au premier bris. Le deuxième sert à gérer les boucles et il est utilisé tout juste après le premier. Ces programmes fonctionnent selon la description effectuée précédemment, mis à part l'ajout d'une autre boucle gérant le bris des fils. De la même façon, une fois que la contrainte des fils atteint 1000 MPa, la rigidité devient quasi nulle pour simuler le bris du fil.

5.7 Traitement des résultats

Les résultats après chaque simulation donnent la déformation, le nombre d'éléments brisés et la contrainte. La déformation est trouvée en divisant le déplacement de l'extrémité de la plaque par la demi-longueur de celle-ci. La contrainte est calculée en divisant la force de réaction de l'extrémité de la plaque par la section du composite sans se soucier du trou. La façon de tracer la courbe contrainte - déformation ne se résume pas à utiliser seulement les résultats d'Ansys. Le tableau XVII présente un exemple des cinq premiers résultats de simulation obtenus et la façon de trouver les vraies contraintes représentant le test de traction. Le traitement de ces données, faites à l'aide du logiciel *Excel*, est basé sur la théorie classique des stratifiés [5]. Un exemple de calcul classique est présenté à l'annexe 3.

Tableau XVII

Exemple du traitement des résultats pour tracer la courbe contrainte - déformation

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
# du test	déformation	nb bris elem.	contrainte	pente	delta deform	accumulation	% acc	ajout contrainte	Contrainte
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,0120	6	264,33	22027,50	0,0120	6	0,26	264,33	264,33
2	0,0123	1	270,93	22026,83	0,0003	7	0,31	6,61	270,94
3	0,0126	4	277,54	22026,98	0,0003	11	0,48	6,61	277,55
4	0,0127	1	279,74	22026,77	0,0001	12	0,53	2,20	279,75
5	0,0128	1	281,94	22026,56	0,0001	13	0,57	2,20	281,95

Les colonnes B,C et D sont les résultats provenant de la simulation par éléments finis. La pente (E) est calculée en divisant la contrainte (D) par la déformation (B). Le delta déformation (F) s'obtient par la soustraction de la déformation (B) par la déformation (B) du test précédent. L'ajout de contrainte (I) se calcule par la multiplication de la pente (E) par le delta déformation (F). Finalement, on obtient la vraie contrainte (J) en additionnant l'ajout de contrainte (I) à la vraie contrainte (J) du test précédent. Il est maintenant possible de tracer la courbe contrainte - déformation en se servant des résultats des colonnes (B) et (J). Dans les tous premiers tests, la différence entre la vraie contrainte (J) et la contrainte obtenue d'Ansys (D) n'est pas significative. Cependant lorsqu'il y a un grand nombre d'éléments qui brisent, cette différence augmente beaucoup (voir exemple de calcul à l'annexe 3).

Toujours en se basant sur l'exemple du tableauXVII, la colonne d'accumulation (G) additionne les bris d'éléments (C) des tests subséquents. Ensuite, la colonne G est traduite en pourcentage d'accumulation (H) variant de 0 à 100%. En traçant le pourcentage d'accumulation (H) en fonction de la déformation (B), on obtient la courbe niveau de dommage en fonction des déformations. L'approche pour trouver la contrainte de détérioration (σ_d) et la déformation de détérioration (ε_d) est maintenant la même que la technique utilisée pour interpréter les résultats d'émission acoustique (technique du 80 et 20 %). Le prochain chapitre donne donc les résultats obtenus par les programmes éléments finis.