

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية  
فرنسيس جانسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics  
National School of Built and Ground Works Engineering  
Francis Jeanson

## Mémoire

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat

Filière : Travaux Publics

Option : Routes et Ouvrages

## Thème

ETUDE DE FAISABILITE D'UN PLANCHER  
INNOVANT POUR BALCON

Présenté par :

**KAHLOUCHE Ramdane**










Encadré par :

**Pr. TAHLAITI Mahfoud  
Dr. FEDGHOUCHE Ferhat**

Promotion 2017 /2018

# Remerciement

*Un très grand merci à:*

-  *Notre promoteur en France M<sup>r</sup> TAHLAITI Mahfoud, pour m'avoir encadré et orienté tout au long de ce travail et aussi notre promoteur en Algérie M<sup>r</sup> FEDGHOUCHE Ferhat.*
-  *Je tiens à remercier M<sup>r</sup> REMKI pour ses efforts déployés pour réussir ce stage.*
-  *Nous remercions chaleureusement M<sup>me</sup>. la directrice MEKIDECHE, notre chef département M<sup>r</sup> LEFKIR et nos enseignants M<sup>r</sup>. TOUNSI, M<sup>r</sup>. HADID et M<sup>r</sup> BOUTEMEUR.*
-  *Je tiens a remercié M<sup>me</sup>. Christelle et le doctorant Remy pour leurs conseils et aides.*
-  *Nous adressons nos remerciements chaleureusement à tous les professeurs qui nous ont enseignés au cours des études primaires jusqu'aux années du cursus universitaire pour l'obtention du diplôme.*
-  *Toute personne ayant contribué de près ou de loin pour réussir cette bourse.*
-  *Et bien sûr, merci à tous les travailleurs de l'ENSTP et de l'Icam.*
-  *En fin, no vifs remerciements aux membres de jury et à son président avec qui nous allons soutenir ce mémoire et juger de sa qualité.*
-  *Et pour finir, un dernier remerciement à toute la promotion 2017-2018 de l'Ecole (ENSTP), tout en leurs souhaitons un avenir plein de réussite.*

## *Dédicace.*

*Je dédie ce modeste travail à:*

- 🌸 Mes très chères parents qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'**Allah** me les garde durant toute ma vie.*
- 🌸 Ma mère qui a toujours cru en moi et mes études.*
- 🌸 Ma mère qui a toujours cru en moi et mes études.*
- 🌸 Mon père et mon oncle maternelle qui m'ont toujours encouragé et guidé*
- 🌸 Mes grands mère et grands-pères.*
- 🌸 A mes oncles et mes tantes.*
- 🌸 A mes frères.*
- 🌸 A mes très chers cousins.*
- 🌸 A toute ma famille grands(es) et petits(es).*
  
- 🌸 A mes amies.*
- 🌸 A mes amis de l'université.*
- 🌸 A tous ma promotion de Travaux Publics **2017/2018**.*
  
- 🌸 A Tous ceux qui me connaissent.*

## ملخص

في إطار المنح الدراسية للتميز في الشبكة المختلطة للدراسة لبرنامج التعاون الجزائري - الفرنسي ، قمت با نجاز مشروع نهاية دراستي بنونت في فرنسا بالمعهد الكاثوليكي للفنون والأعمال، وركزت على دراسة الجدوى من أرضية مبتكرة من هيكل معدني ومواد مركبة للشرفات مبنى سكني ، حيث يتم إنجاز الأرضية من مواد مركبة مصنوعة بطريقة Pultrusion والهيكل الحامل من الفولاذ.

أولاً ، يتم وضع الأبعاد المسبق للهيكل (الأرضية والأنبوب المعدني) ومن أجل التحسين نستعمل برنامج Patran ، وقبل ذلك كان من الضروري تحديد خصائص المواد المركبة من خلال قانون الخلط والقوانين التي وضعت من قبل الباحثين التي تعطي نتائج أقرب إلى الواقع.

يمثل التصميم و النمذجة جزءاً مهماً من الدراسة بحيث تستند على قياس حد الازاحة في أرضية المادة المركبة في المرحلة الأولى وبعد فحص الإجهاد في المادة المركبة وفقاً لمعايير الكسر.

**الكلمات المفتاحية:** شرفة ، ألياف ، الفولاذ ، الازاحة ، إجهاد ، تشوه.

## Résumé

Dans le cadre des bourses d'excellences du Réseau Mixte d'Etude (RME) pour le programme de la coopération algéro-française , j'ai effectué mon projet de fin d'études à l'Icam de Nantes en France, porté sur l'étude de faisabilité d'un plancher innovant en structure mixte métallique et composite pour des balcons rapportés d'un bâtiment d'habitation, le plancher étant en matériau composite réalisé par pultrusion et les profilés sont en acier.

En premier temps un prédimensionnement de la structure (plancher et tube métallique) a été effectué afin de le dimensionner et de l'optimiser par logiciel Patran, et avant cela, il était nécessaire de déterminer les caractéristiques du matériau composite par la loi de mélange et par des formules élaborées par des chercheurs qui donnent des résultats plus proches de la réalité.

La modélisation représente une partie importante de l'étude et le dimensionnement repose sur la limite de la flèche dans le plancher en matériau composite en premier temps et après sur la vérification des contraintes dans le matériau composite par les critères de rupture.

**Mots clés :** Balcon, fibre, résine, acier, flèche, contrainte, déformation.

## Abstract

Within the framework of the scholarship of excellence of Mixed Network of Study for the program of the Algerian-French cooperation, I carried out my end-of-studies project with Icam of Nantes in France, focused on the study of the feasibility of an innovative floor produced by a mixed structure of composite and metal for balconies reported from a residential building, the floor being made by composite material by pultrusion process and the profiles are made by steel.

Firstly, a pre-dimensioning of the structure (floor and metal tube) was carried out in order to re-size and optimize it with Patran software, and before that it was necessary to determine the characteristics of the composite material by the mixing law and formulas developed by researchers that gave us results closer to the reality.

Modeling represents an important part of the study and the dimensioning is based on the limit of the deflection in the composite material floor at the first stage and then in the stress check in the composite material by the rupture criteria.

**Key words:** balcony, fiber, resin, steel, arrow, stress, deformation.

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE

Figure I.1. Schéma illustratif d'un matériau composite .....	2
Figure I.2. Défiantes familles de matrices.....	3
FIGURE I.3. Structure cristalline du graphite.....	9
FIGURE I.4. Élaboration des fibres de carbone .....	10
FIGURE I.5. La phase d'oxydation .....	10
FIGURE I.6. La phase de carbonisation .....	10
FIGURE I.7. Schéma de principe du procédé d'étirage mécanique ou silionne .....	12
FIGURE I.8. Couche de mats.....	13
FIGURE I.9. Chaîne et trame d'un tissu.....	14
FIGURE I.10. Les principaux types d'armures des tissus. ....	14
FIGURE I.11. Tissage unidirectionnel .....	14
FIGURE I.12. Tissage Tricot. ....	15
FIGURE I.13. Tissages 3D et 4D. ....	15
FIGURE I.14. Principe du moulage au contact .....	16
FIGURE I.15. Principe du moulage par projection simultanée.....	16
FIGURE I.16. Moulage en continu de plaques .....	17
FIGURE I.17. Moulage en continu de panneaux ondulés.....	17
FIGURE I.18. Moulage par pultrusion. ....	18
FIGURE I.19. Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel. ....	18
FIGURE I.20. Principe du moulage de l'enroulement hélicoïdal.....	18
FIGURE I.21. Principe du moulage par RTM.....	19
FIGURE I.22. Principe du moulage sous vide .....	19
FIGURE I.23. Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné .....	20
FIGURE I.24. Constitution d'un stratifié. ....	21
FIGURE I.25. Désignation d'un stratifié. ....	21
FIGURE I.26 : Une structure en sandwich et ses constituants. ....	22
FIGURE I.27. Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion (rigidité et résistance) et des masses de trois structures : une plaque et deux sandwiches .....	22
FIGURE I.28. Homogénéisation d'un matériau hétérogène. ....	23
FIGURE I.29. Composite unidirectionnel.....	24
FIGURE I.30. Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre .....	25
FIGURE I.31. Rupture transverse de la matrice.....	25
FIGURE I.32. Rupture longitudinale de la matrice .....	26
FIGURE I.33. Décohésion fibre-matrice. ....	26

FIGURE I.34. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ .....	27
FIGURE I.35. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$ .....	27
FIGURE I.36. Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice.....	28
FIGURE I.37. Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice. ....	28
FIGURE I.38. Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice .....	29
FIGURE I.39. Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse.....	29
FIGURE I.40. Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés.....	30
FIGURE I.41. Rupture en présence d'un trou d'un composite $[0^\circ/90^\circ]_2S$ .....	30
FIGURE I.42. Rupture d'un composite $[\pm 45^\circ]_2S$ à fibres de carbone.....	31
FIGURE I.43. Fissuration d'un stratifié $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$ .....	31
FIGURE I.44. Comportements fragile et "ductile" d'un matériau.....	32

## CHAPITRE II. PRESENTATION DE PROJET

FIGURE II.1. Balcon en porte à faux .....	35
FIGURE II.2. Déperdition des ponts thermique et leur isolation pour les balcons en porte à faux. ....	35
FIGURE II.3. Forme de la plaque. ....	36
FIGURE II.4. Notations d'une plaque sandwich. ....	37
FIGURE II.5. Garde-corps à barreaudage vertical en acier. ....	40
FIGURE II.6. Pression de vent sur les balcons. a) vent de face, b) vent de côté. ....	42
FIGURE II.7. Conception vis-à-vis de la dilatation .....	43
FIGURE II.8. La règle (C+D). ....	47

## CHAPITRE III. MODILISATION

FIGURE III.1. Dessin de la plaque.....	49
FIGURE III.2. Maillage .....	49
FIGURE III.3. Introduire les caractéristiques de matériau composite. ....	50
FIGURE III.4. Création des appuis. ....	50
FIGURE III.5. Application des charges. ....	51
FIGURE III.6. Les résultats. ....	51
FIGURE III.7. Maillage de tube. ....	54
FIGURE III.8. Les caractéristiques de tube. ....	55
FIGURE III.9. Les caractéristiques de tube. ....	55
FIGURE III.10. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m. ....	58
FIGURE III.11. Les résultats de la plaque de hauteur 0.15m. ....	59

FIGURE III.12. Les résultats de la plaque de hauteur 0.12m. ....	60
FIGURE III.13. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m avec une longueur de 1.15m. ....	62
FIGURE III.14. Balcon autoportant. ....	62
FIGURE III.15. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m de balcon autoportant ....	63
FIGURE III.16. Les résultats de la plaque de hauteur 0.15m de balcon autoportant. ....	65
FIGURE III.17. Les résultats de la plaque de hauteur 0.12m de balcon autoportant. ....	67

## **CHAPITRE IV. ETUDE D'EXECUTION**

FIGURE IV.1. Assemblage pied de poteau .....	70
FIGURE IV.2. Platine et longueur d'ancrage.....	70
FIGURE IV.3. Exécution des soudures d'angle. ....	71
FIGURE IV.4. Mise en œuvre d'étanchéité avec pente vers l'extérieur. ....	72
FIGURE IV.5. Disposition d'étanchéité aux niveaux des fixations. ....	72
FIGURE IV.6. Etanchéité a l'aire et complément d'isolaion. ....	73
FIGURE IV.7. Accessibilité des personnes (ressaut maximal de 2 cm). ....	73
FIGURE IV.8. Vue 3d de balcon. ....	74

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIE**

TABLEAU I.1. Caractéristiques de quelques fibres types : carbone, verre, et aramide .....	7
TABLEAU I.2. Compositions des verres de type E, D et R .....	12

### **CHAPITRE II. PRESENTATION DE PROJET**

TABLEAU II.1. Dimension de garde-corps .....	40
TABLEAU II.2. Caractéristique de matériau composite .....	41
TABLEAU II.3. Dimension de la plaque en matériau composite .....	41
TABLEAU II.4. Caractéristique de profilé métallique. ....	41
TABLEAU II.5. Combinaison d'action a ELS. ....	45
TABLEAU II.6. Combinaison d'action a ELU .....	45
TABLEAU II.7. Récapitulation de combinaison d'action a ELS et ELU. ....	46
TABLEAU II.8. Les flèches admissibles pour les balcons .....	47

### **CHAPITRE III. MODILISATION**

TABLEAU III.1 Caractéristiques de matériau composite. ....	50
------------------------------------------------------------	----

TABLEAU III.2. Charge appliqué sur la plaque. ....	51
TABLEAU III.3. Flèche et réaction dans la plaque 1m. ....	52
TABLEAU III.4. Contraintes dans la plaque de 1m.....	52
TABLEAU III.5. Valeurs de la formule Tsai-Wu pour la plaque de 1m.....	53
TABLEAU III.6. Flèches dans les plaques de 1.45m. ....	53
TABLEAU III.7. Flèches et réactions dans les plaques 1.45m. ....	53
TABLEAU III.8. Contraintes dans la plaque de 1.45m. ....	54
TABLEAU III.9. Valeurs de la formule Tsai-Wu pour la plaque de 1.45m. ....	54
TABLEAU III.10. Caractéristiques de matériau composite. ....	55
TABLEAU III.11. Charge appliqué sur le profilé a ELS.....	56
TABLEAU III.12. Charge appliqué sur le profilé à ELU. ....	56
TABLEAU III.13. Flèche dans la plaque (1m) après interaction avec le profilé. ....	57
TABLEAU III.14. Flèche dans la plaque (1.45m) après interaction avec le profilé. ....	57
TABLEAU III.15. Contraintes et les réactions dans le tube a ELU. ....	58
TABLEAU III.16. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	59
TABLEAU III.17. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	59
TABLEAU III.18. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.5m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	60
TABLEAU III.19. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.15m. ..	60
TABLEAU III.20. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	61
TABLEAU III.21. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	61
TABLEAU III.22. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	61
TABLEAU III.23. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.12m. ..	61
TABLEAU III.24. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.2m. ....	61
TABLEAU III.25. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.2m. ....	62

**Les tableaux suivants pour le balcon autoportant**

TABLEAU III.26. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.2m. ....	64
TABLEAU III.27. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.2m. ....	64
TABLEAU III.28. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.2m. ....	64
TABLEAU III.29. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.2m. ....	64
TABLEAU III.30. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	66
TABLEAU III.31. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	66
TABLEAU III.32. Flèches sous la charge variable de la plaque 1 m avec une épaisseur d'âme 0.15m. ....	66
TABLEAU III.33. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.15m. ....	66
TABLEAU III.34. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	68
TABLEAU III.35. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	68
TABLEAU III.36. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.12m. ....	68
TABLEAU III.37. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.12m. ..	68



## PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

$\nu$  : Coefficient de poisson

$\alpha_f$  : Coefficient de dilatation thermique

$\rho$  : Masse volumique

$G$  : Module de cisaillement

$E$  : Module de Young longitudinal

$\sigma$  : Contrainte

$\tau$  : Contrainte tangentielle ou de cisaillement

$\tau_d$  : Contrainte de décohésion entre fibre et matrice.

$\epsilon$  : Déformation

$u$  : Rupture

$\sigma_u$  : Contrainte de rupture

$m$  : Matrice

$f$  : Fibre

$L, 1$  : Sens longitudinal (sens des fibres)

$T, T', 2, 3$  : Sens transversale

$\sigma_m$  : Contrainte dans la matrice

$\sigma_f$  : Contrainte dans le fibre

$\sigma_L$  : Contrainte dans le sens des fibres

$\sigma_T$  : Contrainte dans le sens transversale des fibres

$\sigma^t$  : Contrainte de traction

$\sigma^c$  : Contrainte de compression

$X_t, X_c$  : Contraintes à la rupture suivant l'axe longitudinal respectivement en traction et en compression,

$Y_t, Y_c$  : Contraintes à la rupture suivant l'axe transversal respectivement en traction et en compression,

$S$  : Contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

$X_t (X_c)$  : Déformation à la rupture en traction (ou compression) suivant l'axe longitudinal,

$Y_t (Y_c)$  : Déformation à la rupture en traction (ou compression) suivant l'axe transversal,

$S$  : Déformation à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

$\sigma_i$  : Contrainte dans la direction  $i$  ( $i=x, y, z$ )

$V_f$  : Fraction volumique de fibre

$V_m$  : Fraction volumique de matrice

HM : Haut module

THM : Très haut module

$F$  : Force

$F_h$  : Force sismique horizontale

$F_v$  : Force sismique verticale

$F_s$  : Force sous la combinaison a ELS

$F_u$  : Force sous la combinaison a ELU

$f$  : Flèche

$f_{adm}$  : Flèche admissible

$M$  : Moment fléchissant

$R$  : Réaction

$M_i$  : Moment fléchissant suivant la direction  $x$ ,  $y$  ou  $z$

$R$  : Réaction suivant la direction  $x$ ,  $y$  ou  $z$

$Q$  : Charge d'exploitation

$W$  : Pression de vent

$a_E$  : Calcul l'accélération sismique

$\gamma_I$  : Coefficient d'importance

$q_a$  : Coefficient de comportement

Icam: institut catholique d'art et de métier

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>I. INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2. CONSTITUANT DE MATERIAU COMPOSITE</b> .....	<b>2</b>
I.2.1. Définition d'un matériau composite .....	2
I.2.2. La matrice .....	3
I.2.2.1. Définition de la matrice .....	3
I.2.2.2. Caractéristiques des résines les plus utilisées .....	3
I.2.3. Le renfort .....	6
I.2.3.1. Définition de renfort .....	6
I.2.3.2. Les différents type de renfort .....	6
I.2.3.3. Caractéristiques des fibres .....	7
I.2.4. Les charges et additifs .....	7
I.2.4.1. Les charges .....	7
I.2.4.1.1. Charges renforçantes .....	7
I.2.4.1.2. Charges non renforçantes .....	8
I.2.4.2. Les additifs .....	9
<b>I.3. ÉLABORATION ET PRODUCTION DES FIBRES</b> .....	<b>9</b>
I.3.1. Élaboration des fibres de carbone .....	9
I.3.1.1. Élaboration des fibres acryliques .....	9
I.3.1.2. Élaboration à partir du précurseur brai .....	11
I.3.2. Élaboration des fibres de verre .....	11
I.3.2.1. Procédé d'élaboration des fibres de verre .....	11
I.3.2.2. Ensimage des fibres de verre.....	13
<b>I.4. DIFFERENTES FORMES DE RENFORTS</b> .....	<b>13</b>
<b>I.5. PROCÉDES DE FABRICATION DE MATERIAU COMPOSITE</b> .....	<b>15</b>
I.5.1. Moulage au contact .....	15
I.5.2. Moulage par projection simultanée .....	16
I.5.3. Moulage en continu .....	16
I.5.4. Pultrusion .....	17
I.5.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage) .....	17
I.5.6. RTM (Resin Transfer Moulding) .....	19
I.5.6. Moulage sous vide .....	19
<b>I.6. UTILISATION DE DEMI-PRODUITS</b> .....	<b>20</b>
I.6.1. Procédé de fabrication de demi-produits.....	20
I.6.2. Intérêt des préimprégnés .....	20
I.6.3. Mise en œuvre .....	20

<b>I.7. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES .....</b>	<b>21</b>
I.7.1. Stratifiés .....	21
I.7.2 structures en sandwich.....	21
<b>I.8. RECOMMANDATION POUR LA FORMULATION.....</b>	<b>22</b>
<b>I.9. CONCEPT D'HOMOGENEISATION D'UN MATERIAU COMPOSITE UNIDIRECTIONNEL .....</b>	<b>23</b>
<b>I.10. MECANISMES DE RUPTURE DANS LES MATERIAUX COMPOSITES .....</b>	<b>24</b>
I.10.1. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel .....	24
I.10.1.1. La rupture des fibres .....	24
I.10.1.2. La rupture de la matrice.....	25
I.10.2. Mécanisme de rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale .....	26
I.10.3. Mécanisme de rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse .....	29
I.10.4. Rupture des stratifiés .....	29
<b>I.11. CRITERES DE RUPTURE DE MATERIAU COMPOSITE .....</b>	<b>32</b>
I.11.1. Critères en contraintes maximales. ....	32
I.11.2. Critères en déformations maximales. ....	32
I.11.3. Critères interactifs .....	33
<b>I.12. CONCLUSION .....</b>	<b>34</b>
 <b>CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET ET HYPOTHESES DE CALCULS</b> 	
<b>II.1. INTRODUCTION .....</b>	<b>35</b>
<b>II.2. PRESENTATION DE PROJET ET L'ORGANISME D'ACCUEIL.....</b>	<b>35</b>
<b>II.3. AVANTAGE DE CES TYPES DE BALCONS .....</b>	<b>35</b>
<b>II.4. PRINCIPE CONSTRUCTIF .....</b>	<b>35</b>
<b>II.5. CHOIX DES MATERIAUX .....</b>	<b>36</b>
<b>II.6. PREDIMENSIONNEMENT .....</b>	<b>36</b>
<b>II.7. HYPOTHESES DE LA THEORIE DES SANDWICHES .....</b>	<b>37</b>
<b>II.8. DEFINITION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES .....</b>	<b>37</b>
II.8.1 Caractéristiques de matériau composite .....	37
II.8.2 Caractéristiques mécaniques de l'acier .....	39
<b>II.9. LES CONTRAINTES DE RUPTURES : .....</b>	<b>39</b>
II.9.1. Contraintes de ruptures de matériau composite .....	39
II.9.2 Contrainte de rupture de l'acier .....	40

<b>II.10. DEFINITION DES CHARGES</b> .....	<b>40</b>
II.10.1 Poids propre .....	40
II.10.1.1 La charge de garde-corps .....	40
II.10.1.2. Poids propre de plancher .....	41
II.10.1.3. Poids propre de tube profilé .....	41
II.10.2 Charge d'exploitation .....	41
II.10.3 La charge de la neige .....	41
II.10.2 La charge du vent .....	41
II.10.3 Action thermique : .....	42
II.10.4 Action sismique .....	43
<b>II.11. COMBINAISON D' ACTIONS</b> .....	<b>45</b>
<b>II.12. SECURITE A L'INCENDIE</b> .....	<b>46</b>
<b>II.13. CRITERE DE DIMENSIONNEMENT</b> .....	<b>47</b>
II.13.1. Limitation de déformation .....	47
II.13.2. Limitation de vibrations .....	47
II.13.3. Contraintes limites .....	48
<b>II.14. LOGICIELS UTILISES</b> .....	<b>48</b>
<b>II.15. CONCLUSION</b> .....	<b>48</b>

### **CHAPITRE III : MODELISATION**

<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>49</b>
<b>III.2 MODELISATION DE LA PLAQUE</b> .....	<b>49</b>
III.2.1 Dessin de la plaque .....	49
III.2.2 Maillage .....	49
III.2.3 Introduire les caractéristiques du matériau composite .....	50
III.2.4 Les appuis .....	50
III.2.5 Application des charges (a ELS et ELU) .....	50
III.2.6 Résultats .....	51
<b>III.3 MODELISATION DE LA STRUCTURE METALLIQUE</b> .....	<b>54</b>
III.3.1 Dessin de tube et maillage .....	54
III.3.2 Introduire les caractéristiques de l'acier .....	55
III.3.3 Les appuis .....	55
III.3.4 Les charges .....	55
III.3.5. Les résultats .....	57
III.3.5.1 Les flèches de tube .....	57
III.3.5.2 Les contraintes et les réactions à ELU .....	58
<b>III.4. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.15m</b> .....	<b>58</b>
III.4.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q .....	59
III.4.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU: .....	60
<b>III.5. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.12m</b> .....	<b>60</b>
III.5.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q .....	61

III.5.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU .....	61
<b>III.6. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.2m ET DE LANGUEUR 1.15m .....</b>	<b>61</b>
III.6.1. Les contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU: .....	61
III.6.2. les flèches sous la charge variable Q .....	62
<b>III.7. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.2m (Balcon autoportant) .....</b>	<b>63</b>
III.7.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q .....	64
III.7.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU: .....	64
<b>III.8. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.15m (Balcon autoportant) .....</b>	<b>65</b>
III.8.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q .....	66
III.8.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU: .....	66
<b>III.9. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.12m (Balcon autoportant) .....</b>	<b>67</b>
III.9.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q .....	68
III.9.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action a ELU: .....	68
<b>III.10. CONCLUSION .....</b>	<b>69</b>

#### **CHAPITRE IV : ETUDE D'EXECUTION**

<b>IV.1. ASSEMBLAGE POUTRE EN ACIER AVEC LE BETON .....</b>	<b>70</b>
<b>IV.2. SOUDURE POUTRE-PLATINE .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.3. EVACUATION DES EAUX PLUVIALES .....</b>	<b>71</b>
<b>IV.4. PROTECTION DE SUPPORT DE FIXATION .....</b>	<b>72</b>
<b>IV.5. ETANCHEITE A L'AIR .....</b>	<b>72</b>
<b>IV.6. ACCESSIBILITE .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.7. ASSEMBLAGE DES GARDE-CORPS .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.8. VUE 3D DE BALCON .....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>76</b>



---

# INTRODUCTION GENERALE

---



## INTRODUCTION GENERALE

Il existe différentes familles de matériaux par exemple les métaux, les plastiques, les composites, les matériaux sandwichs, les matériaux intelligents, etc.... Le développement et les changements rapides des produits, des pratiques technologiques et industrielles sont accompagnés par de nouvelles générations de matériaux. Parmi ces matériaux, les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit le moins coûteux possible, soit le plus performant, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, ces matériaux occupent aujourd'hui une place importante dans les produits manufacturables, issus des résultats de la recherche et des besoins de l'industrie. Le choix d'un matériau composite pour la réalisation d'une pièce mécanique n'est plus réservé à des applications spécifiques produites à faible unité comme les satellites, le sport de compétition, les voitures de luxe... Des domaines comme le génie civil, l'automobile, les loisirs envisagent désormais l'emploi de matériaux composite comme moyen d'innovation et d'augmentation des performances de leurs produits. La certification des nouvelles pièces est délicate en raison du changement radical des technologies utilisées, tant pour le dimensionnement que pour la fabrication. De nombreux travaux de recherches ont traité le comportement élastique des matériaux orthotropes, et ainsi la résistance de ces derniers à la rupture, par exemple **Laurent.D et Pierre.L, Jean-Marie Berthelot, Drapier et al. 1994**, etc... Et ces chercheurs ont donné le plus aux dimensionnements et aussi à la fabrication des pièces en matériaux composites.

Le passage des matériaux traditionnels aux matériaux composites engendre des coûts importants pour valider leur efficacité, mais quand on parle à des investissements à long terme leur utilisation devient rentable. Et pour leur comportement, l'inhomogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Au sein d'une structure composite, on peut voir apparaître un endommagement constitué de micro-décohésions et de microfissures, des ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, décohésion de l'interface....

Notre projet fait l'objet de l'étude de faisabilité d'un balcon en porte-à-faux mixte, profilé en acier et plancher en matériau composite et pour faciliter les tâches et assurer un très bon dimensionnement on suit une procédure qui nous permettra d'atteindre notre objectif. Ce mémoire est composé de quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, on commence par une recherche bibliographique sur les matériaux composites, on définit les caractéristiques des constituants d'un matériau composite et aussi les modes de fabrication et après on passe aux mécanismes et aux critères de rupture et on termine cette partie par une conclusion.

Dans le deuxième chapitre on va présenter le projet, la conception et le pré dimensionnement, les caractéristiques mécaniques des matériaux et le calcul et la combinaison des charges.

Le troisième chapitre traite la modélisation et dans le but de dimensionnement du balcon.

Dans le quatrième chapitre, on présente une étude d'exécution du projet et les précautions de l'exécution comme l'assainissement, l'assemblage.

Et à la fin de ce travail, on donne une conclusion générale sur le stage.



---

# CHAPITRE I

---

## RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



**CHAPITRE I. RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.****I.1. INTRODUCTION**

L'utilisation des matériaux innovants est un gage de compétitivité dans tous les domaines de l'industrie. Et le terme matériau composite est utilisé de façon générique et désigne un matériau obtenu par assemblage voulu. Le problème qui se pose aujourd'hui, est de savoir répondre à la raréfaction des combustibles fossiles en allégeant le poids tout en réduisant les coûts de fabrication et de maintenance, en optimisant les performances et en diminuant l'impact sur l'environnement .... Et pour répondre à ces exigences, on doit étudier le comportement des matériaux composites et dans cette partie bibliographique on va traiter les matériaux composites de manière générale. On commence par la définition des caractéristiques des constituants d'un matériau composite et les modes de fabrications et après on passe aux mécanismes et aux critères de rupture et on termine cette partie par une conclusion pour qu'on puisse se rapprocher de la solution à cette équation.

**I.2. CONSTITUANT DE MATERIAU COMPOSITE****I.2.1. Définition d'un matériau composite**

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.

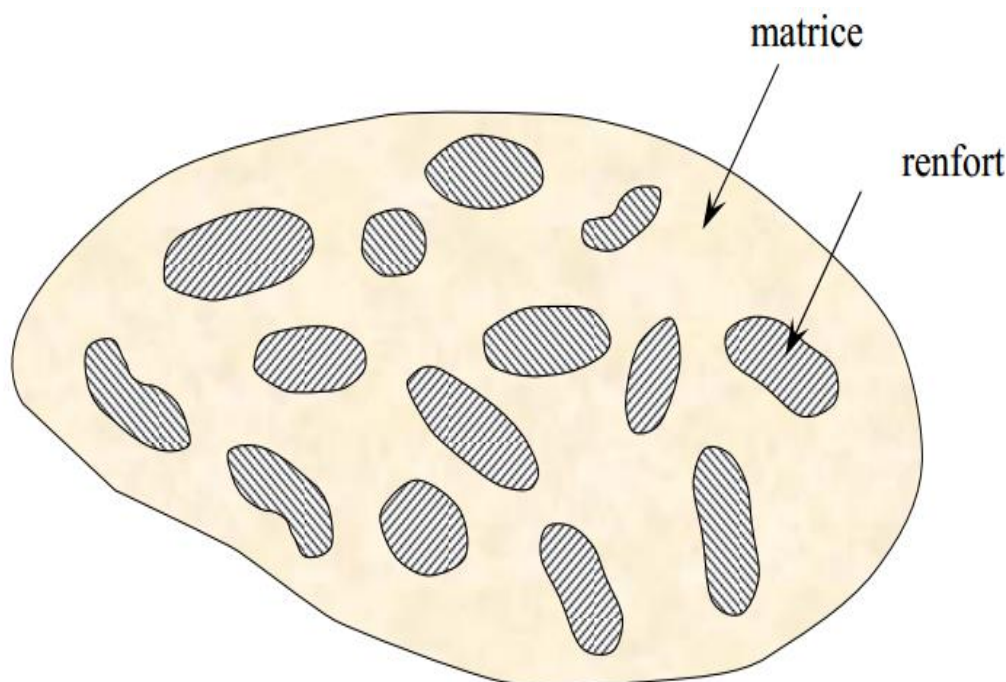


Figure I.1. Schéma illustratif d'un matériau composite. [1]

## I.2.2. La matrice

### I.2.2.1. Définition de la matrice

C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques. [1]

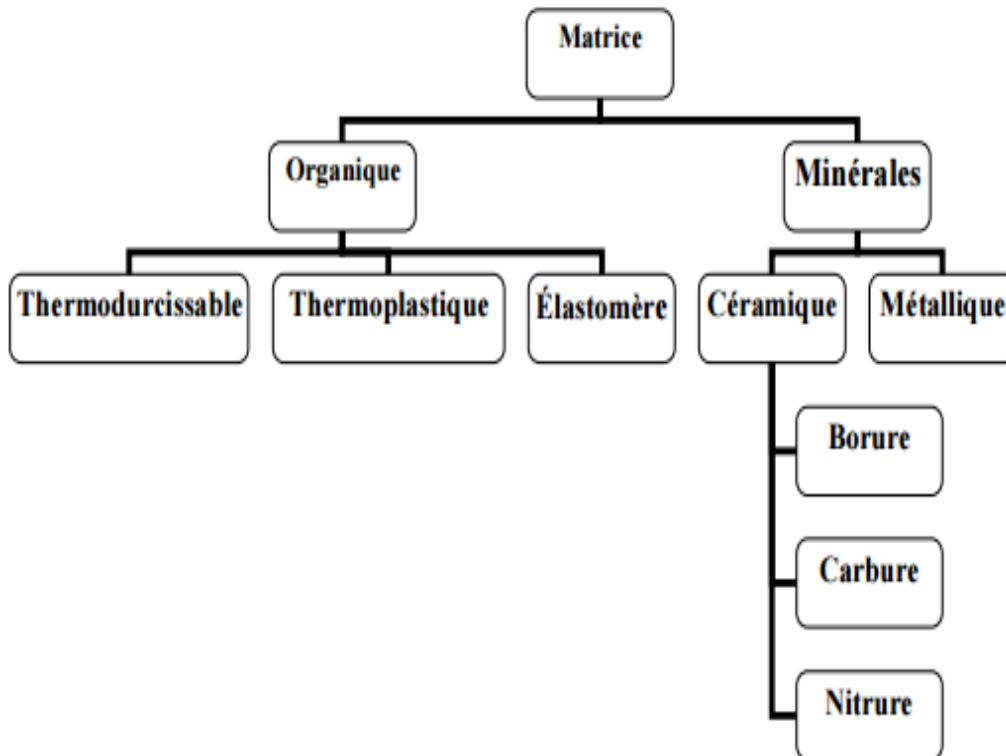


Figure I.2. Différentes familles de matrices. [2]

### I.2.2.2. Caractéristiques des résines les plus utilisées

#### I.2.2.2.1. Les résines polyesters

Les résines polyesters insaturées viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat : [1]

- d'un faible coût de production,
- de leur diversité offrant de multiples possibilités,
- d'une adaptation à des procédés de fabrication faciles à mettre en œuvre et à automatiser.

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide ayant les caractéristiques suivantes :

Masse volumique	1 200 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement à la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement à la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge (1,8 MPa)	60 à 100 °C
Coefficient de Poisson	0.4 [3]

Parmi les avantages des polyesters insaturés, on cite:

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- une bonne stabilité dimensionnelle,
- une bonne mouillabilité des fibres et des tissus,
- la facilité de mise en œuvre,
- une bonne tenue chimique,
- un faible coût de production,
- une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients:

- une tenue médiocre en température : inférieure à 120 °C en service continu,
- une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
- un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de "gel-coat" de manière à les rendre étanches,
- une dégradation à la lumière par les rayons ultraviolets,
- une inflammabilité.

#### I.2.2.2. Les résines époxydes

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters). du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résine époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.). [1]

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Masse volumique	1 100 à 1 500 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	2 à 5 %
Résistance au cisaillement	30 à 50 MPa
Température de fléchissement sous charge	290 °C

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de

transformation et surtout de recuissons très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C). [1]

Parmi les avantages des résines époxydes :

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu;
- une excellente résistance chimique,
- un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %),
- une très bonne mouillabilité des renforts,
- une excellente adhérence aux matériaux métalliques. [1]

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- une sensibilité à la fissuration. [1]

#### **I.2.2.2.3. Les résines de condensation**

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

Les résines *phénoliques* sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Masse volumique	1 200 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en flexion	3 GPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Résistance à la compression	250 MPa
Température de fléchissement sous charge	120 °C

[1]

Parmi les avantages, nous citerons :

- une excellente stabilité dimensionnelle,
- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- une bonne résistance aux agents chimiques,
- un faible retrait,
- de bonnes caractéristiques mécaniques,
- un faible coût. [1]

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- un non adaptation à des utilisations alimentaires.
- les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques. [1]

### **I.2.3. Le renfort**

#### **I.2.3.1. Définition de renfort**

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, En fonction de la forme des renforts. On distingue deux types de composites selon la forme de fibre:

- **les composites à fibres** : constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes. [4]

- **les composites à particules** : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux. [4]

En fonction de la nature des renforts, on distingue les fibres de carbone, de verre, d'aramides, naturelle,....

#### **I.2.3.2. Les différents types de renfort**

##### **I.2.3.2.1. Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont largement utilisées depuis plusieurs années, et leur coût ne cesse de diminuer même s'il reste élevé par rapport aux autres fibres. Les fibres de carbone restent la référence pour les renforts à fibres continues car ce surcoût est compensé par d'excellentes propriétés mécaniques en traction et en compression alliées à une faible densité. Il existe des fibres de carbone privilégiant la résistance (Haute Résistance) et d'autres la rigidité (Haut Module, Très Haut Module), mais dans l'ensemble, elles fournissent les meilleures propriétés spécifiques. [3]

##### **I.2.3.2.2. Les fibres de verre**

Les fibres de verre sont largement utilisées dans les composites grandes diffusions, notamment les fibres de verre E, pour leur excellent rapport performances mécaniques/prix, même si leurs propriétés mécaniques spécifiques restent moyennes par rapport aux fibres de carbone. [1]

Il existe divers types de fibres de verre, les fibres de verre E (Electrical) constituant pratiquement la totalité des fibres de verre utilisées. Les fibres de verre D possèdent de bonnes propriétés diélectriques, et les fibres C (Corrosion) possèdent une bonne résistance aux agressions chimiques, enfin les fibres R et S offrent des propriétés mécaniques plus élevées que celles des fibres E pour un prix également plus élevé (4 fois). [3]

##### **I.2.3.2.3. Les fibres aramides**

Les fibres aramides dont la plus connue est le Kevlar de Dupont de Nemours sont des fibres polyamides. Elles possèdent une résistance à la traction de l'ordre de celle des fibres de carbone pour une densité de l'ordre de 1.5, mais pour un prix 3 à 5 fois moindre (par rapport à la fibre de carbone). Elles sont utilisées dans les applications où leur excellente absorption des vibrations, et leur bonne tenue aux chocs et à la fatigue.

Par contre, ces fibres posent des problèmes d'adhérence à la matrice, ce qui conduit à des propriétés faibles en compression, inférieures à celles obtenues avec des fibres de verre. [3]

##### **I.2.3.2.4. Les fibres naturelles**

Les fibres naturelles sont de plus en plus nombreuses sur le marché. Elles peuvent être extraites de matériaux fibreux, comme le chanvre, le lin, le sisal,... et possèdent alors des propriétés de type isotrope transverse. Ces fibres peuvent également être obtenues par polymérisation de

chaînes de monomères naturelles telles que la cellulose. Il s'agit alors de reconstituer les fibres par passage dans une filière. Cette dernière solution permet également de lever ce qui reste aujourd'hui encore comme le gros point bloquant de l'utilisation de ces fibres : la variabilité naturelle des dimensions et des propriétés de ces fibres. [3]

### I.2.3.3. Caractéristiques des fibres

Le table suivant présente les caractéristiques des fibres de carbone, verre, et d'aramide :

**Tableau I.1: Caractéristiques de quelques fibres types : carbone, verre, et aramide (d'après Gay, 2005). [3]**

Caractéristiques mécaniques et thermiques des fibres	Verre E (Appl. Courantes)	Verre R (Htes Performances)	Aramide (Kevlar 49)	Carbone (Haute Résistance)	Carbone (Haut Module)
Masse volumique $\rho(kg/m^3)$	2600	2500	1450	1750	1800
Diamètre $\Phi(\mu m)$	16	10	12	6 à 7	6 à 7
Rigidité sens fibre $E_{ft}$ (GPa)	74	86	130	230	390
Rigidité sens transvers $E_{ft}$ (GPa)	74	86	130	20	12
Coefficient de Poisson $\nu_f$	0,2	0,25	0,4	0,3	0,35
Contrainte à rupture en tension $\sigma_{fut}(MPa)$	2500	3200	2900	3200	2600
Module spécifique $E_f/\rho(MN/kg)$	28	33	90	130	216
Contrainte spécifique $\sigma_{fu}/\rho(kN/kg)$	0,95	1,4	2	1,8	1,4
Coeff. de dilatation thermique $\alpha_f(10^{-5}C^{-1})$	0,3	0,5	-0,2	0,02	0,08
Température limite d'utilisation $T_f(^{\circ}C)$	700	700	-	> 1500	> 1500
Prix (€/kg)	10	2	50	40-90	60-150

### I.2.4. Les charges et additifs

Différents produits peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés peut varier de :

- quelques dizaines de % dans le cas de charges,
- à quelques % et moins dans le cas d'additifs.

L'addition de ces produits a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre. Nous donnons dans ce paragraphe des exemples de charges et d'additifs. [1]

#### I.2.4.1. Les charges

##### I.2.4.1.1. Charges renforçantes

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine.

Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en:[1]

##### I.2.4.1.1.1. Charges sphériques

- **Les microbilles de verre creuses**

Le principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400 kg/m<sup>3</sup>), apportant une augmentation du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression.

Les avantages essentiels de leur incorporation dans une résine sont :

- la diminution de la masse volumique,
- l'augmentation du module de la résine,
- l'amélioration de la tenue en compression.

Il existe d'autres microbilles creuses :

- **Microbilles de carbone :**
  - Masse volumique 120 kg/m<sup>3</sup>.
  - Diamètre 5 à 150 µm.
- **Microbilles organiques** (époxyde, phénolique, etc.) :
  - Masse volumique 100 à 500 kg/m<sup>3</sup>
  - Diamètre 10 à 800 µm

Ces microbilles sont généralement plus chères (jusqu'à 5 fois pour les microbilles de carbone) que les microbilles de verre.

#### **I.2.4.1.1.2. Charges non sphériques**

Parmi les charges renforçantes non sphériques, le mica il est le matériau le plus utilisé. Il est alors incorporé sous forme d'écaillés de dimensions de 100 à 500 µm, et d'épaisseur de 1 à 20 µm. Le mica est ajouté à des résines thermoplastiques ou thermodurcissables, pour des applications électriques ou électroniques.

#### **I.2.4.1.2. Charges non renforçantes**

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

##### **Charges de faible coût**

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût. Généralement, l'incorporation de ces charges conduit à une augmentation :

- de la masse volumique de la matrice,
- du module d'élasticité,
- de la dureté,
- de la viscosité,
- de la stabilité dimensionnelle.

Et aussi à une diminution du prix et de la résistance à la traction et à la flexion.

#### **I.2.4.2. Les additifs**

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage,
- pigments et colorants,
- agents anti-retrait,
- agents anti-ultraviolets.

Par exemple l'agent catalyseur qui est un agent destiné à être ajouté aux résines polyester et aux gel-coats, afin de permettre la polymérisation. Le ratio de mélange est de l'ordre de 1 à 2% en masse. On cite l'accélérateur UNIACCOB6 utilisé en usage général dans le cadre de résines standards non accélérées. L'ajout d'accélérateur va vous permettre de déclencher la polymérisation plus rapidement en hiver. Mais avec un ratio de mélange de 1 à 5/1000 en masse de résine à respecter. [5]

### I.3. ÉLABORATION ET PRODUCTION DES FIBRES

#### I.3.1. Élaboration des fibres de carbone

Le graphite a une structure hexagonale d'atomes de carbone, disposés en plans cristallographiques parallèles. Ces plans sont décalés de telle sorte qu'un atome de carbone se projette au milieu d'un hexagone des plans voisins. Les liaisons entre atomes de carbone de plans voisins sont faibles, et confèrent au graphite de bonnes propriétés de conduction thermique et électrique. Par contre, les liaisons entre atomes voisins d'un même plan sont fortes, et donnent au graphite des propriétés mécaniques élevées dans la direction parallèle aux plans cristallographiques. [1]

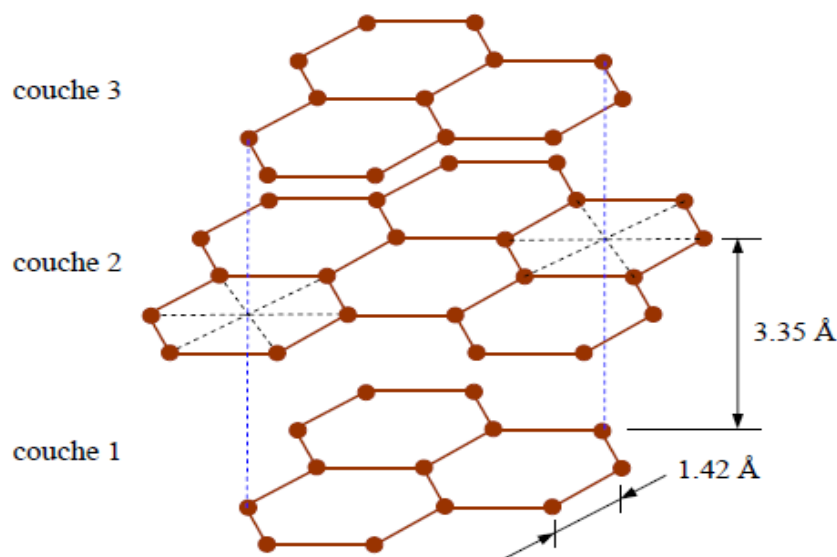


FIGURE I.3. Structure cristalline du graphite. [1]

L'élaboration des fibres de carbone peuvent être:

- a) à partir des fibres acryliques
- b) à partir du précurseur brai

##### I.3.1.1. Élaboration des fibres acryliques

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé *précurseur*, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement, les fibres utilisées sont les fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres acryliques sont connues sous divers noms commerciaux: crylor, court elle, dralon, orlon, etc. La qualité des fibres de carbone finales dépend des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (généralement 500, 1 000, 6 000, 10 000, etc. filaments), et leur font subir quatre traitements successifs: une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface. [1]

##### L'oxydation:

Les fibres acryliques étant fusibles, la phase d'oxydation a pour but de supprimer artificiellement le point de fusion. Cette opération est effectuée en chauffant les fibres à environ 300 °C en atmosphère d'oxygène. Il se produit alors une oxydation conduisant à une réticulation des chaînes moléculaires et à la création d'un réseau tridimensionnel : [1]

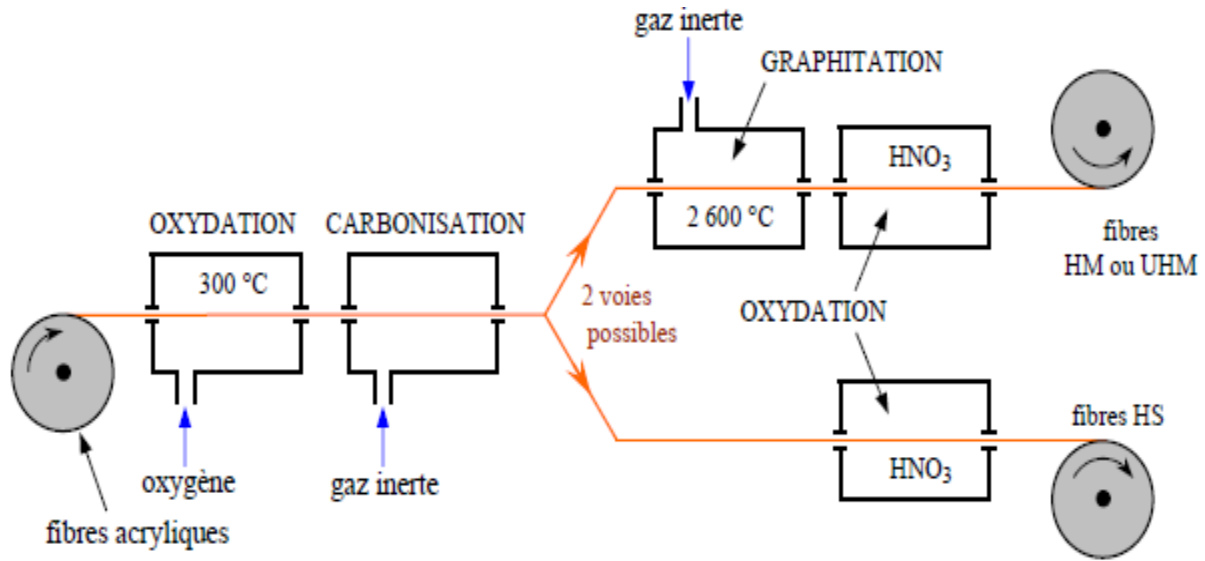


FIGURE I.4. Élaboration des fibres de carbone. [1]

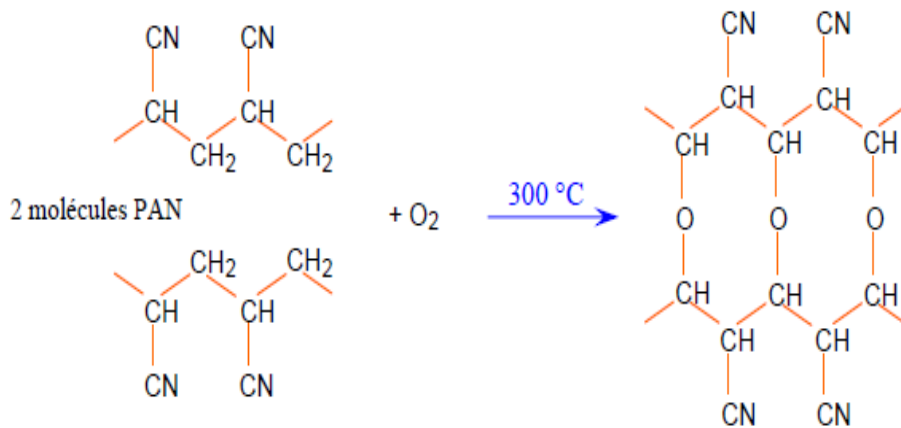


FIGURE I.5. La phase d'oxydation. [1]

**La carbonisation:**

La deuxième phase consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300 °C à 1 100 °C environ, en atmosphère inerte. Il y a alors élimination de l'eau et de l'acide cyanhydrique, seuls les carbones étant conservés dans la chaîne :

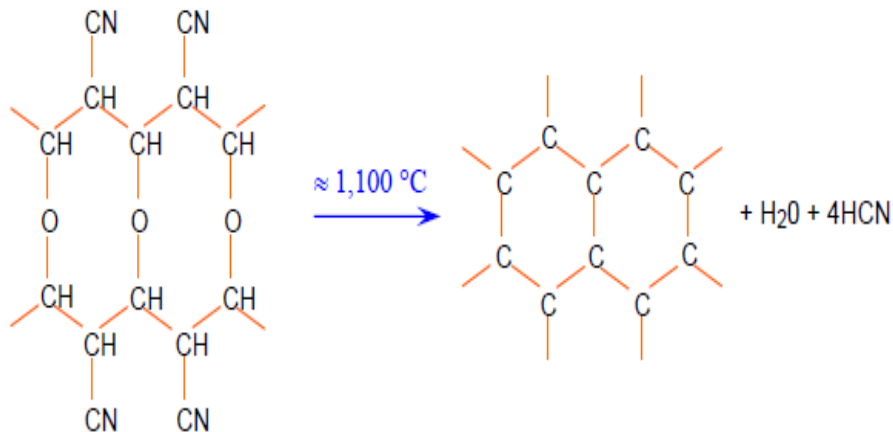


FIGURE I.6. La phase de carbonisation. [1]

Les fibres obtenues après cette phase ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface. Les fibres sont alors dénommées fibres HR (haute résistance) ou fibres HT (haute ténacité). [1]

**La graphitisation:**

La phase de graphitisation est utilisée lorsque l'on souhaite obtenir des fibres à module d'Young élevé. Cette phase consiste à effectuer à la suite de la carbonisation, une pyrolyse des fibres, en atmosphère inerte, jusqu'à 2 600 °C ou à des températures supérieures. La graphitisation provoque une réorientation des réseaux hexagonaux de carbone suivant l'axe des fibres, ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young. Toutefois, simultanément à cette réorientation, des défauts se créent dans la structure, entraînant une diminution de la contrainte à la rupture. Suivant le taux de graphitisation, on obtient des fibres HM (fibres à haut module) ou des fibres THM (à très haut module). [1]

**Le traitement de surface:**

La dernière phase de l'élaboration consiste en un traitement de surface, par oxydation ménagée en milieu acide (nitrique ou sulfurique). Cette phase a pour objet d'accroître la rugosité des filaments ainsi que la nature des liaisons chimiques, afin d'améliorer la liaison fibre-résine. [1]

**I.3.1.2. Élaboration à partir du précurseur brai**

Depuis les années 1970, des procédés d'élaboration de fibres de carbone ont été développés à partir du brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille. Dans ce procédé, le brai est chauffé à 350 °C- 450 °C pour obtenir une mésophase (intermédiaire entre liquide et cristal), puis filé pour améliorer l'orientation. Comme dans le cas du procédé PAN, les filaments sont oxydés et carbonisés, et enfin pyrolysés à des températures supérieures à 2 000 °C pour obtenir des fibres haut module. Les fibres de carbone produites par ce processus ont divers avantages: [1]

- un rendement massique filaments/précurseur élevé de l'ordre de 75 à 90 % (50 % pour le procédé PAN),
- une vitesse de graphitisation plus élevée,
- une matière première bon marché.

Le développement de cette technique devrait permettre aux fibres de carbone d'atteindre les grands marchés industriels (type industrie automobile, etc.), par diminution notable du prix de revient, par rapport aux fibres obtenues à l'aide du précurseur PAN. [1]

**I.3.2. Élaboration des fibres de verre**

**I.3.2.1. Procédé d'élaboration des fibres de verre** Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites. [1]

Suivant leurs compositions, différents types de verres filables peuvent être obtenus. Dans la pratique, les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentant globalement une faible quantité (environ 1 %), sont réservés à des applications spécifiques : [1]

Le verre D, à hautes propriétés diélectriques, pour la construction de matériel électronique de télécommunications, en particulier les radomes;

Le verre C, résistant aux agents chimiques pour les couches superficielles des structures particulièrement exposées sur le plan chimique;

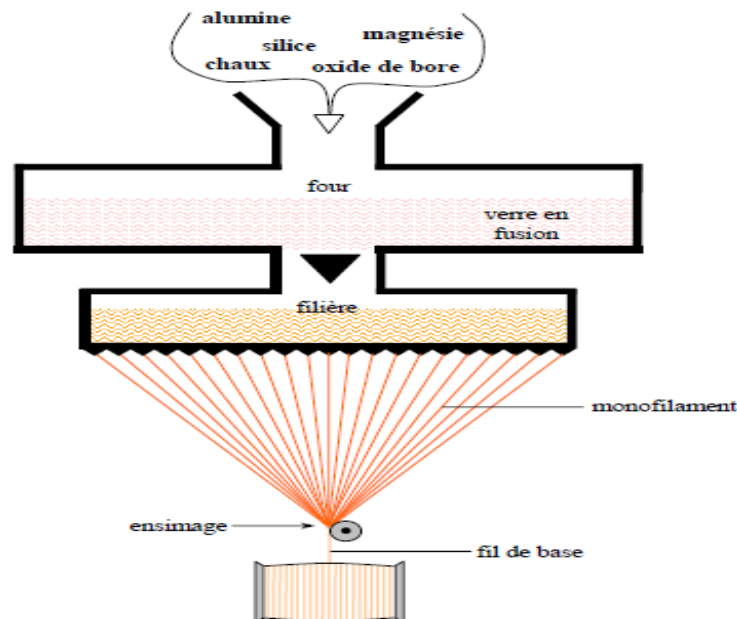
Les verres R et S, à caractéristiques mécaniques élevées pour la réalisation de structures à hautes performances mécaniques.

**TABEAU I.2. Compositions des verres de type E, D et R. [1]**

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO <sub>2</sub>	53-54	73-74	60
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14-15,5		25
Chaux	CaO	} 20-24	} 0,5-0,6	9
Magnésie	MgO			6
Oxyde de bore	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5-9		
Fluor	F	0-0,7	22-23	
Oxyde de fer	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	} < 1	} 0,1-0,2	
Oxyde de titane	TiO <sub>2</sub>			
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	} < 1		1,3
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O			1,5

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2 mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées par effet Joule, aux environs de 1 250 °C. À cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. À la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir des fibres discontinues de diamètres différents (généralement de 5 à 15 µm). [1]

Les monofilaments sont ensuite rassemblés sans torsion pour constituer un fil de base (appelé fil sillionne), qui est enroulé sur une bobine. Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts verre dans les matériaux composites.



**FIGURE I.7. Schéma de principe du procédé d'étirage mécanique ou sillionne. [1]**

### **I.3.2.2. Ensimage des fibres de verre**

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons : [1]

- l'absence de cohésion entre les filaments, qui s'oppose à la constitution de fils;
- la sensibilité du verre à l'abrasion, conduisant à une détérioration lors des manipulations postérieures au fibrage;
- la sensibilité à l'attaque de l'eau;
- la création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour pallier ces défauts, on réalise à la sortie de la filière une opération dite d'ensimage, qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre un produit d'ensimage de composition complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avant, les diverses fonctions de l'ensimage sont : [10]

- établir une certaine cohésion entre les filaments;
- donner une plus ou moins grande raideur aux fils (un fil destiné à être coupé doit être raide, un fil destiné au moulage ou au tissage doit être souple);
- protéger les filaments contre l'abrasion;
- éviter l'apparition de charges électrostatiques;
- faciliter l'imprégnation des filaments par la résine (mouillage superficiel et pénétration au cœur des filaments);
- favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du composite, mais également le comportement du matériau au vieillissement, la sensibilité à l'humidité, à la corrosion, etc.

## **I.4. DIFFERENTES FORMES DE RENFORTS**

Il existe plusieurs catégories de renforts à base de fibres : les mats, les tissés, les unidirectionnels, les tricots et les multidirectionnels.

\* **Les mats** sont des nappes de filaments, de fibres continues ou discontinues, disposés sans orientations préférentielles et maintenus ensemble par un liant soluble. Ce sont des matériaux déformables, quasi-isotropes dans leur plan et peu coûteux malgré des propriétés mécaniques moindres. [6]



**FIGURE I.8. Couche de mats. [6]**

La différence entre les mats à fils coupés et les mats à fils continus se situe essentiellement au niveau de leur propriété de déformabilité. Les premiers sont peu déformables alors que les seconds permettent d'obtenir des “emboutis” profonds par un allongement régulier du mat dans toutes les directions. Une des principales applications des mats à fils continus est le moulage entre

moule et contre-moule, de pièces pouvant avoir des formes complexes, par compression, injection ou moulage sous vide. [1]

\***Les tissus** sont réalisés sur des métiers à tisser. Ils sont obtenus par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires : chaîne et trame. Ils peuvent avoir différentes armures : la toile ou le taffetas, le sergé et le satin. L'armure contrôle la rigidité du tissu. [6]

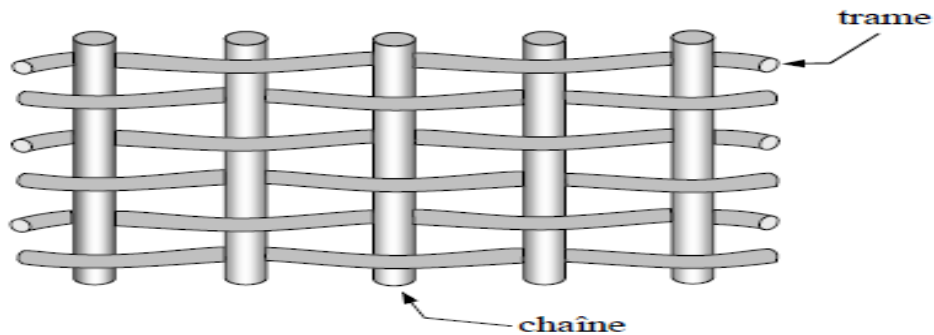


FIGURE I.9. Chaîne et trame d'un tissu. [1]

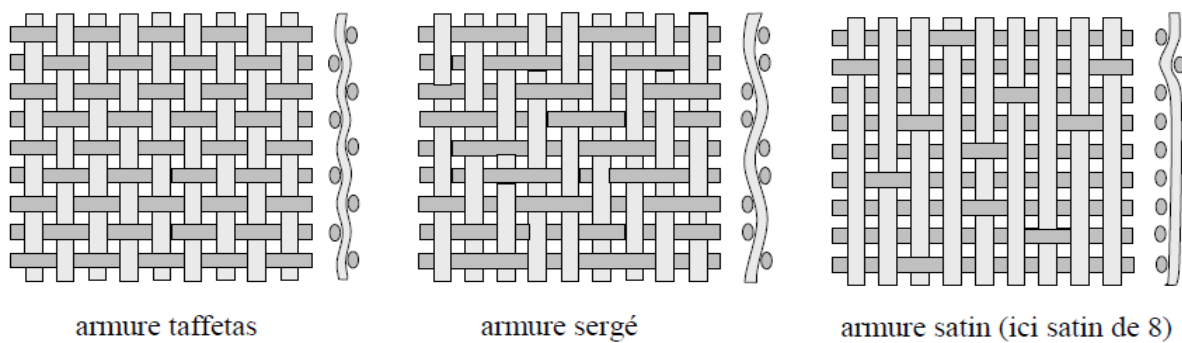


FIGURE I.10. Les principaux types d'armures des tissus. [1]

\***Les unidirectionnelles** sont constituées de fils de chaînes maintenus par des fils de trame fins. [7]

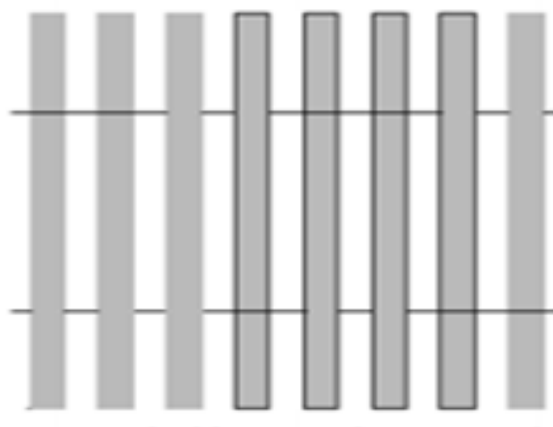


FIGURE I.11. Tissage unidirectionnel. [6]

\***Les tricots** sont formés par bouclage d'un ou plusieurs fils et offrent de plus grandes possibilités de motifs que le tissage. Leur principale caractéristique est leur déformabilité.



FIGURE I.12. Tissage Tricot. [6]

\***Les multidirectionnels** sont des structures 3D formées de fibres orientées dans plusieurs directions de l'espace. Les différentes couches sont liées entre elles, et dans l'objectif de mettre en forme les composites par estampage, cette architecture n'est pas envisagée. [6]

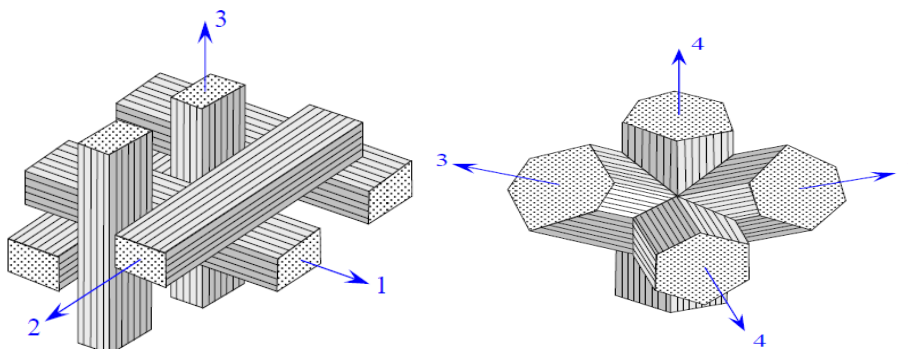


FIGURE I.13. Tissages 3D et 4D. [1]

#### Avantages et inconvénients d'un tissu

- meilleure résistance au délaminage ;
- tolérance à l'endommagement grâce au tissage des fibres ;
- épaisseur régulière grâce au maintien latéral des fibres ;
- propriétés mécaniques dans le sens transverse ;
- drapabilité.

#### Inconvénients d'un tissu

- rigidité et résistance mécanique diminuées dans le plan du tissu ;
- fraction volumique de fibres réduite dans le composite;
- gauchissement des structures minces dans certains cas ;
- coût plus élevé (opération de tissage).

## I.5. PROCÉDES DE FABRICATION DE MATERIAU COMPOSITE

### I.5.1. Moulage au contact

Le principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est peu onéreux et des pièces de formes quelconques peuvent être réalisées mais à cadence très faible. Cette technologie est plus réservée à la réalisation de pièces prototypes ou de simulation.

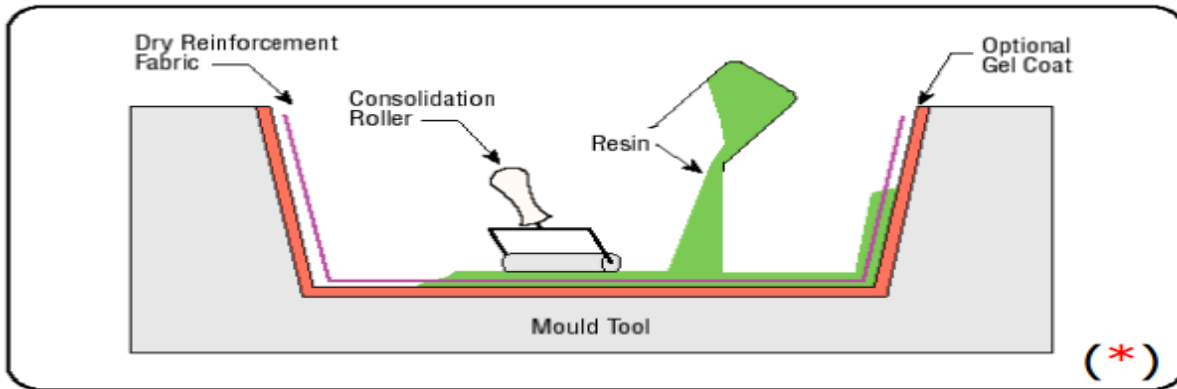


FIGURE I.14. Principe du moulage au contact. [7]

### I.5.2. Moulage par projection simultanée

C'est une technologie similaire à la précédente mais les fibres coupées sont projetées au pistolet.

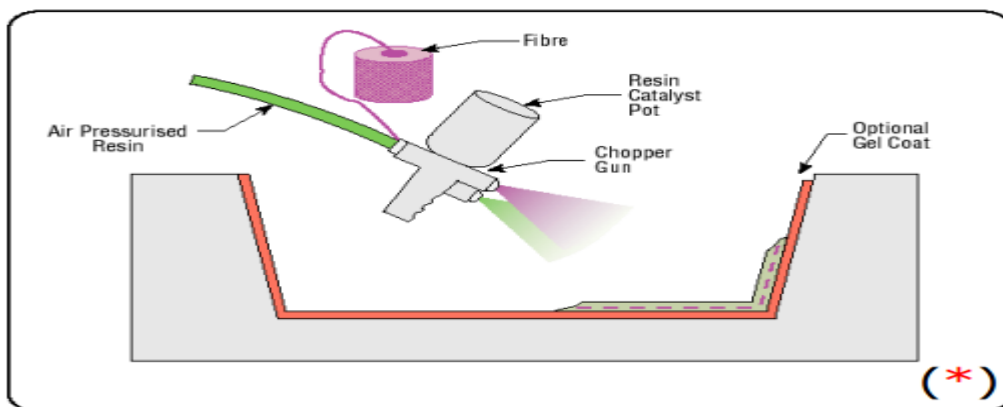


FIGURE I.15. Principe du moulage par projection simultanée [7]

### I.5.3. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (FIGURE I.16), de panneaux ondulés pour toitures (FIGURE I.17), plaques nervurées, etc. Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases. [1]

1. **Une phase d'imprégnation des renforts** (fibres, mats ou tissus): La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, mylar, polyéthylène, etc.). [1]

2. **Une phase de mise en forme.**

3. **Une phase de polymérisation:** effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long). [1]

4. **Une phase de refroidissement et découpage.**

Dans le cas de la fabrication de plaques planes, la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage.

Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation, par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel. [1]

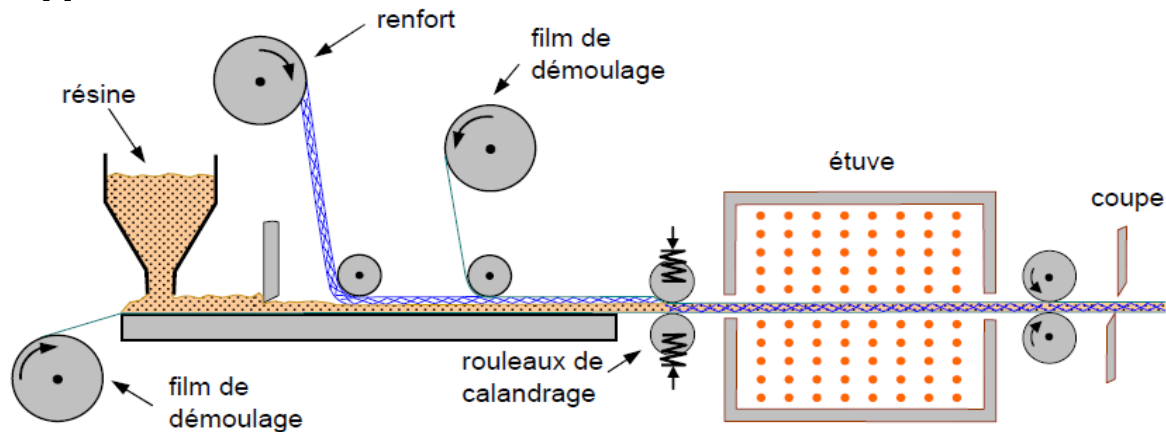


FIGURE I.16. Moulage en continu de plaques. [1]

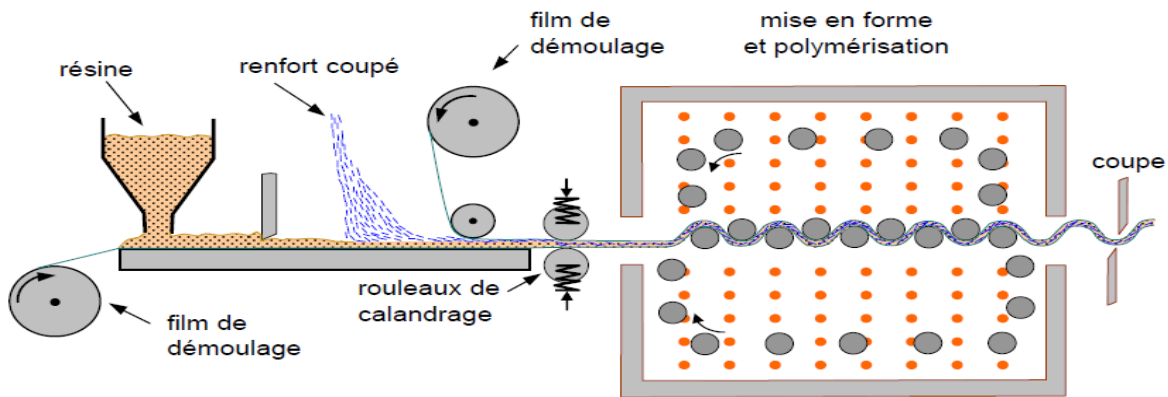


FIGURE I.17. Moulage en continu de panneaux ondulés. [1]

#### I.5.4. Pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique (FIGURE I.18), les renforts fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc. [1]

#### I.5.5. Enroulement filamentaire (ou bobinage)

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation. Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est

très important. Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire. [1]

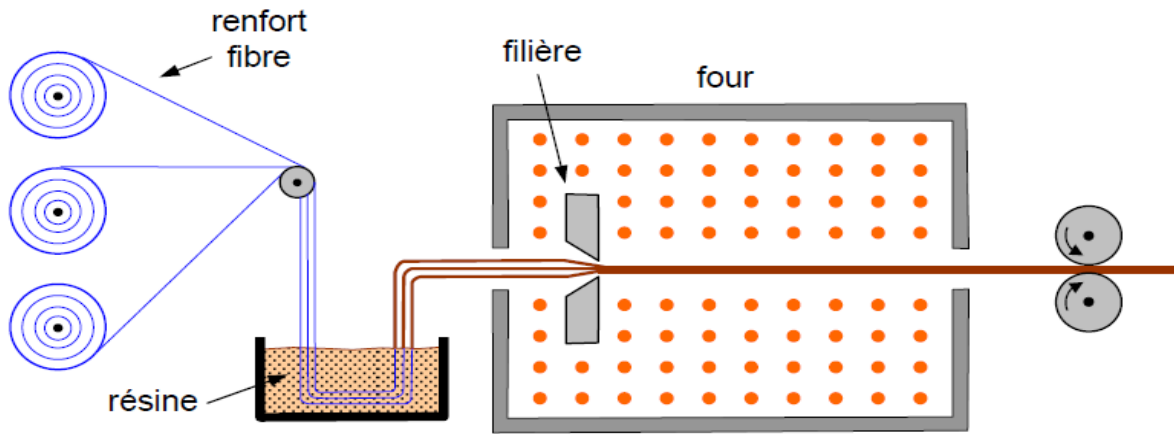


FIGURE I.18. Moulage par pultrusion. [1]

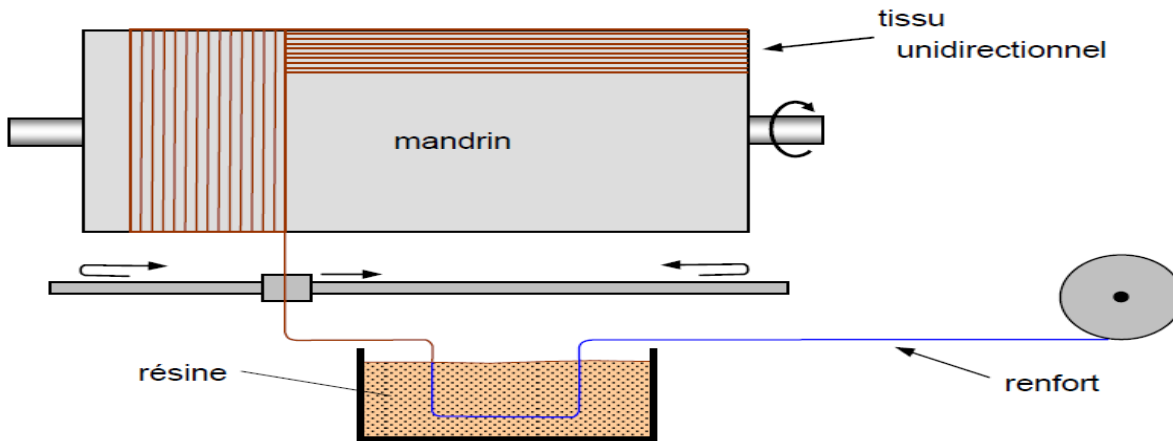


FIGURE I.19. Principe du moulage de l'enroulement circonférentiel. [1]

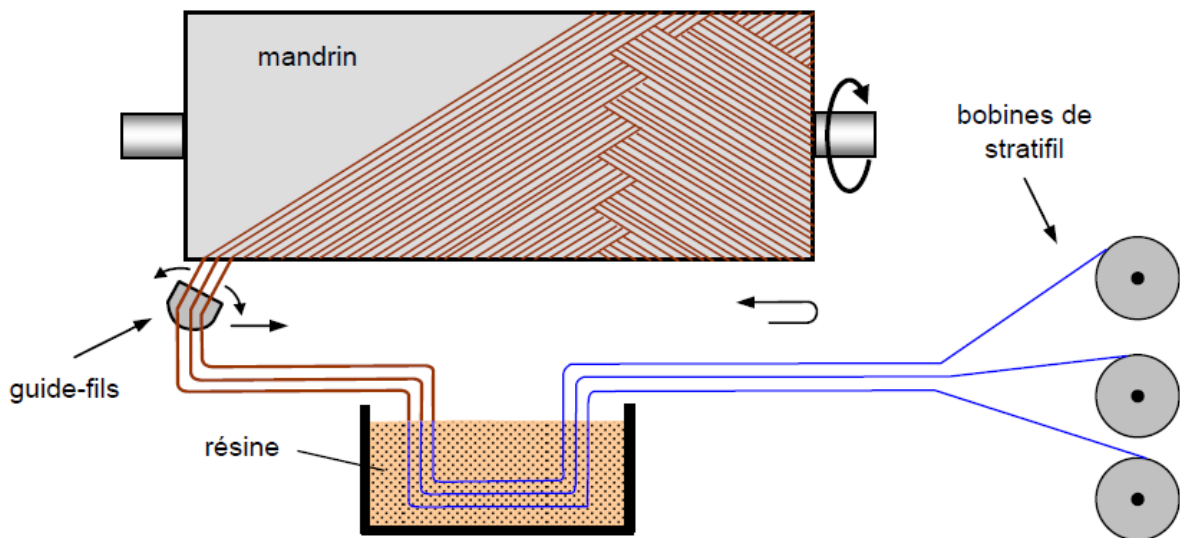


FIGURE I.20. Principe du moulage de l'enroulement hélicoïdal. [1]

### I.5.6. RTM (Resin Transfer Moulding)

Les caractéristiques de la méthode RTM sont les suivants: [7]

- Taux de fibres élevés
- Environnement «santé» (procédé en moule fermé, pas de dégagement de vapeurs nocives)
- Moules mâle et femelle : deux faces «propres»
- Devrait se développer grâce à l'amélioration des méthodes de simulation d'injection de résine

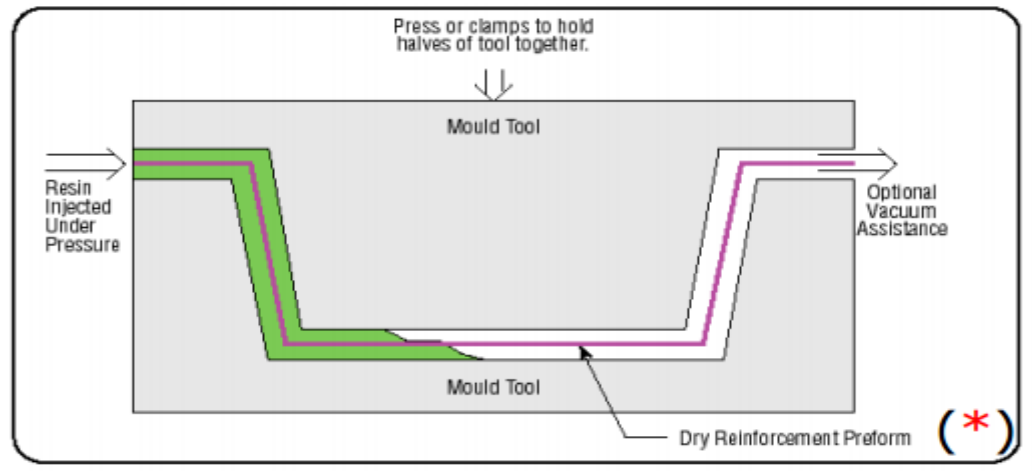


FIGURE I.21. Principe du moulage par RTM. [7]

### I.5.6. Moulage sous vide ou «au sac» :

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité. [1]

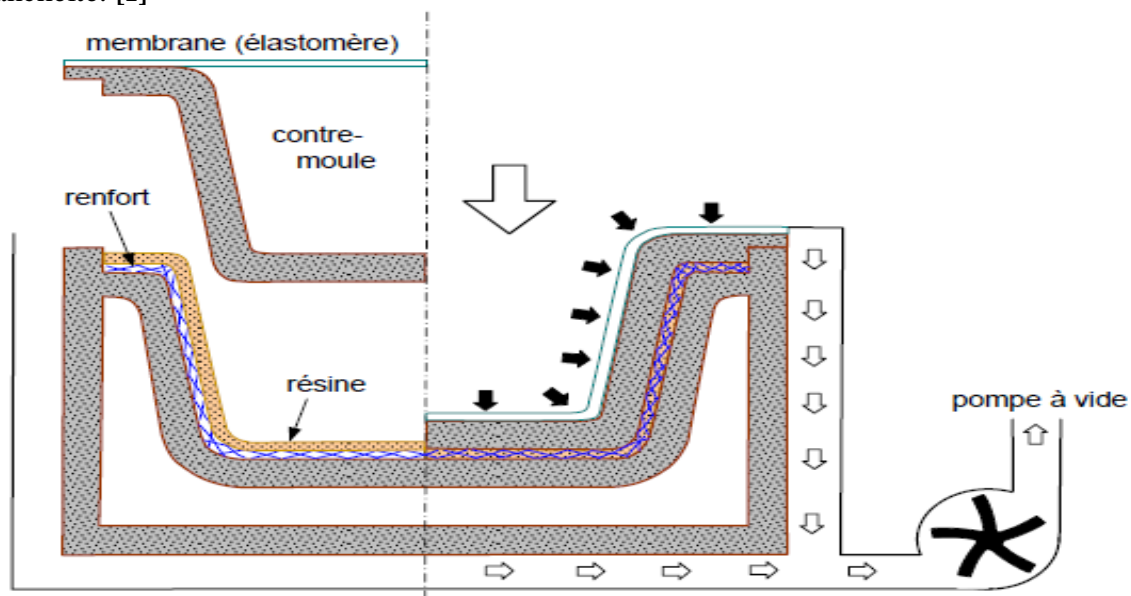


FIGURE I.22. Principe du moulage sous vide. [1]

## I.6.UTILISATION DE DEMI-PRODUITS (préimprégnés)

### I.6.1. Procédé de fabrication de demi-produits (préimprégnés) :

Les préimprégnés sont des produits vendus sous forme de stratifiés, rubans, tissus, etc., imprégnés de résine généralement dissoute dans un solvant.

Les résines peuvent être phénoliques, des polyesters, des résines époxydes, des polyamides, etc. Le pourcentage en volume de fibres est élevé (50 à 80 %) de manière à obtenir des composites à hautes performances mécaniques.

La fabrication des préimprégnés se fait sur une machine verticale ou horizontale, suivant le schéma de principe de la **FIGURE I.23**. Le fil ou tissu est déroulé à vitesse lente (1 à 10 m/min), et passe dans un bac contenant une résine d'imprégnation diluée dans un solvant. À la sortie, des racleurs et des rouleaux essoreurs éliminent l'excès de résine. En effet, nous avons indiqué qu'un des intérêts des préimprégnés est d'être à faible proportion de résine. Le fil ou tissu imprégné passe ensuite dans un four, où la plus grande partie du solvant s'évapore, et où s'amorce un début de polymérisation. A la sortie du four, le préimprégné est refroidi par ventilation, de manière à stopper la polymérisation qui doit rester inachevée. Le tissu est ensuite :

- soit enroulé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en rouleau,
- soit coupé et empilé entre deux feuilles de polyéthylène pour être livré en plaques. [1]

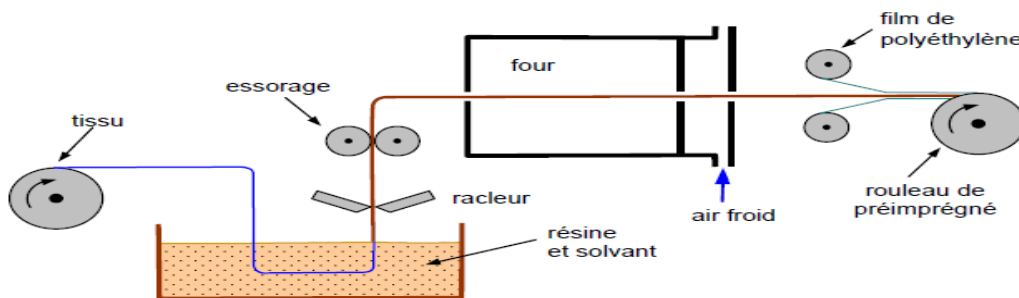


FIGURE I.23. Schéma de principe de l'élaboration d'un préimprégné. [1]

### I.6.2. Intérêt des préimprégnés

Les avantages essentiels des préimprégnés résident dans : [1]

- des performances mécaniques élevées du stratifié obtenu, résultant de la forte proportion de fibres;
- une amélioration des conditions de travail et de sécurité, du fait de la suppression des manipulations de résine et du dégagement de vapeurs toxiques;
- une automatisation possible par drapage, à l'aide d'automates ou de robots, permettant de diminuer les prix de revient des produits finis.

### I.6.3. Mise en œuvre

Les préimprégnés peuvent être mis en œuvre :

- par compression à chaud, puis cuisson;
- par moulage sous vide, avec cuisson dans des moules chauffants.

Après mise en place des préimprégnés dans le moule, sous l'action de la chaleur, la résine redevient fluide, puis durcit pour obtenir la pièce finale. [ 1]

## I.7. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

### I.7.1. Stratifiés

Les stratifiés sont constitués (FIGURE I.24) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Nous examinons les divers types de stratifiés. [1]

- **Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels**

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (FIGURE I.25) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche. [1]

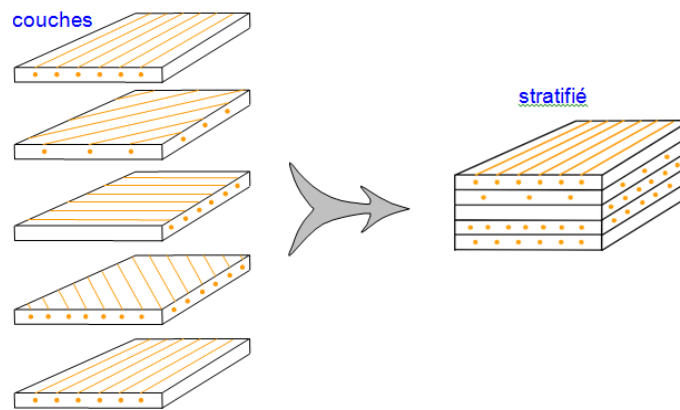


FIGURE I.24. Constitution d'un stratifié. [1]

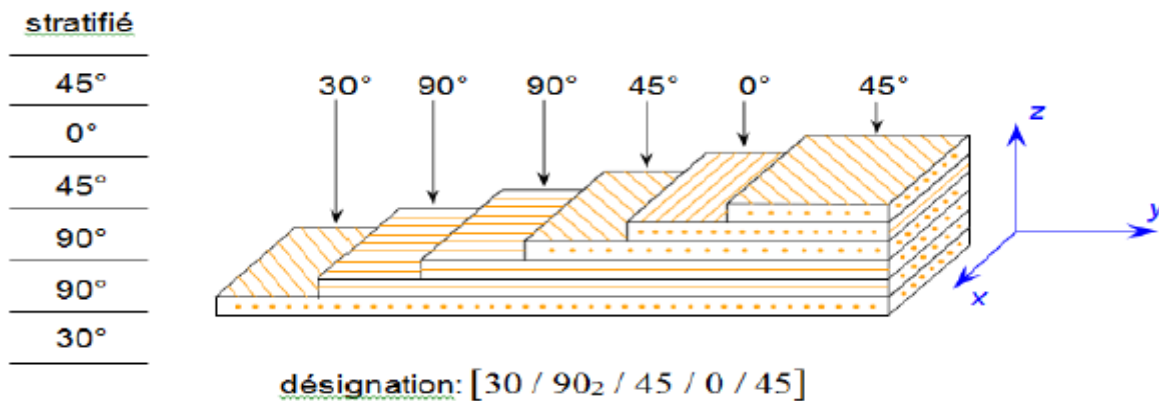


FIGURE I.25. Désignation d'un stratifié. [1]

### I.7.2 Structures en sandwich

Les pièces composites tissées ou stratifiées sont généralement minces. Par conséquent, elles ne résistent efficacement qu'aux sollicitations en membrane, c'est-à-dire dans leur plan, et résistent mal aux sollicitations hors plan (flexion et torsion). Pour concevoir des pièces rigides en flexion et en torsion, une technique couramment employée est celle des structures en sandwich, constituées de deux peaux (généralement stratifiées) collées sur une âme épaisse mais légère, comme une mousse de polymères ou un nid d'abeilles, à l'aide d'adhésifs (FIGURE I.26). [8]

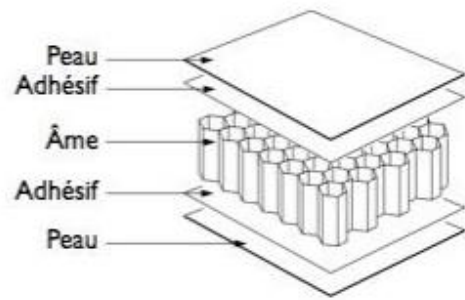
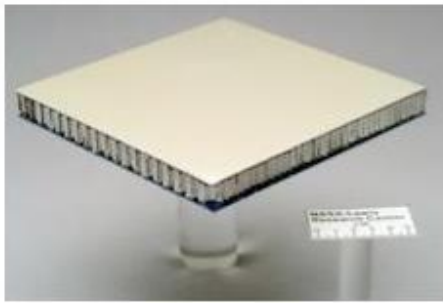


FIGURE I.26 : Une structure en sandwich et ses constituants. [8]

L'intérêt de cette disposition est encore une fois de mettre la matière là où elle est nécessaire lorsqu'un tel « sandwich » est sollicité en torsion ou en flexion, les peaux travaillent essentiellement en membrane, tandis que l'âme travaille essentiellement en cisaillement hors plan (et à des niveaux de contrainte bien plus faibles). Il est ainsi possible d'obtenir des pièces ultralégères, résistantes et rigides en flexion et en torsion, comme le montre le tableau comparatif de la FIGURE I.27.

Rigidité relative	1.0	7.0	37.0
Résistance relative	1.0	3.5	9.2
Masse relative	1.0	1.03	1.06

FIGURE I.27. Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion (rigidité et résistance) et des masses de trois structures : une plaque et deux sandwichs. [8]

## I.8. RECOMMANDATION POUR LA FORMULATION

Le stratifié est le résultat de l'imprégnation de la résine dans les fibres. Sur le tissu se trouvent des agents chimiques qui favorisent cette imprégnation. Il faut donc faire attention au stockage et à la manipulation des tissus pour ne pas dégrader ces propriétés chimiques.

Une grandeur importante est la quantité de résine nécessaire à l'imprégnation d'un tissu donné. On estime que la quantité de résine nécessaire représente environ 65% du volume final du stratifié. Compte tenu des densités différentes des fibres, cela donne une consommation différente suivant le type de fibre. [S1]

Exemple:

Les proportions typiques des quantités de résines pour un tissu :

- 1m<sup>2</sup> de tissu de verre de 100 gr/m<sup>2</sup> va nécessiter 80 gr de résine.
- 1m<sup>2</sup> de tissu de carbone de 100 gr/m<sup>2</sup> va nécessiter 115 gr de résine.
- 1m<sup>2</sup> de tissu de kevlar de 100gr/m<sup>2</sup> va nécessiter 140 gr de résine.

Ce qui donne en fraction volumique :

- $V_f = (35\text{à}40) \%$

- $V_f = (65 \text{ à } 60) \%$

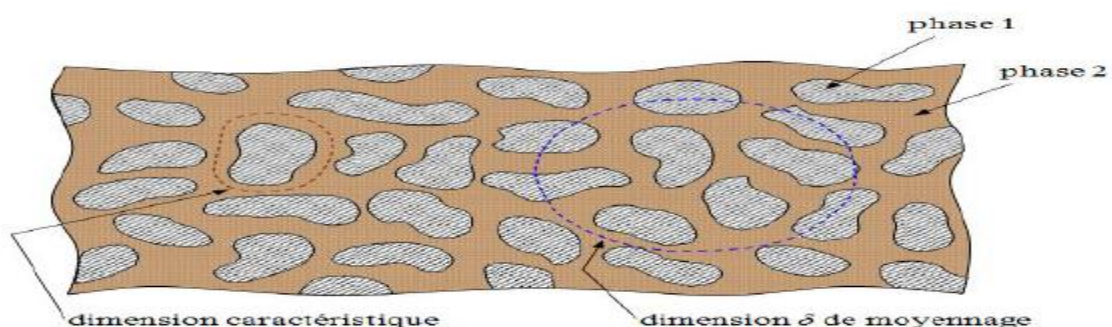
Et dans la pultrusion, on a une possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume.

### I.9. CONCEPT D'HOMOGENEISATION D'UN MATERIAU COMPOSITE UNIDIRECTIONNEL

À une échelle suffisamment fine, tous les matériaux sont hétérogènes, même les matériaux dits homogènes. Pour s'en convaincre, il suffit de partir de l'échelle des atomes et des molécules. Si les matériaux usuels de l'ingénieur devaient être caractérisés à cette échelle d'observation, la tâche serait insurmontable. Pour contourner cette difficulté, l'ingénieur introduit l'hypothèse de continuité de la matière. Cette hypothèse implique un concept de moyenne statistique, dans lequel la constitution réelle du matériau est idéalisée en considérant le matériau comme étant continu. Une fois le modèle de continuité admis, le concept d'homogénéité s'en déduit. Un milieu homogène est alors caractérisé par des propriétés identiques en chaque point. [1]

Au niveau de l'ingénieur, le caractère d'hétérogénéité intervient chaque fois que les propriétés physiques ou mécaniques du matériau sont des fonctions du point. Les variations des propriétés peuvent être de deux types soit continues, soit discontinues comme dans le cas des matériaux composites et dans ce cas, les propriétés ponctuelles du matériau varient d'une manière discontinue aux interfaces de passage entre les diverses phases. [1]

Dans le cas d'une phase 1 dispersée dans une phase 2 (**FIGURE I.28**), il existe généralement une dimension caractéristique de l'hétérogénéité. Par exemple, dans le cas d'un matériau composite à fibres, cette dimension sera la distance moyenne entre les fibres. Cette dimension est en fait une description idéalisée d'une répartition statistique au sein du matériau hétérogène réel. D'autre part, il existe généralement une échelle de dimension  $\delta$  à laquelle les propriétés du matériau peuvent être moyennées avec une bonne approximation. Dans le cadre d'un tel concept, le matériau peut alors être considéré comme étant effectivement homogène, et les problèmes de calculs des structures peuvent être résolus en considérant les propriétés moyennes mesurées à l'échelle  $\delta$ . On parle alors d'*homogénéité macroscopique* (par opposition à l'échelle des constituants dite microscopique), ou d'*homogénéité statistique*. Le concept de rendre "homogène" un matériau "hétérogène" est appelé le concept d'*homogénéisation*. [1]



**FIGURE I.28. Homogénéisation d'un matériau hétérogène. [1]**

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposées dans une matrice (**FIGURE I.29 a**). Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres, d'où l'importance de son étude. La cellule élémentaire d'un tel matériau peut être considérée, en première approximation, comme constituée (**FIGURE I.29 b**) d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice, à base circulaire ou mieux hexagonale. Cette cellule possède un axe de révolution, que nous noterons l'axe 1. Cette direction parallèle aux fibres est appelée *direction longitudinale*, et

pour cette raison l'axe 1 est également noté l'axe  $L$ . Toute direction normale aux fibres est appelée *direction transversale*, et le composite est considéré comme étant isotrope transverse, il est isotrope dans le plan normal à la direction 1. Le plan transverse sera repéré par les directions 2 et 3, notées également  $T$  et  $T'$ , ces directions étant.

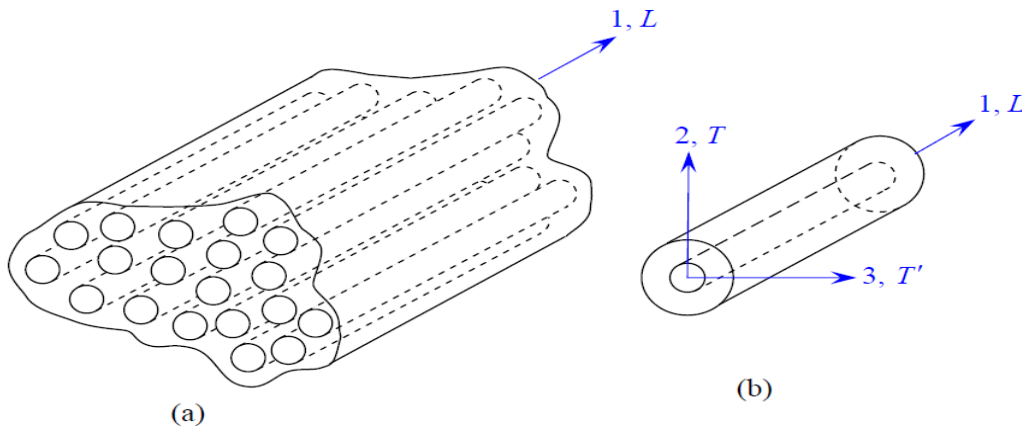


FIGURE I.29. Composite unidirectionnel. [1]

Par mécanisme de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée *fissure*. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture et de propagation de la rupture. L'initiation de la rupture peut être considérée comme la création de microfissures à l'échelle microscopique à partir d'un défaut. On parlera de *microfissuration*. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique à partir des microfissures existantes. On parlera également de *macrofissuration*. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique. [1]

## I.10. MECANISMES DE RUPTURE DANS LES MATERIAUX COMPOSITES

### I.10.1. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres,
- la rupture de la matrice,
  - la rupture transverse de la matrice,
  - la rupture longitudinale de la matrice,
  - la rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées. [1]

#### I.10.1.1. la rupture des fibres

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction  $\sigma_f$  dans une fibre atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{ri}$  de la fibre. La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la

matrice à absorber l'énergie libérée, des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc. La Figure I.30 montre les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre. [1]

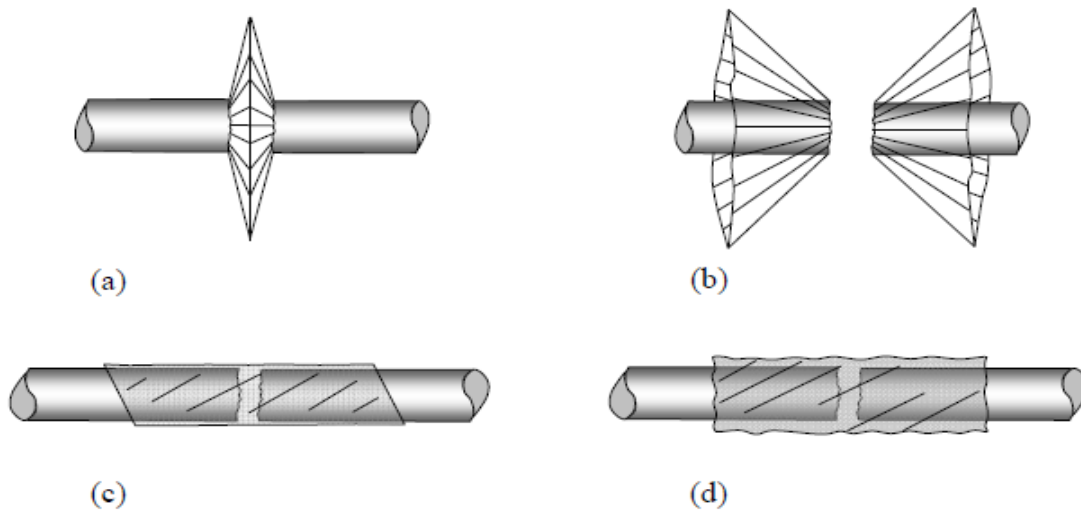


FIGURE I.30. Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre. [1]

(a) Rupture transverse de la matrice ; (b) Rupture en cisaillement de la matrice ;  
(c) Décohésion de l'interface fibre-matrice ; (d) Rupture longitudinale de la matrice.

### I.10.1.2. la rupture de la matrice

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par *fissuration transverse* (FIGURE I.31) lorsque la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice, soit par *fissuration longitudinale* (FIGURE I.32) lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture  $\tau_{mu}$ , généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture, appelé “**splitting**” par les anglo-saxons, se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice :  $\tau_d > \tau_{mu}$ . Dans le cas contraire où  $\tau_d < \tau_{mu}$ , il se produit une *rupture par décohésion* de l'interface fibre-matrice (FIGURE I.33).

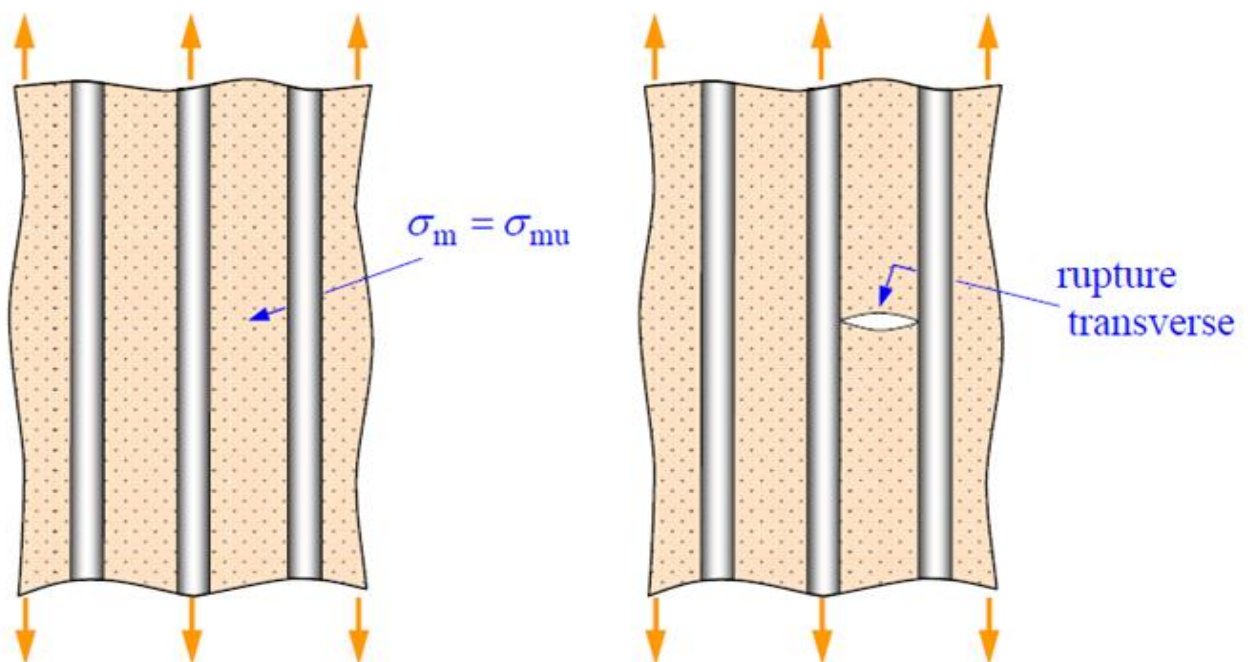


FIGURE I.31. Rupture transverse de la matrice. [1]

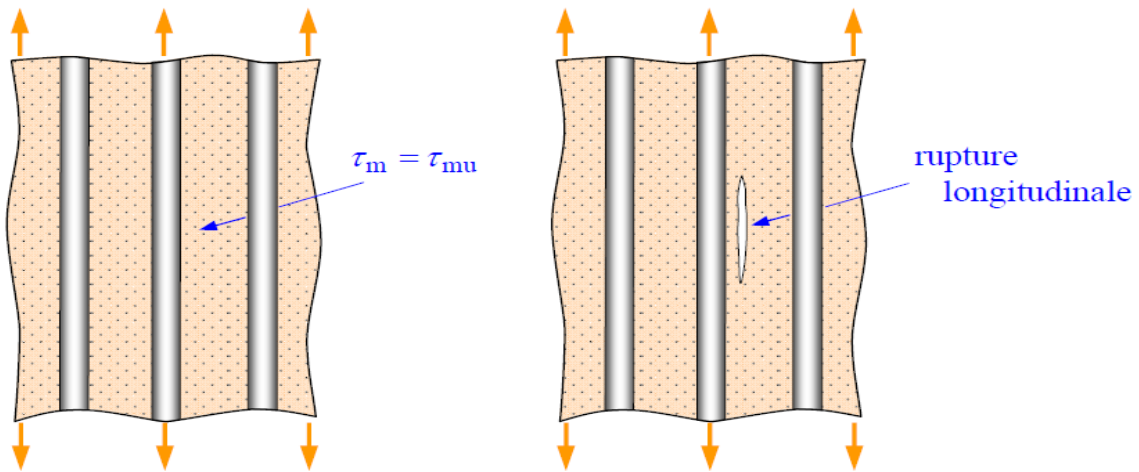


FIGURE I.32. Rupture longitudinale de la matrice. [1]

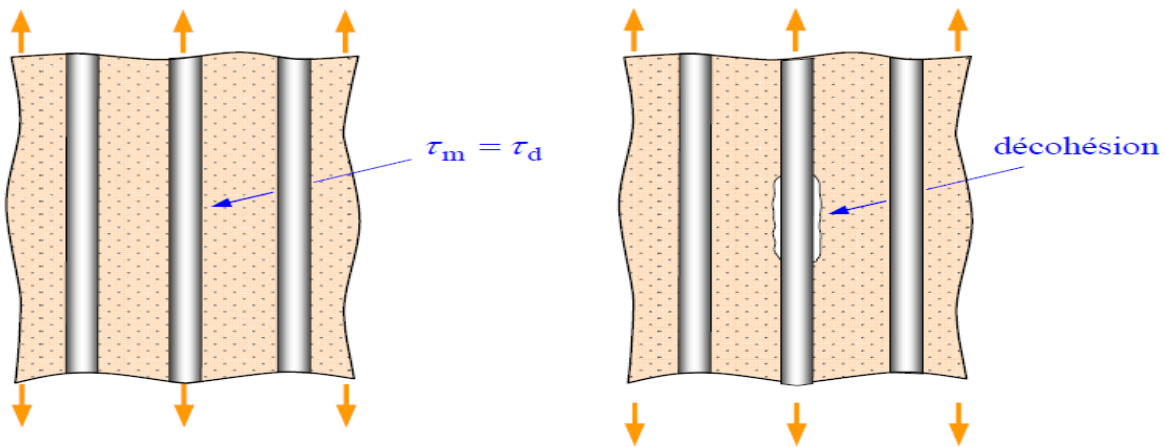


FIGURE I.33. Décohésion fibre-matrice. [1]

La rupture finale d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ces divers mécanismes élémentaires. L'initiation, puis la propagation de la rupture dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, de l'interface fibre-matrice, de la fraction volumique des fibres, de l'état et des conditions de sollicitations mécaniques imposées.

### I.10.2. Mécanisme de rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ( $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ ), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire. [1]

Dans le cas où  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ , les courbes contrainte-déformation sont schématisées sur la figure I.34. Généralement, l'expression retenue pour la contrainte à la rupture du composite est la loi des mélanges :

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} * Vf + \sigma_{mu} * (1 - Vf) \quad (I.1)$$

où  $\sigma_{cu}$  est la contrainte à la rupture du composite,  $\sigma_{fu}$  la contrainte à la rupture des fibres et  $\sigma_{mu}$  la contrainte dans la matrice.

Et pour les fractions usuelles de fibres ( $Vf$ ):

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} * V_f. \tag{I.2}$$

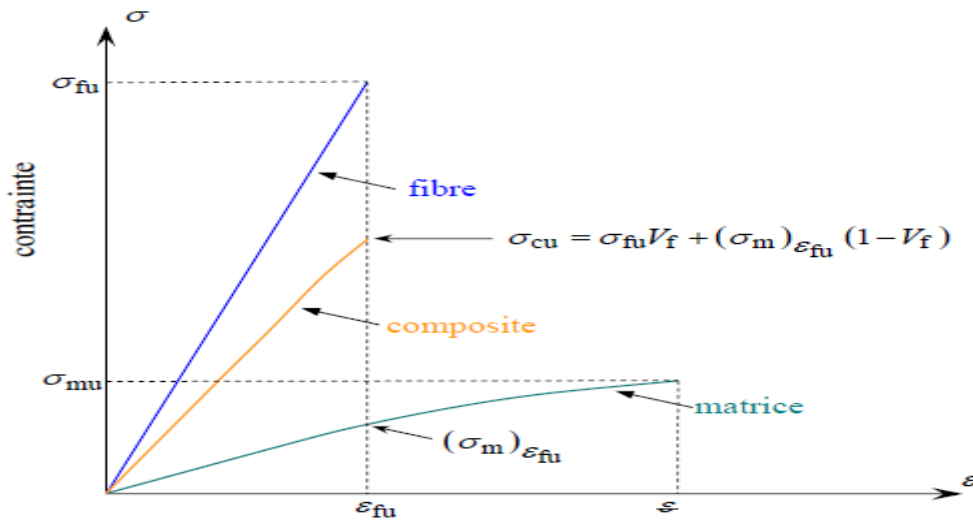


FIGURE I.34. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ . [1]

Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres, la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_{cu} = (\sigma_f)_{\epsilon_{mu}} * V_f + \sigma_{mu} * (1 - V_f) \tag{I.3}$$

où  $(\sigma_f)_{\epsilon_{mu}}$  est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice.

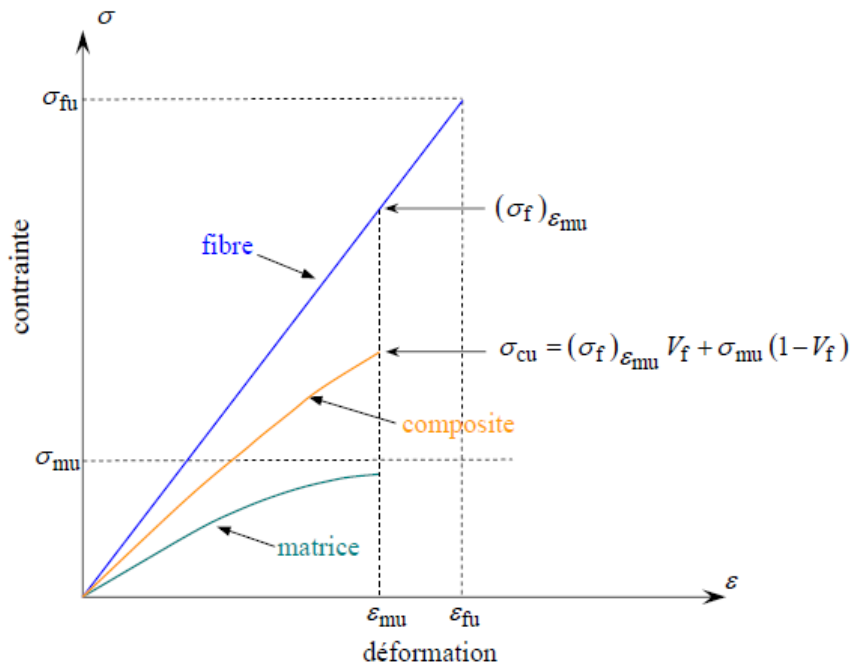


FIGURE I.35. Courbe contrainte-déformation d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, dans le cas où  $\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$ . [1]

Après initiation, la propagation de la rupture diffère suivant la nature de l'interface fibre-matrice. Dans le cas d'une adhérence fibre-matrice élevée, la rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (**figure I.36.a**). La rupture observée est de type fragile (**figure I.36.b**). Il est également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre-matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (**figures I.36.c et I.36.d**). [1]

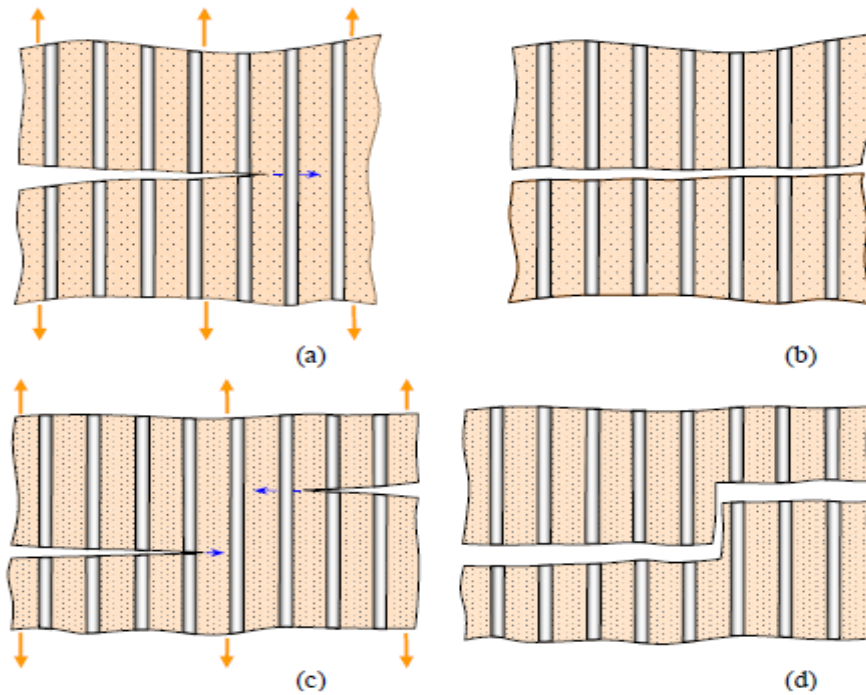


FIGURE I.36. Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre-matrice. [1]

Dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice, la propagation transverse de la fissuration peut être schématisée de la manière suivante. En tête de fissure, la rupture de la matrice traverse les fibres (figure.I.37), sans qu'il y ait rupture des fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice. Dans certains cas, les concentrations de contraintes en tête de fissure peuvent conduire (figure.I.37) à une décohésion fibre-matrice avant rupture transverse de la matrice. [1]

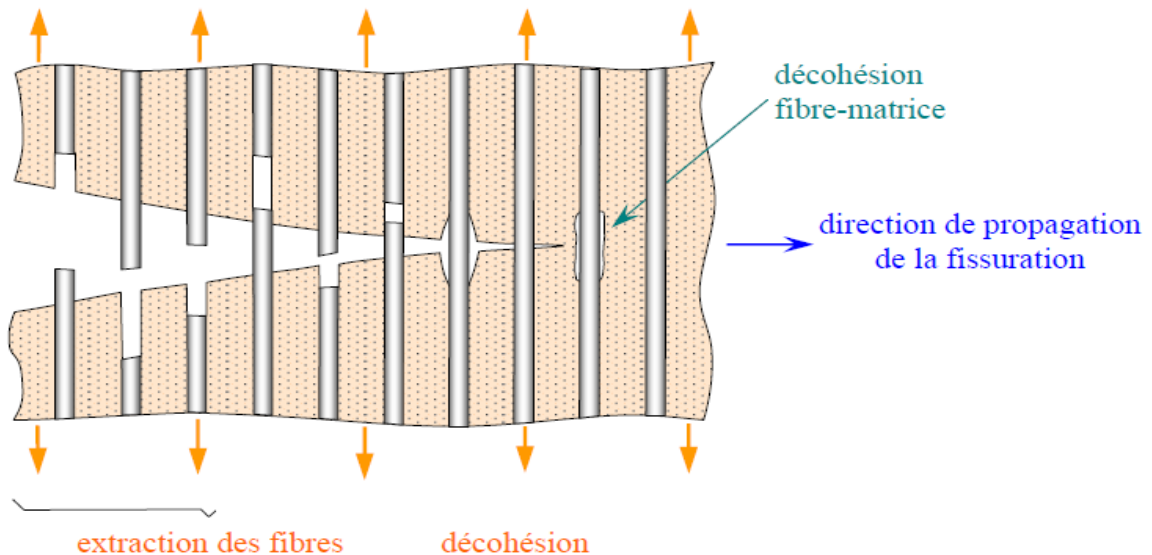


FIGURE I.37. Propagation de la rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice. [1]

En arrière, l'ouverture de la fissure induit des contraintes élevées dans les fibres pontant la fissure. Ces contraintes provoquent la rupture des fibres à une distance plus ou moins proche de la surface de rupture. La fissure continuant de progresser, les fibres rompues sont extraites de la fissure au fur et à mesure de la progression de la fissure. Le pontage des fissures transversales peut

se faire par propagation de la rupture à l'interface fibre-matrice, conduisant à un profil plus ou moins en escalier de la surface de rupture (figure I.38). [1]

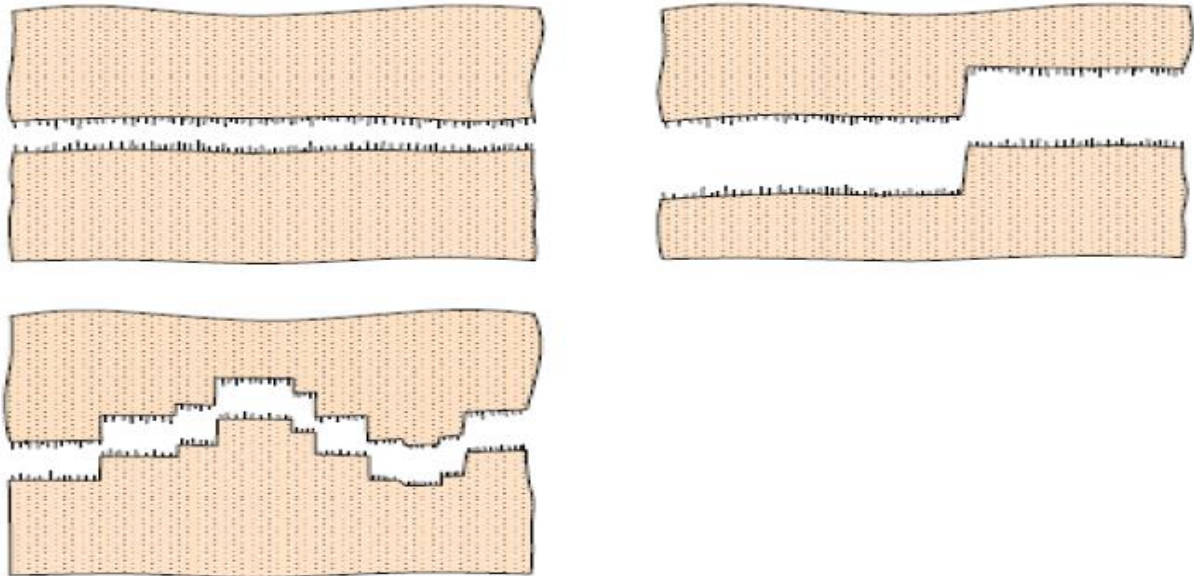


FIGURE I.38. Surfaces de rupture dans le cas d'une faible adhérence fibre-matrice. [1]

### I.10.3. Mécanisme de rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse, la rupture se produit soit par rupture de la matrice, soit par décohésion de l'interface fibre-matrice, suivant les caractéristiques à la rupture de la matrice et de l'interface. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice. Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est inférieure à la contrainte de décohésion  $\sigma_d$  en traction de l'interface fibre-matrice. Dans le cas contraire où  $\sigma_{mu} > \sigma_d$ , la rupture du composite se produit par rupture de l'interface fibre-matrice. Après initiation, la rupture se propage dans le matériau composite suivant une surface plus ou moins plane, dépendant des caractéristiques du matériau.[1]

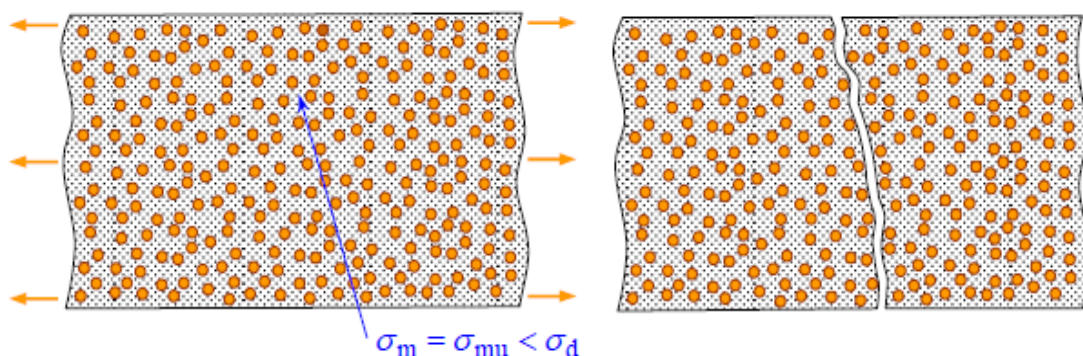


FIGURE I.39. Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transverse. [1]

### I.10.4. Rupture des stratifiés

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinale de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibres), s'ajoute un mécanisme de rupture entre les couches, appelé rupture par *délamination*. Les

mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé. [1]

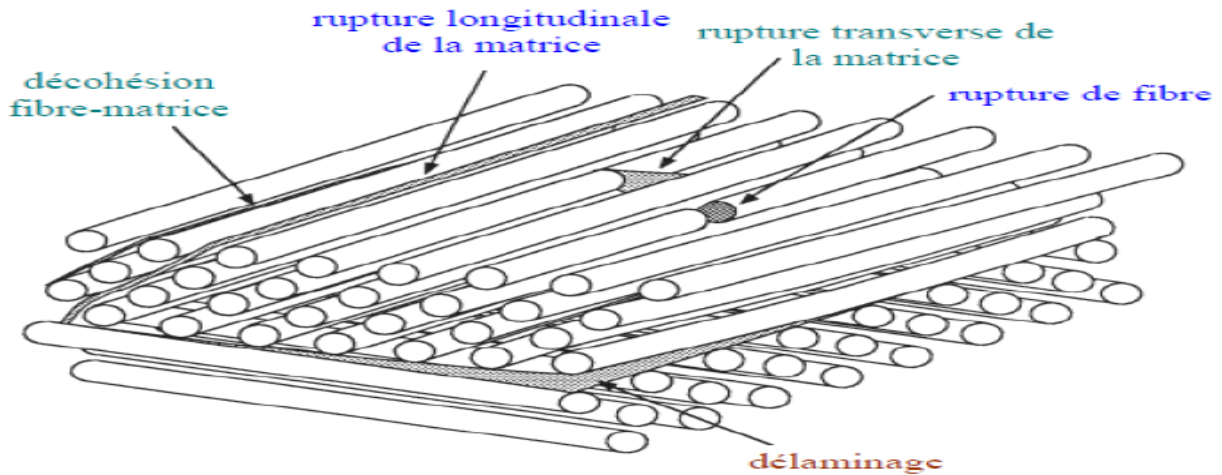


FIGURE I.40. Mécanismes de rupture observés dans les stratifiés. [1]

Par exemple, dans le cas d'un stratifié croisé soumis à une traction dans la direction  $0^\circ$ , le premier phénomène de rupture observé est celui de la fissuration des couches orientées à  $90^\circ$ . La fissuration se produit par rupture longitudinale de la matrice ou/et par rupture de l'interface fibre-matrice dans les couches orientées à  $90^\circ$ . Cette fissuration conduit à la formation de fissures orientées transversalement à la direction du chargement mécanique. Ainsi, cette fissuration initiale des couches à  $90^\circ$  est appelée fissuration transverse du stratifié croisé. Lorsque le chargement mécanique est augmenté, le nombre de fissures croît jusqu'à atteindre un état de saturation de la fissuration. Les fissures transverses créent en pointes de fissures, entre les couches orientées à  $90^\circ$  et à  $0^\circ$ , des concentrations de contraintes qui conduisent à l'initiation puis à la propagation du délaminage à l'interface entre les couches. Ce délaminage se développe ensuite jusqu'à la rupture finale du stratifié par rupture des fibres et de la matrice dans les couches à  $0^\circ$ . La figure 12.14 montre l'aspect final de la surface après rupture. [1]

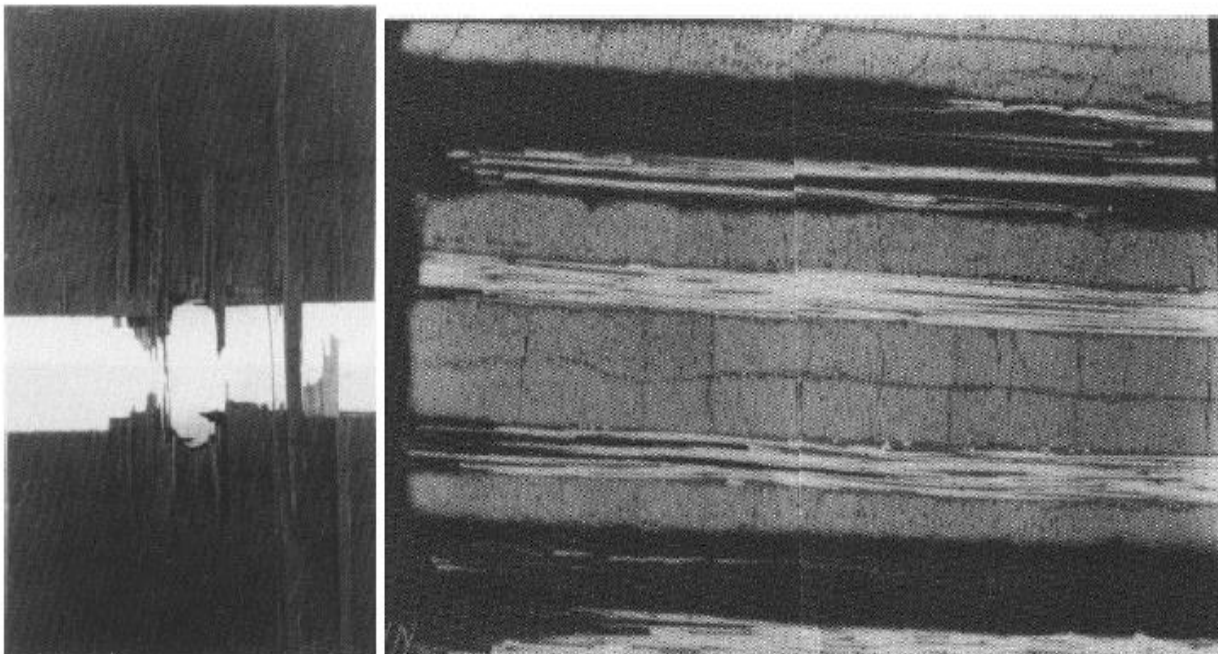


FIGURE I.41. Rupture en présence d'un trou d'un composite  $[0^\circ/90^\circ]_2S$  à fibres de carbone. (haut) Rupture macroscopique au droit du trou Bord de l'éprouvette loin du trou les couches à  $90^\circ$  sont microfissurées (Document ONERA). [1]

Dans le cas d'un stratifié croisé  $\pm 45^\circ$ , soumis à une traction longitudinale dans la direction  $0^\circ$ , on observe d'abord une rupture longitudinale dans les couches à  $\pm 45^\circ$ , suivie d'un délaminage entre les couches. La figure suivante donne un exemple de rupture observé dans ce cas. [1]

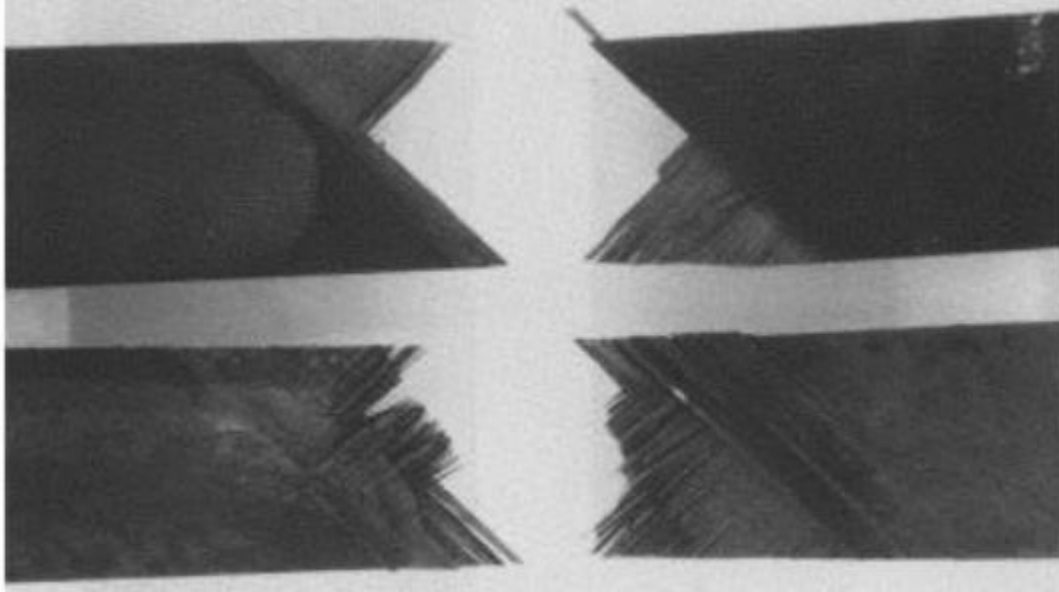


FIGURE I.42. Rupture d'un composite  $[\pm 45^\circ]_2S$  à fibres de carbone. [1]

Un autre exemple intéressant est celui d'une plaque trouée, constituée d'un stratifié  $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$  et soumise à une traction dans la direction  $0^\circ$  (figure I.43a). Plusieurs phases de fissuration sont observées dans ce cas. Dans une première phase, il se produit une fissuration longitudinale de la matrice dans les couches à  $90^\circ$  (figure I.43b). Dans une deuxième phase, on observe l'initiation de la fissuration dans les couches à  $\pm 45^\circ$ , à partir des fissures propagées dans les couches à  $90^\circ$ , avec une propagation limitée de ces fissures à  $\pm 45^\circ$  (figure I.43c). La troisième phase est marquée par l'apparition de fissures longitudinales, partant du trou, dans les couches à  $0^\circ$ . Ces fissures génèrent également des fissures secondaires à  $\pm 45^\circ$  (figure I.43d). Dans la dernière phase, les fissures à  $0^\circ$  produisent un délaminage des couches, suivi de la rupture des couches à  $90^\circ$ , puis des couches à  $45^\circ$ , et enfin d'une rupture des fibres dans les couches à  $0^\circ$ , conduisant à la rupture finale de la plaque. [1]

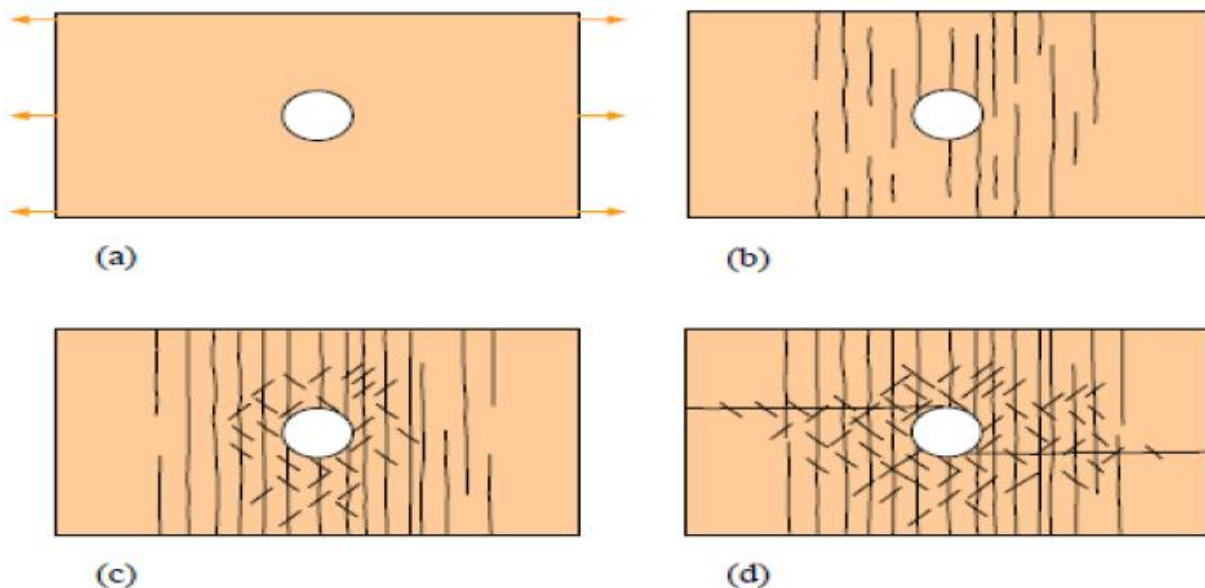


FIGURE I.43. Fissuration d'un stratifié  $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$ . (a) Plaque avec un trou en son centre soumise à une charge de traction; (b) 1ère phase: fissuration dans les couches à  $90^\circ$ ; (c) 2ème phase: fissuration dans les couches à  $\pm 45^\circ$ ; (d) 3ème phase: rupture dans les couches à  $0^\circ$ . [1]

## I.11. CRITERES DE RUPTURE DE MATERIAU COMPOSITE

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre au concepteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des stratifiés. D'une manière générale, la résistance mécanique d'un matériau correspond à une dégradation irréversible : soit à la rupture réelle du matériau (figure I.44a), soit à la limite du domaine élastique (figure I.44b). Dans le cas des matériaux composites, la limite du domaine élastique est généralement liée à l'apparition de la microfissuration: microruptures dans la matrice, ruptures de fibres, décohésion fibres-matrice, etc. Une fois initiées, ces microfissures restent généralement localisées, ne modifiant que très progressivement la rigidité du matériau. [1]

Les critères de rupture sont établis dans le cas d'une couche d'un stratifié et peuvent être classés suivant :

- des critères en contraintes maximales,
- des critères en déformations maximales,
- des critères interactifs, souvent appelés critères énergétiques.

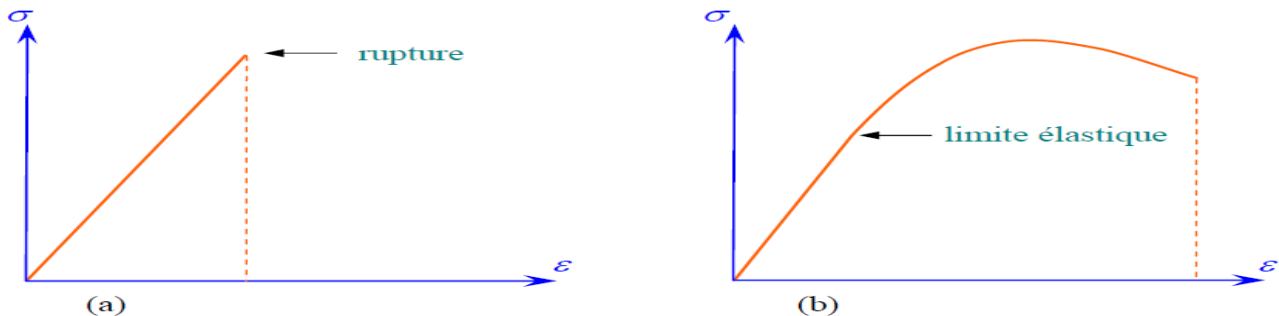


FIGURE I.44. Comportements fragile et "ductile" d'un matériau. [1]

### I.11.1. Critères en contraintes maximales.

Les critères en contraintes maximales s'écrivent sous la forme: [1]

$$-X_c < \sigma_L < X_t \quad (I.4)$$

$$-Y_c < \sigma_T < Y_t \quad (I.5)$$

$$-S < \sigma_{LT} < S \quad (I.6)$$

$X_t, X_c$  : les contraintes à la rupture suivant l'axe longitudinal respectivement en traction et en compression,

$Y_t, Y_c$  : les contraintes à la rupture suivant l'axe transversal respectivement en traction et en compression,

$S$  : la contrainte à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

Si les six inéquations sont vérifiées, l'état de contraintes limite n'est pas atteint c'est-à-dire la rupture de la couche ne se produit pas. Si l'une des inéquations n'est plus vérifiée, l'état limite est atteint c'est-à-dire la rupture se produit suivant le mécanisme correspondant à la contrainte de l'inéquation non vérifiée.

### I.11.2. Critères en déformations maximales.

Les critères en déformations maximales sont transposés des critères en contraintes maximales, les déformations étant bornées, au lieu des contraintes. Les critères en déformations font intervenir : [1]

$X_{\epsilon t} (X_{\epsilon c})$  : la déformation à la rupture en traction (ou compression) suivant l'axe longitudinal,

$Y_{\varepsilon t}$  ( $Y_{\varepsilon c}$ ) : la déformation à la rupture en traction (ou compression) suivant l'axe transversal,

$S_{\varepsilon}$  : la déformation à la rupture en cisaillement dans le plan de la couche.

La résistance mécanique est alors considérée comme étant atteinte, lorsque l'une des déformations principales atteint la déformation à la rupture correspondante.

Les critères en déformations maximales s'écrivent donc sous la forme :

$$-X_{\varepsilon c} < \varepsilon L < X_{\varepsilon t} \quad (I.7)$$

$$-Y_{\varepsilon c} < \varepsilon T < Y_{\varepsilon t} \quad (I.8)$$

$$-S_{\varepsilon} < \varepsilon LT < S_{\varepsilon} \quad (I.9)$$

Les critères en déformations maximales doivent conduire à des valeurs identiques à celles trouvées avec le critère de contrainte maximale dans le cas d'une traction (ou compression) longitudinale :  $\theta = 0^\circ$  et dans le cas d'une traction (ou compression) transversale :  $\theta = 90^\circ$ . Ceci implique que :

$$X_{\varepsilon t} = \frac{X_t}{E_L}, \quad X_{\varepsilon c} = \frac{X_c}{E_L},$$

$$Y_{\varepsilon t} = \frac{Y_t}{E_T}, \quad Y_{\varepsilon c} = \frac{Y_c}{E_T}.$$

D'autre part, l'identité du critère de rupture en cisaillement dans les deux cas conduit à :

$$S_{\varepsilon} = \frac{S}{G_{LT}}$$

### I.11.3. Critères interactifs

Les critères en contraintes maximales et en déformations maximales ne permettent pas de rendre compte de l'ensemble des résultats expérimentaux. D'autre part, ces critères excluent l'existence d'interactions entre les contraintes ou déformations dans les axes des matériaux : les mécanismes de rupture longitudinale, transversale ou en cisaillement sont supposés se produire indépendamment.

Des critères **interactifs** ont alors été recherchés en étendant aux matériaux orthotropes le critère de Von Mises, utilisé pour les matériaux isotropes. Le critère de Von Mises est relié à l'énergie de déformation emmagasinée par unité de volume du matériau déformé. C'est la raison pour laquelle ces critères interactifs sont parfois appelés critères énergétiques. Toutefois, dans le cas de matériaux orthotropes, ces critères ne sont plus reliés exclusivement à l'énergie de déformation. [1]

#### I.11.3.1. Critère de Hill

Un des premiers critères interactifs de rupture appliqués aux matériaux anisotropes a été introduit par R. Hill. Ce critère peut être formulé en disant que l'état limite de contraintes d'un matériau anisotrope n'est pas atteint tant que l'inégalité suivante est vérifiée : [1]

$$F * (\sigma T - \sigma T')^2 + G * (\sigma T' - \sigma L)^2 + H * (\sigma L - \sigma T)^2 + 2 * L * \sigma^2 T T' + 2 * M * \sigma^2 L T' + 2 * N * \sigma^2 L T < 1 \quad (I.10)$$

La rupture du matériau se produit donc lorsque l'égalité est vérifiée, soit :

$$F * (\sigma T - \sigma T')^2 + G * (\sigma T' - \sigma L)^2 + H * (\sigma L - \sigma T)^2 + 2 * L * \sigma^2 T T' + 2 * M * \sigma^2 L T' + 2 * N * \sigma^2 L T = 1 \quad (I.11)$$

Après détermination les paramètres de rupture  $F$ ,  $G$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$  et dans le cas des contraintes planes le critère de Hill s'écrit sous la forme:

$$\left(\frac{\sigma L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma T}{Y}\right)^2 - \left(\frac{1}{X} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2}\right) \sigma L * \sigma T + \left(\frac{\sigma LT}{SLT}\right)^2 = 1 \quad (I.12)$$

### I.11.3.2. Critère de Tsai-Hill

Le critère de rupture précédent (Critère de Hill) en contraintes planes a été simplifié par V.D. Azzi et S.W. Tsai dans le cas de matériaux composites unidirectionnels. En effet, dans ce cas :  $Z = Y$ , et le critère s'écrit :

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{SLT^2} - \frac{1}{X^2}\right) \sin^2 \theta * \cos^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma^2_{xx}} \quad (I.13)$$

### I.11.3.3. Critère de Hoffman

Une généralisation du critère de Hill, tenant compte de la différence du comportement des matériaux en traction et en compression, a été formulée par O.Hoffman. Le critère de Hoffman admet que la rupture du matériau se produit lorsque l'égalité suivante est vérifiée.

$$\frac{\sigma L^2}{Xt * Xc} + \frac{\sigma T^2}{Yt * Yc} - \frac{\sigma L * \sigma T}{Xt * Xc} + \frac{Xc - Yt}{Yt * Yc} \sigma T + \frac{\sigma LT^2}{S^2 LT} = 1 \quad (I.14)$$

### I.11.3.4. Théorie générale de Tsai-Wu

Les critères précédents suffisent généralement pour décrire les divers résultats expérimentaux observés. Toutefois, une des façons d'améliorer la corrélation entre résultats expérimentaux et théoriques est d'accroître le nombre de paramètres des équations théoriques. Ce fait, associé à la possibilité de représenter les critères de rupture sous forme tensorielle, a conduit S.W. Tsai et E.M. Wu à admettre que la rupture d'un matériau anisotrope est atteinte lorsque l'égalité suivante est vérifiée :

$$\left(\frac{1}{Xt} - \frac{1}{Xc}\right) \sigma L + \left(\frac{1}{Xt} - \frac{1}{Xc}\right) \sigma T + \frac{\sigma L^2}{Xt * Xc} + \frac{\sigma T^2}{Xt * Xc} + \frac{\sigma LT^2}{S^2 LT} - \frac{\sigma L * \sigma T}{Xt * Xc} = 1 \quad (I.15)$$

## I.12. CONCLUSION

Dans cette partie, on a vu des généralités sur les matériaux composites, et nous on va se baser sur cette partie pour choisir les matériaux qui nous intéressent pour notre projet avec justification de ce choix. De plus, il nous a permis de voir les différents critères de rupture parmi lesquels nous allons faire le choix de celui qui répond aux critères de rupture de notre projet, par lesquels on crée notre base de donné pour faire le dimensionnement de balcon dans les prochains chapitres puisque il n'y a pas un règlement ou un code pour les matériaux composites comme BAEL pour le béton.



---

# CHAPITRE II

---

**PRESENTATION DU PROJET ET HYPOTHESES  
DE CALCULS.**



## CHAPITRE II. PRESENTATION DU PROJET ET HYPOTHESES DE CALCULS.

### II.1. INTRODUCTION

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans plusieurs domaines comme l'aéronautique, l'automobile, l'équipement sportif et aussi en génie civil grâce à leurs caractéristiques et leurs performances. Dans ce travail, on s'intéresse au domaine de génie civil et plus particulièrement à la construction des balcons pour les bâtiments. Il s'agit d'un plancher de balcon qui est peu développé par les matériaux composites, et donc l'objectif de notre projet est de faire une étude de faisabilité de balcon à base de matériau composite. Pour ce faire, on commence par la présentation du projet après les choix des matériaux et calculs de leurs caractéristiques et aussi on fait un redimensionnement et après le calcul des charges et les critères de dimensionnement et on clôture ce chapitre par une conclusion.

### II.2. PRESENTATION Du PROJET ET DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

C'est un balcon mixte constitué de plancher en matériau composite et une poutre en acier, et il est désolidarisé car on n'a pas la continuité avec le bâtiment. Et les ossatures juxtaposées et reliées entre elles par des organes de fixation, avec un type de balcon en porte à faux. C'est un projet proposé par la société Méca à l'ICAM. Et ce projet a été réalisé dans le département de génie civil à Nantes

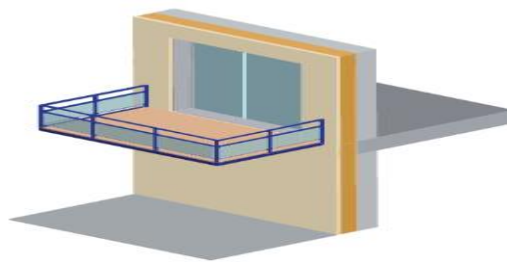


FIGURE II.1. Balcon en porte à faux. [9]

### II.3. AVANTAGE DE CES TYPES DE BALCONS

Il permet l'utilisation des isolants thermiques à l'extérieur ce qui permet de diminuer les déperditions à travers les ponts thermiques et par conséquent l'augmentation des performances thermiques de bâtiment ; par contre, dans les balcons traditionnels où les ponts thermiques peuvent être des sources de pathologie (condensation superficielle).

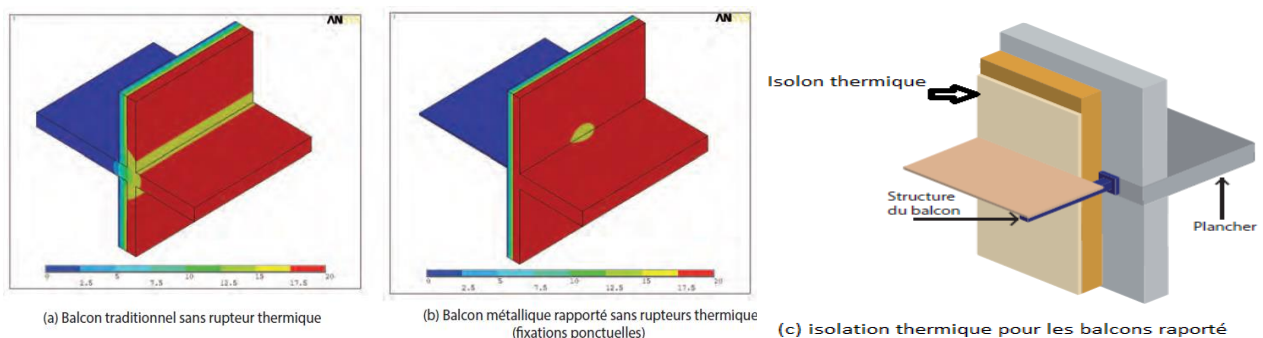


FIGURE II.2. Déperdition des ponts thermique et leur isolation pour les balcons en porte à faux. [9]

### II.4. PRINCIPE CONSTRUCTIF

**Structure métallique :** poutre tubulaire en acier avec une section de 120\*120mm, 150\*100mm ou 200\*100mm avec un acier de nuance S235 ou S275 fixé par le maître d'ouvrage.

**Matériau composite:** on utilise un matériau composite de fibre /résine fabriqué soit en:

- Pulturdé avec résine chargée feu.
- Pulturdé en âme et peaux.

## II.5. CHOIX DES MATERIAUX

Pour l'élément métallique on choisit un acier de type S235 avec une section (200\*100) mm puisque cette section à une meilleure caractéristique.

Pour la plaque en matériau composite on choisit comme un mode de fabrication le deuxième choix pulturdé en âme et peaux avec un renfort la fibre de verre type **E** puisqu'elle est la plus utilisée dans la pratique grâce à leur prix moins cher par rapport aux autres fibres et en plus il offre une très bonne résistance et des caractéristiques adaptées à notre cas (mode de fabrication), et pour la matrice on choisit la résine polyester puisqu'elle est moins chère par rapport aux autres résines et offre des caractéristiques mécaniques acceptables et en plus sa bonne compatibilité avec la fibre de verre et la méthode de réalisation (la pultrusion). Toutefois cette résine a comme inconvénients:

- Mauvaise résistance au feu qui peut être corrigé par l'utilisation d'une peinture spécifique contre le feu.
- Mauvaise étanchéité à l'eau et pour l'améliorer il faut utiliser une couche de gel-coat.

Et on choisit une fraction volumique des fibres égale à 0.6 ( $V_f=0.6$ ).

## II.6. PREDIMENSIONNEMENT

### a) La plaque en composite

On a deux variantes pour la longueur (longueur de la travée) 1 m et 1.45m et pour chaque longueur on fait plusieurs variantes de profondeur 1, 1.5 et 2m avec une hauteur de l'âme égale à 0.2m et un espacement entre les âmes égal à 0.15m et pour les épaisseurs on choisit une épaisseur de 1 cm pour les âmes et de 0.5cm pour les peaux afin d'optimiser ces épaisseurs.

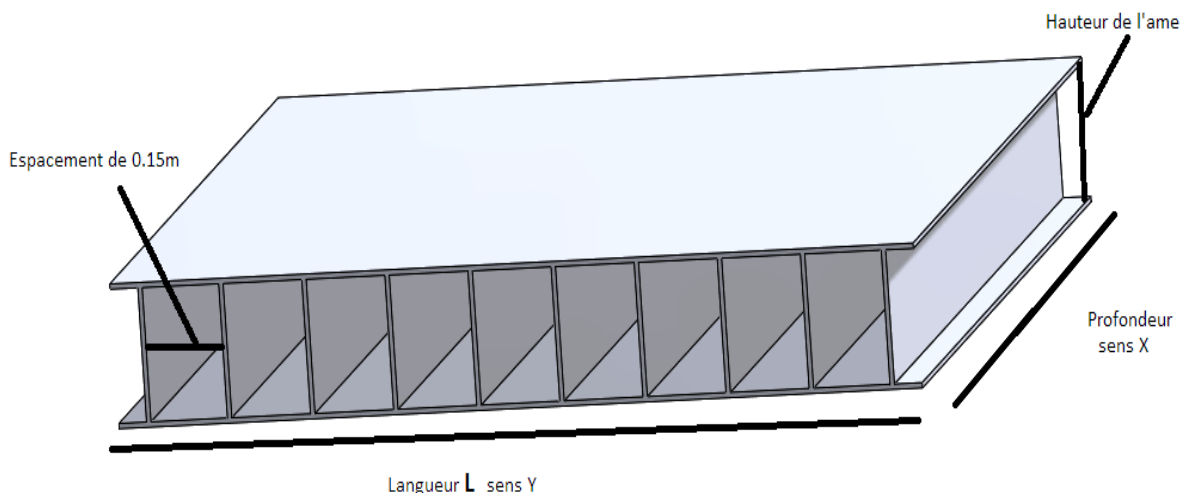


FIGURE II.3. Forme de la plaque.

### b) Le tube métallique

On choisit une nuance d'acier de S235 et le profilé 200\* 100 mm avec une épaisseur de 5 mm.

## II.7. HYPOTHESES DE LA THEORIE DES SANDWICHES

Un matériau sandwich est constitué d'un matériau de faible masse volumique (l'âme) sur lequel sont collées des feuilles ou plaques (les peaux). La fonction essentielle de l'âme du sandwich est de transmettre, par cisaillement, les actions mécaniques d'une peau à l'autre. Dans le cas général, les peaux sont des stratifiés d'épaisseur  $h_1$  (peau inférieure) et d'épaisseur  $h_2$  (peau supérieure). L'épaisseur de l'âme sera notée  $h$ .

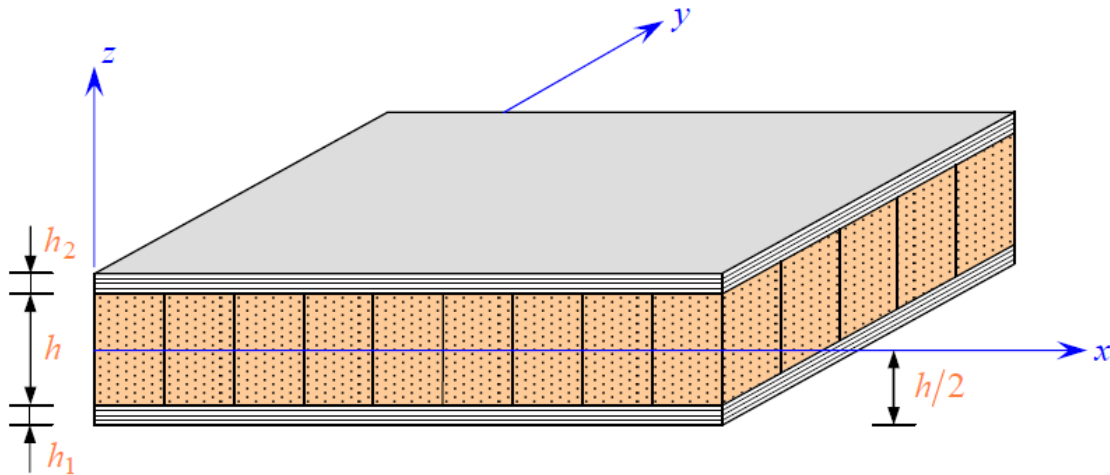


FIGURE II.4. Notations d'une plaque sandwich. [1]

La théorie des plaques sandwiches repose sur les hypothèses fondamentales suivantes :

1. L'épaisseur de l'âme est bien plus élevée que celle des peaux :  $h \gg h_1, h_2$ .
  2. Les déplacements de l'âme  $u_a$  et  $v_a$  suivant les directions  $x$  et  $y$  sont des fonctions linéaires de la coordonnée  $z$ .
  3. Les déplacements  $u$  et  $v$  suivant les directions  $x$  et  $y$  sont uniformes dans l'épaisseur des peaux.
  4. Le déplacement transverse  $w$  est indépendant de la variable  $z$  : la déformation  $\epsilon_{zz}$  est négligée.
  5. L'âme ne transmet que les contraintes de cisaillement transverse  $\sigma_{xz}, \sigma_{yz}$  : les contraintes  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$  et  $\sigma_{zz}$  sont négligées.
  6. Les contraintes de cisaillement transverse  $\sigma_{xz}$  et  $\sigma_{yz}$  sont négligées dans les peaux.
- Enfin, la théorie traite les problèmes d'élasticité de faibles déformations.

Notre plaque est similaire à la plaque sandwich alors on peut utiliser la théorie des plaques sandwiches dans notre cas.

## II.8. DEFINITION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES

### II.8.1 Caractéristiques de matériau composite

On prend les valeurs citées dans la partie bibliographie

#### a) Pour la fibre de verre E:

Masse volumique = 2600 Kg/m<sup>3</sup>

Rigidité sens fibre  $E_{fl} = 74$  GPa

Rigidité sens transverse  $E_{ft} = 74$  GPa

Coefficient de Poisson  $\nu_f = 0.2$

Contrainte à rupture en tension  $\sigma_{fut} = 2500$  MPa

Coefficient de dilatation thermique  $\alpha_f = 0.3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Température limite d'utilisation  $T_f=700^\circ\text{C}$

Module de cisaillement de fibre : par la loi de Hooke

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (II.1)$$

$$G_f = 74 / (2 * (1 + 0.2)) = 30.83 \text{ GPa.}$$

**b) Pour la résine polyester:**

Masse volumique =  $1200 \text{ Kg/m}^3$

Module de Yong  $E = 3.2 \text{ GPa}$

Coefficient de Poisson  $\nu_m = 0.4$

Coefficient de dilatation thermique  $\alpha_f = 8 * 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Température limite d'utilisation  $T_m = 180^\circ\text{C}$

Module de cisaillement de la matrice: calculé à partir de la loi de Hooke

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (II.2)$$

$$G_m = 3.2 / (2 * (1 + 0.4)) = 1.14 \text{ GPa.}$$

**c) Pour le matériau composite**

Et pour calculer les caractéristiques mécaniques de matériau composite on utilise les formules recommandées dans ouvrage de référence [1] page 179 puisque ces formules donnent des résultats plus proche à la réalité (les résultats expérimentaux).

- Module d'Young longitudinal **EL** par la loi des mélanges

$$E_L = E_f * V_f + E_m * (1 - V_f) \quad (II.3)$$

$$E_L = 74 * 0.6 + 3.2 * 0.4 = 45.68 \text{ GPa}$$

- Coefficient de Poisson longitudinal  $\nu_{LT}$  par la loi des mélanges

$$\nu_{LT} = \nu_f * V_f + \nu_m * (1 - V_f) \quad (II.4)$$

$$\nu_{LT} = 0.2 * 0.6 + 0.4 * 0.4 = 0.28$$

- Module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$  par la relation suivante

$$G_{LT} = G_{12} = G_m \frac{G_f(1+V_f) + G_m(1-V_f)}{G_f(1-V_f) + G_m(1+V_f)} \quad (II.5)$$

$$G_{LT} = 1.23 * (30.83 * (1 + 0.6) + 1.14 * (1 - 0.6)) / (30.83 * (1 - 0.6) + 1.14 * (1 + 0.6))$$

$$G_{LT} = 4.02 \text{ GPa}$$

$$G_{LT} = G_{LT'} = 4.02 \text{ GPa}$$

- Module de compression latérale **KL** par la relation

$$K_L = K_m + \frac{\nu_f}{\frac{1}{k_f - k_m + \frac{1}{3} * (G_f - G_m)} + \frac{1 - \nu_f}{k_m + \frac{4}{3} * G_m}} \quad (II.6)$$

Avec  $k_f$  et  $k_m$  ce sont les modules de compressibilités respectivement de renfort et de la matrice ce calcul comme suit :

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (II.7)$$

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (II.8)$$

$$k_f = 74 / (3 * (1 - 2 * 0.2)) = 41.11 \text{ GPa}$$

$$k_m = 3.2 / (3 * (1 - 2 * 0.4)) = 5.33 \text{ GPa}$$

$$K_L = 5.33 + 0.6 / (1 / (41.11 - 5.33 + (30.33 - 1.23) / 3) + (1 - 0.6) / (5.33 + 4 * 1.23 / 3))$$

Alors  $K_L = 13.19$  GPa

- Module de cisaillement transverse  $G_{TT'}$  par la relation suivante :

$$G_{TT'} = G_m \left( 1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{km + \frac{7}{3} * G_m}{2km + \frac{8}{3} * G_m} (1 - V_f)} \right) \quad (II.9)$$

$$G_{TT'} = 1.23 * (1 + 0.6 / (1.23 / (30.33 - 1.23) + (5.33 + 7 * 1.23 / 3) * (1 - 0.6) / (2 * 5.33 + 8 * 1.23 / 3)))$$

$G_{TT'} = 3.67$  GPa

- Module d'Young transverse  $E_T$ , exprimé à partir des modules précédents à l'aide de l'expression suivante :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2 \frac{v^2 L T}{E L}} \quad (II.10)$$

$$E_T = 2 / (1 / (2 * 13.19) + 1 / (2 * 3.67) + 2 * 0.25^2 / 45.68)$$

$E_T = 11.25$  GPa

### II.8.2 Caractéristiques mécanique de l'acier (S235)

Module d'élasticité  $E = 210$  GPa

Coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$

La masse volumique  $\rho = 7800$  Kg/m<sup>3</sup>

## II.9. LES CONTRAINTES DE RUPTURES

### II.9.1. Contraintes de ruptures de matériau composite

La contrainte et l'allongement à la rupture des fibres de verre et de la résine polyester (d'après la partie bibliographie):

$$\sigma_{fu} = 2500 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \epsilon_{fu} = 4.5\%$$

$$\sigma_{mu} = 60 \text{ MPa} \quad \text{et} \quad \epsilon_{mu} = 3\%$$

a) Dans la direction des fibres (x) : on utilise la loi de mélange pour déterminer les contraintes de **traction** dans le matériau composite.

on a  $\epsilon_{fu} = 4.5\% > \epsilon_{fm} = 3\%$  alors la rupture se commence dans la matrice

$$\sigma_{xu} = (\sigma_{fu}) (\epsilon_{mu}) * V_f + \sigma_{mu} * (1 - V_f) \quad (II.11)$$

$$(\sigma_{fu})_{\epsilon_{mu}} = (\sigma_{fu})_{(3\%)} = 2500 * 3 / 4.5 = 1667 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{xu}^t = 1667 * 0.6 + 60 * (1 - 0.6)$$

$$\sigma_{xu}^t = 1024 \text{ MPa}$$

b) Dans la direction perpendiculaire à la direction des fibres (y et z) : on ne considère que la résistante de la matrice (la résine)

$$\sigma_{yu}^t = \sigma_{zu}^t = \sigma_{mu}^t = 60 \text{ MPa}$$

Pour la contrainte de compression et de cisaillement on prend la contrainte de rupture de la résine polyester.

c) Contrainte de compression

$$\sigma_{xu}^c = \sigma_{yu}^c = \sigma_{zu}^c = \sigma_m^c = 120 \text{ MPa}$$

**d) contrainte de cisaillement**

$$\tau_{xyu} = \tau_{yzu} = \tau_{xzu} = \tau_{mu} = 15 \text{MPa}$$

**II.9.2 Contrainte de rupture de l'acier**

La limite élastique à la traction

$$\sigma_e = 250 \text{MPa}$$

Résistance à la rupture

$$\sigma_u = 340 \text{MPa}$$

**II.10. DEFINITION DES CHARGES**

**II.10.1. Poids propre**

**II.10.1.1. La charge de garde-corps**

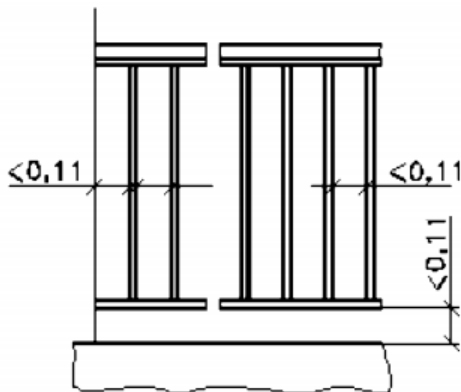
Tous les garde-corps doivent être conçus de manière à répondre aux spécifications de hauteur normale de protection H qui varie selon l'épaisseur du garde-corps et les valeurs de H sont fixées dans le tableau page 23 de la norme **NF P 01-012**. [10]

**Tableau II.1. Dimension de garde-corps[10]**

	<b>Garde-corps minces</b>	<b>Garde-corps épais</b>							
<b>Epaisseur E</b>	≤ 0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	≥ 0,60
<b>Hauteur H</b>	1,00	0,975	0,95	0,925	0,90	0,85	0,80	0,75 [12]	0,70 [12]

Dans notre cas on choisit un garde-corps mince (épaisseur < 0.20m) ce qui donne une hauteur minimale de 1m (H=1m) et pour la dimension horizontale des vides entre barreaux, panneaux, façades et verticale doit être au plus égale à 0,11 m.

A partir de ces dimensions et d'après le site de fournissisons [S2] on choisit un garde-corps à barreaudage vertical en acier avec un poids propre de 8 kg/ml alors la charge du garde-corps égale à  $G_{gc} = 0.08 \text{ KN/m}$ .



**FIGURE II.5. Garde-corps à barreaudage vertical en acier.**

**II.10.1.2. Poids propre de plancher (plaque):**

Par la loi de mélange on calcule la masse volumique de matériau composite et après on calcule le poids de le plaque

**TABLEAU II.2. Caractéristique de matériau composite**

$\rho_f \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$\rho_m \text{ (Kg/m}^3\text{)}$	$V_f$	$\rho_{mc} \text{ (Kg/m}^3\text{)}$
2600	1200	0,6	2040

**TABLEAU II.3. Dimension de la plaque en matériau composite**

Epaisseur de peau (m)	Epaisseur de l'âme (m)	Hauteur de l'âme(m)	Nombre d'âmes par mètre
0,005	0,01	0,2	7

Poids propre de plaque (Kg/m<sup>2</sup>) =48.96 Kg/m<sup>2</sup>

G<sub>plaque</sub> =0,49 KN/m<sup>2</sup>

**II.10.1.3. Poids propre de tube profilé (200\*100\*5)**

**TABLEAU II.4. Caractéristique de profilé métallique.**

<b>ρ<sub>acier</sub> (KN/m<sup>3</sup>)</b>	7800
<b>Epaisseur de tub (m)</b>	0,005
<b>Largeur de tub (m)</b>	0,1
<b>Hauteur de tub(m)</b>	0,2
<b>G<sub>tub</sub> (KN/m)</b>	0,23

**II.10.2. Charge d'exploitation**

C'est un balcon de bâtiment d'habitation alors Q=350 Kg/m<sup>2</sup>. [9]

**II.10.3. La charge de la neige [9]**

On a dans la zone **B1** avec une altitude de A=750m

S<sub>k</sub> : la charge caractéristique de neige sur sol

S<sub>Ad</sub>: la charge de calcul de neige sur sol

D'après le tableau de l'Annexe **B** page **77**

S<sub>k</sub>=0.55 KN/m<sup>2</sup>

S<sub>Ad</sub>=1 KN/m<sup>2</sup>

Et avec une altitude de 750m on doit corriger les deux charges par une valeur Δ<sub>s1</sub> alors

$$\Delta_{s1} = 1.5 \cdot A / 1000 - 0.45 = 1.5 \cdot 750 / 1000 - 0.45 = 0.68$$

$$S_k = 0.55 + 0.68 = 1.23 \text{ KN/m}^2$$

$$S_{Ad} = 1 + 0.68 = 1.68 \text{ KN/m}^2$$

On est dans le cas de balcon protégé par un auvent ou autre balcon à l'étage au-dessus alors on peut appliquer la règle suivante :

Si les inégalités  $Q > 2.8 \cdot S_k$  et  $Q > 1.9 \cdot S_{Ad}$  sont vérifiées on peut négliger l'effet de la neige.

$$Q = 3.5 \text{ KN/m}$$

$$2.8 \cdot S_k = 2.8 \cdot 1.23 = 3.44 \text{ KN/m}$$

$$1.9 \cdot S_{Ad} = 1.9 \cdot 1.68 = 3.19 \text{ KN/m}$$

On remarque que les deux inégalités sont vérifiées alors on peut dire que l'effet de la neige est négligeable.

**II.10.2. La charge du vent**

Le vent provoque un effort de soulèvement sur les balcons, ce fonctionnement est antagoniste aux charges gravitaires et particulièrement important à considérer pour des balcons en porte à faux. Alors on doit déterminer la pression de vent à partir de guide de construction des balcons. [9]

**La pression dynamique de référence  $q_b$ :**

On est dans la zone 3 alors  $q_b=414$  Pa.

**Coefficient d'exposition  $C_e(z)$  :**

La rugosité **IIIB** qui désigne des zones urbanisées alors on aura  $C_e(z)=1.35$

Avec  $z$  la hauteur de balcon (pour  $z=3m$ ,  $z=6m$  et  $z=9m$ ).

On suppose que le bâtiment est construit sur un site relativement plat alors le coefficient d'orographie égale  $C_0(z)=1$

**La pression dynamique de pointe**

$$qp(z) = C_e(z) * qb \quad (II.12)$$

$$q_p(3)=q_p(6)=q_p(9)=1.35*414=558.9\text{Pa} \text{ (dans les deux directions)}$$

et le coefficient de pression  $C_p$  a une valeur de 2 dans tous les cas ( $C_p=2$ ).

$$W = C_p * qp(z) \quad (II.13)$$

$$W=2*558.9=1117.8 \text{ Pa}$$

$$Q_w=1.12 \text{ KN/m}^2$$

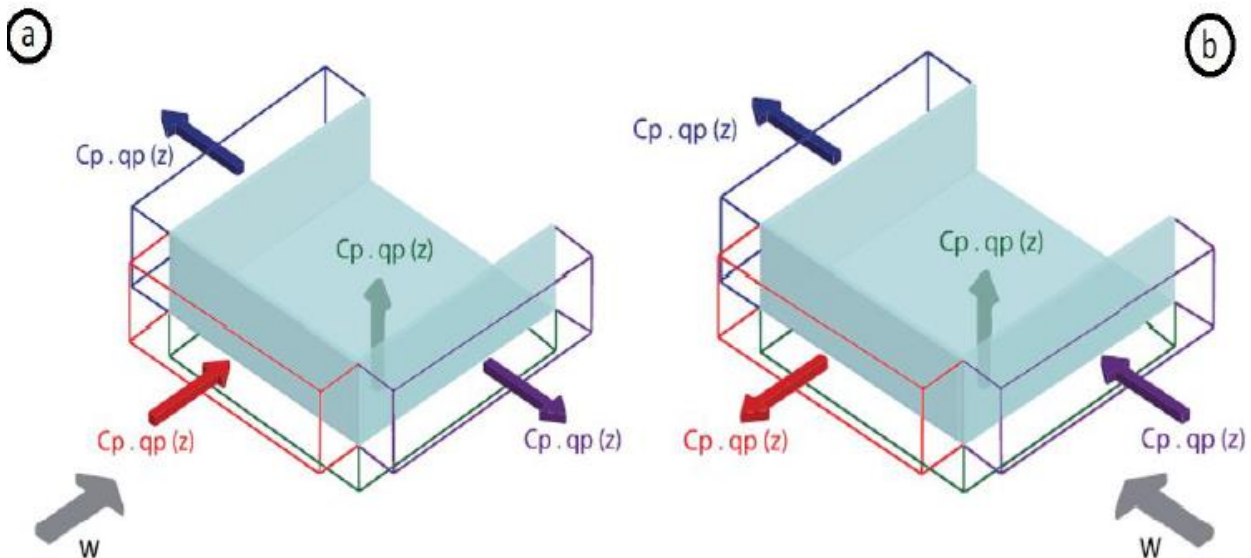


FIGURE II.6. Pression de vent sur les balcons. a) vent de face, b) vent de côté. [9]

### II.10.3. Action thermique

Les actions thermiques ont un effet différent selon la conception du balcon soit en provoquant des déformations supplémentaires lorsque le système est librement dilaté avec des attaches fixes et d'autres coulissantes permettant un glissement de balcon sur le long de façade. Dans ce cas on doit estimer les déformations, soit en engendrant des efforts lorsque ces déformations sont empêchées et dans le cas d'un système bridé totalement avec des assemblages fixes sans possibilité de dilatation ce qui induit des efforts sur les assemblages.

On tire les données de calcul à partir la partie bibliographie

Coefficient de dilatation thermique de fibre

$$\alpha_f=0.3*10^{-5}C^{\circ-1}.$$

Coefficient de dilatation thermique de matrice

$$\alpha_m = 8 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$$

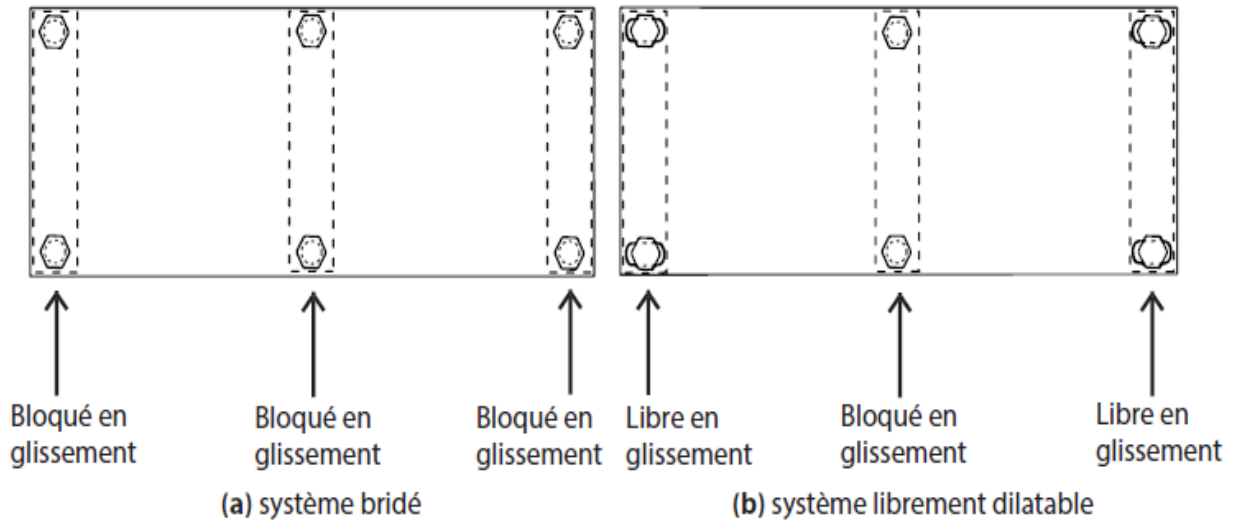


FIGURE II.7. Conception vis-à-vis de la dilatation. [9]

Par la loi de mélange on détermine le coefficient de dilatation thermique de matériau composite fibre-matrice

$$\alpha_{mc} = \alpha_f * V_f + \alpha_m * (1 - V_f) \quad (II.14)$$

avec  $V_f=0.6$  (la fraction volumique de fibre)

$$\alpha_{mc} = 0.3 \cdot 10^{-5} \cdot 0.6 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0.6)$$

$$\alpha_{mc} = 3.38 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$$

$$T_{\max} = 40\text{C}^\circ \text{ et } T_{\min} = -30\text{C}^\circ$$

Dans le cas de système librement délaté dilaté on doit calculer l'allongement maximal (la dilatation entre l'été et hiver) ce calcul comme suit

$$\Delta L/L = \alpha_{mc} * \Delta T$$

$$\Delta L/L = 3.38 \cdot 10^{-5} * (40 - (-30))$$

$$\Delta L/L = 0.24\% \text{ pour } 1\text{m on a un allongement } \Delta L = 2.4\text{mm}$$

Et dans le cas où on a un système bloqué on doit vérifier les contraintes dues à l'effet thermique dans le matériau composite et dans les organes de fixation.

$$\sigma_Y = \varepsilon * E_T = 0.24 \cdot 10^{-2} * 11.25 \cdot 10^3 = 26.62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_X = \varepsilon * E_L = 0.24 \cdot 10^{-2} * 45.68 \cdot 10^3 = 109.6 \text{ MPa}$$

Et  $\sigma_{xu} = 1024 \text{ MPa}$  et  $\sigma_{yu} = 60 \text{ MPa}$  on remarque que ces contraintes sont supérieures aux contraintes créées par l'effet thermique alors on n'a pas un problème pour cet effort sur le matériau composite (peut résister). Et pour les organes de fixation en acier on remarque que ces contraintes sont faibles devant le contrainte de rupture de l'acier ( $\sigma_e = 235 \text{ MPa}$  et  $\sigma_u = 340 \text{ MPa}$ ) alors on n'aura pas un problème pour les organes de fixations.

#### II.10.4. Action sismique

Pour utiliser la méthode simplifiée il doit vérifier les conditions suivantes :

- Balcon fixé au droit de plancher.

- La masse de balcon inférieure à 5% de la masse de plancher c'est le cas puisque le balcon en matériau composite (léger par rapport à un plancher en béton)
- Pas de système de contreventement vertical.

On voit que toutes les conditions sont vérifiées alors la méthode simplifiée est applicable.

On calcule la force sismique par la formule suivante:

$$Fh = m_E \frac{\gamma a * E_a}{q a} \quad (II.15)$$

Avec  $m_E$  la masse sismique égale à  $m_E = m_G + m_Q$   
 $m_G$  c'est la masse permanente  
 $m_Q$  c'est la masse de charge d'exploitation.

L'aire de balcon (A): on suppose une aire inférieure à 15m<sup>2</sup>

$A < 15m^2$  alors  $\alpha_A = 1$

$$G_{plaque} = g_{plaque} * A * \alpha_A$$

$$G_{tub} = g_{tub} * l$$

$$m_G = G_{plaque} + G_{tub}$$

$$Q = q * A * \alpha_A$$

$$m_Q = Q$$

$$m_E = m_G + m_Q \quad (\text{en ton})$$

**Coefficient d'importance  $\gamma a = 1$**

Alors le coefficient de comportement  $q_a^h = 1$  car on a un balcon qui est constitué de deux poutres en console.

**Calcul de l'accélération sismique  $a_E$**

$$a_E = \gamma I * a_{gr} * s * \left( \frac{3(1 + \frac{z}{H})}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0.5 \right) \quad (II.16)$$

$\gamma I$  coefficient d'importance du bâtiment

$a_{gr}$  l'accélération sismique au niveau d'un sol rocheux

S coefficient de sol

$T_a$  = période fondamentale de vibration de balcon

$T_1$  = période fondamentale de vibration du bâtiment dans la direction appropriée

H est la hauteur totale du bâtiment et z la hauteur du balcon au-dessus des fondations

$\gamma I = 1.2$  car on a une catégorie d'importance III

$a_{gr} = 1.6 \text{ m/s}^2$  car la zone de sismicité 4 (moyenne)

S = 1.5 car la classe de sol est C ( $v_s = 180-360 \text{ m/s}$  et  $C_u = 70-250 \text{ KPa}$ )

D'après le guide il est conservateur de considérer  $T_a/T_1 = 1$  et  $z/H = 1$  alors la formule de l'accélération devient égale :

$$a_E = 5.5 \gamma I * a_{gr} * s$$

$$a_E = 5.5 * 1.2 * 1.6 * 1.5 = 15.84 \text{ m/s}^2$$

Alors la force sismique égale

$$F_h = m_E \frac{\gamma_a * E_a}{q_a}$$

$$\gamma_a = 1 \text{ et } q_a = 1$$

$$F_h = m_E * a_E$$

$$F_h = 15.84 * m_E$$

C'est une force appliquée au centre de la plaque dans les deux directions, Et nous on va utiliser cette force pour la vérification de l'assemblage mais il faut majorer par  $1.2 * q_a$  avec  $q_a = 1$ .

$$F_x = F_y = 1.2 * q_a * F_h = 1.2 * 1 * F_h = 1.2 * F_h$$

Dans cette optique, la structure rapportée doit uniquement conduire les charges sismiques qui sont appliquées et non reprendre celles appliquées au bâtiment. C'est-à-dire il faut prendre en compte l'effet sismique de balcon sur le bâtiment lors de la conception et l'étude de bâtiment.

### II.11. COMBINAISON D' ACTIONS

Les deux tableaux suivants donnent les combinaisons d'action à l'ELU et l'ELS.

TABLEAU II.5. Combinaison d'action a ELS. [9]

Etats limites de service (ELS)				
Combinaison	Actions permanentes		Actions variables d'accompagnement	
	Défavorable	Favorables	Dominante	Autres
Caractéristique	$1,0 G_{k,j,sup}$	$1,0 G_{k,j,inf}$	$1,0 Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$

TABLEAU II.6. Combinaison d'action a ELU. [9]

Etats limites ultimes (ELU)				
Actions permanentes		Action variable dominante	Actions variables d'accompagnement	
Défavorable	Favorables		Principale	Autres
$1,35 G_{k,j,sup}$	$1,00 G_{k,j,inf}$	$1,50 Q_{k,1}$ (ou 0 si favorable)	Sans objet	$1,50 \psi_{0,i} Q_{k,i}$ (ou 0 si favorable)

a) Pour les charges appliquées sur la plaque

#### A ELS

$$F_{S1} = G_{paque} + Q + \psi_0 * Q_w \quad \text{avec } \psi_0 = 0.6 \text{ (pour les charges dues au vent).}$$

$$F_{S1} = 0.49 + 3.5 - 0.6 * 1.12 = 3.32 \text{ KN/m}^2$$

$$F_{S2} = G_{paque} + Q$$

$$F_{S2} = 0.49 + 3.5 = 3.99 \approx 4 \text{ KN/m}^2$$

$$F_S = \text{Max} \{F_{S1}, F_{S2}\} = F_{S2} \text{ alors } F_S = 4 \text{ KN/m}^2$$

#### A ELU

$$F_{U1} = 1.35 * G_{paque} + 1.5 * Q + 1.5 * \psi_0 * Q_w$$

$$F_{U1} = 1.35 * 0.49 + 1.5 * 3.5 - 1.5 * 0.6 * 1.12 = 4.9 \text{ KN/m}^2$$

$$F_{U2} = 1.35 * G_{paque} + 1.5 * Q$$

$$F_{U2} = 1.35 * 0.49 + 1.5 * 3.5 = 5.91 \text{ KN/m}^2$$

$$F_U = \text{Max} \{F_{U1}, F_{U2}\} = F_{U2} \text{ alors } F_U = 5.91 \text{ KN/m}^2$$

**b) Pour les charges appliquées sur l'élément métallique**

**A ELS**

$$F_S = G_{\text{tub+Garde-corps}} + Q_W * \Psi_0 \quad (\text{puisque l'action dominante c'est la charge d'exploitation})$$

$$F_{VS} = G_{\text{tub+Garde-corps}} \quad (\text{la force verticale})$$

$$F_{VS} = (0.23+0.08) = 0.31 \text{ KN/m}$$

$$F_{HS} = Q_W * \Psi_0 = 1.12 * 0.6 = \pm 0.67 \text{ KN/m}^2 \quad (\text{la force horizontale})$$

Et pour une hauteur de tub métallique égale à 0.2m on trouve

$$F_{HS} = 0.67 * 0.2 = \pm 0.13 \text{ KN/m}$$

**A ELU**

$$F_U = 1.35 * G_{\text{tub+Garde-corps}} + 1.5 * Q_W * \Psi_0.$$

(Puisque l'action dominante c'est la charge d'exploitation).

$$F_{VU} = 1.35 * G_{\text{tub+Garde-corps}}$$

$$F_{VU} = 1.35 * (0.23+0.08) = 0.42 \text{ KN/m}$$

$F_{HU} = 1.5 * Q_W * 0.6 = \pm 1 \text{ KN/m}^2$  et pour une hauteur de tub métallique égale à 0.2m on trouve

$$F_{HU} = 1 * 0.2 = \pm 0.2 \text{ KN/m}$$

**Note :**

Pour les charges sur le tube métallique on doit ajouter à ces forces les réactions de la plaque pour les deux combinaisons (ELS et ELU).

**Récapitulation**

On récapitule les résultats des combinaisons d'actions à ELS et ELU dans le tableau suivant:

**TABLEAU II.7. Récapitulation de combinaison d'action a ELS et ELU.**

	ELS		ELU	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
<b>Plaque (KN/m<sup>2</sup>)</b>	4	0	5.91	0
<b>Tub métallique (KN/m)</b>	$\pm 0.31 + R_{\text{plaque}}$	$\pm 0.13 + R_{\text{plaque}}$	$\pm 0.42 + R_{\text{plaque}}$	$\pm 0.2 + R_{\text{plaque}}$

$R_{\text{plaque}}$  c'est les réactions de la plaque sur le tub métallique.

**II.12 SECURITE A L'INCENDIE**

Pour un bâtiment d'habitation de hauteur de plancher bas le plus haut est inférieur ou égale à 28 m alors on est dans la 3eme famille, alors l'exigence structurale et séparatif de logement se présentent comme suit :

**L'exigence structurale :** une stabilité au feu(SF) de 1h (R30) et plancher coupe-feu (CF) 1h(REI30).

**L'exigence de séparatif de logement :** coupe-feu de 1/2h(REI30) et recoupement CF 1h/2 tous les 45m

**La règle (C+D) est applicable.**

R: Résistance mécanique ou stabilité.

E: Etanchéité au gaz ou flamme.

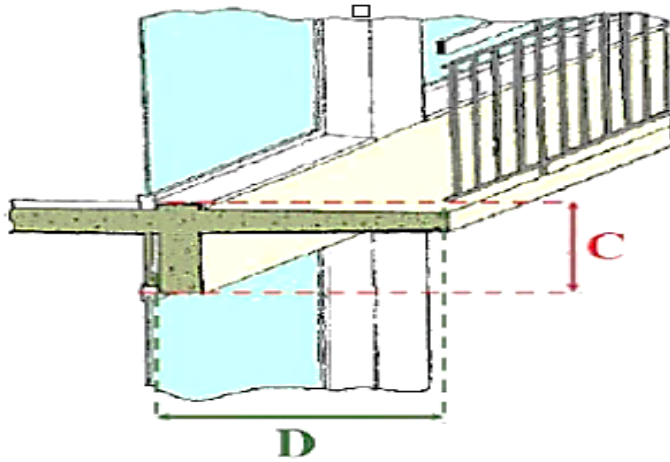
I: isolation thermique.

**Vérification de la règle (C+D)**

La charge d'incendie M:

Le type d'occupation c'est un logement alors  $M=930 \text{ MJ/ m}^2$ .

Alors on est dans la 3eme catégorie (3eme B) car  $M=930 \text{ MJ/ m}^2 > 80 \text{ MJ/ m}^2$  alors  $C+D > 1.3\text{m}$ .



**C** = Distance verticale entre le haut d'une baie et le bas de la baie qui lui est superposée

**D** = Distance horizontale entre le plan des vitres et le nu de la plus grande saillie de l'obstacle résistant au feu

FIGURE II.8. La règle (C+D).

D'après la dimension minimale de notre balcon  $D=1\text{m}$  on trouve que la règle  $C+D$  donne une valeur de  $C$  supérieur à  $0.3\text{m}$ .  $C+D > 1.3\text{m}$  alors  $C > 0.3\text{m}$ .

L'acier est de classe  $M_0$  (incombustible et inflammable) alors l'exigence structurale de la stabilité au feu est vérifiée. Et la classe  $M_1$  pour le matériau composite (combustible et inflammable) est insuffisante pour l'exigence structurale de la stabilité au feu alors on doit l'améliorer par l'utilisation d'une **peinture** contre le feu ou la protection par l'ajout des charges à la matrice. [11]

**II.13. CRITERE DE DIMENSIONNEMENT**

**II.13.1. Limitation de déformation des éléments et les vibrations**

L'annexe nationale à la NF EN 1993-1-1 donne les valeurs maximales recommandées pour les flèches.

TABLEAU II.8. Les flèches admissibles pour les balcons. [9]

Critère mesuré	Limites
Flèche verticale du plancher et de son ossature (poutres maitresses, longerons, ...) sous combinaison ELS	$L / 200$
Flèche verticale du plancher et de son ossature (poutres maitresses, longerons, ...) sous cas de charge variable élémentaire	$L / 300$

**Note :** L représente la portée de l'élément rapporté, ou le double si celui-ci est en porte à faux

**II.13.1. Limitation de vibrations**

Pour éviter les vibrations on doit limiter la fréquence propre de balcon à  $2.6 \text{ Hz}$  ( $f \geq 2.6 \text{ Hz}$ ). Et on peut estimer la fréquence propre  $f$  à partir de la flèche par la formule suivante proposé dans le guide.

$$f[\text{Hz}] = \sqrt{\frac{15.8}{\delta[\text{mm}]}} \tag{II.17}$$

Avec  $\delta$  la flèche en mm.

### II.13.1. contraintes limites

On doit limiter les contraintes dans le matériau composite et dans les aciers par les valeurs suivantes

#### a) Matériau composite

Contrainte de traction dans l'axe  $x$  (équivalent à l'axe  $L$  et  $1$ )

$$\sigma_{xu}^t = 1024 \text{ MPa}$$

Contrainte de traction dans l'axe  $y$  et  $z$  (équivalent à l'axe  $T$ ,  $T'$  et  $2$ ,  $3$  respectivement)

$$\sigma_{yu}^t = \sigma_{zu}^t = \sigma_{mu}^t = 60 \text{ MPa}$$

Contrainte de compression

$$\sigma_{xu}^c = \sigma_{yu}^c = \sigma_{zu}^c = \sigma_m^c = 120 \text{ MPa}$$

Contrainte de cisaillement

$$\tau_{xyu} = \tau_{yzu} = \tau_{xzu} = \tau_{mu} = 15 \text{ MPa}$$

#### b) profilé métallique en acier

La limite élastique à la traction

$$\sigma_e = 250 \text{ MPa}$$

Résistance à la rupture

$$\sigma_u = 340 \text{ MPa.}$$

### II.14. LOGICIELS UTILISES

**Patran version 2012** : pour la modélisation de la plaque en composite et la structure métallique.

**SolidWorks 2015** : pour le dessin.

### II.15. CONCLUSOIN

Dans ce chapitre on fait une présentation de projet et les hypothèses de calculs (loi de mélange), et on a sorti de notre choix de type de matériau composite qui est les fibres de verre avec la résine de polyester avec le calcul de leur caractéristiques mécaniques pour aborder la partie modélisation de balcon dans le prochain chapitre.



---

# CHAPITRE III

---

## MODELISATION



## CHAPITRE III. MODELISATION

### III.1. INTRODUCTION

L'objectif général de ce travail est l'utilisation des matériaux composites pour la réalisation de plancher pour les balcons. Les matériaux composites peuvent être optimisés en adoptant, pour chaque application, un compromis spécifique entre performance et le cout qui dépend principalement de la quantité de matériaux utilisés et pour le baisser il faut passer par le calcul numérique (model numérique) par le logiciel PATRAN (version 2012), dans lesquels on va modéliser la plaque en matériau composite orthotrope et après on passe au tube métallique.

### III.2 MODELISATION DE LA PLAQUE

#### III.2.1. Dessin de la plaque

Modèle 2D des éléments de la plaque (âme et peau).

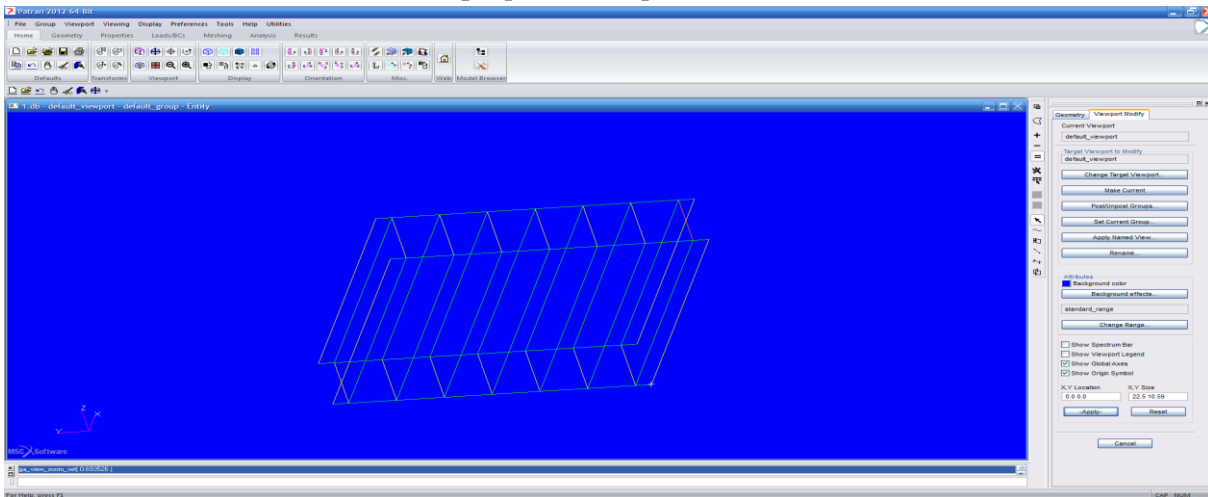


FIGURE III.1. Dessin de la plaque

#### III.2.2. Maillage

On choisit un maillage surfacique des carrés de côté **1cm** pour les peaux et les âmes.

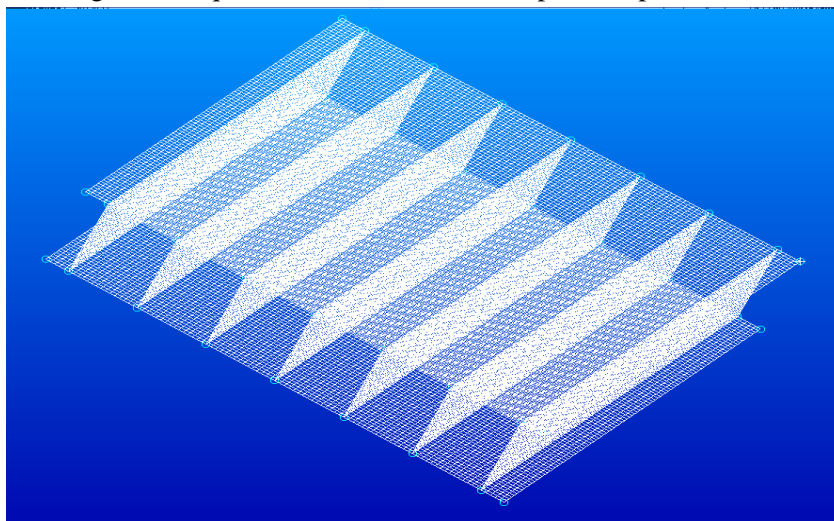


FIGURE III.2. Maillage

### III.2.3. Introduire les caractéristiques de matériau composite

C'est un matériau ortho-tropique en 3D (puisque on a la structure en 3D et pour éviter l'orientation des fibres pour les peaux et les âmes on crée notre matériau en 3D).

TABLEAU III.1 Caractéristiques de matériau composite.

$E_{11}$ (Pa)	$E_{22}=E_{33}$ (Pa)	$G_{12}= G_{13}$ (Pa)	$G_{23}$ (Pa)	$\nu_{12}=\nu_{23}=\nu_{13}$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
45.68e9	11.25e9	4.02e9	3.67e9	0.28	2040

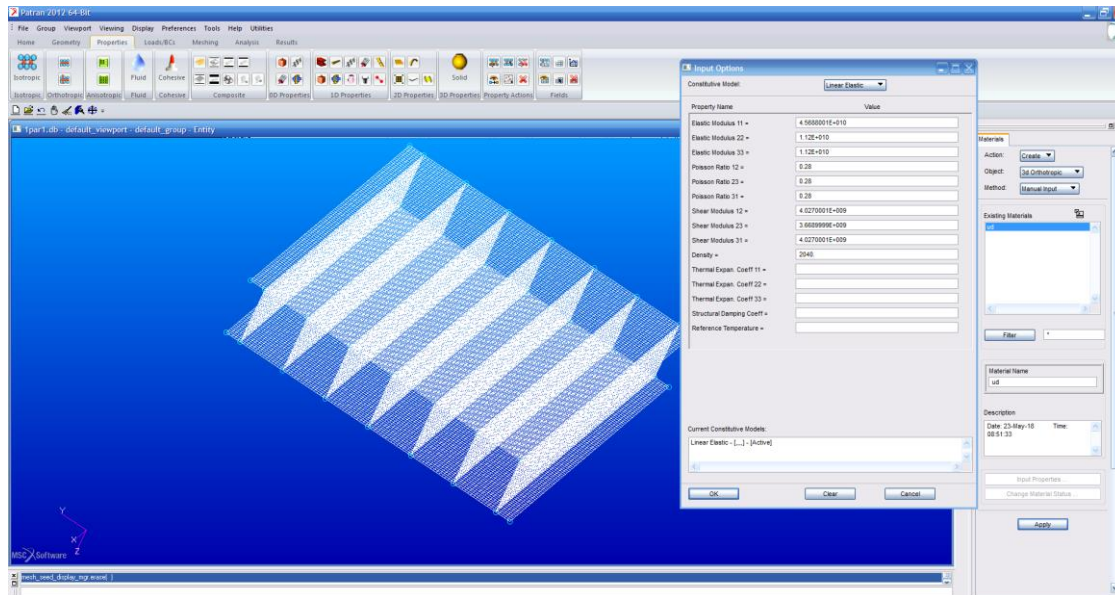


FIGURE III.3. Introduire les caractéristiques de matériau composite.

### III.2.4. les appuis

On empêche toutes les translations des bords supérieurs de la plaque (on met pour chaque nœud un appui).

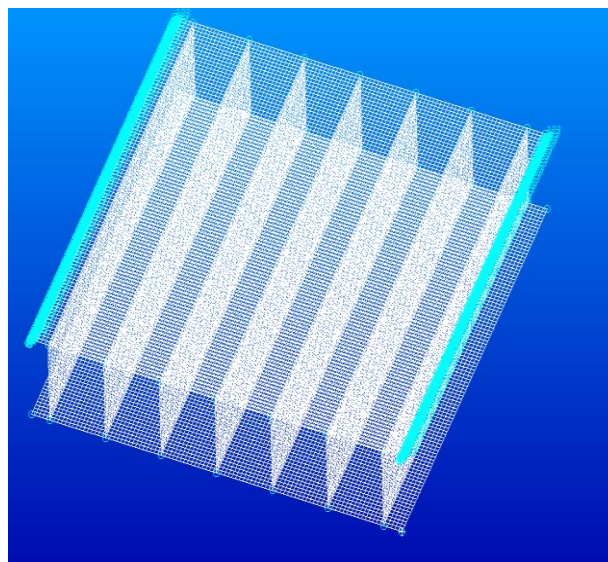


FIGURE III.4. Création des appuis.

### III.2.5. Application des charges (à l'ELS et à l'ELU)

On ne s'intéresse qu'aux valeurs qui donnent les bons résultats (après optimisation).

TABLEAU III.2. Charge appliquée sur la plaque.

Langueur de plaque (m)	Epaisseur de l'âme (mm)	Epaisseur de peau (mm)	ELS		ELU
			charge d'exploitation Q (KN)	combinaison de charge G+Q (KN)	combinaison de charge 1.35G+1.5Q (KN)
1	7	6	3,5	3,94	5,84
	7	7	3,5	3,99	5,91
	8	8	3,5	4,05	5,96
1,45	7	7	5,08	5,79	8,57
	8	8	5,08	5,87	8,69

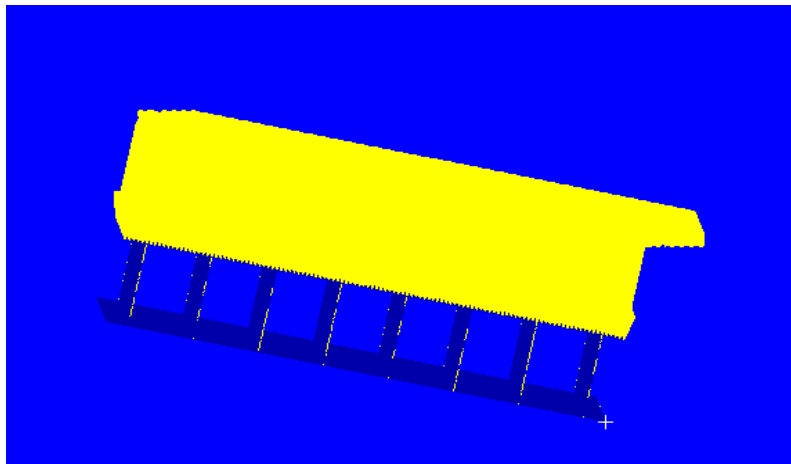


FIGURE III.5. Création des appuis.

### III.2.6. Les résultats

On tire les flèches verticales sous chargement variable et sous combinaison de charge à **ELS**, et on garde les réactions  $R_z$  et  $R_y$  ( $R_x=0$ ) à **ELS** et **ELU** pour les appliquer sur la poutre métallique et aussi aux contraintes à **ELU** pour vérifier la rupture de matériaux composite.

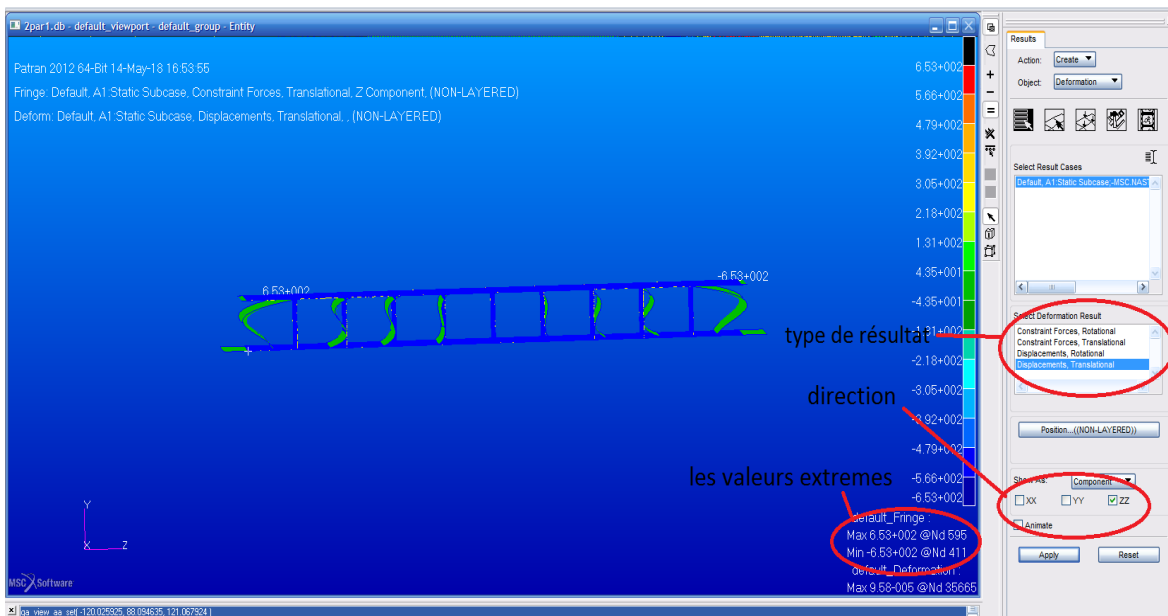


FIGURE III.6. Déformé de plaque.

❖ Pour la plaque de 1m

à ELS

La flèche admissible sous la combinaison de charge a ELS  $f_{adm}=L/200=1000/200= 5$  mm

La flèche admissible sous la charge variable (Q)  $f_{adm}=L/300=1000/300= 3.33$ mm

On a fait plusieurs variantes mais on cite que les valeurs acceptables par exemple pour une plaque de 1m et une épaisseur de l'âme égale à 10mm et épaisseur de peau de 5mm, on trouve une flèche de 3.69mm sous charge variable qui dépasse la flèche admissible  $f_{adm} = 3.33$ mm.

**TABLEAU III.3. Flèche et réaction dans la plaque 1m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	Flèche Max a ELS (mm)	Flèche Max sous Q (mm)	Ry (N) sous		Rz (N) sous	
				ELS	Q	ELS	Q
7	6	3.12	2.77	39.3	34.9	19.6	17.4
7	7	2.3	2.02	38.6	33.8	19.8	17.4
8	8	1.58	1.36	33	28.5	20.1	17.4

à l'ELU

Les contraintes de rupture dans le matériau composite sont les suivantes:

**Contrainte de traction**

$\sigma_{xu}^t = 1024$ MPa (sens de fibre)

$\sigma_{yu}^t = 60$ MPa (sens perpendiculaire au sens des fibres)

**Contrainte de compression**

$\sigma_{cu} = 120$ MPa (dans tous les sens)

**Contrainte de cisaillement**

$\sigma_{xyu} = 15$  MPa

**TABLEAU III.4. Contraintes dans la plaque de 1m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Ry (N)	Rz (N)
7	6	±4.3	±22	±0.45	58.3	29.1
7	7	±3.2	±21.2	±0.35	57.2	29.4
8	8	±2.4	±16.3	±0.26	48.5	29.6

On fait la vérification des contraintes par :

➤ Les critères en contraintes maximales s'écrivent sous la forme:

**-Xc <  $\sigma_L$  < Xt**

**-Yc <  $\sigma_T$  < Yt**

**-S <  $\sigma_{LT}$  < S**

Avec Xc= Yc= $\sigma_{cu}=120$ MPa

Xt= $\sigma_{xu}^t=1024$ MPa

Yt= $\sigma_{yu}^t=60$ MPa

S= $\sigma_{xyu}=15$  MPa

$\sigma_L = \sigma_{xx} = 4.3$ MPa,  $\sigma_T = \sigma_{yy} = 22$ MPa et  $\sigma_{LT} = \sigma_{xy} = 0.45$ MPa.

On Remarque que toute les contraintes sont vérifiées alors le matériau peut résister.

➤ Par le critère interactif de **Tsai-Wu**

$$\left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) \sigma_L + \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) \sigma_T + \frac{\sigma_L^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_T^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_{LT}^2}{S_{LT}^2} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X_t X_c} = 1.$$

↓  
A

**TABLEAU III.5. Valeurs de la formule Tsai-Wu pour la plaque de 1m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	Max de la formule (A)
7	6	0.28
7	7	0.26
8	8	0.15

Les valeurs de la formule (A) sont inférieures à 1 alors on n’a pas la rupture de matériau composite.

❖ **Pour la plaque de 1.45m**

La flèche admissible sous la combinaison de charge à ELS  $f_{adm} = L/200 = 1450/200 = 7.25$  mm

La flèche admissible sous la charge variable (Q)  $f_{adm} = L/300 = 1450/300 = 4.83$ mm

La même chose on a fait plusieurs variantes mais on cite que les valeurs acceptables par exemple les variantes non acceptables

**TABLEAU III.6. Flèches dans les plaques de 1.45m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	Flèche Max a ELS (mm)	Flèche Max sous Q (mm)
10	5	9.04 > 7.25	7.93 > 4.83
10	6	5.64	4.9 > 4.83
10	7		3.34
9	7		3.55
8	7		3.88
7	6		5.99 > 4.83

Et les variantes optimales sont:

**TABLEAU III.7. Flèches et réactions dans les plaques 1.45m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	Flèche Max a ELS (mm)	Flèche Max sous Q (mm)	Ry (N) sous		Rz (N) sous	
				ELS	Q	ELS	Q
7	7	5.01	4.4	29	25.5	28.8	25.3
8	8	3.44	2.98	22.6	25.3	29.2	25.3

à **ELU**

C’est les mêmes contraintes de rupture de la plaque 1m

**TABLEAU III.8. Contraintes dans la plaque de 1.45m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	$R_y$ (N)	$R_z$ (N)
7	7	5.21 -4.39	$\pm 33$	$\pm 0.56$	43	42.7
8	8	+4.1 -3.4	$\pm 25$	$\pm 4.23$	33.6	43.3

On fait la vérification des contraintes par :

- Les critères en contraintes maximales:
  - $X_c < \sigma_L < X_t$
  - $Y_c < \sigma_T < Y_t$
  - $S < \sigma_{LT} < S$

$\sigma_L = \sigma_{xx} = 5.21 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_T = \sigma_{yy} = 33 \text{ MPa}$  et  $\sigma_{LT} = \sigma_{xy} = 0.56 \text{ MPa}$ .

On remarque que toutes les contraintes sont vérifiées alors on n'a pas la rupture de matériau composite.

- Par le critère interactif de **Tsai-Wu**

**TABLEAU III.9. Valeurs de la formule Tsai-Wu pour la plaque de 1.45m.**

e âme (mm)	e peau (mm)	Max de la formule (A)
7	7	0.46
8	8	0.33

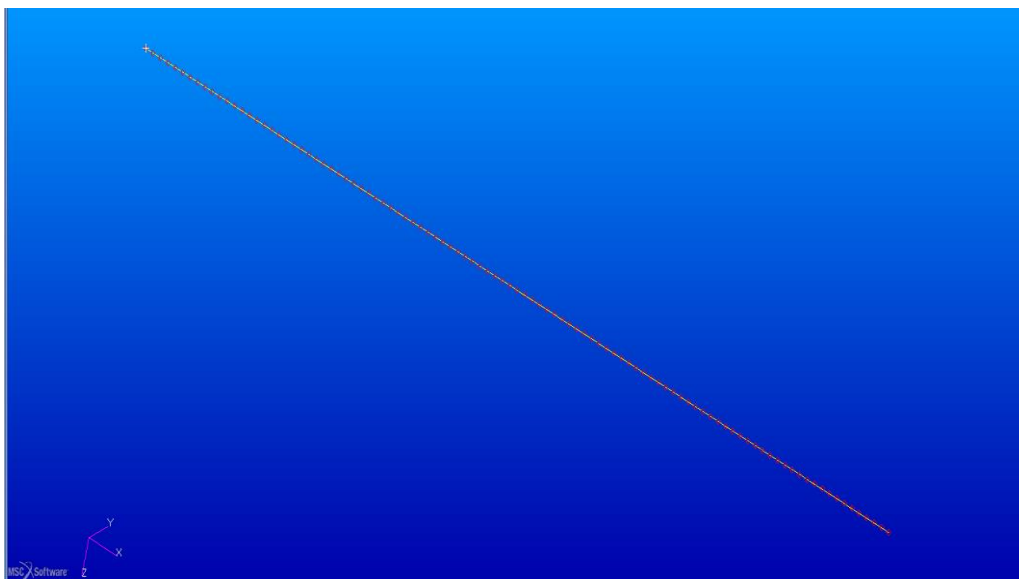
Les valeurs de la formule (A) sont inférieures à 1 alors on n'a pas la rupture de matériau composite selon cette critère.

### III.3. MODELISATION DE LA STRUCTURE METALLIQUE

C'est un tube métallique en porte à faux de section  $0.2 \times 0.1$  avec une épaisseur à déterminer et de différentes longueurs (1m, 1.5m et 2m) pour chacune des plaques (1m et 1.45m).

#### III.3.1. Dessin de tube et maillage

Modèle 1D de tube (ligne) de longueur 1m, 1.5m et 2m, et on choisit un maillage linéique de dimension 1cm pour le tube.



**FIGURE III.7. Maillage de tube.**

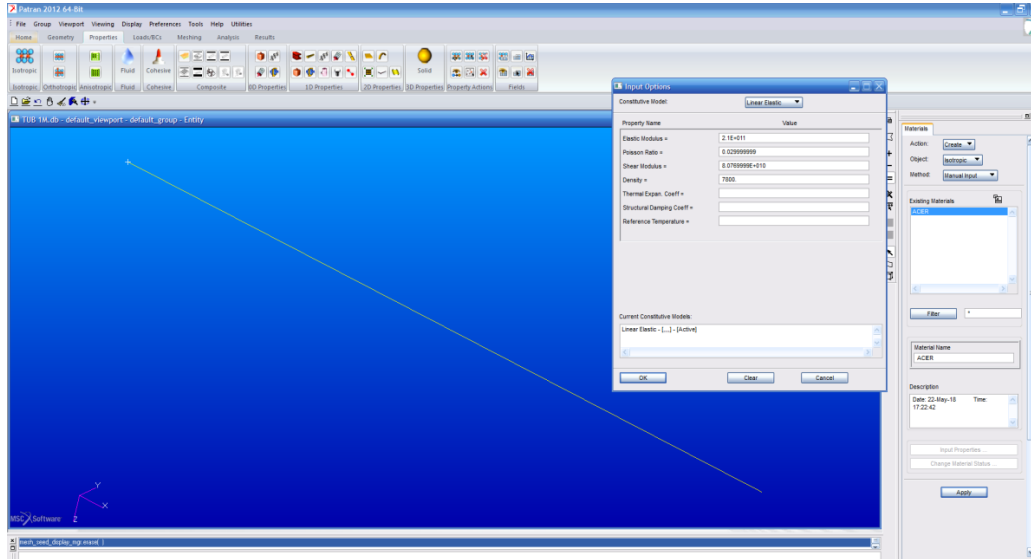
### III.3.2. Introduire les caractéristiques de l'acier

C'est un matériau isotrope de caractéristique suivant :

**TABLEAU III.10. Caractéristiques de matériau composite.**

E(Pa)	G (Pa)	$\nu$	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
210e9	80.7e9	0.3	7800

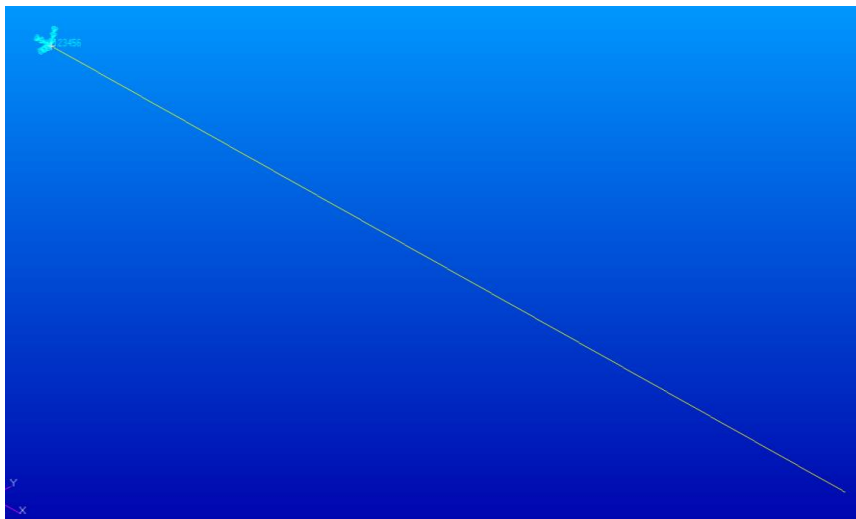
Avec une section de 0.2m\*0.1m\*0.005m.



**FIGURE III.8. Les caractéristiques de tube.**

### III.3.3. Les appuis

On bloque toutes les translations et les rotations dans le point de l'assemblage de balcon avec le plancher de bâtiment en béton armé.



**FIGURE III.9. Les caractéristiques de tube.**

### III.3.4. Les charges

On a plusieurs charges appliquées sur le tube: les réactions de la plaque, la charge de vent, le poids propre de garde-corps et le poids propre de tube métallique.

A ELS

Les réactions de la plaque appliquée sur le tube :

TABLEAU III.11. Charge appliqué sur le profilé a ELS.

	e âme (mm)	e peau (mm)	Ry (N) sous		Rz (N) sous	
			ELS	Q	ELS	Q
Plaque de 1m	7	6	39.3	34.9	19.6	17.4
	7	7	38.6	33.8	19.8	17.4
	8	8	33	28.5	20.1	17.4
Plaque de 1.45m	7	7	29	25.5	28.8	25.3
	8	8	22.6	25.3	29.2	25.3

Le poids propre de tube métallique

$$G_{\text{tub}}=0.23\text{KN/m}$$

Le poids propre de garde-corps

$$G_{\text{garde-corps}} =0.08\text{KN/m}$$

Plaque de longueur 1m →  $G_{\text{garde-corps}} =0.08 \text{ KN}$ .

Plaque de longueur 1.45m →  $G_{\text{garde-corps}} =0.120 \text{ KN}$ .

A ELU

Les réactions de la plaque appliquée sur le tube

TABLEAU III.12. Charge appliqué sur le profilé à ELU.

	e âme (mm)	e peau (mm)	Ry (N)	Rz (N)
Plaque de 1m	7	6	58.3	29.1
	7	7	57.2	29.4
	8	8	48.5	29.6
Plaque de 1.45m	7	7		42.7
	8	8	33.6	43.3

Le poids propre de tube métallique

$$G_{\text{tub}}=0.23*1.35=0.31\text{KN/m}$$

Le poids propre de garde-corps

$$G_{\text{garde-corps}} =0.08*1.35=0.11\text{KN/m}$$

Plaque de longueur 1m →  $G_{\text{garde-corps}} =0.11 \text{ KN}$ .

Plaque de longueur 1.45m →  $G_{\text{garde-corps}} =0.15 \text{ KN}$ .

La charge de vent

$$Q_w= 1.12 \text{ KN/m}^2$$

$$Q_w^v=0 \text{ (vertical)}$$

$$Q_w^h = 1.12 * 0.2 = 0.22 \text{ KN/m (horizontal)}$$

$$F_w^h = 1.5 * 0.6 * 0.22 = 0.18 \text{ KN/m.}$$

$$F_{zw} = 0 \text{ KN/m}$$

$$F_{yw} = 0.2 \text{ KN/m}$$

### III.3.5. Les résultats

Tous les résultats après optimisations et avec la vérification de la flèche et l'interaction entre les deux structures  $f_{\text{tube}} + f_{\text{plaque}} < L/200$  à ELS et  $f_{\text{tube}} + f_{\text{plaque}} < L/300$  sous la charge variable avec L c'est la longueur de la plaque.

#### III.3.5.1. Les flèches

##### Plaque de 1m de longueur:

On doit vérifier l'interaction entre le tube et la plaque c'est-à-dire on doit vérifier la somme de deux flèches ( $f_{\text{tub}} + f_{\text{plaque}}$ ) doit être inférieure à la flèche admissible de la plaque

La flèche admissible de la plaque a ELS  $f_{\text{adm}} = 1000/200 = 5\text{mm}$

La flèche admissible de la plaque sous la charge variable Q  $f_{\text{adm}} = 1000/300 = 3.33\text{mm}$

**TABLEAU III.13. Flèche dans la plaque (1m) après interaction avec le profilé.**

Longueur de tube(m)	e âme*E peau (mm* mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube en (mm) sous		$f_{\text{tube}} + f_{\text{plaque}}$	
			Q	ELS	Q	ELS
1	7*6	3	0.24	0.3	3.01	3.42
1.5	7*7	3	1.16	1.41	3.18	3.71
2	8*8	6	1.9	2.37	3.26	3.95

(e : c'est l'épaisseur)

##### Pour la plaque de 1.45m

La flèche admissible a ELS  $f_{\text{adm}} = 1450/200 = 7.25\text{mm}$

La flèche admissible sous la charge variable Q  $f_{\text{adm}} = 1450/300 = 4.83\text{mm}$

**TABLEAU III.14. Flèche dans la plaque (1.45m) après interaction avec le profilé.**

Longueur de tube (m)	e ame*E peau (mm* mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube en (mm) sous		$f_{\text{tub}} + f_{\text{plaque}}$ (mm)	
			Q	ELS	Q	ELS
1	7*7	3	0.35	0.44	4.75	5.45
1.5	8*8	3	1.69	2.07	4.67	5.51
2	8*8	6	2.7	3.43	5.68	6.87
2m	9mm*9mm	6mm	2.7	3.48	4.81	5.97

(e : c'est l'épaisseur)

On peut réaliser tous les balcons sauf le balcon qui a une longueur de plaque 1.45m et de profondeur 2m car la flèche dépasse la flèche admissible dans ce cas on doit augmenter les épaisseurs de la plaque (peau et/ou âme).

III.3.5.2. Les contraintes et les réactions dans le tube (a ELU)

TABLEAU III.15. Contraintes et les réactions dans le tube a ELU.

plaque	tube	R <sub>x</sub> (KN)	R <sub>y</sub> (KN)	R <sub>z</sub> (KN)	M <sub>x</sub> (KN.m)	M <sub>y</sub> (KN.m)	M <sub>z</sub> (KN.m)	σ <sub>Max</sub> (MPa)
1m	1m	0	6.09	6.18	0	3.14	3.05	80.2
	1.5m	0	8.94	9.27	0	7.03	6.7	178
	2m	0	10.2	12.4	0	12.5	10.2	154
1.45m	1m	0	4.54	8.97	0	4.56	2.27	83.2
	1.5m	0	5.36	13.5	0	10.3	4.02	170

On a la limite élastique à la traction de l'acier égale à  $\sigma_e = 250 \text{ MPa}$

On remarque que toutes les contraintes maximales dans les défiant tubs métallique sont inferieurs a la contrainte limite d'élasticité alors on n'a pas la rupture des profilés d'acier.

Récapitulation des résultats

On résume les résultats obtenus dans les deux organigrammes suivants:

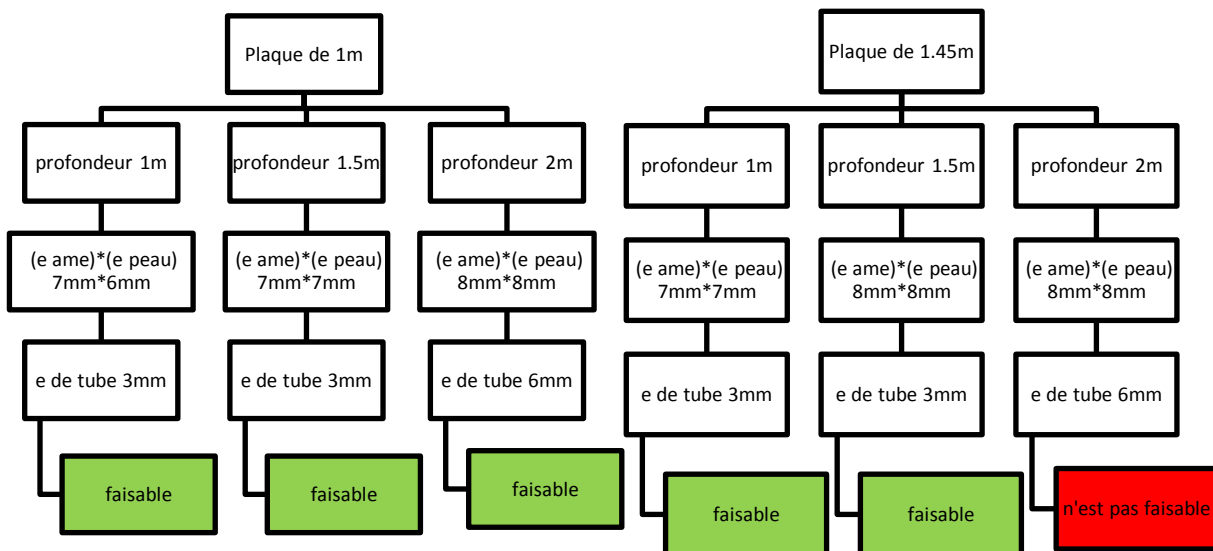


FIGURE III.10. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m.

Avec une désignation de l'épaisseur par e

III.4. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.15m

Cette fois on change la hauteur de l'âme, et on prend une hauteur de 0.15m avec une longueur de 1.45m, 1.15m et 1m, et on fait la même chose et la même démarche que la plaque précédente on vérifie les flèches sous la charge variable et sous la combinaison d'action à ELS (généralement si la flèche sous la charge variable est vérifiée l'autre flèche sou la combinaison d'action à ELS est vérifiée puisque le poids propre de la plaque est presque négligeable) et les contraintes de rupture a ELU sont vérifiées puisque on est dans le cas des petites charges. On obtient les résultats suivants:

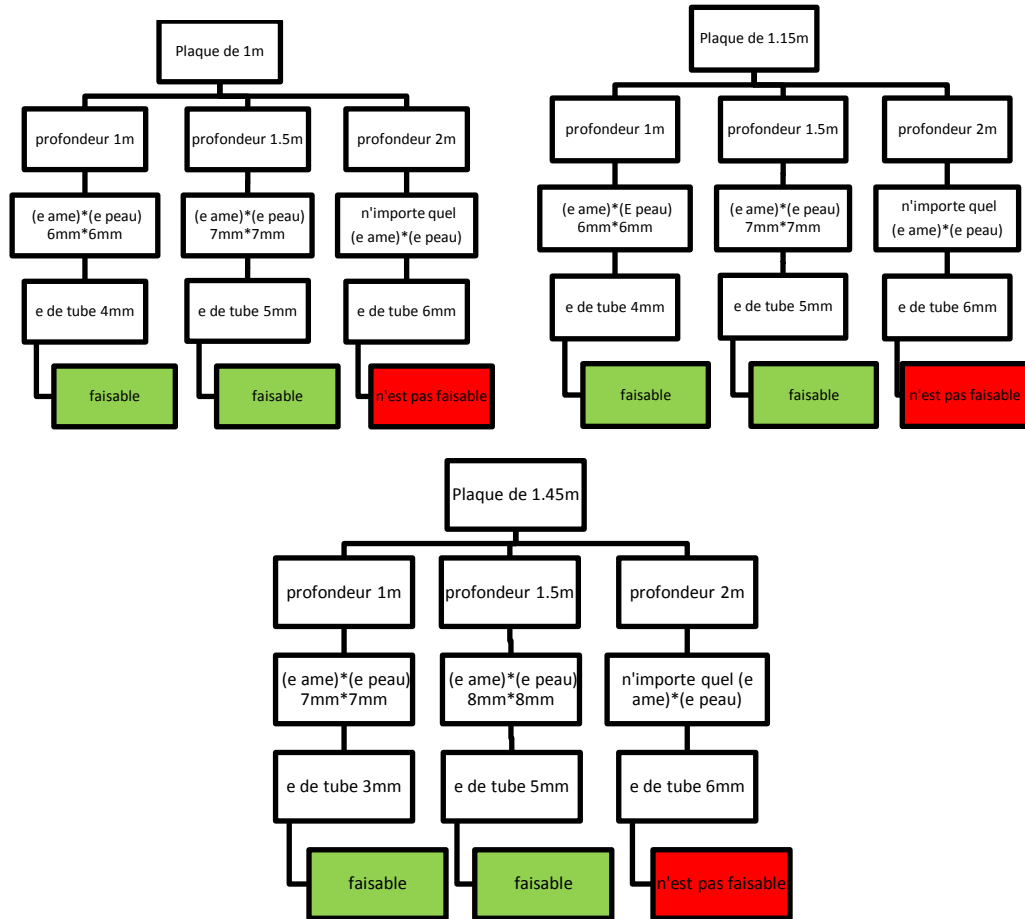


FIGURE III.11. Les résultats de la plaque de hauteur 0.15m.

III.4.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q

➤ Plaque de 1m

TABLEAU III.16. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.15m.

Longueur de tube	e âme*e peau	e de tube	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1m	6mm*6mm	4mm	2.93	0.36	3.29	3.33
1.5m	7mm*7mm	5mm	1.86	1.43	3.29	3.33
2m		6mm		3.82	>3.82	3.33

➤ Plaque de 1.15m

TABLEAU III.17. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.15m.

Longueur de tube (m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de la plaque (mm)	Flèche du tube (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	6*6	4	3.37	0.41	3.78	3.83
1.5	7*7	5	2.14	1.65	3.79	3.83
2		6		4.39	>4.39	3.83

➤ Plaque de 1.45m

**TABLEAU III.18. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.5m avec une épaisseur d'âme 0.15m.**

Longueur de tub(m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube(mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	7*7	3	4.08	0.68	4.76	4.83
1.5	8*8	5	2.78	2.00	4.78	4.83
2		6		5.54	>4.39	4.83

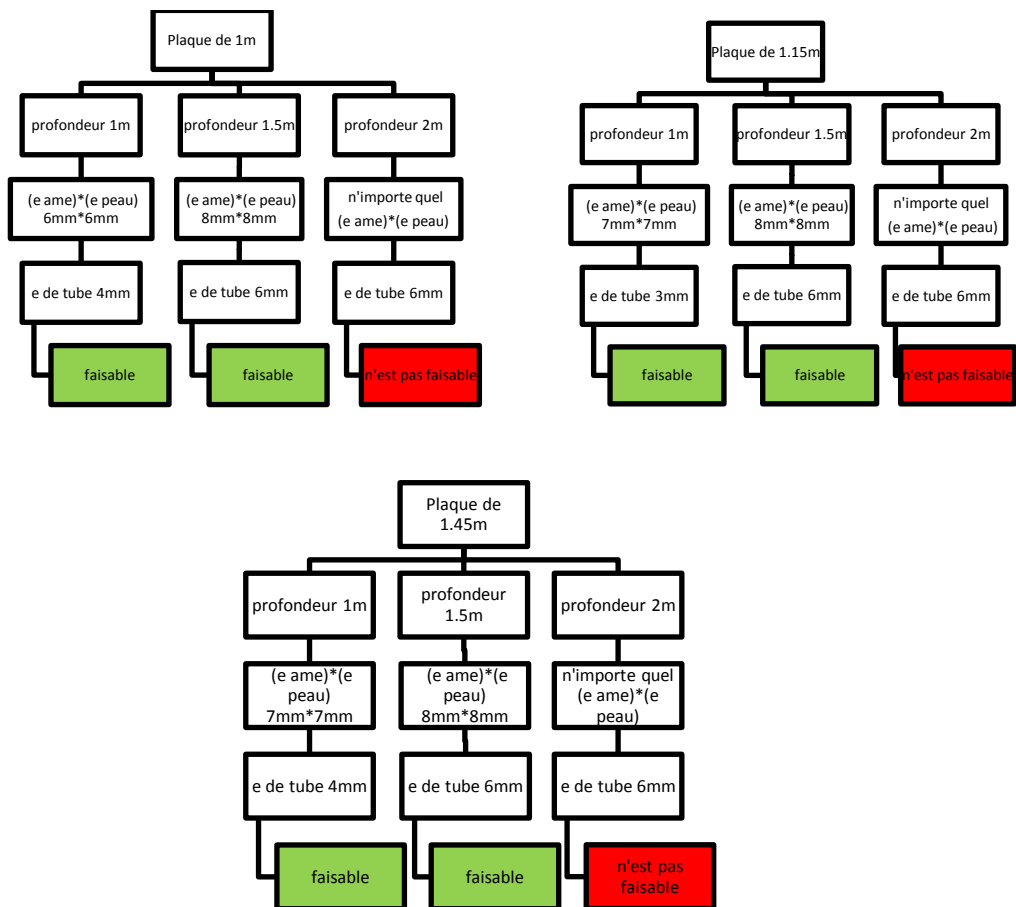
**III.4.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à ELU:**

**TABLEAU III.19. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.15m.**

Longueur de plaque(m)	e âme*e peau (mm*mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1	6*6	4.30	27.60	0.46	0.37
1.15	6*6	5.00	32.30	0.52	0.45
1.45	7*7	5.40	33.10	0.52	0.47

**III.5. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'ÂME 0.12m**

La même chose que la plaque précédente, et on obtient les résultats suivantes :



**FIGURE III.12. Les résultats de la plaque de hauteur 0.12m.**

**III.5.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q**

➤ Plaque de 1m

**TABLEAU III.20. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.12m.**

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	6*6	4	2.71	0.60	3.31	3.33
1.5	8*8	6	1.21	2.08	3.29	3.33
2		6		6.50	>6.5	3.33

➤ Plaque de 1.15m

**TABLEAU III.21. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.12m.**

Longueur de tube (m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de la plaque (mm)	Flèche du tube (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	7*7	3	2.31	0.90	3.21	3.83
1.5	8*8	6	1.63	1.41	3.04	3.83
2		6		7.50	>7.50	3.83

➤ Plaque de 1.45m

**TABLEAU III.22. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.12m.**

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	7*7	4	3.94	0.87	4.81	4.83
1.5	8*8	6	2.70	1.77	4.47	4.83
2		6		9.47	>9.47	4.83

**III.5.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à ELU:**

**TABLEAU III.23. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.12m.**

Longueur de plaque(m)	e âme*e peau (mm*mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1	6*6	3.61	27.90	0.45	0.37
1.15	6*6	4.13	24.70	0.40	0.32
1.45	7*7	5.62	32.80	0.50	0.47

**III.6. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.2m ET DE LONGUEUR 1.15m**

**III.6.1. Les contraintes sous la combinaison d'action à ELU:**

**TABLEAU III.24. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.2m.**

Longueur de plaque(m)	e âme*e peau (mm*mm)	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1.15m	7*7	3.81	24.70	0.42	0.47

III.6.2. les flèches sous la charge variable Q

➤ Plaque de 1.15m

TABLEAU III.25. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.2m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm*mm)	e de tube (mm)	Flèche de la plaque (mm)	Flèche du tube (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300
1	7*7	3	2.61	0.28	2.89	3.83
1.5	7*7	4	2.61	1.02	3.63	3.83
2	9*9	5	2.57	1.24	3.81	3.83

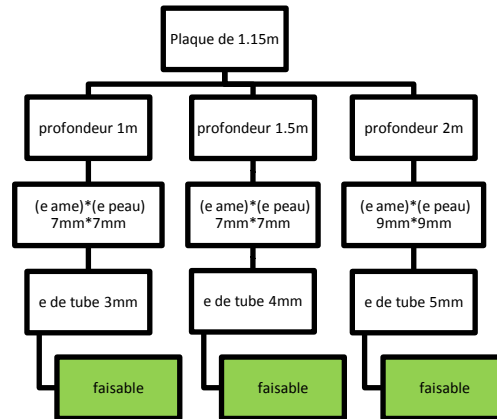


FIGURE III.13. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m avec une longueur de 1.15m.

Remarques

Si les flèches sous la charge variable sont vérifiées alors les flèches sous ELS sont aussi vérifiées puisque le poids propre est presque négligeable et en plus la flèche admissible sous la combinaison d'action ELS (L/200) est supérieure à la flèche sous la charge variable (L/200).

Et pour les critères de rupture on a toutes les contraintes des plaques (de 1m, 1.15m et 1.45m de longueur et pour chaque hauteur d'âme 0.2m, 0.15m et 0.12m) sont vérifiées par les deux critères (en contraintes Max et par la formule de Tsai-Wu).

Pour le profilé métallique on n'a pas un problème pour la résistance et peut résister à ces efforts puisque l'acier offre une très grande résistance et on plus on est dans le cas de petites charges.

On remarque aussi que les balcons en porte à faux sont limités par à port à la profondeur à une valeur max égale 2m, alors on doit chercher une autre conception pour étudier. On propose des balcons autoportants.

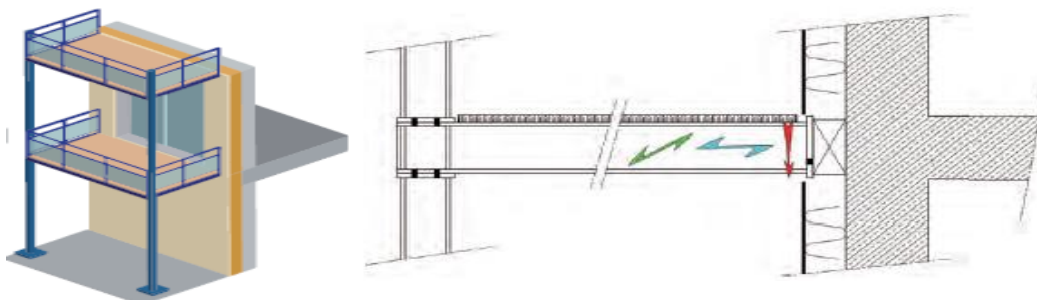


FIGURE III.14. Balcon autoportant. [9]

Et pour la modélisation on fait les mêmes démarches qu'on a faites pour les balcons en porte à faux sauf les conditions aux limites de profilé, qui seront des appuis articulés.

**III.7. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.2m (Balcon autoportant)**

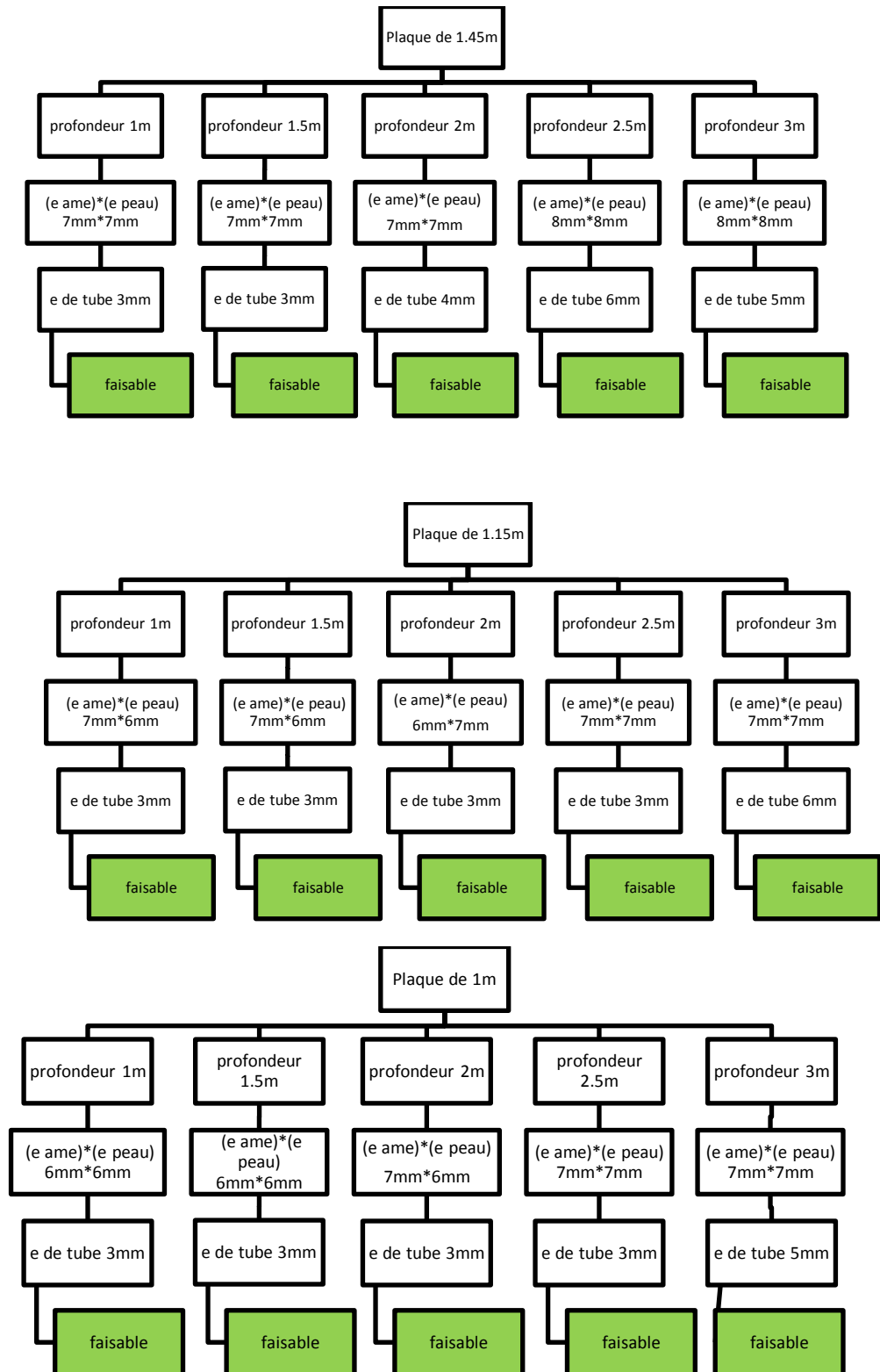


FIGURE III.15. Les résultats de la plaque de hauteur 0.2m de balcon autoportant.

**III.7.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q**

➤ Plaque de 1.45m

**TABLEAU III.26. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.2m.**

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	7*7	3	0.06	4.4	4.46	4.83
1.5	7*7	3	0.18	4.4	4.58	4.83
2	7*7	4	0.4	4.4	4.8	4.83
2.5	8*8	3	1.34	2.98	4.32	4.83
3	8*8	5	1.71	2.98	4.69	4.83

➤ Plaque de 1.15m

**TABLEAU III.27. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.2m.**

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	7*6	3	0.03	3.56	3.59	3.83
1.5	7*6	3	0.15	3.56	3.72	3.83
2	6*7	3	0.44	3.17	3.61	3.83
2.5	7*7	3	1.06	2.61	3.67	3.83
3	7*7	6	1.15	2.61	3.76	3.83

➤ Plaque de 1 m

**TABLEAU III.28. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.2m.**

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*6	3	0.03	3.19	3.22	3.33
1.5	6*6	3	0.3	3.19	3.32	3.33
2	7*6	3	0.39	2.77	3.16	3.33
2.5	7*7	3	0.93	2.02	2.95	3.33
3	7*7	5	1.18	2.02	3.2	3.33

**III.7.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à ELU:**

**TABLEAU III.29. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.2m.**

Longueur de plaque	e âme*e peau	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1.45m	7mm*7mm	5.21	33.3	0.56	0.47
1.15m	7mm*6mm	6.1	32.4	0.68	0.46
1m	6mm*6mm	4.28	28.3	0.49	0.38

III.8. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.15m (Balcon autoportant)



FIGURE III.16. Les résultats de la plaque de hauteur 0.15m de balcon autoportant.

III.8.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q

➤ Plaque de 1.45m

TABLEAU III.30. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.15m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*7	3	0.07	4.76	4.83	4.83
1.5	7*7	3	0.36	4.08	4.44	4.83
2	7*7	3	0.72	4.08	4.8	4.83
2.5	8*8	4	2.04	2.78	4.82	4.83
3	9*9	6	2.92	2.24	5.16	4.83

➤ Plaque de 1.15m

TABLEAU III.31. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.15m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*6	3	0.06	3.37	3.43	3.83
1.5	6*6	3	0.29	3.37	3.66	3.83
2	7*6	4	0.67	3	3.67	3.83
2.5	7*7	4	1.62	2.14	3.76	3.83
3	8*8	6	2.32	1.45	3.77	3.83

➤ Plaque de 1m

TABLEAU III.32. Flèches sous la charge variable de la plaque 1 m avec une épaisseur d'âme 0.15m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*6	3	0.05	2.93	2.98	3.33
1.5	6*6	3	0.25	2.93	3.18	3.33
2	6*7	3	0.76	2.17	2.93	3.33
2.5	7*7	4	1.41	1.86	3.27	3.33
3	8*8	6	2.02	1.26	3.28	3.33

III.8.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action à l'ELU:

TABLEAU III.33. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.15m.

Longueur de plaque	e âme*e peau	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1.45m	6mm*6mm	5.25	42.9	0.57	0.66
1.15m	6mm*6mm	5.04	32.7	0.53	0.46
1 m	7mm*7mm	4.38	28	0.47	0.38

III.9. MODELISATION DE LA PLAQUE DE HAUTEUR DE L'AME 0.12m (Balcon autoportant)

La même chose que la plaque précédente, et on obtient les résultats suivantes :

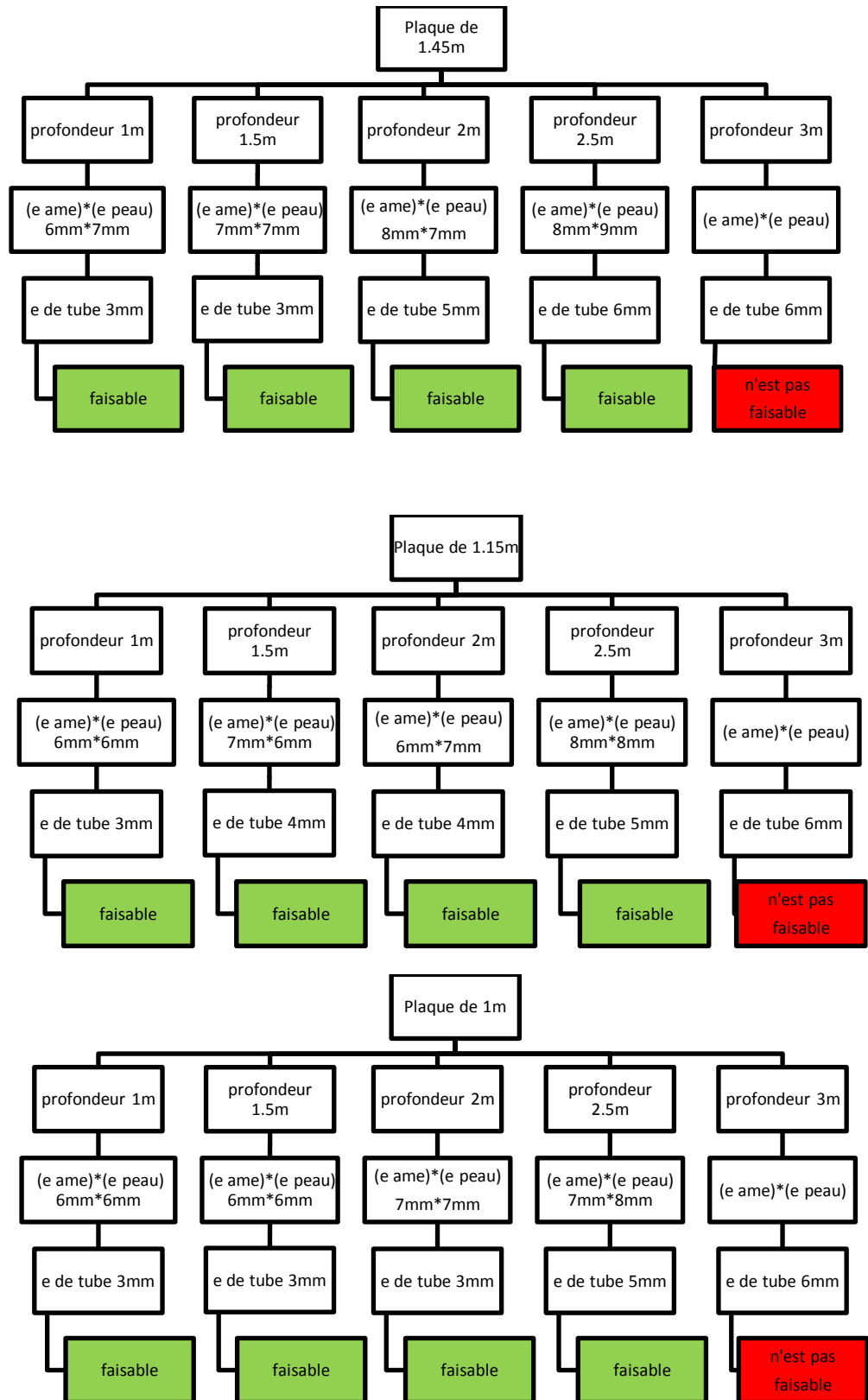


FIGURE III.17. Les résultats de la plaque de hauteur 0.12m de balcon autoportant.

III.9.1. Vérification des flèches sous la charge variable Q

➤ Plaque de 1.45m

TABLEAU III.34. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.45m avec une épaisseur d'âme 0.12m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tub (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*7	3	0.13	4.49	4.62	4.83
1.5	7*7	3	0.6	3.94	4.54	4.83
2	8*7	5	1.17	3.62	4.79	4.83
2.5	8*9	6	2.42	2.51	4.55	4.83
3		6	5		>4.83	4.83

➤ Plaque de 1.15m

TABLEAU III.35. Flèches sous la charge variable de la plaque 1.15m avec une épaisseur d'âme 0.12m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*6	3	0.1	3.73	3.83	3.83
1.5	7*6	4	0.37	3.38	3.75	3.83
2	6*7	4	1.03	2.73	3.76	3.83
2.5	8*8	5	1.95	1.63	3.58	3.83
3		6			>3.83	3.83

➤ Plaque de 1m

TABLEAU III.36. Flèches sous la charge variable de la plaque 1m avec une épaisseur d'âme 0.12m.

Longueur de tube(m)	e âme*e peau (mm)	e de tube (mm)	Flèche de tube (mm)	Flèche de plaque (mm)	Flèche de tube + plaque (mm)	Flèche admissible L/300 (mm)
1	6*6	3	0.09	2.71	2.8	3.33
1.5	6*6	3	0.41	2.71	3.12	3.33
2	7*7	3	1.33	1.78	3.11	3.33
2.5	7*8	5	1.95	1.35	3.3	3.33
3		6	3.45		>3.33	3.33

III.9.2. Vérification des contraintes sous la combinaison d'action a ELU:

TABLEAU III.37. Contraintes Max sous la combinaison d'action à ELU de la plaque de hauteur 0.12m.

Longueur de plaque	e âme*e peau	$\sigma_{xx}$ (MPa)	$\sigma_{yy}$ (MPa)	$\sigma_{xy}$ (MPa)	Max de la formule (A)
1.45m	6mm*7mm	5.38	41.8	0.54	0.63
1.15m	6mm*6mm	5.48	33.1	0.54	0.47
1m	6mm*6mm	2.57	19.6	0.24	0.24

Et pour les critères de rupture on a toutes les contraintes des plaques (de 1m, 1.15m et 1.45m de longueur et pour chaque hauteur d'âme 0.2m, 0.15m et 0.12m) pour le balcon autoportant sont vérifiées par les deux critères (en contraintes Max et par la formule de Tsai-Wu).

### **III.10. CONCLUSION**

Maintenant et d'après les résultats de la modélisation, on constate qu'une structure en porte-à-faux est limitée par rapport à la profondeur à 2m au max par contre les balcons autoportants on peut aller jusqu'à 3m sans problème, et par rapport à la hauteur de profilé il est évident que le profilé le plus grand offre une très bonne résistance grâce à leur inertie, mais en général, on peut dire que ces épaisseurs (épaisseurs de l'âme et de peau) sont importantes, c'est logique puisque la direction des fibres et les âmes sont perpendiculaires à la direction de la flexion de plaque, et pour diminuer ces dimensions et par conséquent le cout on recommande une autre conception de matériau composite et cette fois-ci on dirige les fibres et les âmes dans le sens de la flexion par le même mode de fabrication ou bien par le mode de fabrication des plaques en sandwich.



---

# CHAPITRE IV

---

## ETUDE D'EXECUTION



CHAPITRE IV. ETUDE D'EXECUTION

IV.1. ASSEMBLAGE POUTRE EN ACIER AVEC LE BETON

L'assemblage de la poutre en acier avec le béton est similaire à l'Assemblage de pied de poteau, ce type d'assemblages est utilisé lorsqu'il s'agit de relier une structure en acier à un noyau de béton, voir la figure suivante. La base du poteau est soudée à une platine mince ou épaisse, boulonnée au noyau du béton à l'aide des tiges d'ancrage.

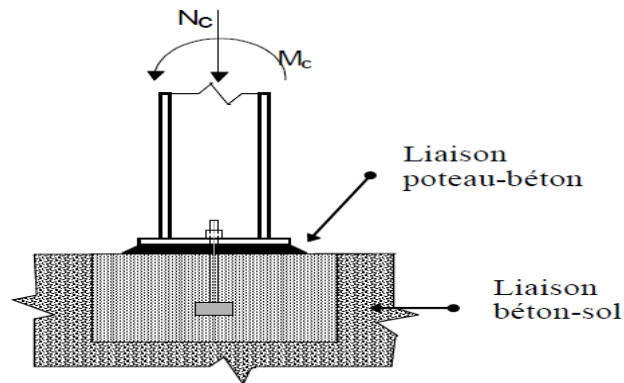


FIGURE IV.1. Assemblage pied de poteau. [12]

Et dans notre cas, on a la flexion dans une dalle en béton, et ces fixations ont des armatures en attente destinées à être incorporées dans la dalle et dans ce cas on doit calculer une longueur d'ancrage. (Ce travail déjà fait par un autre groupe).

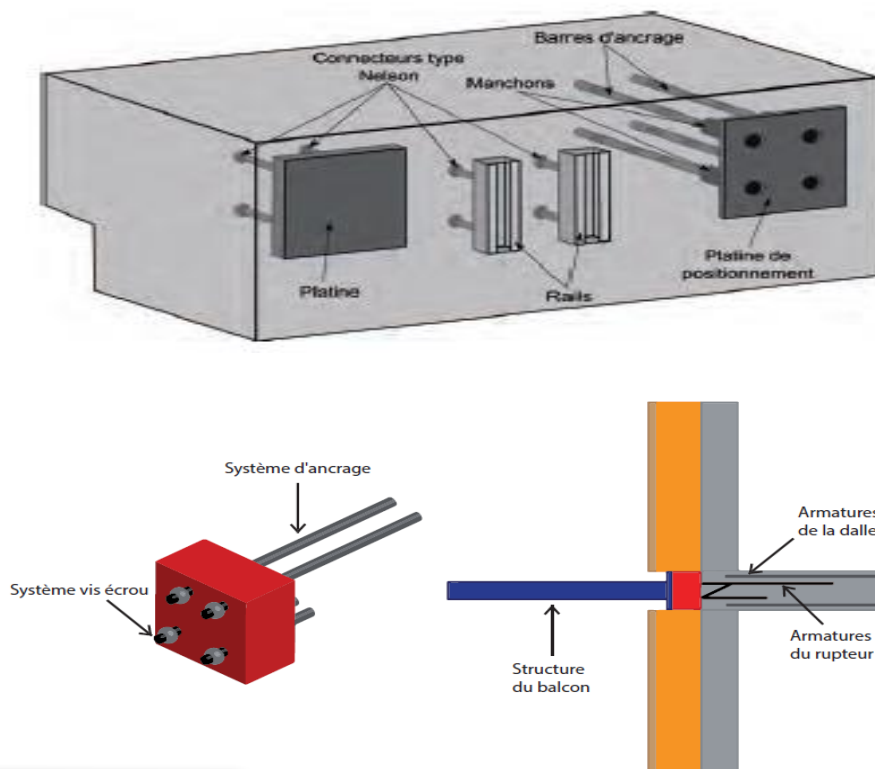


FIGURE IV.2. Platine et longueur d'ancrage. [9]

**IV.2. SOUDURE POUTRE-PLATINE**

L'effort résistant d'un cordon de soudure d'angle est le produit de sa longueur L, de sa gorge a, et de la contrainte limite  $F_{vw,d}$ . et les cordons concaves (figure a) ou plats (figure b) sont préférés, en général, aux cordons bombés (figure c).



FIGURE IV.3. Exécution des soudures d'angle.

$$F_{w,Rd} = L \cdot a \cdot F_{vw,d}$$

Et la contrainte limite ( $F_{vw,d}$ ) se calcule comme suit:

$$F_{vw,d} = \frac{fu}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}} \tag{IV.1}$$

Avec les Coefficients partiels de sécurité :  $\gamma_{M0} = 1$  ,  $\gamma_{M1} = 1$  et  $\gamma_{M2} = 1.25$

$\beta_w = 0.8$  d'après le guide p89

$$F_{vw,d} = 340 / (\sqrt{3} \cdot 0.8 \cdot 1.25)$$

$$F_{vw,d} = 196.3 \text{ MPa}$$

Par exemple pour le tube de (200\*100) mm et une gorge de 1mm on trouve un effort résistant :

$$F_{w,Rd} = (0.2 \cdot 2 + 0.1 \cdot 2) \cdot 0.001 \cdot 196.3 = 117.78 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$F_{w,Rd} = 117.78 \text{ KN}$$

Et cet effort de résistance est largement suffisant pour résister à l'effort de tranchant pour la direction y et z ( $V_y$  et  $V_z$ ).

**IV.3. EVACUATION DES EAUX PLUVIALE**

On draine les eaux pluviales vers l'extérieur par une pente minimale de 2%, dans ce cas les eaux peuvent être récupérées par un chéneau sur la partie extérieure au bord de balcon et dans ce cas on doit avoir une continuité d'étanchéité à l'eau de la façade avec le balcon pour que les eaux pluviales puissent s'écouler vers l'extérieur. Et on peut remplacer les chéneaux par de simples gargouilles.

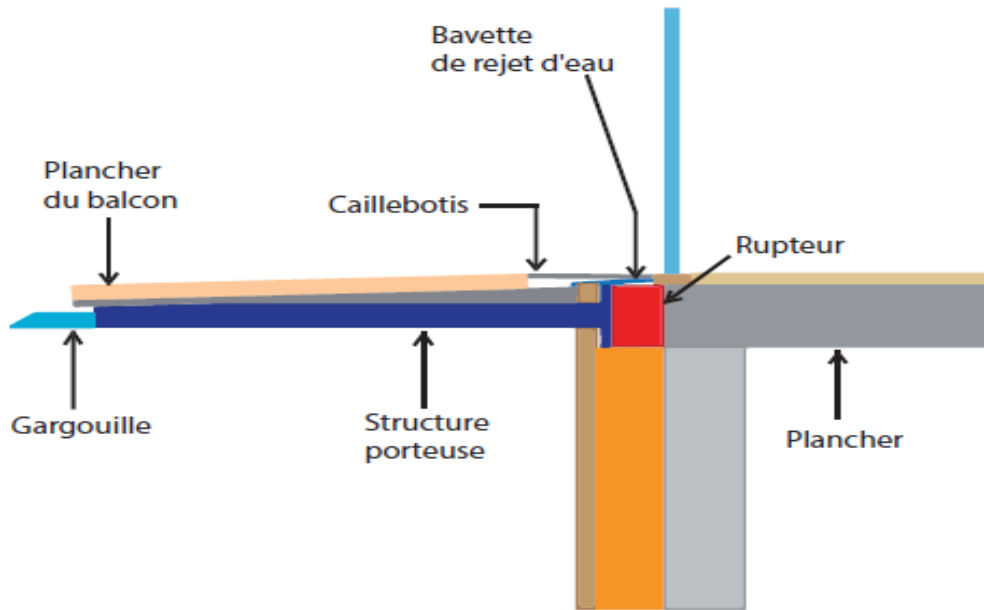


FIGURE IV.4. Mise en œuvre d'étanchéité avec pente vers l'extérieur. [9]

#### IV.4. PROTECTION DE SUPPORT DE FIXATION

La fixation de la structure rapportée sur le support correspond à une discontinuité dans la composition de la façade, et offre donc des plans de liaison propices à l'infiltration d'eau dans la façade. Toutes les possibilités d'intrusion d'eau doivent être colmatées soit par un film étanche situé en face extérieure du nu de fixation de façade (pare pluie), incluant une protection de l'assemblage par des éléments étanches inclus dans la conception, et le dispositif d'étanchéité peut être composé d'un mastic élastomère.

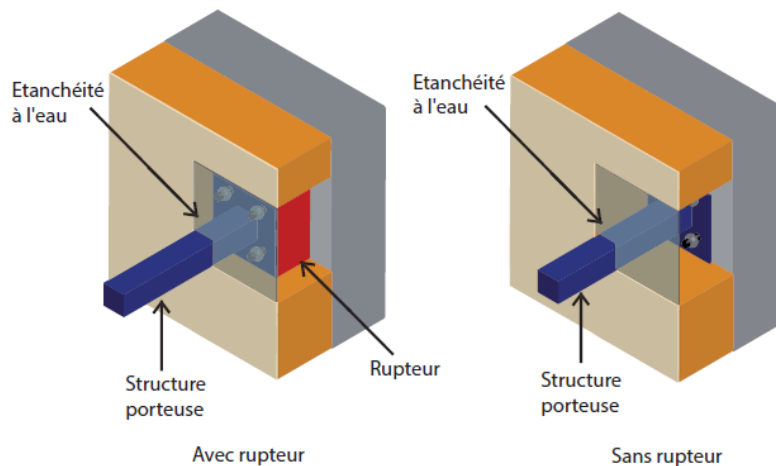


FIGURE IV.5. Disposition d'étanchéité aux niveaux des fixations. [9]

#### IV.5. ETANCHEITE A L'AIR (calfeutrement)

Pour réduire les déperditions thermiques aux niveaux des fixations du balcon ou de la coursive, il est recommandé de mettre en œuvre un complément d'isolation tout autour des poutres, au prolongement de l'isolant de la façade. Dans le cas de la mise en œuvre des ruptures thermiques,

le bon fonctionnement de ces derniers requiert une bonne étanchéité à l'air. Un bon calfeutrement entre l'isolant de façade et les ruptures est donc nécessaire.

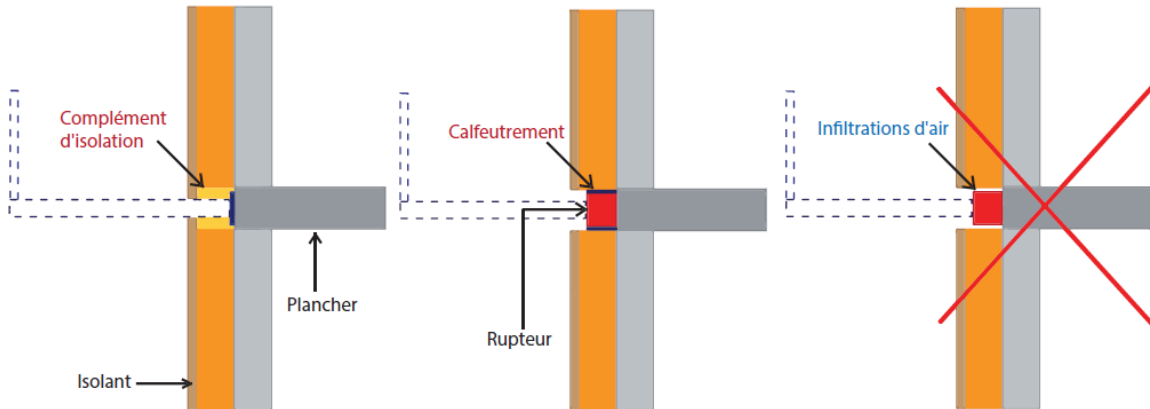


FIGURE IV.6. Etanchéité à l'air et complément d'isolation.[9]

#### IV.6. ACCESSIBILITE

L'arrêté du 1 aout 2006 et la circulaire du 30 novembre 2007 stipulent que pour tout balcon/coursive situé au droit du niveau accessible du logement doit comporter un accès supérieur ou égale à 0.8m de passage avec un ressaut inférieur ou égal a 2cm depuis l'extérieur.

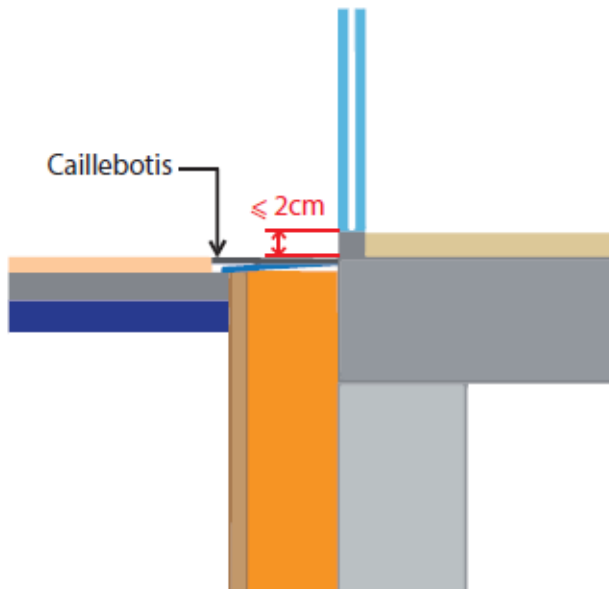


FIGURE IV.7. Accessibilité des personnes (ressaut maximal de 2 cm). [9]

#### IV.7. ASSEMBLAGE DES GARDE-CORPS

Les garde-corps sont de type bardage verticale on doit éviter la liaison avec le matériau composite c'est-à-dire on doit lier le garde-corps avec le profilé métallique et avec la façade dans le cas où on n'a pas l'isolation thermique pour ne pas dégrader l'isolation thermique.

#### IV.8. VUE 3D DE BALCON

Cette vue pour un balcon de 1.5m de profondeur avec une longueur de plaque égale 1.45m et un espacement entre les âmes de 0.15m, et un espacement entre les barreaudages égale à 0.1m

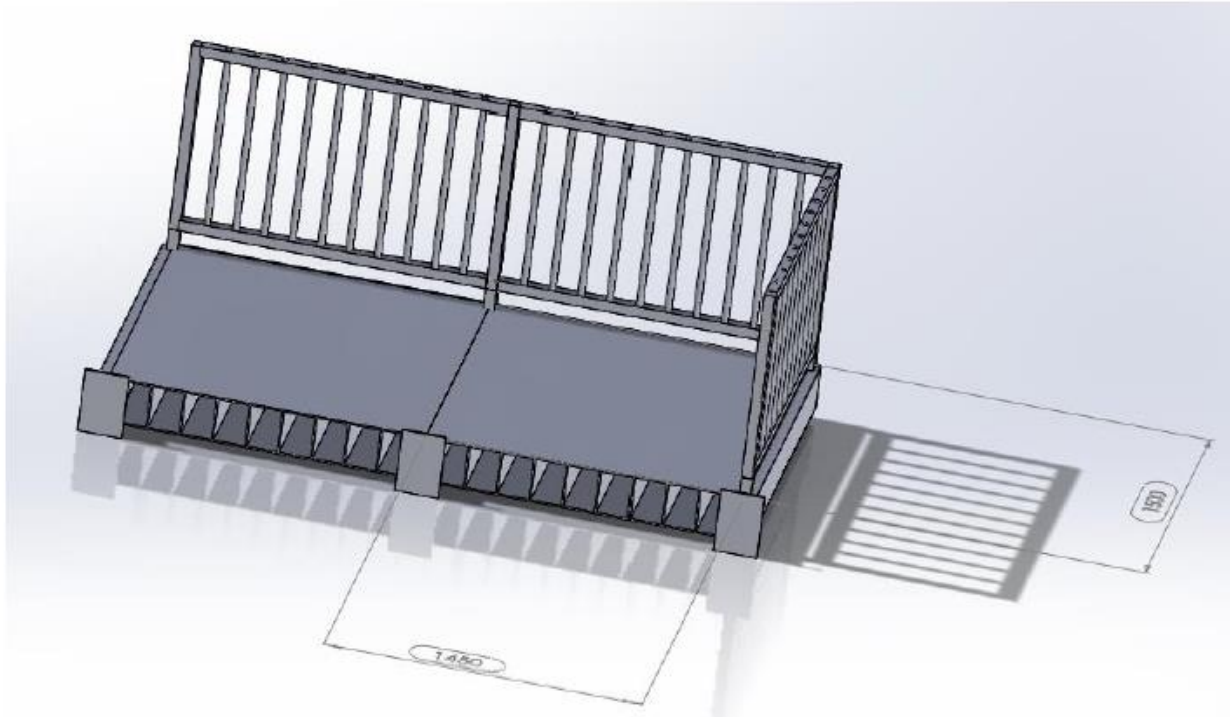


FIGURE IV.8. Vue 3d de balcon.



---

# CONCLUSION GENERALE

---



### CONCLUSION GENERALE

Tout au long de ce rapport, nous avons présenté les différentes étapes de l'étude de faisabilité d'un plancher innovant destiné pour la fabrication d'un balcon. Ce travail étant réalisé au sein de l'Icam de Nantes, en France.

Dans la conception du plancher, nous avons utilisé les logiciels **Patran** et **Solidworks**, Parmi les avantages de ces derniers sont : la rapidité d'exécution, l'exactitude des résultats et une vitesse d'exécution assez élevée.

Et l'étude que nous avons menée, nous a permis de faire le lien entre les connaissances acquises durant notre promotion et de compléter celles-ci par des **nouvelles théories**. Ce projet nous a donné également l'opportunité de s'initier à la vie professionnelle, de plus, nous nous sommes confrontés aux difficultés réelles du monde de recherche.

Au cours de la réalisation de ce projet, nous avons été astreints par quelques limites notamment, la contrainte du temps qui était relativement un obstacle devant l'ajout de certaines autres parties.

L'ingénieur est sensé de proposer des solutions raisonnables et efficaces; et d'une manière générale, une conception justifier doit prendre en compte premièrement la sécurité pour éviter carrément les dégâts humains et matériels, sans oublier l'économie et le temps d'exécution.

En fin, nous espérons que cette modeste étude soit comme une référence contenant un minimum d'informations utiles pour faciliter les futures études dans ce domaine.

---



---

# BIBLIOGRAPHIE

---



## Référence Bibliographique

- [1] “Mécanique des Matériaux et Structures Composites, **Jean-Marie Berthelot**, ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, France”
- [2] “Analyse Des Fissurations Des Matériaux Composites **Abderrezak Gharbi**, Université de Constantine, Algérie”
- [3] “Mécanique des Composites Hautes Performances Version 2, **S. Drapier**, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, France 2014”
- [7] “ Matériaux Composites, Centre Technique des Industries mécaniques, France”
- [5] “Catalogue Des Matériaux Composites, SF COMPOSITES, France”
- [6] “Calcul Des Propriétés Élastiques Des Tissus Utilisés Dans Les Matériaux Composites, **F. DAL MASO** et **J. MÉZIÈRE**, Institut français du pétrole”
- [7] “Les matériaux composites dans l’industrie des sports et loisirs, Congrès RFIS, juin 2005”
- [8] “Matériaux composites et structures composites, **Lionel GENDRE**, Université Paris-SACLAY, France 2011”
- [9] “Guide des balcons et coursives métalliques rapportes mai 2013”
- [10] “Règles de sécurité relatives aux dimensions des garde-corps et rampes d'escalier”
- [11] “Dilatation thermique, Luc Tremblay, Collège Mérici, Québec”
- [12] “Calcul des assemblages en acier poutre-poteau boulonnés par platine d’extrémité - Application de l’approche de l’Eurocode 3-”

## Référence Webographie

[S1] <http://www.f3news.fr/t1936-proprietes-des-materiaux-composites>

[S2] <http://www.mon-garde-corps.fr>