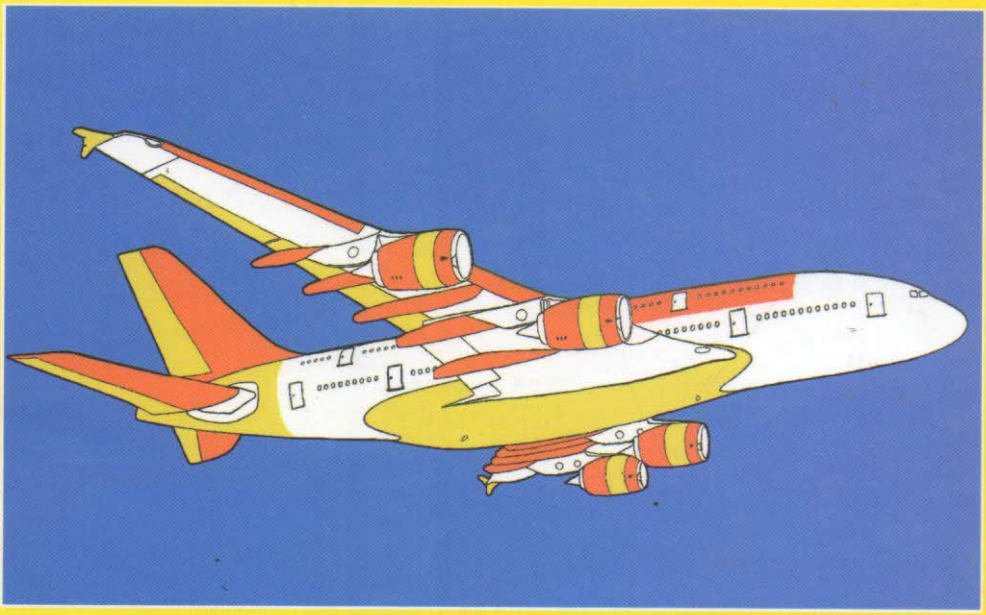

Matériaux composites

5e édition révisée

Daniel Gay

Hermes Lavoisier

Table des matières

Avant-propos 13

Première partie : Principes de construction

Chapitre 1. Les matériaux composites, leur intérêt, leurs propriétés physiques 19

1.1. Qu'est-ce qu'un matériau composite ? 19
1.2. Fibres et matrices 20
Les fibres – les matrices.
1.3. Que fabrique-t-on en matériaux composites ? 25
1.4. L'exemple type d'intérêt des matériaux composites 27
1.5. Quelques exemples de remplacement de solutions classiques par des solutions composites 28
1.6. Les principales propriétés physiques 30
1.7. Autres propriétés remarquables 34

Chapitre 2. Procédés de fabrication 37

2.1. Le formage par moulage 37
Le moulage au contact – le moulage poinçon-matrice– le moulage sous vide – le moulage par injection de résine – le moulage par injection de pré-imprégné – moulage par injection de mousse – moulage de pièces de révolution.
2.2. Autres procédés de formage 44
Formage de plaque – formage de profilés – formage par estampage – préformage par assemblage tridimensionnel – découpe des tissus et détourage des stratifiés.
2.3. Reconnaissance pratique des procédés de mise en forme 47
Les sigles – les coûts comparés.

Chapitre 3. Les propriétés du pli 51

3.1. Isotropie, anisotropie 51
3.2. Les caractéristiques du mélange renfort-matrice 56
La teneur en masse de renfort – la teneur en volume de renfort – la masse volumique du pli – l'épaisseur du pli.
3.3. Le pli unidirectionnel 60
Modules élastiques – résistance à la rupture d'un pli – exemples : unidirectionnels fibres/époxyde – exemples : unidirectionnels « hautes performances ».
3.4. Le pli tissé 67
L'allure du renfort tissé – modules élastiques du pli tissé – exemples : tissus équilibrés/matrice époxyde.
3.5. Les mats et matrices chargées 70
Les mats – exemple récapitulatif : les plis verre/résine – les charges sphériques – autres renforts.
3.6. Les tissus multidimensionnels 75
3.7. Composites à matrice métallique 77
3.8. Les essais 79

Chapitre 4. Les matériaux sandwiches 81

4.1. Qu'est-ce qu'un matériau sandwich ? 81
4.2. La flexion simplifiée 83
Les contraintes – les déplacements.
4.3. Quelques particularités 87
Masses comparées à rigidité de flexion ⟨EI⟩ équivalente – les structures sandwiches se détériorent par flambement.
4.4. Problèmes de construction 89
Un exemple de matériau pour le cœur des structures sandwiches : les « nids d'abeilles » – la mise en forme – l'insertion de pièces et ferrures d'attache – la réparation (revêtements stratifiés).
4.5. Le contrôle qualité non destructif 95

Chapitre 5. Conception, dessin 99

5.1. Le dessin d'une pièce composite 99
Les propriétés caractéristiques – les valeurs guides du prédimensionnement.

5.2. Le stratifié 103
Nappes et tissus – la bonne orientation d'un pli – code de représentation d'un stratifié – l'agencement des plis.
5.3. La rupture des stratifiés 115
Endommagement – le critère de rupture de Hill-Tsai.
5.4. Prédimensionnement d'un stratifié 119
Modules élastiques, déformations d'un stratifié – cas d'un chargement simple – cas d'un chargement complexe : composition approchée d'un stratifié – cas d'un chargement complexe : composition optimum d'un stratifié – particularités de comportement des stratifiés.

Chapitre 6. Conception (assemblage) 157

6.1. Rivetage, boulonnage 157
Les principaux modes de rupture de liaisons boulonnées de matériaux composites – valeurs recommandées – rivetage – boulonnage.
6.2. Collage 167
Les adhésifs utilisés – la géométrie des joints collés – le dimensionnement des surfaces collées – représentation des collages, exemples.
6.3. Les inserts 178

Chapitre 7. Matériaux composites et construction aérospatiale 181

7.1. Les avions 182
Les pièces composites dans les avions – affectation des composites selon leur nature – quelques remarques – les aspects spécifiques de la résistance des structures – les gros porteurs – les moyens porteurs – les avions légers – les avions de combat – architecture et réalisation des pièces composites d'avions – les dispositifs de freinage – le futur.
7.2. Les hélicoptères 214
Situation – les zones composites – les pales – le moyeu rotor – les autres pièces composites travaillantes.
7.3. Les hélices d'avions 222
7.4. Les ailettes de turbines composites 227
7.5. Les applications spatiales 228
Satellites – réservoirs – les tuyères – les autres pièces composites.

Chapitre 8. Matériaux composites et applications diverses 239

8.1. Les composites et la construction automobile 239
Introduction – évaluation et évolution – recherche et développement.
8.2. Les composites et la construction navale 254
Compétition – navires.
8.3. Sports et loisirs 258
Skis – bicyclettes
8.4. Applications diverses 260

Deuxième partie : Comportement mécanique des matériaux stratifiés

Chapitre 9. Milieu élastique anisotrope 269

9.1. Rappels et notations 269
Mécanique des milieux continus – nombre de coefficients distincts.
9.2. Matériau orthotrope 272
9.3. Matériau isotrope transverse 273

Chapitre 10. Constantes élastiques d'un composite unidirectionnel 277

10.1. Module suivant le sens long E_ℓ 277
10.2. Coefficient de Poisson 280
10.3. Module suivant le sens travers E_t 281
10.4. Module de cisaillement $G_{\ell t}$ 283
10.5. Propriétés thermoélastiques 285
Matériau isotrope classique – cas du composite unidirectionnel – comportement thermomécanique de l'unidirectionnel.

Chapitre 11. Constantes élastiques d'un pli dans une direction quelconque 289

11.1. Coefficients de souplesse 289
11.2. Coefficients de raideur 295
11.3. Cas d'un chargement thermomécanique 299
Coefficients de souplesse – coefficients de raideur.

Chapitre 12. Le comportement des plaques stratifiées minces 303

12.1. Stratifié plan à symétrie miroir 303
Comportement en membrane – modules apparents du stratifié – conséquence : détermination pratique d'un stratifié travaillant en membrane – comportement en flexion – conséquence : détermination pratique d'un stratifié travaillant à la flexion – calcul sommaire à la flexion – cas d'un chargement thermomécanique.
12.2. Stratifié sans symétrie miroir 330
Comportements en membrane-flexion couplés – cas d'un chargement thermomécanique.

Troisième partie : Justificatifs, poutres composites, plaques épaisses

Chapitre 13. Coefficients élastiques 335

13.1. Coefficients élastiques d'un matériau orthotrope 335
13.2. Coefficients élastiques d'un matériau isotrope transverse 339
Rappel – rotation autour d'un axe d'orthotropie (axe dans le sens travers).
13.3. Cas d'un pli 350

Chapitre 14. Critère de rupture de Hill-Tsai 351

14.1. Matériau isotrope : critère de Von Misès 351
14.2. Matériau orthotrope : critère de Hill-Tsai 355
Remarques préalables – cas d'un matériau isotrope transverse – cas d'un pli unidirectionnel sous contraintes planes.
14.3. Évolution de la résistance d'un pli unidirectionnel suivant la direction de sollicitation 359
Résistance à la traction ou à la compression – Résistance au cisaillement.

Chapitre 15. Les poutres composites, flexion 363

15.1. Flexion des poutres à phases isotropes, à plan de symétrie 364
Degrés de liberté – le collage parfait des phases entre elles – relations d'équilibre – relations de comportement – formulation technique – interprétation énergétique – extension au cas dynamique.
15.2. Cas d'une section droite quelconque (asymétrique) 385

Chapitre 16. Les poutres composites, torsion 391

16.1. Étude de la torsion uniforme 391
Degré de liberté de torsion – relation de comportement – détermination de la fonction $\Phi(y,z)$ – interprétation énergétique.
16.2. Position du centre de torsion 397

Chapitre 17. Flexion des plaques stratifiées épaisses 403

17.1. Remarques préliminaires 403
Contrainte normale transverse σ_z – contraintes dites « de cisaillement transverse » τ_{xz} et τ_{yz} – hypothèses.
17.2. Champ des déplacements 408
17.3. Déformations 411
17.4. Relations de comportement 411
Comportement en membrane – comportement en flexion – comportement en cisaillement transverse.
17.5. Relations d'équilibre 415
Équilibre transverse – équilibre en flexion.
17.6. Formulation technique de la flexion 417
Contraintes planes de flexion – contraintes de cisaillement transverse de flexion – caractérisation des gauchissements de flexion η_x et η_y – fonctions de gauchissement – conséquences – interprétation énergétique.
17.7. Exemples 431
Plaque homogène orthotrope – plaque sandwich.

Quatrième partie : Applications

Chapitre 18. Applications 439

18.1. Niveau 1 439
Poutre sandwich sur deux appuis – coefficients de Poisson d'un unidirectionnel – pale d'hélicoptère – Arbre de transmission pour camion – Volant d'inertie en carbone/époxyde – Saumon de voilure en carbone/époxyde – Fibres de carbone revêtues de nickel – Tuyauterie sous pression en verre/époxyde – Réservoir bobiné ; angle d'enroulement – Réservoir bobiné prise en compte des ouvertures des fonds – Détermination de la teneur en volume de fibres par pyrolyse – Levier de renvoi en carbone/peek unidirectionnel et

fibres courtes – Poteau télégraphique en verre/résine – Pli unidirectionnel de carbone HR – Bras manipulateur de navette spatiale.

18.2. Niveau 2 504

Poutre sandwich : calcul simplifié du coefficient de section réduite – Programme de calcul d'un stratifié – Stratifiés kevlar/époxyde : évolution de la raideur suivant la direction de la sollicitation – Contraintes thermiques résiduelles lors de la cuisson d'un stratifié – Comportement thermoélastique d'un tube en verre/polyester bobiné – Tube en polymère fretté avec chargement thermique et fluage – Rupture de premier pli d'un stratifié ; rupture complète – Stratifié optimum pour un état de contraintes isotrope – Stratifié constitué de couches identiques de tissu équilibré – Longeron de voilure en carbone/époxyde – Détermination des caractéristiques élastiques d'un unidirectionnel carbone/époxyde par essai de traction – Coque de voilier en verre/polyester – Détermination du module de cisaillement plan d'un pli de tissu équilibré – Stratifié quasi isotrope – Plaque orthotrope en torsion pure – Plaque injectée par le procédé R.T.M. – Comportement thermoélastique d'un pli de tissu équilibré.

18.3. Niveau 3 593

Collage cylindrique – Éclissage collé – Poutre composite à deux couches – Flambement d'une poutre sandwich – Cisaillement de flexion dans une poutre sandwich – Colonne en polymère frettée – Flexion cylindrique d'une plaque orthotrope épaisse uniformément chargée – Flexion d'une plaque console sandwich – Vibrations de flexion d'une poutre sandwich.

Annexes 639

Annexe 1. Contraintes dans les plis d'un stratifié carbone/époxyde chargé dans son plan 639

Annexe 2. Flambement des structures orthotropes 653

Annexe 3. Normes françaises sur les composites 661

Bibliographie 665

Index alphabétique/lexique 667