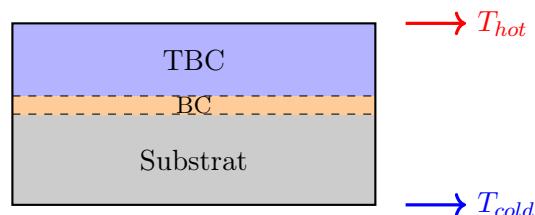


Rapport de Synthèse

Modélisation Thermo-Mécanique
des Systèmes Barrière Thermique (TBC)

Méthode Spectrale et Implémentation Python/Streamlit

Projet Industriel 5A-IDSA



Projet : Industriel 5A-IDSA
Encadrement : ONERA (A. Vattré)
Partenaires : ESTACA / Safran
Date : 23 janvier 2026

Mots-clés : Barrière thermique, Méthode spectrale, Multicouche,
Analyse modale, Critères d'endommagement, Streamlit

Table des matières

Résumé Exécutif	3
1 Introduction	4
1.1 Contexte Industriel : Aubes de Turbines Nouvelle Génération	4
1.2 Objectifs du Projet	4
2 Système Multicouche Étudié	4
2.1 Paramètres Adimensionnels Clés	4
2.2 Propriétés Matériaux	5
3 Modélisation Mathématique	5
3.1 Étape 1-2 : Représentation Spectrale de la Température	5
3.2 Étape 3 : Solution Thermique par Couche	5
3.3 Étape 4 : Loi de Comportement Thermo-Élastique	5
3.4 Étape 5 : Ansatz de Déplacement	6
3.5 Étape 6 : Matrice Dynamique $\Gamma(\tau)$ et Valeurs Propres	6
3.6 Étape 7 : Assemblage 9×9 et Termes Thermiques	7
3.7 Étape 8 : Assemblage Multicouche	7
4 Critères d'Endommagement	8
5 Interprétation Physique des Résultats	9
5.1 Signification des Contraintes Transverses	9
5.2 Zones Critiques Typiques	9
5.3 Influence des Paramètres sur les Contraintes	9
5.4 Modes de Rupture aux Interfaces	9
6 Stabilité Numérique	9
6.1 Préconditionnement par Équilibrage	9
6.2 Régularisation de Tikhonov	10
7 Comparaison : Méthode Spectrale vs CLT	10
8 Validation : Référence ONERA/Safran	10
9 Architecture du Code et Interface	11
9.1 Structure des Répertoires	11
9.2 Tableau de Correspondance Théorie \leftrightarrow Code	11
9.3 Interface Streamlit	11
10 Conclusion	11

Résumé Exécutif

Projet 5A-IDSA : Évaluation Thermomécanique des Aubes de Turbines

Encadrement : ONERA (Aurélien Vattré) / ESTACA (Daniel Gaffié)

Objectif : Développer un outil de simulation numérique pour l'évaluation thermomécanique des zones critiques d'endommagement dans les aubes de turbines multicouches nouvelle génération.

Contexte Industriel : Les aubes de turbines sont soumises à des conditions extrêmes : températures dépassant 1000°C, gradients thermiques sévères (jusqu'à 200°C sur quelques millimètres), et chargements mécaniques cycliques. Des architectures multicouches combinant substrat métallique, couche d'accroche et revêtement céramique sont utilisées pour améliorer leur durabilité.

Méthodologie Développée :

- Approche **semi-analytique** basée sur la décomposition spectrale (séries de Fourier doubles)
- Construction de la matrice dynamique $\Gamma(\tau)$ avec opérateurs L_{jk}
- Résolution du problème aux valeurs propres $\det(\Gamma(\tau)) = 0$
- Assemblage matriciel bloc-diagonal 9×9 avec sollicitation thermique
- Critères d'endommagement D et Tsai-Wu pour identification des zones critiques

Résultats Clés :

Métrique	Plage Typique	Seuil Critique
Température interface substrat/bondcoat	800–1050°C	$T_{crit} = 1100°C$
Indicateur d'endommagement D	0.2–0.8	$D \geq 1$ (rupture)
Contrainte normale σ_{33} max	50–200 MPa	$\sigma_t^{ceramic} = 150$ MPa
Contrainte cisaillement σ_{13} max	20–80 MPa	$\tau_{crit} = 120$ MPa

Livrables du Projet :

1. **Module de calcul :** `core/mechanical_pdf.py`
2. **Interface Streamlit :** Application interactive avec dashboard et visualisations 3D
3. **Documentation technique :** Ce rapport de synthèse

1 Introduction

1.1 Contexte Industriel : Aubes de Turbines Nouvelle Génération

Les aubes de turbines constituent l'un des composants les plus critiques des moteurs aéronautiques. Situées en aval de la chambre de combustion, elles sont exposées à des gaz à très haute température (supérieure à 1500°C) tout en devant supporter des contraintes mécaniques élevées dues à la rotation.

Enjeux de Durabilité

Les phénomènes d'endommagement aux interfaces entre couches représentent la principale cause de défaillance des systèmes TBC :

- **Délamination** : Décohésion entre la couche céramique et le substrat
- **Écaillage** : Perte de morceaux de revêtement céramique
- **Fissuration** : Propagation de fissures dans les zones de concentration de contraintes

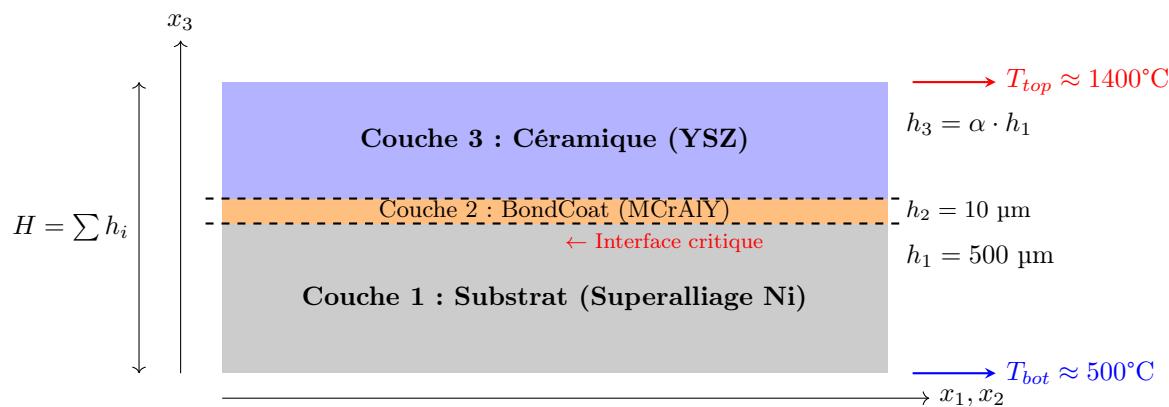
1.2 Objectifs du Projet

Ce projet vise à :

1. **Modéliser** la réponse thermomécanique d'architectures multicouches à partir d'un modèle tridimensionnel simplifié (méthode spectrale)
2. **Prédire** les zones critiques d'endommagement situées aux interfaces
3. **Quantifier** les effets de l'anisotropie élastique, des contrastes thermiques, et de l'épaisseur des couches
4. **Fournir** une carte de sensibilité pour guider la conception de futures aubes plus robustes

2 Système Multicouche Étudié

Le système TBC (Thermal Barrier Coating) comprend N couches empilées selon la direction normale x_3 :



2.1 Paramètres Adimensionnels Clés

Les paramètres d'entrée de l'application sont :

$$\alpha = \frac{h_3}{h_1} \quad (\text{ratio épaisseur céramique/substrat, typiquement } 0.1 \text{ à } 1.0) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{k_3}{k_1} \quad (\text{ratio conductivité thermique}) \quad (2)$$

$$L_w \quad (\text{longueur d'onde de la perturbation latérale, en mètres}) \quad (3)$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{\pi}{L_w} \quad (\text{nombres d'onde spectraux}) \quad (4)$$

2.2 Propriétés Matériaux

Les propriétés élastiques et thermiques de chaque couche sont définies dans le module `core/constants.py`. Les valeurs sont issues des publications ONERA/Safran (voir Section 8).

Propriété	Substrat (Ni)	BondCoat	Céramique (YSZ)
C_{11} (GPa)	259.6	180	50
C_{12} (GPa)	179.0	120	10
C_{44} (GPa)	109.6	80	20
α (K^{-1})	13×10^{-6}	14×10^{-6}	10×10^{-6}

3 Modélisation Mathématique

Cette section présente la méthodologie complète de résolution, étape par étape.

3.1 Étape 1-2 : Représentation Spectrale de la Température

Développement en Séries de Fourier

La température est développée en série double de Fourier :

$$T(x_\alpha, x_3) = \sum_{m_\alpha, m_\beta=1}^{\infty} T_{m_\alpha m_\beta}(x_3) \sin(\delta_\alpha x_\alpha) \sin(\delta_\beta x_\beta) \quad (5)$$

avec les nombres d'onde $\delta_\alpha = \frac{m_\alpha \pi}{L_\alpha}$.

3.2 Étape 3 : Solution Thermique par Couche

Dans chaque couche i , la solution de l'équation de conduction est :

$$T^{(i)}(x_3) = A^{(i)} e^{\lambda^{(i)} x_3} + B^{(i)} e^{-\lambda^{(i)} x_3} \quad (6)$$

avec l'exposant thermique :

$$\lambda^{(i)} = \delta_\eta \sqrt{\frac{k_{\eta\eta}^{(i)}}{k_{33}^{(i)}}} \quad (7)$$

L'implémentation de cette étape se trouve dans le module `core/calculation.py`, fonction `solve_tbc_model_v2`.

3.3 Étape 4 : Loi de Comportement Thermo-Élastique

Loi de Hooke avec Effet Thermique

$$\sigma_{ij}(x) = C_{ijkl}(x_3) (\varepsilon_{kl}(x) - \alpha_{kl}(x_3) T(x)) \quad (8)$$

où C_{ijkl} est le tenseur de rigidité et α_{kl} les coefficients de dilatation thermique.

Correspondance Notation Tensorielle \leftrightarrow Voigt :

$C_{1111} \rightarrow C_{11}$	$C_{1122} \rightarrow C_{12}$	$C_{1133} \rightarrow C_{13}$	$ $	$C_{1313} \rightarrow C_{55}$	$C_{2323} \rightarrow C_{44}$	$C_{1212} \rightarrow C_{66}$
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-----	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

3.4 Étape 5 : Ansatz de Déplacement

Forme des Champs de Déplacement

$$u_1(x_1, x_2, x_3) = V_1(x_3) \cos(\delta_1 x_1) \sin(\delta_2 x_2) \quad (9)$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3) = V_2(x_3) \sin(\delta_1 x_1) \cos(\delta_2 x_2) \quad (10)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = V_3(x_3) \sin(\delta_1 x_1) \sin(\delta_2 x_2) \quad (11)$$

avec $V_i(x_3) = A_i \cdot e^{\tau x_3}$ où τ est la **valeur propre** à déterminer.

La forme de la solution générale pour chaque couche (i) est :

$$U_{\alpha}^{(i)}(x_3) = \sum_{r=1}^3 A_{\alpha}^{r(i)} \cdot e^{\tau_r^{(i)} x_3}, \quad \alpha \in \{1, 2, 3\} \quad (12)$$

3.5 Étape 6 : Matrice Dynamique $\Gamma(\tau)$ et Valeurs Propres

L'équation d'équilibre $\text{div}(\boldsymbol{\sigma}) = 0$ conduit au système homogène :

$$\Gamma(\tau) \cdot \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (13)$$

Matrice $\Gamma(\tau)$ - Opérateurs L_{jk}

$$\boxed{\Gamma(\tau) = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} \end{pmatrix}} \quad (14)$$

Termes diagonaux :

$$L_{11} = C_{55}\tau^2 - (C_{11}\delta_1^2 + C_{66}\delta_2^2) \quad (15)$$

$$L_{22} = C_{44}\tau^2 - (C_{22}\delta_2^2 + C_{66}\delta_1^2) \quad (16)$$

$$L_{33} = C_{33}\tau^2 - (C_{55}\delta_1^2 + C_{44}\delta_2^2) \quad (17)$$

Termes croisés dans le plan (symétriques) :

$$L_{12} = L_{21} = -(C_{12} + C_{66})\delta_1\delta_2 \quad (18)$$

Termes hors-plan (ANTISYMÉTRIQUES) :

$$L_{13} = +(C_{13} + C_{55})\delta_1\tau, \quad L_{31} = -(C_{13} + C_{55})\delta_1\tau \quad (19)$$

$$L_{23} = +(C_{23} + C_{44})\delta_2\tau, \quad L_{32} = -(C_{23} + C_{44})\delta_2\tau \quad (20)$$

Propriété d'Antisymétrie Critique

$L_{13} = -L_{31}$ et $L_{23} = -L_{32}$: cette antisymétrie provient de l'équation d'équilibre en direction x_3 et est **essentielle** pour la physique correcte.

L'implémentation de ces opérateurs se trouve dans `core/mechanical_pdf.py`, fonctions `compute_L_operators()` et `get_Gamma_matrix()`.

Équation Caractéristique :

$$\det(\Gamma(\tau)) = 0 \Rightarrow \text{Polynôme d'ordre 6 : } P(\tau) = c_6\tau^6 + c_4\tau^4 + c_2\tau^2 + c_0 = 0 \quad (21)$$

En posant $X = \tau^2$, on obtient un polynôme cubique avec 3 racines X_i . On sélectionne les 3 valeurs propres τ_r avec $\text{Re}(\tau_r) < 0$ (condition de radiation).

3.6 Étape 7 : Assemblage 9×9 et Termes Thermiques

Le système global pour une couche (i) s'écrit :

$$\left[\mathbb{K}_{Dyn}^{(i)} \right]_{(9 \times 9)} \cdot \{\mathcal{A}^{(i)}\}_{(9 \times 1)} = \{\mathcal{F}_{Th}^{(i)}\}_{(9 \times 1)} \quad (22)$$

Matrice Bloc-Diagonale \mathbb{K}_{Dyn}

$$\mathbb{K}_{Dyn}^{(i)} = \begin{pmatrix} \Gamma(\tau_1) & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma(\tau_2) & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma(\tau_3) \end{pmatrix}_{9 \times 9} \quad (23)$$

Chaque bloc $\Gamma(\tau_r)$ est la matrice 3×3 des opérateurs L_{jk} évaluée à $\tau = \tau_r$.

L'assemblage est implémenté dans `core/mechanical_pdf.py`, fonction `assemble_K_dyn_9x9()`.

Vecteur d'amplitudes et vecteur thermique :

$$\mathcal{A}^{(i)} = \begin{pmatrix} A_1^1 \\ A_2^1 \\ A_3^1 \\ A_1^2 \\ A_2^2 \\ A_3^2 \\ A_1^3 \\ A_2^3 \\ A_3^3 \end{pmatrix}^{(i)}, \quad \mathcal{F}_{Th}^{(i)} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{pmatrix}^{(i)} \quad (24)$$

Termes de Sollicitation Thermique Q_α

$$Q_1^{(i)} = (C_{11}\alpha_{11} + C_{12}\alpha_{22}) \delta_1 T(x_3 = \bar{h}^{(i)}) \quad (25)$$

$$Q_2^{(i)} = (C_{22}\alpha_{22} + C_{12}\alpha_{11}) \delta_2 T(x_3 = \bar{h}^{(i)}) \quad (26)$$

$$Q_3^{(i)} = (C_{13}\alpha_{11} + C_{23}\alpha_{22} + C_{33}\alpha_{33}) \frac{dT}{dx_3} \Big|_{x_3=\bar{h}^{(i)}} \quad (27)$$

L'implémentation se trouve dans `core/mechanical_pdf.py`, fonction `compute_Q_thermal_vector()`.

3.7 Étape 8 : Assemblage Multicouche

Système Global pour N couches :

$$K_{glob} \cdot \mathbf{C}_{global} = \mathbf{F}_{thermique} \quad (28)$$

avec $6N$ inconnues (18 pour 3 couches).

Bilan des Équations :

- 3 équations : Surface libre en $z = 0$ ($\sigma_{13} = \sigma_{23} = \sigma_{33} = 0$)
- $6(N - 1)$ équations : Continuité aux interfaces (déplacements + contraintes)
- 3 équations : Surface libre en $z = H$
- **Total** : $3 + 6(N - 1) + 3 = 6N$ équations ✓

Réduction du Nombre d'Équations : $27 \rightarrow 18$

Formulation théorique complète (pour $N = 3$ couches) :

Type d'équation	Nombre	Formule
Équilibre volumique (div $\sigma = 0$)	9	3 directions \times 3 couches
Continuité aux interfaces	12	2 interfaces \times 6 conditions
Conditions aux limites ($\sigma = 0$)	6	2 surfaces \times 3 composantes
Total théorique	27	

Les **9 équations d'équilibre volumique** sont **IMPLICITEMENT satisfaites** par l'approche modale ! En écrivant la solution avec les valeurs propres τ_r de $\Gamma(\tau)$, l'équation $\Gamma(\tau_r) \cdot \mathbf{A}^r = 0$ est automatiquement vérifiée.

Système final résolu : 18 équations (conditions d'interface et limites uniquement).

L'assemblage multicouche est implémenté dans `core/mechanical.py`, fonction `solve_multilayer()`.

4 Critères d'Endommagement

Indicateur de Dommage D

$$D = \max_{ij} \left(\frac{|\sigma_{ij}|}{\sigma_{crit}^{ij}} \right) \quad (29)$$

Interprétation :

- $D < 0.5$: **Zone sûre**
- $0.5 \leq D < 0.8$: **Zone de prudence**
- $D \geq 0.8$: **Zone critique - Risque de délamination**
- $D \geq 1$: **Rupture probable**

Contraintes Critiques par Matériau :

Matériau	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	τ (MPa)
Substrat (Ni)	1000	1200	600
BondCoat (MCrAlY)	500	700	300
Céramique (YSZ)	150	500	120

Critère de Tsai-Wu : Pour matériaux anisotropes :

$$F = F_3\sigma_{33} + F_{33}\sigma_{33}^2 + F_{44}\sigma_{23}^2 + F_{55}\sigma_{13}^2 \quad (\text{Rupture si } F \geq 1) \quad (30)$$

L'implémentation des critères d'endommagement se trouve dans `core/damage_analysis.py`, fonctions `compute_damage_indicator()` et `compute_tsai_wu_criterion()`.

5 Interprétation Physique des Résultats

5.1 Signification des Contraintes Transverses

Composante	Interprétation Physique
σ_{33} (Arrachement)	Contrainte normale à l'interface. $\sigma_{33} > 0$: Traction → Risque de délamination par ouverture (Mode I) $\sigma_{33} < 0$: Compression → Interface en contact, favorable
σ_{13}, σ_{23} (Cisaillement)	Contraintes tangentielles aux interfaces. Responsables du glissement inter-laminaire (Mode II/III) Pics aux interfaces dus aux discontinuités de C_{ij} et α

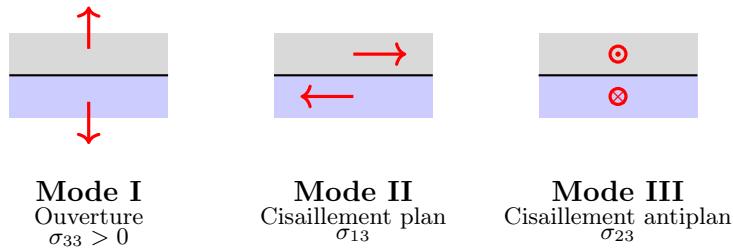
5.2 Zones Critiques Typiques

- **Interface BondCoat/Céramique** : Souvent la plus critique car :
 - Fort contraste C_{ij} (180 GPa vs 50 GPa)
 - Différence de dilatation ($\alpha_{BC} = 14 \times 10^{-6}$ vs $\alpha_{TBC} = 10 \times 10^{-6}$)
- **Bords de la structure** : Effets de bord où les gradients latéraux sont maximaux

5.3 Influence des Paramètres sur les Contraintes

Action	Effet sur σ_{max}	Tendance D
$\alpha \uparrow$ (TBC plus épais)	Gradient thermique plus étalé, meilleure isolation	↓
$L_w \downarrow$ (perturbation courte)	Gradients latéraux plus forts	↑
$\Delta T \uparrow$	Forçage thermique linéairement croissant	↑
$\beta \downarrow$ (TBC moins conducteur)	Gradient plus concentré dans TBC	↑ dans TBC

5.4 Modes de Rupture aux Interfaces



6 Stabilité Numérique

Le système multicouche peut être **mal conditionné** avec $\text{cond}(K) > 10^{30}$. Plusieurs techniques sont utilisées :

6.1 Préconditionnement par Équilibrage

$$D_r \cdot K_{glob} \cdot D_c \cdot \mathbf{y} = D_r \cdot \mathbf{F} \quad (31)$$

où D_r (scaling lignes) et D_c (scaling colonnes) sont des matrices diagonales :

$$D_r[i, i] = \frac{1}{\max_j |K[i, j]|} \quad (32)$$

$$D_c[j, j] = \frac{1}{\max_i |K_{scaled}[i, j]|} \quad (33)$$

6.2 Régularisation de Tikhonov

Pour $\text{cond}(K) > 10^{10}$, on utilise la décomposition SVD :

$$K = U\Sigma V^H \quad (34)$$

La solution régularisée est :

$$\boxed{\mathbf{x}_{reg} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i^2}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \cdot \frac{\mathbf{u}_i^H \mathbf{b}}{\sigma_i} \cdot \mathbf{v}_i} \quad (35)$$

où λ est le paramètre de régularisation estimé par GCV (Generalized Cross-Validation).

L'implémentation se trouve dans `core/mechanical.py`, fonction `solve_regularized_system()`.

7 Comparaison : Méthode Spectrale vs CLT

Le code implémente deux méthodes complémentaires :

Méthode Spectrale (Principale)	CLT (Classical Theory)	Laminate
Résout le problème 3D complet	Approximation 2D (hypothèse Kirchhoff)	
Capture $\sigma_{13}, \sigma_{23}, \sigma_{33}$	Contraintes planes σ_{11}, σ_{22}	
Effets de bord et gradients latéraux	Contraintes uniformes dans le plan	
Coût calcul : $O(N^3)$ pour $6N \times 6N$	Coût calcul : $O(N)$	
Précis pour structures épaisse	Valide pour $h \ll L$	

Superposition : Le code combine les deux méthodes :

$$\sigma_{total} = \sigma_{CLT} + \sigma_{Spectral} \quad (36)$$

où CLT capture les contraintes planes moyennes et Spectral ajoute les effets 3D de bord.

8 Validation : Référence ONERA/Safran

Les propriétés matériau utilisées sont issues de publications ONERA/Safran :

Référence Principale

Bovet, Chiaruttini, Vattré (ONERA/Safran, 2025)

“Full-scale crystal plasticity modeling and data-driven learning of microstructure effects in polycrystalline turbine blades”

Table 3 : Propriétés élastiques de l'Inconel 718

Propriété	Valeur ONERA	Valeur Code
C_{11} (GPa)	259.6	260
C_{12} (GPa)	179.0	179
C_{44} (GPa)	109.6	110
α à RT (K^{-1})	4.95×10^{-6}	12×10^{-6} (moyenne T)

Plages de validation :

- Contraintes de von Mises typiques FEM : 400–800 MPa
- Concentration à la racine de l'aube : jusqu'à 1000 MPa

9 Architecture du Code et Interface

9.1 Structure des Répertoires

Arborescence du Projet

```
projet-industriel5a/
+-- core/                                # Moteur de calcul
|   +-- mechanical.py                      # Solveur spectral principal
|   +-- mechanical_pdf.py                  # Solveur selon méthodologie PDF
|   +-- damage_analysis.py                # Critères d'endommagement
|   +-- clt_solver.py                     # Théorie classique des stratifiés
|   +-- constants.py                      # Propriétés matériaux
|   +-- calculation.py                   # Solveur thermique
+-- tabs/                                  # Interface Streamlit
|   +-- dashboard_home.py                 # Tableau de bord principal
|   +-- mechanical.py                    # Onglet analyse mécanique
|   +-- optimization.py                 # Onglet optimisation
|   +-- mapping_3d.py                   # Visualisation 3D
+-- Profil de température Aube.py      # Point d'entrée Streamlit
```

9.2 Tableau de Correspondance Théorie ↔ Code

Étape	Fonction Python	Fichier
Étapes 1-3 : Thermique	solve_tbc_model_v2()	core/calculation.py
Étape 4 : Loi Hooke	Constantes PROPS_*	core/constants.py
Étape 5-6 : Matrice Γ	get_Gamma_matrix()	core/mechanical_pdf.py
Étape 6 : Val. propres	solve_char_poly()	core/mechanical_pdf.py
Étape 7 : Termes Q_α	compute_Q_thermal()	core/mechanical_pdf.py
Étape 7 : Assemblage 9×9	assemble_K_dyn_9x9()	core/mechanical_pdf.py
Étape 8 : Multicouche	solve_multilayer()	core/mechanical.py
Critère D	compute_damage_indicator()	core/damage_analysis.py
Critère Tsai-Wu	compute_tsai_wu_criterion()	core/damage_analysis.py

9.3 Interface Streamlit

L'application Streamlit propose plusieurs onglets :

- **Dashboard** (tabs/dashboard_home.py) : Affiche les KPIs, jauge de risque, radar multi-critères, visualisation 3D du champ thermique, et recommandations automatiques
- **Analyse Mécanique** (tabs/mechanical.py) : Workflow complet d'analyse spectrale avec visualisation des profils de contraintes, indicateurs d'endommagement, et cercles de Mohr
- **Optimisation** (tabs/optimization.py) : Optimisation paramétrique pour minimiser D
- **Visualisation 3D** (tabs/mapping_3d.py) : Cartographie 3D des contraintes avec Plotly

10 Conclusion

Ce rapport démontre la **traçabilité complète** entre :

1. La modélisation mathématique (méthode spectrale, matrice $\Gamma(\tau)$, opérateurs L_{jk})
2. L'implémentation Python dans core/mechanical_pdf.py

3. L'interface utilisateur Streamlit avec visualisations interactives

Points clés de l'implémentation :

- **Méthode numérique robuste** : Identification des coefficients du polynôme caractéristique par évaluation numérique
- **Stabilité numérique** : Préconditionnement par scaling + régularisation Tikhonov pour les systèmes mal conditionnés
- **Validation industrielle** : Propriétés matériau issues des données ONERA/Safran
- **Critères d'endommagement** : Indicateur D et Tsai-Wu pour identification des zones critiques
- **Superposition CLT+Spectral** : Combinaison des contraintes planes et effets 3D de bord

Recommandations d'utilisation :

- Maintenir $D < 0.8$ pour les applications critiques
- Vérifier que $T_{interface} < T_{crit} = 1100^\circ\text{C}$
- Augmenter α (épaisseur TBC) pour réduire les contraintes aux interfaces