

SCRIPT DE SOUTENANCE V3

Distribution Homogene de la Difficulte

Evaluation Thermomecanique des Aubes TBC

Johan GUITTON · Achille VOISIN · Lionel DAURIAC · Maxime LEBOEUF

26 janvier 2026

REPARTITION EQUILIBREE – 32 SLIDES (10 min chacun)

Orateur	Slides	Contenu	Difficulte
Johan	1–4, 16–17	Intro + Matrice $\Gamma(\tau)$	Facile + Eleve
Achille	5–8, 18–19	TBC/Objectifs + Assemblage 9x9	Moyen + Eleve
Lionel	9–15	Methodologie + Spectrale + Hooke	Moyen + Eleve
Maxime	20–32	Implementation + Resultats	Moyen

Table des matières

1	JOHAN – Slides 1-4 puis 16-17 (10 min)	3
2	ACHILLE – Slides 5-8 puis 18-19 (10 min)	4
3	LIONEL – Slides 9-15 (10 min)	5
4	MAXIME – Slides 20-32 (10 min)	6

1 JOHAN – Slides 1-4 puis 16-17 (10 min)

Slide 1 : Titre (30s)

« Bonjour, je suis Johan Guitton. Avec Achille, Lionel et Maxime, nous presentons notre projet : **Evaluation Thermomecanique des Zones Critiques d'Endommagement dans les Aubes TBC**.

Methode spectrale implementee en Python/Streamlit, encadrement ONERA (Aurelien Vattre) et ESTACA (Daniel Gaffie). »

Slide 2 : Structure Presentation (30s)

« 4 parties : (1) Contexte et Objectifs, (2) Modelisation Mathematique, (3) Implementation Logicielle, (4) Resultats et Validation.

Nous avons reparti les themes pour que chacun presente a la fois du contexte ET du contenu technique. »

Slide 3 : Turbines Haute Pression (1min30)

« Les turbines HP fonctionnent dans un environnement extreme :

- Temperatures gaz $> 1500^{\circ}\text{C}$
- Gradients jusqu'a 200°C sur quelques mm
- Force centrifuge + fatigue cyclique

Le defi : augmenter les temperatures pour ameliorer l'efficacite energetique. »

Slide 4 : Architecture TBC (1min30)

« Systeme multicouche TBC :

- **Ceramique YSZ** ($50\text{--}500\ \mu\text{m}$) : isolation thermique principale
- **Bond Coat MCrAlY** ($\sim 10\ \mu\text{m}$) : adhesion et protection oxydation
- **Substrat Inconel 718** ($\sim 500\ \mu\text{m}$) : resistance mecanique

Contraste de proprietes = source des contraintes aux interfaces. »

[Johan enchaine directement sur les slides techniques 16-17]

Slide 16 : Matrice Dynamique $\Gamma(\tau)$ (2min) – TECHNIQUE

« Le coeur de notre methode est la **matrice dynamique** $\Gamma(\tau)$.

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

Point critique : antisymetrie $L_{13} = -L_{31}$.

Cette propriete provient de l'equilibre en x_3 et est essentielle pour la physique correcte.

L'equation caracteristique : $\det(\Gamma(\tau)) = 0$. »

Slide 17 : Resolution Equation Caracteristique (2min)

« $\det(\Gamma(\tau)) = 0$ donne un polynome d'ordre 6.

Astuce : $X = \tau^2$ reduit a un polynome cubique.

$c_6X^3 + c_4X^2 + c_2X + c_0 = 0 \Rightarrow 3$ racines

Selection physique : $\text{Re}(\tau) < 0$ (condition de radiation).

Seules les ondes evanescentes sont conservees.

Je passe maintenant la parole a Achille. »

2 ACHILLE – Slides 5-8 puis 18-19 (10 min)**Slide 5 : Mecanismes de Defaillance (1min30)**

« Merci Johan. Les systemes TBC presentent des modes de defaillance critiques :

Delamination : perte d'adhesion interface ceramique/bond coat (contrainte σ_{33}).

Ecaillage : perte de morceaux de revetement.

Fissuration : propagation par concentration de contraintes.

Impact : cause principale de defaillance et couts de maintenance eleves. »

Slide 6 : Objectifs du Projet (1min)

« 4 objectifs :

1. **Modeliser** la reponse thermomecanique 3D
2. **Predire** les zones critiques aux interfaces
3. **Quantifier** les effets des parametres cles
4. **Fournir** des cartes de sensibilite pour la conception

»

Slide 7 : Partenaires (45s)

« Partenaires :

- **ONERA** : expertise mecanique, supervision Aurelien Vattre
- **Safran** : contexte industriel, donnees materiaux
- **ESTACA** : encadrement pedagogique, Daniel Gaffie

»

Slide 8 : Planning du Projet (45s)

« Projet sur 6-8 mois :

- Phase 1 (Mois 1-2) : Bibliographie, etude methode spectrale
- Phase 2 (Mois 2-4) : Implementation Python solveurs
- Phase 3 (Mois 4-6) : Interface Streamlit, Plotly 3D
- Phase 4 (Mois 6-8) : Tests croises, rapport

»

[Achille enchainne sur les slides techniques 18-19]

Slide 18 : Assemblage 9x9 (2min) – TECHNIQUE

« On assemble un systeme lineaire global 9×9 :

$$[K_{Dyn}] \cdot \{A\} = \{F_{Th}\}$$

K_{Dyn} est **bloc-diagonale** : 3 blocs $\Gamma(\tau_r)$.

F_{Th} contient les termes sources thermiques Q_α .

Resolution par inversion matricielle pour les 9 amplitudes. »

Slide 19 : Assemblage Multicouche (2min)

« Pour N couches, systeme global avec :

- Conditions limites : surface libre ($\sigma \cdot n = 0$)
- Conditions continuite : u et σ aux interfaces

Reduction : 27 equations theoriques \rightarrow **18 equations** spectrales.

Gain de 9 equations car l'equilibre volumique est implicitement satisfait.

Je laisse la parole a Lionel. »

3 LIONEL – Slides 9-15 (10 min)**Slide 9 : Methodologie Generale (1min)**

« Merci Achille. Voici le flux de calcul semi-analytique :

Entrees \rightarrow **Thermique** (Fourier) \rightarrow **Mecanique** ($\Gamma(\tau)$) \rightarrow **Domage** (D, Tsai-Wu) \rightarrow **Sorties**

Nos parametres d'entree : α , L_w , β , proprietes materiaux. »

Slide 10 : Livrables (1min)

« 3 livrables :

1. **Module Python** : ~3000 lignes, 5 modules dans **core/**
2. **Interface Streamlit** : 8 onglets, dashboard KPIs, 3D Plotly
3. **Documentation** : rapport synthese, tracabilite theorie-code

»

Slide 11 : Methode Spectrale (1min30) – TECHNIQUE

« La methode spectrale decompose les champs en series de Fourier :

$$T(x) = \sum T_{mn} \sin(\delta x)$$

Avantages vs FEM :

- Semi-analytique : pas de discretisation
- Rapidite : resolution directe
- Precision : erreurs minimales

»

Slide 12 : Representation Spectrale Temperature (1min)

« Le champ de temperature :

$$T(x_1, x_2, x_3) = \sum T_{mn}(x_3) \sin(\delta_1 x_1) \sin(\delta_2 x_2)$$

$\delta = \pi/L_w$ est le nombre d'onde.

$T_{mn}(x_3)$ ne depend que de la profondeur : simplification 3D \rightarrow 1D. »

Slide 13 : Solution Thermique par Couche (1min)

« Dans chaque couche i , solution exponentielle :

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

$$\lambda^{(i)} = \delta_\eta \sqrt{k_{\eta\eta}^{(i)} / k_{33}^{(i)}}$$

2N inconnues (A, B) determinees par continuite aux interfaces. »

Slide 14 : Loi de Hooke Thermo-Elastique (1min30) – TECHNIQUE

« Formulation mecanique :

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}(\varepsilon_{kl} - \alpha_{kl} \Delta T)$$

Proprietes par couche (donnees ONERA/Safran) :

Materiau	C_{11}	α
Substrat	260 GPa	13 $\mu\epsilon/K$
Bond Coat	180 GPa	14 $\mu\epsilon/K$
Ceramique	50 GPa	10 $\mu\epsilon/K$

Le contraste important (260 vs 50 GPa) genere les contraintes. »

Slide 15 : Ansatz de Deplacement Modal (1min)

« Forme supposee des deplacements :

$$u_i = V_i(x_3) \times \text{trig}(\delta x_1, \delta x_2)$$

$$V_i(x_3) = A_i \exp(\tau x_3)$$

Condition de radiation : $\text{Re}(\tau) < 0$ assure la stabilite.

Je passe la parole a Maxime pour l'implementation et les resultats. »

4 MAXIME – Slides 20-32 (10 min)**Slide 20 : Criteres d'Endommagement (1min)**

« Merci Lionel. Les criteres de dommage :

Indicateur D : $D = \max(|\sigma_{ij}| / \sigma_{crit}^{ij})$

$D < 0.5$: Sur. $0.5 \leq D < 0.8$: Prudence. $D \geq 0.8$: Critique.

Tsai-Wu pour materiaux anisotropes. »

Slide 21 : Stabilité Numérique (1min)

« Defi : conditionnement peut dépasser 10^{30} .

Solutions :

- Preconditionnement $K' = D_r \cdot K \cdot D_c$
- Regularisation Tikhonov (SVD)
- Normalisation $C_{ref} = 200$ GPa

Precision atteinte : 10^{-8} . »

Slide 22 : Architecture Logicielle (1min)

« Repertoire core/ :

- `mechanical_pdf.py` : Solveur Spectral (1031 lignes)
- `mechanical.py` : Assemblage Multicouche (1507 lignes)
- `damage_analysis.py` : Criteres (367 lignes)
- `calculation.py` : Solveur Thermique (269 lignes)
- `constants.py` : Donnees Materiaux

Total : ~3000 lignes Python. »

Slide 23 : Dashboard Streamlit (1min)

« Interface avec :

- 6 KPI Cards temps reel
- Jauge de risque, radar multi-criteres
- Visualisation 3D Plotly interactive
- Badge "Conforme ONERA"

»

Slide 24 : Resultats Thermiques (45s)

« Profil thermique $T(z)$:

- Gradient substrat : $\sim 20^\circ\text{C}/\text{mm}$
- Gradient ceramique : $\sim 400^\circ\text{C}/\text{mm}$
- $T_{interface} \approx 1050^\circ\text{C}$ (marge 50°C vs T_{crit})

»

Slide 25 : Resultats Mecaniques (1min)

« Profils de contraintes :

- σ_{33} : pic ~ 200 MPa a l'interface BC/Ceramique
- σ_{13} : pic ~ 250 MPa
- Risque de delamination si $\sigma_{33} > \sigma_{crit}$

»

Slide 26 : Etudes Parametriques (45s)

« Sensibilite :

- $\alpha \uparrow \Rightarrow D \downarrow$ (benefique)
- $L_w \downarrow \Rightarrow D \uparrow$ (critique)
- Recommandation : $\alpha \geq 0.2$

»

Slide 27 : Validation ONERA (45s)

« Ecart $< 1\%$ sur modules elastiques vs reference ONERA.

Contraintes dans plage FEM (400–800 MPa).

\Rightarrow Modele valide. »

Slide 28 : Demo Application (30s)

« Workflow : Parametrage \rightarrow Calcul ($< 1s$) \rightarrow Visualisation \rightarrow Export PDF/CSV. »

Slide 29 : Limites (30s)

« Limites :

- Geometrie plane (vs courbure reelle)
- Thermique stationnaire
- Elastique lineaire

Validite : $T < 1100^\circ\text{C}$, $\sigma < 500 \text{ MPa}$. »

Slide 30 : Perspectives (30s)

« Evolutions :

- Geometrie cylindrique
- Fatigue thermique (cyclage)
- Machine Learning (surrogate)
- Materiaux avances (CMC)

»

Slide 31 : Conclusion (30s)

« **Objectifs atteints** : modelisation + prediction zones critiques.

Outil valide : Python/Streamlit + validation ONERA.

Tracabilite : Theorie \leftrightarrow Code.

Potentiel industriel : aide conception rapide. »

Slide 32 : Remerciements (30s)

« Merci a :

- ONERA : Aurelien Vattre
- ESTACA : Daniel Gaffie

Equipe : Johan, Achille, Lionel, Maxime.

MERCI DE VOTRE ATTENTION – Questions ?

»