

# Évaluation de plusieurs méthodes de réduction thermiques pour la création de jumeaux numériques dans l'industrie aérospatiale

Journée Modèles Réduits Société Française de Thermique

Elsa Piollet, Florian Sanchez  
Juin 2025

# Plan de la présentation

1

Présentation  
Maya HTT

2

Contexte  
aérospatial

3

Réduction par  
projection de  
matrices

4

Réduction par  
sous-  
structuration  
et corrélation

5

Conclusion

# Présentation

Maya Heat Transfer Technology

# Présentation



<https://www.linkedin.com/in/epiollet/>

## Elsa Piollet

*Développeuse  
logiciel senior*

***Maya HTT***

### *Parcours antérieur*

Post-doctorante/associée  
de recherche à  
Polytechnique Montréal

Doctorat à l'ISAE-  
Supaéro

Diplôme d'ingénierie  
ISAE-Supaéro



# Maya Heat Transfer Technology

#1 Prix du partenaire mondial  
2024 Siemens

Digital Industries Software



4 Pays :  
Canada, États-Unis, France,  
Royaume Uni



30+

Modules de  
logiciel de  
simulation



ADN  
en simulation  
d'ingénierie



200+

Développeurs,  
scientifiques &  
ingénieurs



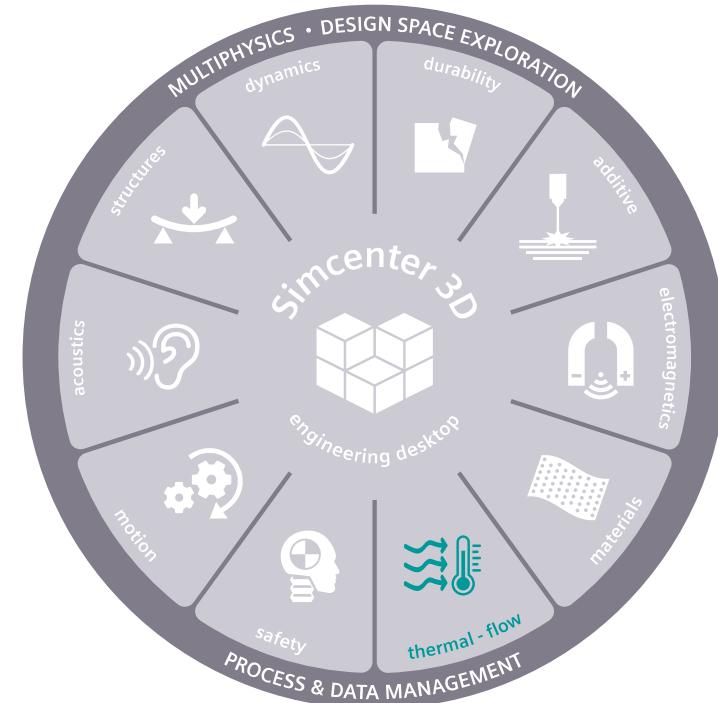
40+

années

Développement de logiciel  
Partenariat avec Siemens

# Solveur thermique TMG développé par Maya HTT

- TMG (*Thermal Model Generator*) est développé et maintenu par Maya HTT depuis plus de 40 ans.
- Le solveur traite des problèmes thermiques conductifs, convectifs, et radiatifs pour différentes industries.
- TMG est intégré dans l'environnement Simcenter 3D de Siemens Digital Software Industry.

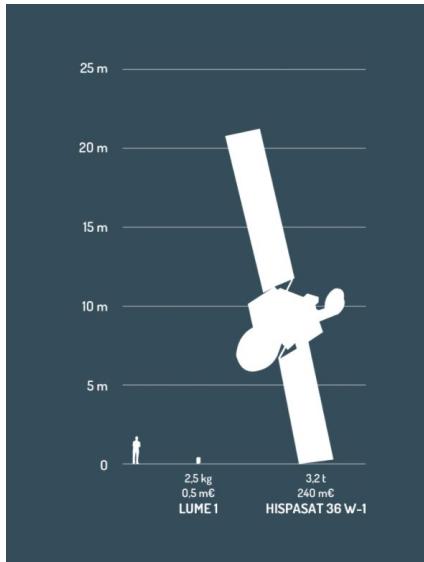


# Contexte

Industrie aérospatiale et défense

# Contexte: modèles réduits en aérospatiale et défense

Satellites à coût réduit et à déploiement plus rapide



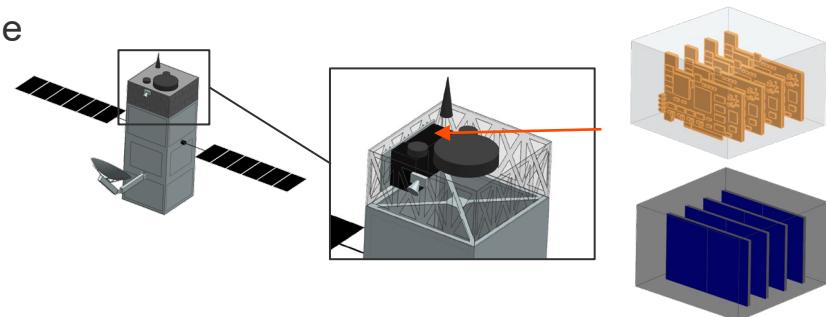
Besoins: jumeaux numériques

- Conception
  - Calculs rapides pour étudier de nombreuses configurations
  - Assemblages de sous-modèles entre départements, fournisseurs, logiciels
- Opération
  - Calculs temps réel
  - Ajustement aux données

# Contexte: méthodes et approche

- Méthodes de réduction basées sur la physique
  - Réduction par projection des matrices du modèle d'état
  - Réduction géométrique par sous-structuration avec corrélation
- Approche recherche et développement industrielle
  - Mise en place de méthodes existantes
  - Intégration dans un processus industriel

$$\boxed{\begin{aligned} \mathbf{E}_S \frac{dT}{dt} &= \mathbf{A}_S T + \mathbf{B}_S \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_S T + \mathbf{D}_S \mathbf{u} \end{aligned}}$$



**Vue d'ensemble des questionnements et développements pour l'intégration dans le processus industriel**

# Réduction par projection de matrices

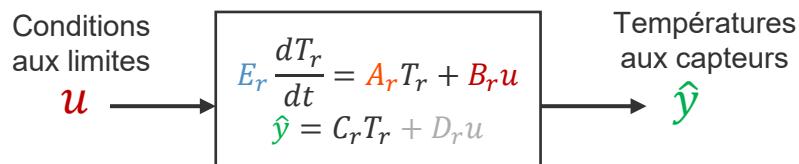
# Projection de l'équation d'état

- Modèle représenté par équation matricielle ou équation d'état



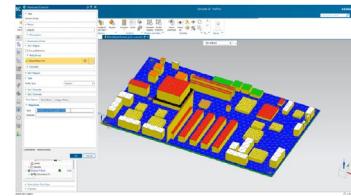
- Modèle réduit par projection des matrices

- Calculs rapides entrée/sortie
- Projection sur différentes bases: modes dynamiques/statiques, méthode de Krylov, POD...
- Possibilité de reconstituer le champ thermique à d'autres positions (capteurs virtuels)



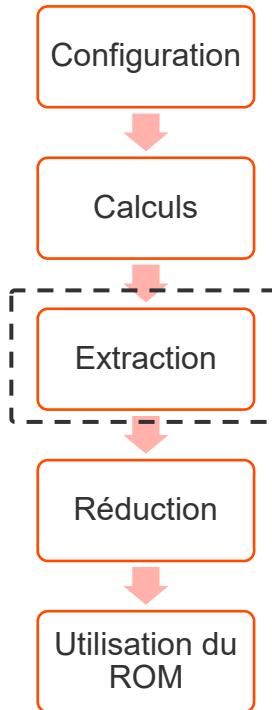
# Intégration dans le processus de simulation industriel

- Configuration dans un environnement industriel habituel
    - Géométries, maillages, sources et conditions aux limites complexes
    - Sélection de la position des capteurs
  - Résolution du système dans le solveur thermique (TMG)
- Extraction des matrices du solveur
    - Matrices du modèle d'état  $A_S$ ,  $C_S$ ,  $E_S$  et source  $b_T$  du solveur (.mtx)
    - Indices des éléments d'entrées/sorties dans les matrices
  - Réduction des matrices
    - Bases de projection obtenues à partir des matrices
    - Intégration avec Simcenter ROM: méthode de Krylov



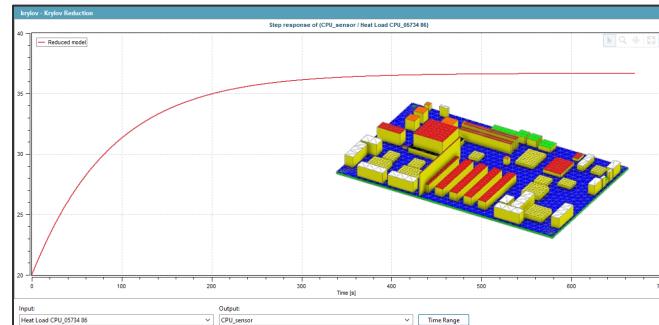
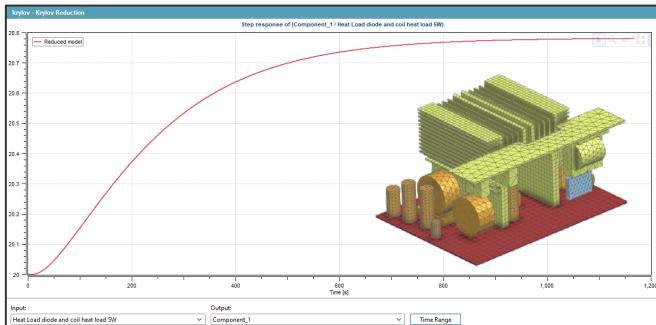
$$C_T \frac{dT}{dt} + K_T T = b_T$$

$$E_S \frac{dT}{dt} = A_S T + B_S u$$
$$y = C_S T + D_S u$$



# Évaluation méthode matricielle

- Tests avec méthode de Krylov en cours

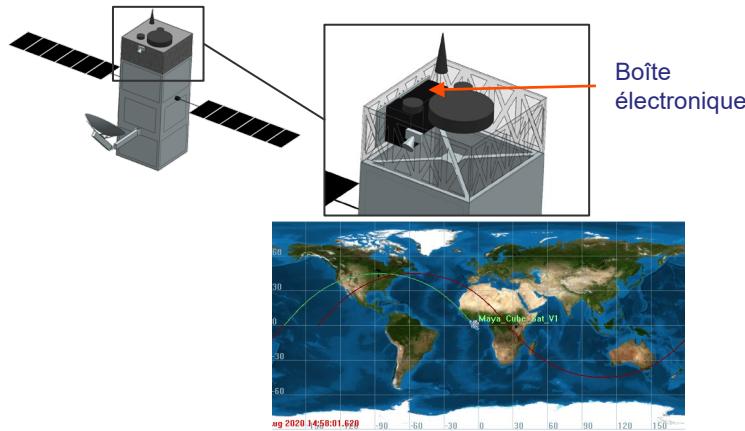


- Évaluation: correspondance entre résultats du solveur, matrices extraites et modèle réduit
- Preuve de concept: limité aux cas linéaires ou faiblement non-linéaires pour l'instant
  - Les matrices extraites sont linéarisées autour du temps d'extraction
  - La méthode de réduction de Krylov suppose un système linéaire ou linéarisé

**Modèles fortement non-linéaires (satellites, turbomachines) requièrent d'autres méthodes**

# Réduction par sous-structuration et corrélation

# Approche de sous-structuration

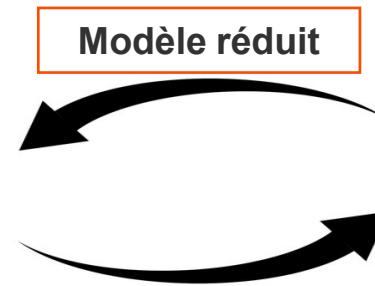


## Analyses systèmes

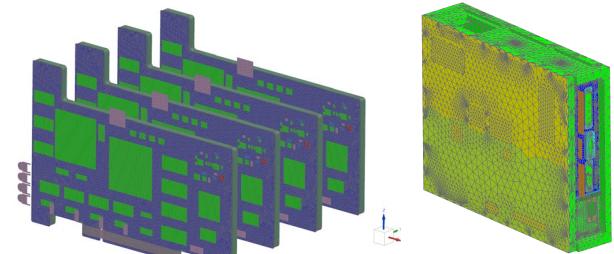
Modèles simplifiés (<15k noeuds)

Dimensionnement cycle de vie (Températures/Puissance)

GRAND NOMBRE de simulations



## Conditions aux limites



## Analyses détaillées

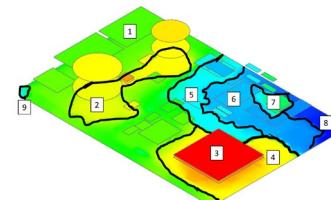
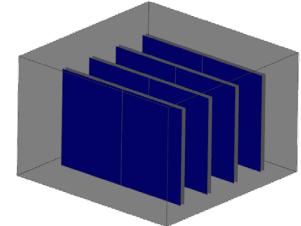
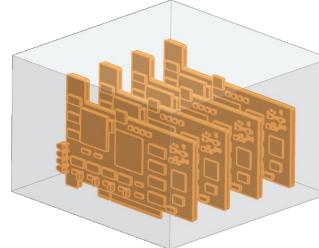
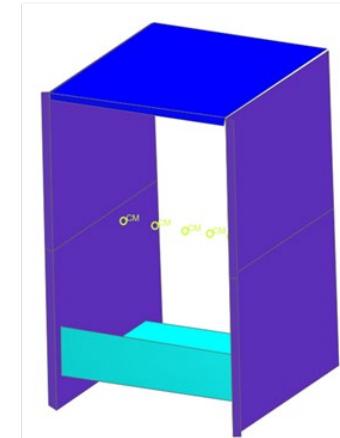
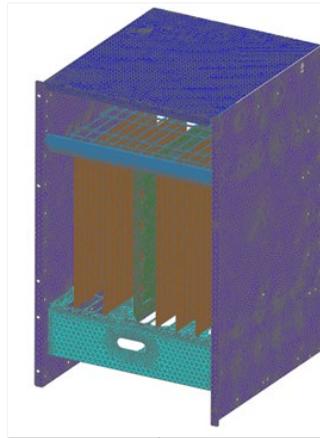
Modèles détaillés (>150k noeuds)

Dimensionnements cas extremes (Tmin/Tmax)

Températures au niveau des composants

# Sous-structuration et corrélation

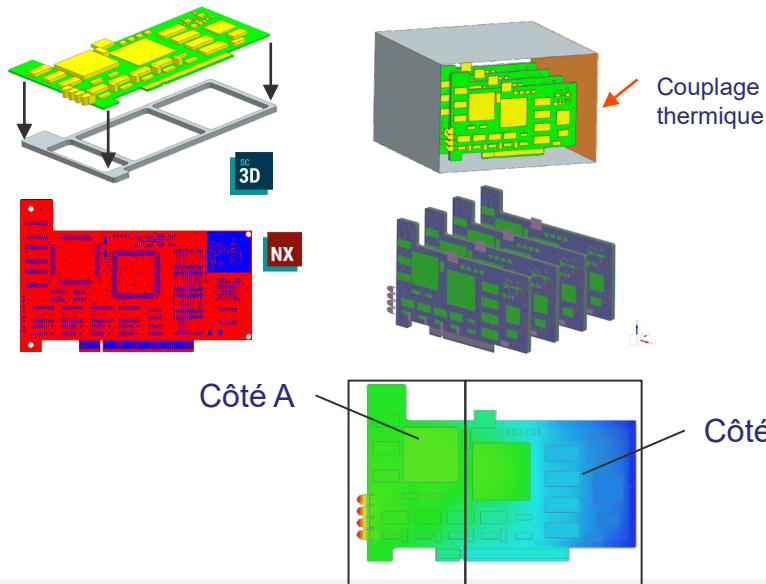
- Modèles réduits combinant:
  - Éléments externes simplifiés conservant la géométrie
  - Éléments internes représentant la dynamique thermique
  - Couplages entre éléments: réseau thermique
  - Similaire à utilisation de super éléments
- Avantages
  - Modélise le comportement incluant les non-linéarités, par exemple rayonnement
  - Conserve la représentation géométrique externe
- Étapes
  - Création d'éléments et couplages selon les zones isothermes
  - Corrélation et validation par rapport aux modèles détaillés, et potentiellement données de référence



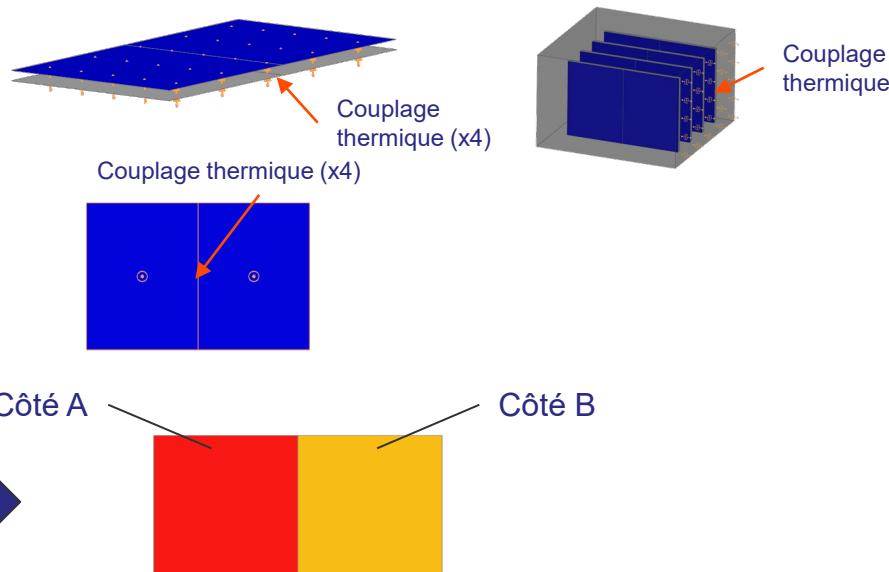
[https://help.mayahtt.com/kb/topics/reducing\\_thermal\\_models.html](https://help.mayahtt.com/kb/topics/reducing_thermal_models.html)

# Exemple d'application: boîte électronique

- Modèle détaillé: **4 circuits imprimés** et leurs composants (2 principaux + 2 de secours) sur un support connecté à l'enceinte sur un côté
- 220,000 éléments (3D & 2D) au total



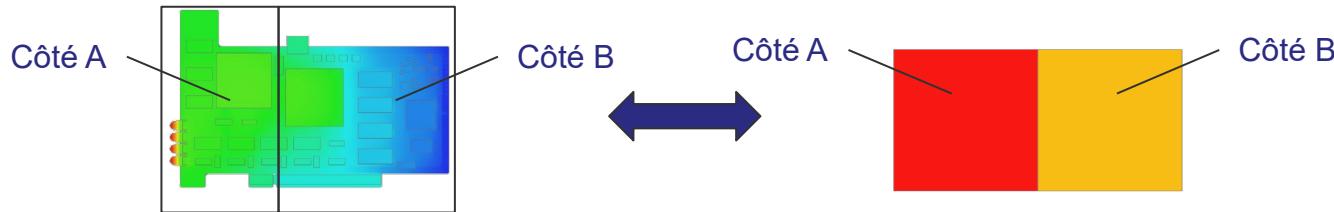
- Modèle (très) réduit
- 500 éléments (2D sans propriétés) au total



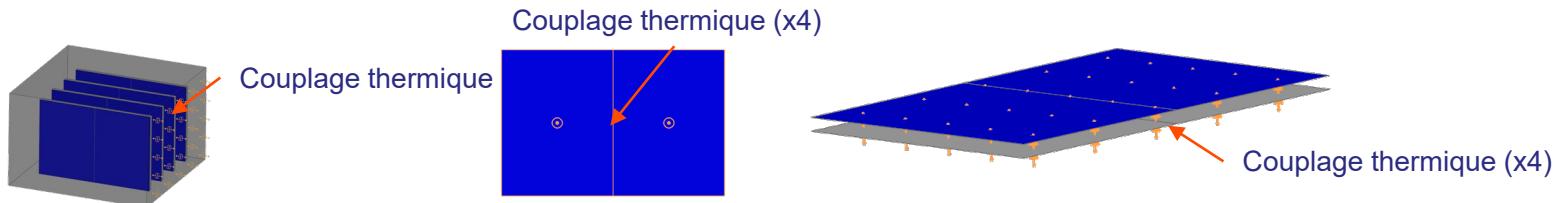
# Modèle réduit à corréler

- Objectifs:

1. Les températures des éléments 2D du modèle réduit doivent correspondre aux températures moyennes du modèle détaillé



2. Trouver les valeurs des couplages thermiques



3. Les contacts thermiques doivent être valides pour différents scénarios:

- Scénario froid: Paroi de l'enceinte @15°C
- Scénario chaud: Paroi de l'enceinte @55°C



# Corrélation des contacts: méthode

- Pratique actuelle
  - Corrélation manuelle
  - Nombreux calculs, coûteux en temps
- Méthode proposée: calcul des valeurs des contacts thermiques par optimisation avec méthode adjointe (TMG Corrélation)

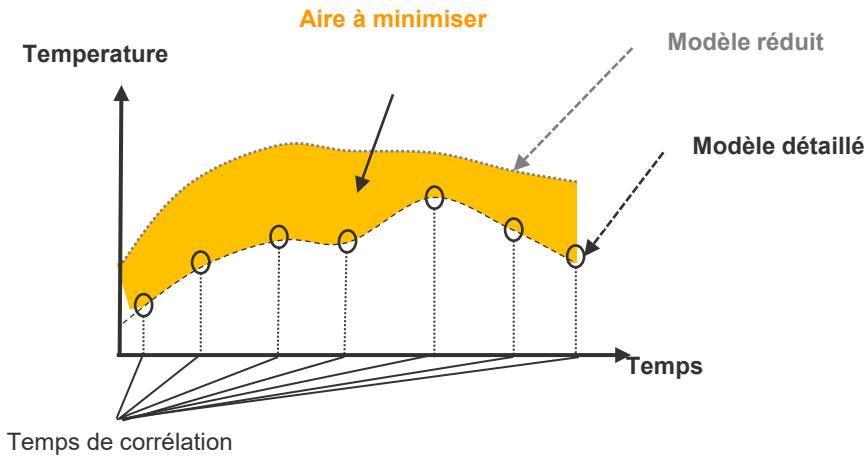
- Optimisation de la fonction objectif

$$F = \sqrt{\frac{1}{N_{times} * \sum(W_{target})} \times \sum_{times} \left( \sum_{target} W_{target} (T - T_{target})^2 \right)}$$

- Méthode adjointe [1,2] pour calcul de gradients efficace

$$\vec{G} = \frac{\partial F}{\partial \vec{h}} + \vec{\psi}^T \frac{\partial R}{\partial \vec{h}}$$

$$R = \mathbf{K}_T T - \mathbf{b}_T \quad \left( \frac{\partial R}{\partial \vec{h}} \right)^T \vec{\psi} = - \frac{\partial F}{\partial T} \quad (\text{régime établi})$$



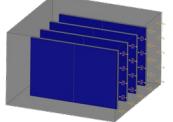
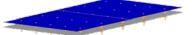
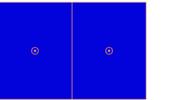
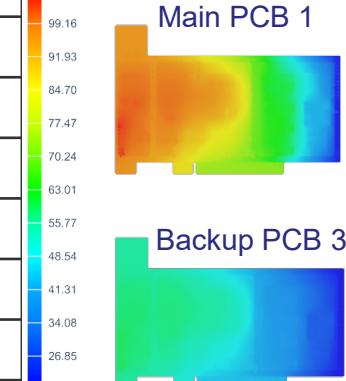
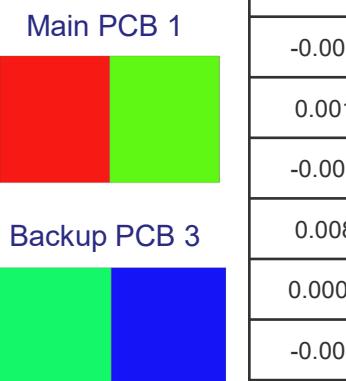
[https://help.mayahtt.com/tmg\\_correlation/v1/user\\_help/introduction.html](https://help.mayahtt.com/tmg_correlation/v1/user_help/introduction.html)

[1] Michaleris, P., Tortorelli, D. A., & Vidal, C. A. (1994). Tangent operators and design sensitivity formulations for transient non-linear coupled problems with applications to elastoplasticity. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 37(14), 2471-2499.

[2] Kast, S. M. (2017). An introduction to adjoints and output error estimation in computational fluid dynamics. *arXiv preprint arXiv:1712.00693*.

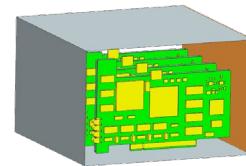
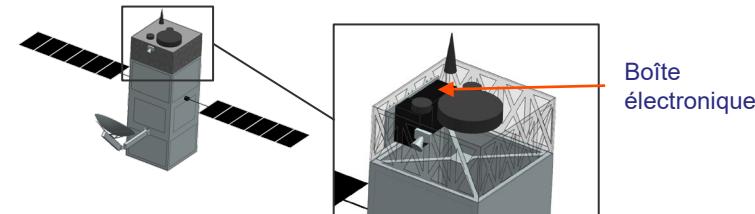
# Corrélation des contacts: résultats

- Après optimisation, toutes les valeurs de conductances sont ajustées pour correspondre aux températures du modèle détaillé

Valeur finale [W/C]	Emplacement	Cible	Modèle détaillé		Modèle réduit		Erreurs absolues [C]
			Température moyenne [C]	Contours pour PCB 1 & 3	Température [C]	Contours pour PCB 1 & 3	
1.221	  	PCB_1_A	64.61	 Main PCB 1 Backup PCB 3	64.63	 Main PCB 1 Backup PCB 3	0.015
0.247		PCB_1_B	97.45		97.45		-0.003
0.243		PCB_2_A	65.26		65.26		0.001
0.245		PCB_2_B	97.53		97.53		-0.003
0.244		PCB_3_A	39.77		39.78		0.008
0.060		PCB_3_B	56.40		56.40		0.0007
0.060		PCB_4_A	39.83		39.83		-0.003
0.063		PCB_4_B	56.43		56.45		0.017
0.062							

# Évaluation méthode de sous-structuration

- Méthode classique dans le spatial, accélérée par optimisation et méthode adjointe
  - Intégration à la configuration industrielle
  - Pas de restriction du nombre de capteurs ou de variables
  - Régime établi ou transitoire
- Illustration sur un cas très simplifié
  - Maillages réduits réels plus complexes
  - Étape supplémentaire de validation croisée des configurations
  - Itérations pour améliorer le modèle



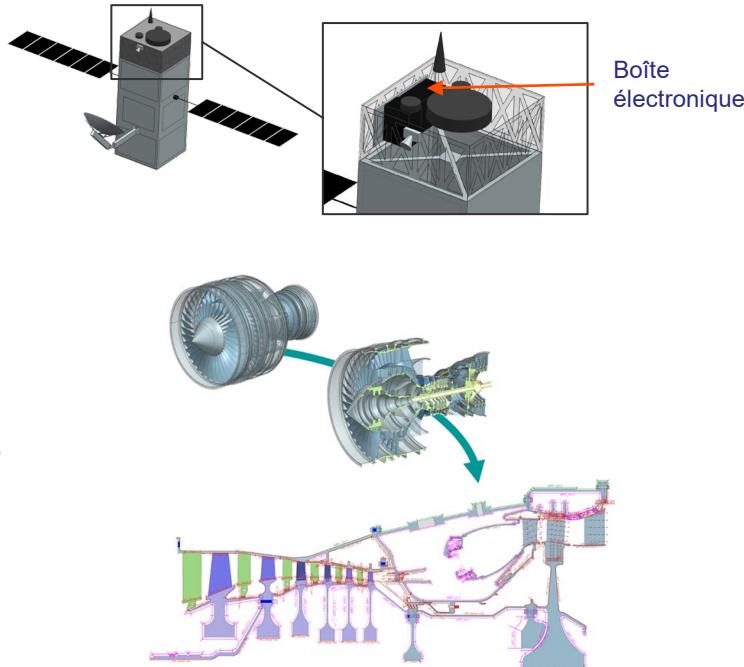
Actuellement: application à cas industriels clients

# Conclusion

# Conclusion

- Méthodes de projection matricielle
  - Extraction des matrices du solveur pour modèles industriels
  - Preuve de concept pour modèles faiblement non-linéaires
  - Possibilité d'explorer plusieurs méthodes
- Méthode de sous-structuration et corrélation
  - Échange de modèles et intégration dans un modèle complet
  - Conserve la géométrie et la dynamique
  - Méthode historique accélérée par optimisation et méthode adjointe
- Évaluation en cours des méthodes
- Différents domaines d'application ont différents besoins en non-linéarités
  - Spatial: rayonnement
  - Électronique: au cas par cas selon le domaine
  - Turbomachines: matériaux, larges plages de températures
  - ...

$$E_S \frac{dT}{dt} = A_S T + B_S u$$
$$y = C_S T + D_S u$$



# Merci de votre attention!

**Elsa Piollet, Développeuse logiciel senior**  
[elsa.piollet@mayahtt.com](mailto:elsa.piollet@mayahtt.com)

**Florian Sanchez, Chef de produit**  
[florian.sanchez@mayahtt.com](mailto:florian.sanchez@mayahtt.com)



**Pour plus d'informations, visitez**  
[www.mayahtt.com](http://www.mayahtt.com)

Better Qs  
Better As

Maya HTT  
[mayahtt.com](http://mayahtt.com)