

# NRTW 2026

## National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1<sup>er</sup> & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

**JUMEAUX NUMÉRIQUES POUR CAPTEURS DUALFBG DÉDIÉS À LA SURVEILLANCE SHM DE STRUCTURES AÉRONAUTIQUES, LANCEURS, ET OFFSHORE EN ENVIRONNEMENT OPÉRATIONNEL.**

Alain Bensoussan  
Quality and Reliability Department  
DFinder, Monbrun

*a.bensoussan@dfinder.eu*

Marie-Anne De Smet  
CEO  
DFinder, Monbrun

*ma.desmet@dfinder.eu*



Organisé par :

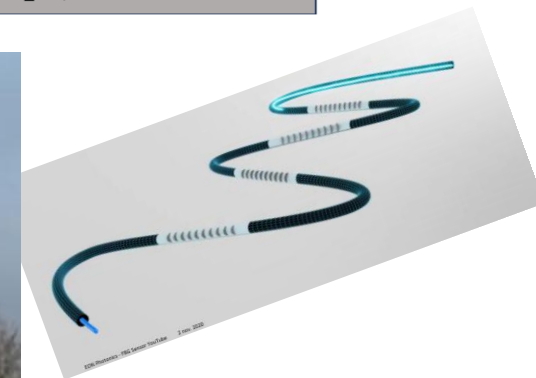
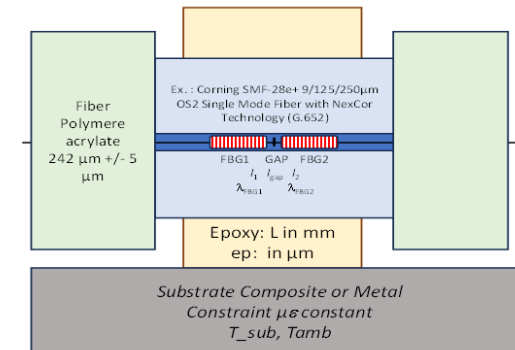


Financé par :



## Contenu

- Contexte Industriel
- Problématique : Fiabilité & Diagnostic
- Approche Méthodologique : Design for Quality/Reliability/Durability
- Jumeau Numérique Multiphysique
- Diagnostic & Résultats (Cas d'Usage)
- Conclusion & Maintenance Prédictive





## 01. Besoins :

Surveillance de structures (SHM) en environnements sévères (Aéronautique, Spatial/Lanceurs, Éolien Offshore).

## 02. Technologie clé :

Fibre optique à capteurs FBG (réseaux de Bragg)

- Immunité EM, multiplexage, légèreté.

## 03. Le défi :

Durée de vie requise de 20 à 30 ans

## 04. Constat :

L'incertitude sur la fiabilité à 20 ans freine l'adoption industrielle.



## Standards Actuels (217+, FIDES...)

### Les défauts aléatoires $\lambda=Cte$

Ces modèles accumulent des statistiques de pannes aléatoires (Tests cumulés 0 défaut).

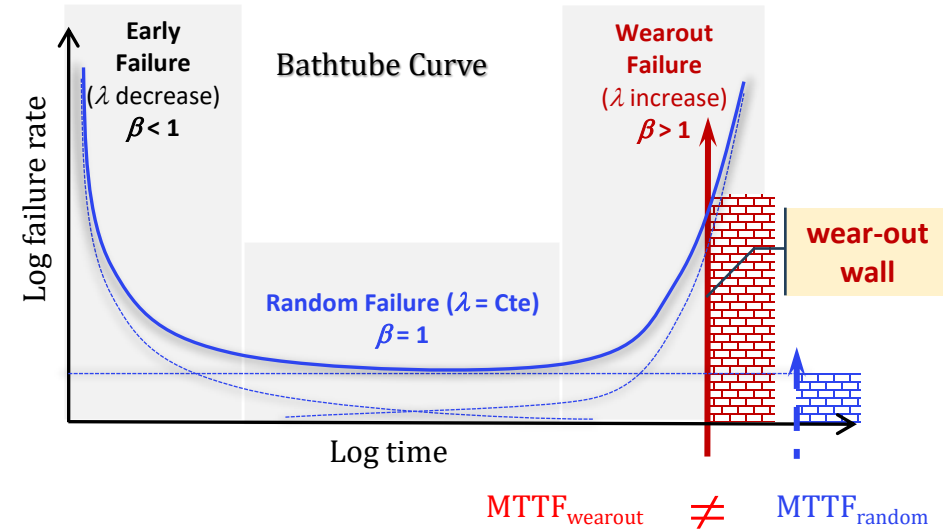
**Vision Standard :**  $MTTF = 1/\lambda$ . Prédit la probabilité d'une panne aléatoire ("Pas de chance").

### Wearout Fin de Vie

**Vision Physique (Wearout) :** La dégradation réelle (fatigue colle, délamination) impose une Fin de Vie physique : **Mur de l'Usure**.

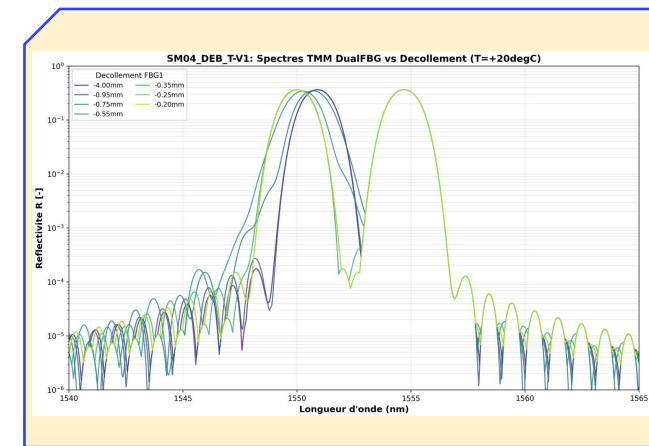
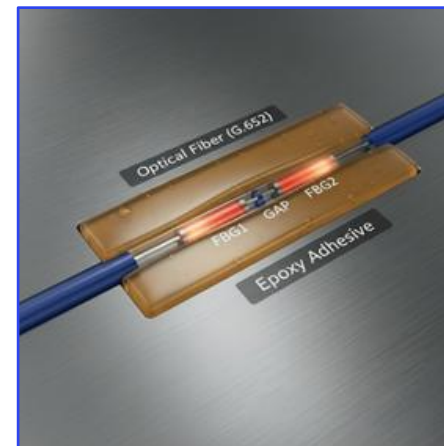
**Constat:**

- $MTTF_{Random}$  élevé ( $\lambda$  faible)  $\neq$   $MTTF_{Wearout}$  (durée de vie mission : fatigue, délamination).
- **Risque majeur : Rencontrer le "Mur de l'Usure" avant la fin de mission.**



## L'approche Physics of Failure (DfR)

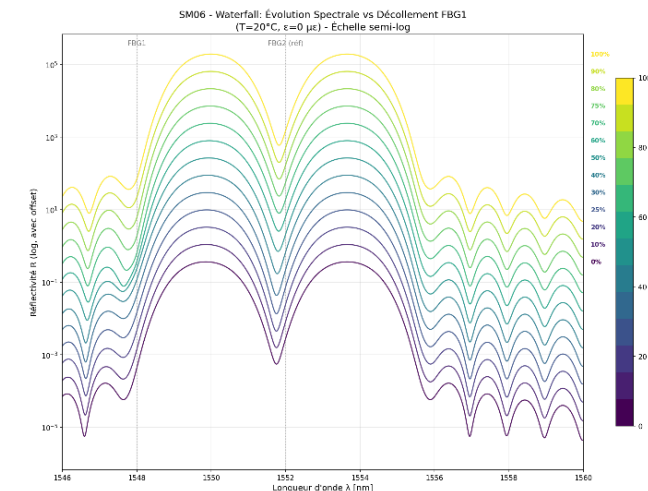
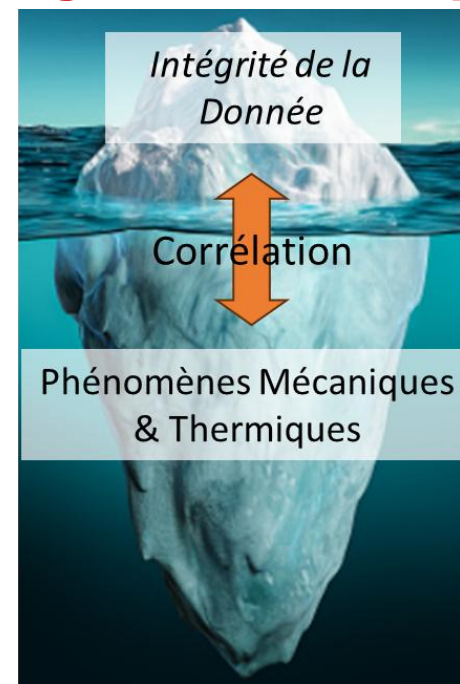
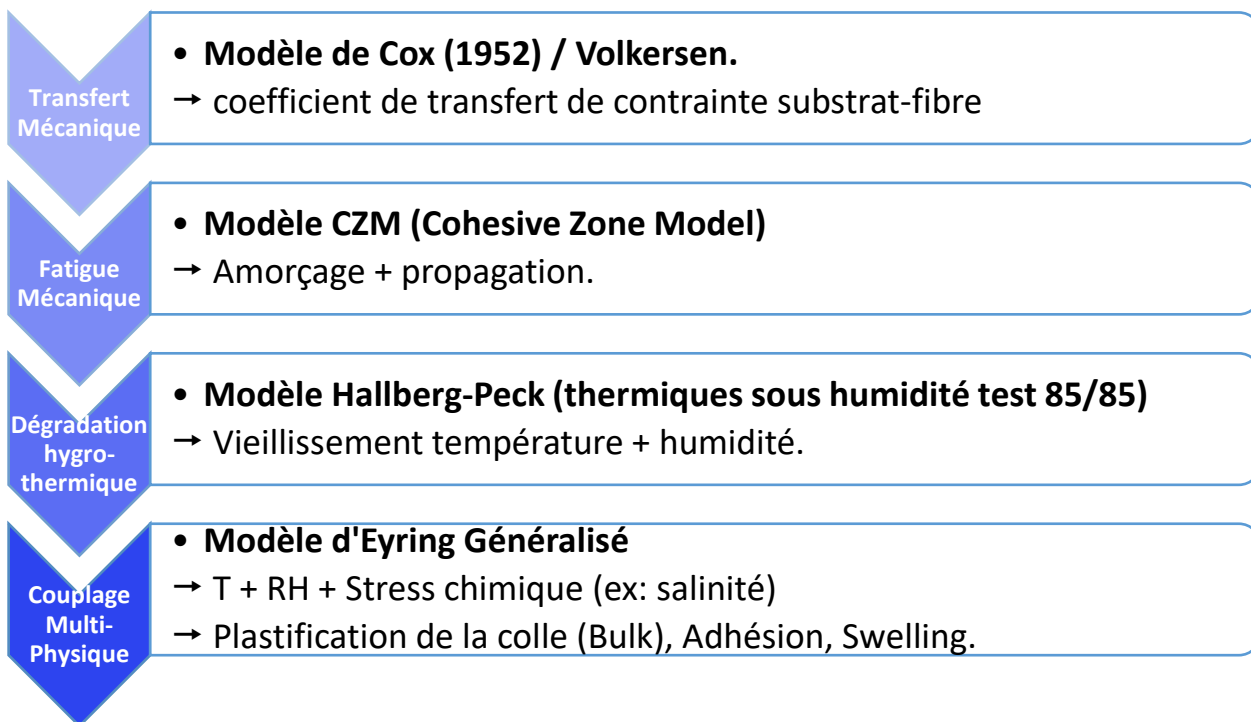
1. Garantir la performance: détecter les non-conformités d'assemblage initiales et dans le temps.
2. Maitriser le système : Caractériser l'interrogateur optique (qualité composant) et exploiter ses performances de résolution optique (ex: Précision native 120pm/pixel, reconstruite  $< 5$  pm par intelligence logicielle (selon SNR) (pour mesure de déformation, T et P)).



## Intégrer la fiabilité dès la conception du système de capteur assemblé :

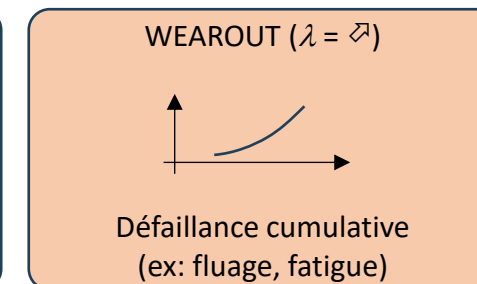
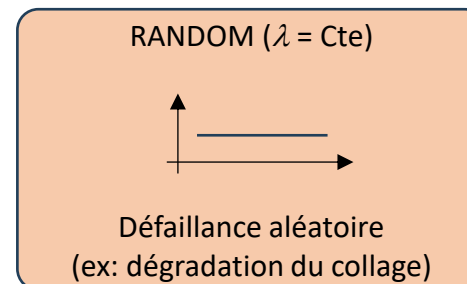
- Objectifs de fiabilité : Définition d'indicateurs garantissant une mesure fiable et reproductible.

Modèles Physique de Défaillance (PoF) sur l'assemblage hétérogène substrat/colle/fibre



Signature de l'analyse spectrale corrélée à des phénomènes physiques réels (mécanique et thermique)

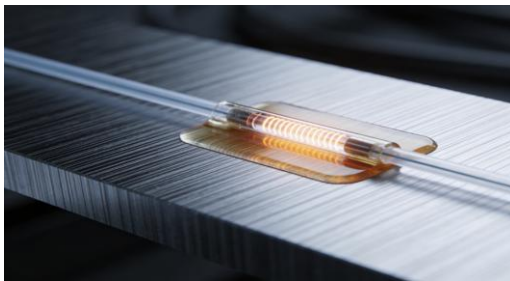
ANALYSE DE RISQUES (AMDEC/FMEA)  
Vérification : essais thermomécaniques environnement opérationnels



## Rôle du Jumeau Numérique :

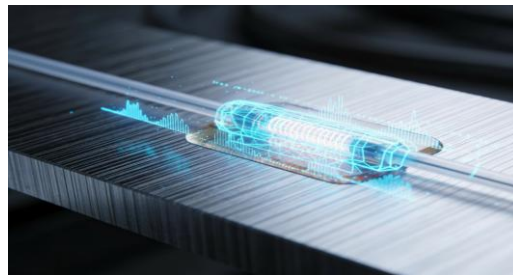
État de Santé effectif  
(Endommagement,  
Détachement,  
dégradation)

- Description physique et technologique du capteur et de son assemblage



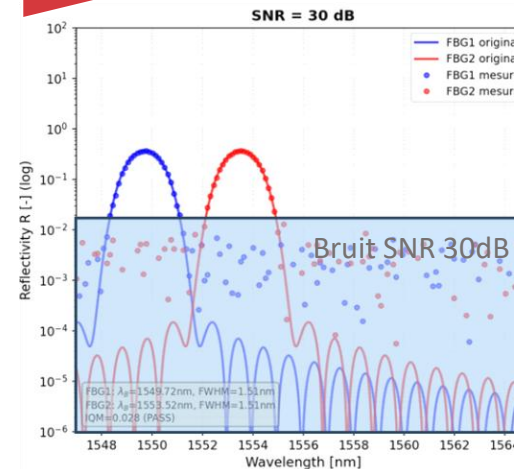
Jumeau Numérique

- Passerelle Physique-Numérique : Corrélation temps réel entre l'état de santé du capteur et sa réponse optique



Simulation Avancée

- Simulation Avancée : Quantification des signatures spectrales complexes (Chirp, Dédoublment) pour identifier le mode de dégradation (SHM)



*BÉNÉFICES CLÉS*

Discriminer un défaut capteur d'un défaut structure

Anticiper la dérive du capteur avant perte de fonction

Réduire le nombre d'essais physiques coûteux (qualification virtuelle)

## Mécanique Shear-Lag / Cox

Transfert de déformation Substrat → fibre (2D)



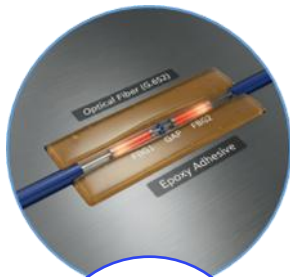
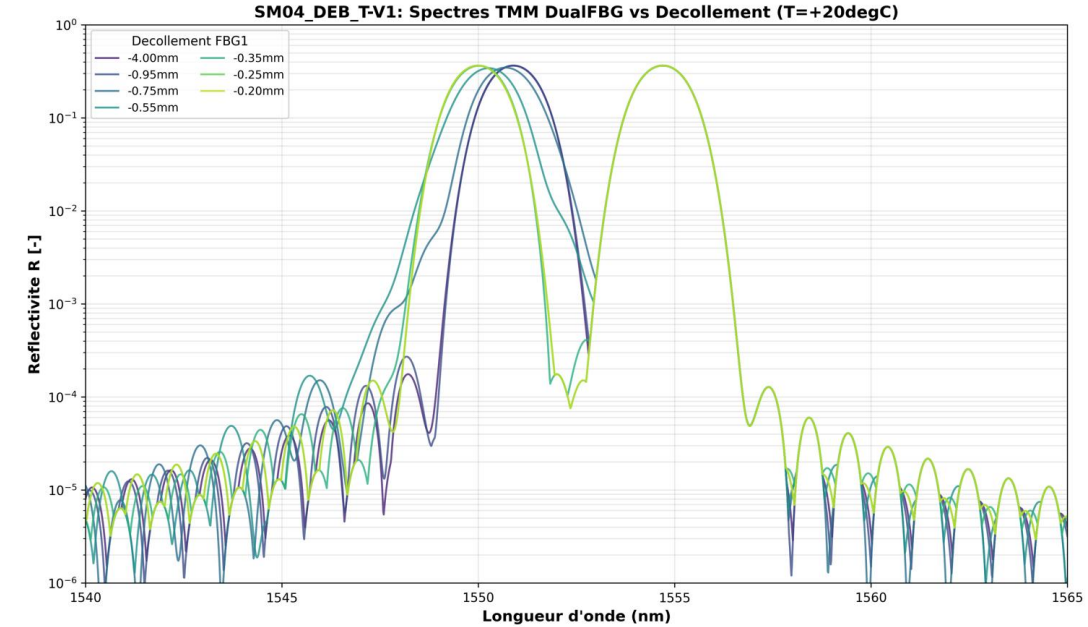
## Thermique (Diffusion 2D)

Champ de température  $T(z, r, t)$

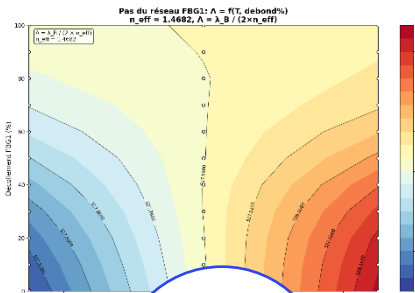


## Optique FBG Réflexion/Transmission

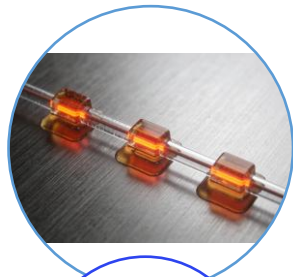
Transfer Matrix Method



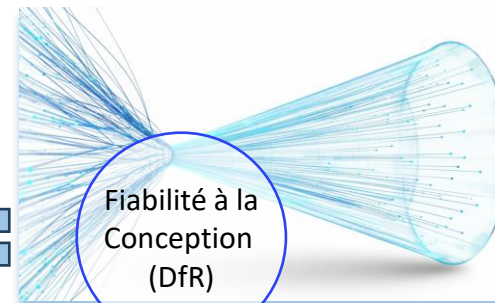
Principe  
FBG dual



Environnement  
thermique  
distribué 2D

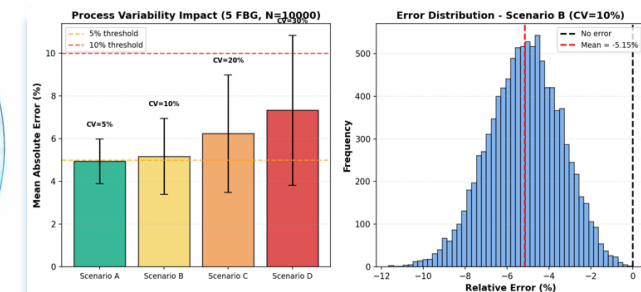


Variabilité  
Profil épaisseur  
d'adhésif



Fiabilité à la  
Conception  
(DfR)

## Quantification Incertitudes



## L'ÉTAT PHYSIQUE & ENVIRONNEMENTAL

Interactions Spatio-Temporelles (z, r, t)

### 1. Vieillessement & Diffusion (HumidityEngine)

Le système n'est pas inerte : la colle absorbe l'humidité, modifiant son module d'Young.

Équation clé : Diffusion de Fick 2D + Loi de Paris (Fatigue)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \rightarrow E_{adh}(RH, T)$$

### 2. Intégrité de l'Interface (FatigueEngine)

Propagation de défauts sous cyclage (mécanique/thermique).

Concept : Cartographie de l'endommagement par fatigue FaultMap a(z,N) qui dégrade localement le transfert de contrainte.

### 3. Géométrie Réelle (Grid Gen 2D)

Prise en compte du biseau de colle (Tapering) et des variations d'épaisseur  $h_{adh}(z)$ .

## LE CŒUR DE MODÉLISATION

Couplage Bidirectionnel & Transfert Matrix

### 1. Transfert de Contrainte (MechanicalEngine)

Modèle de Shear-Lag (Cox/Lau) spatialisé. Ce n'est pas un facteur K constant, mais une fonction  $\eta(z)$  qui dépend de la géométrie locale et de l'endommagement.

Équation clé : Déformation fibre vs Substrat.

$$\epsilon_f = \epsilon_{sub} \cdot \left[ 1 - \frac{\cosh(\lambda z)}{\cosh(\lambda L/2)} \right] \cdot \eta_{humidity} \cdot (1 - FaultMap)$$

( $\lambda$  = paramètre de shear-lag dépendant de  $G_{adh}$ ,  $h_{adh}$ )

### 2. Couplage Thermique (ThermalEngine)

La température vue par la fibre dépend du contact.

Loi : Décollement local ( $\eta \approx 0$ )  $\rightarrow T_{fibre}(z) \neq T_{substrat}$  (Rupture du pont thermique)

### 3. Réponse Spectrale (OpticalEngine)

Reconstruction du spectre par Transfer Matrix Method (TMM) pour intégrer les gradients.

Équation clé : Décalage de Bragg local.

$$\frac{\Delta \lambda_B(z)}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \epsilon_f(z) + (\alpha_f + \xi) \cdot \Delta T(z)$$

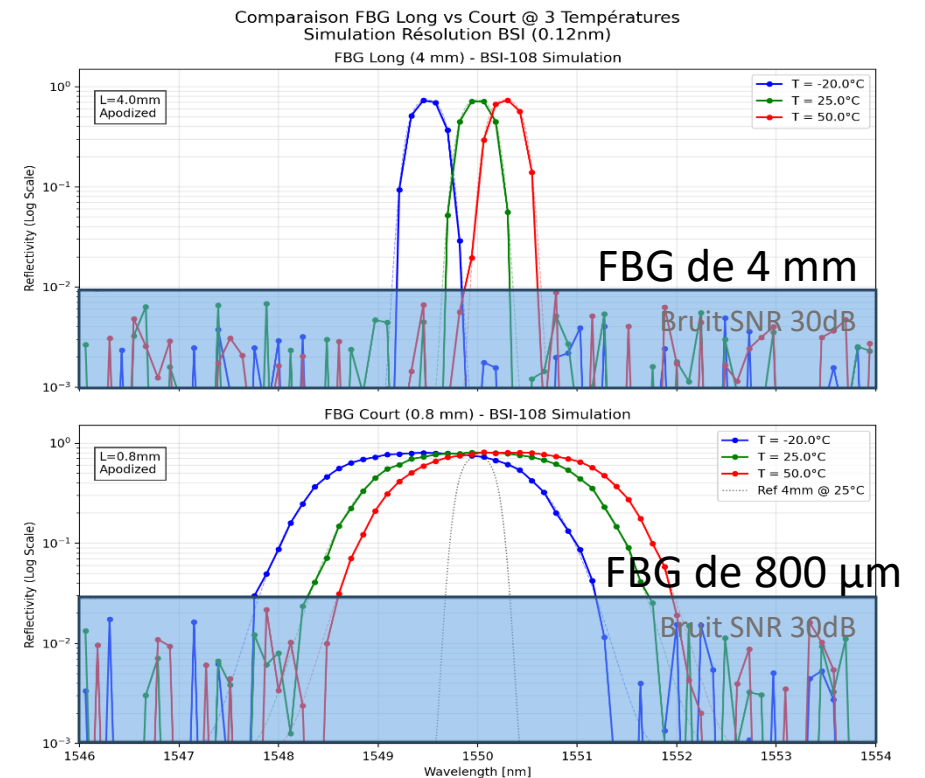
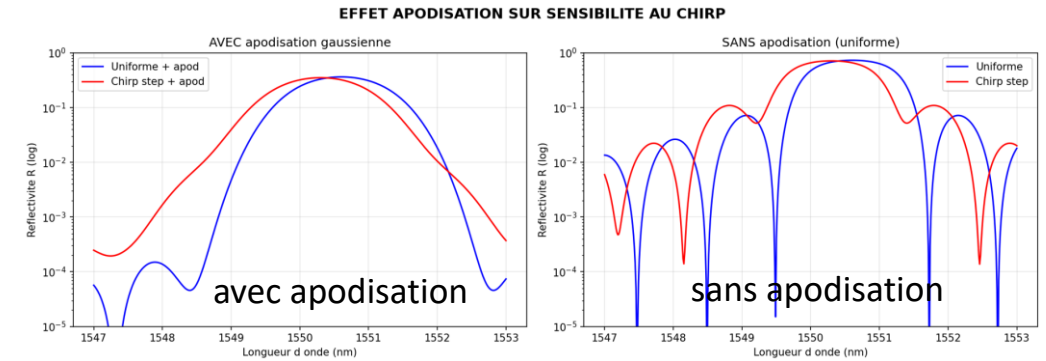
Sorties : Signatures Spectrales Complexes & Métriques SHM (m1...m7)

## Modélisation Optique Avancée (TMM Spatialisé) : Intégration des gradients de déformation et de l'apodisation.

- Simulation spectrale de réseaux de Bragg (modèle TMM) avec et sans apodisation
- Visualisation de l'effet de déformation du spectre de Bragg consécutif à un décollement local partiel (effet de chirp)

## Jumeau Numérique simulant la mesure spectrale de l'Interrogateur BSI108 :

- Simulation de l'influence du rapport Signal/Bruit (SNR 20-30-40dB) pour une réflectivité de 35%,
- Résolution du spectromètre – pixélisation :
  - 4 mm de long ➔ 5-6 pixels mesurables
  - 800µm de long ➔ 28 pixels mesurables
- Quantification et ajustement Gaussien du spectre de réflexion :
  - précision du déplacement du pic de Bragg  $\delta\lambda_B = 120$  pm (de base) ➔ **Ajustement Gaussien permet d'améliorer** la précision à mieux que 5 pm.

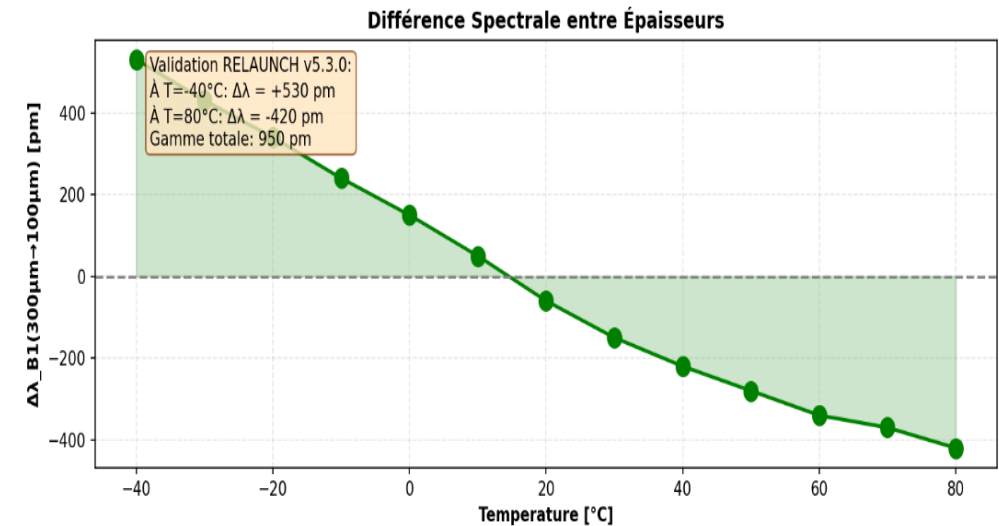
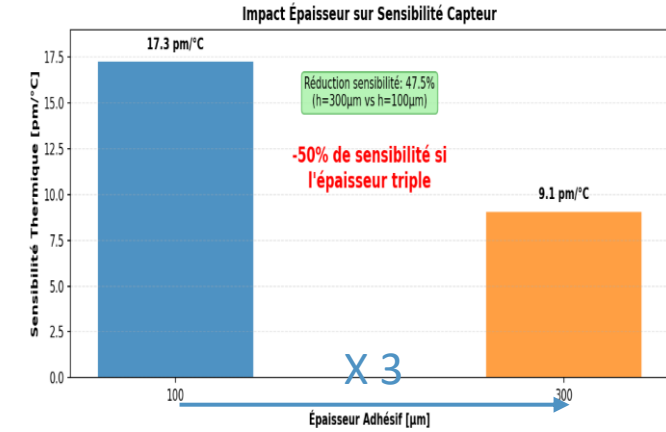
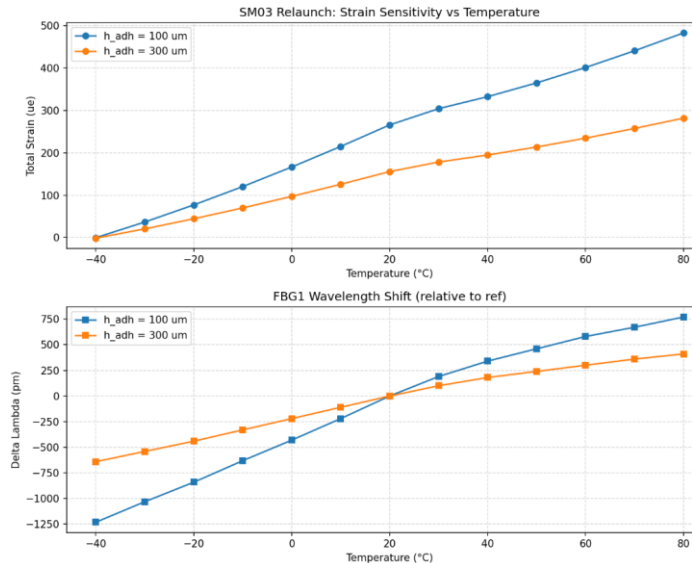


## Loi Physique (Compréhension)

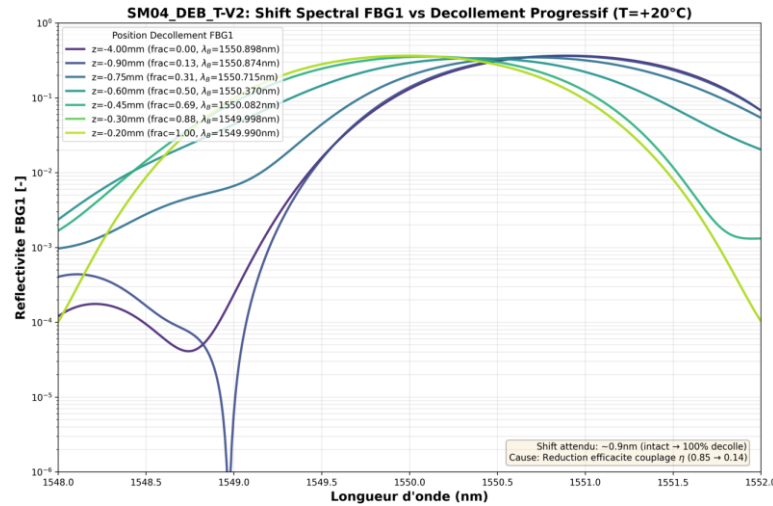
- L'effet physique (Cox) est quantifié par la simulation : tripler l'épaisseur de colle divise par 2 la sensibilité du capteur (Loi en  $1/\sqrt{h_{adh}}$ ).
- Impact direct sur le transfert de contrainte ( $\eta$ )

## L'Impact sur la Mesure (Conséquence)

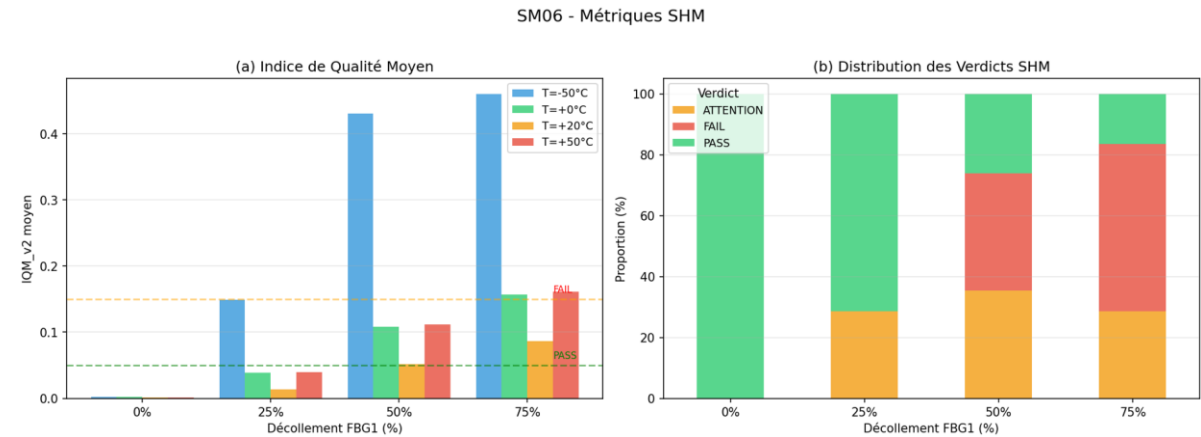
- Process Maîtrisé (CV < 10%) : Erreur < 5% → Acceptable pour SHM standard".
- Process Non Maîtrisé (CV > 20%) : Erreur massive → Calibration Individuelle Obligatoire.



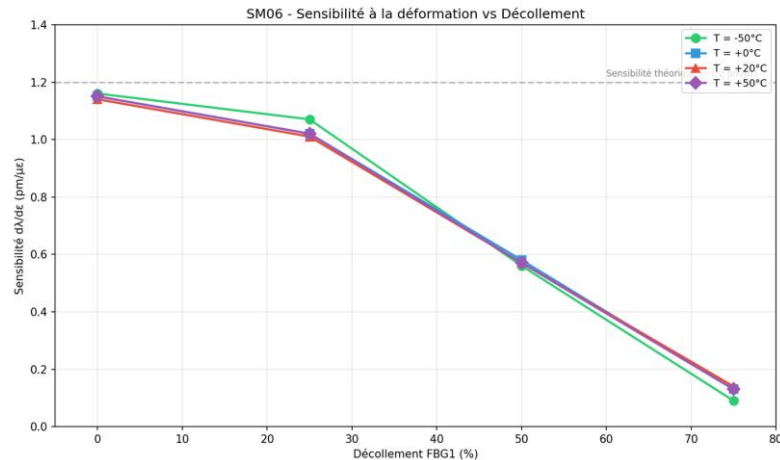
Dégradation du spectre = Perte de fiabilité de la mesure.



Matrice de Décision & Niveaux de Confiance.



Effet du décollement sur FBG1 ⇒ FBG2 peut être juge de paix.

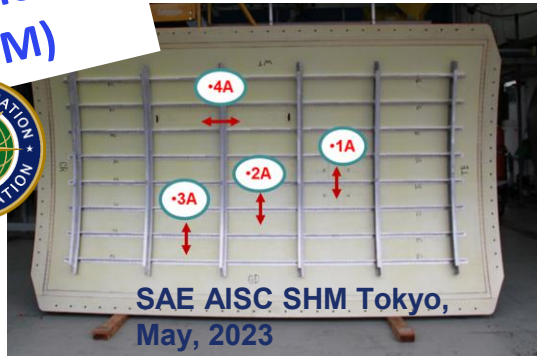


- Intégrité Garantie : "Validation automatique de chaque point de mesure."
- Anticipation : "Détection des dérives (fatigue/colle) avant défaillance critique."
- Opérabilité : "Statut clair (Vert/Orange/Rouge) pour la prise de décision immédiate."

FAA Structural Health Monitoring (SHM)



Typical metallic fuselage assembly



Fondation Expérimentale (TRL 6-7) :

- Technologie capteur éprouvée sur bancs d'essais structuraux majeurs.

L'Apport du Jumeau Numérique :

"Capitalisation sur ce REX expérimental pour développer le modèle prédictif."

Le Jumeau Numérique vient combler les "trous" de l'expérimentation (simuler ce qu'on ne peut pas tester partout et tout le temps).

•Modélisation Validée :

- Jumeau Numérique Multi-physique calibré (Cox + TMM + Thermique).
- Maîtrise quantifiée de l'impact process (épaisseur colle  $h_{adh}$ ).

•Intégrité Garantie :

- Indicateurs de Performance (IPM) pour discriminer *Défaut Capteur* vs *Défaut Structure*.

•Sécuriser la Donnée :

- "Ne jamais piloter la maintenance sur une fausse alarme."

•Optimiser les Coûts :

- Transition vers la Maintenance Conditionnelle (CBM).
- Justification de l'extension de vie (Life Extension) par la donnée certifiée.

"Avec un TRL 6-7" et une validation FAA, le Jumeau Numérique est né du REX de nos campagnes FAA. Une solution SHM certifiable pour les environnements critiques sur 20 ans."

# NRTW 2026

## National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1<sup>er</sup> & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

# merci pour votre écoute !

**Je remercie tout particulièrement Hichame Maanane  
Architecte Système - Thales DMS) pour avoir assuré  
cette présentation - Alain Bensoussan**

Organisé par :



Financé par :

