



**BEA**  
Bureau d'Enquêtes et d'Analyses  
pour la sécurité de l'aviation civile

## Propriétés des matériaux aéronautiques

[www.bea.aero](http://www.bea.aero)



**Emmanuel DELBARRE**  
Enquêteur BEA (ret.)



**BEA**

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses  
pour la sécurité de l'aviation civile

## Matériaux et analyse de défaillances

[www.bea.aero](http://www.bea.aero)




**Emmanuel DELBARRE**  
Enquêteur BEA (ret.)

# Modes de défaillance des matériaux

La **défaillance des matériaux** est un terme technique utilisé pour décrire l'état dans lequel un **matériau** utilisé dans la conception d'un composant ou d'une structure d'ingénierie **cesse de remplir l'objectif pour lequel il a été conçu**. Lorsque cela se produit, le composant ou la structure **devient impropre** à l'usage auquel il est destiné.

Pour plus de clarté, **imaginons un pont** avec un des piliers faibles. Si ce **pilier se déforme sous le poids** du pont et des voitures qui y circulent, c'est tout le pont qui s'effondre. Il **s'agit d'une défaillance matérielle** qui peut avoir plusieurs causes. Voici quelques-unes des plus courantes :

- **Concentration des contraintes**
  - **la surcharge**
  - **la corrosion**
  - **la fatigue**
- 

# Modes de défaillance des matériaux

## Concentration des contraintes

Cela se produit lorsque la charge sur un matériau est inégalement répartie, ce qui entraîne une concentration des contraintes dans une zone particulière.

## Corrosion

Il s'agit de la dégradation progressive des propriétés d'un matériau en raison de réactions chimiques avec son environnement.

## Fatigue

Cela se produit lorsqu'un matériau finit par se briser ou se rompre après avoir été soumis à une charge cyclique pendant une longue période.

## Surcharge

Cela se produit simplement lorsque le poids ou la force supporté par un matériau est supérieur à ce qu'il est conçu pour supporter.

## Causes externes de défaillance des matériaux

- **Contrainte mécanique** : Il s'agit des forces, des charges et des contraintes appliquées à un matériau au-delà de sa capacité de charge, entraînant des comportements tels que des déformations, des fractures ou des défaillances pures et simples. Par exemple, dans les structures, les charges cycliques conduisant à des défaillances dues à la fatigue sont un problème important.
- **Températures extrêmes** : Des températures extraordinairement élevées ou basses peuvent entraîner la défaillance des matériaux. Les températures élevées peuvent entraîner le ramollissement ou même la fonte des matériaux, tandis que les températures extrêmement basses peuvent les fragiliser.

## Causes externes de défaillance des matériaux

- **Corrosion et usure** : Ces deux phénomènes sont responsables d'une réduction progressive du volume d'un matériau, ce qui conduit à son affaiblissement. La corrosion est principalement due aux influences environnementales comme l'humidité, tandis que l'usure résulte du contact physique avec d'autres surfaces au fil du temps.
- **Les radiations** : Dans les cas graves, notamment lorsque le matériau est exposé à un rayonnement de haute énergie, celui-ci peut provoquer des changements dans la microstructure du matériau et donc entraîner une défaillance.

Dans la pratique de l'ingénierie, **ces facteurs doivent être pris en compte lors de la phase de conception** afin d'éviter toute défaillance du matériau. La sélection des matériaux appropriés qui peuvent tolérer ces facteurs de stress externes **est cruciale**.

## Causes internes de défaillance des matériaux

Toutes les **causes de défaillance** des matériaux ne sont pas externes ; certaines sont **enracinées dans le matériau lui-même**. Ces causes internes sont souvent liées aux propriétés intrinsèques du matériau, à son processus de fabrication ou aux défauts qui ont pu être introduits au cours des phases de traitement ou d'application.



## Causes internes de défaillance des matériaux

- **Défauts inhérents au matériau** : Chaque matériau possède son propre ensemble de propriétés physiques et mécaniques qui définissent sa capacité à résister à certaines conditions. Si les propriétés intrinsèques d'un matériau ne sont pas adaptées à une application spécifique, cela peut entraîner une défaillance.
- **Défauts de fabrication** : Les imperfections introduites au cours du [processus de fabrication](#), telles que les inclusions, les pores ou les vides, peuvent servir de points de concentration de contraintes conduisant à une défaillance prématurée.

## Causes internes de défaillance des matériaux

- **Dégradation du matériau (phénomène de fatigue)** : Au fil du temps, les propriétés du matériau peuvent se dégrader en raison du vieillissement ou d'une utilisation répétée, ce qui le rend susceptible de tomber en panne.
- **Erreurs de conception** : Si la conception ne tient pas compte avec précision des propriétés du matériau ou des conditions de chargement prévues, elle peut entraîner une défaillance.

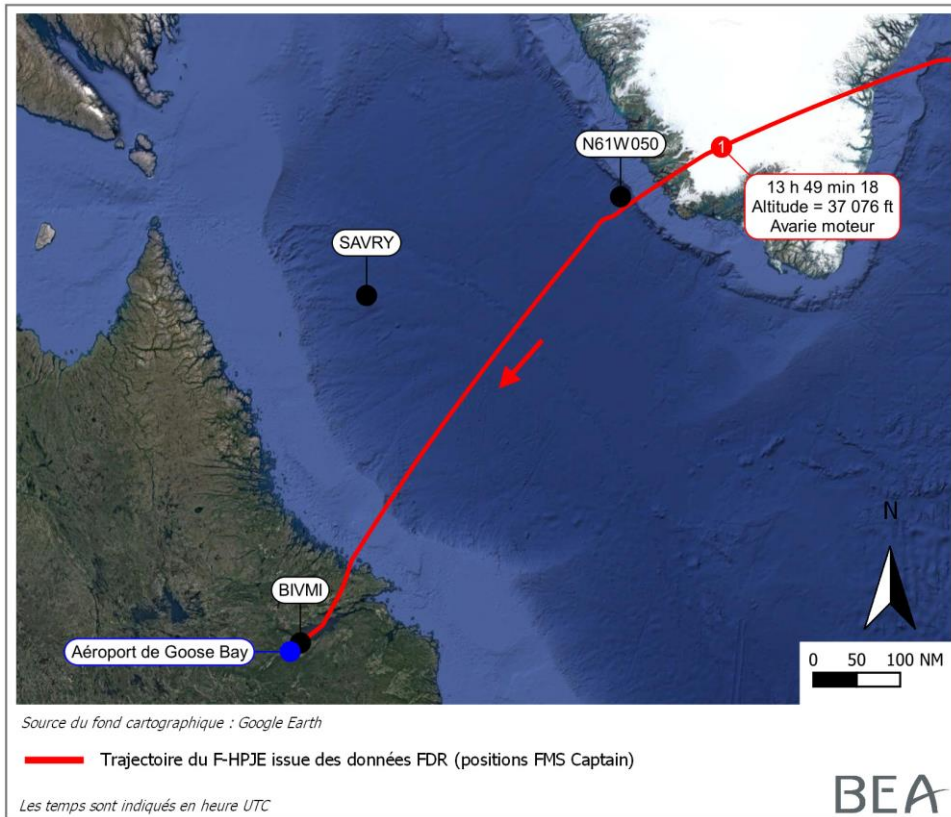
•

## Exemple de défaillance des matériaux composites

**Défaillance du moteur de l'Airbus A380 :** En 2010, un Airbus A380 a dû effectuer un atterrissage d'urgence en raison d'un dysfonctionnement du moteur. Une enquête ultérieure a permis de découvrir une fissure de fatigue dans le tuyau d'alimentation en huile, ce qui a entraîné une fuite d'huile et, par la suite, une défaillance du moteur. Le tuyau était constitué d'un composite à matrice métallique qui n'a pas résisté aux cycles de stress du moteur.

## ✈ RAPPORT D'ENQUÊTE

**Accident de l'avion AIRBUS A380-861**  
équipé de moteurs Engine Alliance GP7270  
**immatriculé F-HPJE**  
exploité par Air France  
survenu le 30 septembre 2017  
en croisière au-dessus du **Groenland (Danemark)**





## Exemple de défaillance (rupture) de matériaux

Un fragment du moyeu de la soufflante a été retrouvé au sud du Groenland, sous la glace, vingt et un mois après l'accident.

.📖 Le fragment a été analysé et a révélé que la rupture, dont l'origine se situait dans une macro-zone sous la surface d'un fond d'alvéole d'aube, s'était produite selon un phénomène de **fatigue-dwell** (fissure très progressive). La **fissure s'est propagée** pendant **1 650 cycles environ**, jusqu'à la rupture totale du moyeu.

.📖 Le nombre de cycles prévu **en durée de vie pour** le moyeu **était de 15 000 cycles**.

.📖 Cette rupture n'a pu être ni anticipée, ni empêchée par une action opérationnelle ou de maintenance.

.📖 Les inspections du moyeu en production n'ont pas révélé d'anomalie.

.📖 La macro-zone où la fissure s'est amorcée était beaucoup plus grande et beaucoup plus intense que les macro-zones généralement observées par le constructeur, à la fois dans d'autres zones du moyeu du moteur N°4 et sur les moyeux issus de la même billette.

.📖 Le phénomène **de fatigue-dwell mis en lumière par cet accident n'était pris en compte ni dans la certification, ni la conception des moteurs**.

.📖 À l'époque de la certification du moyeu et du moteur, il était admis par la communauté scientifique, industrielle et par les autorités de certification que le **Ti-6-4 n'était pas sensible au phénomène de fatigue-dwell**.

# Les examens

## Les examens

Les éléments d'épave prélevés sur le site de l'accident sont acheminés en laboratoire afin d'y être examinés. Ils peuvent être de nature très diverse : pièces ou fragments de pièces de structure, ensembles mécaniques, équipements, instruments de bord, ampoules d'alarmes, fluides, débris, dépôts...

Les examens pratiqués ont pour objectif de déterminer les causes de défaillance des différents éléments et leur éventuelle implication dans l'accident : origine ou conséquence ? Ils peuvent aussi permettre d'enrichir certaines informations sur la configuration de l'appareil au moment de l'accident.

Ces examens peuvent se dérouler dans le laboratoire d'analyse de défaillances du BEA ou dans des laboratoires extérieurs, sous contrôle du BEA ou d'un bureau d'enquêtes étranger en cas de représentation accréditée



L'examen des pièces rompues fait appel à des domaines variés des sciences des matériaux :

- l'analyse morphologique (analyse des structures physiques et des composants des métaux)
- la microscopie électronique à balayage (MEB) (fournit des images 3D à haute résolution de la zone de défaillance),
- la spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS) (contribue à la compréhension de la composition du matériau)
- la fractographie (l'étude de la fracture peut donner des indications sur la défaillance).
- Leur synthèse permet d'identifier la nature et l'origine de la rupture.



Salle d'examens visuels & Microscopie



EDS (Spectrométrie à dispersion d'énergie) couplé au MEB (Microscope Electronique à Balayage)

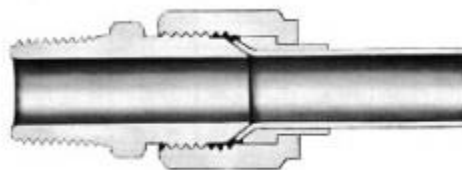
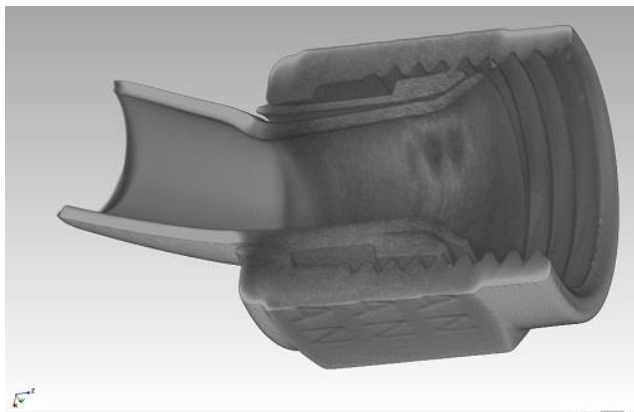


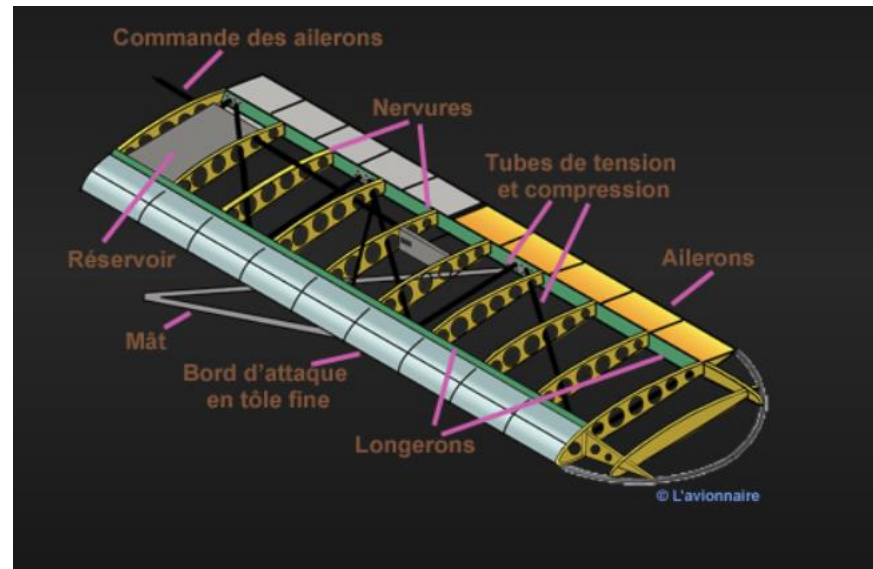
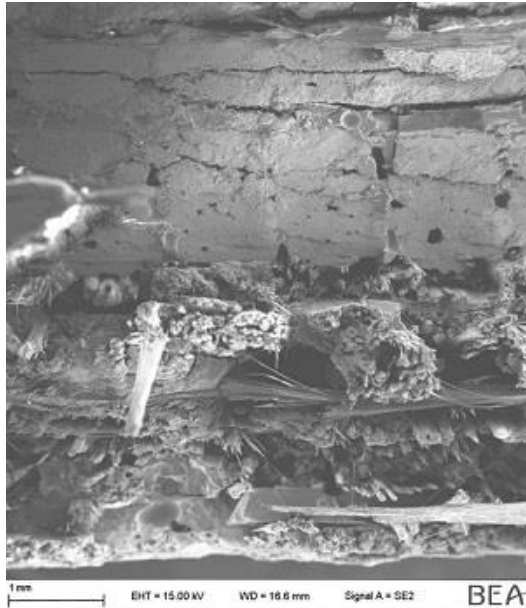
EDS (Spectrométrie à dispersion d'énergie) couplé au MEB (Microscope Electronique à Balayage)

## *Exemples*

## Exemples d'examens

L'examen visuel et le CND (Contrôle Non Destructif) permettent, avant toute altération des pièces (découpe, démontage, etc.), une première phase d'identification et de caractérisation de défaut, d'endommagement ou de dysfonctionnement.





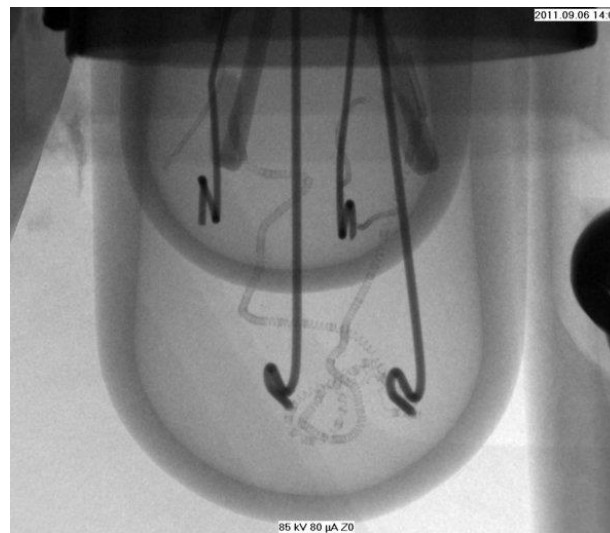
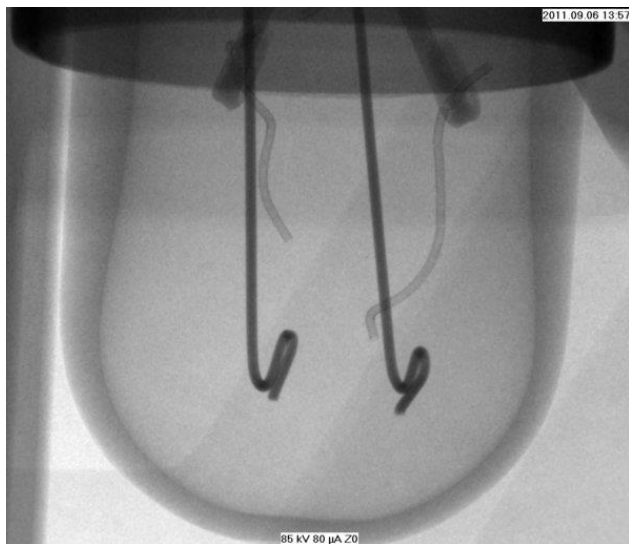
**Vue au MEB** (Microscope Electronique à Balayage) du **faciès de rupture de la semelle intrados** d'un longeron d'aile en composite sous une sollicitation de flexion.

Les fibres sont rompues en compression (en haut) et en traction (en bas)



Vue au banc macroscopique du faciès de rupture d'une pale d'hélice en alliage d'aluminium. Les avancées successives du front de fissuration en fatigue sont visibles.

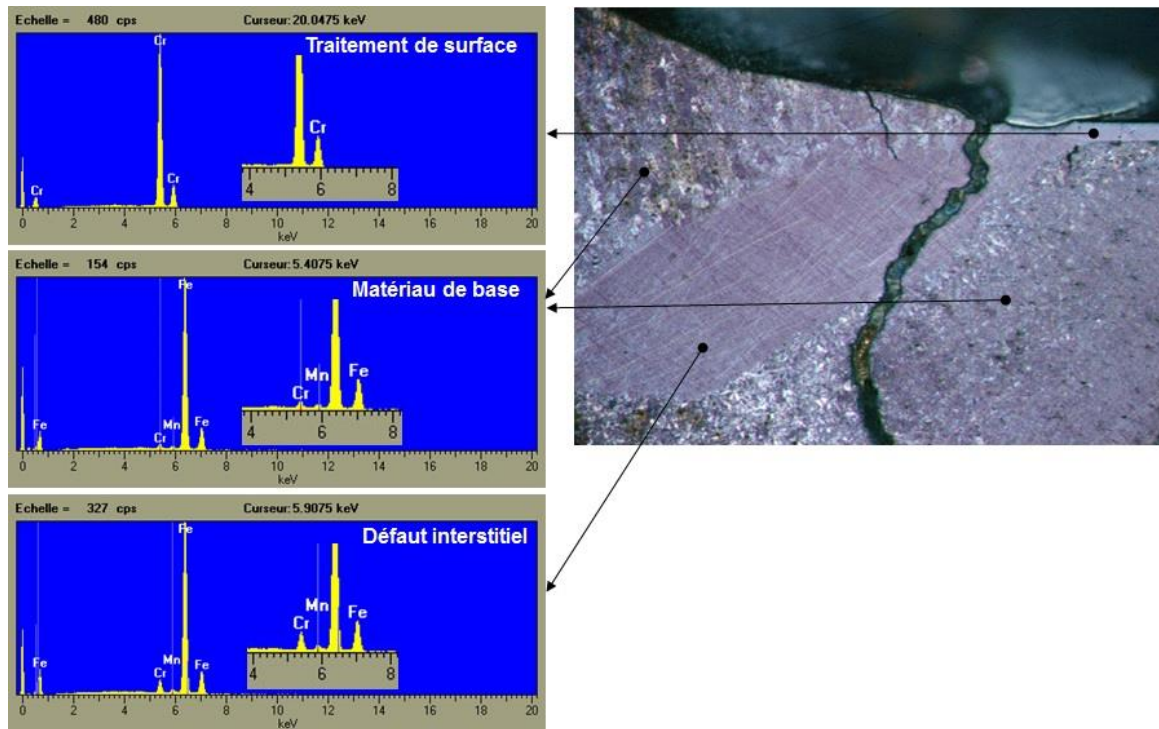




Radioscopie de 2 ampoules de 2 voyants d'alarme. A gauche : filament rompu, peu déformé, les spires ne sont pas étirées - le filament était froid à l'impact, l'alarme était éteinte.

A droite : filament non rompu, déformation généralisée, les spires sont étirées - le filament était chaud à l'impact, l'alarme était allumée.

L'analyse de la matière permet de connaître la composition chimique d'une pièce, d'un revêtement de surface, d'un dépôt. Elle permet notamment de contrôler la conformité de la pièce aux spécifications chimiques du constructeur.



Coupe métallographique (à droite) d'un cordon de soudure de train d'atterrissage avant et spectres EDS (Spectrométrie par dispersion d'énergie, à gauche) associés aux zones analysées. On note la présence d'un défaut interstitiel riche en chrome, élément provenant du traitement de surface.

Je vous remercie