

LA FIABILITE POUR L'EVALUATION DES RISQUES DE RUPTURE DES STRUCTURES AERO-MECANIKES

**‘Toutes les sciences sont mises sur la Terre
depuis que notre seigneur ALLAH a créé son
Prophète ADAM 'PBUH' et les chercheurs
ne font que les découvrir’**

SAID RECHAK

Journée de la Fiabilité. ENP – 18 novembre 2018

PLAN DE LA PRÉSENTATION

- 1. Fiabilité en mécanique / Aéro
 - 2. Définitions
 - 3. Approches:
 - Probabiliste
 - Déterministe
 - Meilleur Estimé
 - 4. In Between
 - 5. Au-delà de la Fiabilité (Beyond Reliability)
- 

- **La fiabilité mécanique est un sujet (science) ancien.**
- **Les systèmes mécaniques sont souvent surdimensionnés**
- **Facteur de sécurité élevé**
- **La prédiction de la fiabilité des composants mécaniques dépend des facteurs influents:**
 - **Production (conditions opératoires)**
 - **Matériel (durabilité)**
 - **Conditions de charge**
 - **Environnement**
- **Prédiction de la rupture d'un composant mécanique**
 - **Déterminer l'espérance de vie d'une pièce mécanique (pièces mécaniques connues)**
 - **Pour un nouveau système mécanique → caler sur le modèle de l'ancien composant**

-



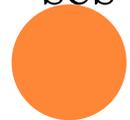
Fiabilité des structures aéro

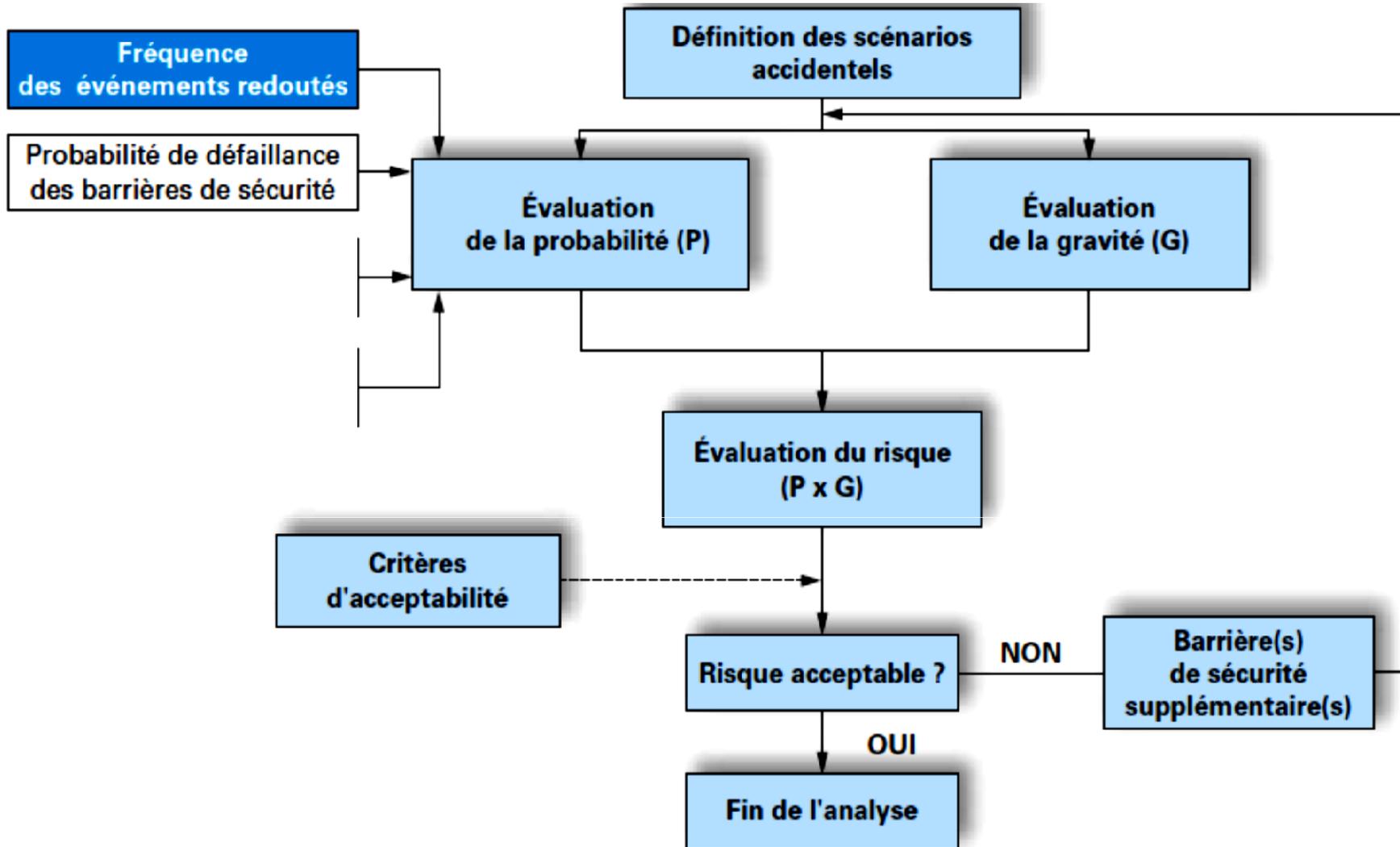
- La probabilité à la rupture des composants aéro est inférieure à 10^{-3}
- Concept Safe Life
- Concept Fail Safe
- Fatigue
 - Initiation
 - Propagation
 - Rupture finale
- Rupture mécanique
 - Critère du F.I.C



Définitions

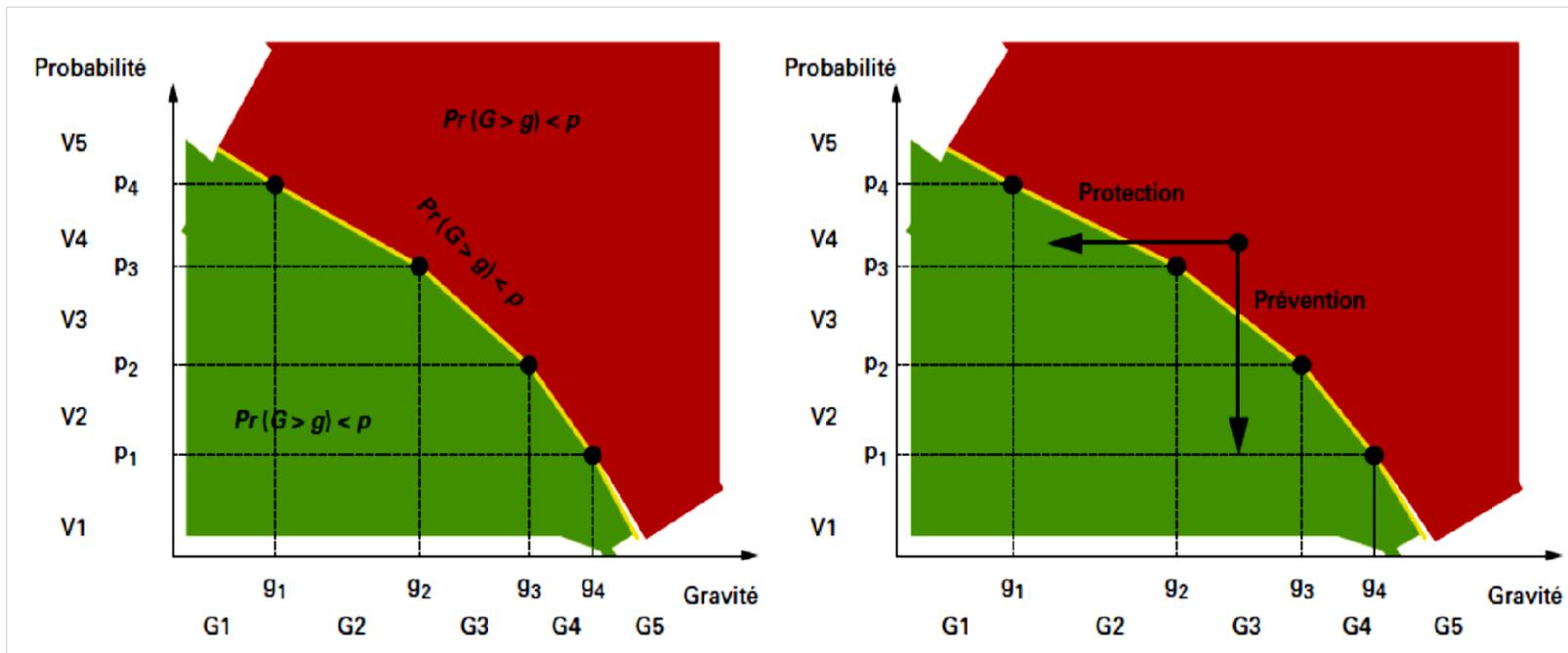
- La fiabilité d'un composant exprime la probabilité qu'il fonctionne correctement (sans défaillance) pendant un temps déterminé dans des conditions (que l'on appellera conditions de base).
- Une étude de fiabilité nécessite obligatoirement une expertise physique des organes ou composants étudiés et peut-être même de ceux qui leur sont liés
- Le risque est le mot-clé central de l'approche du fiabiliste. Le risque associe une évaluation et une mesure à la possibilité d'accident.
- **La prévention** a pour but de diminuer la probabilité d'occurrence du risque.
- **La protection** a pour but de diminuer la gravité de ses conséquences.





Arborescence liée à l'évaluation d'un scénario d'accident





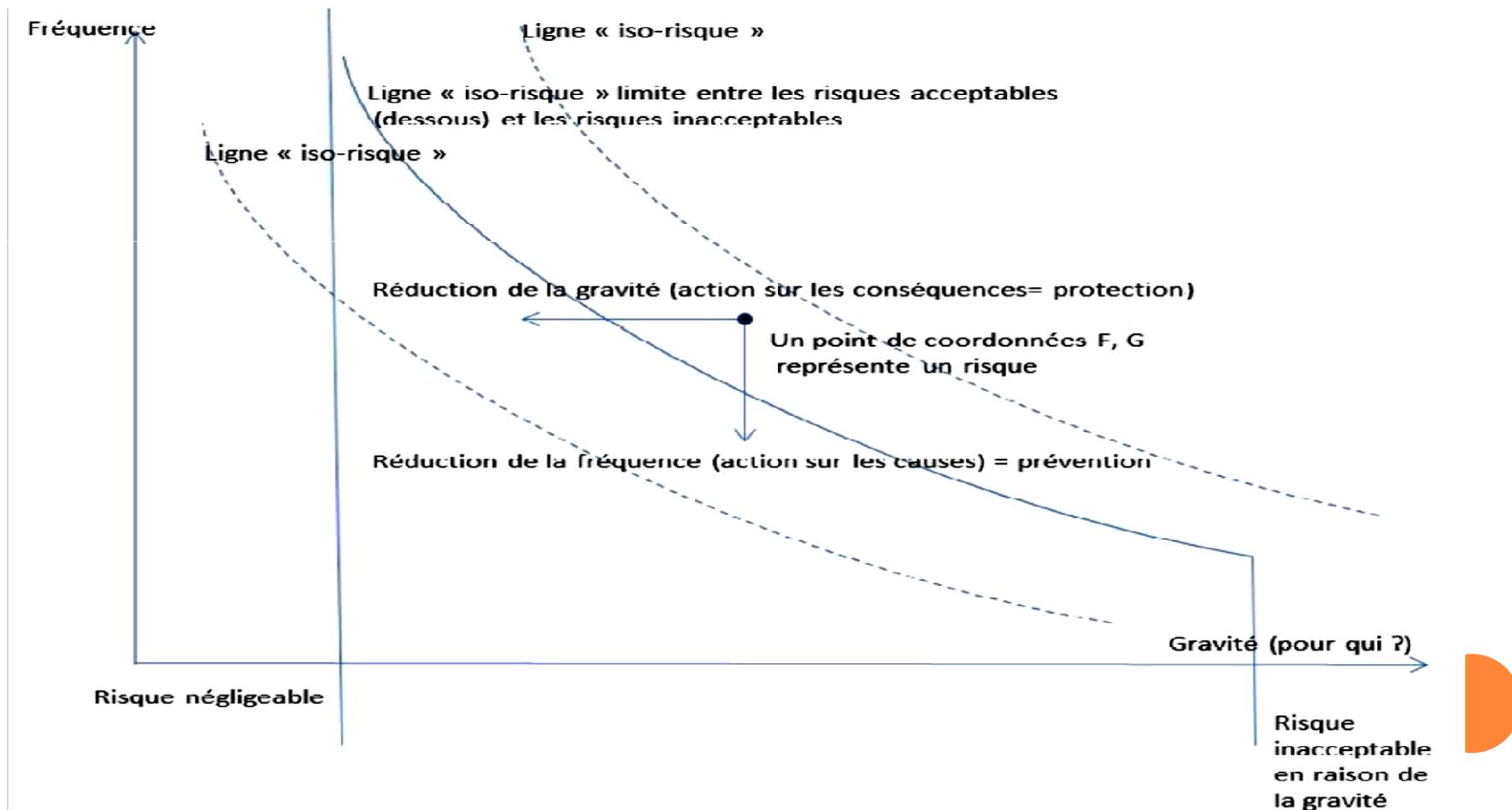
| Classe de criticité | Intitulé de la classe | Intitulés des décisions et des actions |
|---------------------|-------------------------|--|
| C1 | Acceptable en l'état | Aucune action n'est à entreprendre |
| C2 | Tolérable sous contrôle | On doit organiser un suivi en termes de gestion du risque tel que contrôle ou transfert |
| C3 | Inacceptable | On doit refuser la situation et prendre des mesures de réduction des risques Sinon... on doit refuser toute ou partie de l'activité |

Diagrammes d'acceptabilité des risques

Cette classification de l'ensemble des risques de l'activité en trois classes doit être validée par la gouvernance du risque qui dispose des ressources associées aux décisions rattachées à chaque classe.

Réduction du risque

Le regroupement structuré des actions de **prévention** et de **protection** est appelé plan de réduction des risques. Les actions de contrôle permettent de garantir dans le temps le maintien du niveau de risque acceptable ou tolérable atteint.

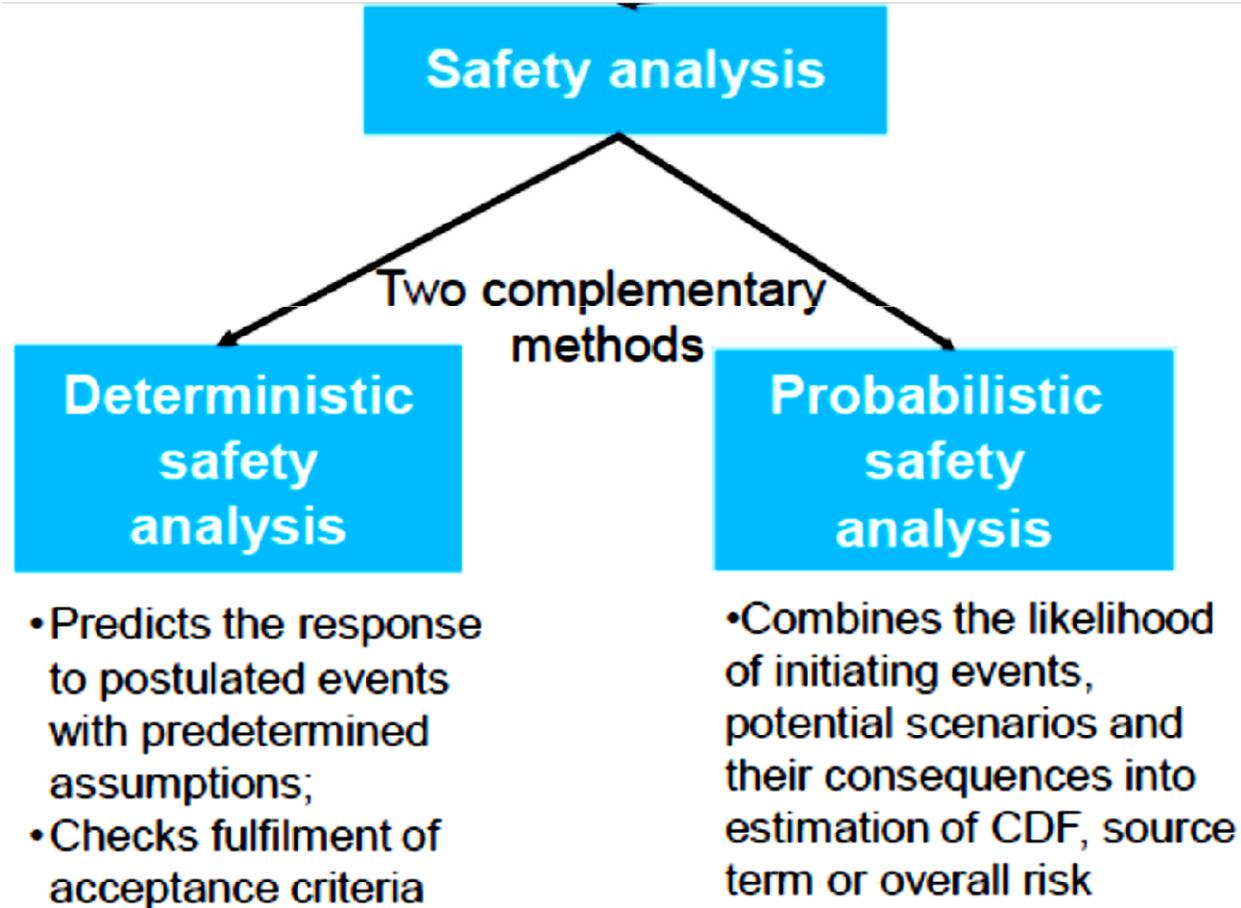


Approches fiabilistes:

Approche Probabiliste

Approche déterministe

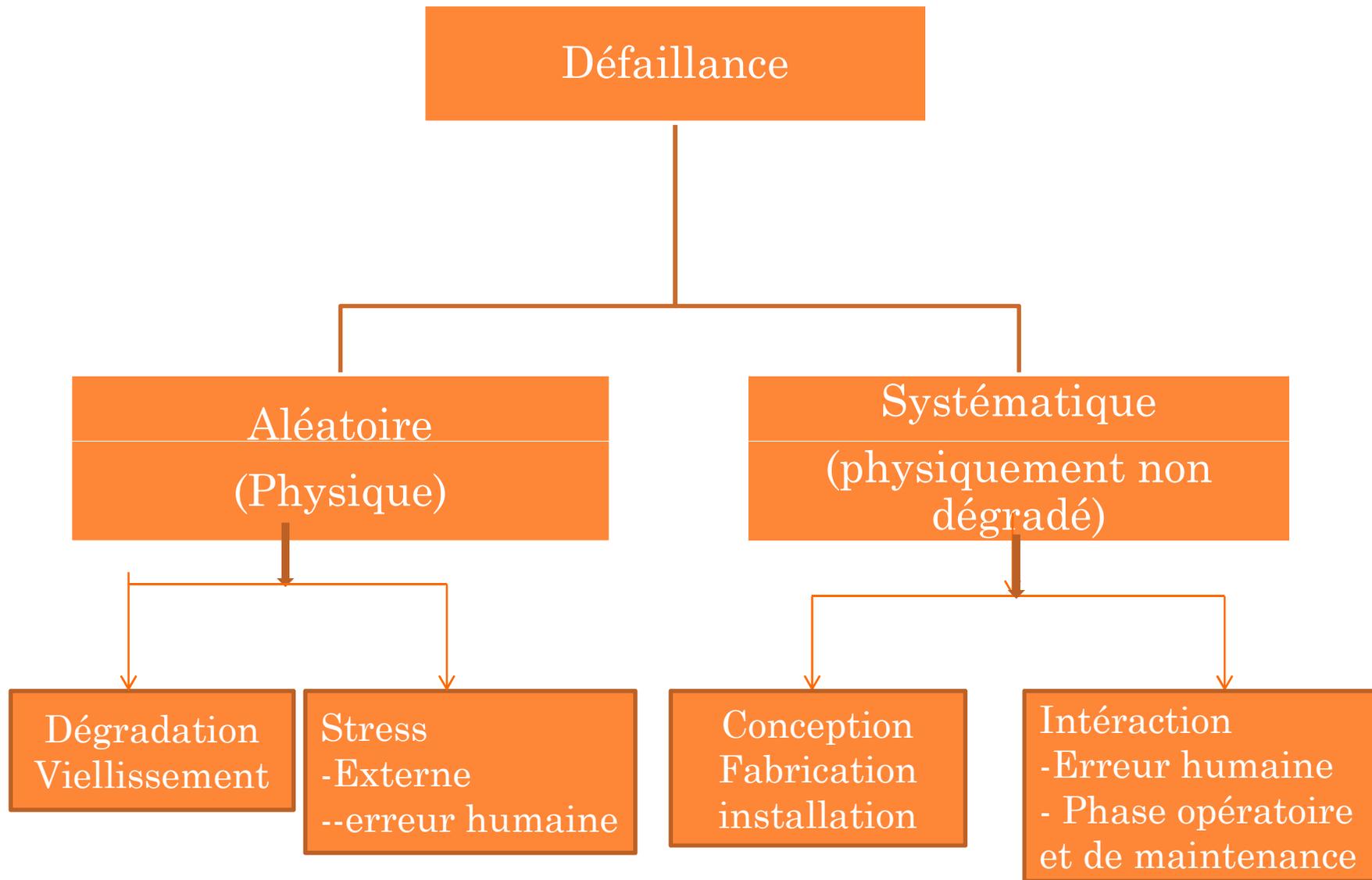
Approche du meilleur estimé (B E A)



L'APPROCHE PROBABILISTE



Nature des défaillances



Modélisation d'un mécanisme de défaillance

Lorsqu'un composant est modélisé par une **loi de durée de vie**, on est souvent amené à faire des calculs de **fiabilité** ou d'optimisation d'une **politique de maintenance** qui caractérise le mode de **vieillessement** du composant.

En phase de spécification, il est nécessaire de recenser toutes les exigences liées à la fiabilité du système :

Exigences qualitatives :

- Listes d'événements redoutés, classification des défaillances ;
- Définition des modes dégradés et des conditions de passage entre modes, comportement dans chacun des modes ;
- Type de fautes à considérer et stratégie de tolérances aux fautes ;
- Méthodes à employer et normes à respecter ;

Exigences quantitatives :

- Probabilité de bon fonctionnement ;
- Durée de fonctionnement ;
- MTTF (ou MTBF);
- Taux de défaillance ;
- Taux de réparation.



Bases de calcul de la fiabilité

Pose du problème:

1-La dégradation peut résulter: d'une **fatigue**, d'une **usure progressive** d'une **pièce mécanique**, de l'**érosion graduelle** d'un matériau,

2- Charges: (a) **le système est soumis à un stress** qui peut être externe (température, humidité, ..).

(b) **conséquence directe de son mode de fonctionnement** (vibrations internes, température interne, ..).

3- Hyp: le niveau de dégradation du système est mesurable.

La probabilité qu'un composant tombe en panne entre le temps t et $t+dt$ est égale à $f(t)dt$ où $f(t)$ est la densité de probabilité de défaillance à l'instant t .

la probabilité de défaillance avant le temps t :

$$F(t) = \int f(\tau) d\tau$$

Cette fonction est le complément de la probabilité de survie (Fiabilité) $R(t)$

$$R(t) = 1 - F(t)$$

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$



Bases de calcul de la fiabilité

Pose du problème:

- 1- Sachant qu'une pièce mécanique ayant servi pendant une durée t et encore fonctionnelle en temps t .
- 2- Quelle serait la probabilité qu'elle tombe en panne entre le temps t qu'elle a déjà servi et le temps $t+dt$?

la probabilité de défaillance conditionnelle:

$$\lambda(t)dt = \frac{f(t)dt}{[1 - F(t)]} = \frac{f(t)dt}{R(t)}$$

$\lambda(t)$: Taux de défaillances conditionnel au temps t

$\lambda(t)dt$: Probabilité de défaillance à l'instant t durant l'intervalle de temps $t+dt$ **sachant que** le système est fonctionnel jusqu'à l'instant t , d'où :



d'où :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{R(t)dt} \quad R(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right] \quad f(t) = \lambda(t)\exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau)d\tau\right]$$

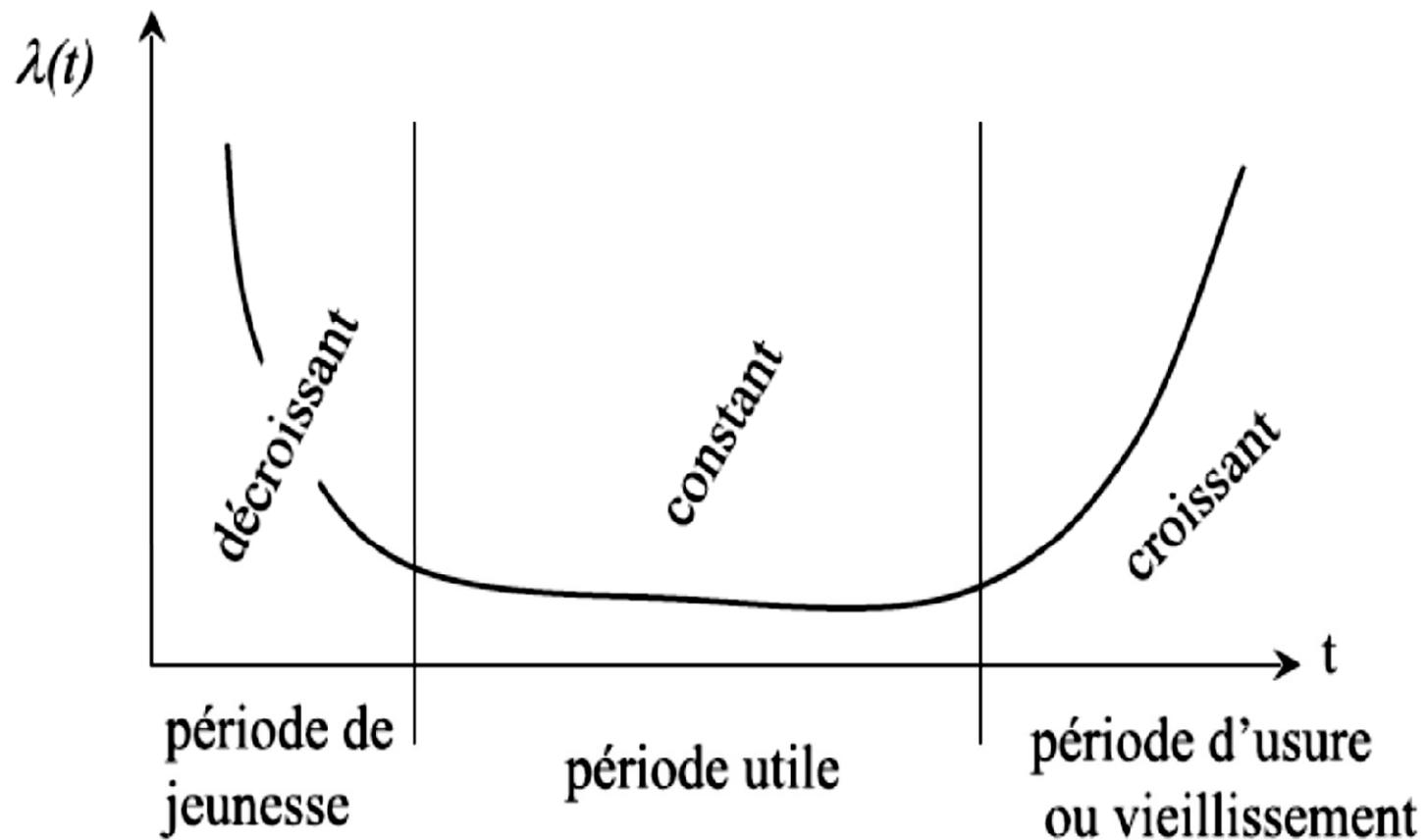
Le Moyen des temps de bon fonctionnement (MTBF) ou la durée de vie moyenne :

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad MTBF = \int_0^{\infty} t.f(t)dt$$

C'est l'espérance mathématique de la durée de vie.

Toutes les grandeurs caractéristiques de la loi de probabilité de X s'expriment a l'aide de la fonction de $\lambda(t)$. Le taux de défaillance caractérise donc la loi d'une durée de vie. C'est pourquoi, en pratique, construire un modèle de fiabilité de systèmes non réparables revient à se donner une forme particulière pour le taux de défaillance.

Le choix de cette forme est basé sur des considérations de modélisation ou des constatations expérimentales. De nombreuses études pratiques ont montré que le graphe du taux de défaillance d'un système non réparable simple a très souvent une forme de baignoire, comme dans la figure suivante.



Défauts de fab.,
Conception
(mauvais dim)

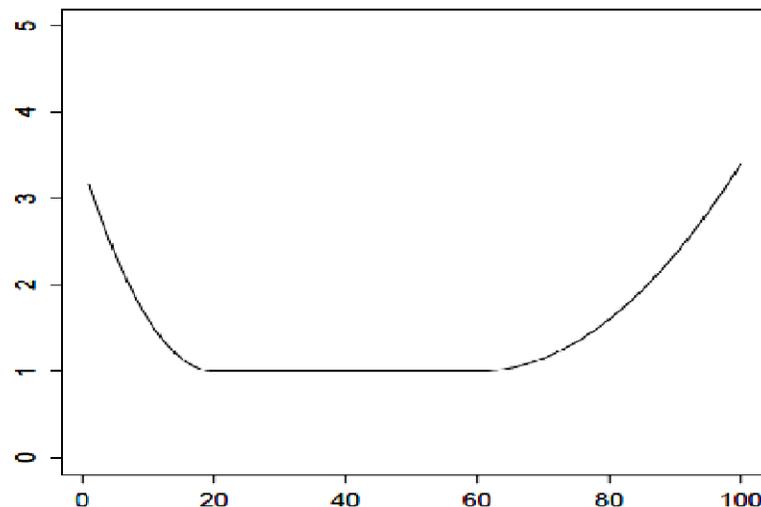


En effet, $\lambda(t)$ se décompose dans ce cas en 3 parties :

La période de jeunesse : Quand un système est neuf, on observe souvent des défaillances précoces, dues à des défauts intrinsèques ou des fautes de conception. Le risque de défaillance est donc assez fort au tout début de la vie du système. Ensuite il diminue car, s'il y a des défauts initiaux, ils vont se manifester tôt. C'est le rodage pour les matériels mécaniques et le déverminage pour les matériels électroniques ;

La vie utile : Pendant cette période, le taux de défaillance est constant et les défaillances sont purement accidentelles ;

Le vieillissement : $\lambda(t)$ se remet à croître car le risque de défaillance va finir par augmenter à cause de l'usure du système.



DISTRIBUTIONS PROBABILISTES LIES AU CALCUL DE FIABILITE

La loi exponentielle

Une variable aléatoire réelle positive X suit une *loi exponentielle*, de paramètre λ positif, si sa densité de probabilité est donnée par :

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$$

Cette distribution est utilisée couramment pour l'étude de la fiabilité de systèmes pour lesquels il est considéré un taux de défaillances constant avec le temps et qui ne subissent pas l'effet de vieillissement c'est-à-dire aux matériels fonctionnant pratiquement sans usure :

$$\lambda(t) = \lambda$$

La loi Normale (Laplace-Gauss) de paramètre σ et μ

$$f_{\mu,\sigma}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$$

Cette distribution est symétrique autour d'une valeur moyenne μ ; elle permet d'approximer la répartition des temps de fonctionnement d'équipements autour de la MTBF.

Fiabilité: Caractère probabiliste (connaissance du taux de panne de chaque composant).

Ces taux de panne étant obtenus sur des échantillons forcément limités en taille, leur valeur est gouvernée par les lois de la statistique (intervalles de confiance notamment).

La théorie mathématique de la fiabilité: application particulière de la théorie des probabilités aux problèmes de **durée de fonctionnement** sans incidents.



Les mesures associées à la fiabilité du matériel, du point de vue de la fiabilité, sont données par un certain nombre d'indicateurs ou mesures de la performance.

1. Fonction de répartition, Densité de probabilité:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

Densité de probabilité de défaillance

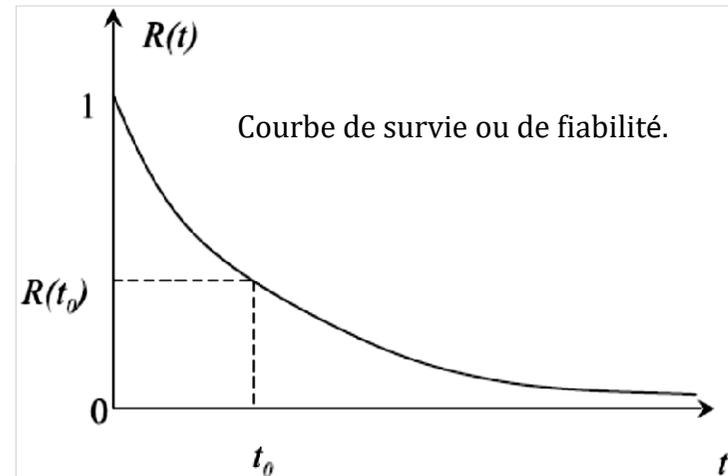
$$F(t) = \int_0^t f(u) du$$

Probabilité de défaillance

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(u) du = \int_t^{\infty} f(u) du$$

Complément de la probabilité de suivi

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(u) du \right]$$



Taux de défaillance instantané

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

MTTF : Durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance (anglais Mean Time To Failure)

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

MTTR : Durée moyenne de réparation (anglais Mean Time To Repair)

$$MTTR = \int_0^{\infty} [1 - M(t)] dt$$

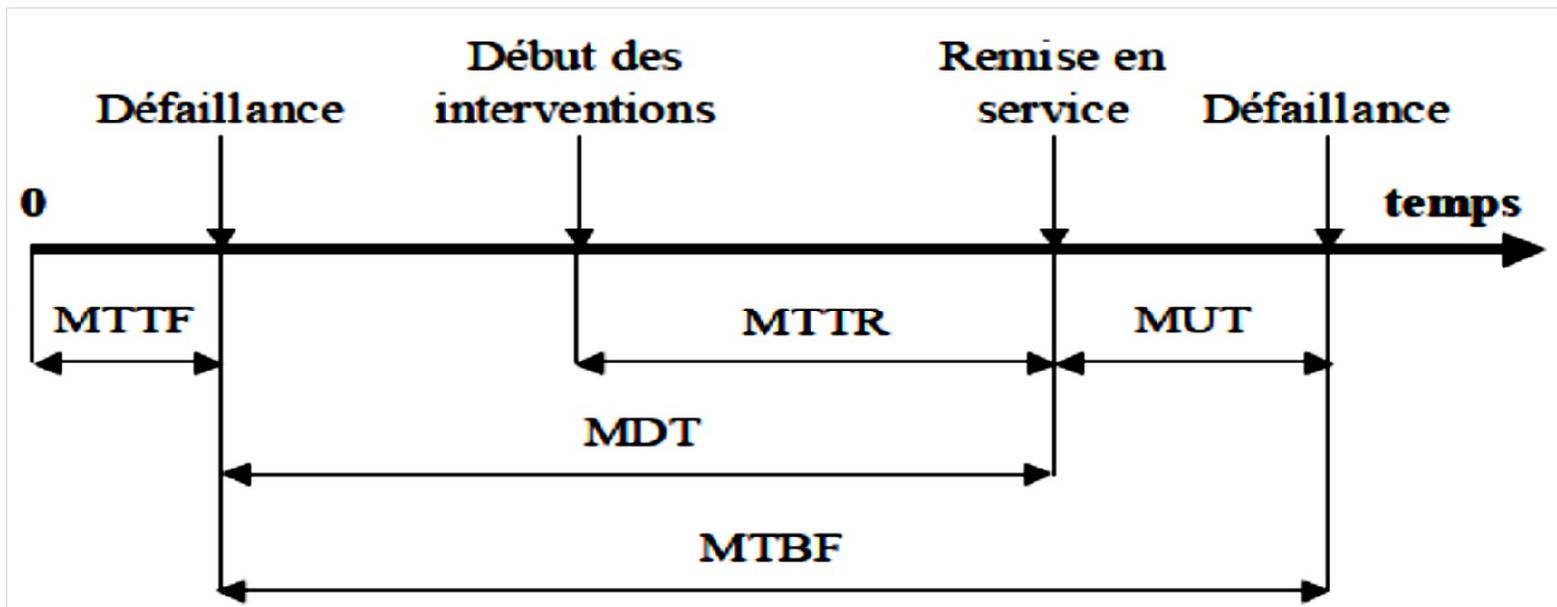
MUT : Durée moyenne de fonctionnement après réparation (anglais Mean Up Time)

MDT : Durée moyenne d'indisponibilité après défaillance (anglais Mean Down Time)

MTBF : Durée moyenne entre deux défaillances (anglais Mean Time Between Failure)

$$MTBF = MDT + MUT$$





L'APPROCHE DETERMINISTE



Les analyses déterministes: Prédire la réponse aux différentes sollicitations.

Des critères d'acceptation sont imposés.

Tenir compte des aspects thermomécaniques et structurels.

Analyses: Outils de calcul (analytique- numérique- empirique- hybride).

Calculs: états de fonctionnement prédéterminés.

Résultats: dépendances spatiales et temporelles de diverses variables physiques (pression, température, vitesse, contraintes dans les matériaux de structure, compositions physiques et chimiques).



Les analyses déterministes: caractérisées par leurs hypothèses conservatives et par une analyse limitative. Ceci est réalisé par un processus itératif, **lorsque le ou les cas limites en termes de marge minimale (minimum margin) par rapport aux critères d'acceptation sont déterminés.**

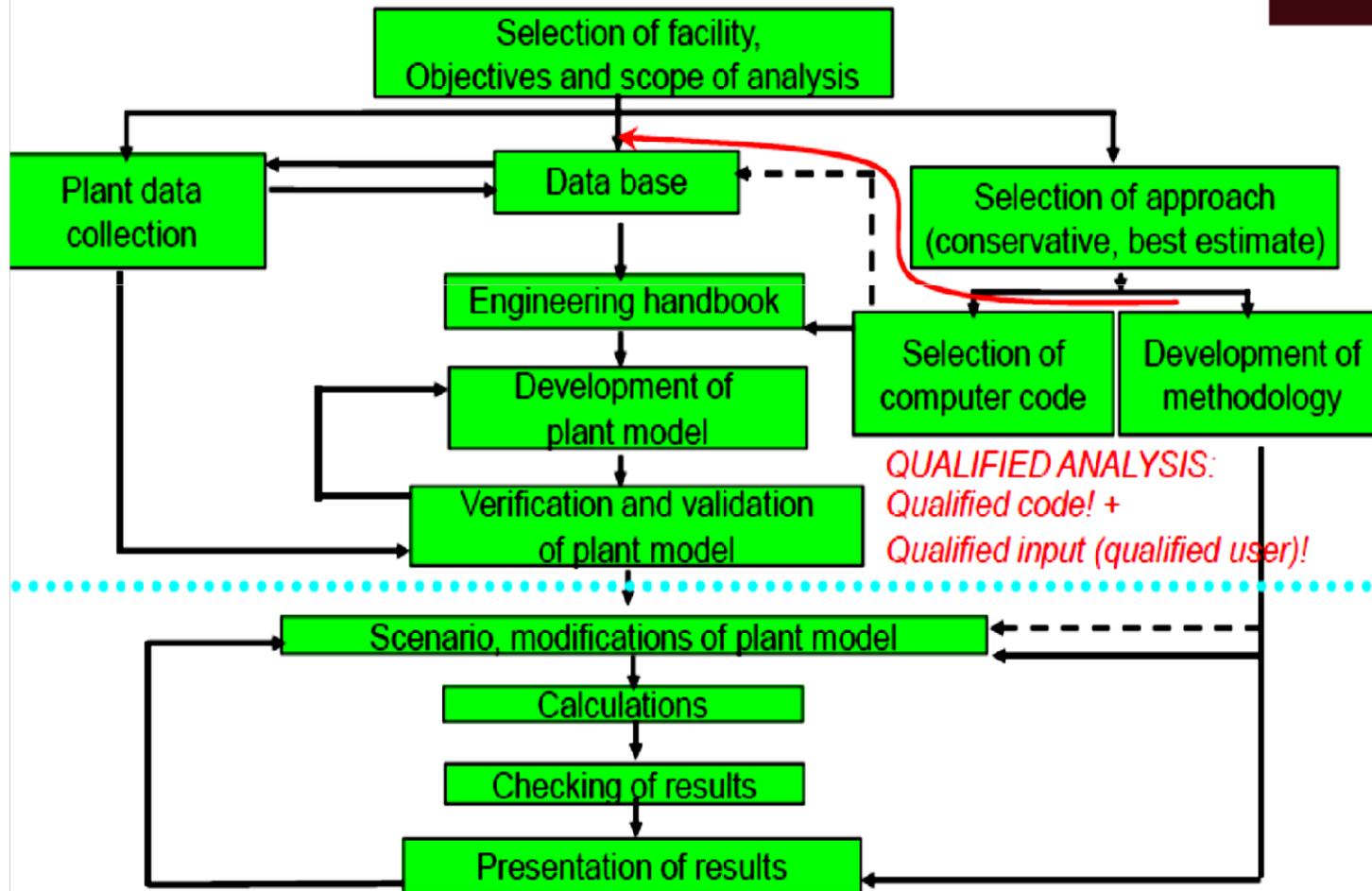
Le concept de l'**HYP conservative**:

- Permet** prendre en compte les incertitudes dues à la capacité limitée de modélisation.
- Permet de prendre en compte 'la connaissance limitée des phénomènes physiques'
- Permet de prendre en compte les simplifications faites dans l'établissement des modèles et dans l'analyse.

Une approche conservative: signifie généralement que tout paramètre devant être spécifié pour l'analyse doit se voir attribuer une valeur qui aura un effet défavorable sur les critères d'acceptation spécifiques.

Analyse Conservative: les paramètres de sécurité calculés se situent dans les critères d'acceptation et garantit le non dépassement des critères d'acceptation.

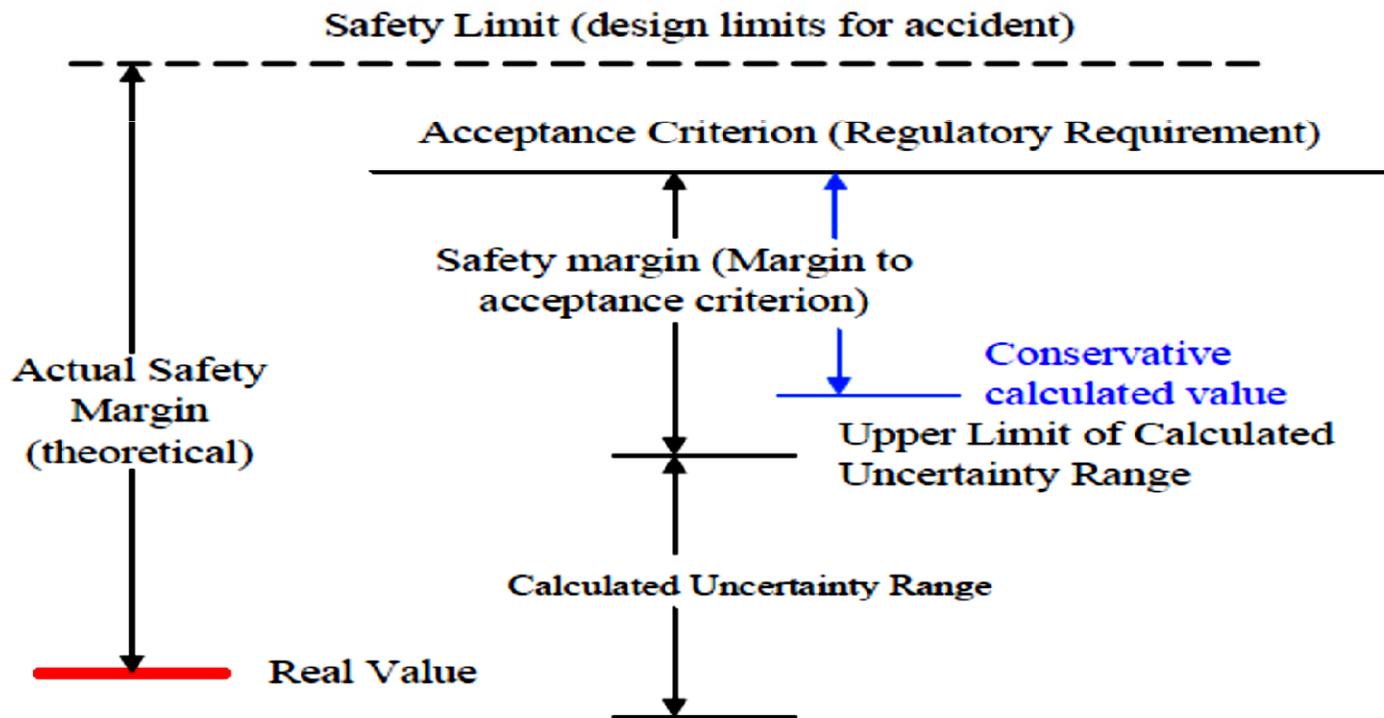
Basic steps in Deterministic Safety Analysis



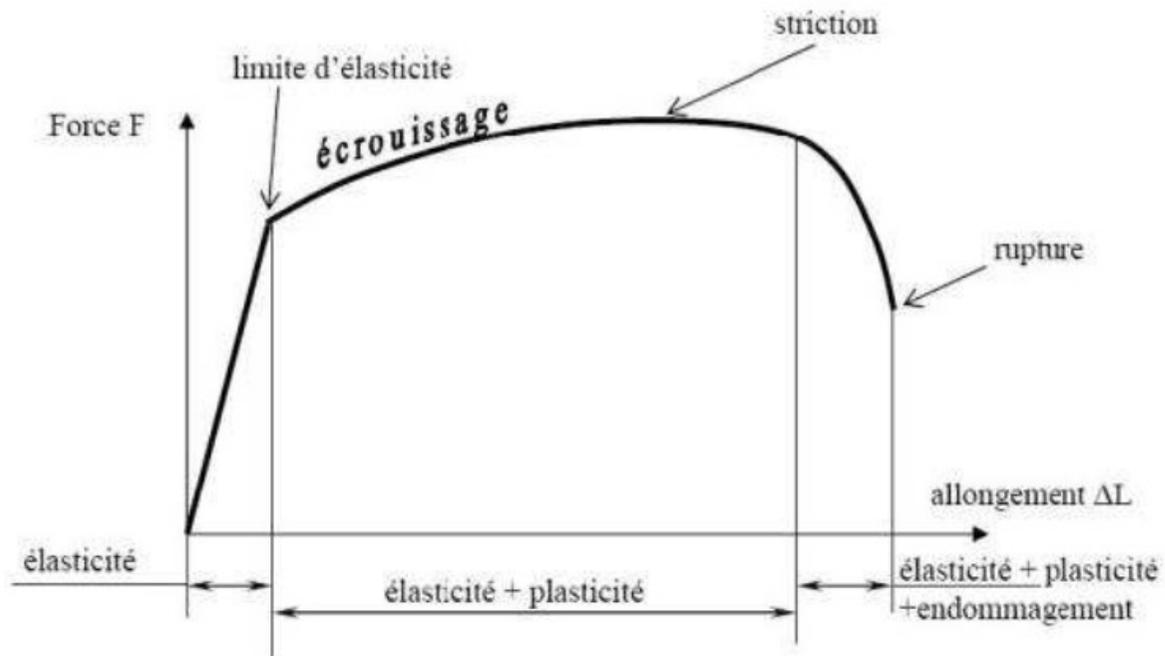
Les inconvénients d'une méthodologie conservatrice:

- les marges de sécurité sont exagérés à tel point que les paramètres du système sont sous-estimés par rapport à la réalité de fonctionnement.
- le système pourrait en réalité être utilisé pour obtenir une plus grande souplesse opérationnelle.

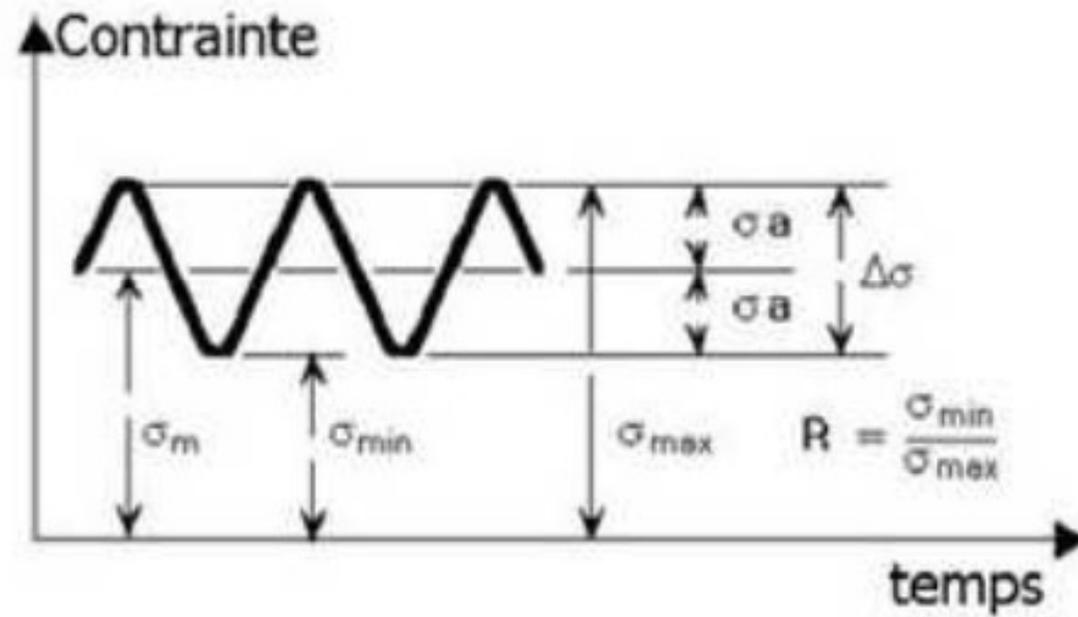
Illustration of safety margins



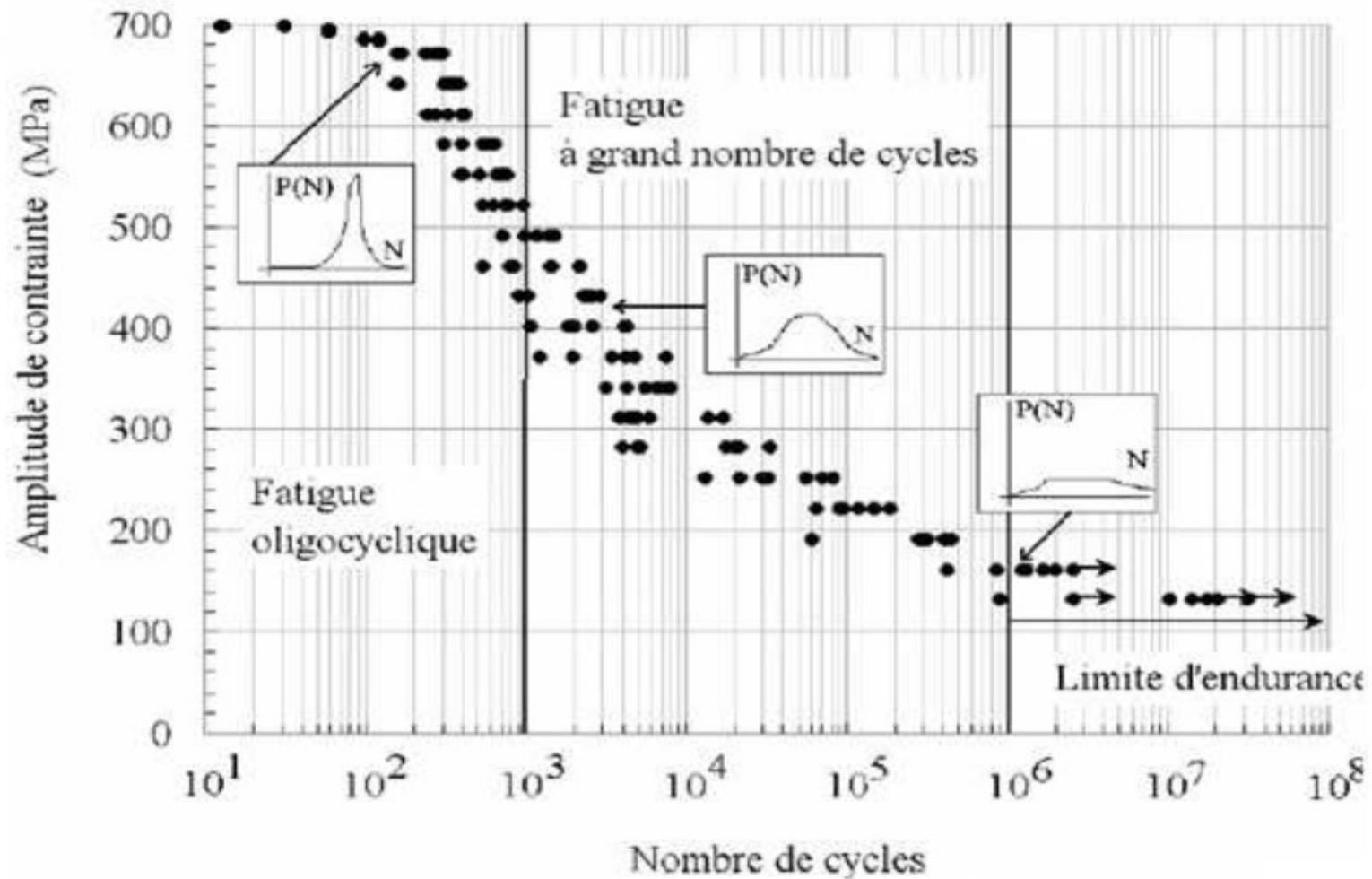
OUTILS EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES



OUTILS EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES



OUTILS EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES



Courbe de Wöhler



OUTILS EXPÉRIMENTAUX ET NUMÉRIQUES

- Les lois de propagation de fissures
- Mécanique de la rupture: K_{Ic}
- Méthode des Eléments Finis
- XFEM
- Méthode de Discontinuité de Déplacement
- Méthode aux Frontières Limites (BEM)
- Méthode des Volumes Finis



**APPROCHE DU
MEILLEUR ESTIME
'B E A'**



Approche hybride mécano-probabiliste: Permet de remédier au problème de sous estimation de la durée de vie utile.

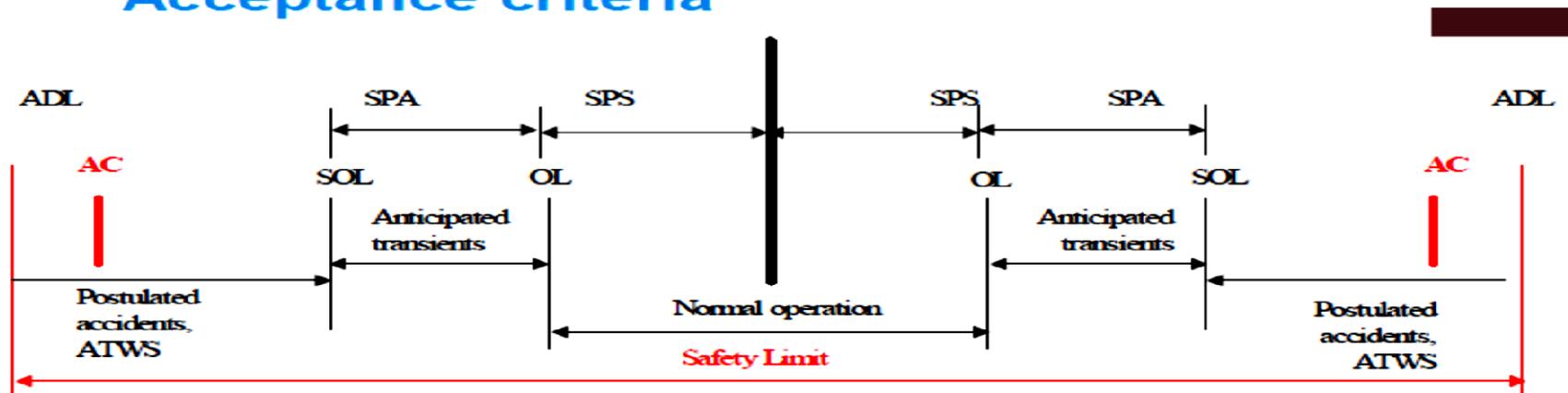
-basée sur la meilleure estimation associée à une évaluation des incertitudes.

-Fournit des informations plus réalistes sur le comportement physique du système.

-Identifie les problèmes de sécurité les plus pertinents.

-Fournit des informations sur les marges existantes entre les résultats des calculs et les critères d'acceptation.

Acceptance criteria



Design limits scale:

AC – Acceptance Criteria, ADL – Design limits for accident, SOL – Safety operational limits, OL – Operational limits, SPA – Set points area, SPS – Set points for preventive signaling

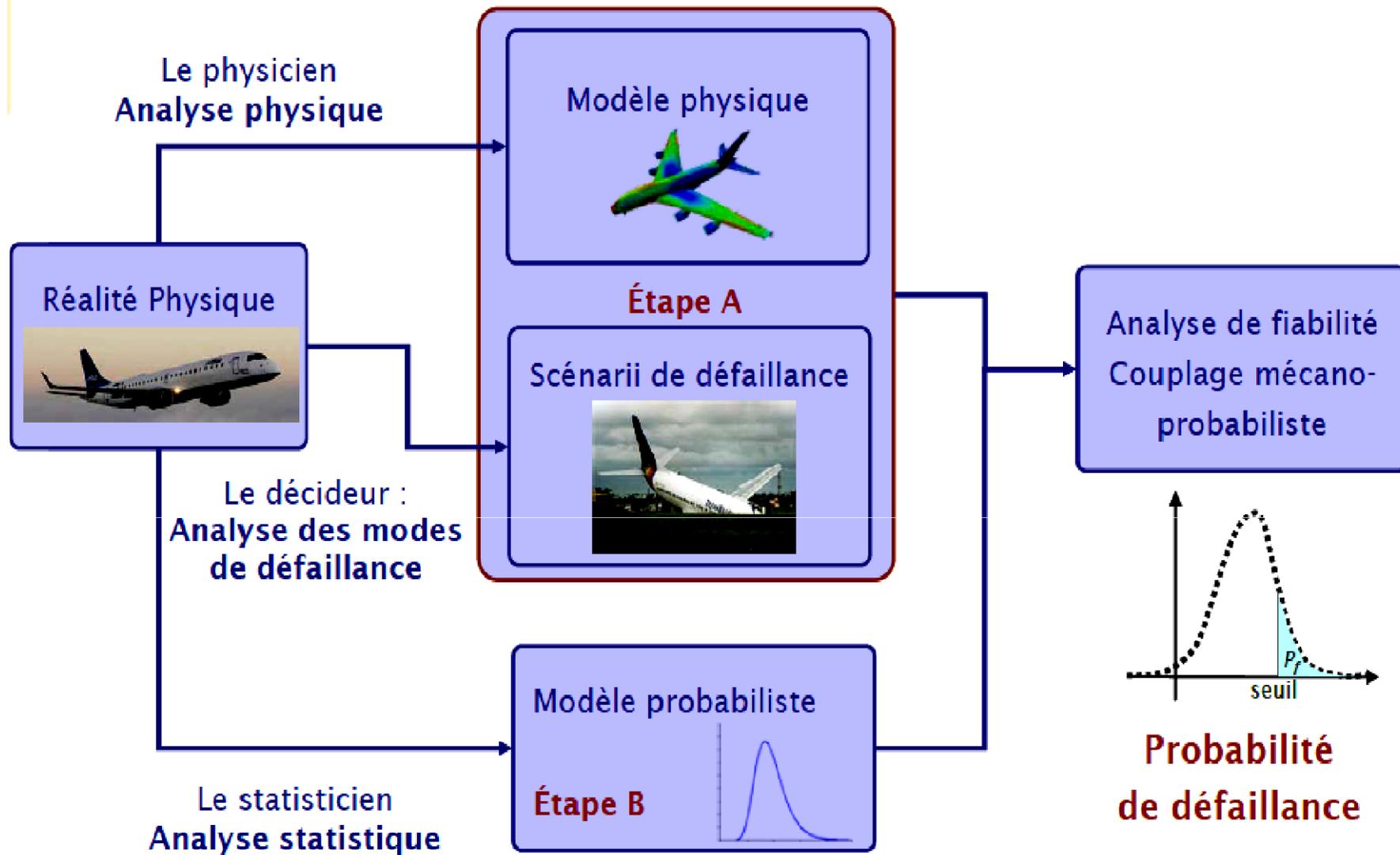


Illustration de l'approche hybride (Best Estimate)

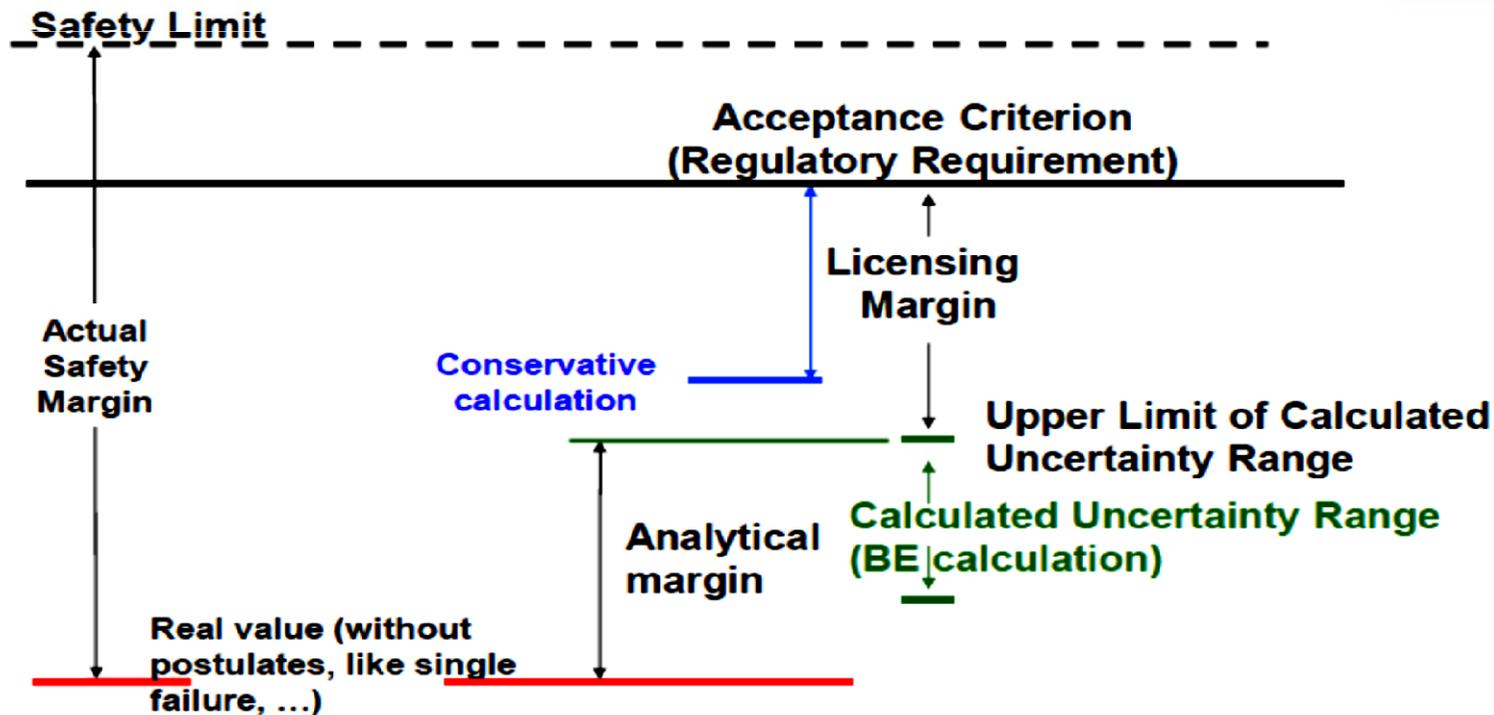


Approche hybride mécano-probabiliste :

-Nécessite suffisamment de données pour pouvoir garantir que tous les phénomènes importants ont été pris en compte dans la modélisation ou que leurs effets sont limités.

-L'aide à l'expérimentation: Quantifier les incertitudes dans les résultats dues à des approximations inévitables dans la modélisation. doivent donc être **quantifiées** à l'aide de résultats expérimentaux.

Best Estimate analysis. Margin illustration



IN BETWEEN



RECALAGE DES MODÈLES

- Déterministe:

$$[K] [\delta] = [Q] \dots\dots\dots\text{statique}$$

$$[M] [\delta] + [C] [\delta] + [K] [\delta] = [Q (t)] \dots\dots\dots\text{dynamique}$$

En introduisant les aspects :

- Défauts structurels
- Dégradation: usure, vieillissement

--> Corrections

$$[K] + [\Delta K] \rightarrow \text{caler sur le réel}$$



FISSURATION

- Matériau Isotrope
- Matériau Orthotrope (Matériau Composite Fibreux)
 - Apparition de fissures interfaciales
 - - Rupture de fibre



Conséquences et effets



DÉFAUTS NAISSANTS

-  Défaut dans un composant mécanique :
 - - Statique ?
 - - Dynamique
-  Stratégie de maintenance
 - - Systématique, préventive, conditionnelle
 - ? Q avec l'admission du défaut, quelle est la stratégie à suivre



CORPS HUMAIN

- Cas d'une maladie
- - Approche systématique (déterministe)
- - Protocoles imposés
- Q? N'existe-t-il pas d'autres?
- - Médecine douce
- Q? N'existe-t-il pas des approches hybrides?



**BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA
FIABILITÉ)**



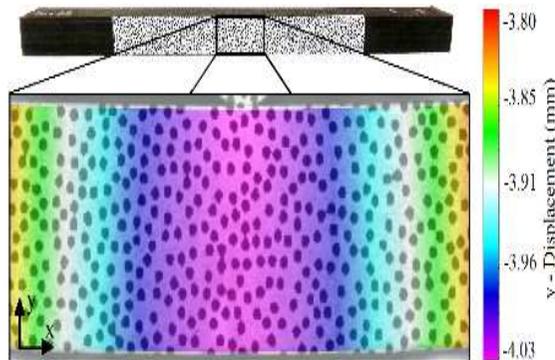
L'utilisation des MC dans des pièces nobles en aéronautique:

Clé d'un avion 100% Composite.

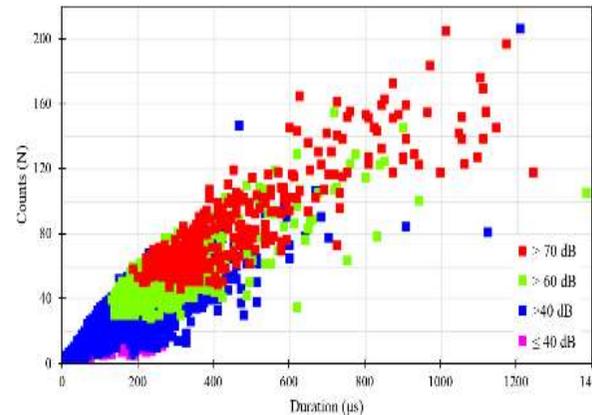
Nécessité s'impose quant à la compréhension des mécanismes de rupture des MC épais.

Trois (03) techniques de détection et de suivi des dommages:
Emission acoustique,
Thermographie infrarouge et la Corrélation d'image.

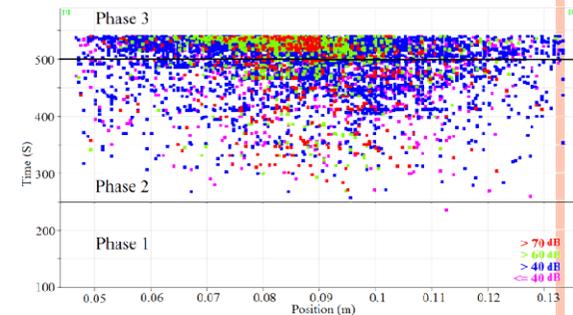
Emission acoustique



Field of displacement at 50 % of stress to failure.



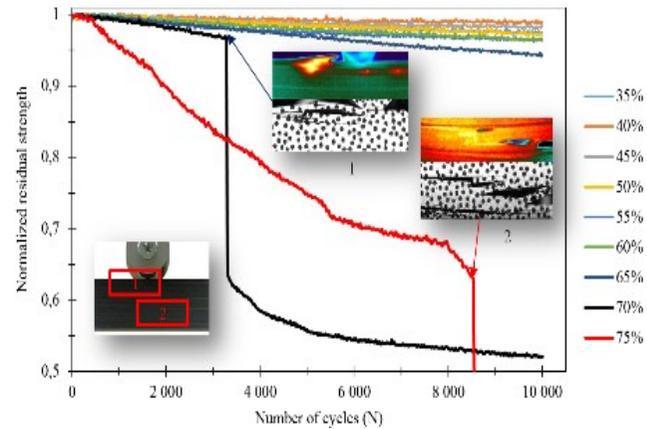
Correlation between the amplitude, number of counts and the duration of the AE events.



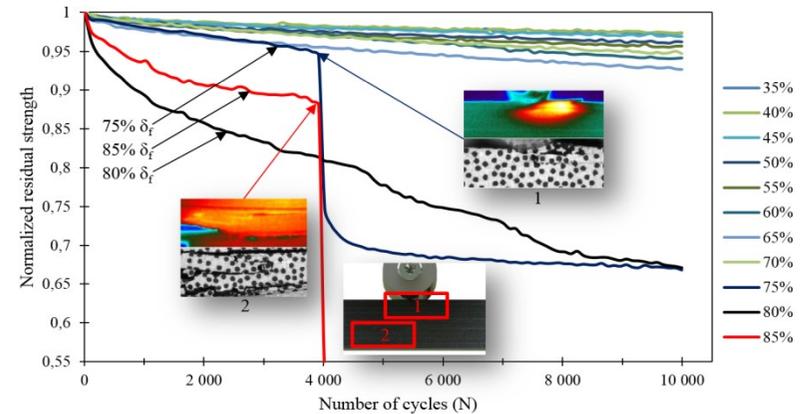
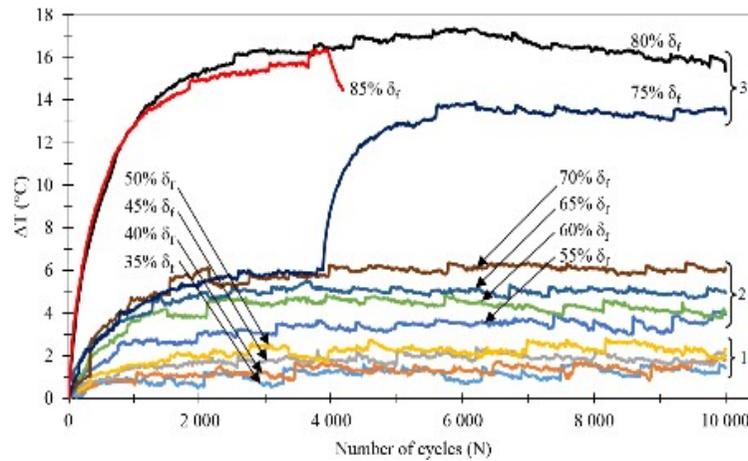
Distribution des événements d'E.A. en fonction du temps, amplitude et position

Thermographie infrarouge

Test de fatigue en flexion



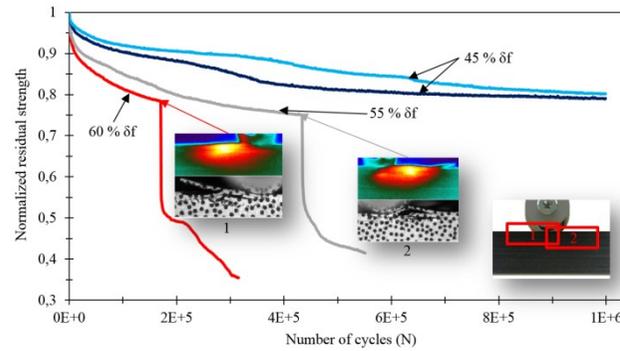
Normalized residual strength degradation.



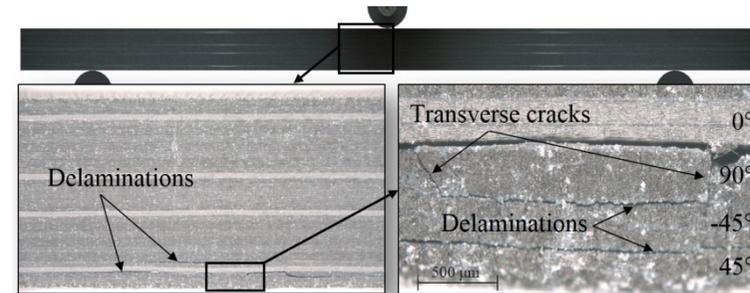
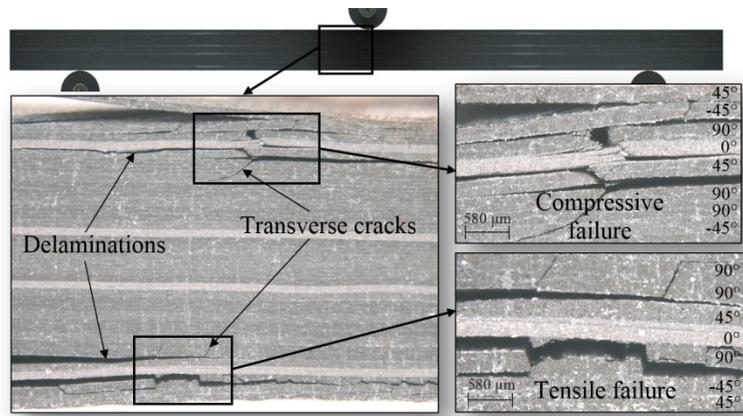
Relationship between residual strength degradation and temperature variation:

- (a) Temperature variation versus number of cycles for indicated maximum displacement magnitudes,
- (b) Normalized residual strength degradation.

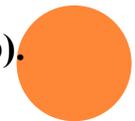
Corrélation d'image



Normalized residual strength versus number of cycles.



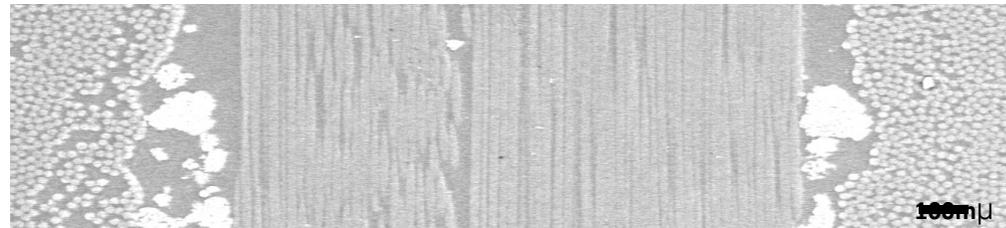
Optical micrographs of a fatigued specimens: (a) 44x10⁴ cycles at 55% δf , (b) 10⁶ cycles at 45% δf (b).



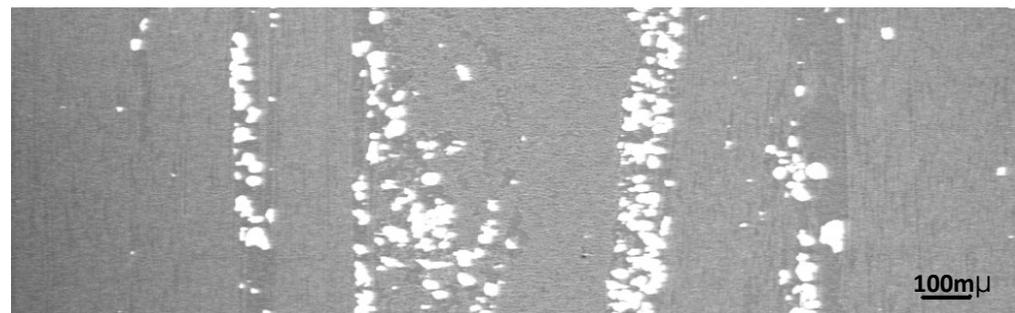
Analyse microscopique

Renfort par des microparticules ferreux aux interfaces du composite stratifié.

Micrographie pour composite $0^{\circ}_5 90^{\circ}_2 0^{\circ}_5$ graphite/époxy avec ajout de poudre en aluminés aux interfaces



Micrographie pour composite $0^{\circ}_5 90^{\circ}_2 0^{\circ}_5$ graphite/époxy avec ajout de poudre en acier inoxydable aux interfaces



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

SUJETS OUVERTS:

- DOIT-ON LAISSER L'AVION VOLER AVEC AUTANT DE FISSURES?
- QUELLE EST LA DÉGRADATION DES PROPRIÉTÉS DYNAMIQUES DE LA STRUCTURE DE L'AVION EN PRÉSENCE DES FISSURES?
- ESTIMATION FIABILISTE DU NOMBRE D'HEURES DE VOL SUPPLÉMENTAIRES AVANT RÉPARATION



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

LES ÉTUDES DE FIABILITÉ DES MATÉRIAUX RENCONTRENT DEUX DIFFICULTÉS MAJEURES :

- LA COMPLEXITÉ DU PROCESSUS PHYSIQUE LORS DE LA FISSURATION ET DE LA PROPAGATION DE LA FISSURE JUSQU'À LA RUPTURE DE LA PIÈCE,
- LE NOMBRE IMPORTANT DE PARAMÈTRES QUI INFLUE SUR LA DURÉE DE VIE TOTALE.



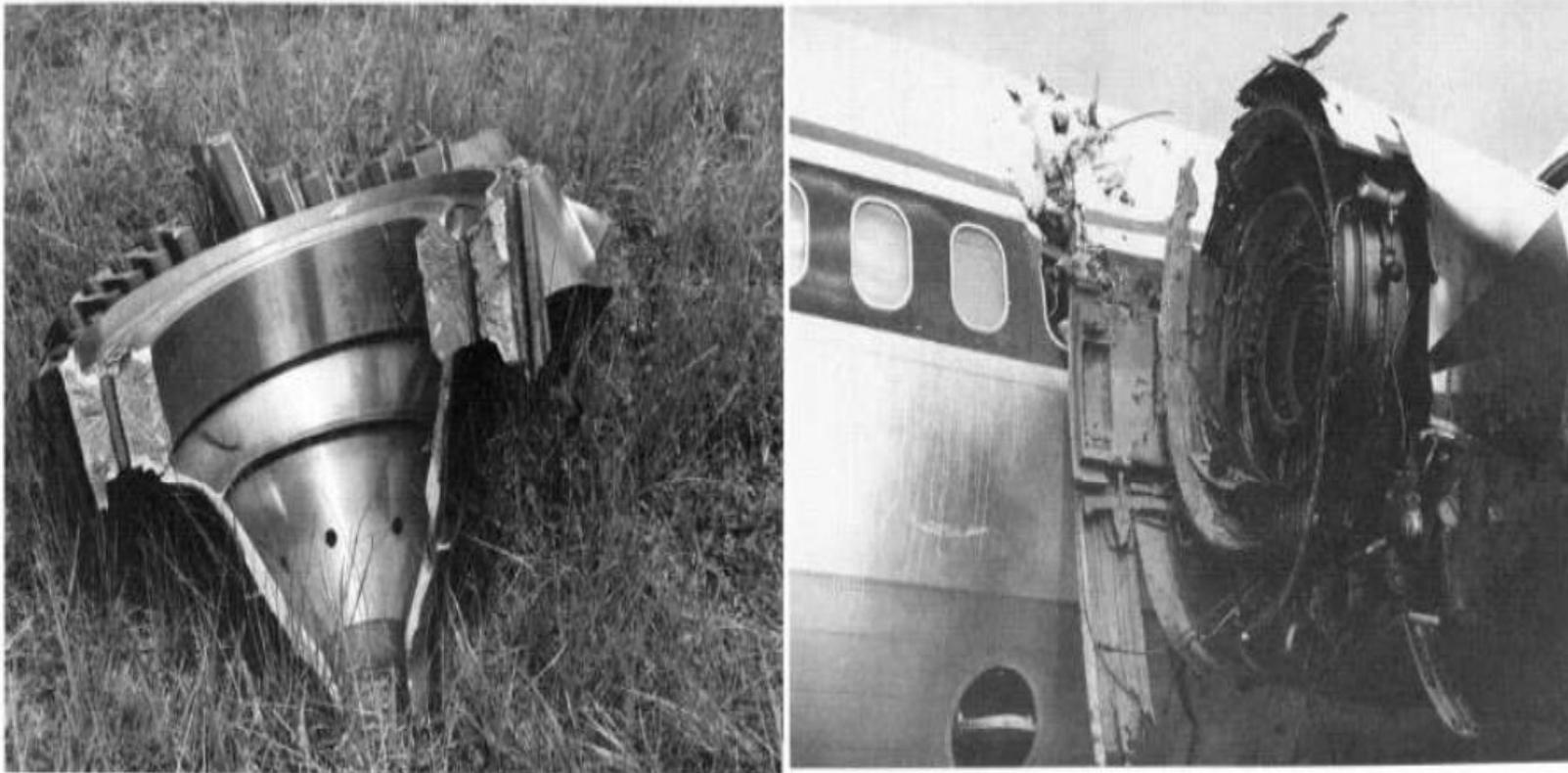
BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

Le vol 243 d'Aloha Airlines était programmé sur un Boeing 737-200 entre Hilo et Honolulu à Hawaï aux États-Unis. Le 28 avril 1988, l'avion subit une décompression explosive en vol mais fut capable d'atterrir à l'aéroport de Kahului sur Maui. Une hôtesse de l'air fut emportée par la décompression et est portée disparue, supposée morte. Le rapport conclut que l'accident avait été causé par de la fatigue exacerbée par des criques de corrosion¹ (l'avion opérait uniquement au-dessus de la mer). La cause principale du problème fut un défaut sur un adhésif époxy assurant la liaison entre les plaques d'aluminium du fuselage quand le Boeing 737 fut construit. Là où les deux surfaces n'étaient pas correctement reliées, l'eau put rentrer dans le sillon et commença un lent processus de corrosion.

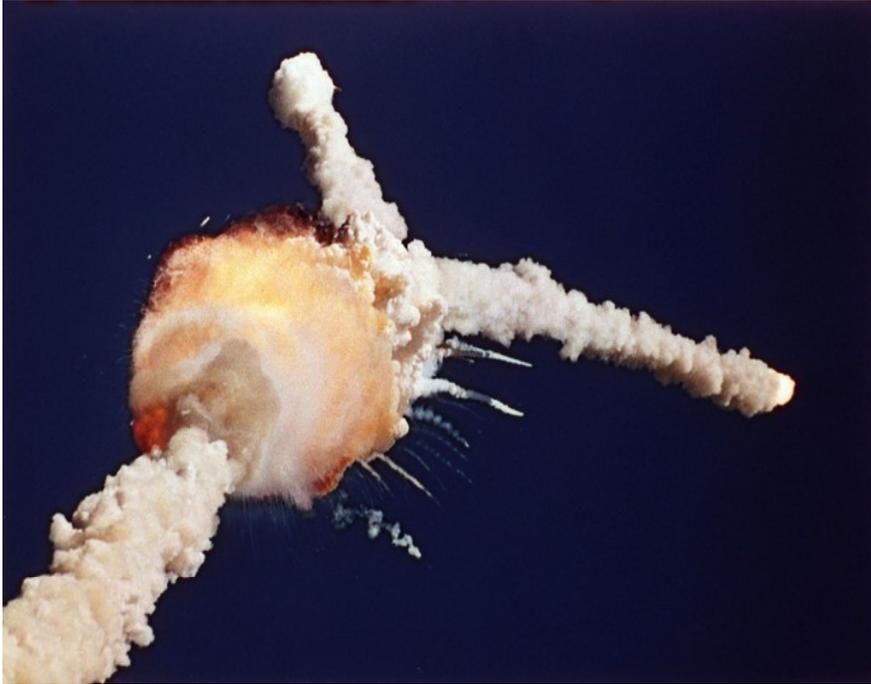
BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)



Accident Pensacola, Floride, USA, 06 juillet 1996. Eclatement d'un disque de MD88 Delta Air Lines, Moteur P&W JT8D.



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)



Pour l'équipage et pour le contrôle au sol, tout paraît encore nominal

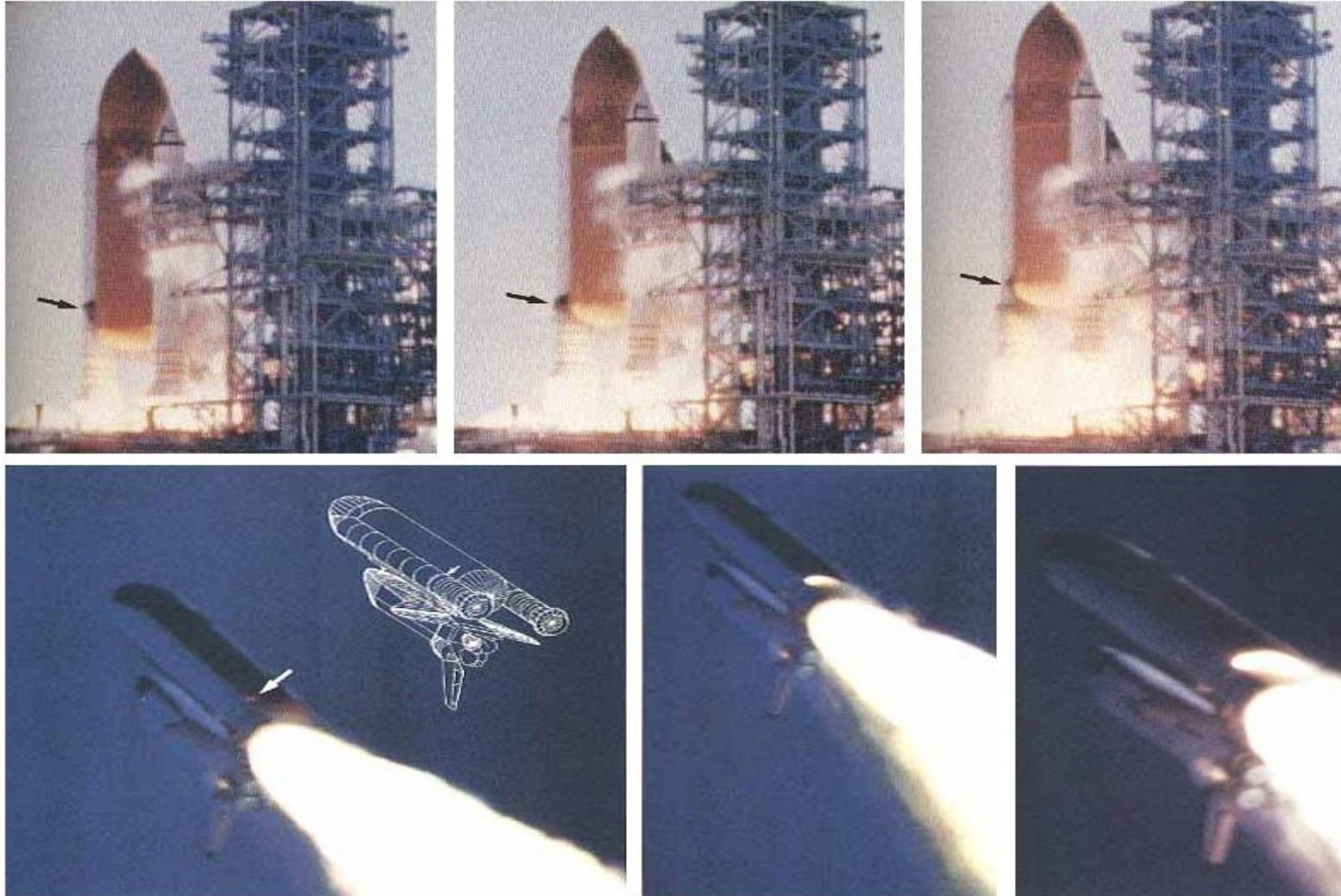
BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

La navette spatiale américaine *Challenger* explose à l'issue d'un vol de soixante-quinze secondes, à 8 km d'altitude, le mardi 28 janvier 1986, à 11 h 38 locale. Les membres de l'équipage, composé de cinq hommes et de deux femmes, meurent sur le coup sous les yeux des familles venues assister au lancement.

Le véhicule emportait comme combustible 721 t d'oxygène et d'hydrogène liquides, hautement explosifs, plus les 1 000 t de poudre des deux fusées d'appoint.



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

Les images d'une caméra de surveillance, exploitées après l'accident, montre l'apparition de fumée juste après le décollage puis de flammes à proximité du joint arrière moins d'une minute plus tard. 5 secondes après, de l'hydrogène liquide s'échappe du réservoir principal dont la structure a été endommagée.

L'accident de Challenger : en haut, les premières fumées provenant d'un des deux boosters visibles juste après le décollage. En bas, les premières flammes apparaissent à H+58,788 secondes puis endommagent le réservoir externe. Créditimage : NASA



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

Le cas Columbia : la tuile

En février 2003, la perte de la navette Columbia et de ses sept membres d'équipages se produit pendant la rentrée atmosphérique, au-dessus du Texas et de la Louisiane.

L'origine de l'accident se produit pourtant 82 secondes après le décollage, à environ 20000 mètres d'altitude et à une vitesse proche de Mach 2,5 : un morceau de mousse d'isolation thermique du réservoir principal cryotechnique (hydrogène et oxygène liquide) se détache...



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

Peu dense, le fragment de pousse ne pèse que 800 grammes et est rapidement freiné pour le frottement atmosphérique. Il percute pourtant le bord d'attaque de l'aile gauche de Columbia à une vitesse relative de 877 km/h : le choc violent endommage le système de protection thermique.

Au cours de la rentrée atmosphérique, la protection thermique endommagée ne résiste pas à l'échauffement : des gaz très chauds pénètrent à l'intérieur de l'aile. La structure interne en alliage d'aluminium est endommagée, entraînant sa destruction progressive puis la désintégration totale de Columbia.



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

Accidents d'avions : **5 causes principales d'accident d'avion**

1. Des erreurs de pilotage (53 %)

Selon le site PlanetCrashInfo, et quelles que soient les époques, ce chiffre n'a guère évolué (58 % en 1950).

« Les avions sont devenus des machines complexes »

Ces erreurs peuvent être liées au comportement du pilote (stress, fatigue, maladie, etc.) mais peuvent également découler de sa réaction inadaptée face à une situation inattendue, d'une erreur de jugement, du non-respect des procédures, etc.



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

2. Les problèmes techniques (20 %)

Malgré tous les progrès techniques réalisés, ils représentent encore environ 20 % des crashes (là aussi, le pourcentage n'a pas vraiment évolué en cinquante ans).

3. La météo (12 %)

Les mauvaises conditions météorologiques sont responsables de 12 % des catastrophes aériennes. Grâce au radar et à la navigation par satellite, les avions peuvent décoller ou atterrir en plein brouillard alors que la visibilité est complètement nulle. Et la plupart du temps, les accidents liés à la météo ne se soldent pas par une catastrophe de grande ampleur.



BEYOND RELIABILITY (AU-DELÀ DE LA FIABILITÉ)

4. Le sabotage (8 %)

En termes de sabotage et détournement d'avion, la tragédie du 11 septembre 2001 est dans tous les esprits.

5. D'autres erreurs humaines (6 %)



ET LA RECHERCHE CONTINUE.....

وَقُلْ رَبِّي زِدْنِي عِلْمًا

