

Application de la méthode Contrainte - Résistance en fatigue Le projet DEFFI

André Bignonnet, andre bignonnet consulting

Isabel Huther, Cetim

Sommaire

- **Les objectifs du projet DEFFI**
(DEmarche Fiabiliste en Fatigue pour l'Industrie)
- **Les méthodes et outils développées**
- **L'application à des cas industriels**

Les objectifs du projet DEFFI

Introduire la démarche fiabiliste de conception en fatigue pour améliorer la compétitivité des entreprises de la Mécanique

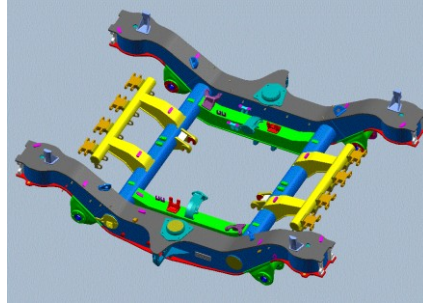
- Développer une **méthode** générale
- Créer les **outils** et les compétences nécessaires dans un contexte industriel

Permettant le pilotage des projets par la maîtrise et la quantification des risques

Objectifs du projet DEFFI Cas industriels

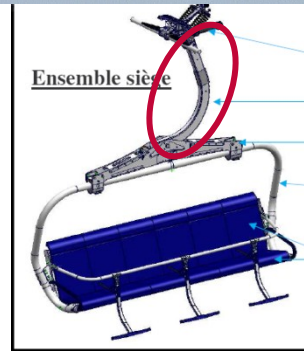
- **SNCF**

Chassis de
bogie TGV



- **POMAGALSKI**

Suspente de
télésiège



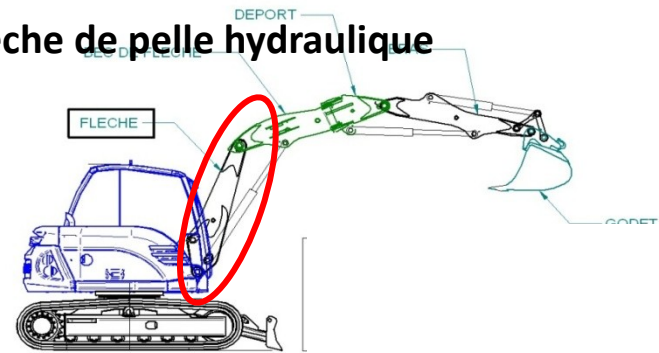
- **VOLVO**

Compact Equipment
Flèche
de tracto-pelle



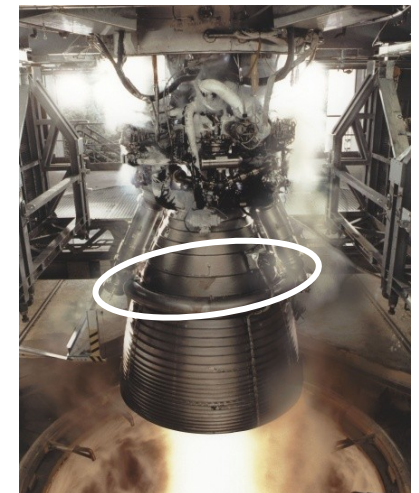
- **MECALAC**

- Flèche de pelle hydraulique



- **CNES – SNECMA**

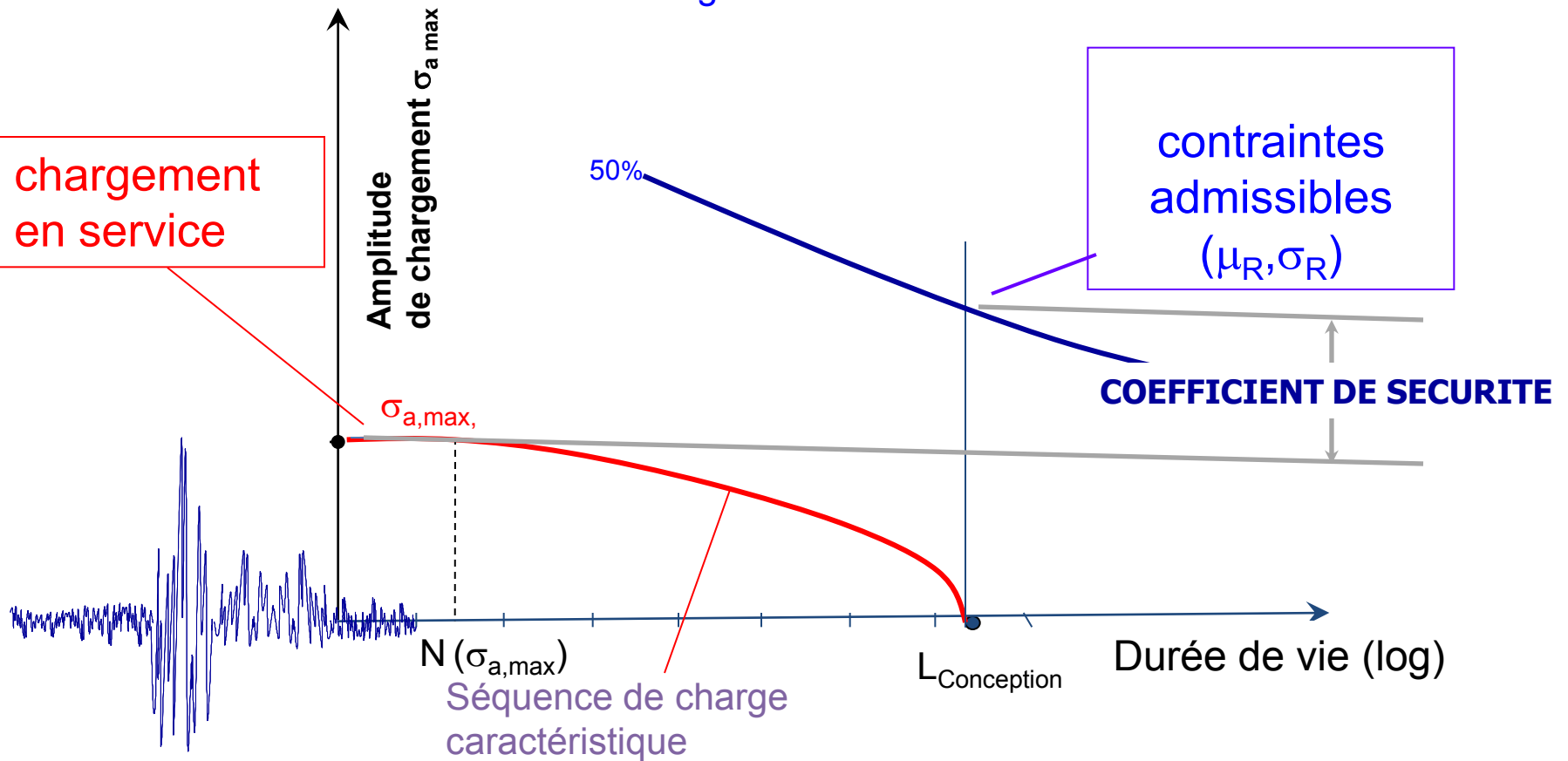
– Ailette de moteur
de lanceur



concept de fiabilité

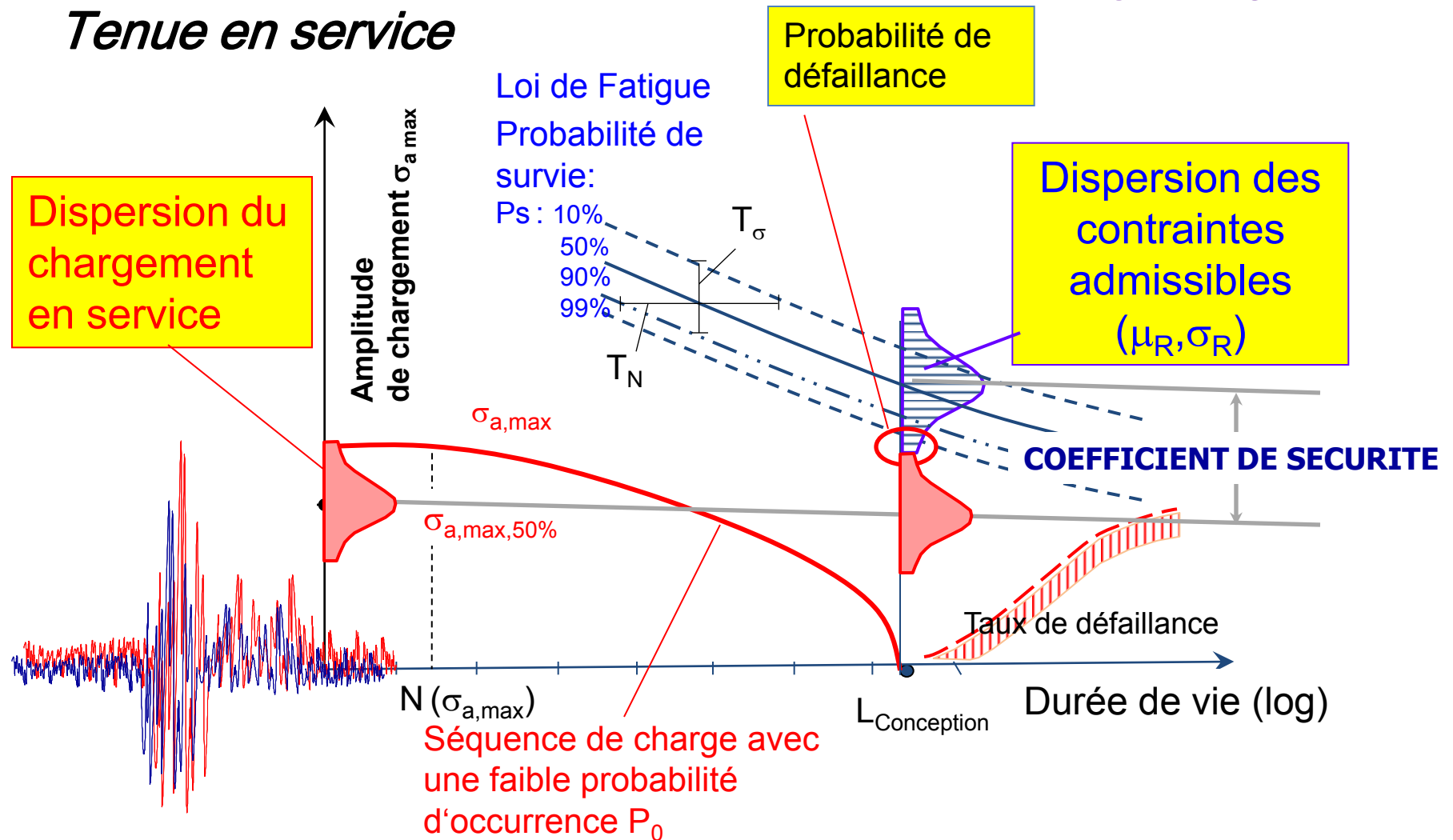
Tenue en service

Loi de Fatigue

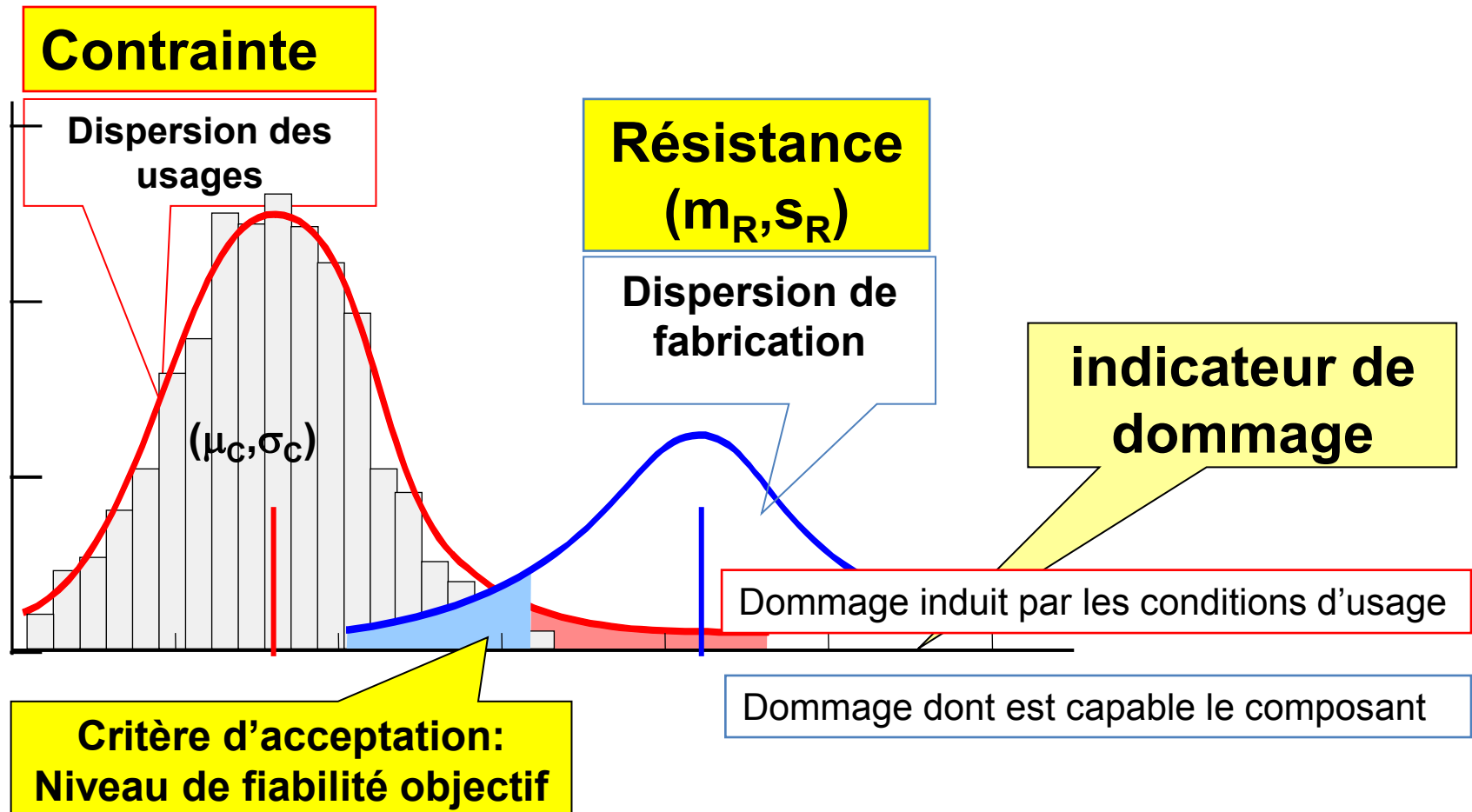


concept de fiabilité

Tenue en service

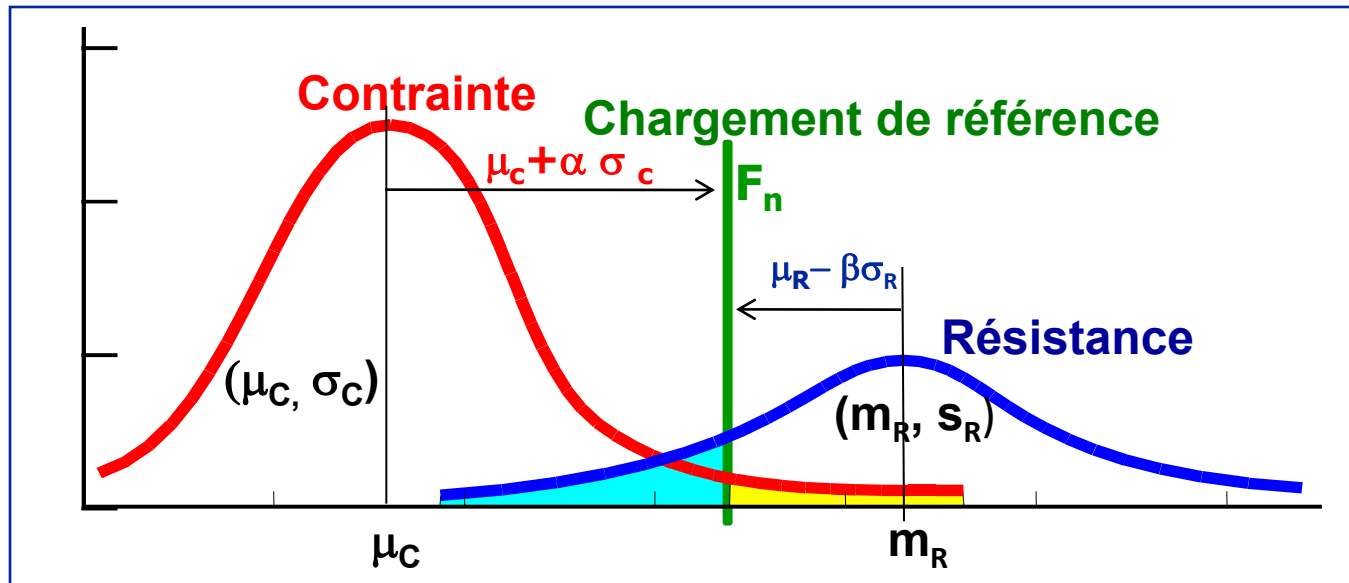


Principe de la méthode Contrainte-Résistance



Méthode contrainte – résistance

Établissement de spécification technique



- Introduire un chargement de référence : $F_n = \mu_c + \alpha \sigma_c$
- Définir le niveau de risque de défaillance accepté : P_f

Critère d'acceptation de la pièce : $\mu_R = F_n + \beta \sigma_R$
 $\beta = f(R, R_1, n, \gamma)$

Problématique de conception en fatigue

La conception du composant est-elle capable de satisfaire la fonctionnalité pendant la vie prévue ?

Données d'entrée à considérer :

- La variabilité du chargement de service ou CONTRAINTE
- La dispersion du comportement en fatigue ou RÉSISTANCE
- Le niveau requis de FIABILITÉ ($R=1-P_f$)

ce qui revient à définir une probabilité de défaillance P_f acceptable

Difficultés :

- Définir le chargement
- Qualifier la qualité de fabrication
- Définir un niveau de probabilité cible

Maître mot : Capitalisation

Chargement en service et charge de conception

Manipulation des chargements d'amplitude variable

Du chargement en service aux conditions de chargement calcul et essais

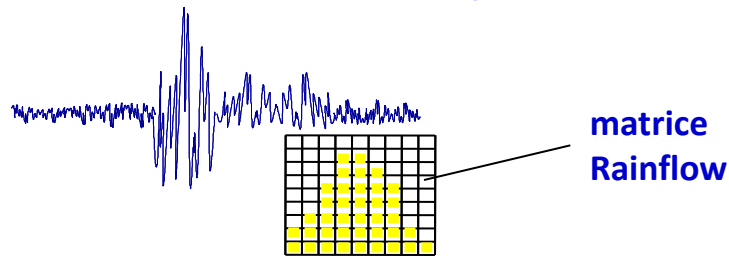
1- Vie de la structure (probable)	Amplitude Variable	En service
↓ Equivalent en dommage		
2- Banc d'essai, piste d'essai	Amplitude Variable	Validation
↓ Equivalent en dommage		
3- calcul et essai composant	Amplitude Constante	Conception

Deux questions se posent :

- quelle variabilité des conditions de service?
- Quel chargement en conception et validation?

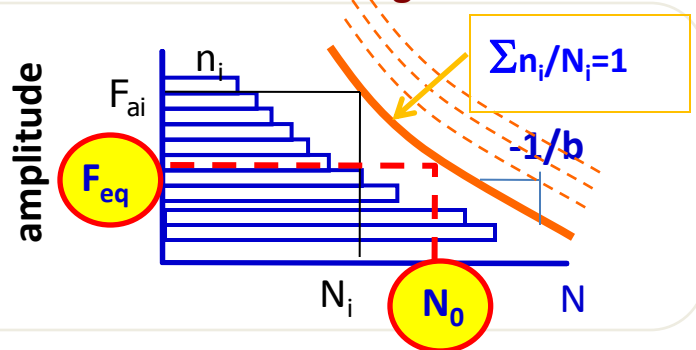
Chargement en service et charge de conception

Introduction de l'équivalent fatigue



Ajuster F_{eq} tel que la courbe de fatigue conduise à $\sum n_i/N_i=1$

Cumul du dommage



Entrée

Matrice Rainflow du chargement

b : exposant de Basquin

N_0 : nb de cycles auquel sera défini l'équivalent fatigue

Calcul par itération

Basquin : $N_i F_{ai}^b = Cte = N_0 F_0^b$

$$N_i = N_0 (F_{eq} / F_{ai})^b$$

Miner : $\sum n_i/N_i = 1$

$$F_{eq} = [(\sum n_i F_{ai}^b) / N_0]^{1/b}$$

Résultat

F_{eq} à N_0 cycles même dommage que le chargement réel

Un scalaire pour représenter la sévérité du chargement

Chargement en service et charge de conception

- Comment identifier la variabilité des chargements de service
à partir de **situations de vies élémentaires**
construire un grand nombre de vies possibles de la structure
Pour différentes conditions d'usage et aléas
- Définir la spécification technique par :
une séquence de charge
ou un **chargement de dommage équivalent**
avec une faible probabilité d'occurrence $P_0(1/100, 1/1000 \dots)$

Chargement en service et charge de conception

Exemples de situation de vie élémentaire

Descript°	automobile	Engin TP	ferroviaire	Remontée mécanique	Moteurs spatiaux
Rang1	Autoroute Ville Route Montagne	Fouille Fd de fouille Martelage ...	Vitesse 1 Vitesse i ... Gare & aiguillages	Pylône Support Pylône Compr° E/S gare	Bufetting: Mach<0.5 0.5<Mach<1.5 1.5<Mach<2.5
Rang 2	À vide ½ Charge Pl. charge	Terre rocher	Passagers Fret	À vide ½ Charge Pleine charge	incidence1 incidence2 incidence3
Rang 3				vitesse 1 vitesse 2	dérapiage1 dérapiage2 dérapiage3
Variabilité d'usage	Mesures ≠conducteurs	Mesures ≠opérateurs	Mesures ≠zones	Mesures ≠sites	Mesure/simu ≠vols

Matrices Rain Flow élémentaires

Chargement en service et charge de conception

Dispersion des chargements

(combinaison de situations de vie élémentaires)

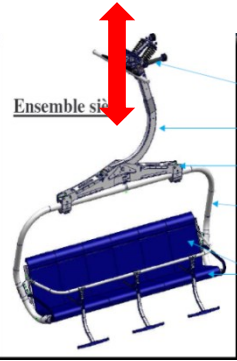
- **Distribution statistique des sévérités de chargement déterminée à partir de séries de mesures :**
situations élémentaires rencontrées en service.
- **Information organisée**
génération de conditions possibles de service.

Exemple : suspenste de télésiège

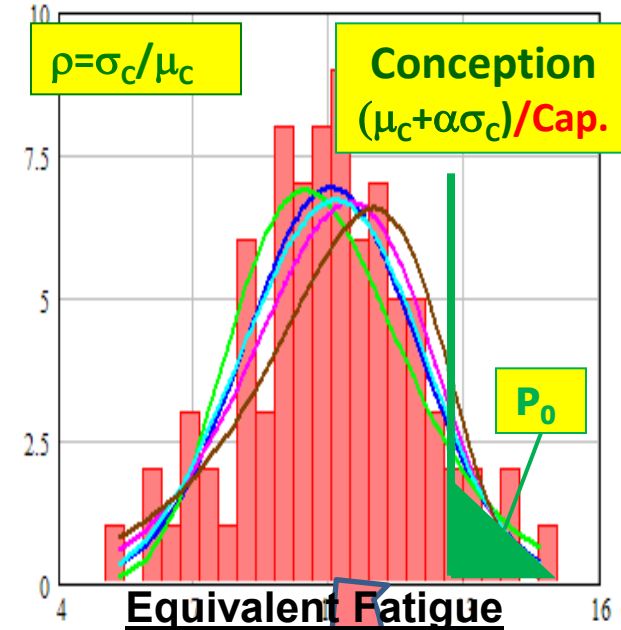
- **Rang 1 : Situation élémentaire :** pylône support, pylône compression, E/S gare
- **Rang 2 : Chargement :** vide, demi-charge, pleine charge
- **Rang 3 : Vitesse :** vitesse 1, vitesse 2

Chargement en service et charge de conception

combinaison de situations de vie élémentaires



<i>m</i>	<i>l</i>		$V_m(\%)$	$C_{ml}(\%)$	$S_{mlk}(\%)$	Matrice élémentaire H^{mlkj} (passage/h)
1		% vitesse 1	45-75			
	1	% à vide		40-80		$j = 1, 2, \dots, n$
		Pylône Support			68	$H^{111j}, H^{111j}, H^{111j}, \dots$
		Pylône Compression			19	H^{112j}, \dots
		E/S gare			13	H^{113j}
	2	% pleine charge		5-40		
		Pylône Support			68	H^{121j}, \dots
		Pylône Compression			19	H^{122j}
		E/S gare			13	H^{123j}
	3	% charge partielle		result		
		Pylône Support			68	H^{131j}
		Pylône Compression			19	H^{132j}
		E/S gare			13	H^{133j}



**Matrice Rainflow d'une vie virtuelle
pour un jeu de combinaison
des proportions de situations élémentaires de vie**

$$H^i = N_{vie} \cdot \sum_{mlk} V_m^i C_{ml}^i S_{mlk}^i H^{mlkj}$$

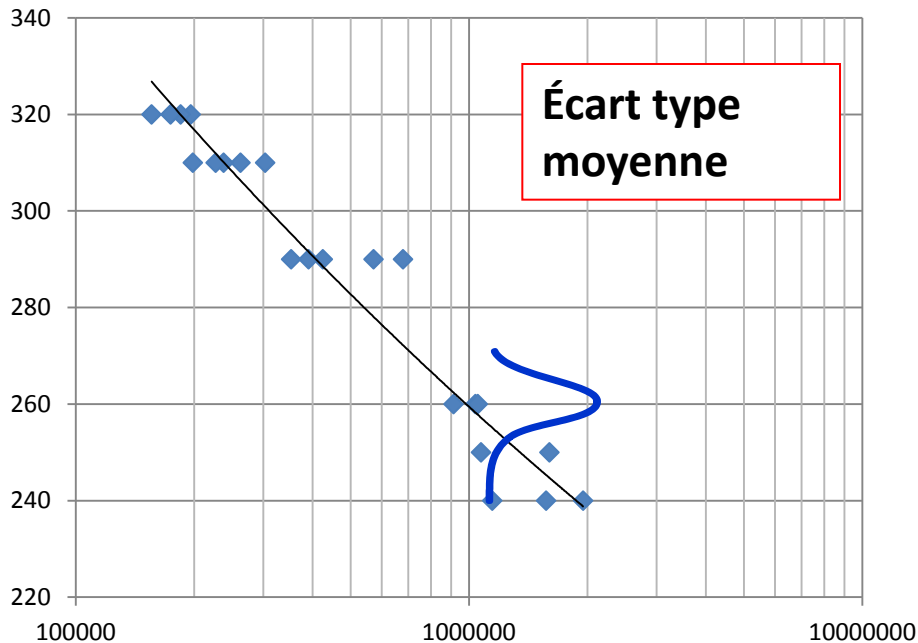
Sévérité donnée par l'équivalent fatigue

**Capitalisation :
Normer par une grandeur
caractéristique**

**Grand nombre de
simulations de vie**

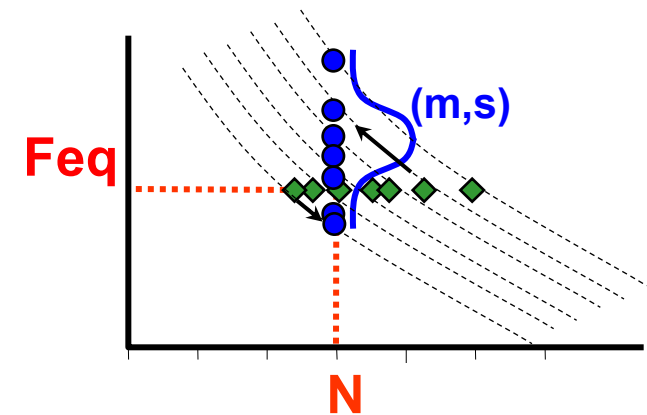
Résistance en fatigue et qualité de fabrication

Analyse statistique des données de fatigue matériau/procédé



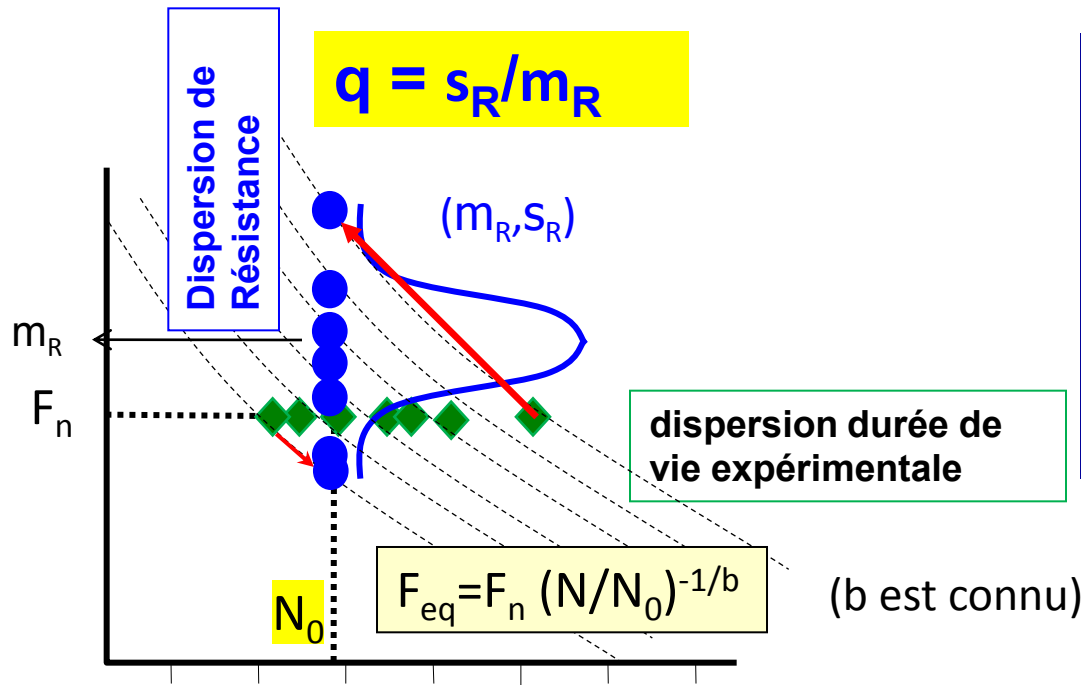
Interprétation essais de validation

$$q = s/m$$



Résistance en fatigue et qualité de fabrication

Dispersion relative Matériau Procédé



**Capitalisation sur la
qualité de fabrication**

**Normer chaque jeu par la
moyenne à N_0**

$$q = s_R/m_R$$

Gaussien à 10^6

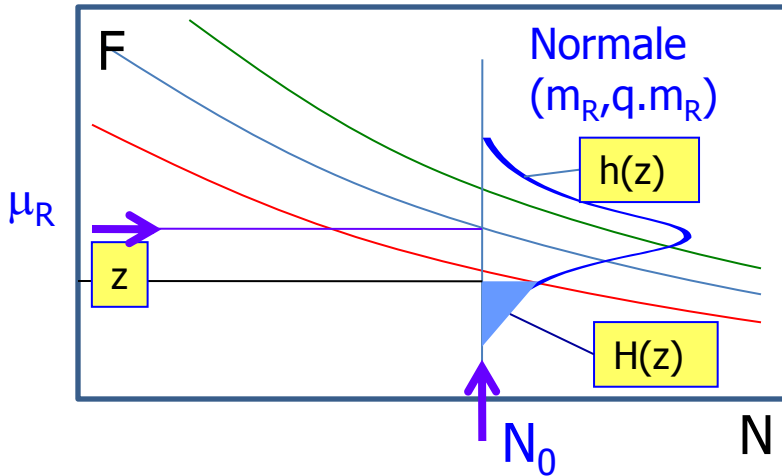
haute qualité

usuel

qualité faible

$q = \sigma_R/\mu_R$	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
----------------------	------	------	------	------	------	------

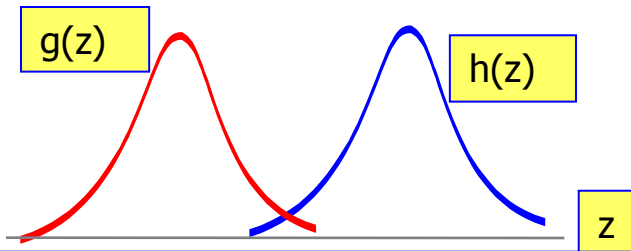
Fiabilité, quantification de la probabilité de défaillance



- **$g(z)$ densité de probabilité de chargement de service**
- **$H(z)$ fonction de répartition de la résistance en fatigue des composants**

P_f peut s'écrire

$$\int_0^{\infty} H(z, m_R, q \cdot m_R) \cdot g(z) \cdot dz < P_{f \text{ obj}}$$



$$H(z) = \int_0^{\infty} h(z) dz$$

$$= H(z, \mu_R, \sigma_R) = H(z, \mu_R, q \cdot \mu_R)$$

**On obtient une relation entre
la résistance en fatigue requise**

**m_R
et la qualité de fabrication
 q**

Fiabilité, quantification de la probabilité de défaillance

Pour illustrer avec des distributions gaussiennes en Chargement et en Résistance

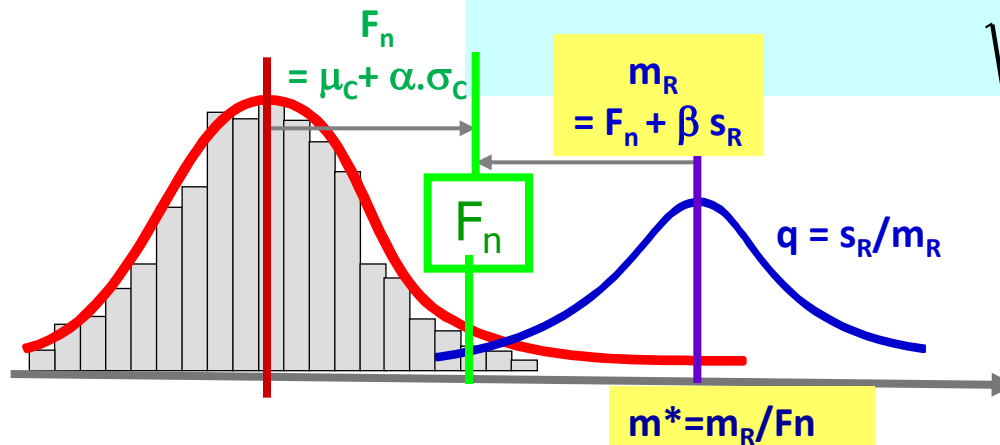
$$Pf = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

$$Pf = \text{normal standard}\left(-\frac{m_R - \mu_c}{\sqrt{(N-1) \cdot \frac{s_r^2}{\chi_{\gamma(N-1)}^2} + \sigma_c^2}}\right)$$

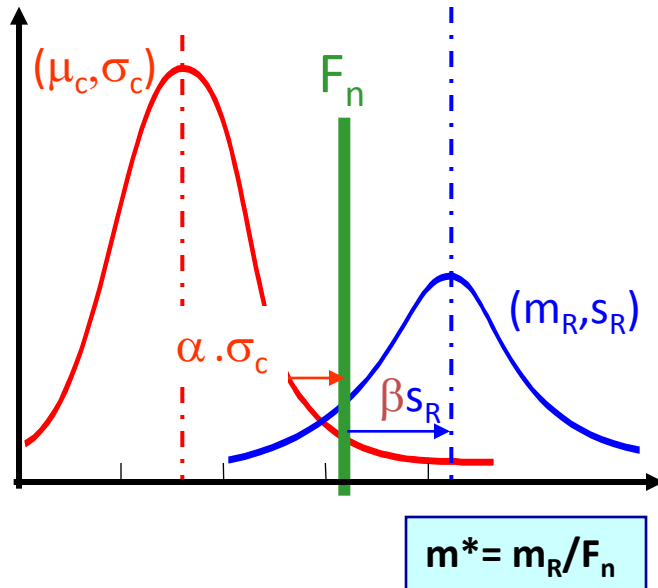
Introduire

$$F_n = \mu_c + \alpha \cdot \sigma_c ; \rho = \sigma_c / \mu_c ; q = s_R / m_R ; m^* = m_R / F_n$$

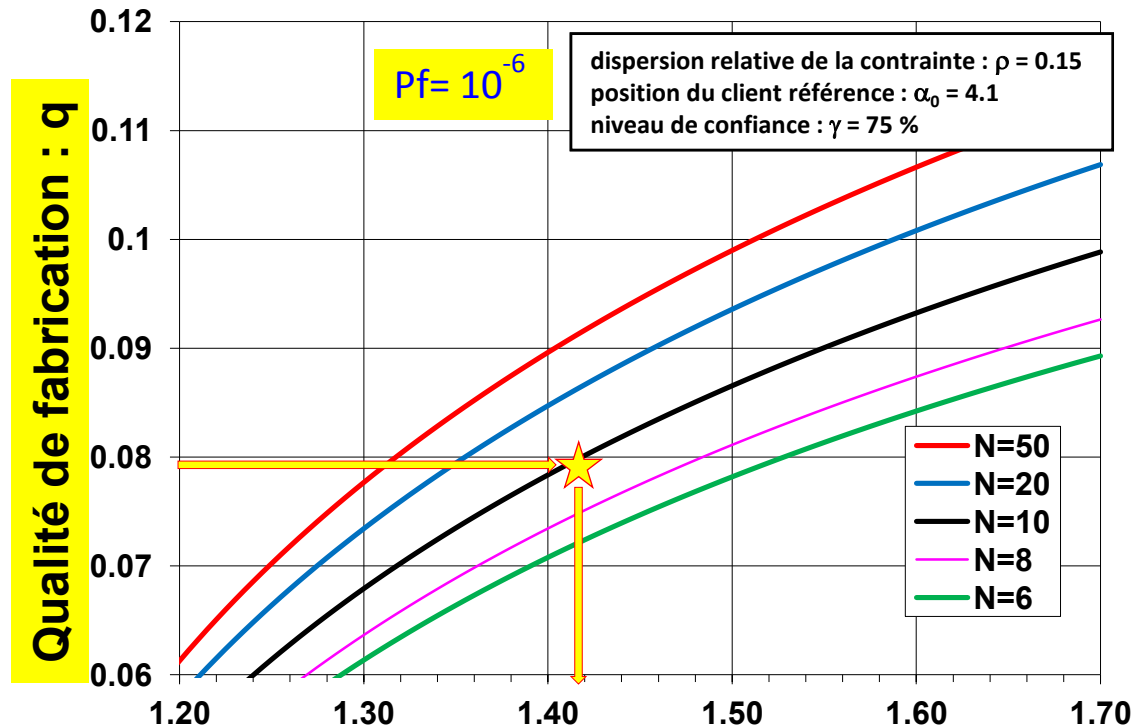
$$Pf = \text{normal standard}\left(-\frac{(1 - m^*)(1 + \alpha\rho)}{\sqrt{\rho^2 + (1 + \alpha\rho)^2 \frac{q^2 m^{*2} (N-1)}{\chi_{\gamma(N-1)}^2}}}\right)$$



Fiabilité, quantification de la probabilité de défaillance



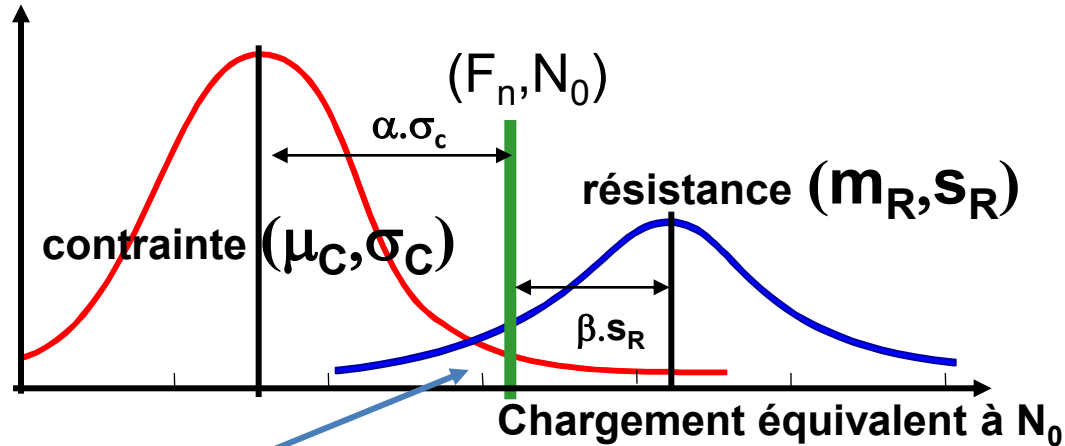
Qualité de fabrication : $q = \frac{s_R}{m_R}$



Utilisation de la dispersion relative q , pour définir la condition d'acceptation du résultat

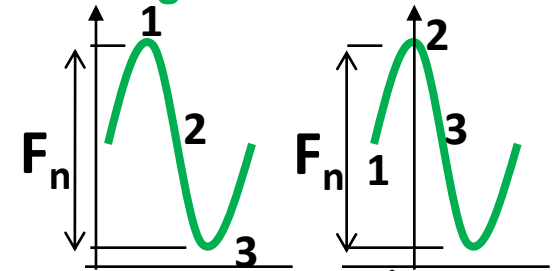
$$q = \sqrt{\frac{\chi^2_{\gamma(N-1)}}{(1 + \alpha\rho)^2 m^{*2} (N-1)} \left[\left(\frac{m^* (1 + \alpha\rho) - 1}{\text{loi normale st inv}(1 - P_f)} \right)^2 - \rho^2 \right]}$$

Fiabilité, justification de la conception

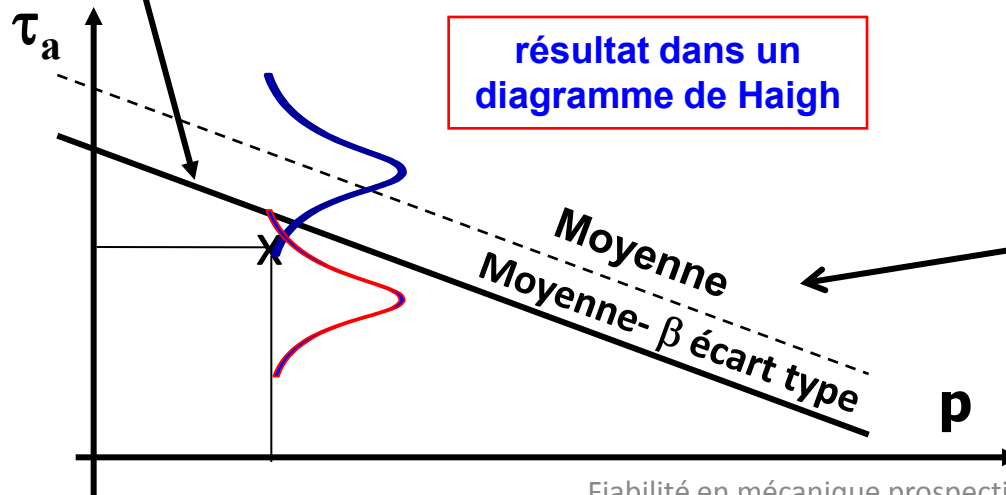


Entrée, F_n : roulis

Vertical gauche Vertical droit

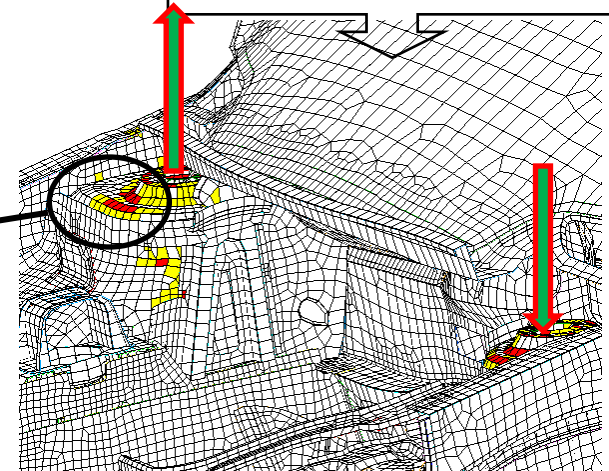


Objectif de fiabilité



résultat dans un diagramme de Haigh

**Calcul Prédictif
Des efforts aux contraintes**



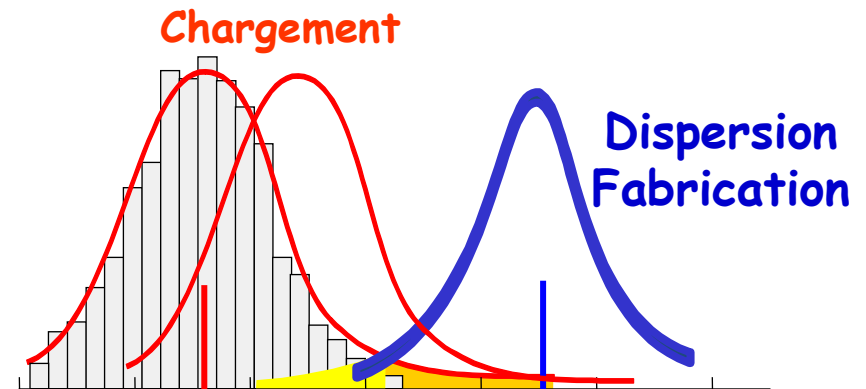
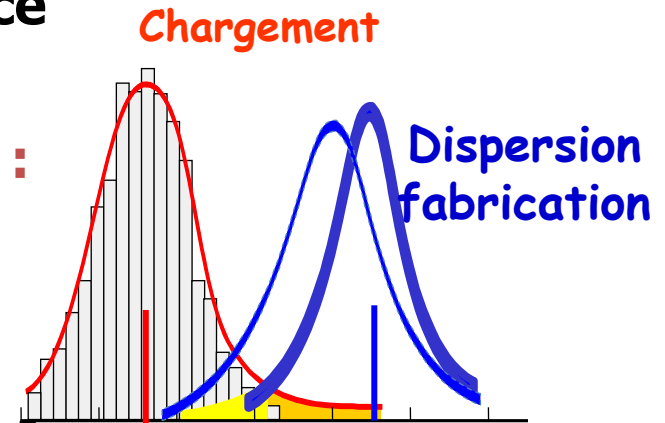
Analyse de risque

– Calculer la fiabilité prévisionnelle
et quantifier le risque de défaillance

– Anticiper l'impact sur la fiabilité :

- d'une délocalisation
de la fabrication

- d'une évolution
du profil mission



Conclusion

- **La mise en œuvre de la fiabilité en conception et validation en fatigue nécessite la capitalisation des données :**
 - Sur la variabilité des chargements de service
 - Sur la dispersion de tenue en fatigue du produit
 - Définir le niveau de fiabilité cible
- **En complément**
 - Les modèles mécaniques et lois de fatigue doivent être validés
 - Les conditions d'échange entre le calcul, l'essai et la vie en service sont correctement établies
- **La mise en œuvre avec maturité suffisante de la fiabilité prévisionnelle nécessite un certain temps**