



cetim

Innovating

in mechanics



***Estimation du dommage par
fatigue en environnement
mécanique vibratoire.***

M. Bennebach, CETIM

***Séminaire SF2M, Commission Fatigue,
6 Décembre 2012***

Sommaire

- **Introduction**
- **Processus général de calcul en fatigue**
- **Focus sur la fatigue vibratoire**
 - Approche classique expérimentale
 - Approche numérique EF
- **Applications**
- **Conclusions**

Un acteur régional, national, international

Le Centre d'expertise mécanicien français au plus près de ses 7 000 entreprises cotisantes

Fondation cetim
sous l'égide de la Fondation de France



valortim
Innovier en mécanique



Etim
COMPOSITES

- 3 sites principaux : Senlis, Nantes, Saint-Étienne
- 17 Délégations régionales
- 4 Centres associés et partenaires
- 1 Centre de ressources mécatronique, une filiale de valorisation
- 2 filiales internationales
- 1 filiale dédiée aux essais sur composites



Senlis



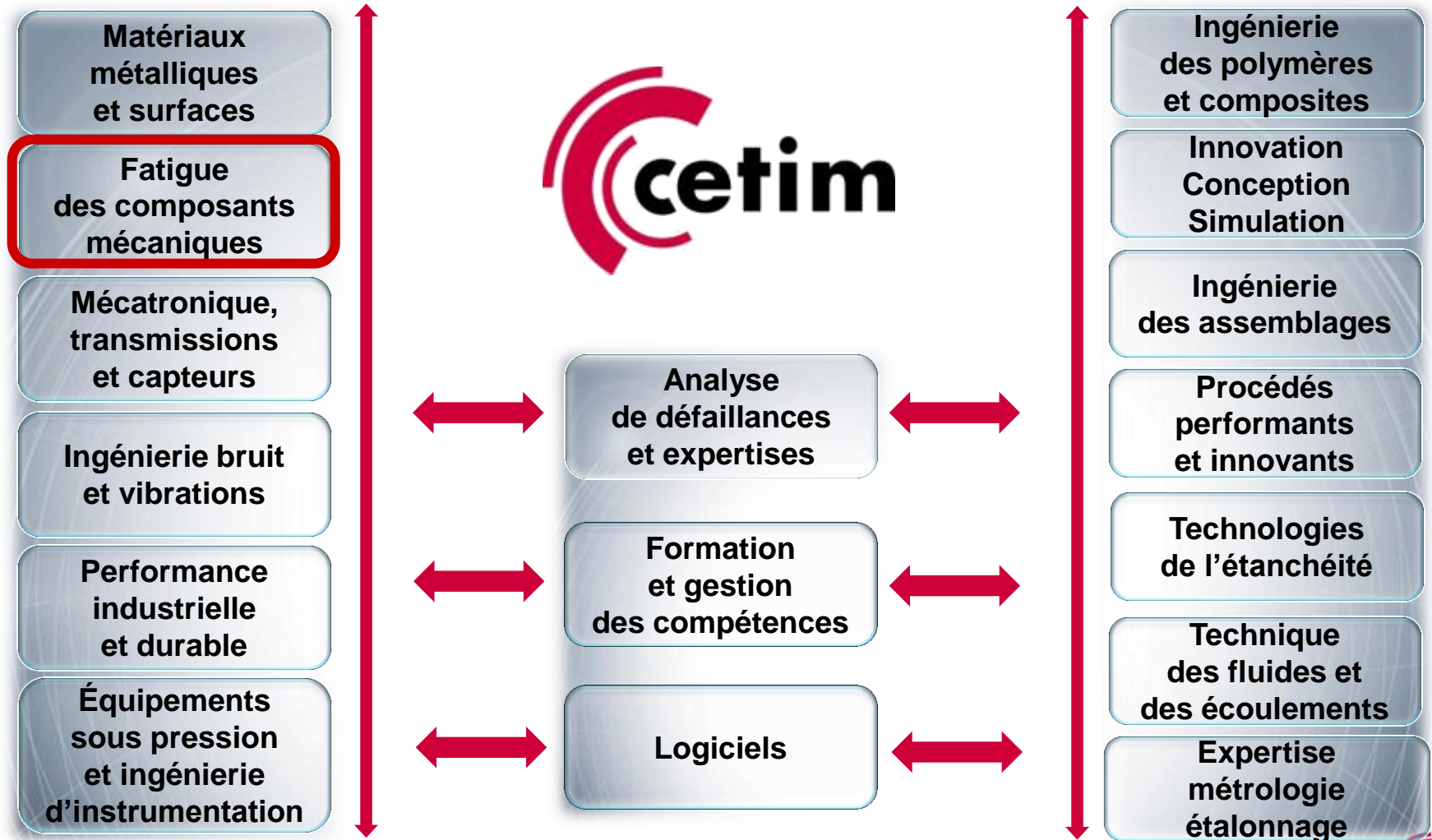
Nantes



Saint-Étienne



Une structuration en pôles d'activité

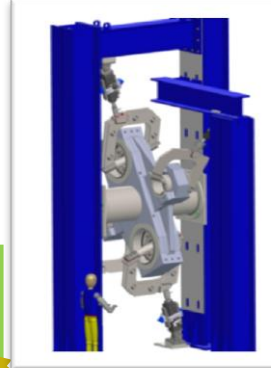
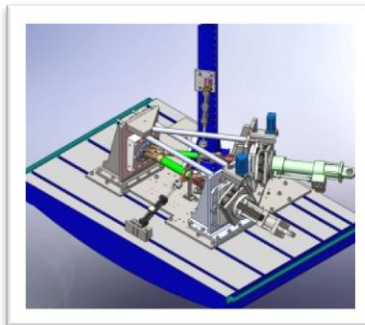


Pour une prise en charge globale de vos projets en fatigue, pendant toute la durée de vie de votre produit

Innovation / Avance de phase

Phase de développement

Vie du produit

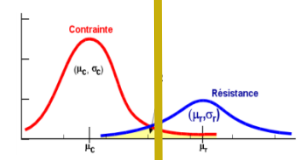
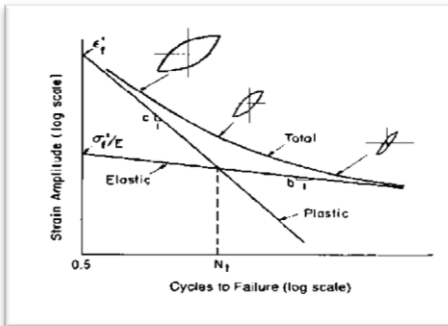
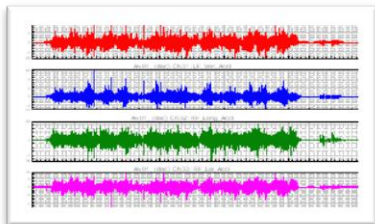
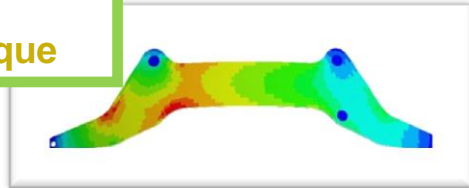
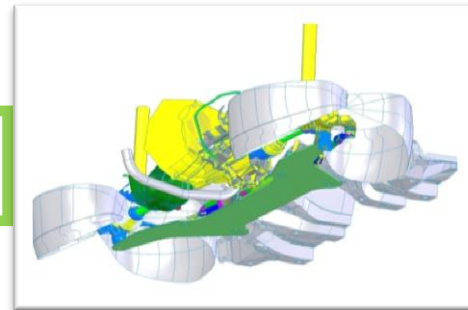


Ingénierie d'essais

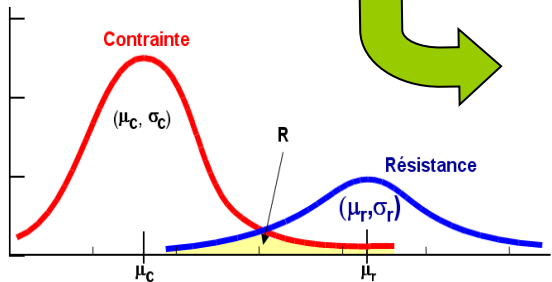
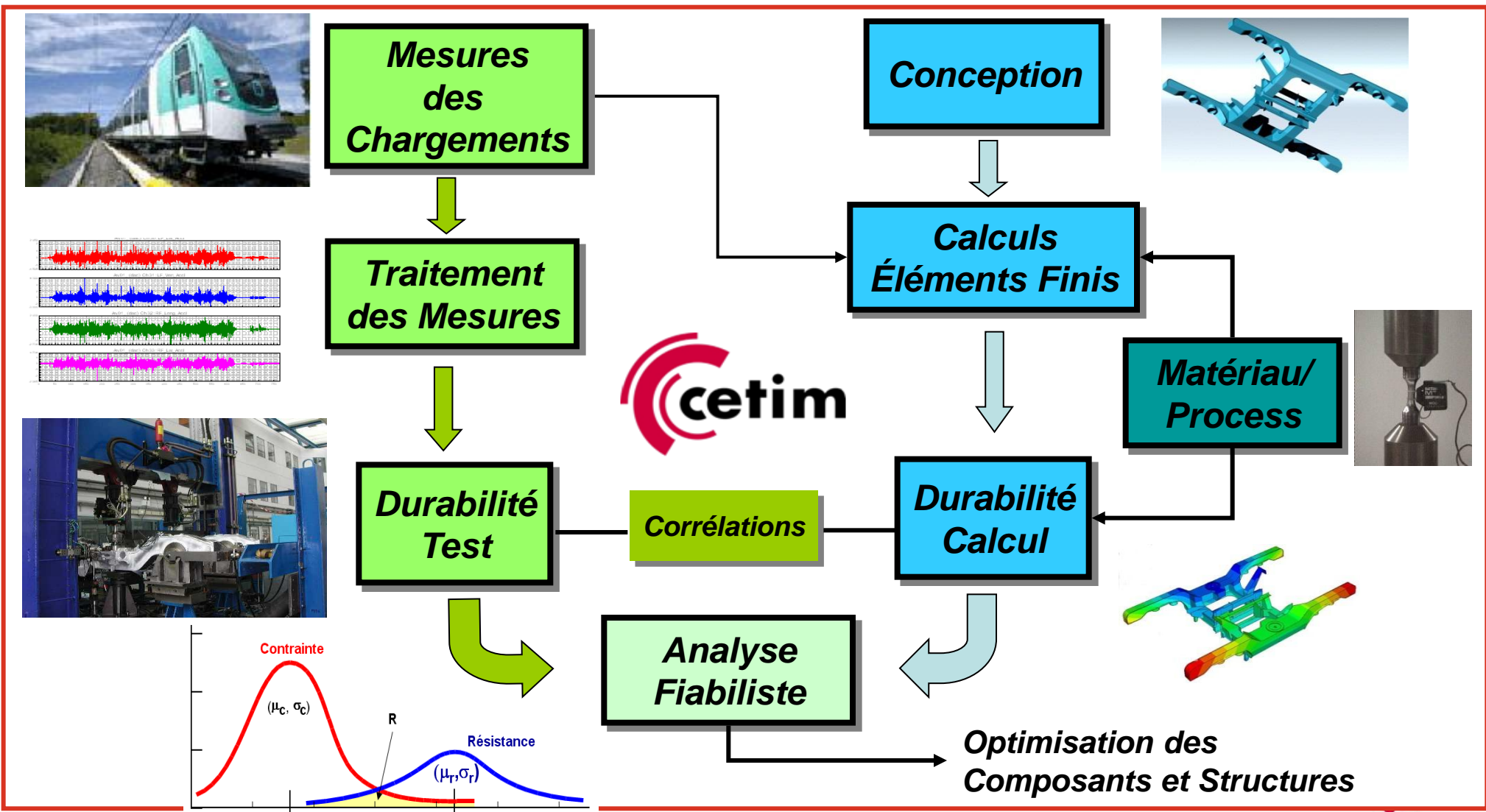
Caractérisation matériaux & procédés

Aide à la conception

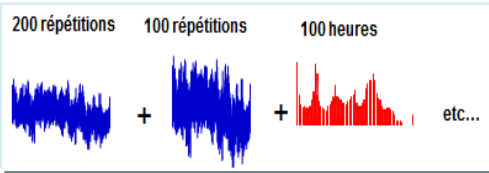
Simulation Numérique



LE PROCESSUS DE DURABILITE OFFRE GLOBALE CETIM



Etapes impliquées dans le calcul en fatigue



Profil de vie

Chargements

Analytique
EF
Mesures

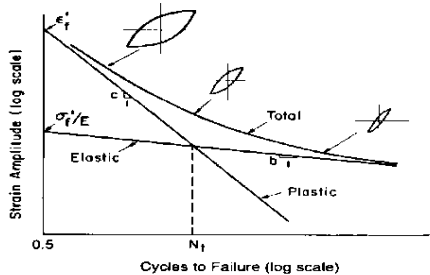
- SN
- EN
- LEFM
- Multiaxial
- Assemblages
- Fatigue Vibratoire**
- Fatigue Thermomécanique

Géométrie

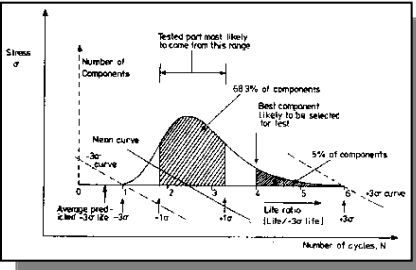
Analyse des Contraintes

Analyse en Fatigue

Matériaux & Process



Lois de comportement Effets du process



Prise en compte des variabilités



- Présentation de la problématique
- Spécification d'essais vibratoires
- Calculs de durée de vie
- Exemples de cas

Fatigue vibratoire: contexte

Répondre à la problématique industrielle d'accélération de la conception et de validation de composants et structures sollicités par un environnement vibratoire

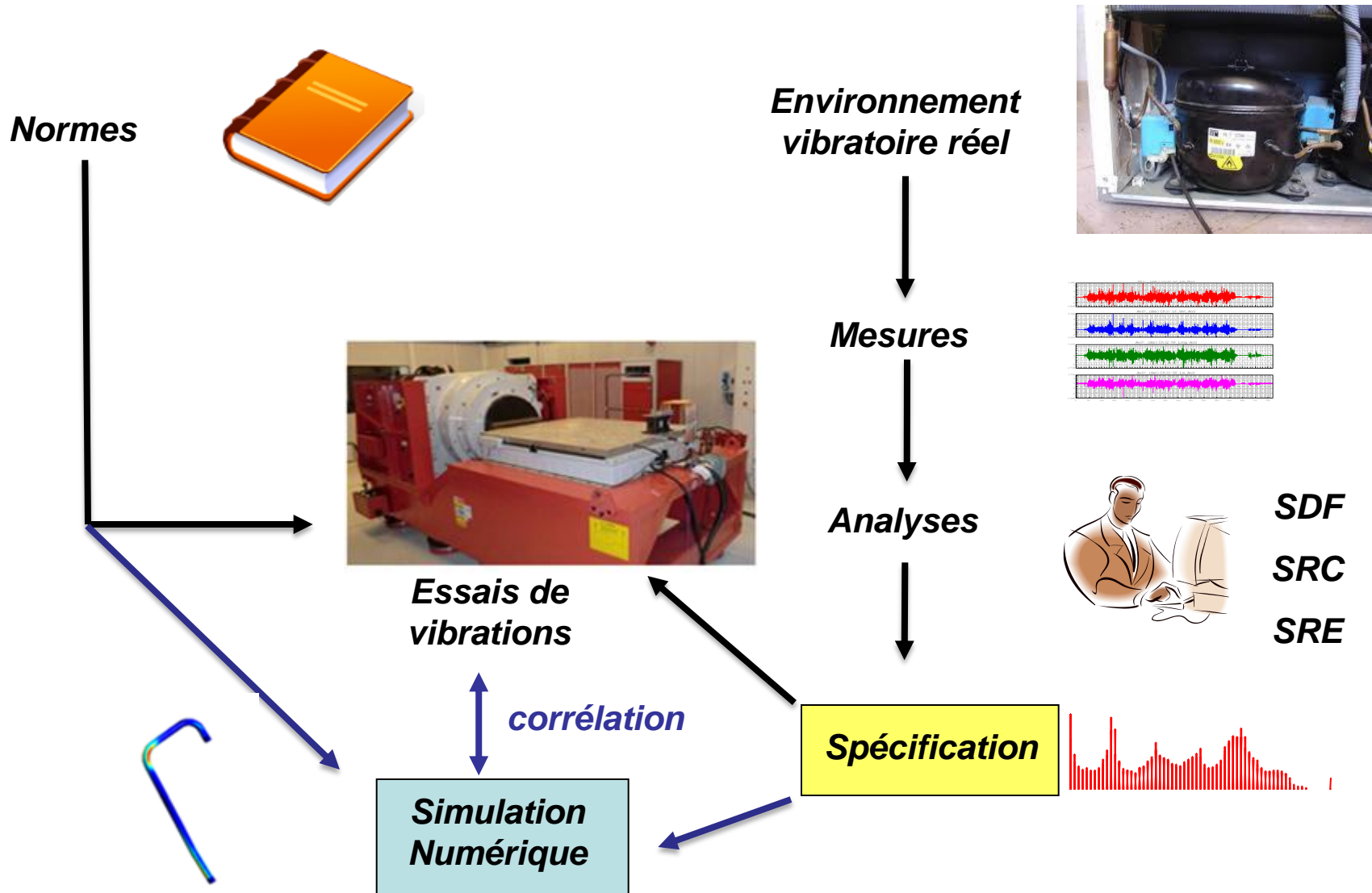
exemples: structures off-shore, éoliennes, composants électroniques, équipements embarqués, capotages, tuyauteries, composants compartiments moteur,...

Démarche:

- Caractériser et analyser l'environnement vibratoire,
- Synthétiser une spécification d'essai accéléré de validation,
- Vérifier qu'il est réaliste expérimentalement et numériquement.

La méthodologie présentée s'appuie sur une démarche de simulation expérimentale et numérique.

La Fatigue Vibratoire: Processus global

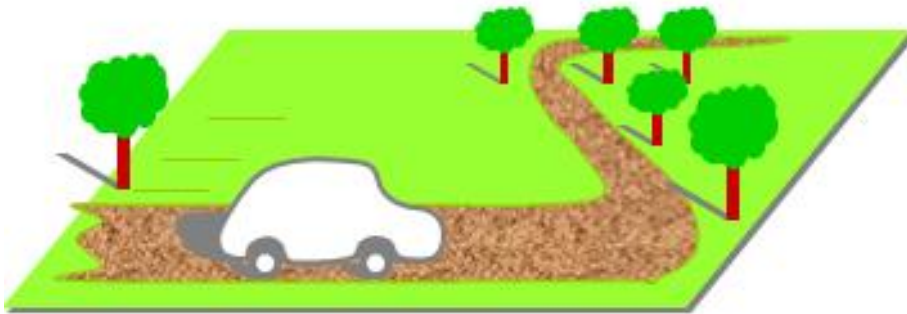


Approche expérimentale: personnalisation des essais

Définir une spécification d'essai sous environnement vibratoire à partir des étapes suivantes :

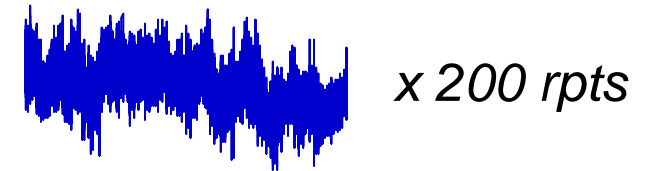
- Identification du cycle de vie,
- Mesures des chargements en service,
- Analyse des chargements,
- Synthèse des données pour en déduire une spécification de durée réaliste,
- Elaboration du programme d'essais.

Cycle de vie ou profil de mission



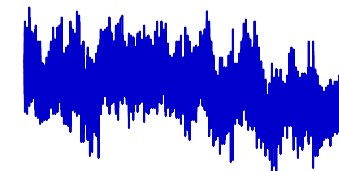
- *Un profil de mission est constitué de combinaisons d'événements représentant ce que la structure ou composant voit durant sa vie (chargements ordinaires et exceptionnels).*
- *Ces événements peuvent être mesurés sous forme de temporels, lorsqu'il s'agit de situations déterministes, ou de DSP lorsqu'il s'agit de situations stochastiques.*

Profil de mission



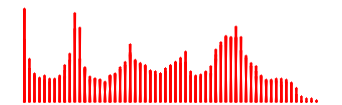
x 200 rpt

+



x 100 rpt

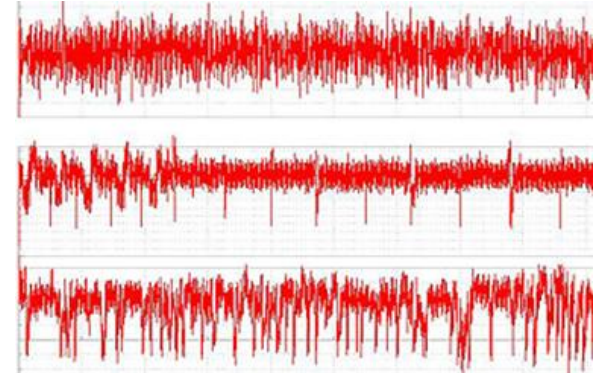
+



x 100 hrs

etc...

Chargements ordinaires:

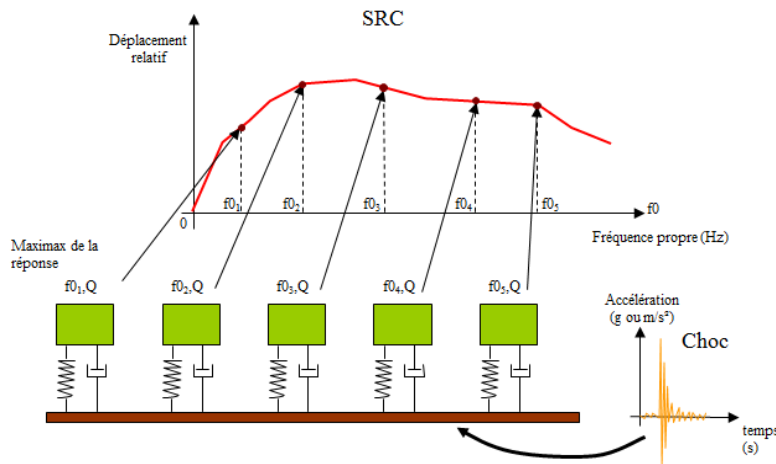


Chargements exceptionnels:



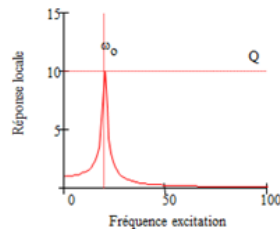
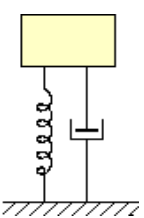
Analyse des chargements

- Méthode basée sur une équivalence en dommage (GAM EG13, MIL-STD 810F...),
- Modélisation de la structure par n systèmes 1ddl (Biot 1932),
- Equivalence réalisée à partir des spectres de dommage en fatigue SDF, spectres de réponses aux chocs SRC et spectres de réponses extrêmes SRE.



SDF: courbe représentative des variations du dommage subi par un système linéaire à 1ddl soumis à une excitation vibratoire, en fonction de sa fréquence propre et pour un amortissement donné.

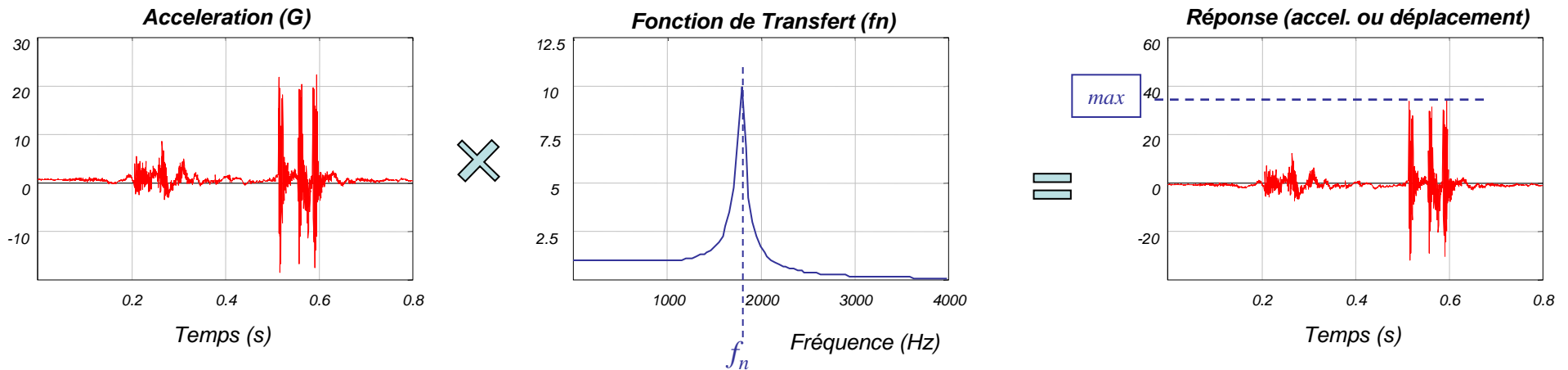
SRC et SRE: courbes représentatives des variations de la réponse la plus grande d'un système linéaire à 1ddl soumis à une excitation mécanique en fonction de sa fréquence propre, pour une valeur donnée de son amortissement.



$$\text{Taux d'amortissement : } \xi = \frac{C}{2\sqrt{k.m}}$$

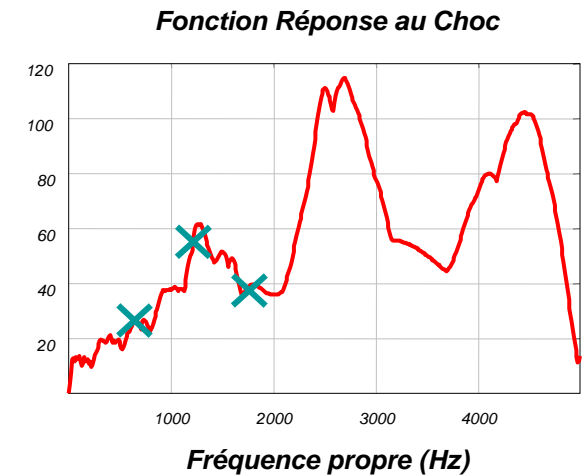
$$\text{Pulsation propre : } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Exemple de calcul de SRC

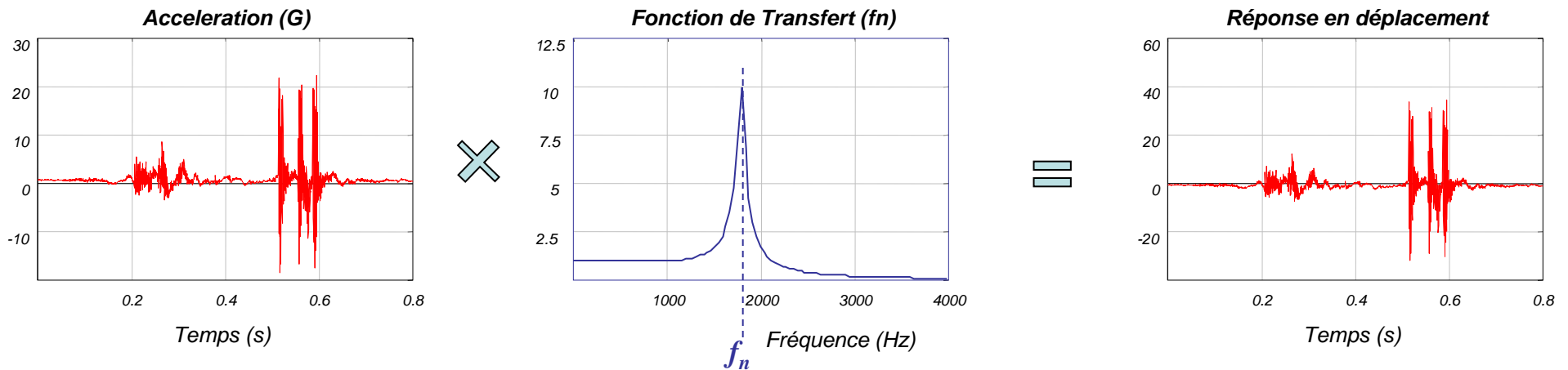


L'accélération entrée est filtrée par la fonction de transfert du système à un ddl pour une fréquence propre f_n

Le niveau max. de la réponse est alors reporté en fonction de la fréquence propre (réponse en accélération ou déplacement)



Exemple de calcul de SDF

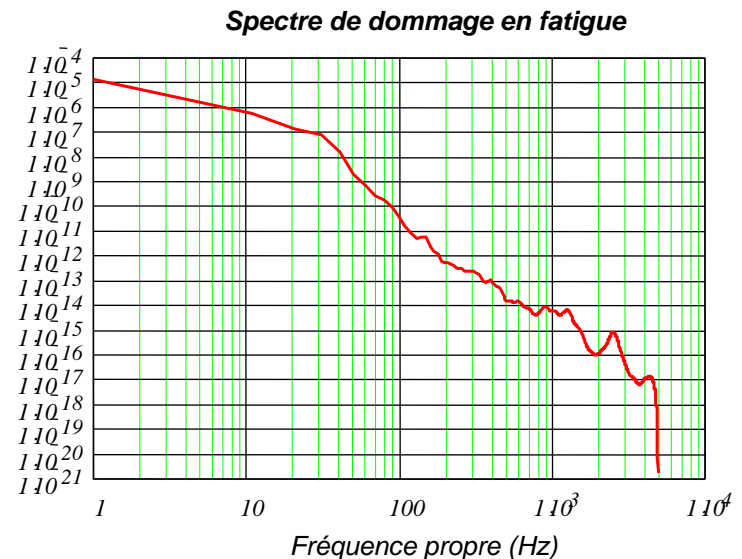


On utilise le même principe de filtrage que pour le SRC.

La réponse est calculée en déplacement, proportionnel à la contrainte ($S = K.z$), pour chaque fréquence propre

Comptage Rainflow de la réponse et calcul du dommage avec Basquin + Miner ($N=C.S^{-b}$)

Répétition du processus pour l'étendue de fréquences propres étudiées

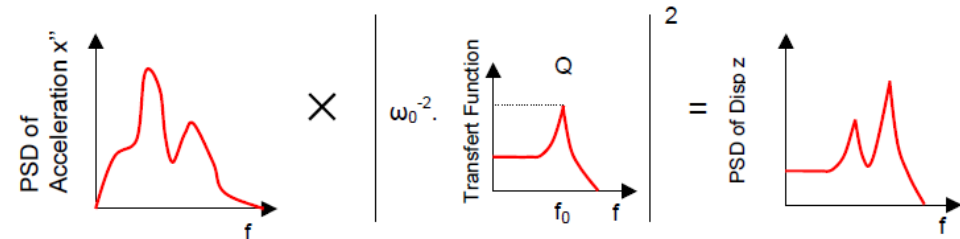


Calcul des SDF et SRE à partir d'une DSP

- La DSP de la réponse est calculée à partir de la DSP d'excitation par:

$$G_z(\omega) = \left| \frac{1}{\omega_0^2} \cdot H(\omega) \right|^2 \cdot G_x(\omega)$$

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \frac{1}{Q^2} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}}$$



- Sur la base des travaux de Bendat et Rice, Lalanne (1978) proposa de calculer les spectres par:

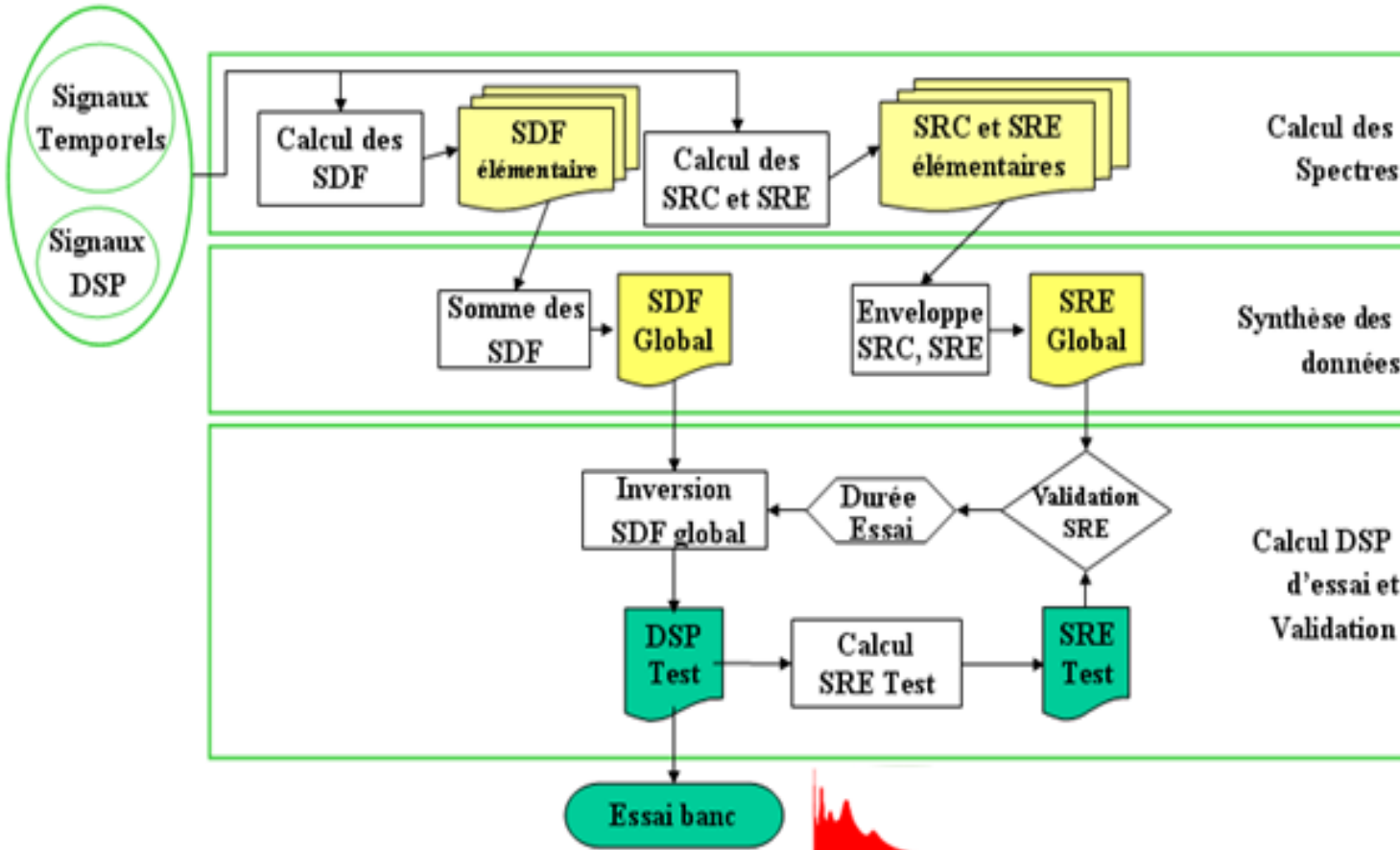
$$FDS(f_0) = f_0 \cdot T \cdot \frac{K^b}{C} \cdot \left[\frac{Q \cdot G_x(f_0)}{2 \cdot (2\pi \cdot f_0)^3} \right]^{b/2} \cdot \Gamma(1 + b/2) \quad ERS(f_0) = \sqrt{\pi \cdot f_0 \cdot Q \cdot G_x(f_0) \cdot \ln(f_0 \cdot T)}$$

$$\Gamma(g) = \int_0^{\infty} x^{(g-1)} \cdot e^{-x} dx$$

C, b paramètres de Basquin
T durée d'exposition de la DSP

Génération du Test Synthétique

Profil de Mission



Coefficients correctifs:

** k sécurité: prise en compte de la variabilité des chargements et des résistances,*

** k test: prise en compte du nombre d'essais*

$$G_0(f_0) = \frac{2(2\pi \cdot f_0)^3}{Q} \cdot \left[\frac{k \cdot \Sigma FDS(f_0) \cdot C}{K^b \cdot f_0 \cdot T_{eq} \cdot \Gamma(1 + \frac{b}{2})} \right]^{2/b}$$

* k = k séc * k test

* Teq durée d'exposition

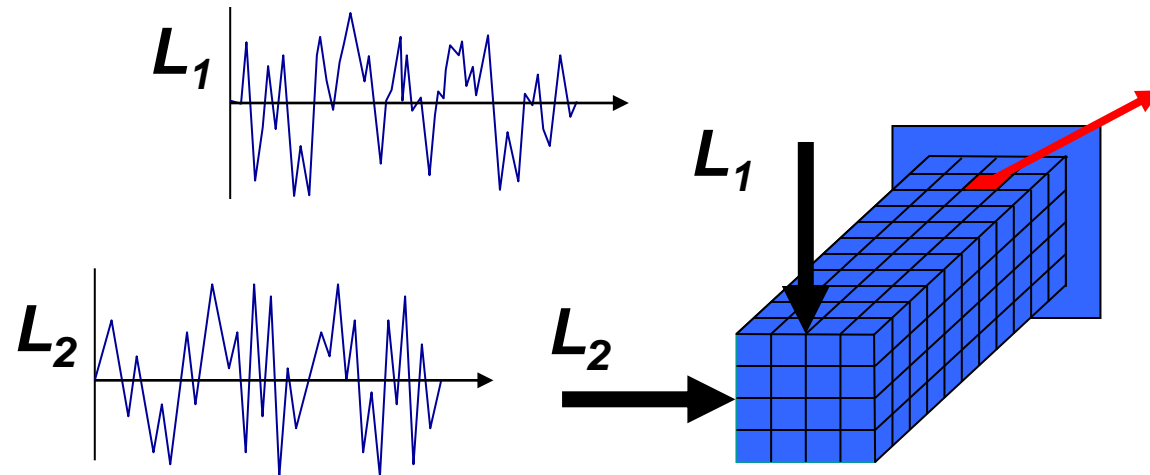
Calcul de durée de vie par simulation EF

Evaluer le dommage sous sollicitations vibratoires à partir de modèles numériques.

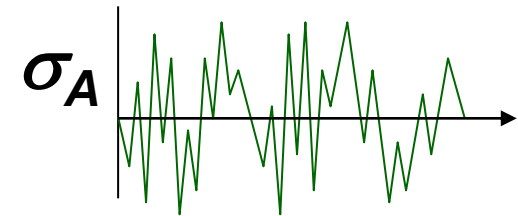
- Calcul dans le domaine temporel:
calcul transitoire ou modal,
- Calcul dans le domaine fréquentiel:
calcul en vibrations aléatoires visant à déterminer la réponse en contrainte (DSP) à partir d'un chargement dynamique (DSP).

Calcul Transitoire

Chargements



Contraintes Locales



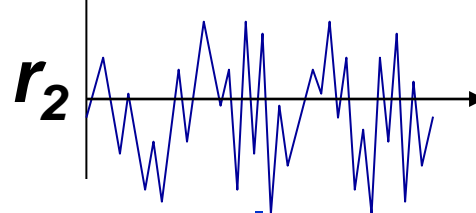
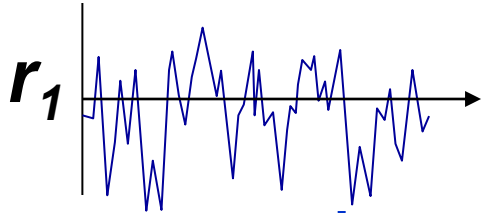
Durée de vie

Les contraintes résultantes sont calculées point par point

Problème de temps calcul et d'espace disque pour des historiques longs

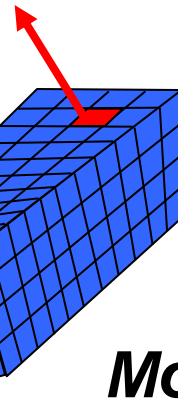
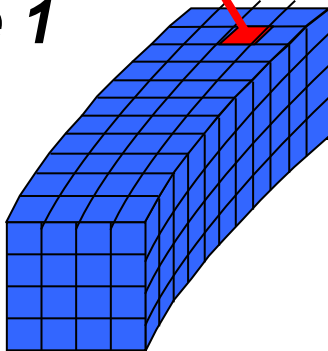
Calcul modal

Réponses Modales



$$\phi_{1A} * r_1(t) + \phi_{2A} * r_2(t) + \dots = \sigma_A(t) \quad \sigma_A$$

Mode 1

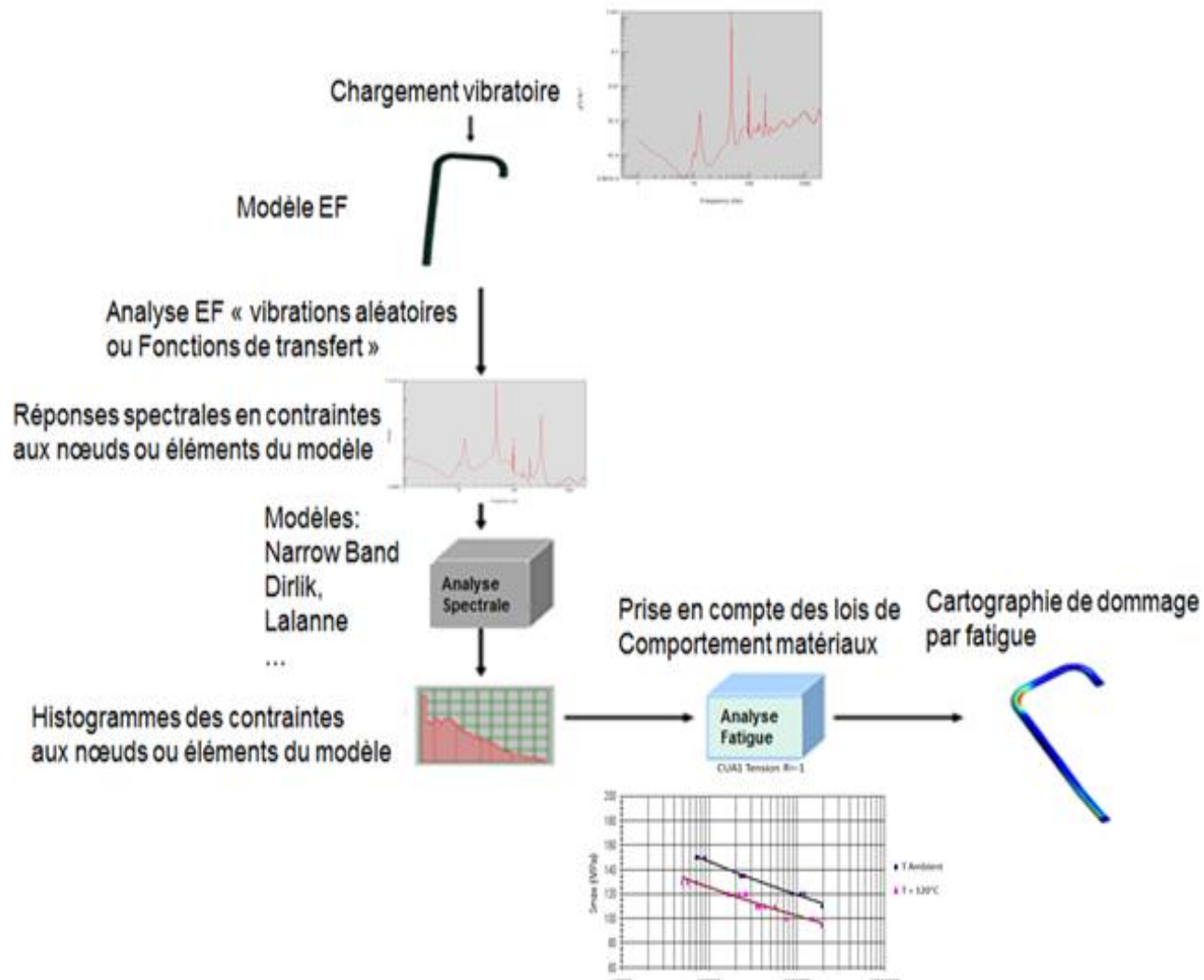


Mode 2

Durée de vie

Contraintes Modales

Calcul dans le domaine fréquentiel



Expression de la fonction densité de probabilité de contrainte

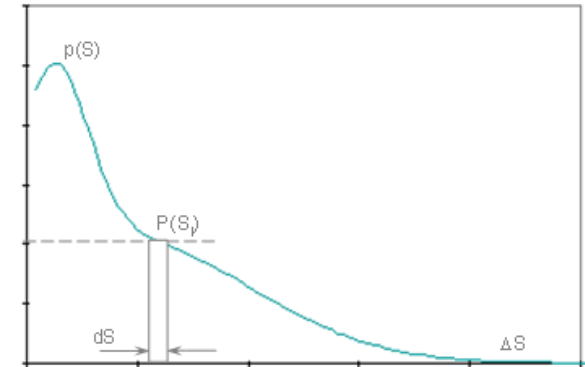
- Le dommage peut être estimé par:

$$D = \frac{E[P]}{C} \int S^b P(S) dS$$

$$n_i = P(S_i) dS \cdot E[P]$$

$$E[P] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n G(f) df$$



- Lalanne a proposé l'expression suivante pour P(S):

$$p(S) = \frac{1}{rms} \left\{ \frac{\sqrt{1-\gamma^2}}{\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-S^2}{2rms^2(1-\gamma^2)}} + \frac{S \cdot \gamma}{2rms} e^{\frac{-S^2}{2rms^2}} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{S \cdot \gamma}{rms \sqrt{2(1-\gamma^2)}} \right) \right] \right\} \quad \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

$$rms = \sqrt{m_0}$$

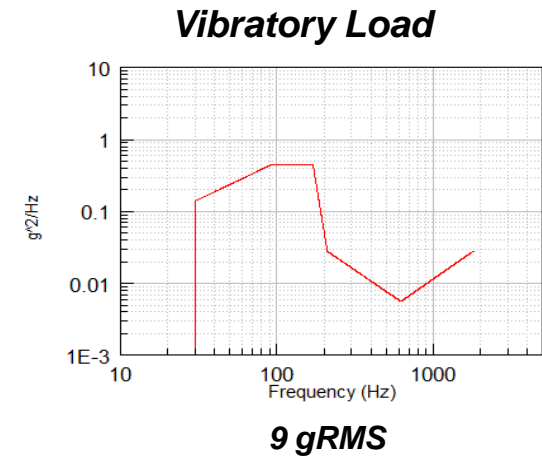
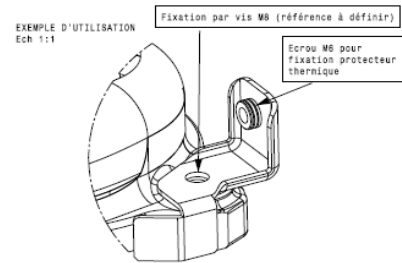
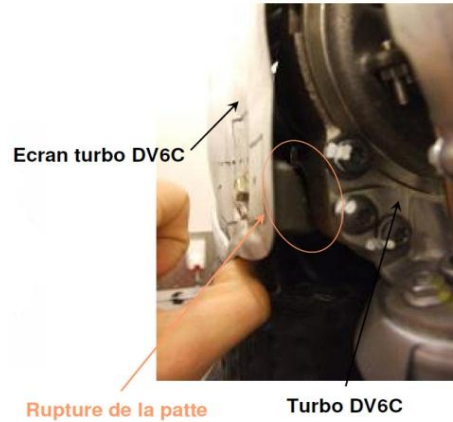
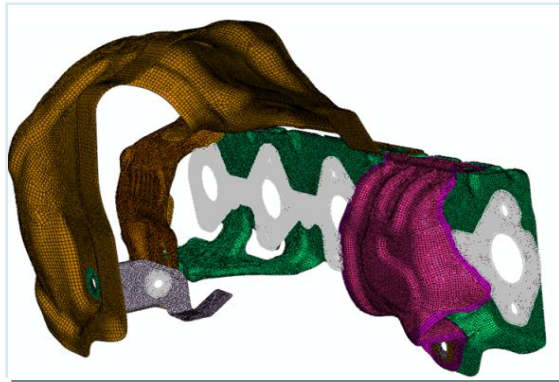
$$\gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 \cdot m_4}}$$

- Beaucoup d'autres formulations sont disponibles dans la littérature (Narrow band, Dirlik...)

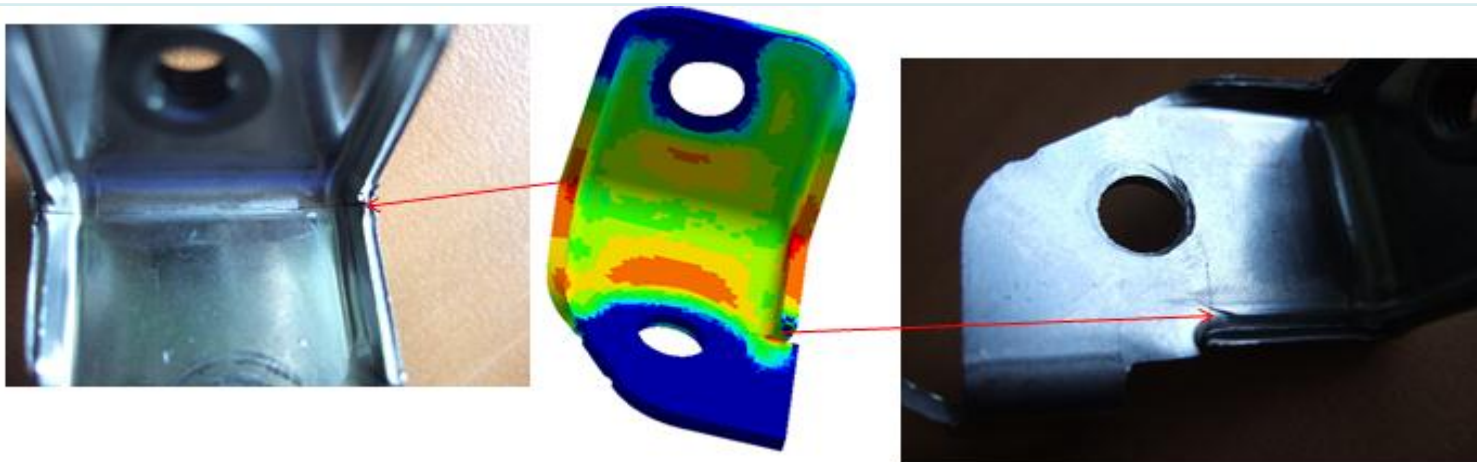
Apports de la simulation numérique

- Le calcul EF permet de valider la DSP synthétisée,
- Le dommage calculé est un dommage « absolu » alors que l'approche expérimentale réalise une équivalence en dommage « relatif »,
- Possibilité d'optimiser le design par calcul dans le domaine fréquentiel, directement à partir de DSP ce qui évite le recours à un calcul transitoire, avec des gains importants sur les temps calculs,
- Le calcul nécessite d'avoir les lois de comportement des matériaux.

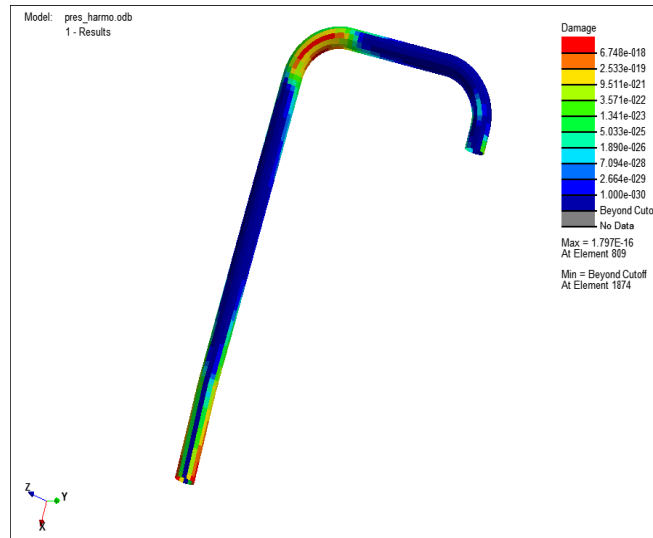
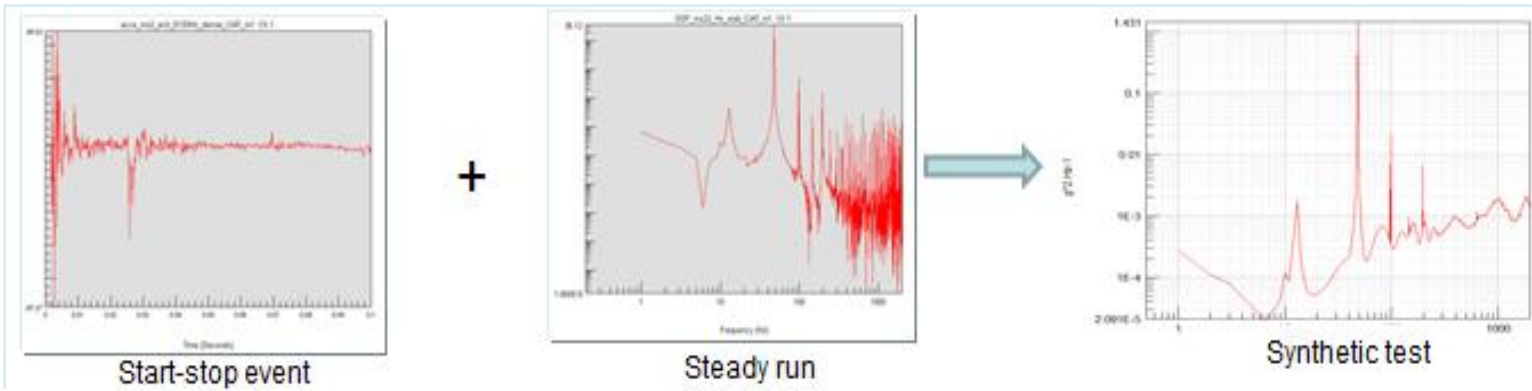
Application 1: écran thermique de turbo



*Synthèse d'un spectre sévéré induisant des ruptures en 1h30
La modélisation numérique avec calcul spectral est cohérente avec le test en durée de vie et zones critiques ($N_{test}/N_{calcul} \approx 1,6$).*



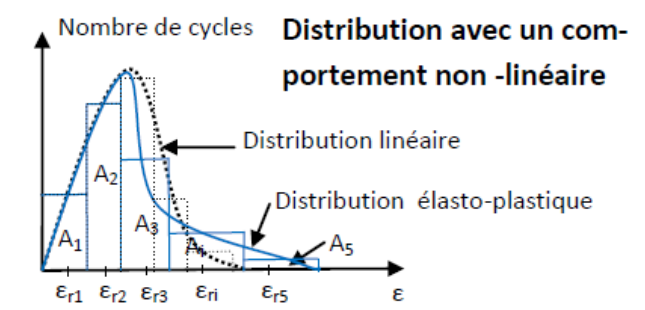
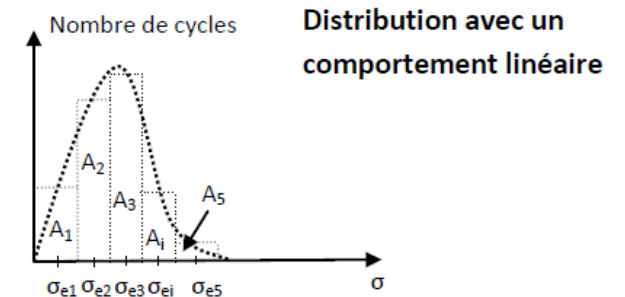
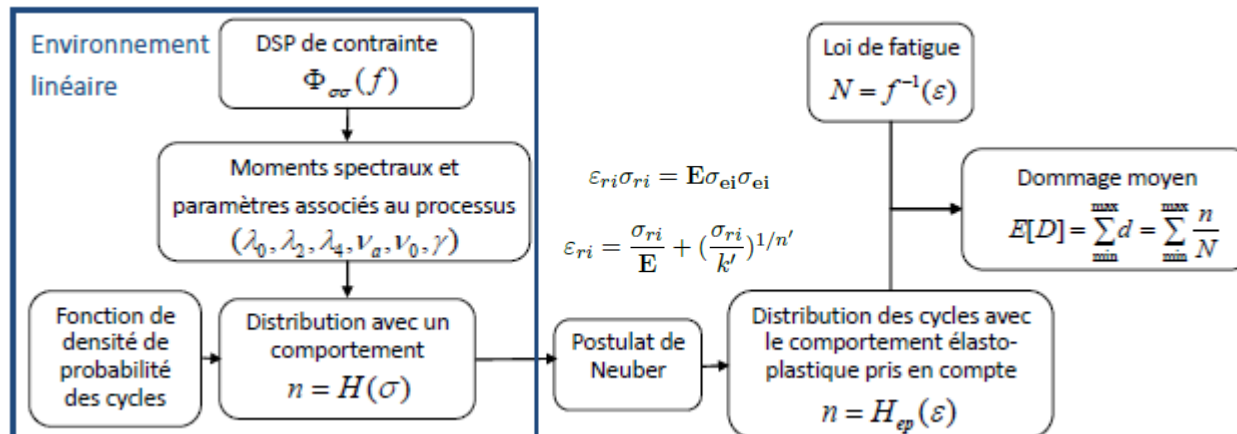
Application 2: tubes de machines frigorifiques



- **Validation d'une durée de vie à 15 ans,**
- **Domage par calcul négligeable,**
- **Possibilité de prendre en compte dans le calcul l'effet de pression et température.**

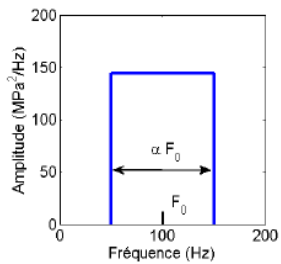
Prise en compte de la non-linéarité matériau

- L'approche classique expérimentale et les méthodes spectrales actuelles sont appliquées à l'endurance,
- Les forts niveaux d'accélération des essais peuvent conduire à de la plasticité locale, qui doit être prise en compte dans le calcul,
- Cet aspect a été abordé dans le cadre d'une thèse ayant différents objectifs dont également le recensement et la comparaison des méthodes spectrales disponibles, avec confrontation à des résultats expérimentaux.

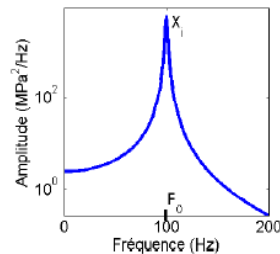


Prise en compte de la non-linéarité matériau

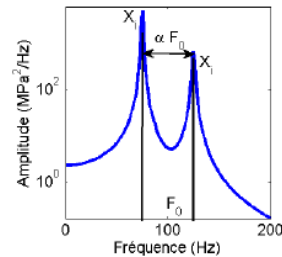
- Validation numérique et expérimentale:



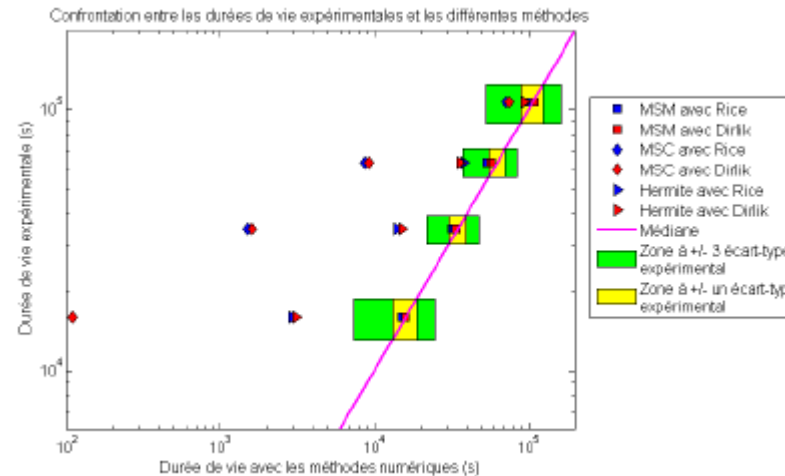
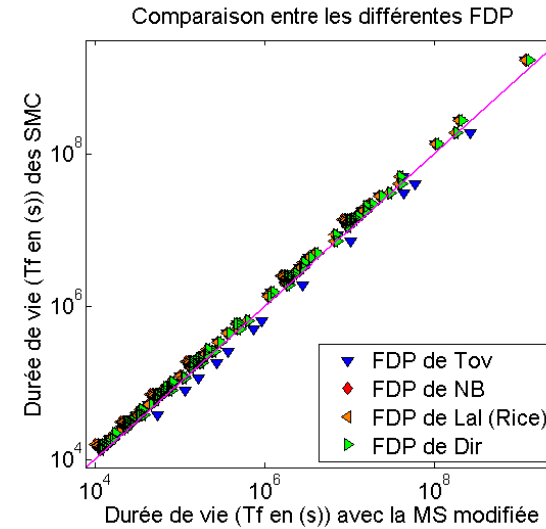
(a) DSP passe-bande



(b) DSP 1DDL



(c) DSP 2DDL



La Fatigue Vibratoire

Une des technologies prioritaires au CETIM

- Evaluations des méthodologies expérimentales et numériques disponibles,
- Identification et proposition d'axes de progrès sur certains verrous technologiques:
 - Plasticité (thèse H. Rognon),
 - Matériaux non métalliques: prendre en compte, dans le cadre de sollicitations vibratoires, l'influence des matériaux non-linéaires et établir le processus méthodologique et les bases de données associées.

→ Réflexion en cours en partenariat avec le LRCCP et le pôle Ingénierie Polymères et Composites.

Etc...

***MERCI POUR VOTRE
ATTENTION!***

fatigue
design **2013**

