



Analyse des chargements en service pour le dimensionnement fiabiliste à la fatigue polycyclique

Colloque MECAMAT – Fatigue des Structures et des Matériaux
24/27 janvier 2017

Merci à G. Pagnoux, D. Hérisson, G. Genet, I. Raoult, M. Facchinetti, F. Szmytka, L. Augustins, A. Oudin, T.M.L. Nguyen, J.J. Thomas, A. Bignonet, G. Perroud,



De la définition de chargement « complexe »

■ Retour sur ceux rencontrés cette semaine

- Cyclique par contact (E. Charkaluk, A. Gravouil, S. Fouvry)
- Cyclique multiaxial non proportionnel (T. Palin-Luc)
- D'amplitude variable (T. Palin-Luc, V. Doquet)
- En mode mixte (V. Doquet)
- Séquentiel (V. Doquet)
- Thermomécanique (F. Szmytka, Y. Marco, P. Kanoute)
- Hygrométrie (Y. Marco)
- Aléatoire (M. Kaminski), fréquentiel (V. Favier)
- *Star, Cross, Cube, Square, Windmill* (S. Pommier)
- Coups forts (S. Pommier)
- **Spectres de chargement (J.C. Ehrstrom)**
- ...

« Bourrin
d'industriel »
© G. Robert

De la (dure) réalité industrielle

■ Variabilité des chargements due :

● Aux clients



● Aux routes



● Aux conditions climatiques



● Aux pièces à dimensionner



● Aux matériaux



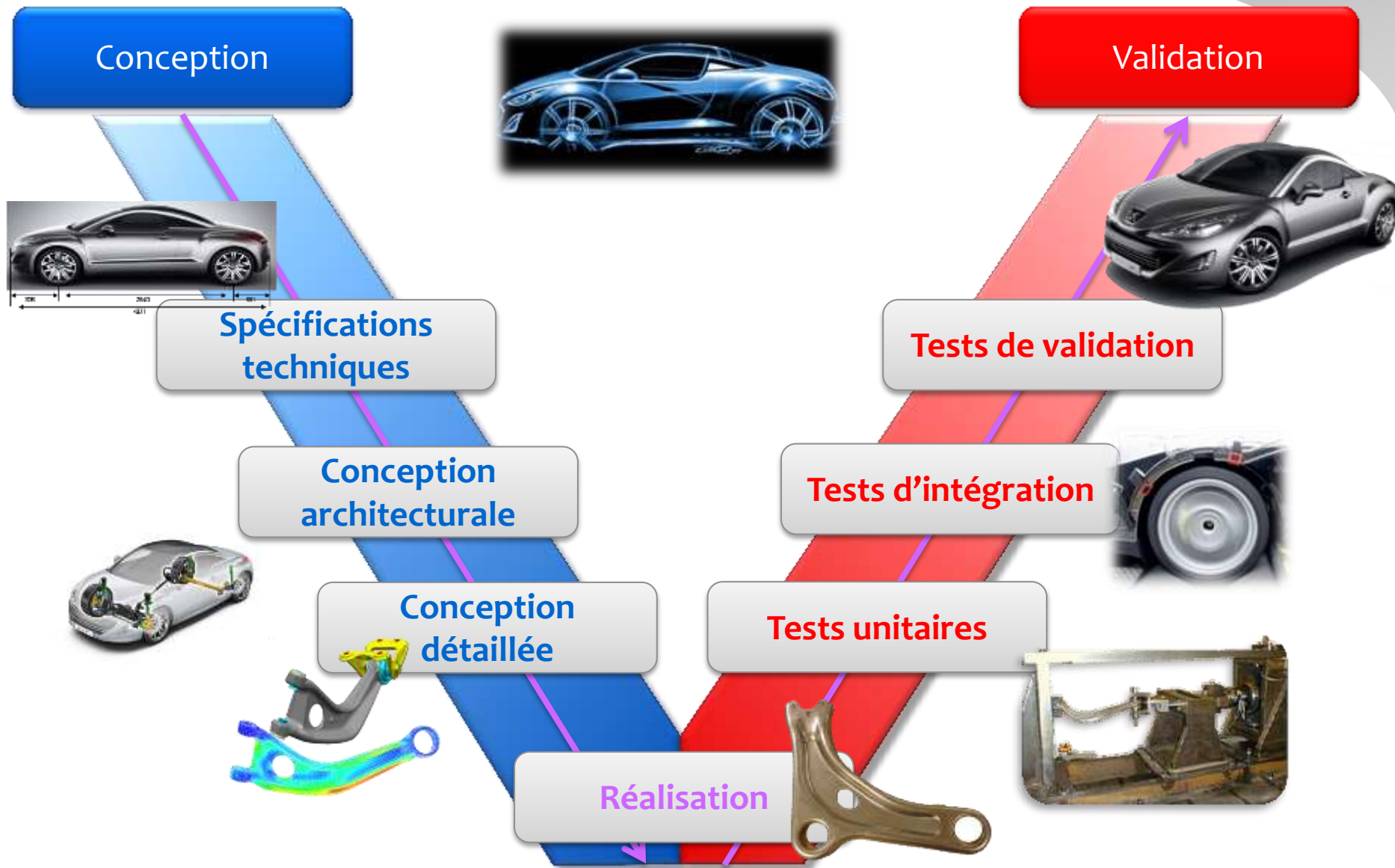
● Aux assemblages



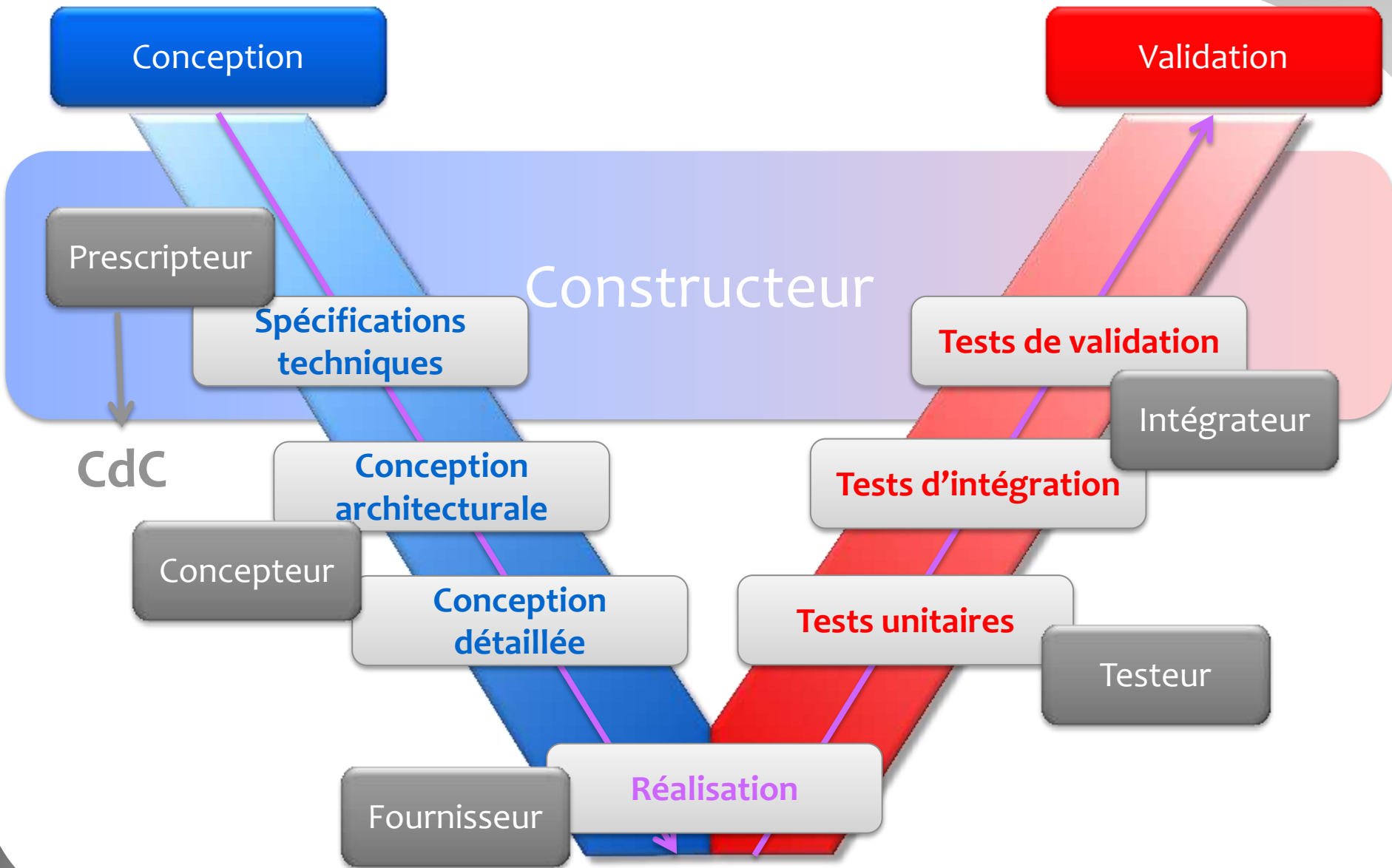
● ...

■ Une certitude, tout peut arriver, **sauf un sinus !**

Vers un changement de paradigme



Vers un changement de paradigme



Réponse industrielle triviale

[Daniel, 1999]

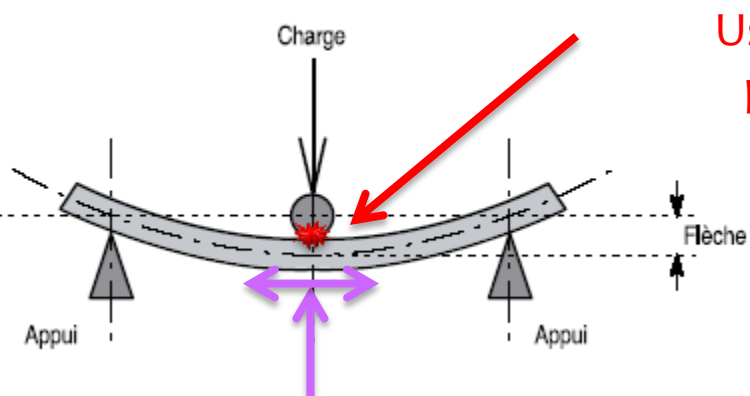
- Je cherche un chargement **représentatif (?)**, **a priori (?)**, **accélééré (?)**
- (Contre-)Exemple



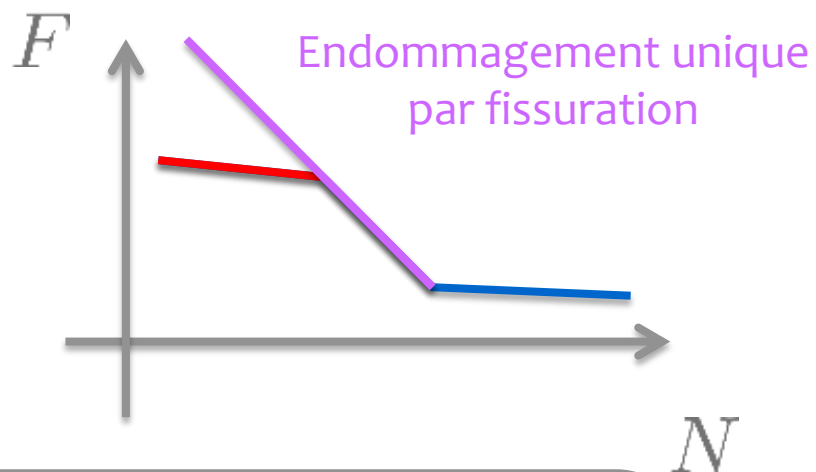
Réponse industrielle triviale

■ Application à l'automobile

● Flexion 3 points des composites



Usure sous
poinçon

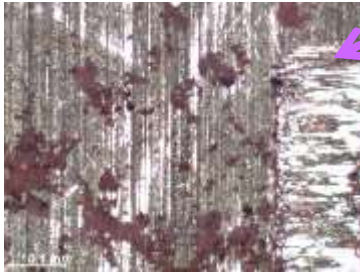
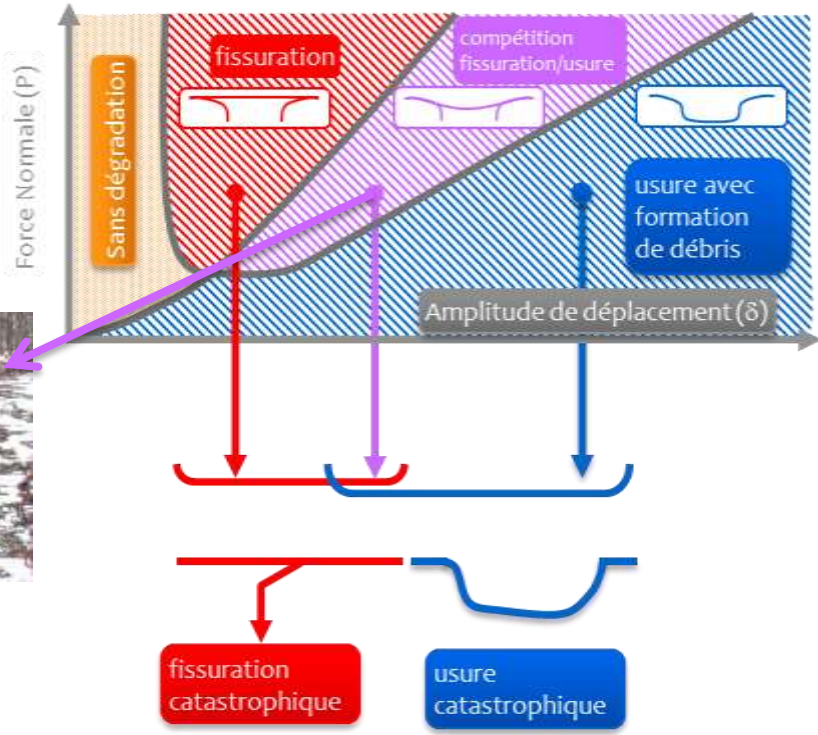
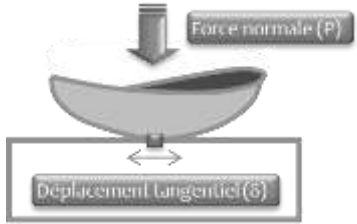
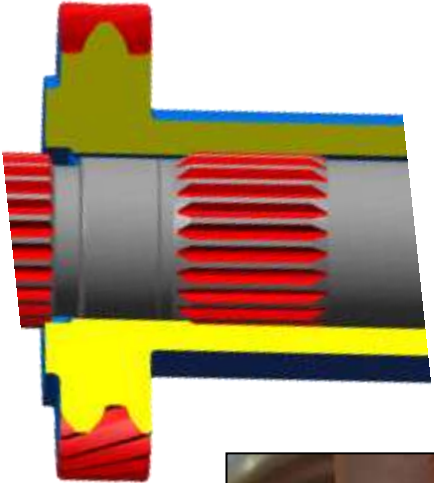


Sans précaution expérimentale, sur une même courbe de Wöhler, 2 modes d'endommagement observés, 2 pentes. En réduisant la pression sous poinçon, on retrouve une unique courbe de Wöhler avec le mécanisme attendu

Réponse industrielle triviale

[Fouvry, 1998, Herrison, 2009]

- Application à l'automobile
 - Flexion 3 points des composites
 - Fretting corrosion dans les cannelures



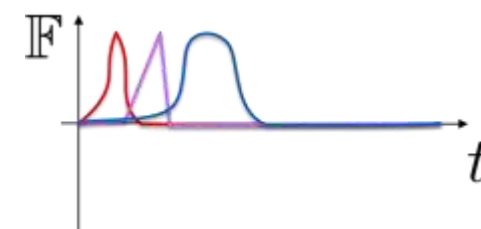
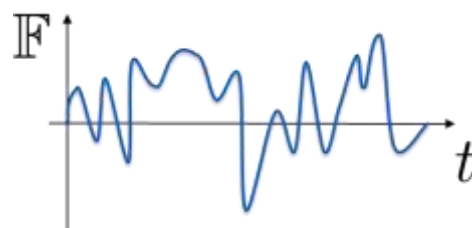
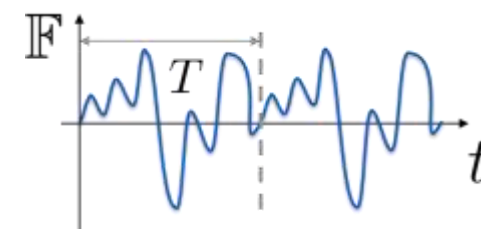
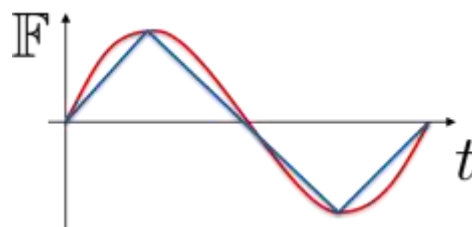
Plan de la présentation

- Introduction
- **Chargements pour la fatigue polycyclique**
- Notion d'équivalent fatigue
- Caractérisation de la durée de vie
- Conclusion

Quels signaux ?

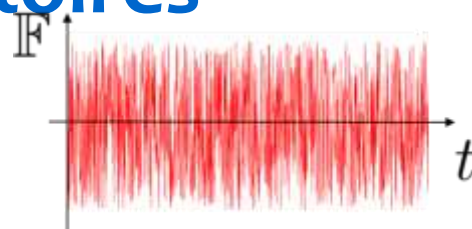
■ Chargements déterministes

- Périodiques
 - ▶ Harmoniques
 - ▶ Bloc répété
- Apériodiques
 - ▶ Entretenus
 - ▶ Impulsifs



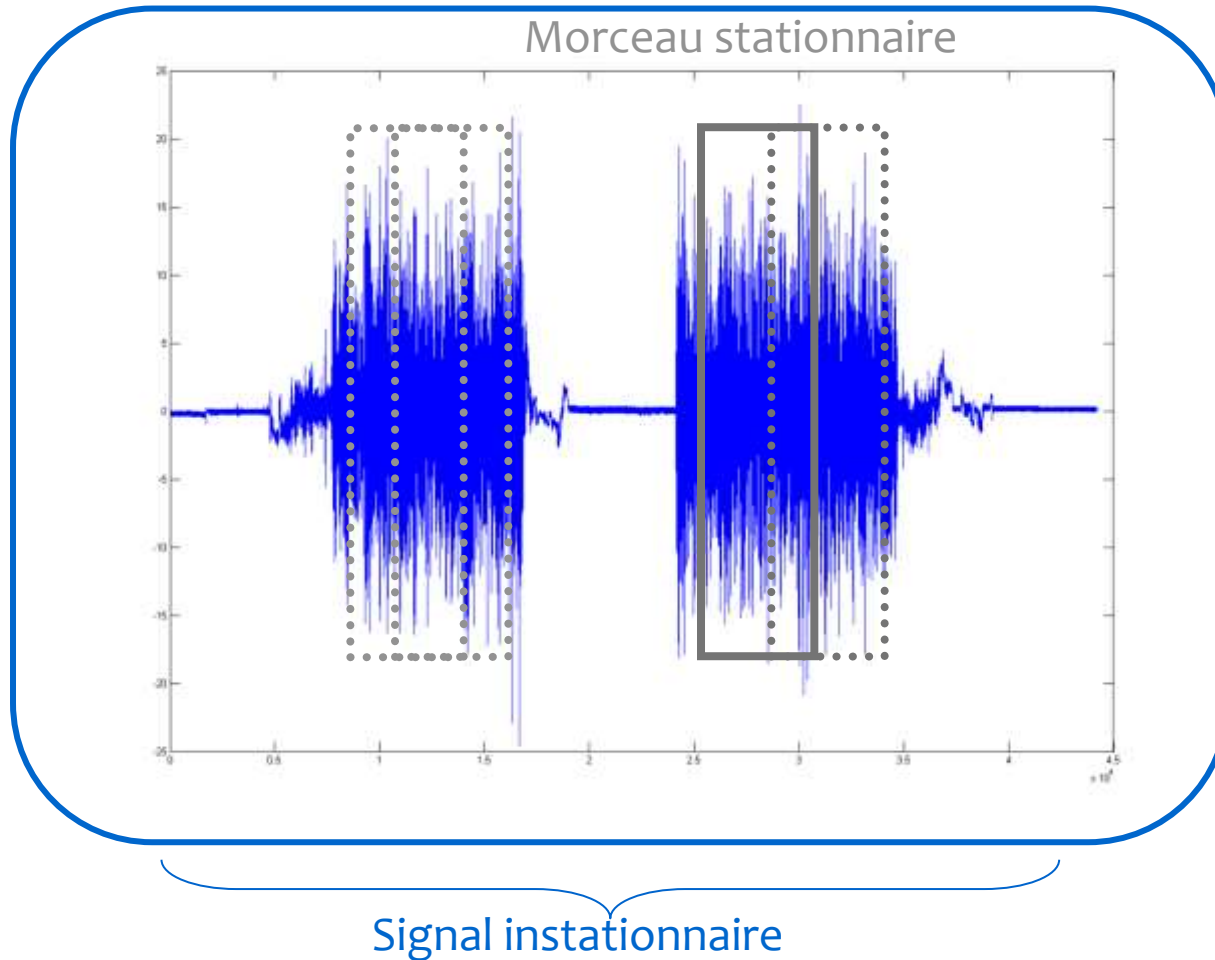
■ Chargements aléatoires

- Stationnaires
- Instationnaires



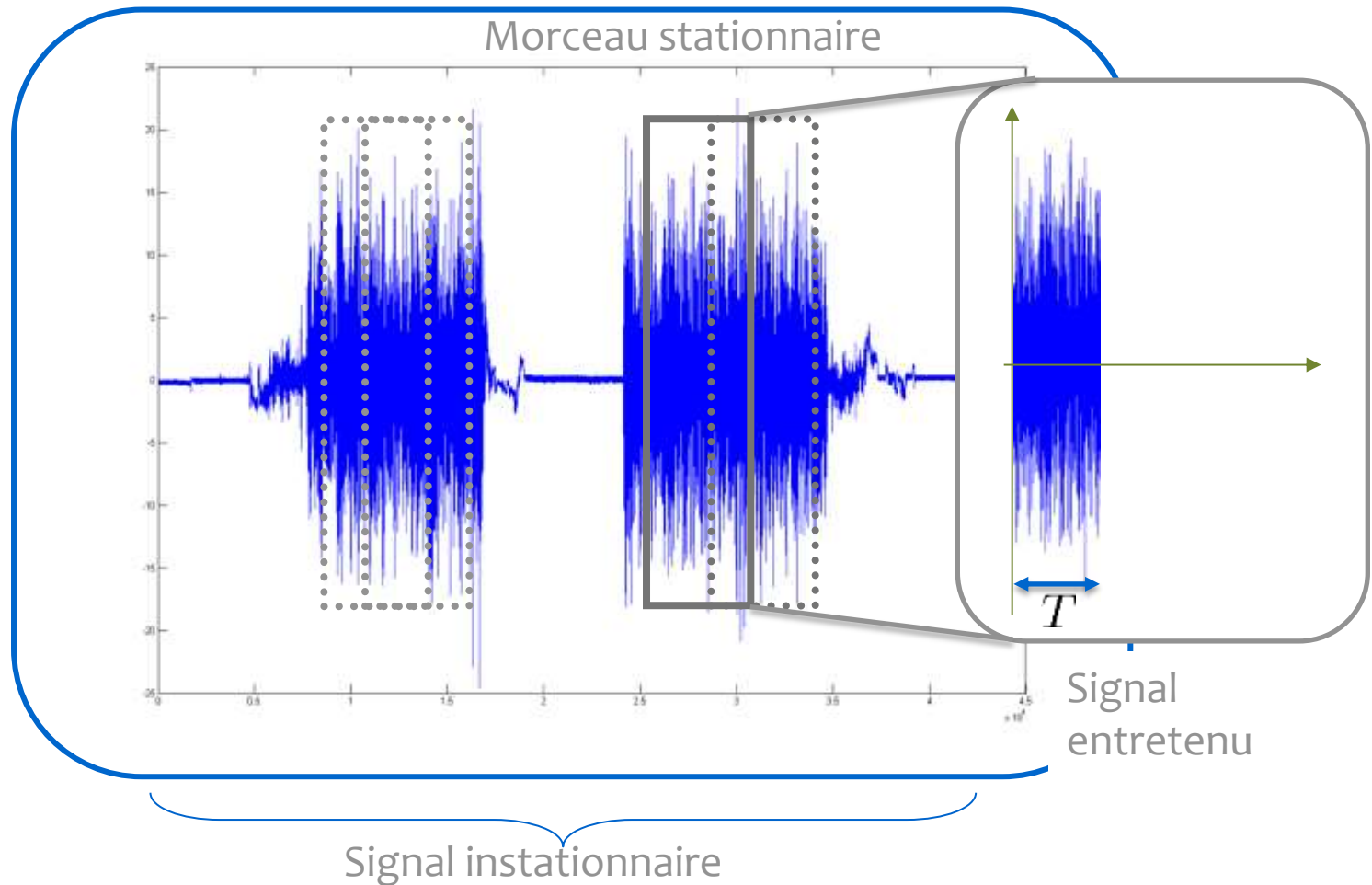
Quels signaux ?

■ Parce que rien n'est jamais simple



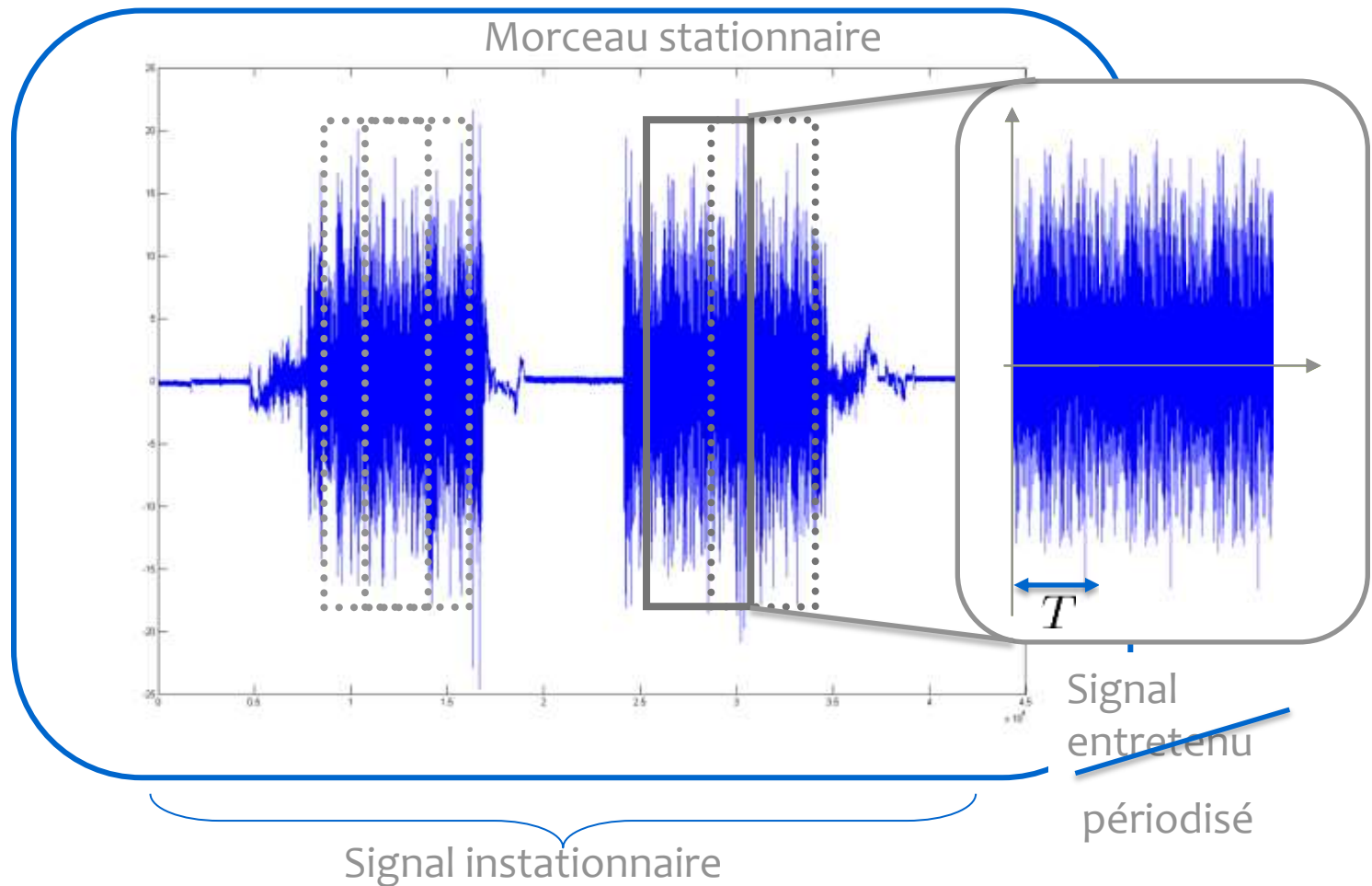
Quels signaux ?

■ Parce que rien n'est jamais simple



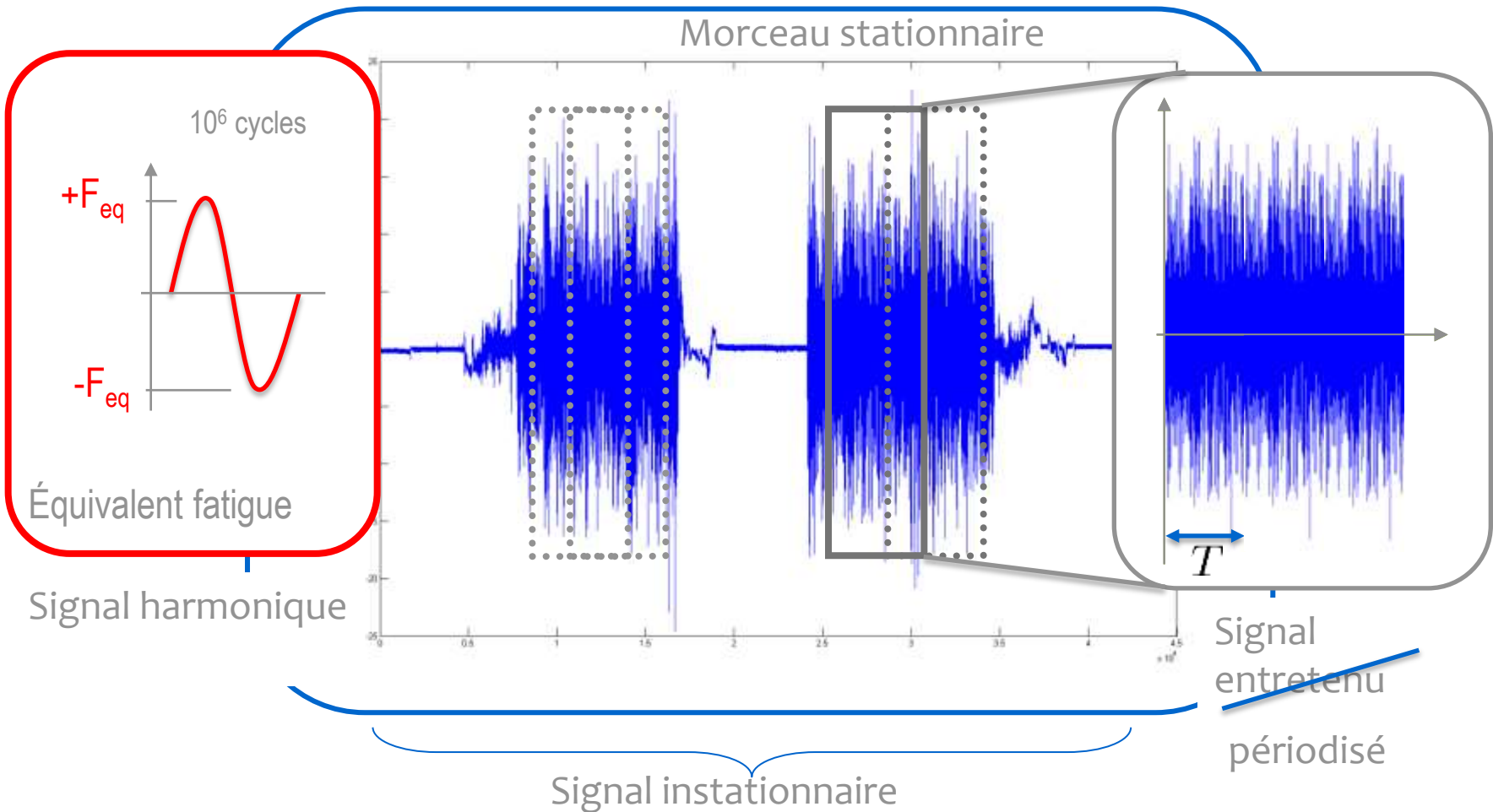
Quels signaux ?

■ Parce que rien n'est jamais simple



Quels signaux ?

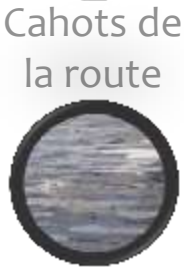
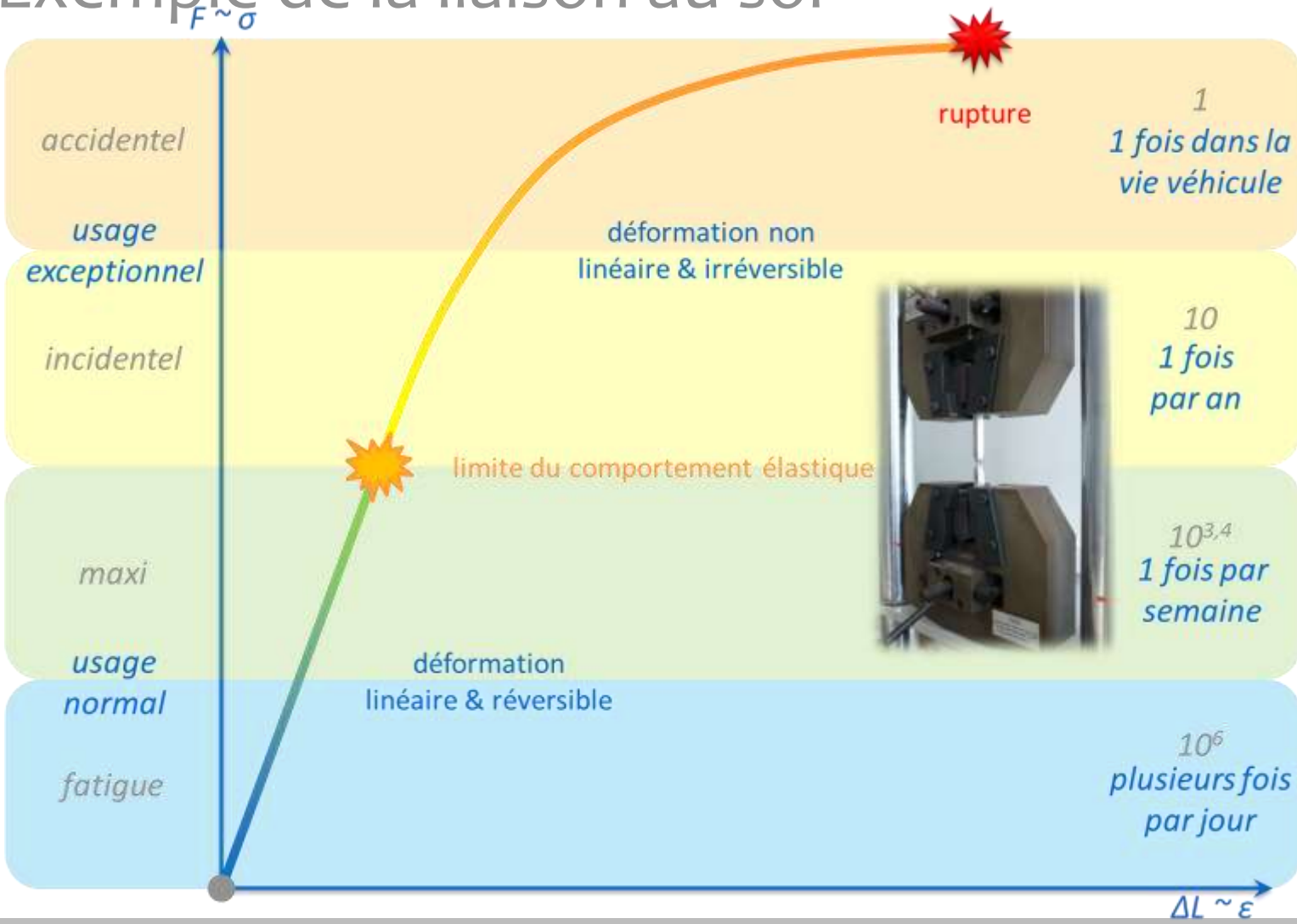
■ Parce que rien n'est jamais simple



Quels dimensionnements ?

© Facchinetti

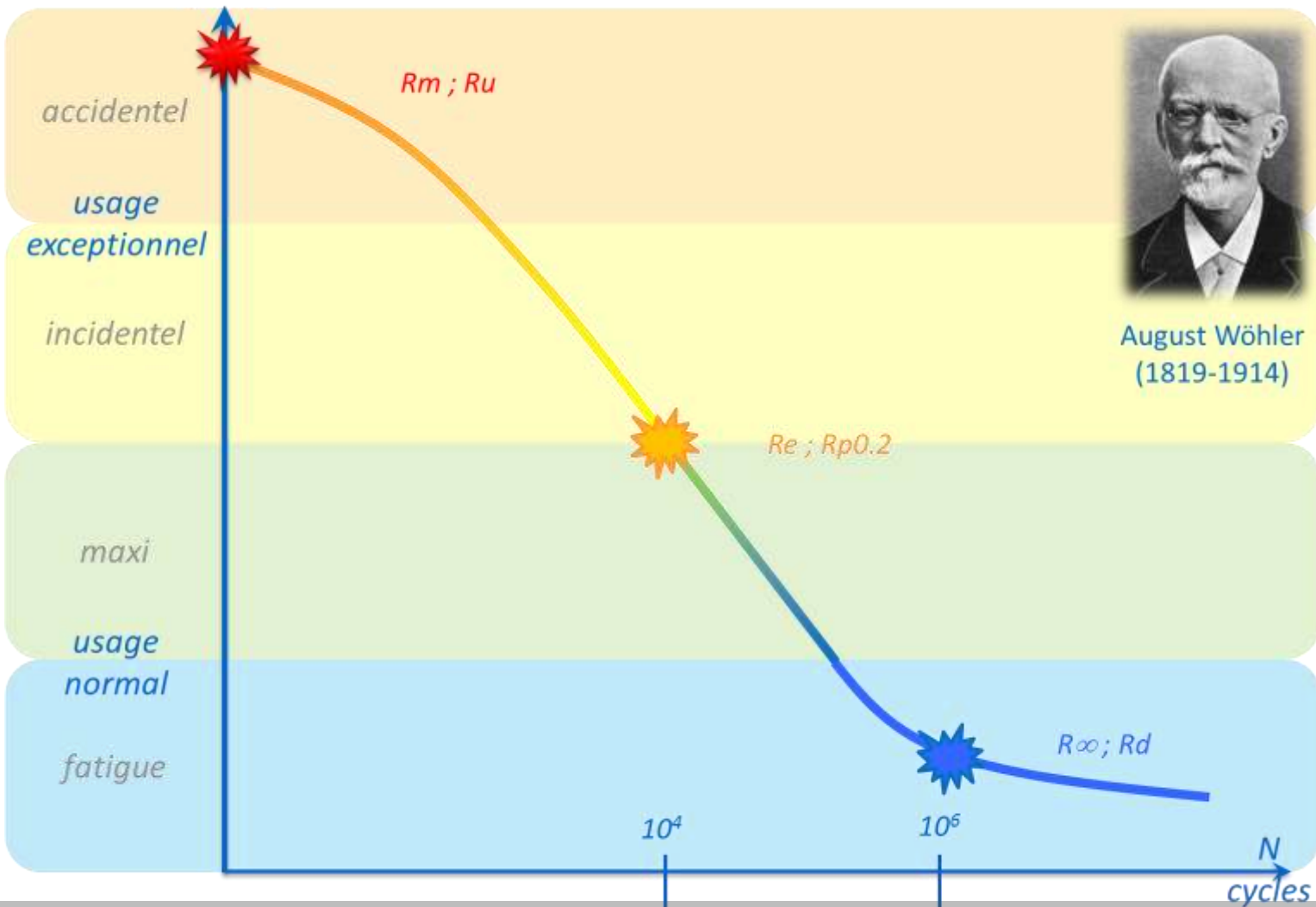
■ Exemple de la liaison au sol



Quels dimensionnements ?

© Facchinetti

■ Exemple de la liaison au sol



August Wöhler (1819-1914)

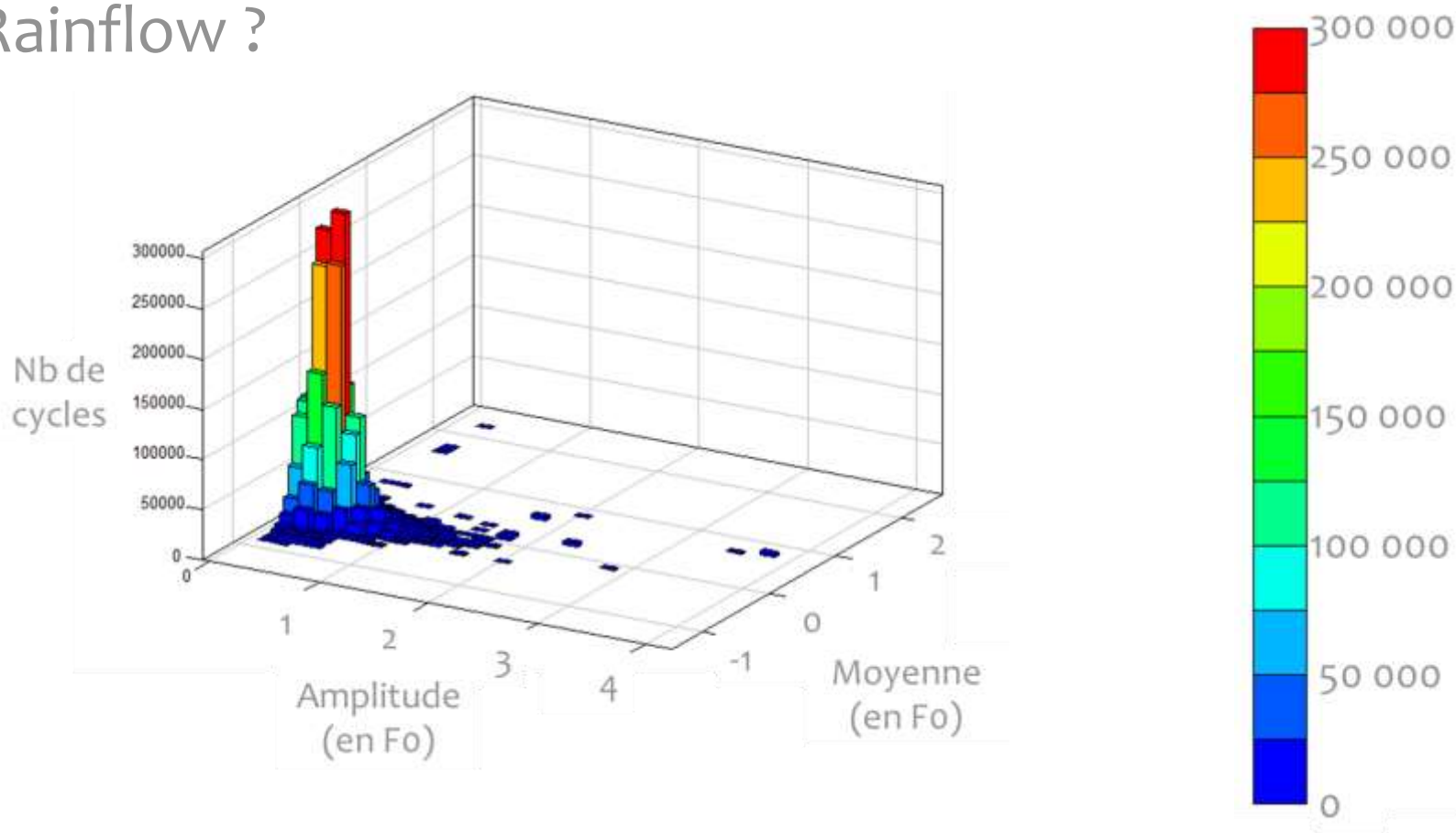
- Crash
- Choc de roue
- Dos d'âne « rapide »
- Cahots de la route

Caractéristiques dimensionnantes

© Szmytka, Oudin

■ Directes

- Amplitude, moyenne, fréquence, DSP, Cycles Rainflow ?



Caractéristiques dimensionnantes

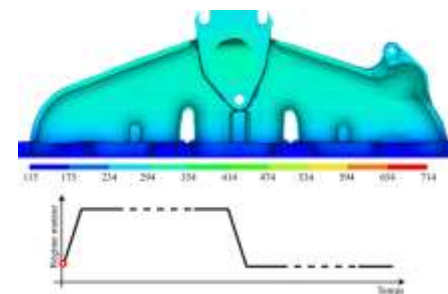
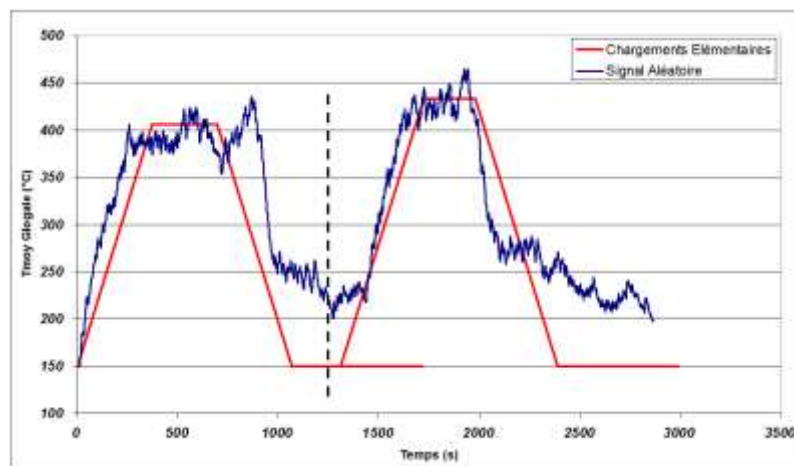
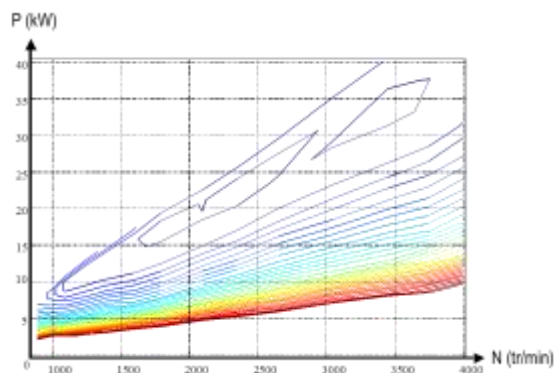
© Szmytka, Oudin

■ Directes

- Amplitude, moyenne, fréquence, DSP, Cycles Rainflow ?

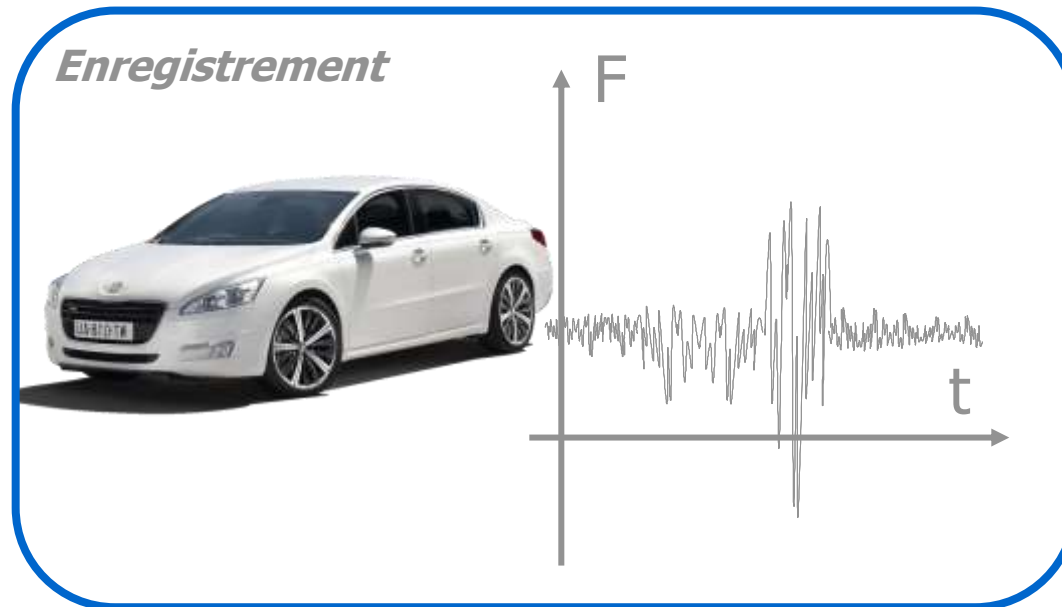
■ Indirectes

- Énergie dissipée, température induite,



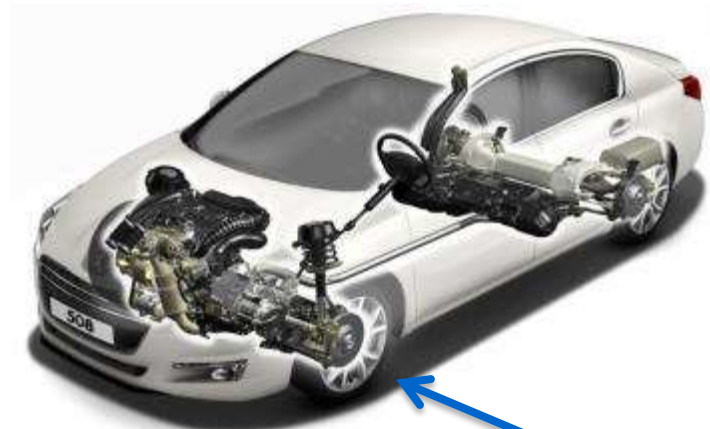
Sources des signaux dans l'industrie

- Mesures en clientèle (quand j'ai déjà la voiture)



Sources des signaux dans l'industrie

- Mesures en clientèle (quand j'ai déjà la voiture)
- Mesures sur piste référencée (idem)

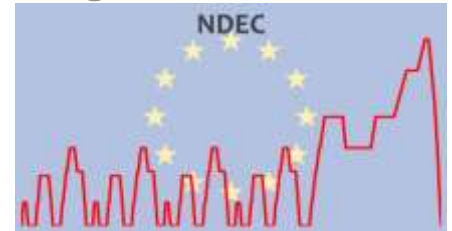


Sources des signaux dans l'industrie

[Heuler et al., 2005]

- Mesures en clientèle (quand j'ai déjà la voiture)
- Mesures sur piste référencée (idem)
- Signaux standardisés

Signaux normatifs



CarLoS
Car
Loading
Spectrum

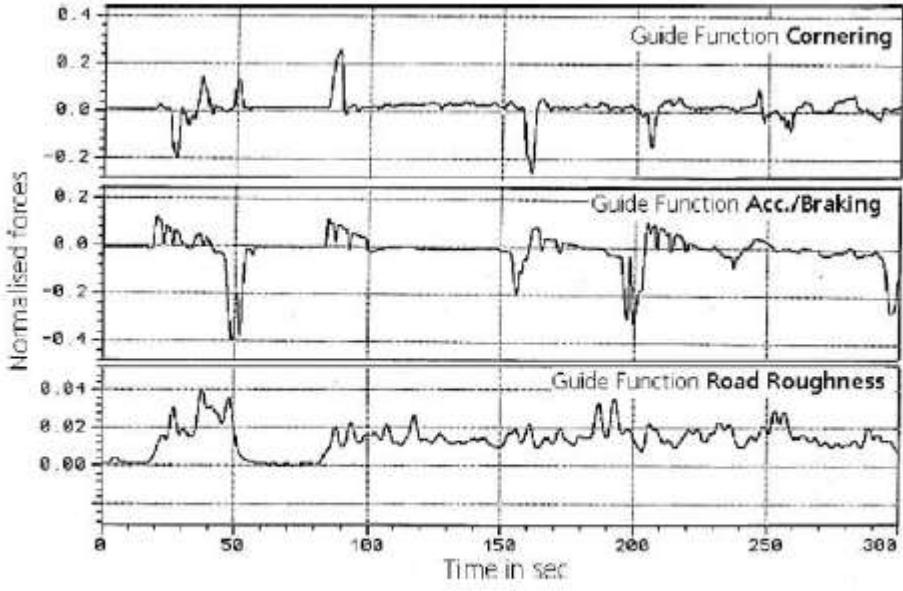
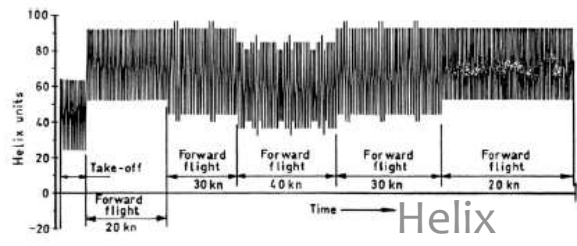


Fig. 7. Guide functions (CARLOS multi): e.g. cornering, sum of front lateral forces.

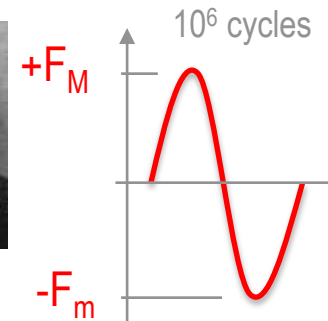


Sources des signaux dans l'industrie

[Schijve, 2003, Sonsino, 2010]

- Mesures en clientèle (quand j'ai déjà la voiture)
- Mesures sur piste référencée (idem)
- Signaux standardisés
- Signaux analytiques

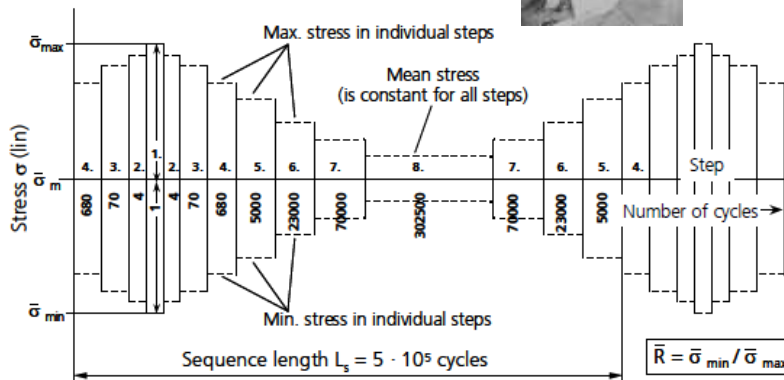
August Wöhler (1819-1914)



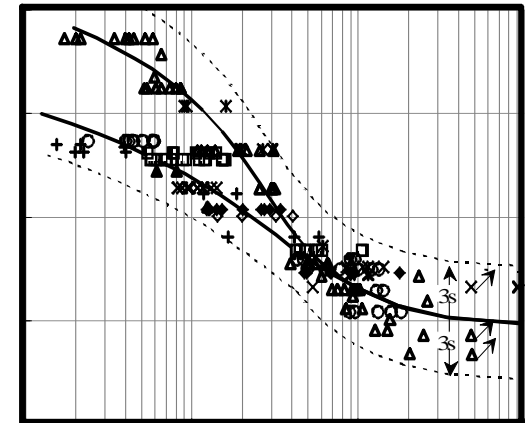
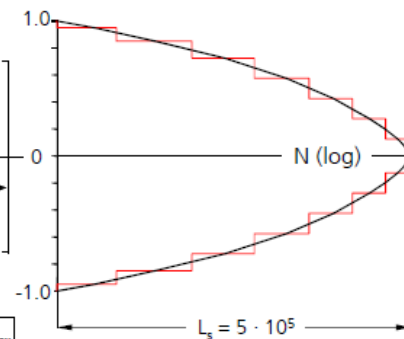
Ernst Gassner 1884-1944



a. Load sequence



b. Cumulative frequency distribution

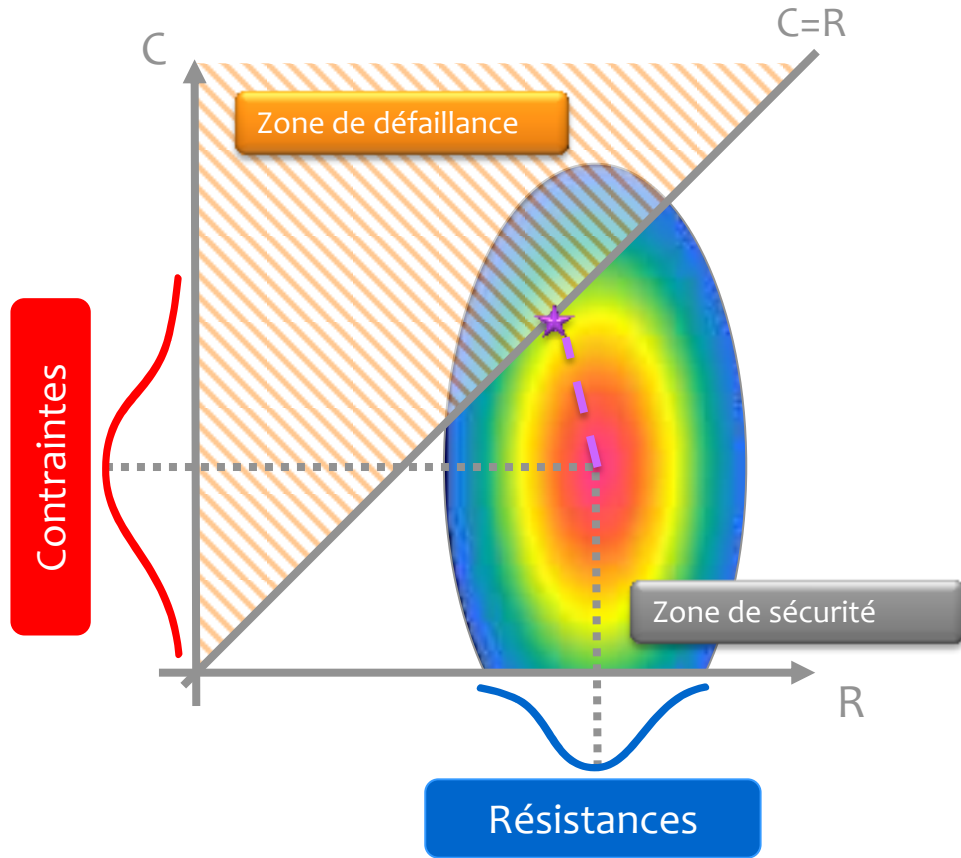


Génération de clients virtuels

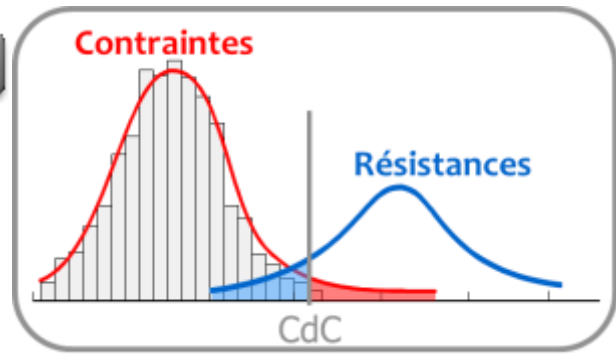


De la notion de sévérité

■ Vers la méthode contrainte-résistance

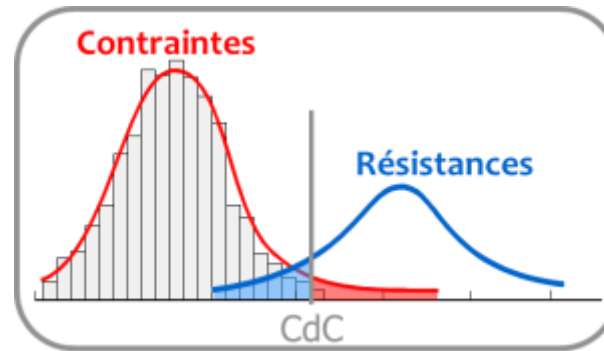


Point de défaillance le plus probable en clientèle



De la notion de sévérité

■ Vers la méthode contrainte-résistance



■ Norme du chargement

- Associée à un phénomène d'endommagement, un critère de tenue et des mesures

Plan de la présentation

- Introduction
- Chargements pour la fatigue polycyclique
- **Notion d'équivalent fatigue**
- Caractérisation de la durée de vie
- Conclusion

Définition

■ Équivalence au sens de la fatigue

2 signaux sont équivalents s'ils produisent les mêmes **réponses en fatigue** sur une structure **donnée**
Ces signaux sont dits avoir **même sévérité**

■ Application à l'endurance illimitée

Si la structure tient la sollicitation F , elle tient **aussi** F^{eq}
Si la structure ne tient pas la sollicitation F , elle ne tient pas **non plus** F^{eq}

Tenir =
respecter
le critère

■ Application à l'endurance limitée

2 signaux sont dits équivalents
ssi ils provoquent la **même durée de vie** de la structure
le **même endommagement**

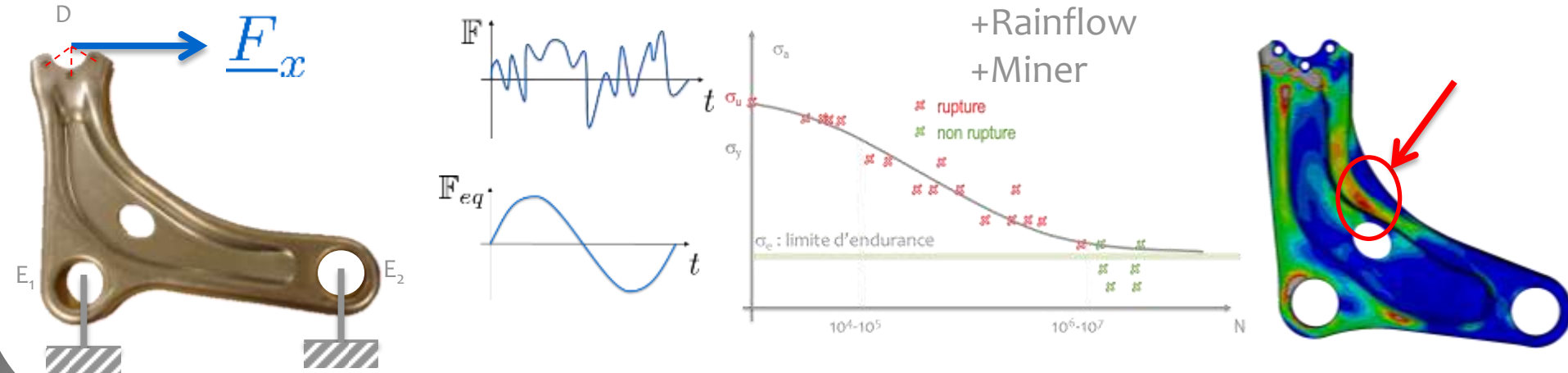
Au sens de la loi de
dommage choisie

Équivalence à structure connue

■ Hypothèse

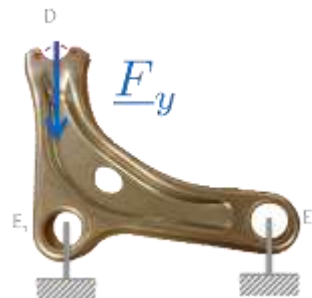
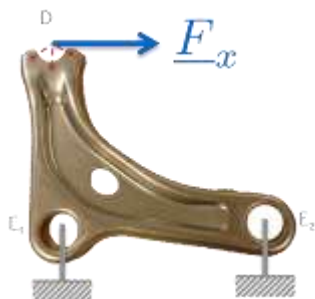
- Structure connue (modèle analytique ou EF)
- Physique de l'endommagement connue
- Critère / loi choisi(e)
- 2 signaux compatibles du critère retenu

■ Exemple en endurance illimitée



Contre-exemples

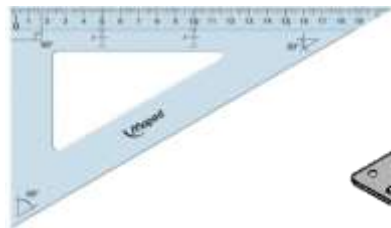
■ Chargements locaux différents :



■ Signaux incohérents du critère retenu

- Ou utiliser 2 critères différents

■ Comparer 2 pièces drastiquement différentes



Équivalence à structure inconnue

- Objectif de l'équivalence à **structure connue**
 - Validation expérimentale après réalisation
 - Utilisation de signaux différents en conception et en validation
 - Disponibilité de mesure sur prototype
 - Essais sur sous-structures
- Et en conception ?

Trouver un signal de **sévérité équivalente** à la **sévérité clientèle** pour toutes les conceptions **possibles**

Fondements physiques

■ Iso-conception

- Pas de nouveau de matériau
- Pas de géométrie « exotique »

■ Iso-endommagement

- Pas de nouveau phénomène prévisible

■ Saint-Venant

- Pas d'effets locaux du chargement

■ Cohérence avec l'équivalence à structure connue



Adhémar Jean-Claude
Barré de Saint-Venant
(1797 - 1886)

Concepts fondateurs

- Ensemble des conceptions possibles

$$\Omega = \{\text{Structures } S\}$$

- Hypothèse :

- La réponse globale de la structure au chargement est caractérisée par la réponse locale de son ou ses maillons faibles \underline{x}_c

$$\Omega_c = \{\underline{x}_c \in S / \forall S \in \Omega\}$$



2 signaux sont équivalents pour un phénomène d'endommagement ssi ils provoquent la même réponse locale pour tous les points critiques possibles

Illustration pratique

- Choix d'une loi de **dommage locale** normalisée en **contrainte**

$$f(\underline{\underline{\sigma}}, p) = N \quad p \text{ paramètres de la loi}$$

- Endurance illimitée : $N = 0$ coefficient de sécurité
- Endurance limitée : N homogène à une durée de vie

- Choix d'une classe de signaux compatibles de la loi $\mathbb{F} = \{\underline{F}(t)\}$

■ Hypothèses

- Endurance illimitée
 - Réponse élastique linéaire
- $$\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}, t) = \underline{\underline{K}}(\underline{x}) \cdot \underline{F}(t)$$

$$f(\underline{\underline{\sigma}}, p) = \tilde{f}(\underline{\underline{K}}(\underline{x}), F(t), p) = N$$

$$\Omega_c = \left\{ \underline{\underline{K}}_c = \underline{\underline{K}}(\underline{x}_c) / \forall S \in \Omega \right\}$$

Hypothèse du maillon faible

- La tenue d'une structure est caractérisée par celle de son maillon faible



$$\min_{\underline{x} \in S} \left[\tilde{f}(\underline{\underline{K}}(\underline{x}), F(t), p) \right] = \tilde{f}(\underline{\underline{K}}(\underline{x}_c), F(t), p)$$

La fonction \tilde{f} définit une classe d'équivalence en endommagement

$$\underline{F}_{eq} \approx \underline{F}$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\forall \underline{\underline{K}}_c \in \Omega_c, \tilde{f}(\underline{\underline{K}}_c, F(t), p) = \tilde{f}(\underline{\underline{K}}_c, F_{eq}(t), p)$$

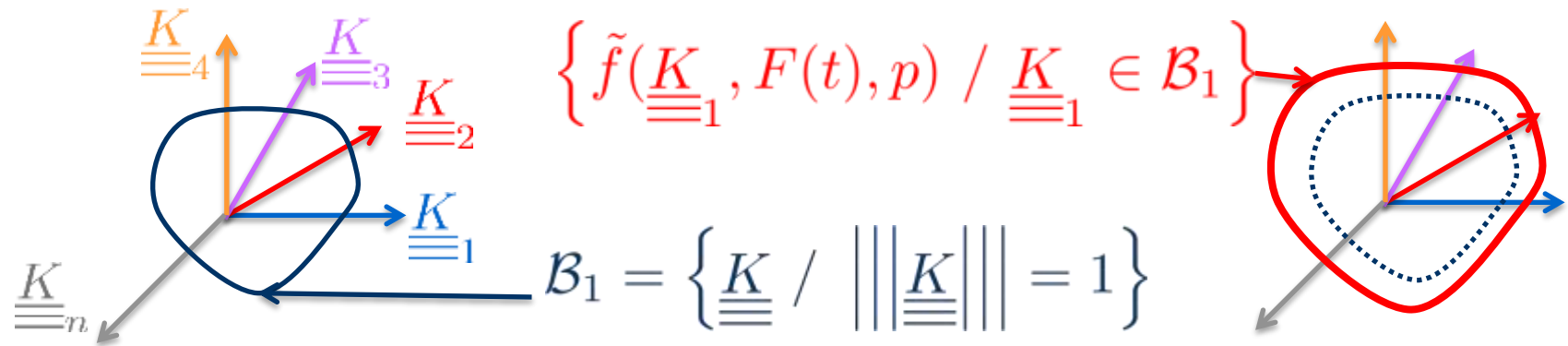
Classe d'équivalence et normes

■ Norme dans l'espace des classes de structures $\left| \left| \left| \underline{\underline{K}} \right| \right| \right|$

$$\forall (\underline{\underline{K}}_1, \underline{\underline{K}}_2) \in \Omega_c^2, \left| \left| \left| \underline{\underline{K}}_1 \right| \right| \right| \geq \left| \left| \left| \underline{\underline{K}}_2 \right| \right| \right| \Leftrightarrow$$

$$\tilde{f}(\underline{\underline{K}}_1, F_{eq}(t), p) \geq \tilde{f}(\underline{\underline{K}}_2, F_{eq}(t), p)$$

- Ainsi, la fonction de dommage est monotone des structures
 - Il suffit de connaitre la valeur de la fonction sur la boule unité



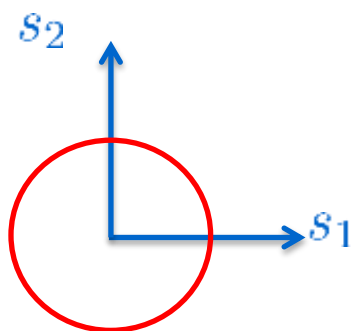
Classe d'équivalence et normes

- Norme dans l'espace des classes de structures $\left| \left| \underline{\underline{K}} \right| \right|$

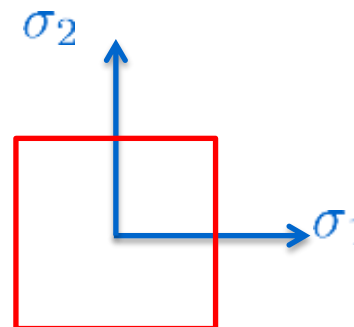
$$\forall \left(\underline{\underline{K}}_1, \underline{\underline{K}}_2 \right) \in \Omega_c^2, \left| \left| \underline{\underline{K}}_1 \right| \right| \geq \left| \left| \underline{\underline{K}}_2 \right| \right| \Leftrightarrow$$

$$\tilde{f}(\underline{\underline{K}}_1, F_{eq}(t), p) \geq \tilde{f}(\underline{\underline{K}}_2, F_{eq}(t), p)$$

- Ainsi, la fonction de dommage est monotone des structures
 - Il suffit de connaître la valeur de la fonction sur la boule unité
- Exemple des tôles minces



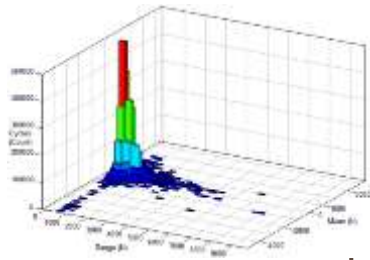
\tilde{f} : critère de Von Mises



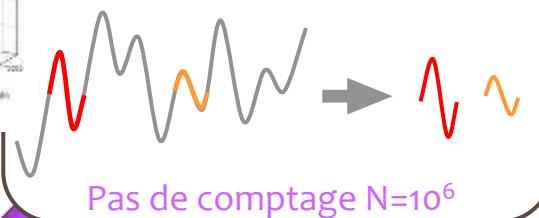
\tilde{f} : critère en contrainte max

Application pratique mono-entrée

[Thomas et al., 1999]

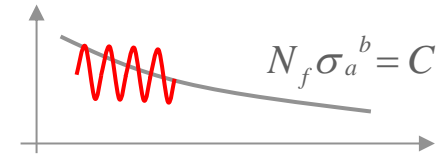


Comptage Rainflow



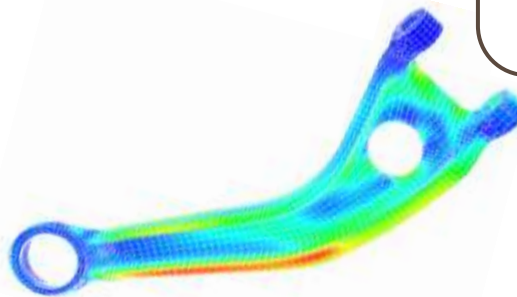
Pas de comptage N=10⁶

Endommagement local
Loi de Basquin + Gerber



Passage Global Local
**Hypothèse de linéarité
des contraintes en fct des efforts**

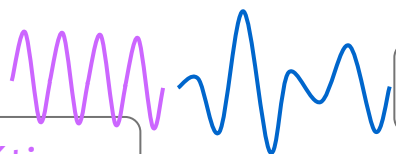
$$\sigma = K_f \cdot F$$



F_{eq} est la mesure de la
sévérité du signal

Sollicitations de la structure
sous forme d'efforts

F_{eq}



Signal mesuré

Cumul d'endommagement
Règle de Miner

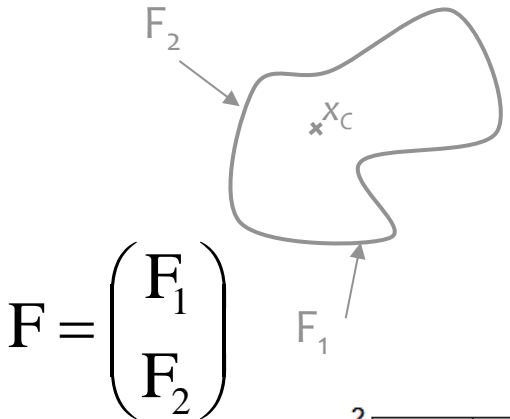
$$D = \sum_i \frac{1}{N_{fi}} \quad D = D(\text{red wave}) + D(\text{orange wave})$$

$$D_{eq}(F_{eq}) = D_{signal}$$

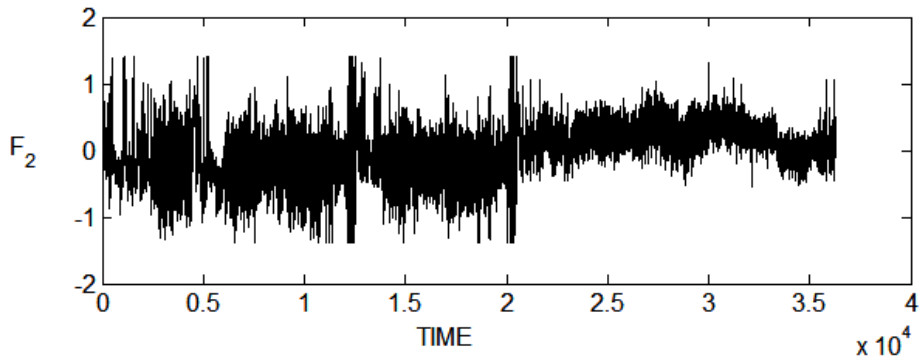
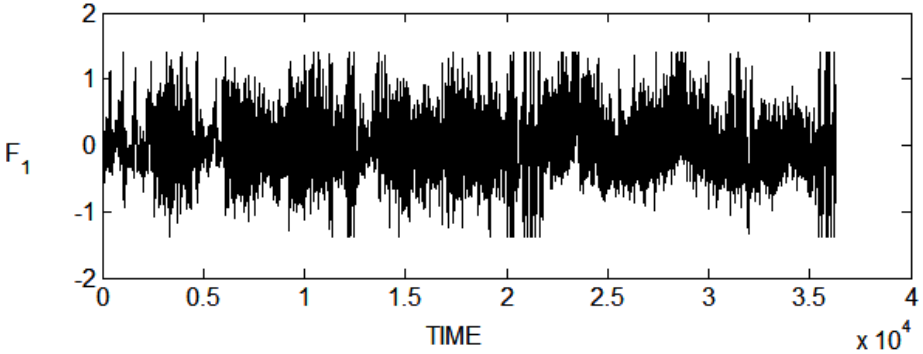
Signal synthétique

Application pratique multi-entrée

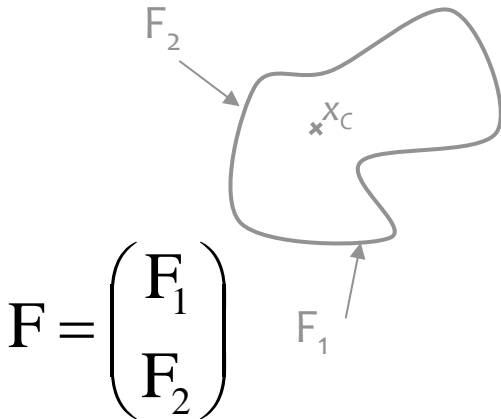
[Morel 1998, Genet, 2006]



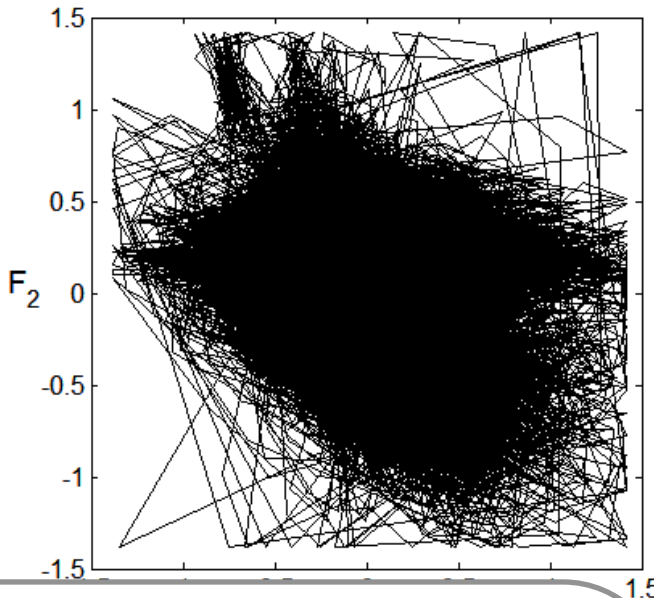
$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$$



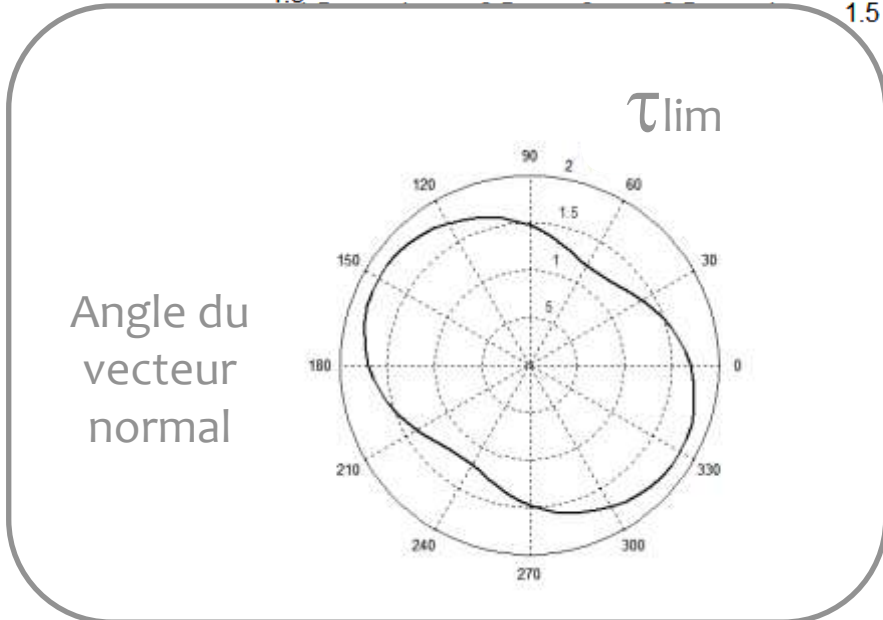
Application pratique multi-entrée



$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \end{pmatrix}$$



[Morel 1998, Genet, 2006]



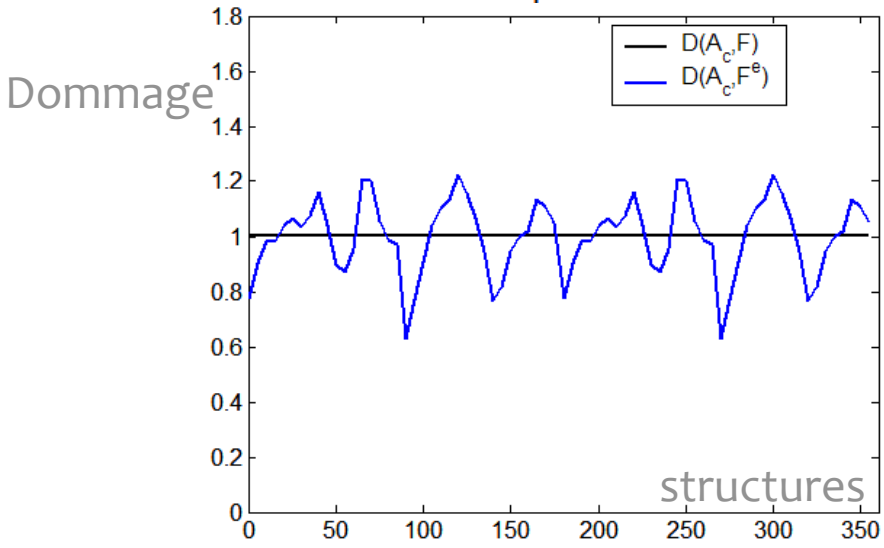
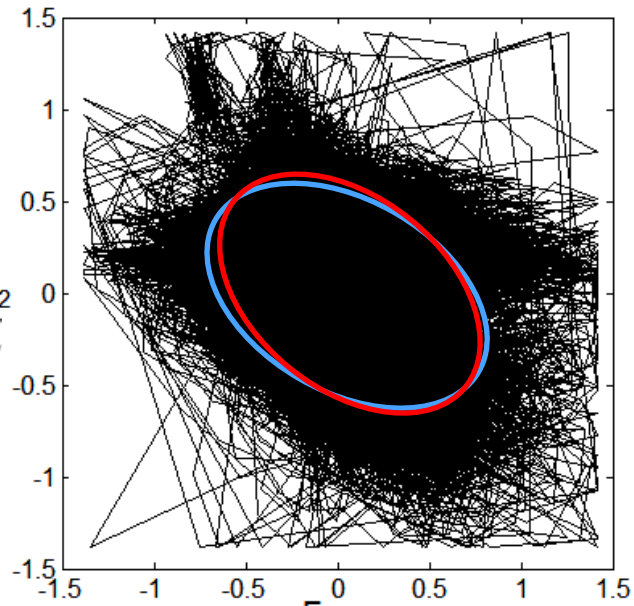
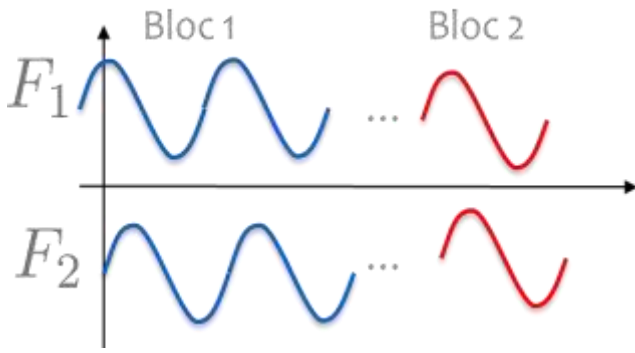
Critère de Morel Simplifié

$$N_{seq,R} = \frac{2q\tau_{lim}}{\sum_k (\tau_{ai} - \tau_{lim})_+}$$

$$D_{seq} = \frac{N_{seq}}{N_{seq,R}}$$


Application pratique multi-entrée

[Morel 1998, Genet, 2006]



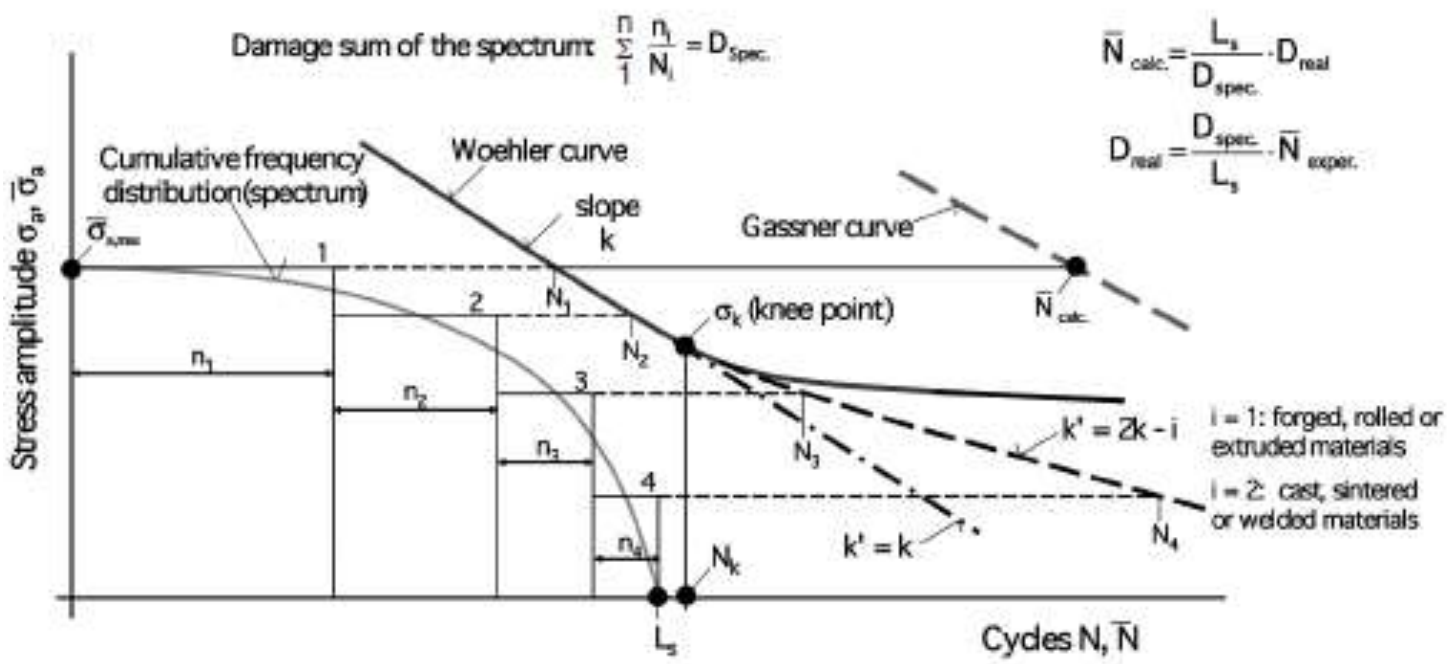
Plan de la présentation

- Introduction
- Chargements pour la fatigue polycyclique
- Notion d'équivalent fatigue
- **Caractérisation de la durée de vie**
- Conclusion

Validation expérimentale

[Sonino, 2010]

■ Allemagne / France

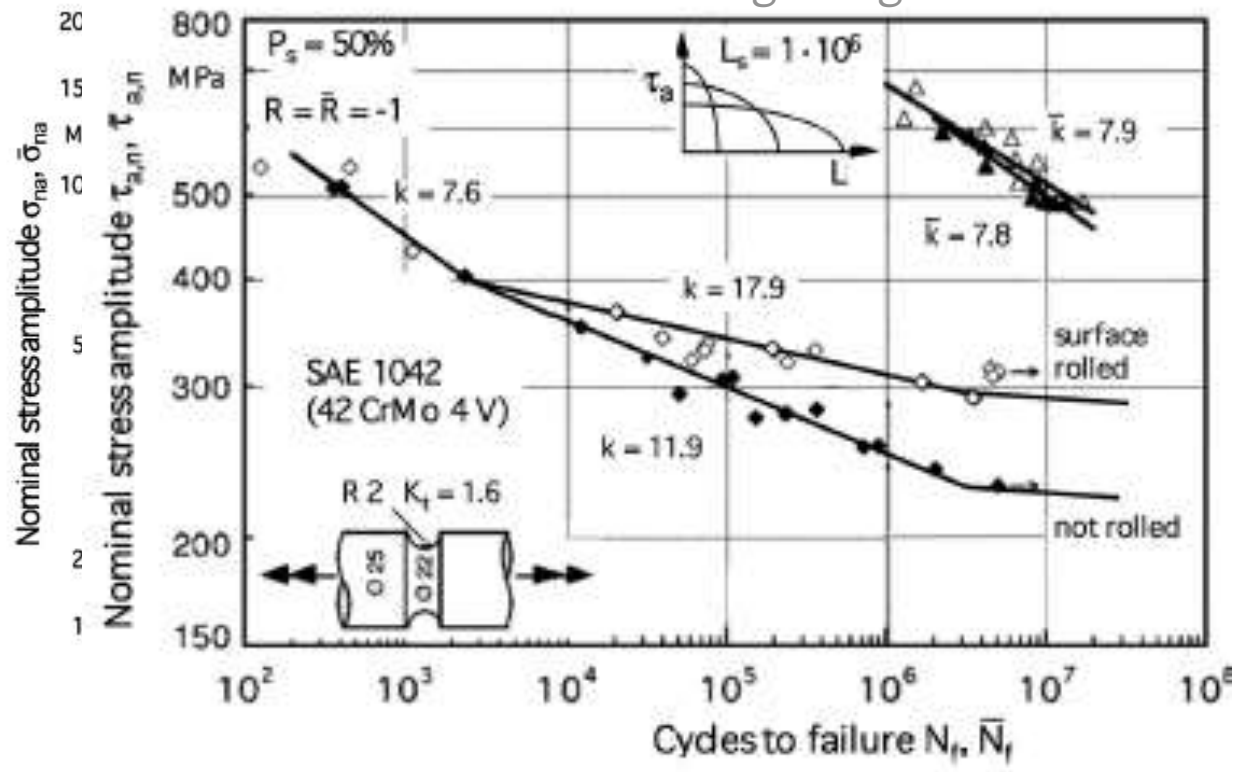


Effet d'histoire

[Sonino, 2010]

■ De la pertinence du cumul de Miner

Influence du galetage



Réduction de signal

■ De l'intérêt de la méthode



Plan de la présentation

- Introduction
- Chargements pour la fatigue polycyclique
- Notion d'équivalent fatigue
- Caractérisation de la durée de vie
- Conclusion

Conclusion

- Dimensionner oui, mais avec le bon signal !

- Méthode limitée
 - En critère de fatigue
 - En forme de signaux équivalents
 - En application

- Avis aux bonnes volontés : Venez au GT « Fatigue et incertitude » le 2 Février !

« On n'est jamais sûr de rien, mais on a le droit d'avoir de la chance »

Georges Perroud (grand philosophe sochalien)

MERCI DE VOTRE ATTENTION