

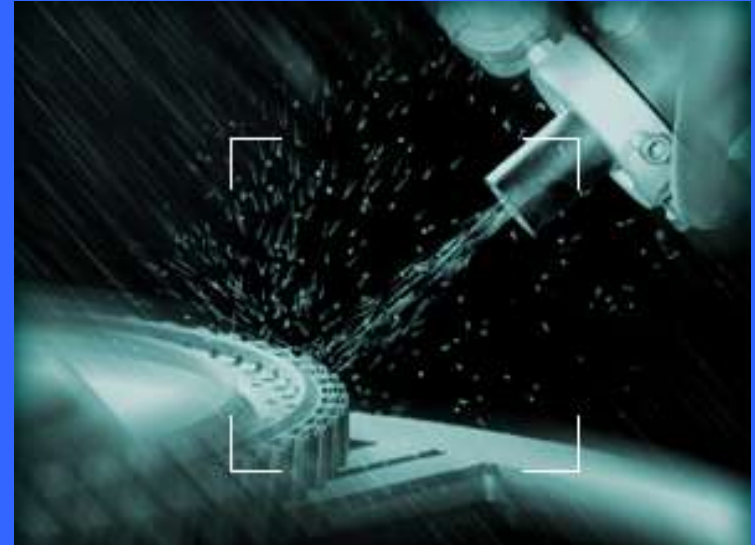
Simulations et Modélisations fiabilistes de la tenue en fatigue des pièces mécaniques traitées superficiellement par voie mécanique : *cas du grenailage de précontrainte contrôlé et du choc laser*

Par Raouf FATHALLAH

*Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse - Tunisie
Responsable du groupe Fatigue au LGM ENI Monastir*



Procédé du grenailage de précontrainte



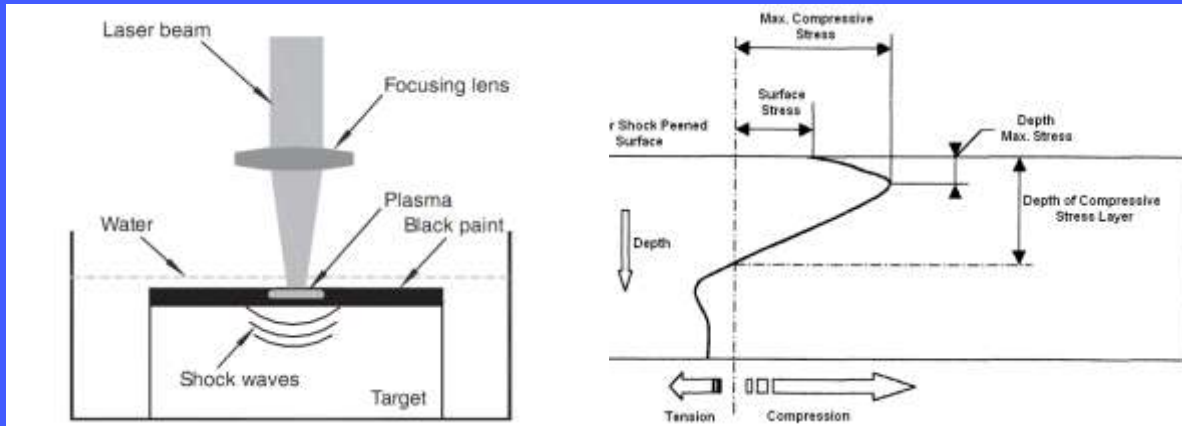
Principe : projection de billes dures à des vitesses, relativement, élevées sur les surfaces des pièces métalliques.

Effets favorables: (i) Consolidation des couches superficielles & (ii) genèse d'un profil de contraintes résiduelles de compression,

Objectifs: amélioration de la résistance à la fatigue polycyclique et à la corrosion sous contraintes des pièces traitées,

Applications: automobile, aéronautique, aérospatial, naval, transmissions mécaniques, ponts, assemblages soudés, pétrochimie, ..

Procédé du Choc Laser



K. Ding et al , 2006

Principe: Le choc laser est un traitement de surface utilisant la pression générée par les plasmas induits par un laser impulsif (régime nanoseconde, densité de puissance 2-10 GW/cm²).

Effets favorables: Génération d'un profil de contraintes résiduelles de compression (4x plus que le GP en profondeur).

Objectifs: Amélioration de la résistance à la fatigue polycyclique et à la corrosion sous contraintes des pièces mécaniques,

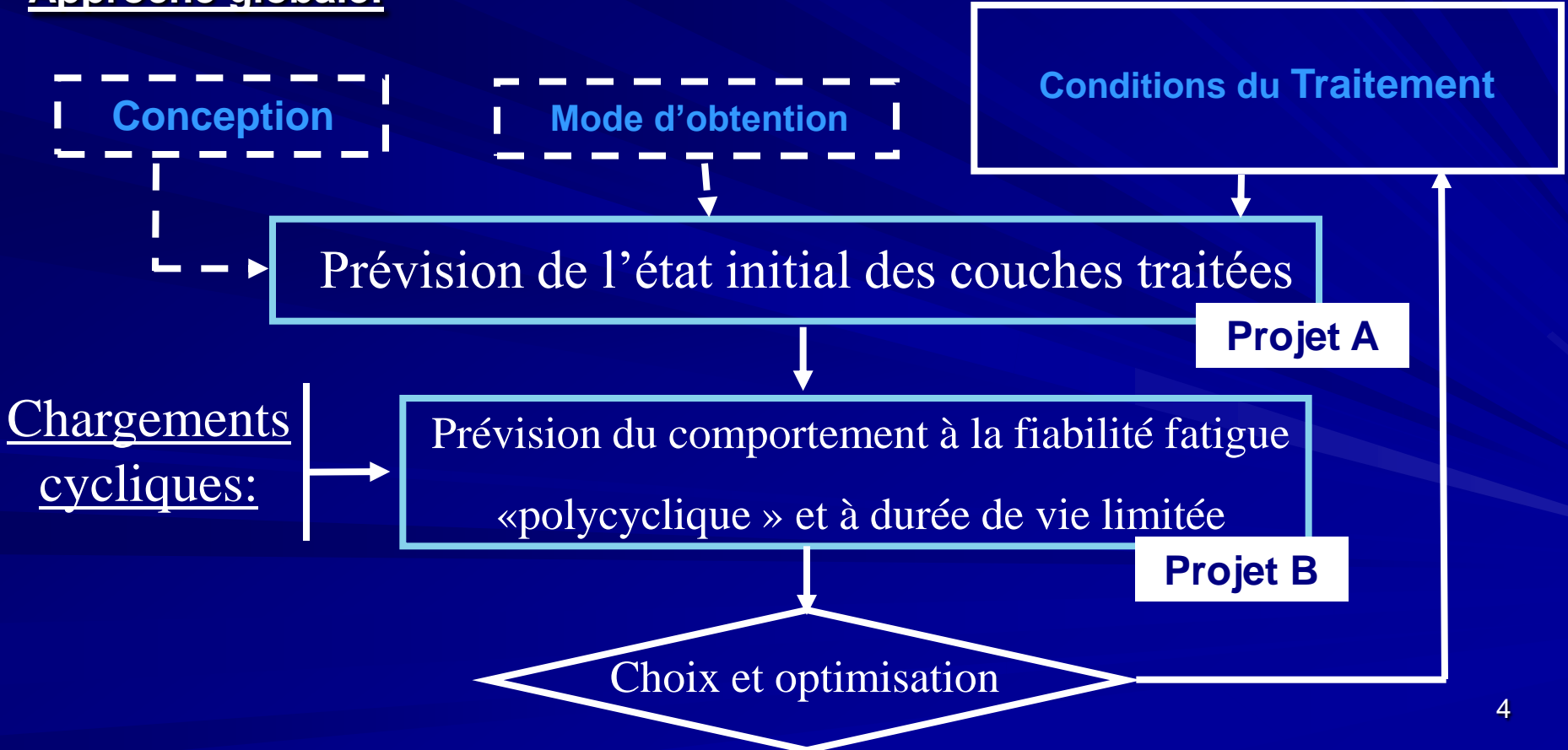
Applications: Aéronautique, Centrale nucléaire, Militaire, etc.

Objectif et approche globale du projet

Objectif du projet de recherche:

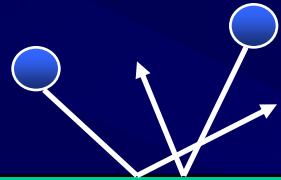
- développement d'une méthode complète de dimensionnement à la fatigue des pièces traitées.
- optimisation des paramètres des deux procédés

Approche globale:

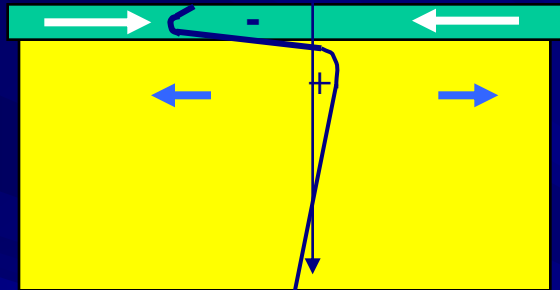


Modifications des propriétés des surfaces par le grenailage de précontrainte

Effet d'ordre mécanique:



Profil des contraintes résiduelles



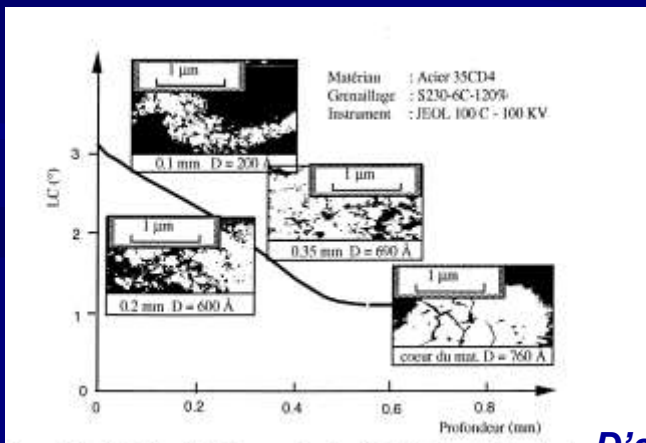
Effet sur la fatigue:

Retardement de la phase d'amorçage (effet faible)

Retardement de la phase de propagation des fissures (efficace)

éventuellement risque d'amorçage en sous-couches si la plaque est mince.

Effet d'ordre métallurgique:



Durcissement ou Adoucissement
Autres effets métallurgiques possibles.

Effet sur la fatigue:

Cas du durcissement: retardement de la phase d'amorçage (effet important)

Effet contraire dans le cas d'un adoucissement.

D'après thèse Hakimi, 1987

Modifications des propriétés des surfaces grenillées

Effet d'ordre micro- géométrique:

Le grenillage de précontrainte contrôlé induit une modification de l'état de surface initial.



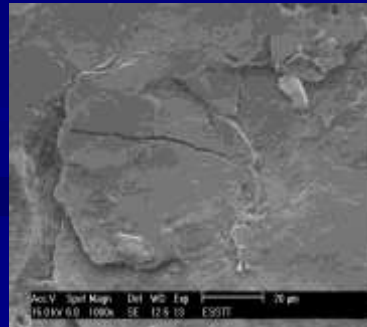
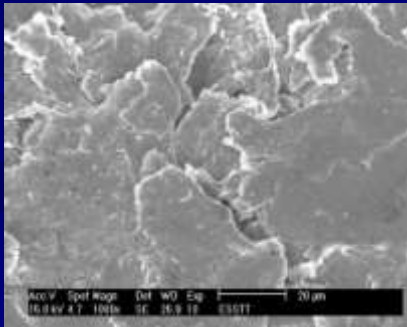
Effet sur la fatigue:

*Si l'état initial est favorable:
risque de dégrader l'état de surface et dégradation de la limite d'endurance de la pièce traitée.*

*Si l'état initial est moins favorable & la taille de bille est convenablement choisie:
l'état de surface peut être amélioré*

Effet sur l'intégrité de la surface:

Endommagement superficiel



Effet sur la fatigue:

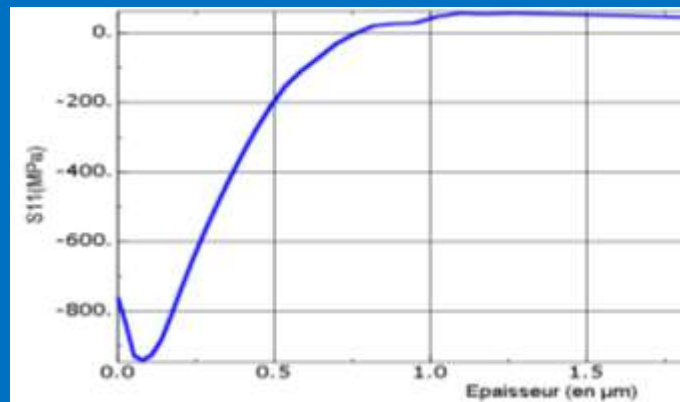
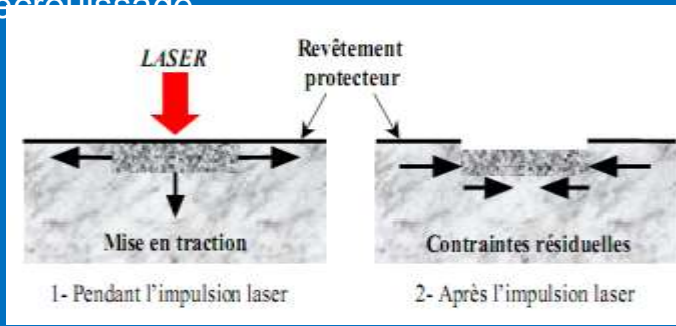
Ces défauts sont des sites potentiels d'amorçage des fissures de fatigue.

Défauts d'intégrité de la surface: écaillage, replis de métal, microfissures, ...

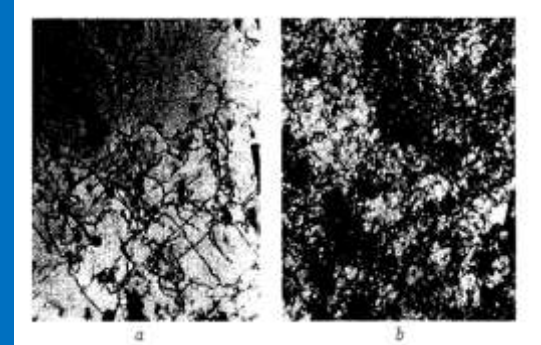
Modifications des propriétés des surfaces traitées par Choc Laser

Effet mécanique

- Génération d'un profil de contraintes résiduelles de compression.
- Déformation plastique → Faible écaillage



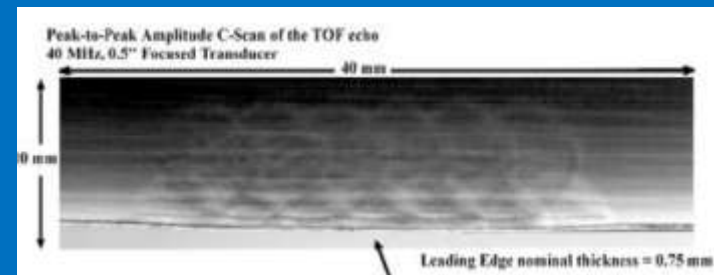
Effet métallurgique



- Les effets métallurgiques se manifestent uniquement dans le cas de non usage de la couche thermo protectrice .
- Effet faible, augmentation de la densité des dislocations, durcissement faible de l'ordre de 10% .

Effet sur la rugosité

Pas d'effet tribologique notable



Modifications des propriétés des surfaces traitées par Choc Laser

Effet sur l'endommagement

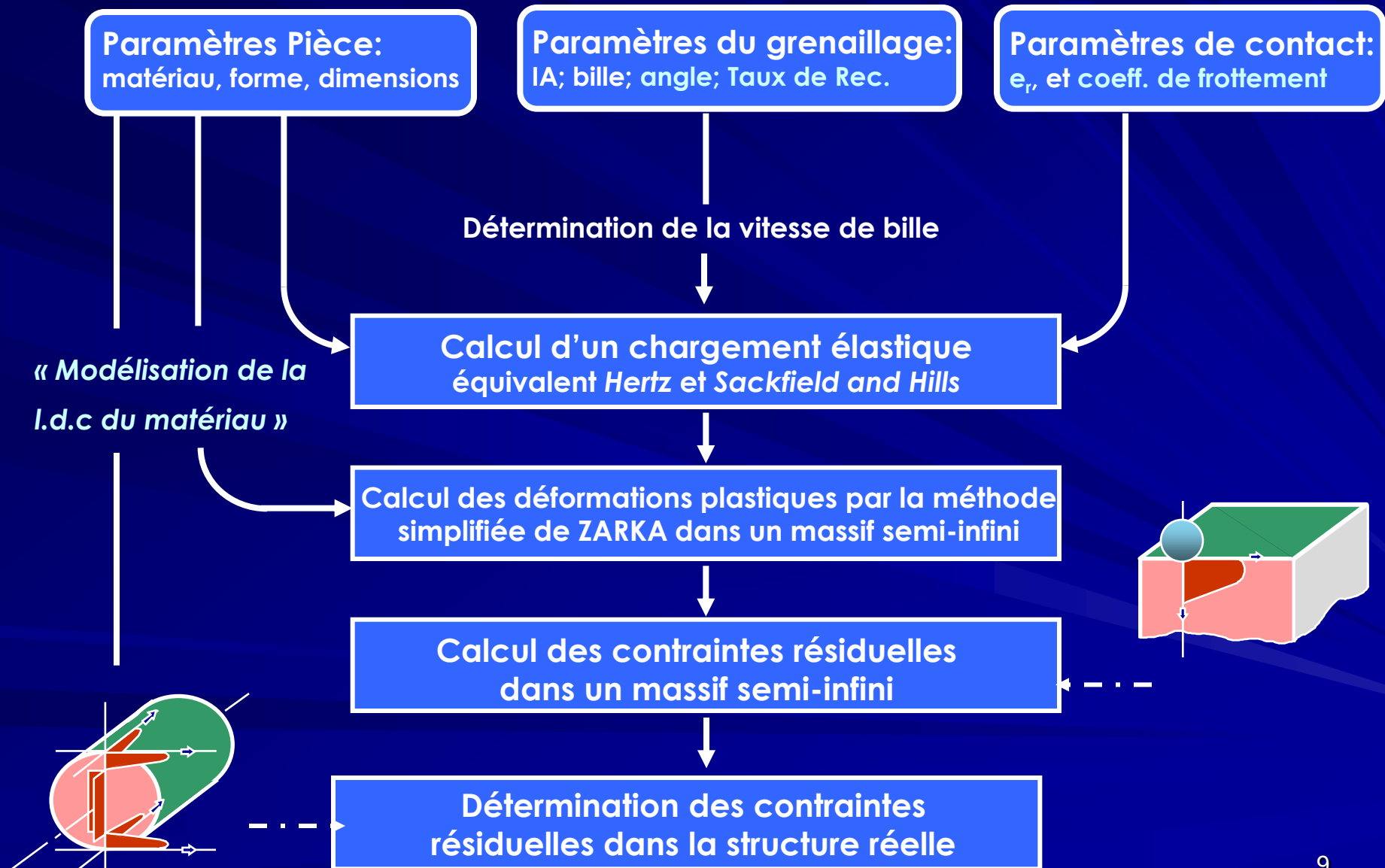
- Endommagement surfacique faible et concentré au centre du spot ne causant pas la détérioration de la pièce.
- L'endommagement interne est nul.

Effet sur la tenue à la fatigue polycyclique

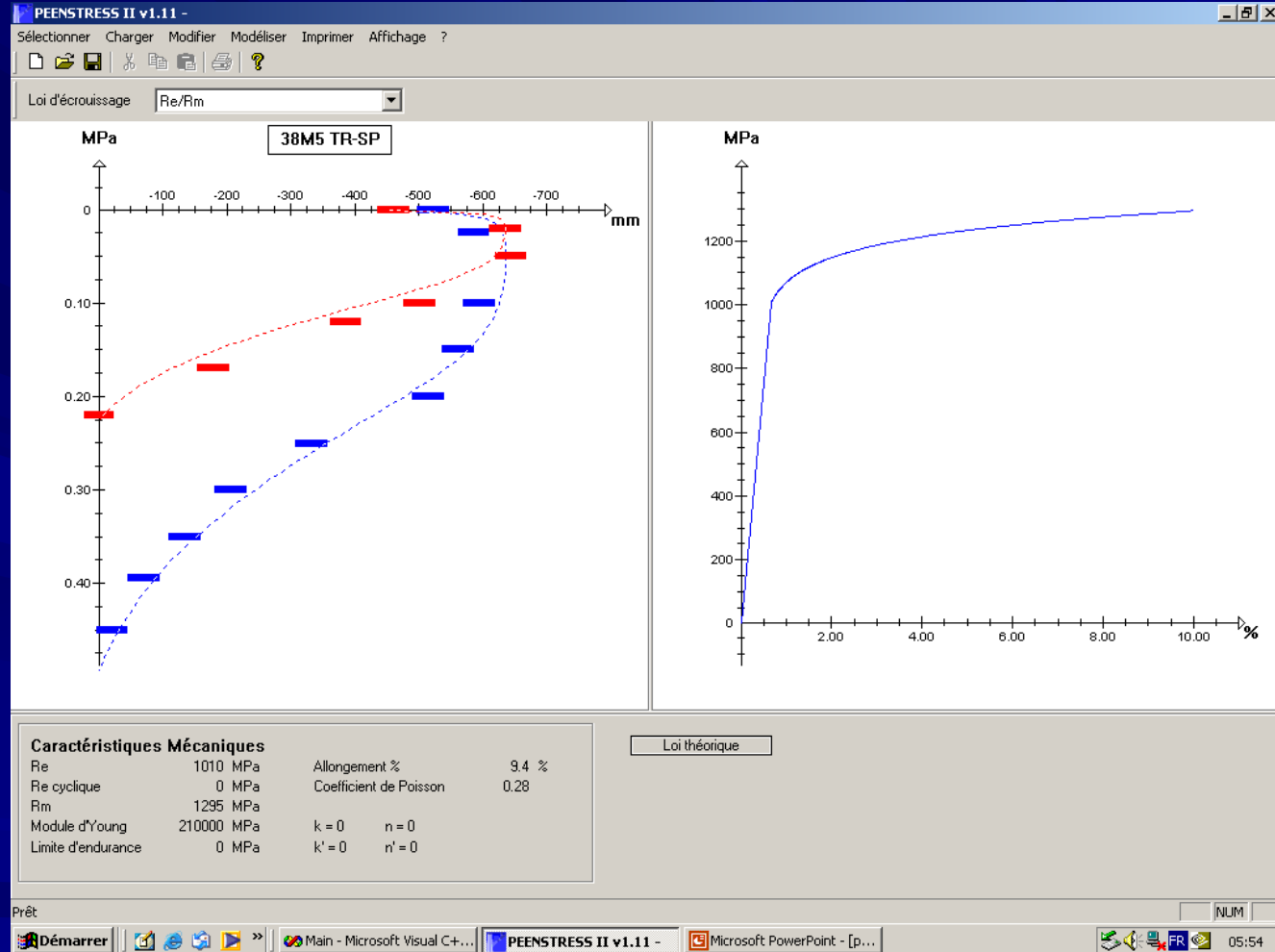
- Retarde la propagation des fissures
- Limite les micro concentrations des contraintes
- Améliore les limites d'endurance en fatigue polycyclique
Dane et al. [1997] ont montré une augmentation de **40 à 120% des limites d'endurance en fatigue** pour l'alliage de Titane.
- **La durée de vie augmente entre 10 et 25 fois.**

Cadre de mes travaux de thèse:

Modélisation du procédé par la méthode simplifiée de Zarka.



La conception (UML)
Le langage de développement
(orienté objet: C++)



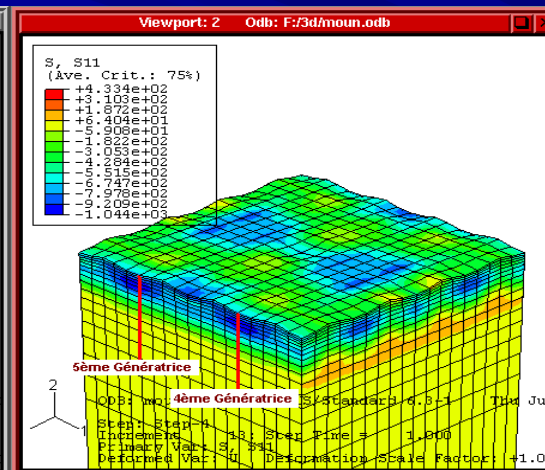
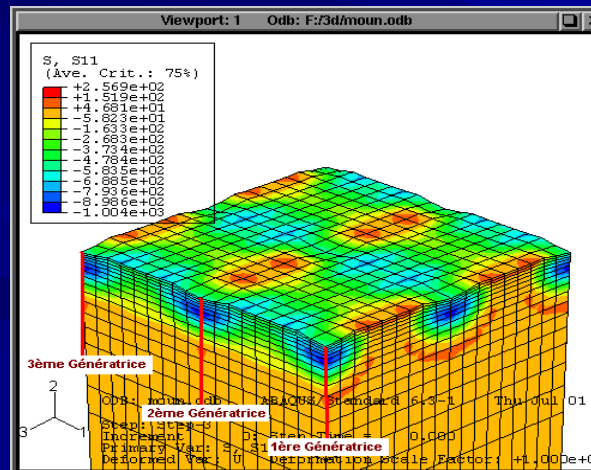
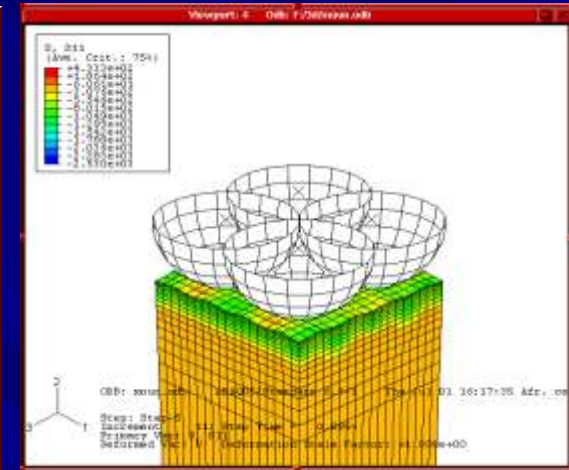
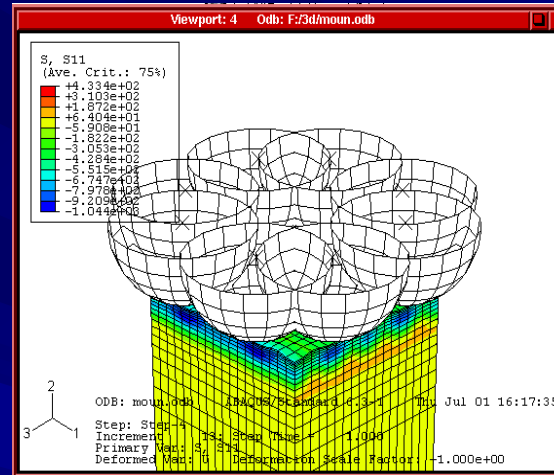
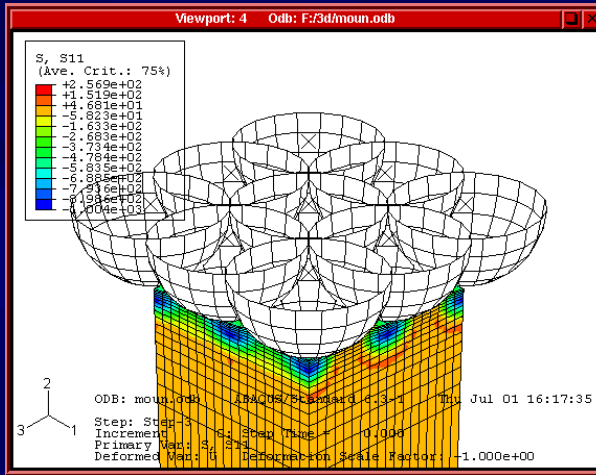
Projet A: Simulation du procédé du grenailage de précontrainte par la méthode des Éléments Finis

Objectifs:

- ✓ Permettre une meilleure analyse des chocs des billes (prise en compte de l'effet de la dureté de la bille),
- ✓ Prendre en compte d'autres paramètres: effet du taux de recouvrement, la nature du comportement du matériau traité,
- ✓ Prévoir les défauts des irrégularités micro géométriques,
- ✓ Prévoir des défauts d'endommagement superficiels

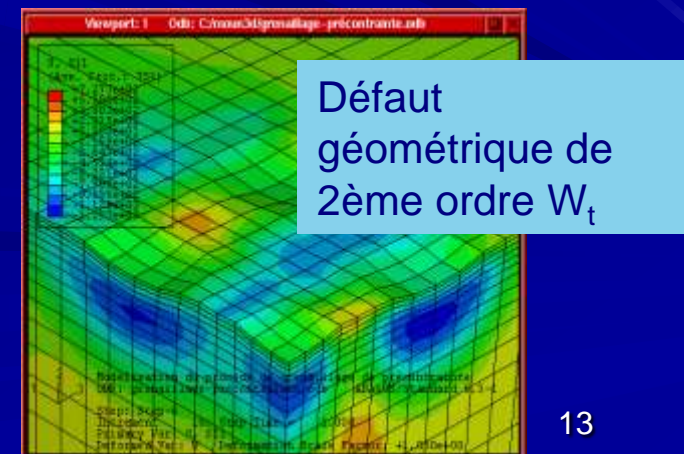
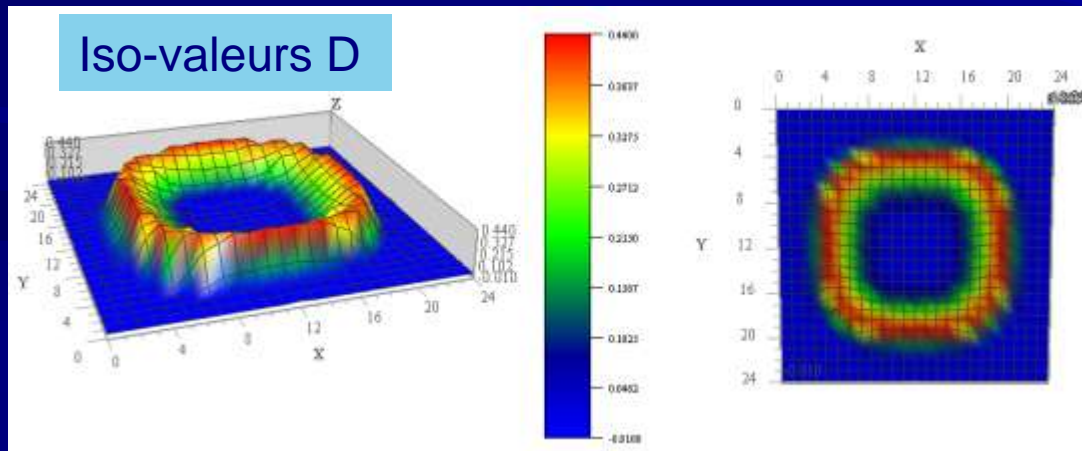
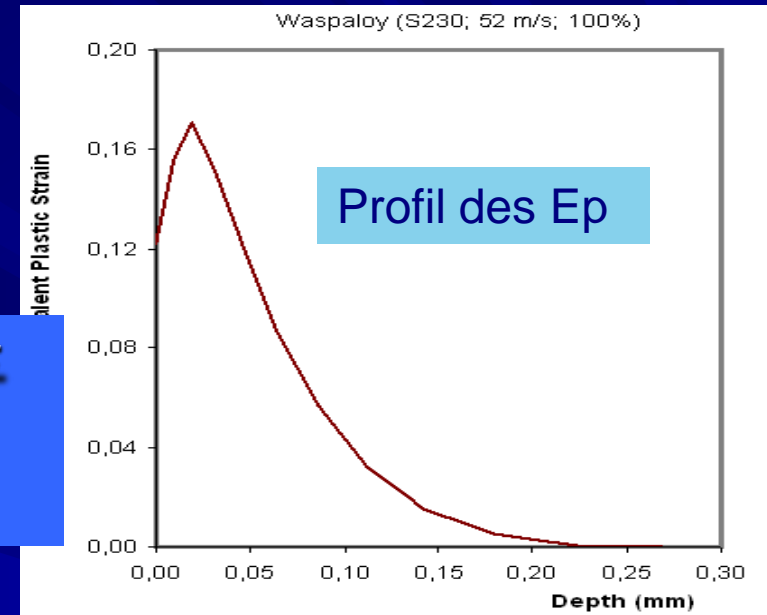
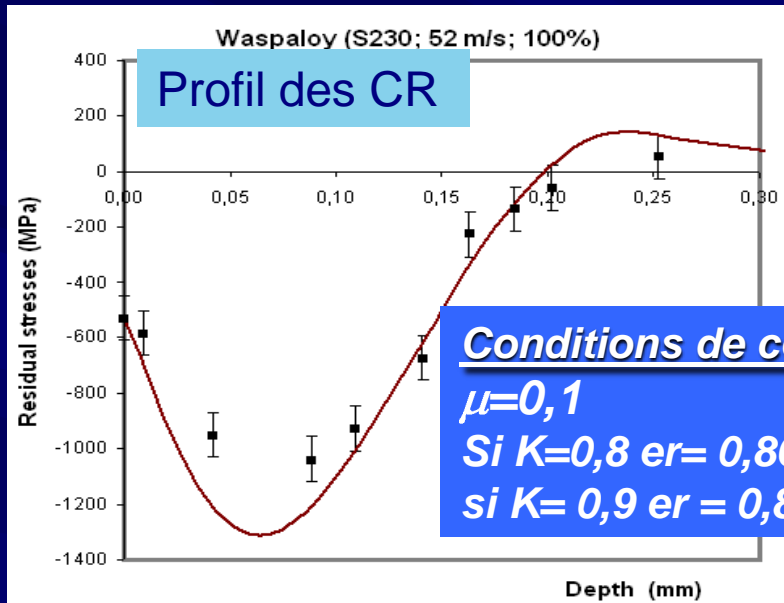
Projet A: Simulation du procédé du grenailage de précontrainte par la méthode des Éléments Finis

Simulation des chocs simultanés et répétés

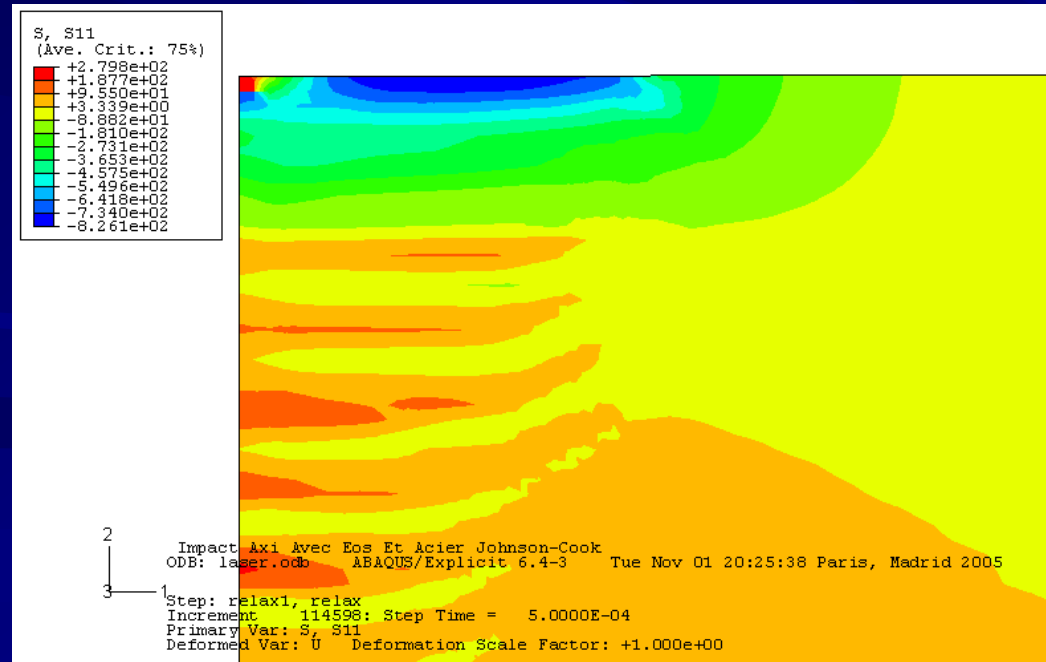
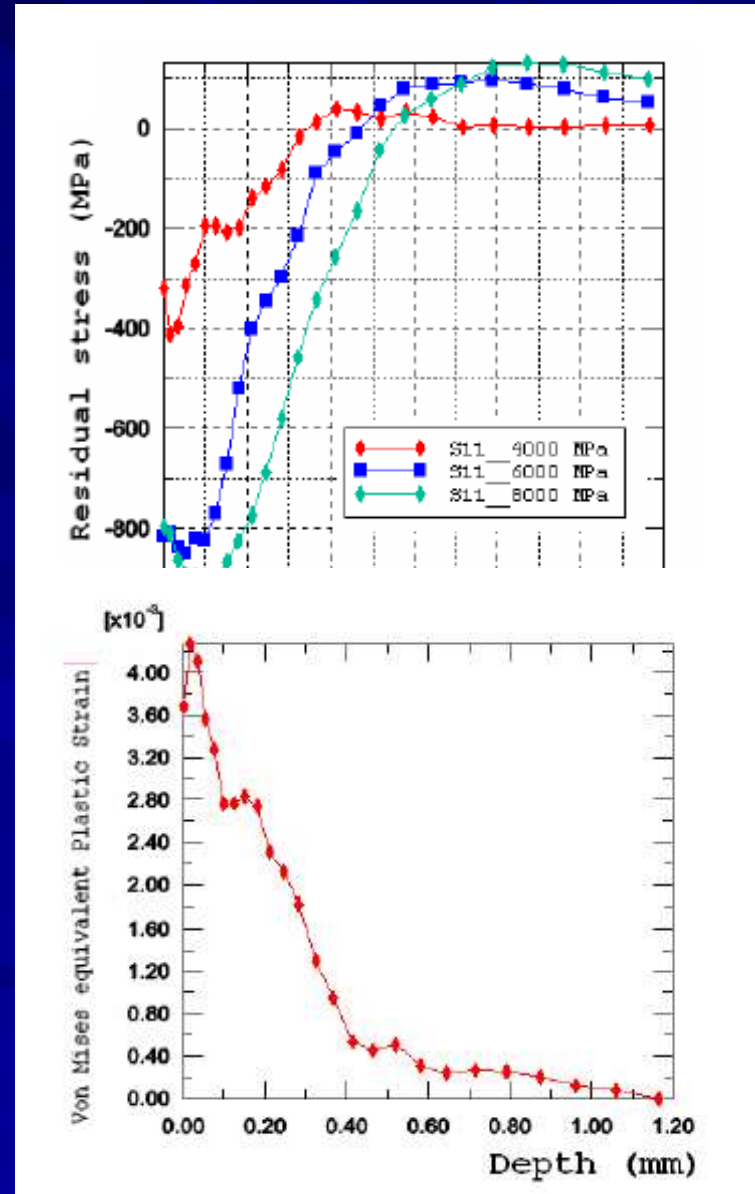
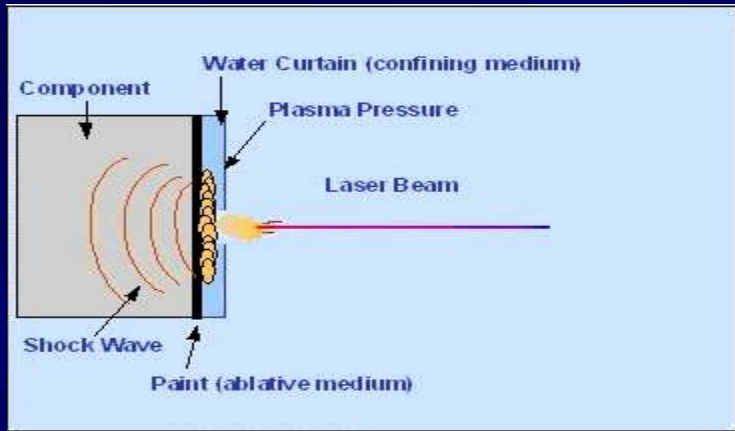


Projet A: Simulation du procédé du grenailage de précontrainte par la méthode des Éléments Finis

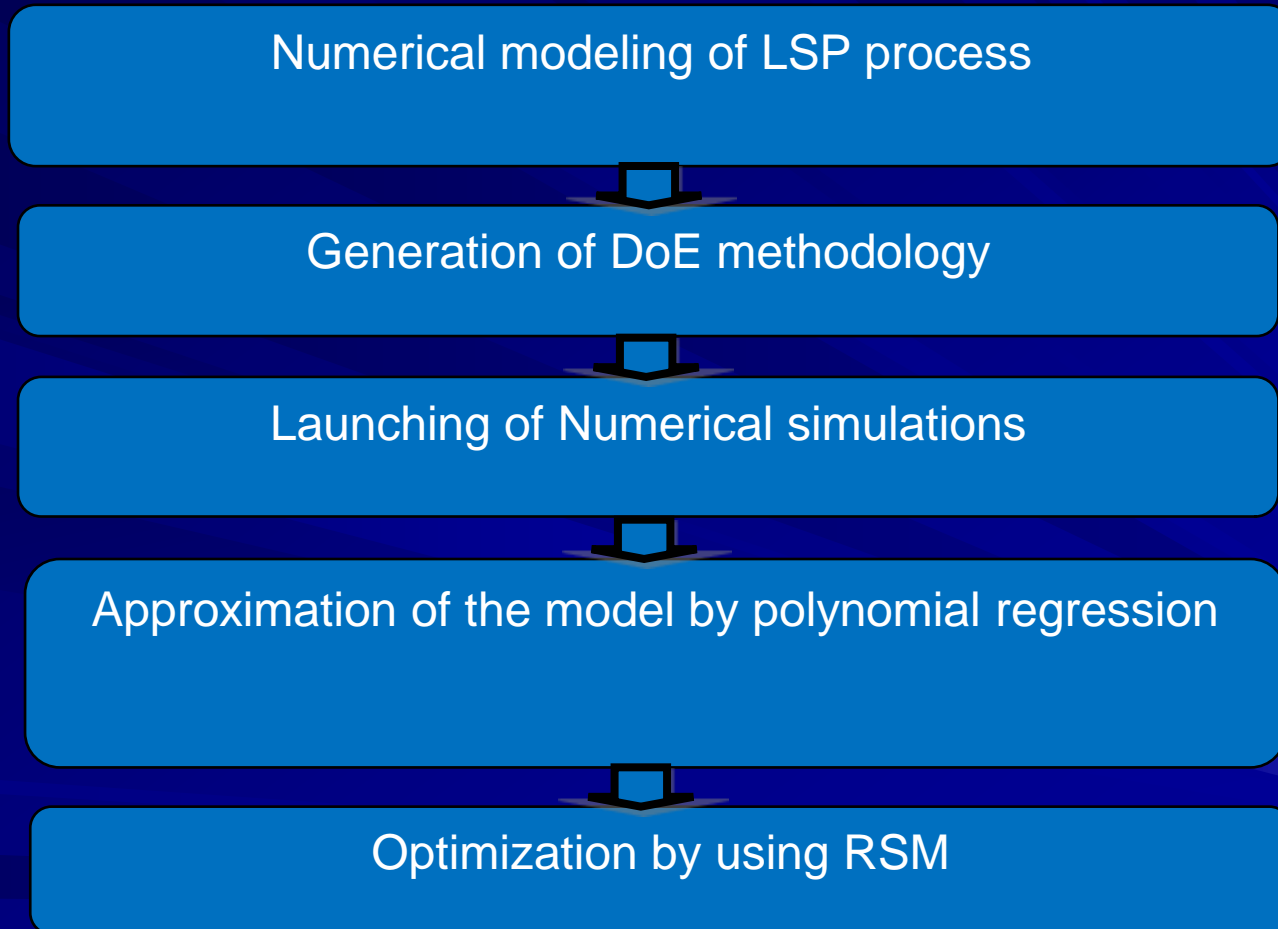
Résultats de la modélisation sur le Waspaloy



Projet A: Simulation du procédé du grenailage par choc laser par la méthode des Éléments Finis



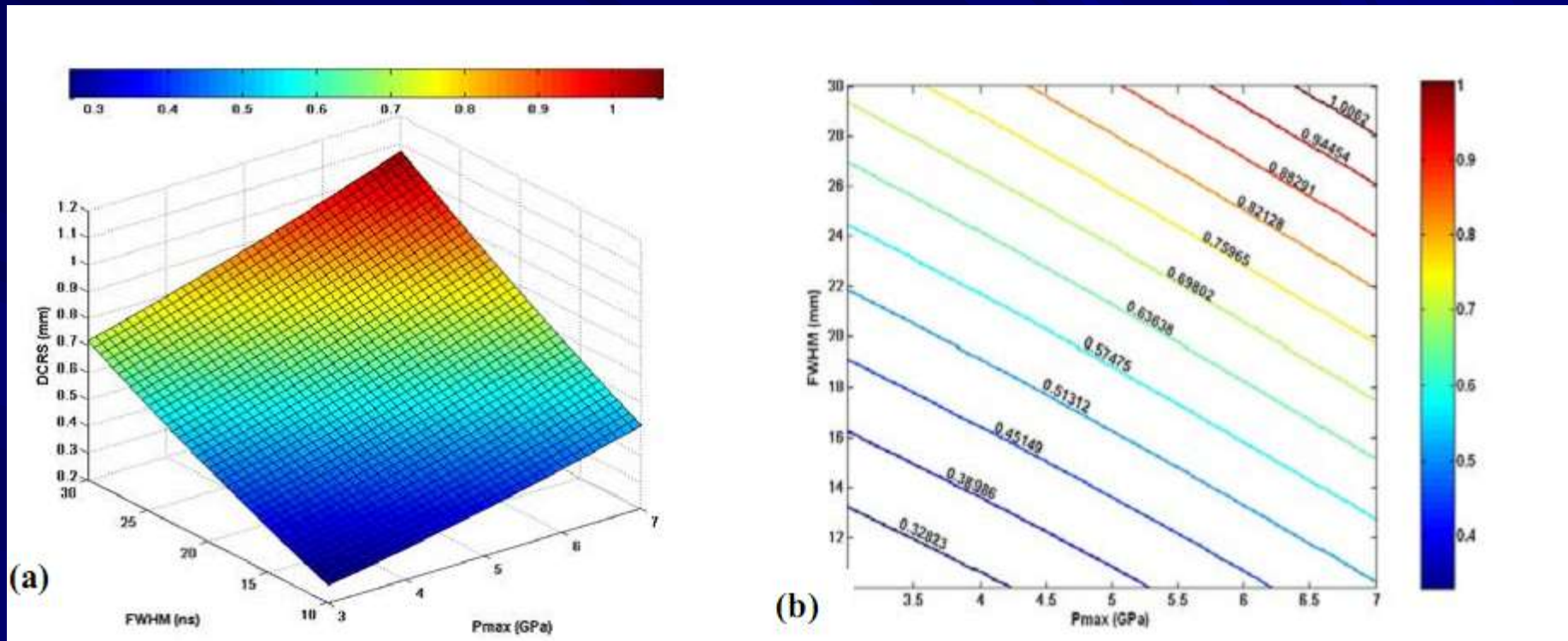
Technique d'optimisation des paramètres du traitement par Choc Laser



Flow chart of LSP process optimization.

$$DCRS \text{ (mm)} = 0.0435 + 0.0083 P_{max} + 0.0102 FWHM + 0.0038 P_{max}^2 + 0.0002 FWHM^2 + 0.0014 P_{max} FWHM$$

The Depth of Compressive Residual Stress

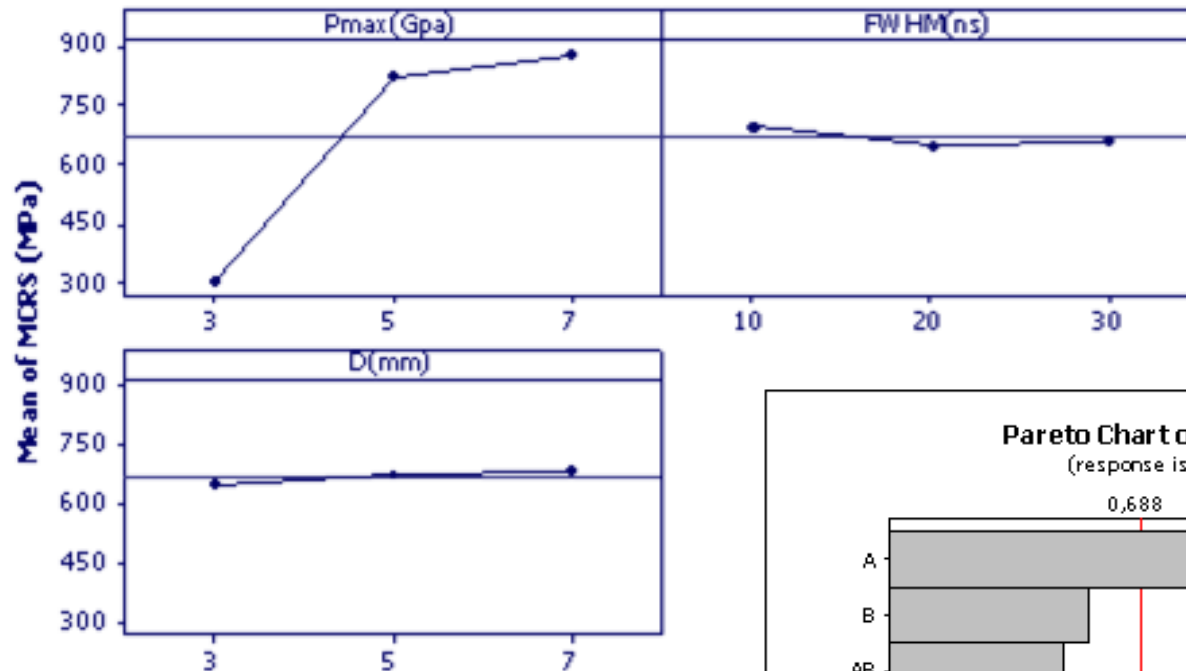


$$DCRS \text{ (mm)} = 0.0435 + 0.0083 P_{max} + 0.0102 FWHM + 0.0038 P_{max}^2 + 0.0002 FWHM^2 + 0.0014 P_{max} FWHM$$

Second order response surface (a) and contour plots (b) of two variables (FWHM and Pmax) for the depth under compressive stress

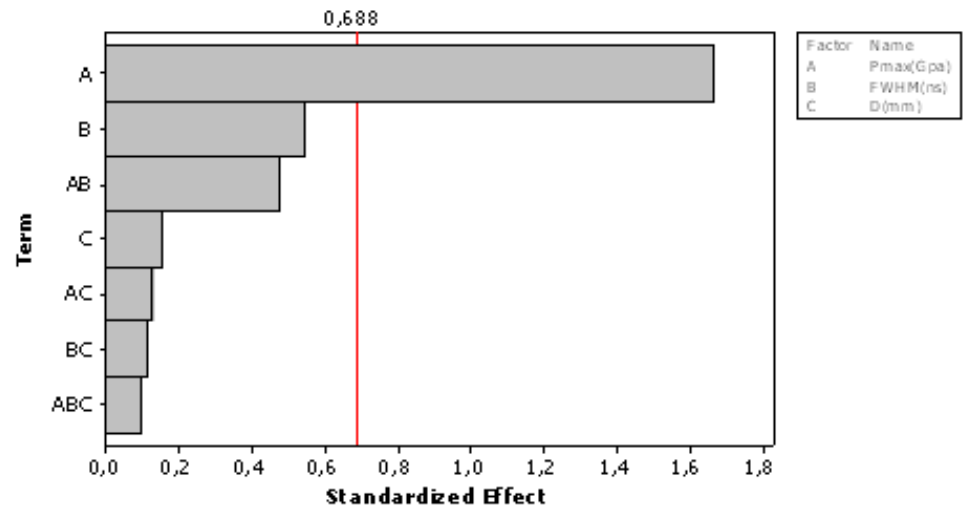
The Maximum compressive Stress

Main Effects Plot (data means) for MCRS (MPa)



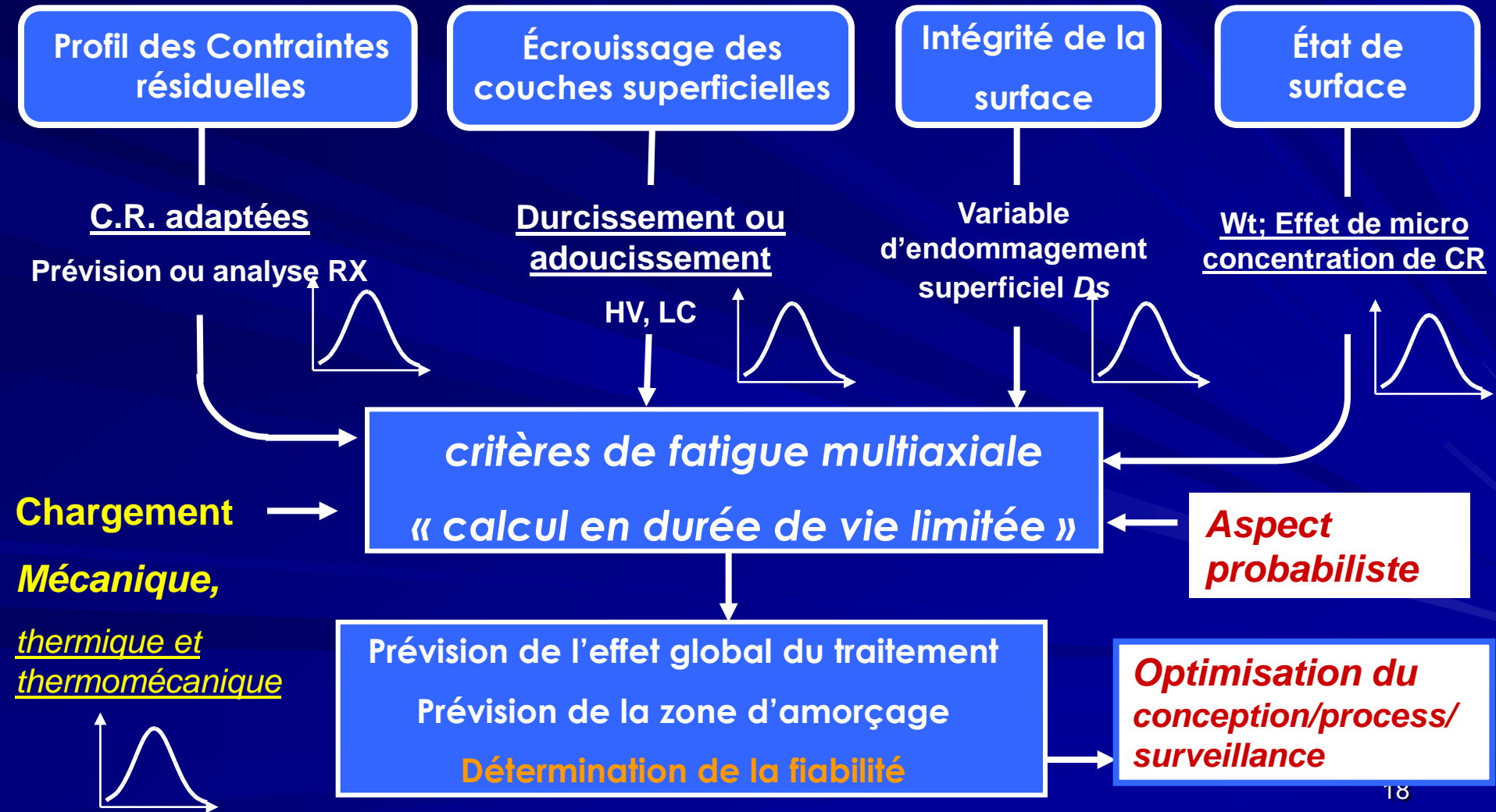
Pareto Chart of the Standardized Effects

(response is MCRS (MPa), Alpha = .50)



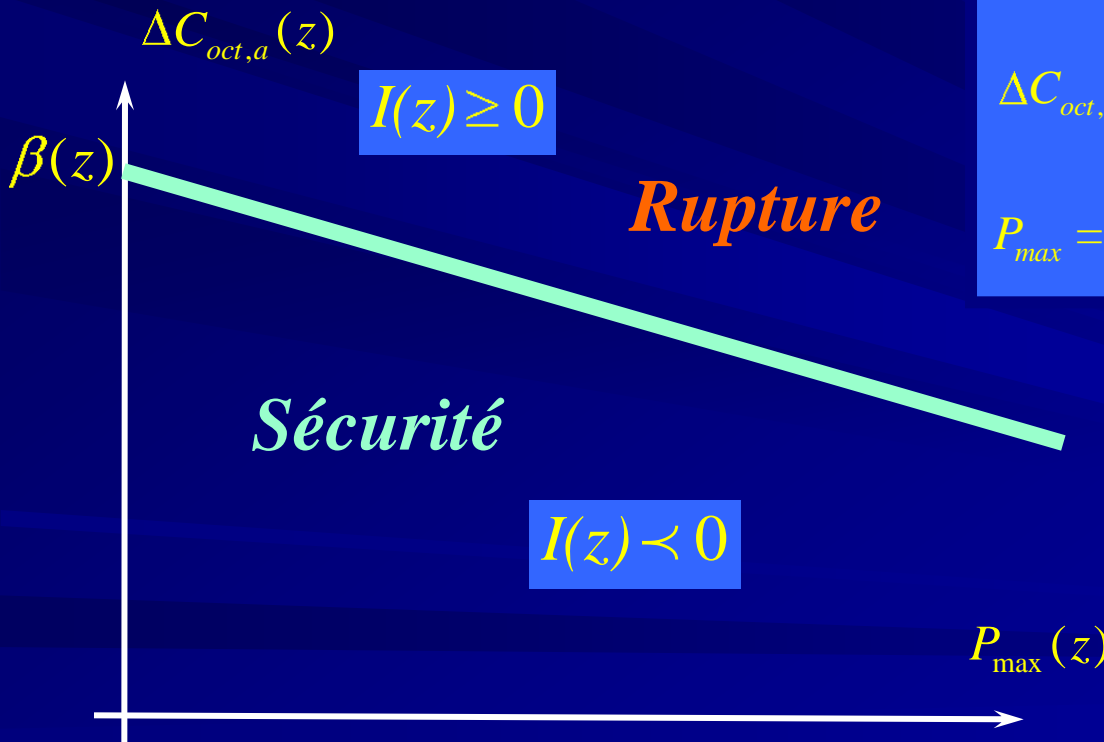
Projet B: Prédiction du comportement en fatigue polycyclique des pièces grenillées

Méthodologie



Projet B: Prévision du comportement en fatigue polycyclique des pièces grenillées

Critère de fatigue multiaxiale de Crossland



$$\sigma_{eq}(z) = \Delta C_{oct,a}(z) + \alpha_C(z) P_{max}(z) \leq \beta_C(z)$$

$$\Delta C_{oct,a} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \max_{t_i \in T} \max_{t_j \in T} |S(t_i) - S(t_j)|$$

$$P_{max} = \frac{1}{3} \max_{t \in T} [tr \underline{\underline{\sigma}}(t)]$$

$$\alpha_C = \frac{t_{-1} - f_{-1} / \sqrt{3}}{f_{-1} / 3}$$

$$\beta_C = t_{-1}$$

$$I(z) = \frac{\sigma_{eq}(z) - \beta_C(z)}{\beta_C(z)} \times 100$$

Défini pour N cycles et à une probabilité p

Projet B: Prévision du comportement en fatigue polycyclique des pièces grenillées

Critère de fatigue pour les couches grenillées

$$\sigma_{eq}^{shot\ peening}(z) \leq \beta^{shot\ peening} z$$

$$\underline{\sigma}_{app}^{IS}(t, z)$$

$$\underline{\sigma}_t(t, z) = \underline{\sigma}_{app}^{IS}(t, z) + \underline{\sigma}_R^* z ;$$

$$\beta^{shot\ peening} z = 0 = \beta_0 \left(\frac{LC(z)}{LC_0} \right)^n (1 - D_s) ; \text{ for } z = 0$$

$$\beta^{shot\ peening} z = \beta_0 \left(\frac{LC(z)}{LC_0} \right)^n ; \text{ for } z > 0.$$

Analyse multicouches

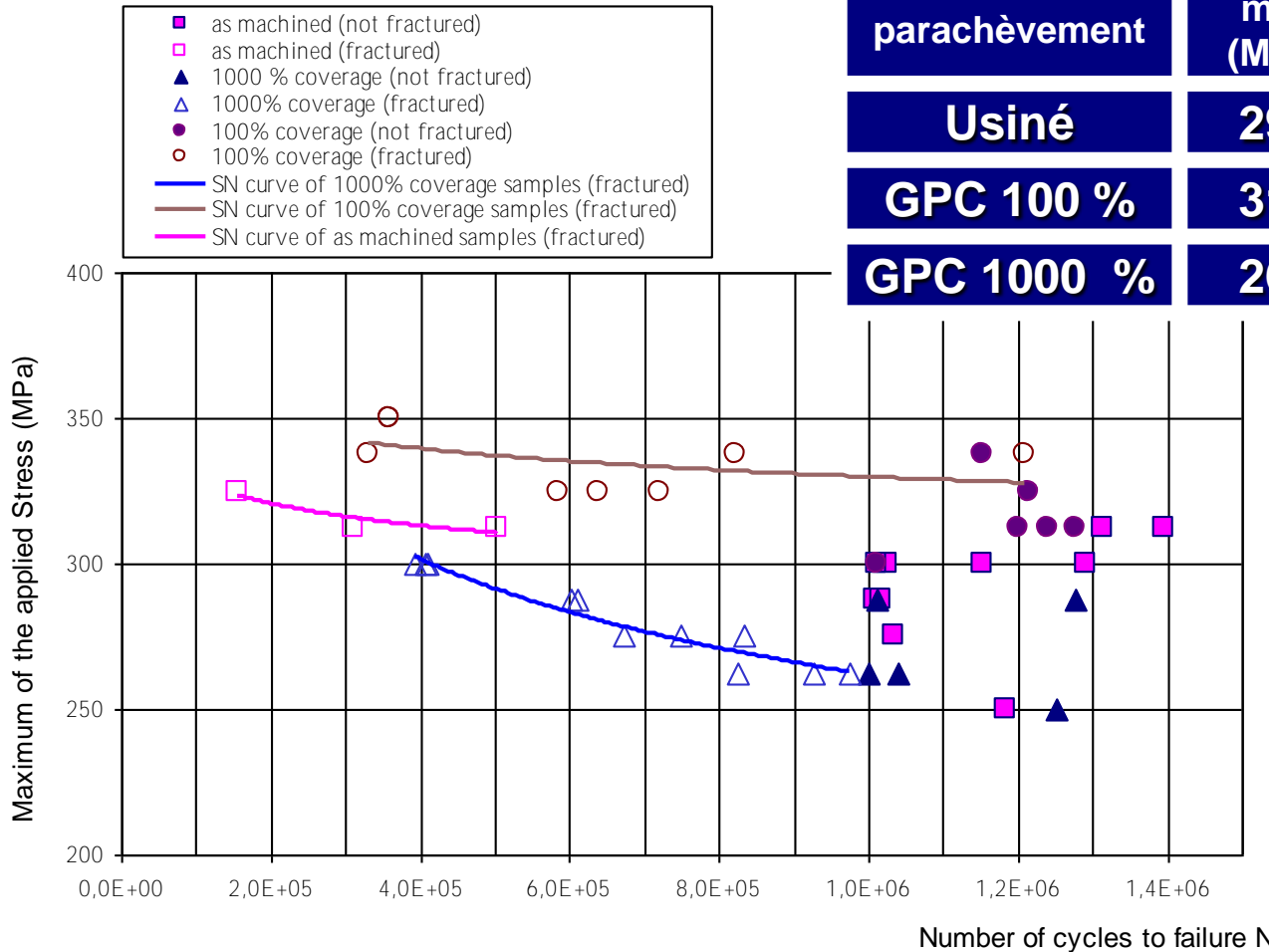
$$I_{Peen} z = \frac{\sigma_{eq}^{shot\ peening}(z) - \beta^{shot\ peening} z}{\beta^{shot\ peening} z} \times 100$$

Si, $I_{Peen} z < 0 \forall z$; alors il y a résistance à la fatigue polycyclique.

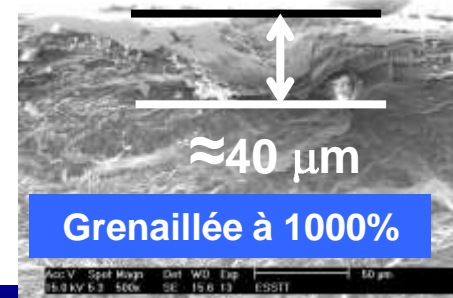
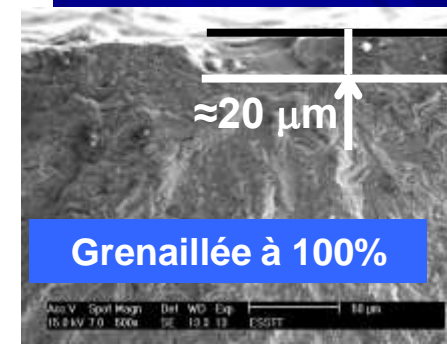
Si, $I_{Peen} z \geq 0$ pour qq. z , il y a amorçage, pour z^c tel que, $I_{Peen} z^c$ est max

Projet B: Prévision du comportement en fatigue polycyclique des pièces grenaillees

Application: essais de fatigue

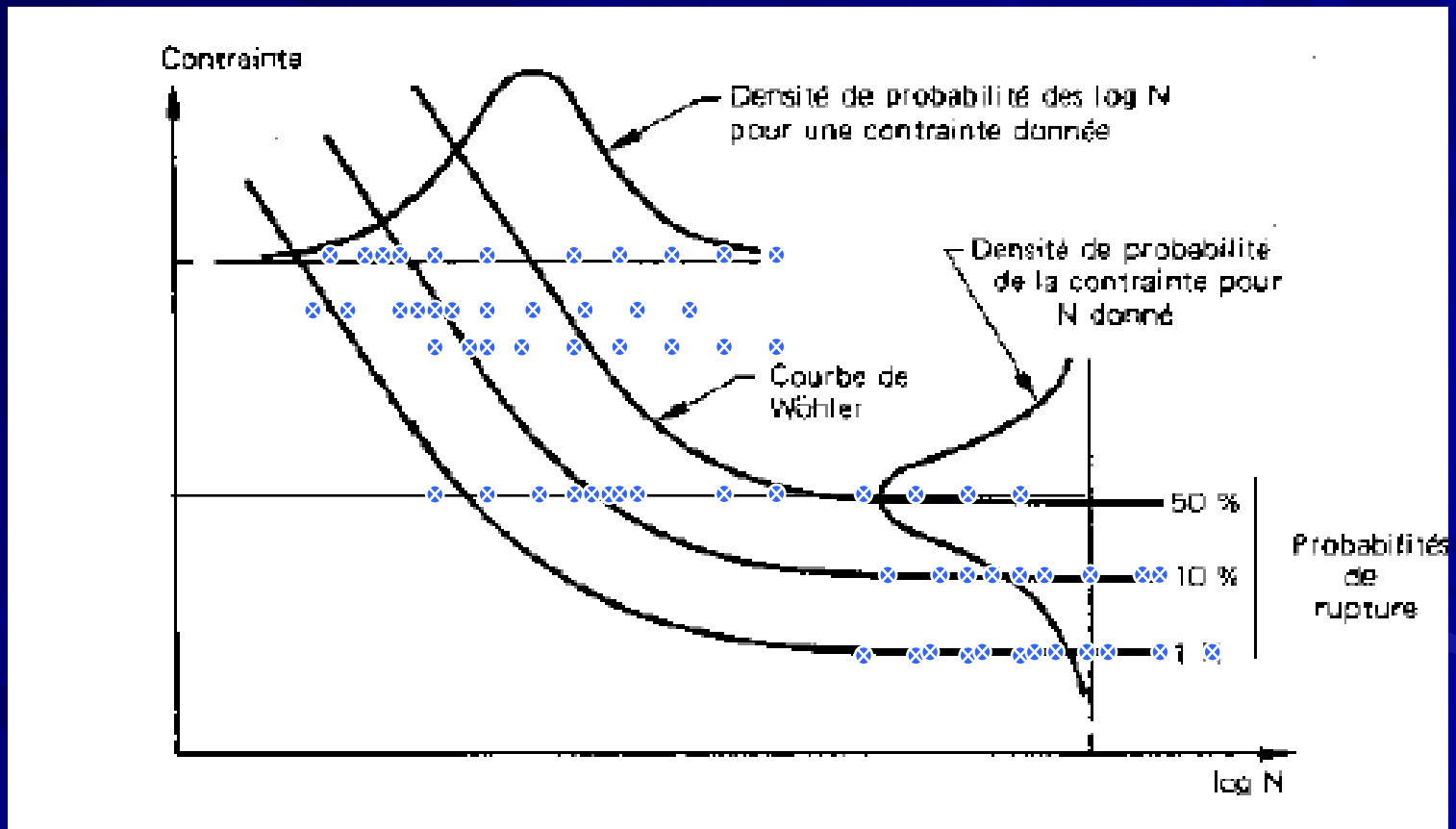


Conditions de parachèvement	Sigma max (MPa)	�carts types (MPa)	%
Usin�	293	11	***
GPC 100 %	312	12	+ 6.5 %
GPC 1000 %	260	30	- 11.3 %



Constatations

Le phénomène de fatigue est caractérisé par un aspect probabiliste très significatif



Courbe de Wöhler probabilisée

Constatations

Les conditions des surfaces sont caractérisées par un aspect probabiliste très important !

Contraintes résiduelles

Largeurs de cordes

État des surfaces traitées

Défauts d'intégrité des surfaces etc.

Défauts au voisinages des surfaces

Développement de critères de fatigue probabilisés

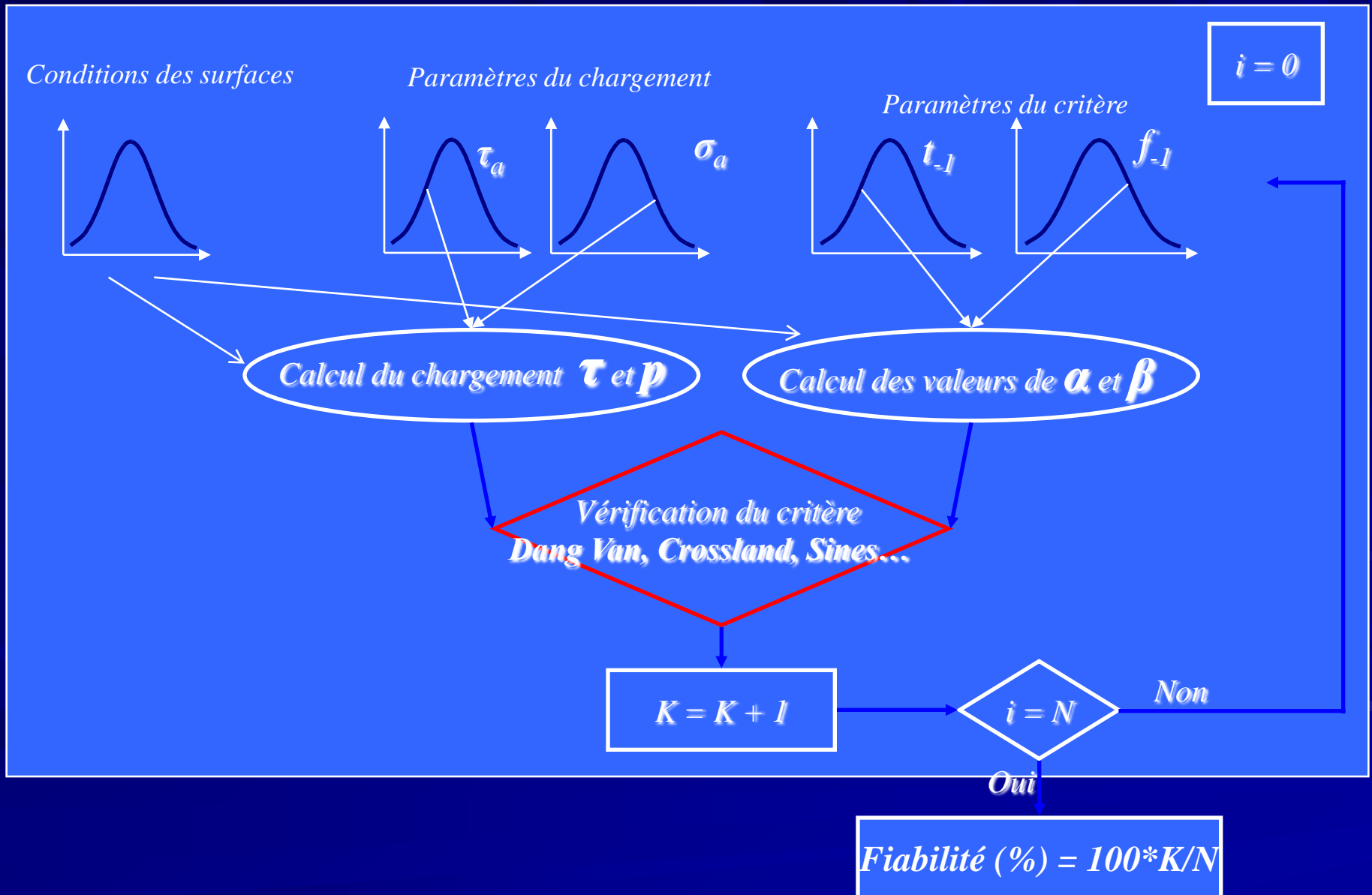
Objectifs

Prévoir la fiabilité de la tenue à la fatigue multiaxiale polycyclique des pièces grenillées ou non, en tenant en compte des dispersions:

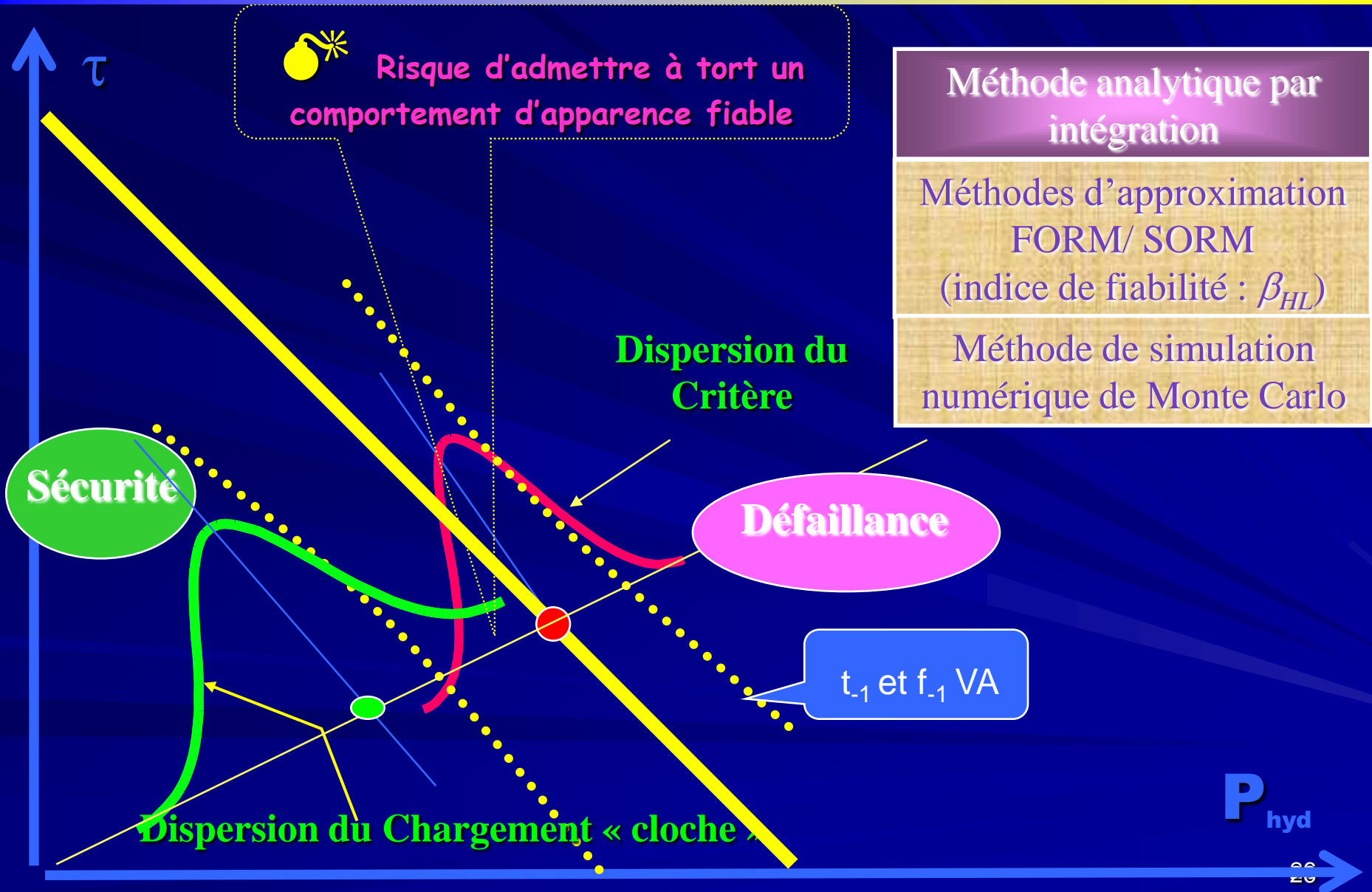
- (i) dues au matériau,
- (ii) dues au chargement appliqué
- (iii) dues aux conditions des surfaces.

Un grand avantage ! Éviter l'utilisation « aveugle » des coefficients de sécurité et de mieux maîtriser la fiabilité !

Développement de critères de fatigue probabilisés

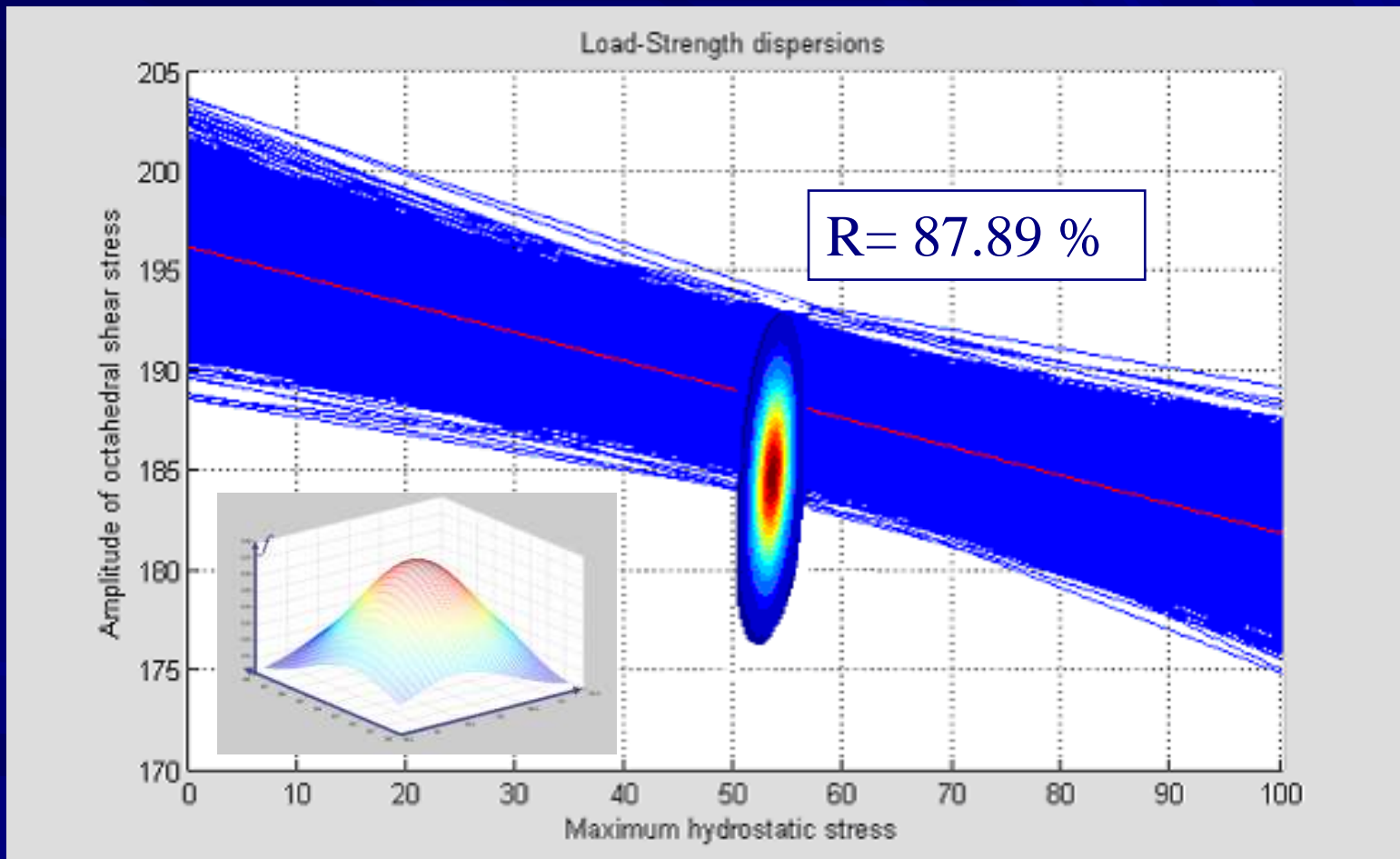


Calcul de la fiabilité de la tenue en fatigue polycyclique



Développement de critères de fatigue probabilisés

Application sur un acier dur soumis à une flexion, torsion alternées en phase



Données: $t_{-1} = 196.2 \text{ MPa}$; $\text{COV}_{t-1}=1\%$; $f_{-1} = 313.9 \text{ MPa}$; $\text{COV}_{f-1}=1\%$

$\sigma_a = 160 \text{ MPa}$; $\text{COV}_{\sigma_a}=2\%$; $\tau_a = 160 \text{ MPa}$; $\text{COV}_{\tau_a}=2\%$; Nombre de tirage= 10^4

Développement de critères de fatigue probabilisés

Prise en compte des conditions de surfaces

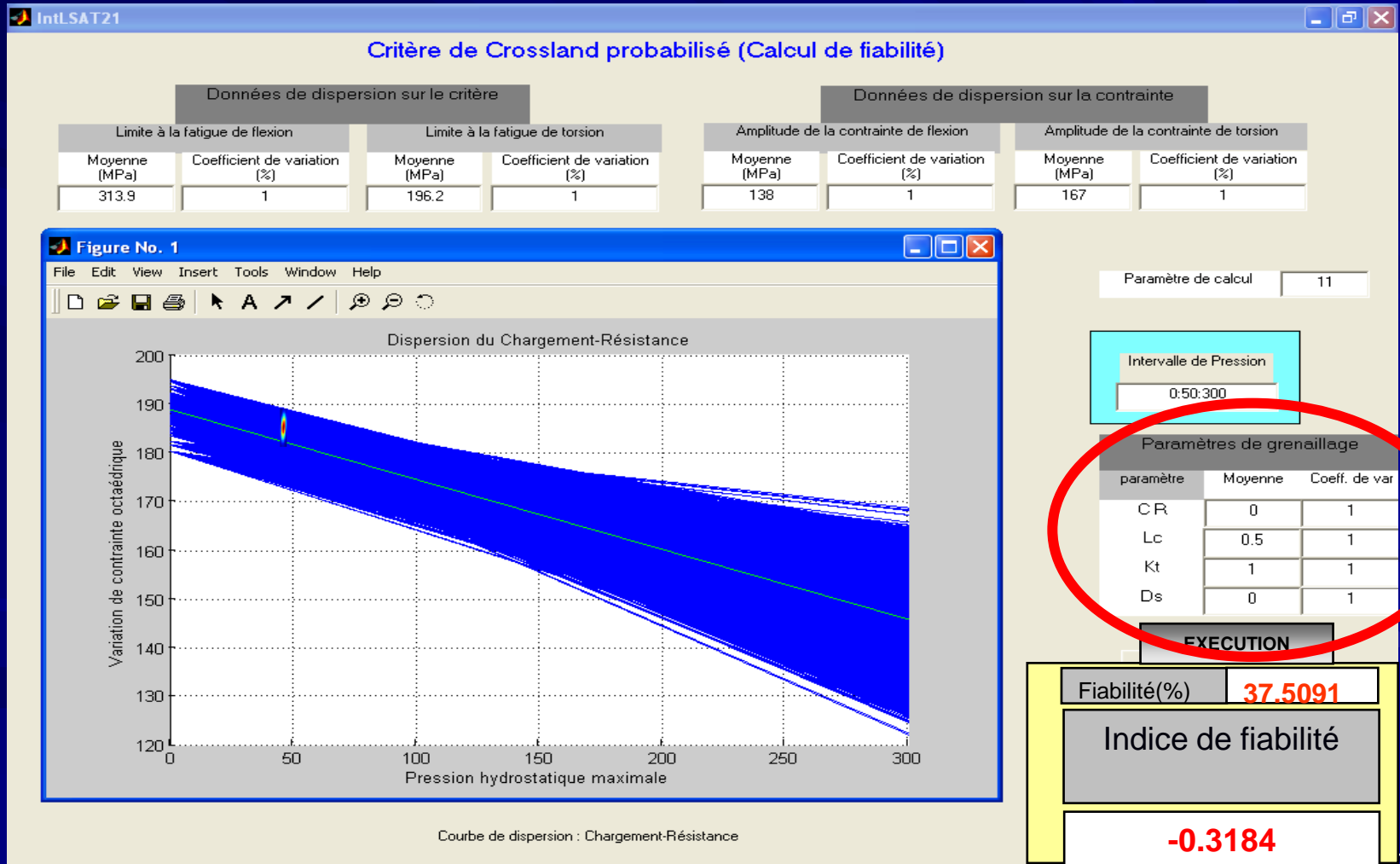
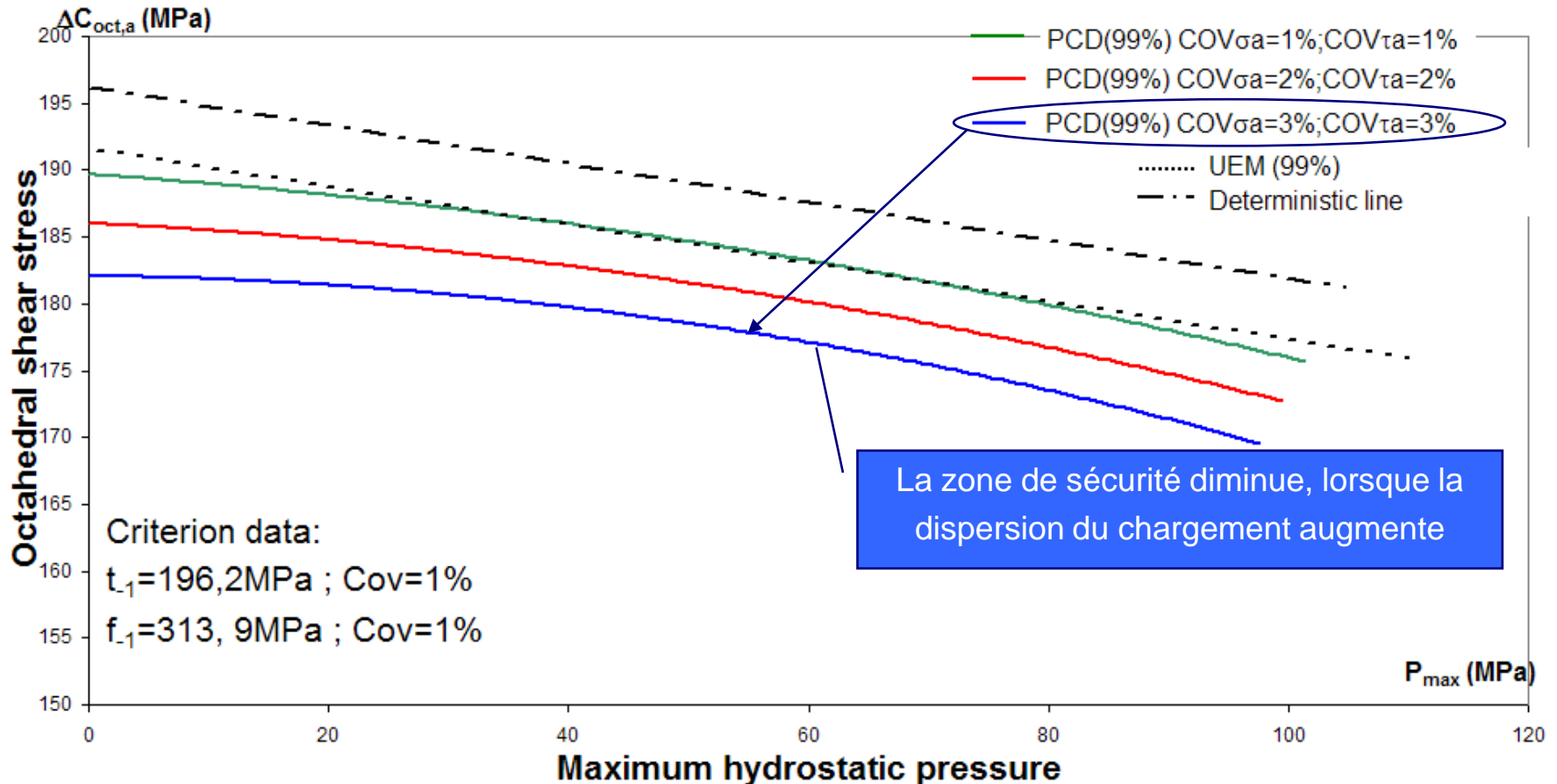
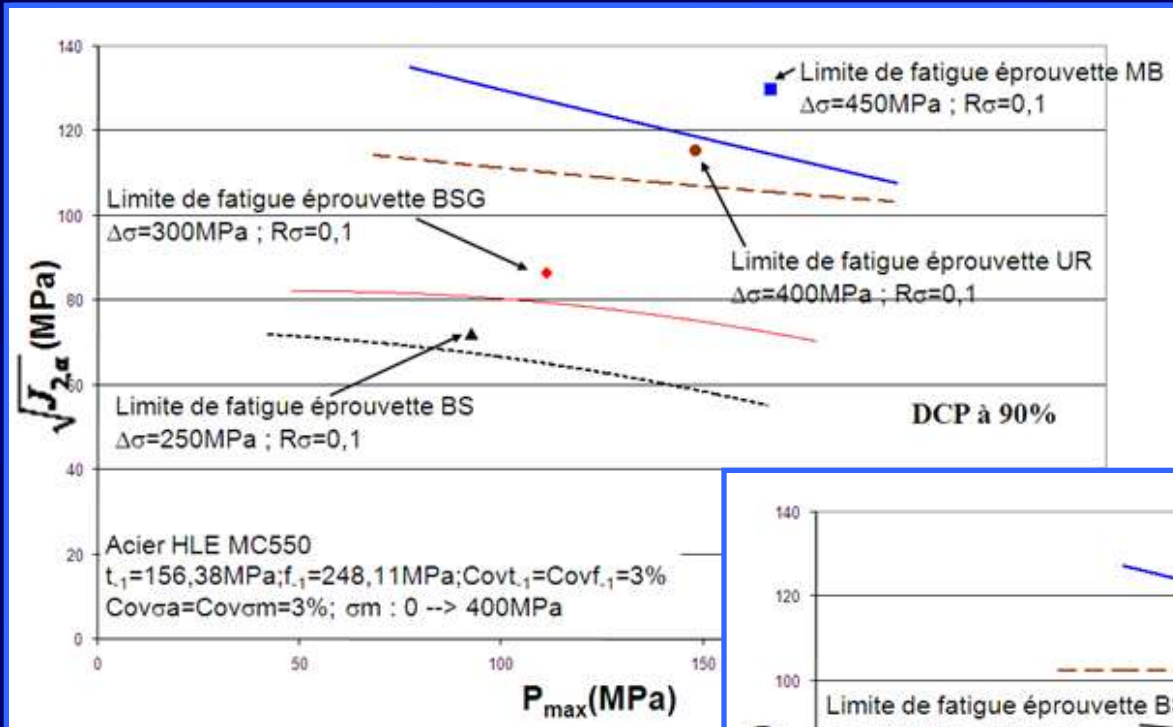


Diagramme de Fatigue probabilisé: pour une sollicitation donnée et un matériau donné

Probabilistic Crossland Diagram



Applications aux cas grenillées et soudées grenillées

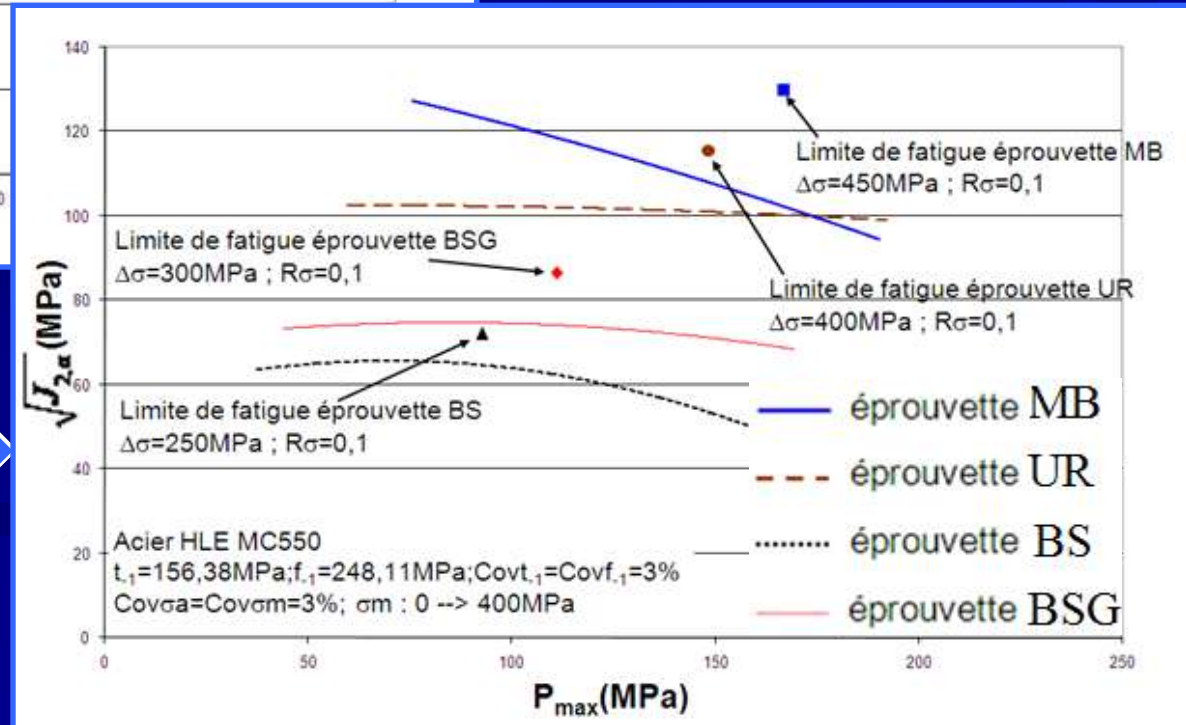


✓ Constater les effets de conditions de surface sur la tenue à la F.P (zone de résistance)

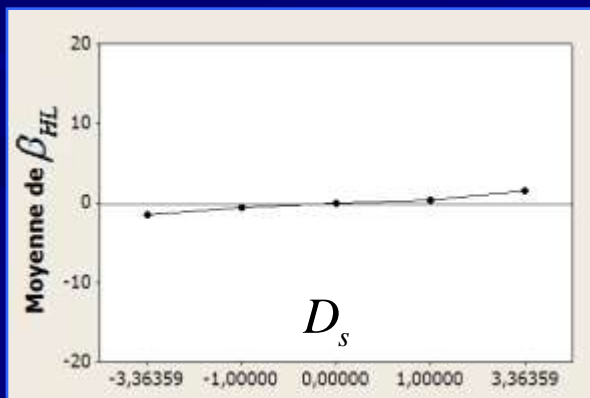
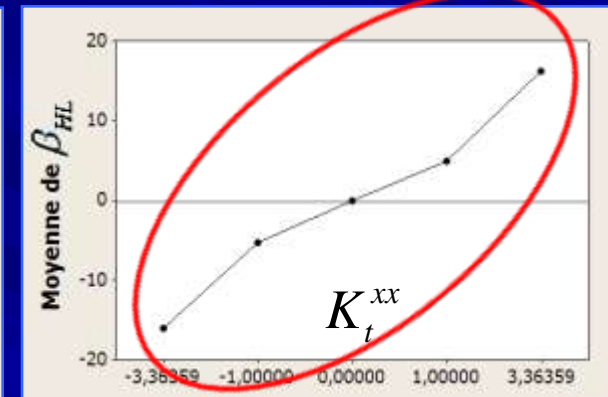
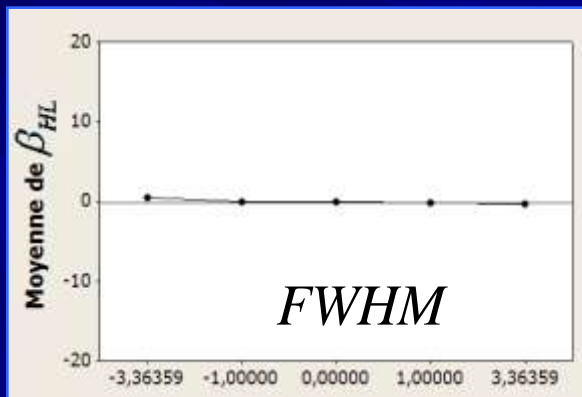
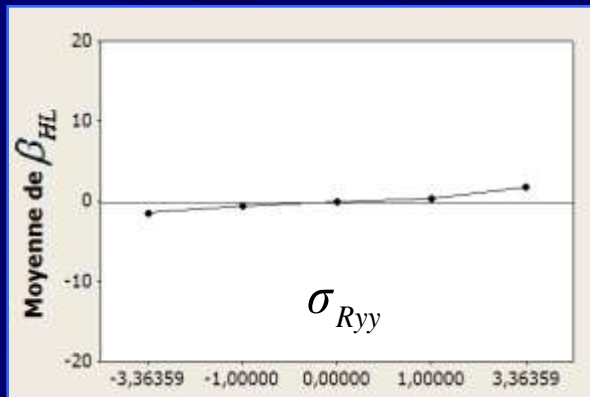
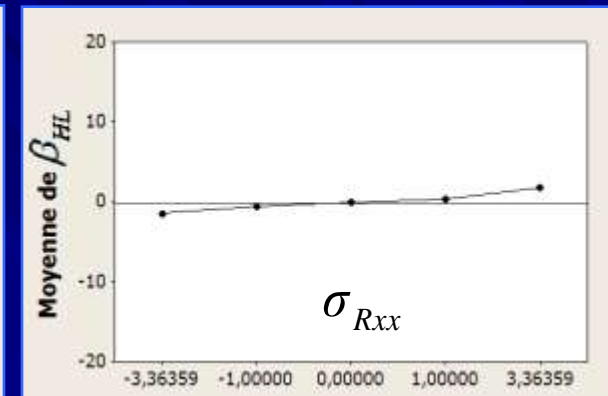
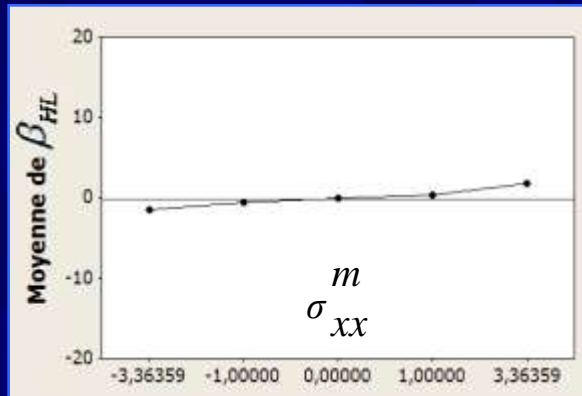
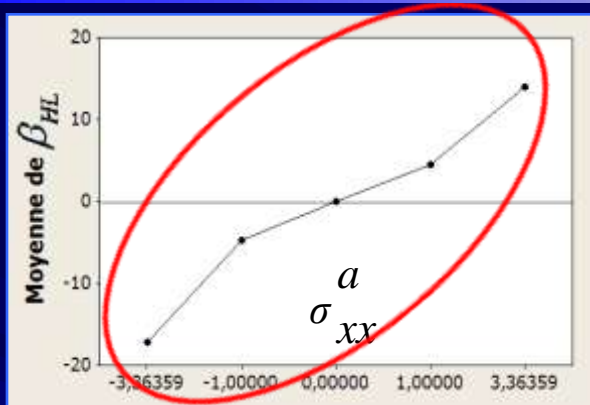
← DCP (Fiabilité de 90%)

DCP (Fiabilité de 99%) →

✓ Confirmer l'aspect conservateur (pessimiste) de prévision

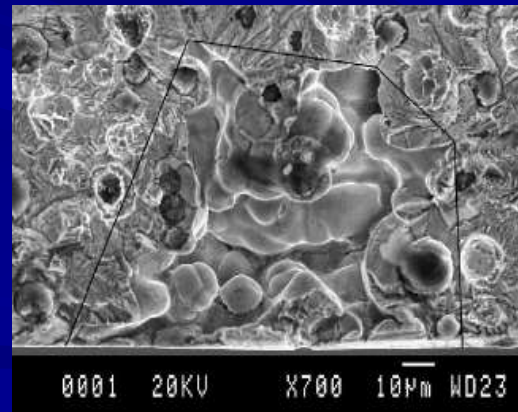
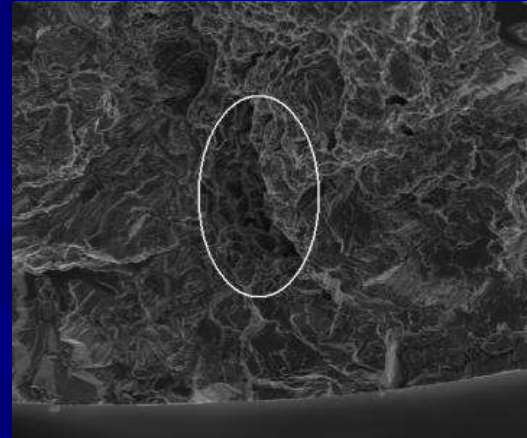
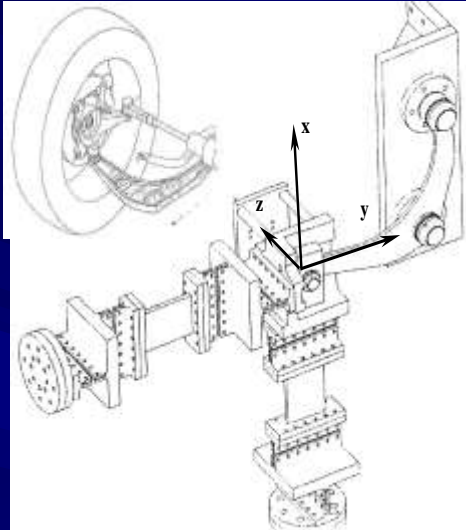


Analyse des facteurs de sensibilité



□ L'effet de K_t et de σ^a sur l'indice de fiabilité est important.

Application aux cas des matériaux à défauts

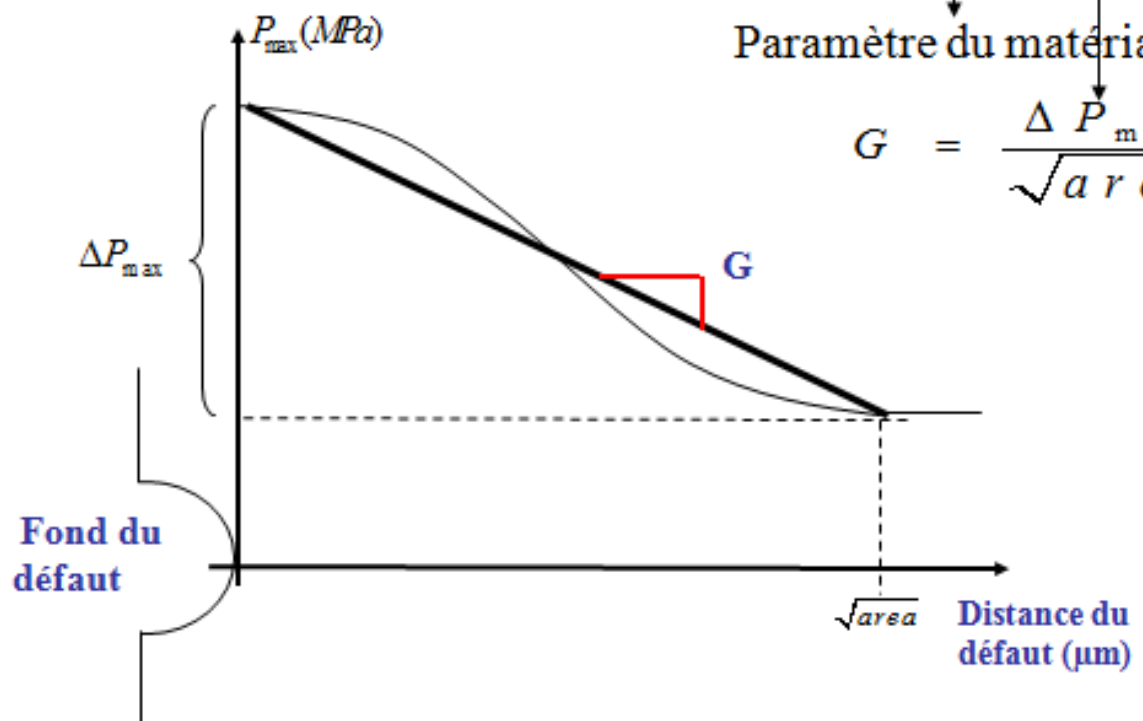


Critère de fatigue adapté au cas des matériaux à défauts

$$\sqrt{J_{2,a}} + \alpha P_{max} \left(1 - A \left(\frac{G}{P_{max}} \right) \right) \leq \beta$$

Paramètre du matériau

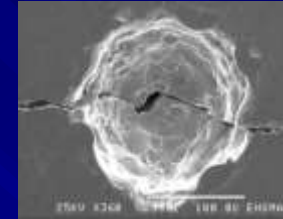
$$G = \frac{\Delta P_{max}}{\sqrt{area}}$$



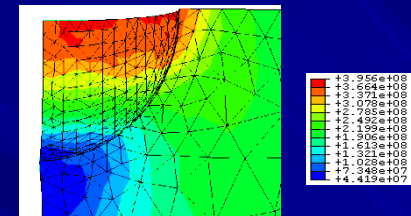
[Nadot 2006]

Méthodologie adaptée pour le cas des matériaux à défauts

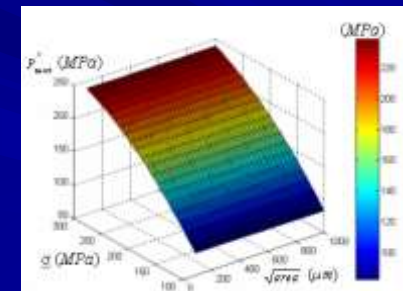
Modélisation géométrique des défauts de surface



Analyse des distributions des contraintes autour des défauts



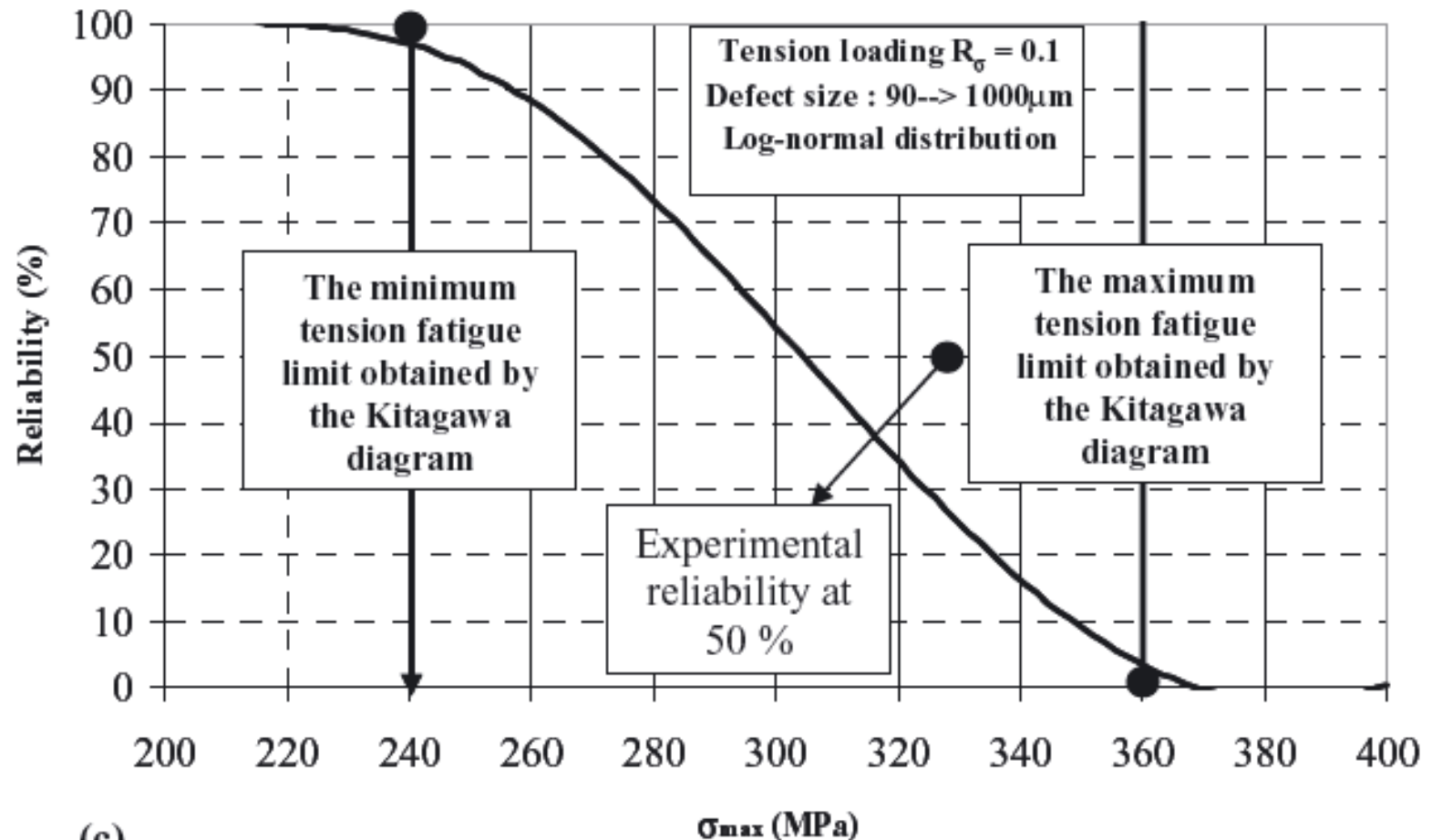
Calcul des coordonnées de point de chargement par la technique de surfaces de réponse



Calcul de la fiabilité

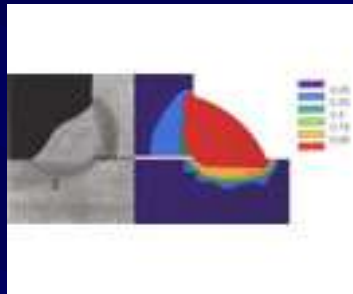


Validation de l'approche



(c)

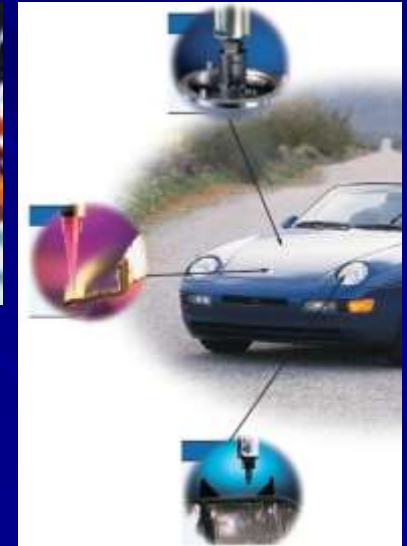
Projets en cours



Soudage MAG des Aciers HLE



**Fiabilité des Assemblages par boulonnage
Collage, rivetage**



Simulation numérique

Procédés d'élaboration, de parachèvement et d'assemblage

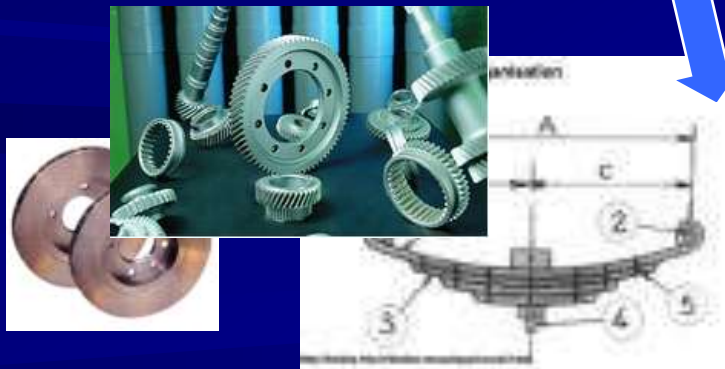
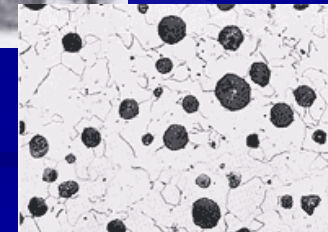
Fatigue P.
Aspect fiabiliste

Fatigue DVL, MR

Optimisation



Fatigue des FGS (défauts de surface)



Dimensionnement Des pièces de transmissions, Suspension et organes de freinage.

**Merci pour
votre aimable attention**

