

Optimisation fiabiliste des systèmes mécatroniques

Application: Fatigue thermomécanique des modules électronique de puissance



Prof. Abdelkhalak El hami

Laboratoire de Mécanique de Normandie

Reliability and Uncertainties in Experimental Mechanics and Numerical

**Normandy Reliability Technology Workshop
15 juin 2017**

Introduction et contexte

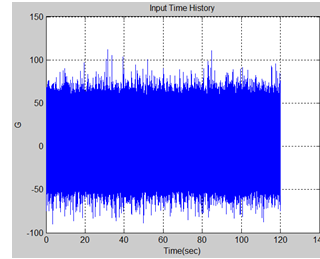


Introduction et contexte

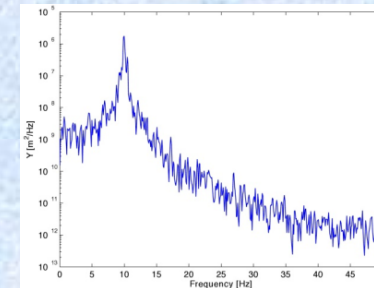
Vibrations
aléatoires

Realistic solicitation (earthquake motion, wind velocity, road loads)

Random signal
 $X(t)$



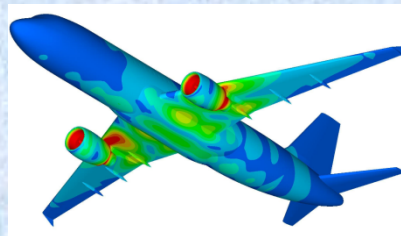
FF
T



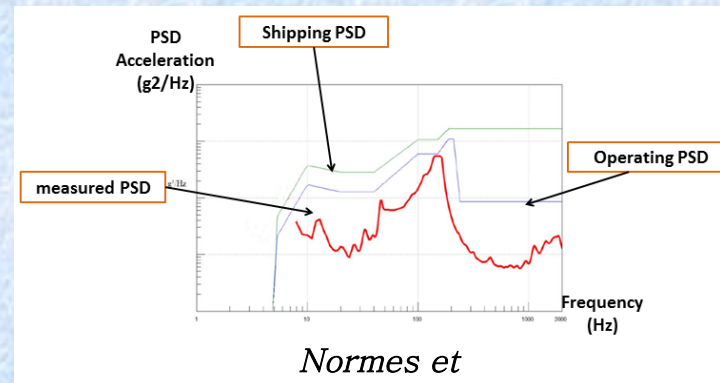
Réponse aléatoire spectrale
Densité Spectrale de
Puissance DSP



Essais de
vibrations



Simulations
numériques



Normes et
spécifications

Fatigue
vibratoire

Analyse des
contraintes +
Etude de la
defaillance

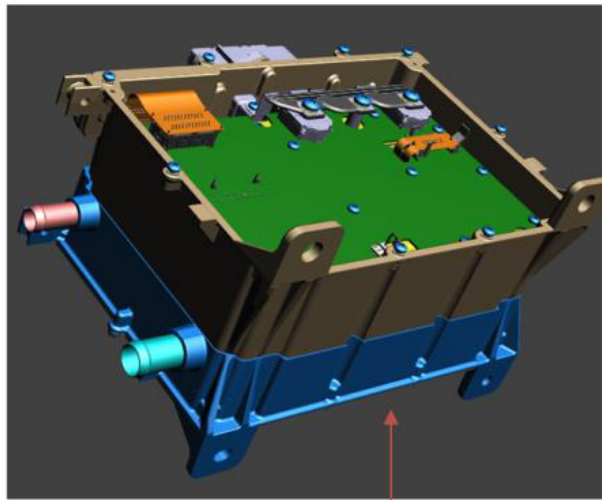
&

Optimisation /
limitations en
fatigue due aux
vibrations
aléatoires

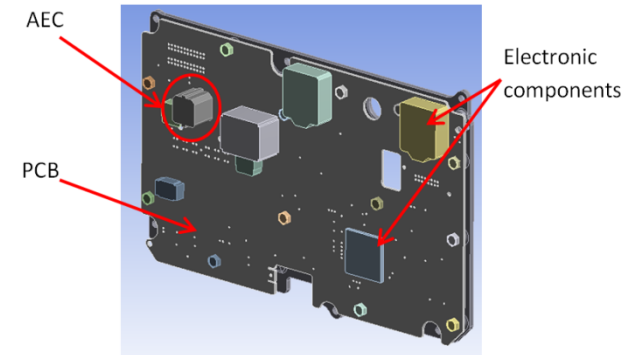
Meilleure
conception

Introduction et contexte

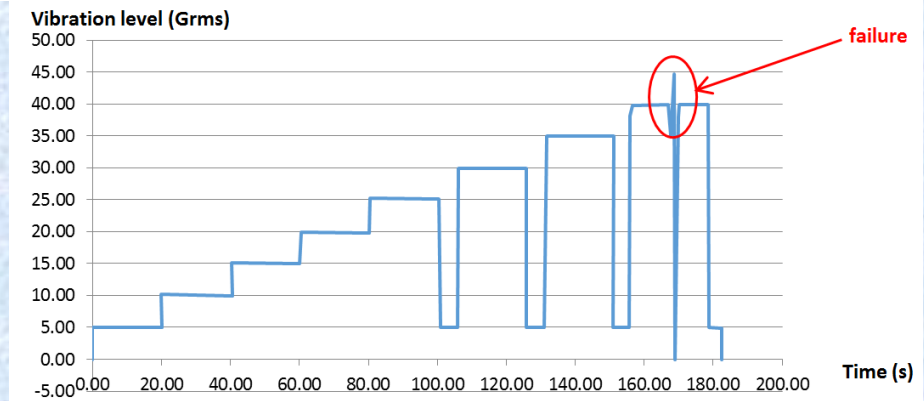
Projet FIRST MFP (Fiabiliser et Renforcer des Systèmes Technologiques Mécatroniques de Forte Puissance) - Démonstrateur Valeo



Onduleur et convertisseur continu-continu



Essais de vibrations



FOCUS

MECHANICAL ENGINEERING AND SOLID MECHANICS SERIES



Uncertainty and Optimization in Structural Mechanics

Abdelkhalak El Hami and Radi Bouchaib

ISTE

WILEY

This book includes the most recent ideas coming from the research and industry in the field of optimization, reliability and the recognition of uncertainties. The book is made up of nine chapters, reviewing uncertainty tools, system reliability and optimization (of sizing, form, topology and multi-objective) of the systems. Optimization-reliability coupling will also be tackled, in order to take into account the uncertainties in the modeling and the resolution of the problems encountered. ♪

Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures

Abdelkhalak El Hami
Bouchaïb Radi

Hermès

Lavoisier

Résumé: La fiabilité des systèmes complexes est un défi majeur pour les entreprises industrielles. Ces dernières doivent répondre aux exigences des donneurs d'ordre dont le non-respect entraînerait des pénalités compromettant les marchés futurs. L'un des enjeux majeurs de l'optimisation fiabiliste est d'établir une surveillance rigoureuse, capable de prédire et de détecter les modes de défaillances des systèmes étudiés. Cet ouvrage présente les avancées de la recherche et de l'industrie appliquées aux domaines de l'optimisation, de la fiabilité et de la prise en compte des incertitudes en mécanique. Ce couplage est à la base de la compétitivité des entreprises dans les secteurs de l'automobile, de l'aéronautique, du génie civil ou encore de la défense. A c c o m p a g n é d ' e x e m p l e s détaillés, Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures présente les nouveaux outils de conception les plus performants. Il s'adresse aux ingénieurs et aux enseignants-chercheurs.

Seifedine Kadry - Abdelkhalak Elhami
Editors

Numerical Methods for Reliability and Safety Assessment

Multiscale and Multiphysics Systems

 Springer



INSA

INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES
APPLIQUÉES
ROUEN

OUTLINE

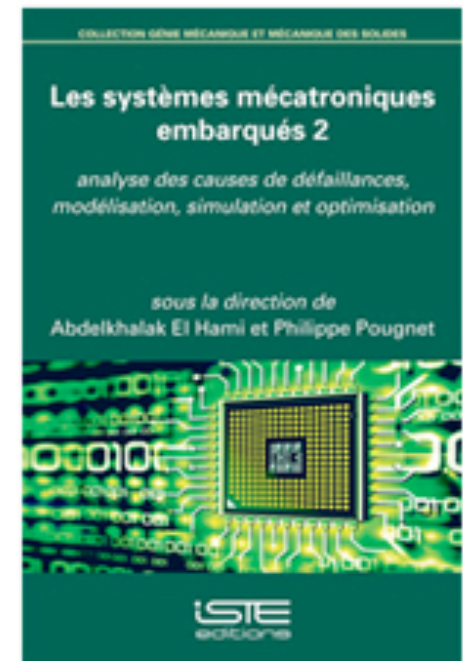
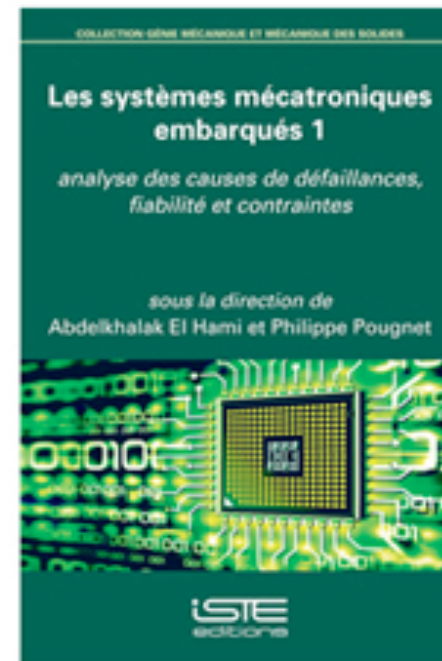
- **Context**
- **Introduction**
- **Basic principles**
- **Developments**
- **New formulation :**
- **Numerical example**
- **Conclusion and Perspectives**

AUDACE 2008-2012 labilisé par MOV'EO, NAE, FUI 6

(Analyse des caUses de DéfaillAnces des Composants des systèmes Electroniques embarqués)

Partenaires: THALES, VALEO, NXP, Ligeron SA- MB Electronique, CEVAA, CETIM, UVSQ, Univ-Rouen,, ECIME-ENSEA, IRSEEM-ESIGELEC, ENSICAEN-LaMIPS.

L'objectif de ce projet est d'analyser, d'appréhender et de modéliser les mécanismes de défaillances des composants électroniques embarqués pour apporter les améliorations nécessaires afin de garantir la performance et la fiabilité systèmes.



SUCCESS STORIES MOVEO
2005 – 2015

direction générale de la compétitivité
de l'industrie et des services



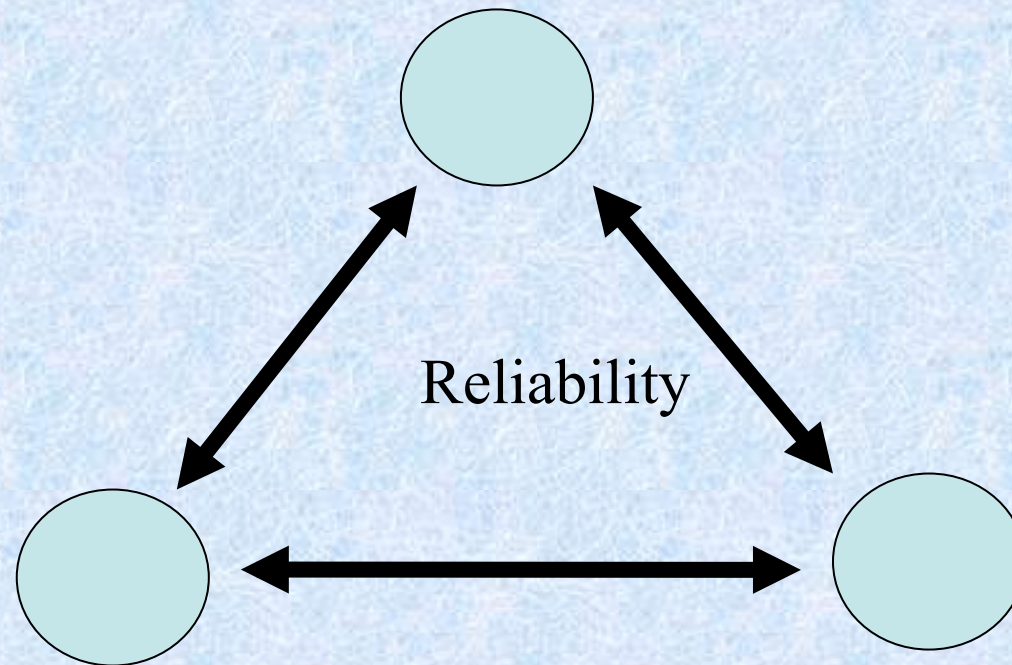
REGION
HAUTE
NORMANDIE

FIRST-MFP

16^E AAP FUI

National Research Program
MECHATRONIC RELIABILITY for HIGH POWER SYSTEM

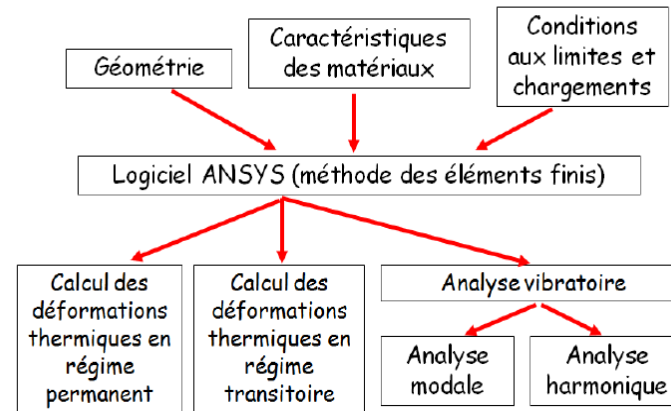
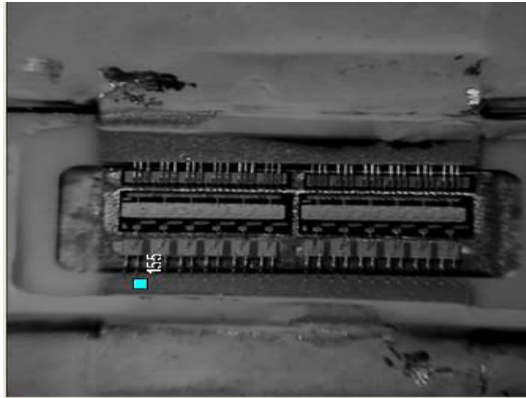
Probability Applied,
Uncertainties, Identification



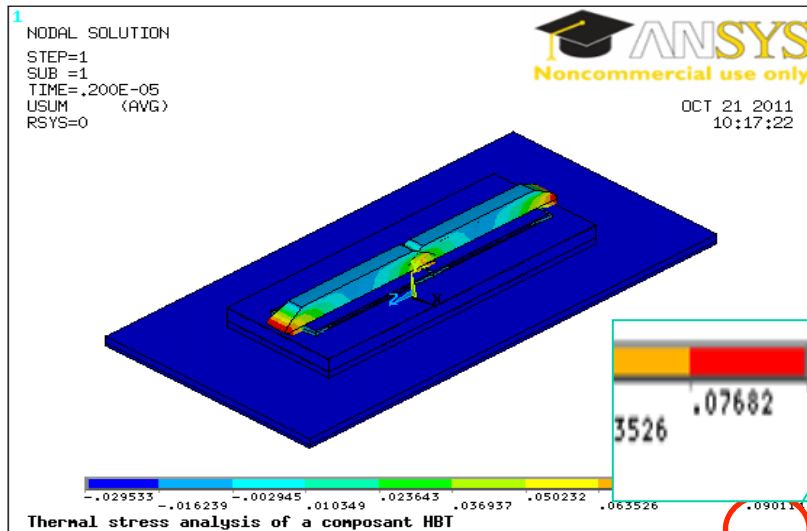
Experimental
Techniques, Optical
measurements

Modeling
Simulation,
Optimization

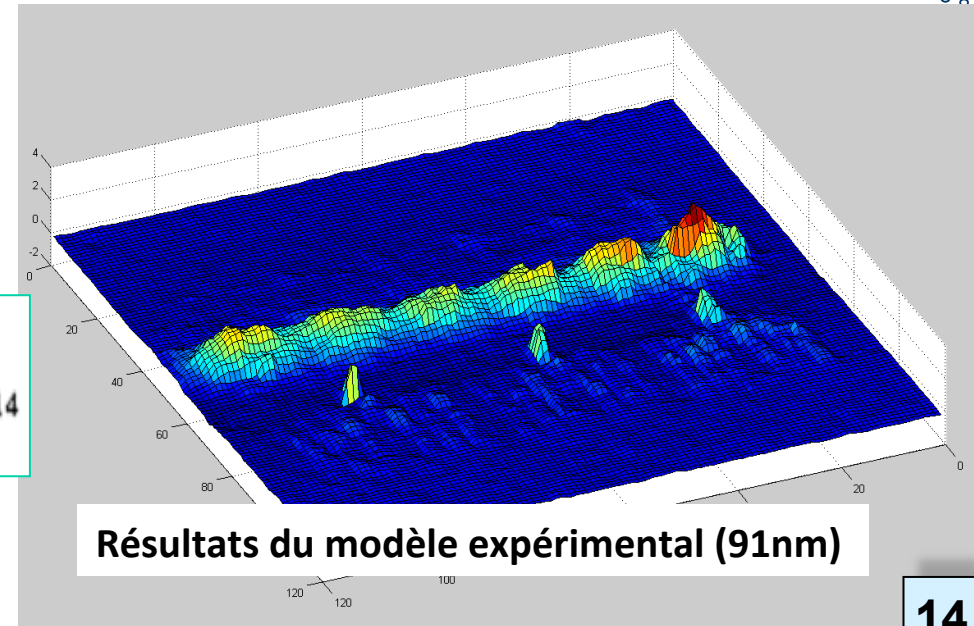
Calcul et mesure des déformations hors plan (déplacement) produites sous excitation électrique



confidential. They shall not be reproduced nor disclosed to any person except to those or written consent of THALES AIR SYSTEMS S.A..



Résultats du modèle numérique (90nm)



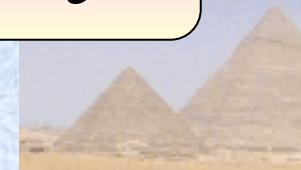
Structural design



Surface transport



Aeronautics



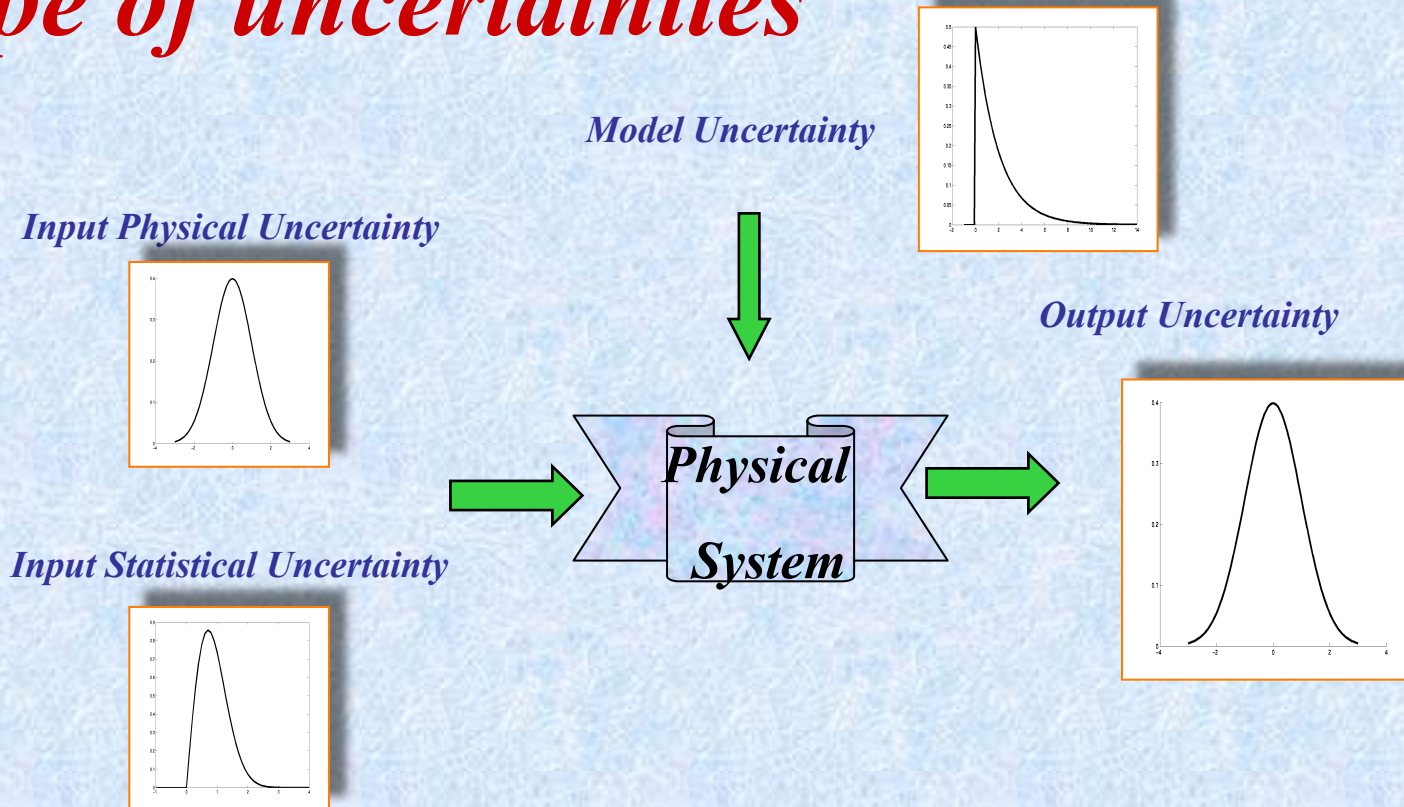
civil engineering

Problemes :

- Is the design sufficiently reliable?
- Which are the influences of uncertainties on the data?
- Are the safety coefficients satisfactory, penalizing or unsuited?
- Which is the choice to be made: the economic solution or most reliable?

Stakes : Good compromise enters the cost of the realization and reliability

Type of uncertainties



- Physical Uncertainty: Material properties, dimensions, loads, & ground profiles
- Statistical Uncertainty: Due to limited sample sizes, probabilistic model (distribution type and its parameters) is uncertain – lack of information
- Model Uncertainty: Uncertainty of mathematical models and numerical methods due to simplifying assumptions, unknown boundary conditions, unknown effects of other variables not included in the model, etc.

Deterministic Optimisation

Research of index of reliability



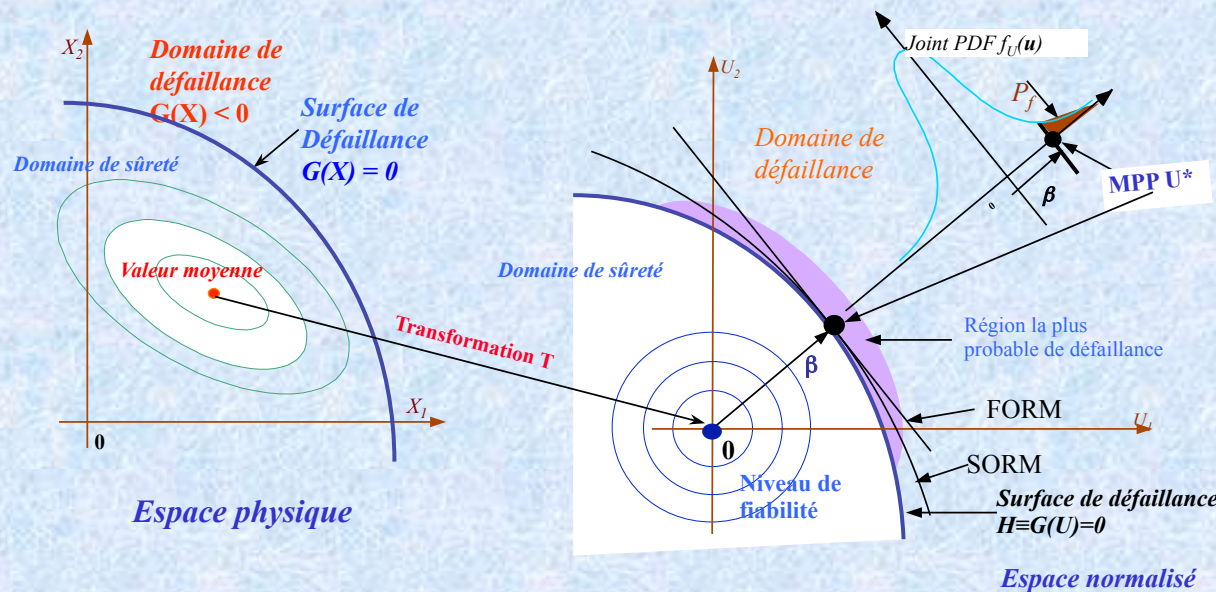
$$\min_x f(X) \quad \text{“Cost, volume, ...”}$$

$$\text{tel que } g_k(X) \leq 0 \quad \text{“Physics, geometrical, ...”}$$

$$\beta = \min \sqrt{\sum_i T_i^2(X, Y)} = \min \sqrt{U^T U}$$

$$\text{tel que } G(X, Y) \leq 0$$

X : Design Variables
 Y : Random Variables
 u : Normalized Variables



Probability of failure

$$P_f = \int_{G(\{x\}, \{y\}) \leq 0} f_{\{y\}}(\{y\}) dy_1 \dots dy_n$$

Hybrid Method

Hybrid Design Space

New form of objective function:

$$F(x,y) = f(x) \cdot \beta(x,y)$$

Limit-state to be satisfied:

$$G(x,y) = 0$$

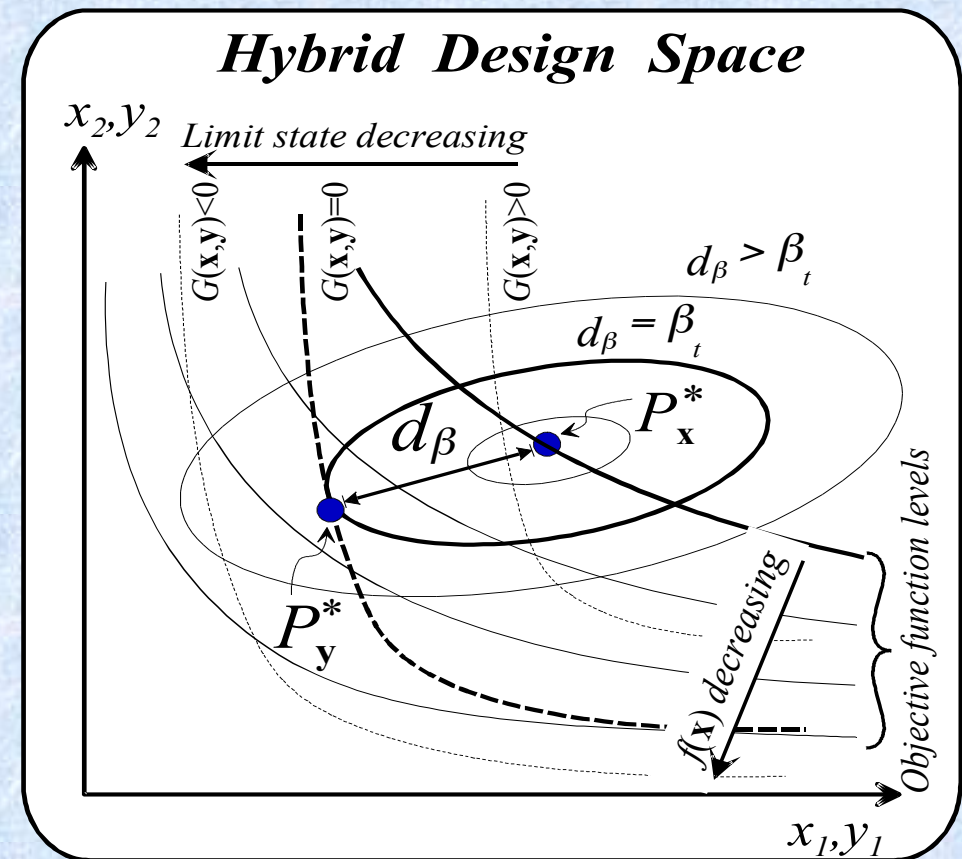
Hybrid problem:

$$\text{min: } F(x,y) = f(x) \cdot d_\beta(x,y)$$

$$\text{s.t. : } G(x,y) = 0$$

$$\text{: } g_k(x,y) \leq 0$$

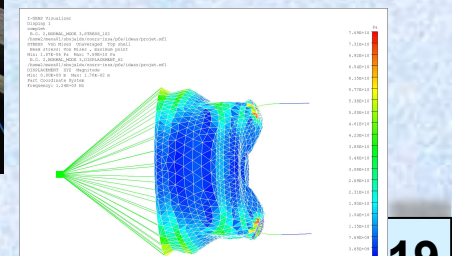
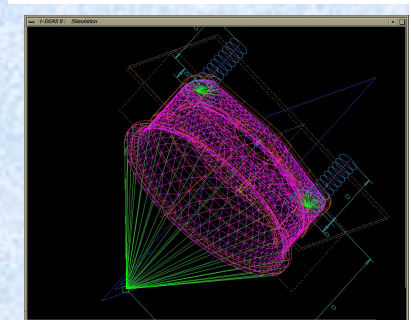
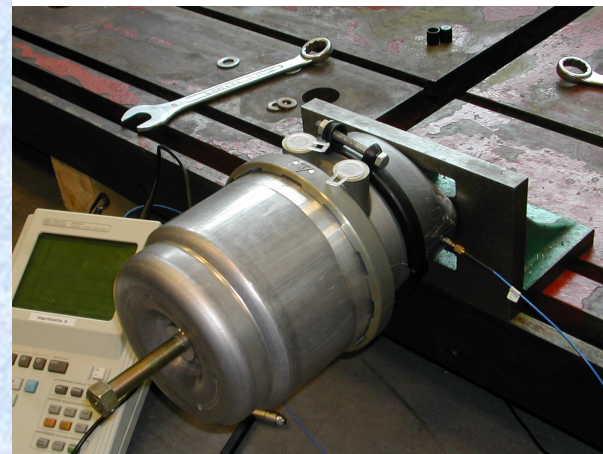
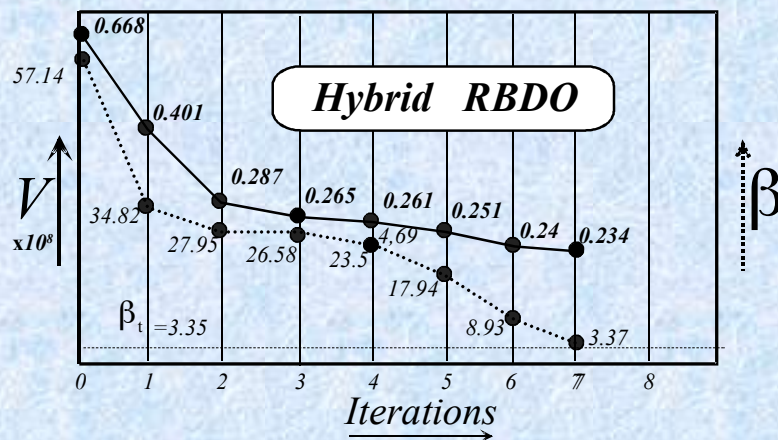
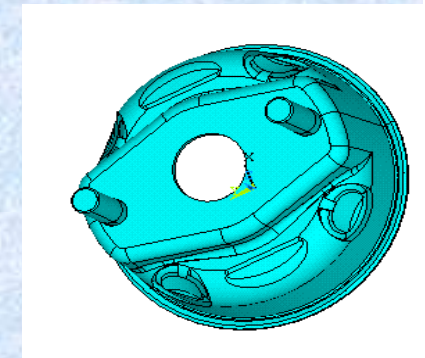
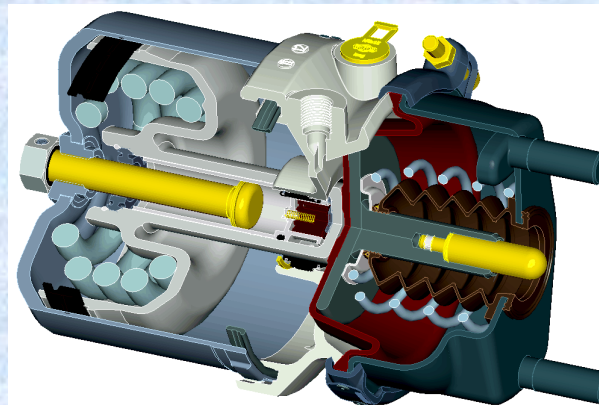
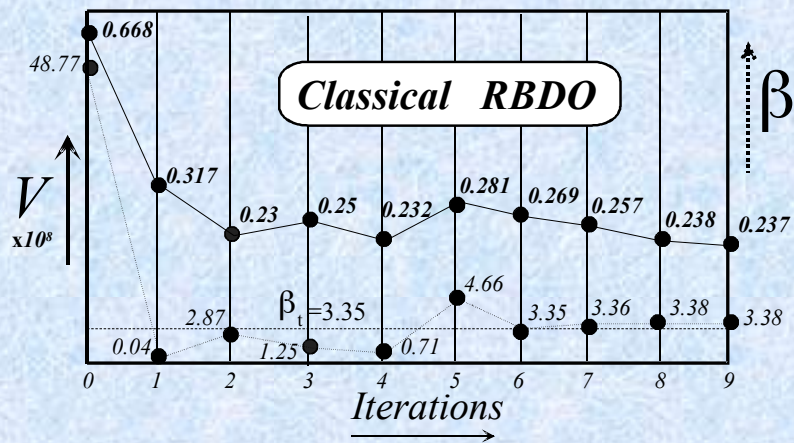
$$\text{: } \beta(x,y) \geq \beta_c$$



Reduction of Computing Time 80%



Optimisation on Reliability and Dynamic Response Analysis of a Spring Cylinder for Trucks Brake system



- Iteration History

Hybrid Method case dynamic

New form of objective function:

$$F(x,y) = f(x) \cdot d_{\beta_a}(x,y) \cdot d_{\beta_b}(x,y)$$

Limit-state to be satisfied:

$$G(x,y) = 0$$

Hybrid problem:

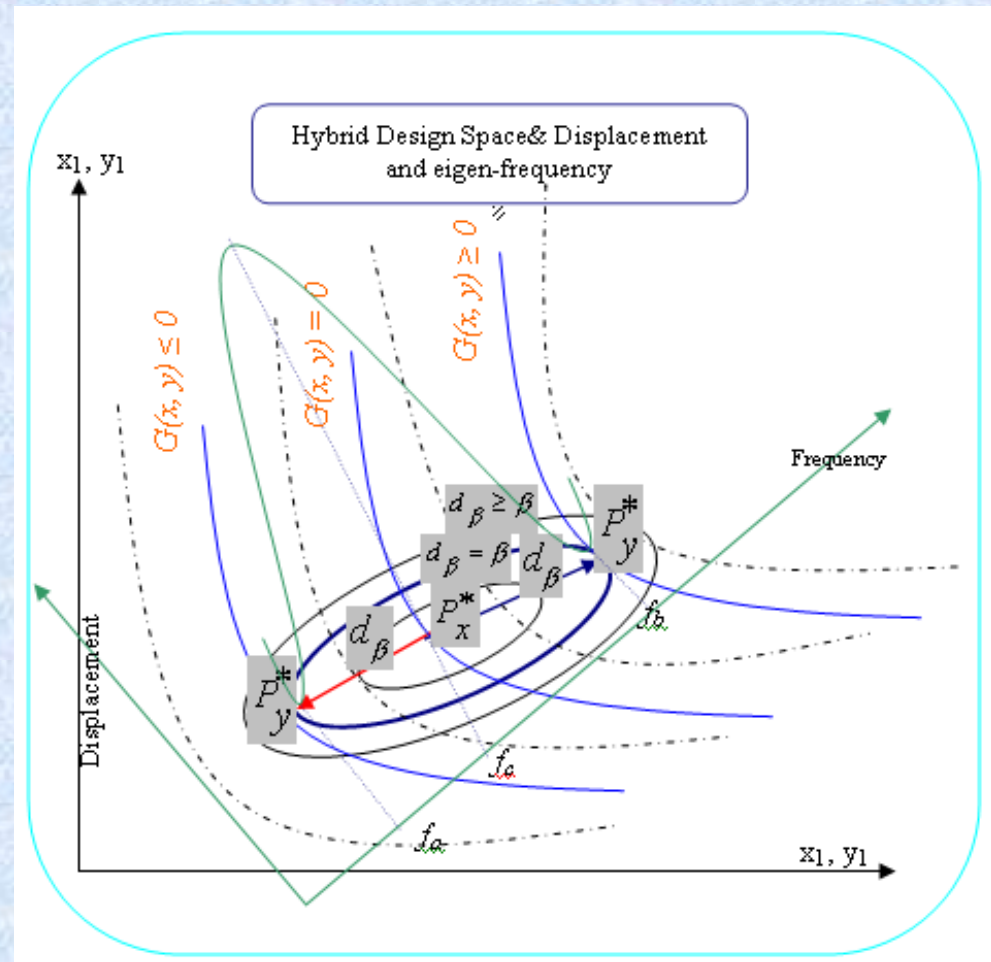
min: $F(x,y) = f(x) \cdot d_{\beta_a}(x,y) \cdot d_{\beta_b}(x,y)$

s.t. : $G(x,y) = 0$

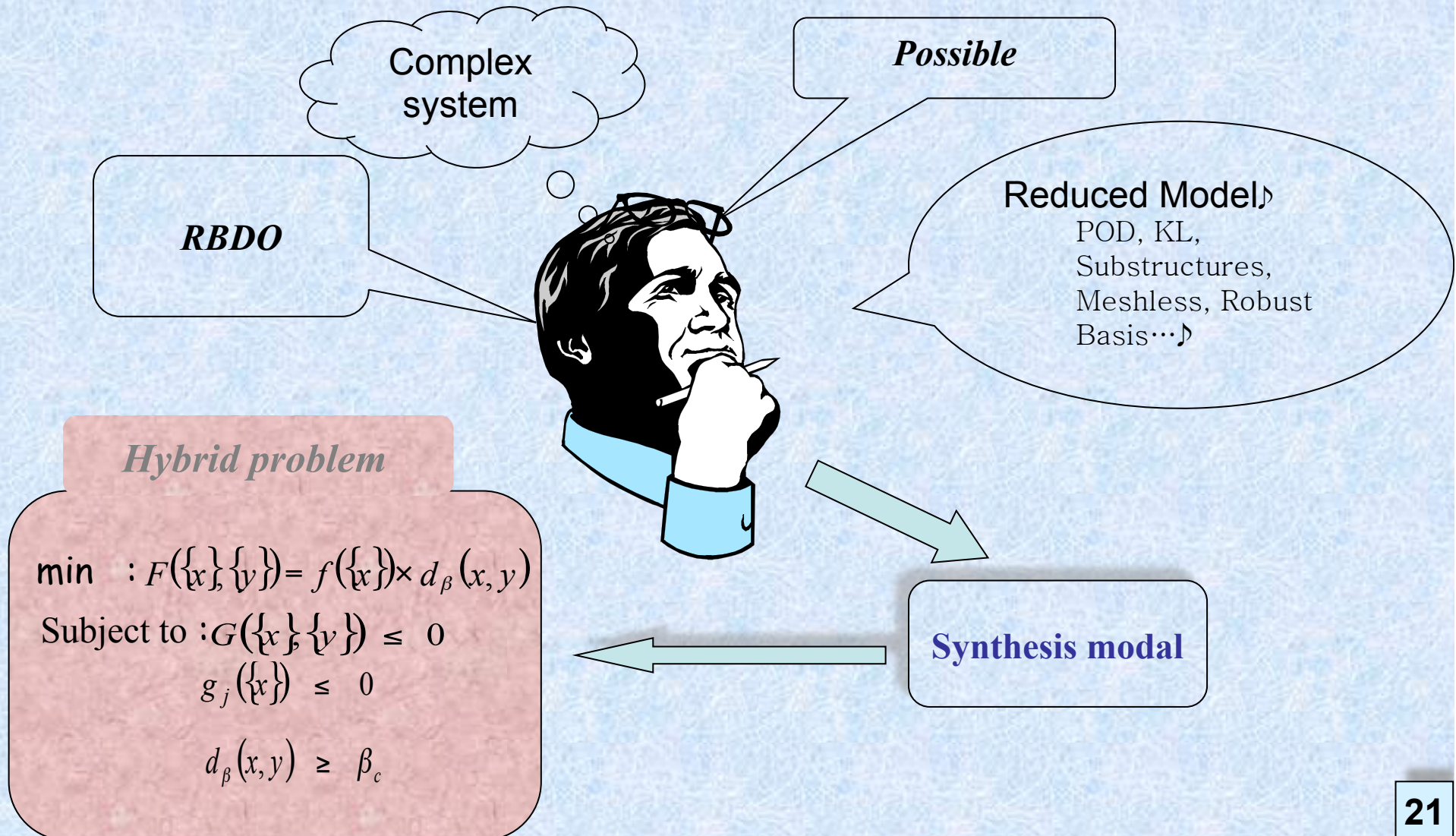
: $g_k(x,y) \leq 0$

: $\beta_a(x,y) \geq \beta_c$

: $\beta_b(x,y) \geq \beta_c$



Integrate the method of Synthesis modal into the hybrid RBDO



Conception robuste des systèmes mécatroniques

Methode de coffin Manson

$$N_f = C_1 \Delta \varepsilon_p^{C_2}$$

Critère de défaillance:
Fatigue thermo-mécanique

Estimation de la durée de
vie des joints de brasure

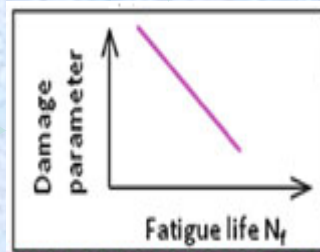
Modèle probabiliste



- Matériaux
- Géométrie
- Chargements

Input data

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mk} \end{pmatrix} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$$



Modèle numérique FEM

Calcul des
déformations plastiques
cumulées (Ansys)

Output response

$$Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$$

Simulation Monte Carlo (Latin Hypercube sampling method)

Modèle de
corrélation: $z(x)$

modèle de krigage
(DACE : toolbox Matlab)

$$G(x) = F(x, \beta) + z(x)$$

Modèle de régression :
 $F(x, \beta) = \beta_1 f_1(x) + \beta_2 f_2(x) + \dots + \beta_p f_p(x)$

Probabilistic distribution of the response



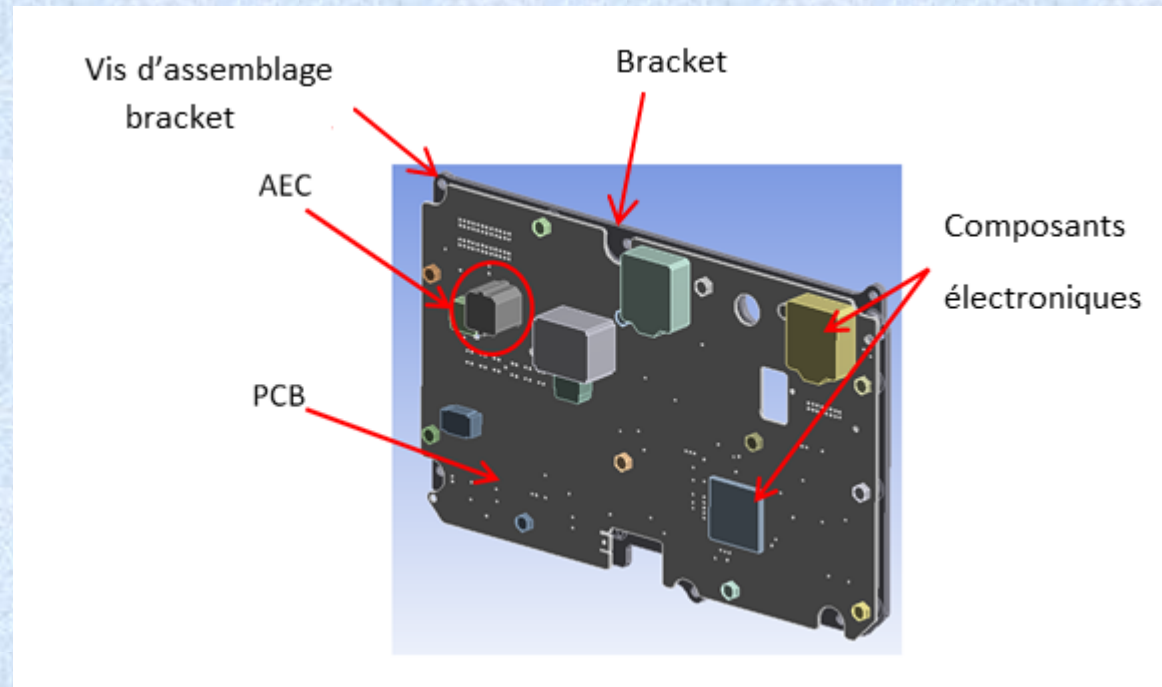
Nombre de cycles de fatigue

Identifier la loi de distribution
et ces moments statistiques

(Toolbox Matlab)

Fatigue Probabiliste due aux vibrations aléatoires

Application industrielle



Dans ce qui suit:♪

- *Application de l'analyse spectrale des vibrations aléatoires => Estimation de la moyenne du dommage par les approches temporelle et spectrale.♪*

♪

- *Utilisation de la méthode du 'zoom structural'.♪*

Estimation probabiliste du dommage par fatigue d'une carte électronique

Validation du modèle numérique

➤ *Résultats de l'analyse modale conditions aux limites libre-libre*

Mode freq.	Experimental mode shape	Numerical mode shape	Mode freq.	Experimental mode shape	Numerical mode shape
195.31 Hz (Exp.)			328 Hz (Exp.)		
196.73 Hz (Num.)			334 Hz (Num.)		
236.3 Hz (Exp.)			363 Hz (Exp.)		
215.6 Hz (Num.)			373 Hz (Num.)		
255.8 Hz (Exp.)			629 Hz (Exp.)		
240.6 Hz (Num.)			628 Hz (Num.)		
320.3 Hz (Exp.)			701 Hz (Exp.)		
301.9 Hz (Num.)			712 Hz (Num.)		

(a)

(b)

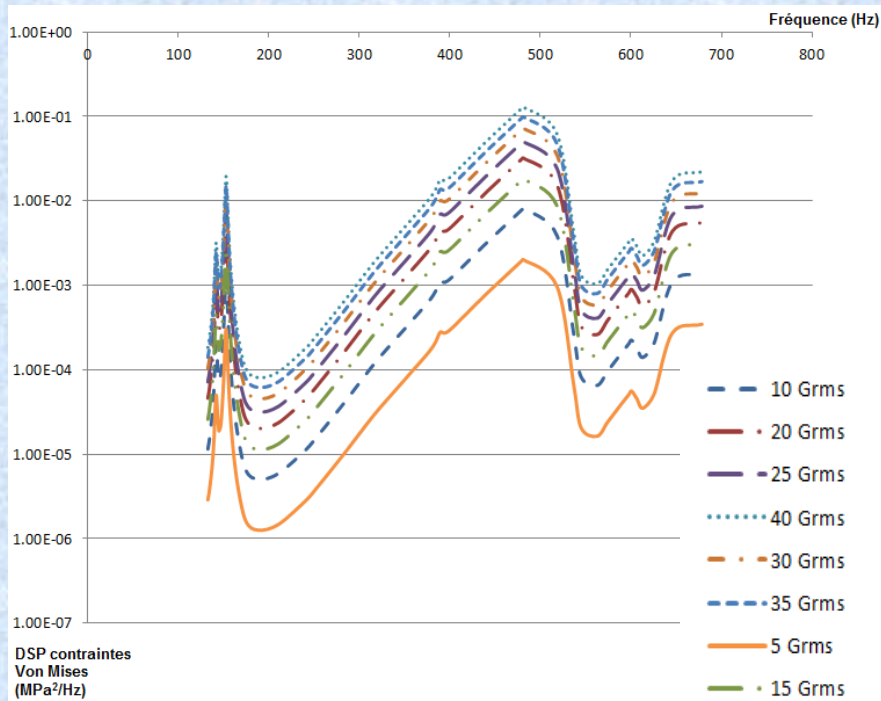
Carte PCB nue

Carte équipée de composants + plaque de rigidité

Estimation probabiliste du dommage par fatigue d'une carte électronique

Dommage par fatigue : approches temporelle et spectrale ♪

➤ *DSP de réponse en contraintes Von Mises numérique du modèle local ♪*



Méthodes	E[D]	Temps nécessaire pour la défaillance	Temps de calcul*
Rainflow + MC	0.2865	2h 31 min	1 semaine (1000 itérations)
Dirlik	0.2596	2h 34 min	14.45 secondes
Single Moment	0.2597	2h 32 min	1.61 secondes
Essai expérimental	N/A	2h 40 min	N/A

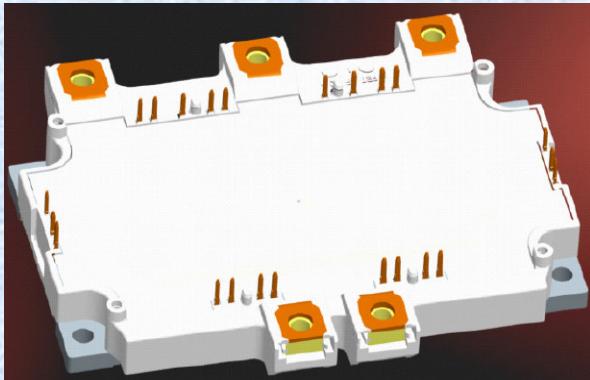
* Caractéristiques de l'ordinateur : Core i7 CPU 2.40GHz RAM 28GB / disqueSSD

Conclusion

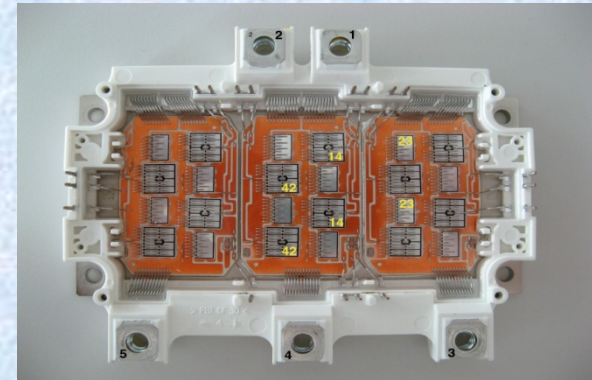
- **Estimation du dommage par fatigue => approches temporelle et spectrale => des signaux stationnaires et gaussiens.**
- **Technique du 'zoom structural' en vibrations aléatoires => difficultés dans l'application et le transfert du chargement.**
- **L'estimation du dommage par fatigue dans les joints brasés et confrontation aux essais expérimentaux - méthode pertinente pour l'étude de la fiabilité du montage des composants sur PCB.**
- **Nouvelle méthode de l'optimisation de la conception de la structure en tenant en compte les limitations en fatigue due aux vibrations aléatoires => chargement aléatoire => problèmes de convergence.**

Modélisation thermomécanique du module de puissance d'un système Véhicule Hybride VALEO (module IGBT)

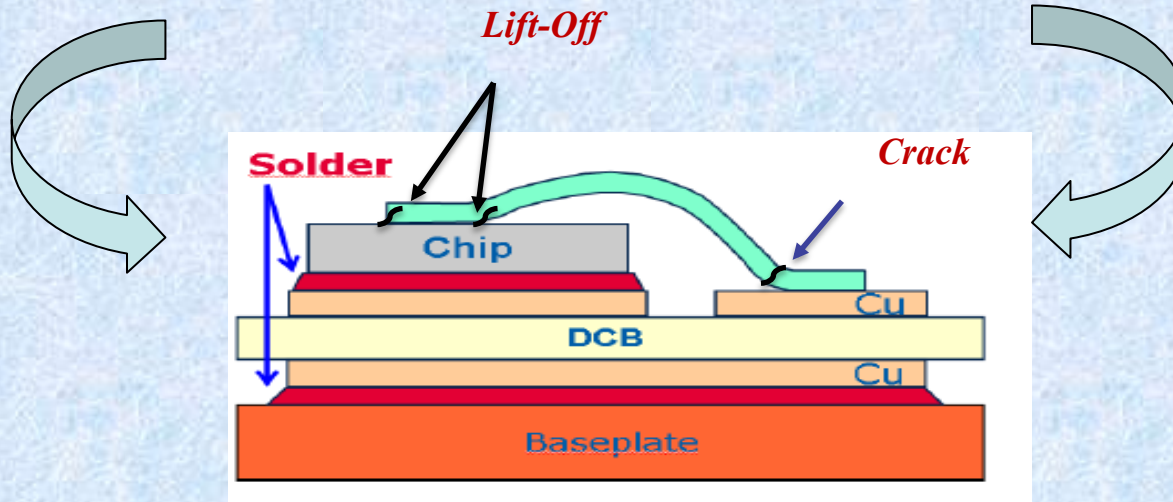
Modes de défaillance



*Electronic Board (Valeo)
Power module INFINEON FS215*

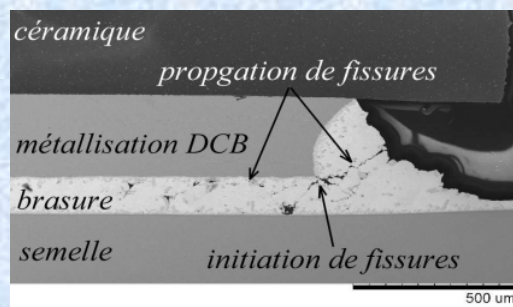
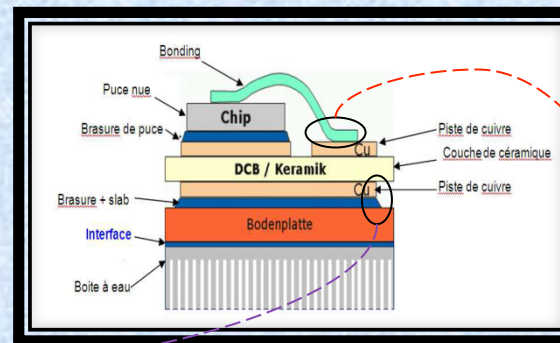


*Thermique
(variations cyclique de température)*

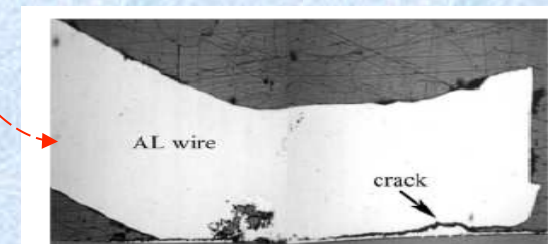


Modes de défaillance

- La différence de CTE impose de fortes contraintes thermomécaniques sur les interfaces: brasure Puce/substrat, substrat/semelle et bonding/puce lorsque la puce est soumise à des variations de température.
- Le mode de défaillance dominant est due à **la rupture par fatigue** thermomécanique des brasures.



(Thèse BOUARROUDJ, ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN)»

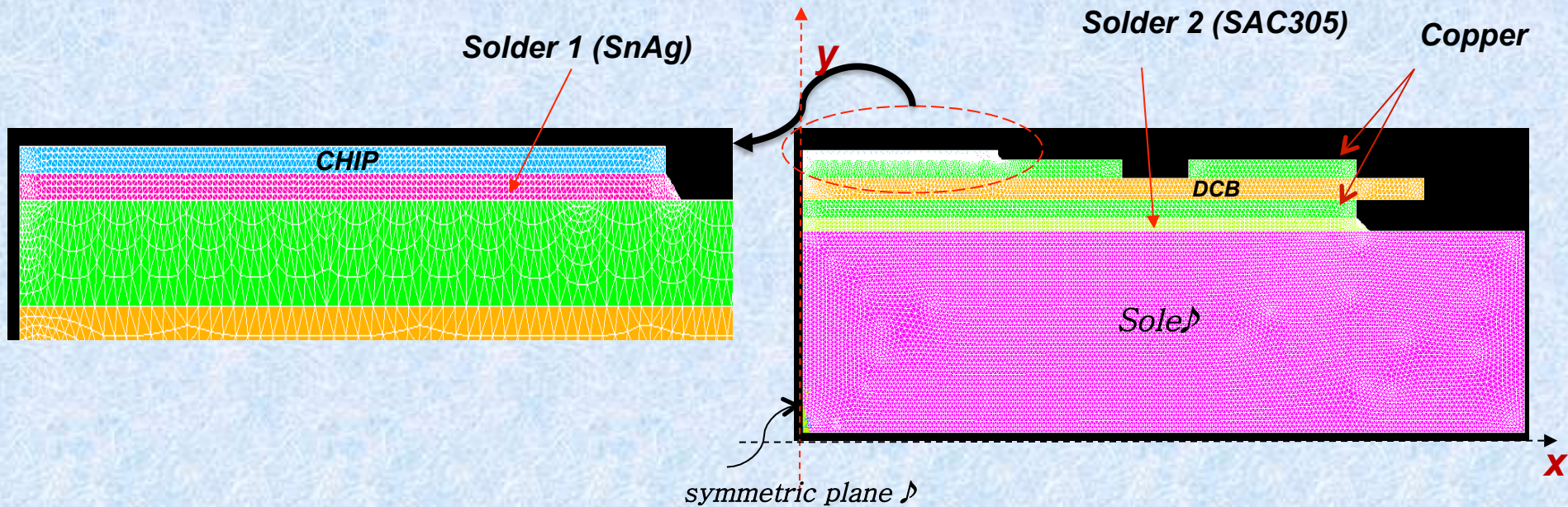


(c) Fissuration au niveau de l'interface fil-puce.

B. Weiss T. Licht G. Khatibi, W. Wroczewski.. *Microelectronics Reliability*, 48(11-12) :1822 – 1830,2008.

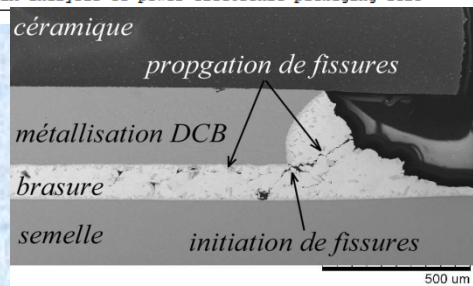
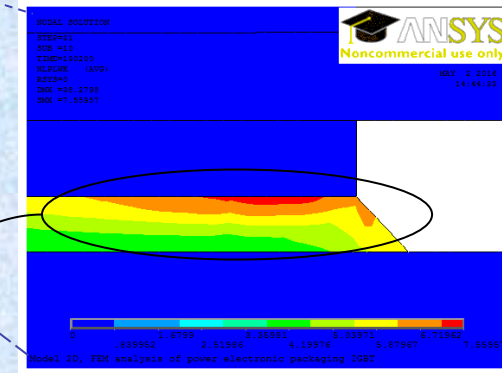
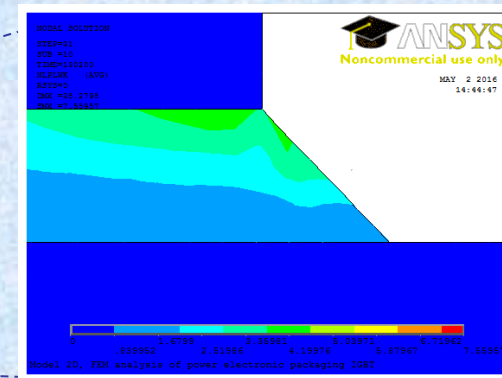
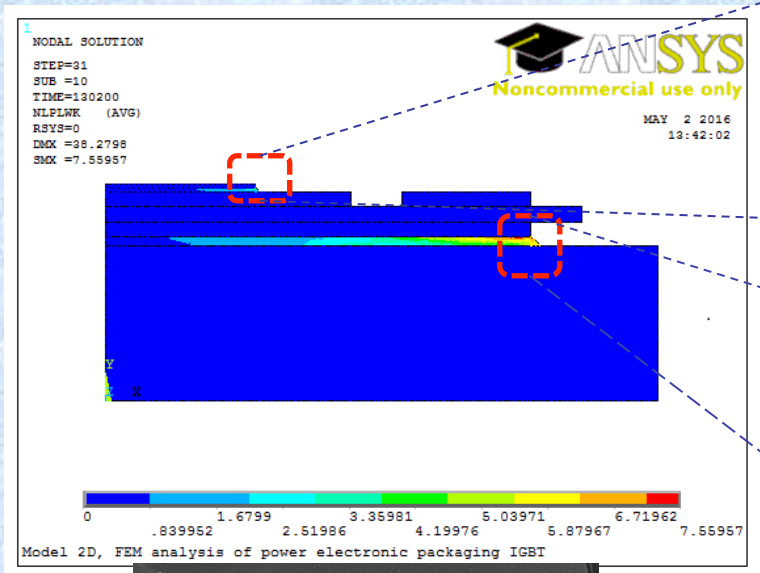
Modèle élément finis

- *Raffiner le maillage autour de la brasure,*
- *Tenir compte des non-linéarités matérielles*
- *Conditions aux limites :*
 - Symétrie suivant Y: Blocage des déplacements nœuds suivant x (Plan X-Z)*
 - Encastrement : Blocage des déplacements nœuds situés en bas du modèle*



Résultats du simulation numérique

➤ Distribution de l'énergie plastique cumulée dans la brasure après six cycles de chargement thermique



(Thèse BOUARROUDJ, ECOLE NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN)

➤ Les déformations plastiques maximales se concentrent au coin de l'interface entre la brasure et la métallisation du DCB et entre la brasure et la puce.