

# Nouvelles approches d'évaluation de la fiabilité : Perspectives pour les nanotechnologies - New approaches of reliability assessment : Prospects for nanotechnologies

**L. Bechou\***, **Y. Danto\***, **JY. Deletage\***, **F. Verdier\***  
**D. Laffitte\*\***, **JL. Goudard\*\***

**\*Laboratoire IMS – Université Bordeaux 1 - UMR CNRS n°5218**  
351, Cours de la Libération – 33405 Talence Cedex  
*mél. laurent.bechou@ims-bordeaux.fr*

**\*\*AVANEX-France**, Route de Villejust, 91625 Nozay Cedex  
*mél. dominique\_laffitte@avanex.com*

# Plan de l'exposé

- ◆ **Evaluation de la fiabilité:** *Contexte et enjeux*
- ◆ **Nanotechnologies:** *Contraintes liées aux approches "top-down" et "bottom-up"*
- ◆ **Construire la fiabilité:** *Nouvelles approches de prévision de durée de vie (Cas d'étude)*
- ◆ **Synthèse :** *Feuille de route pour l'évaluation de la fiabilité des nanotechnologies*

# 1- Evaluation de la fiabilité : *Contexte et enjeux*

- La réduction de l'échelle technologique s'accroît rapidement
- La complexité des fonctions augmente
- Les environnements sévères se banalisent

**MAIS...**

- Changements technologiques récents et majeurs (nouveaux mécanismes physiques)
- Exigence "haute" fiabilité irréversible

⇒ *Challenge fiabilité: "critique"*

⇒ *Vers la fiabilité construite*

## ■ Objectifs de fiabilité pour les nanotechnologies\*

Table 45a Reliability Technology Requirements—Near-term

Year of Production	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	80	70	65	57	50	45	40	36	32	
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)(contacted)	90	78	68	59	52	45	40	36	32	
MPU Physical Gate Length (nm)	32	28	25	22	20	18	16	14	13	
Early failures (ppm) (First 4000 operating hours)** [1]	50– 2000	50– 2000	50–2000	50– 2000	50– 2000	50– 2000	50– 2000	50– 2000	50–2000	
Long term reliability (FITS = failures in 1E9 hours) [2]	10-100	10-100	50–2000	10–100	10–100	10–100	10–100	10–100	10–100	
Soft error rate (FITs)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Relative failure rate per transistor (normalized to 2005 value) [3]	1.00	0.79	0.63	0.50	0.40	0.32	0.25	0.20	0.16	Number of transistors
Relative failure rate per m of interconnect (normalized to 2005 value) [4]	1.00	0.84	0.71	0.59	0.51	0.47	0.41	0.37	0.33	Customer needs; J11 length of interconnect

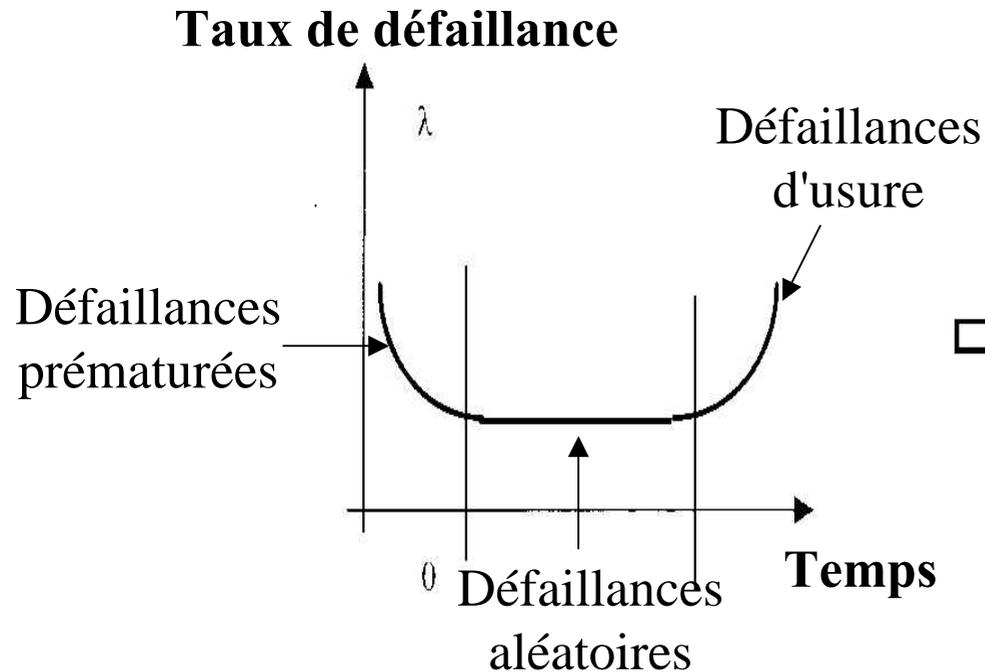
\* Critical Reliability Challenge for The ITRS, published by RTAB at Sematech, 2005

ITRS = International Technology Roadmap for Semiconductors

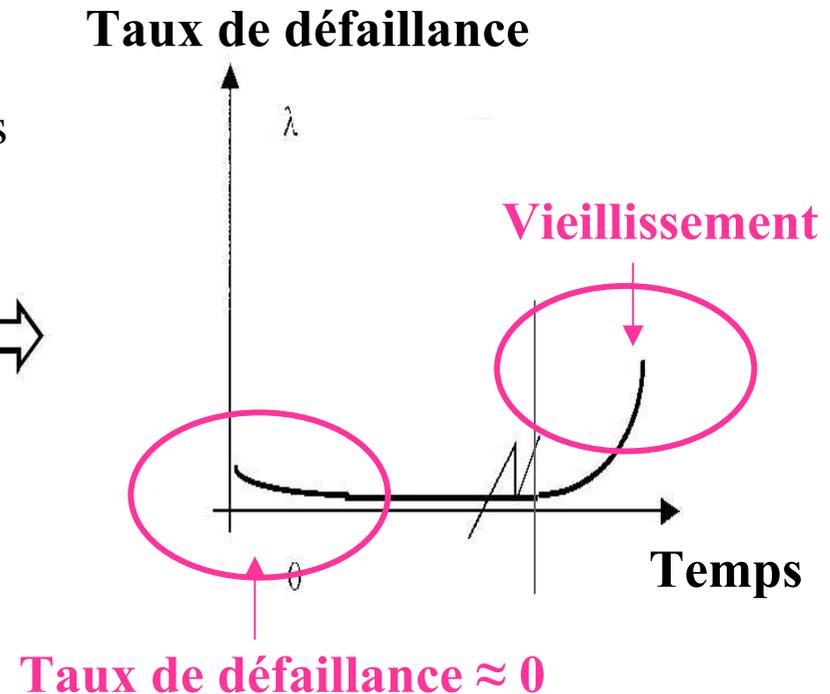


## ■ Notions élémentaires de fiabilité

*Courbe en "baignoire"  
("Bath curve")*

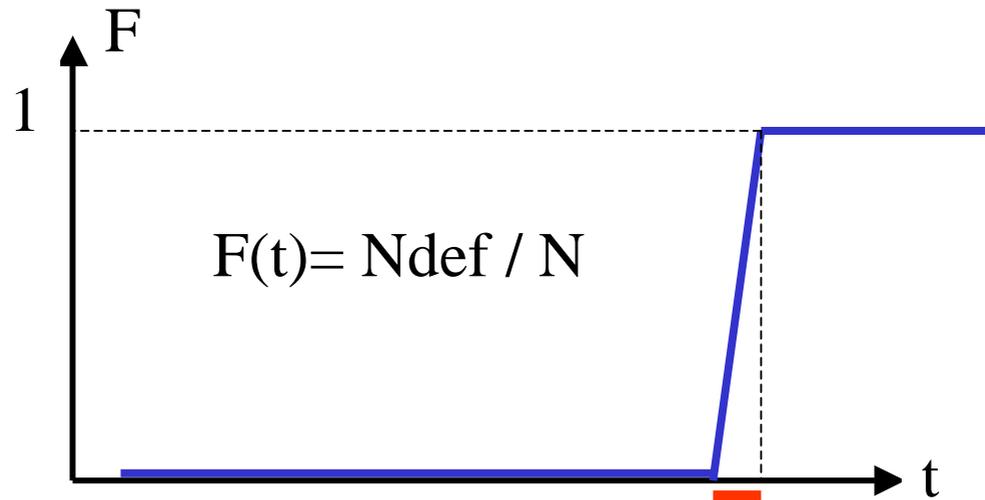


*"Roller-coaster curve"*



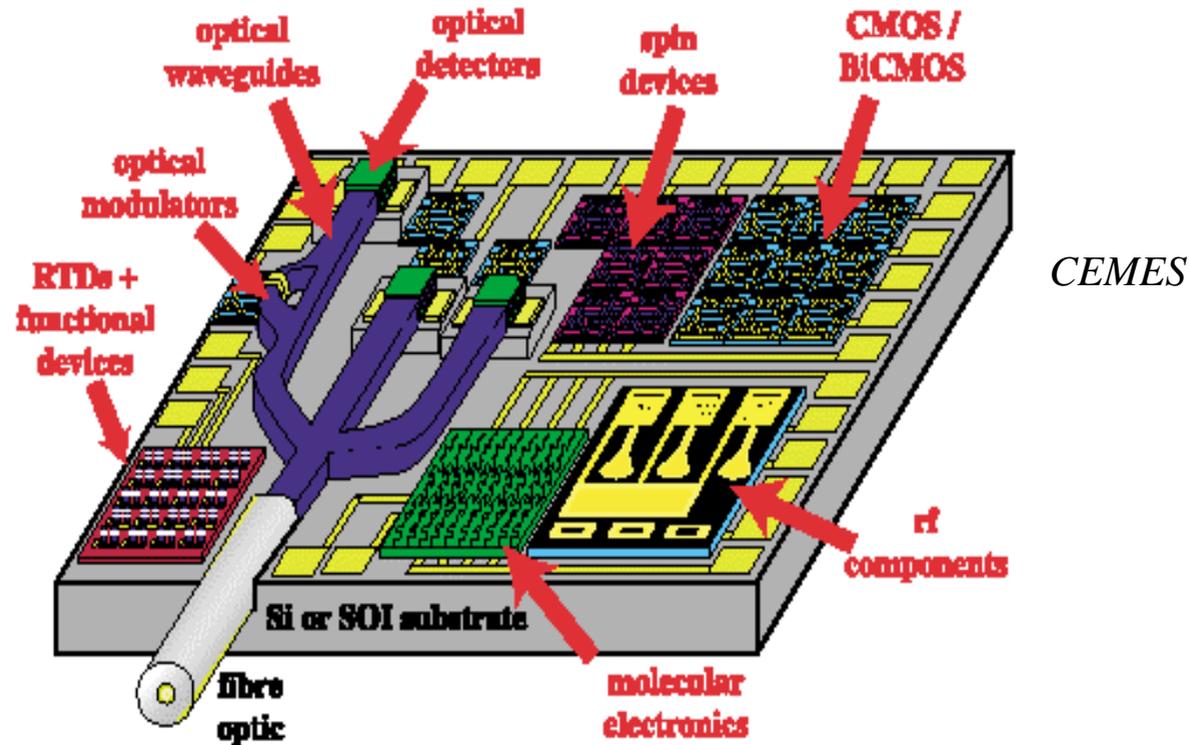
## ■ Le challenge actuel de la fiabilité...

- Aucune défaillance (ou quasi) sur une durée *spécifiée*
- Une courbe des défaillances cumulées où les défaillances sont concentrées dans un intervalle de temps réduit => Difficulté à démontrer expérimentalement



Déf. : Taux de défaillance (hazard rate):  $1FIT = 1def/10^9h$

- Exemple de nanocomposants/nanocircuits destinés à être incorporés dans des systèmes mixtes (SOCs)



- *Circuits multi-technologies et multi-interconnexions* : phénomène analogue aux cartes, aux microassemblages et aux microsystèmes
- *Mêmes exigences de fiabilité que les technologies "micro"*

## 2- Nanotechnologies:

### *Contraintes liées aux approches "top-down" et "bottom-up"*

**"TOP-DOWN"**: *Extension des procédés actuels "micro" vers les dimensions nanométriques*

**"BOTTOM-UP"**: *Synthèse chimique et exploitation des structures moléculaires ou atomiques*

#### *Points communs :*

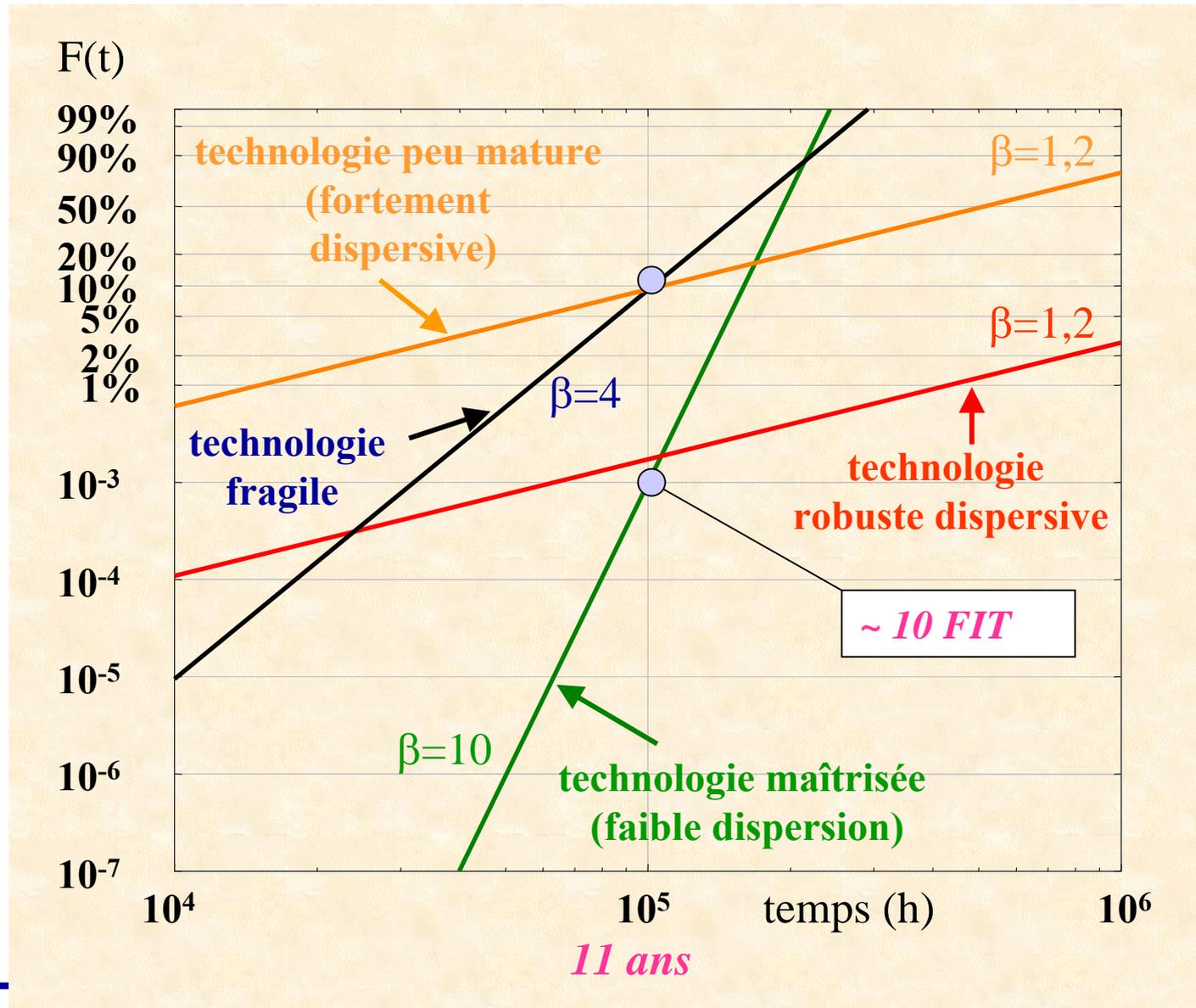
- => Nouveaux matériaux: diélectriques, interconnexions...*
- => Evolution des procédés de lithographie: Extrême UV, Optique Faisceaux d'électrons, Nanoimpression...*
- => Introduction de « désordre » intrinsèque dans les procédés :  
1D-nanowire, réseaux CNT pour biocapteurs, matériaux organiques*
- => Fort impact des fluctuations technologiques/dispersions paramétriques*

# ■ Impact de la maturité de la technologie sur la fiabilité intrinsèque

Loi de Weibull

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1}$$



## ■ Contraintes associées aux dispositifs nanotechnologiques

- Faible population de composants => faible rendement de fabrication
- Structures élémentaires et défauts de tailles identiques
- Sensibilité aux EOS/rad SEU
- Sensibilité aux agressions chimiques (surfaces)
- Fragilité thermique (organiques)
- Susceptibilité thermomécanique, fatigue mécanique
- Connexion avec l'environnement « micrométrique »

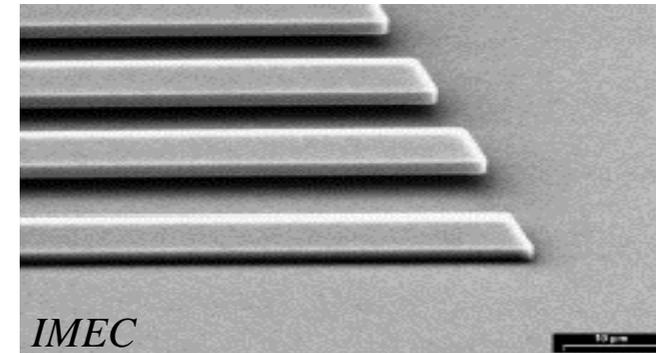
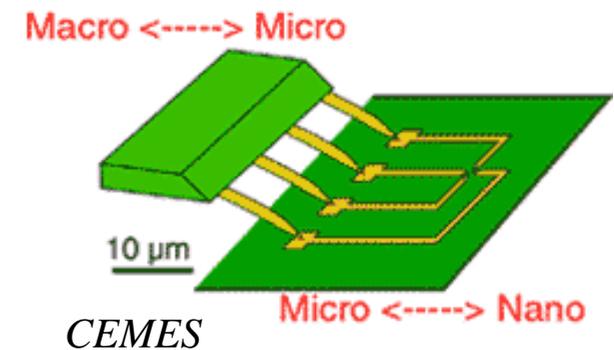
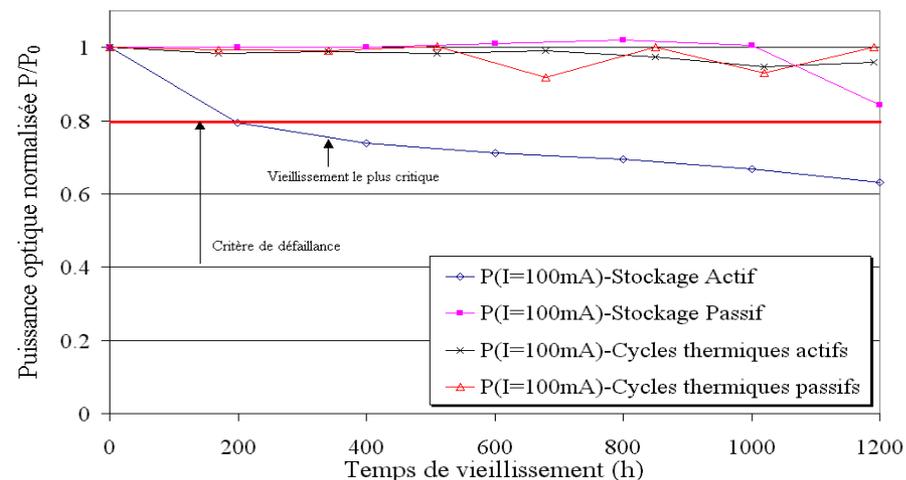
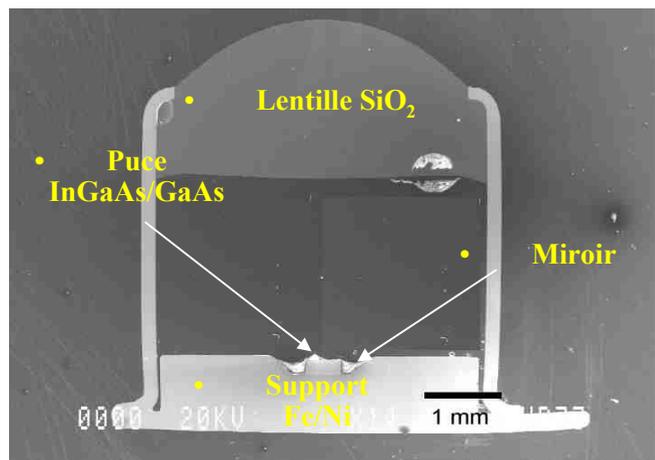


Figure 1. Stiction failure of cantilever beams.



### **3- Construire la fiabilité:** *Nouvelles approches de prévision de durée de vie*

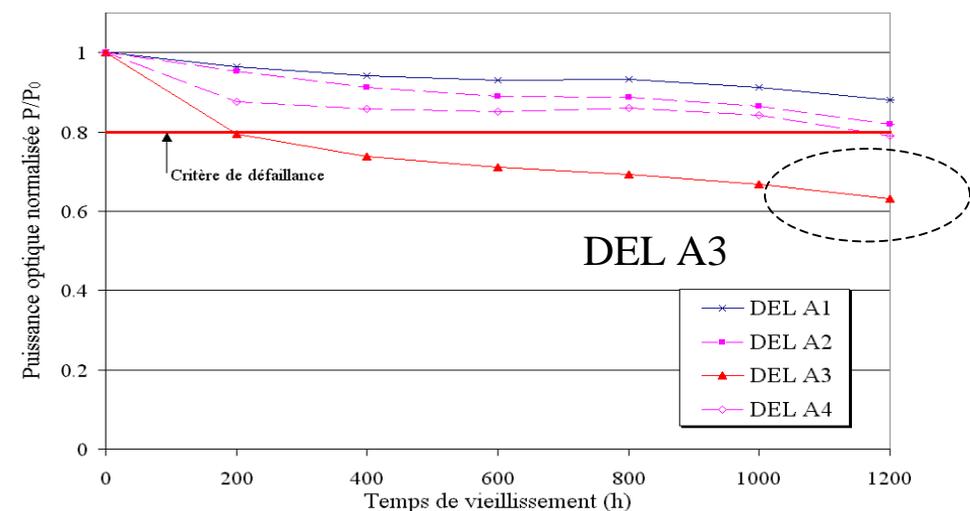
# Ex. 1 - Fiabilité de DELs InGaAs/GaAs 935 nm encapsulées : *Du mécanisme physique de dégradation ... à la distribution des durées de vie (Collaboration IXL-CNES)*

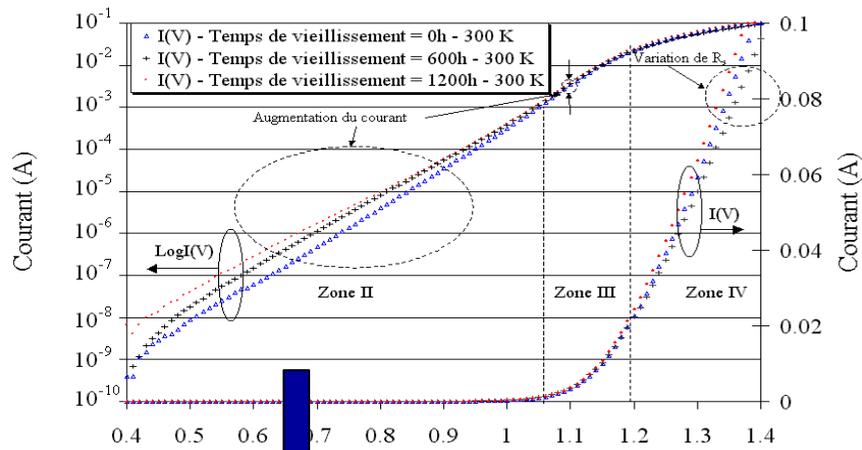


- Criticité du stockage actif ( 125 °C – 110 mA)
- Vieillessement prématuré (après 400 h)



- Caractérisations électriques/optiques  
- Etude des mécanismes de dégradation





**Hypothèse : Augmentation du courant de recombinaison => diminution de la durée de vie des porteurs dans la zone active**

$$I_{(II)} = I_{hj} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

$$I_{hj}(T) = I_{hjcr} + I_{hj0} = a(T) \exp(-bV)$$

Courant induit par la présence  
de centres recombinants (non-radiatifs)

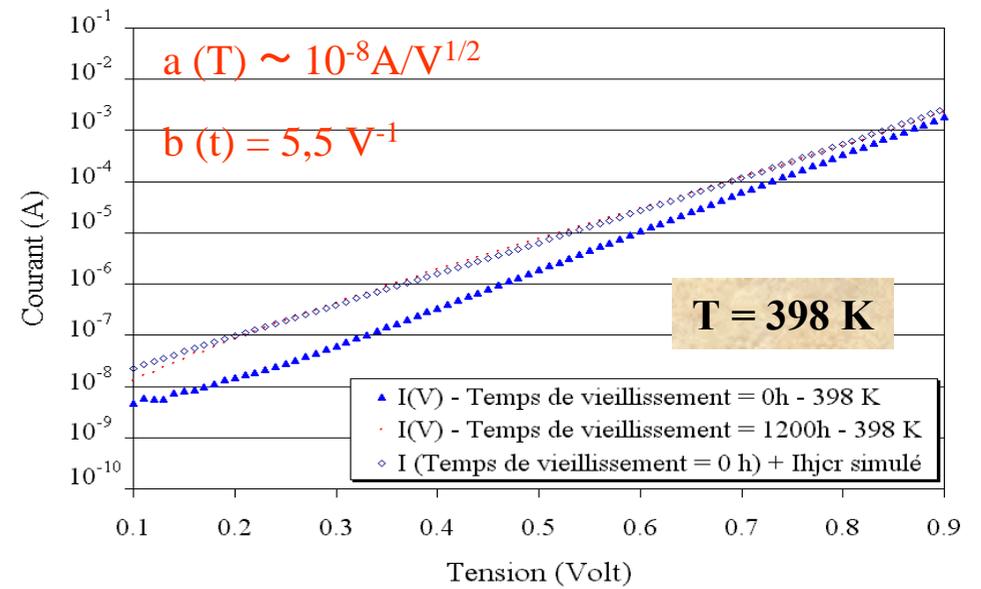
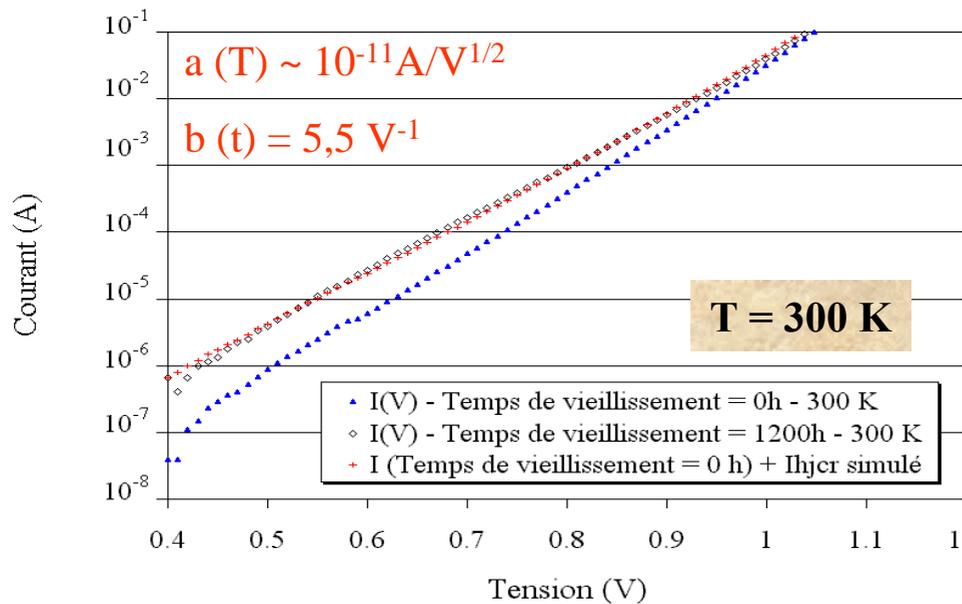
$$a = \frac{qn_i kd (N_0 - N_{a1})}{2} = f(T)$$

$$b = \frac{mM}{16Dt} = \frac{K}{16Dt} = g(t)$$

**Paramètres analysés en température et en durée de vieillissement**

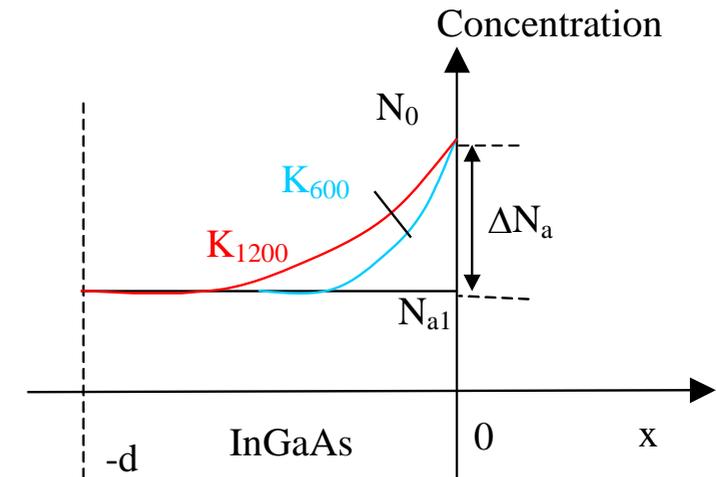
*Deshayes, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, (2002)*





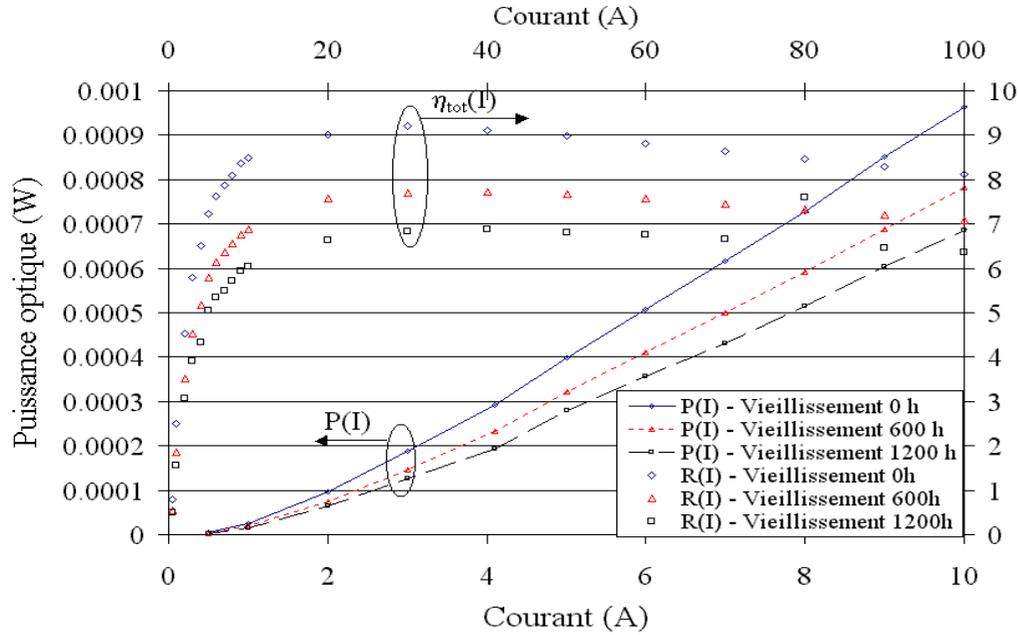
**Relation courant de saturation = f(a, b) – constantes de diffusion (D, K)**

D	$4,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K (600h)	$\sim 10 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
K (1200h)	$\sim 3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$



*T. Mozume, J. of Crystal Growth, 227, p. 577-581, 2001*

**Origine du mécanisme de défaillance** : Evolution du profil de dopage et augmentation du niveau de dopage P dans la zone active InGaAs (activée en température)



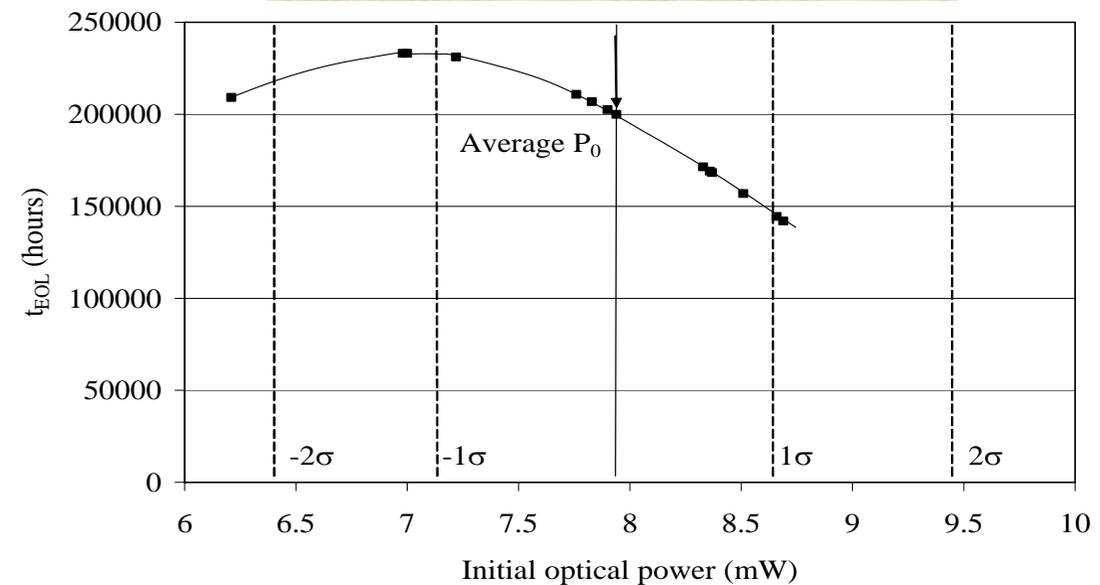
Rendement optique (%)



$$\frac{\Delta P_{opt}}{P_0} = \exp(-\sqrt{t/\tau_a}) - 1 \Rightarrow 20\%$$

$t_a =$  Constante de dégradation ( $s^{-1}$ )

**Donnée fabricant  $\Rightarrow P_{min} = 4,7$  mW**



Contrainte mixte (I,T):

$$AF = AF_I \times AF_T = \left(\frac{I_{acc}}{I_{op}}\right)^\beta \exp\left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{acc}}\right)\right]$$



**Impact de la distribution paramétrique de la puissance optique initiale sur la distribution des durées de vie en conditions opérationnelles (100 mA, 125°C)**

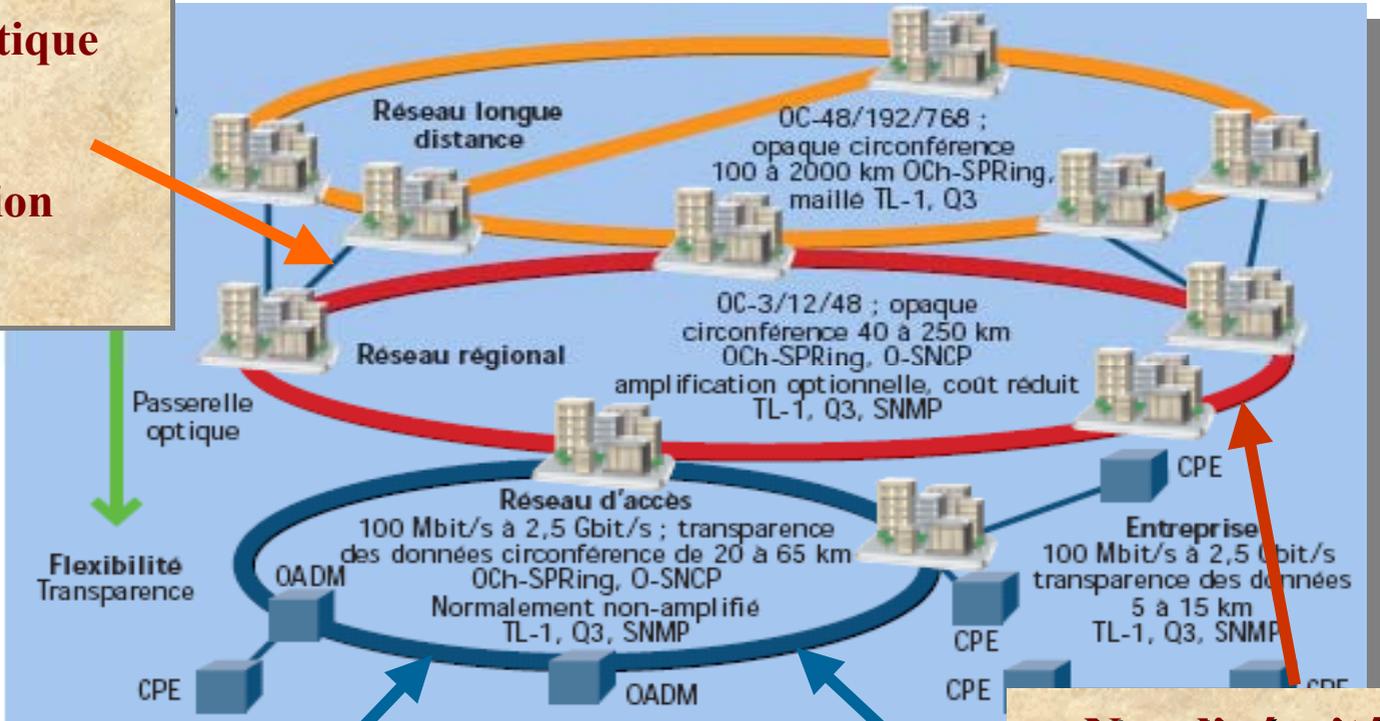
*Deshayes et al. QREI, 21, p. 571-594, (2005)*



# Ex. 2 - Fiabilité d'amplificateurs optiques DH InGaAsP/InP 1,55 μm : Technologie en maturité – Reconstruction statistique de durées de vie

(Collaboration IXL-ALCATEL Optronics-OPTO+)

**Intégration :**  
Amplification optique  
en ligne  
Pré-amplification  
(Booster)

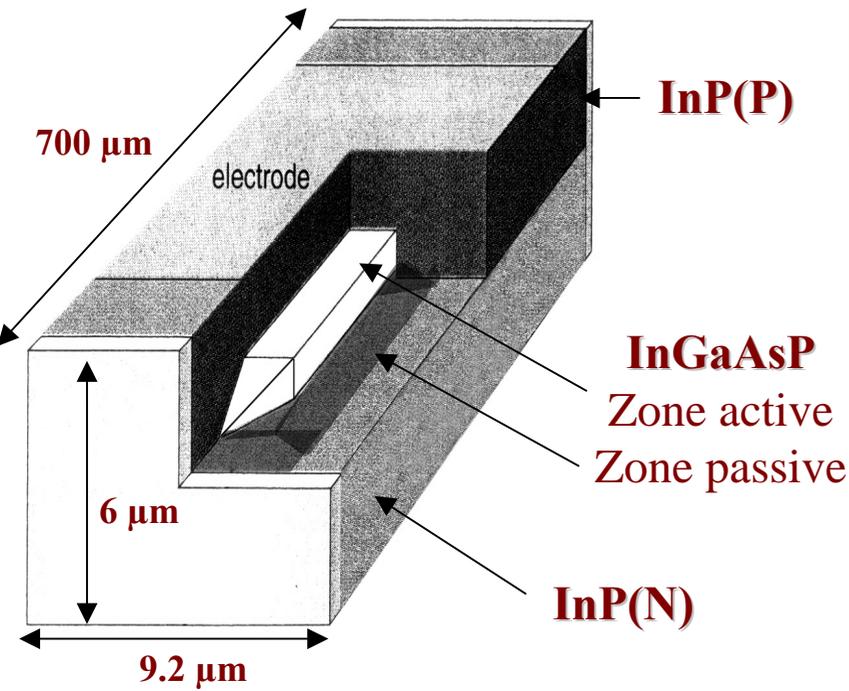


CPE: Installation d'utilisateur  
OADM: Multiplexeur à insertion-extraction optique  
OCh-SPRING: Anneau à protection distribuée de canal optique  
O-SNCP: Protection de connexion

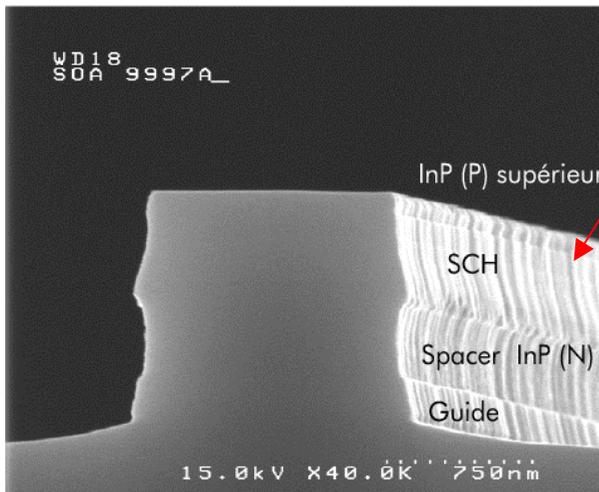
**Non-linéarité optique :**  
Multiplexage  
Conversion de λ  
Régénération optique

**Commutation :**  
portes logiques

# Comparaison technologique de deux wafers sous contraintes accélérées 40kA/cm<sup>2</sup> - 100°C



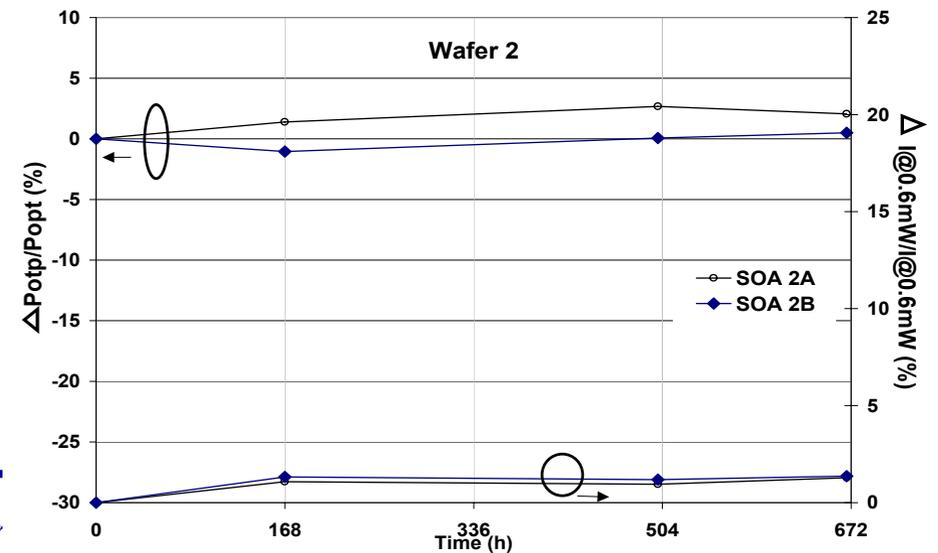
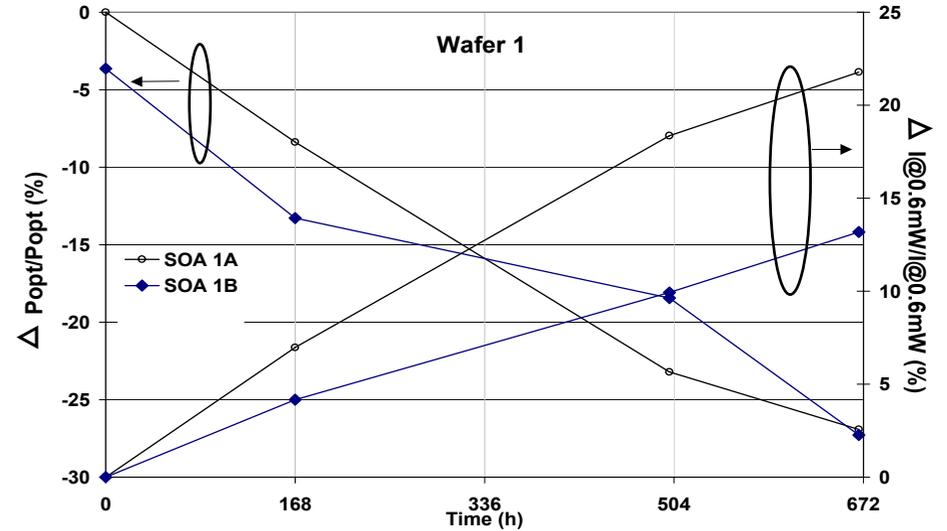
**Vue d'un ruban après gravure et restauration**



**Qualité épitaxie InP-p/InGaAsP**

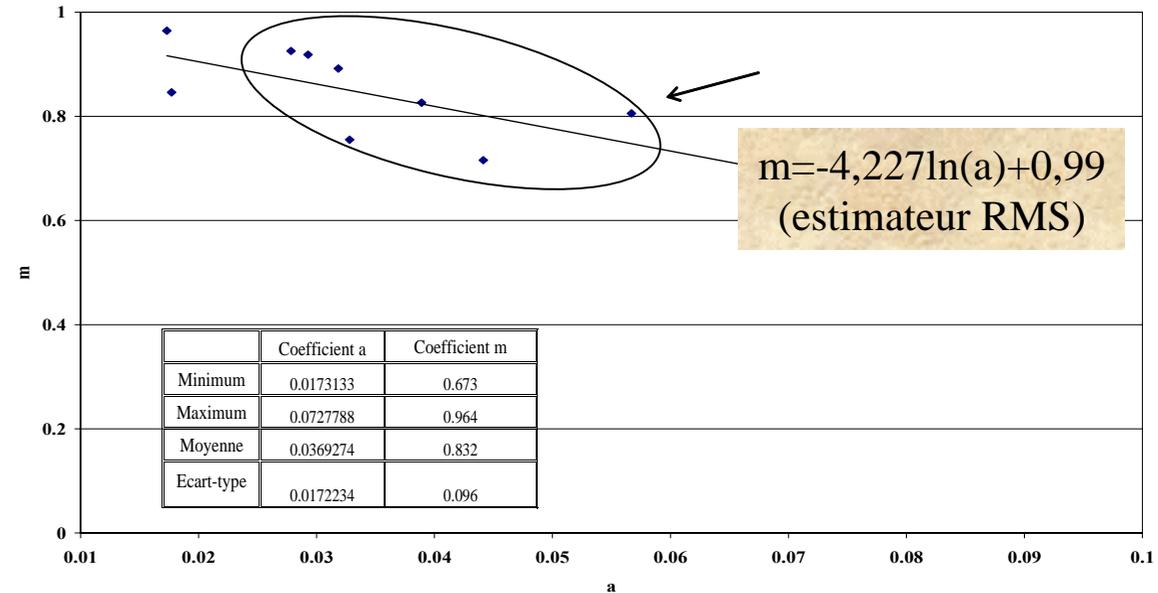
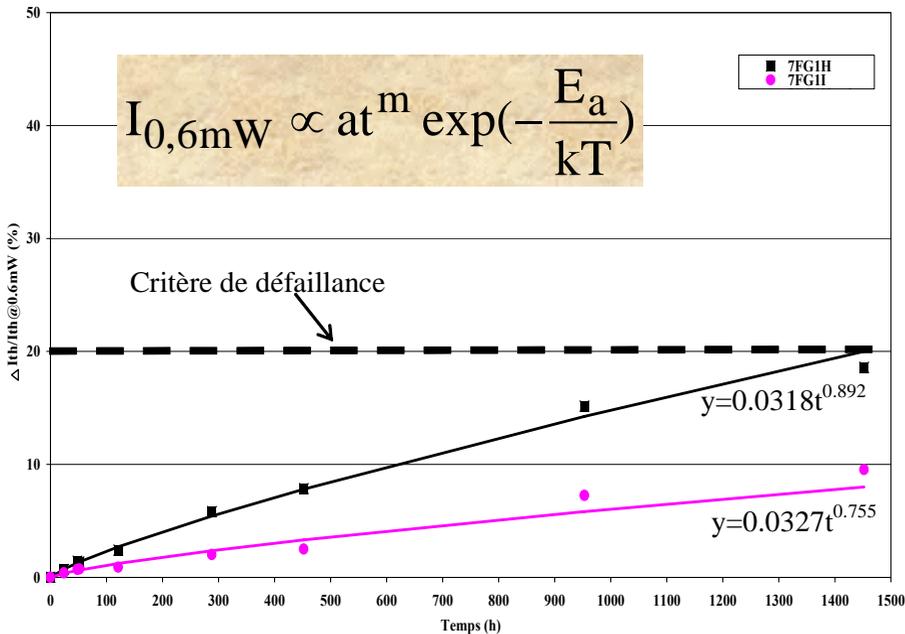


**Défauts dans zones latérales du ruban**



## ■ Extrapolation par une loi de dégradation de la dérive de I@0.6mW analysée :

- Distribution des couples (a, m) expérimentaux en conditions accélérées (10 SOAs)
- Couples (a,m) sont corrélés linéairement



**Renforcement statistique du nombre d'échantillons par tirages Monte-Carlo**

( $E_a$  expérimental = 0,7 eV)

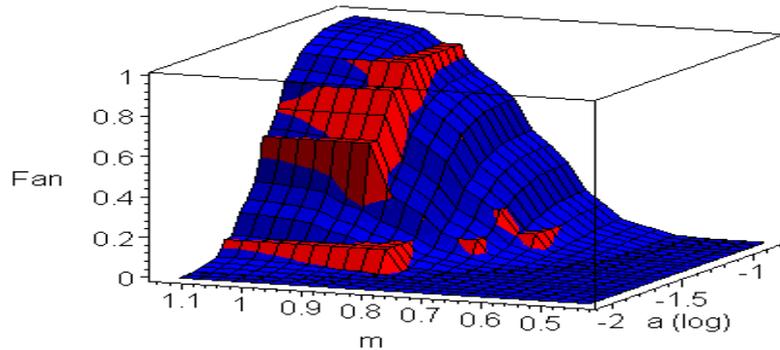
A. Guichardon, *Ph.D, Univ Paris XI, Juin 1995*  
 M. Pommies, *Ph.D, Univ. Limoges, Janvier 2002*

**Objectif : Reconstruire la distribution des durées de vie en tenant compte du biais ( $\Delta m$ ) sur la loi de corrélation**

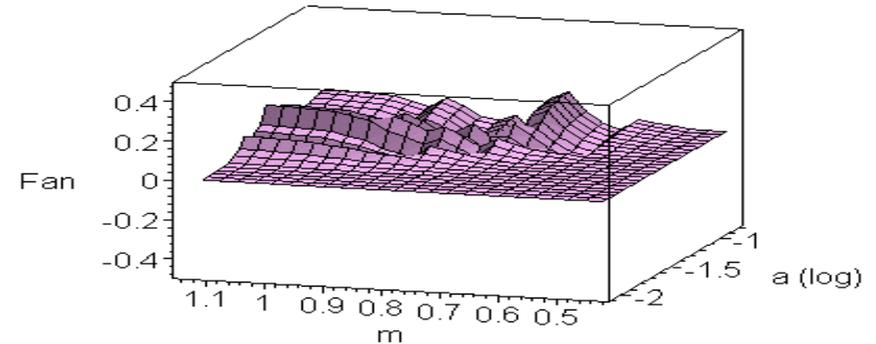
$$\Delta m_i = m_i - (A \ln a_i + B)$$

# ■ Reconstruction statistique de la distribution des durées de vie d'un SOA en conditions opérationnelles

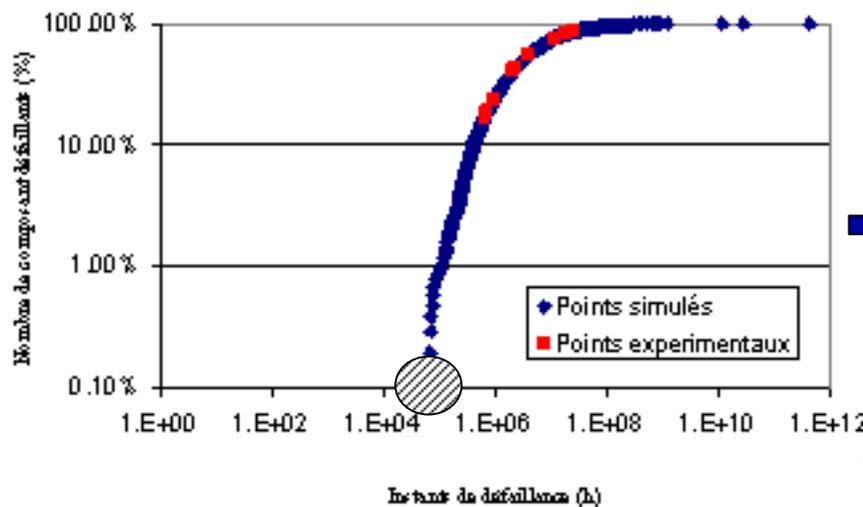
- Distribution cumulée simulée  $F_{an}(a, m) - 1024$  points



- Répartition de l'erreur entre les distributions cumulées expérimentale et simulée (%)



- Distribution des instants de défaillance en fonction du paramètre a

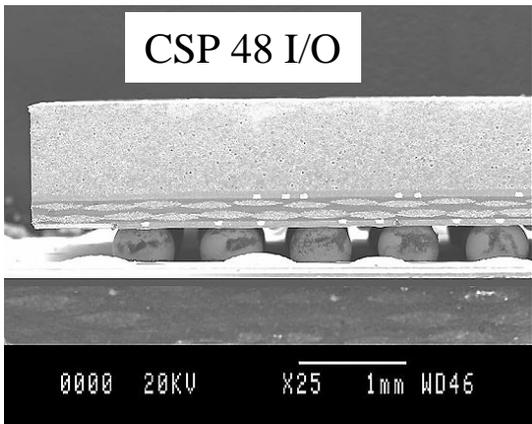


**Prévision des 1<sup>ers</sup> instants de défaillance**  
 $\approx 5 \cdot 10^4$  h (5 ans)  
 sous 25°C-200 mA (AF = 355)

*Huyghe et al. Microel. Rel., 45, p. 1593-1599, (2005)*

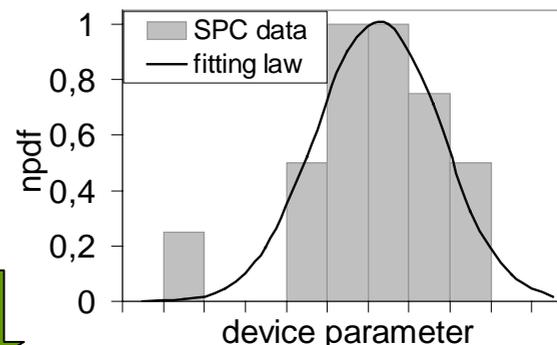


# Ex. 3 - Fiabilité de microassemblages à forte intégration : *Prise en compte des dispersions paramétriques – Modèles mixtes (Collaboration IXL-SOLECTRON-ALCATEL)*



- Assemblages de matériaux très hétérogènes – Criticité des interconnexions (joints de brasure)
- Comportement thermo-mécanique fortement lié aux différences de coefficient d'expansion thermique
- Conditions opérationnelles : 0/80°C

Dispersion technologique



Simulations FEM

Modèle physique de dégradation

Tests accélérés

Distribution des durées de vie

Deletage, *Thèse de Doctorat*,  
Université Bordeaux 1, (2004)



Tests accélérés (-55/+125 °C)

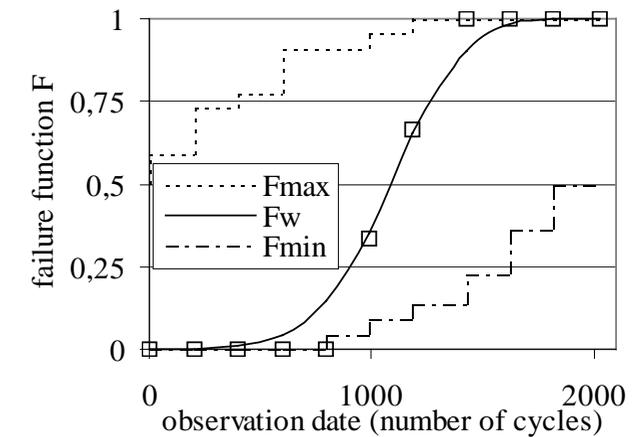
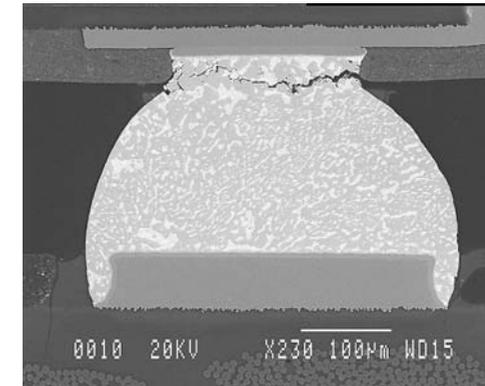
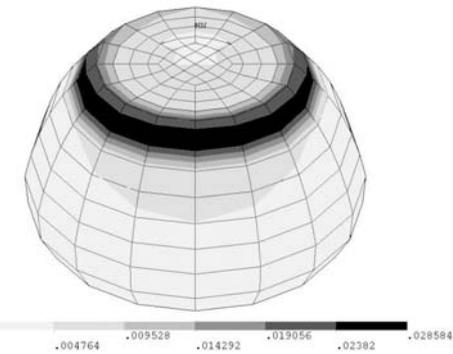
N = 33 Cartes

Analyse par microsections  
de la surface des phases de plomb

$$\Delta S = A (\Delta \gamma)^b \sqrt{N_c t_p} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

Choix d'un critère de défaillance  
(fissuration complète du joint)

Loi de distribution cumulée de  
défaillance (Weibull)



**Problème : Comment prendre en compte la dispersion technologique ?**

**FEM : calcul de  $\Delta\gamma=f(\text{hauteur des billes})$   
à partir des données SPC (Loi normale)**



**Calcul des distributions de  $\Delta\gamma$  (Loi normale)**

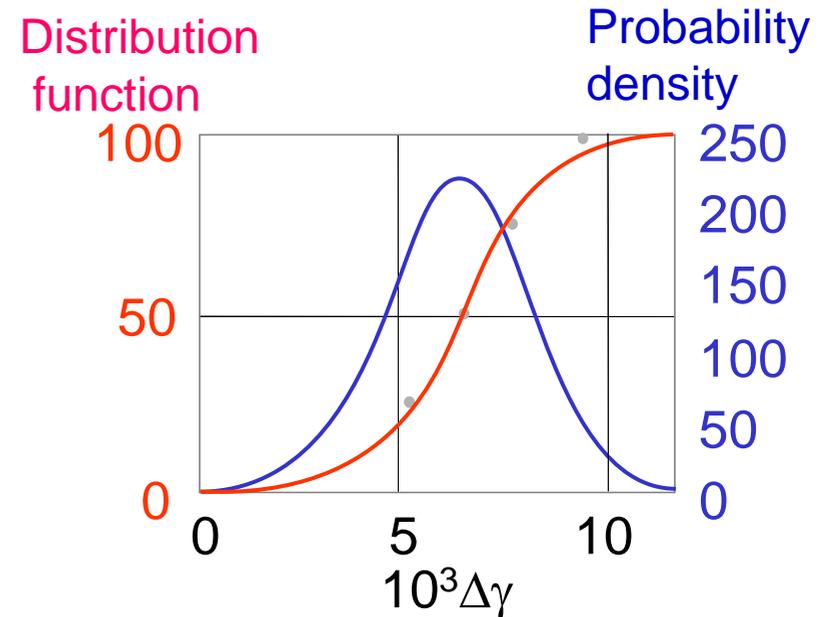
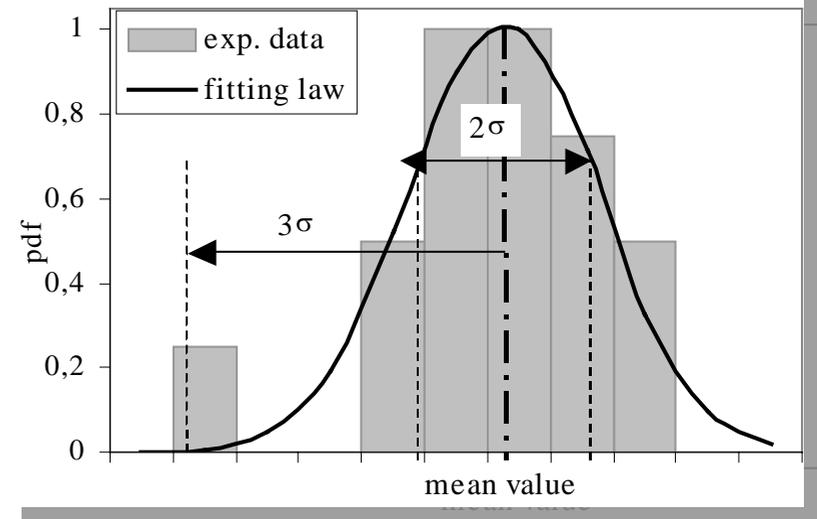


$$Nc_f = N_0 \Delta\gamma^{-2b} \exp\left(\frac{2E_a}{kT}\right)$$

$$AF = \frac{Nc_2}{Nc_1} = \frac{\Delta\gamma_1}{\Delta\gamma_2} \frac{tp_1}{tp_2} \exp\left[\frac{2E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right]$$



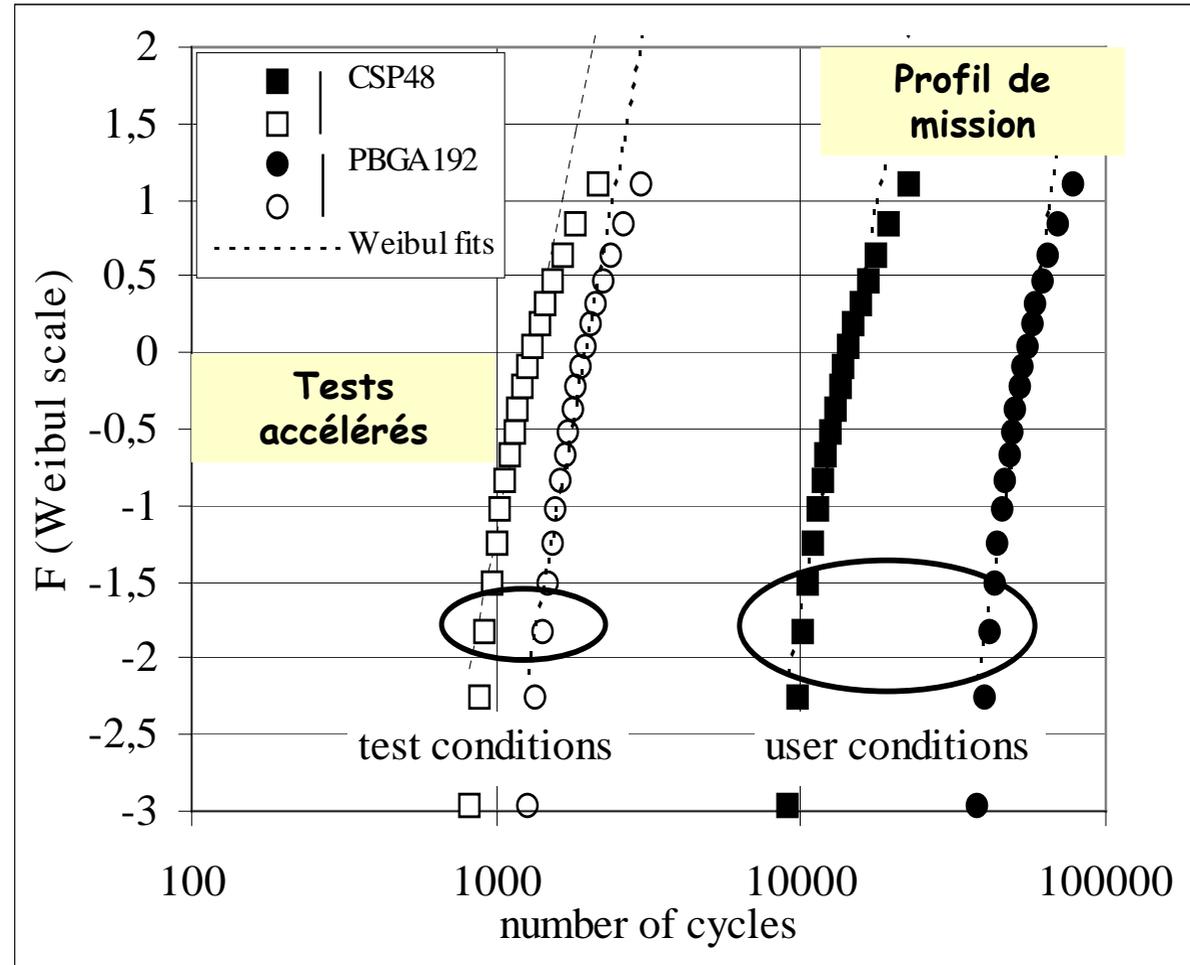
**Calcul des distributions de défaillance  
en conditions accélérées et de mission  
(AFmoy  $\approx 10$ )**



# Reconstruction de la distribution des durées de vie de microassemblages CSP et PBGA en conditions accélérées et opérationnelles

$$F(N_c) = 1 - e^{-\left(\frac{N_c}{\alpha}\right)^\beta}$$

$N_c = \text{Nombre de cycles}$



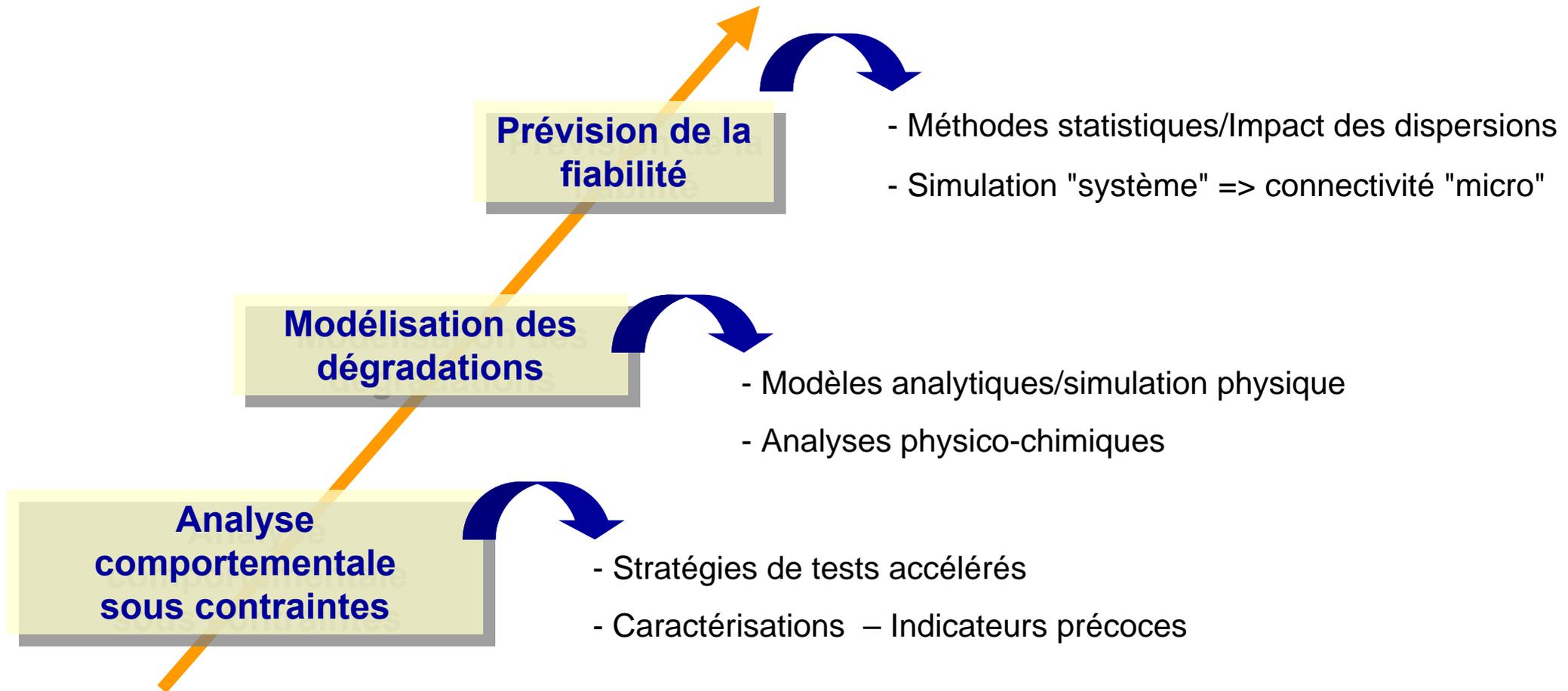
## 4- Synthèse

### Intégrer l'objectif fiabilité dès la mise au point technologique

- ✓ **Choix technologiques: matériaux, procédés, configurations**
- ✓ **Stabiliser les procédés (approche "bottom-up")**
- ✓ **Identifier les paramètres critiques et les contraintes actives (AMDEC)**
- ✓ **Analyser l'effet des dispersions technologiques et les contrôler**
- ✓ **Répertorier et classer les mécanismes de défaillance (tests accélérés)**
- ✓ **Intégrer dans le développement les aspects interconnexions et packaging**
- ✓ **Développer des architectures circuits tolérantes (reconfiguration, redondance)**

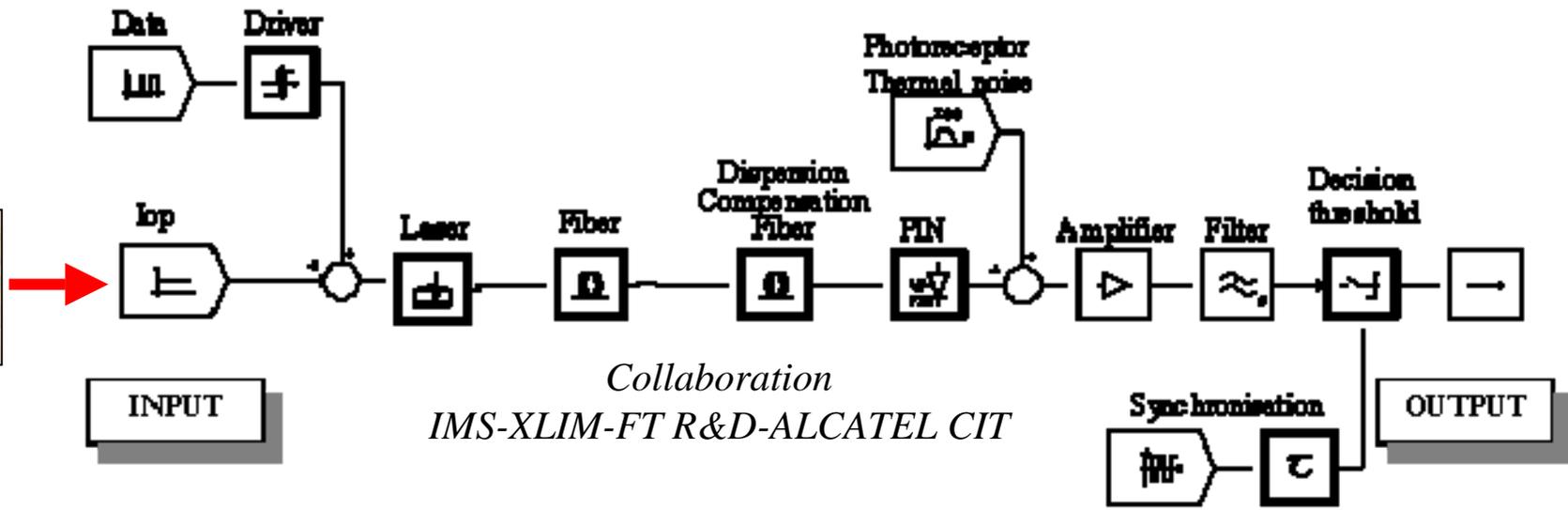
## ■ Proposition d'une feuille de route pour l'évaluation de la fiabilité des dispositifs nanotechnologies

### Construction/Intégration de la fiabilité dès la conception



# ■ Vers la prise en compte de l'aspect microscopique pour la simulation de la fiabilité...

**Modèles physiques multi-composantes**



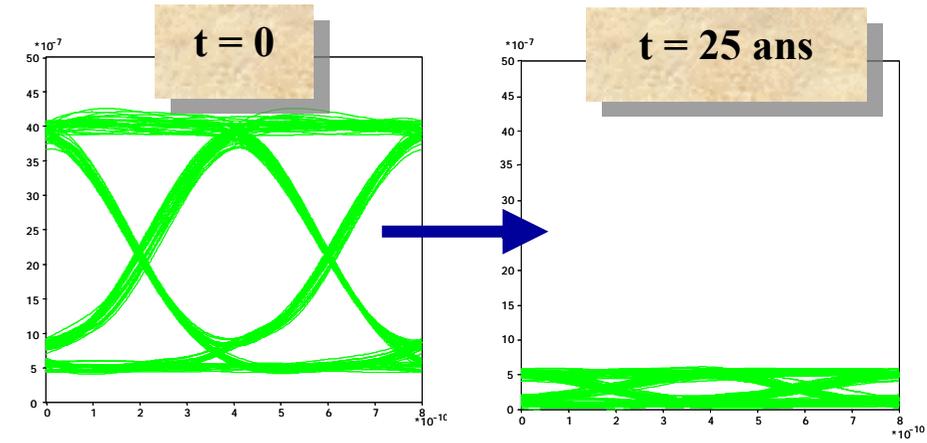
Collaboration  
IMS-XLIM-FT R&D-ALCATEL CIT

Ex. Laser 1.3µm FP

$$\Delta I_{th} = f(N_{\text{défauts}}) \Rightarrow \text{Dérive}$$

$$\Delta I_{th} = \underbrace{I_{nr}(t) - I_{nr}(0)}_{\text{Non-radiatif}} + B \underbrace{[n_{th}^2(t) - n_{th}^2(0)]}_{\text{Recuit de défauts}}$$

Cassidy et al. *JAP*,  
95/5, 2264-2271, (2004)



- Collaboration IMS – Université McMaster (Ontario)
- Proposition d'un projet blanc ANR : "FIQnano" (IMS-CENBG-ICB-LPCNO/INSA)

