

A man with short brown hair, wearing a dark sweater over a light-colored collared shirt, is holding a small, square, gold-colored MEMS chip between his fingers. He is looking directly at the camera with a slight smile. The background is a blurred outdoor scene with a blue sky and a white structure. The image is framed by a large, semi-circular graphic element in the top right corner, transitioning from light blue to dark grey.

**ENVISION MEMS | DELIVER MEMS**

**Industrialisation des MEMS :  
du concept au produit**

*Stéphane Renard, et. al.*

# Tronics Microsystems: en quelques chiffres...



## Développeur et Fabricant OEM de Composants “Custom” à base de MEMS performants, pour applications exigeantes.

- > **Création:** Essaimage du CEA-Leti en 1997
- > **Localisations:** Crolles, France, fabrication de MEMS  
San Francisco, CA, bureaux commerciaux  
Medtech - Sunnyvale, CA, : ingénierie microsystèmes médicaux
- > **Ventes:** 10.5M€(\$M 15.4) – 1.3M€(\$M1.9) profit net en 2007  
56% taux de croissance
- > **Locaux:** 1350m<sup>2</sup> incl. 750m<sup>2</sup> production, packaging et test  
400 m<sup>2</sup> de salles blanches de fabrication en 6”
- > **Equipes :** Crolles : 60 (32 Prod., 18 R&D & Engin., 10 Sales & Admin.)  
Sunnyvale : 15 personnes
- > **Investisseurs:** 15M€ de financement en Capital Risque en 4 tours.

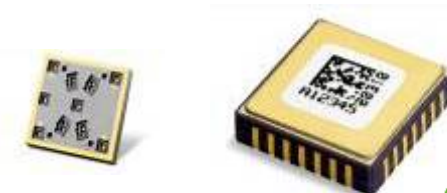
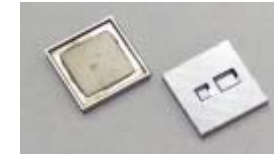
**Deloitte.**  
Technology Fast500  
EMEA 2007

tronics   
microsystems

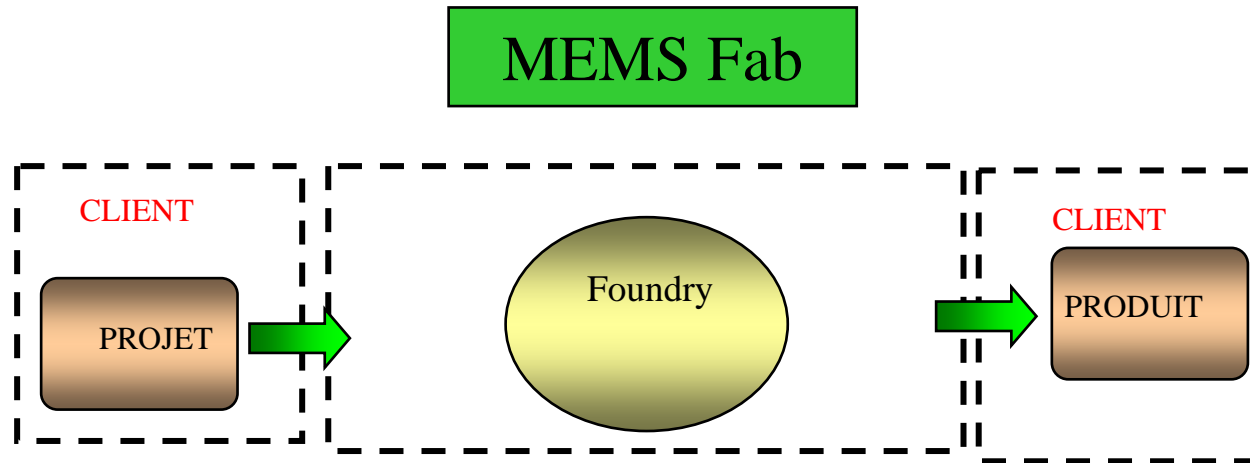
# Composants MEMS Custom pour applications exigeantes



- > **Instrumentation Industriel**
  - + Prospection pétrolière sismique
  - + Capteurs & Actionneurs industriels
- > **Médical**
  - + Dispositifs Implantables
- > **Life sciences**
  - + Robot pour le screening de médicaments
  - + Diagnostiques
- > **Transport**
  - + Navigation de secours
  - + Communication
- > **Télécommunications**
  - + Infrastructures de réseaux.



## Modèle de la Fab de MEMS : Boucle ouverte



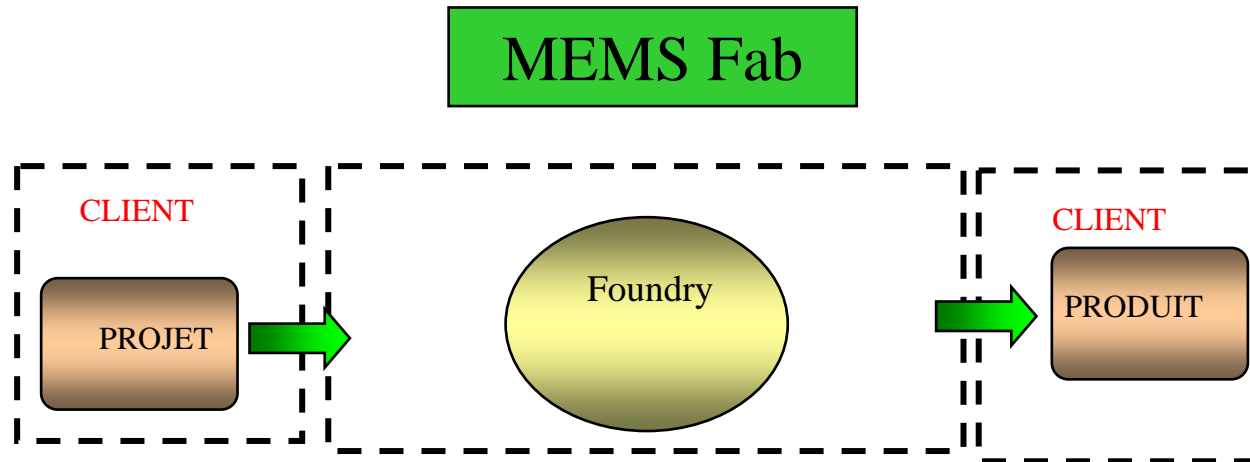
### CLIENT:

- Demande système + Expert(s) MEMS
- Simulation et design du MEMS
- Process MEMS (spécifique au composant)

**SUPER! ....et maintenant, trouvons la bonne FAB pas chère !**



## Modèle de la Fab de MEMS : Boucle ouverte



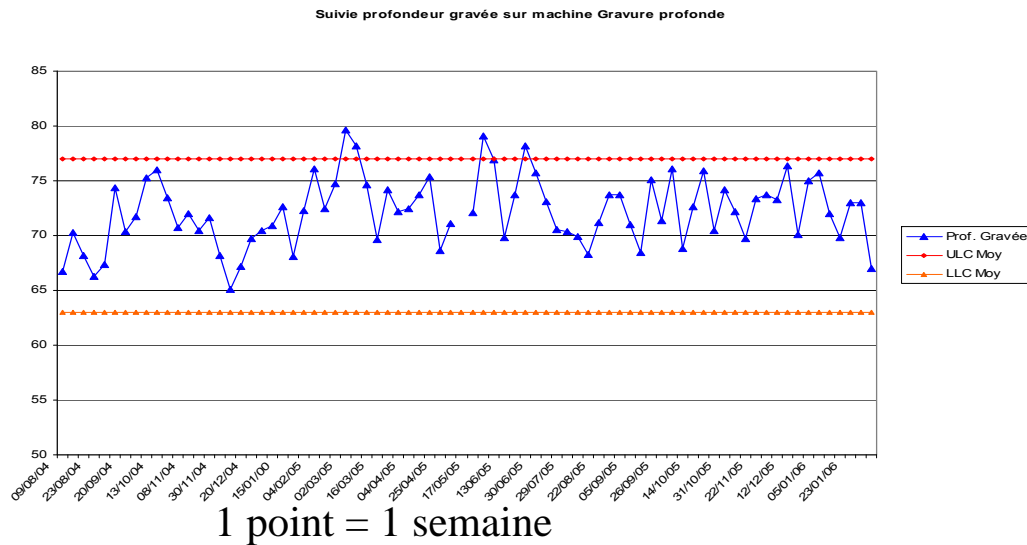
### FAB de MEMS :

- Maîtrise généralement 1 procédé majeur historique
- Autant de variations de procédé que de produits
- Des blocks de procédés bien caractérisés, SPC
- Produits/Plaques: contrôle en ligne, e.g. dimensionnel etc.
- Découpe, packaging et test fonctionnel : client

# Contrôle Machine / Contrôle Process

## Exemple 1 : gravure profonde

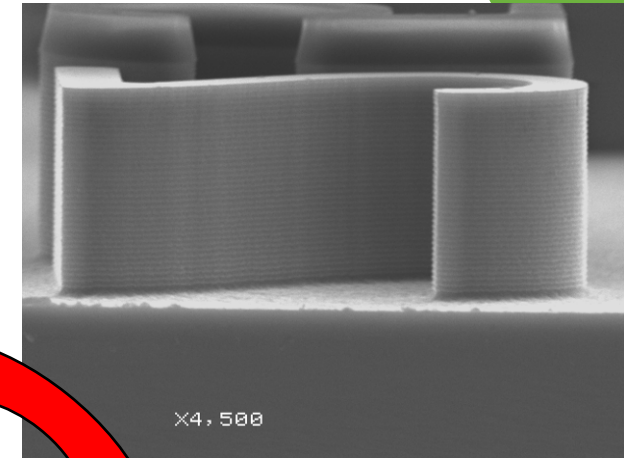
### SPC sur machine gravure profonde



Suivi machine

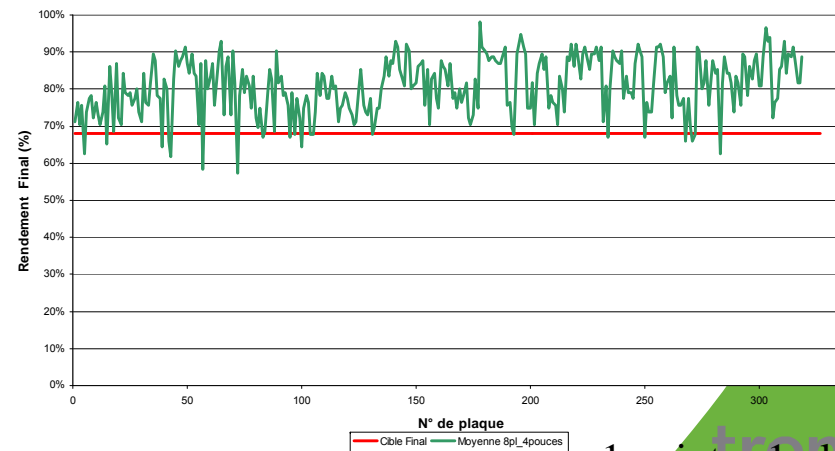
Cartes de contrôle

**Stabilité des rendements  
électriques**



Effet process

Suivi plaque à plaque des rendements Electriques



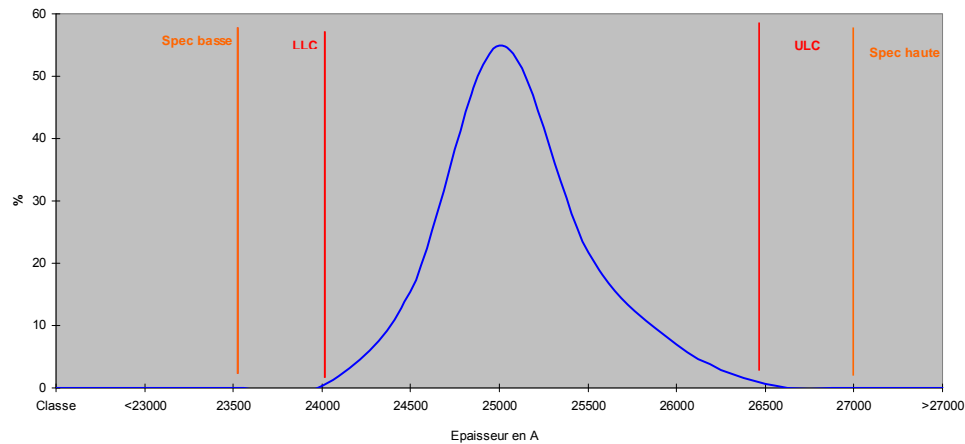
1 point = 1 plaque

# Contrôle Machine / Contrôle Process

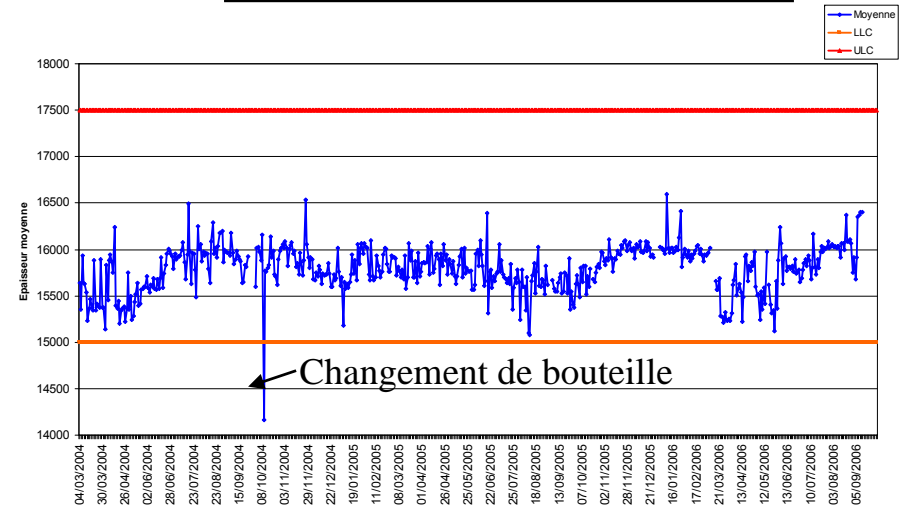
## Exemple 2 : process de lithographie

### Capabilité machine

Suivi procédé de lithographie : étalement de résine



### Suivi Process dépôt de résine



### Historique machine/process

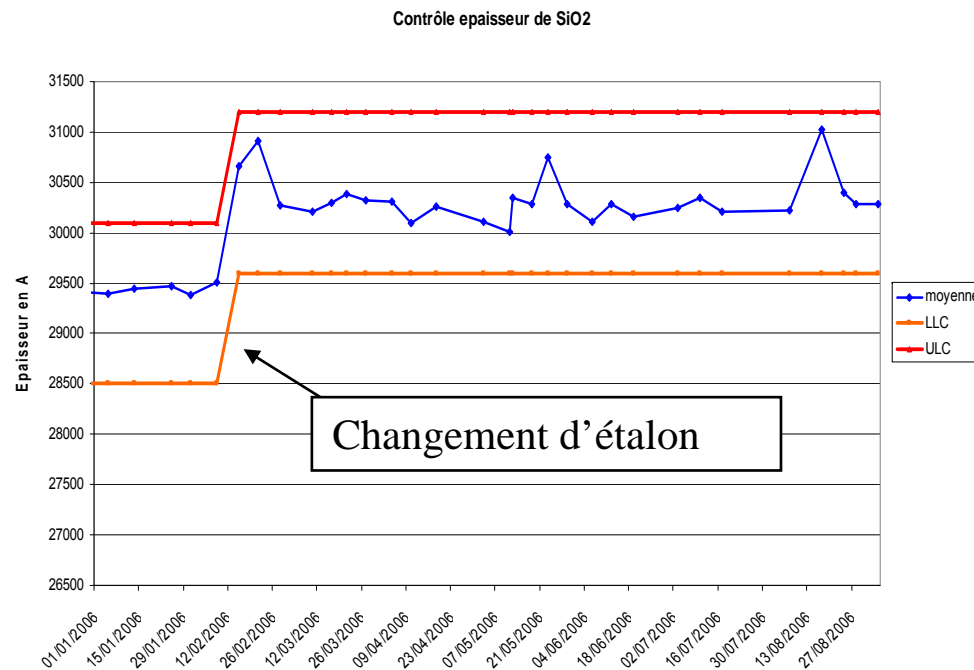
date	heure	cause de l'arrêt	intervention			
			nom	date	heure	commentaire
01/09/03	8:00	inondation	JBU	01/09/03	08:00	remplacement chill plate percée , remplacement indexeur entrée dev, remplacement des cartes detection sur HMDS, DEV, remplacement de l'ev. Du charriage HMDS, (pris sur piste 1), nettoyage des cartes elec sur indexeurs.
15/09/03		pb sur 2 pompes mycrolis	JBU	15/09/03		pris 2 pompes sur piste 1 et récup des pompes par mycrolis
17/09/03	15:00	pb monté du rail sur hot plate	JBU	17/09/03	15:00	moteur pas en cause, remplacement carte track interface, pris sur piste 1, ok
22/09/03		le canister d'HMDS s'et vidé trop rapidement.	JBU	22/09/03		démontage du circuit et ct clapet anti retour, resserage des raccords
		Traces en FAR	JBU	05/11/03		Remplacement de toutes les courroies de transfert.
			JBU	17/11/03		Nettoyage bol. Nettoyage des courroies.
			JBU	24/11/03		Nettoyage bol. Nettoyage des courroies.
			JBU	28/11/03		Remplacement des chill plate.
			GAL	02/12/03		Remplacement courroie sur hot plate Dev.
			JBU	08/12/03		Nettoyage bol. Nettoyage des courroies. Reglage de la vitesse de monté descente du spindle sur coater.
			JBU	15/01/04		Remplacement courroie d'entrainement sur coater.

## Contrôle Machine / Contrôle Process Exemple 3 : Métrologie

- Contrôle Capabilité machine

	Cpm
Contrôle SiO <sub>2</sub>	11,9
Contrôle Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	13,1

- Suivi équipement avec limites de contrôle

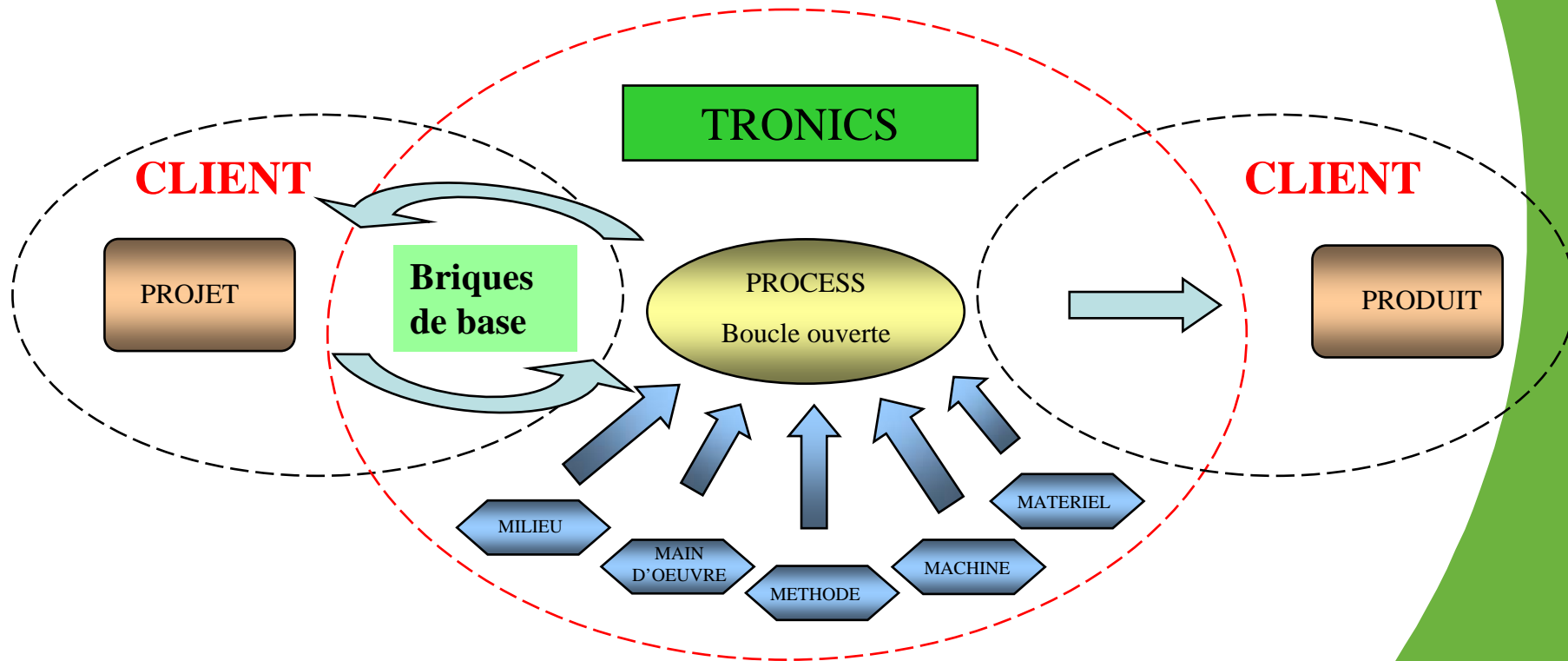


- OCAP : Action correctives bouclées

• OCAP → *Out of Control Action Plan*

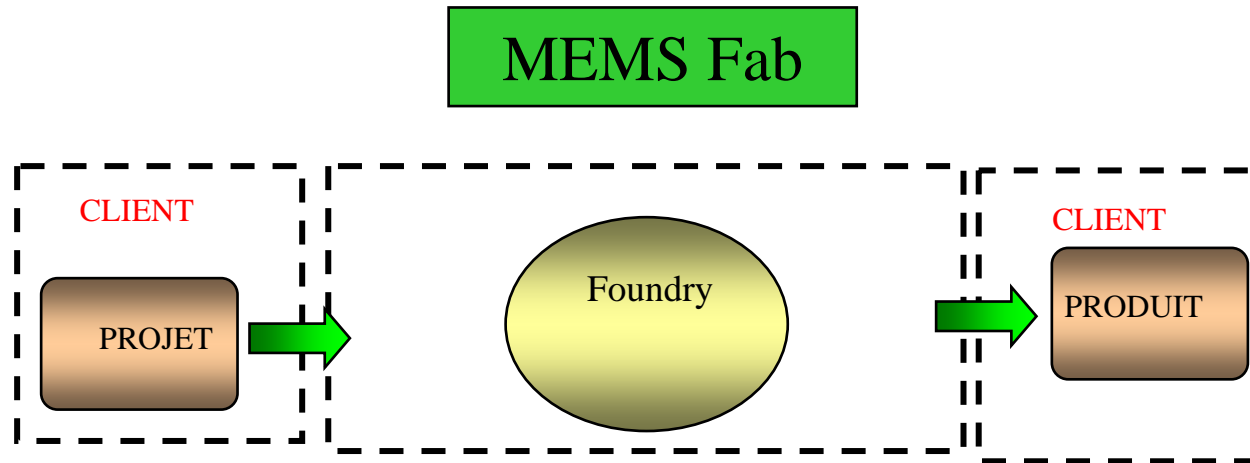
# Avantage du SPC

- Historique équipement / Stabilité équipement & process
- Réduction des Scraps / Anticipe les dérivées de process
- Amélioration limitée des rendements / productivité



- Bonne Interaction Fab-Client sur les aspects « front-end »

## Modèle de la Fab de MEMS : Boucle ouverte



### DEFAULTS:

- Design Produit & Process Foundry
- Procédé sur tranche & Assemblage/Packaging
- Rendements
- Tests Fonctionnel and Contrôles en ligne
- Relation avec le Contrôle Qualité du client

mal optimisés

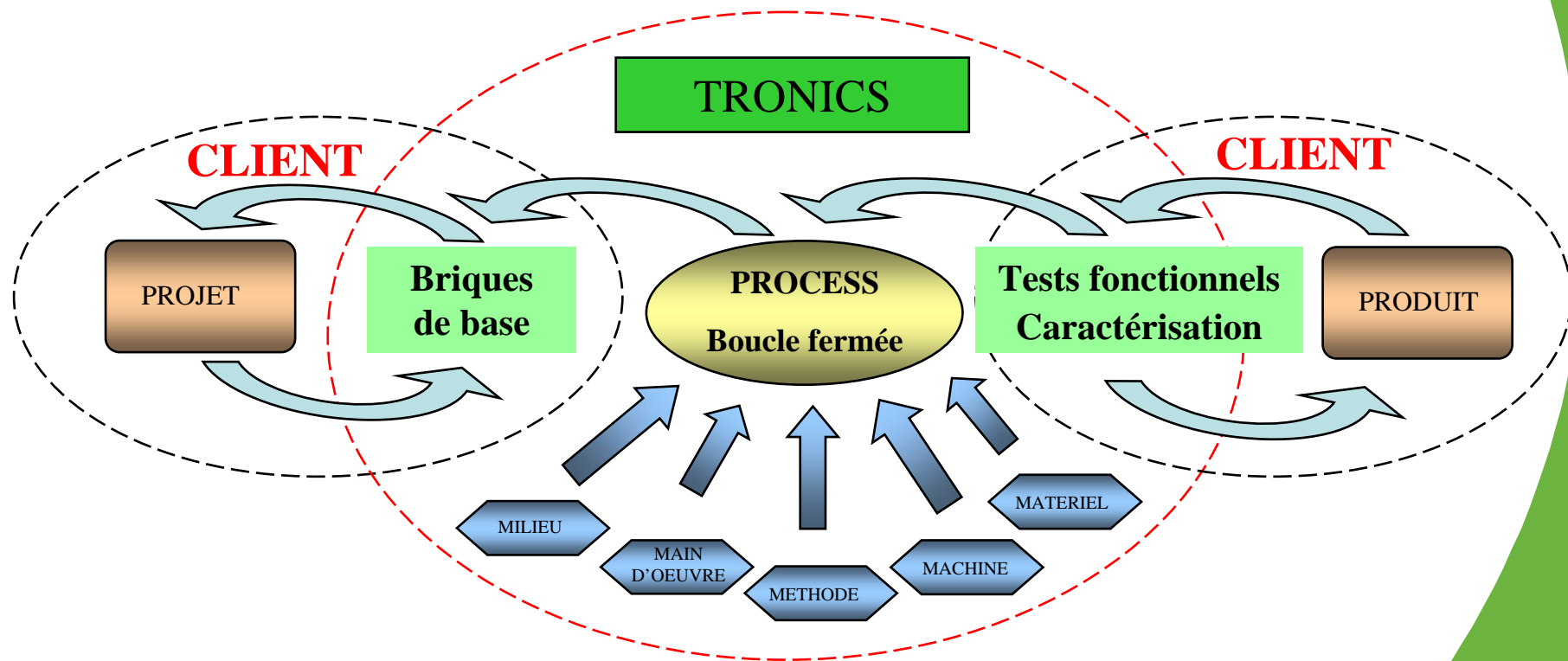
incompatible

non économique

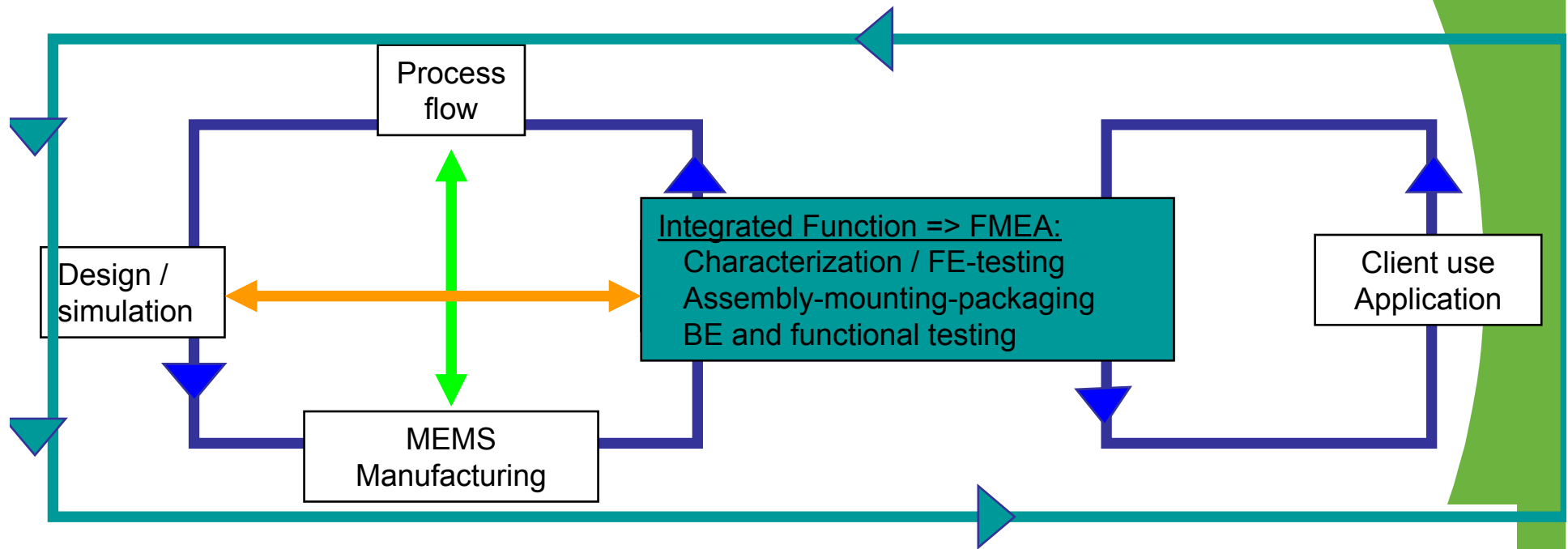
décorrélés

difficile

# Modèle boucle fermée pour la Production de Composants MEMS



## Structure de la boucle de rétroaction étendue à toute la production



## Pourquoi est-ce si compliqué ?

### > Un nouveau produit MEMS qui « sort » de R&D :

- + Par définition, (pour la plupart) les modes de défaillance du produit ne sont pas connus (courbe d'apprentissage)
- + Il n'y a simplement pas assez de données pour « faire » une statistique  
(Nb de wafers, Nb de puces, Nb de produits finis, Nb de produits utilisés)
- + Les évolutions long terme des caractéristiques ne sont pas (encore) connues.

=> Il faut 2-3 années, d'une coopération intense avec le client/utilisateur final pour avoir une rétroaction complète du produit sur sa conception et son procédé.

## FMEA: La clé du succès.

### ■ Failure Mode and Effects Analysis

■ *[Analyse des modes de défaillance (AMDEC)]*

- Identification et élimination des variabilités indésirées du produit par la détection et la prévention des variabilités du process
- Tableaux avec toutes les étapes du procédés de fabrication,
  - pour chaque étape → un mode de défaillance associé
  - pour chaque défaillance → des raisons identifiées
- Chaque défaillance est classée en :
  - S=Sévérité : échelle de 1 à 10
  - O=Occurrence : échelle de 1 to 10
  - D= Détection : échelle de 1 to 10
- RPN=Risk Priority Number =  $S \cdot O \cdot D$

## FMEA: Exemple

Bloc	N°	Etapas	Mode de défaillance	Causes potentielles de la défaillance	S	O	D	RPN
Test final	43	Test final	Puces HS Qm	Pbe métallisation cordon : dégazage d'argon -> dépôt métal non-conforme	10	4	8	320
Trous	17	Gravure Silicium	Infiltrations	Stress du au scellement + SiO2	6	7	6	252
GP	29	Cartographie générale	Contrôle hors spec : Infiltration	Scellement SDB : Bulles au SDB / traces dues aux cales du ficture SDB	6	7	6	252
Dicing	35	Test électrique	Puces HS : CC	GP: défaut litho GP/ Puces non ou mal Libérées	8	4	7	224
Dicing	35	Test électrique	Puces HS : CC	Carto générale: Blocage dus à résidus métal, SiO2 ou contamination, infiltration	8	4	7	224
GP	29	Cartographie générale	Contrôle hors spec : Litho	infiltration / masque GP	6	5	6	180

Les procédés et/ou équipements avec les coefficients RPN les plus élevés sont suivi par le SPC

=> Cp, Cpk, LLC, ULC, OCAP

## Définitions

- **Cp = Capabilité** : Mesure établissant le **rapport** entre la **performance réelle** d'une machine ou d'un procédé et la **performance exigée**  
Capabilité = Intervalle de tolérance / Dispersion du moyen ou procédé  
I.T. = Intervalle de tolérance accepté par le produit  
Dispersion =  $6 \cdot \sigma$  (écart type du process)  
(Cpm : identique au Cp pour les instruments de mesure- calculer avec le GRR=Gauge Repetability et reproductibility)
- **Cpk= Centrage du procédé par rapport à l'intervalle de tolérance**  
Cpk= minimum de la différence entre tolérances et moyenne /  $3 \sigma$
- **Si Cp et Cpk > 1.33 -> process ou machine Capable**
- A la suite de ces calculs -> mise en place de cartes de contrôle de suivi des process et ou machine (avec limites de contrôle haute et basse) :
  - **LLC** : Lower Limit Control = moyenne -  $3 \sigma$
  - **ULC** : Upper Limit Control = moyenne +  $3 \sigma$
- **OCAP : Out of Control Action Plan** : le suivi des cartes de control met en évidence des problèmes ponctuels (points en dehors des limites) qui donnent lieu à des OCAP (actions prioritaires à faire en cas de mesures hors limites)

## Qu'est-ce qu'on y gagne ?

### > La réalisation d'une FMEA appropriée permet:

- + De focaliser et d'optimiser le contrôle du procédé
- + De définir et de suivre les bons indicateurs
- + De tester les bonnes « choses » de la bonne manière (coût !!!)
- + D'anticiper des problèmes dans l'application
- + D'identifier les sources d'amélioration du produit dans ses futures versions.

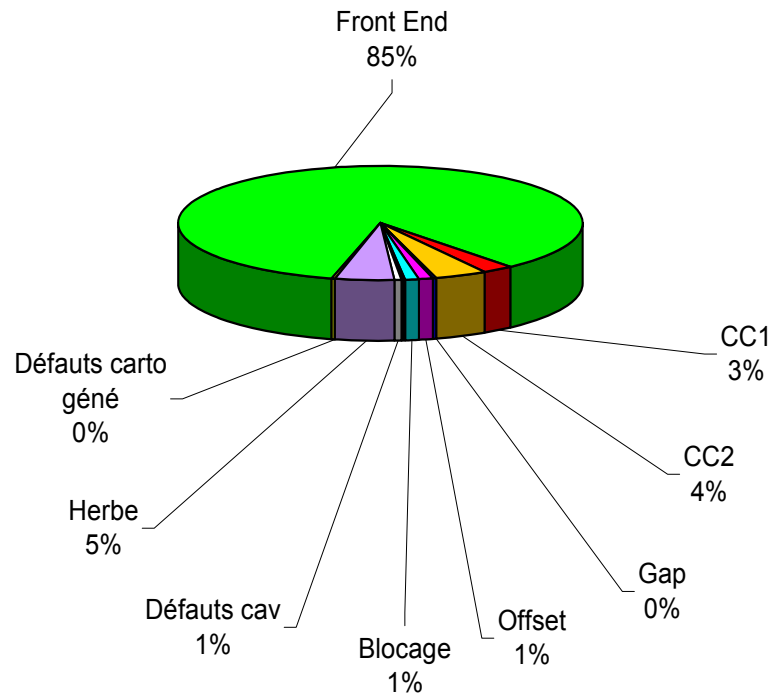
- ⇒ En 2 à 3 ans, le rendement global peut-être optimisé
- ⇒ Les marges opérationnelles et financières améliorées
- ⇒ Le prix du produit baissé

# Exemple: 16 modes de défaillance substantiels

## Défauts intervenant sur Geo W35-06 bilan sur 12 plaques

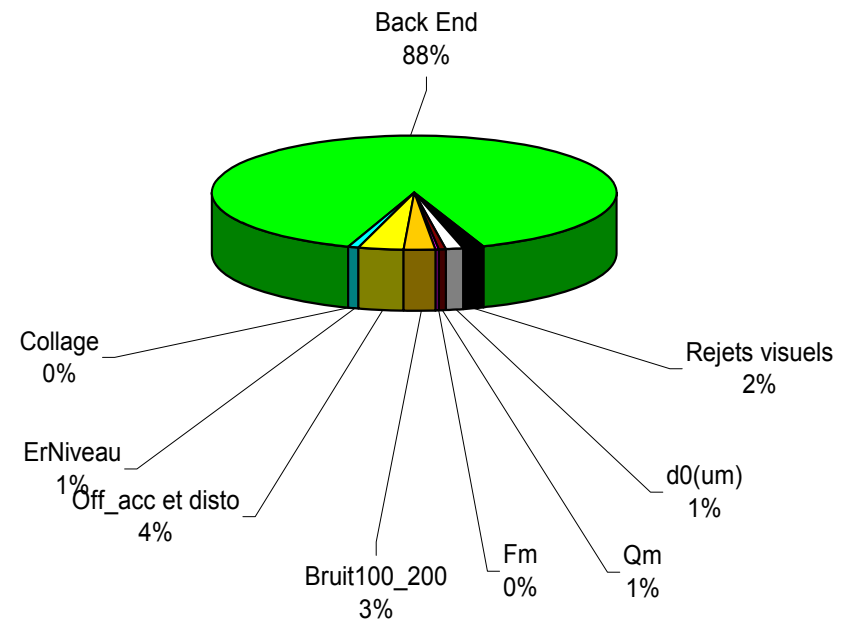
Pareto des rejets Front end

Cible 1 : rendement = 84%

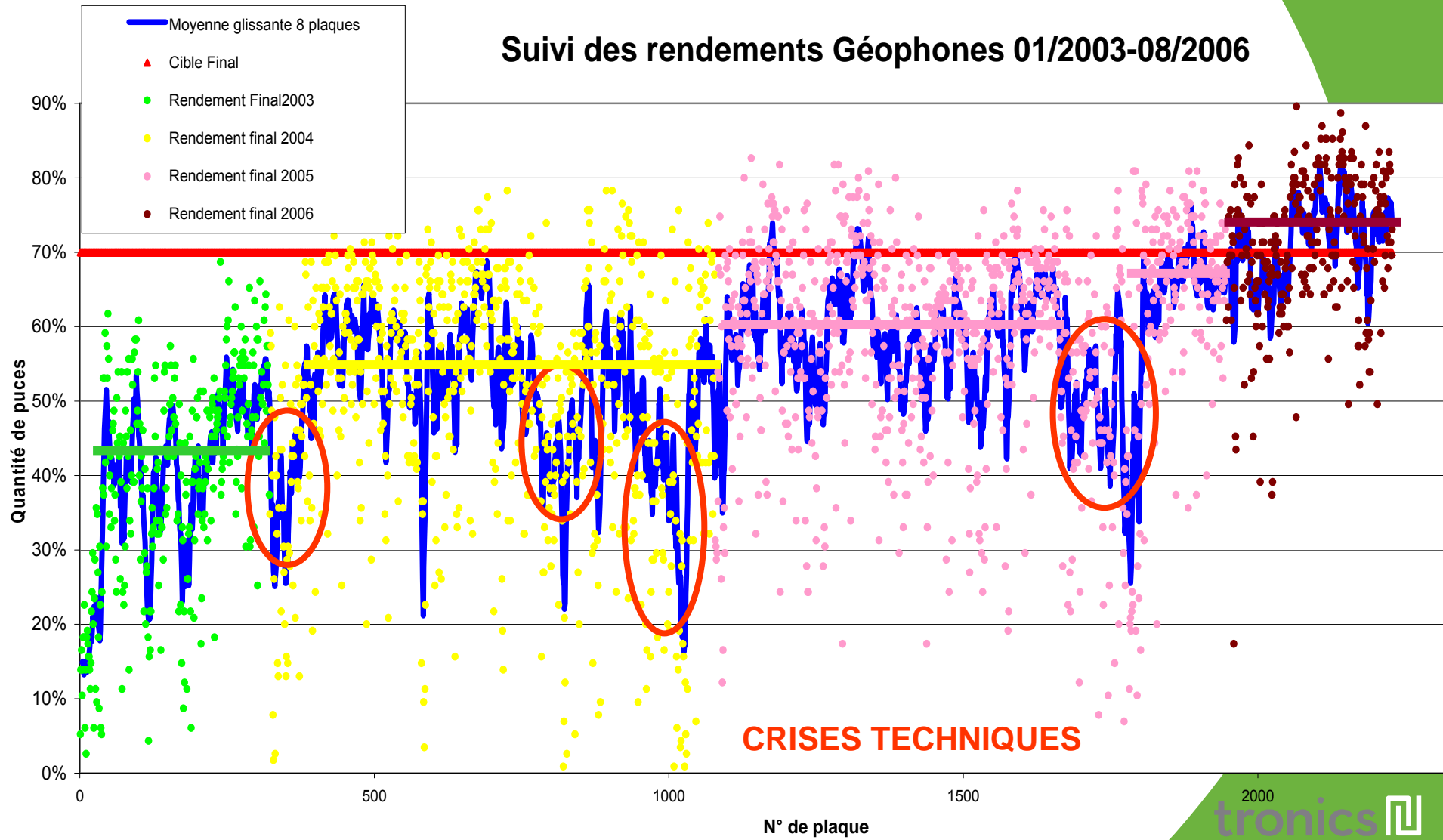


Pareto des rejets Back end

Cible 1 : rendement = 82%



# Exemple: Rendement total (FE\*BE) avec le temps



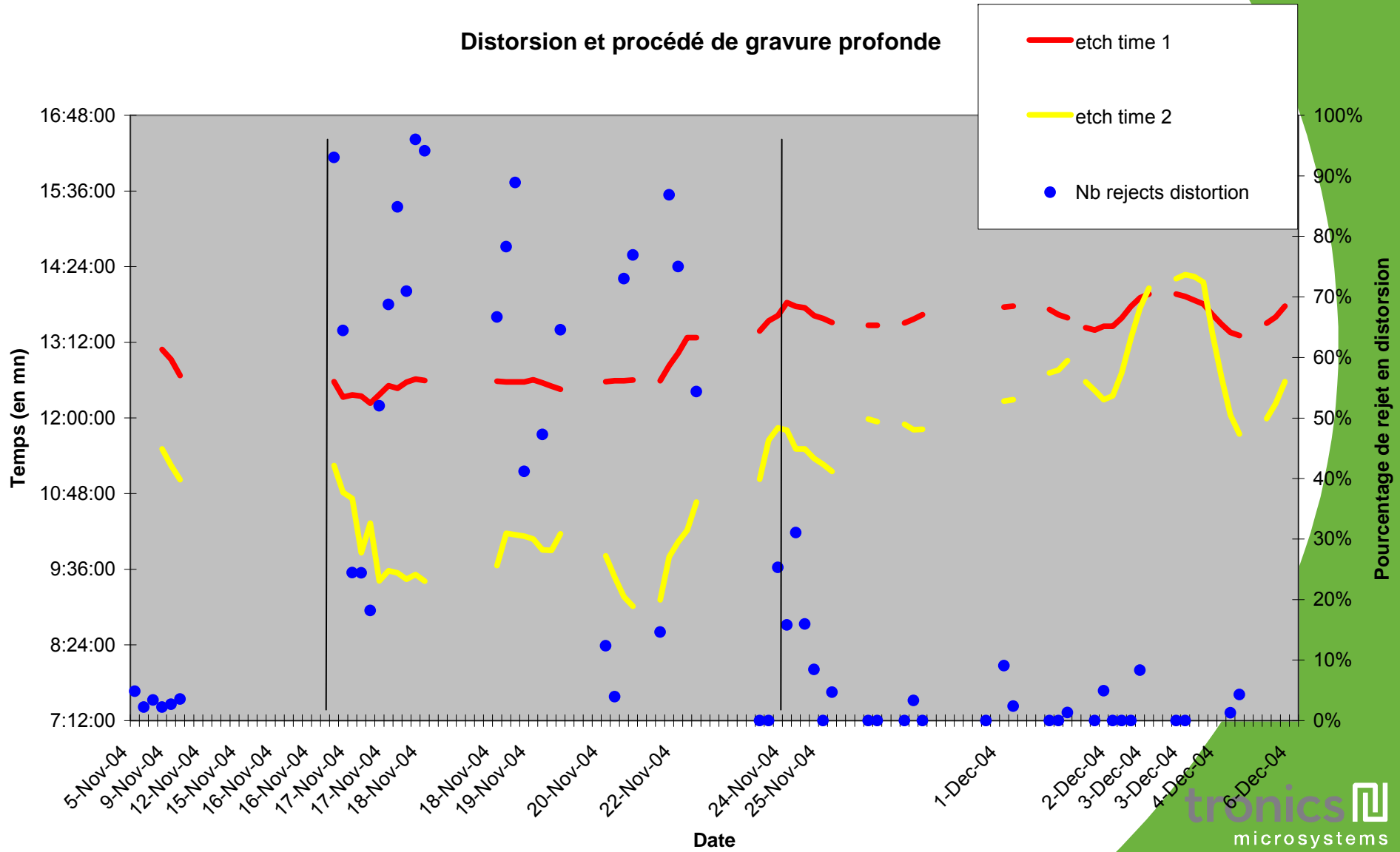
## Ex.1 : Distorsion du signal ⇔ Vitesse de gravure

- > Test final du capteur :  
Taux d'harmonique en dehors de la sinusoïde

$$\underline{-D_s < -75dB}$$

- + Quelques % des composants ne respectaient pas cette spec.
- + L'analyse a montré une corrélation avec la vitesse de gravure de certaines étapes.

# Distorsion électrique et temps de gravure

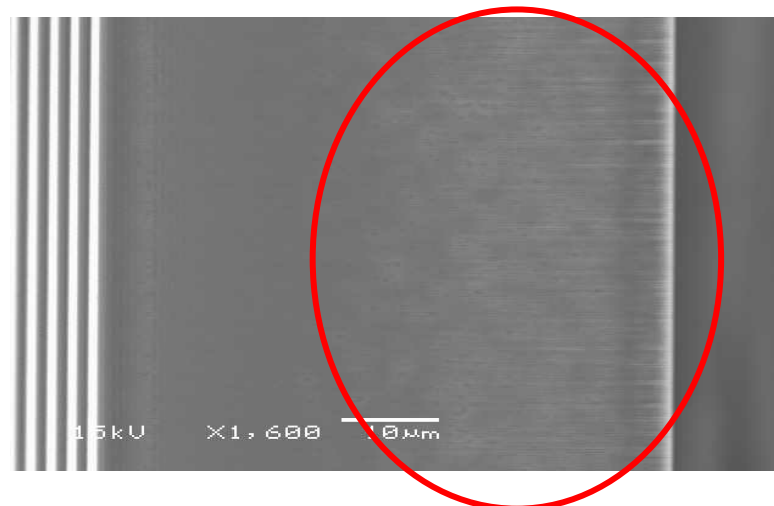


## Ex.1 : Distorsion du signal ⇔ Vitesse de gravure

- > Test final du capteur :  
Taux d'harmonique en dehors de la sinusoïde

$$\underline{-Ds < -75dB}$$

- + Quelques % des composants ne respectaient pas cette spec.
- + L'analyse a montré une corrélation avec la vitesse de gravure de certaines étapes.
- + Identification de la signature process : surface rugueuse

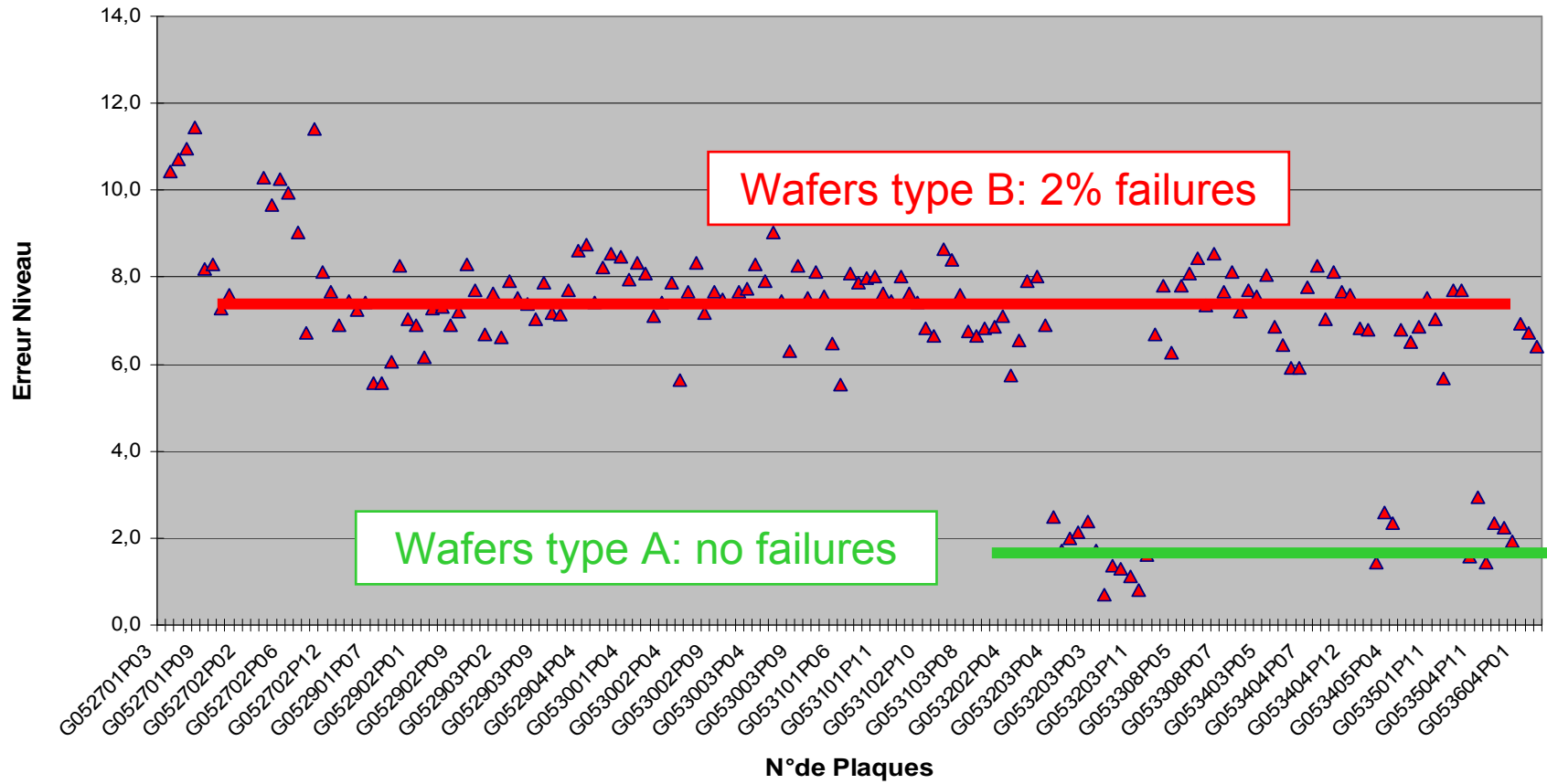


## Ex.2 : Gain Action/Détection ⇔ Manipulation opérateur

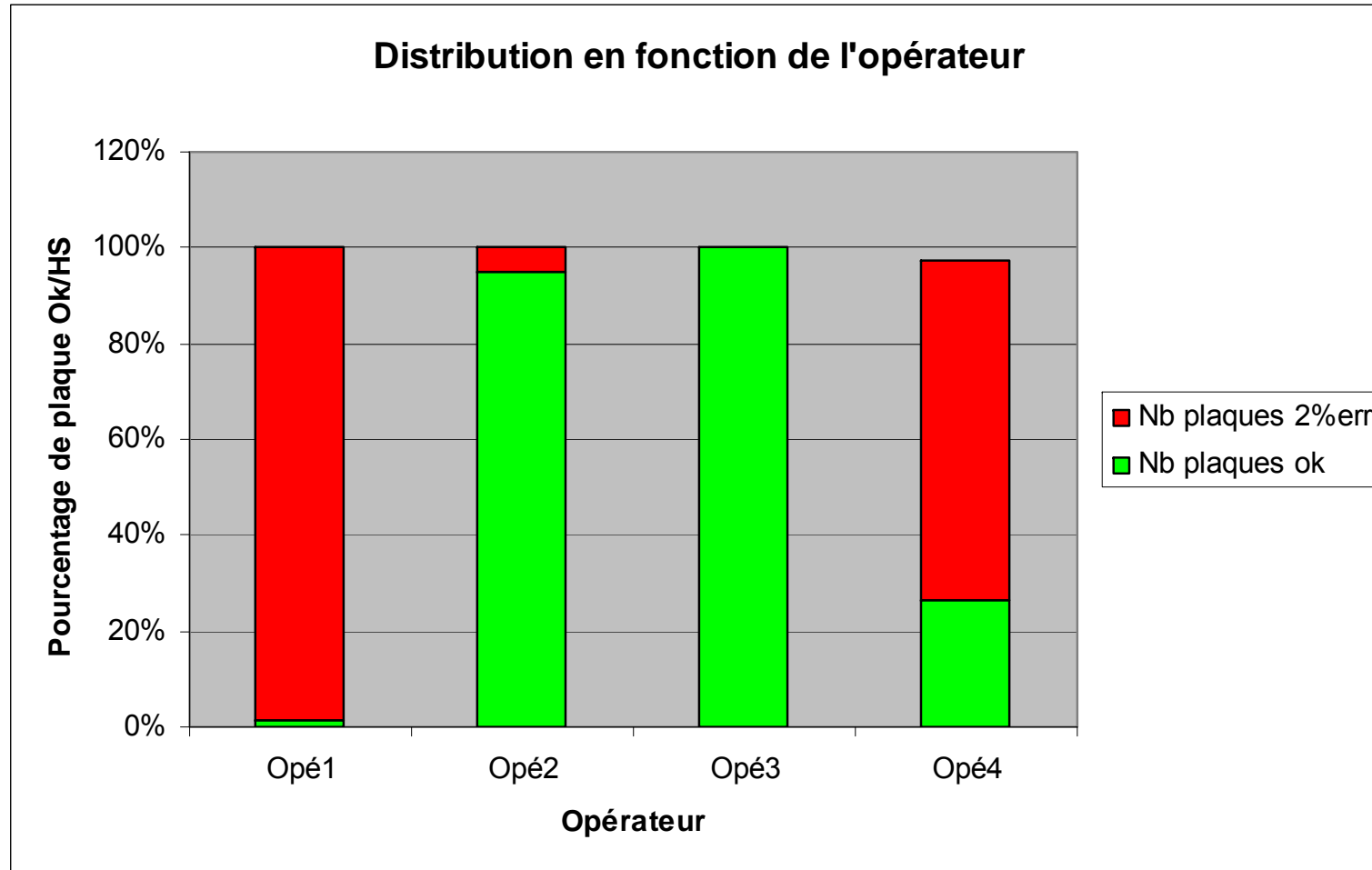
> Test final du capteur :  
Gain Action/Détection autour de 1 dans les specs

- + 2 % de défaillance au test fonctionnel final
- + Corrélation avec 2 populations de wafers

Valeur de l'erreur niveau moyenne pour 162 plaques



### Distribution en fonction de l'opérateur



## Ex.2 : Gain Action/Détection ⇔ Manipulation opérateur

### > Test final du capteur : Gain Action/Détection autour de 1 dans les specs

- + 2 % de défaillance au test fonctionnel final
- + Corrélation avec 2 populations de wafers
- + Identification de la variation dans le procédé :  
Position du premier wafer, en haut ou en bas, dans la machine de scellement.

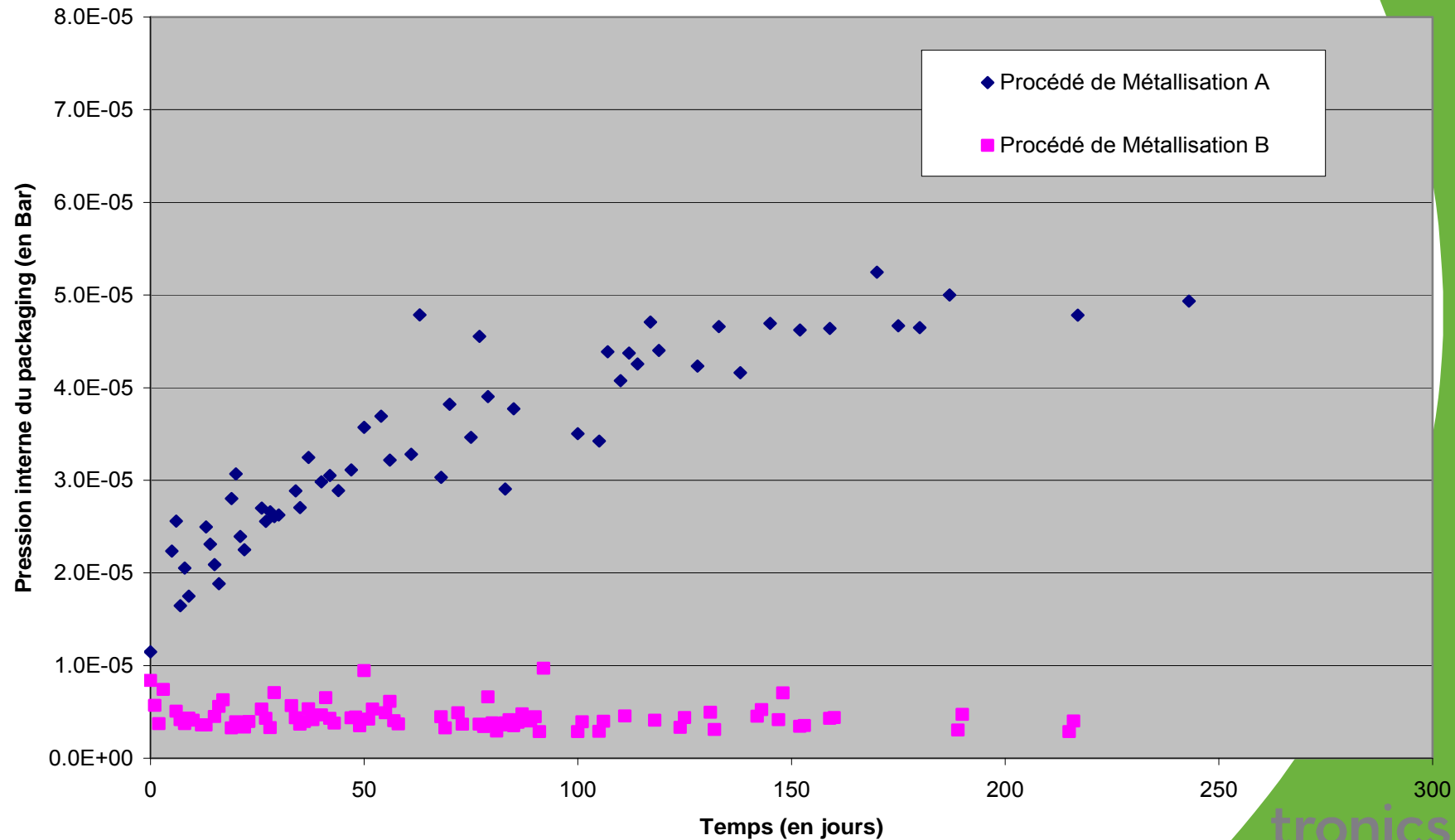
## Ex.3 : $Q_m(t) \Leftrightarrow$ Procédé de Métallisation

### > Test Final : Facteur de Qualité de Résonance Mécanique > 10'000

- + Lente décroissance du  $Q_m$  sur des semaines/mois en test fonctionnel final
- + Défaut potentiellement tueur du produit :  
Potentiel perte de confiance du client sur la fiabilité et le maintien des performance au-delà de 5 ans..
- + Corrélation avec le choix d'un procédé de métallisation

# Evolution du facteur de Qualité (amortissement) en fonction du type de métallisation

Evolution du facteur de qualité dans le temps



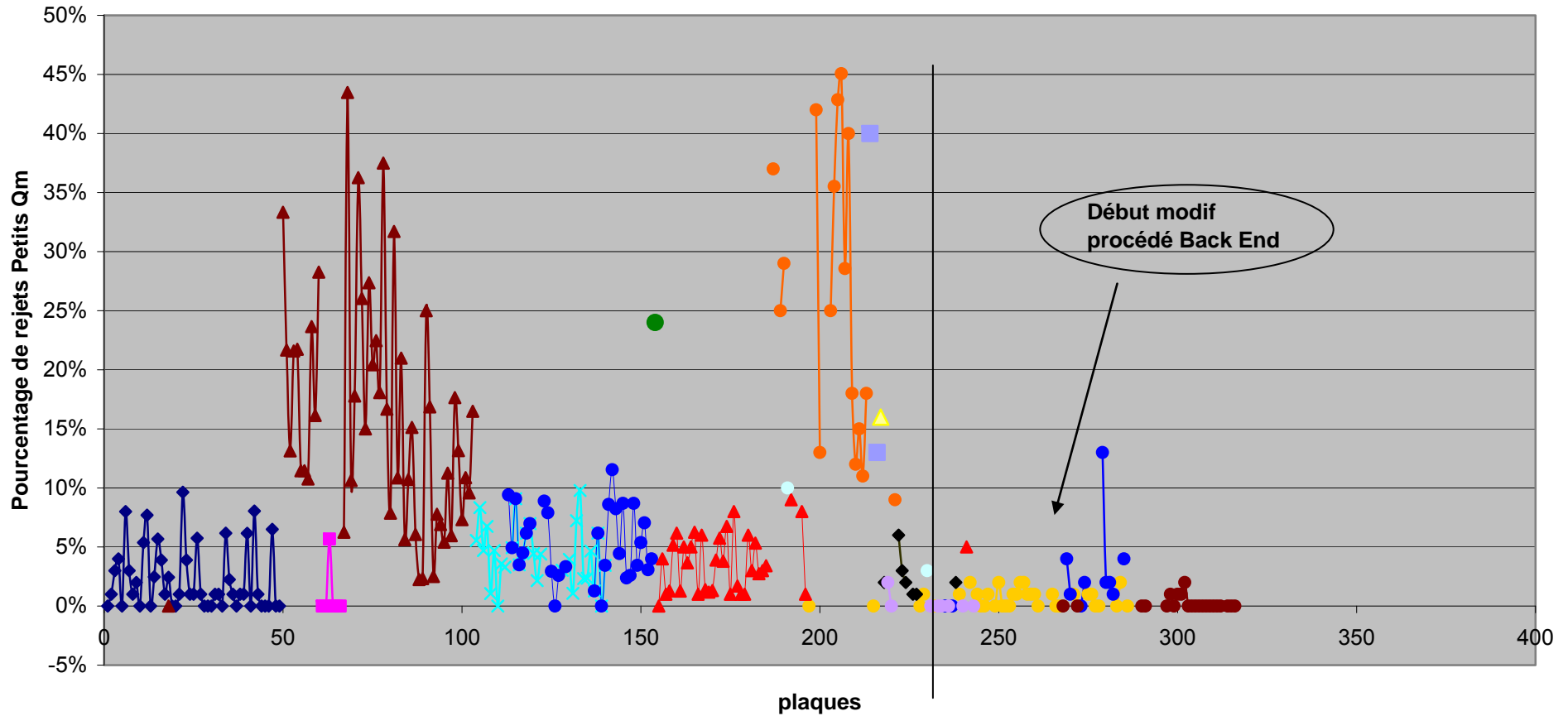
## Ex.4 : Valeurs absolues du $Q_m$ ⇔ Procédé chez le fournisseur

### > Test Final : Facteur de Qualité de Résonance Mécanique > 10'000

- + Apparition de quelques  $Q_m \approx 500 - 5000$ , stables dans le temps
- + Corrélation avec différents lots chez le fournisseur

# Evolution du facteur de Qualité (amortissement) en fonction des lots du fournisseur

Taux de rejet en petits Q en fonction du lot de getter



- |                       |                       |                       |                            |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| ◆ 741407388           | ■ 741407390           | ▲ 748409390           | ✕ 751409390                |
| ● 754413394 nett      | ● 755413394           | ● 757413394           | ● 759416397                |
| ▲ 760416397 R5-003231 | ◆ 760416397 R5-003232 | ■ 761417398 R5-003575 | ▲ 761417398 R5-003583      |
| ● 774422402 non nett  | ○ 754413394           | ○ 759416397 nett      | ● 774422402 R5-003593 nett |

## Ex.4 : Valeurs absolues du Qm ⇔ Procédé chez le fournisseur

### > Test Final : Facteur de Qualité de Résonance Mécanique > 10'000

- + Apparition de quelques Qm  $\approx$  500 – 5000, stable dans le temps
- + Corrélation avec différents lots chez le fournisseur
- + Difficultés d'identifier les différences de procédé chez le fournisseur →  
Résolution par la mise au point d'un post-process après réception.

# CONCLUSIONS

- > Nécessité de créer un lien entre les procédés FE / BE (fabricant)  
⇔  
Paramètres fonctionnels dans l'Application (designer/user)  
'DESIGN FOR MANUFACTURING'
- > Nécessité de savoir Ce qu'il faut tester, Où (à quelle étape) et Comment.
- > Nécessite du temps (2-3 ans) et des Volumes (X00 wafers)
- > => F.M.E.A. est le Guide pour les Améliorations
  - + Nécessité de régler finement le procédé en fonction du design
  - + Etablir un SPC adapté

**C'est ESSENTIEL pour:**

- + Des RENDEMENTS élevés
- + Un succès ECONOMIQUE des MEMS