



**MINISTÈRE
DES ARMÉES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

LES RENDEZ-VOUS FIABILITE DU CFF



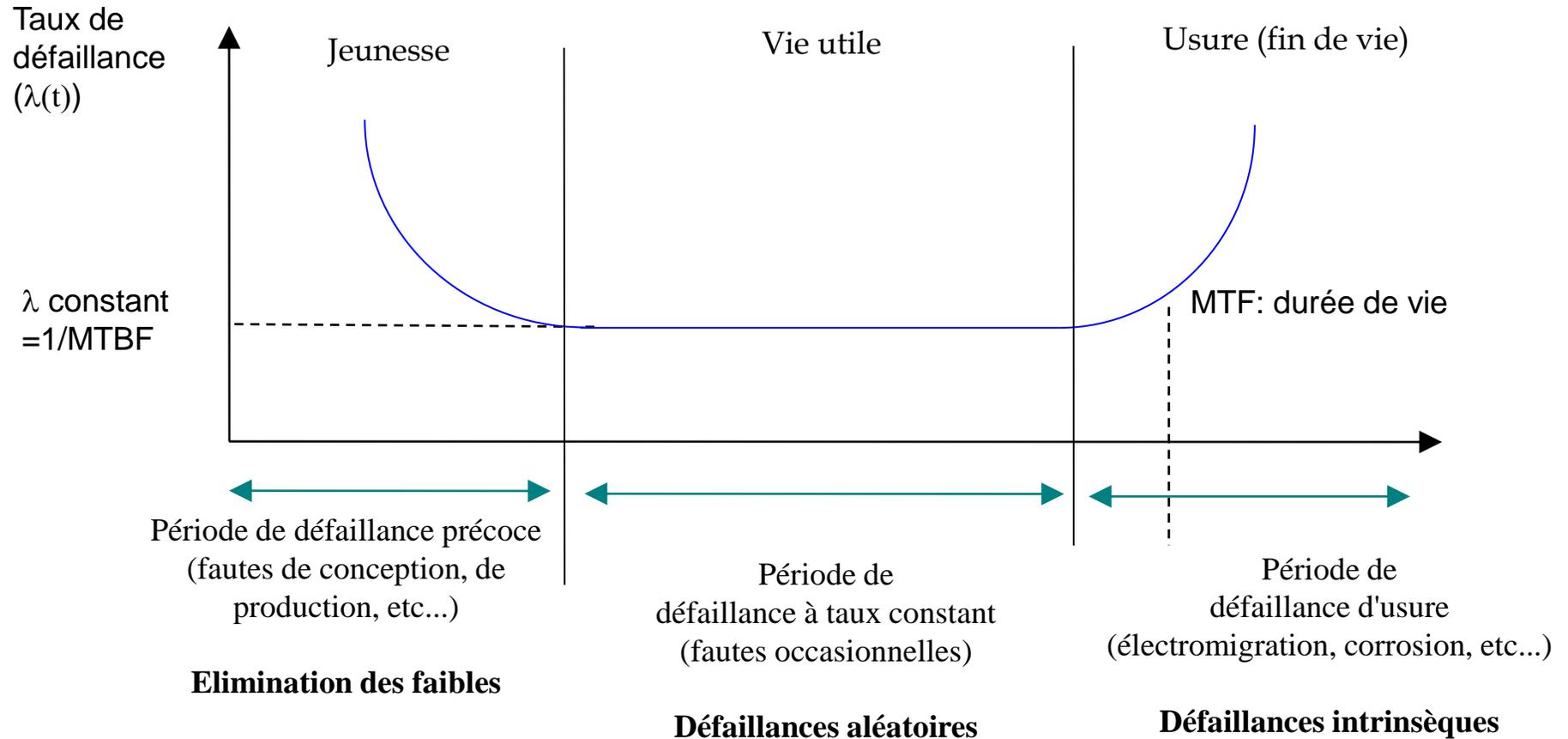
La puissance dans FIDES : perspectives

Franck DAVENEL
DGA MI





Fiabilité Vs Durée de vie



Spécifications performances de fiabilité

2 besoins :

- **Une durée de vie**

- « Le système doit avoir une durée de vie opérationnelle supérieure ou égale à X années pour le profil de vie spécifié. »
 - démontrer la DDV, identifier les composants à durée de vie limitée et proposition d'actions correctives en cohérence avec le plan de maintenance

- **Une fiabilité aléatoire**

- « Le système doit avoir un MTBF calendaire supérieur ou égal à Z heures pour le profil de vie spécifié »
 - Démontrer la fiabilité en utilisant le recueil UTEC80811 (FIDES ou par le retour d'expérience de produits similaires



- « Élaboration et validation d'une méthodologie fiabilité pour les systèmes de défense intégrant des COTS (FIDES) ».
 - Janv. 2001 à Sept. 2004 => **FIDES 2004A**
- PEA FIDES2 de 2006 à déc. 2009 => **FIDES 2009A**
 - guide et outils disponibles @ www.fides-reliability.org

Norme française AFNOR UTE C 80811 et internationale à venir IEC63142

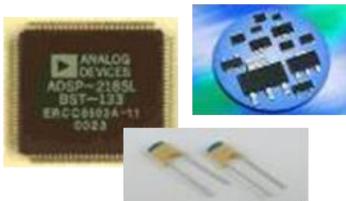
- Troisième étude en cours Sept 2015 – Déc 2020 (EA PISTIS) => **FIDES 2021**
 - DSM, update Puissance, update Puissance RF, guides déverminages et essais aggravés, update Lambda0 puces et boitiers



FIDES par qui pour quoi?

- Une méthodologie Fiabilité pour les Systèmes Électroniques
 - Utilisable pour l'évaluation et la construction de la fiabilité
 - Utilisable pour tous types d'articles, y compris les COTS
 - consortium de huit acteurs de l'aéronautique et la défense
 - Un guide méthodologique (français & anglais)

Composants



Cartes câblées



Sous-ensembles



FIDES : la philosophie



Processus

Technologies

Fiabilité

Utilisations



- Technologie → Le COTS, l'Assemblage et l'Intégration Système
- Processus → Tout le cycle de vie du COTS, depuis sa Fabrication jusqu'à son Remplacement
- Utilisation → Contraintes d'emploi (stress) en Conception, Production et en Exploitation



FIDES : modèle général (1/2)

- L'équation générale est :

$$\lambda = \lambda_{Physique} \cdot \pi_{Part_manufacturing} \cdot \pi_{Process}$$

- $\lambda_{Physique}$ représente la contribution physique (technologie et conditions d'emploi nominales)
- $\lambda_{Part_manufacturing}$ traduit la qualité et la maîtrise technique de fabrication de l'article
- $\lambda_{process}$ traduit la qualité et la maîtrise technique du processus de développement, de fabrication et d'exploitation/maintenance du produit contenant l'article

FIDES : modèle général (2/2)

$$\lambda = \lambda_{Physique} \cdot \pi_{Part_manufacturing} \cdot \pi_{Process}$$

- Où :

$$\lambda_{Physique} = \left[\sum_{Contributions_Physiques} (\lambda_0 \cdot \Pi_{accélération}) \right] \cdot \Pi_{induit}$$

- $\Pi_{accélération}$ est un facteur d'accélération traduisant la sensibilité a un contributeur physique : contraintes électriques, température, cyclage thermique, humidité, mécanique, chimique (contributions nominales spécifiées)
- Π_{induit} représente la contribution des facteurs induits (aussi appelés surcharges accidentelles ou overstress), classiquement attendus dans une application donnée

Modèle discrets actifs FIDES2009 (UTEC80811A)

Modèle général associé à la famille

avec : $\lambda = \lambda_{\text{Physique}} \times \Pi_{\text{PM}} \times \Pi_{\text{Process}}$

$$\lambda_{\text{Physique}} = \sum_i^{\text{Phases}} \left(\frac{t_{\text{annuel}}}{8760} \right)_i \times \left(\begin{array}{l} \lambda_{0\text{TH}} \times \Pi_{\text{Thermique}} \\ + \lambda_{0\text{TCy Boitier}} \times \Pi_{\text{TCy Boitier}} \\ + \lambda_{0\text{TCy Joints brasés}} \times \Pi_{\text{TCy Joints brasés}} \\ + \lambda_{0\text{RH}} \times \Pi_{\text{RH}} \\ + \lambda_{0\text{Méca}} \times \Pi_{\text{Méca}} \end{array} \right) \times (\Pi_{\text{Induit}})_i$$

Π_{PM} : Modèle associé au facteur $AQ_{\text{composant}}$

Niveau d'assurance qualité du composant	Position par rapport à l'état de l'art	$AQ_{\text{composant}}$
Qualification selon l'une des normes suivantes : AEC Q101, MIL-PRF-19500 JANS & JANJ, ESA ESCC 2xxxx niveau B, NASDA-QTS-xxxx classe I	Supérieur	3
Qualification fabricant intégrant les essais conformément aux normes JESD22, EIAJ-ED-4701, MIL-STD-750 et identification des sites de fabrication « front-end » et « back-end » ; Qualification selon l'une des normes suivantes : MIL-PRF-19500 JANTX ou JANTXV, ESA ESCC niveau C, NASDA-QTS-xxxx classe II	Equivalent	2
Qualification selon MIL-PRF-19500 JAN ou programme de qualification interne au fabricant et sites de fabrication non identifiés	Inférieur	1
Pas d'information	Très inférieur	0

Taux de défaillance de base associés à la puce

Lorsque N éléments (diodes, transistor) sont implantés dans un même boîtier, il faut multiplier le $\lambda_{0\text{TH}}$ par \sqrt{N} .

Diodes de faible puissance	$\lambda_{0\text{TH}}$	Diodes de puissance	$\lambda_{0\text{TH}}$
Diodes de signal jusqu'à 1A (PIN, Schottky, signal, varactor)	0,0044	Thyristors, triacs de plus de 3A	0,1976
Diodes de redressement 1A à 3A	0,0100	Diodes de redressement > 3A	0,1574
Diodes de régulation Zener jusqu'à 1,5W	0,0080	Diodes de régulation Zener de plus de 1,5W	0,0954
Diodes de protection jusqu'à 3kW (en crête 10ms/100ms) (TVS)	0,0210	Diodes de protection de plus de 3kW (en crête 10ms/100ms) (TVS)	1,4980
Transistors de faible puissance	$\lambda_{0\text{TH}}$	Transistors de puissance	$\lambda_{0\text{TH}}$
Silicium, bipolaire < 5W	0,0138	Silicium, bipolaire > 5W	0,0478
Silicium, MOS < 5W	0,0145	Silicium, MOS > 5W	0,0202
Silicium, JFET < 5W	0,0143	IGBT	0,3021

FIDES : modèle circuits actifs

$$\lambda_{Physique} = \sum_i \left(\frac{t_{annuel}}{8760} \right)_i \cdot \left(\lambda_{0_{TH}} \cdot \Pi_{Therm.} + \lambda_{0_{TCyBoitier}} \cdot \Pi_{TCy Boitier} + \lambda_{0_{TCyJoint s_brasés}} \cdot \Pi_{TCy Joint s_brasés} + \lambda_{0_{RH}} \cdot \Pi_{RH} + \lambda_{0_{méca}} \cdot \Pi_{méca} \right)_i \cdot \Pi_{Induit-i}$$

$\Pi_{Thermique}$	$11604 \times 0,7 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{j-composant} + 273)} \right]$	Arrhenius
-	En phase de fonctionnement : e En phase de non-fonctionnement : $\Pi_{Thermique} = 0$	
$\Pi_{TCy Boitier}$	$\left(\frac{12 \times N_{cy-annuel}}{t_{annuel}} \right) \times \left(\frac{\Delta T_{cyclage}}{20} \right)^4 \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{max-cyclage} + 273)} \right]}$	Norris-Landsberg
$\Pi_{TCy Joints brasés}$	$\left(\frac{12 \times N_{cy-annuel}}{t_{annuel}} \right) \times \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\Delta T_{cyclage}}{20} \right)^{1,9} \times e^{1414 \times \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{max-cyclage} + 273)} \right]}$	
$\Pi_{Méca}$	$\left(\frac{G_{RMS}}{0,5} \right)^{1,5}$	Basquin
Π_{RH}	$\left(\frac{RH_{ambiante}}{70} \right)^{4,4} \times e^{11604 \times 0,9 \times \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{ambiante_carte} + 273)} \right]}$	Peck
	En phase de fonctionnement : $\Pi_{RH} = 0$	

Modèle composant de puissance FIDES2021

Résultats de l'étude PISTIS

Durée de vie

- Pas de vieillissement constaté en power cycling ou thermal cycling



Principaux mécanismes de défaillance liés à l'assemblage

- Essai thermal cycling pas de défaillance au bout de 7000 cycles d'essais, représentant plus de 30 ans d'équipement disposé en peau d'avion court courrier (profil le plus contraignant)
- Essai power cycling, vieillissement négligeable pour le profil de vie TGV le plus contraignant (plus de 6 millions de cycles sur 25 ans)
- **Pas d'intégration d'une modélisation vieillissement dans FIDES**

Définition des lambda de base

Cas des composants de puissance (PISTIS)

- Analyse des essais fabricants HTRB et HTGB (50/50)

MOSFET

- Infineon ; Ixys ; SinoPower ; STM ; NEXPERIA
- Température d'essais de 125 à 175 °c en fonction des fabricants
- 531 milliards d'heures équivalentes d'essai à 20°C

IGBT

- Ixys ; Mitsubishi Electric ; OnSemi
 - Température d'essais de 85 à 125 °c en fonction des fabricants
 - Seulement 1,5 Mds d'heures équivalentes d'essai à 20°C
- Comparaison aux données de RETEX des partenaires du consortium

Modèle composant de puissance FIDES2021

Modèle composants MOSFET et IGBT en techno Si :

$$\lambda = \lambda_{physique} * \Pi_{induit} * \Pi_{PW} * \Pi_{part} * \Pi_{process}$$

- New : facteur PI Power (Π_{PW}), afin de prendre en compte l'impact sur la fiabilité des règles de conception
- Evolution des λ_{OTH} (en fits) :

	FIDES2009	FIDES2020
MOSFET	0,0202	0,0202
IGBT	0,3021	0,0202

Avec modification de la température de référence : 60°C au lieu de 20°C

En phase de fonctionnement : $\Pi_{Thermique} = e^{11604,07 \cdot \left[\frac{1}{T_{ref}+273} - \frac{1}{T_{j-composant}+273} \right]}$

En phase de non-fonctionnement : $\Pi_{Thermique} = 0$

Avec :

- $T_{ref} = 60^\circ\text{C}$
- $T_{j-composant}$, température de jonction du composant lors d'une phase de fonctionnement ($^\circ\text{C}$). Cette température sera au maximum égale à 175°C.

	FIDES2020	FIDES2020
Température de référence	20°C	60°C
λ_{OTH} MOSFET	0,0202	0,56
λ_{OTH} IGBT	0,0202	0,56

Pipower (1/2)

Pour IGBT et MOSFET

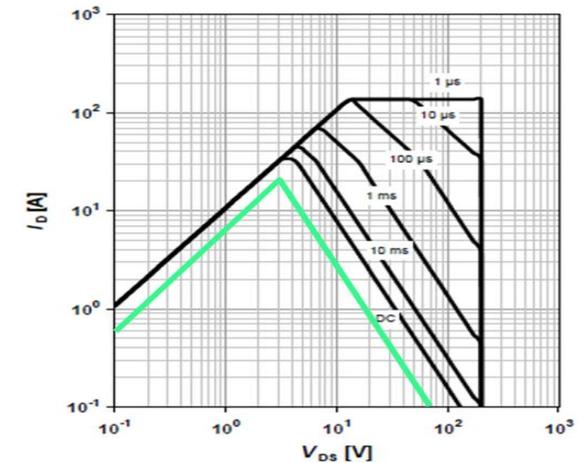
- Importance du derating ou de SOA (Safe Operating Area) pour les composants de puissance

Exemple de SOA :

Toute la zone de fonctionnement en dessous la courbe verte correspond au respect du derating spécifié par le fabricant.

- Mini audit de 10 questions (recommandations)
- A chaque item est associée une réponse VRAI ou FAUX.
- $\Pi_{PW} = 0,16$ à 5

$I_D = f(V_{DS})$; $T_C = 25\text{ °C}$; $D = 0$
 parameter: t_p



Pi power (2/2)

Questionnaire et pondérations

Famille	Item	Questionnaire	Poids
Derating électrique	1.1	Un derating d'au moins 20% est-il appliqué sur la tension Vds (MOSFET) ou Vce (IGBT)?	6
	1.2	Un derating d'au moins 20% est-il appliqué sur la tension Vgs (MOSFET) ou Vge (IGBT)?	6
	1.3	Un derating d'au moins 20% est-il appliqué sur le courant max Id (MOSFET) ou Ic (IGBT) ?	6
Derating thermique	2.1	Un derating d'au moins 25°C sur la Tjmax, ou un derating minimum de 20% sur la puissance max est-il appliqué?	12
	2.2	La variabilité de la résistance de contact thermique a-t-elle été prise en compte (qualité du contact thermique, voids de soudure, couple de serrage vis, force de pression ressort, épaisseur de l'isolant électrique...)	12
Surcharges en transitoire	3.1	Les vitesses maximales de commutation (dV/dt, dI/dt) associées aux éléments parasites de cablage ont-elles été prises en compte ?	10
	3.2	La protection aux court-circuits/surcharges (puissances/courants/tensions) est-elle prise en compte (attention au cas des modes transitoires sur les structures à résonnances / commutation douce) ? Note: Indiquer la justification par analyse ou essais	10
	3.3	Les effets du recouvrement de la diode intrinsèque du composant ont-ils été pris en compte, y compris dans les modes transitoires (démarrage, arrêt, surtension, surcharge, court-circuit...)	10
Overstress accidentels	4.1	Une résistance de grille est-elle utilisée pour éviter les oscillations haute fréquence à la commutation, en particulier en cas de mise en parallèle?	5
	4.2	La présence d'une protection en tension est-elle utilisée, en cas d'une tension de bus trop élevée avec une commutation d'un fort courant?	5

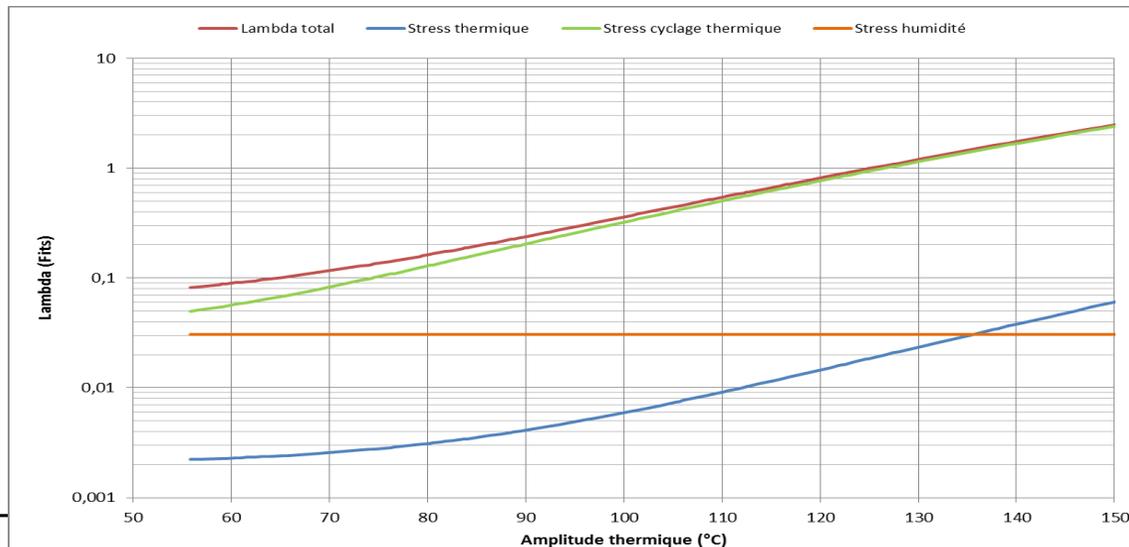
Evaluations fiabilité FIDES2021

Cas du MOSFET (idem IGBT)

- Evolution du produit $\lambda_0 * \Pi_{TH}$ en fonction de la TJ (contributeur thermique sur la puce)

	Tj-composant (°C)	20	60	80	100	120	140	160	175
FIDES 2009	$\lambda_0 * \Pi_{thermique}$ (MOSFET)	0,02	0,564	2	8	23	64	158	296
	$\lambda_0 * \Pi_{thermique}$ (IGBT)	0,3	8	34	115	350	952	2360	4423
FIDES 2021	$\lambda_0 * \Pi_{thermique}$	0,02	0,56	2	8	23	63	157	293

- Calcul de fiabilité pour MOSFET profil de vie Avion d'Arme (type RAFALE)



Modèle FIDES pour SiC (voire GaN de puissance)

- Vérifier que les mécanismes de défaillance principaux sont identiques (au MOSFET/IGBT Si)
→ travaux prévus dans l'étude SICRET
- Analyser les résultats d'essais de plusieurs fabricants et sur une période suffisamment grande (pour avoir bonne représentativité statistique) pour en extraire des λ 0.
- Consolider le résultat du modèle complet par comparaison à du RETEX

Conclusion

- Seuls composants de puissance MOSFET et IGBT en Si couverts par FIDES
- Les modèles pour ces composants mis à jour pour FIDES2021 (en cours de rédaction)

- Les travaux en cours (notamment SICRET pour SiC) =
 - Analyse des mécanismes de défaillance
 - Modélisation des lois de vieillissement
 - données d'entrées pour développer éventuel nouveau modèle FIDES SiC

- Prévoir également modèle pour composants de puissance GaN