



Centre Français Fiabilité

NRTW 2025

National **Reliability** Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

Faut-il intégrer le stress radiatif
au sein des évaluations
prédictives de fiabilité FIDES ?

Organisé par :





Enjeux et contexte autour de la fiabilité et des SEE

01



Gestion des contraintes radiatives par secteurs

02



La fiabilité prévisionnelle et modèle FIDES

03



Peut-on intégrer un modèle de stress radiatif ?

04



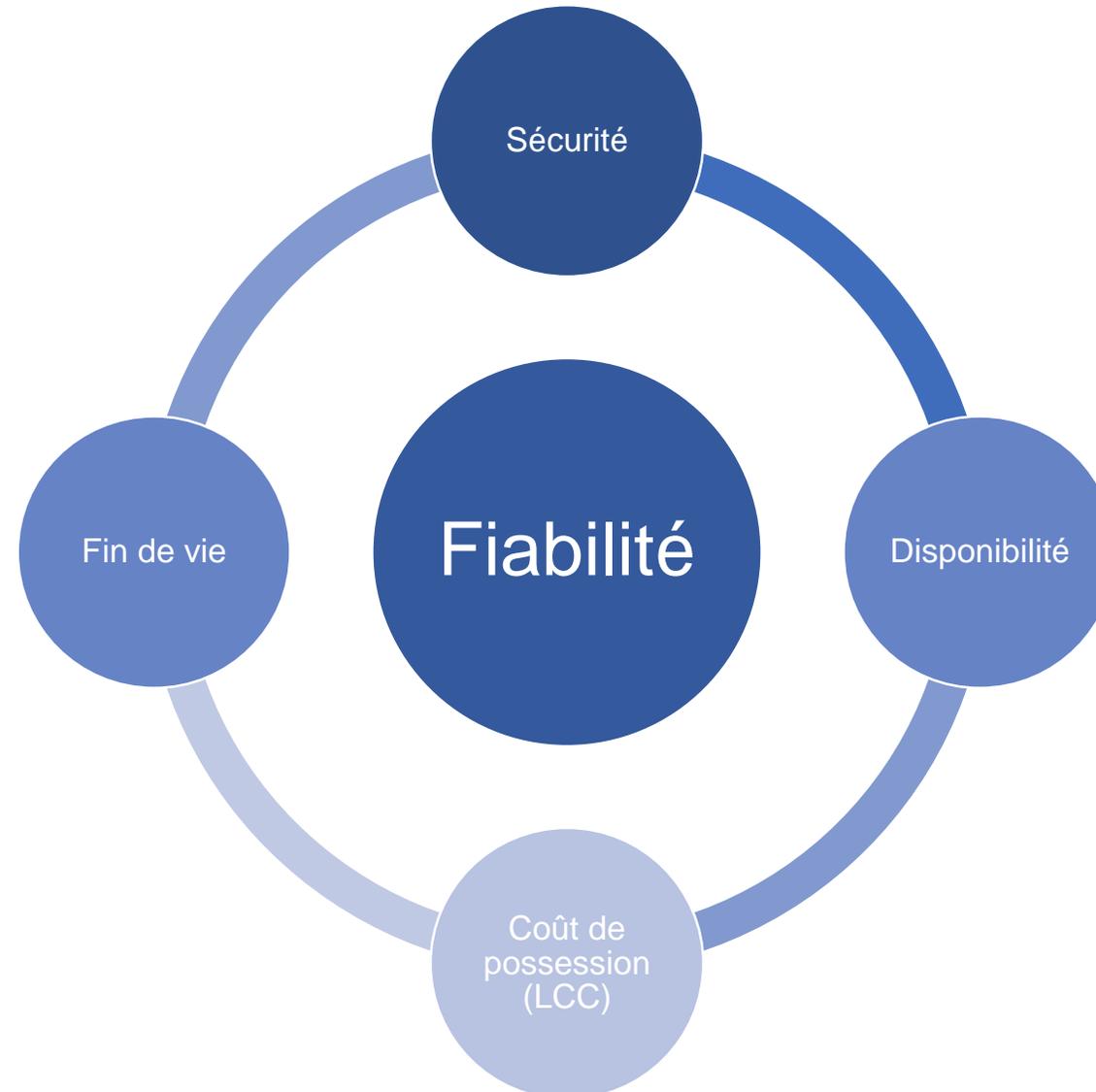
Conclusions et perspectives

05





I - Pourquoi la fiabilité ?



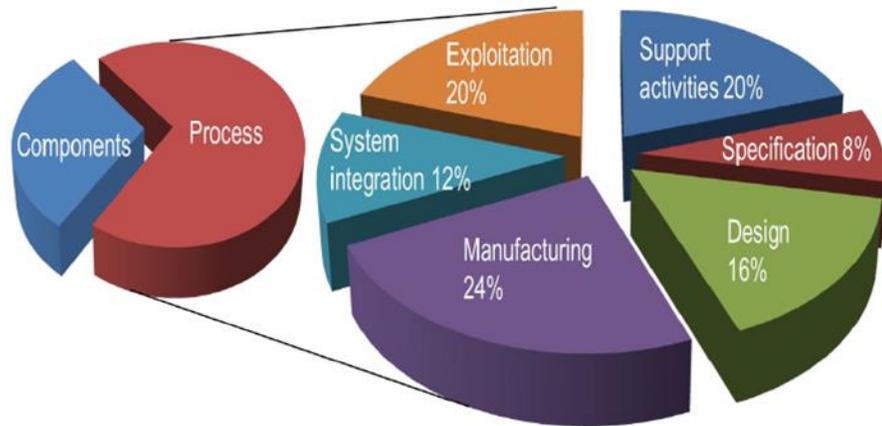
Context – NRPM study observations



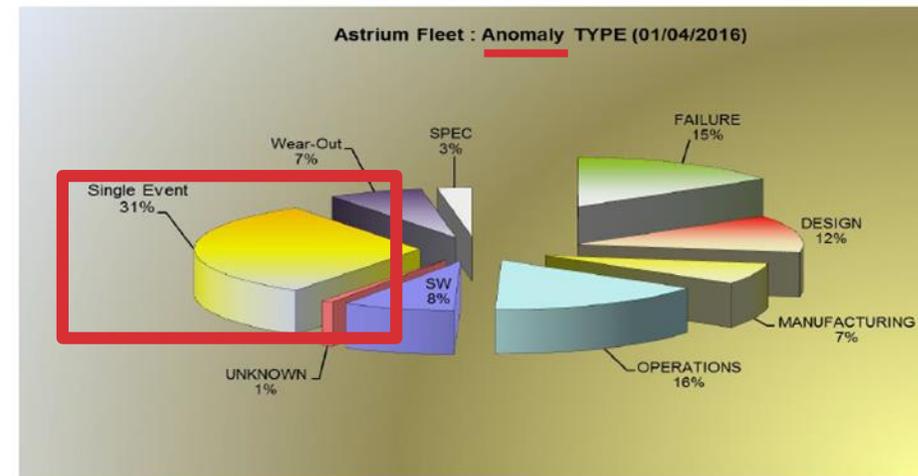
Observation from the different industrial fields:

Intrinsic failures are not the main causes of equipment failures

Weighting between component & process and FIDES default failure distribution through life cycle



In-orbit anomaly type

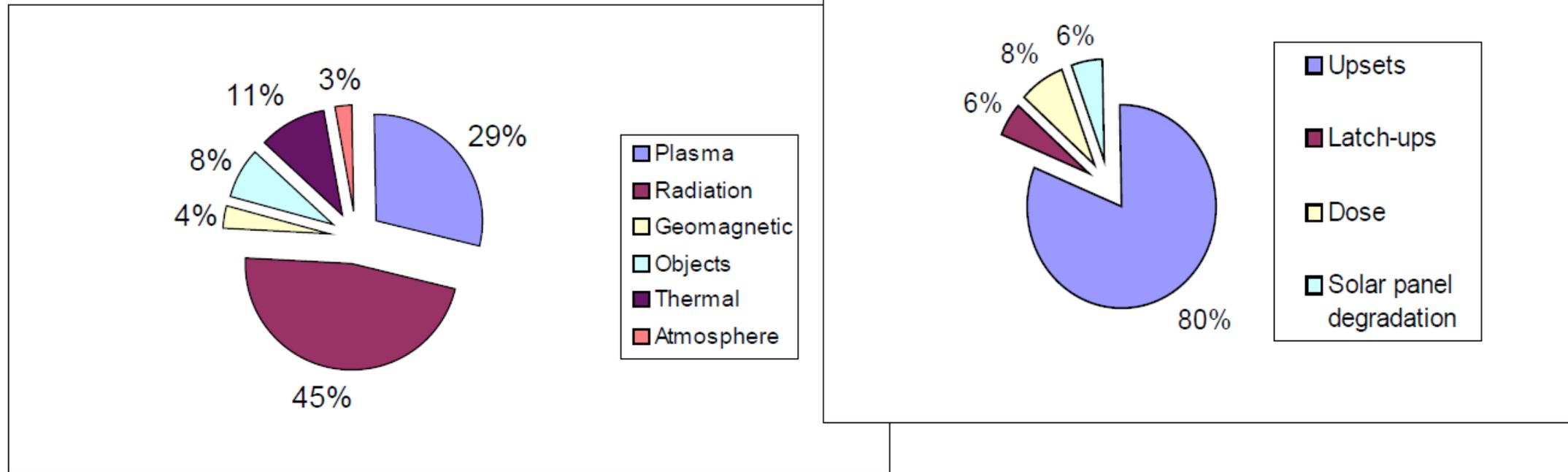


5



→ THE EUROPEAN SPACE AGENCY

Distribution of spacecraft anomalies caused by space environment (not all anomalies) – All types of spacecraft, Earth Orbiting and Interplanetary



© NASA - NASA reference publication 1390 - Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment, Août 1996



SEE :

Single-Event Effect (SEE) - un changement d'état, de données stockées, de sortie ou de fonctionnalité causé par le passage d'une seule particule ionisante à travers un volume sensible dans un composant.

La particule ionisante peut être un ion lourd primaire, un ion secondaire résultant d'un événement de diffusion, un proton primaire - ou, en principe, un muon ou même un électron.

Les conséquences/modes du SEE dépendent de la technologie du composant et peuvent être :

- Destructives (par exemple, Single-Event Latchup – SEL ou Single-Event Gate Rupture – SEGR, SEB)
- Non destructives et temporaires (par exemple, Single-Event Transient - SET)
- Non destructives et récupérables (par exemple, Single-Event Upset - SEU)
- Non destructives, récupérables mais perturbatrices (par exemple, Single-Event Functional Interrupt - SEFI)

I - Types de SEE applicabilités



SEL ★	SEGR ★	SEB ★	SEDR	Stuck Bit	SEU/MCU/MBU	SET	SEFI
CMOS	Power MOSFET	Power MOSFET	Antifuse-based FPGA	SRAM	Digital/ bistable cells	bipolar	Complex microcircuit
Bipolar?	Flash	JFET	Bipolar microcircuit	DRAM	Deep submicron CMOS more at risk for MCU	Analog microcircuit	ADC
	Schottky Diode	Bipolar Xstr		Flash		Digital microcircuit	PWM

■ Common
 ■ Fairly Common
 ■ Moderate
 ■ Theoretically possible, but not seen yet

© ESA - Janvier 2016

★ Nota 1 : Également applicable aux technologies GaNFET et SiCFET

Nota 2 : Le risque de SEE dépend du flux de particules et du LET (Linear Energy Transfert) des matériaux



TID effect (wear-out) :

Les dispositifs électroniques subissent des effets de rayonnement à long terme, principalement dus aux électrons et aux protons.

Les dommages cumulés à long terme dus aux protons et aux électrons peuvent causer des décalages de seuil, une augmentation des courants de fuite, des changements de temporisation, une diminution de la fonctionnalité, etc.

Displacement Damages Effect (wear-out) :

Les Displacement Damages (DD) créent des défauts dans le réseau cristallin des semi-conducteurs, entraînant une dégradation électrique à long terme.

Spatial

Qualitatif avancé - règles design – derating – choix des composants – qualification – triplication – architectures - AMDEC

Quantitatif avancé - évaluations fines sur tous les SEE – comparaison et mixte avec les taux de défaillance pour calculs succès mission et dé-orbitation



Aéronautique civil

Qualitatif avancé - règles design – derating – choix des composants – qualification – triplication – architectures - AMDEC

Quantitatif moyen - évaluations pour les SEU/MBU – comparaison et mixte avec les taux de défaillance pour HAZ et CAT en safety



Nucléaire

Qualitatif moyen - règles design – derating – choix des composants – qualification – architectures



Ferroviaire / automobile

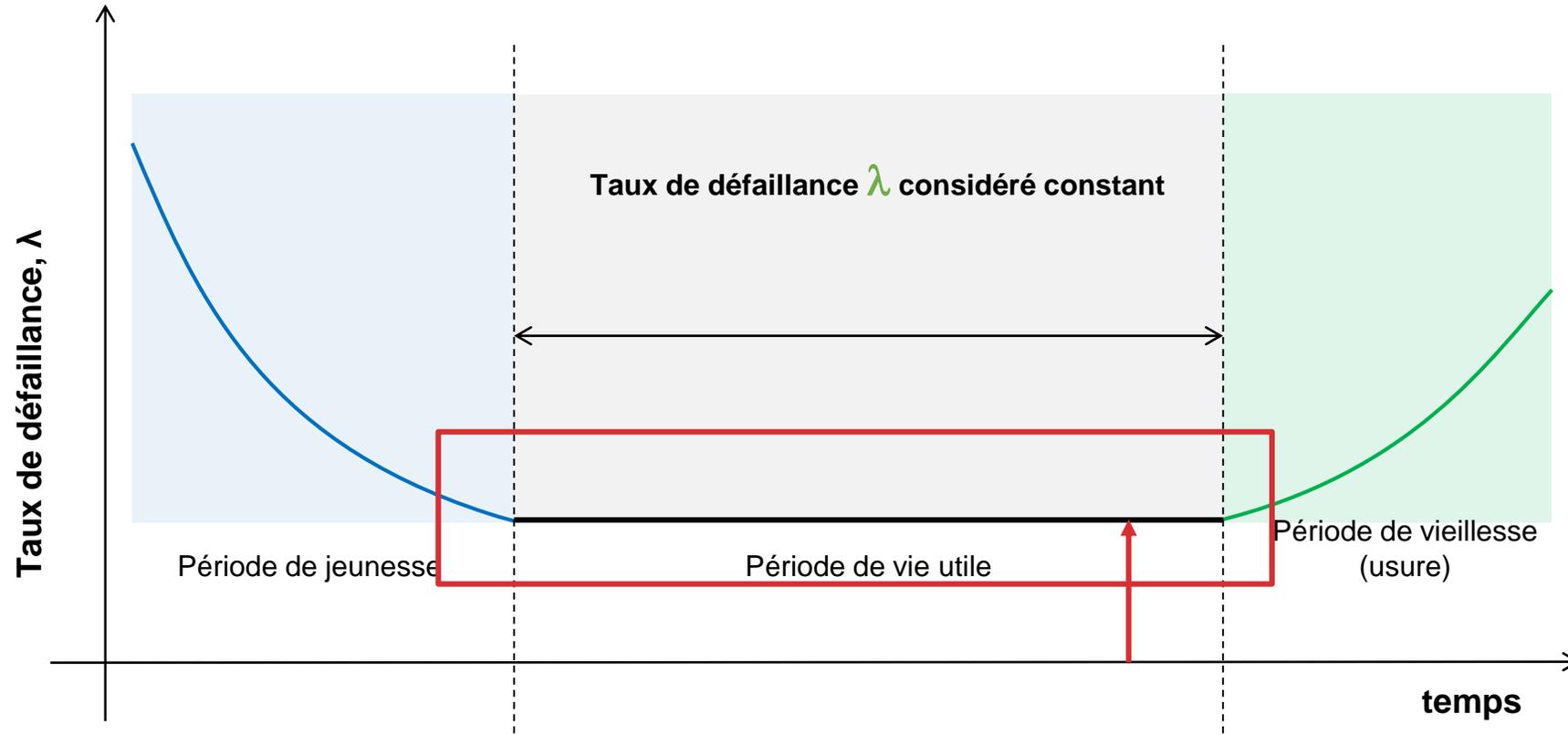
Qualitatif léger - règles design – derating

Nota : En général on évite le quantitatif et, hors spatial, souvent très approximatif

Monde fiabiliste et radiatif souvent disjoints

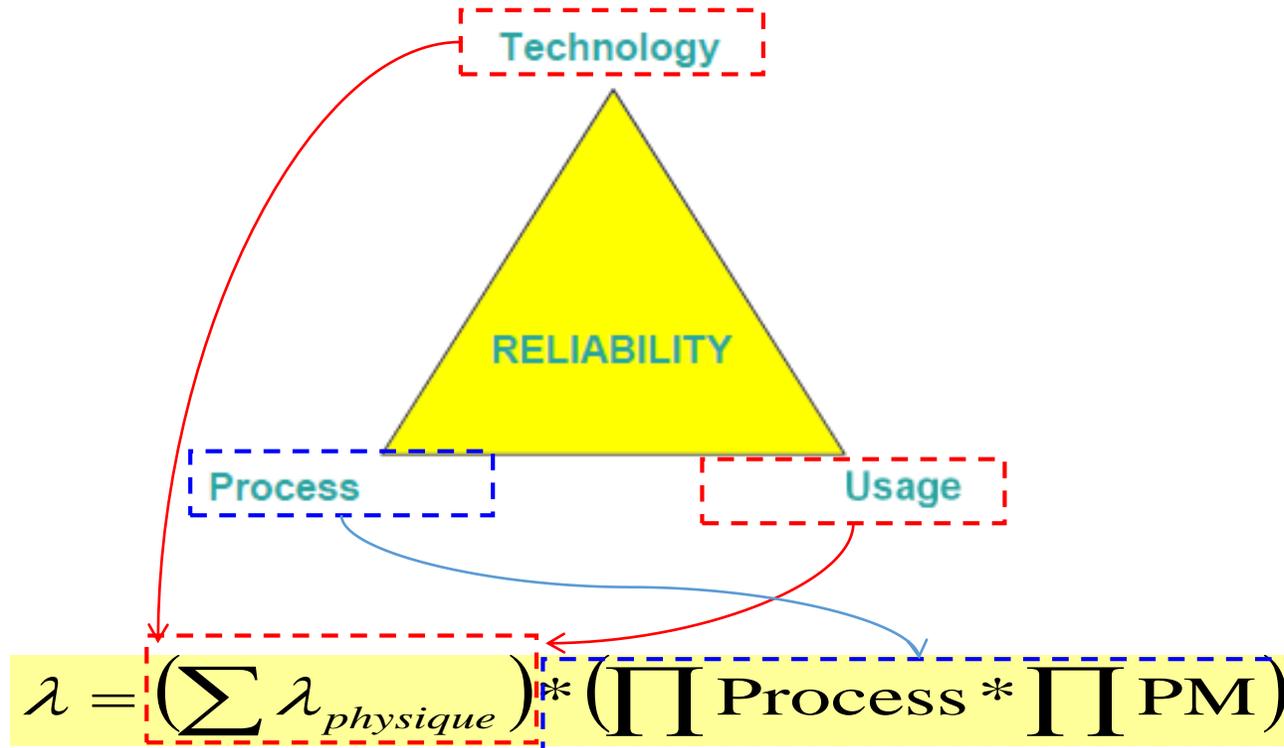


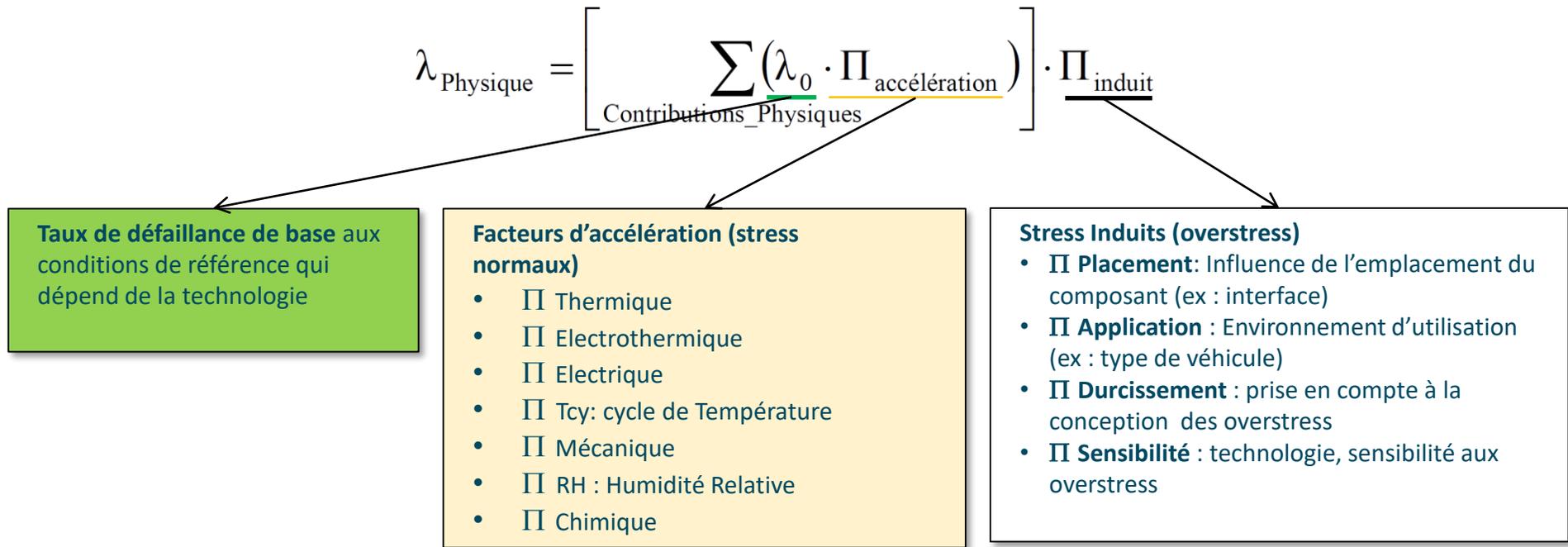
III – Période de vie utile





III – Modèle FIDES 1/2





Nota : Usage d'une physique de défaillance simplifiée

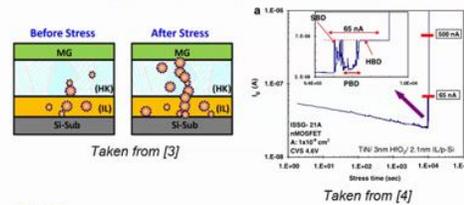
Physique

Mécanismes de défaillances

Modes de défaillance

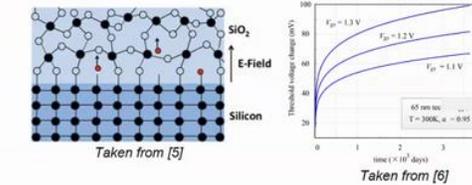
TDDB

• Time Dependent Dielectric breakdown



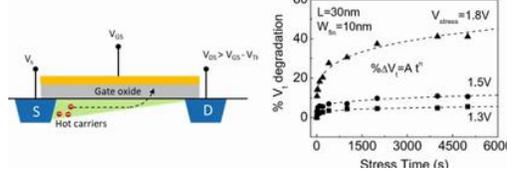
BTI

• Bias Temperature Instability



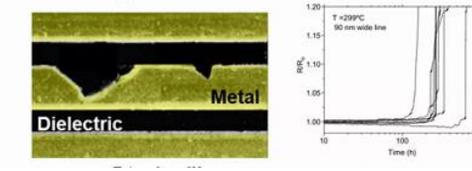
HCI

• Hot Carrier Injection

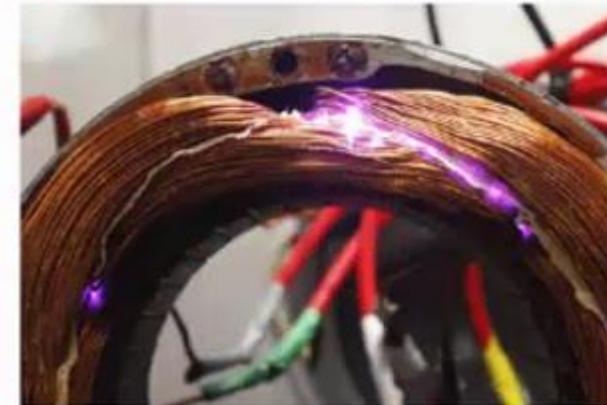


EM

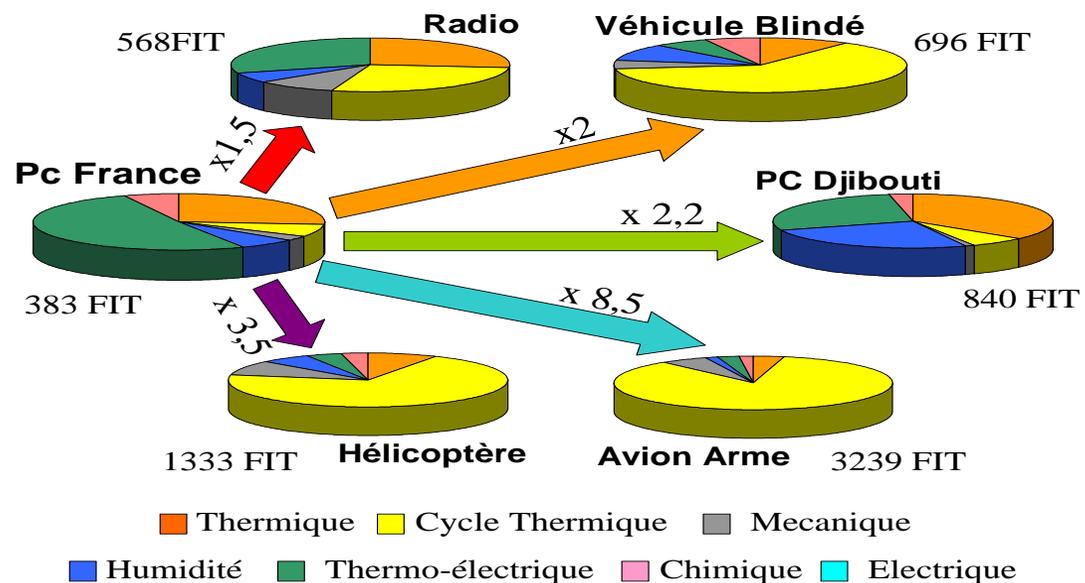
• Electromigration



Overvoltage causes Partial Discharge



III – Profil de vie



© DGA- 2013

• Translation as a FIDES life profile for a motor car calculator

Personal car - used daily

Phase title	Calendar time (hours)	On/Off	Temperature			Thermal cycling			Humidity Relative humidity (%)	Mechanical Random vibrations (Grms)	Chemical				Application induced
			Ambient temperature (°C)	ΔT (°C)	Number of cycles (/year)	Cycle duration (hours)	Maximum temperature during cycling (°C)	Saline pollution			Environmental pollution	Application pollution	Protection level		
Parking off	8212,5	Off	15	10	365	22,5	20	70	0	Low	Moderate	High	Non hermetically sealed	3.1	
Driving on road	365	On	35	20	730	0,5	35	22	1.4	Low	Moderate	High	Non hermetically sealed	5.1	
Traffic jam	182,5	On	50	15	730	0,25	50	10	1.6	Low	Moderate	High	Non hermetically sealed	5.1	
	8 760														



Limitations :

- De -55 °C à +125 °C,
- Aucun effet de vieillissement – **Phénomènes de dose exclus TID ou DD**,
- le modèle de courbe en baignoire est supposé vrai,
- Maximum 7 contraintes avec une combinaison de 8 lois de la physique :
 - Thermique
 - Electrothermique
 - Cycles thermiques
 - Électrique (seulement pour les fusibles, les interrupteurs et les relais)
 - Humidité
 - Mécanique
 - Chimique
- Ne considérant que les mécanismes de défaillance principaux (liés à plus de 95 % des défaillances observées),
- Non applicable pour un seul composant, mais uniquement au niveau d'une carte électronique,
- Approche moyenne (taux de défaillance constant) à partir d'un nombre total de défaillances pour un profil.

Nota : Pas de prise en compte des aspects radiatifs

Oui et cela a déjà été proposé en 2016

San-talking Testing Engineering Academy Co., Ltd. - Publications scientifiques :

A Method of Space Radiation Environment Reliability Prediction - Qunyong Wang, Dongmei Chen & Hua Bai.

Purement spatial, mais semble extensible aux autres secteurs.

Equation : $\lambda_{\text{physique}} = \lambda_{\text{physique non radiatif}} + \lambda_{\text{physique radiatif}}$

Avec $\lambda_{\text{physique radiatif}} = \lambda_{\text{TID}} + \lambda_{\text{DD}} + \lambda_{\text{SEE}}$

Détail des formules

Conforme à ECSS-E-ST-10-12C pour SEE et MIL-HDBK-814 pour TID et DD

- SEE :

$$\lambda_{SEEtype-i} = \int_0^{\infty} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} f(LET, \theta, \phi) \sigma_{SEEtype-i}(LET, \theta, \phi) d\phi d(\cos \theta) dLET$$

where ,

$\sigma_{SEEtype-i}(LET, \theta, \Phi)$: the sensitive cross section for SEE type i for the device for all LET all incident angle θ all 2π direction Φ , unit: cm^2/bit , or $cm^2/device$.

$f(LET, \theta, \Phi)$: the flux stresses for the device for all LET all incident angle θ all 2π direction Φ , unit: $\#/cm^2h$.

When the device SEE threshold LET is less than $15MeV\text{-}cm^2/mg$, the SEE caused by protons is not ignorable. The prediction formula ^[5] for a proton SEE is formula (7):

$$\lambda_{PSEEs} = \frac{A}{4} \int \frac{d\Phi(E)}{dE} \sigma_{PSEEs}(E) dE \quad (7)$$

where ,

λ_{PSEEs} failure rate due to the i^{th} type of SEE caused by a proton for the device, unit: h^{-1} .

$\Phi(E)$: space environment proton integral spectrum

$\sigma_{PSEEs}(E)$: the sensitive SEE cross section caused by a proton, unit: cm^2/bit , or $cm^2/device$.

Détail des formules

- TID ou DD :

The instantaneous failure rate is not constant for lognormal distribution; however, for engineering simplified application, we define a nominal equivalent failure rate λ_{TID} upon the same end-life survival probability, see formula (12):

$$\lambda_{TID} = -\frac{1}{T} \ln(S_{TID}(T)) = -\frac{1}{T} \ln \left\{ 1 - \Phi \left[\frac{\ln(R_{specTID}(T)) - \mu}{\sigma} \right] \right\} \quad (12)$$

Please note that the formula (12) is only applicable to predict the TID failure rate within time duration of 0~T (end-life).



Critiques à challenger

- Ne pas considérer les effets de doses,
- Limiter les SEE aux éléments destructifs ou d'intérêts (potentiel paramétrages des besoins pour conserver ou éliminer des SEE),
- Nécessité d'ajouter des compléments aux profils de vie (durée exposition, flux, types...),
- Proposer des lois heuristiques pour considérer ou non ce volet pour l'analyste,
- Fournir les résultats par types de SEE pour usage dans les AMDEC (pas les mêmes modes),
- Confirmer l'applicabilité hors champ spatial (notamment modèle complémentaire protons),
- Proposer des tables indicatives par types de technologies de cross-sections,
- Définir les facteurs π pour les aspects qualitatifs et leurs impacts sur la fiabilité effective.

Nota : Tout n'est pas réglé, mais c'est « possible », reste également à valider l'adhésion des utilisateurs potentiels.



V - Conclusions



- La fiabilité est une métrique importante pour de nombreux domaines. Les environnements radiatifs peuvent affecter cette métrique, mais les effets exacts relevant de la fiabilité sont encore mal définis.
- Les fiabilistes traitent souvent cette question de manière inégale et hésitent à quantifier les impacts radiatifs. Cela peut entraîner des contraintes coûteuses.
- L'utilisation croissante d'électroniques de puissance pourrait amplifier les impacts radiatifs sur la fiabilité.
- Il est désormais possible d'intégrer ces impacts dans les outils d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle, notamment grâce à la méthodologie FIDES.
- Un premier modèle a même été proposé, qui ouvre la voie à de nouvelles approches.
- Cependant, il reste encore des points à clarifier, notamment la volonté des spécialistes de la fiabilité à adopter de nouvelles pratiques pour quantifier les effets radiatifs.



NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

Mercredi 19 et Jeudi 20 mars 2025 | GANIL – Bd Henri Becquerel, 14000 Caen

merci pour votre écoute !

Organisé par :

