



Electroniques ferroviaires : Comparaison des méthodologies de fiabilité prévisionnelle et déploiement de la FIDES

Predictive reliability methods comparison for railway electronics and deployment of FIDES methodology

RAGOT Anthony
ALSTOM
Villeurbanne (France)
Anthony.ragot@alstomgroup.com

FOTIA Francesco
ALSTOM
Bologne (Italie)
Francesco.fotia@alstomgroup.com

1 **Résumés** — Les prévisions de fiabilité permettent en phase de développement d'identifier les performances de différentes architectures,
2 ainsi que les contributeurs prépondérants dans l'optique de robustifier le design d'un produit ou d'un système devant répondre à des attentes
3 Clients. Elles permettent également de définir des engagements de fiabilité ou des conditions de sortie de garantie et représente donc un
4 métrique de comparaison et/ou de choix mais aussi de différenciation.

5 La plupart des équipements ferroviaires sont soumis à des environnements sévères avec des durées de vie (exploitation) de l'ordre de 30 ans.
6 Pour les équipements électroniques, notamment de signalisation ferroviaire, ALSTOM réalisait ses analyses de fiabilité prévisionnelles
7 suivant l'IEC/TR 62380 [1]. Fort de plus de 15 ans de retour d'expérience sur ce standard et sur le suivi de ses équipements en opération,
8 ALSTOM a acquis une expertise et une confiance dans ce standard.

9 À la suite de l'annulation de l'IEC/TR 62380, un groupe de travail multisites au sein d'Alstom a été mis en place afin d'identifier la
10 méthodologie à appliquer pour déterminer la fiabilité prévisionnelle de nos électroniques d'aujourd'hui et de demain.

11 Dans le cadre du passage de l'IEC/TR62380 vers la FIDES au sein d'Alstom, cette publication présente la méthodologie, les points clés
12 différenciants entre les différents standards de fiabilité, la méthode retenue ainsi que les impacts méthodologiques et quantitatifs de ce
13 changement.

14
15 **Mots-clefs** — IEC/TR 62380, FIDES, fiabilité, profil de vie, retour d'expérience.

16
17 **Abstract** — Reliability predictions allow in the development phase to identify the performance of different architectures, as well as the
18 predominant contributors to robustify products or systems design to reach customer needs. They also make it possible to define reliability
19 commitments or conditions for the end of warranty and it represents a comparison and also a discriminating factor.

20 Most railway equipment is subjected to severe environments with a duration (operation) about 30 years.

21 For electronic equipment, particularly railway signalling equipment, ALSTOM carried out its predictive reliability analyses according to the
22 IEC/TR 62380 [1]. With more than 15 years of feedback on this standard and on the monitoring of its equipment in operation, ALSTOM has
23 acquired expertise and confidence in this standard.

24 Following the cancellation of the IEC/TR 62380, an Alstom multi-site working group was set up to identify the methodology to be applied
25 to determine the predictive reliability of our today and tomorrow electronics.

26 In the framework of the transition between the IEC/TR62380 and the FIDES, this publication presents the methodology, the key
27 differentiating points between the different reliability standards, the chosen method and the methodological and quantitative impacts of this
28 transition.

29 **Keywords** — IEC/TR 62380, FIDES, reliability, life profile, return of experience.

31

32

I. INTRODUCTION

33

34

35

Bien que l'industrie ferroviaire contribue déjà à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, Alstom a à cœur de fournir à ses clients des solutions de plus en plus éco-responsables. La conception d'équipements fiables est un des contributeurs à la ponctualité des transports en commun.

36

37

38

39

40

41

Les modèles de fiabilité prévisionnelle sont partie intégrante du développement d'un produit, d'un système et d'une solution. Elles sont aussi importantes en phase de choix d'architecture, de critère de taux de charge (électrique et thermique), de validation de requis client en phase design, d'engagement de fiabilité, de choix d'indicateur de sortie de garantie, de dimensionnement de stock de rechanges pour le MCO (Maintenance en Conditions Opérationnelles) ou encore du coût de cycle de vie (Life Cycle Cost).

42

Pour atteindre un haut niveau de confiance dans ces prédictions, 4 principaux critères doivent être maîtrisés :

43

44

45

46

47

- ✓ Le profil de vie des équipements (profil d'utilisation & contexte opérationnel)
- ✓ Les caractéristiques de conception (nomenclature, stress)
- ✓ La fabrication
- ✓ Le suivi des performances opérationnelles

48

49

50

Il est évident que pour obtenir une prévision de fiabilité au plus proche de la fiabilité opérationnellement observée, une modélisation « part stress » doit être effectuée et non pas une modélisation « part count » beaucoup plus limitante et moins représentative.

51

52

53

54

55

L'absence de mise à jour de l'IEC/TR62380 depuis 2004 ainsi que son annulation en 2017 ont poussé Alstom à envisager une évolution de la méthode de prédiction de fiabilité de ses électroniques. Pour ce faire, un groupe de travail a comparé les différentes méthodes existantes pour identifier et retenir celle répondant le mieux aux contraintes du secteur ferroviaire tout en assurant une représentativité du résultat obtenu à notre Retour d'Expérience (REX).

56

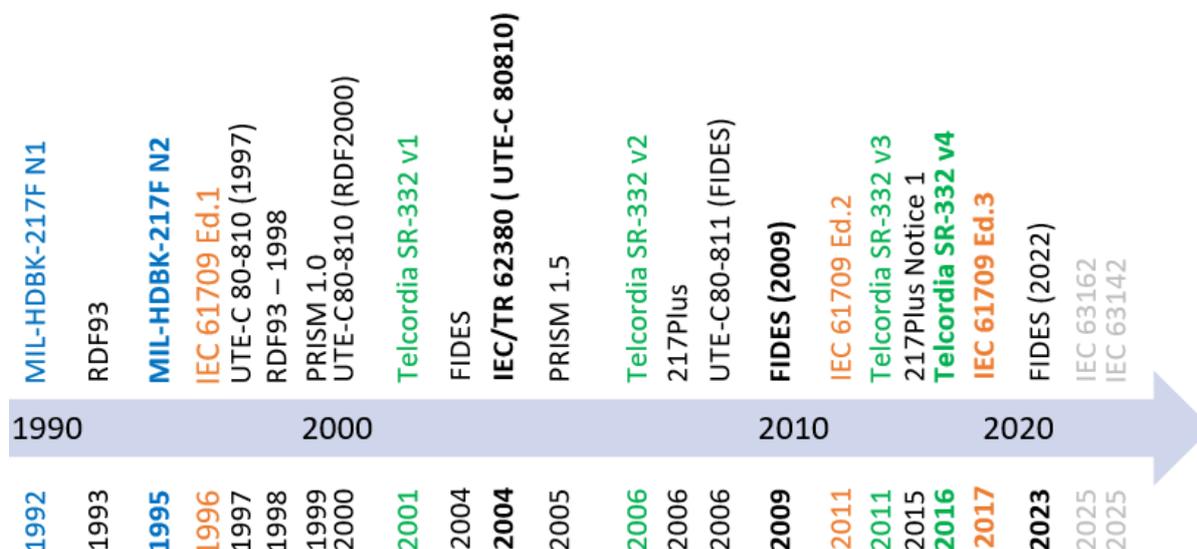
57

II. ÉTAT DE L'ART

58

59

Un tour d'horizon des différents recueils mis à disposition des industriels a permis d'identifier les principales méthodes de prédiction de fiabilité électronique, ci-après résumées :



60

61

Fig. 1. Chronologie des principaux recueils de fiabilité.

62

63

64

65

Outre l'IEC/TR 62380, 6 autres principales approches sont à dénombrer.

Parmi celles-ci, la MIL-HDBK-217F ainsi que la 217Plus ont été écartées assez rapidement de l'analyse du fait de l'absence de mise à jour depuis presque 30 ans pour la première citée et de la construction empirique pour la seconde.

Ainsi, les recueils retenus dans le périmètre de l'analyse Alstom sont :

66

67

68

69

- ✓ FIDES (2009)
- ✓ IEC 61709 (2017)
- ✓ SN 29500 (divers dates).
- ✓ Telcordia SR332 (2016)

70

III. METHODOLOGIE

71

Des guides tels que l'IEEE1413 ou le guide de sélection d'un recueil de fiabilité rédigé par l'IMdR donnent des points clés à vérifier pour la sélection d'une méthode de fiabilité. Mais du fait de l'expertise d'Alstom acquise au fil des années et de l'exploitation de données de ReX terrain sur plusieurs décennies, Alstom a mis en place l'approche suivante pour sélectionner et valider la méthodologie de prévision de fiabilité de ses électroniques :

75

0. Création d'un groupe d'experts FMD représentant les branches Signalisation, Infrastructure, Traction et Rolling stock

76

77

1. Analyse qualitative :

78

- a. Identification des méthodes possibles pour estimer la fiabilité électronique

79

- b. Analyse des familles et types de composants disponibles pour chaque standard/méthode

80

- c. Analyse de la définition et critères des profils de mission

81

- d. Analyse des paramètres et stresses considérés (par famille de composants)

82

2. Analyse quantitative :

83

- e. Création d'une base de comparaison IEC/TR62380 – ReX (validation du modèle IEC/TR 62380)

84

- f. Analyse comparative pour des profils de mission types

85

- g. Analyse de sensibilité de paramètres clés

86

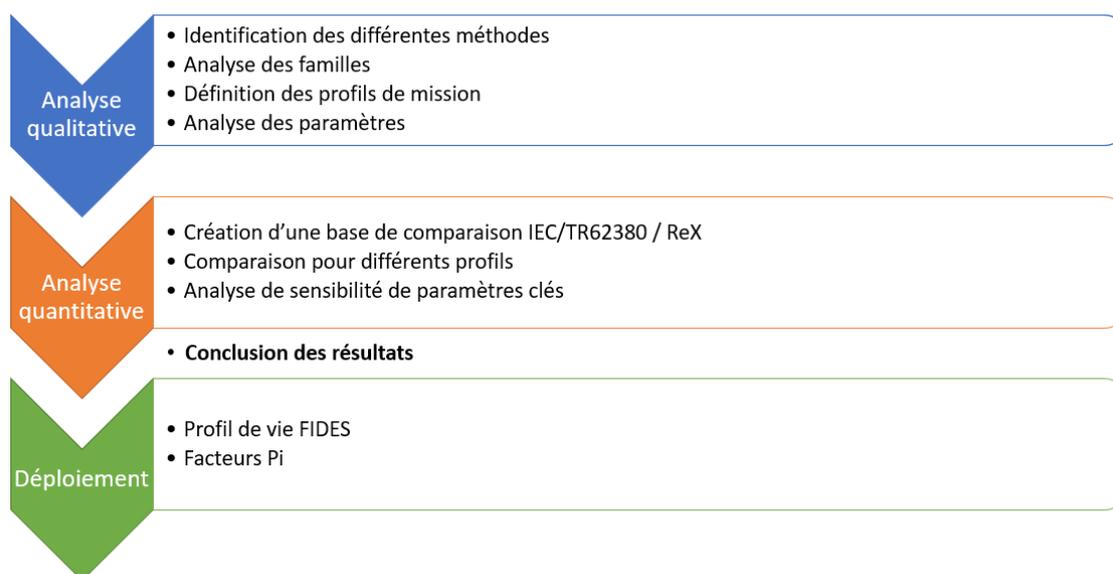
- h. Conclusion des résultats

87

3. Méthodologie pour le déploiement de la FIDES

88

Illustration de la méthodologie :



89

90

Fig. 2. Méthodologie d'analyse des méthodes de fiabilité prédictive

91

92

IV. RESULTATS

93

Pour cette analyse, l'utilisation des équipements dans le domaine ferroviaire est classée suivant 4 profils de mission créés par Alstom :

95

- **Embarqué** dans un train : Tac=50°C ; ON 20h/24 ; 1 cyclage thermique de 36°C par jour ; 1 cycle ON/OFF par jour

96

- **Salle technique** : Tac=40°C ; ON 24h/24 ; 1 cyclage thermique de 5°C par jour ; 1 cycle ON/OFF par an

97

- **Salle technique climatisée** : Tac=30°C ; ON 24h/24 ; pas de cyclage thermique ; 1 cycle ON/OFF par an

98

- **Bord de voie (guérite)** : Tac=45°C ; ON 24h/24 ; 1 cyclage thermique de 15°C par jour ; 1 cycle ON/OFF par an

99

Ces profils présentent les principales phases ON/OFF. Pour chaque utilisation (chaque projet) des phases de stockage ou des redémarrages « à chaud » peuvent être ajoutés.

100

102 Conformément à la méthodologie présentée au chapitre 3, les étapes sont présentées ci-dessous :

103 *A. Identification des méthodes possibles pour estimer la fiabilité électronique*

104 Celles-ci ont été citées au § II. Les méthodes suivantes sont retenues pour analyse :

- 105 ✓ FIDES (2009) ;
- 106 ✓ IEC 61709 (2017) ;
- 107 ✓ SN 29500 (divers dates) ;
- 108 ✓ Telcordia SR332 (2016).

109

110 *B. Analyse des familles et types de composants disponibles pour chaque standard/méthode*

111 En se basant sur les catégories définies par l'IEC 61360-4, les types de composants ne sont pas un critère différenciant car la
112 quasi-totalité des composants utilisés dans les équipements électroniques ferroviaires sont présents dans les différents standards.

113 Nous pouvons cependant noter l'absence :

- 114 - des capacités Film & Papier dans la FIDES 2009,
- 115 - des FAN dans l'IEC61709,
- 116 - des capacités Film, diode Schottky et PCB dans la Telcordia,
- 117 - des PCB dans la SN29500 (uniquement les brasures sont considérées).

118 Note : les capacités Film ont été ajoutées dans la version 2022 de la FIDES

119

120 *C. Analyse de la définition des profils de mission*

121 La définition du profil de mission est une étape majeure pour toute analyse de fiabilité. Celui-ci doit refléter/considérer au
122 plus juste les conditions réelles d'utilisation des équipements. Le même équipement utilisé dans des environnements différents
123 (voir les 4 profils présentés précédemment) aura des performances de fiabilité différentes, voire fortement différentes.

124 Par exemple un modem embarqué dans un train et un point d'accès situé en bord de voie, bien que basés sur les mêmes cartes
125 hautes fréquences et CPU, auront une fiabilité allant du simple au triple.

126 Ainsi, pour chacun des standards analysé, le tableau ci-dessous présente un comparatif de la prise en compte, ou non, des
127 paramètres considérés par Alstom comme étant représentatif du profil de mission.

128

129

TABLE I. DEFINITION DU PROFIL DE MISSION

Paramètres	IEC/TR 62380	FIDES	Telcordia	IEC 61709	SN 29500
Stress électrique	Oui	Oui	Oui	Oui	Idem IEC 61709
Ratio ON/OFF	Oui	Oui	Non	Non	Non
Température moyenne	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Qualité des composants	Non	Oui	Oui	Non	Non
Pollution	Non	Oui	Non	Non	Non
Cyclage thermique	Oui	Oui	Non	Non	Non
Vibrations	Non	Oui	Env. global	Env. global	Non
Environnement global – avec paramètres génériques	Non	Non	Oui (3 types)	Oui (3 types)	Oui
Possibilité de modéliser un profil de mission	Oui	Oui	Non	Non	Non

130 Note : La SN29500 donne des taux de défaillance pour des conditions de référence (par exemple température de jonction de
131 40°C, stress en tension de 50%). Les conversions pour d'autres stress sont réalisées via des formules basées sur l'IEC61709.

132

133 La modélisation du profil de mission (avec ses paramètres tels que température et cyclage thermique) ainsi que la
134 considération des phases non-opérationnelles représentent 2 paramètres essentiels d'une prévision de fiabilité pertinente selon
135 Alstom. Seules l'IEC/TR 62380 et la FIDES permettent de modéliser ces paramètres fondamentaux.

En plus des critères techniques (notamment datasheet et stress), la méthode FIDES propose également de considérer l'influence de la maîtrise du processus de développement sur la fiabilité ; ce facteur Pi_process sera abordé au paragraphe discussion et perspectives.

D. Analyse des paramètres et stresses considérés (par famille de composants)

Sur la base des modèles de l'IEC/TR 62380, les stresses et paramètres utilisés dans les modèles de fiabilité sont passés en revue. Les principales différences sont indiquées dans le tableau suivant :

TABLE II. MODELISATION DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES / PRINCIPALES DIFFERENCES

	IEC/TR 62380	FIDES	Telcordia	IEC 61709	SN 29500
Paramètre composant	+ Considération de du nombre de transistors + Considération de la tension d'isolement des optocoupleurs	- Pas de complexité de la puce	- Pas de boîtier		- Pas de boîtier
Paramètre générique	+ Permet d'estimer la fiabilité de la puce et celle du boîtier	+ Facteurs Pi complémentaires pour certains composants	- Pas de considération de facteur d'interface	- Pas de considération de facteur d'interface	- Pas de considération de facteur d'interface
	- Pas de notion de qualité	+ Considération de plusieurs puces dans un boîtier	+ Donne un intervalle de confiance. + Permet de considérer des résultats de test	- Besoin de maintenir une base de taux de défaillance de référence	- Pas de notion de qualité

L'IEC/TR 62380 et la FIDES sont les méthodes qui requièrent le plus de paramètres physiques sur les composants.

Les points majeurs à retenir de cette première analyse qualitative sont :

- Seules les IEC/TR 62380 et FIDES permettent de modéliser un profil de mission ;
- L'IEC 61709, la SN29500 et la Telcordia ne permettent pas de considérer des composants en interface. Dans notre retour d'expérience nous identifions que même protégés, les composants en interface sont plus souvent défaillants (car plus soumis aux perturbations électriques) ;
- Seules les IEC/TR 62380 et FIDES permettent de considérer quantitativement les cyclages thermiques ;
- L'IEC 61709 ne permet pas de déterminer seule le taux de défaillance d'un composant ou d'un équipement tel que le permettent l'IEC/TR62380, la FIDES ou la Telcordia. Il faut avoir en complément une base de données de taux de défaillance de référence ; c'est-à-dire un taux de défaillance dans les conditions de référence pour chaque type de composant ;
- La FIDES demande plus d'effort pour la modélisation.

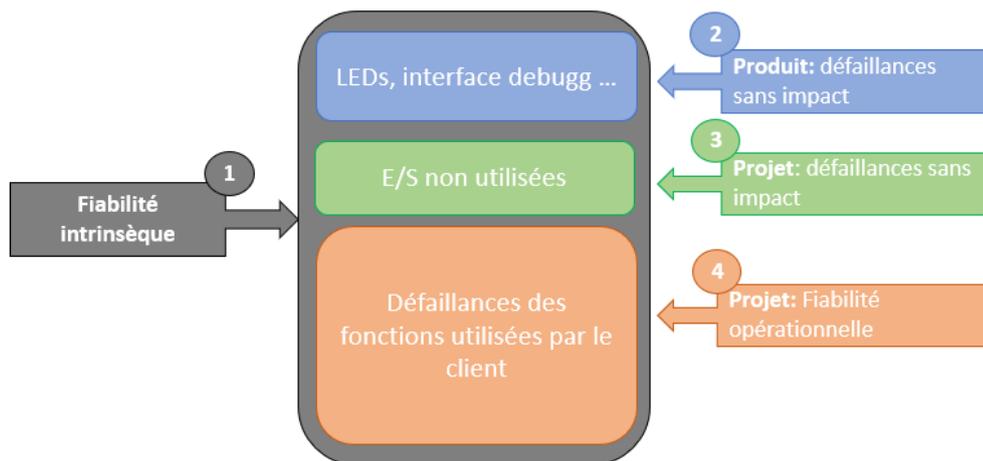
E. Création d'une base de comparaison IEC/TR 62380 – ReX

Tout d'abord le choix des équipements comparés doit s'assurer que :

- Ces équipements sont constitués de technologies largement utilisées dans les produits (module de processing, traitement FPGA, module d'entrées/sorties logiques, de bus série/Ethernet, ...) ;
- Suffisamment d'équipements sont déployés et suivis (avec par exemple plus de dix millions d'heures cumulées) ;
- Les données de retour terrain doivent être détaillées (profil de mission, analyse de la cause des défaillances).

166 Il est également important de pouvoir comparer les données de fiabilité prédictives et opérationnelles en considérant le même
167 périmètre. Les biais de comparaison prédictif / opérationnel suivants ont été supprimés :

- 168 ➤ Les calculs prédictifs donnent des chiffres de fiabilité intrinsèque (défaillances notées 1 dans la figure suivante).
169 C'est-à-dire que tous les modes de défaillances sont considérés qu'ils aient ou non un impact fonctionnel. Une
170 AMDE (Analyse de Modes de Défaillances et de leur Effet) au niveau composant électronique permet de ne
171 considérer que les défaillances ayant un effet fonctionnel direct ainsi que les défaillances « dormantes » pouvant
172 avoir un impact en cas de défaillances combinées (suppression des défaillances notées 2 dans la figure suivante).
- 173 ➤ Les défaillances observées en opération sont uniquement liées aux fonctions utilisées. L'AMDE précédemment
174 réalisée et mise à jour suivant les spécificités du projet permet d'écarter les défaillances notées 3 dans la figure
175 suivante.
- 176 ➤ Ceci nous permettant donc d'obtenir une base de comparaison pertinente et représentative en se focalisant sur les
177 défaillances notées 4 dans la figure suivante.



178 Fig. 3. Différents niveaux d'AMDE
179

180 Les données de retour d'expérience (nombre et type de défaillances, profil de mission) sont ensuite comparées aux
181 défaillances prévisionnelles notées 4 afin de s'assurer que :

- 182 1. La fiabilité opérationnelle est au niveau attendu ;
- 183 2. Le modèle de fiabilité prévisionnel est cohérent avec les données opérationnelles.

184 Un écart important entre ces deux valeurs fait l'objet d'une analyse spécifique afin d'identifier si cet écart est dû au produit, au
185 modèle prévisionnel ou à une utilisation spécifique du projet.

187 F. Analyse comparative pour des profils de mission génériques

188 Des simulations de fiabilité ont été effectuées par grandes familles de composants en se basant sur les profils précédemment
189 définis.

190 Voici des exemples de résultats sur quelques familles :

191 Ici nous comparons la fiabilité de composants discrets et intégrés suivant deux profils de mission : avec et sans cyclage thermique
192 (MP1 : température constante ; MP2 : 1 cycle thermique journalier). Ceci entre l'IEC/TR62380, la SN29500 / IEC61709 et la
193 FIDES.

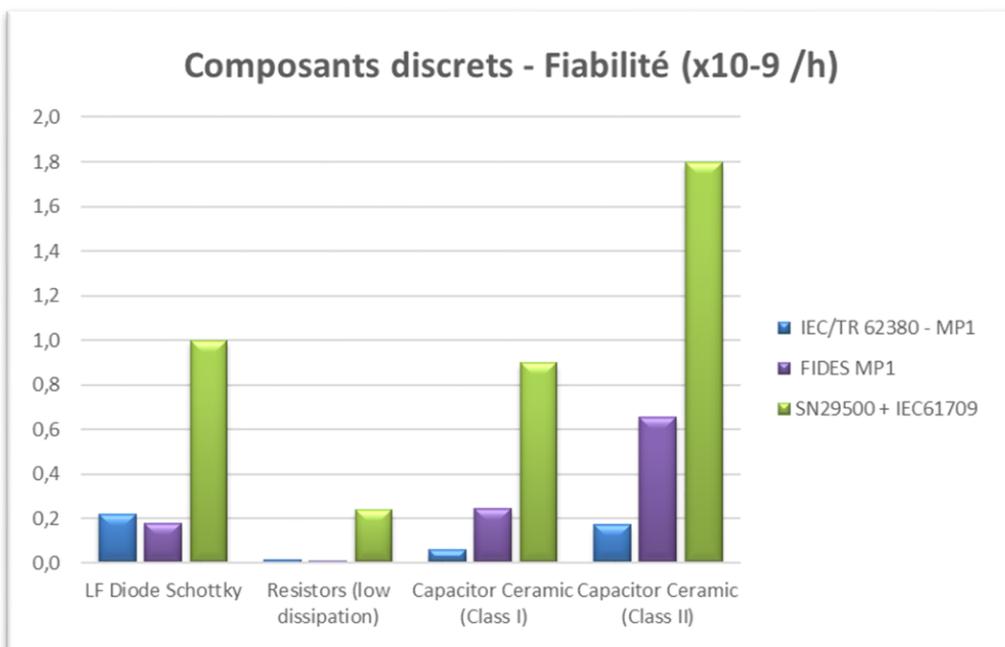


Fig. 4. Taux de défaillance – Sans cyclage thermique

194
195
196

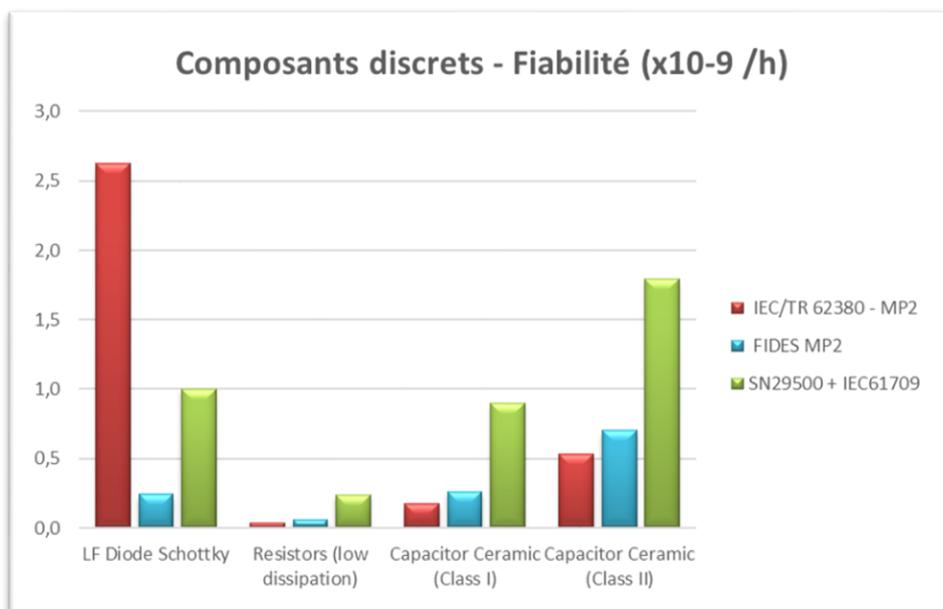


Fig. 5. Taux de défaillance – Avec cyclage thermique

197
198

Sur la base de ces exemples, nous pouvons noter que la SN29500 donne des résultats beaucoup plus conservateurs que l'IEC/TR62380 et la FIDES pour les profils de mission avec et sans cyclage thermique (jusqu'à un facteur 9) ; La FIDES et la SN29500 donnent des résultats beaucoup plus conservateurs que l'IEC/TR62380 pour les capacités céramiques quel que soit le profil de mission (facteur de 3 à 5).

203

G. Analyse de sensibilité de paramètres clés :

204
205
206

En complément des précédentes simulations par famille de composants, une 2nde analyse de sensibilité est effectuée sur différents paramètres. Voici 2 exemples sur les composants « passif » et « actif » de sensibilité à la température :

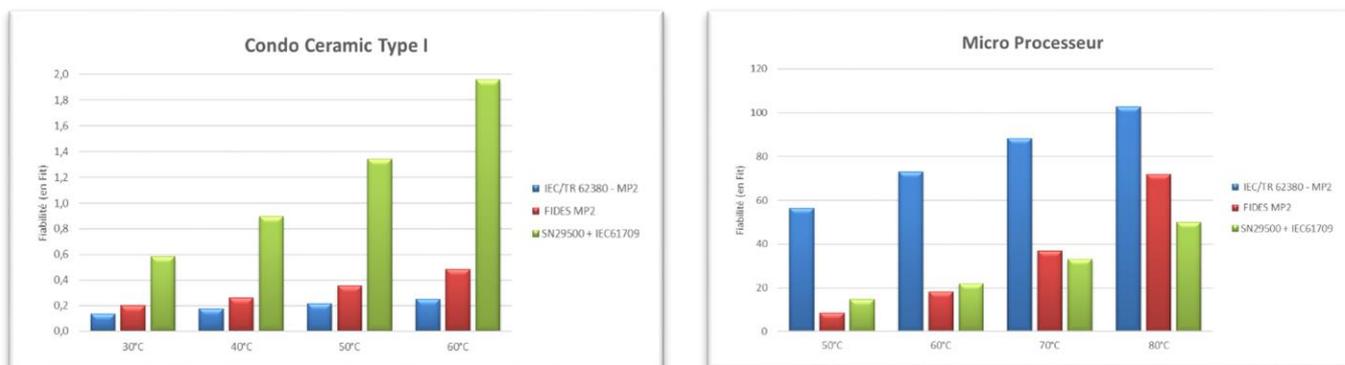


Fig. 6. Sensibilité à la température

Pour une température variant de 30°C à 60°C, il apparait pour les condensateurs céramiques que la SN29500 (et donc également l'IEC61709) est beaucoup plus sensible que la FIDES et l'IEC/TR62380 ; avec respectivement un ratio 3,3 pour la SN29500, 2,5 pour la FIDES et 1,9 pour l'IEC/TR62380.

Ce qui apparait également quand on compare les taux de défaillance entre les standards. En se basant sur l'IEC/TR62380, la FIDES passe d'un ratio $x1,5@30^{\circ}\text{C}$ à $x2 @60^{\circ}\text{C}$, tandis que la SN29500 passe d'un ratio $x4,6@30^{\circ}\text{C}$ à $x8@60^{\circ}\text{C}$.

Pour la catégorie micro-processeur (10 millions de gates), la SN29500 et la FIDES sont également plus sensibles à la température que l'IEC/TR62380. Pour des températures de jonction de 80°C, les taux de défaillance varient de 50 fits pour la SN29500 à 130 fits pour l'IEC/TR62380.

H. Conclusion des résultats :

A la vue de ces différents résultats, **Alstom a choisi d'utiliser la FIDES pour réaliser les calculs prédictifs de fiabilité.** Les points suivants ont justifié ce choix :

- Modélisation d'un **profil de mission** (spécifique pour chaque utilisation et chaque Client) ;
- Considération d'un facteur d'**interface électrique** ;
- Considération du **cyclage thermique** ainsi que les vibrations, l'humidité et l'environnement chimique ;
- Dernière mise à jour en **2023** ;
- Résultats quantitatifs globaux du même ordre que l'IEC/TR 62380 (la réparation par famille de composant est différente) ;
- Considération de la maturité du **process** de développement.

V. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Après la sélection de la méthode FIDES par Alstom, la transition de l'IEC/TR 62380 à la méthodologie FIDES a été réalisée en deux principales étapes.

1- Evaluation de **paramètres génériques** permettant de considérer d'une manière conservatrice les « facteurs Pi ». En effet les valeurs par défaut préconisées dans le guide sont trop pessimistes pour une entreprise mature en fiabilité. Cela permet également de convertir des modèles existants IEC/TR 62380 vers un modèle FIDES.

- Analyse des **profils de mission** pour ajouter les 3 nouveaux paramètres : humidité, vibration et environnement chimique ;
- Analyse des critères de **sélection des composants électroniques** et de gestion d'une « Preferred Part List » pour déterminer les critères de qualification minimaux => Evaluation d'un facteur Pi_{PM} générique par type de composant ;
- Identification des **process internes** répondant à l'audit $Pi_{process}$ puis détermination d'un facteur $Pi_{process}$ générique pour les développements internes ;
- Identification des **process de gestion fournisseur** répondant à l'audit $Pi_{process}$ puis détermination d'un facteur $Pi_{process}$ générique pour les développements externes ; Ce facteur pouvant aider les fournisseurs à se positionner en l'absence d'audit dédié.

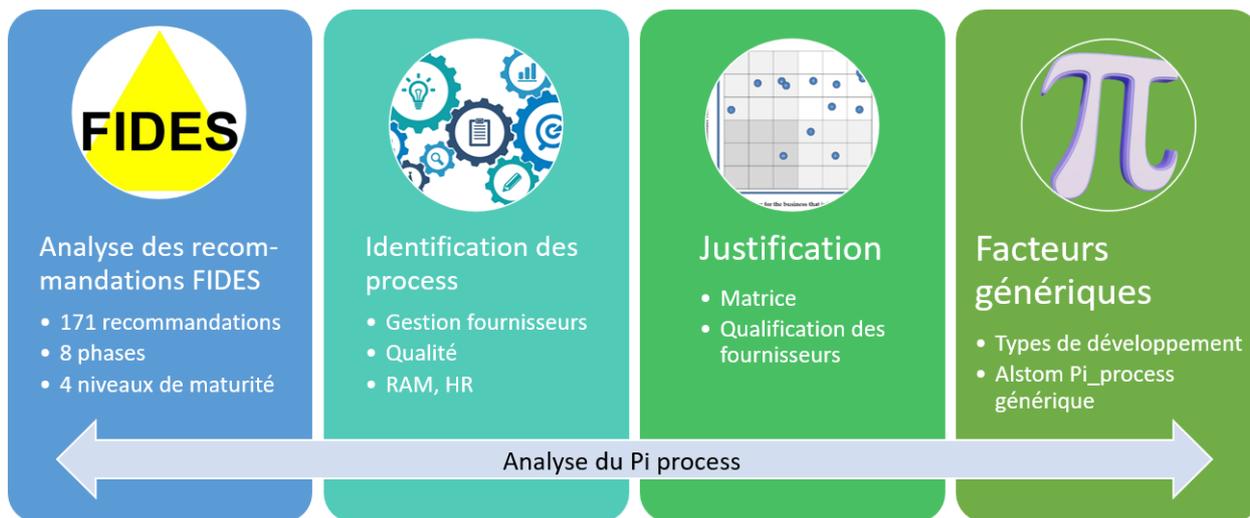


Fig. 7. Analyse générique du facteur Pi_process

- Formation des équipes FMD (Fiabilité Maintenabilité Disponibilité) aux spécificités de la méthode FIDES

2- Evaluation de **paramètres spécifiques** liés au développement du programme

- Réalisation d'audits spécifiques FIDES sur les programmes ;
- Intégration des critères Pi part manufacturing dans la gestion des composants électroniques.

VI. CONCLUSIONS

L'annulation de l'IEC/TR 62380 a été l'occasion de remettre en perspective les modélisations de fiabilité prédictives ainsi que leur bonne maîtrise.

La méthode FIDES est la seule permettant de considérer l'ensemble des stress et surtout de modéliser **différents profils de mission** afin d'adapter chaque prévision de fiabilité à l'utilisation réelle des électroniques. Cette considération étant la clé pour obtenir des données prédictives proches de la réalité opérationnelle.

Le second aspect positif est l'audit Pi_process. Celui-ci met en évidence les bonnes pratiques de l'industriel (tel qu'une démarche de « design for reliability » ou encore l'implication du métier FMD dans la gestion des fournisseurs), mais permet également d'identifier des axes d'amélioration pour la maîtrise de la fiabilité.

D'une manière plus native, les résultats prédictifs calculés avec la FIDES, tout en prenant en compte la maîtrise des processus et l'expertise Alstom, permettent d'obtenir une plus forte adéquation avec le REX Alstom que les valeurs précédemment obtenues suivant l'IEC/TR 62380.

D'autre part, une meilleure estimation de la fiabilité opérationnelle des équipements permet d'optimiser les architectures (par exemple avec l'utilisation de redondances uniquement où cela est nécessaire), et permet également d'optimiser le stock d'équipements de rechange afin d'éviter de stocker trop d'équipements.

L'amélioration de la fiabilité des équipements via l'identification et la diminution des principaux stress contributeurs ainsi que via l'identification et l'amélioration des points faibles des process (via l'audit Pi_process) permet de réduire le nombre de remplacements d'équipements, d'aller/retour vers les lieux de réparation et prélève moins de ressources naturelles car moins d'équipements seront nécessaires lors de l'exécution du projet.

En ce sens la maîtrise de la fiabilité prédictive, réalisée suivant la FIDES, contribue à la transition écologique.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'ensemble des équipes RAM au sein des différents sites Alstom pour leurs disponibilités et leurs participations actives au déploiement de la FIDES ainsi que le groupe FIDES qui a permis de répondre à de nombreuses interrogations quant à cette mise en place et son déploiement.

REFERENCES

- 282
283
284 Guide FIDES 2009 Edition A (Septembre 2010). Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques
285 IEC 61709 (2017). Composants électriques – Fiabilité – Conditions de référence pour les taux de défaillance et modèles de
286 contrainte pour la conversion
287 SN 29500 (divers dates). Siemens Norm – Failure rates of components
288 Telcordia SR332 Issue 4 (2016). Reliability Prediction procedure for electronic component
289 IMdR (2009). Guide de sélection des modèles de fiabilité prévisionnelle pour les composants électroniques
290 IEEE 1413.1 (2002). Guide for selecting and using reliability predictions based on IEEE 1413
291 292