

NRTW 2025

National Reliability Technology Workshop

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

Essais Chocs Accélérés sur équipements électroniques soumis au Tir Canon, selon NF X50-144-3

Bruno Colin (ASTE & KNDS France)

Organisé par :



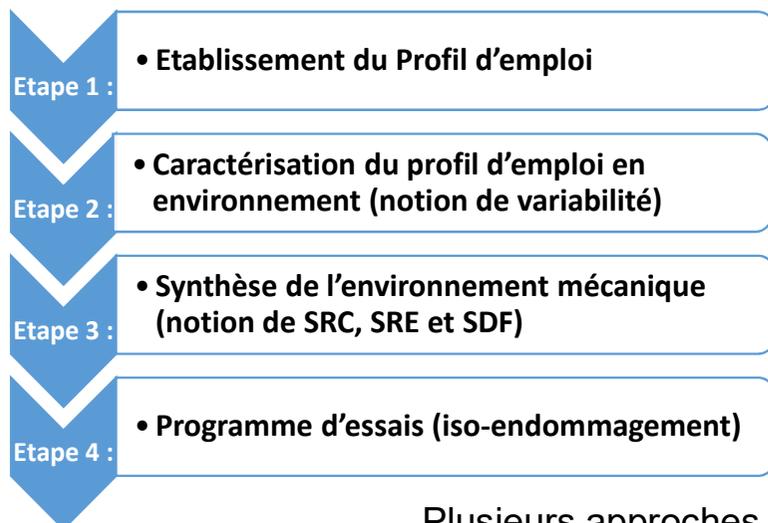
- 1. Principes de la Norme NF X50-144-3**
 - **Personnalisation des essais sur équipement COTS (électronique)**
 - **Répartition des responsabilités (Intégrateur-Equipementier)**
- 2. Contexte industriel (Revalorisation Fonction Pointage Tourelle TS90)**
 - **Profil d'Emploi Nominal (Temps de Paix) et HI (Haute Intensité)**
 - **Fiabilité en Environnement contractuelle (Approche Client DGA)**
- 3. Analyse des modes de dégradation mécanique du COTS (Equipementier)**
 - **Enjeux et Stratégies**
- 4. Analyse de l'Environnement Tir Canon de niveau Système (Intégrateur)**
 - **Application et Actualisation de la Norme NF X50-144-3 dans le domaine du Choc**
- 5. Spécification d'Essais Chocs Accélérés à iso-endommagement**
 - **Méthodologie et Difficultés associées**
- 6. Conclusions**

NF X50-144-3 (Janvier 2021)

Norme d'application volontaire destinée à définir des sévérités d'essais (vibrations et chocs) sur un équipement COTS ou non, en vue de l'intégrer sur un Système d'armes, de manière à :

- ✓ Couvrir l'environnement réel généré par le profil d'emploi du Système d'armes
- ✓ Garantir les Exigences de Fiabilité contractuelles du Client

Principe de Personnalisation des Essais (Tailoring Test)

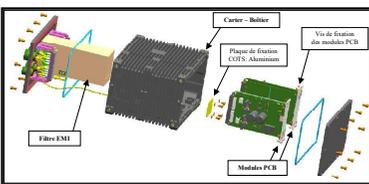
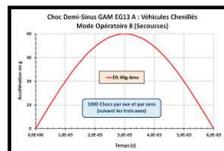
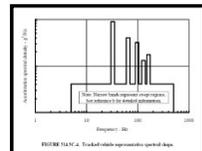
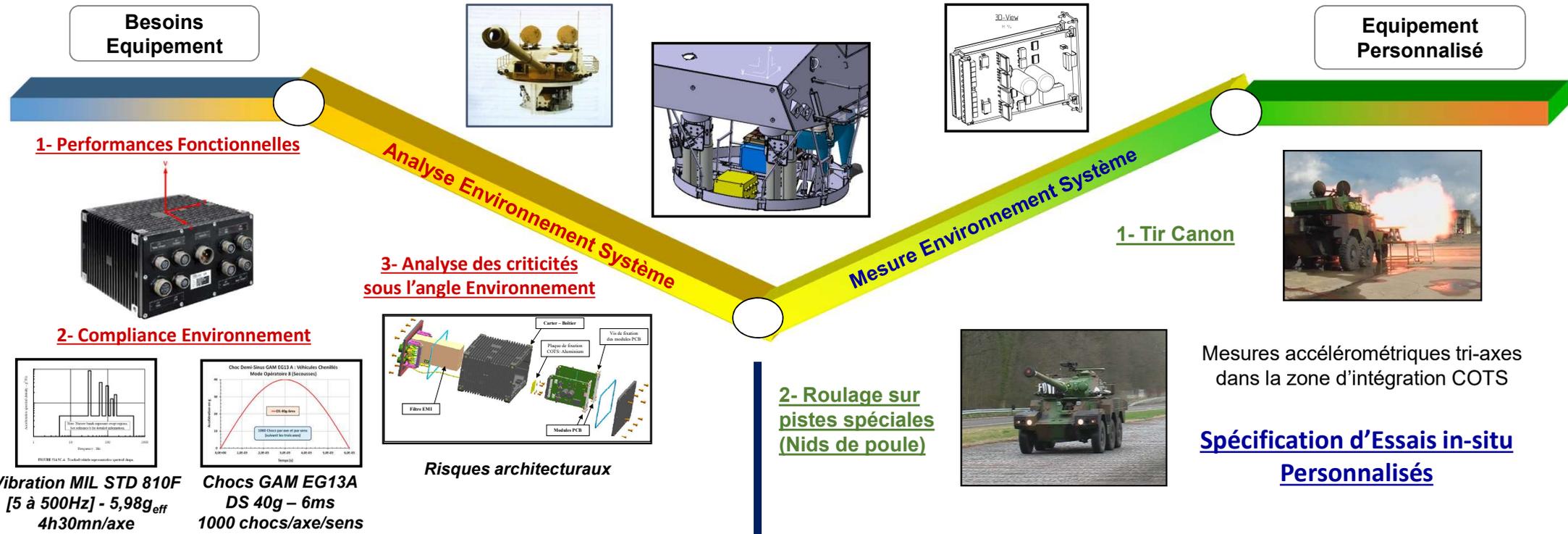


Plusieurs approches normatives possibles pour caractériser l'environnement mécanique :

- **Environnement Limite (Dirac)**
- **Environnement Probabiliste (Modèle statistique-Adéquation sur Moments statistiques)**

Processus industriel KNDS d'intégration COTS (Rénovation Systèmes d'armes)

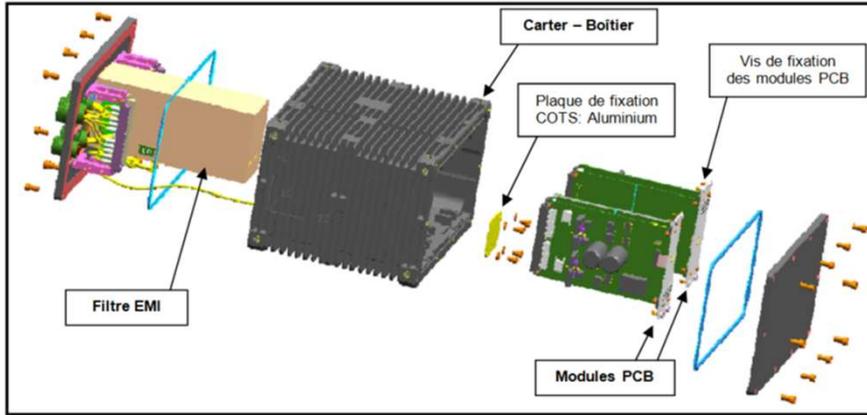
- ✓ Analyse des modes de dégradation potentiel et robustification du COTS (Equipementier)
- ✓ Analyse et caractérisation des environnements d'usage à risque (Intégrateur Systémier)



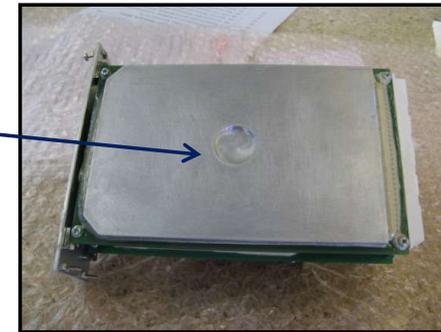
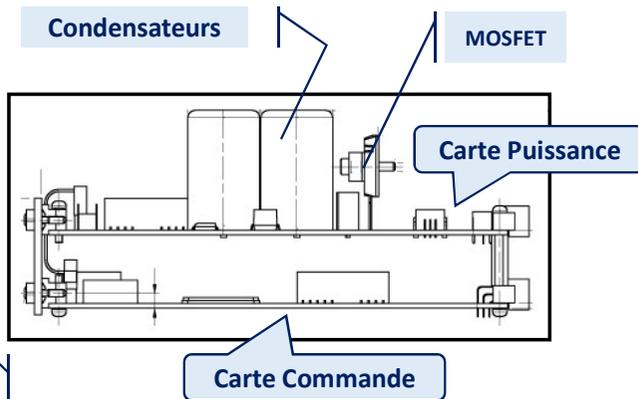
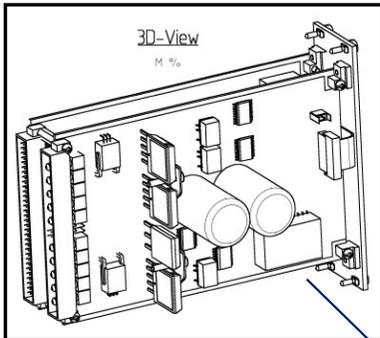
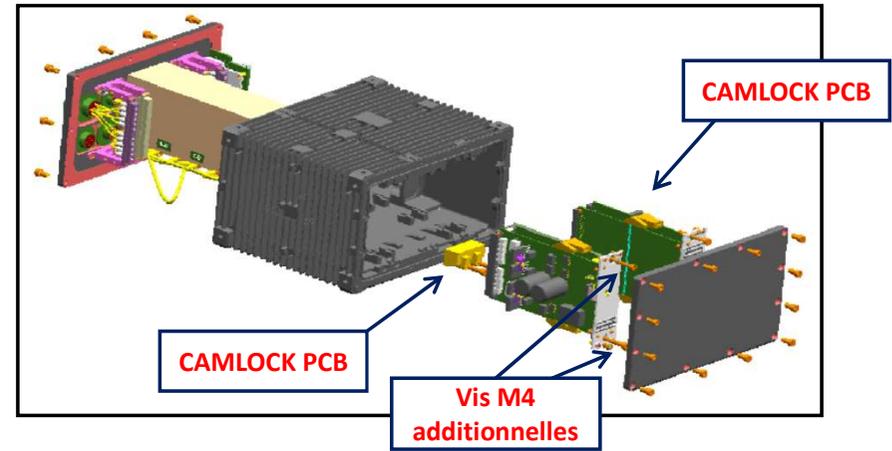
Responsabilité : Equipementier

Responsabilité : Intégrateur-Systémier

Smart Controller COTS (Inial)



Smart controller COTS (Robustifié)



COTS qualifié en vibrations et chocs : **Pertinence vs emploi opérationnel ?**

Fonction Mobilité (Temps de Paix)

Profil d'emploi Temps de Paix sur une année (selon STB n° 06 5762 SPART/DSM-CB/BM - indice 1)			Situation d'Environnement associée	
Aspect Fonctionnel des Kits de Revalorisation	Mobilité Véhicule	Durée d'utilisation en heures	Caractéristiques	Désignation
Hors Fonctionnement	GF (Ground Fixed), sol Fixe	8310	Situation de Stockage du véhicule (moteur véhicule à l'arrêt et équipements embarqués hors fonctionnement)	S1
	GM (Ground Mobile), Terrain Favorable	130	Situation de Transport Logistique du véhicule (équipements hors fonctionnement)	S2
En Fonctionnement	GF (Ground Fixed)	220	Situation de Veille du véhicule (moteur véhicule au ralenti nominal et équipements embarqués en fonctionnement)	S3
	GM (Ground Mobile), Terrain Favorable	84	Situation de roulage (Route et/ou Tout Chemin) avec équipements embarqués en fonctionnement	S4
	GM (Ground Mobile), Terrain Défavorable	16	Situation de roulage (Tout Terrain) avec équipements embarqués en fonctionnement	S5

Durée de vie des Kits de Revalorisation, intégrés sur la Tourelle T90 : 20 ans



Les mesures in situ en roulage sur pistes spéciales montrent clairement qu'elles sont **couvertes par le Plan de Qualification du COTS**.
(MIL STD 810F – Vibrations Bruit sur bruit – Method 514.5, Cat 20, Figure 514.5 C-4)

Seul le Tir Canon est dimensionnant
(Personnalisation des Essais Chocs nécessaire)

Fonction Feu (Temps de Paix et Haute Intensité)

Profil d'emploi Temps de Paix sur une année (selon STB n° 06 5762 SPART/DSM-CB/BM - indice 1)			Durée de vie (année)	Situation d'Environnement associée		
Aspect Fonctionnel des Kits de Revalorisation	Mobilité Véhicule	Occurrence		Caractéristiques	Désignation	Nombre de tirs global
En Fonctionnement	GF (Ground Fixed)	40 coups	20	Situation de Tir (munitions de 90mm de type Obus Charge Creuse, Obus Explosif et/ou Obus Flèche)	S6	800

Profil d'emploi HI (RETEX UKRAINIEN) sur un mois			Durée d'emploi (année)	Situation d'Environnement associée		
Aspect Fonctionnel des Kits de Revalorisation	Mobilité Véhicule	Occurrence		Caractéristiques	Désignation	Nombre de tirs global
En Fonctionnement	GF (Ground Fixed)	100 coups	4	Situation de Tir (munitions de 90mm de type Obus Charge Creuse, Obus Explosif et/ou Obus Flèche)	S6	4800



La sévérité de Choc du Plan de Qualification du COTS n'est pas suffisante pour couvrir les risques de rupture des composants électroniques soumis aux effets pyrotechniques du Tir Canon

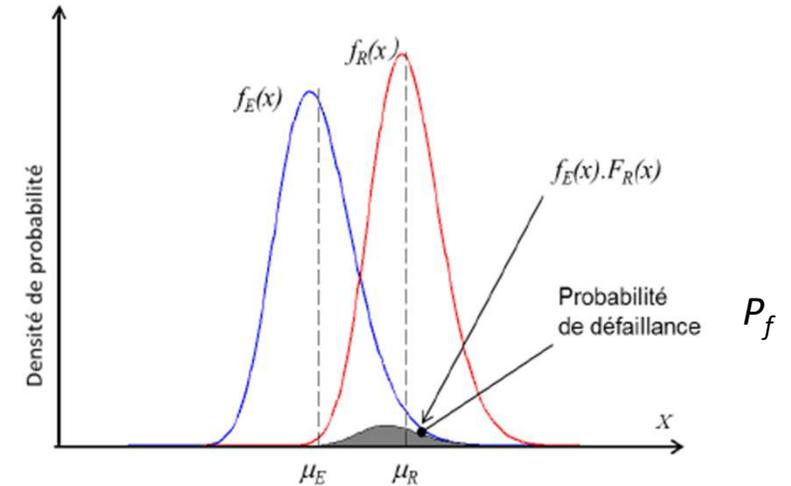
NF X 50-144-3 (Environnement Limite)

Tableau 3 – Choix du niveau de risque associé à une STI

Risque de dépassement accepté en fonction de la criticité de l'Équipement		
Nature des Équipements concernés	Criticité de l'Équipement	Risque de dépassement α retenu
Équipements Standards	Faible (Équipement dont la Fonction Technique est non prioritaire)	10 %
Équipements Critiques	Moyen (Équipement dont la Fonction Technique est prioritaire)	1 %
Équipements Sécuritaires	Fort (Équipement dont la Fonction Technique est en liaison avec la sécurité des biens et des personnes)	0,1 %

$f_E(x)$: DIRAC

NF X 50-144-5 (Approche C-R)



NF X 50-144-3 (Environnement Probabilisé)

$f_E(x)$: Loi de probabilité de type KAPPA (loi à 4 paramètres) *

- Adéquation des 4 paramètres par la Technique des L-moments (L-location, L-scale, L-skewness et L-kurtosis)
- Projection du modèle statistique d'un seul tir sur un processus séquentiel de N tirs indépendants (Approche TVE et TCL)

Tableau 1 — Niveaux de probabilité

Classe de probabilité	Description	Valeur quantitative
Fréquent	Susceptible de se produire fréquemment dans le profil de vie	$P_f \geq 10^{-1}$
Probable	Susceptible de se produire plusieurs fois dans le profil de vie	$10^{-2} \leq P_f < 10^{-1}$
Occasionnel	Susceptible de se produire quelques fois dans le profil de vie	$10^{-3} \leq P_f < 10^{-2}$
Très rare	Peu probable, mais susceptible de se produire dans le profil de vie	$10^{-4} \leq P_f < 10^{-3}$
Improbable	Si peu probable qu'il peut être supposé que cela ne se produira pas pendant la vie du système	$P_f < 10^{-6}$

(*) B. Colin, Maintenance prévisionnelle des équipements critiques, embarqués sur systèmes d'armes terrestres, Journées COFREND 2023, Parc Chanot Marseille du 6 au 8 Juin 2023.

Enjeux

Responsabiliser l'équipementier sur la connaissance des modes de dégradation inhérents au concept d'architecture électronique de sa fourniture, **avant contractualisation**.

- ✓ Analyse des sensibilités mécaniques des composants électroniques montés sur carte de Puissance
- ✓ Analyse des modes propres des cartes de Puissance et de Commande rigidifiées par plaques Alu

Stratégie

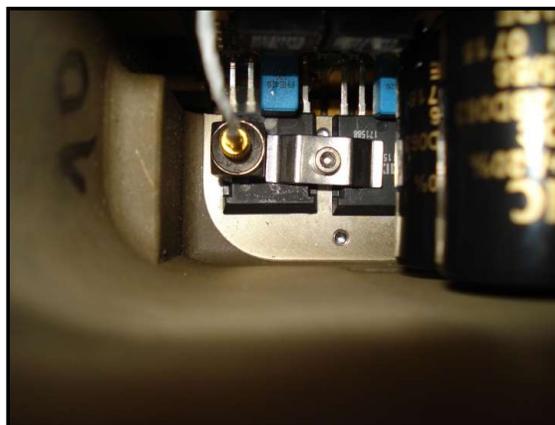
Réalisation d'essais sinus balayés bas niveau suivant les trois axes

- ✓ Essais Sinus 1g constant à 1 Octave/mn dans la bande [10Hz à 1KHz]

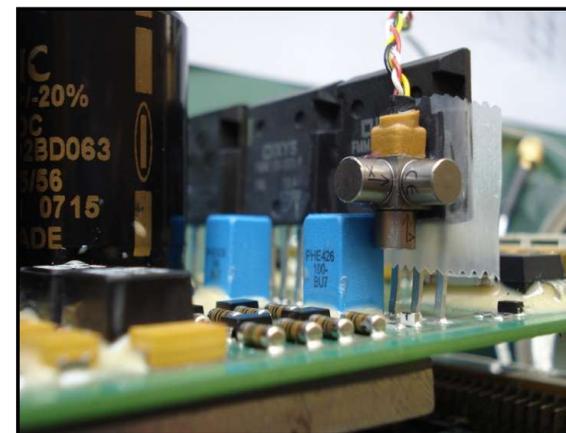
Capteur tri-axes sur cartes PCB



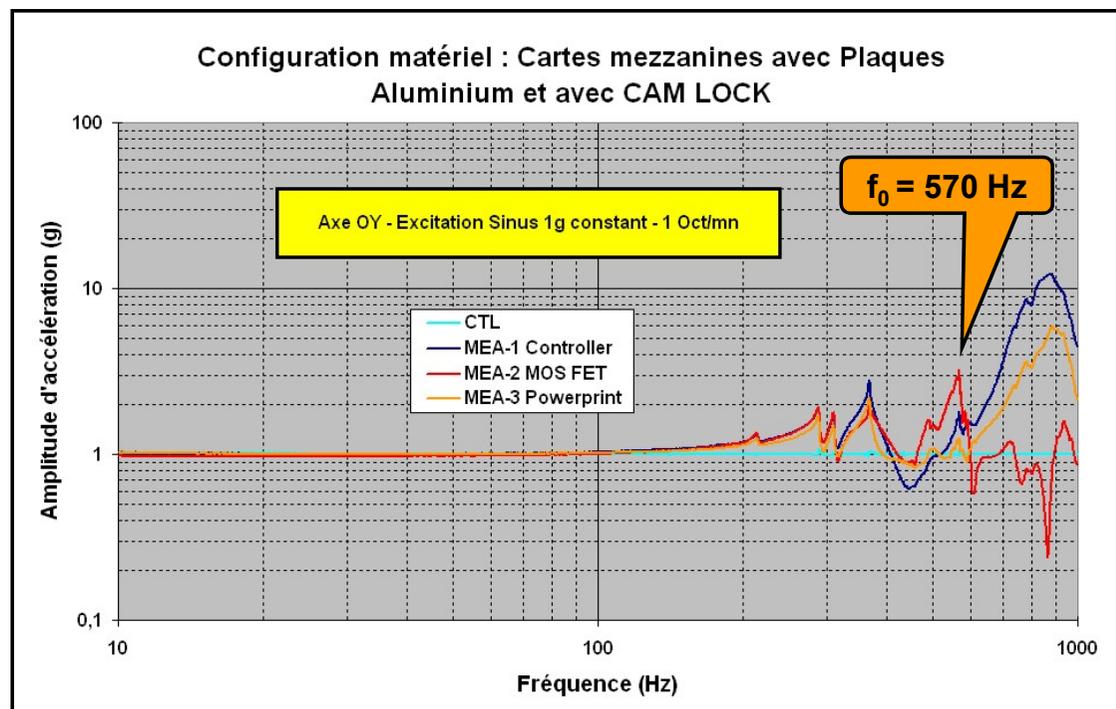
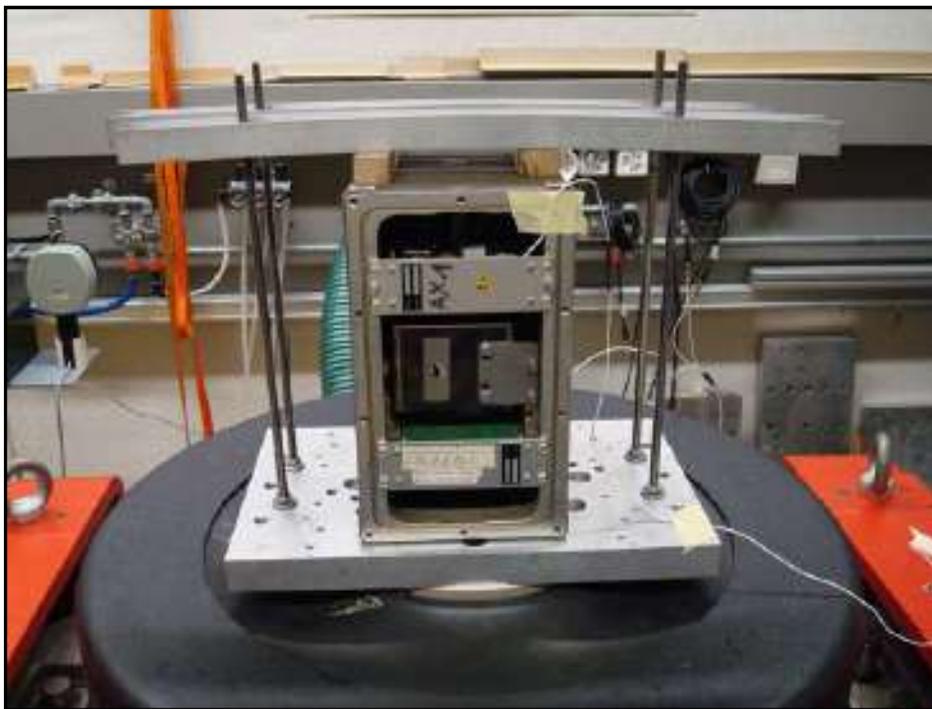
Capteur mono-axial sur MOSFET in Housing



Capteur tri-axes sur MOSFET



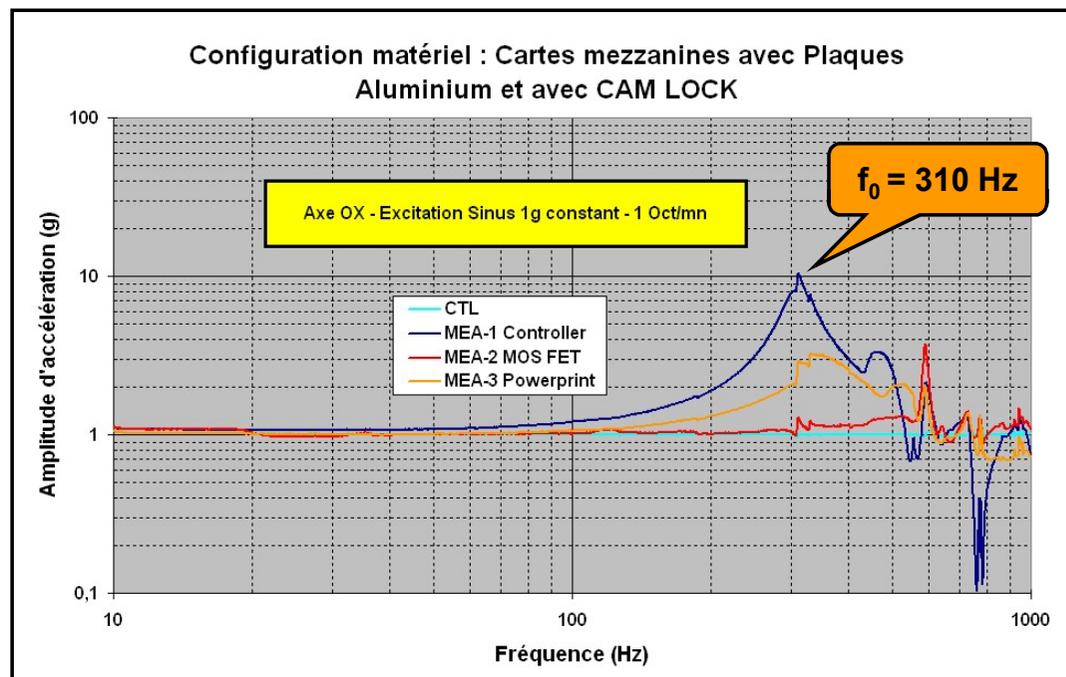
Sensibilité mécanique (Axe OX Tourelle)



Pour l'axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon), la sensibilité mécanique du Boîtier Electronique de Pointage de la Tourelle TS90 se situe à la fréquence de 570Hz (Q=3,2)

- ✓ Elle correspond à la flexion transverse des composants MOSFET, intégrés sur carte Puissance
- ✓ Risque de fissuration au niveau des pattes de connexion soudées des MOSFET sur PCB

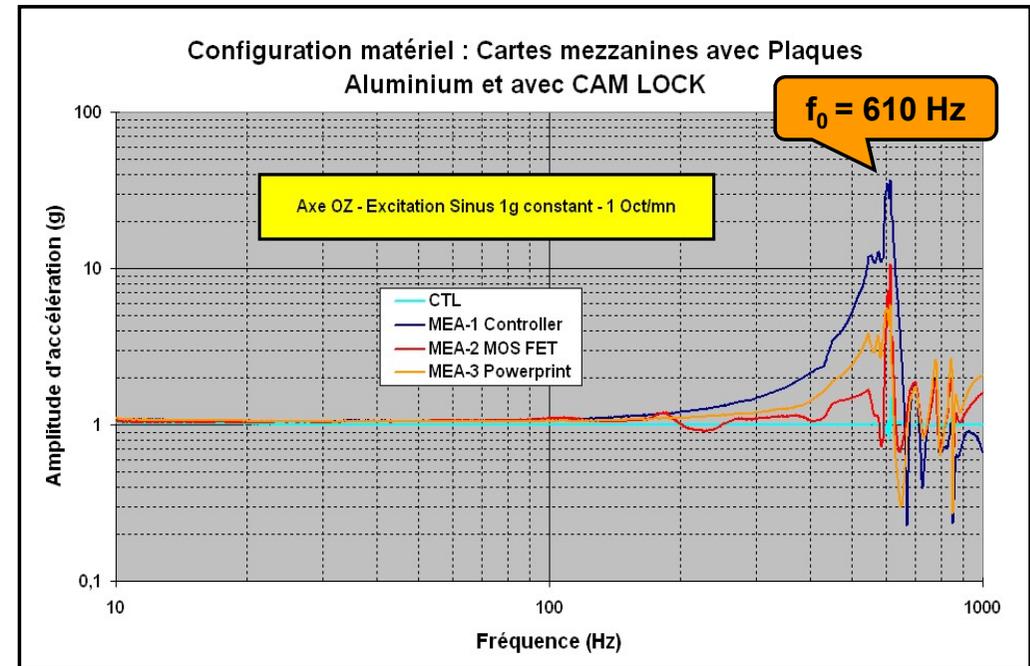
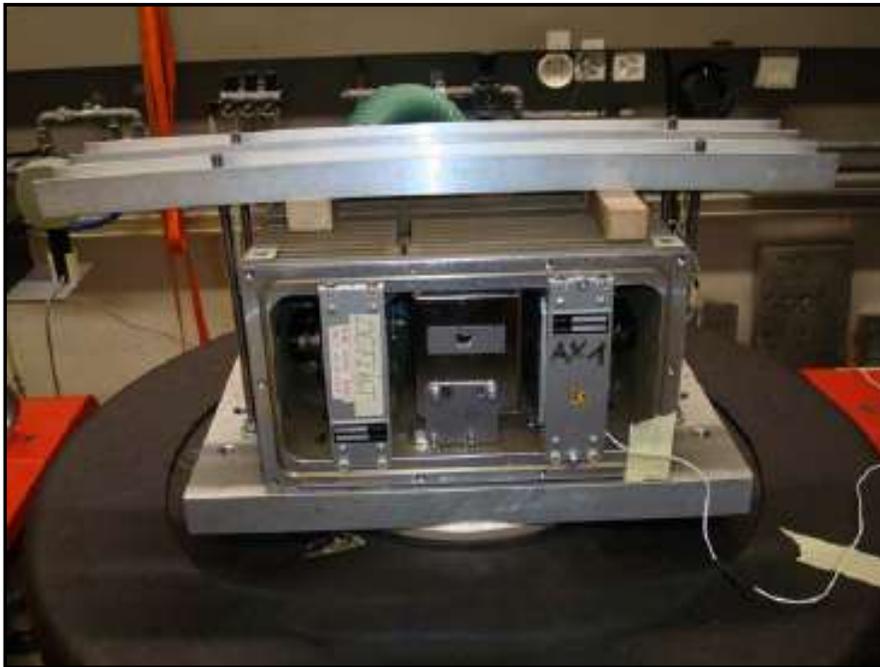
Sensibilité mécanique (Axe OY Tourelle)



Pour l'axe Transversal OY Tourelle, la sensibilité mécanique du Boîtier Electronique de Pointage de la Tourelle TS90 se situe à la fréquence de 570Hz (Q=12)

- ✓ Elle correspond à la flexion verticale de la carte PCB de Commande
- ✓ Risque d'usure prématurée au niveau des pins de connexion des 2 cartes Commande (Site et Gisement)

Sensibilité mécanique (Axe OZ Tourelle)



Pour l'axe Vertical OZ Tourelle, la sensibilité mécanique du Boîtier Electronique de Pointage de la Tourelle TS90 se situe à la fréquence de 610Hz (Q=10 pour MOSFET et Q=38 pour cartes PCB)

- ✓ Elle correspond à la flexion couplée des cartes PCB de Commande et de Puissance du montage mezzanine (site ou gisement), entraînant une flexion des composants MOSFET et Condensateurs
- ✓ Risque de fissuration au niveau des composants électroniques intégrés sur l'ensemble des smart modules (notamment au niveau des condensateurs)

Analyse de l'environnement Choc Tir Canon (modélisation en terme de processus aléatoire séquentiel)

L'analyse du caractère stochastique du Tir Canon nécessite un Plan d'Essais Système et une analyse statistique spécifique (**PLEXP** et MBD*** avec randomisation des mesures chocs nécessaire**).

- ✓ Variabilité due au type de munitions (BOFL et BSCC)
- ✓ Variabilité due au pointage de l'arme (en site et gisement)



**Gisement : 12 heures
et Site 0°**



**Gisement : 3 heures
et Site 0°**



**Rampe montante et/ou
descendante pour Site -8° et +15°**

(**) AFNOR, FD X 06-081 du 14 Juin 2017, Plans d'expériences — Mise en œuvre des plans d'expériences par essai ou par simulation numérique : choix et exemples d'application.

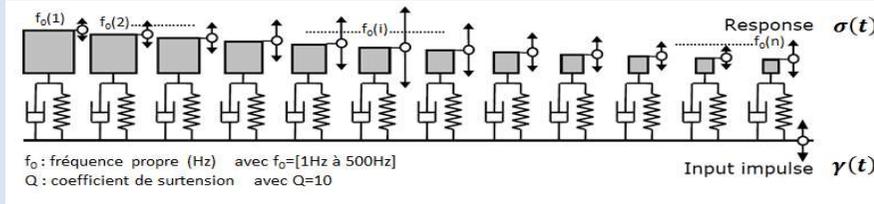
(***) B.Colin, Actualisation de la méthode MBD pour l'analyse statistique des vibrations et des chocs, ASTELAB 2024, INSA Rouen, 25 et 26 Juin 2024

Analyse de l'environnement Choc Tir Canon (Caractérisation en SRC & SDF)

Approche déterministe de l'environnement choc tir canon en terme de contraintes extrêmes (SRC) et d'endommagement par fatigue (SDF) selon NF X50-144-3

Approche SRC

Modélisation conceptuelle d'un équipement dont on ne connaît pas la définition (équipement fournisseur).



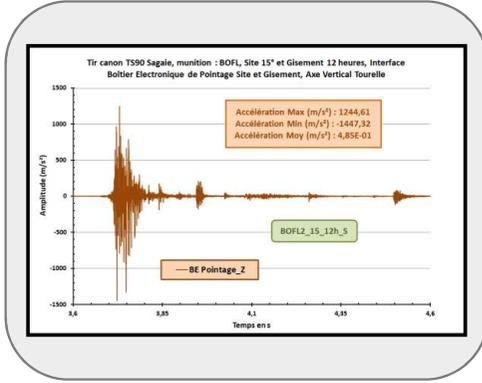
Avantage (1) : le niveau de réponse en contrainte $\sigma(t)$ pour chaque système étalon (f_0, Q) est **facilement calculable** car il ne dépend que de l'excitation temporelle $\gamma(t)$

Avantage (2) : l'endommagement par fatigue subi par l'équipement est **maîtrisable simplement** en se donnant la pente de **Wöhler b** des organes sensibles de l'équipement ($b=4$ pour un équipement électronique)

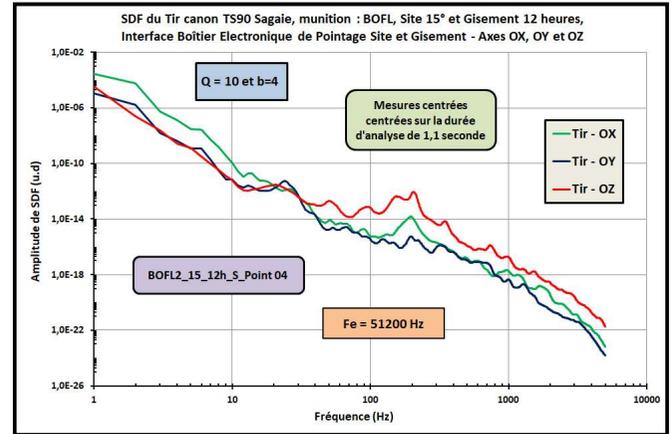
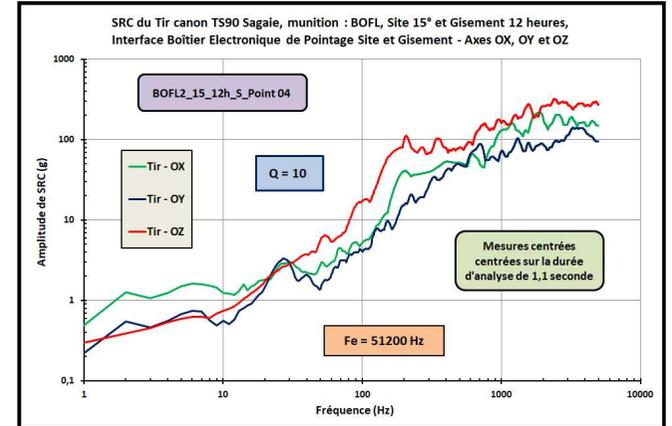


Approche MDOF

Approche SDF



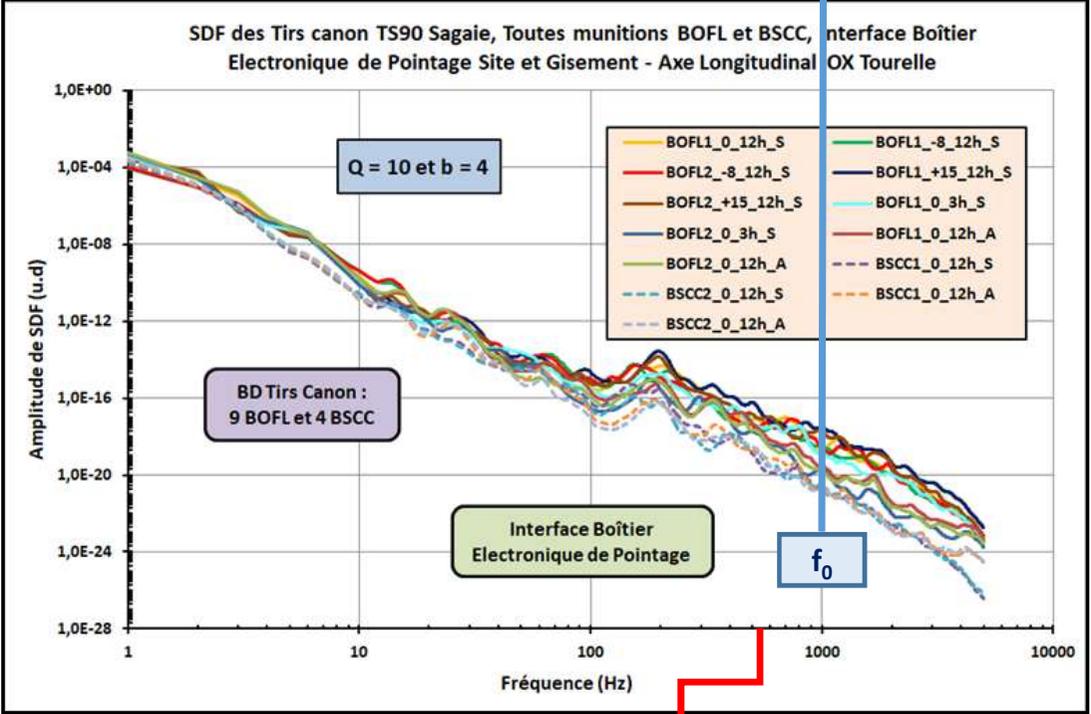
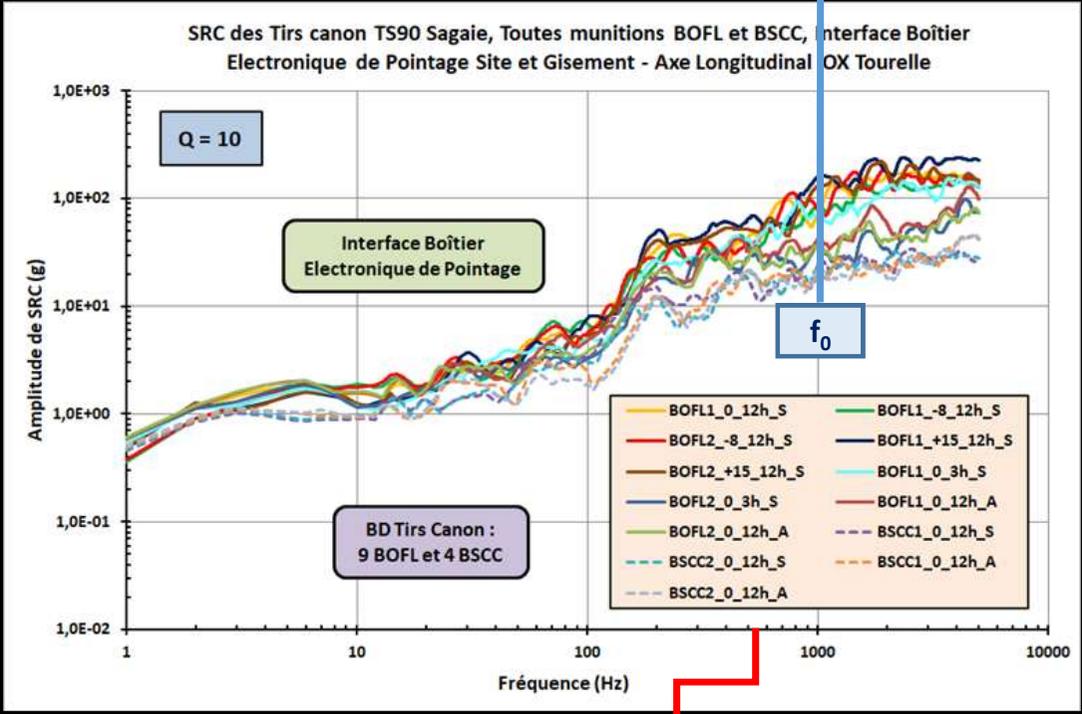
Approche déterministe



4 – Analyse de l'Environnement Tir canon (Variabilité des Tirs Canon – Axe OX Tourelle)

Modélisation probabiliste nécessaire en SRE

Modélisation probabiliste nécessaire en SDF



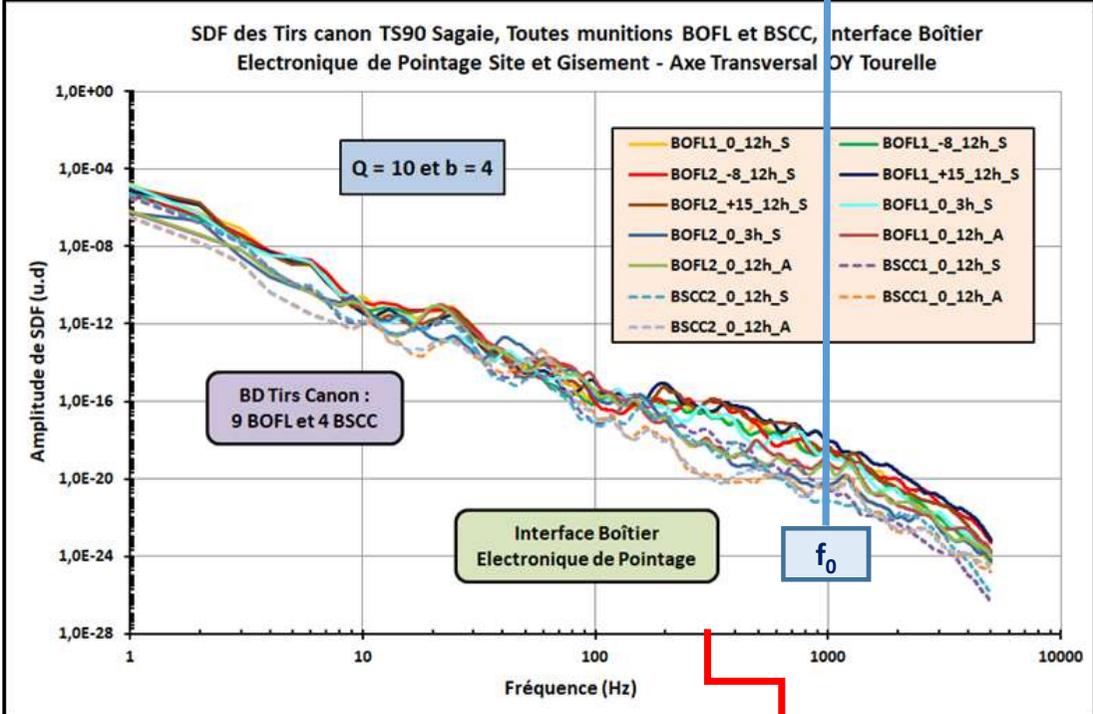
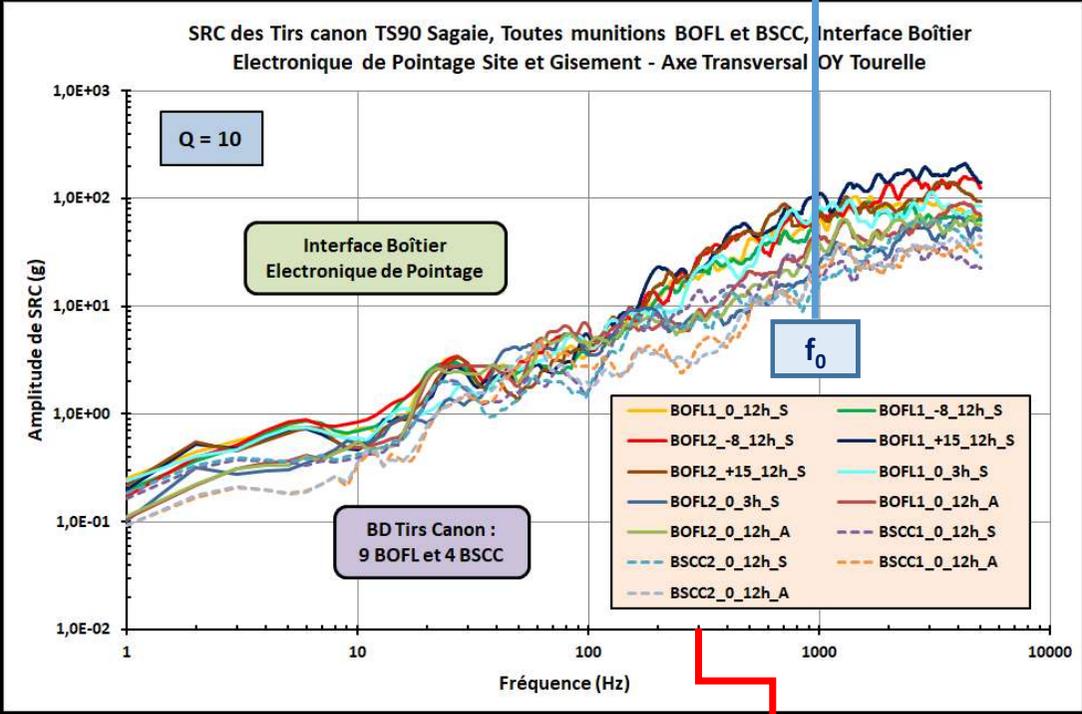
Sensibilité COTS : $f_0 > 570\text{Hz}$

Sensibilité COTS : $f_0 > 570\text{Hz}$

4 – Analyse de l'Environnement Tir canon (Variabilité des Tirs Canon – Axe OY Tourelle)

Modélisation probabiliste nécessaire en SRE

Modélisation probabiliste nécessaire en SDF



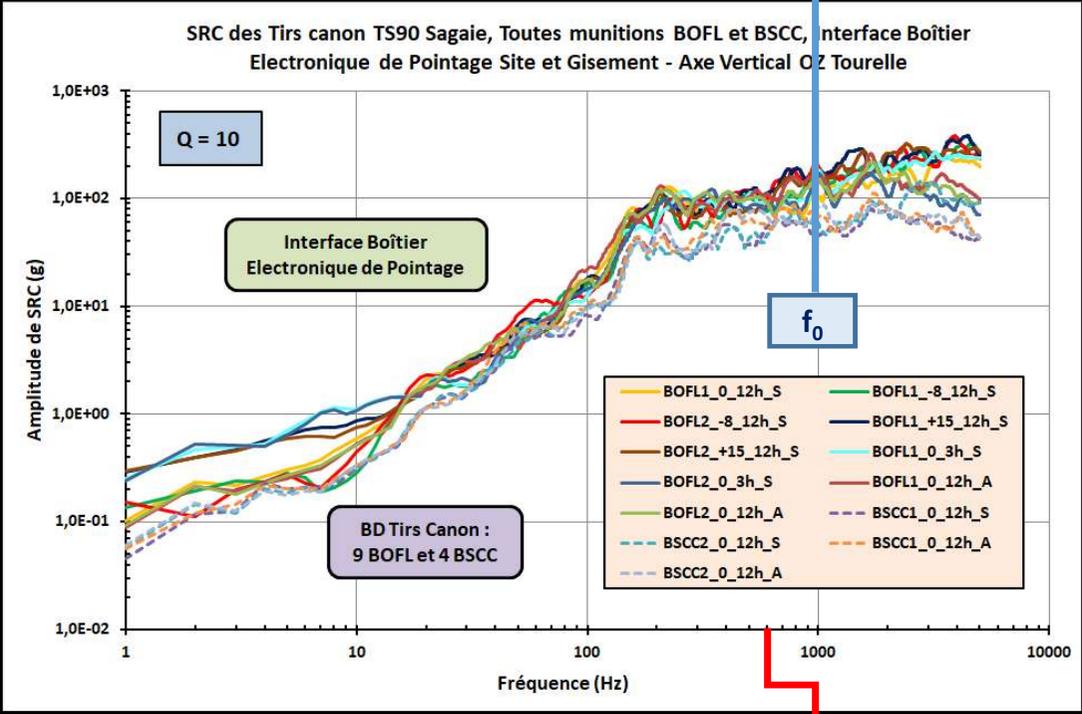
Sensibilité COTS : $f_0 > 310\text{Hz}$

Sensibilité COTS : $f_0 > 310\text{Hz}$

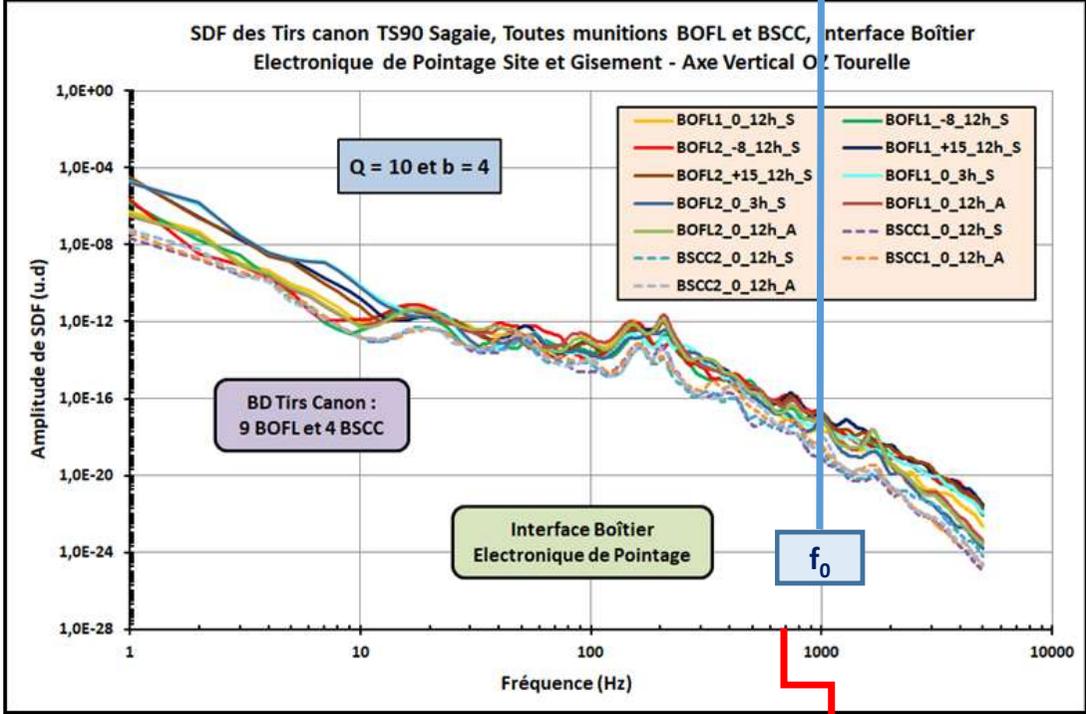
4 – Analyse de l'Environnement Tir canon (Variabilité des Tirs Canon – Axe OZ Tourelle)

Modélisation probabiliste nécessaire en SRE

Modélisation probabiliste nécessaire en SDF



Sensibilité COTS : $f_0 > 610\text{Hz}$



Sensibilité COTS : $f_0 > 610\text{Hz}$

Analyse de l'environnement Choc Tir Canon (caractérisation temporelle et SRC)

Approches historiques : Non prise en compte du caractère stochastique du processus aléatoire séquentiel du Tir Canon et Non prise en compte de l'exigence de Fiabilité Client (**Dimensionnement et Qualification à risque**)

Caractérisation temporelle des Chocs Tir Canon TS90 sur équipement COTS (Boîtier de pointage Curtiss-Wright) pour l'ensemble de la BD Tir Canon					
Approche temporelle (Fe = 51,2 KHz) et Bande Passante des mesures réglée à 5KHz		Unité	Axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon)	Axe Transversal OY Tourelle	Axe Vertical OZ Tourelle
		Max (g)	141	67	129
		Min (g)	-79	-70	-148
Caractérisation en SRC des Chocs Tir Canon TS90 sur équipement COTS pour l'ensemble de la BD Tir Canon, sans marge CG & FE					
Environnement Limite - f ₀ = [1Hz à 5KHz] (ACTU : Actuelle et HIST : Historique)		Unité	Axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon)	Axe Transversal OY Tourelle	Axe Vertical OZ Tourelle
HIST	Approche Enveloppe (MAX)	g	241	211	385
HIST	Approche forfaitaire (MOY+3.ET)	g	323	240	528



Temporels simulables sans restriction sur pot vibrant



Chocs formés à iso-SRC simulables sans restriction sur pot vibrant

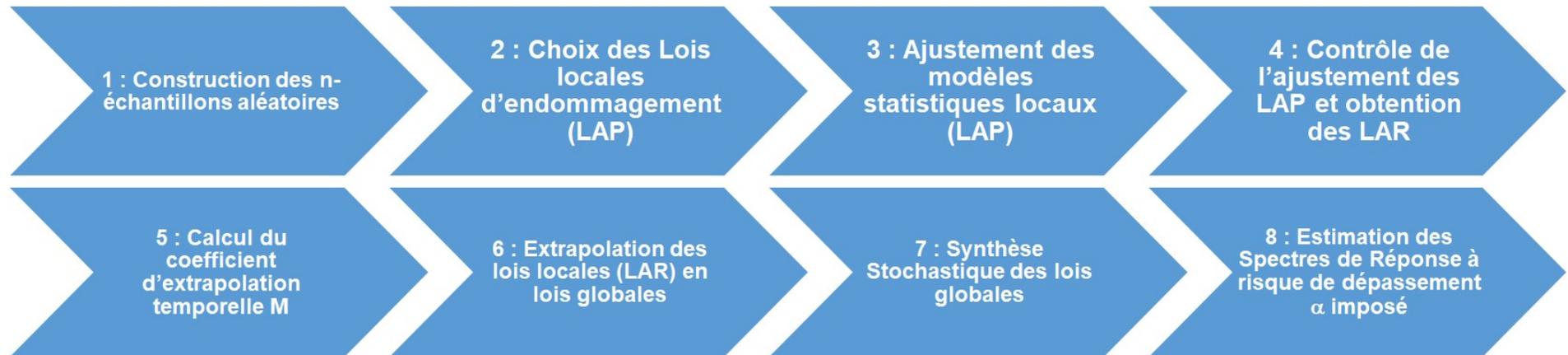


Les transitoires de tirs canon TS90 **sont simulables sur pot vibrant** pour le COST **sans restriction** suivant les trois axes Tourelle, **pour autant que l'on dispose d'un moyen à hautes performances (Unholtz-Dickie T2000-64HS : Shock - 600g)**

Méthode « MBD » : Processus de traitement statistique des variables aléatoires SRC-SDF au sens local, puis au sens global en 8 Etapes, pour les N (N=1 à 5000 dans le cas présent) systèmes étalon à 1ddl (f_0 , Q).

Etapes 1 à 4 : Traitement statistique au sens local (inférence statistique par L-Moments)

Etapes 5 à 6 : Traitement statistique au sens global (extrapolation par TVE pour SRC et par TCL pour SDF)

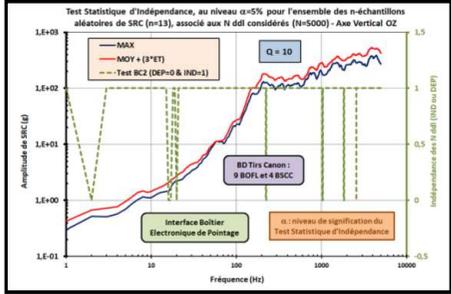


Points clés à satisfaire pour utiliser la MBD dans le cas de l'analyse des chocs :

- Etape 1 : Randomisation des mesures de chocs (**critère statistique d'indépendance à satisfaire sur les SRC et SDF**)
- Etapes 2 et 3 : Ajustement paramétrique des données (SRC et SDF) sur loi LAP de type **KAPPA à 4 paramètres**
- Etape 4 : Contrôle de l'ajustement des LAP par calcul du **critère d'erreur de modélisation statistique (MSDI, MADI ou NAE)**
- Etape 5 : Prise en compte du profil d'emploi Tir canon pour estimer M (**Nombre de tirs par classe de chocs**)
- Etape 6 : Extrapolation selon approche Asymptotique ou Non (**critère de convergence statistique**)

(****) MBD (Méthode des Blocs Disjoints) : Développée entre 2007-2015 par l'auteur pour couvrir les besoins HUMS dans le cadre des défaillances fonctionnelles des équipements électroniques, puis introduite dans le référentiel normatif AFNOR NF X50-144 entre 2014 - 2021

4 – Analyse de l'Environnement Tir canon (Critères statistiques associée à la MBD Actualisée)



La modélisation statistique des SDF en loi KAPPA est rendue nécessaire dans le cas des n-échantillons non indépendant et non convergent asymptotiquement

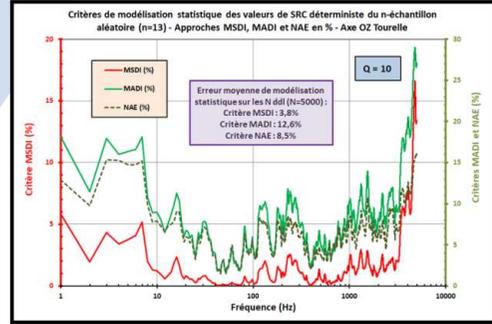
Extrapolation de la loi KAPPA en SDF en fonction du critère de convergence de normalité de la loi KAPPA

MBD Chocs

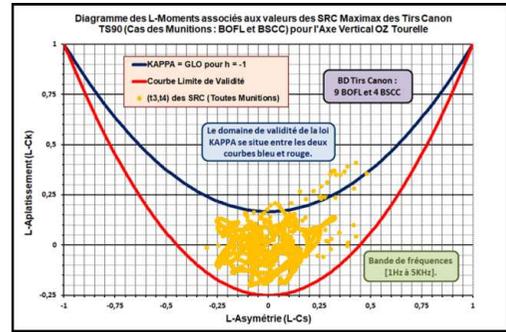
Extrapolation de la loi KAPPA en SRC en fonction de la nature de sa Zone d'attraction en Valeurs Extrêmes

Loi KAPPA est éligible à la TVE car sa ZA des VE est pilotée directement par son facteur de forme (voir Article COFREND (*))

Contrôle de l'ajustement statistique des N modèles statistiques loi KAPPA (SRC-SDF)

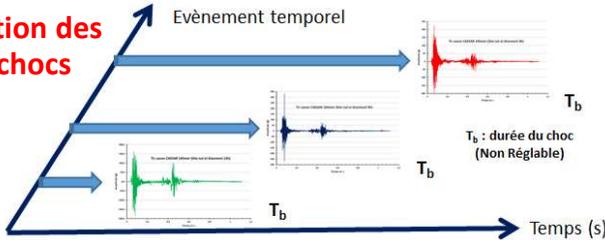


Projection des N modèles statistiques loi KAPPA dans diagramme L-moments (SRC-SDF)



MBD (Vibrations)

Randomisation des mesures chocs



Environnement Limite à 1% selon approche MBD

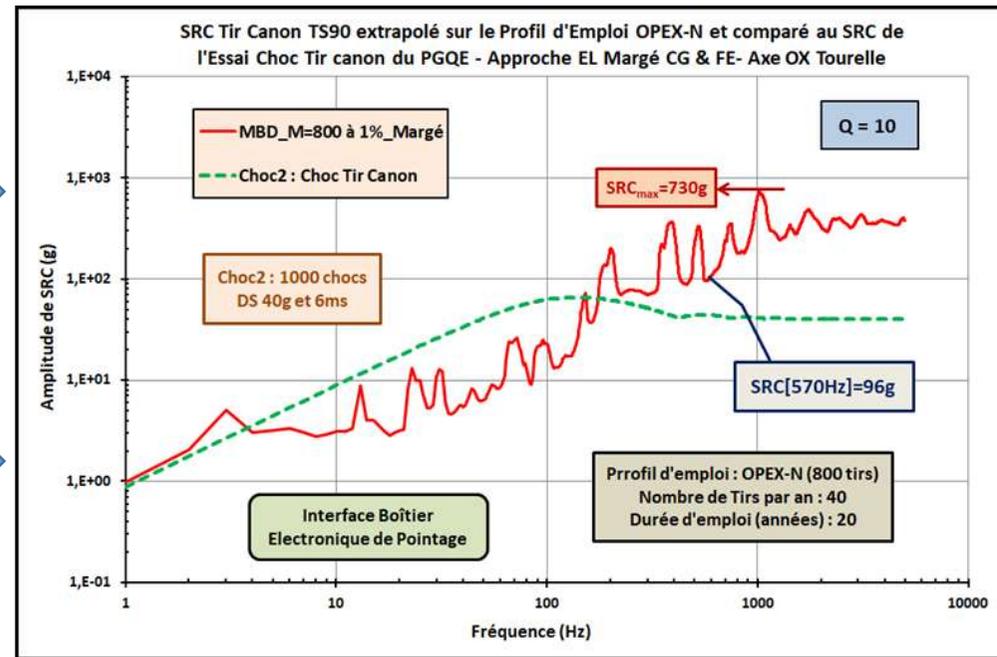
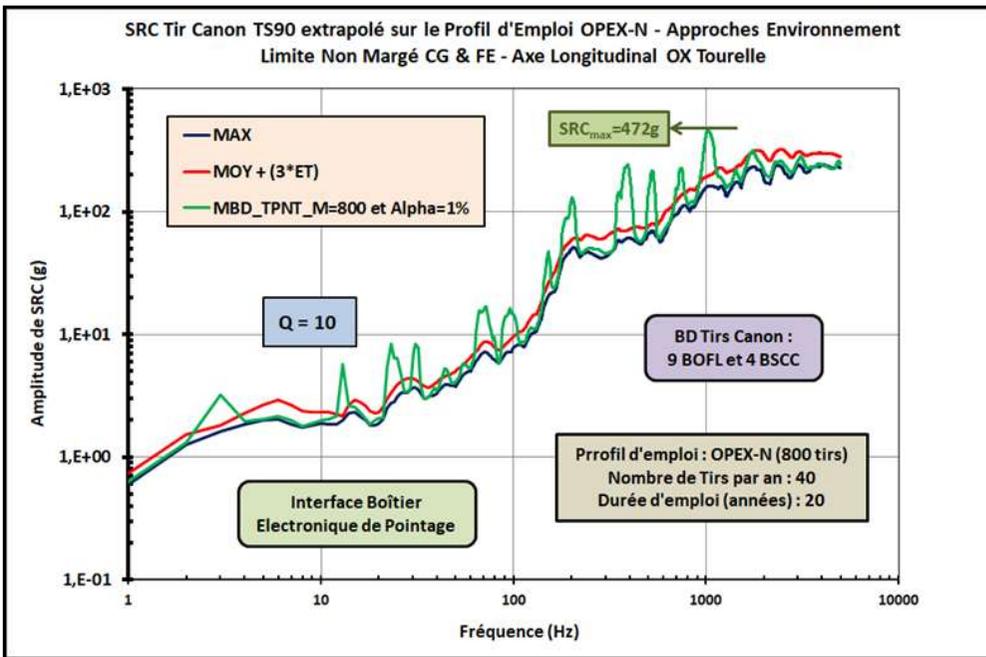
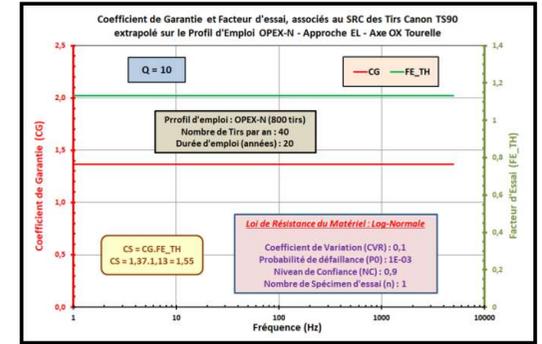
Modélisation statistique des SRC, puis projection sur PE-N (800 tirs canon)

- ✓ Prise en compte du CG (Norme NF X50-144-5)
- ✓ Prise en compte du FE (Norme NF X50-144-6)



CS en SRC = 1,55

Nota : Le CG permet de garantir la Fiabilité Client, alors que le FE couvre le risque pris par le Client d'accepter à tort un équipement COTS qui aurait passé avec succès les essais de KLIF, alors que sa fiabilité réelle est inférieure à la Fiabilité contractuelle (exigée) du Client.

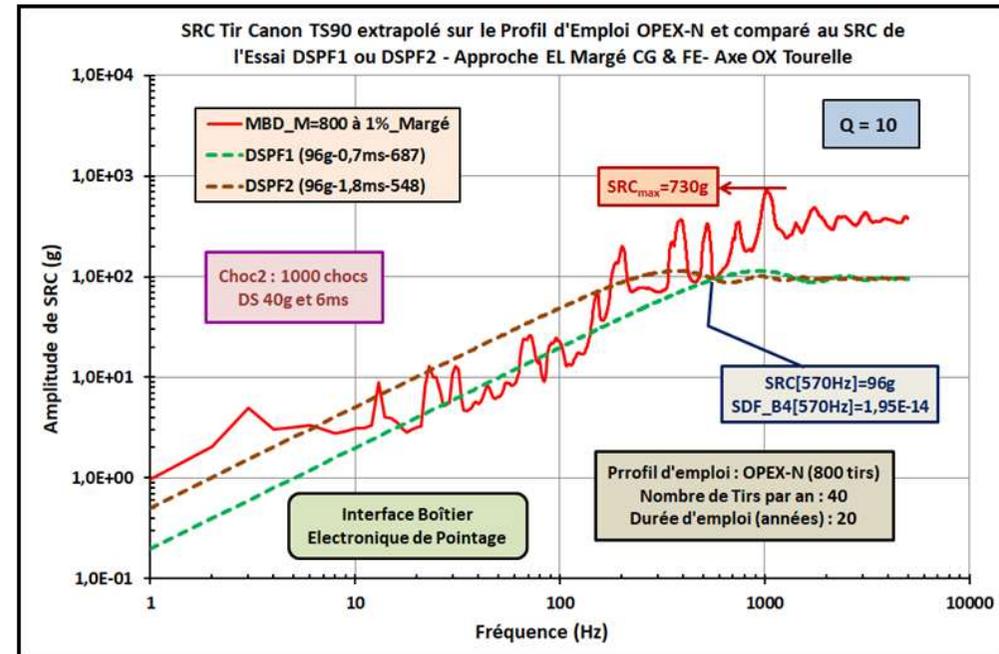
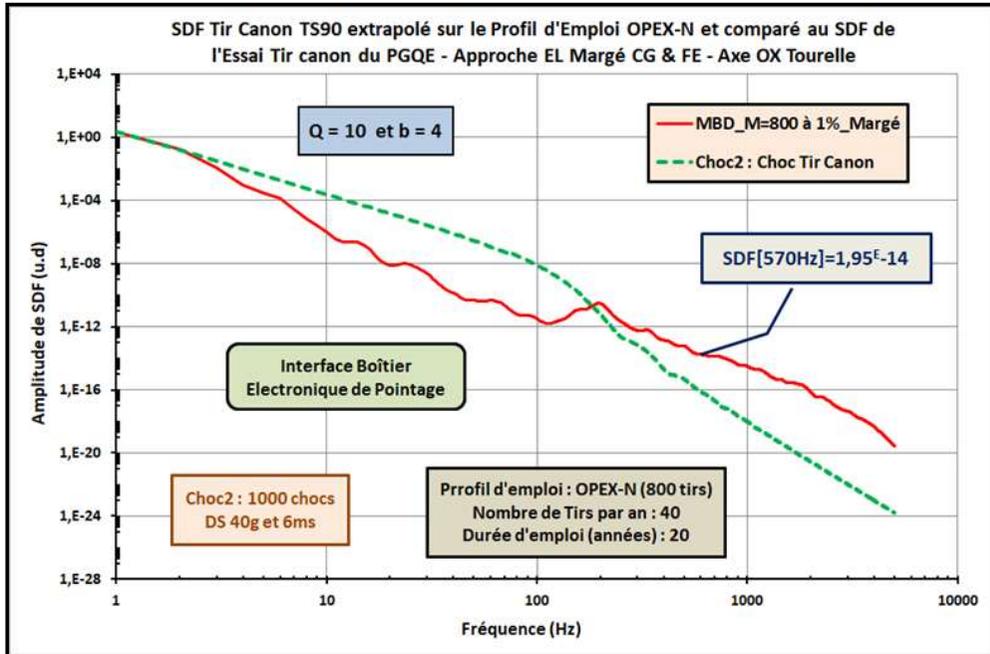
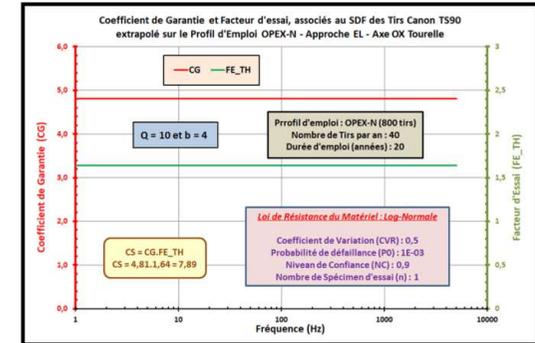


Environnement Limite à 1% selon approche MBD

Modélisation statistique des SDF, puis projection sur PE-N (800 tirs canon)

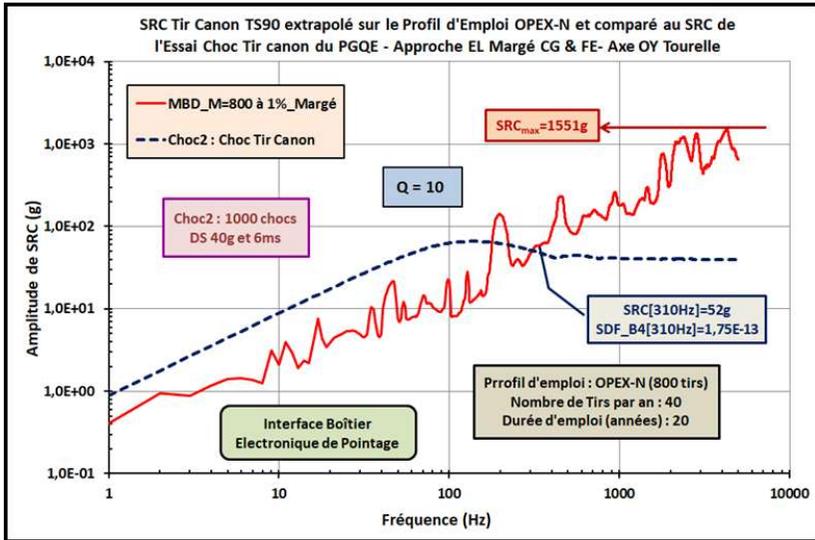
- ✓ Prise en compte du CG (Norme NF X50-144-5)
- ✓ Prise en compte du FE (Norme NF X50-144-6)

→ CS en SDF = 7,89

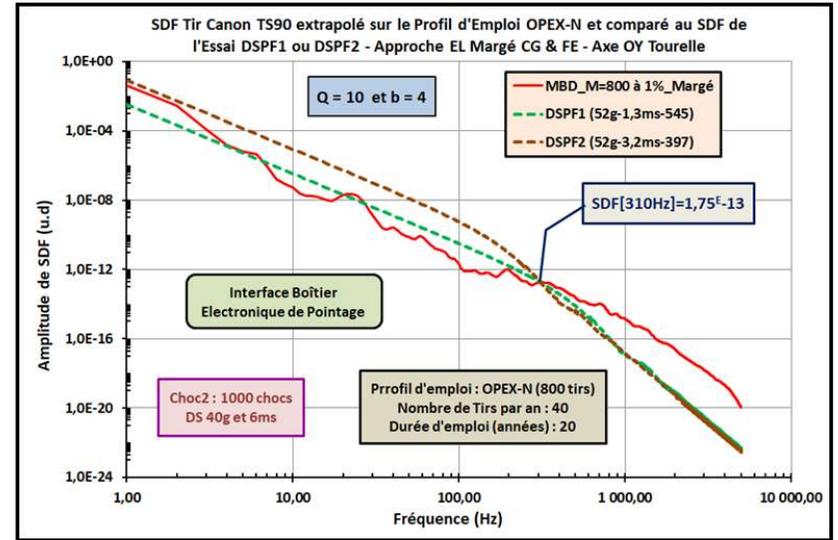


→ Spécification choc à iso endommagement pour axe OX sur sensibilité COTS située à 570Hz pour 800 tirs : DSPF 96g - 1,8ms - 548

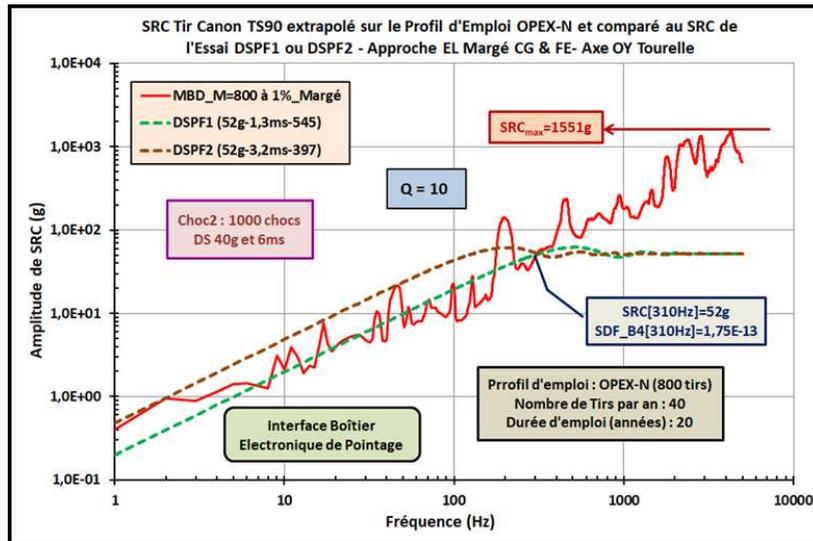
5 – Spécification d'essais chocs accélérés à iso-endommagement (Axe OY Tourelle)



Approche iso-dommage par fatigue (b=4)

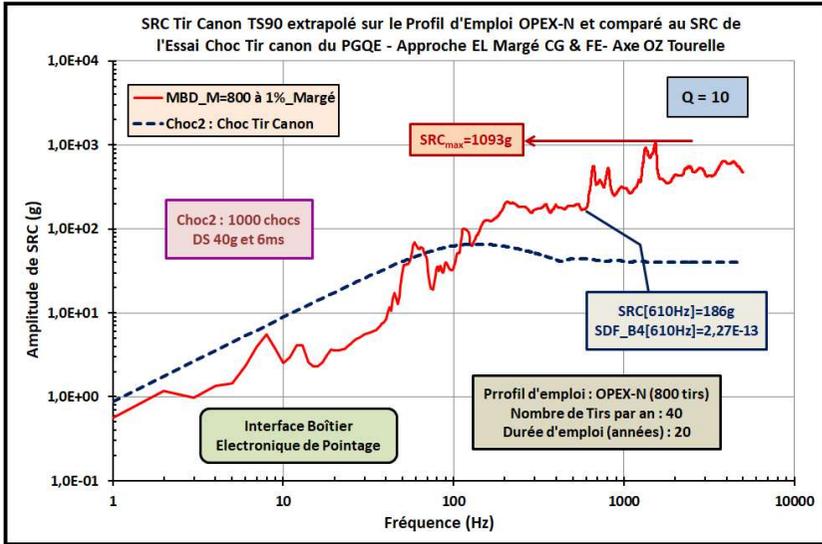


Approche contrainte extrême

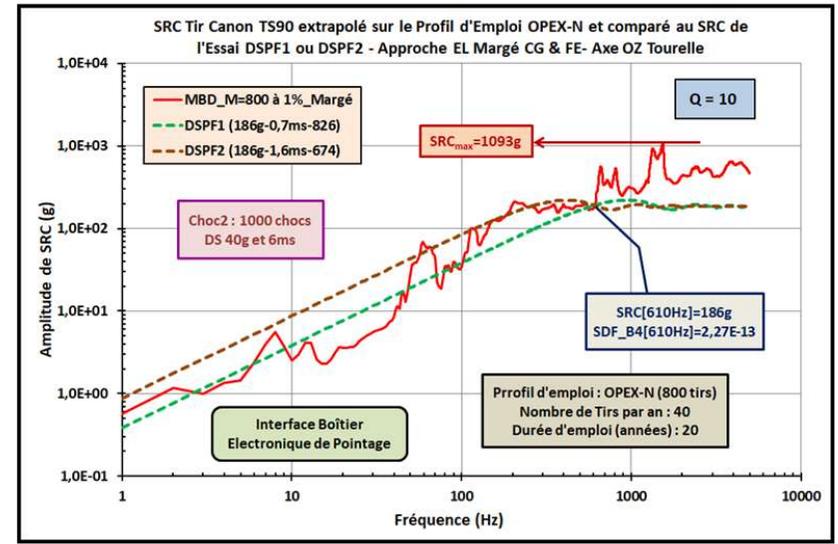


Spécification choc à iso endommagement pour axe OY sur sensibilité COTS située à 310Hz pour 800 tirs : DSPF 52g - 3,2ms - 397

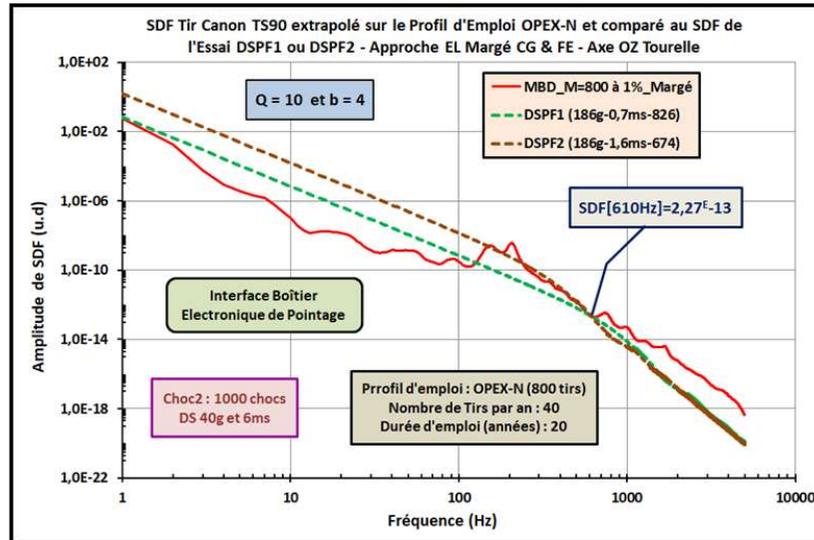
5 – Spécification d'essais chocs accélérés à iso-endommagement (Axe OZ Tourelle)



Approche iso-dommage par fatigue (b=4)



Approche contrainte extrême



Spécification choc à iso endommagement pour axe OZ sur sensibilité COTS située à 310Hz pour 800 tirs : DSPF 186g - 1,6ms - 674

Spécification d'essais chocs accélérés à iso-endommagement (Difficultés rencontrées)

- ✓ **Approche historique** : Couverture de toute la bande d'intérêt [1Hz à 5KHz] en SRC et SDF (**Difficultés récurrentes**)
- ✓ **Approche préconisée (KNDS France)** : Couverture en SRC et SDF, uniquement dans les zones de sensibilités mécaniques des modes de défaillance du COTS électronique (**Nombreux avantages**)

Caractérisation en SRC des Chocs Tir Canon TS90 sur équipement COTS pour l'ensemble de la BD Tir Canon, sans marge CG & FE

Environnement Limite - $f_0 = [1\text{Hz à } 5\text{KHz}]$ (ACTU : Actuelle et HIST : Historique)		Unité	Axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon)	Axe Transversal OY Tourelle	Axe Vertical OZ Tourelle
ACTU	Approche MBD à 1% de dépassement (extrapolation sur PE-N de 800 tirs)	g	472	1003	706
ACTU	Approche MBD à 1% de dépassement (extrapolation sur PE-HI de 4800 tirs)	g	534	1218	800

Seuls les SRC non margés de l'axe OX Tourelle sont simulable sur pot vibrant

Spec en SRC ?

Les SRC margés des axes OX, OY et OZ Tourelle ne sont pas simulables sur pot vibrant

Caractérisation en SRC des Chocs Tir Canon TS90 sur équipement COTS pour l'ensemble de la BD Tir Canon, avec marge CG & FE permettant de couvrir l'exigence de Fiabilité du Client ($F=1-P_0$ avec $P_0=1E-03$)

Environnement Limite - $f_0 = [1\text{Hz à } 5\text{KHz}]$ (ACTU : Actuelle et HIST : Historique)		Unité	Axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon)	Axe Transversal OY Tourelle	Axe Vertical OZ Tourelle
ACTU	Approche MBD à 1% de dépassement (extrapolation sur PE-N de 800 tirs)	g	731	1553	1093
ACTU	Approche MBD à 1% de dépassement (extrapolation sur PE-HI de 4800 tirs)	g	827	1886	1238

Spec en SRC ?

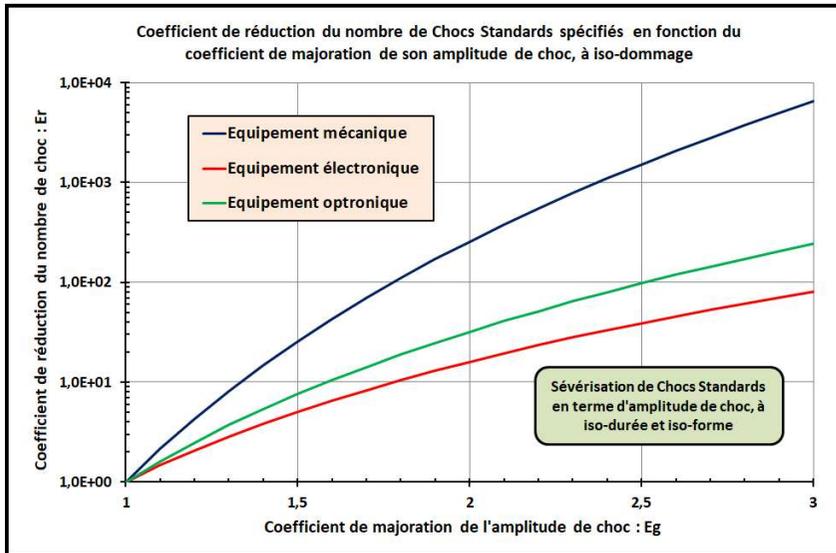
La Spécification Chocs tri-axiale en DSPF est simulable sans restriction sur pot vibrant

Spécification de Chocs Tir Canon TS90 à iso-dommage sur équipement COTS pour le Profil d'emploi PE-N (800 tirs)

Choc Standard de type DSPF (Dent de Scie à Pic Final)		Axe Longitudinal OX Tourelle (Axe Canon)	Axe Transversal OY Tourelle	Axe Vertical OZ Tourelle
		96g - 1,8ms - 548	52g - 3,2ms - 397	186g - 1,6ms - 674

Spécification d'essais chocs Tirs Canon accélérés à iso-endommagement

- ✓ La variabilité des Tirs canon en SRC et SDF nécessite une démarche de prise en compte spécifique **(Actualisation de l'approche MBD pour les chocs)**
- ✓ La méthode de couverture historique des SRC et SDF margés CG & FE sur tout le domaine le fréquences d'intérêt conduit à **des impossibilités fortes et systématiques.**



Coefficient de réduction du nombre de chocs à simuler en fonction du coefficient de majoration de l'amplitude du Choc Standard, à iso-endommagement par fatigue	
Paramètre de sensibilité à la fatigue du matériel électronique (b)	4
Coefficient de majoration du niveau d'amplitude du Choc Standard, à iso-durée et iso-forme	Coefficient de réduction du nombre de Choc Standard spécifié pour une sévérisation Eg de son amplitude, à iso-endommagement par fatigue
Eg	Er
1,0	1,0
1,1	1,5
1,2	2,1
1,3	2,9
1,4	3,8
1,5	5,1
1,6	6,6
1,7	8,4
1,8	10,5
1,9	13,0
2,0	16,0

Spécification iso-dommage	A (g)	T (ms)	N (sd)
OX	96	1,8	548
OY	52	3,2	397
OZ	186	1,6	674

Spécification iso-dommage accéléré (b=4)	Coefficient Eg		N (sd)
	A (g)	T (ms)	
OX	115	1,8	264
OY	62	3,2	191
OZ	223	1,6	325

Spécification iso-dommage accéléré (b=4)	Coefficient Eg		N (sd)
	A (g)	T (ms)	
OX	192	1,8	17
OY	104	3,2	12
OZ	372	1,6	20

Conclusions : L'accélération des Chocs à iso-endommagement par fatigue sur équipement électronique COTS est désormais envisageable **(Simulation sur pot vibrant de hautes performances avec un nombre réduit de chocs, préservant la durabilité des moyens d'essais)** pour autant que la démarche d'essais NF X50-144-3 soit personnalisée sur les modes de dégradations des équipements COTS.

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 :

