

Une méthodologie de maintenance prévisionnelle, basée sur un processus vertueux d'ingénierie d'essais issu du secteur défense

A predictive maintenance methodology, based on a virtuous process of test engineering from the defense sector

COLIN Bruno
KNDS France
Versailles
bruno.colin@knds.fr

1 **RESUMÉ** — Confrontés à des menaces nouvelles et de fortes intensités, la disponibilité opérationnelle des systèmes
2 d'armes terrestres devient une priorité d'amélioration continue pour KNDS France. La mise en place d'une maintenance
3 prévisionnelle pour l'ensemble des industriels concernés (systèmeurs, intégrateurs et équipementiers) est de ce fait nécessaire
4 et doit s'inscrire dans une logique de niveau système. Partagés étroitement avec leurs clients, les innovations technologiques
5 dans ce domaine sont nombreuses et s'inscrivent pour l'essentiel dans le cadre d'une maintenance dite 4.0, avec l'avènement
6 du numérique et la démocratisation des outils d'intelligence artificielle.

7 Soucieux de maintenir efficacement les fonctions techniques très complexes de ses produits, KNDS France met en place
8 une stratégie HUMS au niveau des équipements critiques, dont les performances de fiabilité sont largement altérées par des
9 conditions d'usage incertaines et de sévérités accrues.

10 Cette politique HUMS équipement est gouvernée autour d'un processus d'ingénierie d'essais, normalisé à l'AFNOR sur
11 la période 2011-2021 [1, 2, 3, 4 et 5] et intégrée récemment dans les référentiels normatifs internationaux OTAN [6] et
12 EDSTAR [7] pour le secteur défense.

13 **ABSTRACT** — Faced with new and high-intensity threats, the operational availability of land weapon systems becomes a
14 priority for continuous improvement for KNDS France. The implementation of predictive maintenance for all manufacturers
15 concerned (system manufacturers, integrators and equipment manufacturers) is therefore necessary and must be part of a
16 system approach. Shared closely with their customers, technological innovations in this field are numerous and are essentially
17 part of industry 4.0, with the arrival of digital technology and the democratization of artificial intelligence tools.

18 Concerned with effectively maintaining the very complex technical functions of its products, KNDS France is
19 implementing a HUMS strategy for critical equipment, whose reliability performance is largely degraded by uncertain
20 conditions of use and increased severity.

21 This HUMS equipment policy is governed around a test engineering process, standardized at AFNOR over the period
22 2011-2021 [1, 2, 3, 4 and 5] and recently integrated into the international NATO standards [6] and EDSTAR [7] for the
23 defense sector.

24
25 **MOTS-CLEFS** — Maintenance prévisionnelle, MCO, PHM Hybride, NF X50-144-3, MBD, SRE, SDF

26 **KEYWORDS** — Predictive maintenance, MCO, Hybrid PHM, NF X50-144-3, MBD, SRE, SDF

27 I. INTRODUCTION

28 L'augmentation de la disponibilité des matériels constituant le premier cercle de l'armée de terre (AMX 10RCR,
29 LECLERC, VBCI et CAESAR) utilisés en OPEX dans des régions aux conditions climatiques extrêmes et sur des terrains
30 particulièrement abrasifs [8], constitue une des priorités claires de la loi de programmation militaire 2019-2025 [9]. Pour ce

31 faire, l'ingénierie du soutien a dû faire peau neuve pour passer du MCO « matériel » traditionnel au MCO « fonctionnel », en
32 réduisant autant que faire se peut les actions correctives (remplacement d'équipements défectueux ou obsolètes) au profit des
33 actions de diagnostic de pannes, voire de pronostic de risques dysfonctionnels.

34 Un des leviers significatifs de ce MCO fonctionnel est la mise en place du concept de maintenance prévisionnelle, qui dans
35 le cadre du MCO Terrestre (MCO-T) s'inscrit dans une démarche d'innovations marquantes (RFid, HUMS, IA et Big Data,
36 Réalité augmentée et virtuelle, Télémaintenance, Impression 3D) [10]. Ces innovations technologiques DGA-EMAT-SIMMT,
37 constituent des vecteurs importants de la transformation de la chaîne du soutien terrestre, qui ne cesse de s'accélérer avec
38 l'avènement du numérique, sans toutefois en remettre en cause sa résilience.

39 Dans son rôle de systémier-intégrateur, KNDS France poursuit cette transformation numérique du processus de soutien des
40 matériels terrestres, en la positionnant désormais sur la couche organique des équipements critiques, imposés par ses clients
41 (COTS) ou développés par ses fournisseurs. Ainsi sur la base des travaux menés dans le cadre de la démarche normative
42 AFNOR [11], l'innovation proposée par KNDS France consiste à surveiller désormais l'état de santé des équipements
43 concernés par des capteurs intelligents, dont les seuils d'alerte sont calés sur des données techniques acquises
44 systématiquement par le systémier et ses équipementiers en phase de qualification produit.

45 II. ENJEUX STRATEGIQUES

46 Face à des menaces de plus en plus sophistiquées et performantes (missiles hypersoniques, munitions intelligentes, drones,
47 IED), les matériels terrestres s'équipent d'équipements complexes, à densité technologique de plus en plus élevée pour pouvoir
48 s'en prémunir de façon efficace. Développés le plus souvent autour de composants électroniques et optroniques provenant du
49 secteur civil, ces derniers sont désormais non durcis aux environnements extrêmes de type climatique et mécanique, générés
50 par les matériels terrestres de nos forces en situation opérationnelle.

51 Ainsi sur des critères essentiellement de limitation de coût de possession, l'intégration de tels équipements, à forte valeur
52 ajoutée sur des matériels terrestres en développement ou en cours de valorisation est donc de nature à diminuer la performance
53 de disponibilité opérationnelle de ces derniers, dans un contexte d'engagement majeur de haute intensité et de longue durée. En
54 effet, il est clair que dans des conditions d'utilisation sévères, de nature incertaine, et de forte intensité, ces nouvelles
55 technologies non durcies et donc non éprouvées par un retour d'expérience suffisant sont enclin à subir des niveaux de
56 dégradation difficilement maîtrisables et différenciés sur une flotte de matériels projetée en OPEX, avec potentiellement
57 comme sanction immédiate, l'échec de la mission.

58 Ainsi garantir l'activité opérationnelle de nos forces, sur des durées de conflit importantes, nécessite donc de mettre en
59 place une politique de Maintien en Condition Opérationnelle Terrestre efficace au plus près des équipements critiques, dont les
60 mécanismes de dégradation conventionnels sont pour l'essentiel de nature mécanique, accélérés par des conditions
61 d'environnement climatique de type température et humidité (cas des composants électroniques [12] notamment).

62 Disposer de systèmes d'armes performants, dotés d'une disponibilité opérationnelle optimale dans des conditions d'usage
63 sévères en évolution permanente, nécessite par conséquent la mise en place d'une fonction technique de surveillance au niveau
64 de chacun de ces équipements critiques, permettant ainsi d'assurer l'avantage opérationnel de nos forces en toutes
65 circonstances.

66 Cette stratégie de surveillance d'équipements critiques, développés en partenariat avec nos fournisseurs de rang 1, doit
67 s'inscrire dans un contexte contractuel « systémier-équipementiers », respectant le contour de responsabilité technique de
68 chacun des acteurs, afin de garantir des relations industrielles harmonieuses et efficaces. Pour ce faire, la stratégie de
69 surveillance développée par KNDS France et proposée dans ce qui suit a pour principes de base de favoriser :

- 70 • un mode de surveillance non intrusif au niveau des équipements critiques monitorés, et que le systémier devra à terme
71 gérer comme une fonction technique à part entière au niveau de ses systèmes d'armes,
- 72 • une répartition de tâches techniques efficaces entre systémier et équipementiers, dictées par un référentiel normatif,
73 récemment mis en place à l'AFNOR et qui concerne le processus de qualification expérimental, auquel doit satisfaire
74 désormais nos systèmes d'armes complexes et leurs équipements embarqués.

75 Qualifiés bien souvent pour des usages contractuels, mais différenciés de ceux qu'ils subissent réellement en condition
76 opérationnelle, les équipements critiques embarqués sur les systèmes d'armes terrestres, constituent désormais les maillons de
77 la chaîne logistique qu'il convient de surveiller in-situ, avec une attention particulière pour répondre à cet accroissement
78 d'exigences de disponibilité majeur.

79 III. PROCESSUS D'INGENIERIE D'ESSAIS

80 Historiquement dans le secteur défense, les essais mécaniques (vibratoires, chocs, accélération constante, rebondissement et
81 autres...), dédiés à la qualification des équipements embarqués sur nos systèmes d'armes terrestres étaient effectués à partir de
82 spécifications extraites de normes nationales GAM-T13 [13] et GAM-EG13 [14] ou internationales MIL STD 810 [15] et DEF
83 STAN 0035 [16]. Les premières normes d'essais en environnement mécanique, établies dans les années 40, étaient à caractère
84 forfaitaire (vibrations sinusoïdales uni-axiales à fréquence fixe ou balayée), réputées très sévères, et possédant un niveau de
85 représentativité faible en regard de la nature des excitations aléatoires réelles subies par les matériels terrestres en utilisation
86 opérationnelle. Ces essais forfaitaires étaient essentiellement destinés à démontrer une certaine résistance des équipements
87 testés, avec l'inconvénient de ne pas pouvoir révéler l'ensemble des mécanismes de dégradation susceptibles d'apparaître in-
88 situ au sein de ces équipements critiques, par manque de représentativité des essais ainsi réalisés.

89 Pour ces raisons de représentativité et de réduction de masse et de coût des équipements embarqués, les industriels de
 90 l'armement terrestre, se sont vu dans l'obligation d'établir entre les années 75 et 85 (à l'aube du développement LECLERC)
 91 des spécifications d'essai vibratoire, capables de reproduire la nature complexe de la physique d'engrènement des chenilles,
 92 mixée à celle des vibrations de roulement [17]. L'introduction de ces essais vibratoires de type sinus sur bruit ou bruit sur bruit
 93 a permis certes d'améliorer grandement le niveau de représentativité des essais de qualification des équipements chenillés
 94 concernés, mais surtout de faire émerger en laboratoire des processus de défaillance conformes à ceux rencontrés in-situ sur
 95 véhicules prototypes [18]. Coïncidant avec l'avènement de moyens d'essais (pots vibrants pilotés numériquement et non plus
 96 de façon purement analogique comme par le passé), capables désormais de réaliser de tels essais aléatoires composites non
 97 stationnaires (sinus sur bruit ou bruit sur bruit balayé), ces derniers ont largement contribué à fiabiliser les équipements
 98 embarqués sur la criticité fréquentielle de leurs modes de défaillance, dont les causes sont très souvent :

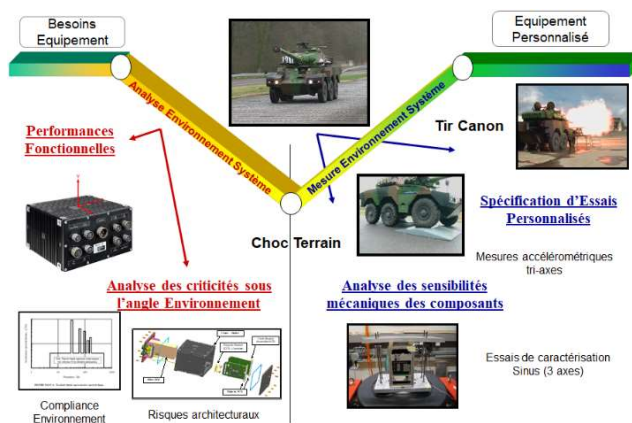
- 99 • le dépassement d'une contrainte seuil admissible,
- 100 • ou l'accumulation d'un endommagement par fatigue vibratoire excessif, situé au-delà d'un niveau d'endommagement
- 101 limite (connu par calculs, ou par essais).

102 Cette évolution en matière d'essais vibratoires à forte représentativité et reproductibilité a été prise en compte au début des
 103 années 80 dans les normes françaises (GAM EG 13), américaines (MIL STD 810) voire internationales (STANAG 4370), en
 104 favorisant l'émergence du processus de personnalisation des essais, au sein de ces référentiels normatifs du secteur défense.
 105 Pour afficher la volonté des experts métier (nationaux et internationaux) de prendre en compte les conditions d'usage et
 106 d'environnement associées au profil de vie des systèmes d'armes dès les phases de conception, plutôt que d'en vérifier leur
 107 tenue à posteriori lors des phases de qualification, il convient désormais de parler de démarche de « personnalisation du produit
 108 à son environnement » [19]. Ce concept de personnalisation enrichie a été initié en France dans les années 90 et jalonne
 109 aujourd'hui toutes les phases classiques du cycle en V de gestion de projet. La finalité de ce processus de personnalisation
 110 enrichie, est de permettre à l'intégrateur-systémier de disposer d'un Programme Général de Qualification Expérimental
 111 (PGQE) de niveau équipements, capable désormais de garantir les exigences de fiabilité fonctionnelle et structurales, déclinées
 112 aux équipements critiques par les experts métier en sûreté de fonctionnement.

113 Ainsi bien que non menés à rupture (casse ou dysfonctionnement), les essais d'environnement mécanique et climatique des
 114 équipements embarqués sont devenus au fil du temps des essais de démonstration des exigences de fiabilité opérationnelle
 115 requises et construites autour de méthodes d'allocation FMDS largement répandues en ingénierie des exigences [20]. De ces
 116 considérations techniques, il ressort que l'ingénierie d'essais personnalisés est bien de nature à favoriser une plus forte synergie
 117 entre les processus d'ingénierie des exigences, de validation et de maintenance de nos produits complexes, nécessaire à
 118 l'augmentation de disponibilité recherchée.

119 A. Démarche en V du processus de personnalisation des essais

120 Dans la branche descendante du V de conception (Figure 1), l'intégrateur-systémier analyse l'environnement système en
 121 définissant le profil d'emploi environnement, et ceci en s'appuyant sur le profil de vie contractuel de la STB client. Il s'agit
 122 donc ici de ne retenir que les situations d'environnement les plus pertinentes, au regard de la criticité des technologies duales
 123 introduites au sein des équipements COTS, imposés ou non par le client, et dont le choix est issu d'un fort compromis
 124 technico-économique (optimisation du coût de possession). Retenus essentiellement pour leurs performances fonctionnelles et
 125 leurs coûts d'acquisition, les équipements COTS sont alors souvent durcis, ou voire intégrés mécaniquement sur porteurs
 126 terrestres au moyen d'interfaces découplées, pour répondre aux contraintes environnementales sévères et très spécifiques,
 127 générées in-situ par ces derniers.



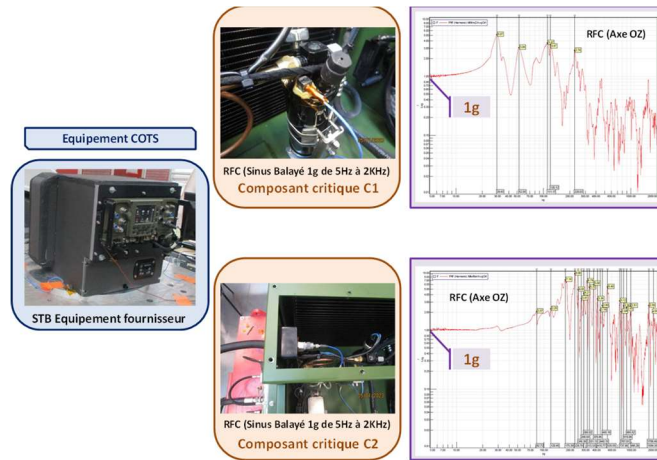
128 Figure 1: Processus en V de gestion de projet, appliqué au domaine de la personnalisation des essais.

130 De ce fait, sur la base d'un processus de qualification expérimental acquis par les fournisseurs, une étude de compatibilité «
 131 environnementale » est alors réalisée par l'intégrateur-systémier, en s'appuyant principalement sur :

- 132 • l'analyse des criticités fréquentielles des équipements COTS fournisseurs, obtenues par un essai contractuel de
- 133 Recherche de Fréquences Critiques (RFC : essai sinus balayé bas niveau), et qui est à la charge de ces derniers. Cet essai RFC

134 est réalisé suivant les trois axes des équipements critiques, en marge des essais de qualification menés par les fournisseurs
135 concernés sur leurs équipements (Figure 2),

136 • l'analyse des sévérités d'essais de qualification, retenues de façon forfaitaire par les fournisseurs concernés, et qui
137 sont issues bien souvent des normes en vigueur ([6], [15] et [16]) sans lien directe avec le profil d'emploi environnement du
138 système d'armes dont l'intégrateur-systémier est en charge.



139
140 Figure 2: Essais de Recherche de Fréquences Critiques (RFC) sur Equipements COTS.

141 L'analyse des sévérités d'essais des PGQE équipements est réalisée par l'intégrateur-systémier, en s'appuyant sur la notion
142 des spectres de réponses de type SRE (Spectre de Réponses Extrêmes) et SDF (Spectre de Dommages par Fatigue), définis dans
143 la norme NF X50-144-3 [3]. Ces derniers correspondent en fait aux indicateurs d'endommagement induits respectivement sur
144 les équipements testés, par les deux modes de défaillance cités précédemment.

145 Il est à noter que ces spectres de réponses de type SRE et SDF sont des indicateurs d'endommagement à caractère
146 probabiliste, dont les caractéristiques statistiques dépendent de la nature stochastique des processus d'excitation considérés. Ils
147 sont calculables à partir d'une excitation temporelle, obtenue par un capteur de mesure d'accélération situé au pied d'un
148 équipement, jugé critique et que l'on vient modéliser simplement sur le plan dynamique par une batterie de systèmes à 1ddl
149 découplés. L'intérêt de ces indicateurs d'endommagement probabiliste réside dans leur caractère spectral, permettant si
150 nécessaire de corrélérer ces derniers avec les criticités fréquentielles de composants sensibles, dont les signatures sont
151 généralement connues à partir des essais RFC fournisseur. Par ailleurs, ces derniers sont excessivement simples et très rapides
152 à évaluer sur le plan calculatoire, pour des sévérités d'essais forfaitaires (vibrations sinus, aléatoire gaussien et chocs) comme
153 rappelé dans l'Annexe A de la norme française NF X50-144-3 [3]. Au niveau de l'endommagement par fatigue vibratoire, ce
154 dernier est calculé par des approches simplifiées, basées sur le modèle de Basquin défini par les constantes (b et C) ci-après :

155

$$N \cdot \sigma^b = C \quad (1)$$

156 L'utilisation de tels indicateurs d'endommagement dans les domaines de la conception et de la validation de produits civil
157 (automobile, génie civil, énergie) et militaire (tous systèmes d'armes confondus) est donc de nature à justifier leur utilisation
158 grandissante dans le domaine de la maintenance conditionnelle, voire prévisionnelle [21]. Nécessitant par ailleurs peu de
159 connaissances académiques, concernant la modélisation mécaniste des deux mécanismes de dégradation considérés, ces
160 indicateurs probabilistes constituent potentiellement des marqueurs d'état de santé très pertinents pour des équipements COTS,
161 dont on ne connaît pas ou peu la criticité de conception.

162 Dans la branche ascendante du V de conception (Figure 1), l'intégrateur-systémier mesure l'environnement système, en
163 caractérisant principalement les situations d'environnement non conventionnelles du profil d'emploi environnement, réputées
164 très sévères et qui sont spécifiques au produit développé, à savoir :

- 165
- 166 • situation de roulage tout chemin et tout terrain,
 - 167 • situation tir canon (armement principal ou secondaire),
 - 168 • situation d'explosions (souffle mines et IED),
 - situation d'impact balistique (selon le niveau de protection contractualisé avec le client).

169 Ces caractérisations expérimentales sont réalisées autant que faire se peut sur un matériel de tête de série (le plus proche de
170 sa définition finale) et plus particulièrement aux pieds des équipements critiques que l'on souhaitera ultérieurement surveiller
171 au titre de la fonction HUMS équipements. Ces mesures d'accélération sont ensuite mises en Base de Données (BD)
172 environnement, et traitées en termes de SRE et de SDF avec le même formalisme que celui adopté dans la branche descendante
173 du V de conception, pour les sévérités d'essais des PGQE équipements fournisseurs.

174 Il ne reste donc plus qu'à projeter cette Base de Donnée environnement sur le profil d'emploi contractuel du client, pour
175 savoir si ces équipements COTS sont désormais intégrables tels quels ou non sur le matériel en développement. Ce travail est

176 réalisé par des experts de l'ingénierie d'essais, formés au formalisme probabiliste des processus de synthèse des situations
 177 d'environnement, caractérisées en termes de SRE et de SDF, dans la mesure où ces derniers sont assimilables à des variables
 178 aléatoires. Ces principes de synthèse sont destinés à regrouper sur le plan statistique l'ensemble des situations d'environnement
 179 du profil d'emploi retenu, en une série de situations équivalentes, définies en termes de vibrations et/ou de chocs. Ces
 180 regroupements sont soumis à des règles métier, très strictes afin de garantir une bonne représentativité des valeurs probabilistes
 181 de type SRE et SDF calculées, au regard des mécanismes de dégradation couverts par les principes de personnalisation
 182 enrichie, qui sont exposés au §8.4 de la norme NF X50-144-3, à savoir :

- 183 • synthèse déterministe lorsque les environnements des situations à regrouper au sens du profil d'emploi sont de nature
 184 déterministe (cas des excitations sinusoïdales, chocs ou accélérations constantes),
- 185 • synthèse stochastique lorsque les environnements des situations à regrouper au sens du profil d'emploi sont de nature
 186 aléatoire (cas des excitations gaussiennes ou non, et stationnaires ou non).

187 Ce processus de synthèse des situations d'environnement d'un profil d'emploi (PE) est également utilisé pour synthétiser
 188 en termes de SRE et de SDF les différents essais forfaitaires, réalisés dans le cadre des PGQE équipements fournisseurs,
 189 permettant de définir les seuils de surveillance des équipements critiques, en adoptant les formalismes développés au
 190 paragraphe 3.2 qui suit.

191 *B. Détermination des seuils de surveillance au niveau des équipements critiques*

192 Le travail engagé par l'intégrateur-systémier dans la phase descendante du V de conception permet de définir les valeurs
 193 probabilistes de $SRE_{PGQE}(f_0)$ et de $SDF_{PGQE}(f_0)$, auxquelles résistent les équipements critiques des fournisseurs concernés. De
 194 même, le travail engagé par ce même intégrateur-systémier dans la phase ascendante du V de conception lui permet de
 195 quantifier les valeurs probabilistes de $SRE_{PE}(f_0)$ et $SDF_{PE}(f_0)$, associées au profil d'emploi (PE) sur lequel il s'est engagé
 196 contractuellement avec son client, au stade de la STB de niveau système.

197 La comparaison des valeurs probabilistes $[SRE_{PGQE}(f_0), SRE_{PE}(f_0)]$ pour $f_0 \in [f_{min}, f_{max}]$ permet alors de savoir si l'équipement
 198 concerné est intégrable ou non dans l'architecture du système d'armes, vis-à-vis de sa tenue aux contraintes extrêmes, générées
 199 par le profil d'emploi contractuel. De même, la comparaison des valeurs probabilistes $[SDF_{PGQE}(f_0), SDF_{PE}(f_0)]$ pour
 200 $f_0 \in [f_{min}, f_{max}]$ est de nature à estimer si l'équipement concerné est intégrable, vis-à-vis de sa tenue à la fatigue vibratoire,
 201 générée par le profil d'emploi contractuel. Une intégration à sec des équipements critiques n'est alors envisageable que si les
 202 deux types de comparaison satisfont globalement les relations d'ordre qui suivent, à savoir :

$$\begin{cases} SRE_{PGQE}(f_0) < SRE_{PE}(f_0) \\ SDF_{PGQE}(f_0) < SDF_{PE}(f_0) \end{cases} \forall f_0 \in [f_{min}, f_{max}] \quad (2)$$

203 Malheureusement, les critères d'intégration définis par (2) ne sont pas directement exploitables par l'ingénierie d'essais,
 204 dans la mesure où les valeurs $SRE(f_0)$ et $SDF(f_0)$ sont, comme rappelé précédemment, des variables aléatoires dont on peut
 205 estimer le modèle statistique soit à partir d'une approche [3]:

- 207 • analytique (cas des environnements réels de type déterministe et des sévérités d'essais forfaitaires normalisées),
- 208 • numérique, en s'appuyant sur la méthode MBD (cas des environnements réels stationnaires ou non, voire de nature
 209 gaussienne ou non).

210 De ce fait pour exploiter favorablement ces critères d'intégration au sens des deux mécanismes de dégradation considérés,
 211 il convient de raisonner désormais sur un niveau de seuillage statistique, défini par un quantile à risque de dépassement α que
 212 l'on va se fixer par rapport à la criticité de l'équipement COTS à intégrer. Ces valeurs de risque α sont ici retenues en
 213 cohérence avec celles proposées par la norme NF X50-144-3, au Tableau 3 du §8.4 (voir Tableau 1 qui suit).

214 Tableau 1: Niveau de risque de dépassement α [3]

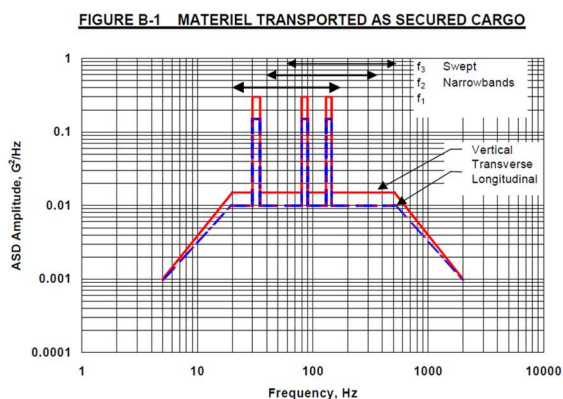
Risque de dépassement accepté en fonction de la criticité de l'Equipement		
Nature des Equipements concernés	Criticité de l'Equipement	Risque de dépassement α retenu
Equipements Standards	Faible (Equipement dont la Fonction Technique est non prioritaire)	10%
Equipements Critiques	Moyen (Equipement dont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

215 En s'appuyant sur les considérations techniques précédentes, les critères d'intégration probabilistes, exposés à l'équation
 216 (2) deviennent donc exploitables en maintenance conditionnelle et/ou prévisionnelle, dans la mesure où ces derniers sont
 217 désormais à caractère scalaire [21].
 218

219 C. Cas pratiques (emport Tactique de munitions AT4F2) sur porteurs terrestres

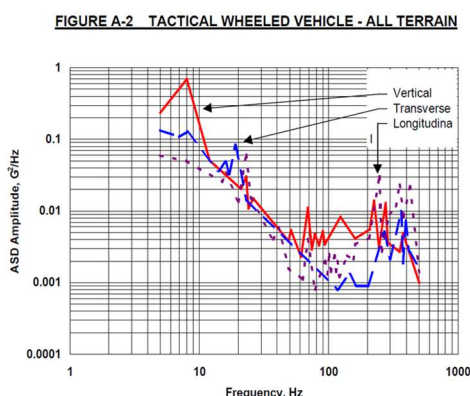
220 Au vu des considérations précédentes et pour illustrer très simplement le cas de l'estimation des seuils de surveillance de
 221 type SRE et SDF sur un matériel sensible et utilisable par nos forces en situation opérationnelle, on se place ici dans le cadre
 222 d'une situation d'emport tactique de munitions AT4F2 développées par la Société suédoise SAAB. Considérées à juste titre par
 223 notre fournisseur comme des munitions transportables sur véhicules à roues ou à chenilles, ces dernières ont été qualifiées par
 224 SAAB selon un PGQE comprenant les deux sévérités forfaitaires de vibrations suivantes et tirées du STANAG 4370 [6] :

- 225 • Sévérité d'essai vibratoire de type bruit sur bruit à spectre formé et de BP=[5, 2000Hz], AECTP 400, Méthode 401,
 226 Procédure III, Figure B-1 (Material Transported as Secured Cargo), 2 heures par axe suivant les 3 axes de l'équipement. Les
 227 niveaux d'accélération efficaces suivant les 3 axes de l'équipement sont alors de 4,65g pour l'axe vertical OZ et de 3,70g pour
 228 les axes transverses OX et OY (Figure 3).



229
 230 Figure 3: Sévérité d'essai de qualification (munitions AT4F2) pour véhicules chenillés.

- 231 • Sévérité d'essais vibratoire de type bruit à spectre formé et de BP=[5, 500Hz], AECTP 400, Méthode 401, Procédure
 232 III, Figure A-2 (Tactical Wheeled Vehicle-All Terrain), 40 minutes par axe suivant les 3 axes de l'équipement. Les niveaux
 233 d'accélération efficaces suivant les 3 axes de l'équipement sont alors de 2,05g pour l'axe longitudinal OX, de 1,62g pour l'axe
 234 transversal OY et de 2,20g pour l'axe vertical OZ (Figure 4).



235
 236 Figure 4: Sévérité d'essai de qualification (munitions AT4F2) pour véhicules à roues.

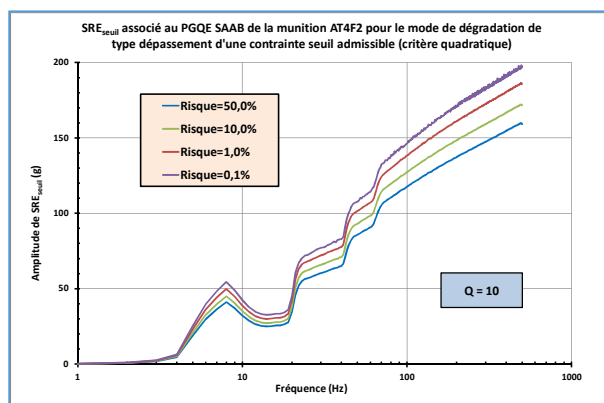
237 La réussite des missions OPEX étant un enjeu majeur pour nos forces, les seuils de surveillance de ces munitions sont
 238 estimés, en considérant ces dernières comme des matériels à forte criticité et de nature électronique pour ses composants les
 239 plus sensibles. L'analyse des seuils est donc réalisée avec les paramètres de calculs suivants : Q=10, b=4, K=C=1 et $\alpha=0,1\%$
 240 pour une bande de fréquences [1Hz, 500Hz], qui correspond ici, d'après les essais RFC réalisés par SAAB, à la bande de
 241 fréquences des criticités fréquentielles les plus pertinentes. L'analyse des seuils en SRE et en SDF est tout d'abord réalisée axe
 242 par axe suivant les trois axes de l'équipement, puis ces derniers sont combinés suivant les trois axes, en s'appuyant sur le
 243 critère de la racine quadratique [21]. Les modèles probabilistes des SRE associés à ces deux sévérités d'essais pour chacun des
 244 trois axes sont tout d'abord calculés et synthétisés sur le plan stochastique, en considérant que ces deux sévérités d'essais sont
 245 réalisées séquentiellement lors du déroulement de la qualification munition. Les modèles probabilistes du SRE_{PGQE} étant
 246 désormais connus pour chacun des trois axes, la valeur de seuil SRE_{seuil} est alors obtenue, selon le critère de sommation
 247 quadratique en s'appuyant sur l'équation (4) suivante :

$$SRE_{seuil} = \sqrt{\left(F_{SRE_{PGQE}^{OX}}^{-1}(f_0)(\beta)\right)^2 + \left(F_{SRE_{PGQE}^{OY}}^{-1}(f_0)(\beta)\right)^2 + \left(F_{SRE_{PGQE}^{OZ}}^{-1}(f_0)(\beta)\right)^2}$$

248 en (m/s^2) avec $\beta = 1 - \alpha$ pour chaque d.d.l (f_0, Q) donné (4)

249 où : $F_X(x)$ représente ici la fonction de répartition de la variable aléatoire X, avec X=SRE_{PGQE} dans le cas présent.

250 Contrairement aux indicateurs scalaires classiques d'endommagement, utilisés dans le secteur de la maintenance des
 251 équipements industriels, la valeur vectorielle de SRE_{seuil} est ici représentée par une courbe limite (Figure 5) définie sur le
 252 domaine fréquentiel d'intérêt [1Hz, 500Hz] pour $\alpha=0,1\%$. Ceci permet par exemple une surveillance « globale » sur toute la
 253 bande de fréquences d'intérêt ou « locale » sur une bande de fréquences cible permettant de suivre uniquement la dégradation
 254 d'un composant de la munition, dont la fréquence critique a fait l'objet d'une investigation particulière par le fournisseur lors
 255 des essais RFC.



256
 257 Figure 5: Seuil de maintenance de type SRE pour la munition AT4F2 pour ($\alpha=0,1\%$, 1%, 10% ou 50%).

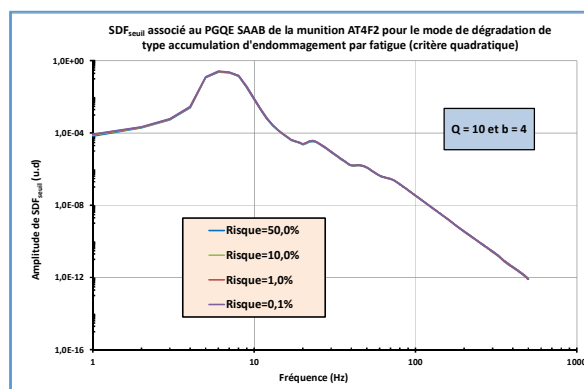
258 Comme précédemment, les modèles probabilistes des SDF associés à ces deux sévérités d'essais pour chacun des trois axes
 259 sont là encore calculés et synthétisés sur le plan stochastique, en considérant que ces deux essais sont réalisés séquentiellement
 260 lors du déroulement de la qualification munition. Les modèles probabilistes du SDF_{PGQE} étant désormais connus pour chacun
 261 des trois axes, la valeur de seuil SDF_{seuil} est alors obtenue, selon le critère de sommation quadratique, en s'appuyant sur
 262 l'équation (5) suivante :

$$SDF_{seuil} = \sqrt{\left(F_{SDF_{PGQE}^X}(f_0)^{-1}(\beta)\right)^2 + \left(F_{SDF_{PGQE}^Y}(f_0)^{-1}(\beta)\right)^2 + \left(F_{SDF_{PGQE}^Z}(f_0)^{-1}(\beta)\right)^2}$$

263 en (m/s^2) avec $\beta = 1 - \alpha$ pour chaque d.d.l (f_0, Q) donné (5)

264 où : $F_X(x)$ représente ici la fonction de répartition de la variable aléatoire X , avec $X=SDF_{PGQE}$ dans le cas présent.

265 Comme pour le seuil de maintenance précédent, le seuil relié à la fatigue vibratoire de la munition est là encore défini par
 266 une courbe limite (Figure 6) sur la bande fréquentielle d'intérêt considérée et pour $\alpha=0,1\%$, à savoir :



267
 268 Figure 6: Seuil de maintenance de type SDF pour la munition AT4F2 pour ($\alpha=0,1\%$, 1%, 10% ou 50%).

269 Dans la plupart des cas, la surveillance des équipements critiques s'effectue en prenant en compte les deux indicateurs
 270 calculés. Cependant l'expérience acquise par KNDS France, montre que l'indicateur de fatigue vibratoire est à privilégier pour
 271 le cas des sollicitations de roulage, alors qu'à contrario dans le domaine impulsionnel (tir canon, souffle et impact balistique), il
 272 est important de surveiller les deux indicateurs simultanément.

273 IV. DEMARCHE DE SURVEILLANCE DES EQUIPEMENTS CRITIQUES

274 La maintenance prévisionnelle est aujourd'hui très présente dans tous les secteurs industriels français et est au cœur de la
 275 maintenance du futur (4.0), grâce notamment à l'avènement de la transformation numérique, basée sur les techniques
 276 d'intelligence artificielle. Elle s'articule aujourd'hui autour des 7 niveaux fonctionnels, basés sur une architecture OSA-CBM
 277 (Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance), dont les principes (Figure 7) sont intégrés à la norme NF ISO
 278 13374 [22] et [23].

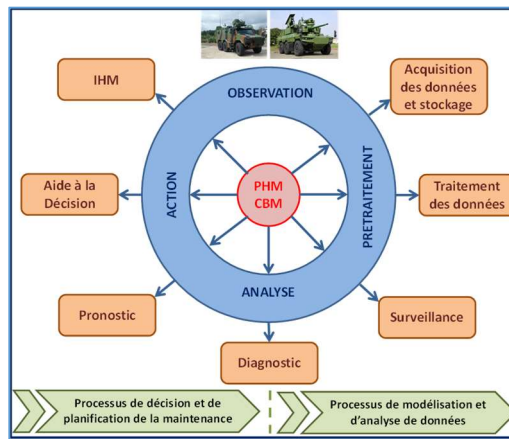


Figure 7: Architecture OSA-CBM de la norme NF ISO 13374 (Concepts CBM et PHM).

A l'aube du programme SCORPION (Jaguar, Griffon) et dans l'optique de favoriser à terme la mise en place d'une maintenance prévisionnelle pérenne, alors qu'elle reste très confrontée aux contraintes de la maintenance corrective, KNDS France s'est attachée à définir les grands principes d'une fonction « HUMS équipements », en se concentrant dans un premier temps sur le cas de ses équipements critiques « Cost Drivers » et/ou « Fonctionnal Drivers » [21].

Architecturée suivant les grands principes OSA-CBM de la norme NF ISO 13374, la solution « HUMS équipements » de KNDS France vient s'appuyer sur son savoir-faire et surtout sur les fondements du processus de qualification expérimental, normalisé à l'AFNOR, auquel les matériels de défense doivent désormais répondre (tous matériels confondus). Ainsi pour développer les tâches diagnostic et pronostic de sa fonction « HUMS équipements », KNDS France met en place des solutions numériques non conventionnelles de type :

- **Surveillance et Diagnostic Prédictif** (CBM - Condition Based Monitoring), en utilisant les marqueurs d'état de santé SRE_{seuil} et SDF_{seuil} présentés au §III.B et tirées des formalismes techniques de la norme NF X50-144, promulguée certes entre 2019-2021, mais dont les grands principes ont été largement éprouvés par les grands programmes d'armement des années 80-2000.

- **Pronostic et Bilan de Santé Continu** (PHM - Prognostics & Health Management), en évaluant en temps réel les marqueurs $SRE_{courant}$ et $SDF_{courant}$, mesurés aux pieds des équipements critiques, à l'aide de capteurs HUMS, dopés à l'IA et aux traitements statistiques de la MBD du référentiel normatif NF X50-144-3 [21].

Confrontés très souvent à l'intégration d'équipements COTS (Components-Off-the Shelf) imposés par ses clients, KNDS France a donc développé une architecture de traitement OSA-CBM originale et non conventionnelle, nourrie par des marqueurs d'état de santé (SRE et SDF), dont les seuils et les principes calculatoires sont désormais décrits par des référentiels normatifs métier AFNOR, retenus très récemment à l'international (OTAN et AED). Située à la frontière des modélisations physiques (PoF) des dégradations générées au sein de ses équipements critiques, et de celles basées sur les données (Data driven) des techniques d'apprentissage automatique de l'IA, cette PHM s'inscrit donc ici dans le cadre des méthodes de modélisation dites « hybrides », dont les 7 niveaux fonctionnels sont :

- **Acquisition des données** : acquisition par capteurs intelligents (de type MEMS accélérométriques). A ce stade, il s'agit de relever les valeurs d'accélération tri-axes in-situ, aux pieds des équipements embarqués, jugés critiques, comme défini précédemment,

- **Traitement des données** : traitement en SRE et en SDF des données accélérométriques ainsi collectées par les techniques de calculs temporelles de nature déterministe (SRE_d , SDF_d), pour chacun des trois axes des capteurs considérés [21]. Ces calculs temps réel de SRE et de SDF sont réalisés en s'appuyant sur la norme NF X50-144-3, avec comme règle stricte d'utiliser les mêmes valeurs des paramètres Q et b, que celles retenues précédemment pour évaluer les seuils de surveillance des équipements concernés. En s'appuyant donc sur le critère de sommation quadratique des équations (4) et (5), il est alors possible d'estimer l'évolution temporelle des marqueurs d'état de santé in-situ $SRE_{courant}$ et $SDF_{courant}$ pour chaque équipement monitoré, comme indiqué respectivement par les équations (6) et (7),

$$SRE_{courant} = \sqrt{[SRE_d^{OX}(f_0)]^2 + [SRE_d^{OY}(f_0)]^2 + [SRE_d^{OZ}(f_0)]^2}$$

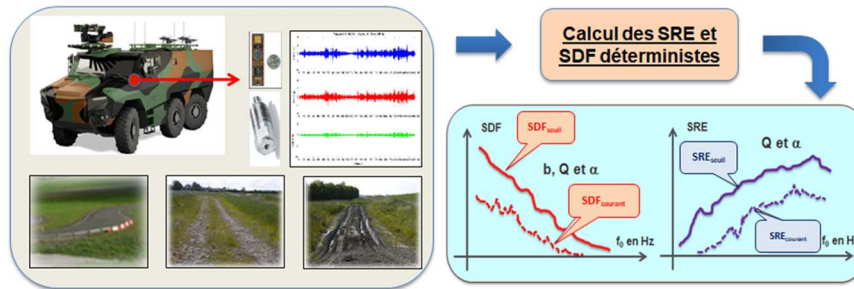
en (m/s^2) pour chaque d. d. l (f_0, Q) donné (6)

$$SDF_{courant} = \sqrt{[SDF_d^{OX}(f_0)]^2 + [SDF_d^{OY}(f_0)]^2 + [SDF_d^{OZ}(f_0)]^2}$$

en (u. d) pour chaque d. d. l (f_0, Q) donné (7)

- **Surveillance** : comparaison des marqueurs d'état de santé in-situ ($SRE_{courant}, SDF_{courant}$), calculés en temps réel, avec les marqueurs seuil du PGQE équipement (SRE_{seuil}, SDF_{seuil}), dont les sévérités d'essais ont été retenues et réalisées expérimentalement par le fournisseur en laboratoire (Figure 8),

- 319 • **Diagnostic** : mise en place d'une alerte en fonction de la criticité de l'équipement et de sa sensibilité fréquentielle, obtenue à partir des essais contractuels de type RFC menés également par le fournisseur en laboratoire,
- 320
- 321 • **Pronostic** : estimation de la capacité de projection d'emploi, en s'appuyant sur les formalismes probabilistes de la méthode MBD et de la Synthèse Stochastique, développés par KNDS France dans la norme NF X50-144-3 [24] et [25],
- 322
- 323 • **Optimisation et aide à la décision** : planification optimale des actions de maintenance à réaliser sur les équipements critiques retenus,
- 324
- 325 • **Présentation IHM** : synthèse de l'ensemble des informations de l'état de santé des équipements critiques, de manière à définir le potentiel restant au niveau des grandes fonctions opérationnelles (mobilité, feu, communication, protection active et/ou réactive) du système d'armes ainsi monitoré.
- 326
- 327



328 Figure 8: Principe de surveillance de la fonction « HUMS équipements », développée par KNDS France.

329 Avant de présenter le principe de diagnostic de la fonction « HUMS équipements », il est important de rappeler les fondements probabilistes de la MBD et de la Synthèse stochastique, sur lesquelles la fonction « HUMS équipements » de KNDS France repose.

330 A. Principes de la méthode MBD (Méthode des Blocs Disjoints)

331 Si pour l'estimation des marqueurs d'endommagement temps réel $SRE_{courant}$ et $SDF_{courant}$, les techniques de calculs utilisées sont de nature déterministe, on montre clairement l'importance d'utiliser les techniques probabilistes des marqueurs d'état de santé SRE et SDF pour estimer la capacité de projection d'un matériel terrestre, sur lequel est intégré un certain nombre d'équipements critiques.

332 Comme rappelé dans l'article [26] présentant les fondements probabilistes de la MBD, il est important de retenir que les concepts de SRE et de SDF sont, dans le cas des vibrations aléatoires de roulage ou voire même dans le cas des chocs répétés de type tir canon, des processus stochastiques à part entière. De ce fait, les marqueurs d'état de santé de type SRE et SDF sont des variables aléatoires uni-variées, que l'on se doit de caractériser en terme de densité de probabilité et/ou de fonction de répartition. Pour ce faire, on vient mettre en place un processus d'analyse statistique, « local-global » permettant d'estimer respectivement (Figures 9.1 et 9.2) :

- 344 • la statistique locale des processus mesurés in-situ sur la durée de bloc T_b , requise par la méthode MBD,
- 345 • et la statistique globale de ces mêmes processus sur une durée de sollicitation cible, qui correspond à la durée de projection d'emploi, pour laquelle on souhaite estimer les valeurs de $SRE_{projetée}$ et de $SDF_{projetée}$.
- 346

347 Dans le cas des vibrations de roulage, cette durée T_b correspond en fait à la durée d'analyse locale de la méthode MBD avec laquelle on vient scruter la non-stationnarité et la non-gaussiannité du processus de sollicitation, mesuré par le capteur d'accélération et positionné au pied de l'équipement monitoré. Par contre pour le cas des chocs induits par le tir canon, cette durée T_b correspond tout simplement à la durée du choc mesuré, dont il faut analyser la variabilité sur plusieurs tirs. Ainsi la projection d'emploi peut être définie en terme de durée (ou de potentiel kilométrique) pour le cas des situations de roulage, voire en terme de nombre de chocs (ou de munitions) pour le cas des situations de tir canon gros ou moyen calibre.



353 Figure 9.1: Etapes (1 à 4) de la modélisation statistique locale de la méthode MBD.



355 Figure 9.2: Etapes (5 à 8) de la modélisation statistique globale de la méthode MBD.

357 Il est à noter que ce processus d'analyse statistique « local-global » est réalisé pour chaque système à 1ddl (f_0, Q) caractérisé
 358 par sa fréquence propre f_0 et son facteur de surtension Q . Pour ce faire, sur l'excitation vibratoire $\gamma(t)$ mesurée par le capteur
 359 accélérométrique de surveillance, on vient calculer en temps réel le déplacement relatif $z(t)$ situé entre la masse oscillante et la
 360 base du système étalon considéré, en utilisant les algorithmes récurrents très répandus de D.O. Smallwood [27].

361 Chaque réponse $z(t)$ est ensuite découpée en n blocs disjoints de durée T_b , sur lesquels on relève les valeurs maximales
 362 $\{Z_{\max,j}, j=1 \text{ à } n\}$ et d'endommagement par fatigue $\{D_{p,j}, j=1 \text{ à } n\}$, calculées par la méthode Rain Flow Counting (RFC). Ces
 363 deux n -échantillons associés aux variables aléatoires locales d'intérêt Z_{\max} et D_p , sont ensuite inférés par la méthode des L-
 364 moments, qui est ici la méthode de modélisation statistique retenue par l'auteur, dans la mesure où elle permet de caractériser
 365 une classe de variables beaucoup plus large que les méthodes traditionnelles, basées sur les moments conventionnels (C-
 366 moments). Cette propriété est essentielle dans le cas de l'approche MBD, qui est très largement confrontée à des lois de
 367 distribution à queues épaisses (cas des sollicitations de roulage tout-terrain, mixant vibrations large bande et chocs
 368 impulsionsnels de forts niveaux).

369 Comme démontré par J.R.M Hosking, les L-moments de tout ordre existent dès lors que la loi de distribution retenue
 370 possède une moyenne (espérance mathématique d'ordre 1) de valeur finie [28]. De façon plus formelle, une loi de distribution
 371 dont sa valeur moyenne existe, est caractérisable de façon unique par ses L-moments d'ordre r , notés λ_r , et définis comme une
 372 combinaison linéaire des espérances mathématiques associées aux statistiques d'ordre de la variable aléatoire d'intérêt X (avec
 373 dans le cas présent $X=Z_{\max}$ ou $X=D_p$). En notant $X_{i:n}$, la i ème statistique d'ordre d'un n -échantillon aléatoire, associé à la
 374 variable aléatoire X , de fonction de répartition marginale $F(x)$, le L-moment d'ordre r de X , peut alors écrire :

$$\lambda_r = r^{-1} \cdot \sum_{k=1}^{r-1} (-1)^k \cdot \binom{r-1}{k} \cdot E[X_{r-k:r}]$$

avec : $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n-k)!}$ pour $r \geq 1$ (8)

375 avec d'après l'ouvrage de H. A. David [29], une formulation de $E[X_{r:n}]$ définie par l'expression intégrale bornée suivante, à
 376 savoir :

$$E[X_{r:n}] = \frac{n!}{(r-1)! \cdot (n-r)!} \cdot \int_{F=0}^1 x(F) \cdot F^{r-1} \cdot [1-F]^{n-r} \cdot dF \quad (9)$$

378 En injectant l'équation (9) dans l'équation (8), on obtient après plusieurs simplifications l'expression λ_r suivante :

$$\lambda_r = \int_{F=0}^1 x(F) \cdot P_{r,j}^*(F) \cdot dF \quad \text{pour } r \geq 1 \quad (10)$$

381 où,

$$P_{r,j}^*(F) = \sum_{j=0}^r p_{r,j}^* \cdot F^j \quad \text{pour } r \geq 1$$

avec $p_{r,j}^* = (-1)^{r-j} \cdot \binom{r}{j} \cdot \binom{r+j}{j}$ (11)

382 et où, $P_r^*(F)$ représente le polynôme de Legendre décalé (shifted) d'ordre r .

384 A ce stade, il est également possible d'obtenir une autre écriture de l'expression de λ_r en s'appuyant sur la définition des
 385 moments pondérés de la variable aléatoire X d'intérêt [30], que l'on note $\beta_r = M_{p,r,s}$ pour $p=1$ et $s=0$, à savoir :

$$\begin{cases} M_{p,r,s} = E[X^p \cdot [F(X)]^r \cdot [1-F(X)]^s] & \text{pour } p, r, s \in \mathbb{N} \\ \beta_r = M_{p,r,s} & \text{avec } p = 1 \text{ et } s = 0 \end{cases} \quad (12)$$

386 Les quatre premiers L-moments $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et λ_4 peuvent donc s'écrire comme suit :

$$\begin{cases} \lambda_1 = \beta_0 \\ \lambda_2 = 2 \cdot \beta_1 - \beta_0 \\ \lambda_3 = 6 \cdot \beta_2 - 6 \cdot \beta_1 + \beta_0 \\ \lambda_4 = 20 \cdot \beta_3 - 30 \cdot \beta_2 + 12 \cdot \beta_1 - \beta_0 \end{cases} \quad (13)$$

388 Afin de comprendre la forme de la loi de distribution de la variable d'intérêt X , J.R.M. Hosking et J.R. Wallis ont introduit
 389 la notion de rapport des L-moments, noté τ_r pour $r \geq 3$, à savoir [31] :

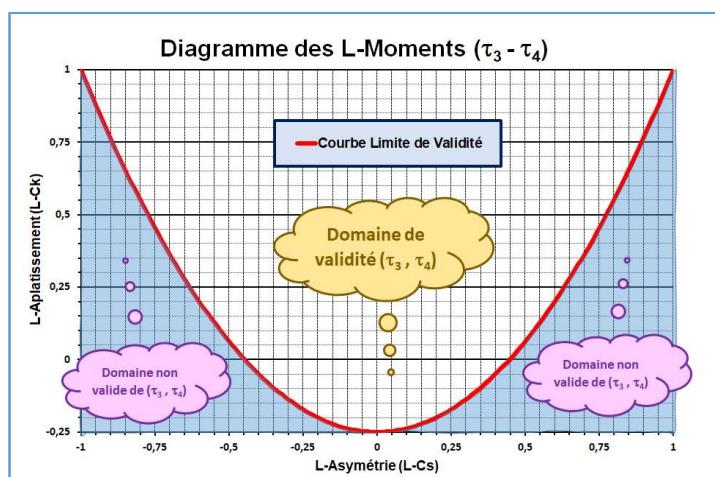
$$\begin{cases} \tau_r = \lambda_r / \lambda_2 & \text{pour } r \geq 3 \\ \text{avec } \tau_r \in [-1, +1] \end{cases} \quad (14)$$

391

392 Les rapports des L-moments τ_3 et τ_4 sont dénommés respectivement L-Asymétrie (L-Cs) et L-Aplatissement (L-Ck) et
 393 permettent de caractériser la forme de la loi de distribution sur sa partie centrale et sur sa queue de distribution, à l'instar des
 394 paramètres d'asymétrie (Skew) et d'aplatissement (Kurtosis) calculés couramment par la théorie des moments conventionnels
 395 (C-moments). Selon ces mêmes auteurs, les lois de distribution des variables aléatoires satisfont obligatoirement les relations
 396 d'ordre suivantes, à savoir :

$$\frac{1}{4} \cdot (5 \cdot \tau_3^2 - 1) \leq \tau_4 < 1 \quad (15)$$

397
 398 Dans un diagramme de rapports de L-moments (τ_3 , τ_4), l'équation (15) précédente définit le domaine de validité de ces
 399 deux rapports τ_3 et τ_4 , et ceci quelle que soit la loi de distribution considérée. Ce domaine de validité est matérialisée en partie
 400 basse par la courbe limite de validité : $\tau_4 = 1,25 \cdot (\tau_3)^2 - 0,25$ (courbe parabolique), et en partie haute par la droite asymptotique :
 401 $\tau_4 = +1$ comme indiqué sur la Figure 10 suivante.



402
 403 Figure 10: Domaine de validité du diagramme des rapports de L-moments (τ_3 , τ_4)

404 Ainsi pour caractériser au mieux la statistique locale des n-échantillons aléatoires des variables Z_{\max} et D_p ainsi calculées, il
 405 est apparu important de proposer désormais une base de données de LAP (Lois A Priori) à 4 paramètres, plutôt qu'à 2 ou 3
 406 paramètres, comme dans le cas de la norme NF X50-144-3. Le choix de l'auteur s'est alors porté sur le cas de la loi KAPPA(ξ ,
 407 α , k , h) avec $\xi \in \mathbb{R}$, $\alpha > 0$, $k > -1$, $h > -1$ et ($h \cdot k > -1$ si $h < 0$), qui possède l'avantage d'avoir des expressions explicites pour ses
 408 quatre premiers L-moments [31], définis en termes de λ_1 , λ_2 , τ_3 et τ_4 , à savoir :

$$\lambda_1 = \xi + \alpha \cdot (1 - g_1) / k \quad (16) \quad \lambda_2 = \alpha \cdot (g_1 - g_2) / k \quad (17)$$

$$\tau_3 = \frac{(-g_1 + 3 \cdot g_2 - 2 \cdot g_3)}{(g_1 - g_2)} \quad (18) \quad \tau_4 = \frac{(g_1 - 6 \cdot g_2 + 10 \cdot g_3 - 5 \cdot g_4)}{(g_1 - g_2)} \quad (19)$$

409
 410
 411 Avec pour fonction $g_r(k, h)$, l'expression suivante, à savoir:

$$g_r = \begin{cases} r \cdot h^{-(k+1)} \cdot B\left(\frac{r}{h}, k+1\right) & \text{si } h > 0 \text{ et } k > -1 \quad (20.1) \\ r^{-k} \cdot \Gamma(1+k) & \text{si } h = 0 \text{ et } k > -1 \quad (20.2) \\ r \cdot (-h)^{-(k+1)} \cdot B\left(-\frac{r}{h} - k, k+1\right) & \text{si } h < 0 \text{ et } -1 < k < -\frac{1}{h} \quad (20.3) \end{cases}$$

$$B(a, b) = \frac{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)}{\Gamma(a+b)} \quad \text{pour } a > 0 \text{ et } b > 0 \quad \Gamma(a) = \int_{t=0}^{+\infty} t^{a-1} \cdot \exp(-t) \cdot dt \quad \text{pour } a > 0$$

412
 413 où $B(a, b)$: fonction Béta (21) où $\Gamma(a)$: fonction Gamma (22)

414 Nota : L'expression de τ_4 présentée par l'auteur est identique au signe près à celle proposée par J.R.M Hosking et J.R
 415 Wallis dans leur ouvrage [31] Annexe A10 : Kappa distribution, formulation A100.

416 Le domaine de validité de cette loi KAPPA, en termes de paramètres de forme (k, h) est fourni à la Figure 11 qui suit et est
 417 ici plus large que celle définie par J.R.M Hosking [31] permettant une meilleure inférence statistique de la loi KAPPA ainsi
 418 définie par l'auteur :

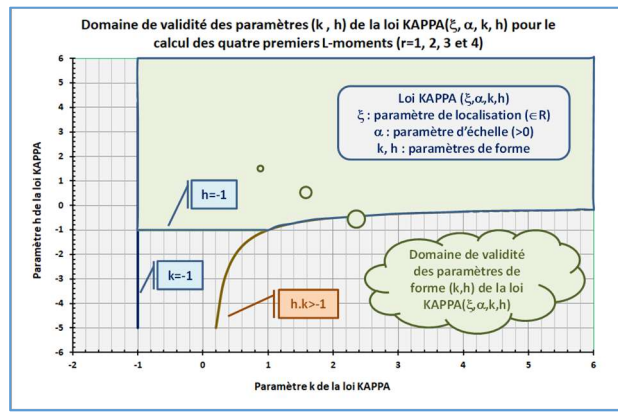


Figure 11: Domaine de validité des paramètres de forme (k,h) de la loi KAPPA à 4 paramètres

Ainsi en s'appuyant sur les équations (18), (19) et (20.1, 20.2, 20.3), on constate que la loi KAPPA(ξ, α, k, h) à 4 paramètres est caractérisable par une infinité de courbes polynomiales d'ordre 6, dans le diagramme des L-moments (τ_3, τ_4), permettant de balayer la partie basse du domaine de validité. Ce travail a été réalisé par l'auteur pour un domaine de définition du paramètre de forme h de la loi KAPPA, allant de [-1 à 2, avec $\Delta h=0,25$], puis de [2 à 10, avec $\Delta h=0,5$] comme le montre la Figure 12. La formulation polynomiale et les valeurs de ses coefficients A_i sont fournies respectivement dans l'équation (23) et les Tableaux 2.1 et 2.2 qui suivent, à savoir :

$$\tau_4 = \sum_{i=0}^6 A_i \cdot (\tau_3)^i \quad (23)$$

Tableau 2.1: Coefficients A_i pour h=-1 à 2 et $\Delta h=0,25$

Approche polynomiale de τ_4 en fonction de τ_3 : $\tau_4 = A_0 + A_1 \cdot (\tau_3) + A_2 \cdot (\tau_3)^2 + \dots + A_6 \cdot (\tau_3)^6$								
Type de Lois	GLO	KAPPA	KAPPA	KAPPA	GEV	KAPPA	KAPPA	
Indice (i)	Coefficients polynomiaux	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5
0	A_0	1,6667E-01	1,5992E-01	1,4795E-01	1,3006E-01	1,0701E-01	8,0579E-02	5,3019E-02
1	A_1	0,0000E+00	2,0773E-02	4,6825E-02	7,7449E-02	1,1090E-01	1,4139E-01	1,6722E-01
2	A_2	8,3333E-01	8,3183E-01	8,3277E-01	8,3872E-01	8,4838E-01	8,6754E-01	8,9278E-01
3	A_3	0,0000E+00	-1,4985E-02	-2,8187E-02	-4,1256E-02	-6,6689E-02	-9,6186E-02	-1,3188E-01
4	A_4	0,0000E+00	4,4527E-03	3,7919E-03	-2,7315E-03	5,6733E-03	1,5172E-02	3,0095E-02
5	A_5	0,0000E+00	-5,7215E-03	-1,8231E-02	-3,4998E-02	-4,2077E-02	-4,4174E-02	-3,4805E-02
6	A_6	0,0000E+00	3,7688E-03	1,5283E-02	3,3241E-02	3,7622E-02	1,1147E-02	2,3856E-02
Type de Lois	KAPPA	KAPPA	GPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	
Indice (i)	Coefficients polynomiaux	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
0	A_0	5,3019E-02	2,5845E-02	0,0000E+00	-2,4017E-02	-4,1762E-02	-6,5883E-02	-8,3766E-02
1	A_1	1,6722E-01	1,8671E-01	1,9997E-01	2,0767E-01	2,1044E-01	2,1009E-01	2,0663E-01
2	A_2	8,9278E-01	9,2428E-01	9,6001E-01	9,9782E-01	1,0282E+00	1,0721E+00	1,1061E+00
3	A_3	-1,3188E-01	-1,6491E-01	-1,9175E-01	-2,1092E-01	-2,2068E-01	-2,2691E-01	-2,2564E-01
4	A_4	3,0095E-02	3,8662E-02	3,8335E-02	2,9691E-02	1,8330E-02	-3,1729E-02	-2,2716E-02
5	A_5	-3,4805E-02	-2,1626E-02	-8,2064E-03	3,2187E-03	1,0214E-02	1,6826E-02	1,9051E-02
6	A_6	2,3856E-02	1,1147E-02	1,6538E-03	-3,4897E-03	-4,7598E-03	-3,0839E-03	3,6952E-04

Tableau 2.2: Coefficients A_i pour h=2 à 10 et $\Delta h=0,5$

Approche polynomiale de τ_4 en fonction de τ_3 : $\tau_4 = A_0 + A_1 \cdot (\tau_3) + A_2 \cdot (\tau_3)^2 + \dots + A_6 \cdot (\tau_3)^6$										
Type de Lois	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	
Indice (i)	Coefficients polynomiaux	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
0	A_0	-8,3766E-02	-1,1403E-01	-1,3801E-01	-1,5698E-01	-1,7203E-01	-1,8401E-01	-1,9369E-01	-2,0141E-01	-2,0786E-01
1	A_1	2,0663E-01	1,9413E-01	1,7774E-01	1,6202E-01	1,4298E-01	1,2681E-01	1,1214E-01	9,9105E-02	8,7532E-02
2	A_2	1,1061E+00	1,1642E+00	1,2083E+00	1,2398E+00	1,2615E+00	1,2755E+00	1,2847E+00	1,2879E+00	1,2908E+00
3	A_3	-2,2564E-01	-2,1079E-01	-1,8636E-01	-1,5834E-01	-1,3023E-01	-1,0369E-01	-7,9992E-02	-5,9514E-02	-4,1778E-02
4	A_4	-2,2716E-02	-5,8569E-02	-8,4375E-02	-9,8931E-02	-1,0438E-01	-1,0282E-01	-9,8236E-02	-8,6170E-02	-7,7891E-02
5	A_5	1,9051E-02	1,6706E-02	8,5941E-03	-1,9890E-03	-1,2992E-02	-2,3459E-02	-3,2538E-02	-4,0017E-02	-4,6181E-02
6	A_6	3,6952E-04	8,3917E-03	1,4117E-02	1,6086E-02	1,4905E-02	1,1291E-02	7,1418E-03	-5,2826E-04	-5,2634E-03
Type de Lois	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	KAPPA	
Indice (i)	Coefficients polynomiaux	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
0	A_0	-2,0786E-01	-2,1311E-01	-2,1747E-01	-2,2112E-01	-2,2422E-01	-2,2683E-01	-2,2904E-01	-2,3095E-01	-2,3256E-01
1	A_1	8,7532E-02	7,7501E-02	6,8734E-02	6,1228E-02	5,4404E-02	4,8613E-02	4,3480E-02	3,9255E-02	3,5268E-02
2	A_2	1,2908E+00	1,2905E+00	1,2891E+00	1,2872E+00	1,2845E+00	1,2817E+00	1,2787E+00	1,2755E+00	1,2726E+00
3	A_3	-4,1778E-02	-2,7238E-02	-1,5206E-02	-6,1299E-03	2,9170E-03	9,3625E-03	1,4835E-02	1,8365E-02	2,1729E-02
4	A_4	-7,7891E-02	-6,5948E-02	-5,4175E-02	-4,4508E-02	-3,3050E-02	-2,3832E-02	-1,5059E-02	-6,5440E-03	6,6136E-04
5	A_5	-4,6181E-02	-5,0661E-02	-5,3877E-02	-5,5398E-02	-5,7540E-02	-5,8092E-02	-5,8367E-02	-5,7575E-02	-5,6884E-02
6	A_6	-5,2634E-03	-1,1705E-02	-1,7709E-02	-2,1840E-02	-2,7478E-02	-3,1304E-02	-3,4886E-02	-3,8212E-02	-4,0292E-02

Ceci montre donc clairement que la loi KAPPA(ξ, α, k, h) est complètement adaptée pour modéliser le comportement statistique de variables aléatoires X , caractérisées par un n-échantillon empirique $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ qu'il convient d'ordonner pour en calculer ses quatre premiers L-moments empiriques, l_1, l_2, l_3 et l_4 , avec dans le cas présent $X=Z_{\max}$ ou $X=D_p$.

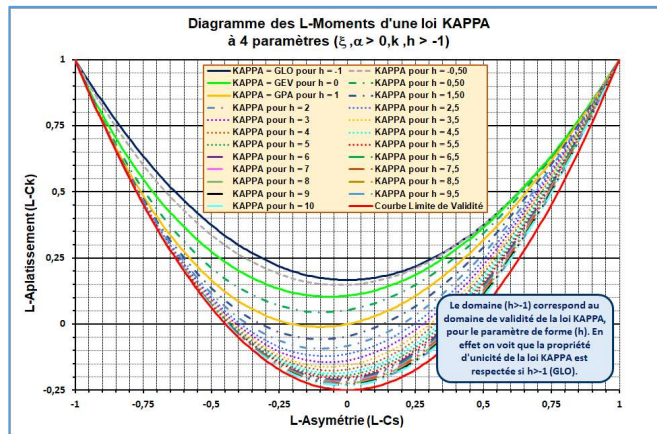


Figure 12: Loi KAPPA à 4 paramètres pour h=-1 à 10 dans un diagramme de L-moments (τ_3, τ_4)

435 Les quatre premiers L-moments empiriques du n-échantillon aléatoire ordonné $\{X_{1:n}, X_{2:n}, X_{3:n}, \dots, X_{n:n}\}$ sont estimés à
 436 partir de l'estimateur non biaisé des moments pondérés β_r , à savoir [31] :

$$\begin{cases} \hat{\beta}_r = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{\binom{k-1}{r}}{\binom{n-1}{r}} \cdot X_{1:k} \\ \text{avec } \binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(n-k+1) \cdot \Gamma(k+1)} \end{cases} \quad (24)$$

437
 438 d'où le moment pondéré empirique b_r :

$$b_r = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \frac{(k-1) \cdot (k-2) \dots (k-r)}{(n-1) \cdot (n-2) \dots (n-r)} \cdot x_{k:n} \quad (25)$$

439 Ainsi en injectant (25) dans (13), on obtient les quatre premiers L-moments empiriques,

$$\begin{cases} l_1 = b_0 \\ l_2 = 2 \cdot b_1 - b_0 \\ l_3 = 6 \cdot b_2 - 6 \cdot b_1 + b_0 \\ l_4 = 20 \cdot b_3 - 30 \cdot b_2 + 12 \cdot b_1 - b_0 \end{cases} \quad (26)$$

441 ce qui permet de calculer les rapports de L-moments empiriques t_3 et t_4 , en s'appuyant sur (14) et (26), à savoir :

$$\begin{cases} t_3 = \frac{l_3}{l_2} \quad \text{et} \quad t_4 = \frac{l_4}{l_2} \\ \text{avec } t_3 \quad \text{et} \quad t_4 \in [-1, +1] \end{cases} \quad (27)$$

442
 443 Pour chaque système à 1 ddl (f_0, Q) , on vient donc estimer les rapports empiriques de L-moments (t_3, t_4) , que l'on positionne
 444 alors sur le diagramme de L-moments comprenant l'ensemble des polynômes d'ordre 6 associé à la loi KAPPA (ξ, α, k, h) .
 445 L'ajustement du modèle statistique de la loi KAPPA s'effectue au moyen d'une procédure d'optimisation décrite par l'équation
 446 (28), permettant de retenir la valeur h^* du modèle paramétrique recherché. Cette valeur h^* est ici obtenue en utilisant un critère
 447 de minimisation de la distance euclidienne entre le point analytique (τ_3, τ_4) de la loi KAPPA à 4 paramètres et le point
 448 empirique (t_3, t_4) du n-échantillon aléatoire observé.

$$\begin{cases} h^* = \underset{h \in [-1, 10]}{\operatorname{argmin}} \{ [\tau_3(h) - t_3]^2 + [\tau_4(h) - t_4]^2 \}^{1/2} \\ \text{avec } \tau_4(h) = \sum_{i=0}^6 A_i \cdot [\tau_3(h)]^i \end{cases} \quad (28)$$

449
 450
 451 Connaissant la valeur du paramètre de forme h^* , il est alors possible d'évaluer le point d'optimisation (τ_3^*, τ_4^*) du modèle
 452 statistique de la loi KAPPA, sachant que :

$$\tau_3^* = \tau_3(h^*) \quad \text{et} \quad \tau_4^* = \tau_4(h^*) = \sum_{i=0}^6 A_i \cdot [\tau_3^*]^i \quad (29)$$

453
 454 Il convient désormais d'évaluer les valeurs des 3 autres paramètres (ξ^*, α^*, k^*) du modèle statistique, associé à la loi
 455 KAPPA, dont la formulation en terme de fonction de répartition $F(x)$ et de fonction quantile $x(F)$ sont définies par les équations
 456 (30) et (31) qui suivent.

$$F(x) = \left[1 - h \cdot \left\{ 1 - k \cdot \frac{(x - \xi)}{\alpha} \right\}^{1/k} \right]^{1/h} \quad (30) \quad x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{1 - F^h}{h} \right)^k \right\} \quad (31)$$

457
 458 En s'appuyant sur les équations (18), (20.1), (20.2) et (20.3), on peut écrire :

$$g_1^* \cdot (\tau_3^* + 1) - g_2^* \cdot (\tau_3^* + 3) + 2 \cdot g_3^* = 0$$

Avec : $g_r^* = g_r(k^*, h^*)$ défini par (20.1)
 ou (20.2) ou (20.3) selon le signe de h^* (32)

459
 460 Ainsi, la valeur du paramètre de forme k^* est obtenue en résolvant l'équation (32) par dichotomie et donc en utilisant un
 461 algorithme de type Newton-Raphson. Connaissant désormais (k^*, h^*) , il est facile d'obtenir la valeur du paramètre d'échelle α^* ,
 462 en s'appuyant sur (17), à savoir :

$$\alpha^* = k^* \cdot l_2 / (g_1^* - g_2^*) \quad (33)$$

Avec : $g_r^* = g_r(k^*, h^*)$ défini par
 (20.1) ou (20.2) ou (20.3) selon le signe de h^*

463

464 Et pour finir, la valeur du paramètre de localisation ξ^* est obtenue en s'appuyant sur (16), à savoir :

$$\xi^* = l_1 - (\alpha^*/k^*) \cdot (1 - g_1^*) \quad (34)$$

Avec : $g_r^* = g_r(k^*, h^*)$ défini par

(20.1) ou (20.2) ou (20.3) selon le signe de h^*

465

466 Connaissant les 4 paramètres $(\xi^*, \alpha^*, k^*, h^*)$ des lois locales LAR (Lois A Retenir), associées aux variables aléatoires Z_{\max} et
467 D_p , de type loi KAPPA, il devient désormais possible d'évaluer la statistique des variables aléatoires globales Z_{\sup} et D_c ,
468 correspondant respectivement aux concepts probabilistes de type SRE et SDF [26]. Pour ce faire, on va s'appuyer sur les
469 fondements statistiques de type (TVE : Théorie des valeurs Extrêmes) et (TCL : Théorème Central limite) introduits
470 historiquement par l'auteur dans le cadre de la méthode MBD [24] et [25].

471 A ce stade, il s'agit donc de passer du modèle statistique local associé à la durée de bloc T_b , au modèle statistique global de
472 durée T_{Pj} (durée de ProJection), où T_b/T_{Pj} correspond au coefficient M d'extrapolation temporelle, fixé par l'opérationnel, dès
473 lors que ce dernier souhaite évaluer si cette projection est réalisable sur son matériel en OPEX, compte tenue de la marge
474 estimée en temps réel entre les marqueurs d'état de santé seuil ($SRE_{\text{seuil}}, SDF_{\text{seuil}}$) et leurs valeurs courantes
475 ($SRE_{\text{courant}}, SDF_{\text{courant}}$).

476 Ainsi, en supposant que les M variables aléatoires locales $\{Z_{\max,i}$ pour $i=1$ à $M\}$ sont indépendantes et identiquement
477 distribuées (i.i.d), on peut écrire d'emblée :

$$\begin{cases} Z_{\sup} = \text{MAX}_{i \in [1, M]} Z_{\max, i} \\ \text{et } F_{Z_{\sup}}(z) = [F_{Z_{\max}}(z)]^M \end{cases} \quad (35)$$

478

479 De même, en supposant que les M variables aléatoires locales $\{D_{p,j}$ pour $j=1$ à $M\}$ sont indépendantes et identiquement
480 distribuées (i.i.d), on peut là encore écrire d'emblée :

$$D_c = \text{SOM}_{j \in [1, M]} D_{p,j} = \sum_{j=1}^M D_{p,j} \quad (36)$$

481

482 En optant pour une projection d'emploi de durée $T_{Pj} \gg T_b$ de sorte que M soit grand ($M > 100$), il est possible d'appliquer la
483 Théorie des Valeurs Extrêmes qui repose sur le théorème fondamental de Fisher-Tippett [32] et de Gnedenko [33], permettant
484 d'estimer l'expression analytique de la loi statistique asymptotique de la variable aléatoire globale Z_{\sup} . Connaissant désormais
485 la loi statistique de la variable aléatoire locale Z_{\max} , définie dans le cas présent par une loi unique de type
486 KAPPA($\xi^*, \alpha^*, k^*, h^*$), on peut effectivement montrer, en s'appuyant sur l'étude du domaine d'attraction de la loi KAPPA, que
487 le modèle statistique de la variable aléatoire globale Z_{\sup} tend asymptotiquement (M grand) vers :

- 488 • une loi de Gumbel (EV1) à queue fine, si la valeur du paramètre de forme k^* est nulle ($k^*=0$),
- 489 • une loi de Fréchet (EV2) à queue épaisse, si la valeur du paramètre de forme k^* est à valeur négative ($k^*<0$),
- 490 • une loi de Weibull Négative (EV3), si la valeur du paramètre de forme k^* est à valeur positive ($k^*>0$).

491 En ce qui concerne par contre la variable aléatoire locale D_p , qui elle-même est calée sur une loi LAR de type
492 KAPPA($\xi^*, \alpha^*, k^*, h^*$), on peut montrer d'après le Théorème Central Limite que la variable aléatoire globale D_c tend
493 asymptotiquement (M grand) vers :

- 494 • une loi de Normale (GAUSS) à queue fine, dès que le coefficient d'extrapolation temporel M est supérieure à 30,

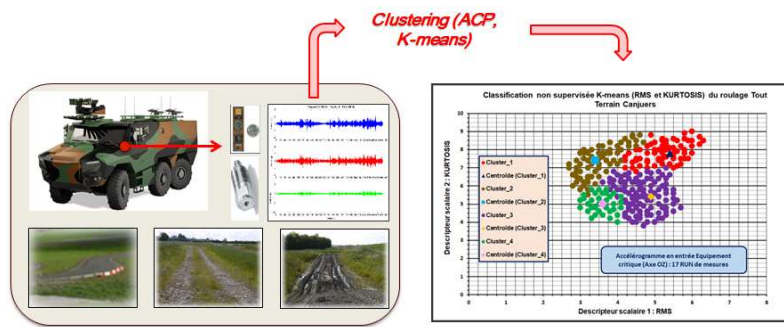
495 L'intérêt donc de s'appuyer désormais sur une loi unique de type KAPPA pour cette approche MBD réside dans le fait,
496 qu'elle permet certes de couvrir un domaine important du diagramme des L-moments (Figure 12), mais surtout de satisfaire à
497 l'ensemble des principes statistiques des théories TVE et TCL en convergeant vers les 4 lois asymptotiques précédentes sur
498 lesquelles repose la MBD ([24], [25] et [26]).

499 B. Synthèse stochastique

500 Les conditions de roulage et de tir canon subies par les équipements critiques en situation OPEX n'étant pas stationnaires et
501 homogènes, il est important de pouvoir les classifier en temps réel, afin d'estimer les modèles prédictifs des marqueurs d'états
502 de santé de type SRE-SDF. L'état de santé des équipements critiques nécessite donc de savoir :

503 • **classifier l'usage du système d'armes terrestre** sur lequel sont intégrés les équipements critiques [21]. Cette
504 classification est réalisée en s'appuyant sur les techniques d'IA (Intelligence Artificielle) non supervisées de type K-means que
505 l'on applique sur la mesure d'accélération des capteurs de surveillance, dont les descripteurs statistiques (RMS, FC, SKEW,
506 KURTOSIS, FI) sont traités par ACP (Analyse en Composantes Principales) pour ne conserver que les composantes les plus
507 pertinentes lors de cette classification (Figure 13),

508 • **synthétiser le caractère probabiliste des marqueurs d'états de santé de type SRE et SDF** pour chaque cluster
509 identifié précédemment et que l'on obtient à l'aide des principes statistiques de la MBD, rappelées au §IV.A ci-dessus.



510

511

Figure 13: Classification de l'usage opérationnel des systèmes d'armes terrestres pour chaque capteur de surveillance.

512

Le clustering est une technique d'apprentissage automatique de l'IA permettant de regrouper des données par distance ou par similarité. Concrètement, ces algorithmes non supervisés repèrent des similarités dans les données pour pouvoir ensuite les structurer en différents clusters, dont on limite ici volontairement le nombre, pour éviter des calculs trop lourds tout en assurant par la métrique de classification, l'homogénéité statistique des données classifiées pour chacun des clusters identifiés. Cette phase est fondamentale pour l'approche MBD et doit être réalisée en utilisant des descripteurs métiers pertinents pour chacun des blocs de données de durée T_b que l'on doit particulariser en fonction de la nature de la situation opérationnelle à analyser. En effet, une situation opérationnelle de tir canon en mode coup par coup ou en mode rafale ne sera pas classifiée par les mêmes descripteurs statistiques que ceux utilisés pour les situations opérationnelles de type roulage, comme présenté précédemment.

521

Ainsi dans le cas des munitions AT4F2 développées par SAAB, dont les marqueurs d'état de santé seuil ont été évalués au §III.C, il devient alors possible, pour un système d'armes terrestre sur lequel sont transportés ces munitions, d'identifier en temps réel les clusters d'usage auxquels ils sont confrontés en situation de roulage sur terrains variés. Cette analyse d'usage a été menée par KNDS France à la suite d'essais de roulage sur terrains variés d'une longueur de 457km. Le capteur de surveillance, positionné aux points de fixation des munitions dans leur casier a permis de mettre en évidence 4 clusters, alors que le nombre limite de cluster était fixé forfaitairement à 5.

527

Par souci de simplification, cette analyse d'usage a été ici réalisée à l'aide uniquement de 2 descripteurs statistiques (RMS et KURTOSIS) sur un ensemble de 415 blocs de données, de durée constante T_b égale à 3mn. Le réglage de la durée T_b est bien évidemment à réaliser en fonction de la nature des situations d'usage à monitorer et surtout du caractère impulsionnel de ces dernières. Une détection de franchissement de seuil est intégrée au capteur de surveillance afin d'adapter localement la durée T des blocs de données, acquis par ce dernier.

532

Par ailleurs, il est à noter que l'emplacement du capteur de surveillance constitue un élément important à prendre en compte pour estimer une extrapolation d'emploi correcte au niveau des équipements ainsi monitorés. En effet, il est ici nécessaire de positionner le capteur de surveillance potentiellement au même endroit que celui retenu par l'équipementier SAAB lors des essais menés au stade du PGQE, sachant que dans le cas des munitions, les capteurs de surveillance devront à terme être intégrés au cœur du concept munitionnaire dans la mesure où ces dernières ne restent pas intégrées sur un même porteur avant d'être tirées.

538

Tableau 3: Caractérisation des clusters, associés à l'usage de type roulage, en terrains variés

Caractérisation des clusters non supervisés obtenus par la méthode K-means					
Nature des Clusters concernés	Caractérisation des Clusters	Nombre de blocs de durée T_b	Vitesse moyenne en Km/h	Centroïde des Clusters	
				Descripteur Scalaire 1 : RMS	Descripteur Scalaire 2 : KURT
Cluster_1	Rugosité moyenne	57	12	5,4	7,8
Cluster_2	Rugosité moyenne	82	15	3,4	7,4
Cluster_3	Rugosité faible	155	31	4,9	5,4
Cluster_4	Rugosité faible	121	20	3,6	5

Nota : La durée T_b est ici de 3 mn (soit 180 secondes)

539

Connaissant désormais la nature probabiliste des lois locales associées à ces deux marqueurs, et qui comme présenté au §IV.A sont définies par des lois KAPPA à 4 paramètres, il devient ensuite facile d'en dériver les modèles statistiques globaux pour une projection cible donnée. Dans le cas présent, l'extrapolation d'emploi est définie par le chef d'engin en définissant cette dernière en terme de potentiel kilométrique, que l'on se doit de convertir en durée pour revenir à la détermination du coefficient d'extrapolation temporelle M_i , associé à chacun des 4 clusters $\{C_i$ pour $i=1$ à $4\}$. Ainsi pour un objectif cible de 10000km, le coefficient M à retenir pour chaque cluster est :

546

- $M=1247$ pour le Cluster C_1 dont l'occurrence temporelle est égale à 13,7%

- **M=1794** pour le Cluster C_2 dont l'occurrence temporelle est égale à 19,8%
- **M=3392** pour le Cluster C_3 dont l'occurrence temporelle est égale à 37,3%
- **M=2647** pour le Cluster C_4 dont l'occurrence temporelle est égale à 29,2%

Cette extrapolation effectuée en durée ou en potentiel kilométrique permet alors de revenir aux différents modèles statistiques recherchés $\{SRE_{C_i}, SDF_{C_i}$ pour $i=1$ à $4\}$, que l'on vient regrouper en s'appuyant sur le processus de synthèse stochastique défini par la Figure 15, et qui considère à juste titre les clusters comme des situations opérationnelles homogènes et réparties séquentiellement en série.

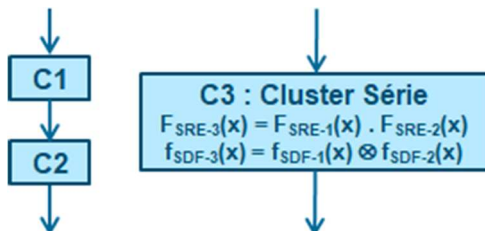


Figure 15: Synthèse stochastique des Clusters, en termes de SRE et de SDF

Au sens du marqueur SRE, la synthèse stochastique SRE_{P_j} des 4 clusters est donc réalisée en faisant le produit de leurs fonctions de répartition, à savoir :

$$F_{SRE_{P_j}}(x) = \prod_{i=1}^4 F_{SRE_{C_i}}(x) \quad (37)$$

Par contre, au sens du marqueur SDF, la synthèse stochastique SDF_{P_j} des 4 clusters est à réaliser en faisant le produit de convolution de leurs densités de probabilité, sachant qu'au sens de la loi d'accumulation de Miner (retenue comme hypothèse de base dans la méthode MBD), les variables aléatoires d'endommagement par fatigue s'additionnent. On obtient donc la formulation probabiliste suivante.

$$f_{SDF_{P_j}}(x) = [f_{SDF_{C_1}}(x)] \otimes [f_{SDF_{C_2}}(x)] \otimes [f_{SDF_{C_3}}(x)] \otimes [f_{SDF_{C_4}}(x)] \quad (38)$$

L'extrapolation probabiliste sur la cible opérationnelle de 10000km étant désormais acquise, il ne reste donc plus qu'à estimer les valeurs de quantile à risque de dépassement α (où α correspond au risque associé à l'équipement critique considéré, soit $\alpha=0,1\%$ pour le cas des munitions AT4F2) des marqueurs d'endommagement SRE et SDF, que l'on vient ensuite comparer à ces mêmes valeurs de quantile pour les marqueurs seuils définis au §III.C. Dans le cas présent, on montre que l'objectif cible de 10000km est tout à fait atteignable au sens des deux marqueurs d'endommagement considérés, avec une marge d'emploi opérationnelle qui est de 37583km en SRE (en contrainte extrême) et de 54891km en SDF (en dommage par fatigue).

V. CONCLUSIONS

Le monitoring de l'état de santé des équipements critiques sur des systèmes d'armes complexes comme ceux développés par KNDS France constitue un enjeu majeur pour les armées. Cette surveillance, réalisée au cours du cycle de vie des systèmes, permet en effet de maximiser le temps de fonctionnement des équipements embarqués, et d'augmenter la durée de vie de ses systèmes d'armes, avec à la clé une optimisation et une réduction des coûts de maintenance pour KNDS France et ses clients.

Face à ces objectifs technico-économiques, il était donc important de pouvoir favoriser la mise en place d'une politique de maintenance conditionnelle, pouvant évoluer favorablement vers le prévisionnel, et plus spécifiquement vers le Prognostic and Health Management (PHM). La stratégie PHM de KNDS France s'inscrit favorablement dans le cadre des méthodes hybrides, dans la mesure où les dysfonctionnements des équipements critiques constatés en utilisation opérationnelle sont difficilement accessibles par les approches classiques, basées sur les modèles physiques des modes de dégradation ou sur les modèles de données (data driven) pratiqués par un grand nombre d'industriels.

La technique HUMS équipements développée par KNDS France est basée sur le monitoring de marqueurs d'endommagement fiables, et calculables en temps réel à partir de capteurs accélérométriques connectés, que l'on vient comparer à des seuils de conception et de validation connus et acquis expérimentalement pendant la phase de qualification des équipements. Ces indicateurs de santé de type Spectre de Réponses Extrêmes (SRE) et Spectre d'endommagement par fatigue (SDF) sont ceux préconisés par les techniques d'essais personnalisés du référentiel Français AFNOR NF X50-144-3, promulgué en janvier 2021, et qui sont calculables par la méthode des blocs disjoints (MBD), introduite par KNDS France dans le référentiel Normatif Français sur la décennie des années 2010-2020. Introduit récemment dans les normes internationales de l'OTAN et de l'AED, ce référentiel normatif français devient une réelle référence normative dans le monde de l'ingénierie d'essais dual civil/militaire, qui est de nature désormais à favoriser grandement l'émergence des technologies de surveillance présentées dans le cadre de cet article.

Ces travaux sur le « HUMS Equipements » de type Hybride ont été récompensés par le Trophée OrNormes 2021 (Catégorie Numérisation Maîtrisée), décerné par l'AFNOR à la société KNDS France le 14 octobre 2021 (Musée des Arts forains, Paris 12e). KNDS France tiens donc à exprimer sa gratitude et ses remerciements à l'AFNOR, ainsi qu'à la DGA qui ont grandement favorisé la mise en place de cette stratégie de maintenance prévisionnelle.

- 599 [1] AFNOR, NF X 50-144-1, Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en
600 environnement - Partie 1 : Bases de la démarche pour la prise en compte de l'environnement général, Juillet 2019.
- 601 [2] AFNOR, NF X 50-144-2, Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en
602 environnement - Partie 2 : Guide de la démarche de personnalisation en environnement, Juillet 2019.
- 603 [3] AFNOR, NF X 50-144-3, Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en
604 environnement - Partie 3 : Application de la démarche de personnalisation en environnement mécanique, Janvier 2021.
- 605 [4] AFNOR, NF X 50-144-5, Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en
606 environnement - Partie 5 : Coefficient de garantie, Juillet 2019.
- 607 [5] AFNOR, NF X 50-144-6, Démonstration de la tenue aux environnements - Conception et réalisation des essais en
608 environnement - Partie 6 : Facteur d'essai, Juillet 2019.
- 609 [6] OTAN, STANAG 4370 Ed. 7, Environmental Testing, 28 November 2019.
- 610 [7] EDSTAR, Expert Group 08 Environmental Testing, Final report, Brussels, 1st of December 2022.
- 611 [8] M. Delaporte, Le MCO Terrestre face à la haute intensité, Conférences Forum Entreprises Défense (FED 2021), Satory
612 les 13 et 14 Octobre 2021.
- 613 [9] Ministère des armées, Loi de programmation militaire 2019-2025, Dossier de presse LPM 2019-2025.
- 614 [10] IGA N. Hué, ICA W. Arnaud, ICA C. Grandemange, Perspectives et ambitions du Maintien en Condition Opérationnelle
615 rénové au cœur de la conduite des Programmes d'Armement : illustrations dans le milieu terrestre, 2018 ISTE
616 OpenScience.
- 617 [11] P. Lelan, B. Colin, La norme AFNOR X50-144-3, une évolution majeure pour la construction de sévérités d'essais
618 vibratoires de qualification, 22ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Im22, Lambda Mu,
619 Octobre 2020, Le Havre.
- 620 [12] B. Colin, Approche de dimensionnement des équipements électroniques, vis à vis des excitations transitoires "Tir Canon"
621 : Démarche intégrée Systémier/Equipementier, Congrès VCB, Lyon 2010.
- 622 [13] DGA, GAM T13, Essais en environnement, Ed. 1976 (déclassifiée en 1982).
- 623 [14] DGA, GAM EG13, Essais généraux d'environnement, Ed. 1986 (déclassifiée en 2009).
- 624 [15] MoD USA, MIL-STD-810H, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, 31 January 2019.
- 625 [16] MoD UK, DEF STAN 00-35, Issue 5, Environmental Handbook for Defence Materiel, Part1 to 5, 28 March 2018.
- 626 [17] B. Colin, Tracklayers : A complex vibration environment, Institute of Environmental Sciences, 1990, Proceedings, pp
627 663-678.
- 628 [18] B. Colin, Outil de personnalisation en environnement combiné sinus plus bruit, intégré aux essais en environnement
629 mécanique, Juin 1991, Symposium ASTE 91.
- 630 [19] DGA, CIN-EG-01 Ed.1, Guide pour la prise en compte de l'environnement dans un programme d'armement, Mai 1999.
- 631 [20] AFNOR, NF EN 60812, Techniques d'analyses de la fiabilité du système-Procédure d'analyse des modes de défaillance
632 et de leurs effets (AMDE), Août 2006.
- 633 [21] B. Colin, Diffusion d'une technologie innovante duale de Maintenance prédictive (HUMS), basée sur la Méthode des
634 Blocs Disjoints (MBD), $\lambda\mu 23$, 10 au 13 Octobre 2022, EDF Lab Paris Saclay.
- 635 [22] AFNOR, NF ISO 13374-1, Surveillance et diagnostic d'état des machines, Traitement, échange et présentation des
636 données, Partie 1 : Lignes directrices générales, Juillet 2003.
- 637 [23] AFNOR, NF ISO 13374-2, Surveillance et diagnostic d'état des machines, Traitement, échange et présentation des
638 données, Partie 2 : Traitement des données, Octobre 2007.
- 639 [24] B. Colin, Intérêt de la Méthode des Blocs Disjoints (MBD) de caractérisation des processus aléatoires non gaussiens et
640 non stationnaires, Congrès CFM2017, 28 au 1er Septembre 2017, Lille.
- 641 [25] B. Colin, Analyse de la non stationnarité et de la non gaussiannité des chargements vibratoires par la méthode MBD,
642 Colloque CFM 2019, Brest.
- 643 [26] B. Colin, P. Lelan, Modélisation stochastique et extrapolation temporelle des chargements vibratoires par l'approche
644 MBD , 22ème Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, $\lambda\mu 22$, Lambda Mu, Octobre 2020, Le
645 Havre.
- 646 [27] D.O. Smallwood, An improved recursive formula for calculating shock response spectra', The Shock and Vibration
647 Bulletin, 51, Part 2, May 1981, p211-p217.

- 648 [28] J.R.M. Hosking, 1990, L-moments : Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics,
649 Journal of Royal Statistical Society B 52 (1), 105-124.
- 650 [29] H. A. David, Order statistics, 2nd Edition, New York, Wiley, 1981.
- 651 [30] J.A. Greenwood, J.M. Landwehr, N.C. Matalas, Probability weighted moments : definition and relation to parameters of
652 several distributions expressible in inverse form, Water Resources Research 1979, 15(5):1049–54.
- 653 [31] J.R.M. Hosking, J.R. Wallis, 1997, Regional frequency analysis : An approach based on L-moments, Cambridge, UK :
654 Cambridge University Press.
- 655 [32] R. Fisher, L. Tippett, Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample,
656 Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 24, 180-190, 1928.
- 657 [33] B. Gnedenko, Sur la distribution limite du terme maximum d'une série aléatoire, The annals of Mathematics, 2nd Ser.,
658 44, 423–453, 1943.