



**GTPS**

Groupe de Travail  
de Pyrotechnie

Document GTPS N°11F  
Edition : Octobre 2012

# Méthode Statistique Des Essais Durcis

Recommandation pour obtenir et  
assurer la fiabilité des produits  
pyrotechniques en conception

*Document rédigé par la commission « Fiabilité »*

## Table des matières :

<b>A. GENERALITES.....</b>	<b>4</b>
A.1 OBJET.....	4
A.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	4
A.2.1 DOCUMENTS DE REFERENCE .....	4
A.2.2 AUTRES DOCUMENTS .....	5
A.3 TERMINOLOGIE SPECIFIQUE .....	5
<b>B. PREMIERE PARTIE : RECOMMANDATION POUR OBTENIR ET ASSURER LA FIABILITE DES PRODUITS PYROTECHNIQUES EN CONCEPTION .....</b>	<b>6</b>
B.1 DOMAINE D'APPLICATION .....	6
B.2 METHODOLOGIE PAR PHASE.....	6
B.2.1 REGLES GENERALES .....	6
B.2.2 FAISABILITE.....	7
B.2.2.1 OBJECTIF.....	7
B.2.2.2 TACHES A ACCOMPLIR.....	7
B.2.3 AVANT-PROJET.....	8
B.2.3.1 OBJECTIF.....	8
B.2.3.2 TACHES A ACCOMPLIR.....	8
B.2.4 DEVELOPPEMENT .....	9
B.2.4.1 OBJECTIF .....	9
B.2.4.2 TACHES A ACCOMPLIR.....	9
B.3 PRESENTATION DES METHODES STATISTIQUES UTILISEES .....	11
B.3.1 OBJET DES METHODES.....	11
B.3.2 CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE DES METHODES .....	11
B.3.2.1 DEFINITION DES SPECIMENS D'ESSAIS .....	11
B.3.2.2 REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS .....	12
B.3.2.3 CONDITIONS PREALABLES.....	13
B.4 COMPARAISON DES METHODES D'EVALUATION DE LA FIABILITE DES PRODUITS PYROTECHNIQUES .....	14
<b>C. SECONDE PARTIE : MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE « ESSAIS DURCIS » .....</b>	<b>15</b>
C.1 CONVENTIONS DE NOTATION.....	15
C.2 BUT DE LA METHODE .....	15
C.2.1 PRINCIPE DE LA METHODE.....	16
C.2.2 CONDITIONS PREALABLES D'APPLICATION.....	16
C.2.3 RECHERCHE DU PARAMETRE A DURCIR .....	17
C.2.4 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE VARIATION .....	18
C.2.4.1 Généralités .....	18
C.2.4.2 Obtention des Coefficients de Variation élémentaires (CVi).....	18
C.2.4.3 Obtention du Coefficient de Variation Corrigé (CVc).....	19
C.2.4.4 Recommandations.....	19
C.2.5 CONSTRUCTION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS.....	21
C.2.5.1 Définition des niveaux .....	21
C.2.5.2 Définition du coefficient de durcissement .....	21
C.2.5.3 Calcul du coefficient multiplicateur.....	22
C.2.5.4 Calcul du coefficient diviseur .....	24
C.2.5.5 Recommandations.....	25
C.2.5.6 Feuille de calcul .....	26
C.2.6 REALISATION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS .....	26
C.2.6.1 Cas d'un plan sans échec .....	26
C.2.6.2 Cas d'un plan avec échecs .....	27
C.2.6.3 Recommandation .....	29

## GTPS N°11F

<b>D. EXEMPLE D'APPLICATION.....</b>	<b>30</b>
D.1 OBJECTIF .....	30
D.2 RECHERCHE DU PARAMETRE A DURCIR.....	30
D.3 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE VARIATION CVG .....	31
D.4 CONSTRUCTION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS.....	32
D.5 REALISATION ET EXPLOITATION DES ESSAIS DURCIS .....	32
D.5.1 CAS 1 : AUCUN ECHEC OBSERVE.....	33
D.5.2 CAS 2 : UN ECHEC OBSERVE (CAS DEGRADE).....	33
D.5.3 CAS 3 : DEUX ECHECS OBSERVES (ECHEC DU PLAN D'ESSAIS DURCIS) .....	34
<b>E. CONCLUSION .....</b>	<b>35</b>
<b>F. REMERCIEMENTS .....</b>	<b>35</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>36</b>
ANNEXE 1 : VERIFICATION DE LA REPRESENTATIVITE DES ECHANTILLONS TESTES .....	37
ANNEXE 2 : PONDERATION DES CV PAR UTILISATION D'UN PLAN D'EXPERIENCES .....	38
ANNEXE 3 : TRAITEMENT DES PLANS D'ESSAIS AVEC ECHECS .....	40
ANNEXE 4 : ANALYSE ET CONSTRUCTION DU CVG.....	41
ANNEXE 5 : NIVEAU MINIMUM DE COEFFICIENT DE DURCISSEMENT .....	44
ANNEXE 6 : CONSTRUCTION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS .....	45
ANNEXE 7 : REALISATION ET EXPLOITATION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS.....	46
ANNEXE 8 : ANALYSE DE SENSIBILITE DU COEFFICIENT DE DURCISSEMENT .....	47

# GTPS N°11F

## A. GENERALITES

### A.1 OBJET

La première partie de cette recommandation est établie à usage des concepteurs pour obtenir et assurer la fiabilité des produits pyrotechniques. Elle doit constituer une base de dialogue dans les relations client - fournisseur, dès lors que le contrat, qui les lie, requiert des exigences de fiabilité. Elle expose :

- La nature des phases de conception,
- Les dispositions d'obtention de la fiabilité pour chacune de ces phases,
- Une présentation des différentes méthodes statistiques à la disposition du concepteur :
  - méthodes adaptées à chacune des phases de la conception,
  - avantages et inconvénients de chacune des méthodes explicitées.

La seconde partie de cette recommandation présente la procédure de mise en œuvre de la méthode statistique des « essais durcis ».

### A.2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

#### A.2.1 DOCUMENTS DE REFERENCE

##### GTPS

1. Dictionnaire de pyrotechnie,
2. N°11A : Méthode statistique Probit,
3. N°11B : Méthode statistique One-Shot,
4. N°11C : Méthode statistique Bruceton

##### AFNOR

5. Recueil de normes françaises **AFNOR** – Statistique Tome 1, éd. 7, 2008 : Vocabulaire, estimation et tests statistiques,
6. Groupe fiabilité (éd. 1, 1981) : Guide d'évaluation de fiabilité en mécanique par l'**A.F.C.I.Q.**,
7. **NFX 06-021** (01/10/1991) : Principes du contrôle statistique de lots - application de la statistique,
8. **NFX 06-050** (01/12/1995) : Etude de la normalité d'une distribution - application de la statistique,
9. **NFX 07-009, NF EN ISO 10012** (01/09/2003) : Système de management de la mesure – exigences pour les processus et les équipements de mesure,
10. **NFX 50-130, NF EN ISO 9000** (01/10/2005) : Principes essentiels et vocabulaire - Systèmes de management de la qualité,
11. **FD X50-127** (01/04/2002) : Maîtrise du processus de conception et développement - Outils de management,
12. **NFX 60-500** (Octobre 1988) : Terminologie relative à la fiabilité, maintenabilité, disponibilité,
13. **FDX 07 144-2** (1996) : conception et réalisation des essais, essais environnement partie 2 : coefficient de garantie,
14. **FDX 07 144-3** (1997) : conception et réalisation des essais, essais environnement partie 3 : facteur d'essais.

## A.2.2 AUTRES DOCUMENTS

15. **BN Ae - RE Aéro 703.05**, Mars 2000 : Guide pour la maîtrise de la fiabilité,
16. **ARMP 1**, 08/2008 : Exigences OTAN en matière de fiabilité et maintenabilité
17. **IEC 60812, CEI 60812** (2006-01-01) : Procédure d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE) - Techniques d'analyse de la fiabilité du système
18. **IEC 61025, CEI 61025** (2006-12-01) : Analyse par arbre de panne (AAP)
19. Document technique de M. HEYMANN (MBDA) : « Essais durcis avec prise en compte des échecs ».
20. Note technique réf. **M/TE/SM/DVF/S-2011-2017098 – Ed. 0** (15/12/2011) de D. GOND (MBDA) : « Estimation d'une proportion / Equivalence entre loi binomiale et loi bêta ».
21. Note Technique **A5-NT-1-X-542-ASAI** du 28/08/1990 : « Systèmes pyrotechniques Marges de dimensionnement et de performances ».

## A.3 TERMINOLOGIE SPECIFIQUE

Afin de permettre une application sans équivoque de la présente recommandation, il a été jugé nécessaire de préciser les notions suivantes :

- **Conception** : activité créatrice qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable,
- **Produit** : terme englobant tout article issu d'opération de production ou toute prestation de service telle que les productions matérielles (matières premières, produits semi-ouvrés ou finis, ingrédients, pièces, composants, équipements matériels, systèmes, ...),
- Un **paramètre fonctionnel** est une grandeur physique quantifiable, associée au produit, dont la valeur intervient sur les critères de succès - échec lors de leur mise en œuvre,
- Le **critère de succès** ou **d'échec** est le moyen de caractériser la réponse du produit à la sollicitation,
- Le **seuil de fonctionnement** d'un produit pour une fiabilité donnée **R** est défini comme étant la valeur du paramètre fonctionnel pour laquelle la probabilité de succès est égale à **R**.

## **B. PREMIERE PARTIE : RECOMMANDATION POUR OBTENIR ET ASSURER LA FIABILITE DES PRODUITS PYROTECHNIQUES EN CONCEPTION**

### **B.1 DOMAINE D'APPLICATION**

Ce document s'adresse à tout industriel concepteur devant répondre à un besoin formalisé sous forme de spécifications quantifiées de fiabilité d'un produit pyrotechnique. Il couvre :

- Les activités de conception comprenant, conformément à la norme NFX 50-130 réf. [10], les phases de faisabilité, d'avant projet et de développement, au cours desquelles la fiabilité est prise en compte pour aboutir à un produit pouvant être industrialisé au meilleur coût,
- Les activités de conception à caractère permanent qui permettent d'améliorer la fiabilité d'un produit donné.

Il s'applique aux produits mettant en œuvre les substances pyrotechniques définies dans le document cité alinéa 1 au § A.2.1 (produits monocoup).

### **B.2 METHODOLOGIE PAR PHASE**

#### **B.2.1 REGLES GENERALES**

1. Déterminer les objectifs à atteindre en termes de performances, caractéristiques, coûts et délais,
2. Insérer et gérer la fiabilité au cours des phases de conception du projet,
3. Disposer d'une structure de concertation systématique entre les parties concernées,
4. S'assurer de la cohérence des objectifs avec :
  - Les actions envisagées,
  - Les résultats obtenus,
5. S'assurer de l'adéquation entre les moyens techniques et humains mis en œuvre et le produit à concevoir.

A ces règles sont associées un certain nombre de tâches telles que tâches de management, de calcul, d'analyse ou d'essai. Elles résultent en particulier des itérations nécessaires entre le dimensionnement du produit et sa fiabilité qui s'expriment en termes de marges et de coefficients de dimensionnement.

## B.2.2 FAISABILITE

### B.2.2.1 OBJECTIF

Cette phase a pour objet de montrer dans quelle mesure il peut être répondu aux besoins exprimés en précisant les concepts, les voies technologiques et les architectures possibles. Les besoins sont exprimés généralement en termes de mission à remplir, d'indications sur l'environnement opérationnel (profil d'emploi et conditions d'environnement associées) et d'objectifs de fiabilité.

Elle doit concourir à établir les exigences de fiabilité à inclure dans le cahier des charges fonctionnel (CdCF) et les éventuelles exigences de management de la fiabilité.

### B.2.2.2 TACHES A ACCOMPLIR

Pour chacune des solutions technologiques proposées, les tâches à accomplir sont les suivantes :

- Analyse préliminaire des risques,
- Evaluation des risques par :
  - recherche bibliographique et/ou expérience acquise sur des produits similaires, particulièrement au niveau des anomalies ou incidents rencontrés ; recherche de banque de données en fiabilité,
  - calculs de simulation numérique permettant de comprendre qualitativement et quantitativement les phénomènes mis en jeu et de mettre en évidence certains points critiques de dimensionnement,
  - utilisation d'un plan d'expérience afin de cerner les paramètres influents, leur sensibilité sur les performances et l'interaction entre ces paramètres,
  - mise en œuvre d'une des méthodes préconisées dans le tableau du § B.4 pour obtenir une estimation de la moyenne sur certains paramètres en particulier,
- Bilan des points critiques mis en évidence pour chaque solution et comparaison des solutions, vis à vis des besoins exprimés.

A l'issue de cette phase, les éléments d'appréciation à caractère qualitatif devraient constituer les données d'entrée nécessaires au démarrage de la phase suivante. De ce fait, ils devraient être consignés dans le CdCF au chapitre d'exigences de fiabilité.

### B.2.3 AVANT-PROJET

#### B.2.3.1 OBJECTIF

Cette phase a pour objet d'étudier les voies faisables identifiées précédemment afin de proposer celle qui pourra être développée.

Elle permet de préparer le dossier de définition préliminaire du produit à réaliser en accord avec les exigences de fiabilité du cahier des charges fonctionnel, établies lors de la phase précédente.

#### B.2.3.2 TACHES A ACCOMPLIR

Pour chaque solution considérée faisable :

- **Modélisation** : Construire le bloc-diagramme de fiabilité afin d'établir l'architecture du produit et d'identifier les interfaces concernées dans l'étude de fiabilité. Cette démarche permet de définir l'arborescence « produit » dont le niveau de décomposition s'arrête aux composants possédant des caractéristiques mesurables,
- **Allocation** : Répartir l'objectif global de fiabilité selon l'arborescence en allouant à chacun des composants et interfaces recensés un objectif prévisionnel de fiabilité : probabilité de réalisation de la fonction compte tenu du profil d'emploi et/ou de la durée de vie relatifs à chaque composant,
- **Analyse** : Procéder, pour chaque composant répertorié, à une analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) afin de mettre en évidence les points jugés critiques en s'appuyant sur :
  - des bases de données existantes et/ou le retour d'expérience sur composants analogues,
  - éventuellement, et en fonction des produits développés, une expérimentation spécifique en appliquant la ou les méthodes préconisées dans le tableau du § B.4 afin, d'une part de confirmer la première évaluation de la moyenne  $m$  (Cf. § B.2.2.2), et, d'autre part, d'apporter une première estimation de l'écart type  $\sigma$  lié à la dispersion autour de la valeur moyenne,
- **Prévision** : Recomposer, dans le bloc diagramme de fiabilité, les évaluations partielles afin d'évaluer l'adéquation de la solution proposée au besoin,
- **Plan de validation** : Etablir un avant-projet de plan de développement - fiabilité du produit afin d'estimer en terme de coût et de délai les travaux techniques nécessaires pour mener à bien le développement du produit,
- **Choix** : En considérant toutes les solutions, choisir celle qui répond le mieux au besoin exprimé et qui sera développée dans la phase suivante, en justifiant l'abandon des solutions non retenues.



### B.2.4 DEVELOPPEMENT

#### B.2.4.1 OBJECTIF

Cette phase a pour objet :

- D'établir le dossier de définition du produit répondant aux exigences de fiabilité exprimées dans la Spécification Technique de Besoin,
- De valider la conception en utilisant les résultats des études théoriques, des essais, de l'exploitation des faits techniques,
- De préparer les phases de production et d'utilisation en spécifiant les procédés qui seront nécessaires pour assurer la fiabilité au cours de ces deux phases.

#### B.2.4.2 TACHES A ACCOMPLIR

Pour la solution retenue :

- Procéder à l'étude prévisionnelle de fiabilité qui permet de :
  - reprendre et affiner le bloc diagramme de fiabilité précédemment établi,
  - optimiser les contraintes d'environnement appliquées à chaque composant,
  - éventuellement, revoir les allocations de fiabilité et renégocier les exigences de fiabilité,
- Identifier les événements redoutés par une analyse déductive au moyen d'un arbre de défaillance. L'analyse déductive est une analyse statistique qui ne prend pas en compte les aspects séquentiels des événements. Les limites inhérentes à la mise en œuvre des arbres de défaillance sont :
  - définir correctement l'événement redouté (origine de l'arbre),
  - définir des événements élémentaires,
  - s'assurer de l'indépendance des événements élémentaires recensés,
- Effectuer les analyses de défaillance, de leurs effets et de leur criticité pour chaque événement élémentaire recensé,
- Définir toutes les parades à mettre en place pour satisfaire les niveaux de fiabilité requis au moyen :
  - d'étude et d'essais jusqu'à la phase qualificative du produit (fiabilité en conception), en mettant en œuvre les méthodes préconisées dans le tableau du § B.4,
  - de procédures de fabrication et de recette (fiabilité en fabrication),
- Vérifier et évaluer a posteriori le niveau d'indépendance des événements,

## **GTPS N°11F**

- Mettre en place les actions « long terme » destinées à s'assurer de la fiabilité tout au long de la durée de vie du produit. En particulier, définir le programme de vieillissement qui sera conduit afin de :
  - s'assurer du niveau de fiabilité supposé atteint,
  - évaluer le préavis nécessaire pour faire face à une défaillance long terme éventuelle,
  - alimenter les banques de données, notamment celles utilisées pour les analyses de fiabilité pendant le développement.

La politique de prélèvement associée devra être conforme au besoin opérationnel.

A la fin de la phase de développement, la conception du produit doit permettre d'atteindre les objectifs de fiabilité.

La phase de développement se concrétise par le dossier d'homologation, de qualification et/ou certification (dossier de définition et ses justificatifs, dossier d'industrialisation).

## B.3 PRESENTATION DES METHODES STATISTIQUES UTILISEES

### B.3.1 OBJET DES METHODES

Ces méthodes ont pour objet de :

- Caractériser la distribution des seuils de fonctionnement d'un produit par des tests de sensibilité (séquentiels ou simultanés),
- Vérifier la loi de répartition probabiliste adéquate de ces seuils de fonctionnement,
- Exploiter cette loi pour évaluer une probabilité de succès ou d'échec lors du fonctionnement du produit testé, pour un niveau de confiance donné.

### B.3.2 CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE DES METHODES

#### B.3.2.1 DEFINITION DES SPECIMENS D'ESSAIS

La définition des spécimens d'essais doit prendre en compte les trois points suivants :

##### 1. Définition nominale des spécimens testés :

- La définition nominale des spécimens testés est conforme à un Dossier de Définition et constitue un échantillon représentatif d'une population (Cf. **annexe 1**).
- Les spécimens d'essais peuvent être :
  - Un objet fonctionnel (ex : un inflammateur, le couple formé par une cisaille et le tirant à couper, etc.),
  - Une quantité définie d'un produit.

##### 2. Définition de la population :

- Les spécimens d'essais appartiennent à une population clairement identifiée.
- On recommande d'utiliser un lot homogène fabriqué en respectant une même unité de temps, de lieu, de matière première, de méthodes et de personnes, et en tout état de cause, suivant des méthodes et des moyens définis (Cf. **annexe 1**).

### 3. Définition de l'échantillon prélevé :

Il est choisi dans la population suivant un plan d'échantillonnage défini par :

- Le type de test,
- Le schéma suivant lequel le prélèvement doit être effectué, afin d'assurer la validité des résultats d'essais,
- L'effectif de l'échantillon à tester. Il est fonction de la méthode utilisée, comme explicité dans le tableau du § B.4. Il est cependant recommandé de constituer une réserve de spécimens supplémentaires pour aléas,
- La relation entre les résultats des essais et les critères d'acceptation du test.

#### B.3.2.2 REPRODUCTIBILITE DES ESSAIS

La reproductibilité des essais doit prendre en compte les quatre points suivants :

##### 1. Identification des montages d'essais :

- Montage consommable conforme à un Dossier de Définition,
- Montage réutilisable dont on vérifiera la conformité à un Dossier de Définition et la stabilité de ses caractéristiques fonctionnelles.

##### 2. Identification des moyens d'essais :

- Conditions d'environnement (Cf. norme NFX 07-009 Réf. [9]),
- Sources d'énergie connexes,
- Équipements de mesure calibrés.

##### 3. Maîtrise des sollicitations appliquées aux spécimens :

- L'incertitude des sollicitations appliquées doit être très inférieure à l'écart-type présumé de la population.

##### 4. Maîtrise des conditions d'essais :

- Conditions d'environnement et d'essais stables durant une séquence d'essais,
- Représentativité des conditions et/ou spécimens d'essais par rapport à la configuration réelle (confinement, diamètre critique, échanges thermiques...),
- Moyens d'essais,
- Procédures,
- Personnel.

B.3.2.3 CONDITIONS PREALABLES

1. Choix du paramètre fonctionnel :

Il doit répondre aux critères suivants :

- Etre ajustable,
- Avoir un comportement connu et continu dans le domaine d'étude envisagé.

2. Choix du critère de succès/échec :

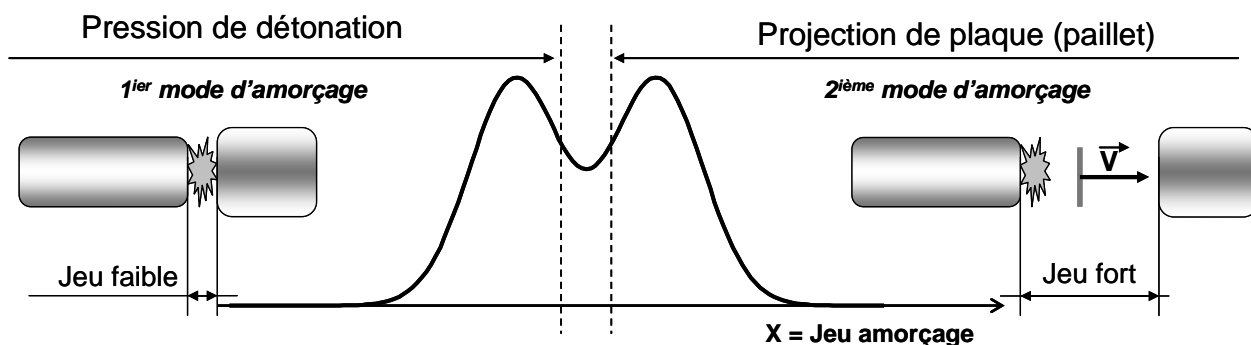
- Il doit être défini sans ambiguïté, après analyse de toutes les réponses possibles du produit étudié.
- Il est nécessaire de connaître le sens de variation de la probabilité de succès ou d'échec en fonction du sens de variation du paramètre fonctionnel choisi.

3. Hypothèses :

On suppose que :

- La résolution du paramètre fonctionnel, pour l'essai, doit être d'environ 10 fois inférieure à la première évaluation de l'estimateur de l'écart-type,
- Le seuil de fonctionnement du paramètre fonctionnel choisi est une variable aléatoire,
- La densité de probabilité de cette variable aléatoire suit une loi normale (1) ou log normale (2), dont le choix, a priori, tiendra compte de l'acquis.

(1) NOTA : Au sujet de l'hypothèse de normalité, il conviendra de s'assurer que le paramètre fonctionnel retenu est régi par **un seul et unique phénomène physique** dans le domaine d'essais. En effet, certains cas peuvent être régis par plusieurs phénomènes physiques qui conduisent à des lois multimodales comme, par exemple, le jeu d'amorçage en détonation d'un relais d'explosif par un détonateur :



(2) NOTA : Dans le cas d'une loi log-normale, il suffira d'effectuer un changement de variable pour ramener le cas étudié à une loi normale.

## B.4 COMPARAISON DES METHODES D'EVALUATION DE LA FIABILITE DES PRODUITS PYROTECHNIQUES

Le tableau 1 ci-dessous propose un inventaire des avantages et des inconvénients de chacune des méthodes statistiques.

Méthode	Nbre essais	Avantages	Inconvénients
<b>Probit</b> GTPS 11A (Cf. alinéa 2 du § A.2.1)	≥ 72	Test non séquentiel Possibilité d'adapter les niveaux en cours d'essais Le meilleur estimateur de l'écart type	Définir au minimum 5 niveaux Risque important d'échec de la méthode (estimé à 16%), même dans les conditions idéales du test
<b>One-shot</b> GTPS 11B (Cf. alinéa 3 du § A.2.1)	≥ 30	Tous les résultats d'essais sont exploitables Le choix de la valeur initiale du test ne joue pas sur la précision des résultats La convergence vers la moyenne est assurée et très rapide pour un faible échantillon testé : <ul style="list-style-type: none"> <li>• éventuellement mal connue,</li> <li>• dont la loi de probabilité est unimodale</li> </ul>	Test séquentiel entraînant une gestion contraignante des épreuves avec des niveaux non connus à l'avance.
<b>Bruceton</b> GTPS 11C (Cf. alinéa 4 du § A.2.1)	≥ 30	Donne accès aux estimateurs statistiques de la moyenne et de l'écart type, avec une bonne précision sur la moyenne	Test séquentiel entraînant une gestion contraignante des épreuves, mais avec un pas fixe Dépendance des résultats de la valeur du pas
<b>Essais durcis</b> GTPS 11F (Cf. seconde partie de ce document)	≥ 1 ≤ 10	Permet de montrer des marges sur un produit par rapport à son niveau nominal de fonctionnement, avec moins de 10 essais. Démarche analytique prenant en compte le contenu des AMDEC dont elle est un outil complémentaire. Possibilité d'accepter un échec dans la réalisation du plan d'essais durcis, moyennant : <ul style="list-style-type: none"> <li>• soit une évaluation dégradée de la fiabilité (par rapport à la valeur initiale visée)</li> <li>• soit une augmentation du nombre de spécimens testés</li> </ul>	Impose la connaissance des coefficients de variation des paramètres influents Dépendance étroite des résultats aux coefficients de variation associés aux paramètres dispersés Ne permet pas d'accéder à la loi de distribution du paramètre fonctionnel testé

Tableau 1

## C. SECONDE PARTIE : MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE « ESSAIS DURCIS »

### C.1 CONVENTIONS DE NOTATION

- . **CVc** = coefficient de variation corrigé du paramètre fonctionnel prépondérant
- . **CVg** = coefficient de variation global du paramètre fonctionnel prépondérant
- . **CVi** = coefficient de variation élémentaire du paramètre fonctionnel  $X_i$
- . **CV0** = coefficient de variation élémentaire du paramètre fonctionnel prépondérant
- . **I** = fonction BETA incomplète
- . **I<sup>-1</sup>** = fonction inverse de la fonction BETA incomplète
- . **N** = loi normale centrée réduite
- . **N<sup>-1</sup>** = fonction inverse de la loi normale centrée réduite
- . **Kd** = Coefficient de durcissement diviseur
- . **Km** = Coefficient de durcissement multiplicateur
- . **m** = Moyenne de la loi de distribution d'une population
- . **n** = nombre d'essais
- . **R** = fiabilité à évaluer (au niveau de référence  $X_{réf}$ )
- . **R<sub>d</sub>** = fiabilité au niveau durci  $X_{dur}$
- . **s** = Estimateur de l'écart-type de la loi de distribution d'une population
- . **U<sub>d</sub>** = Valeur de la variable centrée réduite correspondant au niveau durci
- . **U<sub>R</sub>** = Valeur de la variable centrée réduite correspondant au niveau de référence
- .  $\bar{x}$  = Estimateur de la moyenne de la loi de distribution d'une population
- . **X<sub>dur</sub>** = niveau durci auquel on souhaite réaliser les essais durcis pour valider le respect de l'objectif de fiabilité
- . **X<sub>nom</sub>** = niveau nominal du paramètre fonctionnel prépondérant
- . **X<sub>réf</sub>** = niveau qui correspond au besoin nominal auquel est associé l'objectif de fiabilité,
- .  **$\sigma$**  = Ecart-type de la loi de distribution d'une population
- . **1- $\alpha$**  = niveau de confiance requis pour l'évaluation de la fiabilité

### C.2 BUT DE LA METHODE

Cette méthode permet de valider le respect d'un objectif de fiabilité sur un nombre réduit d'essais d'un dispositif monocoup.

Elle est applicable en particulier aux produits pyrotechniques.

Cette méthode est utilisable dans chacune des phases de conception d'un produit (faisabilité, avant-projet, développement ou qualification), telles qu'elles sont définies dans la partie B du présent document.

### C.2.1 PRINCIPE DE LA METHODE

Pour évaluer un objectif spécifié de fiabilité, le principe de la méthode est de déterminer un coefficient de durcissement à appliquer sur un paramètre fonctionnel prépondérant d'un dispositif pyrotechnique, et de démontrer, par essais au niveau durci ainsi déterminé, que ce dispositif fonctionne « sans échec ».

Sous certaines conditions exposées plus loin (§ C.2.6.2), il est possible d'intégrer la notion d'échec dans l'analyse des résultats.

### C.2.2 CONDITIONS PREALABLES D'APPLICATION

Les analyses fonctionnelles, physique et process amènent à la compréhension et la maîtrise des paramètres influents.

Le plan d'essais durcis s'appliquera pour évaluer, avec un niveau de confiance donné, la fiabilité d'une fonction élémentaire (\*) du produit testé (découpe, allumage, résistance structurale, etc.).

(\*) **NOTA** : en aucun cas, la méthode des essais durcis ne peut servir à évaluer la fiabilité globale du produit étudié (ce qui est d'ailleurs le cas de toutes les méthodes statistiques).

L'application à une fonction élémentaire de la méthode des essais durcis nécessite la détermination ou la connaissance préalable des éléments suivants :

- Un paramètre fonctionnel prépondérant **X** (dont la distribution des seuils de fonctionnement doit suivre une loi normale) : voir sa recherche au §C.2.3,
- Les coefficients de variation élémentaires **CV<sub>i</sub>** des paramètres fonctionnels agissant sur la fonction élémentaire étudiée (voir leur détermination au §C.2.4),
- Le niveau de fiabilité **R** à évaluer sur la fonction élémentaire,
- Le niveau de confiance **1- $\alpha$**  associé à l'évaluation de la fiabilité (\*\*),
- La connaissance des écarts existants entre le processus d'obtention des prototypes d'essais et le processus de série. Il est recommandé que le processus prototype se rapproche le plus possible de celui de série (Cf. **annexe 1**).

(\*\*) **NOTA** : en pratique, **1- $\alpha$**  est couramment compris entre 90% et 60% en accord avec le client.

On trouvera en **annexe 9** une méthode pour convertir les niveaux de fiabilité en fonction du niveau de confiance sur des plans d'essais durcis déjà réalisés.



### C.2.3 RECHERCHE DU PARAMETRE A DURCIR

Rechercher les paramètres fonctionnels du produit à partir d'une analyse physique et /ou d'une description fonctionnelle du système.

Sélectionner, parmi les paramètres fonctionnels identifiés, ceux qui sont influents sur la fonction élémentaire étudiée du produit :

- Ces paramètres doivent être indépendants les uns des autres (cette condition d'indépendance doit être vérifiée).

Choisir, parmi les paramètres influents sélectionnés, un paramètre fonctionnel que l'on appellera « prépondérant ». Ce paramètre (à durcir) doit :

- Avoir une influence significative sur la performance à satisfaire,
- Etre quantifiable,
- Etre accessible à la mesure,
- Etre facilement ajustable.

Exemples de paramètres représentatifs de la fonction élémentaire :

- « Tenue en tension » dans un tirant ou « vitesse initiale » fournie par un déverrouilleur,
- « Energie calorifique » ou « pression » nécessaire à l'initiation d'un système pyrotechnique,
- « Section » d'un tirant à couper ou « masse de poudre » d'une cisaille,
- « Température » d'initiation en combustion de matériaux pyrotechniques ; dans ce cas, une attention particulière sera portée sur l'unité employée : le Kelvin est la seule unité permise pour la mesure de la température (les autres unités n'effectuant qu'un repérage de cette dernière),
- Etc...

Les autres paramètres fonctionnels influents sur la fonction élémentaire seront pris en compte dans la détermination du coefficient de variation corrigé à appliquer au paramètre prépondérant :

- Si leur nombre est jugé suffisamment important ( $\geq 5$ ), leur contribution globale à la distribution des seuils de fonctionnement du paramètre prépondérant est assimilable à une loi normale dans leur domaine d'utilisation et d'essais, quelles que soient leurs lois individuelles de distribution,
- Si leur nombre est jugé faible ( $< 5$ ), il est nécessaire que leur contribution globale au paramètre prépondérant suive une loi de distribution normale dans leur domaine d'utilisation et d'essais.

## GTPS N°11F

**NOTA 1 :** Ces hypothèses sont à vérifier, dans la mesure du possible, par :

- Utilisation de banques de données,
- Etat de l'art,
- Essais,
- Similitude (produit identique ou dérivé),
- Simulation numérique,
- Etc...

**NOTA 2 :** Certains paramètres fonctionnels influents peuvent être figés à leur borne min ou max d'utilisation dans le plan d'essais durcis, et ainsi ne pas être intégrés au calcul du coefficient de variation corrigé du paramètre prépondérant.

### C.2.4 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE VARIATION

#### C.2.4.1 GENERALITES

Dans la suite du texte, les estimateurs statistiques d'un échantillon issu de la population mère de moyenne  $m$  et d'écart-type  $\sigma$ , seront notés respectivement  $\bar{x}$  et  $s$ .

Le coefficient de variation est donc défini comme étant le rapport entre les estimateurs de l'écart type et de la performance moyenne du paramètre fonctionnel considéré :

$$CV = \frac{s}{\bar{x}}$$

Le calcul de **CV** doit être représentatif de la performance du système ou du composant dans les conditions spécifiées (conditions d'utilisation et d'environnement, durée de vie,...).

En l'absence de connaissance de la moyenne  $\bar{x}$  et de l'écart type  $s$  du paramètre fonctionnel prépondérant, il est nécessaire de déterminer au préalable les coefficients de variations élémentaires (CVi) des autres paramètres influents sur la performance étudiée.

#### C.2.4.2 OBTENTION DES COEFFICIENTS DE VARIATION ELEMENTAIRES (CVI)

Les coefficients de variation élémentaires des paramètres influents pour un dispositif pyrotechnique peuvent être obtenus à partir :

1. De l'exploitation statistique d'essais (méthodes One Shot, Probit, Bruceton ou autres),
2. D'une expérience acquise sur des matériels similaires, en attribuant au paramètre une distribution a priori (obtention du coefficient de variation par similitude),
3. De simulations numériques,
4. De l'expérience sur les process et moyens de fabrication/contrôle (intervalle de tolérance assimilé à une amplitude de  $\pm 3$  écarts-types, ce qui implique la mise sous contrôle de tous les paramètres significatifs du processus),
5. De l'exploitation statistique d'un plan d'expérience.

### C.2.4.3 OBTENTION DU COEFFICIENT DE VARIATION CORRIGE (CVC)

La détermination du coefficient de variation du paramètre prépondérant noté **CV0** obtenu comme ci-dessus doit être corrigée afin de prendre en compte :

- Les dispersions attendues et non prises en compte par les autres paramètres influents,
- Les paramètres non intégrés dans les estimations précédentes :
  - vieillissement,
  - changements de lots (poudre, matières, composants, ...),
  - ambiances mécaniques et climatiques,
  - etc.

En l'absence de connaissance des contributions (coefficients de pondérations) des différents paramètres sur la variabilité de la performance étudiée, on calcule le coefficient de variation corrigé **CVc** en utilisant la formule simplifiée suivante :

$$\mathbf{CVc} = \sqrt{\mathbf{CV0}^2 + \mathbf{CV1}^2 + \dots + \mathbf{CVi}^2 + \dots}$$

**NOTA :** Les coefficients de variation **CVi** peuvent être aussi assortis de coefficients pondérateurs, si un modèle mathématique de la performance étudiée a été établi au moyen d'un plan d'expérience ou de simulations (voir exemple en **annexe 2**).

### C.2.4.4 RECOMMANDATIONS

#### RECOMMANDATION N°1 : Majoration forfaitaire du coefficient de variation

Il est recommandé d'appliquer un coefficient de majoration forfaitaire de 10% sur le coefficient de variation obtenu, afin de compenser :

- La méconnaissance de l'influence de certains paramètres fonctionnels,
- La méconnaissance de certains phénomènes physiques (types de loi réelle, paramètres influents non accessibles à la mesure, environnement inconnu, faible nombre d'essais pour la détermination du coefficient de variation, ...).

On obtient alors le coefficient de variation global :

$$\mathbf{CVg} = 1,1 \times \mathbf{CVc}$$

## GTPS N°11F

### RECOMMANDATION N°2 : Domaine d'emploi de la méthode des essais durcis

La méthode n'est pas pertinente dans les cas suivants :

- Le **CVg** est très faible (< 3 %) :
  - soit le CV ne prend pas en compte tous les facteurs influents :
    - il est recommandé dans ce cas de revenir à la connaissance fonctionnelle du système (Analyse fonctionnelle, AMDEC) pour essayer de trouver les manques,
  - soit le CV est réellement très faible (cas d'un système maîtrisé et simple), et la méthode conduit à un coefficient de durcissement « très faible » (donc non significatif) :
    - il est recommandé d'appliquer un coefficient de durcissement minimum de 1,2 (ce niveau minimum permet de garantir une marge suffisante entre le niveau nominal moyen et le niveau durci : voir justificatif en **annexe 5**).
- Le **CVg** est très grand (> 15 %), ce qui est incompatible de l'évaluation d'un niveau de fiabilité élevé par la méthode :
  - il n'est pas possible de définir un coefficient de durcissement compatible du niveau de fiabilité recherché quel que soit le nombre d'essais (**annexe 4**),
  - le coefficient de durcissement très élevé peut ne pas être compatible du produit étudié.

Au-delà de 15%, il est généralement considéré que la définition et le processus de fabrication ne sont pas suffisamment maîtrisés pour répondre aux exigences. L'utilisation éventuelle de la méthode est soumise à dérogation après analyses et expertises approfondies.

### RECOMMANDATION N°3 : Coefficient de variation forfaitaire

Dans le cas où on ne dispose pas de justification du coefficient de variation, il est recommandé d'employer un coefficient de variation global forfaitaire établi sur la base d'un retour d'expérience admis et reconnu par la profession.

En l'absence de tout retour d'expérience, on prendra un coefficient de variation global forfaitaire : **CVg = 15%**.

### C.2.5 CONSTRUCTION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS

La logique de construction du plan d'essais durcis est décrite dans le logigramme en **annexe 6**.

Le but recherché est de déterminer un niveau durci du paramètre fonctionnel prépondérant, auquel nous réaliserons les essais.

#### C.2.5.1 DEFINITION DES NIVEAUX

**Niveau nominal ( $X_{nom}$ ) :** c'est la valeur de définition nominale du paramètre prépondérant

**Niveau de référence ( $X_{réf}$ ) :** c'est la valeur du paramètre prépondérant associée à l'évaluation de fiabilité (marges possibles par rapport au niveau nominal)

Le niveau de référence est, selon les cas, soit :

- Le niveau nominal du paramètre fonctionnel prépondérant,
- La valeur nominale du paramètre fonctionnel prépondérant, affectée d'un coefficient de marge spécifié par le client ou par des standards,
- Un majorant ou un minorant d'un besoin exprimé comme déterministe,
- Le niveau correspondant aux bornes de l'intervalle de tolérances du niveau nominal,
- Le niveau correspondant à une (ou aux) borne(s) à  $\pm 3$  écarts-types du niveau nominal,
- ...

**Niveau durci ( $X_{dur}$ ) :** c'est la valeur du paramètre prépondérant à laquelle on réalise les essais durcis

#### C.2.5.2 DEFINITION DU COEFFICIENT DE DURCISSEMENT

Le coefficient de durcissement est défini comme étant le rapport entre le niveau durci et le niveau de référence.

Ce coefficient peut se présenter sous les 2 formes suivantes :

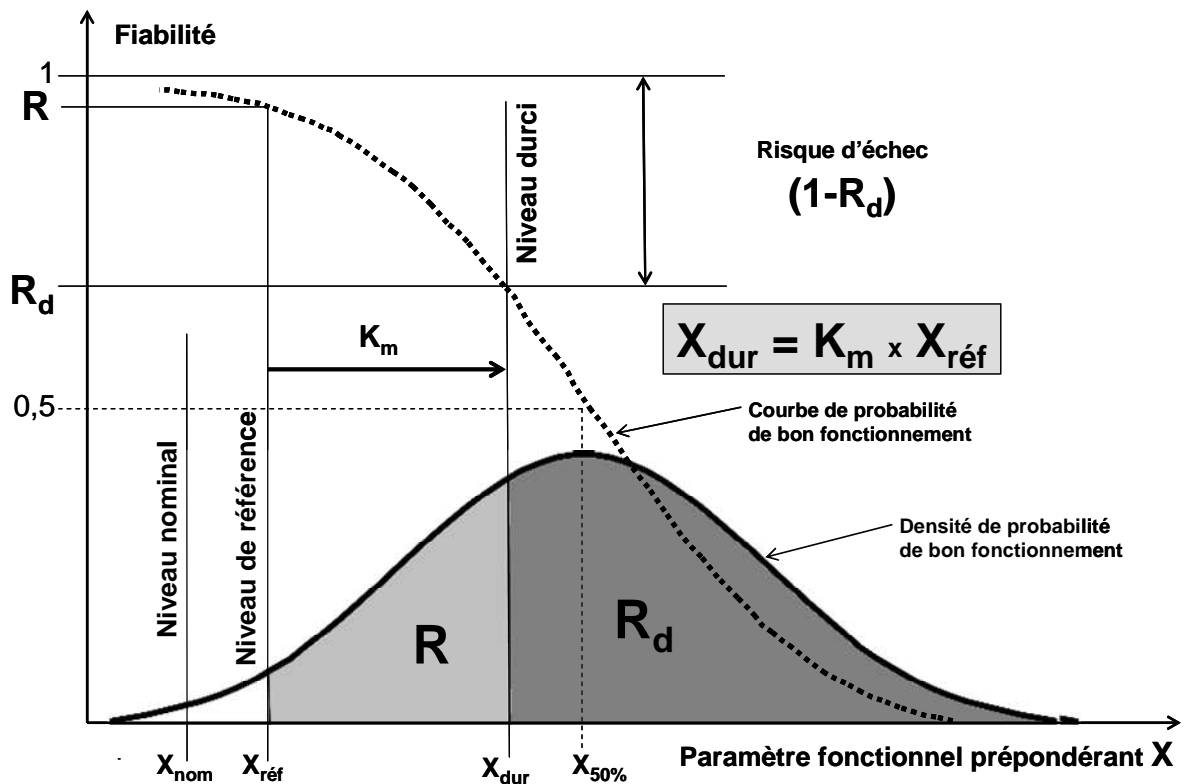
- **Cas 1 :** Coefficient de durcissement multiplicateur **Km** : le niveau durci est à comparer à un niveau de référence inférieur,
- **Cas 2 :** Coefficient de durcissement diviseur **Kd** : le niveau durci est à comparer à un niveau de référence supérieur.

## GTPS N°11F

On trouvera aux § C.2.5.3 et C.2.5.4 les méthodes de calcul des coefficients de durcissement pour les cas « multiplicateur » et « diviseur » :

- Les formules développées supposent que les plans d'essais durcis soient réalisés sans aucun échec, ce qui est le cas nominal d'application de la méthode des essais durcis,
- Dans le cas où on constaterait l'apparition d'un échec, on trouvera en **annexe 3** des formules plus générales acceptant la prise en compte d'un échec. La conduite à tenir dans ce cas est décrite au §C.2.6.2 et dans le logigramme en **annexe 7**.

### C.2.5.3 CALCUL DU COEFFICIENT MULTIPLICATEUR



L'utilisation de la loi normale standard ( $N(0,1)$ ) nécessite la transformation de la variable aléatoire, caractérisant la performance du composant, en une variable normale centrée réduite.

Si  $N(X)$  est la fonction de répartition de la loi normale de  $X$ , on a :

- Au niveau de référence, la variable réduite s'écrit :

$$U_R = \frac{X_{ref} - X_{50\%}}{s}$$

- Au niveau durci, la variable réduite s'écrit :

$$U_d = \frac{X_{dur} - X_{50\%}}{s}$$

## GTPS N°11F

En résolvant le système ci-dessus et sachant que  $X_{dur} = K_m \times X_{réf}$ , on obtient :

$$K_m = \frac{X_{50\%} + U_d \times s}{X_{50\%} + U_R \times s}$$

Sachant que le coefficient de variation global est  $CVg = \frac{s}{X_{50\%}}$ , l'expression

$K_m$  devient :

$$K_m = \frac{1 + U_d \times CVg}{1 + U_R \times CVg}$$

$U_R$  est la valeur de la variable centrée réduite correspondant à la probabilité de non fonctionnement  $1 - R$  pour la valeur de référence  $X_{réf}$  :

$$R = 1 - N(U_R) = N(-U_R)$$

$U_d$  est la valeur de la variable centrée réduite correspondant à la probabilité observée après avoir effectué  $n$  essais réussis à un niveau durci, pour un niveau de confiance  $1 - \alpha$  requis. Cette valeur de  $U_d$  est déterminée par l'utilisation de la loi binomiale, dont la formule, si on observe  $0$  échec au niveau durci est :

$$\text{Prob (paramètre } X > X_{dur}) = \alpha^{1/n} = R_d = 1 - N(U_d) = N(-U_d)$$

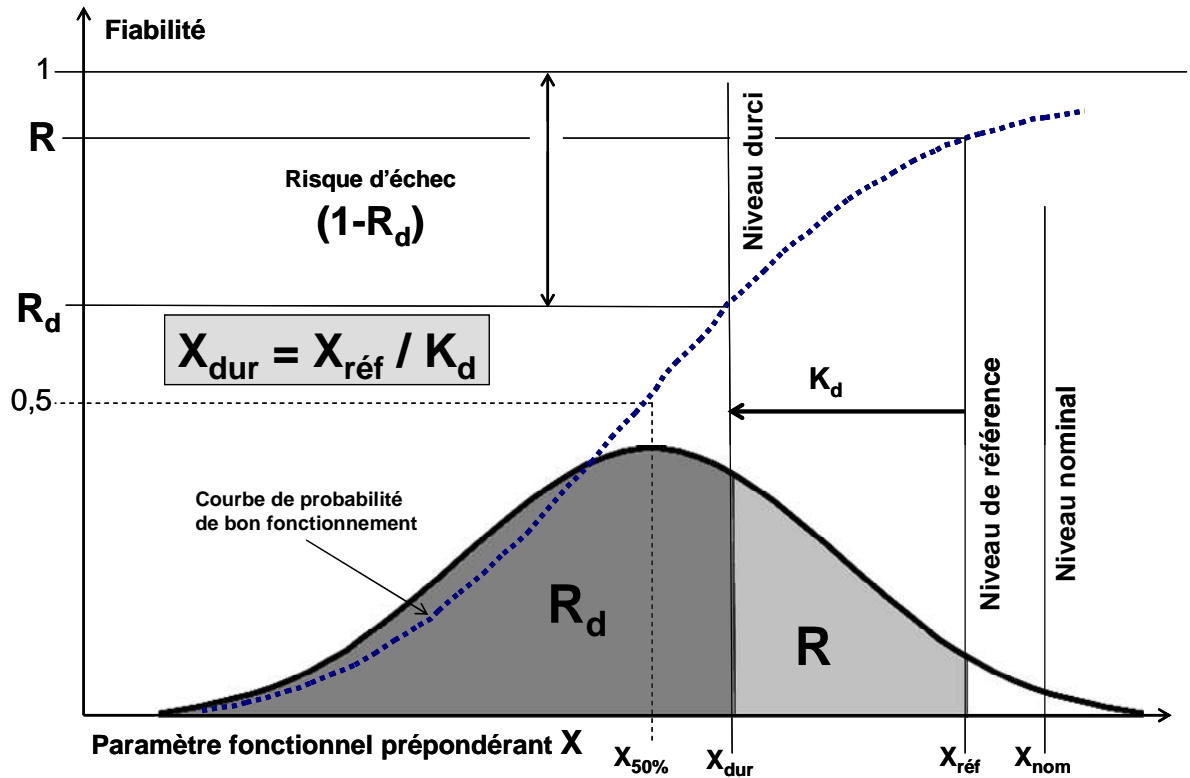
L'expression  $K_m$  peut finalement s'écrire :

$$K_m = \frac{1 + N^{-1}(1 - \alpha^{1/n}) \times CVg}{1 - N^{-1}(R) \times CVg} = \frac{1 - N^{-1}(\alpha^{1/n}) \times CVg}{1 - N^{-1}(R) \times CVg}$$

Avec  $N(x)$  : Loi normale de  $x$  :  $N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du$

C.2.5.4 CALCUL DU COEFFICIENT DIVISEUR

La démarche est identique à celle du coefficient multiplicateur à savoir :



L'utilisation des tables de la loi normale nécessite la transformation de la variable aléatoire, caractérisant la performance du composant, en une variable normale réduite.

Si  $N(X)$  est la fonction de répartition de la loi normale de  $X$ , on a :

- Au niveau de référence, la variable réduite s'écrit :

$$U_R = \frac{X_{ref} - X_{50\%}}{s}$$

- Au niveau durci, la variable réduite s'écrit :

$$U_d = \frac{X_{dur} - X_{50\%}}{s}$$

En résolvant le système ci-dessus et sachant que  $X_{réf} = K_d \times X_{dur}$ , on obtient :

$$K_d = \frac{X_{50\%} + U_R \times s}{X_{50\%} + U_d \times s}$$



## GTPS N°11F

Sachant que le coefficient de variation global est  $CVg = \frac{s}{X_{50\%}}$ , l'expression

$K_d$  devient :

$$K_d = \frac{1+U_R \times CVg}{1+U_d \times CVg}$$

$U_R$  est la valeur de la variable réduite correspondant à la probabilité de bon fonctionnement  $R$  pour la valeur de référence  $X_{réf}$  :

$$R = N(U_R)$$

$U_d$  est la valeur de la variable réduite correspondant à la probabilité observée après avoir effectué  $n$  essais réussis à un niveau durci, pour un niveau de confiance  $1-\alpha$  requis. Cette valeur de  $U_d$  est déterminée par l'utilisation de la loi binomiale, dont la formule, si on observe  $0$  échec au niveau durci, est :

$$\text{Prob ( Paramètre } X < X_{dur} ) = \alpha^{1/n} = R_d = N(U_d)$$

L'expression  $K_d$  peut finalement s'écrire :

$$K_d = \frac{1 + N^{-1}(R) \times CVg}{1 - N^{-1}(1 - \alpha^{1/n}) \times CVg} = \frac{1 + N^{-1}(R) \times CVg}{1 + N^{-1}(\alpha^{1/n}) \times CVg}$$

Avec  $N(x)$  : Loi normale de  $x$  :  $N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-u^2/2} du$

### C.2.5.5 RECOMMANDATIONS

#### RECOMMANDATION N°4 : Coefficient de durcissement maximal

Il est recommandé de vérifier que le niveau durci calculé est situé à un niveau de risque d'échec jugé acceptable. Si ce n'est pas le cas :

- diminuer le coefficient de durcissement :
  - soit en augmentant le nombre de tirs durcis,
  - soit en dégradant la fiabilité à évaluer,
- revoir la conception de l'objet (par exemple en augmentant les marges).

### RECOMMANDATION N°5 : Analyse de sensibilité

Avant de procéder à la réalisation du plan d'essais durcis, il est nécessaire de procéder à une analyse de sensibilité du niveau durci calculé en faisant varier le niveau de fiabilité à évaluer.

Si la variation de niveau durci  $X_{dur}$ , pour un niveau de fiabilité significativement différent, n'est pas significativement plus élevée que la précision d'ajustement du niveau, la méthode ne s'applique pas. En effet, le même niveau de durcissement permettrait d'évaluer des niveaux de fiabilité très différents (Voir exemple en **annexe 8**).

### RECOMMANDATION N°6 : Domaine physique des essais

Avant de procéder à la réalisation du plan d'essais durcis, il est recommandé de vérifier que le niveau durci ne se situe pas dans un domaine avec changement physique de fonctionnement par rapport au niveau nominal (exemple : un changement de phase en sollicitation thermique, cf. §B.3.2.3).

#### C.2.5.6 FEUILLE DE CALCUL

Une feuille de calculs, fonctionnant sous la version française de MICROSOFT EXCEL<sup>®</sup>, est mise à disposition sur le site internet du GTPS (<http://www.afpyro.org/gtps>) : elle peut être utilisée avec ou sans échec.

### C.2.6 REALISATION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS

Ce chapitre traite de la réalisation du plan d'essais et de l'exploitation de ses résultats.

Deux cas peuvent se produire :

- Le plan d'essais se déroule conformément à l'attendu : pas d'échec observé,
- Le plan d'essais ne se déroule pas conformément à l'attendu : un ou plusieurs échecs observés.

#### C.2.6.1 CAS D'UN PLAN SANS ECHEC

Le résultat est conforme à l'attendu : la fiabilité est donc bien évaluée au niveau requis à la construction du plan d'essais.

## GTPS N°11F

### C.2.6.2 CAS D'UN PLAN AVEC ECHECS

Les causes possibles et axes de résolution sont présentés dans le tableau ci-après :

Causes possibles et significations		Processus de résolution	Commentaires
Conditions de réalisation du plan d'essais	<p>Eléments extérieurs au produit ayant conduit à l'échec des spécimens concernés :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- réalisation des essais,</li> <li>- environnement,</li> <li>- etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vérifier que les éléments identifiés n'ont pas favorisé les succès,</li> <li>- Exclure les essais incriminés : échecs <b>et</b> succès douteux,</li> <li>- Réapprovisionner les spécimens nécessaires,</li> <li>- Terminer le plan d'essais.</li> </ul>	<p>Il est <b>impératif</b> de démontrer que les causes spécifiques identifiées sont effectivement responsables des échecs constatés et ne sont pas responsables d'une augmentation de variabilité pouvant favoriser les succès observés.</p> <p>Dans le cas contraire, supprimer tous les spécimens incriminés (échecs <u>et</u> succès).</p>
Construction du plan d'essais	<p>Le coefficient de durcissement est trop élevé pour le produit testé :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- nombre d'essais trop faible,</li> <li>- objectif de fiabilité trop élevé,</li> <li>- CVg surévalué.</li> </ul>	<p>Diminuer le coefficient de durcissement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- vérifier le CVg,</li> <li>- augmenter le nombre d'essais</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Et/Ou</b></p> <p>Renégocier l'objectif de fiabilité.</p>	<p>Les succès précédents ne sont pas perdus : ils sont toujours comptabilisés comme des succès dans le nouveau plan à coefficient de durcissement réduit.</p>

## GTPS N°11F

Causes possibles et significations		Processus de résolution	Commentaires
Fabrication des spécimens d'essais	Cause(s) spécifique(s) de fabrication ayant conduit à l'échec des spécimens concernés : - non respect de tolérances, - défaut matière, - défaut de traitement thermique, - etc.	- Vérifier que les éléments identifiés n'ont pas favorisé les succès, - Exclure les essais incriminés : échecs <b>et</b> succès douteux, - Réapprovisionner les spécimens nécessaires, - Terminer le plan d'essais.	Il est <b>impératif</b> de démontrer que les causes spécifiques identifiées sont effectivement responsables des échecs constatés et ne sont pas responsables d'une augmentation de variabilité pouvant favoriser les succès observés. Dans le cas contraire, supprimer tous les spécimens incriminés (échecs <u>et</u> succès).
Conception du produit	Le produit ne répond pas au niveau de fiabilité attendu : - erreur de dimensionnement des marges de conception, (modélisation fonctionnelle erronée, etc.).	- Renégocier un nouvel objectif de fiabilité compatible de l'exigence système - Ré-exploiter le plan d'essais durcis à un niveau de fiabilité réduit (avec prise en compte des échecs constatés) en utilisant la méthode de calcul de l' <b>annexe 3</b> ,  <b>Ou</b>  Reconcevoir le produit.	

## GTPS N°11F

Causes possibles et significations		Processus de résolution	Commentaires
Risque statistique résiduel	Cas d'un seul échec : statistiquement, la probabilité d'avoir <b>UN</b> échec reste possible même si elle est faible.	<p>Compléter par des essais supplémentaires pour regagner l'objectif de fiabilité (avec prise en compte de l'échec) en utilisant la méthode de calcul de l'<b>annexe 3</b>.</p> <p style="text-align: center;"><b>Ou</b></p> <p>Evaluer une fiabilité plus faible (par rapport à l'objectif visé) en utilisant la méthode de calcul de l'<b>annexe 3</b> (à renégocier au niveau système).</p>	<p>Ce risque est à envisager en <b>dernier recours</b> : toutes les autres causes précédemment évoquées doivent être éliminées.</p> <p style="text-align: center;">-----</p> <p>Si on s'est trompé sur l'hypothèse de risque statistique résiduel, on risque un deuxième échec dans le complément d'essais durcis.</p>
	Cas de plusieurs échecs : statistiquement, la probabilité d'avoir <b>plusieurs</b> échecs est très improbable, et révèle un dysfonctionnement en amont (causes ci-dessus).	<p>La justification statistique n'est pas crédible.</p> <p>Reprendre :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- l'ensemble du plan d'essais durcis,</li> </ul> <p style="text-align: center;"><b>Et/ou</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la conception.</li> </ul>	Toutes les causes précédentes doivent être réexaminées.

### C.2.6.3 RECOMMANDATION

#### RECOMMANDATION N°7 : Analyse des échecs

Dès qu'un échec est observé, il est recommandé d'arrêter les essais, et d'analyser la cause de cet échec. La reprise des essais se fera alors après correction du problème, ce qui évitera de nouveaux échecs imputés à la cause identifiée.

## D. EXEMPLE D'APPLICATION

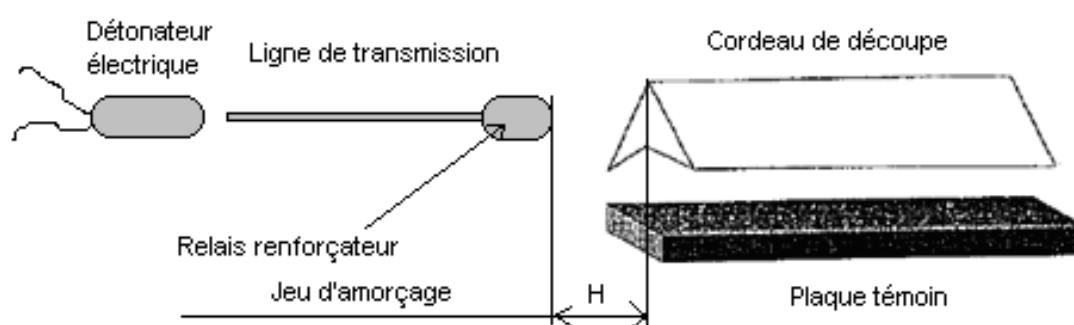
Le système présenté est un cordeau découpeur initié en détonation par une ligne de transmission détonante.

**NOTA :** Toutes les données numériques de cet exemple sont fictives : elles sont données à titre d'apprentissage pédagogique, pour permettre au lecteur de ce document de refaire les calculs.

### D.1 OBJECTIF

Valider la fiabilité d'initiation en détonation de l'interface fonctionnelle entre la ligne de transmission détonante et le cordeau découpeur.

La transmission de l'onde de détonation de la ligne de transmission détonante au découpeur est validée par l'empreinte de détonation créée par le fonctionnement du cordeau découpeur sur une cible de tir.



### D.2 RECHERCHE DU PARAMETRE A DURCIR

Le paramètre physique pilotant l'initiation du cordeau découpeur est l'énergie transmise par la ligne de transmission détonante.

Parmi les différents paramètres fonctionnels influant sur cette énergie (densité d'explosif de la ligne de transmission détonante et du cordeau découpeur, jeu fonctionnel, épaisseur du cordeau, température,...), le paramètre à durcir choisi est l'énergie d'initiation, qui est liée au jeu entre la ligne de transmission détonante et le cordeau découpeur : une étude antérieure spécifique et le retour d'expérience sur ce type d'interface ont montré qu'il existe une relation non linéaire entre le jeu et l'énergie d'initiation.

Le jeu **H** devient donc le paramètre prépondérant, car il permet de faire varier l'énergie tout en satisfaisant les critères du §C.2.3, à savoir :

- il a une influence significative sur la performance à satisfaire,
- il est quantifiable,
- il est accessible à la mesure,
- il est facilement ajustable en modifiant la hauteur d'appui de la ligne dans l'outillage d'interface.

Une étude paramétrique est réalisée sur le jeu afin de déterminer le niveau d'énergie apporté au cordeau en fonction de l'évolution du jeu entre la ligne souple et le cordeau découpeur : cette simulation permet d'établir la relation existante entre l'énergie (paramètre à durcir) et le jeu (moyen expérimental pour durcir l'énergie).

## GTPS N°11F

Le coefficient de durcissement est calculé à partir du ratio entre :

- L'énergie de la configuration nominale aux bornes des tolérances de la définition ( $X_{réf}$ ),
- L'énergie durcie obtenue par augmentation du jeu ( $X_{dur}$ ).

### D.3 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE VARIATION CVG

Le paramètre fonctionnel « énergie de détonation du donneur » dépend des paramètres influents suivants :

- la charge linéaire de la ligne de transmission détonante (donneur),
- la charge linéaire du cordeau découpeur (receveur),
- la géométrie de l'extrémité de la ligne de transmission détonante,
- la géométrie de l'épaisseur de l'enveloppe du cordeau découpeur,
- le jeu  $H$  entre la ligne de transmission détonante et le cordeau découpeur.

La dispersion (**CVc**) est une conséquence des dispersions associées aux paramètres influents :

- dispersion géométrique sur le jeu  $H$  **CV0 = 3%**
- dispersion de la charge linéaire de la ligne de transmission détonante **CV1 = 3%**
- dispersion de la charge linéaire du cordeau découpeur **CV2 = 3%**
- dispersion géométrique de l'extrémité de la ligne de transmission détonante **CV3 = 7%**
- dispersion géométrique de l'épaisseur de l'enveloppe du cordeau découpeur **CV4 = 5%**

Les coefficients de variation élémentaires **CVi** de ces paramètres sont établis à partir des tolérances de définition de ces paramètres, considérées égales à  $\pm 3$  sigma.

Dans cet exemple, les dispersions liées au vieillissement, aux ambiances mécaniques ou aux cyclages thermiques sont délibérément exclues du calcul, en application de la spécification d'entrée.

Les lots de matériels présentés aux essais sont par ailleurs considérés représentatifs de la population.

Le CVc est calculé comme suit :

$$CVc = \sqrt{CV0^2 + CV1^2 + CV2^2 + CV3^2 + CV4^2} = 10,05\%$$

En suivant la recommandation N°1 du §C.2.4.4, on majore de 10% le coefficient de variation calculé CVc pour obtenir le coefficient de variation global :

$$CVg = 1,1 \times CVc = 11,05\%$$

Cette valeur est acceptable conformément à la recommandation n°2 du §C.2.4.4 :

$$3\% < CVg < 15\%$$

## D.4 CONSTRUCTION DU PLAN D'ESSAIS DURCIS

Le coefficient de durcissement utilisé est de type « multiplicateur » ( $K_m$ ), car le paramètre choisi (jeu H) est inversement proportionnel à l'énergie d'initiation en détonation.

Le plan d'essais durcis est construit de la manière suivante :

- Fiabilité visée : **R = 0,999**
- Niveau de confiance : **1- $\alpha$  = 90%**
- Coefficient de variation : **CVg = 11,05%**
- Nombre d'essais durcis : **n = 5**

Le coefficient multiplicateur calculé est donc de  $K_m = 1,46$  : il reste conforme à la recommandation n°2 du §C.2.4.4 ( $K_m \geq 1,2$ ).

## D.5 REALISATION ET EXPLOITATION DES ESSAIS DURCIS

Plusieurs cas peuvent se présenter :

➤ <b>Aucun échec</b> observé :	c'est le cas nominal
➤ <b>1 échec</b> constaté et inexpliqué :	c'est un cas dégradé restant exploitable
➤ <b>2 échecs</b> constatés et inexpliqués :	c'est un cas d'échec du plan d'essais durcis

**NOTA :** Pour les cas avec un ou deux échec(s) constaté(s), on fait l'hypothèse que ces échecs ne sont pas attribués à une cause liée à la fabrication des spécimens concernés et/ou aux conditions d'essai, et ne peuvent donc pas être remplacés par de nouveaux essais (Cf. tableau du §C2.6 .2, et logigramme en **annexe 7**) : ces échecs sont donc attribués au « risque statistique ».



### D.5.1 CAS 1 : AUCUN ECHEC OBSERVE

Si les 5 essais durcis sont effectués sans échec, alors la fiabilité visée pour l'interface fonctionnelle entre la ligne de transmission détonante et le cordeau découpeur est validée à **R=0,999** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 90%**.

### D.5.2 CAS 2 : UN ECHEC OBSERVE (CAS DEGRADE)

Si les 5 essais durcis sont effectués avec un échec constaté (au 5<sup>ème</sup> tir en application de la recommandation n°7 au §C.2.6.3), alors la fiabilité visée pour l'interface fonctionnelle entre la ligne souple et le cordeau découpeur n'est pas validée.

Deux options sont alors possibles :

- **Option 1** : on exploite tel quel le plan d'essais avec son échec en dégradant la fiabilité et/ou le niveau de confiance. Dans ce cas la fiabilité peut être évaluée à :
  - **R= 0,9914** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 90%**
  - **R= 0,999** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 60%**
  - **R= 0,9964** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 80%**
- **Option 2** : on complète le plan d'essais avec des spécimens supplémentaires pour retrouver le niveau de fiabilité visé. Dans ce cas, il faudra rajouter aux 5 essais déjà réalisés :
  - **4** essais supplémentaires sans échec permettent de retrouver le niveau de fiabilité visé (**R=0,999** avec **1- $\alpha$  = 90%**), soit au total **9 essais** durcis (dont 1 échec),

La **2<sup>ème</sup> option** est risquée, car si l'échec constaté n'est pas réellement dû au risque statistique comme on le suppose, alors le risque d'avoir un deuxième échec dans les nouveaux spécimens testés reste fort.

### D.5.3 CAS 3 : DEUX ECHECS OBSERVES (ECHEC DU PLAN D'ESSAIS DURCIS)

Si les 5 essais durcis sont effectués avec deux échecs constatés, alors la fiabilité visée pour l'interface fonctionnelle entre la ligne souple et le cordeau découpeur n'est pas validée.

Ce cas est considéré comme un échec du plan d'essais durcis et il est recommandé de ne pas l'exploiter en l'état.

En effet, si on essayait d'exploiter ce plan avec deux échecs, comme on l'avait fait au § D.5.2, on aurait les résultats suivants :

- **Option 1** : on exploite tel quel le plan d'essais avec ses deux échecs en dégradant la fiabilité et/ou le niveau de confiance. Dans ce cas la fiabilité peut être évaluée à :
  - **R= 0,9618** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 90%**
  - **R= 0,999** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 26%**
  - **R= 0,9935** à un niveau de confiance **1- $\alpha$  = 60%**
- **Option 2** : on complète le plan d'essais avec des spécimens supplémentaires pour retrouver le niveau de fiabilité visé. Dans ce cas, il faudra rajouter aux 5 essais déjà réalisés :
  - **8** essais supplémentaires sans échec permettent de retrouver le niveau de fiabilité visé (**R=0,999** avec **1- $\alpha$  = 90%**), soit au total **13 essais** durcis (dont 2 échecs).

On s'aperçoit que :

- La 1<sup>ière</sup> option donne une fiabilité résultante très éloignée de l'objectif visé,
- La 2<sup>ième</sup> option devient prohibitive en termes de nombre d'essais à réaliser, et le risque d'avoir d'autres échecs dans les nouveaux spécimens testés devient inacceptable, car il est très probable que les deux échecs constatés ne résultent pas du seul risque statistique.

## **E. CONCLUSION**

Cette recommandation expose la procédure de mise en œuvre de la méthode des essais durcis.

Cette méthode est applicable à l'évaluation d'une probabilité de succès (ou d'échec), lors du fonctionnement d'un dispositif monocoup. Elle explicite la démarche à suivre (conditions de mise en œuvre proprement dite) en insistant notamment sur :

- la sélection d'un paramètre prépondérant, sur lequel seront réalisés les essais durcis,
- la détermination du coefficient de variation du paramètre prépondérant à durcir,
- la détermination du coefficient de durcissement et par conséquent du niveau auquel on fera les essais durcis,
- la conduite des essais durcis, qui ne doivent en principe pas produire d'échecs,
- l'exploitation des résultats, notamment lorsqu'on constate l'apparition d'échecs.

Elle permet d'évaluer un niveau de fiabilité visé a priori, à partir d'un échantillon de taille faible ( $< 10$ ), en supposant que la distribution des seuils de fonctionnement du paramètre fonctionnel prépondérant retenu suit une loi normale.

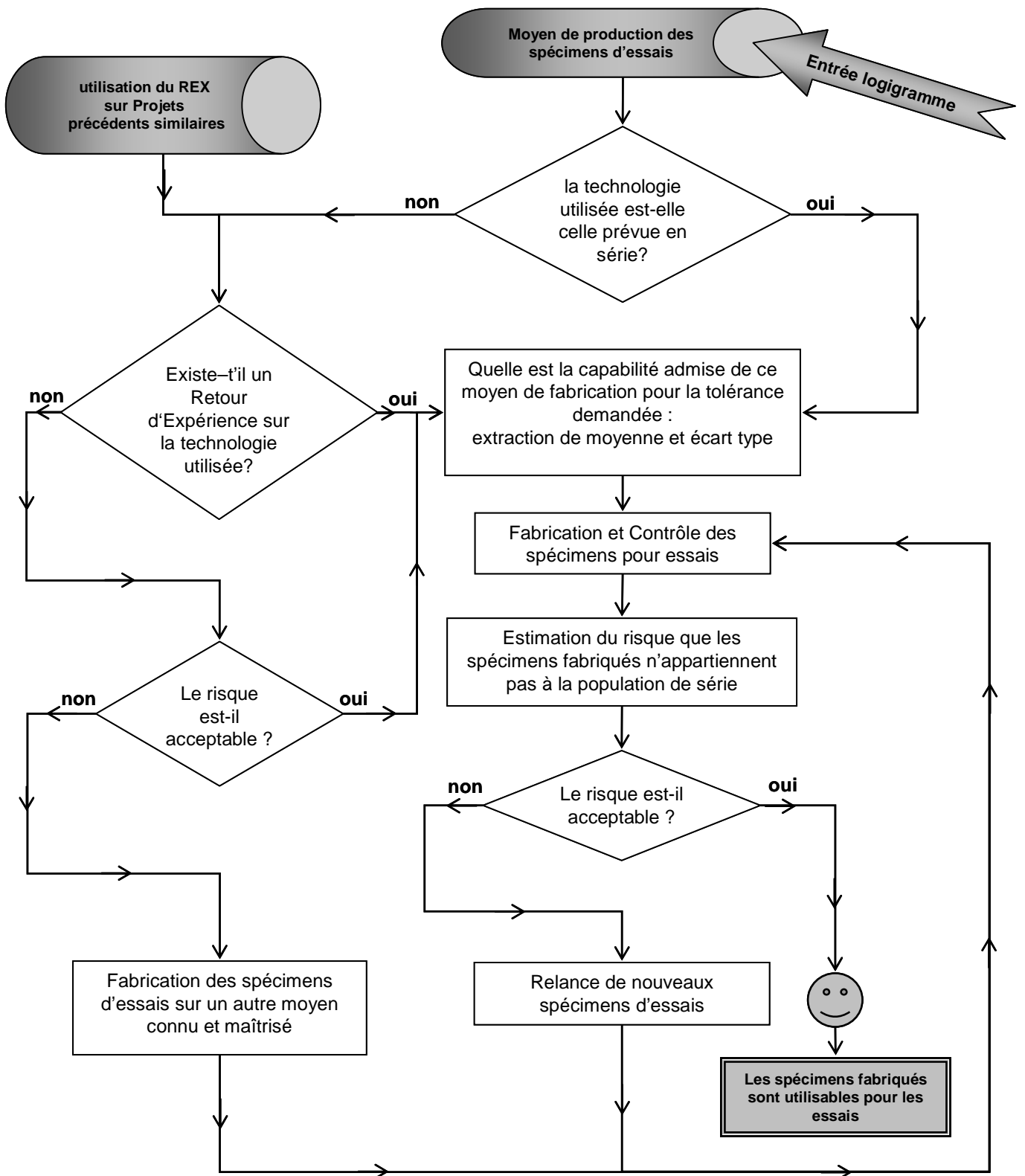
Cette évaluation de fiabilité, étendue à une population infinie et assortie d'un niveau de confiance donné, permet de chiffrer la probabilité de réalisation de la fonction du dispositif monocoup sous l'effet d'un niveau de sollicitation de référence défini.

## **F. REMERCIEMENTS**

La commission fiabilité du GTPS tient particulièrement à remercier MM. HEYMANN et GOND (MBDA) pour leur aide apportée à la construction de la méthode des essais durcis avec prise en compte des échecs.

**ANNEXES**

Annexe 1 : Vérification de la représentativité des échantillons testés



## Annexe 2 : Pondération des CV par utilisation d'un plan d'expériences

Le calcul du coefficient de variation corrigé CVC tel que présenté au §C.2.4.3 repose sur le fait que tous les coefficients de variation élémentaires CV<sub>i</sub>, soient affectés d'un « poids » égal : tous les paramètres associés à ces CV<sub>i</sub> jouent un rôle d'importance égale dans la performance étudiée.

L'utilisation de la méthode des plans d'expérience permet d'éviter l'introduction d'un tel biais sur le calcul. La méthodologie proposée est la suivante :

### 1/ Analyse factorielle

Identification des facteurs prépondérants :

- Facteurs prépondérants (ex : épaisseur, distance,...) : maîtrisables et indépendants entre eux ; effet direct sur le produit ; non assimilables aux dispersions dites naturelles
- Facteurs environnementaux (température,...) : peu ou non maîtrisables ; l'ensemble de ces facteurs génère une distribution normale de la performance

### 2/ Etablissement et réalisation d'un plan d'expérience

Le plan d'expérience est à réaliser sur les facteurs prépondérants aux limites d'emploi du produit.

### 3/ Exploitation du plan d'expérience par régression multilinéaire

Obtention d'un modèle mathématique du produit du type :

$$Y = A_0 + \sum_{j=0}^{k-1} A_{j+1} \times X_j$$

- Où
- A<sub>j</sub>** : coefficient d'influence associé au facteur prépondérant X<sub>j-1</sub> issu du plan d'expérience
  - X<sub>j</sub>** : facteur prépondérant du système
  - Y** : performance étudiée

### 4/ Détermination de la dispersion totale

Le coefficient de variation global CV<sub>g</sub> peut ensuite être calculé en cumulant l'écart type résiduel obtenu par le plan et les coefficients de variation associés aux facteurs prépondérants pondérés en fonction de leur « poids » dans le modèle mathématique suivant la relation suivante :

$$C_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \Big|_{X_j = cte = \mu_j, \forall j \neq i}$$

- Où **C<sub>i</sub>** : coefficient d'effet

## GTPS N°11F

La dispersion totale est ensuite obtenue par composition quadratique des écarts types avec leurs coefficients d'effet  $C_i$  :

$$\sigma_{total} = \sqrt{\left[ \sum_i C_i^2 \cdot \sigma(X_i)^2 \right] + \sigma_{résiduel}^2}$$

- Où :
- $\sigma(X_j)$  : écart type associé au facteur prépondérant  $X_j$  (obtention suivant §C.2.4.2)
  - $\sigma_{résiduel}$  : écart type résiduel obtenu par le plan d'expérience (influence des facteurs « environnementaux »)
  - $\sigma_{total}$  : écart type total directement lié au CVg

L'écart-type total permet le calcul du **CVg** :  $CVg = \sigma_{total} / m_{performance}$

### 5/ Exemple d'application

Équipement : vérin fonctionnant par onde de choc

- Facteurs prépondérants :
  - **X0** (masse d'explosif secondaire) = 10 avec  $\sigma(X0) = 0,1$
  - **X1** (masse d'explosif primaire) = 4 avec  $\sigma(X1) = 0,2$
- Modèle :  $Y = A0 + A1X0 + A2.X0.X1$  avec  $\sigma_{résiduel} = 0,05$ 
  - $A0 = 2,5$
  - $A1 = 0,5$
  - $A2 = 0,2$

- Coefficients d'effets :

$$C_o = \frac{\partial Y}{\partial X_o} \Big|_{X_1=\mu_1} = A_1 + A_2 \cdot \mu_1 = 0,5 + 0,2 \times 4 = 1,3$$

$$C_1 = \frac{\partial Y}{\partial X_1} \Big|_{X_0=\mu_0} = A_2 \cdot \mu_0 = 0,2 \times 10 = 2,0$$

D'où :

- Moyenne de la performance : **moyenne (Y)** =  $2,5 + 0,5 \times 10 + 0,2 \times 10 \times 4 = 15,5$ .
- Coefficient de variation global : **CVg** =  $0,424/15 = 3 \%$ .

**Annexe 3 : Traitement des plans d'essais avec échecs**

**Hypothèse de départ :** On réalise un plan de **n** essais durcis avec **k** échecs

D'après le document réf. **19**, la probabilité minimale **P** d'occurrence de ce plan d'essais durcis au niveau de confiance **1-α** suit une loi **Bêta incomplète** :

$$I(P, n - k, k + 1) = \alpha$$

Pour prouver, à partir de ce plan d'essais, que la probabilité de bon fonctionnement PBF est au moins égale à **R<sub>d</sub>** (fiabilité au niveau durci **X<sub>dur</sub>**), il faut satisfaire la relation :

$$P \geq R_d$$

Ce qui implique que :

$$I(R_d, n - k, k + 1) \leq \alpha$$

La résolution de cette inéquation (Cf. document réf. **20**) permet de calculer la fiabilité **R<sub>d</sub>** au niveau durci **X<sub>dur</sub>** :

$$R_d = \left( I^{-1}(\alpha, n - k, k + 1) \right)$$

Comme on l'a vu au § C.2.5.3, les expressions des coefficients de durcissement multiplicateur et diviseur sont les suivantes :

$$K_m = \frac{1 + U_d \times CV_g}{1 + U_r \times CV_g} \quad \text{et} \quad K_d = \frac{1 - U_r \times CV_g}{1 - U_d \times CV_g}$$

Dans le cas du coefficient multiplicateur, on sait que **R = N(-U<sub>r</sub>)** et que **R<sub>d</sub> = N(-U<sub>d</sub>)** ; on en déduit l'expression de coefficient de durcissement **K<sub>m</sub>** :

$$K_m = \frac{1 - CV_g \cdot N^{-1} \left( I^{-1}(\alpha, n - k, k + 1) \right)}{1 - CV_g \cdot N^{-1}(R)}$$

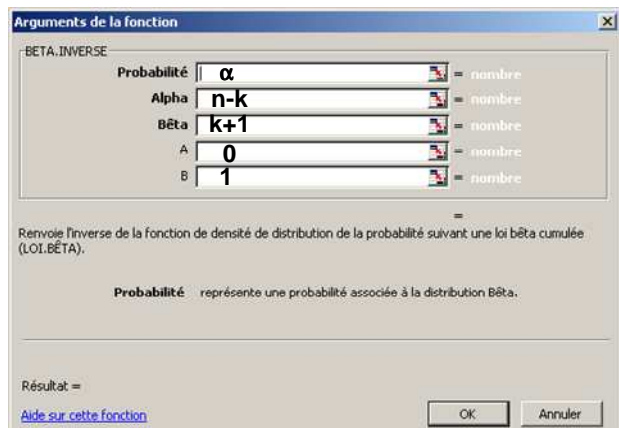
Dans le cas du coefficient diviseur, on sait que **R = N(U<sub>r</sub>)** et que **R<sub>d</sub> = N(U<sub>d</sub>)** ; on en déduit l'expression de coefficient de durcissement **K<sub>d</sub>** :

$$K_d = \frac{1 + CV_g \cdot N^{-1}(R)}{1 + CV_g \cdot N^{-1} \left( I^{-1}(\alpha, n - k, k + 1) \right)}$$

**NOTA :** Il est à noter que ces formules de calcul (de Km et de Kd) fonctionnent pour des plans d'essais durcis sans échec (il suffit de rentrer la valeur **0** pour le nombre d'échecs **k**).

Ces formules sont facilement programmables dans un tableur (Microsoft EXCEL® par exemple) : Le GTPS propose d'ailleurs une feuille de calcul EXCEL fonctionnant avec la version française de Microsoft EXCEL®. Sous EXCEL,  $I^{-1}(\alpha, n - k, k + 1)$  se programme de la manière suivante :

BETA.INVERSE (α ; n-k ; k+1 ; 0 ; 1)





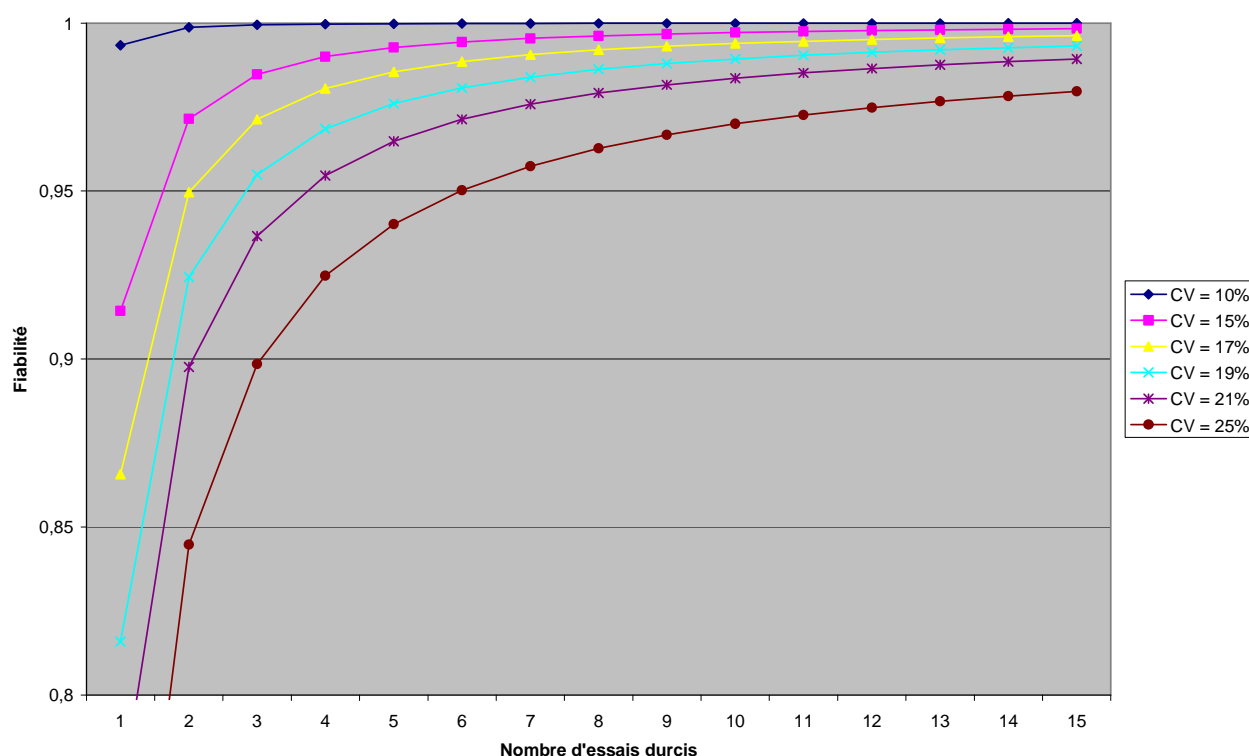
## Annexe 4 : Analyse et construction du CVg

### Niveaux maximum des CVg recommandés :

L'utilisation d'un CVg > 15% n'est pas recommandée (cf. Recommandation 2 du §C.2.4.4). Les graphiques ci-après illustrent cette notion de niveau limite recommandé.

Le graphique 1 montre que des niveaux de fiabilité élevés sont difficilement atteignables avec des CVg supérieurs à 15% (cas d'un coefficient de durcissement multiplicateur Km de 1,5) :

- pour 4 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,990
- pour 15 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,998

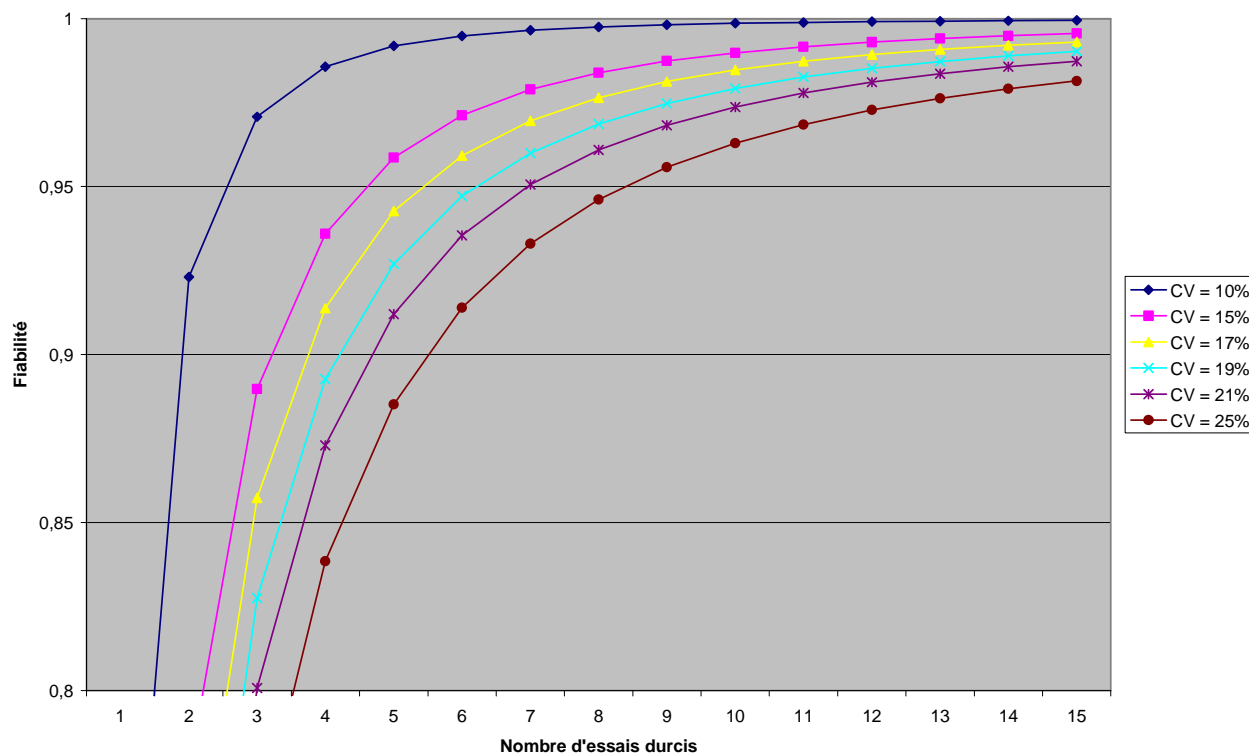


**Graphique 1** – Niveaux de fiabilité avec un niveau de confiance de 90% en fonction du nombre d'essais avec un coefficient de durcissement multiplicateur Km de 1,5

## GTPS N°11F

Le graphique 2 montre que des niveaux de fiabilité élevés sont difficilement atteignables avec des CVg supérieurs à 15% (cas d'un coefficient de durcissement diviseur Kd de 1,2) :

- pour 4 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,950
- pour 15 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,995

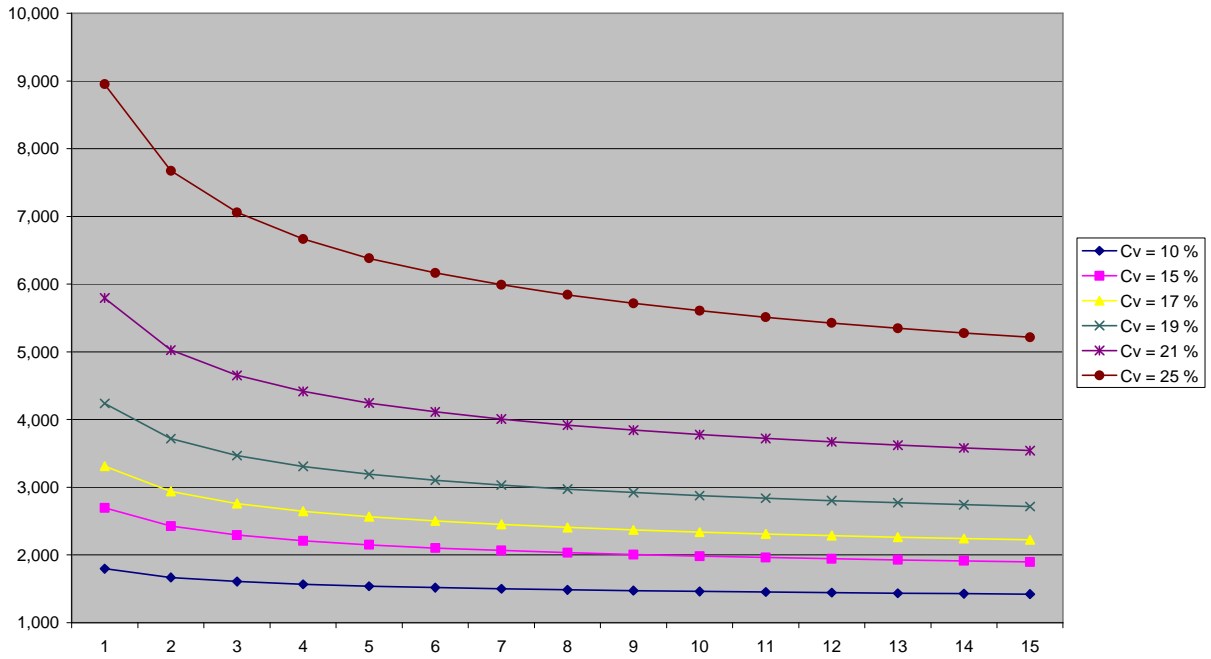


**Graphique 2** – Niveaux de fiabilité avec un niveau de confiance de 90% en fonction du nombre d'essais avec un coefficient de durcissement diviseur Kd de 1,2

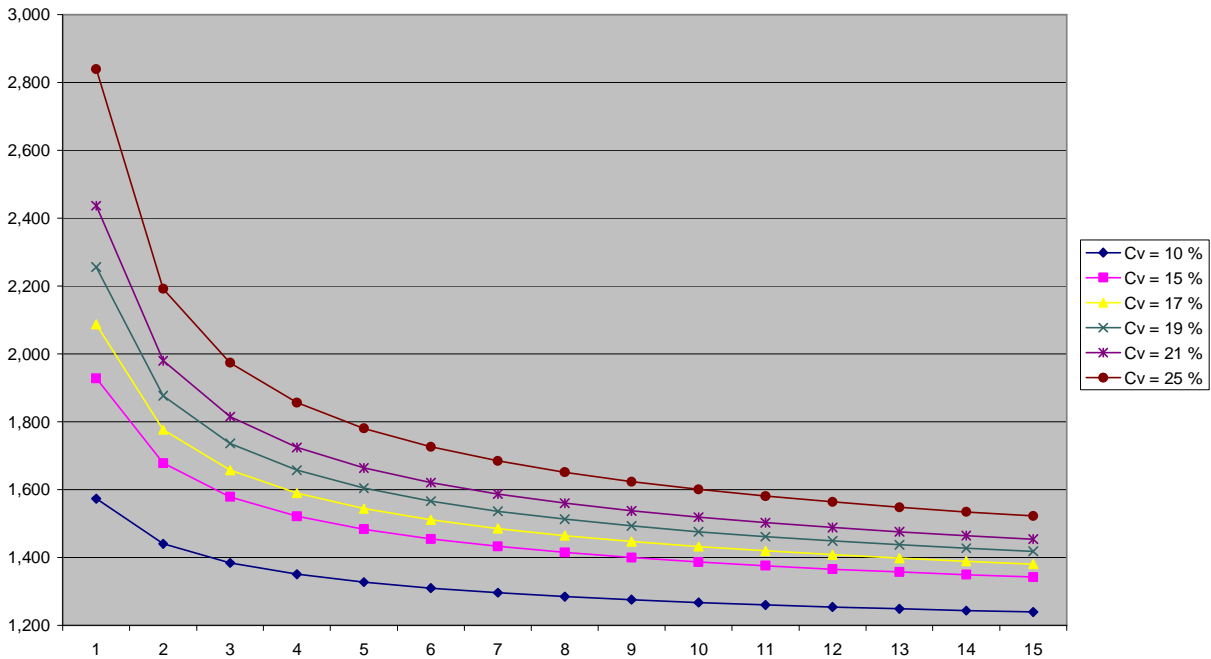
Le même constat s'applique en fixant l'objectif de fiabilité et en calculant le coefficient de durcissement requis en fonction du nombre d'essais (voir graphiques 3 et 4 page suivante).

Les niveaux requis des coefficients de durcissement pour un même objectif de fiabilité atteignent alors des valeurs importantes, potentiellement non compatibles de la définition ou de la mise en œuvre.

## GTPS N°11F



**Graphique 3** – Coefficient de durcissement multiplicateur en fonction du nombre d'essais avec un objectif de fiabilité de 0,9999 pour un niveau de confiance de 90%



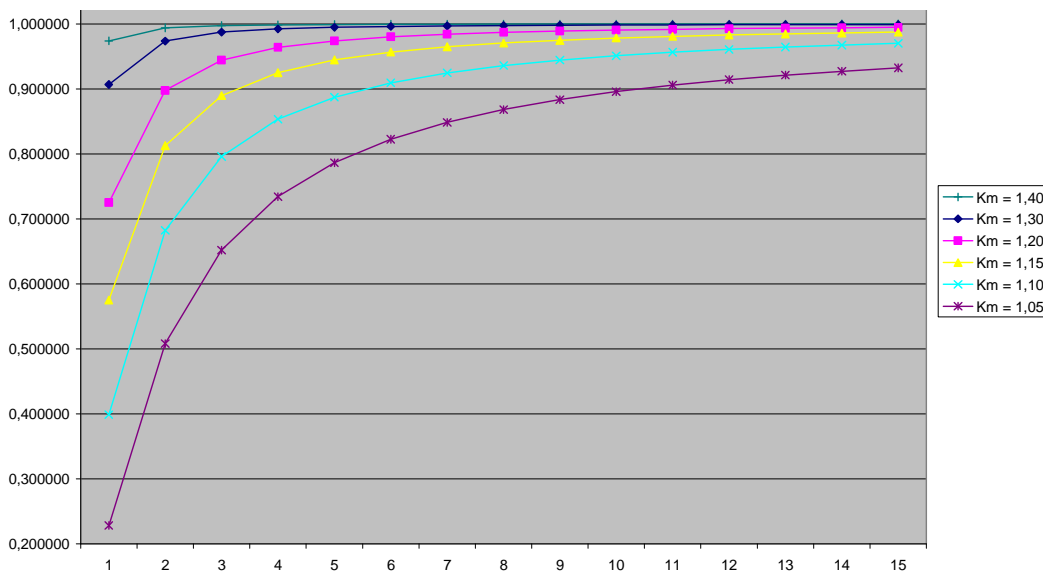
**Graphique 4** – Coefficient de durcissement diviseur en fonction du nombre d'essais avec un objectif de fiabilité de 0,9999 pour un niveau de confiance de 90%

**Annexe 5 : Niveau minimum de coefficient de durcissement**

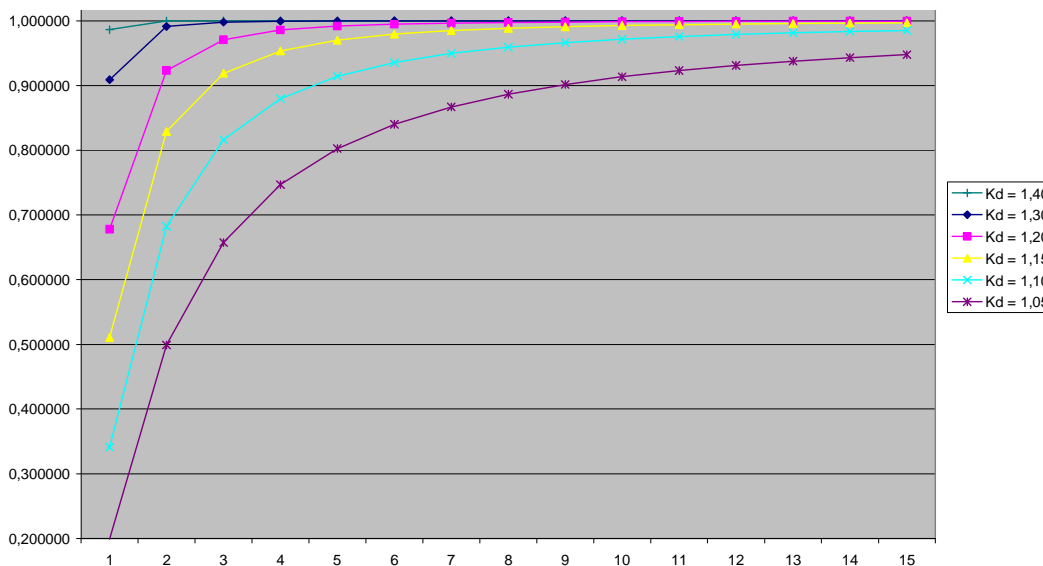
Il est recommandé d'utiliser un coefficient de durcissement supérieur à 1,2 afin de garantir une marge suffisante entre le niveau de référence et le niveau durci (cf. Recommandation N°5 au §C.2.5.5). Les graphiques ci-après illustrent cette notion de niveau limite recommandé.

Les graphiques 5 et 6 montrent que des niveaux de fiabilité élevés sont difficilement atteignables avec des coefficients de durcissement inférieurs à 1,2 :

- pour 5 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,995 avec  $K_m = 1,15$
- pour 11 essais réussis, le niveau de fiabilité obtenu reste en deçà de 0,995 avec  $K_d = 1,15$

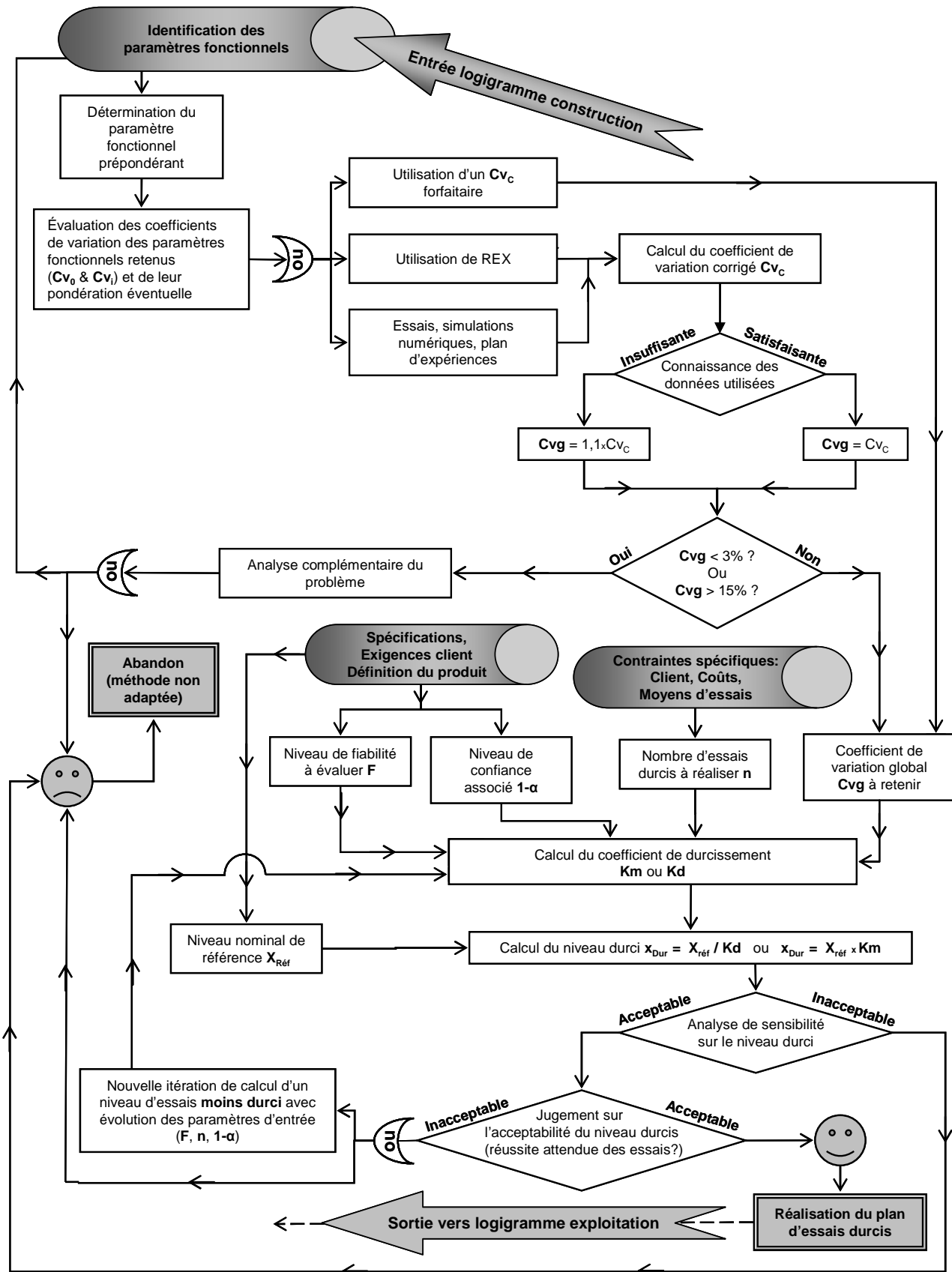


**Graphique 5** – Niveaux de fiabilité ( $1-\alpha = 90\%$  &  $CV_g = 10\%$ ) en fonction du nombre d'essais (cas du coefficient multiplicateur  $K_m$ )

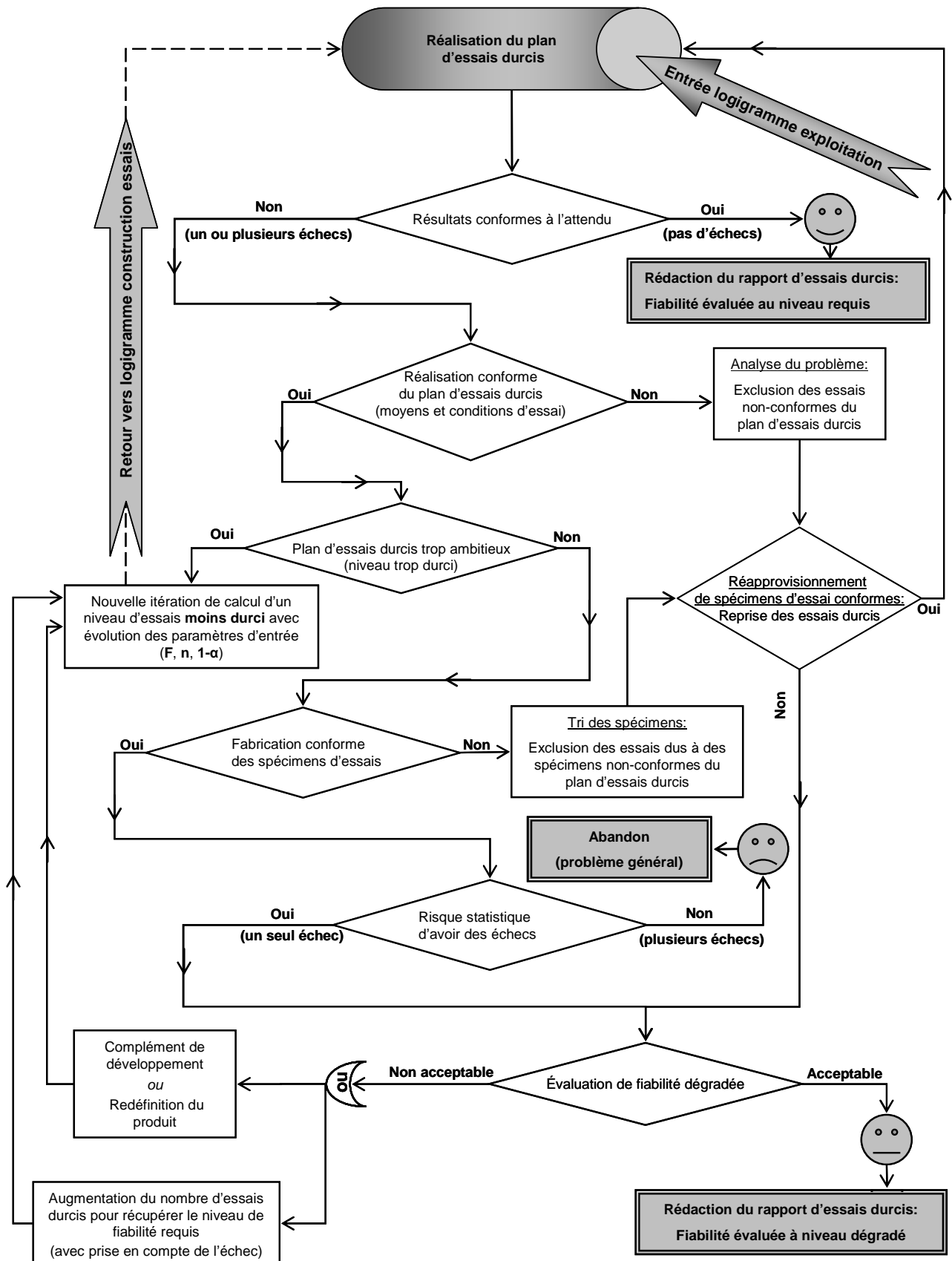


**Graphique 6** – Niveaux de fiabilité ( $1-\alpha = 90\%$  &  $CV_g = 10\%$ ) en fonction du nombre d'essais (cas du coefficient diviseur  $K_d$ )

Annexe 6 : Construction du plan d'essais durcis



Annexe 7 : Réalisation et exploitation du plan d'essais durcis



### Annexe 8 : Analyse de sensibilité du coefficient de durcissement

Toutes les données numériques de cet exemple sont fictives : elles sont données à titre d'apprentissage pédagogique, pour permettre au lecteur de ce document de refaire les calculs.

On souhaite réaliser un plan d'essais durcis sur l'intensité du courant de mise à feu d'un initiateur électrique.

Le niveau de fiabilité visé est :

- $R = 0,99999 = 1-10^{-5}$
- $1-\alpha = 90\%$

Pour des raisons économiques, on ne souhaite réaliser que deux tirs durcis.

Les caractéristiques fonctionnelles de ce paramètre sont les suivantes :

- Intensité minimale de mise à feu :  $X_{réf} = 5A$
- Coefficient de variation :  $CVg = 15\%$  (soit un écart-type  $\sigma = 0,75A$ )

Le **niveau de précision** sur l'ajustement du courant de mise à feu est de **0,1A** : il est très inférieur à l'écart-type du paramètre fonctionnel prépondérant.

Le coefficient de durcissement diviseur calculé est alors de :  $Kd = 1,766$

Ce qui nous fait un niveau durci de :  $X_{dur} = 5/1,766 = 2,83A$ .

Si on fait varier le niveau de fiabilité à  $R = 0,999999 = 1-10^{-6}$ , le plan d'essais durcis deviendrait alors :

- $Kd = 1,854$
- $X_{dur} = 2,71 A$

L'écart entre les deux niveaux durcis calculés n'est que de 0,12 A : il est du même ordre de grandeur que le niveau de précision d'ajustement du courant de mise à feu, ce qui veut dire qu'avec le même essai, on est capable d'évaluer des niveaux de fiabilité très différents.

Si on visait un niveau de fiabilité  $R=0,9999 = 1-10^{-4}$ , le plan d'essais serait alors :

- $Kd = 1,68$
- $X_{dur} = 2,98 A$

Soit un écart entre les deux niveaux de 0,15A : On s'aperçoit qu'avec un Cv de 15% et pour deux essais durcis, les limites de la méthode sont atteintes pour une fiabilité de  $R=0,9999$  à  $1-\alpha=90\%$  de confiance.

