



**HAL**  
open science

## Validation d'un objectif probabiliste par des essais de fiabilité: cache-bagages de coffre automobile

Moustafa Lachgar, Roxane Fepeussi Tumchou, Yann Ahmoy

### ► To cite this version:

Moustafa Lachgar, Roxane Fepeussi Tumchou, Yann Ahmoy. Validation d'un objectif probabiliste par des essais de fiabilité: cache-bagages de coffre automobile. Congrès Lambda Mu 22 " Les risques au cœur des transitions " (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. hal-03483302

**HAL Id: hal-03483302**

**<https://hal.science/hal-03483302>**

Submitted on 16 Dec 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Validation d'un objectif probabiliste par des essais de fiabilité : cache-bagages de coffre automobile

## Probabilistic objective validation by reliability testing: trunk automotive luggage cover

Moustafa Lachgar  
SECTOR Group  
Villeurbanne, France  
moustafa.lachgar@sector-group.net

Roxane Fepoussi Tumchou  
SECTOR Group  
Villeurbanne, France  
roxane.fepoussitumchou@sector-group.net

Yann Ahmoy  
Groupe PSA

**Résumé**—La maîtrise de la fiabilité dans l'automobile a des enjeux importants sur l'image de marque et la satisfaction client. Ce document présente la méthodologie d'évaluation de la fiabilité basée sur le guide « d'aide à l'estimation et à la validation de la fiabilité automobile » à travers un cas d'application.

**Abstract**—In the automotive industry, reliability management is important for brand image and customer satisfaction. This document will present the methodology to evaluate the reliability based on the guide for assessing and validating automotive reliability through an application case.

**Mots-clés**—fiabilité, essais tronqués, bayes, fatigue mécanique, endommagement, contrainte/résistance

### I. INTRODUCTION

La maîtrise de la fiabilité des véhicules automobiles en période de garantie et au-delà, a des enjeux considérables sur les coûts de garantie, l'image de marque et la satisfaction client. Evaluer la fiabilité sur le long terme est donc nécessaire à la compétitivité et si nécessaire à l'extension de garantie. L'objectif de la fiabilité étant de maîtriser sur une durée de vie donnée, l'apparition des modes de défaillances liées à des phénomènes de vieillissement.

C'est dans ce contexte qu'un groupe d'experts fiabilistes des entreprises AB VOLVO, HUTCHINSON, PSA, RENAULT, VALEO et SECTOR à élaborer un guide accessible à un large public, proposant des méthodes éprouvées, illustrées par des exemples d'applications, des fiches pratiques et un glossaire définissant un vocabulaire de référence pour la fiabilité : le « guide d'aide à l'estimation et à la validation de la fiabilité automobile » (réf. DC-01-03) [1].

SECTOR a accompagné le Groupe PSA pour la validation de la fiabilité d'un cache-bagages de coffre automobile en s'appuyant sur le guide.

L'objectif de ce document sera de présenter dans un premier temps le système étudié et de détailler étape par étape chacune des 5 phases de la trame méthodologique à travers ce cas d'application, jusqu'à la définition d'un essai permettant de valider sa fiabilité :

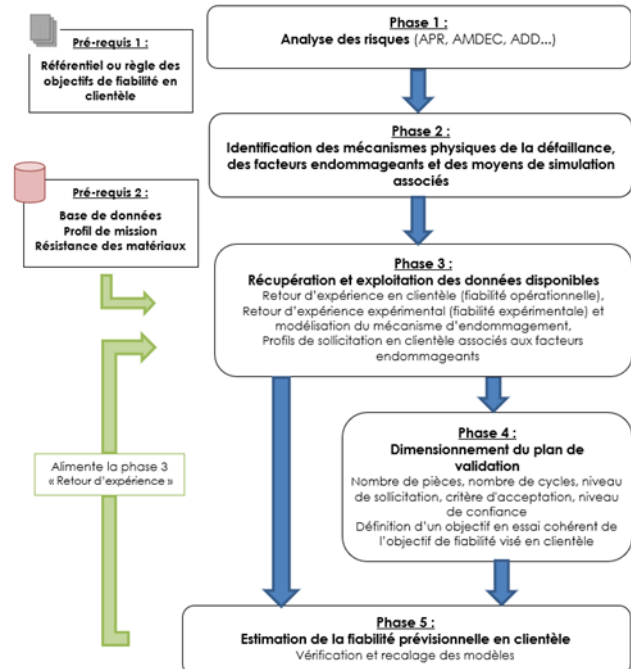


Fig. 1. Trame méthodologique

## II. TRAVAUX DEVELOPPES ET PRINCIPAUX RESULTATS

Cette étude a été réalisée par SECTOR dans le cadre du développement d'un système de cache-bagages pour un des véhicules du groupe PSA. L'objectif de l'étude est de définir un essai permettant de valider la tenue du système à un objectif de fiabilité. Nous détaillerons chacune des 5 phases de la trame méthodologique du guide permettant la validation d'un objectif probabiliste par un essai de fiabilité.

### A. Présentation du système cache-bagage

Ce système a pour fonction de dissimuler le contenu d'un coffre depuis l'extérieur (à travers les vitres du véhicule et le hayon). Il est composé d'un assemblage de pièces (une cassette, une toile, un ressort de rappel, etc.) permettant facilement de couvrir ou de découvrir manuellement le compartiment du coffre, mais aussi de pouvoir le retirer de son emplacement.

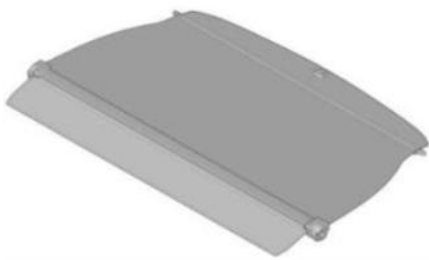


Fig. 2. Illustration cache-bagages

### B. Phase 1 : Analyse des risques

L'objectif de cette première phase, est de rechercher et d'identifier les risques en cas de défaillance, sur le système et son environnement.

Les analyses fonctionnelles, analyses préliminaires des risques et AMDEC, ont permis d'identifier pour chacune des situations de vie du système, les événements redoutés (ER) et le niveau de gravité associé.

Suite à cette étude d'analyse des risques, nous avons retenu pour la validation du système l'évènement redouté : « gêne de la fermeture de la toile du cache bagage » lors de la situation de vie « déroulement/enroulement de la toile ». C'est un ER de gravité 2 qui présente un risque de fiabilité, avec une dégradation de la fonction sans immobilisation du véhicule.

Le mode de défaillance pouvant mener à cet ER est une casse ou dégradation du mécanisme de déroulement/enroulement. Il est important de définir un critère de défaillance, c'est à dire le seuil de dégradation à partir duquel on confirme la défaillance. Dans notre cas ce sera un niveau d'effort pour le déroulement de la toile supérieur à un niveau seuil.

Pour ce niveau de gravité, un objectif de fiabilité est associé et il est exprimé en probabilité de défaillance  $Pf^*$  sur la durée de vie cible du véhicule. Cet objectif a été obtenu par une décomposition des objectifs au niveau véhicule.

Pour ce niveau de gravité, on fait le choix de valider l'objectif de fiabilité avec un niveau de confiance de 50%. D'après la norme ISO 26262 (8.4.3.b) [4], l'estimation d'un taux de défaillance basé sur un retour client doit être au

moins de 70% pour des ER 4 (ASIL B à D). En dehors de ces niveaux de gravité, aucun niveau de confiance n'est imposé dans la norme. Nous verrons tout de même en phase 4 l'impact de ce niveau de confiance sur la définition d'un essai de validation.

### C. Phase 2 : Identification des mécanismes physiques de la défaillance, des facteurs endommageants et des moyens de simulation associés

La fatigue mécanique et l'usure sont les deux mécanismes physiques identifiés pouvant être à l'origine de cette défaillance. Pour ces deux modes de ruine, ont été identifiés les facteurs endommageants. Ce sont les variables ayant une influence directe sur la dégradation du système :

- Pour la **fatigue mécanique**, l'endommagement est causé par la répétition des cycles de déroulement/enroulement de la toile ( $n$ ) et l'amplitude des efforts de tirage ( $E$ ). Cet effort varie linéairement avec la longueur de déroulement ( $L$ ) de la toile :  $\Delta E = k \cdot L$  (avec  $k$  : la raideur du ressort de rappel).

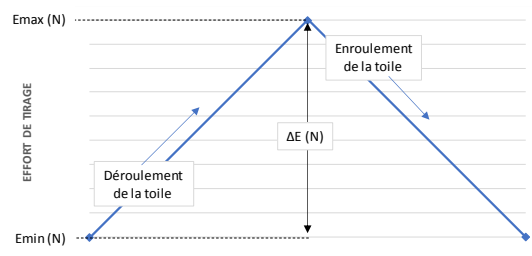


Fig. 3. Illustration de l'évolution des efforts en fonction de la longueur de tirage

- Pour le cas de l'**usure**, la dégradation est provoquée par les frottements des pièces du mécanisme, générées par les tirages de la toile. Dans ce cas, le nombre de cycles ( $n$ ) et la vitesse de tirage ( $v$ ) de la toile sont les facteurs endommageants.

Plus globalement, pour ces 2 modes de ruine, nous avons identifiés les facteurs environnants pouvant avoir une influence sur la dégradation. Leur prise en compte est nécessaire, car le système est composé de pièces en polyamide pouvant être sensibles à ces variables :

- la température ambiante,
- l'ensoleillement,
- l'humidité relative.

### D. Phase 3 : Récupération et exploitation des données disponibles

Cette phase est importante car elle permet de définir la méthode de quantification selon la disponibilité ou non d'un retour d'expérience. Pour cette étude, on ne dispose pas de retour d'expérience en clientèle (pas ou peu de données à défaillance sur un système similaire). De ce fait, le guide préconise d'utiliser la méthode contrainte/résistance [1] pour dimensionner un plan de validation afin de valider la fiabilité.

Cette méthode nécessite d'avoir les profils de sollicitations ainsi qu'un retour d'expérience métier permettant d'optimiser le plan de validation (essai à 0 défaillance plutôt qu'essai complet jusqu'à défaillance).

### 1) La méthode Contrainte / Résistance

La méthode Contrainte-Résistance repose sur la prise en compte de la dispersion de la contrainte C appliquée sur le système (variabilité des clients, des usages, de l'environnement...) et de la dispersion de la résistance R du composant (dispersion des caractéristiques matériaux, dispersion de fabrication, ...) [1].

Cette méthode a pour but d'estimer la fiabilité ou la défiaillance (probabilité de défaillance) d'un composant, en prenant en compte ces 2 variables aléatoires :

- la distribution C de la sollicitation en clientèle,
- la distribution R de la résistance des composants.

La probabilité de défaillance  $P_f = \text{Prob}(R \leq C)$  est estimée par une approche probabiliste à condition que ces 2 variables soient exprimées sur le même axe des endommagements (z) :

$$\int_{z_{inf}}^{z_{sup}} F_R(z) * f_C(z) . dz \leq P_f^*$$

C'est une approche simple qui peut s'utiliser dans de nombreux cas et qui peut se schématiser par la figure ci-dessous :

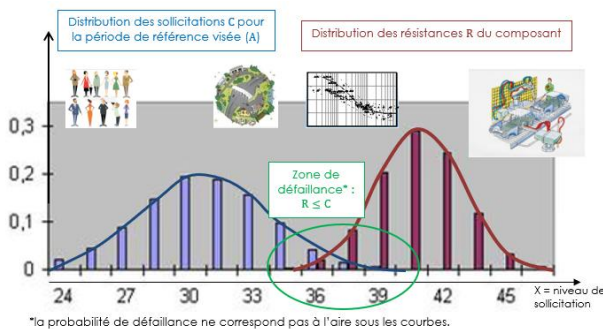


Fig. 4. Illustration de la méthode Contrainte / Résistance

### 2) Récupération des profils de mission

On s'intéressera lors de cette phase à la situation de vie « déroulement/enroulement de la toile » afin d'identifier les profils de mission, qui permettent de décrire par des lois de probabilité, la variabilité des sollicitations en clientèle :

- Nombre de cycles n de déroulement/enroulement de la toile (sur la durée de vie du véhicule) : caractérisé par une loi log normale de paramètres  $m_{ln}$  ;  $s_{ln}$ .
- Les efforts de tirage E (en Newton) sont caractérisés par une loi normale de paramètre  $\mu$  et  $\sigma$ . La variabilité des efforts de tirage dépend de l'effort nécessaire à l'utilisateur pour dérouler la toile jusqu'à son emplacement. Cet effort est lié à la

variabilité de la raideur du ressort (liée à la dispersion de fabrication).

- Dans le cas de la fatigue, une loi d'accélération (aussi appelée loi de fatigue ou pente de Basquin) nous permettra de lier l'effort de tirage au nombre de tirage à défaillance. On s'intéressera à la pente de Basquin b la plus élevée parmi les pièces du mécanisme (qui dépend principalement du type de matériau).
- Les vitesses d'enroulement et de déroulement de la toile (en m/s), caractérisées par une loi normale de paramètres : Enroulement :  $\mu_{ve}$  ;  $\sigma_{ve}$  / Déroulement :  $\mu_{vd}$  ;  $\sigma_{vd}$ .

L'absence d'une loi d'usure tenant compte de l'impact de la vitesse de déroulement/enroulement ne nous permet pas d'appliquer la variabilité dans le calcul Contrainte/Résistance. On considèrera une vitesse d'enroulement et de déroulement max (client 99%).

- Les profils de mission liés à l'environnement sont décrits par des matrices du temps passé par classe de température ambiante, par classe d'ensoleillement et par classe d'humidité relative. Ces matrices sont données par plateforme géographique. N'ayant pas la possibilité de quantifier l'influence de ces facteurs sur la tenue du système cela nous pousse à les prendre en compte directement lors de l'essai de validation. Cela suppose que l'on puisse avoir un banc d'essai sous enceinte climatique nous permettant de faire varier ces paramètres.

### 3) Récupération du retour d'expérience métier

Afin d'estimer la fonction de répartition de la résistance, il est possible de réaliser une campagne d'essai à défaillance, avec des contraintes fortes sur le temps d'essai et le coût. Une alternative moins contraignante est de définir un essai tronqué qui ne nécessite d'avoir qu'un retour d'expérience métier pour chacun des modes de ruine étudié :

Fatigue mécanique :

- La distribution des résistances de la pièce étudiée est caractérisée par une loi normale avec une dispersion relative connue et issue du retour d'expérience  $q = \sigma/\mu$  exprimée en %.

Usure :

- La distribution des résistances de la pièce étudiée est caractérisée par une loi Weibull avec un paramètre de forme connu et issu du retour d'expérience  $\beta$ .

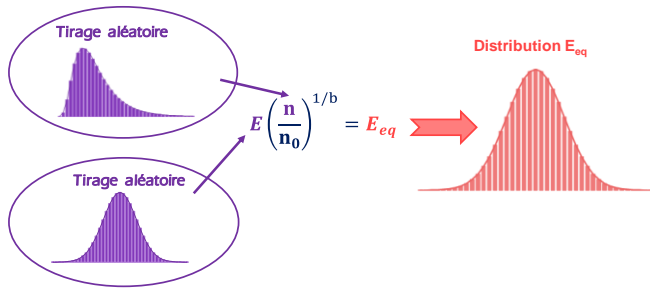
### E. Phase 4 : Dimensionnement du plan de validation

Cette quatrième phase permettra de définir un essai tronqué. Pour rappel, ce type d'essai ne permet pas d'identifier la fonction de répartition de la résistance mais permet de démontrer l'atteinte de l'objectif de fiabilité en clientèle, en vérifiant qu'aucune défaillance n'a été observée à la fin de l'essai. On dimensionnera lors de cette phase un essai de validation tronqué qui soit commun aux deux modes de ruine.

1) Etape 1 : Détermination de la condition de défaillance

a) Fatigue mécanique :

Dans ce cas, nous avons 2 paramètres endommageants, le nombre de cycles et l'effort de tirage. Afin de définir un essai de validation, il est nécessaire de ramener la sollicitation à une seule variable qui sera la condition de défaillance. On utilisera la loi d'accélération de Basquin [2] pour construire la distribution de résistance équivalente. La condition de défaillance est définie en effort équivalent  $E_{eq}$  à un nombre de cycles fixé  $n_0$ . Autrement dit,  $n_0$  cycles à l'effort équivalent  $E_{eq}$  en essai produiront le même endommagement  $n$  cycles à l'effort  $E$  en clientèle :



Par la suite, la méthode Contrainte-Résistance est appliquée avec  $n_0 = 30\,000$  cycles pour le calcul de l'équivalence en fatigue.

b) Usure :

Dans le cas de l'usure, nous avons un seul paramètre endommageant qui est le nombre de cycles, on résoudra donc la méthode C/R sur une seule dimension.

2) Etape 2 : Définition de la distribution de contrainte

Nous avons la possibilité pour la définition de la distribution de contrainte de construire une distribution explicite de l'effort équivalent  $E_{eq}$  en clientèle à un nombre de cycles fixé  $n_0$  à partir d'un tirage de Monte Carlo, de la loi d'accélération pour le calcul de l'équivalence et en ajustant une loi de probabilité [1]. Cette méthode simplifie la démarche mais risque d'introduire des incertitudes. On préférera utiliser directement les 2 lois de probabilités identifiées afin de les intégrer à la formule Contrainte / Résistance.

3) Etape 3 : Détermination des distributions de la résistance vérifiant l'objectif de fiabilité

Il s'agit dans un premier temps de traduire l'objectif de fiabilité en objectif de tenue de la pièce étudiée.

Pour cela, la résolution de la formule de la méthode Contrainte/Résistance nous permettra de calculer la distribution de résistance idéale  $F_R$  pour tenir l'objectif de fiabilité  $P_f^*$  pour chacun des modes de ruines.

a) Fatigue mécanique :

Formule de la méthode Contrainte / Résistance à deux dimensions à résoudre avec :

$$\int_{E_{inf}}^{E_{sup}} \int_{n_{inf}}^{n_{sup}} F_R(E, n, \sigma_{REX}, \mu) * g_E(E) * g_n(n) \cdot dE \, dn = P_f^*$$

- $P_f^*$  est la probabilité de défaillance cible en clientèle sur la période de référence,
- $F_R$  est la fonction de répartition de la résistance sur l'axe des efforts équivalents  $E_{eq}$ . Cette fonction modélisée par une loi normale est caractérisée par :
  - l'écart-type  $\sigma_{REX}$  issu du retour d'expérience ( $\sigma_{REX} = q * \mu$ ),
  - la moyenne  $\mu$  qui est l'inconnue.
- $g_E$  est la densité de probabilité de la variable effort de tirage,
- $g_n$  est la densité de probabilité de la variable nombre de cycles.

b) Usure :

Formule de la méthode Contrainte / Résistance à une dimension à résoudre avec :

$$\int_{n_{inf}}^{n_{sup}} F_R(n, \beta_{REX}, \eta) * g_n(n) \cdot dn = P_f^*$$

- $P_f^*$  est la probabilité de défaillance cible en clientèle sur la période de référence,
- $F_R$  est la fonction de répartition de la résistance sur l'axe du nombre de cycles  $n$ . Cette fonction est modélisée par une loi de Weibull caractérisée par :
  - le paramètre de forme  $\beta_{REX}$  issu du retour d'expérience,
  - le paramètre d'échelle  $\eta$  qui est l'inconnue.
- $g_n$  est la densité de probabilité de la variable nombre de cycles.

4) Etape 4 : Dimensionnement de l'essai avec retour d'expérience expérimental

L'objectif ici est de définir un essai physique sur le système permettant de valider la fiabilité en clientèle. Le choix a été fait de définir un essai de fiabilité tronqué à zéro-défaillance qui consiste à appliquer un endommagement sur un échantillon de pièces et à interrompre l'essai une fois ce niveau d'endommagement atteint [1].

L'objectif de cet essai est d'estimer avec un niveau de confiance donné  $\gamma$  la proportion de défaillants en essai  $\delta$ , c'est-à-dire la proportion de composants défaillants lorsqu'on applique un niveau de dommage  $\tau$ .

a) Détermination du niveau d'endommagement  $\tau$  à appliquer en essai :

Pour chacun des modes de ruine, on utilisera la formule ci-dessous pour calculer le niveau d'endommagement à appliquer en essai. Ce niveau d'endommagement est généralement pris tel que  $\delta_\gamma \approx 10\%$  afin que le niveau de sollicitation en essai ne soit pas trop faible.

$$\tau_1 = F_R^{-1}(\delta, \eta, \beta_{REX})$$

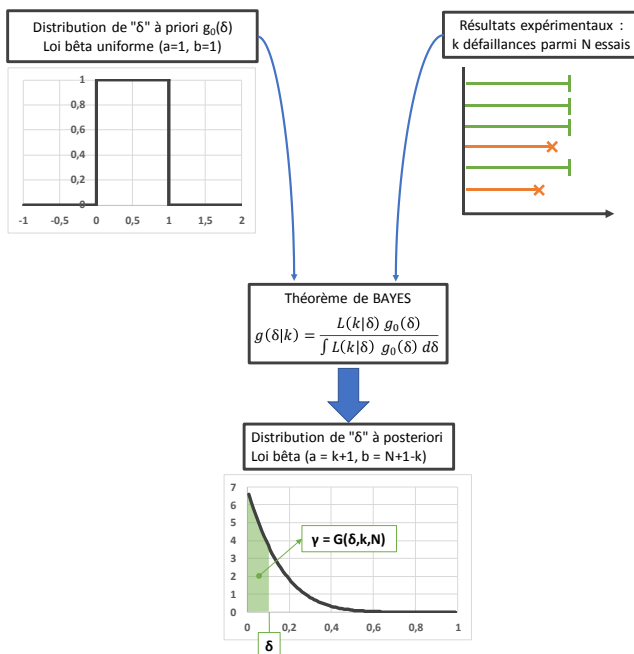
$$\tau_2 = F_R^{-1}(\delta, \mu, \sigma_{REX})$$

Avec :

- $\tau$  : niveau d'endommagement de l'essai. Cette valeur devra être proche de la réalité client :
  - $\tau_1$  : nombre de cycles (usure)
  - $\tau_2$  : effort équivalent (en N) à un nombre de cycles fixé  $n_{essai}$  (fatigue)
- $F_R^{-1}$  : la fonction de répartition inverse de la résistance.

b) Définition de l'essai :

D'après la méthode bayésienne [3], la proportion de composants défaillants en essai dépend du niveau de confiance, du nombre de pièces testées et du nombre de défaillances observées à la fin de l'essai :



Soit :

$$\gamma = F_{b\hat{\epsilon}ta}(\delta, k + 1, N - k + 1)$$

De manière équivalente :

$$\delta = F_{b\hat{\epsilon}ta}^{-1}(\gamma, k + 1, N - k + 1)$$

Avec :

- $F_{b\hat{\epsilon}ta}$  : la fonction de répartition de la loi bêta
- $F_{b\hat{\epsilon}ta}^{-1}$  : la fonction de répartition inverse de la loi bêta
- $\gamma$  : niveau de confiance qui est la probabilité de ne pas se tromper en confirmant que la proportion de composants défaillants en essai est inférieure à  $\delta$ .
- $N$  : nombre de pièces à tester en s'assurant que ces pièces sont représentatives de la pièce finale et

issues de lots de fabrication différents. De plus, la taille de l'échantillon est un gage de robustesse de la validation en tenant compte de la dispersion de tenue.

- $k$  : nombre de défaillance avant la fin de l'essai. Dans notre cas on prendra comme critère  $k=0$ .

Etant donné le critère d'acceptation de l'essai tronqué à zéro-défaillance, cela permet de simplifier le calcul de la proportion de composants défaillants en essai :

$$\delta = 1 - (1 - \gamma)^{\frac{1}{N+1}}$$

Pour les modes de ruine usure et fatigue mécanique nous avons donc construit le plan d'essai commun suivant :

- Nombre de composants à tester ( $N$ ) = 6 pièces, imposé par le niveau de confiance et une proportion de composants défaillants en essai proche de 10%.
- Vitesses de déroulement  $v_{dmax}$  et d'enroulement  $v_{emax}$  (cf. chapitre D.2),
- Conditions d'environnement : variabilité de la température ambiante, de l'ensoleillement et de l'humidité relative suivant les profils de mission.

Pour chacun des modes de ruine usure, on calcule un niveau d'endommagement :

- Usure :
 
$$\tau_1 = F_R^{-1}\left(1 - (1 - \gamma)^{\frac{1}{N+1}}, \eta, \beta_{REX}\right) = 24000 \text{ cycles}$$
- Fatigue mécanique :
  - Pour ce mode de ruine, on fixe le nombre de cycles  $n_{essai} = 24\ 000$  cycles au même niveau que le mode de ruine usure.
  - On ajuste la valeur de l'effort équivalent à 24000 cycles via l'équivalence en fatigue :
 
$$\tau_2 = F_R^{-1}\left(1 - (1 - \gamma)^{\frac{1}{N+1}}, \mu, \sigma_{REX}\right) = 20N$$
 Soit une longueur de déroulement de la toile  $L$  (mm) =  $\tau_1 * k$

Il est évidemment nécessaire de compléter cet essai en considérant par exemple les situations de vie exceptionnelles afin de s'assurer de couvrir un maximum de cas d'usage.

Avant le lancement de l'essai, il est important de valider le support d'essai en s'assurant :

- d'avoir un banc d'essai représentatif des sollicitations en clientèle avec la possibilité de faire varier les facteurs endommageants et environnants,
- de connaître la capacité du moyen d'essai avec le nombre de pièces que l'on peut tester simultanément ainsi que les variables utilisées pour piloter l'essai.

On peut se poser la question sur l'influence de l'essai à réaliser en fonction du niveau de confiance. Le graphique ci-

dessous nous permet de voir l'influence du nombre de pièces à tester en fonction du niveau de confiance :

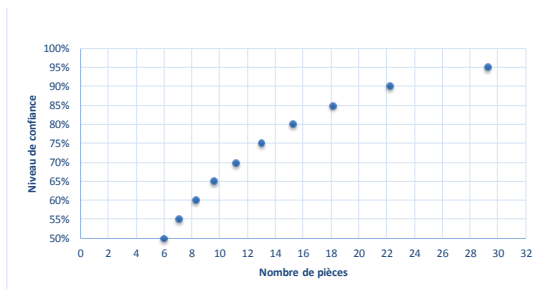


Fig. 5. Nombre de pièces à tester en fonction du niveau de confiance

On remarque que si l'on souhaite valider notre système avec une confiance de 70%, 11 pièces seront à tester sans défaillance avec la conséquence de doubler le temps d'essai ou de doubler la capacité du banc d'essai.

#### F. Phase 5 : Estimation de la fiabilité prévisionnelle en clientèle

Finalement, il s'agira lors de cette phase de conclure sur l'atteinte de l'objectif ou non du système en clientèle.

- Si aucun des N composants n'est défaillant en fin de test, on a une probabilité de 50%, soit une chance sur deux que la vraie fonction de répartition de la résistance se situe à droite et donc que la résistance de la pièce est meilleure que celle nécessaire pour tenir l'objectif de fiabilité.

Ce qui signifie donc que l'on estime que la fiabilité en clientèle sera au moins meilleure que l'objectif.

On valide donc la fiabilité du système à l'usure et à la fatigue mécanique.

- Inversement, il suffit d'une seule défaillance sur les N composants pour estimer que la fiabilité en clientèle sera inférieure à l'objectif.

### III. CONCLUSION

Cet article présente un cas d'application concret du « guide d'aide à l'estimation et à la validation de la fiabilité automobile » publié par la SIA.

Les essais tronqués à zéro défaillance permettent de valider la fiabilité en limitant le nombre de pièces et la durée des essais, ce qui représente un avantage important en termes de coûts. Les principales difficultés pour la mise en place de ce type d'essai, résident dans la connaissance des profils de mission client, des lois d'endommagement et d'un retour d'expérience solide.

L'intérêt du guide réside dans son accessibilité à un large public, dans la présentation et l'explication de méthodes éprouvées. Les calculs numériques présentés dans le guide sont relativement simples à mettre en place avec des outils spécialisés de type R, Mathcad, mais aussi des plus communs tels que Excel. Cela ne nécessite pas d'avoir des moyens de simulation importants.

### REFERENCES

- [1] *Guide d'aide à l'estimation et à validation de la fiabilité automobile*, SIA, 2017, versions anglaise et française disponibles gratuitement : <http://www.sia.fr/publications/>
- [2] Préconisations pour les caractéristiques statistiques de résistance en fatigue des tôles en acier, SIA : <http://www.sia.fr/publications/>
- [3] Document interne PSA - Dimensionnement par le risque
- [4] Norme ISO 26262