

Modèles et procédures statistiques normalisées de calcul de la fiabilité des matériaux, leurs évolutions et leurs limites

Afin de caractériser un matériau, différents types d'essais mécaniques sont effectués. Sur cette base, des études statistiques sont menées (décrites par le MILITARY HANDBOOK 5) afin d'obtenir des données exploitables pour un dimensionnement assisté par ordinateur, par exemple.

L'exposé a pour objet de montrer ces méthodes et leurs évolutions durant ces dernières années ainsi que leurs limites techniques, statistiques et industrielles.

Sommaire

1. Les différents essais mécaniques (statique et fatigue) matériaux, et leurs objectifs statistiques et dimensionnels.....	2
1.a. Les matériaux concernés.....	2
1.b. Les sollicitations.....	2
1.c. Les essais statiques.....	3
1.d. Les essais de fatigue (avec données censurées).....	4
1.e. Les valeurs de dispersion (Tolerance value).....	5
1.f. Le dimensionnement.....	5
2. Exposé de la procédure normalisée du MIL-HDBK 5 utilisée dans l'industrie.....	5
3. Les évolutions des modélisations statistiques sur ces dernières années : De la version MIL-HDBK 5G à la version J.....	6
4. Apports du spécialiste en statistique.....	6
4.a. De l'université vers l'industrie.....	6
4.b. De l'industrie vers l'université.....	7
5. Les limites techniques (essais concernés), statistiques (modélisation évoluant, hypothèses utilisées), industrielles (contexte, normes, autorisations...) et leurs perspectives en Recherche.....	8
5.a. Les limites techniques.....	8
5.b. Les limites statistiques.....	8
5.c. Les limites industrielles.....	9
5.d. Perspectives de recherche.....	9

1. Les différents essais mécaniques (statique et fatigue) matériaux, et leurs objectifs statistiques et dimensionnels.

1.a. Les matériaux concernés

En aéronautique, les matériaux utilisés sont multiples de l'aluminium, à l'acier, ou le titane, en passant par la fibre de verre, les plastiques, la peinture sans compter les systèmes de fixations qui compliquent la donne.

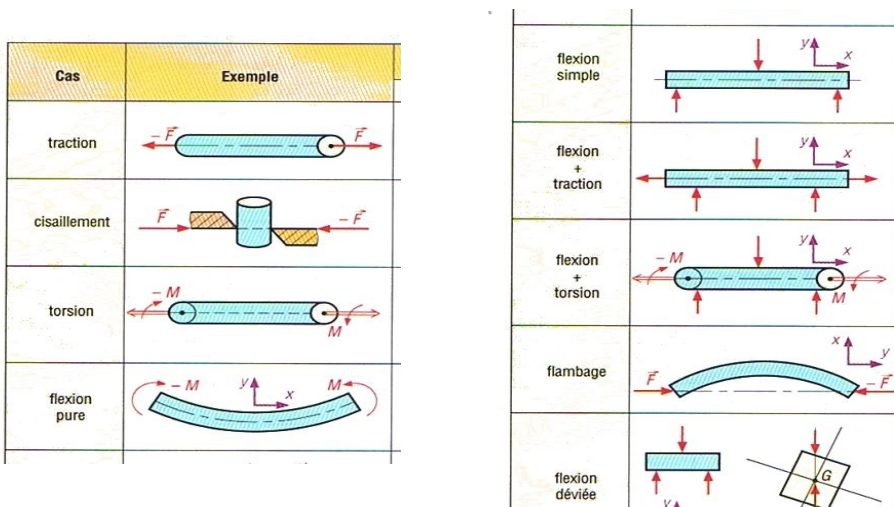
On identifie trois types de familles de matériaux :

- les matériaux métalliques où nous trouverons pèle-mêle, les aluminiums, les aciers, les titanes, et toutes leurs déclinaisons obtenues au travers de procédés que sont les traitements chimiques comme l'anodisation, ou les traitements mécaniques comme le laminage, le forgeage ou encore le matriçage... Chaque procédé permet d'apporter des caractéristiques supplémentaires de résistance à celles initiales du matériau.
Nous possédons un grand recul technique sur les matériaux métalliques dû à la maîtrise ancienne des technologies de fabrication industrielle. Ceci qui va s'avérer non négligeable d'un point de vue statistique.
- Les matériaux composites (anisotropes) sont une famille plus complexes de matériaux. Ils sont composés d'une charge et de fibres. Nous pourrions y trouver les pré-impregnés avec des fibres de verres, des plastiques, ainsi que tout matériau susceptible de ne pas être purement métallique... Le recul sur ces matériaux est relatif. Nous nous heurtons aussi à leur coût de fabrication, et aussi au coût des essais. Un élément économique qui a toute son importance dans l'industrie.
- Les peintures forment la dernière famille. Il ne s'agit pas que d'un élément esthétique. Elles participent à la protection des éléments de structures de l'avion contre la corrosion, leur vieillissement...

En préambule, on a aussi évoqué les systèmes de fixations. Eux-mêmes font l'objet d'études statistiques...

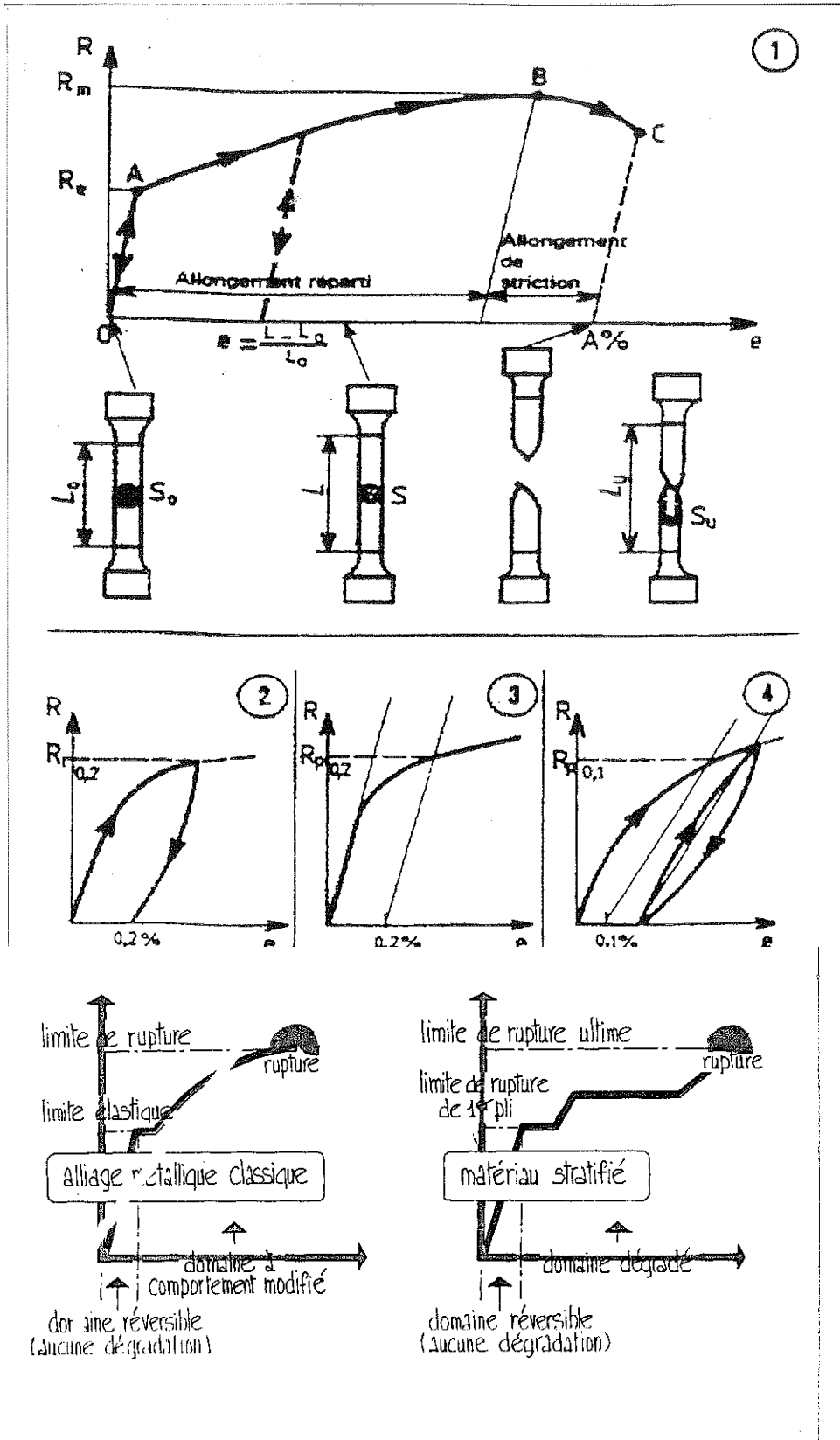
1.b. Les sollicitations

Il existe 5 types de sollicitations : Flexion, traction, torsion, compression, cisaillement.



1.c. Les essais statiques

Les essais statiques sont des essais effectués sur des éprouvettes normalisées de matière. Il s'agit d'appliquer une contrainte constante jusqu'à ce qu'il y ait rupture de l'éprouvette. Ils permettent de mesurer la résistance mécanique d'un matériau, d'étudier son comportement à l'aide de différents indicateurs comme l'allongement, le module de Young, etc...

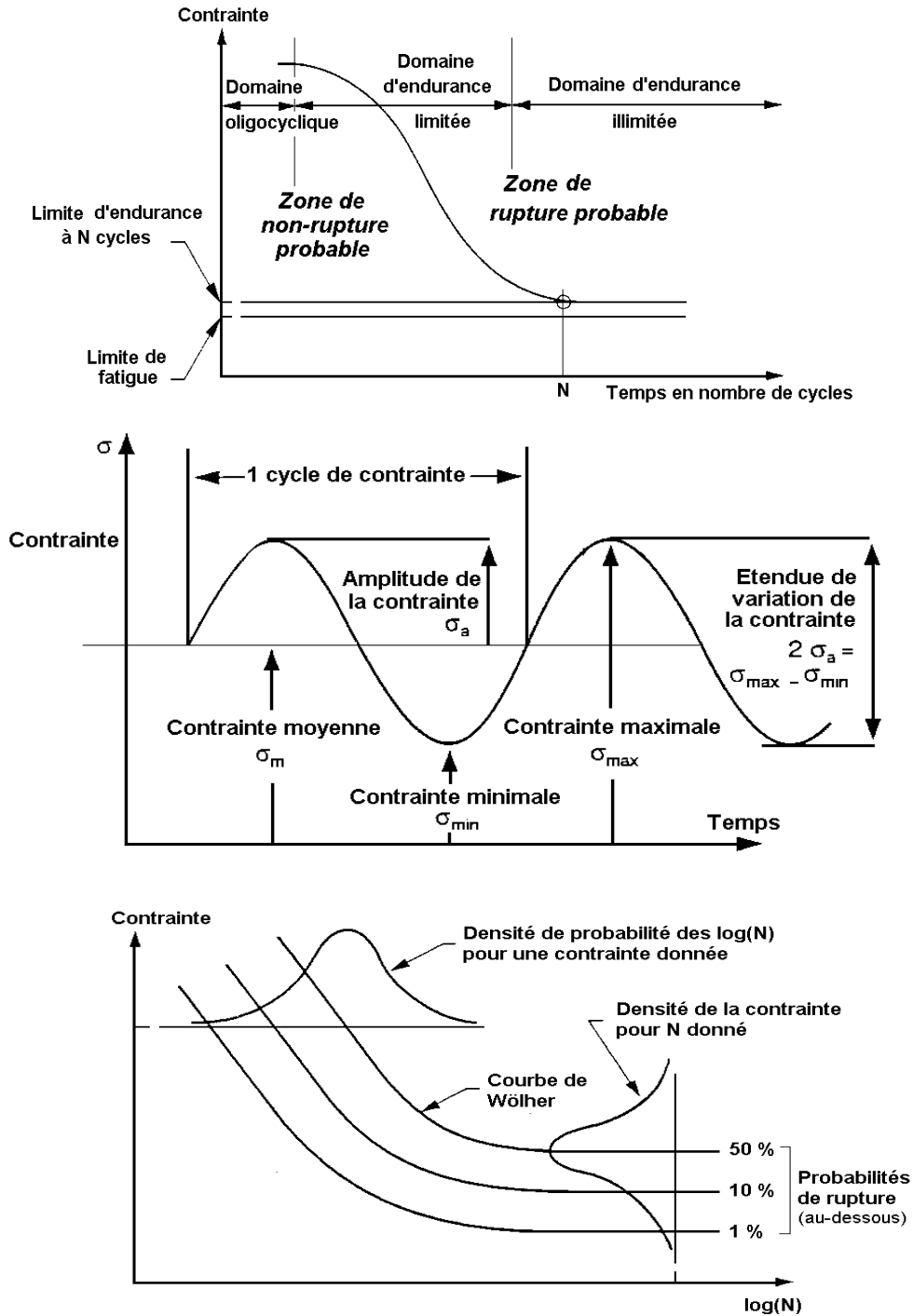


1.d. Les essais de fatigue (avec données censurées)

Les essais de fatigue sont des essais pendant lesquels on applique une contrainte cyclique d'amplitude constante jusqu'à ce qu'il y ait éventuellement rupture.

Le modèle bien que connu est difficile à identifier par l'organisation même du jeu d'essais.

Dans ce cadre, on étudie alors le modèle de Wölher schématisé comme ceci :



1.e. Les valeurs de dispersion (Tolerance value)

Toutes les études statistiques menées n'ont pour seul objectif de calculer les valeurs de dispersion. Il s'agit d'une donnée résumant le comportement du matériau suivant un indicateur choisi (rupture en statique ou fatigue, module de Young, allongement, ...). Cette donnée sera implémentée afin de pouvoir effectuer le dimensionnement grâce à l'outil informatique.

Ces valeurs de dispersion sont définies comme suit :

Il s'agit de la valeur limite au dessus de laquelle $y\%$ de la population se situe en zone de rupture avec une confiance de $z\%$.

Mathématiquement, cela se traduit dans le cadre d'un intervalle de dispersion $[L_i, L_s]$, de la façon suivante :

$$P[F(L_s) - F(L_i) > y] = z$$

Autrement dit, X la variable aléatoire appartient à $[L_i; L_s]$ avec un risque d'erreur de $1-z$ et une probabilité d'au moins y .

Dans le cadre de ce qui nous intéresse, la définition précédente devient :

$$P[1 - F(L_i) > y] = z$$

Autrement dit, X la variable aléatoire appartient à $[L_i; +\infty]$ avec un risque d'erreur de $1-z$ et une probabilité d'au moins y .

L'application de cette définition dans le cas de la loi normale donne la formule suivante :

$$L_i = \bar{x} - k\sigma$$

Le coefficient k est décrit par DB Owen dans « Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables and Sampling Plans » datant de 1963.

1.f. Le dimensionnement

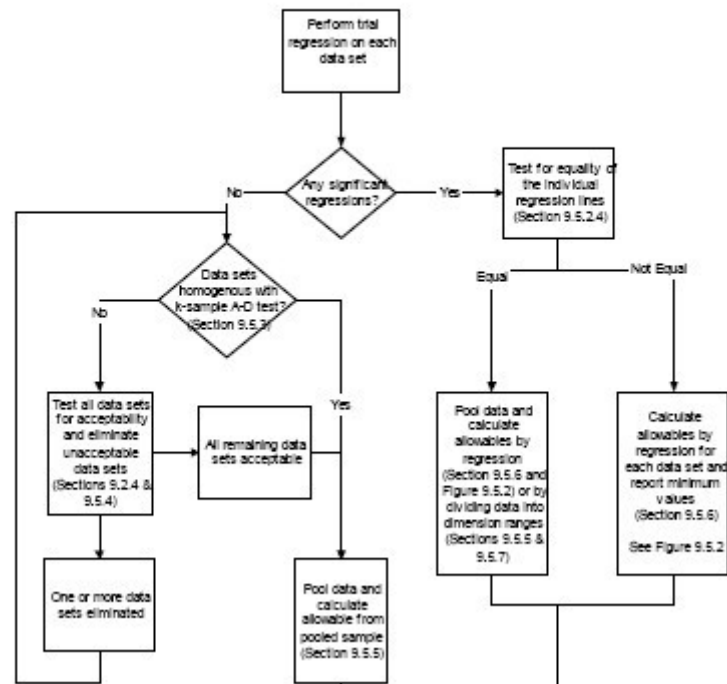
Il s'agit de l'ultime étape au niveau du Bureau d'étude.

La CAO et les logiciels d'éléments finis sont des outils indispensables préalables à la mise en production. Il évite ainsi des tâtonnements consommateurs de temps et d'argent.

Les valeurs de dispersion sont alors utilisées comme valeur sommative, résumant le comportement du matériau fonction des différents types de données caractérisant ce comportement, assimilable par des logiciels spécifiques.

2. Exposé de la procédure normalisée du MIL-HDBK 5 utilisée dans l'industrie

Le Military Handbook 5 est le document de référence utilisé dans le domaine de l'aérospatiale pour évaluer la fiabilité et les performances mécaniques des matériaux dans le calcul de résistance des matériaux métalliques dans l'aéronautique et le spatial (il existe un équivalent pour les matériaux composites mais en raison d'un historique plus restreint, d'une technologie moins stabilisée et de processus de fabrication toujours en mouvement, les procédures statistiques sont moins « élaborées » et nous ne l'aborderons pas).



3. Les évolutions des modélisations statistiques sur ces dernières années : De la version MIL-HDBK 5G à la version J...

Au cours des 10 dernières années, la procédure générale et les hypothèses statistiques ont évolué parfois de façon importante, entraînant des nouveaux calculs de valeurs de dispersion.

Les lois statistiques modélisant le comportement en rupture des matériaux métalliques étaient les lois normale, lognormale, et Weibull. Dans certaines versions bêta, apparaissent d'autres lois comme celle de Rayleigh pour disparaître dans la version définitive ou les suivantes. Aujourd'hui, la loi de Pearson Type III est apparue et la loi lognormale a disparu.

4. Apports du spécialiste en statistique

4.a. De l'université vers l'industrie

L'arrivée d'un universitaire dans le monde de l'industrie n'est pas de tout repos.

A l'université, les études sur les jeux de données sont faites sur des jeux calibrés pour montrer l'intérêt des méthodes statistiques et leurs significations. Face à la rigueur des méthodes statistiques, on se trouve parfois en heurt à un manque de « rigueur » des données : jeux de données non équilibrés, indépendance des expériences ?, un vocabulaire industriel, des procédures associées à des situations parfois inadéquates...

Dans le cadre de notre sujet, l'un des premiers problèmes était la notion de lot. Comment un lot était défini? Par exemple, lors de l'étude d'un type de matériau métallique, le lot était défini par son fournisseur, le type d'alliage, le traitement thermique, les conditions de traitement à la fabrication (comme la coulée), la date des essais en laboratoire. Cependant, lors de la fabrication d'un avion, les pièces fournies sont issues de divers fournisseurs et donc de divers lots. L'étude d'un lot ne suffit pas à caractériser un matériau, et donc à dimensionner à terme une pièce aéronautique. L'objectif était donc de faire un étude suffisamment pertinente pour caractériser un matériau en tentant de rester homogène dans le choix du jeux de données.

Plus anecdotique, en anglais, les termes valeurs de tolérance (utilisées en Maîtrise Statistique des Processus, domaine logiquement accolé à la Fiabilité des Matériaux) et de valeurs de dispersion ont la même dénomination à savoir, tolerance values. Les industriels, par souci d'efficacité, amalgament régulièrement ses valeurs même si dans certains cas, les valeurs de dispersion peuvent être reprises dans le cadre de la MSP en tant que valeurs de tolérance. Cet amalgame a été renforcé par le fait que les valeurs de dispersion et de tolérance dans le cadre d'une loi normale s'écrivent de la même façon à savoir $\bar{x} - ks$. Une explication pédagogique récurrente a permis d'éclaircir ce type d'ambiguïté. Ensuite, la loi normale est un confort piégeant. Comme évoqué précédemment, les lois de Weibull et lognormale étaient inconnues dans le milieu industriel à part de quelques initiés. Il a fallu intégrer dans les procédures d'identification des lois suivies par les échantillons (avec les problématiques de lots déjà citées plus tôt).

La recherche des lois a ouvert un débat qui agite, parfois, le monde des statisticiens, à savoir celui des points aberrants. La réflexion sur les points aberrants dans le cadre industriel s'avère indispensable car elle implique une recherche sur la traçabilité des éléments de fabrication et de tests. Elle a permis de mettre en évidence des dysfonctionnements de laboratoire, des lots hâtivement fusionnés.

En industrie, on ne peut se frotter aux statistiques sans intégrer le paramètre de l'informatisation. Il est alors utile de se questionner sur l'art subtil de l'équilibre des « pouvoirs », rapidité (PC bureau et gestion en base de données) et précision de calcul. Cette question fondamentale a été posée lorsque que la question du calcul des estimateurs de la loi de Weibull à 3 paramètres.

L'un des points sur lequel l'universitaire statisticien peut apporter une plus-value est sur la méthodologie statistiques des essais à mener et en particulier, concernant les plans d'expérience. A chaque problème, question du spécialiste en matériau, le statisticien peut proposer des outils décisionnels et accompagner son collègue dans sa prise de décision. Il peut aussi aider à la lecture des normes, former, ou encore adapter les outils statistiques aux problématiques abordées.

4.b. De l'industrie vers l'université

Certaines des questions posées dans le cadre industriel, ont poussé certains universitaires à se pencher sur des problématiques inusitées. Le test de Anderson-Darling, ; les questions sur les points aberrants, et les tests utilisables, la notion d'intervalle de dispersion télescopant celle d'intervalle de confiance. Ainsi la même année où les procédures du MIL HDBK ont été informatisées, dans certaines filières, l'enseignement du test d'Anderson-Darling a été intégré.

Depuis quelques années, la notion de points aberrants a permis aux étudiants d'être moins démunis face à certains jeux de données retors et de pouvoir mener des études approfondies de traçabilité.

Sans rentrer dans certains débats, on peut voir l'intérêt des passerelles entre industrie et université.

La notion d'intervalle de dispersion, dont les premières références et seules démontrées remontent à 1963, ont titillé la curiosité de collègues universitaires en dehors de la mienne.

L'exemple de situations industrielles permet aussi d'illustrer l'utilisation des procédures statistiques concrètement et les ponts qui peuvent exister entre des domaines industriels à priori étrangers mais voisins dans les méthodologies abordées. Cette exemple peut être rencontrée avec la loi de Weibull utilisée avec des données non censurées dans le cadre de essais aéronautiques alors que en biostatistique, son utilisation commune est basé sur des données censurées.

Le statisticien arrive dans un monde où l'ingénieur, le physicien est tout puissant. Là où l'expérience vaut démonstration, tenter de montrer l'utilité d'approfondir certains fondamentaux statistiques n'est pas particulièrement valorisé, et pourtant si nécessaire...

5. Les limites techniques (essais concernés), statistiques (modélisation évoluant, hypothèses utilisées), industrielles (contexte, normes, autorisations...) et leurs perspectives en Recherche.

5.a. Les limites techniques

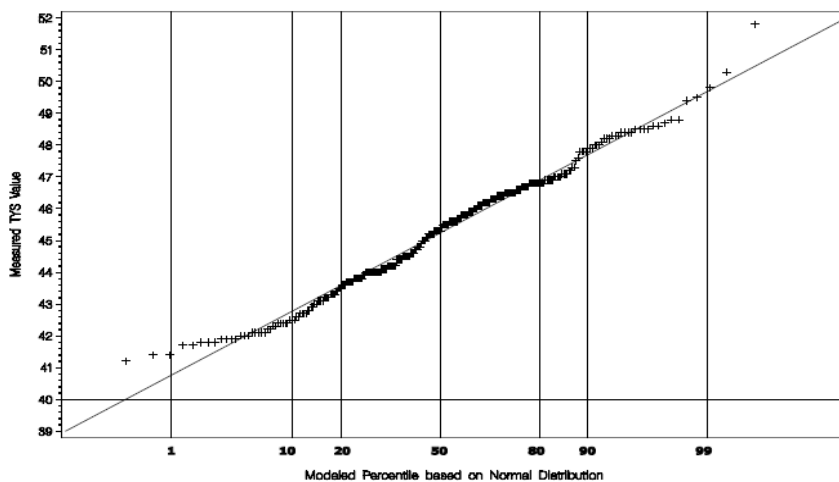
Nous avons évoqué des domaines déblayés par des années d'expérience, de recul. Dans le cadre d'autres essais moins connus, plus complexes comme la fatigue, on se heurte à un manque de recherche (comme déjà signalé auparavant), un manque de recul, à des modèles mécaniques expérimentaux. Autant les matériaux métalliques bénéficient d'un recul qui se compte en dizaines d'années, autant les matériaux composites de part leurs diversités et leurs coûts de fabrication, on se trouve confronté à des questionnements cornéliens. Les procédés de fabrication sont soumis à des très grands aléas dû aux changements de températures extérieures et intérieures de ces procédés (climat, autoclave...), à l'instabilité des produits utilisés... A cela s'ajoute le coût de ces composites, parfois exorbitants (mais permettant un gain de poids non négligeable en ces temps de recherche d'économies de carburant), qui limite de façon drastique les possibilités de prélèvements de matières pour des essais qui peuvent aussi être eux-même très coûteux. Étudier un lot ou un ensemble de lots à priori homogène, dans ces conditions, est délicat.

5.b. Les limites statistiques

Dans le cadre de la fatigue, le modèle mécanique suppose que la loi est normale à cycle fixé, la moyenne étant référencé par la courbe de Wölher. En plus de cette hypothèse sur la loi, une autre hypothèse très fort est attribuée au modèle qui est que l'écart-type est constant.

La question qui se pose régulièrement lors de nouvelles mises à jour des référentiels de cette envergure sont « est-ce que l'on doit faire table rase du passé et tout recalculé? », « quelles sont les bases -nouvelles- qui ont été prises en compte pour faire ce changement? » (Technique, économique,...)

Nous sommes passés de modèles statistiques reposant sur 3 lois, normale, lognormale, Weibull, à des un modèle reposant sur les lois normale, Weibull et de Pearson III.



La notion d'échantillons reste problématique. Les calculs effectués intègrent les procédés de fabrication des différents fournisseurs, différentes époques, différents laboratoires d'essais (Round Robin). Les études d'homogénéité demandent du temps, un accès à des informations techniques parfois confidentielles, une collaboration et une confiance dans un monde où tout est régi par les questions d'argent et les secrets industrielles qui en découlent...

Régulièrement, dans un cadre aussi riche techniquement, des éléments viennent à interpellier le statisticien dans son travail. Dans le cadre des essais statiques de rupture, l'étude du QQ plot donne à voir un comportement typique au niveau des valeurs extrêmes. Les premières fois où un professionnel de la statistique se trouve confronté à un test comme Anderson-Darling (très puissant par ailleurs) qui identifie la loi comme normale et un QQ plot de ce type, les premiers doutes l'assaillent. Les échanges croisés avec les professionnels en résistance des matériaux semblent montrer qu'il s'agit d'un comportement inhérent aux essais.

Ensuite, les différents éléments préconisés dans le cadre du MIL-HDBK laisse le statisticien dans un rôle décisionnel empreint de solitude. On peut mesurer alors les limites de la mise en place de procédures automatiques laissant le spécialiste en matériau en autonomie face à cette masse d'informations qui peut ne pas lui faire sens.

5.c. Les limites industrielles

La première des contraintes reste financière. Elle est couplée avec la contrainte de temps suivant le vieil adage : « le temps, c'est de l'argent ».

Lors des essais de fatigue, on note que dans le modèle utilisé en aéronautique, trois valeurs sont déterminantes, à savoir l'asymptote verticale, la contrainte correspondant à 10^5 cycles (durée de vie moyenne d'un avion) et la valeur l'ordonnée à l'origine. Les essais étant soumis au temps de cycle, les industriels les mènent dans un souci d'efficacité de telle façon qu'ils « visent » ces points à priori au détriment d'une série d'essais équilibrés qui autoriseraient une modélisation plus solide.

Au delà de cet exemple, la culture du plan d'expériences se heurte à celle de l'industriel qui cherche une réponse rapide parfois au détriment de l'efficacité.

A chaque version du MIL HDBK, le modèle de calcul des limites de dispersion est potentiellement changé à l'aide de coefficients correcteurs. L'origine de ces corrections n'est pas diffusée et pose question de leurs légitimité.

5.d. Perspectives de recherche

Un travail de référence a été mené ces dernières années par Mr Bastenaire sur les essais de fatigue.

Au delà, du MHBK 5, dans les questionnements, on peut rencontrer les problématiques d'arrachage de peinture, ou encore d'épaisseur, certains essais non destructifs comme le ressuage, la propagation de fissures, le vieillissement, certaines problématiques qui tombent dans le cadre d'une modélisation non paramétrique.

Une des questions qui mériterait d'être traité concerne l'étude de l'homogénéité inter-laboratoire, de manière plus générale tous les problèmes de mesure.

Bibliographie

MILITARY HANDBOOK 5G et 5J.

F. Bastenaire « Etude statistique et physique de la dispersion des résistances et des durées à la fatigue » Thèse de doctorat, faculté des sciences de l'Université de Paris, 1960. Décliné pour l'industrie dans la norme AFNOR A03-405, Septembre 1991

Normes AFNOR : les valeurs de dispersion.

OWEN D. B., "Factors for One-Sided Tolerance Limits and for Variables and Sampling Plans", Sandia Corporation Monograph SCR-607 (March 1963).