

## **Optimisation de la conception et dimensionnement d'un produit à l'aide d'une extension de l'approche résistance / contrainte**

**Projet de l'IMdR-SdF n° 1/2005**

Chef de Projet : Monsieur Henri GRZESKOWIAK (MBDA)  
Contractant : Institut Français de Mécanique Avancée

Ce projet a pour objectif essentiel l'extension de l'approche « résistance/contrainte », utilisée dans le dimensionnement des pièces mécaniques, en vue de pouvoir l'appliquer dans d'autres domaines. Le projet consiste à mettre à plat les différents concepts couramment admis s'inscrivant dans cette problématique, dans l'optique de la justification de leurs fondements scientifiques, de la mise en évidence des difficultés et de l'illustration de la démarche. Pour atteindre ces objectifs, le projet se décline en trois tâches principales : étude bibliographique, modèle de dimensionnement probabiliste et exemples d'application.

### ***Tâche 1 – Recherche bibliographique***

La première partie de l'étude consiste en une recherche bibliographique sur les méthodes fiabilistes et les modes de défaillance dans un certain nombre de domaines d'ingénierie. L'évaluation de la fiabilité des composants est le noyau central pour l'extension de l'approche dans les divers secteurs industriels. Ce point est d'autant plus important que nous n'avons pas d'accès direct à la réponse des composants dans la plupart des cas ; seules les informations en amont sont disponibles, et la réponse n'est en général obtenue que par des fonctions de transfert non linéaires et complexes, qui sont souvent données par des méthodes numériques. Sur le plan théorique, le calcul de la fiabilité se ramène à une simple intégration des densités de probabilité de la résistance et de la sollicitation sur le domaine de sûreté. Vu sous cet angle, l'évaluation de la fiabilité s'avère triviale lorsque le système ne contient que deux variables dont les distributions sont bien identifiées. Mais en réalité, la résistance, aussi bien que la sollicitation, dépendent de plusieurs paramètres qui sont plus ou moins maîtrisés. Cette dépendance rend l'évaluation de l'intégrale de fiabilité très complexe pour les raisons principales suivantes : interdépendance des variables non linéaire, méconnaissance des fonctions de distribution, impact des corrélations, confiance dans les résultats des essais, rareté des données d'une façon générale, modélisation numérique implicite, nombre de paramètres influents élevé, connaissance qualitative des grandeurs, évolutions des caractéristiques internes et externes dans l'espace et le temps, ... En associant ces aspects aux difficultés d'interprétation des résultats et au manque de culture probabiliste des concepteurs, des méthodes alternatives se sont développées pour permettre le passage à la dimension industrielle ; on peut recenser les méthodes principales suivantes :

- **Coefficients de variabilité** : ces coefficients permettent de définir directement le dimensionnement nécessaire pour un objectif de fiabilité donné et dans un domaine d'application bien cadré (spécialité, gamme de production, distributions de probabilité,...). Les méthodes du coefficient de garantie et du facteur d'essai appartiennent à cette catégorie. Cette approche a l'avantage de la grande simplicité d'utilisation (tableaux, abaques,...), mais elle présente l'inconvénient de son inapplicabilité dans le cas général. Pour chaque nouvelle application (système, paramètres ou lois de distribution), il faut recalculer entièrement les coefficients et les

facteurs permettant de satisfaire le niveau de fiabilité requis ; ces coefficients sont calculés soit analytiquement (dans des cas très restrictifs) soit numériquement. Néanmoins, la simplicité de cette méthode la rend adaptée au dimensionnement quotidien pour des applications peu innovantes.

- **Simulations de Monte Carlo** : lorsque l'intégration directe n'est pas possible (grand nombre de variables, modèles complexes,...), les simulations de Monte Carlo présentent un outil puissant, mais aussi coûteux, pour l'évaluation des probabilités de défaillance. Toutefois, l'énergie dépensée n'est souvent pas à la hauteur de la richesse des informations obtenues (les résultats se limitent à la valeur de la probabilité).
- **Méthodes de fiabilité du premier et du second ordre FORM/SORM** : ces méthodes approchées ont l'avantage de donner des informations complètes et précises sur la défaillance, tout en dépensant une énergie raisonnable pour l'obtention des résultats. En plus de la probabilité de défaillance, ces méthodes fournissent des informations sur les sensibilités des paramètres, les coefficients de garantie et la configuration de défaillance la plus probable. Ces résultats sont même plus utiles que la valeur intrinsèque de la fiabilité (qui est souvent difficile à démontrer par l'expérience). Les méthodes FORM ne sont en réalité qu'une extension de la méthode résistance-contrainte au cas général des marges non linéaires, des variables nombreuses et des interdépendances complexes.

Le descriptif des phénomènes de défaillance et de dégradation des systèmes permet de donner une idée globale sur la nature des scénarios mis en jeu dans l'étude de l'intégrité des composants. La maîtrise des phénomènes de dégradation s'avère indispensable pour garantir la tenue dans le temps des équipements. Or, on constate que certains phénomènes, tels que l'usure et le grippage, sont assez mal décrits par des modèles mécaniques. Il est donc nécessaire de développer des modélisations analytiques, empiriques et numériques pour tenir compte des dégradations de la façon la plus fidèle possible.

## ***Tâche 2 – Elaboration de modèles***

La deuxième partie de l'étude porte sur la justification des modèles utilisés dans la méthode résistance-contrainte. Les points principaux sont les suivants :

- **Dimensionnement fiabiliste** : sous l'effet de l'environnement, la résistance moyenne du composant doit être spécifiée en fonction du niveau de fiabilité objectif. Les limites de la méthode résistance-contrainte sont démontrées et l'extension par l'approche FORM est développée et illustrée sur des petits exemples. Les développements suivants sont à souligner :
  - la méthode du coefficient de garantie est généralisée au cas de lois de distribution quelconques. Pour un objectif de fiabilité donné, une formulation mathématique est développée pour le cas général, dont la résolution peut être effectuée par un algorithme d'optimisation classique.
  - l'extension au cas de plusieurs facteurs endommageants est traitée dans un cadre général. Pour séparer l'influence des différents facteurs, il est recommandé d'introduire la notion de *coefficients partiels de garantie*, qui sont associés aux différents facteurs endommageants. Ces coefficients présentent l'avantage d'une plus grande liberté dans le dimensionnement, au moyen de la séparation des rôles fiabilistes des différents facteurs.
  - pour un objectif de durée de vie donné, à défaut d'une modélisation par processus stochastiques, le dimensionnement doit être basé sur les lois des valeurs extrêmes

de l'environnement, aussi bien que de la résistance. Ces lois permettent l'intégration de la probabilité de défaillance sur la durée d'exposition de l'équipement. Elles étendent l'applicabilité de la méthode résistance-contrainte à la dimension temporelle, au prix d'un certain sur-dimensionnement.

- l'étude a permis de démontrer l'invariance du calcul de fiabilité par rapport au changement d'échelle des grandeurs étudiées, du moment que les paramètres et la distribution sont correctement définis dans l'échelle adoptée. La méthode de passage d'une échelle à l'autre est donnée et validée sur différentes applications.
- **Dimensionnement des essais** : un coefficient supplémentaire doit être dégagé en fonction du niveau de confiance dans les essais :
  - le calcul des paramètres statistiques (moyenne et écart-type) à partir d'un très faible nombre d'essais, a été remis à plat. L'hypothèse sur la normalité de la moyenne et son intervalle de confiance classiquement donnée dans la littérature, ne sont plus valables dans le cas d'un nombre réduit d'essais avec des lois non normales. Une méthode générale de calcul de la moyenne et de la variance, voire de l'écart-type, a été développée dans ce projet ; les densités sont obtenues par intégration numérique.
  - quatre méthodes de dimensionnement des essais ont été étudiées et comparées sur différentes applications ; il s'agit de l'application des intervalles de confiance, des tests d'hypothèse, des compositions des variables et de l'approche bayésienne. Parmi ces méthodes, l'approche par composition, éventuellement couplée à la méthode bayésienne et/ou à la théorie des données imprécises, conduit à une méthode consistante, robuste et suffisamment conservatrice.
  - une recherche bibliographique est réalisée sur les modèles probabilistes utilisés dans la littérature. Cette recherche porte essentiellement sur la résistance statique, les propriétés mécaniques, la résistance à la fatigue, la corrosion et l'érosion. Etant donné la jeunesse de ces approches par rapport à certaines applications, la difficulté majeure réside dans l'identification de modèles génériques pour décrire tous les phénomènes de dégradation en dehors du contexte de développement. Le bilan de ce travail se situe au niveau des recommandations de certaines lois avec les paramètres associés.
  - l'extension de l'approche résistance-contrainte aux erreurs humaines et aux facteurs influents et mal connus, est possible par l'introduction des données imprécises (théorie des ensembles flous) dans le calcul de la fiabilité. La probabilité de l'erreur humaine peut être déterminée par une comparaison de l'importance des événements pour aboutir à une identification intrinsèque. On applique ensuite des facteurs modificateurs pour la mise à jour de cette probabilité en fonction de l'environnement de travail. L'introduction des données qualitatives permet la génération d'une famille de distributions, conduisant à une plus grande confiance dans le résultat final.

### ***Tâche 3 – Exemples d'application***

Pour illustrer l'approche résistance-contrainte et les différents développements proposés dans ce projet, cinq applications sont considérées.

1. *Circuit imprimé soumis à un environnement thermique* : en plus de la loi d'accélération d'Arrhenius, l'endommagement du circuit est une fonction non linéaire de la durée d'exposition en fonctionnement. Cet exemple compare les méthodes de dimensionnement de l'essai, ainsi que les méthodes de modélisation

- du coefficient de variation ; il permet également la prise en compte des durées d'exposition aux différents niveaux de température.
2. *Vis de fixation soumise à la fatigue* : la difficulté de cette application réside dans la dépendance des paramètres du modèle mécanique, que seule l'approche FORM permet d'aborder convenablement. Le traitement de l'erreur humaine fait partie de cette illustration.
  3. *Capteur de Contrôle à dimensionner en essai* : cette application traite la confiance dans les essais. La méthode des tests d'hypothèse est comparée aux autres approches.
  4. *Fatigue d'un composant avec plusieurs facteurs endommageants* : le choix optimal du niveau de l'essai et la prise en compte des facteurs influents et mal identifiés représentent la particularité de cette application.
  5. *Équipement en dégradation hygro-thermique* : il s'agit de l'illustration de la méthode de calcul de la fiabilité sur un composant soumis au vieillissement dans un environnement agressif.

En complément de ces exemples, une procédure numérique a été développée sur Excel pour permettre le traitement de simples applications.

### **Conclusion et perspectives**

Ce projet représente un progrès mesurable dans la réflexion sur le dimensionnement fiabiliste, en donnant des réponses claires aux différents aspects de cette méthodologie. Il est certain que l'extension de l'approche résistance-contrainte passe par les méthodes de fiabilité du premier ordre, connues sous le nom FORM. La rareté des données représente un point dur dans la démarche, pour laquelle des solutions sont proposées et validées. L'intégration des informations cognitives (non statistiques) devient possible par la prise en compte des ensembles flous dans le calcul de fiabilité.

Parmi les difficultés rencontrées, on peut citer le spectre très large des applications et des modes de dégradation envisageables, d'une part, et la collecte d'information probabiliste dans des domaines émergents, d'autre part. La prise en compte de ces deux aspects est indispensable pour juger de l'aboutissement des recherches effectuées sous la contrainte du temps imparti.

Les perspectives de ce projet peuvent être résumées comme suit :

- extension à la prise en compte du risque dans la démarche de conception. Etant donné que l'optimum n'est pas simplement fonction de la fiabilité, ce développement consiste à intégrer les conséquences (matérielles et immatérielles (délais, pollution, vie humaines,...)) dans le dimensionnement, en s'appuyant sur la fonction d'utilité et la théorie de la décision.
- développement d'une méthode résistance-contrainte de la dégradation sur la base des processus stochastiques ; ce qui permettrait de dégager des marges supplémentaires dans le dimensionnement, à travers des considérations plus réalistes des probabilités d'occurrence de l'événement indésirable dans le temps.
- développement des méthodologies de conception robuste, en se basant sur le couplage de la théorie des probabilités, de la théorie des ensembles flous et de l'algèbre des intervalles. Ce couplage permet une évaluation encore plus réaliste

des niveaux de fiabilité, tout en intégrant les difficultés liées au manque de données et aux informations qualitatives.

- élargissement et approfondissement de la recherche bibliographique sur les modèles probabilistes utilisés dans les différents domaines d'ingénierie. Cet élargissement passera par l'acquisition des bases de données industrielles sur les modes de défaillance et sur les mécanismes de dégradation.
- études de cas industriels sur lesquels la méthodologie résistance-contrainte est considérée en tenant compte de tout le cycle de conception, de développement et de validation du produit : utilisation des données a priori et des informations subjectives pour une meilleure définition des essais, exploitation et actualisation bayésienne des résultats, mise au point du produit, vérification a posteriori et intégration du retour d'expérience.