

# Projet IMdR n° P07-1

## Modélisation des dégradations des structures et optimisation de leurs inspections

Chef de projet : Emmanuel ARDILLON (EDF)

Contractant : Henri GRZESKOWIAK (HG Consultant),

en partenariat avec Alaa CHATEAUNEUF (responsable technique) et Lambert PIERRAT

### 1. CONTEXTE ET ENJEUX

La dégradation d'une structure est la traduction d'une évolution lente et irréversible de ses variables d'état, conduisant à la diminution des marges de sûreté nécessaires pour assurer son bon fonctionnement. La modélisation de la dégradation des structures est essentielle pour la maîtrise des risques industriels, pour la gestion de leur durée de vie, pour l'optimisation des opérations d'inspections, de maintenance et de réparation, ainsi que pour le choix des engagements sur la garantie et la qualité des équipements. Toutefois, le manque de données, les incertitudes sur les propriétés physiques et les variations des conditions d'exploitation conduisent à des incertitudes plus ou moins importantes qui se répercutent sur l'évaluation de l'état de dégradation réel. Ceci rend difficile la prise de décision quant à une intervention appropriée. La situation est aggravée lorsque les enjeux sont importants, les données trop rares, la prévision très éloignée de l'observation et lorsque les conditions d'exploitation ne sont pas bien contrôlées. Ce constat ne fait qu'accroître l'intérêt de disposer d'une méthodologie de modélisation de la dégradation et de la prévision de la durée de vie des structures.

La modélisation des mécanismes de dégradation implique l'utilisation d'outils mathématiques permettant une bonne représentation de leur évolution temporelle. Comme la fiabilité des structures doit pouvoir être réévaluée, les modèles doivent pouvoir s'adapter à l'évolution des connaissances et au retour d'expérience. De plus, dans de nombreux domaines d'applications industrielles, les difficultés suivantes viennent s'ajouter :

- les mécanismes physiques conduisant à la dégradation des structures et à la baisse de la fiabilité ont des origines et des échelles de temps physiques très différentes d'un mode de dégradation à un autre,
- les dépendances entre les phénomènes de dégradation sont nombreuses et pas toujours bien connues,
- les structures sont des systèmes complexes car elles sont constituées d'un grand nombre de composants aux interactions multiples.

En conséquence, si la description qualitative des phénomènes physiques en jeu, bien que difficile, semble possible, leur quantification exacte à l'aide de lois régissant ces mécanismes paraît être une tâche, dont l'issue à court terme est encore loin d'être assurée.

L'évaluation de la fiabilité des structures dégradées nécessite le développement d'une méthodologie permettant :

- la modélisation des mécanismes de dégradation et de leurs impacts sur la structure étudiée, en fonction de ses conditions d'exploitation, y compris de l'environnement et des situations exceptionnelles,
- l'identification des modèles stochastiques de dégradation, ainsi que des sollicitations et des conditions d'environnement auxquelles une structure est exposée ; ces modèles doivent permettre de définir les cinétiques de dégradation des composants, ainsi que les synergies entre les différents modes et les interactions entre composants de la structure,
- l'évaluation de la fiabilité en fonction de l'âge de la structure (i.e. temps de fonctionnement), en décrivant ses performances à chaque instant de son cycle de vie.

Dans le cadre de cette étude, trois cas ont été envisagés :

- existence de modèles physiques (mathématiques ou numériques) du ou des mécanisme(s) de dégradation, et des données physiques d'entrée de ces modèles avec leurs incertitudes ;
- existence de données de dégradation suivies dans le temps, suffisamment nombreuses pour permettre un ajustement statistique de lois de dégradation (cinétiques) sans modélisation physique préexistante ;
- situations intermédiaires entre les deux cas précédents (éléments de connaissance physique disponibles mais non exhaustifs, avis d'experts, données de dégradation censurées...).

## 2. CONTENU DU PROJET

### 2.1. Etat de l'art sur les modèles de dégradation

Dans un premier temps, un état de l'art concernant la modélisation probabiliste des principaux mécanismes de dégradation est établi: il s'agit des phénomènes de fatigue, de fluage, de corrosion des aciers et des armatures, de gel-dégel du béton. Les paramètres des différents modèles sont définis par des distributions probabilistes. Des fiches synthétiques permettent de recenser les différentes grandeurs intervenant dans les mécanismes de dégradation et dans leur surveillance.

### 2.2. Guide méthodologique

Dans un second temps, un guide méthodologique est élaboré afin d'identifier les différentes modélisations permettant de définir les phénomènes de dégradation. Le cadre général de l'étude consiste, en vue de la prévision de la durée de vie des équipements, à définir la dégradation par la diminution de la marge de sûreté en fonction de l'âge de la structure. Cette marge peut appartenir à une des deux catégories :

- **marge instantanée** représentant la situation où la ressource (résistance ou seuil admissible) diminue en fonction du temps (calendaire ou de fonctionnement) et le cas échéant de l'environnement (augmentation de ses effets) et de l'accumulation des dégradations.
- **marge cumulée** traduisant l'écart entre le seuil admissible (ou fonctionnel) et le cumul de la dégradation (telle que la propagation de fissure par fatigue), qui se termine par la défaillance telle qu'elle est définie par la fonction étudiée. Dans ce cas, l'effet de l'environnement croît avec la durée d'exploitation, jusqu'à la consommation de la ressource disponible.

Le modèle général de dégradation peut être décomposé en quatre phases : phase d'incubation, phase d'amorçage, phase de propagation et phase d'accélération. La modélisation probabiliste de la dégradation nécessite la prise en compte de l'évolution des incertitudes au cours du temps. Ces incertitudes résultent de deux causes : d'une part la dégradation inhérente à la structure, fonction des conditions d'exploitation préalablement spécifiées, d'autre part des imperfections affectant la prévision des conditions opérationnelles, l'état du système et les modèles de dégradation.

Les modèles paramétriques de dégradation peuvent être définis par :

- une fonction de dégradation déterministe, affectant la variable aléatoire de dégradation.
- une fonction de dégradation déterministe, affectant la moyenne et l'écart-type de la variable aléatoire de dégradation.
- une fonction de dégradation à paramètres aléatoires,
- un processus markovien, où les probabilités de transition caractérisent l'évolution de l'état dégradé,
- un processus gamma pour représenter l'évolution du dommage,
- une diminution linéaire ou quadratique de l'indice de fiabilité au cours du temps,
- un processus stochastique général, dont les paramètres sont déterminés par les lois physiques intéressées.

Par ailleurs, les effets de l'environnement sont modélisés, soit par les lois de valeurs extrêmes, soit par des processus stochastiques continus, à impulsions ou à sauts.

La prévision de durée de vie des structures dégradables peut faire appel aux approches suivantes :

- approche physique: la distribution de la fiabilité est obtenue par intégration du temps, par discrétisation de la durée de vie ou par la méthode du taux de franchissement. La résolution est possible en utilisant des méthodes asymptotiques, la méthode de l'indice de fiabilité, ou des simulations de Monte Carlo.
- approche statistique: la distribution de la durée de vie est directement définie par une loi théorique, telle que la loi de Weibull, la loi exponentielle ou la loi lognormale. Les paramètres de ces lois peuvent être obtenus, à partir d'essais accélérés, d'un retour d'expérience ou par calage sur les résultats d'une approche physique.

Un schéma de modélisation est proposé permettant de couvrir l'ensemble des situations rencontrées et décrivant les cheminements possibles conduisant aux modèles à adopter. Ce schéma tient compte de la complexité des modèles, de la nature et de la disponibilité de l'information. Les performances de l'analyse peuvent être améliorées par la génération d'un métamodèle permettant de combler le manque de connaissance physique ou par le recours à une base de données numérique en vue de combler le manque d'informations. Il est toujours recommandé de faire intervenir une modélisation physique, aussi fine que possible (à condition de pouvoir estimer les paramètres), en vue de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et de connaître leur rôle dans le comportement fiabiliste. C'est une démarche essentielle pour l'optimisation de l'inspection et de la maintenance des structures.

### **2.3. Application aux données de dégradation**

Trois études de cas d'applications numériques ont été considérées :

- usure d'une pompe à huile basée sur des données statistiques issues d'essais,
- fatigue d'une structure mécano-soudée,
- corrosion d'un assemblage en construction métallique.

Pour ces applications, les études portent sur le choix de la modélisation la plus adaptée au cas considéré et aux données et observations disponibles, en vue d'une prévision quantitative de la durée de vie.

### **2.4. Méthodologies d'optimisation des inspections et de la maintenance**

Après la définition des différents types de maintenance envisageables au cours d'un cycle de vie, l'optimisation d'une politique de maintenance se base sur la minimisation de l'espérance du coût total de maintenance (inspection, réparation et défaillance), impliquant l'introduction de modèles de dégradation. Les modèles de planification des inspections basés sur la fiabilité permettent de tenir compte des différentes sources d'incertitudes associées à la prise de décision. Deux types de modèles sont à considérer : modèles probabilistes de dégradation et modèles d'actualisation de la fiabilité.

Les différents modèles de maintenance sont présentés et discutés en termes de fonctions de dégradation et de modèles de coûts. Pour un composant isolé, les modèles de maintenance peuvent être : « aussi bon que neuf », « aussi mauvais que vieux », « maintenance imparfaite » et maintenance inefficace » ; les remplacements peuvent être basés sur le temps ou sur l'âge. Les politiques combinées permettent généralement une meilleure utilisation des ressources. Dans le cas d'un horizon fini, il est nécessaire de considérer toute la durée de vie de la structure. Lorsqu'il s'agit

d'un groupe de composants, des politiques de groupement opportunistes peuvent être appliquées en vue de réduire les coûts fixes induits par les manques à gagner.

## **2.5. Examen de la pertinence de la capitalisation des données de dégradation**

On ne peut analyser la pertinence de la capitalisation des données de dégradation en dehors du contexte spécifique des composants ou équipements concernés. En effet, capitaliser des données suppose de les acquérir préalablement, en vue de les traiter ultérieurement. Ceci implique de mobiliser sur une durée significative des moyens humains et matériels compatibles avec les objectifs poursuivis: maintenir un certain niveau de disponibilité opérationnelle, assurer la sécurité des biens et des personnes, se mettre en conformité avec une réglementation évolutive, planifier les opérations de maintenance, réduire les contraintes d'exploitation, programmer la mise hors service en fin de vie,... autant d'aspects dont le caractère technico-économique est évident. En début de vie, la complexité des structures rend difficile l'appréhension d'une amorce de vieillissement, car aucun composant ne présente un comportement singulier. Au cours du temps, la capitalisation des données permet de se focaliser plus efficacement sur les composants critiques. La décision de mise en place d'une méthode de collecte et de capitalisation de données de dégradation relève d'une analyse préalable, technique et économique, pour laquelle on indique les principaux facteurs à considérer.

## **3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Ce projet a permis de faire le point sur les approches méthodologiques utilisables pour la modélisation probabiliste des dégradations, impliquant, en amont les pré-requis en termes d'informations disponibles et de capitalisation et en aval, l'exploitation des modèles de dégradation en vue d'optimiser les politiques d'inspection-maintenance-réparation.

En prolongement de ce travail de synthèse, il est utile de mettre l'accent sur l'intérêt d'envisager des développements ultérieurs, parmi lesquels :

- l'exploration du potentiel des approches proposées sur un « benchmark » permettant d'évaluer les différentes facettes et/ou difficultés pratiques liées aux différentes approches et hypothèses. Un objectif ultime serait ainsi d'explorer complètement le schéma logique de modélisation, sur la base d'un exemple unique. Pratiquement, un ou plusieurs exemples seraient à définir par le groupe de projet, sur lesquels les différentes modélisations seraient appliquées et confrontées,
- l'étude de l'impact de la prise en compte des résultats d'essais et du retour d'expérience en exploitation, pour l'analyse des structures dégradées. L'objectif serait de quantifier les sensibilités de la prévision de la durée de vie en fonction des informations recueillies. Cette étude intégrerait des informations objectives et subjectives (avis d'experts, résultats imprécis, conditions d'exploitation imprécises,...etc.),
- l'intégration éventuelle, dans la démarche de gestion de la durée de vie des structures, de critères pertinents caractéristiques du développement durable: prise en compte des conséquences matérielles et immatérielles (délais, pollution, vie humaines,...) dans le dimensionnement et la maintenance, en s'appuyant sur des fonctions d'utilité et sur la théorie de la décision,
- le développement d'un outil informatique d'aide à la décision, intégrant les principaux modèles et méthodes développés dans ce projet. Alors qu'il existe un certain nombre d'outils de calcul fiables, l'ingénierie a besoin d'un outil de suivi et de modélisation des dégradations, intégrant le choix des politiques d'inspection et de maintenance.