HAL
open science

Methodologies d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes - Panorama et benchmarking

A. Chateauneuf, Mathieu Reimeringer, Gaëtan Prod'Homme

To cite this version:

A. Chateauneuf, Mathieu Reimeringer, Gaëtan Prod'Homme. Methodologies d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes - Panorama et benchmarking. Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 19, Oct 2014, Dijon, France. ineris-01862474

HAL Id: ineris-01862474

https://ineris.hal.science/ineris-01862474v1

Submitted on 27 Aug 2018

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.

METHODOLOGIES D'EVALUATION DE LA SURETE DES STRUCTURES VIEILLISSANTES – PANORAMA ET BENCHMARKING

METHODOLOGIES OF SAFETY ASSESSMENT OF AGING STRUCTURES – PANORAMA AND BENCHEMARKING

Chateauneuf A.
Clermont Université, Université Blaise Pascal,
Institut Pascal,
BP 10448, 63000 Clermont-Fd
Tél. : 0473407525, Fax : 0473407494
alaa.chateauneuf@univ-bpclermont.fr

Reimeringer M. et Prod'homme G.
INERIS
Parc Technologique Alata
88 Bd Lahitolle, 18020 Bourges
Tél: 0248484044, Fax : 0248484034
mathieu.reimeringer@ineris.fr

Résumé

L'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes est essentielle pour assurer le bon fonctionnement des installations et des systèmes industriels. Le besoin d'une méthodologie cohérente et adaptée se ressent de plus en plus dans différents secteurs d'ingénierie, étant donné le nombre important d'équipements actuels et de leur âge, d'une part, et les limitations de la capacité de réinvestissement, d'autre part. Le projet IMdR P10-2 : « Méthodes d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes – Panorama et benchmarking », auquel sept souscripteurs ont participé : AMETHYSTE, BUTAGAZ, CETIM, EDF, INERIS, RTE et SNCF[1], a pour objet d'identifier les méthodologies scientifiques existantes et utilisées dans des secteurs industriels variés, d'en dégager les concepts fondamentaux et les besoins en termes de données et de compétences. Pour chaque famille de méthodes, le degré de maîtrise des incertitudes et la façon de prendre en compte le risque sont identifiés. Un benchmark composé de trois exemples industriels (réservoir atmosphérique, conduite forcée et structure métallique), s'appuyant sur des données réelles, est établi pour la comparaison des différentes méthodologies, en termes d'acquisition de données, d'analyse d'incertitude et d'intégration du risque pour le suivi et la remise en état des structures.

Summary

The assessment of the safety of aging structures is mandatory to ensure appropriate operations of industrial systems. The needs of coherent and adapted methodology become more and more significant in various engineering fields, knowing the large number of equipment and their actual ages, on one hand, and the limitations of re-investment capacity, on the other hand. The project IMdR P10-2: "Methodologies of safety assessment of aging structures – panorama and benchmarking", to which seven subscribers have participated: AMETHYSTE, BUTAGAZ, CETIM, EDF, INERIS, RTE and SNCF, has as an object to identify the existing scientific methodologies, which are applied in different industrial fields, in order to highlight the main concepts, and the requirements in terms of data and skills. For each family, the level of uncertainty control and the risk consideration are identified. A benchmark composed of three industrial examples (atmospheric tank, pressurized pipe and steel structure), based on real data, is established for comparison of the different methodologies, in terms of data acquisition, uncertainty analysis and risk consideration in managing and monitoring the state of the structures.

Introduction

Suite aux accidents marquants des dernières décennies, les évolutions sociétales et règlementaires vis-à-vis de la perception et de la gestion des risques imposent au gestionnaire d'accorder une attention de plus en plus forte au suivi de l'état de sûreté des systèmes dont il est responsable. Les développements récents de diverses méthodologies, plus ou moins spécifiques, ne permettent pas d'avoir une vision complète et cohérente de l'ensemble des méthodes et outils disponibles pour l'évaluation de la sûreté des structures. Cette évaluation nécessite la connaissance de l'état précis de la structure elle-même, de son historique, de son environnement et des évolutions potentielles au cours du temps. La pertinence de l'évaluation n'est possible qu'à travers une représentation réaliste des incertitudes et de leurs effets sur l'état de la structure, l'environnement, les mécanismes de dégradation et le système de management (inspection, surveillance, maintenance et réparation ou rénovation). En plus du diagnostic, permettant l'évaluation de l'état actuel de la structure, le pronostic vise à évaluer la durée de vie résiduelle du point de vue technico-économique.

Les gestionnaires ont besoin d'une méthodologie qui offre un cadre systématique présentant des orientations sur les composants à hauts risques, par l'évaluation des modes de défaillance, de leurs probabilités et conséquences, dans un premier temps, et par l'introduction des résultats de l'analyse dans les modèles de décision, dans un second temps. La méthodologie doit se baser sur le retour d'expérience disponible dans les bases de données, l'expérience du métier (managers, ingénieurs et opérateurs) et les modèles d'évaluation du risque, ainsi que les expériences dans d'autres secteurs industriels et expertises.

L'objectif de l'évaluation est de mettre à la disposition du décideur des informations qualitatives et quantitatives qui pourront être exploitées pour la gestion du risque. Cette évaluation comprend l'analyse du risque, qui implique l'identification de l'aléa, l'estimation de la probabilité d'occurrence des événements indésirables et l'évaluation des conséquences potentielles, d'une

[1] Participants au projet IMdR P10-2 : Aoues Y. (INSA de Rouen), Barakat B. (CETIM), Borlet O. (Amethyste R&D), Bryla Ph. (EDF), Da Costa H. (BUTAGAZ), Dieleman L. (SNCF), Faddoul R. (USJ), Lannoy A. (IMdR), Leboëtté G. (CETIM), Mauris F. (EDF), Obama J.M. (IMdR), Stevenin P. (RTE), Yang S. (SNCF)

part, et l'évaluation du risque, qui nécessite la définition du seuil d'acceptabilité et la comparaison des alternatives et des variantes et options, d'autre part.

Quelle que soit la méthodologie employée, la première étape de l'évaluation consiste à décomposer l'installation ou la structure en composants et sous-systèmes. L'évaluation commence par le niveau le plus élémentaire et l'agrégation des informations permet le passage aux niveaux supérieurs. Pour cibler les équipements critiques, il est souvent conseillé de procéder en deux phases : une phase d'identification rapide, souvent visuelle ou fondée sur une analyse du retour d'expérience, de l'état général des composants, et une phase approfondie destinée aux composants critiques identifiés lors de la première phase.

Dans ce cadre, le présent projet a pour objectif d'identifier les méthodologies utilisées dans différents secteurs industriels, d'en dégager les concepts fondamentaux, les conditions d'application, les avantages et les inconvénients. Il s'agit également de proposer des pistes d'amélioration et de définir les liens entre les approches adoptées et les possibilités de transfert de méthodologies d'un domaine industriel à un autre. Un benchmark composé de trois exemples industriels est établi pour la comparaison des différentes méthodologies, en termes d'analyse de données, de prise en compte des incertitudes et de gestion de la sûreté de la structure.

Méthodologies d'évaluation de la sûreté des structures vieillissantes

1 Maîtrise du risque

L'évaluation de la sûreté est un processus scientifique et technique permettant de modéliser et de quantifier les risques associés à des situations prédéfinies. L'objectif de l'évaluation est de mettre à la disposition du décideur des informations qualitatives et quantitatives qui pourront être exploitées pour la gestion du risque. Cette évaluation comprend l'analyse du risque, qui implique l'identification de l'aléa, l'évaluation de la probabilité d'occurrence des événements et des conséquences, d'une part, et l'évaluation du risque, qui nécessite la définition du risque acceptable et l'évaluation comparative des alternatives et des variantes et options, d'autre part. L'évaluation du risque permet de répondre aux trois questions : Qu'est-ce qui peut mal se passer ? Quelle est la vraisemblance que ça se passe mal ? Et quelles sont les conséquences potentielles si ça se produit ? Le contrôle du risque est effectué par le biais de la surveillance et de la méthodologie de décision. La communication du risque doit être adaptée selon l'audience : médias, grand public ou communauté technique et scientifique.

L'évaluation de la sûreté doit être considérée au regard de l'objectif visé parmi les quatre critères de performance :

- aptitude au service (capacité à remplir les fonctions requises) ;
- sécurité (absence de dommage inattendu aux personnes exposées, aux biens ou à l'environnement), maintenir l'intégrité de l'actif et sa fonction ;
- maintenir la sécurité de l'espace de travail et des zones affectées ;
- durabilité (absence de dégradation inattendue de la performance) ;
- améliorer ou maintenir sa fiabilité ;
- optimiser la disponibilité et d'une façon générale la performance et le service rendu ;
- réduire les coûts des investissements et des interventions ;
- compatibilité (adéquation aux exigences de l'activité industrielle, règlementaires, gouvernementales, sociales et environnementales).

La gestion du risque comprend tous les processus permettant aux opérateurs, gestionnaires et propriétaires de prendre des décisions pour la sûreté, de modifier les régulations, et de choisir les configurations du système, sur la base des résultats de l'évaluation, en vue de maintenir la sûreté et de mieux contrôler les risques potentiels (Lannoy et al., 2005). Cette gestion du risque facilite la prise de décision sur la base de l'évaluation de la sûreté, tout en tenant compte des autres facteurs économiques, sociaux, politiques, environnementaux, législatifs, de fiabilité, de productivité et de sécurité. Notons aussi qu'une telle évaluation n'est pas seulement utile pour la sûreté, étant donné qu'elle amène également de nombreuses informations pour optimiser la performance industrielle en termes de disponibilité ou de réduction des coûts.

La norme ISO 31000 (ISO 31000) définit le processus de management des risques en cinq étapes principales (figure 1) :

1. établissement du contexte et définition du système ;
2. identification des risques (aléas, incertitudes et conséquences) ;
3. analyse des risques (exigences, capacités, vraisemblance, conséquences, mesures) ;
4. évaluation des risques ;
5. traitement des risques (réduire la vraisemblance et/ou les conséquences, éviter, transférer)

Ces différentes étapes doivent interagir avec les expertises, les consultations et la communication, d'une part, et doivent subir des procédures de suivi et de révision régulière, d'autre part.

Pour effectuer l'analyse des risques, il est nécessaire de :

- identifier l'aléa interne et externe ;
- évaluer sa fréquence ;
- évaluer les conséquences ;
- évaluer le risque ;
- identifier les actions préventives ou correctives,
- évaluer leur efficacité ;
- prendre la décision et contrôler le suivi des actions tout en développant le retour d'expérience.

Différentes étapes doivent être considérées pour déterminer le risque acceptable : définir les alternatives (ou options), spécifier les objectifs et les mesures d'efficacité, identifier les conséquences des alternatives, quantifier les valeurs des conséquences, et évaluer toutes les alternatives en vue de permettre le meilleur choix.

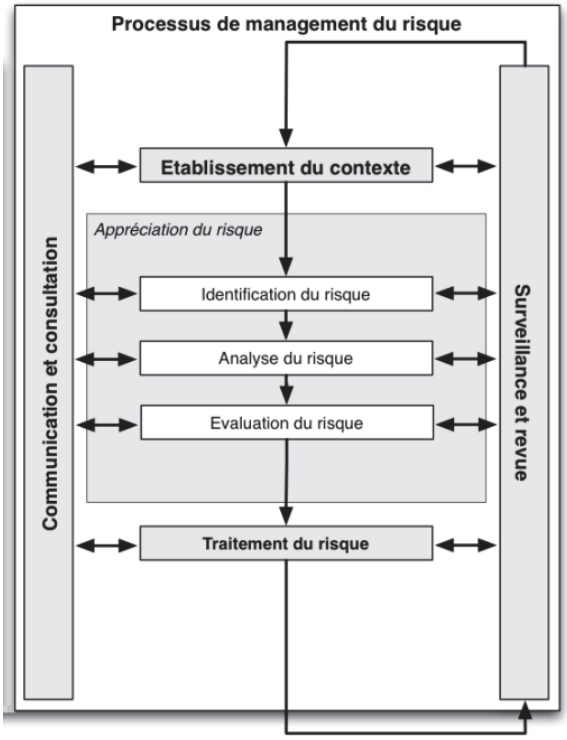

Figure 1. Processus de management du risque selon l'ISO 31000

D'une façon générale, les méthodologies d'évaluation peuvent être qualitatives ou quantitatives. Alors que les méthodes qualitatives utilisent les avis d'experts pour identifier et évaluer la probabilité et les conséquences de l'aléa, les méthodes quantitatives reposent sur les méthodes statistiques et les bases de données (Altenbach, 1995). Le choix d'une approche qualitative ou quantitative dépend de la disponibilité des données et des modèles pour l'évaluation de l'aléa et des moyens d'analyse à la disposition de l'équipe de gestion du risque. Toutefois il faut remarquer que l'analyse quantitative nécessite toujours une analyse qualitative préalable, notamment pour appréhender le contexte et pour faciliter la compréhension physique.

2 Méthodologie d'évaluation de la sûreté

Les méthodologies étudiées dans ce projet sont regroupées en trois familles.

- Les **méthodologies basées sur le classement** (Faddoul et al., 2011), dans lesquelles l'évaluation se fait par des scores de conditions d'état, alloués à chaque composant lors des inspections et des expertises. Ces scores permettent l'évaluation des indicateurs de l'état de santé pour la structure et ses composants, aboutissant à une cotation générale de la structure et à une priorisation des actions à mener. Cette approche est plutôt déterministe et qualitative. Elle nécessite principalement des données d'observation simples à acquérir.
- Les **méthodologies basées sur la criticité** (API 581, 2008), dans lesquelles les conséquences et les probabilités de défaillance sont obtenues par des référentiels spécifiques au secteur industriel, dans le but d'évaluer le risque. Les phénomènes de dégradation et la fiabilité des inspections sont pris en compte dans l'évaluation de la criticité, pour le calcul de la durée de vie résiduelle et pour la planification des interventions. Cette approche est semi-probabiliste, impliquant des procédures qualitatives ou quantitatives. Elle nécessite la construction d'une base de données importante sur les taux de défaillance et l'influence des différents facteurs sur l'évolution de l'état de la structure étudiée.
- Les **méthodologies basées sur la fiabilité** (Ditlevsen et al. 2005 ; Aoues et al., 2013), dans lesquelles l'analyse précise de la fiabilité structurale vis-à-vis de chacun des modes de défaillance est effectuée pour l'état actuel et prévisionnel ; la dégradation aléatoire de la structure doit alors être considérée. L'évaluation de l'espérance du coût du cycle de vie de la structure permet l'optimisation du plan d'inspection et de maintenance sous des contraintes de budget et de fiabilité (Sahraoui et al., 2013). Cette approche est totalement probabiliste et quantitative. Elle nécessite de nombreuses données statistiques sur les matériaux et sur l'état de la structure ainsi que des modèles de comportement précis.

Dans les paragraphes suivants, nous développons brièvement les principaux concepts de ces trois méthodologies.

2.1 Méthodologie basée sur le classement

L'application des méthodes de classement, en se basant sur des référentiels qualitatifs ou quantitatifs, constitue une démarche simple pour l'évaluation de l'état général de la structure, à travers l'observation de son niveau de dégradation. La méthode est composée des étapes suivantes (figure 2) :

1. décomposition de la structure en unités structurales, sous-systèmes et éléments. Cette décomposition ne tient pas compte des liens logiques, fonctionnels et mécaniques entre les éléments, à l'exception des liens de protection contre l'agressivité de l'environnement climatique ou mécanique ;
2. établissement d'un référentiel pour les éléments, dans lequel les différents types sont répertoriés, avec leurs mécanismes de dégradation potentielle ;
3. établissement d'un référentiel des conditions d'état pour chacun des mécanismes de dégradation ; les indications qualitatives ou quantitatives permettent aux inspecteurs d'associer facilement et de façon plus ou moins invariante des pourcentages de l'élément correspondant à chaque condition d'état ;
4. établissement d'un référentiel d'« indicateurs critiques » pour couvrir les mécanismes de dégradation associés à des comportements locaux, tel que la fatigue ; ces indicateurs déclenchent des alertes pour la hiérarchisation des actions ;
5. les règles d'agrégation des conditions d'état sont définies par la dégradation ayant le score le plus élevé ; cette approche admet la même pondération pour tous les modes (mécanismes) de dégradation, et seuls les pourcentages affectés déterminent la condition d'état de l'élément ;
6. l'évaluation de la structure se base sur le calcul d'un certain nombre d'indicateurs (indices de santé, indice de classement, indice de suffisance, etc.) à partir des conditions d'état de chaque type de dégradation dans chacun des éléments de la structure, d'une part, et des autres paramètres socio-économiques, d'autre part ;
7. le pronostic des conditions d'état est basé sur un modèle markovien dont les matrices de transition sont évaluées soit par élicitations des avis d'experts, soit par le retour d'expérience relatif aux dernières inspections de la structure ; un référentiel de l'environnement permet également d'ajuster le taux de dégradation, selon la nature de la protection ;
8. la hiérarchisation des actions est établie en fonction des indices structuraux et des paramètres économiques associés (perte en valeur structurale et coûts de défaillance, de réparation, de rénovation ou de remplacement).

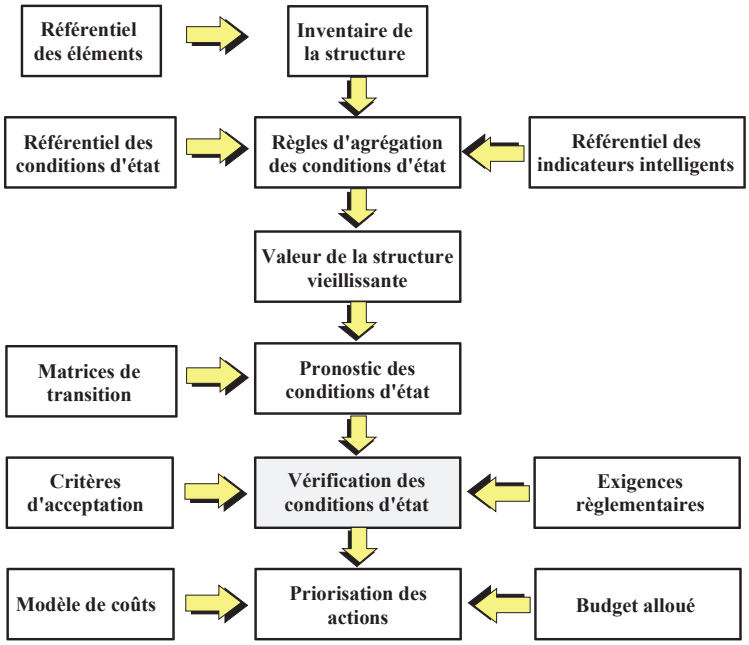

Figure 2. Schéma de la méthodologie basée sur le classement

2.2 Méthodologie basée sur la criticité

Cette méthodologie consiste à réaliser l'évaluation des risques des équipements et installations, d'une part, et à exploiter les résultats pour définir les fréquences et la qualité des inspections, d'autre part. Elle s'appuie sur les tâches suivantes (figure 3) :

1. sélection des composants, sous-systèmes et systèmes : cette sélection s'appuie sur le retour d'expérience et sur le jugement d'expert, concernant le composant en question ou les composants similaires ; un groupement par type d'éléments ou par type de dégradation/défaut s'avère utile pour l'analyse ; le classement selon le coût de remplacement peut être effectué pour déterminer leur importance relative ;
2. développement de l'arbre de conséquences pour chaque sous-système : la combinaison du retour d'expérience, du jugement d'ingénieur et des avis d'experts permet de définir les conséquences de la défaillance des sous-systèmes en fonction des conséquences associées à leurs composants constitutifs ; le jugement d'ingénieurs et d'experts fait

souvent appel à des modélisations physiques, lorsque celles-ci sont disponibles, pour l'estimation des conséquences de la défaillance (e.g. diffusion de gaz toxique, etc.) ; il est à noter que les composants ne contribuent pas de façon égale dans le sous-système ; des classes de coûts de conséquences sont établies dans cette approche ;

3. estimation des probabilités de défaillance des composants : à partir du retour d'expérience ou d'une probabilité subjective à partir des opinions d'experts (l'approche qualitative repose sur une approximation des conditions physiques et structurales des composants individuels, en vue de l'attribution des probabilités de défaillance) ; pour chaque composant, une probabilité est associée à l'étendue du dommage (et éventuellement à sa sévérité) ; lorsque la représentation sous forme d'un « arrangement logique en série » des composants est admise, la probabilité de défaillance du sous-système est obtenue par la probabilité maximale de ses composants ;
4. calcul des coûts de défaillance : le coût de défaillance est estimé en fonction de l'importance relative du composant, des coûts de maintenance et du niveau de dommage (coûts directs et indirects des conséquences) ; une métrique doit être définie pour la contribution de chaque composant dans le coût total de défaillance ; pour chaque type de conséquence, le coût de défaillance du sous-système est obtenu par une somme pondérée des coûts associés aux composants constitutifs ; le risque est évalué par les coûts des conséquences et par le degré d'importance du composant, d'une part, et par la probabilité de défaillance associée, d'autre part ;
5. analyse de décision : les tâches ci-dessus sont effectuées pour chaque sous-système de la structure ou installation ; les composants sont classés selon leur degré de criticité individuelle ; les niveaux acceptables du risque sont définis par jugement d'experts ou par retour d'expérience, et le résultat peut être représenté dans la matrice de criticité.

Dans cette démarche, il est supposé que l'estimation du risque est actualisée en fonction des résultats de surveillance, de l'inflation, de la révision des coûts et des sollicitations d'experts. Cette actualisation permet également d'affiner les probabilités de défaillance des composants et leur impact sur l'intégrité de la structure, permettant d'établir une planification plus précise des inspections majeures.

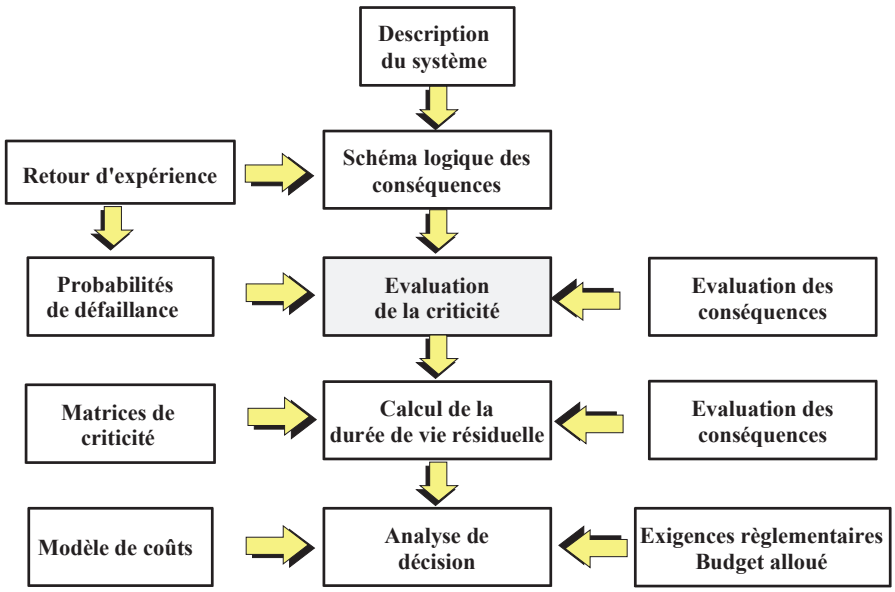

Figure 3. Schéma de la méthodologie basée sur la criticité

2.3 Méthodologie basée sur la fiabilité

Cette méthodologie est basée sur une modélisation mécano-fiabiliste rigoureuse du comportement mécanique, logique et probabiliste de la structure, complétée par une analyse des conséquences de la défaillance (voire même de la dégradation) et des coûts pour la formulation de la fonction de l'utilité (Ellingwood 1996, JCSS 2001). Cette approche fournit ainsi le cadre le plus sophistiqué de représentation du système, de son fonctionnement et de son environnement. Les étapes principales sont comme suit (figure 4) :

1. identification du système structural et élaboration de l'arbre d'événements ;
2. analyse quantitative des trajectoires de l'arbre de défaillance : les probabilités d'occurrence des différents composants sont évaluées par un couplage mécano-fiabiliste, sur la base de l'analyse du comportement mécanique et probabiliste du système et de l'identification des conditions opérationnelles ;
3. identification des aléas et description logique (sous forme de systèmes série-parallèle) des scénarii permettent l'évaluation quantitative de l'arbre de défaillance, en s'appuyant sur l'analyse du retour d'expérience ;
4. évaluations quantitatives des probabilités permettent le calcul de la distribution de la durée de vie résiduelle, et évaluation des conséquences, des risques et de la fonction d'utilité ;
5. modélisation probabiliste des résultats d'inspection pour tenir compte de leur degré de précision et des incertitudes associées ;
6. en fonction des informations disponibles sur la durée de vie résiduelle, les calculs des conséquences et les risques associés, l'analyse de la décision est effectuée pour proposer une planification des interventions et des mesures de réduction des risques ; l'impact de ces opérations sur la durée de vie résiduelle est réévalué afin d'améliorer la

qualité du plan d'actions mis en place ; la décision se base préférentiellement sur l'optimisation coûts-bénéfices, sous contraintes de niveau de fiabilité et de risque admissibles.

Cette méthodologie est purement quantitative et implique l'utilisation de modèles physiques et mécaniques pour la dégradation et pour la prise en compte des interdépendances fonctionnelles. Les données sur la structure, l'environnement et les inspections sont traitées pour la définition des distributions de probabilité qui sont utilisées en entrée des modèles de calcul. Les informations qualitatives peuvent être intégrées par l'utilisation d'approches bayésiennes permettant d'ajuster les informations quantitatives. Le risque est évalué quantitativement, sans référentiel particulier pour la comparaison ; cette dernière se fait principalement sur la base d'une équivalence monétaire.

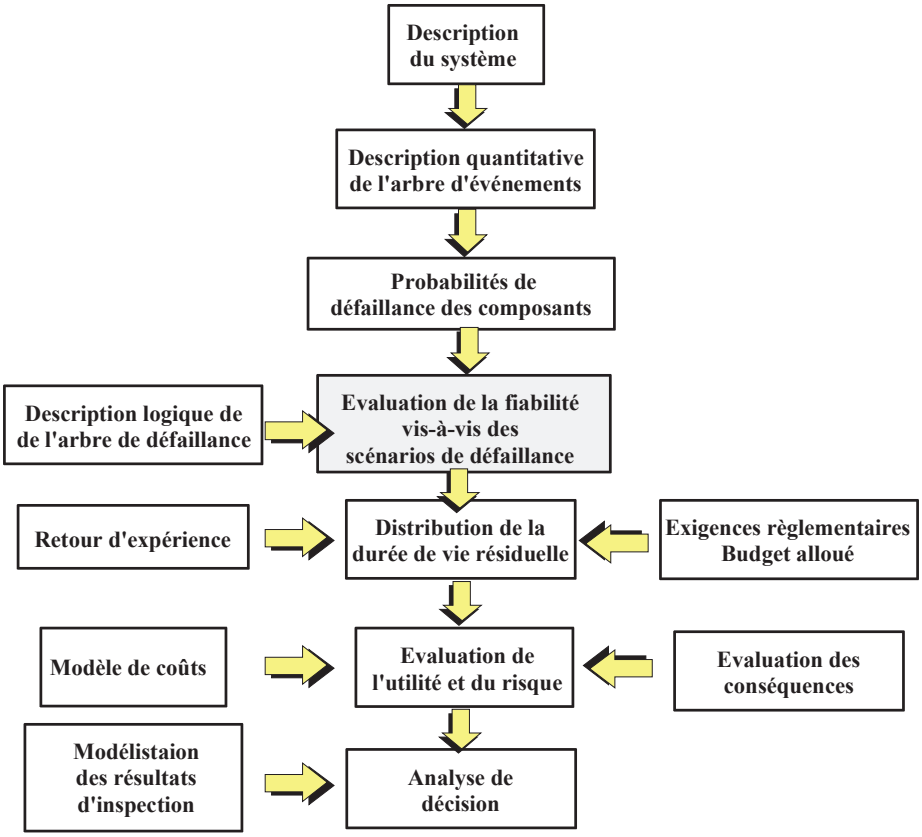

Figure 4. Schéma de la méthodologie basée sur la fiabilité

Benchmark de comparaison des différentes méthodologies

Les méthodologies décrites ci-dessus ont été appliquées à trois exemples industriels, dans le but d'établir une analyse critique et d'identifier leurs limites pratiques, ainsi que les améliorations potentielles.

3 Cas d'étude

Trois cas d'étude ont été considérés dans ce projet : réservoir atmosphérique, conduite forcée et assemblage métallique. Ces cas d'étude seront brièvement décrits dans les paragraphes suivants.

3.1 Réservoir atmosphérique

L'évaluation de la sûreté est effectuée pour un réservoir atmosphérique de stockage de pétrole brut. Le réservoir, âgé de plus de 50 ans, est soumis à la corrosion généralisée au niveau de la tôle du fond et de la virole inférieure de la robe. Les méthodologies employées sont :

- l'approche déterministe basée sur des valeurs admissibles ;
- la méthodologie basée sur la criticité selon l'approche ***qualitative*** ;
- la méthodologie basée sur la criticité selon l'approche ***quantitative*** ;
- l'approche fiabiliste, basée sur le couplage mécano-fiabiliste et sur l'optimisation du coût total de maintenance.

Les règles d'évaluation déterministes permettent de comparer les valeurs mesurées aux seuils définis par les règlements, en l'occurrence le CODRES. Les valeurs seuils tolèrent une réduction du coefficient de marge par rapport à la valeur requise à la conception initiale. Toutefois, cette approche ne permet ni de spécifier l'intervalle d'inspection, ni le niveau de sûreté de l'installation.

Les analyses de criticité permettent de tenir compte des probabilités de défaillance, d'une part, et des conséquences de la défaillance, d'autre part. L'évaluation du réservoir en fonction des données historiques montre un niveau de criticité très élevé (figure 5). Ces analyses permettent de spécifier l'intervalle d'inspection correspondant à un niveau de criticité inacceptable.

Cette valeur est définie de façon arbitraire, représentant le risque financier que l'entreprise peut assumer. Toutefois, il n'est pas certain que cette solution corresponde réellement à un choix optimum des interventions.

L'analyse fiabiliste est une extension de l'analyse de criticité dans laquelle la quantification des incertitudes se fait de façon plus cohérente. Elle permet de tenir compte, non seulement du retour d'expérience, mais aussi du savoir-faire en termes de modèles prévisionnels de comportement. Le choix de l'instant optimal d'intervention se fait sur la base de la minimisation du coût total de maintenance, comme l'illustre la figure 5 où l'optimum se trouve à 17 ans après la dernière inspection.

Alors que l'ensemble de ces méthodes conduisent à des conclusions similaires sur l'état actuel du réservoir, elles donnent des résultats différents en termes d'estimation de la durée de vie résiduelle, avec des conséquences directes sur la prise de décision vis-à-vis de la planification des intervalles d'inspection. Les méthodes quantitatives accordent une très grande pondération aux conséquences environnementales, en imposant des coûts de pollution très élevés. Dans ce cas, l'intervalle d'inspection est principalement piloté par le risque de pollution.

Probabilité	Matrice de criticité			
Elevée	L	H	E	E
Moyenne	L	M	H	E
Faible	N	L	M	H
Négligeable	N	N	L	M
Conséquences	Négligeables	Faibles	Moyennes	Elevées

Criticité
E Très élevée
H Elevée
M Moyenne
L Faible
N Négligeable

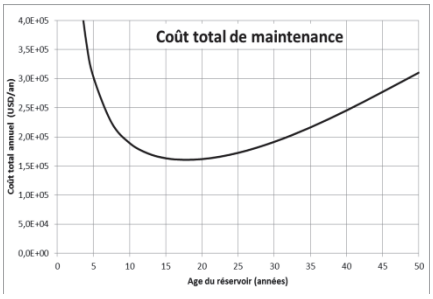

Figure 5. Niveau de criticité et coût total de maintenance

3.2 Conduite forcée

Dans ce cas d'étude, nous nous intéressons à l'évaluation de la sûreté d'une conduite forcée soumise à la corrosion atmosphérique (Bryla et al., 2012), correspondant à la classe C4 de la norme ISO-9223. Des mesures d'épaisseurs ont été réalisées sur différents tronçons de la conduite, montrant un taux de corrosion globalement faible, mais avec une dispersion qui ne peut pas être négligée. Trois approches ont été appliquées pour l'évaluation de la conduite :

- approche déterministe basée sur la justification du facteur de marge sous les hypothèses les plus pessimistes ; cette approche ne permet pas de justifier l'intégrité de la structure de façon claire, étant donné la très grande plage de variation, interdisant toute décision rationnelle ;
- approche semi-probabiliste dans laquelle les valeurs caractéristiques, dites « représentatives » par abus de langage, sont utilisées pour la justification ;
- approche probabiliste, basée sur l'exploitation statistique des données et sur la spécification d'un objectif de fiabilité ; cette approche fournit la durée de vie résiduelle par rapport au niveau de sûreté visé.

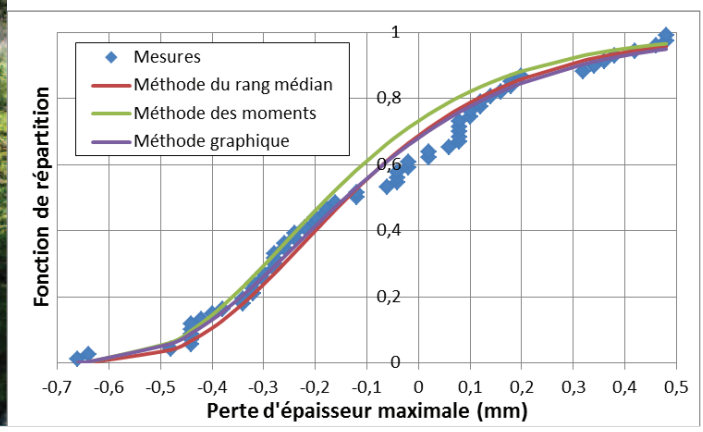

Figure 6. Conduite forcée et fonction de répartition de la perte d'épaisseur

L'approche déterministe conduit à un facteur de marge minimal de 1,16 pour les conditions nominales de conception et pour la phase d'exploitation. Ce facteur de marge devient insuffisant lorsque des hypothèses pessimistes sont considérées. Pour la classe C4, l'estimation de la durée de vie résiduelle se situe entre 0 et 145 ans selon les hypothèses considérées sur les données et sur le taux de corrosion ; la valeur de 43 ans peut être adoptée en prenant les valeurs moyennes de l'état actuel avec un taux de corrosion élevé.

L'approche semi-probabiliste effectue les traitements statistiques des mesures en vue de la détermination des quantiles (pris à 5% ou à 95%, selon la nature de la variable). Le facteur de marge se trouve légèrement en dessous de l'unité, lorsque des

hypothèses pessimistes sont adoptées. La durée de vie résiduelle est difficile à justifier, à moins de spécifier arbitrairement une valeur limite du facteur de marge, comme par exemple 0,8, en dessous de laquelle la structure sera considérée « peu sûre ».

L'approche probabiliste considère l'ensemble des aléas, qui sont définis par des modèles probabilistes incluant les variables du matériau, de la dégradation, de la mesure et de la cinétique de corrosion. La spécification de la fin de la durée de vie se base sur un niveau minimum de fiabilité acceptable, correspondant à 10^{-4} dans notre application. La durée de vie résiduelle est estimée à 60 ans pour la classe C4.

Ces analyses montrent l'intérêt de l'acquisition des données réelles au moyen de l'application des différentes techniques d'essais (destructifs et non destructifs). Ces données sont mieux exploitées par les approches semi-probabilistes et probabilistes, permettant une estimation fine de l'état de sûreté.

3.3 Assemblage métallique

Un assemblage métallique d'un pont-rail a été considéré sous l'effet de la fatigue et de la corrosion. Il s'agit d'une attache permettant de relier un longeron et une pièce de pont. Contrairement aux deux cas précédents, il existe peu d'informations sur l'historique de l'assemblage. L'étude de la sûreté a permis de comparer différentes approches :

- la méthodologie déterministe basée sur le facteur de marge, permettant de comparer la contrainte appliquée à la valeur admissible ;
- la méthodologie qualitative basée sur le classement, permettant de définir les conditions d'état de la structure et l'indice de santé des composants ;
- la méthodologie semi-probabiliste basée sur le calcul des facteurs de marge en utilisant les coefficients partiels de sécurité, la vérification de l'assemblage est effectuée selon l'Eurocode 3 partie 1.8 ;
- la méthodologie basée sur la criticité, selon l'approche qualitative permettant de spécifier le degré de criticité de l'ouvrage ;
- la méthodologie fiabiliste basée sur l'estimation de la probabilité de défaillance associée à une ou plusieurs fonctions d'états limites.

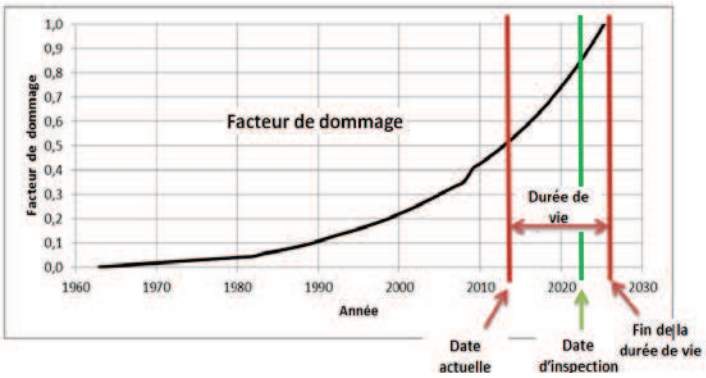

Figure 7. Pont métallique et évolution du facteur de dommage

L'approche déterministe consiste à comparer la contrainte maximale observée à celle de la résistance du matériau. Le facteur de marge est obtenu par le rapport des deux grandeurs : résistance du matériau et contrainte appliquée. Lorsque les charges maximales sont appliquées, le facteur de marge obtenu est de 3,92 pour les rivets en traction et de 1,14 pour les rivets en cisaillement. L'analyse déterministe permet de valider l'assemblage et d'estimer la durée de vie résiduelle à 16 ans, étant donné que la profondeur de corrosion observée est inférieure à 3 mm.

L'application de la méthode de classement permet de définir les niveaux de dégradation et les indices de santé des éléments et de la structure. Cette méthode aboutit à des conditions d'état « Médiocres » pour la superstructure, « Satisfaisantes » pour la substructure et « bonnes » pour le tablier. L'ouvrage doit donc être réparé, mais sans que cela ne constitue une urgence. Néanmoins, cette méthode ne permet pas d'indiquer une durée de vie résiduelle, à moins de disposer des matrices de transition, ce qui n'est pas le cas dans notre étude.

La justification selon l'Eurocode 3 permet de vérifier les différents modes de défaillance de l'assemblage. Les critères d'acceptation sont évalués pour les chargements de type SNCF et LM71, avec les hypothèses d'une poutre continue ou isolée. L'assemblage est justifié pour l'ensemble des cas, sauf celui d'une poutre continue avec le chargement de l'Eurocode. La considération de la corrosion diminue les facteurs de marge et rend l'assemblage acceptable seulement pour l'hypothèse isostatique avec le chargement de la SNCF.

La méthodologie basée sur la criticité est appliquée selon l'approche qualitative. Avec des probabilités faibles et des conséquences très élevées, le risque obtenu est plutôt élevé. En admettant une corrosion de classe C5, la durée de vie résiduelle est estimée à 11 ans, avec une prochaine inspection à planifier au plus tard à 9 ans. Il est remarqué que ce résultat est proche de celui de l'analyse déterministe, ce qui semble cohérent, étant donné que la base de calcul dans les méthodes basées sur la criticité est aussi déterministe.

Le calcul fiabiliste est réalisé en adoptant des modèles probabilistes des variables de chargement et de résistance, en cohérence avec la pratique de l'ingénieur et avec les valeurs caractéristiques indiquées par les règlements. Lorsque

l'assemblage est considérée rigide, la sûreté de l'assemblage devient inacceptable sous le chargement LM71. La durée de vie résiduelle est estimée à 20 ans, avec une probabilité de défaillance admissible de 10^{-3}.

Pistes d'amélioration des méthodologies actuelles

L'ensemble des méthodologies disponibles offre au gestionnaire des possibilités d'adaptation de la méthode employée en fonction du contexte, des besoins, des informations disponibles et des aspects pratiques. Les méthodes existantes ont le plus souvent été développées dans des contextes industriels très spécifiques, en termes d'objectifs, de contraintes et de culture du secteur d'activité, d'une part, et de sensibilités techniques et de recul scientifique des groupes de travail, d'autre part. Nous observons donc des méthodes très pratiques mais incomplètes et d'autres très complètes mais inutilisables pour les systèmes réels. La règle d'or dans les choix des améliorations à apporter consiste à estimer le gain apporté par des approches plus complexes, par rapport à l'impact sur la décision finale et sur le degré de confiance associé. A titre d'exemple, il est inutile d'appliquer des méthodes complexes lorsque l'incertitude sur les données cache le gain en précision d'évaluation ou lorsque la décision finale reste insensible à l'amélioration de la précision de l'évaluation.

D'une façon générale, les méthodologies doivent être déployées de façon progressive, avec une possibilité d'enrichissement en fonction de la criticité de la structure ou du composant étudiés. Alors que la méthodologie basée sur le classement permet de faire un tri rapide des composants en fonction de leurs conditions d'état, la méthodologie fiabiliste permet l'évaluation précise de la sûreté, au prix d'une modélisation mécanique, physique et statistique complexe, qui peut être intéressante mais qui a aussi ses limites. La méthodologie basée sur la criticité présente un compromis entre ces deux approches. Dans tous les cas, l'approche quantitative doit être privilégiée à l'approche qualitative qui ne permet pas assez de garantir l'argumentation et la robustesse de la décision. Du point de vue pratique, il est indispensable de développer un système informatique pour la gestion de l'actif, pour permettre l'établissement d'un bilan du comportement, la capitalisation des connaissances et l'actualisation dynamique et efficace de l'évaluation de la sûreté.

Les pistes d'amélioration des méthodologies se situent à plusieurs niveaux, dont les plus importantes sont :

- l'élaboration d'une démarche probabiliste garantissant la cohérence entre l'évaluation du risque et l'estimation de la durée de vie résiduelle ;
- l'amélioration de la modélisation du système structural pour tenir compte des interdépendances des composants et des interactions des scénarios de défaillance, ainsi que des relations entre les conséquences associées aux composants ;
- l'amélioration de la robustesse du concept de matrice de criticité, afin de réduire la part arbitraire des choix des classes de probabilités et de conséquences ;
- le développement d'une méthodologie permettant la prise en compte des scénarii rares ou sans historique de dégradation ;
- la standardisation de la modélisation probabiliste de la dégradation pour les phénomènes de dégradation principaux (e.g. fatigue, corrosion, usure, fluage, etc.) et leur interaction ;
- l'amélioration de la modélisation probabiliste des interventions d'inspection et des incertitudes locales et spatiales, en particulier avec les nouvelles techniques de contrôle non destructif, et avec la possibilité de multiplier les moyens de mesure sur le même type de dégradation.

Ainsi, une grande marge de progrès reste possible pour rendre les méthodologies actuelles plus attractives et surtout plus pertinentes lorsqu'il s'agit de prendre des décisions concernant la gestion de la sûreté et l'optimisation du cycle de vie des structures industrielles et de génie civil. La méthodologie idéalement recherchée doit combiner les modèles de décision, les méthodes probabilistes et fiabilistes avancées, les méthodes d'évaluation des conséquences de défaillance, et les modèles de comportement physique et mécanique pour l'évaluation de la résistance résiduelle. Différentes sources d'incertitudes doivent être prises en compte notamment lors du processus de décision, sur les données de défauts repérés lors des inspections, sur les types de matériaux, sur les charges et l'environnement, sur les plans de maintenance et sur les modèles mécaniques et les modèles financiers.

Il est aussi important de rappeler que les objectifs du constructeur ou fabriquant sont différents de ceux de l'exploitant, ce qui peut poser des difficultés de gestion de la durée de vie de la structure elle-même. Si les acteurs sont différents, chacun cherchera à optimiser sa partie en appliquant un transfert des risques sur les autres parties. Par exemple, un concepteur cherchera à optimiser le coût initial, même si les coûts d'inspection et de maintenance sont élevés, ou encore un exploitant pour une concession limitée dans le temps, cherchera à transférer les risques aux successeurs, en réduisant les coûts de maintenance sur sa période d'exploitation, etc. Une bonne gestion des risques doit donc garantir une continuité du suivi et des responsabilités tout au long de la durée de vie de la structure. Nous proposons à ce qu'une méthodologie multi-acteurs soit développée sur une base socio-économique, afin de définir une sorte de « carnet de santé » permettant le transfert des responsabilités, pour une optimisation globale du cycle de vie de la structure. C'est d'autant plus important que les cycles de revente, de changement de propriétaires et de décideurs industriels, régionaux et gouvernementaux, sont de plus en plus courts, conduisant à la perte de vision globale sur le long terme.

Conclusion

Les méthodologies d'évaluation de la sûreté des structures existantes partagent le même esprit dans la prise en compte des dégradations et des conséquences de la défaillance, mais elles s'appuient sur des approches assez différentes, allant des méthodes déterministes et simples à appliquer, aux approches scientifiques avancées nécessitant un niveau de compétence bien particulier. Le choix d'une méthodologie n'est donc pas une affaire triviale, ce qui explique l'existence d'un grand nombre d'approches. Il est toutefois remarqué que les méthodes les plus répandues sont soutenues par des secteurs industriels puissants (e.g. secteur pétroliers ou ouvrages d'art) ; il est par conséquent difficile de distinguer la contribution du secteur d'application dans le contenu technique et scientifique, ainsi que dans la diffusion des méthodologies.

L'identification et l'application des méthodologies scientifiques utilisées dans différents secteurs industriels a permis de dégager les concepts fondamentaux des méthodes de suivi des structures, d'en déterminer le besoin en données, d'évaluer le degré de maîtrise des incertitudes et d'appréhender le niveau global de gestion des risques de défaillance. Ce projet a également permis d'établir des passerelles entre les différentes méthodologies dans le cadre de la gestion de la sûreté et de l'optimisation du cycle de vie des actifs industriels et des structures de génie civil.

4 Remerciements

Les auteurs remercient les entreprises AMETHYSTE, BUTAGAZ, CETIM, EDF, INERIS, RTE et SNCF, pour leur soutien financier du présent projet, et remercient l'IMdR pour la mise en place et l'organisation de cette étude.

5 Références

Aoues Y., Chateauneuf A., Lemosse, D., El-Hami A., 2013. Optimal design under uncertainty of reinforced concrete structures using system reliability approach, International Journal for Uncertainty Quantification, Vol. 3(6), pp. 487-498.
Altenbach Th. J., 1995. A Comparison of Risk Assessment Techniques from Qualitative to Quantitative ASME Pressure and Piping Conference Honolulu, Hawaii, July 23-27.
API 581, 2008. Base Resource Document on Risk Based Inspection, American Petrolium Institute.
Bryla Ph., Parise M., Rémy E., 2012. Estimation de probabilités de rupture en corrosion sous contrainte par application conjointe d'un modèle mécano-fiabiliste et d'un modèle de weibull basé sur le retour d'expérience, Lambda-Mu 18, 21 mai.
Ditlevsen O, Madsen H.O., 1996. Structural Reliability Methods, Wiley Chichester.
Ellingwood, B., 1996. Reliability-Based Condition Assessment and LRFD for Existing Structures. Structural Safety, 18(2): 67-80.
Faddoul R., Soubra A., Raphael W., Chateauneuf A., 2011. Extension of dynamic programming models for management optimization from single structure to multi-structures level. Structure and Infrastructure Engineering, pp.1-16.
ISO 31000, 2009. Risk Management–Principles and Guidelines on Implementation.
JCSS. Probabilistic assessment of existing structures, 2001. The Joint Committee on Structural Safety January, RILEM Publications.
Lannoy A., Procaccia H., 2005. Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel. TEC & DOC, Lavoisier.
Sharaoui Y., Khelif R., Chateauneuf A., 2013. Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 104, pp.76-82.