

PÉRENNITÉ DES STRUCTURES INTERNES D'AÉRORÉFRIGÉRANTS

Thierry YALAMAS, Gilles DEFAUX

PHIMECA

Jean-François DESTREBECQ

LaMI – Clermont Ferrand

Antoine LAUDREN, Benoît CLATOT

EDF CNEPE

RÉSUMÉ

Une méthode est présentée pour l'analyse du processus de vieillissement de structures en béton armé exposées à un risque de corrosion. Le but est d'estimer l'état actuel d'une structure existante afin de prédire sa durée de vie résiduelle et de déterminer les moyens appropriés (inspection, maintenance, réparation...) pour garantir et si nécessaire prolonger son exploitation fiable. La méthode est multiforme : estimation de marges de dimensionnement, prédiction des évolutions des charges, inspection et mesure de flèches, modélisation des pertes de résistance par vieillissement. Elle est illustrée par l'application à l'analyse de structures de dispersion dans un aéroréfrigérant. Le processus de vieillissement est dû à une augmentation progressive des charges, concomitante avec une perte de résistance par corrosion des armatures. Les conclusions concernent la détermination des zones nécessitant une réparation, la proposition de scénarii de dégradation et l'estimation de la durée de vie résiduelle, des recommandations pour une surveillance et une maintenance appropriées de l'ouvrage.

Mots-clés: béton armé – corrosion – entartrage – durée de vie – réparation.

1. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Les structures de dispersion dans les aéroréfrigérants atmosphériques sont constituées de plusieurs centaines de poutres en béton armé. Ces poutres supportent un système complexe de canalisations, d'échangeurs en nid d'abeilles et de collecteurs de gouttes destinés à favoriser l'échange de chaleur avec le flux d'air ascendant. Le mécanisme de vieillissement de ces structures internes présente un double aspect :

- d'une part, les charges supportées par les poutres augmentent au cours du temps dû à un dépôt progressif de tartre sur les échangeurs ;
- d'autre part, les poutres en béton armé sont exposées à un risque de corrosion induit par les conditions d'exploitation (taux élevé d'humidité, température).

Il est donc nécessaire de disposer de méthodes d'analyses pour estimer l'état actuel des structures en exploitation afin de prédire de manière fiable les durées de vie résiduelles et de définir les moyens appropriés (inspection, maintenance, réparation) pour garantir ou prolonger leur durée de vie dans des conditions satisfaisantes.

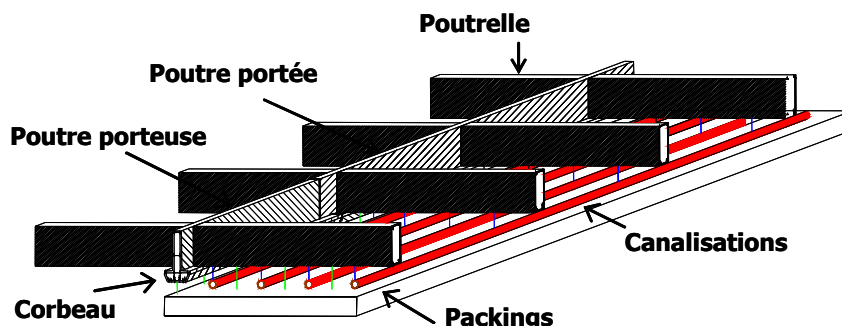


Fig.1 : Constitution des structures internes.

La méthode exposée dans cette étude est appliquée à l'analyse des structures internes en béton armé d'un aéroréfrigérant construit dans les années 80 (figure 1). Elle repose sur l'estimation de la valeur initiale de la marge excédentaire de résistance en chaque point critique de la structure, et sur sa diminution du fait de l'augmentation progressive des charges et de la perte potentielle de résistance par corrosion des armatures. Elle est complétée par des inspections visuelles et des mesures de flèches qui fournissent des indications permettant de classer les différents composants structuraux en fonction de leur état de dégradation.

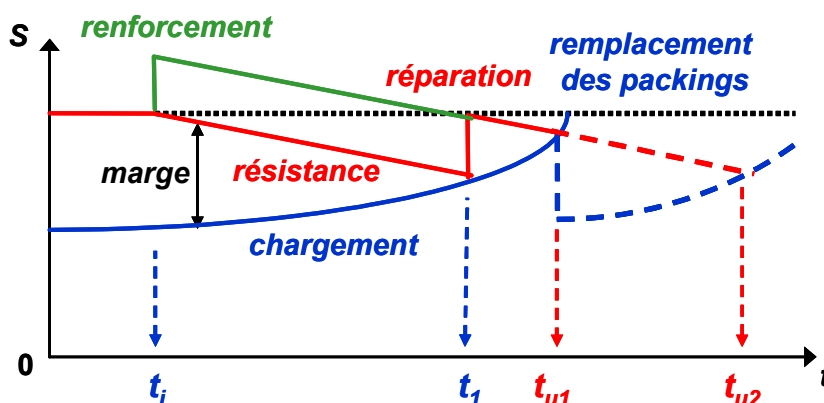


Fig.2 : Scénarii pour l'analyse de la durabilité d'une structure vieillissante.

Les scénarii possibles sont montrés sur la figure 2. La perte de résistance due au processus de dégradation débute après un période d'incubation t_i . Simultanément, le chargement augmente du fait de l'entartrage des échangeurs. Il en résulte une diminution progressive de la marge initiale. Lorsque la marge est épuisée (temps t_1), une réparation devient nécessaire pour restaurer les performances de la structure et prolonger sa durée de vie. Le même résultat peut être atteint en renforçant la structure encore intacte de manière à augmenter sa résistance initiale. Dans tous les cas la durée de vie ne peut dépasser t_{u1} , à moins de nettoyer ou de remplacer les échangeurs pour rétablir le chargement initial afin de prolonger la durée de vie ultime jusqu'à t_{u2} .

2. ASPECTS MÉCANIQUES DE LA DEGRADATION

2.1 Effets de la corrosion

A l'état initial, le pH des bétons courants est proche de 12,5. Dans ce milieu basique, les barres d'armatures se couvrent d'une fine couche d'oxyde très dense qui les protège de la corrosion (passivation). En absence de chlorures, le processus de dégradation résulte de la pénétration lente dans le béton d'enrobage de gaz carbonique présent dans l'air environnant [1]. Ce phénomène présente plusieurs phases (figure 3) :

- la phase d'incubation correspond à la diffusion de gaz carbonique dans le béton. Ce phénomène provoque la carbonatation du béton qui entraîne son acidification.
- lorsque la carbonatation atteint les armatures, l'abaissement du pH provoque la destruction de la couche d'oxyde (dépassivation) et les armatures se trouvent exposées au risque de corrosion.

- la phase de propagation correspond à la corrosion des armatures dans un milieu devenu acide. Elle provoque une lente diminution de la section résistante des barres et s'accompagne de la formation d'une couche de rouille [2].

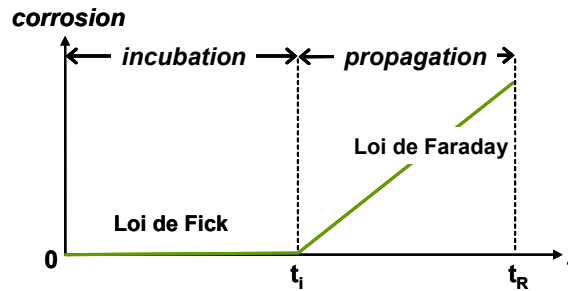


Fig.3 : Phases de dégradation du béton armé par corrosion des armatures.

La diffusion du gaz carbonique dans le réseau poreux du béton peut être modélisée par la loi de Fick. La vitesse de propagation du front de carbonatation dépend des propriétés du béton et de l'humidité relative du milieu ambiant. La durée de la phase d'incubation est donnée avec une précision acceptable par la relation suivante [3] :

$$t_i = \left(\frac{c}{2K} \right)^2, \quad \text{avec } K = \gamma (0,1 + 1,74 HR - 1,79 HR^2) \left(\frac{9,1}{\sqrt{f_{c28}}} - 1,15 \right) \quad (1)$$

où : t_i : temps d'incubation en jours,
 c : enrobage [mm],
 γ : coefficient d'exposition (0,9 en environnement humide),
 HR : humidité relative,
 f_{c28} : résistance caractéristique du béton [MPa].

La corrosion est un phénomène électrochimique qui peut être décrit par la loi de Faraday [4]. Selon cette loi, la vitesse de pénétration est proportionnelle à la densité de courant de corrosion i_{cor} [5]. En l'absence de chlorures, la perte de métal est uniforme sur la périphérie de la barre (corrosion généralisée). L'équation suivante, dérivée de la loi de Faraday, permet de calculer la diminution du diamètre dans le temps [6] :

$$\forall t \geq t_i : \phi(t) = \phi_0 - 0,0233 i_{cor} (t - t_i) \quad (2)$$

avec : ϕ_0 : diamètre initial de la barre [mm]
 $\phi(t)$: diamètre actuel de la barre [mm]
 i_{cor} : courant de corrosion [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
 t : temps [ans]

Le courant de corrosion dépend des conditions d'environnement [7]. Il est inférieur à $0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les atmosphères sèches peu corrosives (vitesse de pénétration inférieure à $2,3 \mu\text{m}/\text{an}$). Il peut dépasser $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pour les atmosphères humides ou corrosives (vitesse de pénétration supérieure à $11,6 \mu\text{m}/\text{an}$).

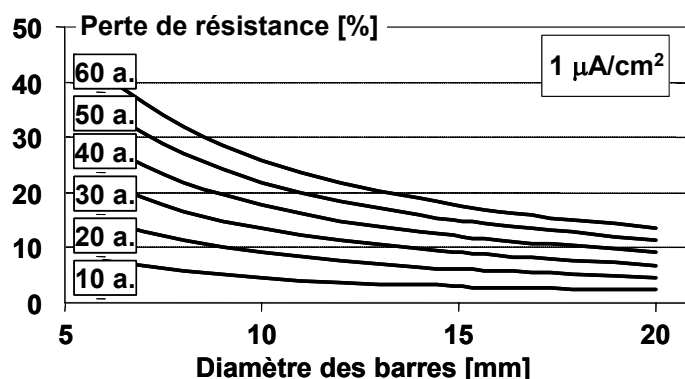


Fig.4 : Perte relative de résistance par corrosion des barres (équation 2).

La diminution de diamètre entraîne une perte de résistance des barres. Cette perte est plus sensible pour les barres de petits diamètres (figure 4). Pour un courant de corrosion égal à $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, la perte après 60 ans est de 13,5% pour les barres de diamètre 20mm ; elle atteint 41% pour les barres de diamètre 6mm.

2.2 Evolution du chargement

Une spécificité de cette structure est l'évolution dans le temps du chargement qui lui est appliqué. En effet, lorsque l'aéroréfrigérant est en fonctionnement, un dépôt de tartre se forme sur les échangeurs, entraînant ainsi une surcharge progressive du réseau de poutres et de poutrelles. On ne peut donc espérer obtenir une prévision fiable de la durée de vie de l'ouvrage sans modéliser l'évolution de la surcharge en tartre sur les échangeurs.

Il convient de noter que l'évolution de la charge de tartre dans le temps n'est pas uniforme sur l'ensemble de l'aéroréfrigérant. En effet, la zone centrale de l'aéroréfrigérant n'est pas utilisée durant les périodes hivernales et sa charge en tartre augmente donc moins rapidement. De plus les conditions d'échange ne sont pas identiques en chaque point et à chaque instant, ce qui confère un caractère aléatoire à l'évolution de la charge en tartre.

Les échangeurs ont été pesés à plusieurs reprises et en différents endroits de l'aéroréfrigérant depuis le début de l'exploitation de l'ouvrage. Il est donc possible de modéliser l'évolution constatée du chargement en tartre. On observe l'existence de deux phases : une phase « d'initiation » durant laquelle la charge en tartre évolue très lentement suivie d'une seconde phase où l'entartrage s'avère de plus en plus rapide.

Il apparaît qu'un modèle de type Arrhenius permet d'obtenir une estimation assez précise de l'évolution de la charge de tartre. Pour la détermination des paramètres de la loi, deux zones ont été distinguées : la zone périphérique qui fonctionne en permanence et la zone centrale qui est arrêtée en période de gel. Pour chaque zone, deux lois ont été déterminées, avec pour chacune deux durées distinctes pour la phase d'initiation : une loi moyenne qui correspond à la moyenne des valeurs mesurées pour la charge en tartre, et une loi « pessimiste » qui correspond à la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 75%.

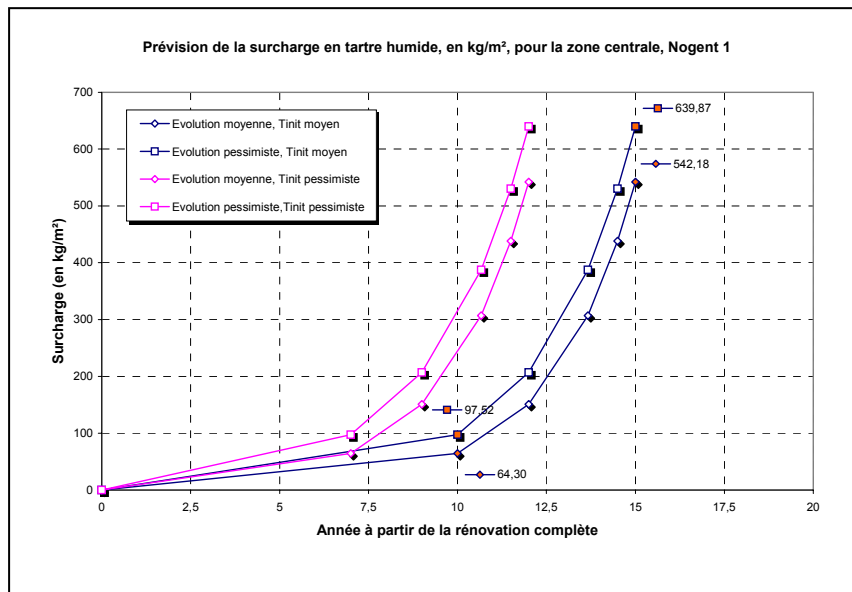


Fig. 5 : Prévision de l'évolution de la charge en tartre pour l'ouvrage étudié.

3. DÉTERMINATION DES MARGES INITIALES

La première étape de l'analyse consiste à déterminer les marges théoriques initiales pour la structure non dégradée. On calcule d'abord la sollicitation initiale à partir des valeurs nominales des charges supportées par la structure : poids propre, poids des équipements, charges d'exploitation (eau, glace). On calcule ensuite la résistance théorique de chaque élément sur la base de sa géométrie et de sa constitution précise, ainsi que des valeurs nominales des résistances. Les calculs sont effectués en tenant compte des coefficients partiels de sécurité pour les résistances d'une part, et pour les charges d'autre part. De cette manière, on intègre les « marges de dimensionnement » exigées par les règlements de calcul.

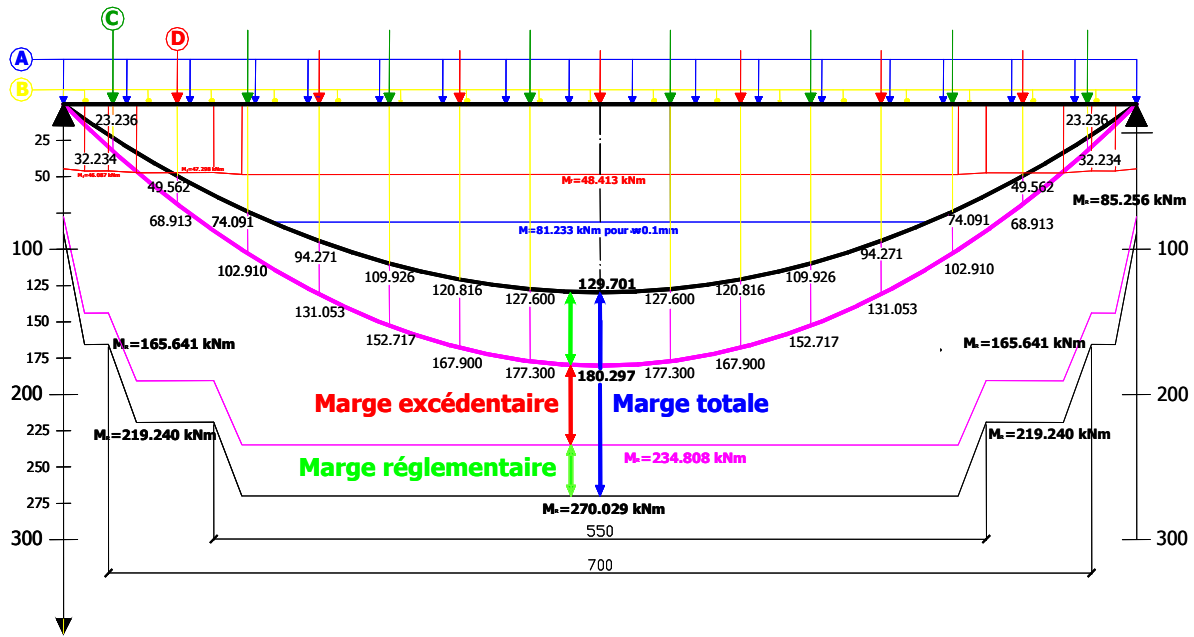


Fig. 6 : Evaluation des marges initiales de flexion pour une poutre secondaire.

Le principe du calcul est présenté sur la figure 6 dans le cas de la flexion d'une poutre secondaire. Le chargement est constitué du poids propre de la poutrelle (A) et des séparateurs de gouttes (B), des charges ponctuelles apportées par les tuyaux (C) et par les attaches des échangeurs (D). La résistance en flexion de la poutre est calculée de manière précise en tenant compte des arrêts des barres et des zones d'ancrage.

La section critique correspond à la plus petite distance (ie. « marge excédentaire » sur la figure 6) entre le diagramme sollicitant majoré par les coefficients de sécurité sur les charges et le diagramme résistant minoré par les coefficients de sécurité sur les résistances. En général, cette distance n'est pas nulle. Elle résulte du fait que la structure réalisée excède généralement légèrement les exigences réglementaires de dimensionnement et que la charge de tarte n'est pas prise en compte dans ce calcul.

Ce travail préliminaire est effectué pour tous les modes possibles de sollicitation (flexion, cisaillement...) des différentes parties (travées, appuis, corbeaux, suspentes...) de chaque élément de la structure. Il permet de déterminer les sections les plus critiques pour l'ensemble de la structure. On obtient ainsi une indication sur les zones les plus « sensibles » pour lesquelles l'inspection visuelle devra être particulièrement soignée.

Dans un second temps, on simule l'effet du vieillissement pour l'ensemble de la structure. Pour cela, on calcule l'évolution des sollicitations au cours du temps en appliquant la loi d'augmentation des charges décrite au paragraphe précédent. Simultanément, on évalue les pertes de résistance des sections de la structure en appliquant la loi de réduction des sections due à la corrosion des aciers. La comparaison de ces grandeurs au cours du temps permet d'analyser la diminution des marges excédentaires pour l'ensemble de la structure. La durée de vie d'un élément correspond au temps nécessaire pour que sa marge excédentaire devienne égale à zéro dans l'une quelconque de ses sections.

4. INSPECTIONS

Une approche multi-symptômes a été retenue pour caractériser l'état actuel de la structure : inspection visuelle de l'ensemble des éléments à la recherche d'indices précis de dégradation, essais mécaniques d'éléments déposés et utilisation des mesures de flèches in situ comme indices de comportement global. L'objectif de ces inspections est de caractériser l'état actuel de la structure le plus précisément possible afin de décider des opérations de maintenance à court terme et de disposer d'informations précises pour sa modélisation à long terme.

4.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle est basée sur la recherche d'indices indiquant des désordres potentiels : corrosion des barres, chargement excessif de la structure, fonctionnement mécanique « inadéquat » de la structure (e.g. existence d'efforts excessifs aux appuis).

L'inspection visuelle a été effectuée pour chacun des 600 éléments de la poutraison sur la base de la grille d'indices ainsi établie. L'inspection visuelle a permis de valider le fait que la corrosion des aciers n'est pas dans une phase active : pas de trace de rouille, pas de fissures de corrosion... L'éventualité d'un cisaillement des appuis a également pu être écartée.

Finalement, il ressort de ces inspections que les deux mécanismes de dégradation qui doivent être retenus sont :

- un possible processus de corrosion encore en phase d'incubation ;
- une détérioration de la structure résultant de surcharges excessives de tartre.

4.2 Essais de poutrelles déposées

Trois poutrelles ont été déposées et testées en flexion jusqu'à rupture. Les résultats d'essais sont utilisés pour caler les paramètres matériaux. Les valeurs expérimentales sont comparées aux valeurs issues des calculs de dimensionnement dans le tableau 1. On observe que les données utilisées pour le dimensionnement conduisent à sous-estimer le moment plastique et à surestimer les flèches. Ces résultats sont pris en compte pour l'analyse des flèches mesurées (voir §4.3).

	Moment (kN.m)			Flèche élastique	
	Données	Essais		Données (mm)	Essais (mm)
Plastification	91	111	Moment (kN.m)		
Ultime	---	115	111	54,2	22,8

Tableau 1 : Evaluation du moment de plastification et de la flèche des poutres testées.

4.3 Mesure et analyse des flèches

Deux mesures de flèches sont effectuées pour l'ensemble des poutres. La première (phase 1) est effectuée « en charge », c'est-à-dire avec l'ensemble des échangeurs encore suspendus. Il est à noter que ceux-ci étaient partiellement égouttés et que les flèches en service étaient donc probablement légèrement supérieures aux valeurs mesurées. La deuxième mesure (phase 2) est effectuée après dépose des échangeurs. Pour certaines poutrelles, il est observé une forte diminution de la flèche après déchargement.

La poutraison est constituée majoritairement de poutrelles B1 ou B2. Compte tenu de cet ensemble de poutrelles identiques, les flèches mesurées peuvent être directement comparées et statistiquement analysées. La valeur moyenne f_{moyen} des flèches pour la phase 1 vaut 31,43 mm ce qui, ramené à la portée L, donne $f_{\text{moyen}} / L = 4.10^{-3}$. La figure 7 présente la répartition des flèches mesurées pour cet ensemble de poutrelles.

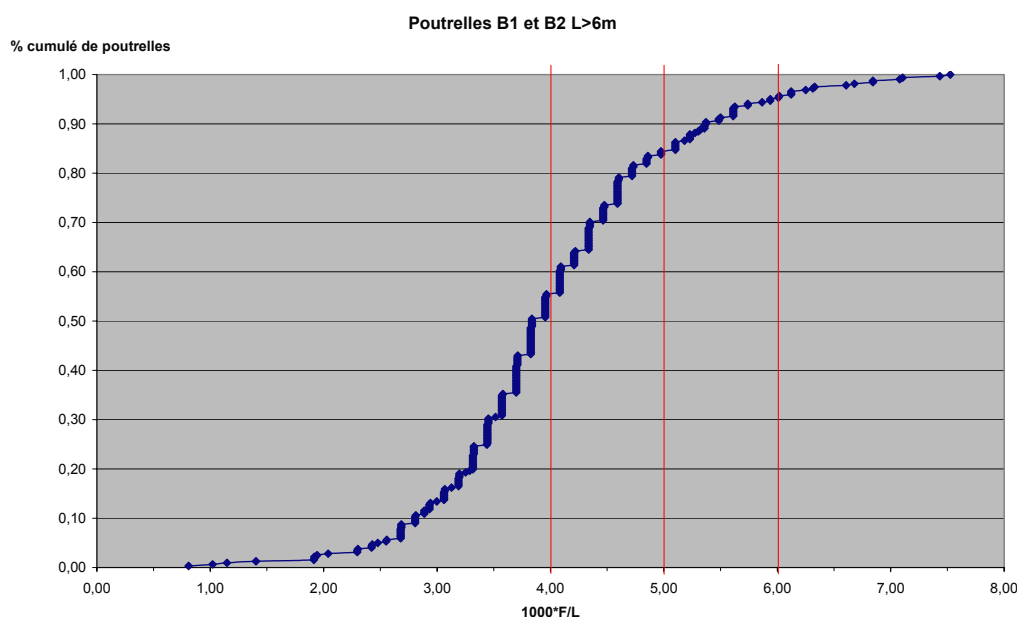


Fig.7 : Fonction de répartition des flèches.

A partir de cette analyse statistique, les poutrelles peuvent être réparties en quatre catégories susceptibles de fournir une indication sur leur état de dégradation :

- $1000 \cdot F/L < 4$: ces éléments peuvent être considérés en bon état (catégorie 4) ;
- $4 < 1000 \cdot F/L < 6$: ces éléments sont dans un état intermédiaire. On distingue deux catégories pour affiner l'évaluation de l'état des poutrelles :
 - $4 < 1000 \cdot F/L < 5$ – soit l'intervalle entre le fractile 50% et le fractile 85% (catégorie 3) ;
 - $5 < 1000 \cdot F/L < 6$ – soit l'intervalle entre le fractile 85% et le fractile 95% (catégorie 2) ;
- $1000 \cdot F/L > 6$. Cette catégorie correspond au fractile 95% pour les poutrelles B1 et B2 (catégorie 1). Ces éléments présentent un état de déformation critique, confirmé par l'observation de fissures ouvertes sur la majorité de ces éléments.

Une analyse plus fine s'avère nécessaire pour prendre en compte le chargement effectif appliqué sur la poutraison. Les résultats des essais présentés au §4.2 sont utilisés pour corréler les flèches aux charges mesurées. A partir de cette analyse, il est possible d'estimer la part de flèche due au fluage. Pour cela, une valeur théorique de la flèche de fluage est calculée pour une charge de tarte sec égale à 45 kg/m² (ordre de grandeur de la charge en tarte sec constatée en 2002, i.e. avant la forte progression de l'entartrage). Les valeurs calculées sont comparées aux flèches mesurées sur la figure 8 en fonction de la charge de tarte. Il ressort de cette comparaison une bonne adéquation entre la courbe des flèches attendues et les flèches mesurées en phase 1.

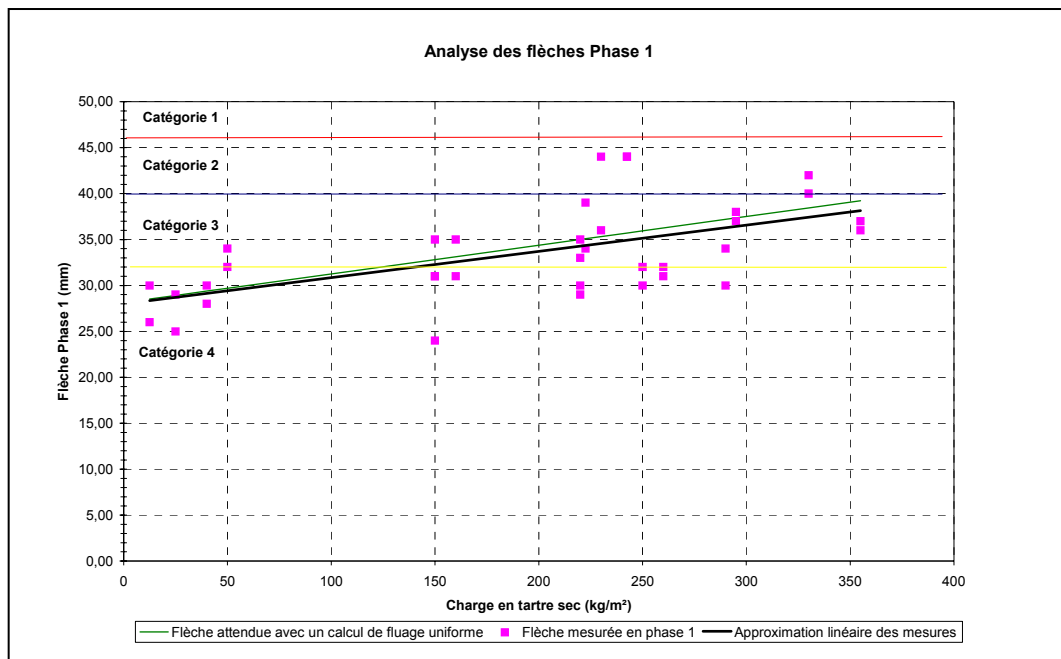


Figure 8 : Analyse des flèches en phase 1.

Sur cette figure, les quatre catégories déduites de l'analyse statistique sont également indiquées. Il ressort que les poutrelles de catégorie 1 présentent manifestement des flèches excessives révélatrices d'un endommagement significatif. Pour les poutrelles de catégorie 2, celles de la zone centrale présentent également une flèche excessive au regard de leur chargement (100 kg/m² de tarte sec en moyenne). En partie périphérique, du fait de l'imprécision des mesures (illustrée par la dispersion des résultats), il est plus difficile de trancher. Il semble toutefois raisonnable de les considérer également endommagées.

Au final, l'excès de chargement subi par la structure semble être la cause principale de sa dégradation. La conséquence est une flexion excessive des poutres et poutrelles avec pour corollaires l'apparition de flèches importantes et d'une fissuration excessive pour certains éléments.

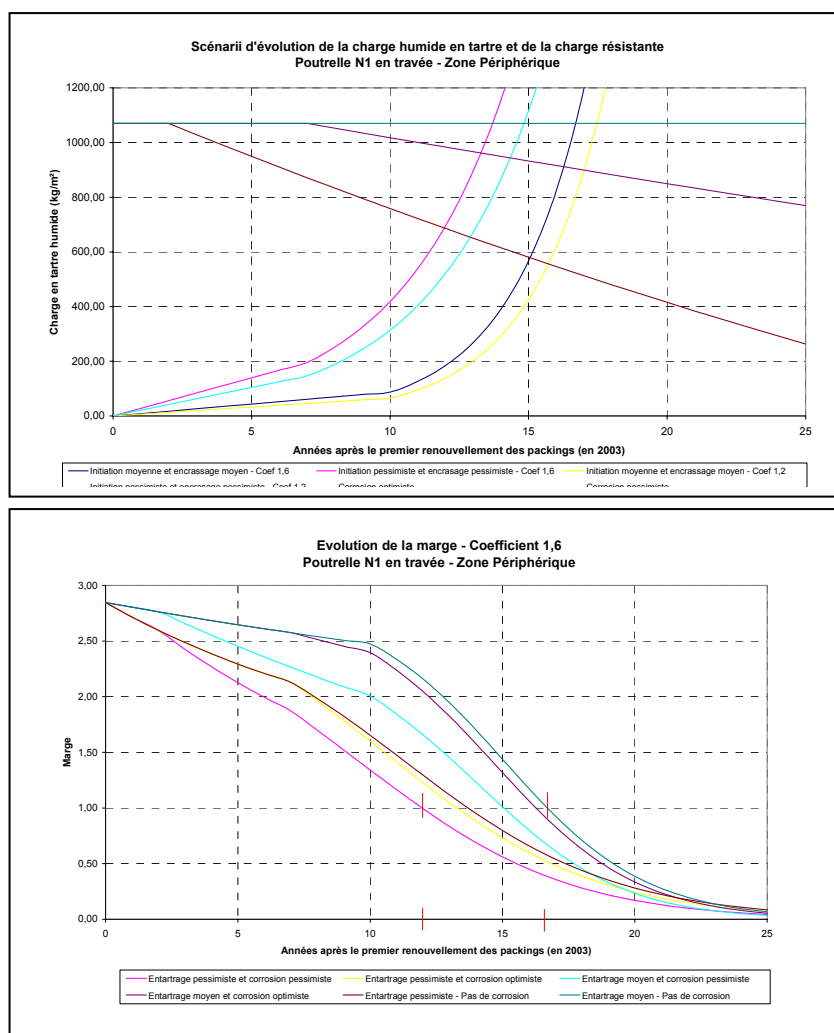
5. MAINTENANCE ET DUREE DE VIE

L'objectif final de l'étude est de permettre au gestionnaire de l'ouvrage, ici Electricité de France, de faire les meilleurs choix possibles en terme de maintenance/réparation. Pour cela, divers scénarii sont envisagés pour l'évolution du chargement d'une part et de la résistance des éléments d'autre part. Ces scénarii permettent une estimation réaliste de l'évolution de la marge excédentaire pour chaque élément. Les opérations de maintenance peuvent être envisagées selon deux directions complémentaires :

- une diminution des charges par le renouvellement ou le décrassage des échangeurs ;
- une augmentation de la résistance de certains (ou tous) éléments par renforcement ou remplacement.

En d'autres termes, le gestionnaire de l'ouvrage peut choisir entre deux stratégies : le renforcement local des sections critiques afin de limiter le nombre d'intervention sur les échangeurs ou le renouvellement (ou décrassage) régulier des échangeurs afin d'éviter le renforcement.

Les figures 9 et 10 illustrent cette analyse dans le cas de la résistance en flexion d'un type de poutre. Selon cette analyse, la durée de vie résiduelle après remplacement des échangeurs varie de 12 ans (scénario pessimiste) à 17 ans (scénario moyen).



Figures 9 et 10 : Evolution des marges en flexion à mi-portée d'une poutre N1.

Les figures 11 et 12 montrent l'évolution des marges pour une zone d'appui d'une part et une zone en travée d'autre part, dans le cas d'une stratégie de renouvellement régulier des échangeurs tous les 10 ans.

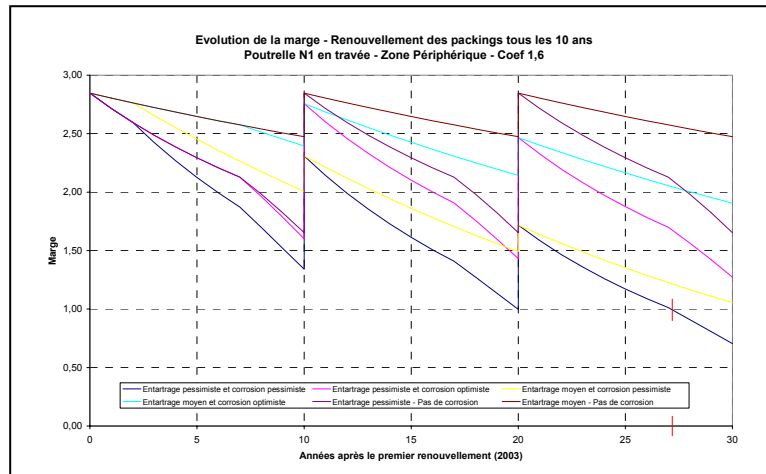


Figure 11 : Evolution de la marge en flexion à mi-portée.

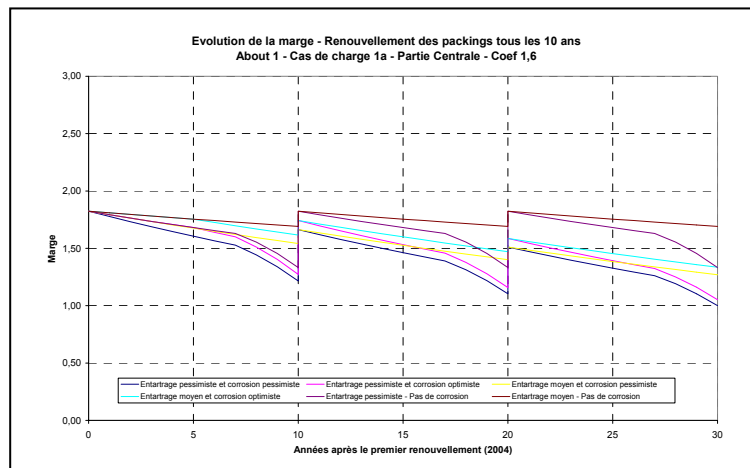


Figure 12 : Evolution de la marge à l'appui.

On observe que la zone la plus « fragile » (marge excédentaire la plus faible) à un instant donné, e.g. l'about de poutrelle, ne le reste pas forcément du fait du processus de vieillissement (corrosion) qui n'est pas homogène au sein de l'élément.

6. CONCLUSIONS

La méthode proposée dans cette étude est basée sur une combinaison de plusieurs approches complémentaires :

- estimation des marges de dimensionnement : la comparaison entre les valeurs nominales et les valeurs actuelles des marges fournit une indication sur la capacité de la structure à remplir ses fonctions au cours du temps ;
- prédiction de l'évolution des charges : l'évolution prévisible des charges de tartre peut être estimée à partir des charges observées durant les années de service écoulées ;
- inspection et mesures de flèches : l'inspection visuelle et la mesure des flèches fournissent des indications précieuses sur les causes essentielles de la dégradation des poutres (corrosion, surcharge) et permettent de les classer en fonction de leur niveau de dégradation ;
- modélisation de la perte de résistance par vieillissement : à partir des conclusions précédentes, il est possible de prévoir la perte de résistance de chaque composant au cours du temps.

L'application de la méthode au cas d'une structure réelle conduit aux conclusions suivantes :

- détermination des zones nécessitant une réparation ;
- proposition de scénarii de vieillissement et estimation de la durée de vie résiduelle ;
- recommandations pour une surveillance et une maintenance appropriées.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Raharinaivo A., Arliguie G., Chaussadent T., Grimaldi G., Pollet V., Taché G. *La corrosion et la protection des aciers dans le béton*, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (Paris), (1998) 167p.
- [2] Chitty W.-J., Dillmann P., L'Hostis V., Lombard C. *Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete : a study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts*. Corrosion science, 47 (6) (2005) 1555-1581.
- [3] AFGC. *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages*, Association Française Génie Civil, Documents Scientifiques et Techniques, (2004) 252p.
- [4] Landolt D. *Corrosion et chimie de surfaces des métaux*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Lausanne), (1997) 552p.
- [5] Ahmad S. *Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction: a review*, Cement & Concrete Composites, 25 (2003) 459-471.
- [6] Sudret B., Defaux G., Pendola M. *Time-variant finite element reliability analysis – application to the durability of cooling towers*, Structural Safety, 27 (2005) 93-112.
- [7] Law D.W., Cairns J., Millard S.G., Bungey J.H. *Measurement of loss of steel from reinforcing bars in concrete using linear polarisation resistance measurements*. NDT&E International, 37 (2004) 381-388.