

ESTIMATION DE LA DUREE DE VIE RESIDUELLE DES MECANISMES DE BARRAGES

Estimating the residual life of dam's mechanisms

Francis BLANC

CETIM, 52 avenue Felix Louat 60300 SENLIS – France

francis.blanc@cetim.fr

MOTS CLEFS

Durée de vie résiduelle, Mécanismes de vannes, engrenages, arbres de transmission

KEY WORDS

Residual life, Mechanisms of gates, gears, drive shaft

RÉSUMÉ

La démarche DVR (Durée de Vie Résiduelle) a pour objectif de statuer sur l'état des mécanismes de transmission permettant d'actionner les équipements mobiles de barrages ou d'écluses (vannes de pertuis, portes d'écluses, ...) pour permettre à l'exploitant de faire les bons choix de maintenance à réaliser : équipements laissés partiellement en l'état ou révision des mécanismes existants ou remplacement par des mécanismes neufs.

Les enjeux de cette démarche sont importants car ils conditionnent le maintien du matériel actuel pour plusieurs années ou le remplacement par du matériel neuf plus coûteux avec une architecture différente et de nouveaux protocoles de maintenance à mettre en place.

La démarche consiste en trois étapes principales :

1. L'analyse de l'historique d'exploitation de l'installation et des mécanismes associés

Cette étape consiste en une analyse documentaire du dossier des mécanismes du barrage afin d'y recueillir tous les éléments nécessaires à la prise en compte de la conception, du dimensionnement, des événements survenus au cours de l'exploitation : plans, notes de calcul, historique, évolutions, maintenances, réparations, incidents... Ces éléments sont des données d'entrée importantes pour la précision de l'évaluation finale.

2. L'expertise sur site des cinématiques des mécanismes et la mesure des conditions de fonctionnement

L'expertise sur site des composants majeurs qui constituent les mécanismes permet d'apporter un diagnostic approfondi et étayé sur l'état de santé de l'installation : contrôles visuels et endoscopiques, prise d'empreintes pour analyse morphologique en laboratoire, contrôles métrologiques, mesures d'usures et de jeux, mesures vibratoires, contrôles non destructifs, mesures de consommation, d'efforts et de couples... Cette expertise, au-delà du simple diagnostic, permet d'établir des actions correctives aux dérives ou anomalies éventuellement constatées.

3. La modélisation des mécanismes puis le calcul de durée de vie résiduelle avec la prise en compte de l'historique, des conditions réelles de fonctionnement et de l'état des mécanismes

Cette dernière étape a pour objectif de calculer la durée de vie initiale et de la comparer à la durée de vie recalculée avec la prise en compte des informations capitalisées et des résultats de l'expertise des mécanismes.

L'ensemble de ces travaux permet d'estimer une durée de vie résiduelle, définie en nombre d'années de fonctionnement restant.

Dans cet article, pour illustrer la démarche, nous avons pris pour exemple les mécanismes de manœuvre des portes aval des sas des écluses du Rhin exploités par EDF Hydro.

ABSTRACT

The aim of the RLt (Remaining Lifetime) approach is to assess the condition of the transmission mechanisms used to operate the mobile equipment in dams and locks (sluice gates, lock gates, etc.), so that the operator can select the right maintenance choices: equipment left partially as is, overhaul of existing mechanisms or replacement by new mechanisms.

The issues involved in this approach are significant, as they determine whether the current equipment is maintained for several years or replaced by new, more costly equipment with a different architecture and new maintenance protocols to be put in place.

The approach consists of three main stages:

1. Analysis of the facility's operating history and associated mechanisms

This step consists of a documentary review of the dam mechanism file in order to collect all the data needed to take into account the design, rating and events that have occurred during operation: drawings, calculation notes, history, upgrades, maintenance, repairs, incidents, etc. These items are important input data for the accuracy of the final assessment.

2. Special assessment of mechanism kinematics and measurement of operating conditions

On-site inspection of the major components that make up the mechanisms provides an accurate and substantiated diagnosis of the state of health of the facility: visual and endoscopic inspections, taking replicas for morphological analysis in the laboratory, metrological controls, measurements of wear and clearances, vibration measurements, non-destructive tests, measurements of power consumption, forces and torques, etc. This inspection, which goes beyond simple diagnosis, enables corrective action to be taken in the event of any deviations or any anomalies observed.

3. Modelling the mechanisms and then calculating the remaining lifetime, considering the history, actual operating conditions, and the state of the mechanisms

The aim of this final step is to calculate the initial lifetime and compare it with the recalculated lifetime, considering the capitalised data and the results of the expert assessment of the mechanisms.

Taken together, this work allows us to estimate a remaining lifetime, defined in terms of the number of years of operation left.

In this article, to illustrate the approach, we have used the example of the mechanisms that operate the lock gates on the Rhine operated by EDF Hydro.

1. CONTEXTE ET BUT DES TRAVAUX

EDF a eu besoin d'approfondir la connaissance précise de l'état des mécanismes de manœuvre des portes aval des sas des écluses du Rhin encore d'origine. EDF a sollicité le CETIM pour les aider à statuer sur l'état de ces mécanismes pour permettre de décider du choix de maintenance à réaliser : révision des mécanismes existants ou modernisation et remplacement par des mécanismes neufs. Les enjeux sont donc importants car ils conditionnent le maintien du matériel actuel pour plusieurs années ou le remplacement par du matériel neuf plus coûteux avec une architecture différente et de nouveaux protocoles de maintenance à mettre en place.

L'étude consiste à réaliser des travaux de diagnostics des mécanismes et des calculs de résistance des engrenages et des arbres.

Les écluses du Rhin ont une conception proche et comportent chacune deux sas en parallèle :

- Un petit sas de largeur 12m.
- Un grand sas de largeur 23 ou 24m.

La Figure 1 montre la vue d'une des écluses du Rhin avec les 2 sas.



Figure 1 : Vue des portes aval de l'écluse de Vogelgrun

Le travail a porté sur cinq écluses du Rhin.

2. METHODOLOGIE DU CETIM

La méthodologie du Cetim est constituée de 6 phases comme indiquées sur la Figure 2. Cette méthodologie, utilisée depuis plus de 20 ans sur différents matériels, est fortement éprouvée. Elle est basée sur plus de 50 ans d'expertise, d'analyse de défaillance et de calculs en matériaux, composants, assemblages, systèmes et machines complètes.

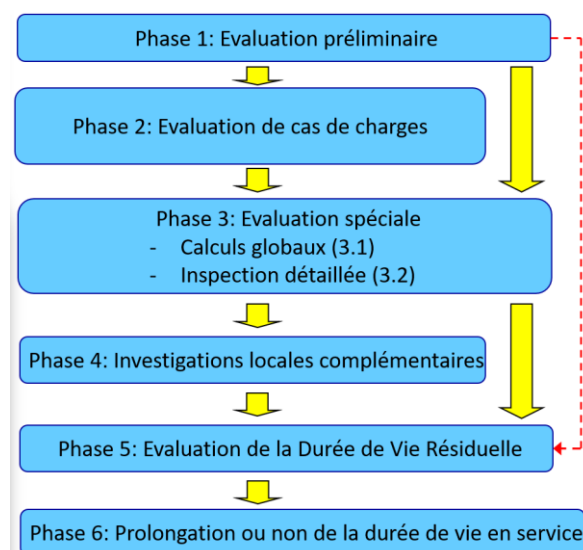


Figure 2 : Logigramme simplifié de la méthode

Pour pouvoir atteindre un niveau de recommandations fiables sur l'extension ou non de la durée d'exploitation et les conditions requises (**phase 6**), il est nécessaire de réaliser au minimum les 3 phases principales :

- **Phase 1** : Evaluation préliminaire
- **Phase 3** : Evaluation spéciale (calculs complets et inspection détaillée)
- **Phase 5** : Evaluation de la Durée de Vie Résiduelle

La fiabilité des résultats de calculs réalisés en **phase 3** est dépendante de la bonne maîtrise du vécu du matériel, c'est-à-dire des conditions de charges réelles subies depuis la première mise en route. Pour renforcer cette fiabilité sur les niveaux de charge à prendre en compte dans les calculs et tout au moins pour le chargement présent, il peut être nécessaire d'activer la phase optionnelle concernant l'évaluation des cas de charge (**phase 2**).

La fiabilité des évaluations de la DVR en **phase 5** est dépendante de la bonne connaissance de l'installation dans les moindres détails. En fonction des résultats de la **phase 3**, des investigations locales complémentaires (**phase 4**) optionnelles sont donc quelques fois nécessaires pour approfondir des zones à risques.

Phase 1 : Evaluation préliminaire

Le CIH (Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF) a réalisé l'évaluation préliminaire des installations (**phase 1**). Elle a consisté en des visites globales des équipements. Conformément aux recommandations, l'existant a été comparé avec les plans de conception, qui avaient été récupérés à l'occasion. Lors de cette phase, le CIH a aussi recueilli les données suivantes auprès des exploitants des écluses :

- Les informations de base concernant l'historique de chaque équipement en particulier celles relatives à leur chargement (nombre de cycles et le spectre des charges) ;
- Le descriptif des opérations de maintenance et des modifications apportées à l'équipement initial ;
- Les avaries notables et immobilisations qui ont pu être reportées dans le carnet de maintenance ;
- Les hypothèses initiales de dimensionnement et les notes de calcul.

La Figure 3 montre un exemple d'aléas rencontré sur une porte d'écluse.



Figure 3 : Exemple d'aléas rencontré sur une porte d'écluse

L'inspection préliminaire peut, dans certains cas, permettre de constater certains problèmes, notamment lorsqu'elle est conduite avec recul par des personnels spécialistes.

A l'issue de cette phase, le CIH a pu rédiger une note technique qui a servi de base à la consultation du diagnostic des mécanismes de manœuvre des portes aval des écluses.

Phase 3 : Evaluation spéciale

Généralités

L'évaluation spéciale (**phase 3**) représente le cœur de la méthode puisque ses deux étapes (calculs précis des composants et inspection détaillée) constituent un diagnostic fouillé de l'état de l'équipement à l'instant présent (« point 0 »). Dans le cas présent, cette évaluation est obligatoirement réalisée par des spécialistes métiers, en l'occurrence par des ingénieurs en mécanique expérimentés dans l'expertise des organes de transmission de puissance mécaniques.

Phase 3.1 : Calculs globaux

Le but étant d'obtenir une grande précision de résultats, des calculs normatifs ont été utilisés et à défaut des vérifications selon les règles de l'art de dimensionnements des composants. Des outils permettant de modéliser des chaînes cinématiques complètes, de la partie tournante de la machine menante à la partie mobile de la porte du sas ont été utilisés pour voir les interactions entre les différents composants comme :

- Les défauts d'alignement entre les arbres ;
- Les dégradations localisées sur les flancs de dents comme les phénomènes de fatigue de contact ou de grippage ;
- L'influence des jeux ou des précharges appliquées sur les paliers.

La Figure 4 montre un exemple de la modélisation de la demi-chaîne cinématique d'un des mécanismes.

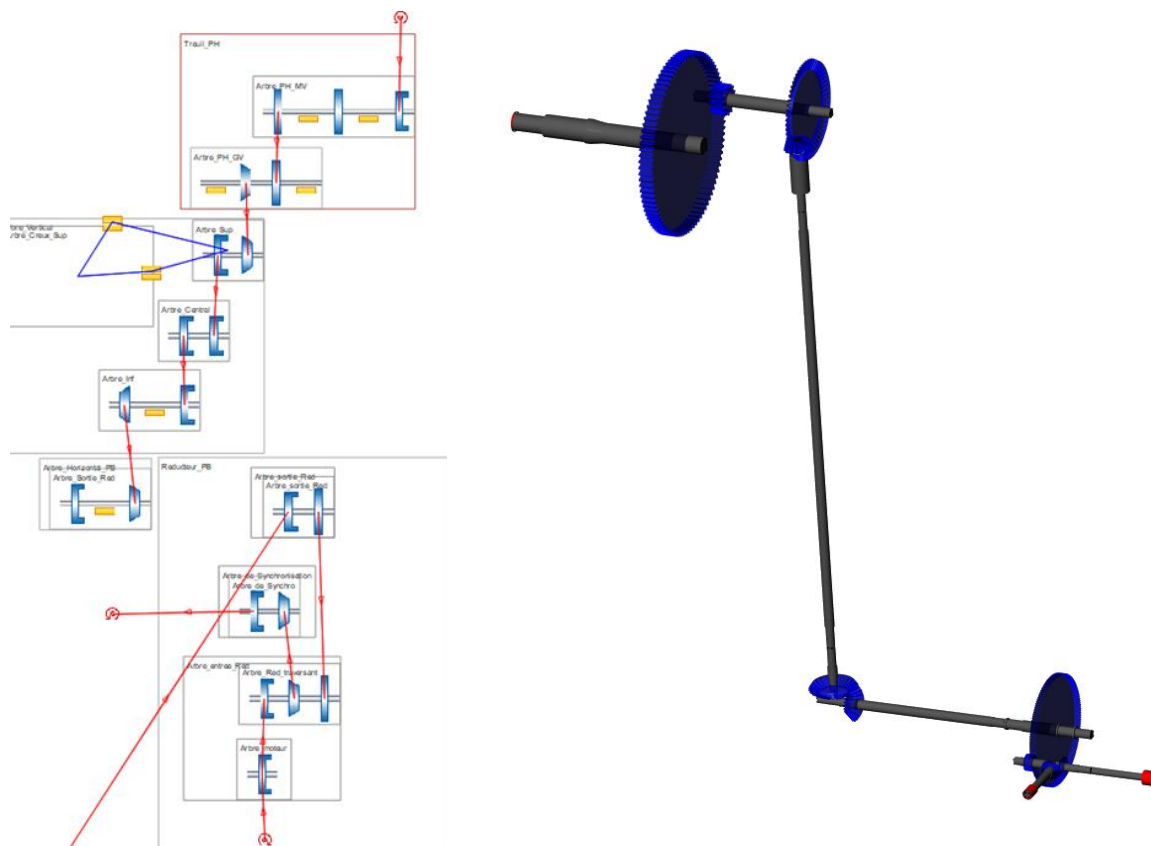


Figure 4 : Vues de la modélisation de la demi-chaîne cinématique d'un des mécanismes

Lors de l'évaluation préliminaire de la **Phase 1**, si des défauts ont été décelés, elles doivent être prises en compte dans la première passe de calculs de la présente **Phase 3.1**.

De la même façon, ces calculs font l'objet d'une itération à l'issue de l'inspection détaillée de la **Phase 3.2**.

Pour statuer sur le niveau de confiance de la sécurité théorique en termes de durée de vie des mécanismes, nous avons établi des critères d'acceptabilités, avec des notations facilement compréhensibles pour rendre les résultats plus assimilables et comparables entre eux.

Calculs de capacité de charge			
Emoticons	Niveau par rapport aux sécurités recommandées	Risque	Type d'action à mener
😊	Conforme	Fonctionnement normal	Examens périodiques conformant au plan de maintenance
😐	Vigilance	Fonctionnement à surveiller	Correction des éventuels désordres rencontrés et surveillance plus soutenue
😞	Danger	Risque d'évolution brutale	Corrections dans la mesure du possible par des réparations ou des remplacement et surveillance accrue

Phase 3.2 : Inspection détaillée

Cette étape qui complète à discrétion la **Phase 1** a principalement pour but d'identifier et de caractériser tous les phénomènes visibles. Pour chaque mécanisme de porte d'écluse, nous avons accompli les travaux suivants :

- Un examen global du mécanisme en fonctionnement (écoute et visuel) ;
- Un diagnostic vibratoire (basé sur l'ISO 10816), pour la partie la plus sensible de la chaîne cinématique aux effets dynamiques (les arbres tournants à des vitesses très lentes ne sont pas soumis à ce type de contrôle) ;
- Une inspection visuelle de tous les composants accessibles des cinématiques d'entraînement : châssis métallique, moteurs, freins, sélecteurs à crabots, arbres de synchronisation, accouplements et paliers, dans la mesure du possible ;
- Une prise d'échantillon des lubrifiants (huiles des réducteurs et des renvois d'angle, et graisses des engrenages ouverts) ;
- En cas de doute sur la qualité de l'huile, une analyse comparative de l'huile en service et des précédentes analyses par rapport à l'état initial.
- L'ouverture des trappes de visite et le nettoyage de secteurs de dentures à la demande du CETIM, aidée par une entreprise extérieure ;
- L'examen des réducteurs fermés à engrenages et des renvois d'angle ;
- L'examen visuel de toutes les dentures d'engrenage ouverts ;
- La mesure des jeux de fonctionnement des engrenages (jeu de battement et/ou de vide à fond de dents) à l'aide de comparateurs, de jeu de lame ou de fil d'étain/plomb ; dans le but de vérifier la géométrie d'engrènement (respect des entraxes, du parallélisme...)
- La mesure d'épaisseurs de denture au moyen d'un pied à module, d'un palmer à plateau ou d'un pied à coulisse (côtes sur K dents) afin de relever les épaisseurs de dents, dans le but de vérifier la géométrie et de quantifier une éventuelle usure prononcée ou anormale ;
- Le contrôle non destructif si nécessaire des zones dégradées ou des zones suspectes par magnétoscopie ou ressuage ;
- La prise d'empreintes de certaines zones de flancs des dentures pour un examen plus approfondi à la loupe binoculaire ou au microscope, dans le but de caractériser les éventuelles dégradations ;
- Les mesures de dureté au moyen d'un duromètre portable, permettant d'avoir une indication des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés et d'un éventuel phénomène d'écrouissage ;
- Les mesures des jeux de fonctionnement des paliers à l'aide de comparateurs ou de jeu de lame et avec des palans, des élingues ou des pieds de biche, dans le but de quantifier le niveau d'usure ;
- Les mesures des jeux de battement des accouplements à l'aide de comparateurs ou de jeu de lame, dans le but de quantifier le niveau de matage ou d'usure.

Sur la base de l'évaluation préliminaire de la **Phase 1** et en s'appuyant sur une première passe de calculs de la **Phase 3.1** s'ils sont disponibles à la date de l'inspection, une recherche de phénomènes d'endommagement ciblée et une expertise des modes de détérioration sont réalisés, notamment pour mettre en évidence les phénomènes suivants :

- Des phénomènes de fissuration par fatigue au niveau des zones de concentrations de contraintes, décelées lors des calculs (**Phase 3.1**), par exemple en pied de dents des engrenages ;
- Des phénomènes de déformation des flancs de dents provoqués par des mauvais fonctionnement, des réglages incorrects ou des passages de corps étrangers ;
- Des traces de choc pouvant conduire à provoquer des fragilisations ;
- Des phénomènes de corrosion, pouvant être source de baisse des caractéristiques en fatigue et zone amorce d'autres dégradations.

Les Figure 5 et Figure 6 illustrent des travaux d'inspection détaillée des mécanismes.

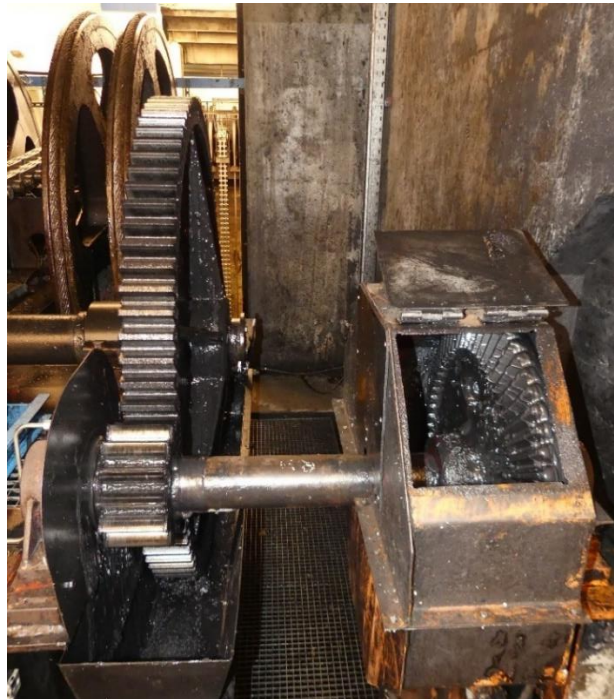


Figure 5 : Vue d'une partie d'une cinématique

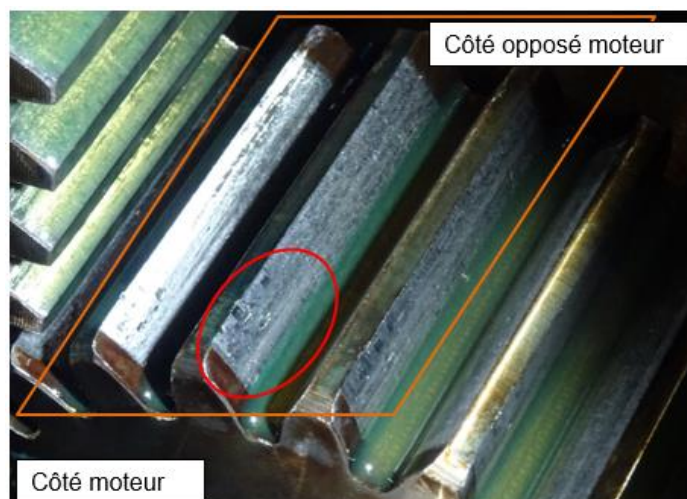


Figure 6 : Vue d'un exemple d'examen morphologique d'une denture d'engrenage

Pour statuer sur l'état physique des mécanismes, nous avons établi des critères d'acceptabilités, avec des notations facilement compréhensibles pour rendre les résultats plus assimilables et comparables.

Analyses vibratoires			
Emoticons	Niveau par rapport au seuil recommandé	Risque	Type d'action à mener
	Acceptable	Fonctionnement normal	Mesure vibratoire périodique conforme au plan de maintenance
	Vigilance	Fonctionnement à surveiller	Analyse vibratoire nécessaire et surveillance plus soutenue
	Danger	Risque d'endommagement	Arrêt immédiat et reprise après enlèvement du risque et validation

Examens morphologiques (visuels, endoscopiques, micrographiques) complétés par des mesures			
Emoticons	Niveau de dégradation	Risque	Type d'action à mener
	Usure courante	Fonctionnement normal	Examen visuel périodique conforme au plan de maintenance
	Peu significative	Fonctionnement non perturbé mais pouvant évoluer	Surveillance renforcée
	Significative	Perturbation possible ou à venir	Corrections des désordres constatés si possible et surveillance plus soutenue
	Très significative	Perturbation avérée risquant d'empirer	Corrections des désordres constatés obligatoire par un remplacement de pièce et surveillance très renforcée en attendant les réparations
	Excessive	Situation grave inacceptable	Arrêt immédiat et reprise après enlèvement du risque et validation

Phase 5 : Evaluation de la DVR

L'évaluation de la DVR consiste, dans la majorité des cas, en une vérification en fatigue.

Cette évaluation doit être effectuée en se basant sur un référentiel reconnu, de préférence une norme ou des codes de calcul en vigueur.

Si la vérification initiale de la durabilité (par exemple de la tenue en fatigue) fut faite avec un référentiel obsolète à la date d'évaluation de la DVR, l'évaluation de la DVR doit être effectuée en se basant soit, sur la version en vigueur de ce référentiel initial, soit sur un autre référentiel reconnu et approprié.

Le code de calcul ou la norme retenue doit contenir une méthode de vérification du dimensionnement en fatigue ou à la déformation progressive reconnue et éprouvée, qui ne soit pas par exemple une simple vérification statique avec des coefficients de sécurité très conservatifs.

Cette évaluation de la DVR cumule l'estimation de l'endommagement passé et celle de l'endommagement à venir. De ce fait, les hypothèses de calcul doivent être scindées en isolant les deux périodes d'activité :

- La période passée au moment de l'évaluation,
- La période à venir.

Lors des visites des **Phases 1** et **3.2**, si des défauts ont été décelés, elles doivent être prises en compte dans les vérifications théoriques de la présente **Phase 5**.

Nota : La découverte de fissures doit être prise en compte pour la période à venir en utilisant les approches par la Mécanique de la rupture. Des méthodes de l'évaluation de la fiabilité, comme dans l'EN 4552, peuvent être requises dans cette phase, en se basant sur des critères d'acceptabilité du risque.

Pour chaque mécanisme de porte d'écluse, nous avons accompli les travaux suivants :

- Etudes fines du dossier technique et réflexion par rapport aux examens et mesures,
- Modélisation des mécanismes sous un logiciel dédié (KISSsys),
- Réalisation des calculs des organes principaux (engrenages, arbres, roulements, accouplements),
- Analyse des résultats.

Les calculs de capacités de charge pour une durée de vie de conception donnée des différents composants équipant les chaînes cinématiques ont été effectués conformément aux normes suivantes :

- La norme ISO 6336 pour les dentures d'engrenages, parties 1 à 6. En particulier, la partie 6 concerne le calcul de la durée de vie de conception sous charge variable,
- Les normes ISO 281 et ISO TS 16281 pour les roulements,
- La norme NF E 22-057 pour les arbres.

Ces normes permettent de calculer des durées de vie de conception pour des composants neufs. La DVR est obtenue par un calcul de cumul d'endommagement prenant en compte les chargements issus de l'historique vus par le composant, cumulés aux chargements futurs demandés.

Phase 6 : Prolongation ou non de la Durée d'exploitation

L'évaluation de la durée de vie résiduelle peut conduire à l'une des deux préconisations suivantes :

- Poursuite de l'exploitation ;
- Arrêt de l'exploitation de l'équipement.

1) Préconisation 1 : Poursuite de l'exploitation

Cette poursuite est conditionnée par l'application d'une ou plusieurs mesures spécifiques, par exemple :

- Des préconisations de réparation ;
- Des préconisations de renforcement ou de reconception locale ;
- Des préconisations additionnelles de maintenance ;
- Des propositions de conditions d'exploitation dégradée ou de déclassement d'ouvrage ;
- La définition ou le réaménagement des méthodes de surveillance des conditions d'exploitation, par instrumentation et /ou monitoring ;
- Une combinaison de plusieurs des mesures listées ci-dessus, intégrant éventuellement des considérations environnementales.

Un composant de chaîne cinématique ne peut généralement pas être renforcé pour étendre sa durée d'exploitation. Une denture ou un palier connaissant des désordres ou étant en fin de vie doivent être réparés ou remplacés par une autre denture ou un autre palier. Le renfort est quelque fois possible

sur la pièce de remplacement par un changement de matériaux ou de traitement de durcissement (exemple avec un acier traité dans la masse qui est remplacé par un acier trempé par induction) ou par l'ajout de corrections de flancs de dents (exemple avec l'ajout d'un bombé longitudinal sur un pignon). Le remplacement de la pièce, même sans renfort de conception ou de matériaux, conduit inéluctablement à la prolongation de la durée d'exploitation d'une cinématique. Néanmoins, l'optimisation permet d'avoir un impact significatif sur la durée de vie de composants sans pour autant coûter beaucoup plus cher.

2) Préconisation 2 : Arrêt de l'exploitation de l'équipement

Cette préconisation peut être proposée, par exemple :

- Si les coûts de réparation et ou de maintenance sont trop élevés ;
- Si le risque lié à la poursuite de l'exploitation est trop sensible ;
- Si les considérations environnementales ne sont pas respectées.

Nota : Une étude d'impact environnemental (comme avec le Guide CEN 4), incluant l'efficacité matière et énergétique, peut être réalisée afin de pouvoir faire une balance entre maintien en service de l'équipement ancien et mise en service d'un nouvel équipement plus respectueux de l'environnement.

L'étude d'impact d'éventuelles réparations ou renforcements sur la durée d'exploitation peut s'appuyer sur la NF EN 45554 qui fournit des méthodes génériques permettant d'évaluer la capacité des produits ou de leurs parties :

- A être réparés (un équipement faisant partie des produits) ;
- A être réutilisés ;
- A être améliorés.

A l'issue de l'évaluation de la DVR, un rapport récapitulatif (cohérent avec la NF EN 45552, article 8), est préparé, qui comprend à minima les informations suivantes :

- Une description des critères de dimensionnement utilisés (**Phase 3.1**) et des hypothèses de calcul (**Phases 1 et 2**) qui dépendent des données d'entrée, fournies par l'exploitant des équipements considérés et qui doivent être référencées distinctement dans le rapport ;
- Une description de l'équipement évalué et les résultats significatifs des inspections (**Phases 1, 3.2 et 4**) ;
- Les résultats de l'évaluation de la DVR, comprenant les calculs effectués (**Phases 3.1 et 5**) et la durée de vie en service prédite ou amendée qui en découle ;
- Les exigences relatives à toute mesure à prendre pour permettre de poursuivre l'exploitation (**Phase 6**),
- L'intervalle de temps jusqu'aux prochaines évaluations, si nécessaire ;
- Le calendrier d'inspections avant la prochaine évaluation, modifié si nécessaire.

3. CONCLUSION

Les travaux réalisés pour EDF ont permis d'émettre d'un avis argumenté sur la durée de vie en bon fonctionnement des composants principaux des chaînes cinématiques des mécanismes de manœuvre des portes aval des sas de cinq écluses du Rhin encore d'origine. L'ensemble des travaux réalisés a permis au CETIM de formuler des recommandations dans l'optique d'un maintien en conditions opérationnelles optimum des installations.

REMERCIEMENTS

Les études de Durée de Vie Résiduelle vont au-delà du simple diagnostic et elles ne sont efficaces que lorsque tous les acteurs sont investis pleinement (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, exploitants, prestataires, sous-traitants...).

Nous tenons donc, dans le cadre de la prestation prise en exemple, de remercier tout particulièrement le CIH et les exploitants des écluses, les responsables mais aussi les équipes qui utilisent et maintiennent ce matériel.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Journée technique du CETIM « Prolongation de Durée de Vie des machines et structures » du 21 juin 2022
- [2] Recommandations applicables aux appareils de levage "anciens" dans les ports – CETMEF – 2003
- [3] Rapport Performances du CETIM : Durée de vie résiduelle (DVR) des structures et équipements : problématique et applications aux appareils de levage – réf : 9Q395 - 2020