

## Recommandations applicables aux appareils de levage "anciens" dans les ports



**Guide**  
**Technique**

## PREFACE

La fiabilité, l'efficacité, l'optimisation de l'usage de l'outillage portuaire sont des facteurs-clés de la compétitivité des ports. Parallèlement, la sécurité d'utilisation de ces outillages, en particulier celle des appareils de levage tels que les portiques et les grues, est un impératif permanent qui s'impose au propriétaire et à l'exploitant de ces outillages.

Le parc des appareils de levage actuellement en exploitation sur les ports maritimes français présente une grande diversité, selon le type des appareils, leur charge, leur fréquence d'utilisation ou leur âge. Malgré les renouvellements en cours, l'âge moyen du parc est encore élevé, de nombreux appareils construits au cours des années soixante-dix, voire antérieurement, restant en exploitation. Il est essentiel que cette ancienneté ou ce vieillissement soient pris en compte dans les procédures de contrôle et dans les conditions d'exploitation ou de mise à la réforme des appareils concernés.

### Réglementation en vigueur

La politique de prévention des risques professionnels repose sur l'évaluation des risques, dont la responsabilité incombe à l'employeur, qui doit notamment rédiger et mettre à jour un document unique sur l'évaluation des risques (article R. 230-1 du code du travail, issu du décret n° 2001-1016 du 5 novembre 2001).

Une condition préalable fondamentale de la sécurité est évidemment de respecter les dispositions du code du travail qui s'y rapportent (livre II, titre III, chapitre III sécurité), notamment ses articles L. 233-5 (obligation de sécurité, de la conception à l'utilisation et à la maintenance des équipements de travail, dont les appareils de levage), R. 233-11 (vérifications générales périodiques, précisées pour le levage des charges par l'arrêté du 9 juin 1993 modifié), ainsi que toutes les dispositions introduites par le décret n° 98-1084 du 2 décembre 1998, les dernières prévues par ce décret étant entrées en vigueur le 5 décembre 2002.

Ainsi, l'article R. 233-13-1 dispose que « Les équipements de travail démontables ou mobiles servant au levage des charges doivent être utilisés de manière à garantir la stabilité de l'équipement de travail durant son emploi dans toutes les conditions prévisibles, compte tenu de la nature des appuis. » De même, l'article R. 233-90 dispose que « Les équipements de travail [...] doivent être maintenus en état de conformité aux règles techniques qui leur étaient respectivement applicables lors de leur mise en service dans l'établissement. », ces règles techniques applicables aux machines neuves étant définies à l'annexe I du livre II du code du travail, mentionnée à l'article R. 233-84.

S'agissant de la fatigue, les règles techniques applicables à la conception des appareils mentionnent en particulier que « Les matériaux utilisés doivent présenter une résistance suffisante [...] en ce qui concerne les phénomènes de fatigue, de vieillissement, de corrosion et d'abrasion. » (règle 1.3.2 de l'annexe I du livre II du code du travail). Elles n'indiquent pas les procédures de vérification à la fatigue à utiliser au cours de la vie de l'appareil.

## **Étude méthodologique pour la maîtrise de l'intégrité des engins de levage**

En complément de ces obligations réglementaires, dont il faut rappeler le caractère impératif, il est utile d'améliorer, de systématiser et d'homogénéiser les procédures de contrôle des appareils de levage, en capitalisant l'expérience des exploitants portuaires et en définissant une méthodologie commune. A cette fin, la direction du Transport Maritime, des Ports et du Littoral (DTMPL) et l'Union des Ports Autonomes et des Chambres de Commerce et d'Industrie Maritimes (UPACCIM), avec l'appui du Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), ont confié à un bureau d'études la réalisation d'un cadre méthodologique pour parvenir à une meilleure maîtrise de l'intégrité des appareils de levage. Cette étude, dite étude MIEL, à laquelle de nombreux ports ont été associés, est désormais terminée et a été diffusée à tous les acteurs concernés. Elle a permis aux ports de capitaliser leur expérience sur l'ensemble du champ que représente l'exploitation des appareils de levage portuaires du point de vue de la maîtrise de leur intégrité, grâce à une approche de nature systémique car il convenait de considérer non pas l'appareil de levage comme un équipement en soi, mais dans l'ensemble des fonctions liées à son exploitation sur un terminal.

## **Méthodologie applicable aux appareils de levage anciens**

Parallèlement à l'étude MIEL et compte tenu de la proportion élevée d'appareils de levage anciens en exploitation dans les ports maritimes, il est également apparu souhaitable de préciser les procédures à leur appliquer de façon spécifique, notamment au regard des effets possibles de l'endommagement par fatigue du métal.

En effet, du point de vue de la fatigue, certains appareils de levage peuvent, en appliquant les règles de calcul de la Fédération Européenne de la Manutention (FEM), voir leur utilisation prolongée au-delà du nombre conventionnel de cycles de charges pour lequel ils ont été dimensionnés, notamment s'ils ont été utilisés de façon moins intensive, en terme de charges levées, que dans le calcul de dimensionnement. Mais cette prolongation ne peut se faire dans le sens de la sécurité que si préalablement un certain nombre de vérifications et de précautions ont été prises, allant au-delà des questions de fatigue, en considérant tous les aspects d'ordre fonctionnel, exploitation, inspection et entretien ayant affecté ces appareils.

De ce fait, une telle prolongation d'utilisation n'est envisageable que s'il peut être démontré que « l'endommagement » de l'appareil, prenant en compte la fatigue du métal et les effets de la corrosion, reste inférieur à l'endommagement maximum admissible considéré lors du dimensionnement initial. Ce peut être le cas, en particulier, si les contraintes effectivement subies par l'appareil ont été moins dommageables du point de vue de la fatigue que celles retenues pour le dimensionnement initial, ou encore si les sections actuelles restent surdimensionnées.

## **Élaboration du guide**

Pour définir la méthodologie de cette vérification, le CETMEF a constitué et animé en 2001 et 2002 un groupe de travail composé d'experts qui a entendu les principaux organismes ayant mis au point les méthodes de vérification des appareils de levage anciens et qui a recueilli les positions de certains représentants des ports responsables de l'outillage.

Ce groupe a terminé ses travaux à la fin 2002. Le présent guide expose en détail la méthodologie qu'il préconise.

## Mise en oeuvre

La mise en œuvre complète de la méthodologie de contrôle décrite dans ce guide, avec l'évaluation spéciale pour les appareils de levage qui le nécessiteraient, peut être un processus important et étalé dans le temps, selon l'état de l'outillage et les procédures de contrôle déjà en vigueur.

Elle peut débuter par l'identification des appareils à examiner en priorité, en appliquant à chaque appareil de levage les quatre critères décrits dans ce guide, afin de :

- 1) recenser tous les appareils de levage ayant atteint l'un des quatre critères de déclenchement de l'évaluation spéciale ;
- 2) effectuer un premier classement indicatif de ces appareils selon le degré de priorité de leur évaluation spéciale, au regard des éléments disponibles, quantitatifs ou qualitatifs : âge, nombre et intensité des cycles de charge subis, défauts, corrosion, signes de fatigue du métal, modification d'usage, etc. ;
- 3) mettre en oeuvre la méthodologie sur les appareils ainsi identifiés, en vérifiant au cas par cas si la poursuite de leur utilisation est possible.

Cette première évaluation indicative pourra conduire, le cas échéant, à modifier les conditions de contrôle (fréquence et intensité accrues) ou d'utilisation (moindre sollicitation) de ces appareils, ou encore à interrompre leur exploitation.

Une amélioration de la sécurité passe sans doute aussi par une généralisation de la base de données Outillage portuaire capitalisant les incidents-accidents des appareils de levage portuaires, dès que l'expérimentation en cours aura été conclue.

\*\*\*\*

Je remercie le CETMEF, son directeur, les experts, les représentants des ports et tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce guide.

Il constitue un outil précieux d'aide à la décision pour évaluer les risques liés à l'utilisation des appareils de levage anciens, dans le cadre plus général de la prévention des risques professionnels, et donc une contribution très utile à l'objectif permanent d'amélioration de la sécurité.

**Didier SIMONNET**



**Directeur du Transport Maritime, des Ports et du Littoral**

# SOMMAIRE

•••

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>GUIDE TECHNIQUE DES RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX APPAREILS DE LEVAGE « ANCIENS » DANS LES PORTS</b> .....	<b>4</b>
I – SITUATION DE LA PROBLEMATIQUE .....	4
II – PORTEE DE LA NORME ISO 12482-1 .....	5
III – UTILISATION DES REGLES DE CALCUL FEM POUR L'EVALUATION SPECIALE D'UN APPAREIL .....	7
1. <i>Faut-il procéder à un nouveau calcul exhaustif de l'appareil tenant compte de la durée d'utilisation prévue après révision générale de l'appareil ?</i> .....	7
2. <i>Faut-il instrumenter l'appareil de levage pour apprécier la réalité des contraintes auxquelles il est soumis ?</i> .....	7
2.1. Instrumentation liée aux charges levées .....	7
2.2. Estimation des écarts de réaction des structures.....	8
3. <i>Vérification à l'aide des règles FEM</i> .....	8
<b>PRINCIPES ET CHOIX POUR LA GRANDE REVISION DES APPAREILS DE LEVAGE « ANCIENS » : RESUME</b> .....	<b>12</b>
<b>LOGIGRAMME DE L'EVALUATION SPECIALE</b> .....	<b>13</b>
<b>COMMENTAIRES DU LOGIGRAMME</b> .....	<b>14</b>
<b>GLOSSAIRE</b> .....	<b>18</b>
<b>EXEMPLES DE CLASSEMENT ET D'EVALUATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE D'UN APPAREIL DE LEVAGE PORTUAIRE</b> .....	<b>19</b>
1 - INTRODUCTION .....	19
2 – EXEMPLES DE CLASSEMENT – EVALUATION D'INDICATEUR DE FATIGUE.....	19
<i>Exemple 1 : portique à conteneurs</i> .....	19
<i>Exemple 2 : portique à benne</i> .....	21
<i>Exemple 3 : grue polyvalente benne / crochet</i> .....	22
<b>ANNEXE 1</b> .....	<b>25</b>
<b>ANNEXE 2</b> .....	<b>26</b>
<b>ANNEXE 3</b> .....	<b>27</b>
<b>ANNEXE 4</b> .....	<b>28</b>
<b>ANNEXE 5</b> .....	<b>29</b>

## INTRODUCTION

Le guide portant recommandations pour les appareils de levage portuaires a été établi dans le contexte décrit par le directeur du transport maritime, des ports et du littoral dans la préface à ce document.

Un groupe d'experts rassemblé autour du CETMEF a d'abord entendu avec attention les intervenants sollicités par les exploitants portuaires pour les aider à définir les précautions particulières à prendre pour les appareils de levage anciens. A la suite de ces auditions, il est parvenu à la conclusion que pour améliorer la situation des appareils de levage anciens, il convenait de se référer à la norme ISO 12 482-1 publiée en 1995 et intitulée « Appareils de levage à charge suspendue - partie 1 - généralités », dans la mesure où il n'a eu connaissance d'aucun travail similaire de portée générale en la matière.

Au delà des questions d'interprétation opérationnelle de la norme, plusieurs questions pratiques se sont posées au groupe :

- la norme ayant été rédigée en des termes très généraux, fallait-il la compléter et aller dans le détail d'une méthode décrite de façon très exhaustive, au risque de choisir une seule méthode ?
- au-delà de la norme, fallait-il prévoir l'instrumentation systématique et la reprise des calculs de dimensionnement initial des appareils ?
- comment éviter enfin de conduire des investigations très lourdes quand elles ne sont visiblement pas nécessaires ?

Devant l'immensité de la tâche et la grande diversité des appareils de levage portuaires, le groupe a établi un ensemble de propositions concrètes, perfectibles, permettant à l'exploitant portuaire d'appliquer la norme sans aller dans le détail pour ne pas privilégier une méthode particulière, ce qui ne le dispense évidemment pas d'appliquer toutes les autres dispositions réglementaires intéressant les appareils de levage.

En substance, il est donc proposé de mener une évaluation spéciale au sens de la dite norme pour les appareils de levage anciens et de le faire dans les conditions suivantes :

1. examiner pour chaque appareil si l'un des quatre critères alternatifs suivants est à considérer :
  - a) le premier d'entre eux se réfère à l'augmentation anormale des rapports de défauts ou à l'observation d'indices révélant une détérioration significative de l'appareil lors des inspections réglementaires annuelles prévues par l'arrêté du 9 juin 1993 ;
  - b) le second se réfère au dépassement d'une durée d'utilisation : fixée à 19 ans pour l'ensemble des appareils, sauf pour les grues mobiles calculées selon les règles FEM de la section V où cette durée est ramenée à 9 ans ;
  - c) le troisième se réfère à un nombre de cycles de levage réalisés dépassant 95 % du nombre conventionnel de cycles utilisé pour le dimensionnement initial de l'appareil ;
  - d) le quatrième se réfère au cas de modification substantielle de son usage.

2. si l'un de ces critères est à considérer, mener une évaluation spéciale grâce au concours d'un bureau d'évaluation indépendant<sup>(\*)</sup>, selon une procédure définie par celui-ci sauf lorsque le constructeur l'a prédéfinie lui-même.
3. le premier travail du bureau d'évaluation est de prendre connaissance de toutes les données utiles à la fois pour reconstituer la vie de l'appareil, ce qui peut dans certains cas nécessiter de recourir momentanément à l'instrumentation, de dépouiller les données et d'identifier les nœuds les plus sensibles.
4. la seconde étape consiste à examiner si l'appareil nécessite ou non une investigation complète passant par un nouveau calcul de dimensionnement et de vérification à la fatigue des assemblages critiques, ainsi qu'une analyse fondée sur l'appréciation des risques. Le concept d'analyse du type RBI (Risk Based Inspection) favorise les programmes d'inspection, d'essais et de réparation établis sur l'identification des points sensibles, de l'analyse comportementale à diverses sollicitations et de l'évaluation des risques associés. A l'issue de longs débats, le groupe a identifié l'indicateur de fatigue, défini comme le produit du nombre conventionnel de cycles de levage pour lequel l'appareil a été conçu par le coefficient de spectre de charges conventionnel indiqué au départ, comme étant un critère de choix pertinent pour effectuer cette sélection entre investigation complète et investigation allégée, même si ce n'est pas le seul critère puisqu'il ne concerne que la vérification à la fatigue. Ce critère revient simplement à considérer que l'exploitant peut en général s'en remettre au professionnalisme du constructeur tant que cet indicateur demeure en deçà d'une certaine valeur, 90 % en l'occurrence. Il s'agit donc d'une aide à la décision pour l'évaluateur et non d'un critère suffisant en soi pour discriminer entre une investigation complète et une évaluation plus légère. Par mesure de précaution, il a également été demandé d'interrompre l'exploitation de l'appareil tant que l'évaluation spéciale n'était pas achevée, dès lors qu'on entre dans une configuration où l'indicateur de fatigue dépasse 95 % de sa valeur initiale.
5. enfin, le bureau d'évaluation doit consigner dans un rapport argumenté toutes les mesures qu'il préconise à l'exploitant (restaurations, inspections rapprochées, etc.) et indiquer à quel moment se situe la prochaine évaluation spéciale.

Le groupe a bien conscience qu'en posant de tels choix, il n'a fait que clarifier certains aspects de l'application de la norme ISO 12 482-1 tout en laissant nombre d'autres aspects dans l'ombre et qu'il n'a pu que préciser ce qu'il faut attendre de telles évaluations sans en fixer la méthodologie précise. Il pense néanmoins que, pour perfectibles qu'elles soient, celles-ci vont dans le sens d'une meilleure sécurité des professions et des activités portuaires. Le CETMEF attend d'ailleurs toutes les observations utiles afin d'améliorer ce guide dans des versions ultérieures.

**Geoffroy CAUDE**



**Directeur du CETMEF**

---

<sup>(\*)</sup> le choix du bureau d'évaluation pourra être facilité ultérieurement, quand les bureaux intervenant dans les ports auront été accrédités.

## **GUIDE TECHNIQUE DES RECOMMANDATIONS APPLICABLES AUX APPAREILS DE LEVAGE « ANCIENS » DANS LES PORTS**

La Direction du Transport Maritime, des Ports et du Littoral a demandé en 2001 au CETMEF de réfléchir à l'élaboration de recommandations techniques applicables aux appareils de levage anciens. Pour ce faire, le CETMEF a constitué un groupe de travail comprenant MM. DEPALE et LIEURADE du Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques (CETIM), MM. CREMONA et BREVET du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, M. LEBRETON du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen, M. THIMJO, expert indépendant, MM. CAUDE, MARIA et ANDRE du CETMEF. Ce groupe a entendu plusieurs bureaux d'évaluation pour connaître les principales méthodes applicables au problème posé et recueilli l'avis de nombreux responsables des services d'outillage des ports. Il a produit quatre documents : une situation générale de la problématique, un résumé de la méthode proposée, un logigramme détaillé, des commentaires du logigramme, ces trois derniers documents s'adressant davantage aux praticiens des services d'outillage. En outre, un document pratique traitant d'exemples a été proposé par M. DEPALE du CETIM, à l'usage du praticien. L'ensemble de ces documents a été converti en guide technique à la demande de la DTMPL formulée au cours de l'été 2003.

### **I – SITUATION DE LA PROBLEMATIQUE**

Un certain nombre d'accidents ou d'incidents récents ont eu lieu au cours des dernières années dans les ports français. Certains d'entre eux ont affecté des appareils de levage anciens, ce qui a conduit les responsables d'outillage à s'interroger pour savoir s'il existait des recommandations ou une procédure applicable à la poursuite d'exploitation en sécurité des appareils « anciens ». Cette démarche est d'autant plus pertinente qu'elle touche une très forte proportion du parc des appareils de levage bord à quai : plus de 70 % de ce parc dépasse vingt années d'utilisation. Mais elle est sans doute plus difficile à uniformiser que dans d'autres secteurs d'activité industrielle où les équipements relèvent de séries importantes et où la solution retenue consiste à convenir avec le constructeur des équipements d'une procédure de révision générale ou de grande révision de l'équipement. Dans le secteur portuaire en effet, non seulement on a affaire à de petites séries, voire à des appareils sur mesure, mais, de surcroît, la maintenance est souvent réalisée en régie ou sous la conduite des services d'outillage portuaires, si bien que les constructeurs pour des raisons de responsabilité juridique, sont plutôt réticents à proposer des procédures de révision pour des appareils dont ils n'ont pas contrôlé la maintenance.



S'il est exclu de s'intéresser au seul parc d'appareils de levage anciens, et s'il convient de mettre au point des recommandations plus générales<sup>(1)</sup>, en revanche il est important de développer des recommandations spécifiques au parc des appareils de levage portuaires anciens, qui est confronté à de nombreuses causes d'altération ou de vieillissement accéléré : fatigue métallique, pertes d'épaisseur liées à la corrosion, sollicitations accidentelles lors de chocs, sollicitations dynamiques de courte durée, effet de vents exceptionnels, modification progressive de conditions d'utilisation.

Une procédure de révision de ce parc doit donc combiner à la fois plusieurs éléments :

- une analyse rétrospective poussée des conditions réelles d'utilisation des appareils,
- une inspection « clinique » propre à détecter ou à en prévoir les défauts ou les points faibles,
- un entretien avec l'utilisateur pour établir un cahier des charges d'utilisation future et procéder enfin, le cas échéant, à une nouvelle vérification du dimensionnement de l'appareil, tenant compte de son utilisation antérieure et de son utilisation future, avec une attention accrue portée aux questions de fatigue, mais pas uniquement puisque la corrosion ou l'usure peuvent réduire les sections utiles au point d'y accroître les contraintes au-delà de la limite élastique des structures considérées.

Il faut que le rapport d'évaluation établi à l'issue de la révision précise la méthode retenue par le bureau d'évaluation et l'ensemble des conclusions qui en sont tirées pour l'utilisation en sécurité de l'appareil jusqu'à la prochaine évaluation spéciale.

Après avoir pris connaissance des divers textes existants ou en préparation en matière de levage, le groupe de travail a considéré qu'il convenait d'une part de s'appuyer sur la norme ISO 12 482-1 établie en 1995, intitulée « appareils de levage à charge suspendue - surveillance – partie 1 – généralités », d'autre part de faire usage des règles de calcul de la Fédération Européenne de Manutention (FEM), ou plus exactement de s'inspirer des principes de classification et de calcul qui sous-tendent ces règles dans la mesure où il s'agit d'un ensemble de règles conçues pour le dimensionnement initial des structures et non pour la révision après utilisation.

## **II – PORTEE DE LA NORME ISO 12482-1**

La norme ISO 12 482-1 établie en 1995, intitulée « appareils de levage à charge suspendue – surveillance – partie 1 généralités » établit quelques principes qu'il peut être opportun d'utiliser pour formuler des recommandations techniques sur ce sujet. En effet, préparé par le comité technique ISO/TC 96 par l'intermédiaire de son sous-comité SC 5 présidé par Rolf LOVGREN, ce document pose deux principes :

- le premier que tout engin ne peut être conçu pour une durée illimitée et que de ce fait, s'il approche des limites des contraintes de l'utilisation ou des limites de conception pour lequel il a été conçu, il doit faire l'objet d'une procédure d'évaluation spéciale prédéfinie.

- le second principe est qu'en l'absence de critère fixé par le constructeur pour un engin l'évaluation doit être réalisée dans un délai inférieur à 10 ans pour toutes les grues mobiles et à 20 ans pour les autres appareils de levage.

- Cette évaluation spéciale s'impose aussi lorsqu'on constate une augmentation des défauts lors des inspections périodiques ou lorsqu'un problème grave est apparu (par exemple après un accident).

<sup>(1)</sup> elles ont été mises au point sous forme d'un document de portée plus générale établi par les ports et le CETMEF avec l'UPACCIM, intitulé "Maîtrise de l'intégrité des appareils de levage" (MIEL)

La norme fournit donc trois critères pour le déclenchement de la procédure d'évaluation spéciale :

- l'approche des limites des contraintes de conception,
- l'âge de l'appareil,
- l'observation « clinique » d'une augmentation des défauts ou après un problème grave,

A ces trois critères, le groupe de travail propose d'en ajouter ipso facto un quatrième :

- une modification d'usage substantielle (étant entendu que ce critère n'est pas propre aux appareils anciens)<sup>(1)</sup>.

Des quatre critères ainsi proposés le premier est sans doute le plus délicat à établir. En effet, soit cette limite a été définie a priori par le constructeur (mais tout au plus trouve-t-on dans ce cas la situation des engins de série entretenus par le constructeur ou sous son contrôle), soit il faut se référer à la notion de durée d'utilisation, qui se conçoit comme un nombre de cycles de levage accompli par l'appareil au sens défini par les règles FEM, lorsque ce nombre peut être appréhendé.

La question fondamentale qui se pose est donc de savoir si au regard de la norme ISO 12 482-1, l'atteinte ou le dépassement du nombre conventionnel de cycles de levage du calcul initial d'un appareil correspond ou non à l'atteinte ou au dépassement potentiel d'une des limites de contrainte de conception. La norme ne fournit pas de réponse explicite à cette question. En revanche, bien qu'on ne puisse pas affirmer qu'un engin de levage ayant dépassé le nombre conventionnel de cycles de levage pour lequel il a été calculé ait atteint ou dépassé sa limite d'utilisation convenue au sens de la dite norme, il est préférable que tout exploitant s'astreigne à faire procéder à une évaluation spéciale de l'appareil, lorsqu'il approche des limites fixées lors de son dimensionnement initial.

La problématique supposée ici consiste donc à considérer que tout appareil de levage portuaire atteignant une durée de vingt ans (dix ans pour les grues mobiles)<sup>(2)</sup> après sa mise en service, ou une durée d'utilisation exprimée en nombre de cycles équivalente à celle pour laquelle les calculs de dimensionnement initiaux ont été menés doit faire l'objet d'une évaluation spéciale au sens de la norme ISO 12 482-1. Il en va de même lorsque l'appareil présente un dysfonctionnement grave, a subi un accident grave, ou lorsque la fréquence des défauts détectés lors des inspections périodiques s'accroît fortement. Il en va aussi de même si des modifications d'utilisation substantielles viennent à être introduites.

A ce stade il convient de préciser que si la norme ISO 12 482-1 s'applique aussi aux éléments de l'appareil de levage lui-même qui peuvent approcher leurs limites d'utilisation avant la charpente de l'appareil considérée dans son ensemble, la problématique de l'évaluation spéciale envisagée ici s'applique plus spécialement à l'ensemble de l'appareil.

<sup>(1)</sup> Comme pour la note (1) de la page précédente, des recommandations plus générales traiteront des vérifications liées à la modification des caractéristiques géométriques des appareils.

<sup>(2)</sup> Le délai de 10 ans ne s'applique qu'aux grues mobiles qui n'ont pas été conçues suivant le cadre de la section I des règles FEM, compte tenu de la spécificité de l'utilisation de ces grues en milieu portuaire.

### **III – UTILISATION DES REGLES DE CALCUL FEM POUR L'EVALUATION SPECIALE D'UN APPAREIL**

Les règles FEM sont définies pour le calcul de dimensionnement des appareils de levage et leur utilisation pour l'évaluation spéciale soulève un certain nombre de questions qu'il faut aborder successivement au regard de la problématique des appareils anciens :

#### **1. FAUT-IL PROCEDER A UN NOUVEAU CALCUL EXHAUSTIF DE L'APPAREIL TENANT COMPTE DE LA DUREE D'UTILISATION PREVUE APRES REVISION GENERALE DE L'APPAREIL ?**

Cette question revient en quelque sorte à s'interroger sur la qualité du dimensionnement initial. En effet, les règles FEM appliquées ont pu évoluer (avec les trois versions successives de 1962, 1970 et 1987), la précision des modèles a pu s'affiner (en particulier la modélisation aux éléments finis bi ou tridimensionnelle permet depuis plusieurs années de connaître avec une précision accrue les phénomènes de répartition de contraintes).

Dans d'autres cas, les données concernant le dimensionnement initial de l'appareil sont inexistantes (appareils antérieurs à 1962). Il ne peut donc être établi de règle générale en la matière, car seule la connaissance de l'historique de l'appareil permet de déterminer s'il faut effectivement reprendre intégralement le calcul de dimensionnement initial de l'appareil. Néanmoins, il y a lieu de recommander systématiquement le recours à ce calcul si, lors d'accidents ou d'incidents répétés, l'utilisateur s'interroge sur la qualité du dimensionnement initial et lorsque l'appareil doit être prolongé au-delà de sa durée d'utilisation initiale.

Le paragraphe 3 sera l'occasion d'introduire un critère conventionnel permettant de se fixer une limite à partir de laquelle lors de son évaluation spéciale il sera nécessaire de procéder à un nouveau calcul exhaustif de l'appareil.

#### **2. FAUT-IL INSTRUMENTER L'APPAREIL DE LEVAGE POUR APPRECIER LA REALITE DES CONTRAINTES AUXQUELLES IL EST SOUMIS ?**

L'instrumentation des appareils peut être pratiquée dans deux optiques assez différentes :

- soit pour reconstituer le spectre de charges ou pour mieux connaître la nature des sollicitations auxquelles l'appareil est soumis ;
- soit pour reconstituer le spectre de contraintes dans les parties les plus sollicitées de la charpente de l'appareil ou pour mieux mesurer les écarts qui peuvent exister entre les réponses réelles de la charpente aux sollicitations et les réponses issues des calculs.

##### ***2.1. Instrumentation liée aux charges levées***

Une grande partie des appareils est dotée aujourd'hui d'un CEC (contrôleur d'état de charges), c'est-à-dire d'un appareil permettant de s'assurer que la charge levée reste inférieure à la charge maximale autorisée. Ce type d'appareil n'est généralement pas associé à un enregistrement qui, seul, peut être utile pour reconstituer précisément le spectre des charges levées. Il est donc souvent nécessaire, pour le bureau d'évaluation de le proposer quand il n'existe pas un système d'enregistrement électronique des charges levées afin de l'aider dans la reconstitution de l'historique récent de l'appareil.

D'autre part, les CEC ont un certain temps de réaction, au cours duquel des charges supérieures aux charges limites autorisées peuvent être dépassées : c'est le cas par exemple des portiques à conteneurs lorsque les « twistlocks » restent coincés. Dans ce cas, des sollicitations dynamiques de courte durée peuvent dépasser sensiblement les sollicitations calculées. Pour la vérification à la fatigue des appareils, il en est tenu compte à l'aide de coefficients de sécurité, en l'état actuel des connaissances scientifiques à ce sujet.

Il n'y a donc pas lieu de préconiser systématiquement l'installation de systèmes d'enregistrement continu des charges levées, mais d'une part le bureau chargé de l'évaluation spéciale au sens de la norme ISO 12 482-1 peut le demander pour faciliter la reconstitution de l'historique du spectre de charges et d'autre part, ce dispositif peut servir également d'outil pédagogique entre responsables d'outillage et exploitants afin de limiter les conduites d'appareils favorisant l'apparition de sollicitations exceptionnelles dépassant les limites calculées.

## **2.2. Estimation des écarts de réaction des structures**

L'autre situation d'instrumentation est celle liée à la connaissance des contraintes et des déformations que les sollicitations engendrent sur les structures. Dans ce cas, il est utile de placer en certains points judicieusement choisis des jauges de déformation multiaxiales, qui permettent de comparer les déformations réelles des appareils et celles obtenues par le calcul. Là aussi, le bureau chargé de procéder à l'évaluation spéciale au sens de la norme ISO 12 482-1 peut recommander de les installer, soit pour déterminer le spectre de contraintes de l'appareil associé au spectre de charges (ou de sollicitations), soit pour mesurer les écarts de réaction des éléments de la structure, ou de certains de ses éléments critiques. C'est notamment le cas d'appareils dont les conditions d'utilisation ont évolué notablement : passage en twin-lift pour les portiques à conteneurs si le dimensionnement initial n'a pas envisagé l'effet de torsion correspondant de l'avant-bec, ou pour des grues amenées à manutentionner des colis lourds, ou encore du fait des modifications des caractéristiques des becs d'entrée des cellules à bord des navires...

## **3. VERIFICATION A L'AIDE DES REGLES FEM**

Il est jugé préférable d'opérer avec les dernières règles FEM en vigueur même si elles n'ont pas servi pour le dimensionnement initial de l'appareil. Pour les appareils anciens, ceci peut signifier une reclassification des appareils dans la mesure où il n'y a pas forcément d'équivalence immédiate d'une version<sup>(1)</sup> des règles à la suivante.

Les trois premières vérifications préconisées par ces règles, à savoir le non dépassement de la limite élastique, le flambement et le voilement sont indépendantes du nombre de cycles considéré qui n'intervient que pour les vérifications à la fatigue. Les recommandations applicables aux appareils<sup>(2)</sup> « anciens » concernent principalement (pour les aspects structuraux de ces appareils) la connaissance des sections utiles qui peuvent perdre de l'épaisseur par corrosion, ce qui nécessite de vérifier les épaisseurs réelles des appareils anciens, au moins pour leurs parties les plus critiques (déterminées grâce à une analyse de type AMDEC, analyse modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité). Il en va de même de la nature des aciers, notamment lorsqu'il est fait usage d'aciers HLE (aciers à haute limite d'élasticité).

<sup>(1)</sup> les questions de clefs de passage en facteurs de spectre entre les règles FEM 70 et FEM 87 sont exprimées à l'annexe 1 des exemples

<sup>(2)</sup> les autres aspects ne sauraient être ignorés, notamment pour l'ensemble des dispositifs recourant à la sécurité des appareils, la liste exhaustive de ces éléments est fournie au 4<sup>ème</sup> paragraphe du 4 intitulé « évaluation » de la norme ISO 12 482-1

La vérification à la fatigue prévue pour le dimensionnement initial des appareils peut être étendue dans son principe à la vérification des appareils anciens à condition de parvenir à retracer convenablement l'historique de son utilisation. Le calcul initial repose en effet sur deux hypothèses fortes qui autorisent à effectuer une classification des appareils, de leurs mécanismes et de leurs éléments qui facilite la recherche d'un dimensionnement en sécurité :

- la première est que la résistance en fatigue des joints soudés des appareils est régie par une courbe de Wöhler : établie pour 90 % de non-rupture pour des éprouvettes d'acier soumises à des cycles de contraintes alternées, ce genre de courbes peut être représenté par une loi linéaire dans un repère bi-logarithmique ( $\log N$ ,  $\log \sigma$ ) où  $N$  est le nombre de cycles à la rupture au sens défini précédemment et la contrainte  $\sigma$  est la résistance en fatigue de cette éprouvette. La pente, négative, de cette droite varie entre 1,8 et 8 en valeur absolue dans les cas réels envisagés, tandis qu'une valeur conventionnelle de 3 est adoptée pour faciliter la définition des classes d'utilisation et le calcul des spectres de charge de l'appareil global. L'approximation qui consiste à étendre les résultats expérimentaux obtenus sur éprouvettes aux joints soudés et aux éléments de charpente donne satisfaction, d'après les auteurs ayant établi ces règles. En effet, la durée de vie en fatigue d'un élément de charpente est celle du joint soudé le plus critique en fatigue ;

- la seconde est que l'endommagement suit un processus cumulatif appelé règle de cumul de Palmgren-Miner. L'endommagement cumulatif  $\alpha$  est donc indépendant de l'ordre d'application des cycles de contrainte. Il ne dépend que de la contrainte maximum appliquée, du cas d'entaille des assemblages soudés et du rapport existant entre les valeurs algébriques des contraintes extrêmes.

En définitive, ces deux hypothèses permettent de caractériser l'endommagement à partir du nombre de cycles de contraintes qu'un élément ou un assemblage soudé subit ou subira lors de son utilisation ( $N$ ) et de spectres des cycles de contraintes de chaque élément ou de chaque nœud ( $K_{sp}$ ), ce qui conduit, si l'on admet que la contrainte maximale de chaque élément et de chaque assemblage critique reste en deçà de la contrainte admissible, en respectant un certain facteur de sécurité, à vérifier que la contrainte calculée reste en deçà de la valeur admissible correspondante. Pour la vérification à la fatigue, on s'assure grâce à une partition adéquate des repères bi-logarithmiques déjà définis qu'à chaque point calculé du plan ( $N$ ,  $K_{sp}$ ) est associé un point majorant du point de vue de l'endommagement, donc qui offre un niveau de sécurité supérieur.

La combinaison de ces hypothèses autorise également à procéder à une classification des appareils, de leurs éléments et de leurs assemblages en couplant à chaque fois des spectres de charges, de sollicitations ou de contraintes et une classe d'utilisation (exprimée en nombre de cycles ou en durée d'utilisation).

Le tableau ci-dessous rappelle les principes de classification (édition 1987 des Règles FEM).

		Charpentes U0 à U10 (nombre de cycles)	Mécanismes T0 à T10 (nombre d'heures)	Éléments B0 à B10 (nombre de cycles)
Spectre de charge	Q1 à Q4	8 groupes A1 à A8		
Spectre de sollicitations	L1 à L4		8 groupes M1 à M8	
Spectre de contraintes	P1 à P4			8 groupes E1 à E8

L'application des règles de calcul de la FEM à la vérification à la fatigue des appareils anciens ne pose pas de difficultés de principe vu les deux hypothèses de Wöhler et de Palmgren-Miner, mais soulève des difficultés pratiques, si l'on souhaite éviter de mener un calcul aussi détaillé que celui qui a servi au dimensionnement initial de l'appareil.

C'est ce qui a conduit le groupe de travail à introduire une troisième hypothèse conventionnelle : elle s'appuie sur le produit  $\Pi = NK_p$  où  $N$  désigne le nombre conventionnel de cycles d'utilisation de l'appareil et  $K_p$  le coefficient de spectre de charges. Ce produit  $\Pi$  peut être qualifié d'indicateur de fatigue global de l'appareil.

Contrairement à celles de Wöhler et de Palmgren-Miner, qui se fondent sur un caractère physique expérimental, cette dernière hypothèse a un caractère doublement conventionnel. Le premier est lié à la conception des appareils par le constructeur qui suppose qu'à partir d'une classification de l'appareil des groupes d'utilisation  $A_i$ , le dimensionnement consiste à s'assurer parallèlement que les mécanismes, les éléments et les assemblages soudés gardent des contraintes critiques « admissibles », en se fondant respectivement sur une classification liée au spectre de sollicitations ou au spectre de contraintes induit par les cycles de levage considérés; le second est lié au fait qu'on applique des règles de conception, celles de la FEM, à un appareil ancien, ce qui veut dire implicitement que la reconstitution de l'historique des appareils n'apporte aucun élément susceptible de remettre en cause le dimensionnement initial du constructeur.

Le travail du bureau d'évaluation consiste donc d'abord à reconstituer le spectre de charges réel  $K_{pr}$  et le nombre réel de cycles de levage  $N_r$  auquel l'appareil a été soumis de façon à déterminer le produit  $\Pi_r$  de l'appareil « ancien » et à le comparer avec son indicateur de fatigue de conception  $\Pi_c$ , c'est-à-dire celui qui a servi lors de son dimensionnement initial.

Ce calcul doit ensuite être étendu à la période séparant l'évaluation spéciale en cours et la date de la prochaine évaluation envisagée, d'où la détermination d'un nouveau coefficient de spectre des charges  $K_{pf}$  et d'un nouveau nombre de cycles de levage  $N_f$ , ce qui conduit au produit  $\Pi_f$ . Le reste de la méthode est précisé grâce à un logigramme détaillé, assorti de commentaires.

Il faut apporter trois précisions utiles à la pleine compréhension de cette hypothèse conventionnelle :

- la simplification introduite par cette hypothèse suppose de vérifier au préalable avec l'utilisateur que l'utilisation de l'appareil n'a pas entraîné ou n'entraînera pas des cycles de contraintes induits par les cycles de levage plus préjudiciables que ceux utilisés pour la conception initiale de l'appareil notamment au niveau des assemblages soudés ou dans les éléments de charpente, faute de quoi le calcul de dimensionnement initial doit être repris;

- la qualité de l'évaluation est liée à la qualité de la détermination de ce produit  $\Pi = NK_p$ , ce qui peut supposer une instrumentation réelle poussée car il est lié à la reconstitution d'un historique connu de façon approchée par l'utilisateur de l'appareil;

- la vérification à la fatigue, même si elle conduit à une évaluation simplifiée ne dispense nullement des autres types de vérification, notamment celles liées aux questions de corrosion.

Enfin, une attention particulière doit être apportée au choix de la nouvelle période de sécurité d'exploitation, surtout si la procédure d'évaluation simplifiée a été retenue pour la vérification à la fatigue de l'appareil.

Il a été jugé pertinent de considérer que si l'indicateur  $\Pi$  n'atteint pas 90 % de sa valeur de dimensionnement initial, il n'y avait pas lieu de procéder à une vérification à la fatigue de l'ensemble des éléments ou des assemblages soudés (sous certaines conditions détaillées dans le logigramme).

D'autre part, si cet indicateur atteint la valeur 100 %, l'arrêt de l'appareil s'impose automatiquement à l'exploitant : il n'en découle pas pour autant l'obligation de le ferrailer. Deux conséquences s'en déduisent en revanche : la nécessité de mener complètement une évaluation spéciale « lourde » et l'impossibilité d'utiliser plus longtemps la notion d'indicateur de fatigue global, puisqu'une nouvelle remise en service impliquerait la restauration des assemblages soudés ou d'éléments qui, indiscutablement, atteignent déjà leurs limites d'utilisation, en terme de fatigue. Dans ce cas la notion d'indicateur global de l'appareil perd tout son sens.

Cette obligation d'arrêt d'exploitation s'impose également à l'exploitant, s'il prévoit qu'avant la fin de l'évaluation spéciale « lourde » de l'appareil, l'indicateur global de l'appareil atteigne 100 %.

De plus, afin de tenir compte des incertitudes liées à une méthode d'évaluation fondée sur le recours à un indicateur global de fatigue, le groupe a proposé d'imposer à l'exploitant l'arrêt préventif de l'appareil chaque fois que l'indicateur de fatigue vient à dépasser 95 % de sa valeur initiale, tant que l'évaluation spéciale n'a pas été menée à son terme.

## PRINCIPES ET CHOIX POUR LA GRANDE REVISION DES APPAREILS DE LEVAGE « ANCIENS » : RESUME

La situation de la problématique définie précédemment au I a permis au groupe de travail de préciser les recommandations applicables à la révision des appareils de levage anciens. Il est utile, avant d'exposer sous forme de logigramme commenté la méthode retenue, de rappeler en les résumant les principes et les choix opérés pour ce faire par le groupe :

- le texte le plus adapté à la révision des appareils de levage anciens est la norme ISO 12 482-1 intitulée « appareils de levage à charge suspendue – surveillance - partie 1 généralités », publiée en 1995. Il est donc proposé d'appliquer la procédure d'évaluation spéciale définie dans cette norme en se fondant sur le dépassement de l'un des quatre critères de déclenchement ;

- l'évaluation spéciale doit être opérée par un bureau distinct de l'exploitant appelé bureau d'évaluation, agréé pour ce faire selon une procédure qui sera précisée par la DTMPL ;

- le choix de la méthode d'évaluation relève du bureau d'évaluation retenu suffisamment en amont dans le temps pour que d'éventuelles instrumentations ou recueil d'informations préalables puissent se faire avant le dépassement effectif des critères retenus à partir de la norme. Le soin de la méthode de reconstitution de l'historique de l'appareil est donc laissé à l'appréciation de ce bureau ;

- l'évaluation spéciale concerne l'ensemble des questions relatives au « vieillissement » de l'appareil, mais une attention particulière est portée à la question de la fatigue métallique et aux conditions de réévaluation à la fatigue de l'appareil ;

- le choix opéré en la matière consiste à vérifier que l'appareil reste toujours avec un indicateur de fatigue de l'appareil  $\Pi_r$  inférieur à 90 % de celui de son dimensionnement initial  $\Pi_c$  pour l'ensemble de l'appareil et à l'issue de la période liée à la prochaine évaluation spéciale<sup>(1)</sup> et à supposer que si ce critère est vérifié l'évaluation peut être conduite de façon simplifiée, c'est-à-dire sans procéder à nouveau à l'ensemble des vérifications à la fatigue prévues par le constructeur, lors de la conception initiale de l'appareil. Dans le cas contraire, la méthode propose d'approfondir les questions de vérification des règles FEM en recourant à des instrumentations et à des inspections détaillées en cas de doute ;

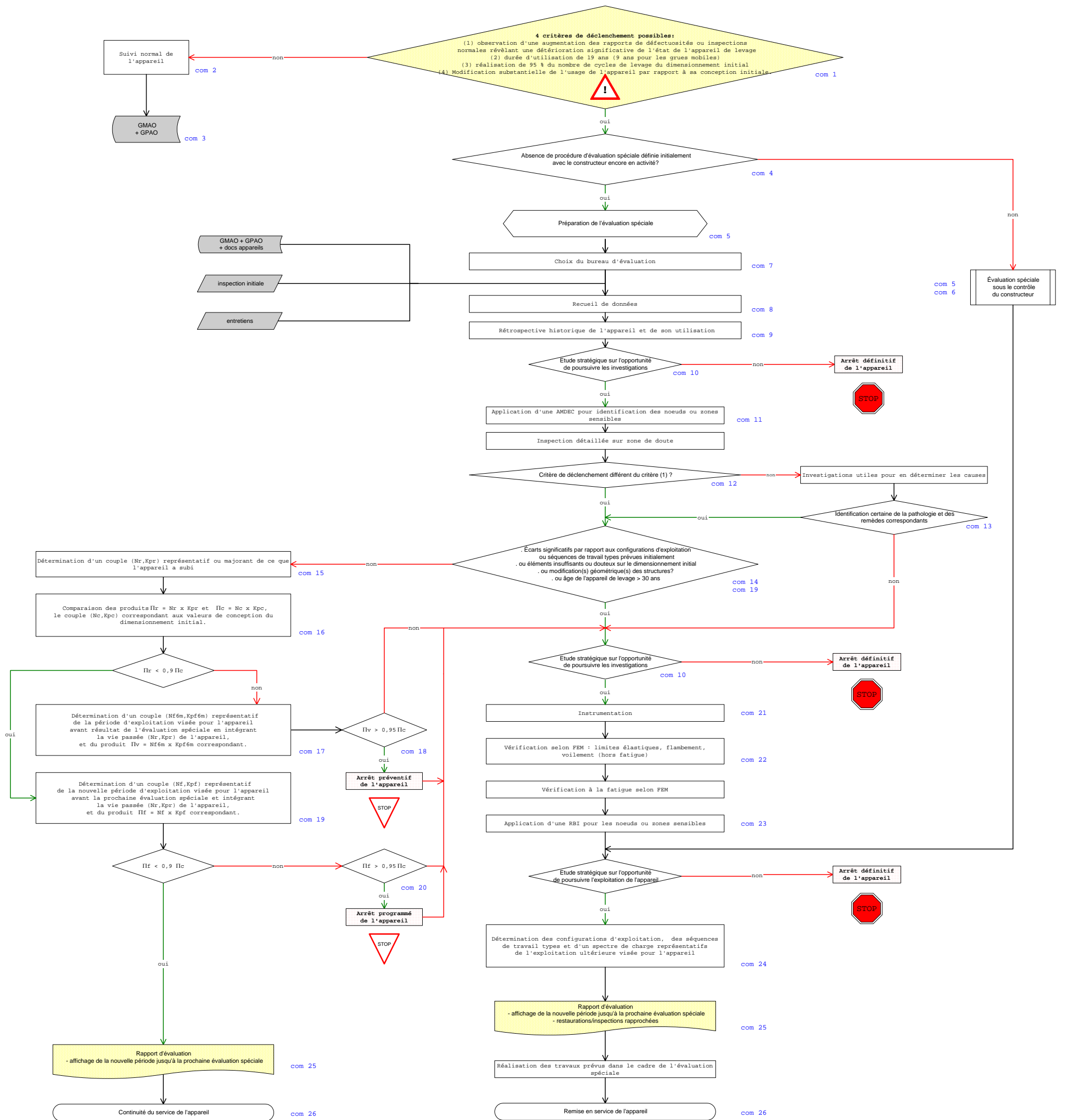
- l'arrêt préventif de l'appareil pour la sécurité du dimensionnement initial à la fatigue s'impose si le risque de dépasser 95 % de la valeur de l'indicateur de fatigue initial  $\Pi_c$  au cours de l'évaluation spéciale « lourde » vient à se présenter ;

- le contenu du rapport d'évaluation est précisé de façon que les ports disposent non seulement de la durée qui les sépare de la prochaine évaluation spéciale, mais aussi de l'ensemble des dispositions à prendre en termes de restauration, de surveillance ou de maintenance.

<sup>(1)</sup> pour la durée maximale séparant deux évaluations spéciales, le groupe a proposé une durée de 5 ans pour le cas où l'évaluation s'est limitée à une approche de l'endommagement global fondée sur l'indicateur de fatigue de l'appareil  $\Pi$ , et de 10 ans dans les autres cas. Il s'agit toutefois du maximum ce qui n'empêche pas le bureau d'évaluation ou le port de choisir des durées plus courtes s'il le souhaite.



# Logigramme de l'évaluation spéciale



## COMMENTAIRES DU LOGIGRAMME

**Com 1** : Les facteurs déclenchant correspondent à ceux retenus par la norme ISO 12482-1. Il est toutefois clair que si l'utilisateur de l'appareil de levage dispose d'informations sur des conditions d'exploitation réelles susceptibles d'avoir conduit à un endommagement nettement plus important à nombre de cycles équivalents que celui défini à l'origine, il convient de ne pas attendre d'avoir atteint 95 % du nombre de cycles de charge du dimensionnement initial pour enclencher la procédure d'évaluation spéciale.

D'autre part, il a été ajouté un critère supplémentaire, qui n'est pas spécifique aux engins de levage anciens, lorsqu'il y a modification substantielle de l'usage de l'engin par rapport à sa conception initiale.

Enfin, si les grues mobiles portuaires ont été conçues en suivant la section I des règles FEM, on retiendra le même critère déclenchant de durée d'utilisation que les autres appareils de levage, à savoir 19 ans.

**Com 2** : Ce circuit est rappelé pour mémoire. Force est de constater qu'aujourd'hui il est difficile de réaliser un historique complet d'appareil de levage sans être obligé d'extrapoler des informations parfois cruciales sur la vie de celui-ci. La GMAO et la GPAO doivent donc aussi être conçues en tant qu'éléments d'un système de maîtrise de l'intégrité des appareils de levage (cf. étude MIEL diffusée au cours de l'année 2002).

**Com 3** : Dans le cadre de ce suivi normal, on cherchera à optimiser l'organisation des informations essentielles (utilisation, grands événements, défaillances, incidents, accidents, contrôles particuliers, modifications réalisées) pour l'évaluation spéciale future de l'appareil.

**Com 4** : Cas « malheureusement » assez rare pour les appareils de levage bord à quai.

**Com 5** : La norme ISO 12482-1 précise que l'évaluation couvre toutes les parties de l'appareil dont une détérioration peut affecter la sécurité de fonctionnement et qu'elle doit se répartir sur les principaux groupes suivants :

- Structures porteuses de la charge
- Mécanismes
- Circuits hydrauliques
- Circuits pneumatiques
- Circuits électriques
- Systèmes de sécurité

**Com 6** : La norme ISO 12482-1 précise qu'il incombe au fournisseur de s'assurer que, lorsqu'il fournit les critères d'évaluation de l'appareil, les éléments suivants sont pris en considération :

- Nombre des cycles de charge
- Distance de déplacement

- Spectre des charges
- Circonstances exceptionnelles (par exemple liées à l'environnement, au climat, accidentelles)
- Parties et zones qui doivent faire l'objet d'une évaluation critique
- Méthode d'évaluation (mesure, essais non destructifs, émissions acoustiques, ...)
- Critères d'acceptation

**Com 7** : Le bureau d'évaluation doit être une structure externe à l'utilisateur de l'engin. Il s'agira d'une société reconnue apte à procéder à cette évaluation spéciale. L'agrément ou l'accréditation relève d'une procédure déterminée par la DTMPL.

**Com 8** : Cette étape comprendra nécessairement des entretiens avec l'exploitant et les services de maintenance, une expertise visuelle de l'engin (qui s'attachera en particulier à évaluer le degré de corrosion des éléments et des nœuds de la structure de l'appareil) et une analyse documentaire (conception initiale, réception, carnet de bord, rapport d'inspection périodique, anomalies, et de façon plus large l'ensemble des données incluses dans les bases d'information de GMAO et GPAO si elles existent,...).

**Com 9** : L'objectif est ici d'organiser les informations existantes sur la vie de l'appareil de manière à mener au mieux, par la suite, son diagnostic.

On cherchera en particulier à préciser :

- Les différentes configurations d'exploitation et les séquences de travail types pour l'appareil,
- Les charges classées par type et les nombres de cycles associés,
- Les modifications substantielles de l'appareil,
- L'évolution des poids morts sous câble,
- Les diverses masses en mouvement,
- Les incidents ou accidents.

A ce stade, le bureau d'évaluation pourra préconiser une instrumentation pour compléter les informations nécessaires à la détermination ultérieure du couple (Nr, Kpr), pour chacun des usages à classement distinct, confer Com 16.

**Com 10** : Il s'agit ici de comparer la valeur économique résiduelle de l'appareil de levage, en fonction de l'usage que l'on souhaite en faire, avec le coût des investigations et des probables restaurations à effectuer pour le remettre en service en sécurité. A ce stade, le bureau d'évaluation pourra proposer de déclasser l'appareil ou de le mettre au rebut en liaison avec l'exploitant.

**Com 11** : Par une analyse fondée sur le risque de type AMDEC (analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité), il s'agit d'identifier les zones critiques du point de vue de la sécurité sur la base de la redondance de la pièce, de son rôle vis-à-vis de la tenue de l'appareil de levage, de son accessibilité pour les contrôles, etc. Ce travail s'effectuera en liaison aussi étroite que possible, avec le constructeur.

- Com 12** : Les investigations spécifiques qui suivent ont pour but essentiel de repérer, à l'amont des investigations qui relèvent de la mécanique des structures, des problèmes d'une autre nature (déficiency de circuits ou de commandes électriques, corrosion accélérée de certaines pièces métalliques...) qui peuvent par ailleurs avoir des conséquences sur la résistance ou la tenue à la fatigue de l'appareil.
- Com 13** : Les remèdes proposés pourront concerner une intervention physique sur l'engin et/ou une modification de ses modes d'exploitation.
- Com 14** : Si on est en présence d'écart significatifs entre l'exploitation prévue (modifications d'usage, modifications de charges...) et l'exploitation réelle ou si la structure de l'appareil a été modifiée, il est difficile d'imaginer de se contenter d'une approche de l'endommagement de l'appareil dans son ensemble avec les données contractuelles du constructeur dans la mesure où certains assemblages ou mécanismes ont pu être sollicités de manière nettement plus préjudiciable que prévu.
- Com 15** : Nr correspond au nombre de cycles de levage et  $K_{pr}$  au facteur de spectre de charges, pour chacun des usages à classement distinct. Plus la reconstitution historique de l'engin aura pu être réalisée précisément et plus ces deux paramètres pourront être approchés finement, c'est à dire être représentatifs de la vie réelle de l'engin. Dans le cas contraire, le bureau d'évaluation sera amené à préciser comment il a procédé pour déterminer un nombre de cycles et un facteur de spectre de charges majorants de ce que l'engin a subi.
- Com 16** : Le couple ( $N_c$ ,  $K_{pc}$ ) est normalement défini à partir des besoins exprimés par le commanditaire de l'appareil de levage et sert de base à l'application des règles FEM par le constructeur lors de la conception de l'appareil.
- Com 17** : L'évaluation spéciale s'établit approximativement sur une période de 6 mois. Cette période est retenue pour vérifier l'orientation finale concernant l'exploitation de l'appareil, étant bien entendu que son utilisation sur cette période doit être préalablement établie pour que les conclusions aient un sens. Ainsi une nouvelle valeur de l'indicateur de fatigue  $\Pi_v$  est pris en compte.
- Com 18** : Si l'indicateur de fatigue dépasse 95 % de sa valeur de conception, l'arrêt préventif s'impose à ce stade, du fait des incertitudes de la méthode fondée sur cet indicateur, tant que les mesures ou les travaux préconisés par l'évaluation spéciale n'auront pas été menés à leur fin.
- Com 19** : Il sera vérifié, en particulier, que les séquences de travail types de manutention ne conduisent pas à soumettre certains éléments de la structure à des cycles de contraintes plus préjudiciables (en nombre et en intensité) durant un cycle de levage que ceux prévus à la conception.
- Com 20** : Il s'agit ici de programmer l'arrêt de l'appareil lorsque l'indicateur de fatigue atteint la valeur de 95 % tandis que l'évaluation spéciale "lourde" est conduite et menée à bien.
- Com 21** : Elle peut-être de deux types, en fonction des objectifs poursuivis (confer note de problématique – partie B - question 2).
- Com 22** : Cette vérification ne nécessite pas systématiquement la reprise complète des calculs faits à l'origine par le constructeur (s'ils paraissent complets et qu'il n'y a pas de raison objective de les mettre en doute). Par contre il est indispensable de vérifier préalablement les épaisseurs des pièces métalliques (corrosion) au moins dans les parties les plus critiques de l'appareil.

**Com 23** : Il s'agit ici, au delà de l'analyse de type AMDEC réalisée en amont dans l'évaluation, de préciser les actions envisagées sur les nœuds ou zones sensibles jusqu'à la prochaine évaluation spéciale (inspections rapprochées, pièces à changer, réparations, consolidations...).

**Com 24** : Il est indispensable que l'utilisateur réfléchisse à l'utilisation qu'il souhaite faire de l'appareil de levage par la suite pour que les conclusions de l'évaluation spéciale aient un sens.

**Com 25** : Il ne faut pas oublier à ce stade, pour rester dans l'esprit de la norme ISO 12482-1, de bien définir les modalités de la prochaine évaluation spéciale.

Dans le cas de l'évaluation lourde, le rapport d'évaluation doit indiquer clairement :

1/ les parties à changer

2/ les parties à réparer

3/ les zones à inspecter en fonction de l'analyse de risque

4/ la durée jusqu'à la prochaine évaluation spéciale (avec un maximum de 5 ans si on s'est contenté d'une approche de l'endommagement de l'appareil de levage dans son ensemble en s'appuyant sur la notion d'indicateur de fatigue de l'appareil, et de 10 ans sinon) : appelée période de sécurité d'exploitation dans la norme ISO 12482-1.

**Com 26** : La remise en service est bien sûr précédée des « vérifications réglementaires » au sens de l'arrêté du 09 juin 1993. Après l'évaluation spéciale, les visites annuelles prévues par les textes réglementaires existants s'attarderont plus particulièrement sur les nœuds ou zones sensibles identifiés par l'analyse de risque conduite au cours de l'évaluation spéciale.

La continuité du service de l'appareil implique que ce dernier reste soumis aux dispositions de l'arrêté du 09 juin 1993 telles que les « vérifications périodiques réglementaires ».

## GLOSSAIRE

**FEM** : Fédération Européenne de la Manutention. La section I "Appareils lourds de levage et de manutention" a édité en 1998 la troisième édition révisée des "Règles pour le calcul des appareils de levage" en 8 cahiers.

**GMAO** : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur.

**GPAO** : Gestion de la Production Assistée par Ordinateur.

**Bureau d'évaluation** : il s'agit ici du bureau technique chargé de réaliser l'évaluation spéciale conformément au cadre défini dans le présent logigramme à partir de la norme ISO 12482-1.

**Indice c** : fait référence à la valeur de conception du paramètre, c'est à dire établie au moment de la conception de l'appareil de levage. Exemple :  $N_c$  correspond à la durée totale d'utilisation supputée, établie contractuellement en nombre de cycles de levage, considérée comme valeur d'orientation, débutant à la mise en service de l'appareil de levage, se terminant à la mise hors service définitive de l'appareil de levage concerné.

**Indice r** : fait référence à la valeur réalisée du paramètre, c'est à dire établie au moment de l'évaluation spéciale de l'appareil de levage. Exemple :  $N_r$  correspond à la durée réalisée ou majorée d'utilisation, établie en nombre de cycles de levage, s'entendant de la mise en service initiale de l'appareil de levage jusqu'au moment de l'évaluation spéciale de l'appareil de levage concerné.

**Indice f** : fait référence à la valeur future du paramètre, établie au moment de l'évaluation spéciale de l'appareil de levage. Exemple :  $N_f$  correspond à la future durée d'utilisation prévue, établie en nombre de cycles de levage, considérée comme valeur d'orientation, débutant à la remise en service de l'appareil de levage après l'évaluation spéciale et se terminant soit au démarrage de l'évaluation spéciale suivante soit à la mise hors service définitive de l'appareil de levage concerné.

**Indice v** : fait référence à la valeur future du paramètre, établie pour une période de 6 mois correspondant au rendu du rapport de l'évaluation spéciale de l'appareil de levage. Exemple :  $N_v$  correspond à la future durée d'utilisation prévue, établie en nombre de cycles de levage, considérée comme valeur d'orientation, débutant à la remise en service de l'appareil de levage après l'évaluation spéciale et se terminant pratiquement au rendu du rapport d'évaluation de l'appareil de levage concerné.

**Kp** : coefficient de spectre de charges relatif à l'appareil de levage dans son ensemble, d'après FEM.

**N** : nombre de cycles de levage. La FEM décrit un cycle de levage comme étant l'ensemble des opérations commençant au levage d'une charge et se terminant au moment où l'appareil est prêt à lever la charge suivante.

**$\underline{N}$**  : indicateur de fatigue de l'appareil. C'est le produit du nombre de cycles de levage N et du coefficient de spectre de charges de l'appareil.

## EXEMPLES DE CLASSEMENT ET D'EVALUATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE D'UN APPAREIL DE LEVAGE PORTUAIRE

### 1 - INTRODUCTION

L'objectif de ces exemples est de montrer le cheminement qui conduit ou non à emprunter la branche lourde de l'évaluation spéciale.

Les "Recommandations applicables aux appareils de levage anciens" préconisent une évaluation préalable de l'état de fatigue de l'appareil dans son ensemble par le biais d'un indicateur de fatigue, sans dimension, produit du nombre de cycles de levage accomplis par le facteur de spectre de levage accompli, appelés respectivement  $N_r$  et  $k_{pr}$ .

Cette évaluation préalable permet de comparer l'indicateur de fatigue correspondant à l'utilisation passée avec l'indicateur de fatigue "contractuel" déduit du ou des classement (s) de l'engin défini (s) dans son cahier des charges.

Les appareils dimensionnés avant 1987 ne comportent pas la notion de facteur de spectre de charge. En effet, les règles antérieures aux règles FEM 1987 définissent les spectres de charge par des courbes sans indication des valeurs des facteurs de spectre correspondants.

Il devient nécessaire, au moins pour les appareils dimensionnés selon les règles FEM 1970, d'avoir une clef de passage pour transposer les bornes des classes d'état de charge de ces règles en celles de facteur de spectre de charge selon l'expression mathématique précisée dans les règles FEM 1987.

L'annexe 1 facilite l'application de cette clef, nécessaire aussi bien pour recalculer les assemblages soudés que lorsqu'il faut donner un sens à l'indicateur d'endommagement puisqu'il comprend le facteur de spectre de charge comme l'un de ses deux éléments constitutifs.

### 2 – EXEMPLES DE CLASSEMENT – EVALUATION D'INDICATEUR DE FATIGUE

#### EXEMPLE 1 : PORTIQUE A CONTENEURS

##### **DONNEES DE BASE**

Il s'agit d'un portique pour la manutention des conteneurs de 40 tonnes sous spreader et 50 tonnes sous câbles, commandé en 1979 avec application des règles FEM de l'édition de 1970. Le classement contractuel de l'engin dans son ensemble, défini dans le cahier des charges, était le suivant :

- Classe d'utilisation :       **C**
- Etat de charge :               **2**
- Groupe de classement       **5**

### **EXPRESSION DES CRITERES DE CLASSES REPRESENTATIVES DE L'APPAREIL**

D'après l'annexe 1, les valeurs des paramètres contractuels de classement sont :

- classe d'état de charge 2 : le facteur de spectre correspondant est  $k_{pc} = 0,40$ .
- classe d'utilisation C : le nombre de cycles maximal correspondant est  $N_c = 6,3 \cdot 10^5$ .

### **DETERMINATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE CONVENTIONNEL DE L'APPAREIL**

La valeur maximale contractuelle de l'indicateur de fatigue est donc égale à :

$$\Pi_c = N_c \cdot k_{pc} = 6,3 \cdot 10^5 \cdot 0,40 = 2,52 \cdot 10^5$$

### **RECONSTITUTION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE**

La reconstitution des services de l'appareil (nombre de cycles et facteur de spectre de charge correspondant) doit alors être réalisée avec soin en tenant compte de la répartition la plus fidèle possible des différentes charges manutentionnées et de l'évolution des masses fixes sous câbles (porte outil, spreader ...).

Cette reconstitution doit être effectuée d'une part par exploitation de toutes les bases de données statistiques d'exploitation, des historiques de maintenance et d'autre part par la collecte d'informations précises sur les méthodes de travail et leur évolution, recueillies au cours d'entretiens avec les responsables d'exploitation, de maintenance et d'étude.

Dans le cas où les différentes statistiques ne permettent pas de reconstituer de façon réaliste la répartition des différentes valeurs des masses levées pour chaque unité de charge, des majorants de spectre doivent être définis pour chacune de ces unités de charge.

L'année de l'évaluation, la répartition des différentes charges mises en évidence au cours de la reconstitution de service et les nombres de cycles associés permettent de tracer le spectre de charge correspondant et de procéder au calcul du facteur de spectre  $k_p$  et de l'indicateur de fatigue relevé  $N \cdot k_p$  (voir l'annexe 2) donne les résultats suivants :

$$K_{pr} = 0,22$$

$$N_r = 7,6 \cdot 10^5$$

$$\Pi_r = 1,7 \cdot 10^5$$

### **CALCUL DE L'INDICE DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE**

$$IF = \Pi_r / \Pi_c = (N_r \cdot k_{pr}) / (N_c \cdot k_{pc}) = 1,7 \cdot 10^5 / 2,52 \cdot 10^5 = 0,66$$

Orientation vers l'évaluation à réaliser

L'estimation du  $K_{pf}$  est établie à partir du  $K_{pr}$  de base et de l'extrapolation du service à venir.

L'évaluation légère est possible tant que  $\Pi_f < 0,9 \Pi_c$ .

Si  $k_{pf} = k_{pr}$ ,  $N_f$  est alors égal à :

$N_f = (0,9 \cdot 2,52 \cdot 10^5) / 0,22 = 1,03 \cdot 10^6$  cycles (en admettant un facteur de spectre futur identique à celui relevé), il reste donc  $1,03 \cdot 10^6 - 7,6 \cdot 10^5 = 2,7 \cdot 10^5$  cycles à effectuer avant d'atteindre un indice de fatigue égal à 0,9 et donc l'obligation de réaliser une évaluation spéciale complète.



L'arrêt provisoire du portique étant obligatoire à partir d'une valeur de 0,95 de l'indice de fatigue, le nombre de cycles restant à effectuer est donc égal à :

$N_f = (0,95 \cdot 2,52 \cdot 10^5) / 0,22 = 1,08 \cdot 10^6$  cycles, il reste donc  $1,08 \cdot 10^6 - 7,6 \cdot 10^5 = 3,2 \cdot 10^5$  cycles à effectuer avant d'atteindre un indice de fatigue égal à 0,95 et donc l'obligation d'arrêter au moins provisoirement l'appareil.

## **EXEMPLE 2 : PORTIQUE A BENNE**

### ***DONNEES DE BASE***

Il s'agit d'un portique charbonnier de 30 tonnes sous câbles, commandé en 1982 avec application des règles FEM de l'édition de 1970. Le classement contractuel de l'engin dans son ensemble, défini dans le cahier des charges, était le suivant :

- Classe d'utilisation : **D**
- Etat de charge : **3**
- Groupe de classement **6**

### ***EXPRESSION DES CRITERES DE CLASSES REPRESENTATIVES DE L'APPAREIL***

D'après l'annexe 1, les valeurs des paramètres contractuels de classement sont :

- classe d'état de charge 3 : le facteur de spectre correspondant est  $k_{pc} = 1$ .
- classe d'utilisation D : le nombre de cycles correspondant est  $N_c = 2 \cdot 10^6$ .

### ***DETERMINATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE CONVENTIONNEL DE L'APPAREIL***

La valeur maximale contractuelle de l'indicateur de fatigue est :

$$\Pi_c = N_c \cdot k_{pc} = 2 \cdot 10^6 \cdot 1 = 2 \cdot 10^6$$

### ***RECONSTITUTION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE***

L'année de l'évaluation, la répartition des différentes charges mises en évidence au cours de la reconstitution de service et des nombres de cycles associés permettant de tracer le spectre de charge correspondant et de procéder au calcul du facteur de spectre  $k_p$  et de l'indicateur de fatigue relevé  $N \cdot k_p$  (voir l'annexe 3) donne les résultats suivants :

$$K_{pr} = 0,89$$

$$N_r = 8,3 \cdot 10^5$$

$$\Pi_r = 7,4 \cdot 10^5$$

### ***CALCUL DE L'INDICE DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE***

$$IF = \Pi_r / \Pi_c = (N_r \cdot k_{pr}) / (N_c \cdot k_{pc}) = 7,4 \cdot 10^5 / 2 \cdot 10^6 = 0,37$$

#### **Orientation vers l'évaluation à réaliser**

L'estimation du  $K_{pf}$  est établie à partir du  $K_{pr}$  de base et de l'extrapolation du service à venir.

L'évaluation légère est possible tant que  $\Pi_f < 0,9 \Pi_c$ .

Si  $k_{pr} = k_{pr}$ ,  $N_f$  est alors égal à :

$N_f = (0,9 \cdot 2 \cdot 10^6) / 0,89 = 2,02 \cdot 10^6$  cycles (en admettant un facteur de spectre futur identique à celui relevé), il reste donc  $2,02 \cdot 10^6 - 8,3 \cdot 10^5 = 1,19 \cdot 10^6$  cycles à effectuer avant d'atteindre un indice de fatigue égal à 0,9 et donc l'obligation de réaliser une évaluation spéciale complète.

L'arrêt provisoire du portique étant obligatoire à partir d'une valeur de 0,95 de l'indice de fatigue, le nombre de cycles restant à effectuer est donc égal à :

$N_f = (0,95 \cdot 2 \cdot 10^6) / 0,89 = 2,13 \cdot 10^6$  cycles, il reste donc  $2,13 \cdot 10^6 - 8,3 \cdot 10^5 = 1,3 \cdot 10^6$  cycles à effectuer avant d'atteindre un indice de fatigue égal à 0,95 et donc l'obligation d'arrêter au moins provisoirement l'appareil.

### **EXEMPLE 3 : GRUE POLYVALENTE BENNE / CROCHET**

#### **3 - 1 - GRUE POLYVALENTE POUVANT TRAVAILLER A LA BENNE OU AU CROCHET**

##### **DONNEES DE BASE**

Il s'agit d'une grue polyvalente pouvant travailler à la benne ou au crochet, chaque usage ayant un pouvoir de levage et un classement distinct.

Cette grue a été commandée en 1989 avec application des règles FEM de l'édition de 1987. Les classements contractuels de l'engin dans son ensemble, définis dans le cahier des charges, étaient les suivants :

##### **Fonctionnement au crochet à 45 tonnes (charge maximale sous câbles)**

- Classe d'utilisation : **U5**
- Classe de spectre : **Q2**
- Groupe de classement **A5**

##### **Fonctionnement à la benne de 25 tonnes (charge maximale sous câbles)**

- Classe d'utilisation : **U6**
- Classe de spectre : **Q4**
- Groupe de classement **A8**

Cette double classification correspond à une double situation alternative ou l'appareil doit fonctionner au crochet sur une base de  $10^6$  cycles ou à la benne sur une base  $5 \cdot 10^5$  cycles. Le constructeur s'est alors assuré que les assemblages soudés étaient vérifiés à la fatigue pour le service le plus critique.

#### **DETERMINATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE CONVENTIONNEL DE L'APPAREIL POUR LE SEUL FONCTIONNEMENT AU CROCHET**

Le nombre de cycles maximal, correspondant à la borne supérieure de la fourchette de définition de la classe U5, est de  $N_c = 5 \cdot 10^5$  cycles et le facteur de spectre maximal, correspondant à la classe de spectre Q2, est de  $k_{pc} = 0,25$ .

La valeur maximale contractuelle de l'indicateur de fatigue usage crochet est donc égale à :

$$II_c = N_c \cdot k_{pc} = 5 \cdot 10^5 \cdot 0,25 = 1,25 \cdot 10^5$$

### **DETERMINATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE CONVENTIONNEL DE L'APPAREIL POUR LE SEUL FONCTIONNEMENT A LA BENNE**

Le nombre de cycles maximal, correspondant à la borne supérieure de la fourchette de définition de la classe U6, est de  $N_c = 10^6$  cycles et le facteur de spectre maximal, correspondant à la classe de spectre Q4, est de  $k_{pc} = 1$ .

La valeur maximale contractuelle de l'indicateur de fatigue usage benne est donc égale à :

$$\Pi_c = N_c \cdot k_{pc} = 10^6 \cdot 1 = 10^6$$

### **DETERMINATION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE CONVENTIONNEL DE L'APPAREIL POUR LE FONCTIONNEMENT LE PLUS REPRESENTATIF BENNE OU CROCHET**

L'indicateur de fatigue Benne est ramené au cas du chargement du crochet. La masse maxi est de 45 tonnes dans le calcul du  $K_p$ .

$$K_{pc(45\text{ t})\text{ benne}} = K_{pc(25\text{ t})\text{ benne}} \cdot (25 / 45)^3 = 0,17$$

$$\Pi_c\text{ benne} = N_c \cdot k_{pc(45\text{ t})\text{ benne}} = 10^6 \cdot 0,17 = 1,71 \cdot 10^5$$

Cet indicateur de fatigue Benne est supérieur à l'indicateur de fatigue Crochet. C'est donc lui qui sert de base à la vérification à la fatigue des éléments.

Cela implique notamment que les services au crochet et à la benne provoquent un endommagement en fatigue pour les mêmes éléments, dans la même proportion, à charge levée égale.

### **RECONSTITUTION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE POUR LE SEUL FONCTIONNEMENT AU CROCHET**

L'année de l'évaluation, la répartition des différentes charges mises en évidence au cours de la reconstitution de service et des nombres de cycles associés permettant de tracer le spectre de charge correspondant et de procéder au calcul du facteur de spectre  $k_p$  et de l'indicateur de fatigue relevé  $N \cdot k_p$  (voir l'annexe 4) donne les résultats suivants :

$$K_{pr} = 0,17$$

$$N_r = 2,6 \cdot 10^5$$

$$\Pi_r = 4,4 \cdot 10^4$$

### **RECONSTITUTION DE L'INDICATEUR DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE POUR LE SEUL FONCTIONNEMENT A LA BENNE**

L'année de l'évaluation, la répartition des différentes charges mises en évidence au cours de la reconstitution de service et des nombres de cycles associés permettent de tracer le spectre de charge correspondant.

La masse maxi de 45 tonnes, retenue précédemment dans le calcul de l'indicateur de fatigue conventionnel, permet de procéder au calcul du facteur de spectre  $k_p$  et de l'indicateur de fatigue relevé  $N \cdot k_p$  (voir l'annexe 5). Les calculs donnent les résultats suivants :

$$K_{pr(25\text{ t})\text{ benne}} = 0,86 \quad \text{soit} \quad K_{pr(45\text{ t})\text{ benne}} = 0,86 \cdot (25 / 45)^3 = 0,15$$

$$K_{pr} = 0,15$$

$$N_r = 6,5 \cdot 10^5$$

$$\Pi_r = 9,75 \cdot 10^4$$

**ESTIMATION D'UN INDICE DE FATIGUE REEL DE L'APPAREIL DE LEVAGE (POUR USAGE COMBINE)**

$$IF = (\Pi_r \text{ benne} + \Pi_r \text{ crochet}) / \Pi_c \text{ benne} = (9,75 \cdot 10^4 + 4,4 \cdot 10^4) / 1,71 \cdot 10^5 = 0,83$$

Orientation vers l'évaluation à réaliser

L'estimation du  $K_{pf}$  est établie à partir du  $K_{pr}$  de base et de l'extrapolation du service à venir.

Pour l'estimation du nombre de cycles restant avant l'évaluation, il est supposé que :

- les facteurs de spectre futurs restent identiques à ceux du passé, soit  $k_{pf \text{ benne}} = k_{pr \text{ benne}} = 0,15$  et  $k_{pf \text{ crochet}} = k_{pr \text{ crochet}} = 0,17$
- l'exploitation benne sera prépondérante sur l'exploitation crochet et que le ratio des cycles futurs sera de  $N_c \text{ benne} / N_c \text{ crochet} = 2,3$ .

L'évaluation légère est possible tant que  $\Pi_f < 0,9 \Pi_c$ .

$N_f \text{ benne} = 0,9 \cdot 1,71 \cdot 10^5 / ((0,17 \cdot 1 / 2,3) + 0,15) = 6,9 \cdot 10^5$  cycles, il reste donc  $6,9 \cdot 10^5 - 6,5 \cdot 10^5 = 4 \cdot 10^4$  cycles pour le fonctionnement à la benne à effectuer avant d'atteindre un indice de fatigue égal à 0,9 et donc l'obligation de réaliser une évaluation spéciale complète.

L'arrêt provisoire de la grue étant obligatoire à partir d'une valeur de 0,95 de l'indice de fatigue, le nombre de cycles restant à effectuer est donc égal à :

$N_f \text{ benne} = 0,95 \cdot 1,71 \cdot 10^5 / ((0,17 \cdot 1 / 2,3) + 0,15) = 7,25 \cdot 10^5$  cycles, il reste donc  $7,25 \cdot 10^5 - 6,5 \cdot 10^5 = 7,5 \cdot 10^4$  cycles à effectuer avant d'atteindre pour le fonctionnement à la benne un indice de fatigue égal à 0,95 et donc l'obligation d'arrêter au moins provisoirement l'appareil.

**Commentaires** : cette précaution revient à considérer que si l'estimation de l'usage combiné de l'appareil revient à dépasser 90 %, l'évaluation spéciale lourde s'impose.

## ANNEXE 1

**Comparaison des bornes des classes "facteur de spectre" et "utilisation"  
FEM 1970 et FEM 1987**

**I - Comparaison des facteurs de spectre des classes d'état de charge**

FEM 1970				
0 ⇨ (très léger) $0 \leq K_p \leq 0,025$	1 ⇨ (léger) $0,025 \leq K_p \leq 0,12$	2 ⇨ (moyen) $0,12 \leq K_p \leq 0,40$	3 ⇨ (lourd) $0,40 \leq K_p \leq 1$	
0	0,025	0,12	0,40	1
0	0,125	0,25	0,50	1
Q1 ⇨ $0 \leq K_p \leq 0,125$	Q2 ⇨ $0,125 \leq K_p \leq 0,25$	Q3 ⇨ $0,25 \leq K_p \leq 0,5$	Q4 ⇨ $0,5 \leq K_p \leq 1$	
FEM 1987				

Chaque classe d'état de charge des règles FEM 70, après exploitation graphique, a subi une transformation donnant le facteur de spectre selon la formule des règles FEM 87 :

$$k_p = \left( \frac{m_{l1}}{m_{l\max}} \right)^3 \frac{n_1}{n_{\max}} + \left( \frac{m_{l2}}{m_{l\max}} \right)^3 \frac{n_2}{n_{\max}} + \dots + \left( \frac{m_{lr}}{m_{l\max}} \right)^3 \frac{n_r}{n_{\max}}$$

**II - Comparaison des classes d'utilisation**

FEM 1970									
A ⇨ $0 \leq N \leq 6,3 \cdot 10^4$		B ⇨ $6,3 \cdot 10^4 \leq N \leq 2 \cdot 10^5$		C ⇨ $2 \cdot 10^5 \leq N \leq 6,3 \cdot 10^5$		D ⇨ $6,3 \cdot 10^5 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$			
0		6,3 10 <sup>4</sup>		2 10 <sup>5</sup>		6,3 10 <sup>5</sup>		2 10 <sup>6</sup>	
0		6,3 10 <sup>4</sup>		2,5 10 <sup>5</sup>		5 10 <sup>5</sup>		10 <sup>6</sup>	
U0 ⇨ $0 \leq N \leq 1,6 \cdot 10^4$	U1 ⇨ $1,6 \cdot 10^4 \leq N \leq 3,2 \cdot 10^4$	U2 ⇨ $3,2 \cdot 10^4 \leq N \leq 6,3 \cdot 10^4$	U3 ⇨ $6,3 \cdot 10^4 \leq N \leq 1,25 \cdot 10^5$	U4 ⇨ $1,25 \cdot 10^5 \leq N \leq 2,5 \cdot 10^5$	U5 ⇨ $2,5 \cdot 10^5 \leq N \leq 5 \cdot 10^5$	U6 ⇨ $5 \cdot 10^5 \leq N \leq 10^6$	U7 ⇨ $10^6 \leq N \leq 2 \cdot 10^6$	U8 ⇨ $2 \cdot 10^6 \leq N \leq 4 \cdot 10^6$	U9 ⇨ $4 \cdot 10^6 \leq N$
FEM 1987									

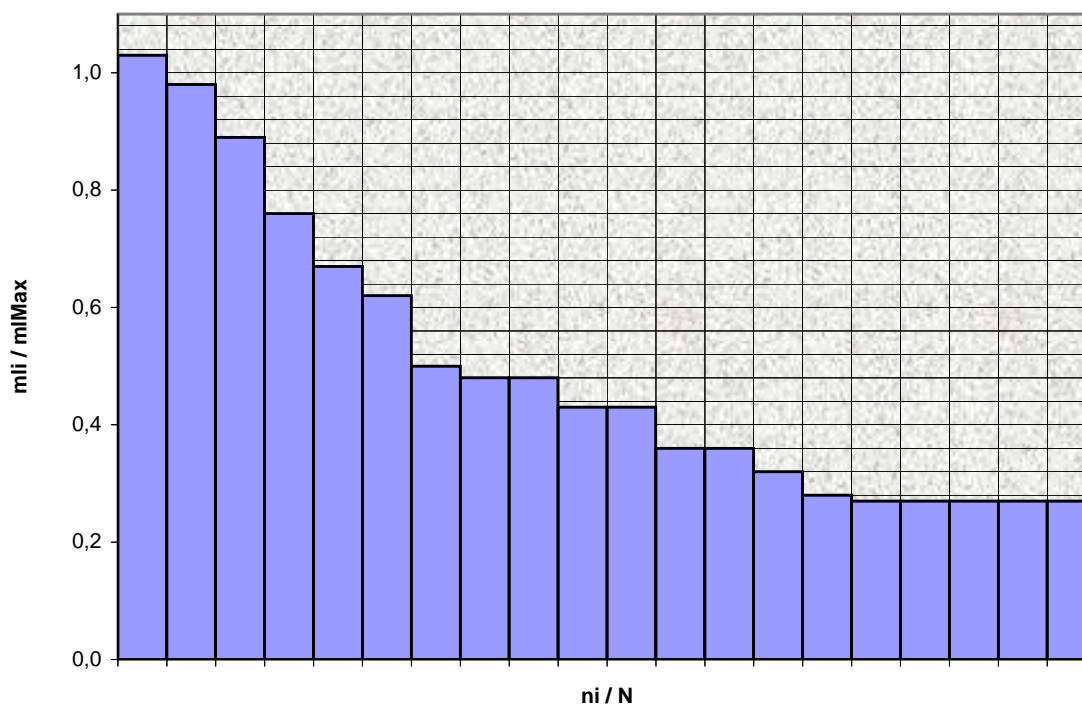
## ANNEXE 2

## PORTIQUE A CONTENEURS

## SPECTRE DE CHARGE POUR LES CYCLES REALISES

$n_i$	38 000	38 000	38 000	38 000	38 000	38 000	38 000	76 000	76 000	76 000	38 000	38 000	190 000
$n_i/n_{Max}$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,25
$m_{li}/m_{lMax}$	1,03	0,98	0,89	0,76	0,67	0,62	0,50	0,48	0,43	0,36	0,32	0,28	0,27
$(m_{li}/m_{lMax})^3$	1,093	0,941	0,705	0,439	0,301	0,238	0,125	0,111	0,080	0,047	0,033	0,022	0,020

## SPECTRE DE CHARGE



## SPECTRE DE CHARGE "SOUS CABLE"

Paramètres : - charge maximale sous spreader :

40,0 tonnes

- masse du spreader

9,6 tonnes

- masse du palonnier écarteur

2,5 tonnes

Nombre de cycles réalisés :

N = 7,6E+05

Facteur de spectre :

Kp = 0,223

Indicateur de fatigue :

N.Kp = 1,7E+05

Autres valeurs informatives pouvant être demandées à l'évaluateur :

Charge moyenne levée = 0,50

Charge maximale levée = 1,03

$$k_p = \left( \frac{m_{l1}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_1}{n_{max}} + \left( \frac{m_{l2}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_2}{n_{max}} + \dots + \left( \frac{m_{lr}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_r}{n_{max}}$$

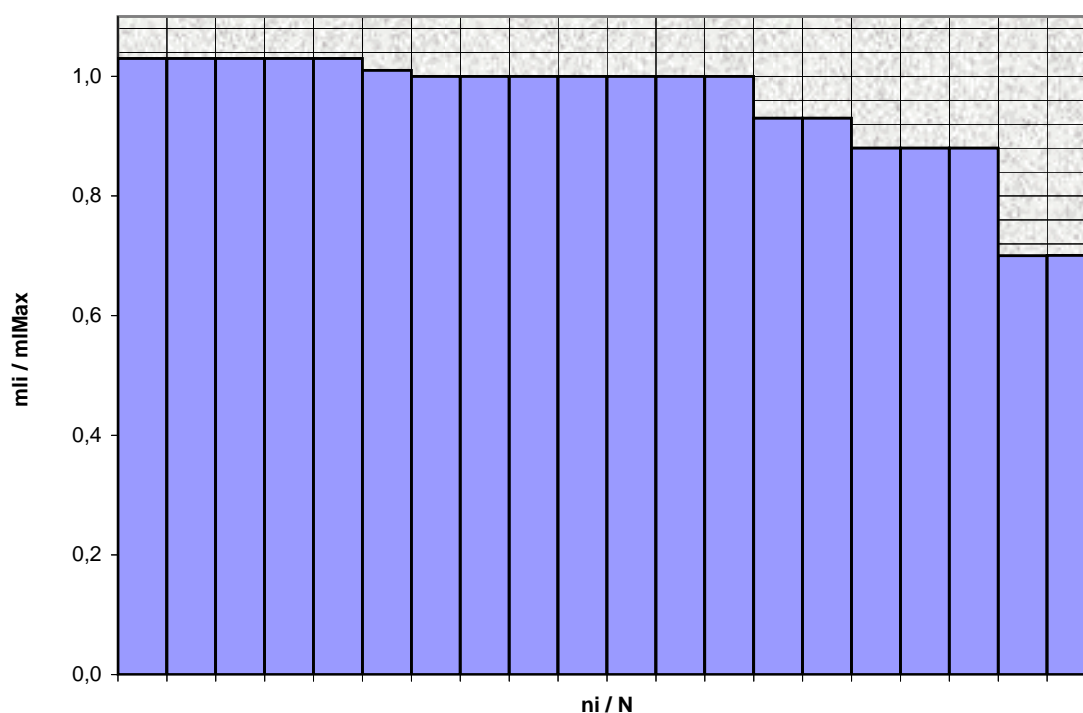
## ANNEXE 3

## PORTIQUE A BENNE

## SPECTRE DE CHARGE POUR LES CYCLES REALISES

$n_i$	207 500	41 500	290 500	83 000	124 500	83 000
$n_i/n_{Max}$	0,25	0,05	0,35	0,10	0,15	0,10
$m_{Ii}/m_{IMax}$	1,03	1,01	1,00	0,93	0,88	0,70
$(m_{Ii}/m_{IMax})^3$	1,093	1,030	1,000	0,804	0,681	0,343

## SPECTRE DE CHARGE



## SPECTRE DE CHARGE "SOUS CABLE"

Paramètres : - charge maximale sous câbles : 30,0 tonnes

Nombre de cycles réalisés :

<b>N =</b>	<b>8,3E+05</b>
------------	----------------

Facteur de spectre :

<b>Kp =</b>	<b>0,892</b>
-------------	--------------

Indicateur de fatigue :

<b>N.Kp =</b>	<b>7,4E+05</b>
---------------	----------------

Autres valeurs informatives pouvant être demandées à l'évaluateur :

Charge moyenne levée =	<b>0,95</b>
------------------------	-------------

Charge maximale levée =	<b>1,03</b>
-------------------------	-------------

$$k_p = \left( \frac{m_{I1}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_1}{n_{\max}} + \left( \frac{m_{I2}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_2}{n_{\max}} + \dots + \left( \frac{m_{Ir}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_r}{n_{\max}}$$

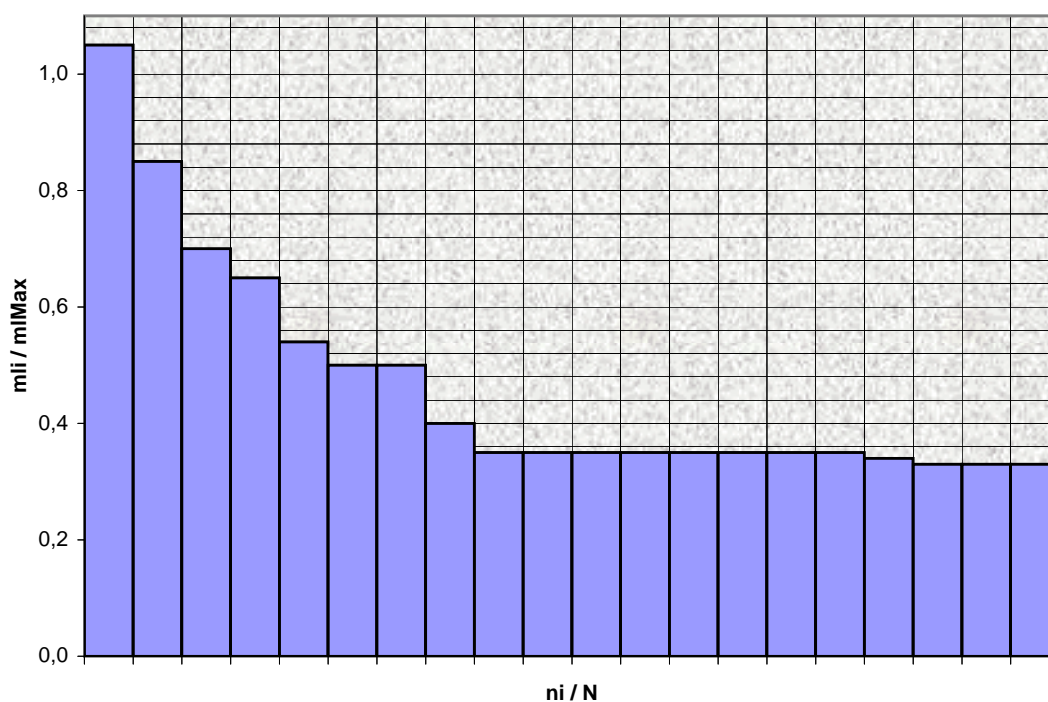
## ANNEXE 4

## GRUE POLYVALENTE - USAGE AU CROCHET

## SPECTRE DE CHARGE POUR LES CYCLES REALISES

$n_i$	13 000	13 000	13 000	13 000	13 000	26 000	13 000	104 000	13 000	13 000	26 000
$n_i/n_{Max}$ (1)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,40	0,05	0,05	0,10
$m_{li}/m_{lMax}$ (2)	1,05	0,85	0,70	0,65	0,54	0,50	0,40	0,35	0,34	0,33	0,33
$(m_{li}/m_{lMax})^3$ (3)	1,158	0,614	0,343	0,275	0,157	0,125	0,064	0,043	0,039	0,036	0,036

## SPECTRE DE CHARGE



## SPECTRE DE CHARGE "SOUS CABLE"

Paramètres : - charge maximale sous câbles : 45,0 tonnes

Nombre de cycles réalisés :

**N = 2,6E+05**

Facteur de spectre :

**Kp = 0,168**

Indicateur de fatigue :

**N.Kp = 4,4E+04**

Autres valeurs informatives pouvant être demandées à l'évaluateur :

Charge moyenne levée = **0,47**

Charge maximale levée = **1,05**

$$k_p = \left( \frac{m_{l1}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_1}{n_{max}} + \left( \frac{m_{l2}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_2}{n_{max}} + \dots + \left( \frac{m_{lr}}{m_{lmax}} \right)^3 \frac{n_r}{n_{max}}$$



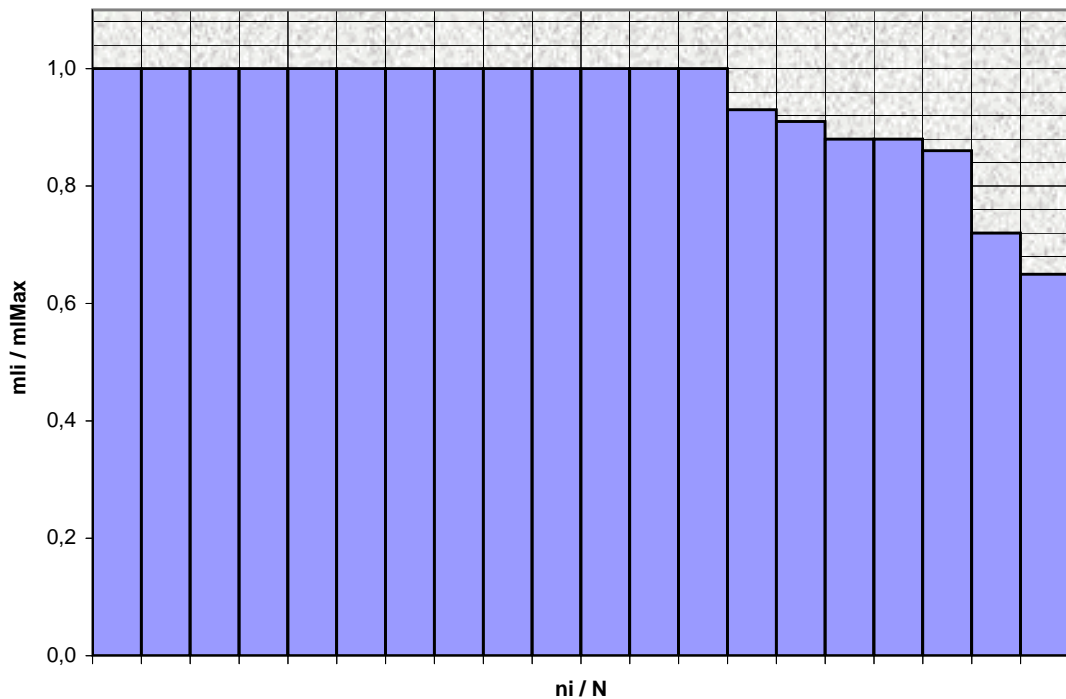
## ANNEXE 5

## GRUE POLYVALENTE - USAGE A LA BENNE

## SPECTRE DE CHARGE POUR LES CYCLES REALISES

$n_i$	422 500	32 500	32 500	65 000	32 500	32 500	32 500
$n_i/n_{Max}$	0,65	0,05	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05
$m_{Ii}/m_{IMax}$	1,00	0,93	0,91	0,88	0,86	0,72	0,65
$(m_{Ii}/m_{IMax})^3$	1,000	0,804	0,754	0,681	0,636	0,373	0,275

## SPECTRE DE CHARGE



## SPECTRE DE CHARGE "SOUS CABLE"

Paramètres : - charge maximale sous câbles : 25,0 tonnes

Nombre de cycles réalisés :

**N = 6,5E+05**

Facteur de spectre :

**Kp = 0,860**

Indicateur de fatigue :

**N.Kp = 5,6E+05**

Autres valeurs informatives pouvant être demandées à l'évaluateur :

Charge moyenne levée = **0,94**

Charge maximale levée = **1,00**

$$k_p = \left( \frac{m_{I1}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_1}{n_{\max}} + \left( \frac{m_{I2}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_2}{n_{\max}} + \dots + \left( \frac{m_{Ir}}{m_{I\max}} \right)^3 \frac{n_r}{n_{\max}}$$

2, Bd Gambetta

BP 60039

60321 COMPIEGNE CEDEX

Téléphone : 03 44 92 60 00

Télécopie : 03 44 92 60 75



Novembre 2003

Crédit photographique : CETMEF

ISBN : 2-11-094688-1