



2

14.06.2016



CESAM

Journée d'information « Plaisance »

14 juin 2016



cetim

The slide has a white background with a red vertical bar on the left side. At the top right is the CESAM logo, which features a gold anchor inside a hexagonal frame with the word 'CESAM' below it. The main text is centered and written in a bold, red, sans-serif font. At the bottom right, there is a photograph of a white speedboat moving across the water, leaving a white wake. The Cetim logo is located in the bottom left corner of the slide.

3

14.06.2016



Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Francis BLANC



4

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions


14.06.2016

PROBLEMATIQUE:

- ▶ Comment tirer parti d'une défaillance sur une pièce métallique ?

Pour ce faire, il est nécessaire de:

- ▶ Connaître les principales causes de défaillance des pièces métalliques
- ▶ Définir et maîtriser la méthodologie d'investigation
- ▶ Savoir analyser et établir un lien entre les différents résultats des examens mis en œuvre
- ▶ Déterminer l'origine de l'avarie
- ▶ Mettre en place des actions correctives
- ▶ Capitaliser



5

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

SOMMAIRE

- ▶ I – Principales causes de défaillance des pièces métalliques
 - ▶ Vie d'une pièce
 - ▶ Défauts pouvant être rencontrés
 - ▶ Principaux modes de défaillance
- ▶ II – Méthodologie d'investigation en analyse de défaillances
 - ▶ Enquête préliminaire
 - ▶ Inspection de l'équipement
 - ▶ Examens complémentaires
 - ▶ Modélisation et vérification de la conception
 - ▶ Essais
- ▶ III – Cas concrets

14.06.2016



6



I. Principales causes de défaillance des pièces métalliques



05/2016



7

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

DEFINITION : La défaillance (ou avarie)

- ▶ Définition : incapacité d'un composant, d'un assemblage ou d'une machine à fonctionner correctement dans les conditions définies lors de sa conception
 - ▶ **Défaillance d'une fonction physique** : la pièce, l'assemblage ou la machine n'assurent plus du tout leurs fonctions (grippage d'un roulement, rupture d'un arbre de transmission...)
 - ▶ **Non respect des performances attendues** : la pièce, l'assemblage ou la machine n'assure pas l'atteinte des critères de performance initialement définis (durée de vie, limites d'utilisation...)

14.06.2016

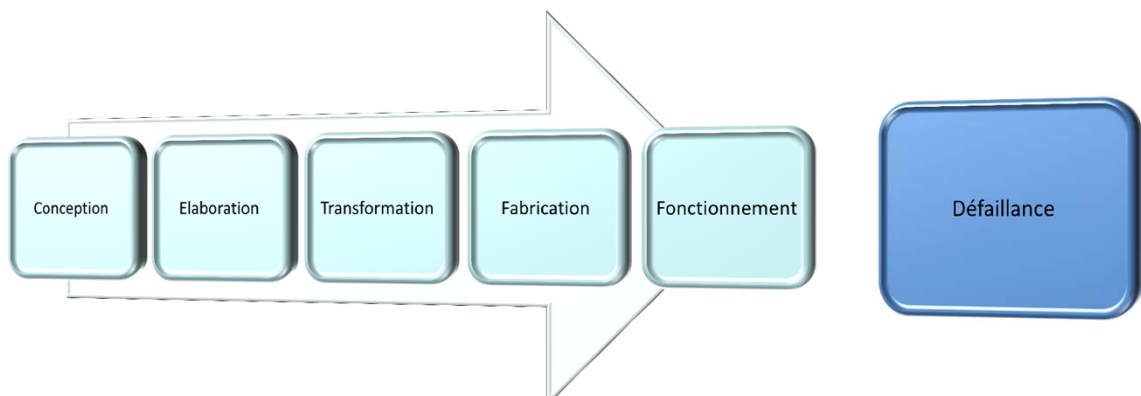


8

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

La vie d'une pièce peut se décomposer en grandes étapes



- ▶ De nombreux scénarii peuvent mener à la défaillance

14.06.2016

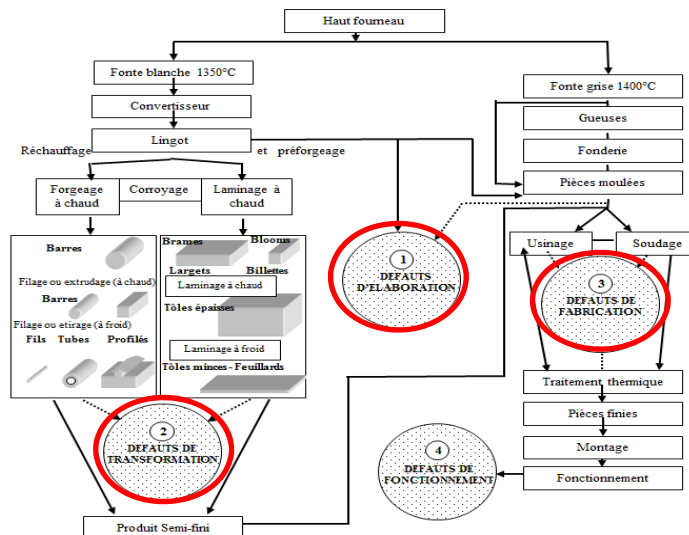


9

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Le processus de fabrication peut conduire à des défauts matière



10

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

DEFINITION : Le défaut matière

- ▶ Définition : Défectuosité produite dans les pièces au cours de leur élaboration, de leur transformation ou de leur fabrication et pouvant nuire à leur intégrité en service.
 - ▶ Classement en trois catégories :
 - ▶ Imperfections dimensionnelles et de formes
 - ▶ Imperfections superficielles
 - ▶ Imperfections internes
 - ▶ Un défaut matière peut être à l'origine d'une défaillance (concentration de contrainte, réduction de section, dépassement de seuil critique...)



11

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Exemple de défaut matière

- ▶ Elaboration (lingot ou fonderie) :
 - ▶ Crique, retassure, soufflure, inclusions, goutte froide, reprise, ségrégation majeure, gerce, gale, ...
- ▶ Transformation (forge ou laminage) :
 - ▶ Crique, dédoubleure, incrustation, tapure, replis, ...
- ▶ Fabrication :
 - ▶ Soudage : fissure, retassure, soufflure, inclusion, manque de fusion, manque de pénétration, rochage, caniveau, morsure, ...
 - ▶ Usinage : crique, écrouissage, tapure, ...
 - ▶ Traitement thermique : tapure de trempe, crique, contamination, décarburation, oxydation interne, ...
 - ▶ Traitement de surface : manque d'adhérence, feuilletage, rugosité, ...

14.06.2016



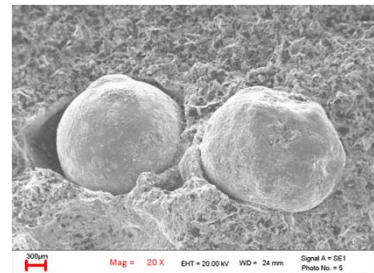
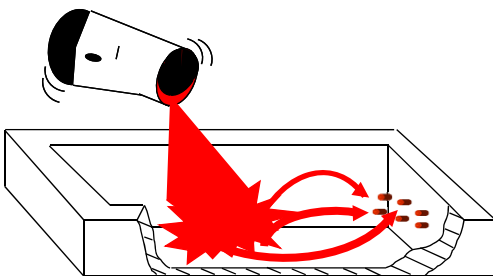
12

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Exemple de défaut d'élaboration

- ▶ Goutte froide :
 - ▶ Origine : Gouttelette de métal qui au cours de la coulée a été projetée contre la paroi du moule, s'est solidifiée rapidement, et n'est soudée qu'imparfaitement à la surface de la pièce.
 - ▶ Forme : défaut volumique (gouttelette).
 - ▶ Position : Sur la surface des pièces coulées.



14.06.2016

13

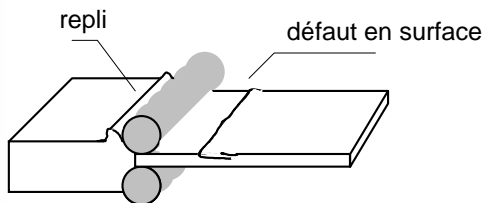
CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Exemple de défaut de transformation

► Repli matière :

- Origine : Replis oxydés en peau survenus lors du forgeage ou du laminage. Discontinuité la plupart du temps oxydée se développant en surface des produits.
- Position : en surface.



14.06.2016

14

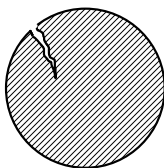
CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

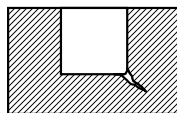
Exemple de défaut de traitement thermique

► Tapure de trempe :

- Origine : fissuration se formant avec une cinétique rapide lors du refroidissement par trempe. Occasionnée par des problèmes d'accommodation de variations dimensionnelles dues à des transformations structurales (austénite-martensite).
- Conditions favorables à l'apparition :
 - Fluide de trempe trop sévère
 - Arêtes vives
 - Mauvais état de surface ...



Exemple de tapure



Exemple de crique



14.06.2016

15

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Exemple de défaut de fonctionnement (ou mécanisme défaillant)

- ▶ Définition : Evènement résultant de processus physique ou chimique entraînant la défaillance
- ▶ Origines probables (liste non exhaustive) :
 - ▶ Conditions d'utilisation (solicitations mécaniques, environnement...) :
 - ▶ mal évaluées (conception)
 - ▶ non conformes aux prévisions (milieu agressif)
 - ▶ ayant évolué dans le temps (évènement extérieur)
 - ▶ Peut être la conséquence d'un défaut matière



14.06.2016

16

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Principaux modes de défaillance :

- ▶ Usure
- ▶ Fatigue de contact
- ▶ Corrosion
- ▶ Fragilisation
- ▶ Déformation
- ▶ Rupture



14.06.2016

17

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

USURE



Erosion



Cavitation



Adhésion/Grippage



Fatigue de contact



Abrasion

14.06.2016

CETIM

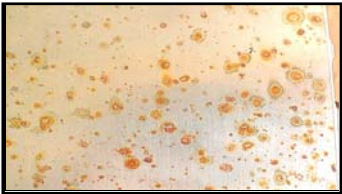
CETIM

18

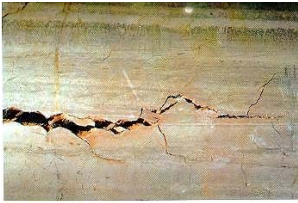
CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions


CORROSION



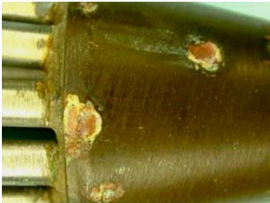
Corrosion par piqûres




Corrosion sous contraintes




Corrosion généralisée



Corrosion sélective



Erosion corrosion



Fatigue-corrosion

14.06.2016

CETIM

CETIM

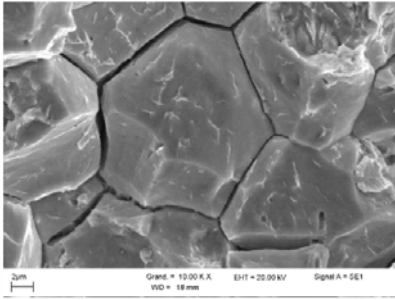
19

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

FRAGILISATION

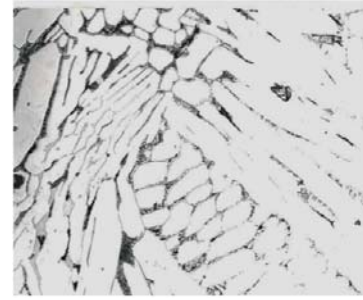
14.06.2016



Fragilisation par l'hydrogène



Fragilisation par les métaux liquides



Fragilisation par des composés intermétalliques



20

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

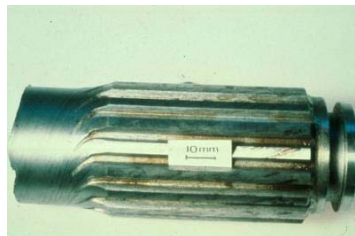
Défaillance des structures métalliques et des transmissions

DEFORMATION

14.06.2016



Fluage



Déformation plastique



21

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

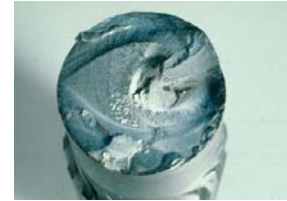
RUPTURE



Rupture brutale fragile



Rupture brutale semi-fragile



Rupture brutale ductile



Rupture par fatigue



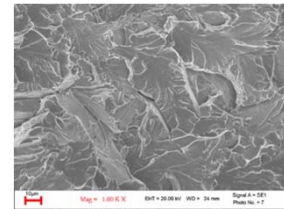
Fatigue thermique



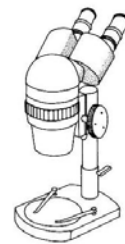
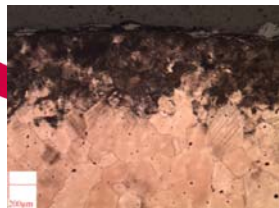
14.06.2016

22

05.2016



II. Méthodologie d'investigation en analyse de défaillance



23

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

Phase 1 : Enquête préliminaire

Phase 2 : Inspection de l'équipement

Phase 3 : Analyses complémentaires

Phase 4 : Modélisation et vérification de la conception

Phase 5 : Essais d'un équipement

Phase 6 : Rapport d'évaluation

Phase 7 : Modifications et nouvelles solutions

- ▶ Recueil et validation des données d'entrée
- ▶ Examens, mesures et contrôles par des spécialistes
- ▶ Calculs théoriques basés sur l'expérience métier
- ▶ Conception de banc d'essais et campagne d'essais
- ▶ Préconisations pour maîtriser l'exploitation
- ▶ Reconception et proposition de solutions

14.06.2016



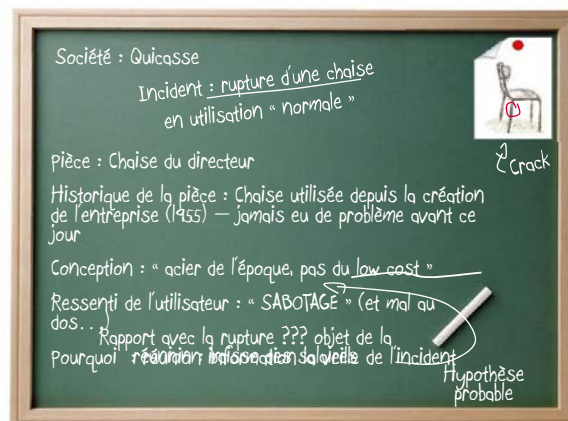
24

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 1 : Enquête préliminaire

- ▶ Objectif: Recueillir les informations nécessaires pour orienter les analyses et définir les examens complémentaires utiles et réalisables.



25

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 1 : Enquête préliminaire

- ▶ Informations et éléments potentiellement utiles sur les pièces défailtantes:
 - ▶ Etablir les premiers constats et cartographier les dommages
 - ▶ Récupérer le dossier de conception et fabrication (plans, matériaux et traitements thermiques, gamme de fabrication et contrôles qualité...)
 - ▶ Réaliser des prélèvements
- ▶ Reconstitution avec le client de l'historique de vie en fonctionnement de l'équipement et l'analyse exhaustive des spécifications techniques, des conditions de service ou de défaillance :
 - ▶ Historique de chargement (nombre de cycles / spectre de charges)
 - ▶ Grosses opérations de maintenance / Modifications
 - ▶ Avaries notables / Immobilisations

14.06.2016



26

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 1 : Enquête préliminaire

- ▶ Vérification des hypothèses initiales de calculs et dimensionnements en rapport avec les conditions d'utilisation
- ▶ Visite sommaire de l'équipement avec le client
- ▶ Note de synthèse - constats et analyses :
 - ▶ Evaluation du niveau d'investigation à mettre en œuvre
 - ▶ Elaboration et planification du programme d'inspection de l'équipement et du déroulement de la prestation
- ▶ Garder le recul par rapport aux problèmes rencontrés et ne pas se focaliser uniquement sur les composants défailtants

14.06.2016



27

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE intermédiaire : Précautions avant analyses

- ▶ Repérer les différents éléments
- ▶ Eviter les contacts entre les faciès de rupture



14.06.2016

28

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE intermédiaire : Précautions avant analyses

- ▶ Toujours réaliser une première observation détaillée avant nettoyage
- ▶ Conserver un ou plusieurs échantillons de lubrifiant ou de dépôt



14.06.2016

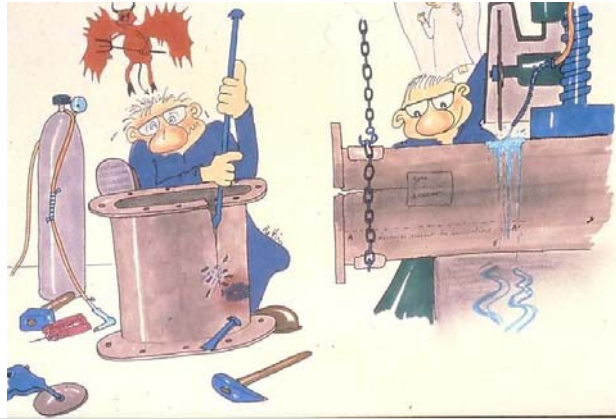
29

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE intermédiaire : Précautions avant analyses

- ▶ Choisir des moyens adaptés pour manutentionner, prélever, nettoyer, ouvrir les faciès de rupture...



14.06.2016

30

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 2 : Inspection de l'équipement

- ▶ Objectifs:
 - ▶ Avoir une vue globale d'ensemble du problème
 - ▶ Identifier les points importants
 - ▶ Définir les éléments à expertiser
 - ▶ Déterminer les compétences nécessaires
 - ▶ Mettre de côté les éléments secondaires ou consécutifs.



14.06.2016

31

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 2 : Inspection de l'équipement

Réalisée exclusivement par des spécialistes sur la base de l'enquête préliminaire

▶ Examens morphologiques visuels :

- ▶ Examen visuel global de l'ouvrage ou de l'équipement
- ▶ Analyse morphologique des composants
- ▶ Inspection visuel à l'endoscope
- ▶ Examen au microscope portatif
- ▶ Caractérisation des phénomènes d'endommagement



14.06.2016

32

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

▶ Objectifs:

- ▶ Confirmer ou infirmer les hypothèses résultant des phases précédentes



14.06.2016

33

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

- ▶ Contrôles dimensionnels des pièces ou jeux fonctionnels
- ▶ Contrôles non destructifs
- ▶ Examens au Microscope Electronique à Balayage
- ▶ Analyses élémentaires de surface
- ▶ Analyse chimique
- ▶ Examens métallographiques
- ▶ Essais mécaniques, mesures de dureté
- ▶ Mesure des contraintes résiduelles
- ▶ Analyse vibratoire
- ▶ ...



14.06.2016

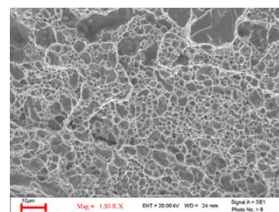
34

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

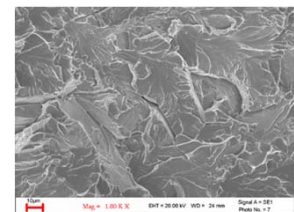
Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

- ▶ Examens au microscope électronique à balayage :
 - ▶ Objectif: visualiser à fort grossissement les faciès de rupture pour:
 - ▶ Identifier le(s) mode(s) de décohesion
 - ▶ Rechercher la zone d'amorçage



Faciès à cupules



Faciès clivé



14.06.2016

35

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

► Analyse chimique :

- Objectif: Déterminer la composition chimique du matériau pour vérifier la conformité vis-à-vis du cahier des charges ou des normes en vigueur

	Echantillon	Nuance attendue X46Cr13 (n° 1.4034) suivant EN 10088-3
Carbone %	0,37 ± 0,01*	0,43 – 0,50 ± 0,02**
Manganèse %	0,87	≤ 1,00
Silicium %	0,35	≤ 1,00
Soufre %	0,016	≤ 0,030
Phosphore %	0,011	≤ 0,040
Nickel %	0,17	-
Chrome %	13,26	12,5 – 14,5
Molybdène %	0,051	-
Cuivre %	0,11	-
Fer %	Cplut à 100%	Base



14.06.2016

36

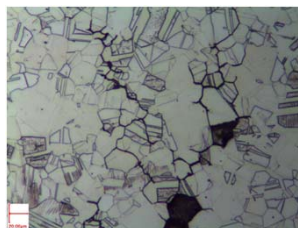
CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

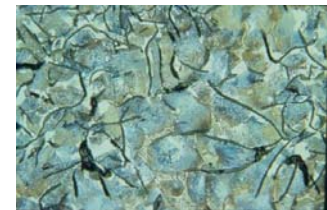
PHASE 3 : Analyses complémentaires

► Examens métallographiques :

- Objectif:
 - Vérifier la conformité métallurgique des pièces avant et après attaque chimique,
 - Visualiser des défauts de surface
 - Caractériser le mode de propagation de fissures



Fissures ramifiées dans un laiton, observées après attaque chimique



Structure métallographique d'une fonte grise lamellaire à matrice perlitique



14.06.2016

37

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

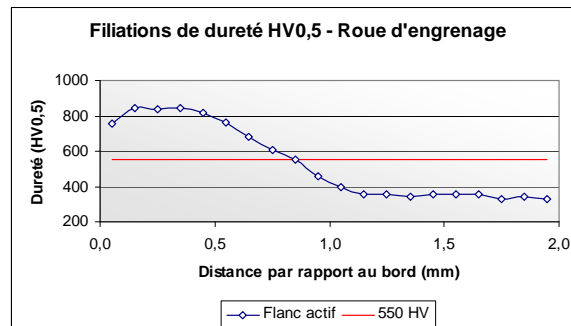
Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

► Mesures de dureté:

► Objectif:

- Evaluer les caractéristiques mécaniques dans une zone précise,
- Mesurer l'épaisseur d'un traitement superficiel par filiation.



14.06.2016

38

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 3 : Analyses complémentaires

► Essais mécaniques:

- Objectif: Vérifier les caractéristiques mécaniques statiques d'un matériau ($R_{p0,2}$, R_m , $A\%$).



14.06.2016

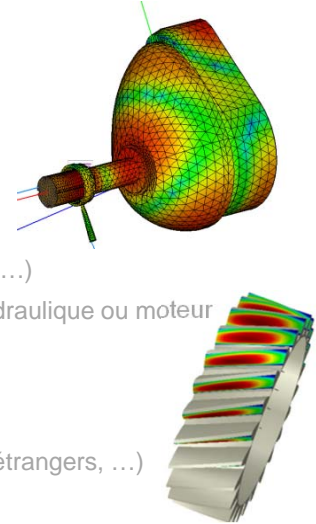
39

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 4 : Modélisation et vérification de la conception

- ▶ Objectif : établir un modèle représentatif
 - ▶ Reproduire les défaillances par le calcul
 - ▶ Utiliser le modèle pour proposer des solutions pérennes
- ▶ Modélisation de l'équipement :
 - ▶ Modélisation des structures
 - ▶ Modélisation des cinématiques (engrenages, roulements...)
 - ▶ Intégration comportement moteur thermique, moteur hydraulique ou moteur électrique avec électronique de commande
 - ▶ Prise en compte les influences extérieures
 - ▶ Effet du châssis, des supports
 - ▶ Effets liés au fonctionnement (chocs, passage de corps étrangers, ...)



14.06.2016

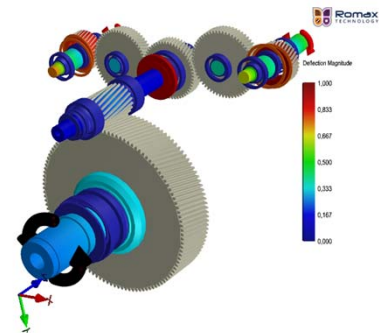
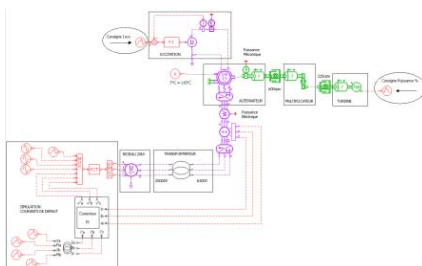
40

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 4 : Modélisation et vérification de la conception

- ▶ Vérification du dimensionnement de l'équipement
 - ▶ Identification des zones de concentration de contraintes
 - ▶ Capacité de charge en fatigue
 - ▶ Analyse torsionnelle
 - ▶ Résolution dynamique



14.06.2016

41

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 5 : Essais d'un équipement

- ▶ Conception du banc d'essais :
 - ▶ Analyse et compréhension des contraintes de fonctionnement et des performances attendues
 - ▶ Définition du protocole d'essai et d'un cycle type d'essais
 - ▶ Conception du banc d'essai (mécanique, hydraulique, pneumatique, électrique et automatisme)

14.06.2016



42

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 5 : Essais d'un équipement

- ▶ Réalisation des essais :
 - ▶ Pilotage du banc et réalisation de la campagne d'essais
 - ▶ Mesures de comportement statique ou dynamique (sous charge et sous environnement thermique)
 - ▶ Mesures de performance (évaluation des pertes, du rendements et des fonctions transfert)
 - ▶ Caractérisation en fatigue (courbe d'endurance ou fiabilité)
- ▶ Expertises des pièces détériorées en cours et/ou à la fin des essais

14.06.2016



43

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 6 : Rapport d'évaluation

- ▶ Evaluation de la criticité des :
 - ▶ Zones sensibles
 - ▶ Désordres constatés
- ▶ Préconisations de réparation / renforcement
- ▶ Proposition de conditions d'exploitation dégradée
- ▶ Définition / réaménagement des méthodologies de surveillance des conditions d'exploitation
- ▶ Prescription / optimisation du programme de maintenance
- ▶ Evaluation de la durée de vie résiduelle selon différents scénarii de fonctionnement



14.06.2016

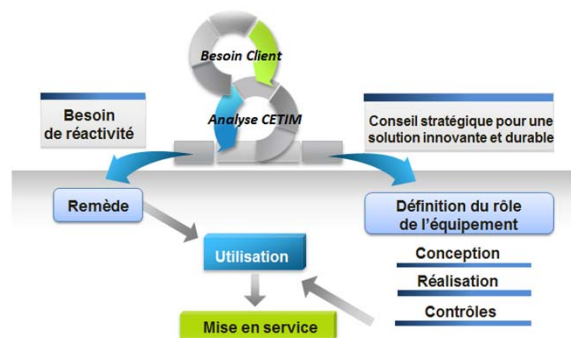
44

CESAM – Journée d'information « Plaisance »

Défaillance des structures métalliques et des transmissions

PHASE 7 : Modifications et nouvelles solutions

- ▶ Avis et recommandations amenant une solution durable
- ▶ Il est possible de revoir ou de reconcevoir le système
- ▶ Cette approche globale augmente la performance de l'installation



14.06.2016

Défaillance des structures métalliques et des transmissions



Plus qu'un simple diagnostic, l'analyse de défaillance, c'est

- ▶ Une méthode et des moyens appropriés de travail
- ▶ Une vision globale de la défaillance
- ▶ Des connaissances spécifiques et une large expérience
- ▶ Des conseils d'amélioration, des recommandations et la reconception