



More than a simple diagnosis

Analyse de défaillance

Allez au-delà du simple diagnostic avec les experts Cetim

romain.barrellon@cetim.fr

1

Présentation du CETIM

Centre technique des industries de la mécanique

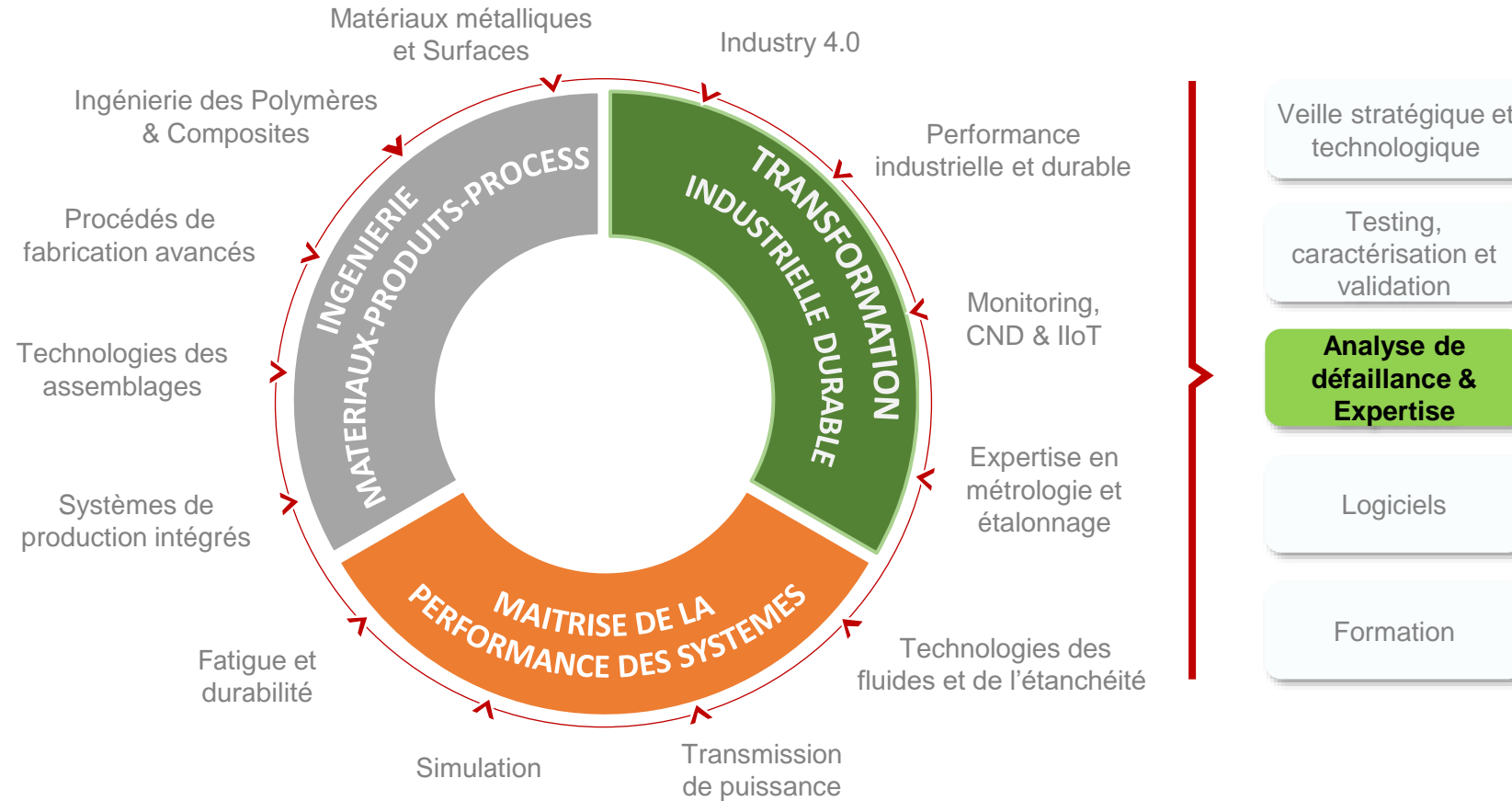
Groupe international d'ingénierie, créé en 1965, le Cetim, Centre technique français de l'industrie mécanique, soutient l'innovation et la compétitivité des entreprises.

Principal partenaire technologique de l'**industrie 4.0**, du déploiement numérique et de la **durabilité** grâce à ses compétences pluridisciplinaires et à sa capacité unique de **recherche et développement**.



Nos domaines de compétence

Capacités uniques en matière de R&D et compétences pluridisciplinaires



Cetim Academy® : Se former pour le présent, préparer l'avenir

■ 2 chaînes de valeurs sur l'analyse de défaillance et l'expertise

■ Dédiée aux experts (assurance et judiciaire)

■ Pour les industriels :

- Qui disposent d'une structure ou d'un laboratoire traitant leurs analyses en interne, et qui souhaitent améliorer les compétences de leur personnel en termes de méthodologies et acquérir des connaissances techniques
- Qui n'ont pas de laboratoire mais qui souhaitent mieux comprendre l'expertise et acquérir des connaissances techniques sur les matériaux, les fonctions et les produits.



+500

Sessions de formations

+250

experts / formateurs

+ 95.000

Heures de formation par an

+ 7.000

Stagiaires par an

Visitez notre site web



ÉDITION 2024

LES FORMATIONS
CETIM ACADEMY

600 formations pour l'industrie d'aujourd'hui et de demain !



2

Les enjeux dans l'industrie

Quand faire appel à l'analyse de défaillance ?

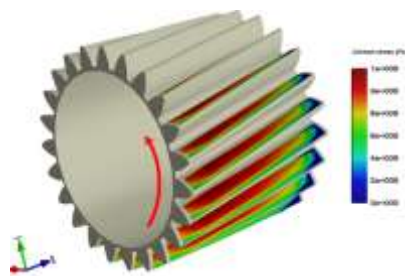
- Pas uniquement lorsqu'une pièce est cassée, mais aussi pour :
 - un dysfonctionnement
 - une non-performance (rendement insuffisant...)
 - une usure anormale
 - un endommagement par fatigue (Fatigue-contact, Fatigue-corrosion)
 - une variation de l'apparence ou des caractéristiques
 - une anomalie de fonctionnement (bruit, vibration....)
 - un risque de rupture (fissure, corrosion...)
 - une suspicion de défaut (indication CND, ...)
 - une levée de doute
 - une non-conformité (détectée par Sce qualité)
 - un mélange de pièces
 - une conséquence d'accident, d'incendie, de déformation

Produit
Composant
Équipement
Process
Système



Cetim, l'analyse de défaillances d'un coup d'oeil

- **+50 ans d'expérience**, acteur de référence en France.
- **+200 experts** techniques dans le monde
- **+1 500 expertises** multisectorielles réalisées chaque année
- **+25 laboratoires** dotés d'équipements innovants et de nombreuses accréditations Cofrac / EN ISO 17025
- **+ 500 formations** Cetim Academy®, dont **+35 dédiées à l'analyse de défaillance**



Plus de 1 500 expertises multisectorielles par an

Mobilité

- Automobile: GROUPE RENAULT, PSA, VOLVO TRUCKS
- Aéronautique: SAFRAN, DAHER
- Ferroviaire: ALSTOM, Faiveley, SNCF
- OffRoad & autres: MANITOU, POCLAIN

Global énergie

- Oil & Gas: TechnipFMC, TotalEnergies, PERENCO
- Nucléaire: EDF, orano, framatome
- Autres: ENGIE, CAR, suez, GE

Autres Industries

- Chimie, Pharmacie, Santé: SANOFI, Air Liquide, GE, OCP
- Défense: nexter, THALES, MBDA, NAVAL GROUP, DASSAULT AVIATION
- Naval: NAVAL GROUP, CHANTIERS DE L'ATLANTIQUE, CMA SHIPS
- Process: ArcelorMittal, BOSCH, ENIM

Assurances

MAAF, gan, Groupama, MAIF, SMABTP, MACIF

Cabinets d'expertises

Charlevoix, naudet, SOCABAT, cpd, Polvexpert, VRSovering, stelliant, EQUAD, Groupe SARETEC, 3C, ERGET GROUPE

Autorités

BEA (Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la Sécurité de l'Aviation Civile), MINISTÈRE DE LA JUSTICE (Liberté, Égalité, Fraternité), POLICE NATIONALE, Gendarmerie

Une expertise mécanicienne qui va au-delà de l'analyse du matériau

Matériaux concernés

- ▶ Matériaux métalliques
- ▶ Composites, polymères
- ▶ Elastomères,
- ▶ Peintures
- ▶ Céramiques / Verres

Exemples de process

- ▶ Transmissions de puissance
- ▶ Usinage
- ▶ Mise en forme / transformation des métaux
- ▶ Procédés industriels



Exemples de composants et équipements

- ▶ Equipements sous pression
- ▶ Moyens de levage / manutention
- ▶ Machines tournantes
- ▶ Composants mécaniques
- ▶ Structures mécaniques
- ▶ Equipements fluidiques (Tuyauterie, Pompes, robinetterie ...)

Exemples de fonctions

- ▶ Assemblages dont multi-matériaux
- ▶ Etanchéité
- ▶ Pollution particulaire
- ▶ Lubrification
- ▶ Revêtements et Protections



L'analyse de défaillances : bien plus qu'un diagnostic

- Nos experts vous accompagnent jusqu'à la mise en œuvre de solutions correctives.
- Les experts du Cetim déploient **des méthodologies éprouvées** basées sur plus de 50 ans d'expérience :
 - **Diagnostic sur site** dans des environnements variés et éventuellement prélèvement d'échantillons,
 - **Investigations sur site** (CND, métrologie, instrumentation, etc.) et analyses en laboratoire (physico-chimie, fractographie, ...)
 - Essais visant à **reproduire la défaillance** ou l'endommagement
 - **Simulation numérique** (éléments finis, CFD, etc.) pour comprendre ou recréer les situations d'endommagement
 - Identification de **solutions** et fourniture d'un rapport détaillé avec des conclusions documentées, y compris notre **avis technique et nos recommandations**
 - Mise en œuvre et suivi des **actions correctives**
 - **Formations**

Cetim, quelques liens intéressants

- Site Cetim : <https://www.cetim.fr/>
- Site Cetim Engineering : <https://www.cetim-engineering.com/>
- Page Analyse de Défaillance : <https://www.cetim.fr/expertises/l-analyse-de-defaillance/>
- Vidéo Cetim : <https://www.youtube.com/watch?v=JXm7Knt0Q2k>
- Formations Cetim : <https://www.cetim.fr/formation>
- Formations en Analyses de défaillance : <https://www.cetim.fr/formation/Chaines-de-valeur/analyse-de-defaillances>



3

Activités



Matériaux métalliques

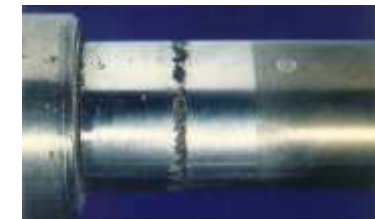
■ Matériaux concernés

- Tous types de métaux : Aciers, fontes, cuivre, alliage-aluminium, titane,....
- Traitements de surface et revêtements
- Corrosion et protection anti-corrosion



■ Compétences

- Expertise du matériau
- Détermination des causes des dommages (rupture, usure, corrosion...)
- Action corrective et préventive
- Nocivité du défaut
- Durée de vie résiduelle
- Reconception



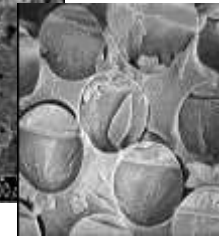
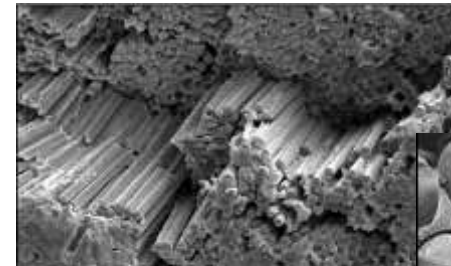
Composites, polymères et matériaux organiques

■ Matériaux concernés

- Composites à matrices organiques
- Polymères, plastiques et élastomères
- Composites à matrices céramiques
- Verres
- Matériaux tissés
- Adhésifs

■ Compétences

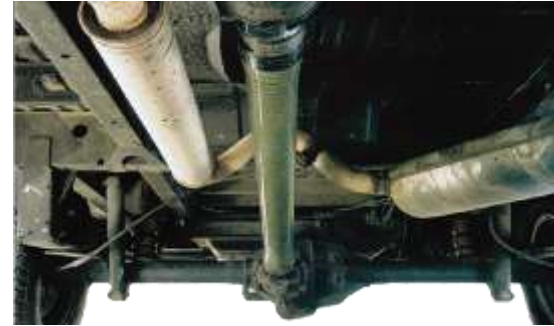
- Résistance aux intempéries / durabilité
- Compréhension des mécanismes de la détérioration : rupture de fibres, décollage, délaminages, etc..
- Nocivité des défauts : mauvais alignement de fibres, porosités, etc.
- Contraintes internes
- Contrôles et réparations



Assemblages

■ Technologies concernées

- Vissage
- Rivetage
- Soudage
- Collage

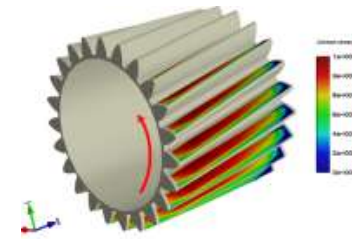


■ Compétences

- Expertise des composants, fonctions, structures.
- Déterminations des origines de la défaillance (rupture soudaine, fatigue, corrosion,...)
- Action corrective et préventive
- Aide à la re-conception de la fonction assemblage
- Estimation de la durée de vie résiduelle
- Reconception
- Recommandations et procédures de réparation
- Procédures d'audit pour l'optimisation des programmes de maintenance



Transmissions de puissance



■ Activités concernées

- Analyse des défaillances ou du dysfonctionnement du composant aux systèmes
- Modélisation complète de la ligne de transmission de puissance,
- Analyse du système sous charge et des phénomènes dynamiques.
- Expertise sur site client.



■ Compétences

- Prévisions des défaillances à partir de calculs.
- Modes de dégradation.
- Définition de solutions palliatives.
- Durabilité et maintenance prédictive.
- Calcul de durée de vie résiduelle.



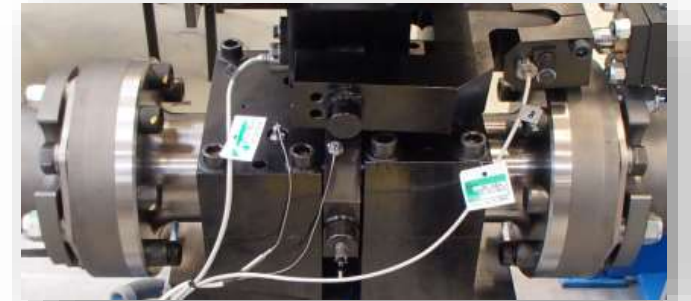
Machines tournantes

■ Activités concernées

- Approches multi-physiques pour le diagnostic des vibrations

■ Compétences

- Instrumentation sur site ou en labo :
 - Vibrations, bruits
 - Paramètres électriques (tension, courant...)
 - Déformations (déplacement, jauges d'extensométrie)
 - Émission acoustique
 - Couple, vitesse
 - Température
 - Efforts...



Lubrifiants / graisses

■ Activités concernées

- Analyses des lubrifiants dans le cadre de défaillances de systèmes mécaniques (roulements, engrenages, transmissions, systèmes hydrauliques, pompes et compresseurs, joints,)



Graisses



Fluides de coupe
Huiles hydrauliques
Huiles moteurs

■ Compétences

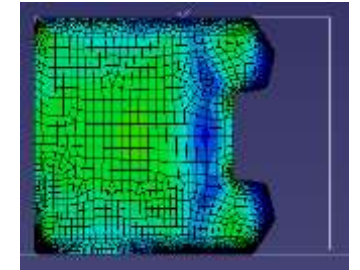
- Vérification de l'adéquation du lubrifiant par rapport à l'application
- Contrôle de l'état du lubrifiant par rapport à ses caractéristiques initiales (vieillessement)
- Identification de pollution/particules dans les lubrifiants en vue d'analyser les causes de défaillance



Etanchéité

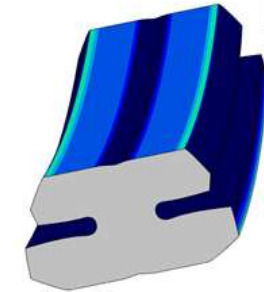
■ Activités concernées

- Analyses des défaillances des systèmes d'étanchéité, des joints.
- Problèmes liés aux fuites de fluides (liquide ou gaz)



■ Compétences

- Mise en œuvre de techniques de détection de fuites
- Localisation et quantification de fuites
- Analyse des dégradations
- Analyse des matériaux et analyses dimensionnelles
- Outils de modélisation et de dimensionnement
- Mise en œuvre d'essais spécifiques
- Durabilité et évaluation de durée de vie



Peinture

■ Activités concernées

- Analyse de défaillance d'éléments peints ou revêtus.



■ Compétences

- Détermination de la (ou les) cause(s) de problématiques liées à des équipements peints: Décollement, corrosion, cloquage, aspect, vieillissement, faïençage.....
- Caractérisation des endommagements (Microscopie, polluants, couches, épaisseurs, état de surface du support ...)
- Analyses physico-chimiques: Qualité des produits, essais d'adhérence, vérification de la cuisson
- Reproduction de la défaillance en laboratoire sur échantillon.
- Diagnostic ou audits sur site, analyse du process.
- Préconisations de réparations



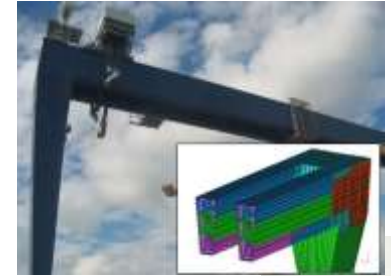
Durée de vie résiduelle et extension de la durée de service

■ Activités concernées

- Structures métalliques (ponts, grues, levage et manutention, tours)
- Equipements sous pression
- Équipements industriels (y compris pétrole et gaz, énergie)
- Composants mécaniques

■ Compétences

- Validation de la conception et du dimensionnement
- Évaluation de la gravité des zones critiques
- Exigences liées aux réparations / au renforcement / à la reconception / au maintien en état
- Durée de vie résiduelle estimée
- Procédure d'audit en vue de l'optimisation des programmes de maintenance
- Analyse des modes de défaillance et de la dangerosité du défaut : fatigue – rupture fragile – fissures - corrosion



Réseau et systèmes fluidiques

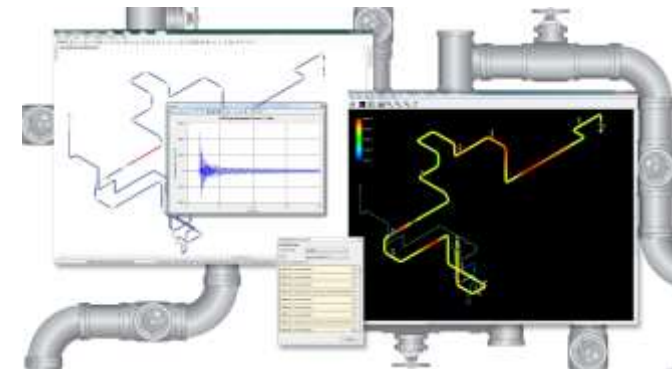
■ Activités concernées

- Réseaux fluidiques



■ Compétences

- Approche globale réseau: la pièce rompue est rarement responsable de la défaillance.
- Diagnostic thermo-hydraulique
- Simulation fluide « 1D » de l'évènement (calcul rapide)
- Détermination des efforts
- Simulation de coups de bélier
- Pertes de charge
- Propositions d'actions correctives



Equipements sous pression

■ Activités concernées

- Analyse des défaillances depuis les accessoires jusqu'aux équipements sous pression
- Règlementations, codes et normes applicables aux équipements sous pression

■ Compétences

- Prévisions des défaillances à partir de calculs
- Durabilité et maintenance prédictive
- Frangibilité des bacs de stockage
- Modes de défaillance
- Calcul des durées de vie résiduelles



4

Exemples industriels

A

Exemple de processus d'analyse

Cas d'une rupture

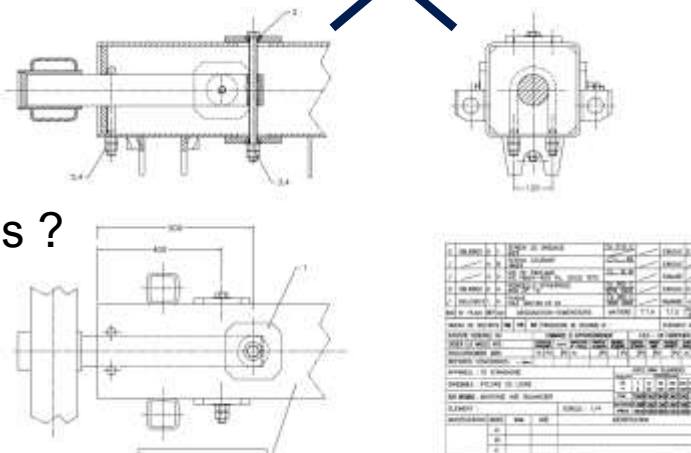
Caractérisation dans le cadre d'une rupture

Objectif : Obtenir un maximum d'éléments contextuels pour écarter des pistes

Contact client
- Demande de données

1

Pièces disponibles ?



~~Plan/dimensions~~



Environnement

Matériau

Revêtement

Peinture/huile



~~Mode de fabrication~~

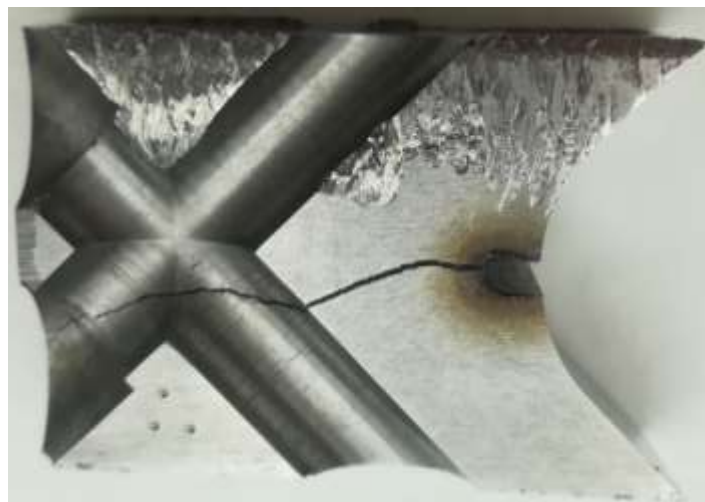
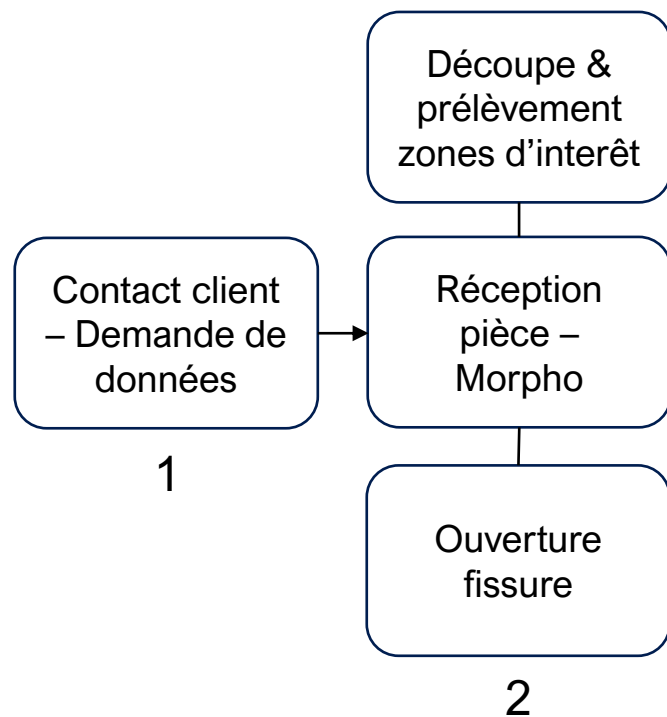
~~Traitements thermiques~~



Cycle de vie

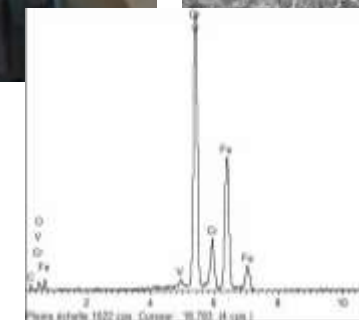
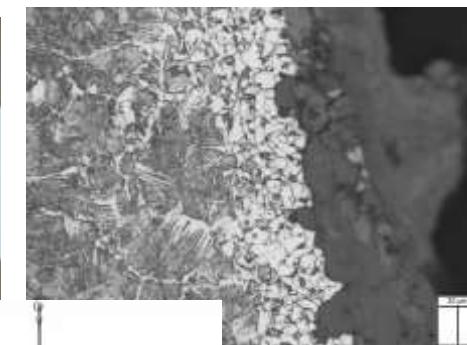
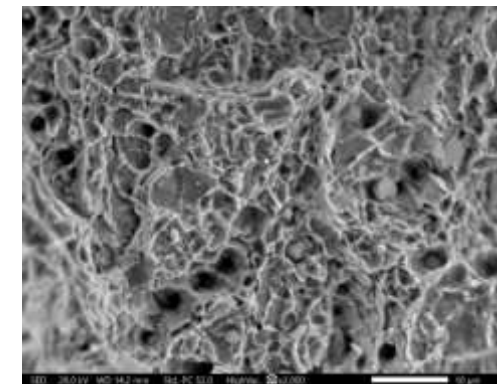
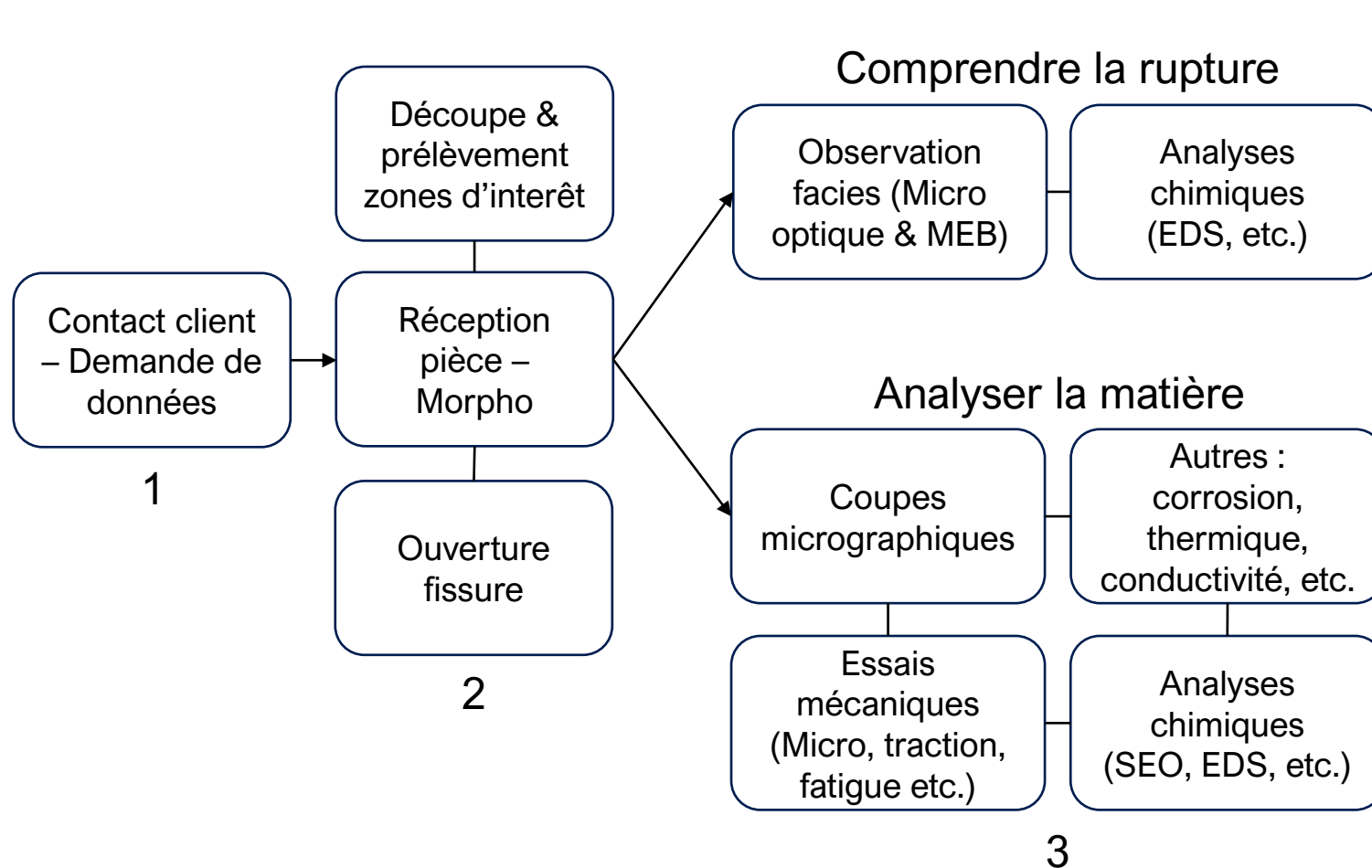
Processus d'une analyse

Objectif : Sélectionner les zones d'intérêt et l'ensemble des éléments à analyser



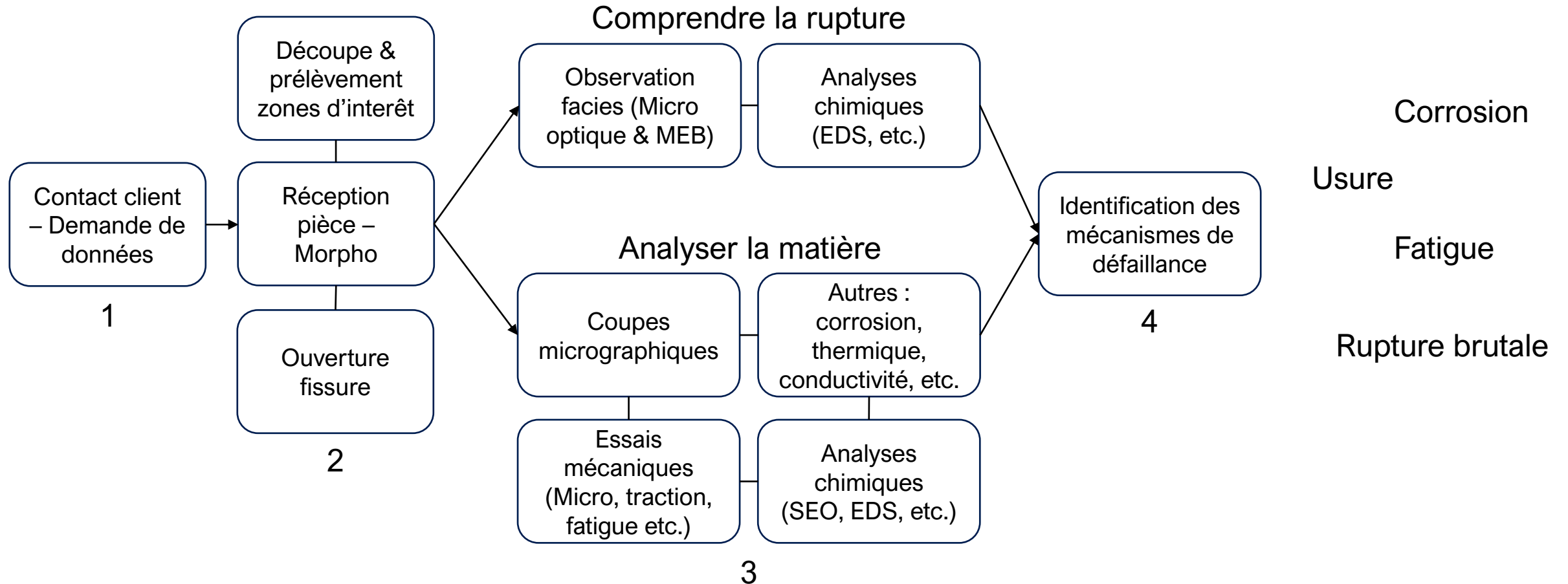
Processus d'une analyse

Objectif : Obtenir un maximum de données pour identifier des mécanismes possibles et en écarter d'autres



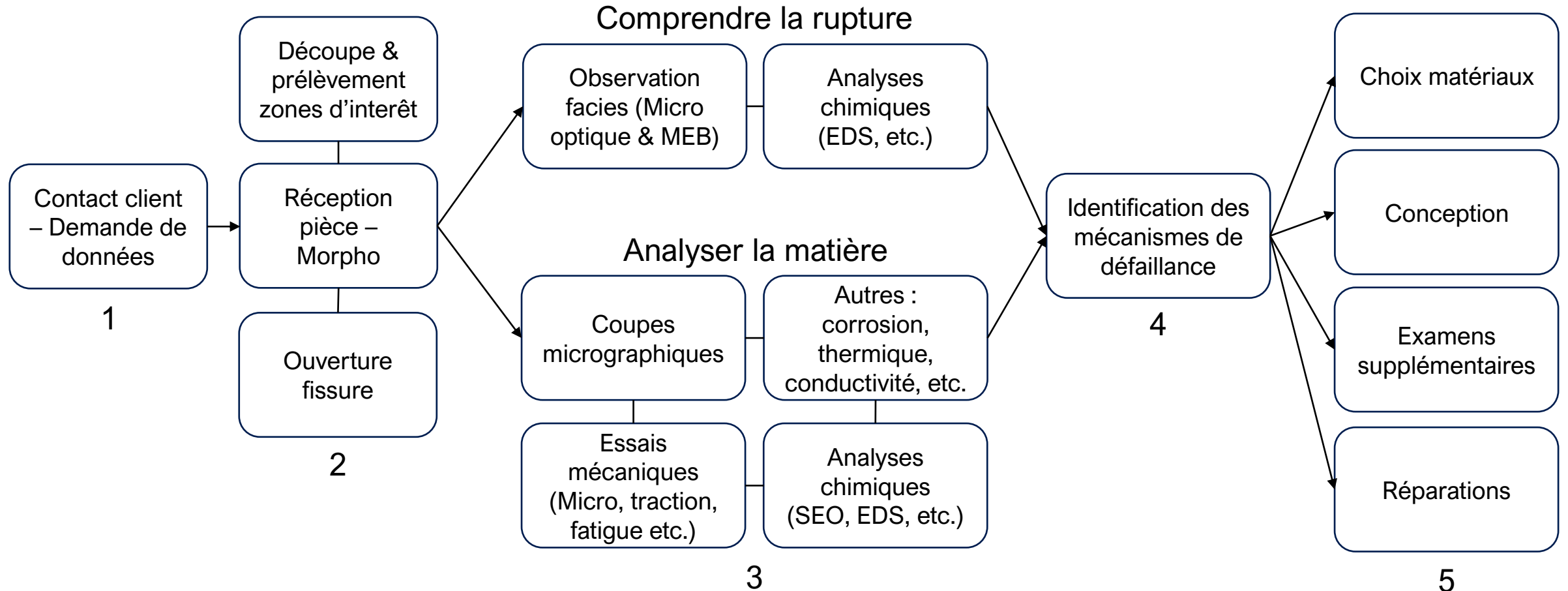
Processus d'une analyse

Objectif : Identifier les causes de la défaillance.



Processus d'une analyse

Objectif : Apporter au client/interlocuteur des pistes pour la résolution de la défaillance.



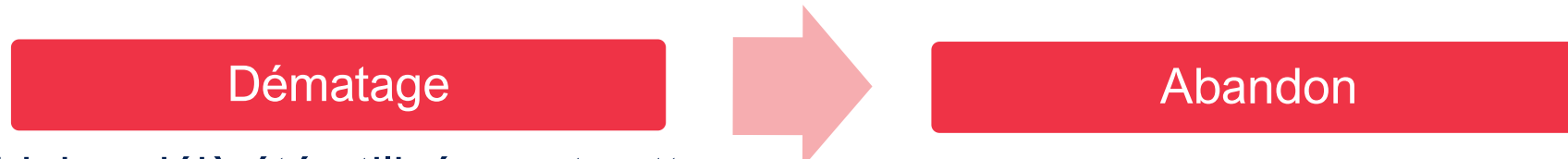
B

**Cas d'application sur
un ridoir de hauban**

Analyse de la rupture d'un ridoir de hauban de mât d'un voilier.

■ Exposé du problème :

- Rupture d'un ridoir de hauban de mât de voilier après 7 heures de course (Route du Rhum)



- Ce ridoir a déjà été utilisé avant cette course.
- Cette pièce est en acier inoxydable 316L

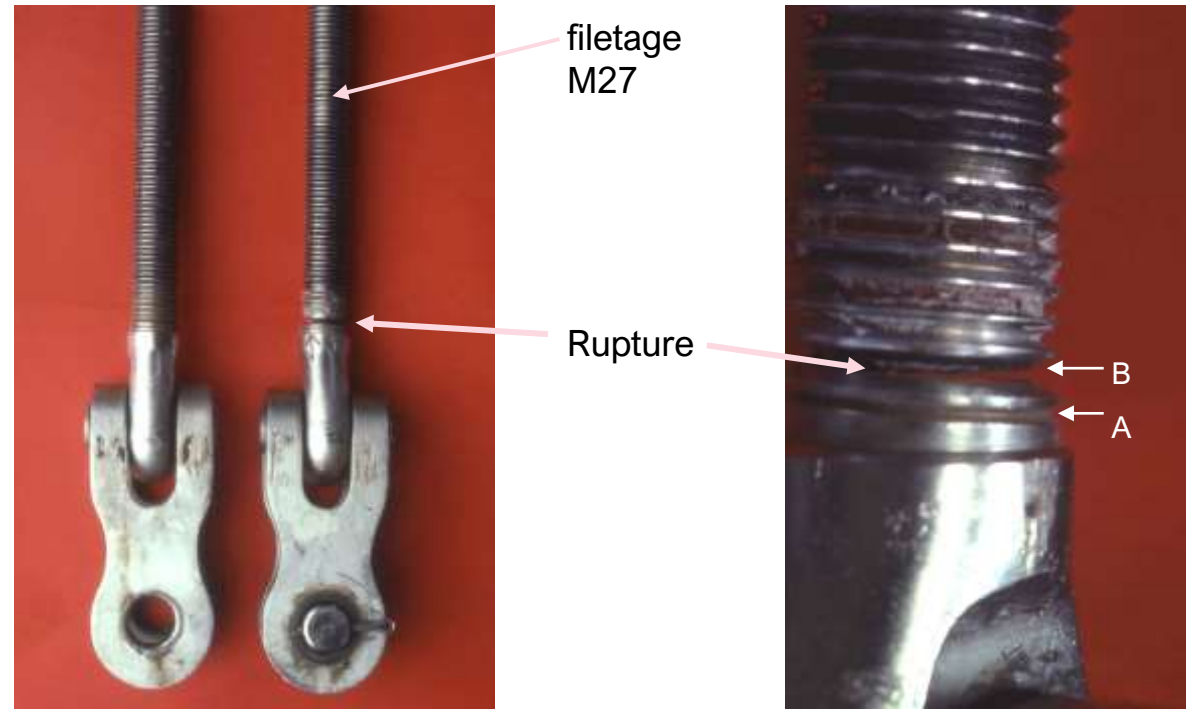
■ Objectifs de l'analyse de la défaillance :

- Caractériser la rupture
- Définir si le ridoir était pré fissuré avant la course
- Proposer des actions correctives pour améliorer la tenue en service



Processus de l'analyse

- Analyses et examens réalisés :
 - Analyse morphologique de la rupture
 - Examens microfractographiques (MEB)
 - Analyse chimique
 - Examens micrographiques
 - Calcul

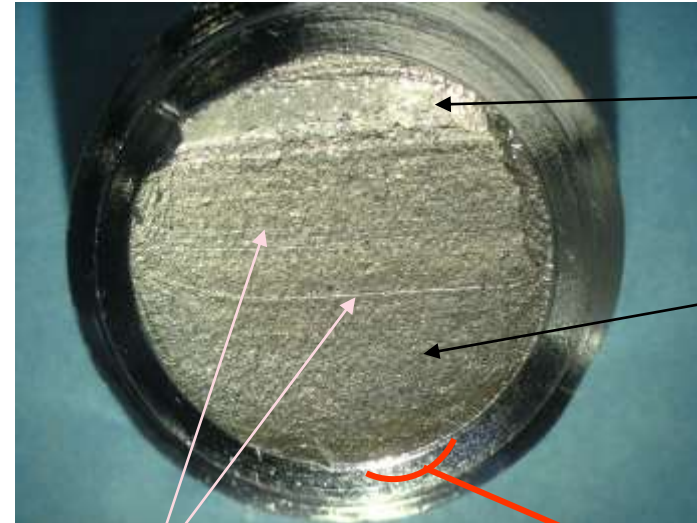


Analyse morphologique de la rupture

État réception



Examen après nettoyage du faciès



Lignes
frontales

Amorce
en fond
de filet

2^{ème} zone de
rupture finale
brutale

1^{ère} zone de
fissuration
progressive

Rupture de fatigue en traction

Examens microfractographiques (MEB)

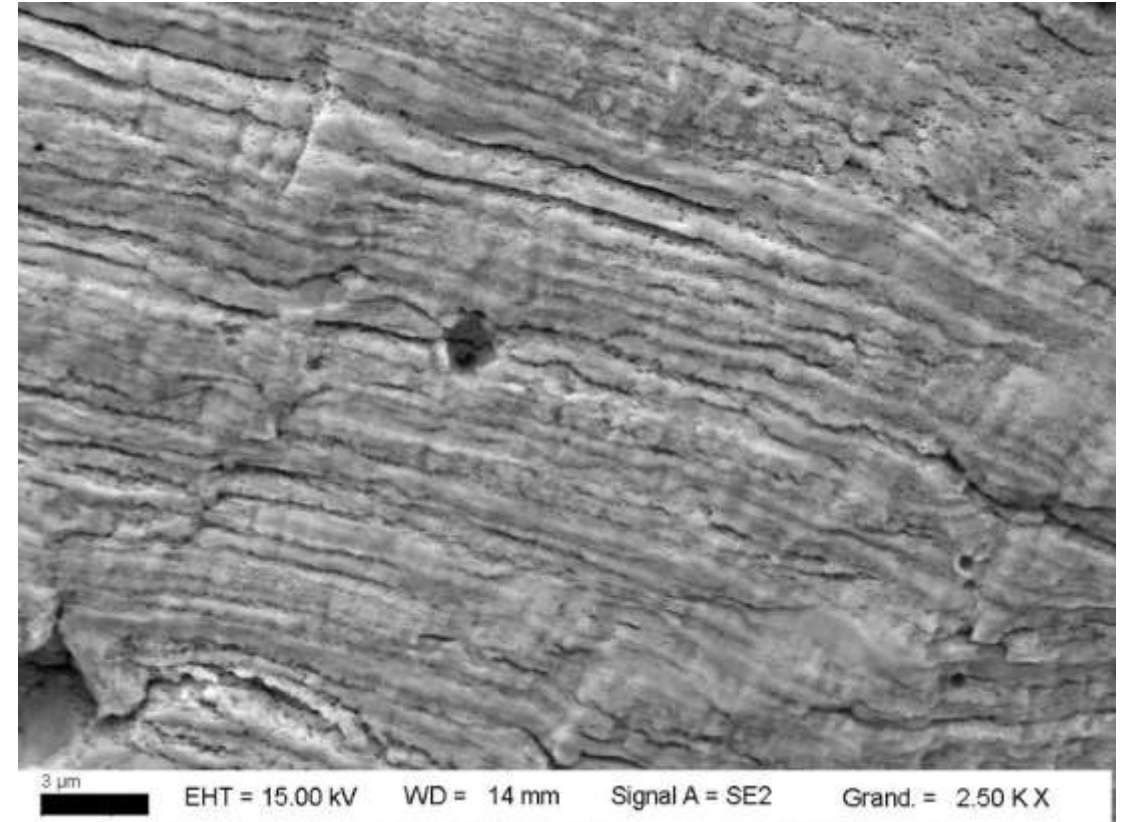
Stries de fatigue

Estimation de la distance interstries : de l'ordre de 0,4 à 0,5 μm

Longueur totale fissurée en fatigue : 18 mm

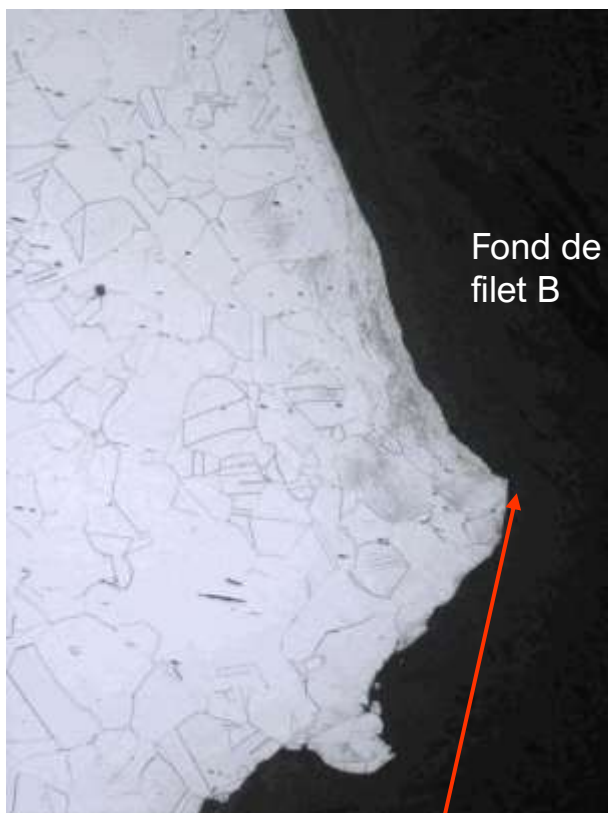
Nombre de stries total : environ 36000

Soit environ 50 heures (mini) de fissuration avec une houle ayant une période de 5 s

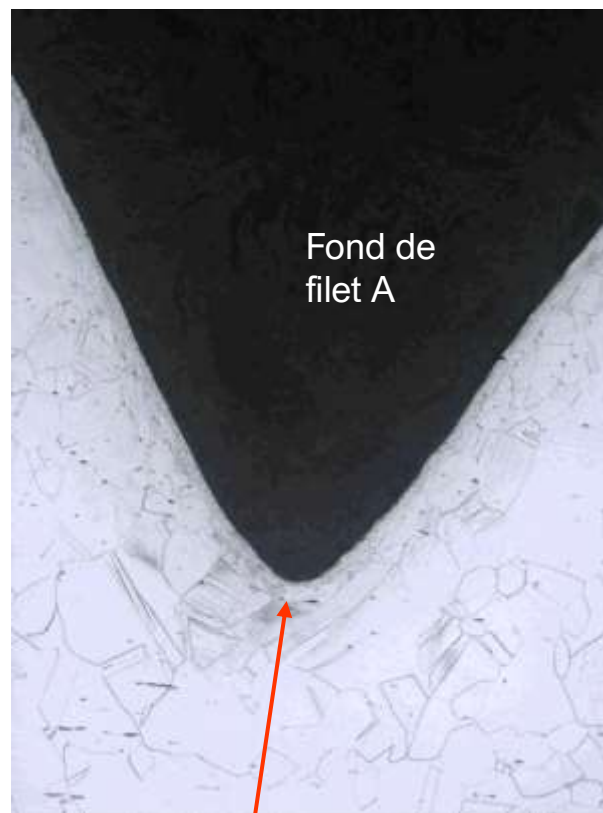


Ce ridoir était donc pré-fissuré avant le début de la course (rupture du ridoir 7 heures après le début de la course)

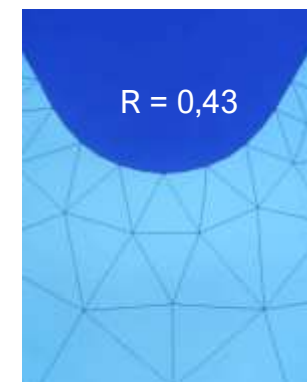
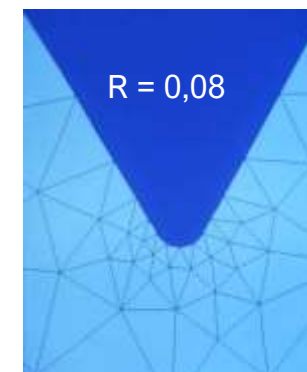
Examens micrographiques du filetage



Amorce de rupture en fond de filet



fond de filet voisin : $r = 0,08\text{mm}$



Rayon en fond de filet non conforme: $r = 0,08\text{ mm}$ pour un rayon de $0,43\text{ mm}$ prévu par les normes de filetages sur ce \emptyset

Conclusions

- Analyses métallurgiques conformes
 - Composition chimique conforme
 - Rayon en fond de filet **non conforme**
-
- Propositions d'actions correctives :
 - Augmenter le rayon à fond de filet
 - Prévoir une gorge de décharge
 - Réaliser le filetage par roulage, gain d'endurance de 65% VS filets tournés

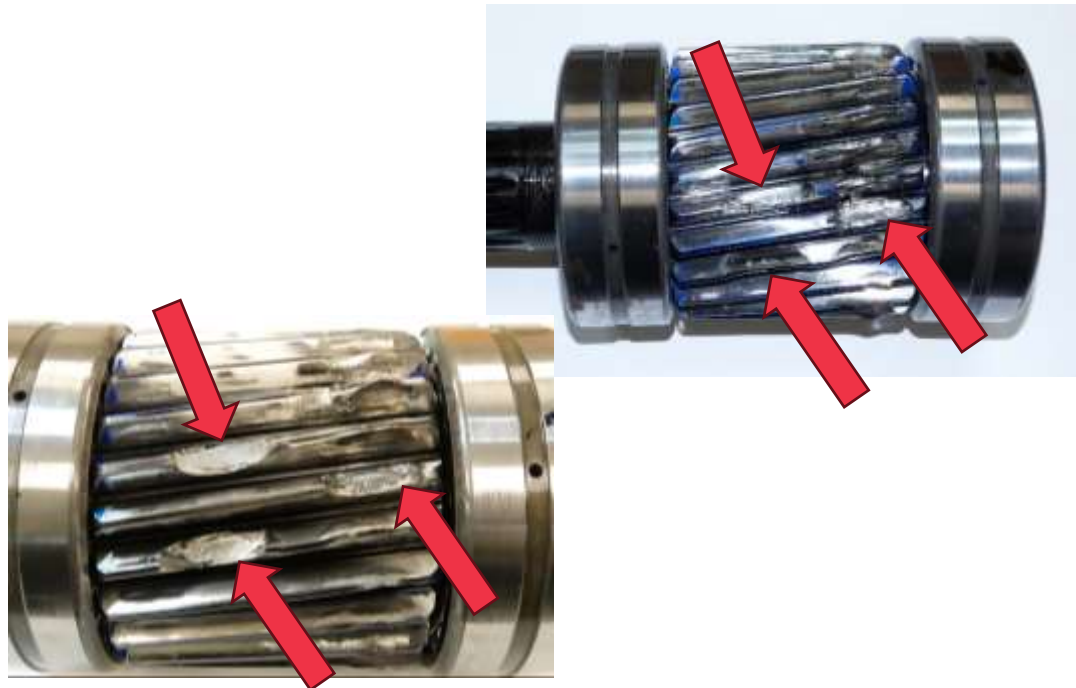


C

Cas d'application sur un engrenage

Analyse de défaillances des engrenages d'un réducteur à moindre coût

- Contexte : Le CETIM a été consulté pour réaliser une analyse de défaillance sur une roue et 2 pignons d'un réducteur, afin d'identifier l'origine de la rupture des dents.
- Travaux réalisés : Contrôle morphologique d'engrenages en laboratoire



Inspection



Examens
morphologiques

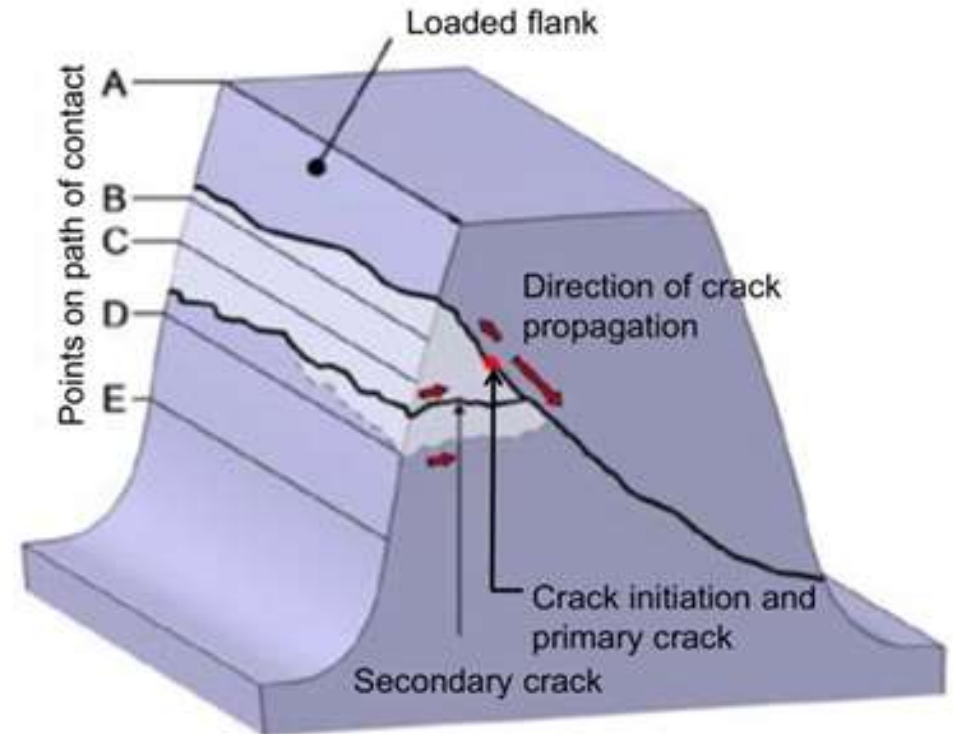


Rupture de fatigue d'une dent
de la roue et du pignon
Rupture d'abord sur la roue puis
sur le pignon
Puis fissures sur le flanc de la
roue
Eraflures sur le flanc,
déformations plastiques de la
dent puis rupture de la dent



- Conclusion:
 - Fracture des dents de la roue en avant des dents du pignon.
 - L'origine de la fracture est identifiée comme étant une fracture du flanc de la dent.
 - La cause fondamentale peut provenir des contraintes de charge, de la distribution de la dureté ou des inclusions dans le matériau.

- Propositions de poursuite
 - Coupes micrographiques sur la roue pour vérifier la qualité du matériau et la profondeur du traitement thermique (cémentation).



5

**Autres
références**

ENERGIE

Centre référencé d'analyse des défaillances



Besoins client

Le Ceidre (*) souhaitait trouver un partenaire en charge des analyses de défaillance qui possède le même niveau d'expertise.



Réponse Cetim

- Cetim a conquis les experts EDF par les compétences et les ressources mises en œuvre pour certaines analyses menées pendant deux ans.



Résultats obtenus

Un contrat multi-annuel a été élaboré avec les experts de ce Centre.

(*) Le CEIDRE est le centre français d'Expertise et d'Inspection dans les Domaines de la Réalisation et de l'Exploitation.

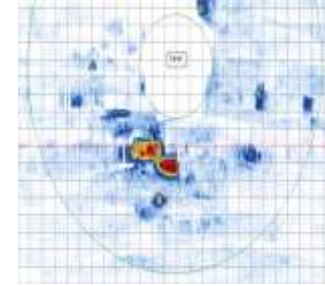


Bénéfices client

Cetim est le centre d'analyse des défaillances référencé du CEIDRE. Avec la signature d'un contrat multi-annuel d'analyse des défaillances avec le Cetim, EDF Ceidre (*) a valorisé son potentiel de réactivité immédiate et conclu un partenariat à long terme.

ENERGIE

Expertise par imagerie ultrasonore d'arbre d'éoliennes



Besoins client

Comprendre le phénomène de ruine à l'origine de la rupture de l'arbre principal d'une éolienne après 80 mois de fonctionnement



Réponse Cetim

Suspicion présence défaut visible
Déploiement de la démarche d'analyse de défaillance.



Résultats obtenus

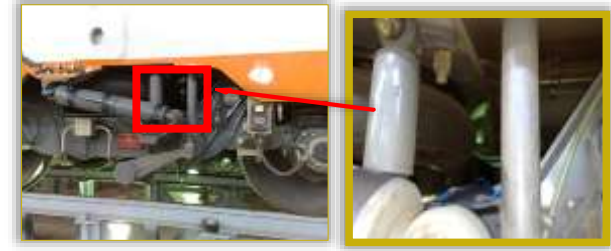
Analyse et mesures in situ (contrôle de la cinématique, vérification de l'état de serrage des fixations)
recherche de défauts de fabrication ou d'endommagement



Bénéfices client

Accompagnement auprès de la DREAL (remise en service du parc) et programmation de campagnes de contrôles préventives selon une procédure mise en place

Optimisation du confort du matériel roulant



Besoins client

L'ONCF (Office National des Chemins de Fer, Maroc) a détecté une dégradation du comportement en vibration d'un matériel roulant neuf. Dégradation du confort en termes de vibrations dès que le train dépasse 90 km/h et en cas de changement du type de rails.



Réponse Cetim

Instrumentation des wagons en service pour identifier les causes premières.



Résultats obtenus

2 causes ont été détectées :

- Bogie réglé à des fins de guidage au détriment du confort.
- Insuffisance de la rigidité du plancher, entraînant une dégradation majeure du confort sur la plateforme et à l'arrière du train.

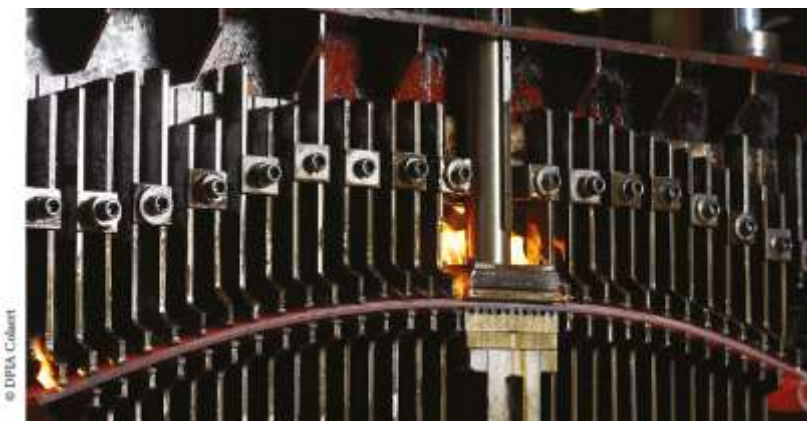
Bénéfices client



Amélioration du confort des passagers.
Optimisation de la maintenance et du remplacement des rails.

TRANSPORT

L'analyse pour garantir la sécurité des trains



Besoins client

- La caractérisation des pièces pour homologation demande de l'expertise. Quand une défaillance apparaît il faut réagir vite. Dans les deux cas, DPIA s'est appuyé sur le CETIM.



Réponse Cetim

- Le CETIM réalise les essais mécaniques et les analyses métallurgiques pour s'assurer de la fiabilité dans le temps des produits des fournisseurs. D'autre part, le CETIM réalise les expertises pour définir les origines des défaillances.



Résultats obtenus

- Le CETIM participe à la compréhension de l'origine des avaries et préconise des solutions sur le traitement des pièces et leur fabrication.

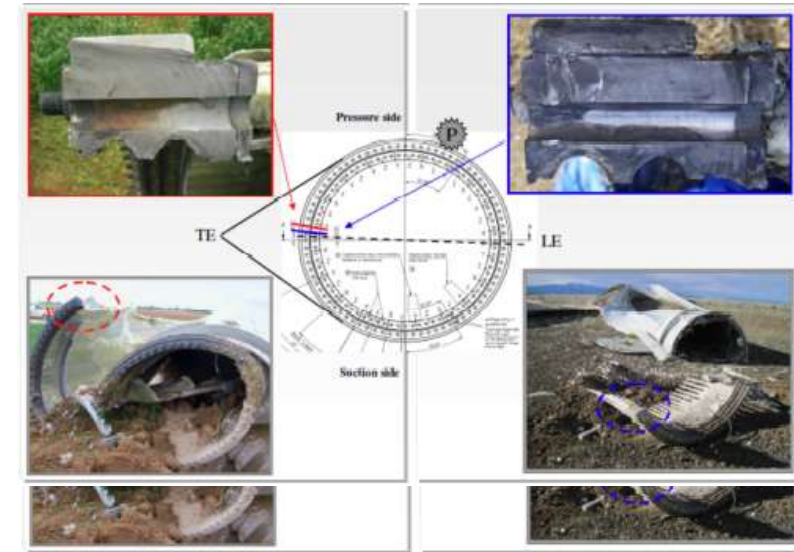
Les bénéfices client

- Des produits homologués pour être installés sur les trains du monde entier. Une crédibilité de DPIA sur son marché.



ENERGIE

Défaillances sur roulements de pale d'éolienne



Besoins client

- Faisant face à des chutes de pâles d'éoliennes en service, l'exploitant souhaite comprendre l'origine des défaillances et obtenir un support technique pour analyser les expertises du fabricant



Réponse Cetim

- Examen des composants sur site et chez le fournisseur.
- Analyse critique des analyses réalisées précédemment.
- Analyse critique de la méthode de contrôle et de remise en état des roulements de pale.
- Contrôles non destructifs sur d'autres parcs d'éoliennes



Résultats obtenus

- Mode de dégradation identifié.
- Parc éolien sécurisé.

Les bénéfices client

- Un accompagnement du client jusqu'à la remise en exploitation.
- La sécurisation du parc avec définition d'une méthode de contrôle.



Expertise des réducteurs de propulsion d'un navire



Besoins client

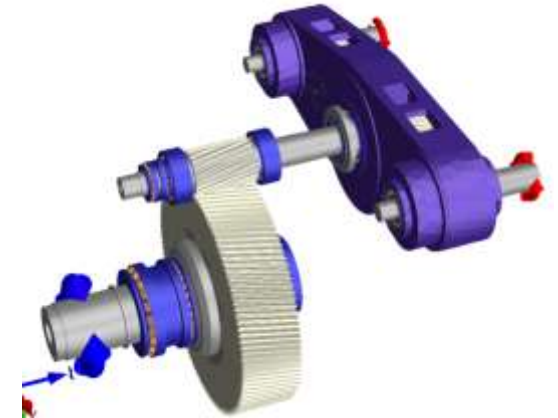
Un navire (L 120m, 2 lignes de propulsion : 4 moteurs de 2MW + 2 réducteurs) rencontre des problèmes de vibrations élevées, de rupture des dentures et d'endommagement important des roulements des deux réducteurs de la ligne de propulsion.



Réponse Cetim

Le Cetim a proposé une expertise en 2 temps :

- expertises des réducteurs à bord du navire,
- Mesures de déformation du carter en service,
- Modélisation des réducteurs.



Résultats obtenus

Optimisation des corrections de denture pour prendre en compte les déformations sous charge

Bénéfices client

Solution économique et rapide à mettre en place car ne nécessite aucune modification du carter des réducteurs.

Contrôle de la solution après 2 ans de fonctionnement. ✓



MARITIME

Expertise sur systèmes fluidiques



Besoin du client

- Fiabilisation de son système
- Comprendre l'origine de ruptures répétées de tuyauterie sur un **circuit incendie**
- Protéger le système



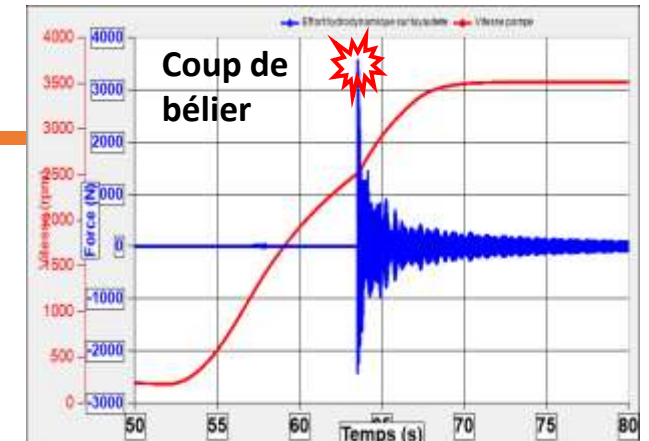
Réponse Cetim

- Alliance de l'approche numérique et expérimentale
- Expertise hydraulique du système
 - Caractérisation par essais de composants du réseau
 - Simulation transitoire 1 D du réseau hydraulique
 - Étude d'un **coup de béliet** : propagation d'onde de pression



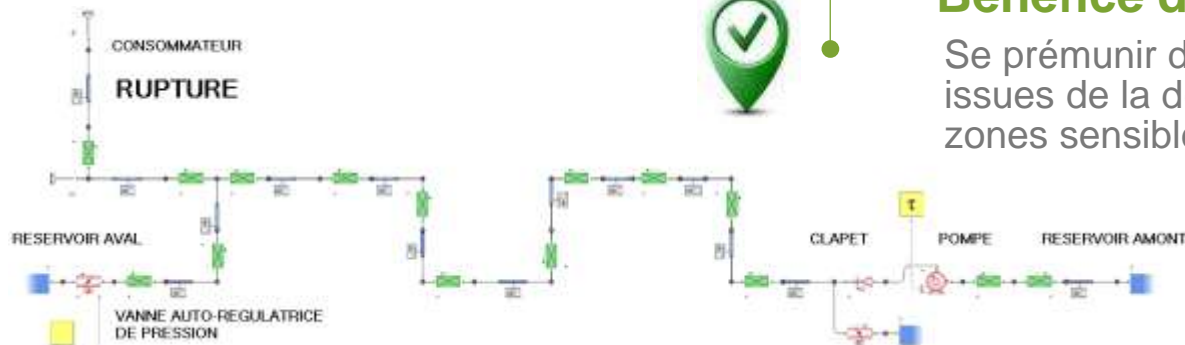
Résultats

Proposition d'actions correctives pour **fiabiliser** le système



Bénéfice du client

Se prémunir des conséquences graves issues de la défaillance : inondations de zones sensibles



PÉTROLE & GAZ

Investigation après la rupture d'un maillon de chaîne



Besoins client

- Le client avait besoin d'une réponse rapide et claire après la rupture d'un maillon de chaîne.



Réponse Cetim

Examen métallurgique et modélisation du comportement



Photo d'une partie du maillon cassé et modélisation numérique de la déformation



Résultats obtenus

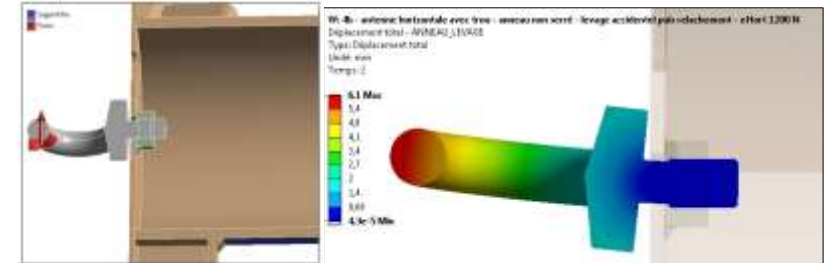
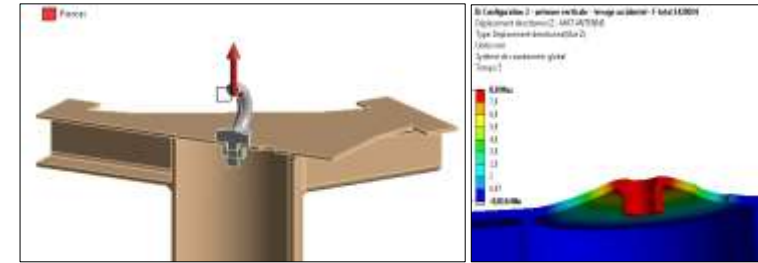
Rupture soudaine amorcée au niveau de petits défauts de soudage:
Éventuelle torsion du maillon.



Bénéfices client

Le client avait besoin d'une réponse rapide sur les causes premières et a pu prendre les actions correctives requises.

La modélisation pour aller plus loin



Besoins client



Déformation d'un anneau de levage sur un pied d'antenne. Aucune explication possible sur la déformation à partir des connaissances métallurgiques standards.



Réponse Cetim

Une modélisation numérique a été proposée pour vérifier diverses hypothèses de déformation.



Résultats obtenus

La modélisation numérique a démontré qu'aucune déformation permanente du plateau n'était observée en conditions normales d'utilisation. Lorsque l'antenne était horizontale, verrouillée et que l'anneau n'était pas correctement serré, il était possible de déformer la tige de l'anneau. La modélisation a également démontré que l'antenne pouvait être manipulée bien qu'en position de blocage.



Bénéfices client

Le problème a été résolu grâce à une approche globale par une analyse des matériaux et une modélisation.



Vos interlocuteurs :

Romain BARRELLON

Tél. : +33788500429

Email : romain.barrellon@cetim.fr



Pour un futur industriel
responsable et respectueux
de la planète