

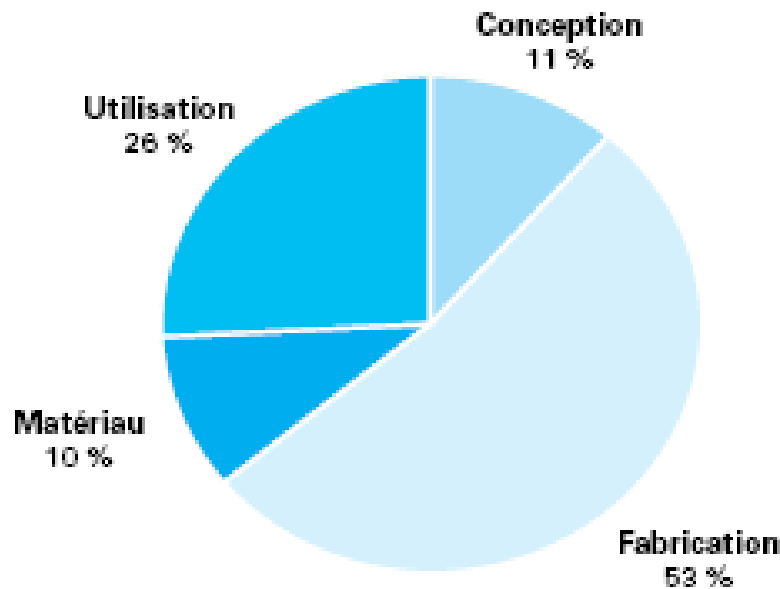
Matériaux Composites (E)

- 1) Analyse de défaillance de pièces en composites
 - Enjeux de l'analyse de défaillance
 - Démarche analyse de défaillance
 - Études de cas
- 2) Essais non destructifs → Contrôle par ultrasons
 - Principe de la méthode par transmission
 - Acquisition multibuse et suivi du profil de la pièce
 - Défauts recherchés
 - Acquisition d'une cartographie des défauts
 - Principe de la méthode par réflexion

Analyse de défaillance de pièces

Enjeux de l'analyse de défaillance

Une pièce est **défaillante** du moment où **elle ne remplit pas ou plus sa fonction**



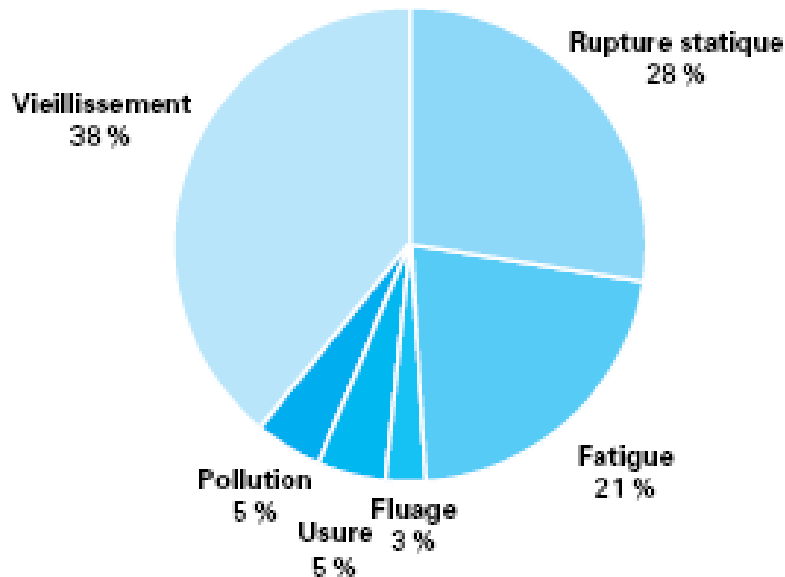
Répartition globale des origines d'avarie de pièces à base de polymères

Causes de défaillance:

- la normalisation des matériaux est limitée
- la maîtrise des procédés de transformation n'est pas toujours optimisée,
- **le matériau** : si la composition et/ou la qualité du matériau fourni évoluent, les propriétés finales de la pièce transformée ne seront pas celles attendues;
- **la conception** : des défaillances peuvent résulter d'un mauvais dimensionnement des pièces;
- **l'utilisation** : une modification des conditions de fonctionnement, des opérations de maintenance inadaptées ₁

Analyse de défaillance de pièces

Enjeux de l'analyse de défaillance



Répartition globale des modes de défaillance en service de pièces à base de polymère

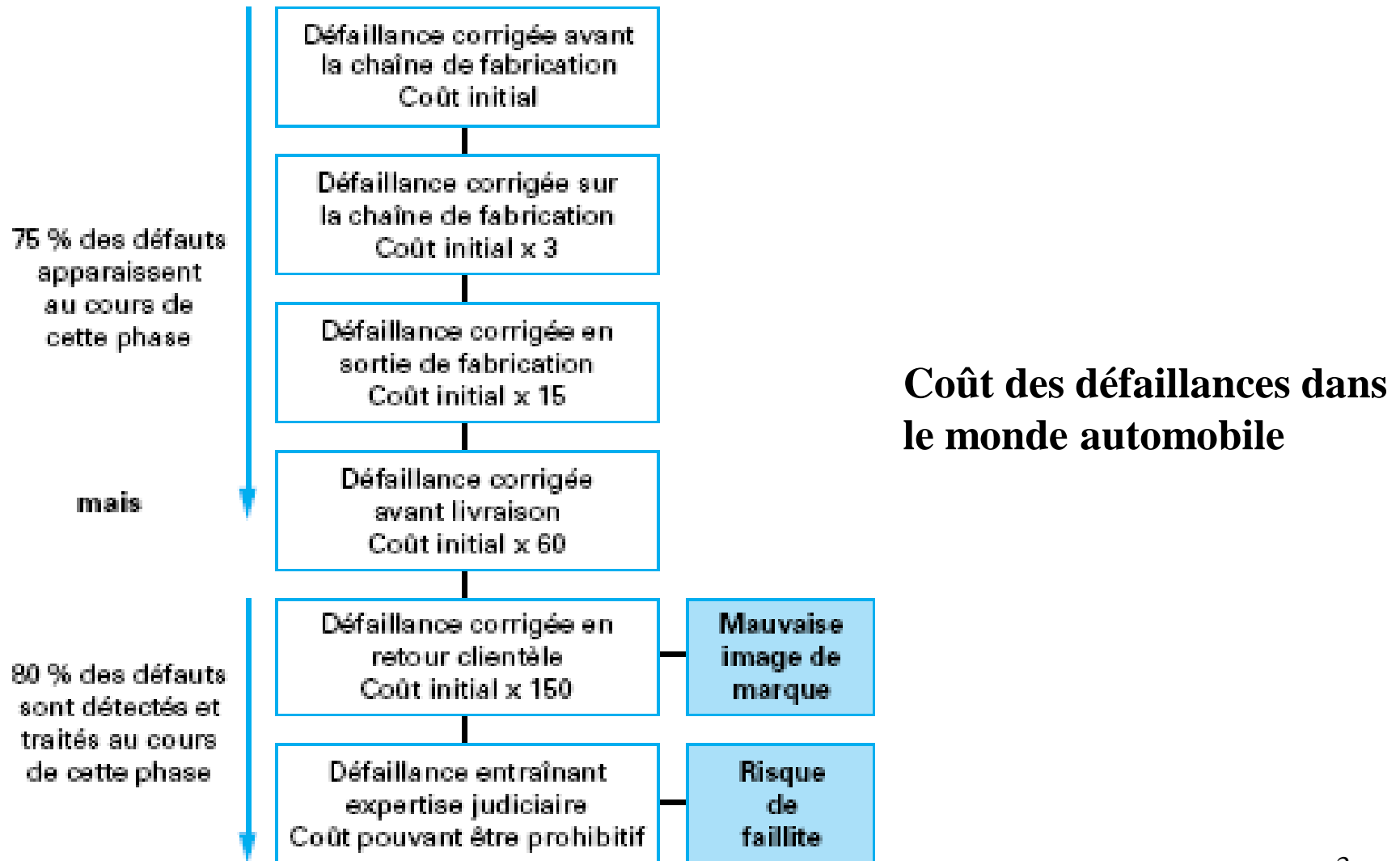
Des ruptures résultant des contraintes mécaniques appliquées en service : 52 %.

— ruptures résultant des conditions d'environnement (humidité, température, contact avec des produits chimiques, ultraviolets, ozone...) : 38 %.

Les phénomènes de fissuration sous contrainte dans un environnement agressif (environnement Stress Cracking ESC) ne sont pas encore pris en compte à leur juste valeur.

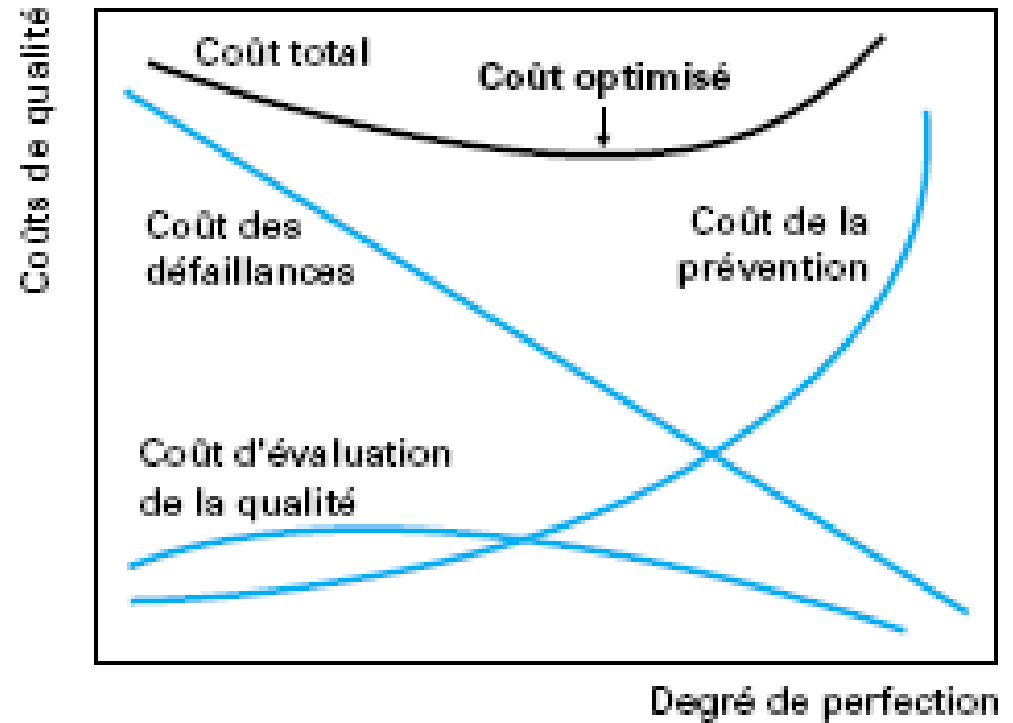
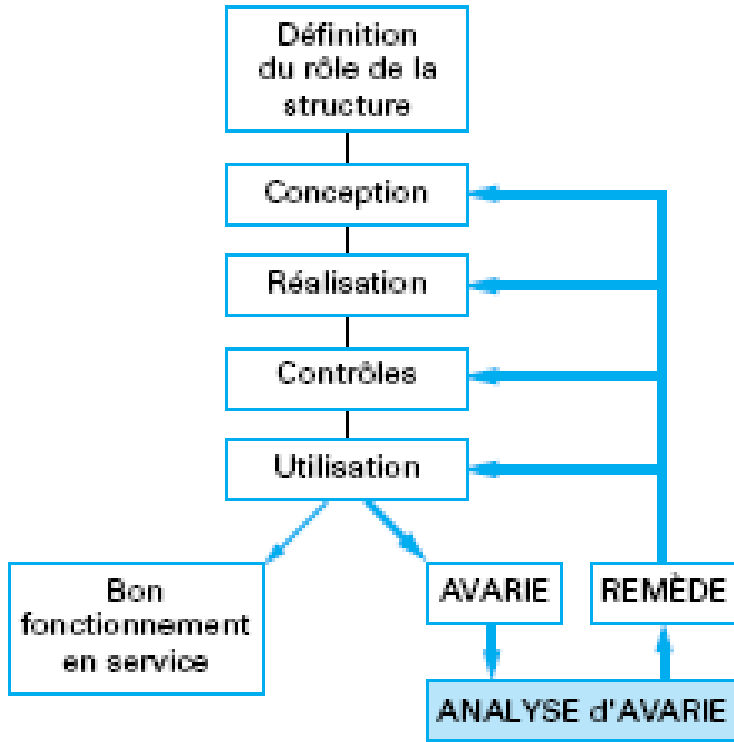
Analyse de défaillance de pièces

Enjeux de l'analyse de défaillance



Analyse de défaillance de pièces

Enjeux de l'analyse de défaillance



Place de l'analyse d'avarie dans la vie d'une pièce

Coûts de la qualité

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

une analyse d'avarie doit disposer de renseignements sur l'accident, de pièces à convictions, d'échantillons correctement prélevés et repérés. La démarche s'intéresse à l'ensemble de la genèse et de la vie d'un organe de machine

- la réalisation de la pièce, des approvisionnements aux finitions ;
- les contrôles effectués tout au long de la gamme de fabrication;
- les conditions d'utilisation.

La démarche vise à remettre en cause les choix, les calculs, les procédures et les gammes.

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

1) Enquête préliminaire

une **enquête préliminaire** couvre les préoccupations du bureau d'études, des ateliers ou de l'utilisateur:

- On se procure le plan de la pièce avec la liste des modifications éventuelles.
- on prend connaissance des notes de calcul associées, des raisons du choix du matériau de base, de la gamme de fabrication de la pièce.
- On collecte les divers certificats de contrôle et les enregistrements en service (température, vibrations...).
- Enfin, l'enquête concerne l'historique de l'avarie (prémices, déroulement et conséquences). La fréquence est un point capital.

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

2.a) Recueil d'informations techniques:

compiler tous les documents:

- le cahier des charges ;
- les notes de calcul de la pièce incriminée ;
- les plans de la pièce incriminée ;
- le plan de drapage (cas de pièces stratifiées) ;
- les données métrologiques ;
- les fiches techniques des matériaux précisant la nature, la composition des constituants, les caractéristiques physiques, mécaniques, physico-chimiques, rhéologiques... ;
- les fiches de contrôle-réception matière ;
- les fiches de fabrication (incluant les paramètres machine et moule, le taux de rebroyé éventuel, la méthode de coloration, l'étuvage...) ;
- les fiches de contrôle-réception pièces ;
- les procédures diverses (assemblage à d'autres pièces, montage, traitement de surface ou de finition...).

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

2.b) Recueil d'informations techniques:

Des questions pertinentes permettront de compléter les données recueillies sur les matériaux constitutifs et le procédé de transformation des pièces :

- si la matière est formulée chez un sous-traitant intermédiaire : nature et taux des additifs, des colorants, méthode de mélangeage...;
- si la pièce incriminée est sous-traitée : nombre de moules, nombre d'empreintes, âge du ou des moules, modifications du moule, nombre de sous-traitants...

Une bonne connaissance de l'équipement, du matériel ou de la pièce en cause est indispensable au bon déroulement d'une expertise:

Équipement ou matériel en cause (1) :

- désignation, identification ;
- localisation géographique (intérieur, extérieur...) ;
- rôle et fonction ;
- date de la défaillance

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

Équipement ou matériel en cause (2) :

— premières constatations sur place :

- répartition des morceaux rompus, pièces et matériaux en jeu (position, teinte particulière prise par les morceaux, présence de dépôts, déformations...),
- fumées, vibrations, odeurs détectées...,
- clichés montrant l'environnement (cette dernière phase est particulièrement importante lorsque la défaillance concerne une pièce ou un ensemble de pièces de grand volume car elle permet de figer le repérage des différents éléments et leur position les uns par rapport aux autres) ;

— circonstances de la défaillance :

- mode de fonctionnement au moment de la défaillance (phase opératoire, régime établi ou transitoire, conditions normales, conditions limites, surrégime...),
- données de fonctionnement (vitesse, pression, température, environnement chimique),
- contexte humain (opérateur présent ou non, personnel intérimaire, changement de poste, milieu hostile...) ;

— état des dispositifs de surveillance en place (état des capteurs...) ;

— procédures d'exploitation (existence, respect, mise à jour...).

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

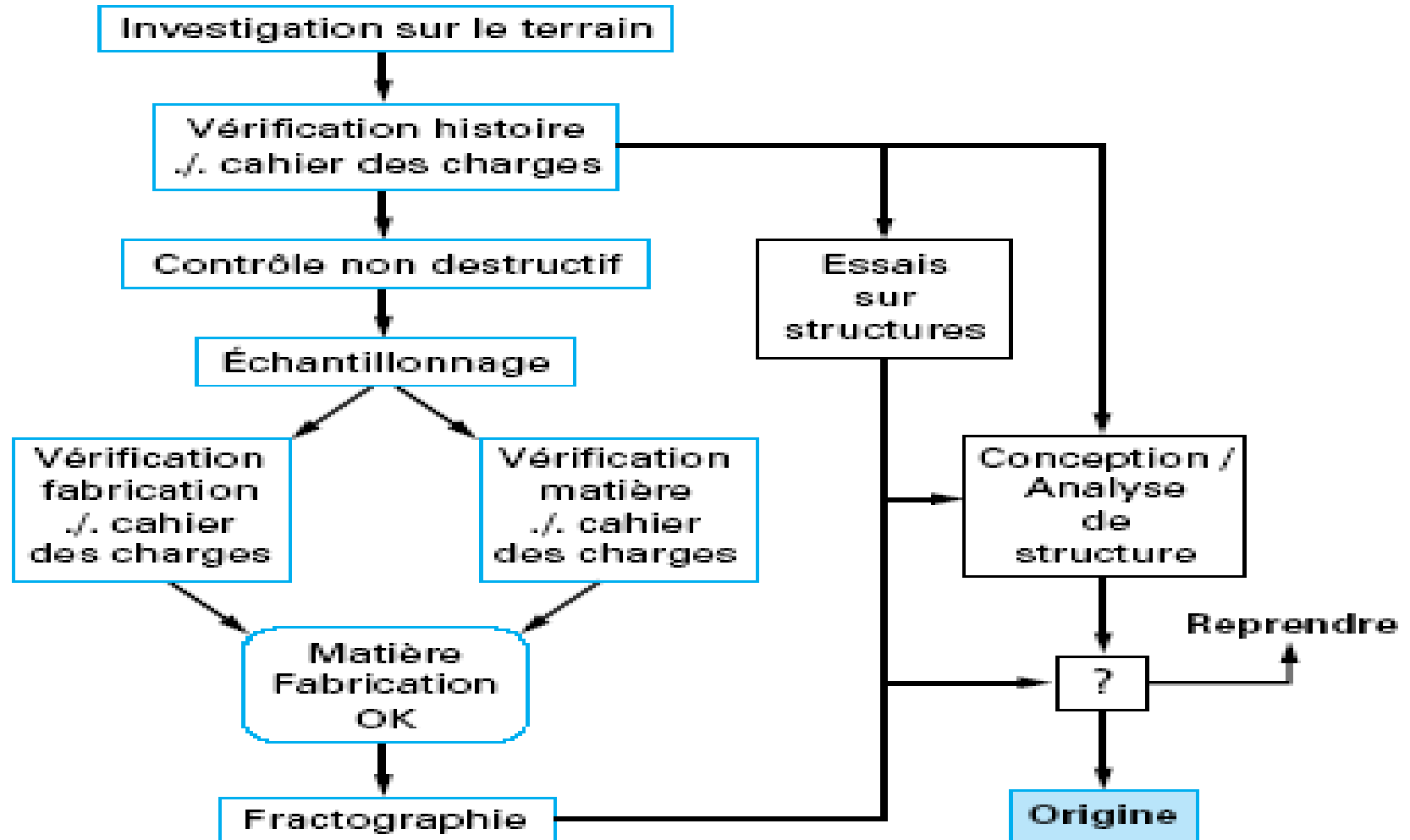
Pièce défaillante :

- identification pour les pièces injectées : position du dateur, numéro d’empreinte
- localisation dans l’équipement (a-t-il fallu démonter ?...)
- rôle et fonction ;
- conditions de fonctionnement (présence d’humidité, de lubrifiants, de produits chimiques, contraintes, pression, température...)
- premiers constats sur place (déformation, macrofissures, microfissures, forme de fissuration, état de la surface de rupture (mat, brillant, lisse, rugueux, renfort déchaussé...), nombre de morceaux, cartographie des endommagements, dégradation superficielle, présence de dépôts, coloration...)
- historique de la pièce :
 - pièce prototype ou courante (si courante, depuis combien de temps),
 - date de mise en service,
 - nombre d’heures de fonctionnement
 - taux de défaillance : défaillance ponctuelle ou répétitive.
 - interventions effectuées sur la pièce au cours de sa vie (nature et résultats d’éventuels contrôles, maintenance, réparations, modifications apportées...).

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

Démarche générale (1)



Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance

Démarche générale (2)

Différentes méthodes complémentaires d'investigation peuvent être employées dans les domaines suivants :

- contrôle non destructif (CND) ;
- contrôle métrologique ;
- caractérisation physico-chimique ;
- caractérisations mécanique et physique ;
- fractographie ;
- calcul...

Lorsque l'expertise le permet, cette dernière phase de validation par calcul de la conception peut elle-même être épaulée par des essais de caractérisation du comportement de structures.

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 1

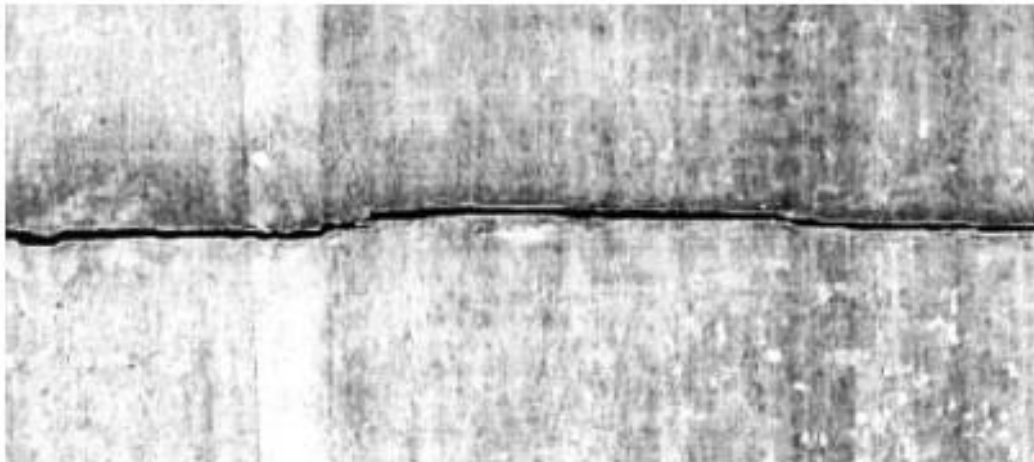
Défaillance d'une citerne en verre-polyester (1):

Éléments résultant de l'enquête:

- Structure: citerne de 20 m³ en verre-polyester.
- Environnement: contenant perchlorure de fer de pH 1,1. utilisation : -15 à + 35°C.
- Rupture: 10 mois après la mise en route, la virole de la citerne se casse nette

Indices

La rupture franche d'une paroi en matériaux composites en contact avec un milieu acide fait penser à une dégradation chimique du matériau.



Aspect de la rupture de la virole

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 1

Défaillance d'une citerne en verre-polyester (2):

Analyses effectuées

- vérifier la composition et la constitution du matériau de la virole
- analyser la rupture à l'aide d'un MEB.

Analyse de la constitution de la virole

- Identification par spectrophotométrie infrarouge des résines du gel-coat et du stratifié de la paroi : une seule résine est employée, de la famille des polyesters insaturés de type orthophtalique.
- Analyse des fibres de verre par spectrométrie X : le renfort du stratifié de la paroi est à base de verre E, le voile de surface placé au sein du gel-coat est à base de verre C. La composition type de chacun des verres est fournie par le fabricant.

Analyse de la rupture

L'examen des faciès de rupture par MEB met en évidence les événements caractéristiques de la rupture : faciès plat au niveau macro et microscopique, faciès type miroir des fibres, fissuration du verre dans le sens longitudinal des fibres, formation de polygônes caractéristiques au sein du polymère

Analyse de défaillance de pièces

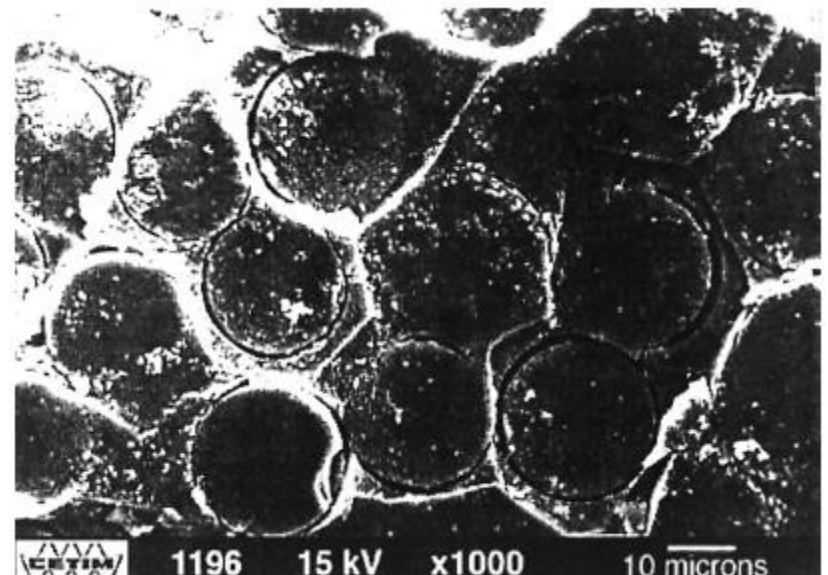
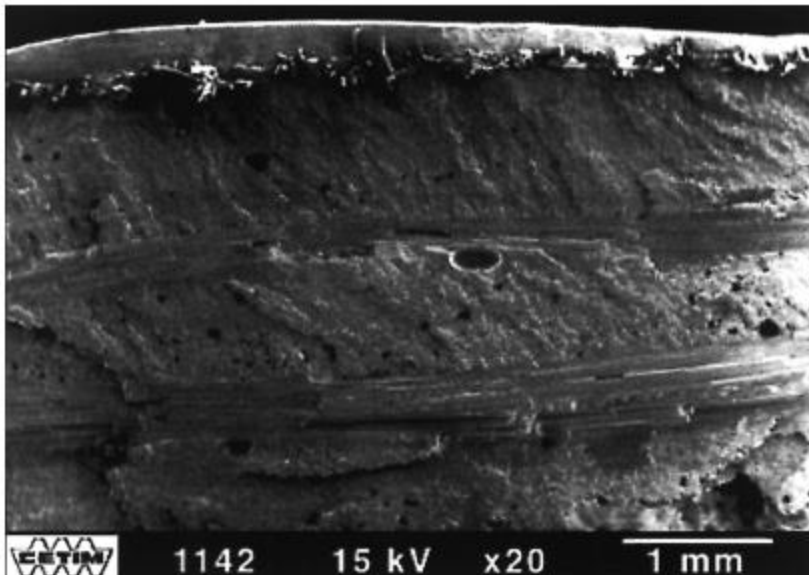
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 1

Défaillance d'une citerne en verre-polyester (3):

Synthèse: Le mode principal de ruine de la structure résulte d'une fissuration sous contrainte en environnement chimique acide.

Remèdes possibles

1. Prévoir une barrière anticorrosion thermoplastique ou employer une résine anticorrosion (en général plus rigide).
2. Dimensionner la structure pour limiter les contraintes en service.



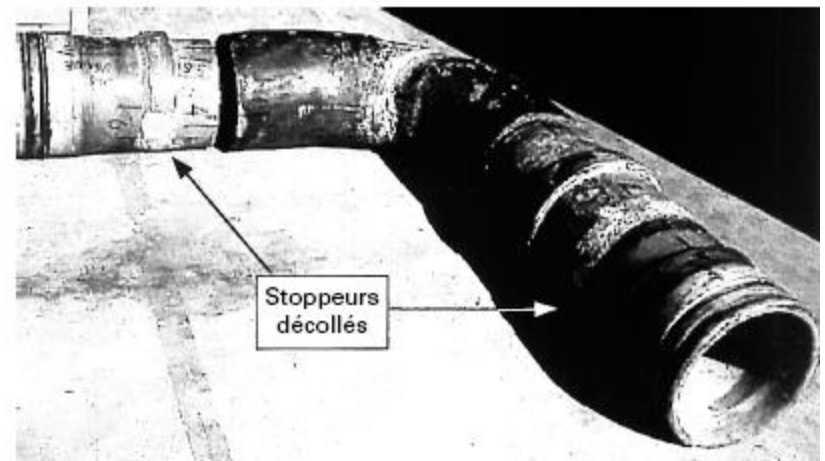
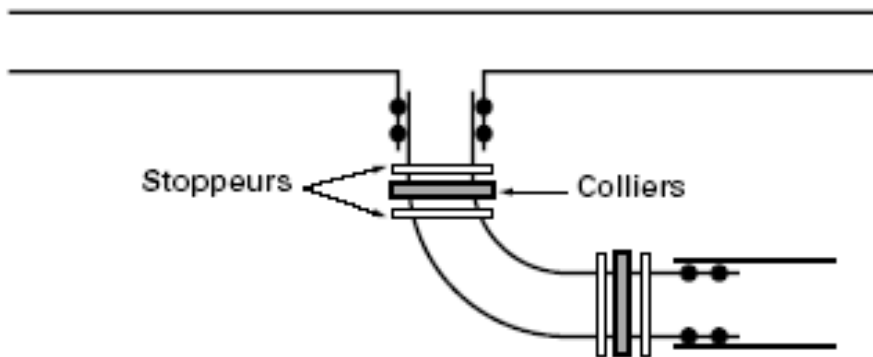
Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (1)

Éléments résultant de l'enquête

- Structure : circuit de ballastage en verre-vinylester d'un navire de type méthanier.
- Environnement : eau de mer sous pression.
- Rupture : pendant la phase d'essai en mer du bateau. La partie rompue consiste en une dérivation. L'étanchéité entre le coude et le té est assurée par des joints en élastomère. Le coude est maintenu par deux colliers fixes. L'accessoire est immobilisé par des stoppeurs (bagues composites collées au coude de part et d'autre du collier métallique). La défaillance résulte du décollement des stoppeurs du coude, ce qui a entraîné la rupture par flexion du coude.



Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (2)

Indices

- Rupture précoce.
- Partie incriminée : stoppeurs.
- Manque de colle apparent à l'oeil nu sur le faciès de rupture.

Analyses effectuées

Des défauts macroscopiques de collage étant visibles au point de départ de l'expertise, il est nécessaire de :

- vérifier l'état de polymérisation de la colle utilisée ;
- cartographier l'endommagement ;
- analyser finement l'état de collage stoppeur/tube.

Analyse du mastic ayant servi à l'assemblage

L'état de polymérisation du mastic est apprécié par analyse enthalpique différentielle (AED). La température de transition vitreuse T_v mesurée est environ 115°C . Aucune réticulation résiduelle n'est constatée. Le matériau est correctement réticulé.

Analyse de défaillance de pièces

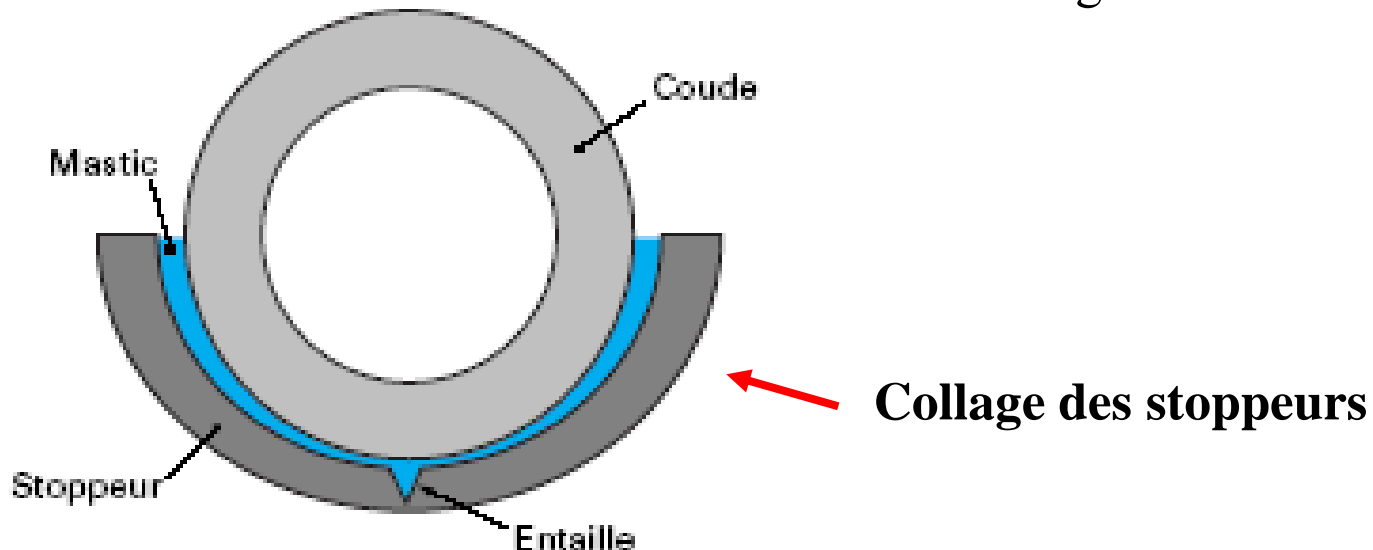
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (3)

Analyse de la rupture

les stoppeurs sont réalisés à partir de tronçons de tube: le diamètre n'est pas adapté à celui du coude. Une entaille est effectuée à la paroi interne du stoppeur pour favoriser la correspondance de forme. Ce type de conception d'assemblage implique que le joint de mastic n'aura pas une épaisseur constante.

Par ailleurs, au droit de l'entaille, il peut y avoir discontinuité de l'assemblage.

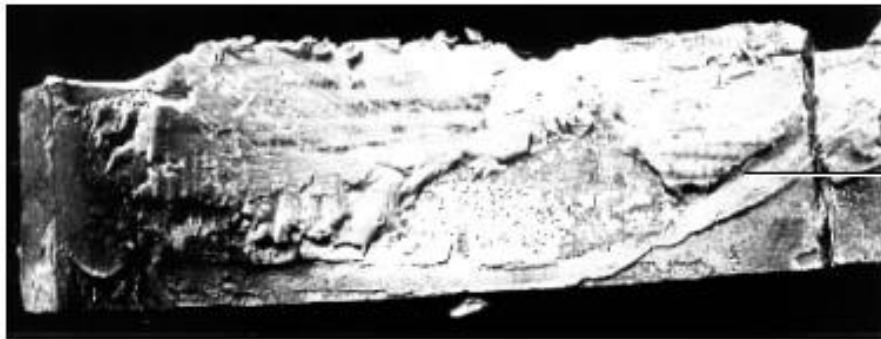


Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (4)

Un examen à l'oeil des surfaces décollées révèle des traces d'outil ayant servi à appliquer le mastic et la présence d'oxyde de fer déposé avec le temps sur le joint de mastic ou la paroi du coude ou du stoppeur. Cela signifie que le mastic n'a pas complètement adhéré aux parois respectives du coude et du stoppeur



(a) côté stoppeur

Trace
d'outi



(b) côté coude

Aspect de la rupture d'un assemblage

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (5)

Les surfaces de collage peuvent être divisées en trois zones distinctes : zone non collée, zone de rupture à l'interface entre le coude et le mastic, zone de rupture entre le stoppeur et le mastic.

Une cartographie de l'endommagement, est étudiée par un d'un logiciel d'analyse d'images:

Zone	Vue côté coude (%)
Non collée	26,6
Rupture à l'interface mastic-coude	28,6
Rupture à l'interface mastic-stoppeur	44,8

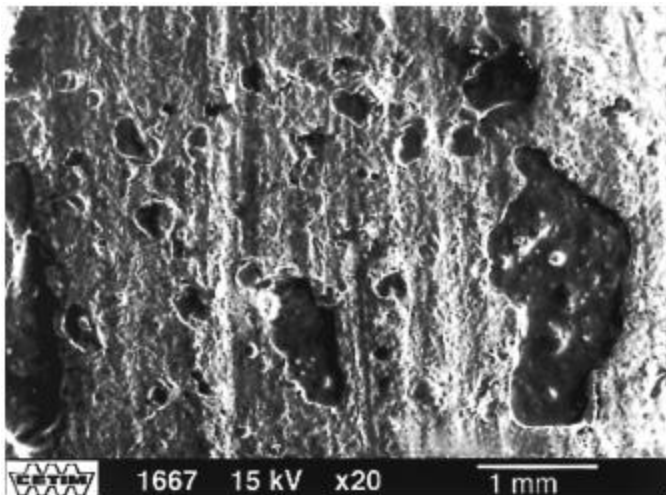
Part des zones observées au niveau de la rupture des collages

Analyse de défaillance de pièces

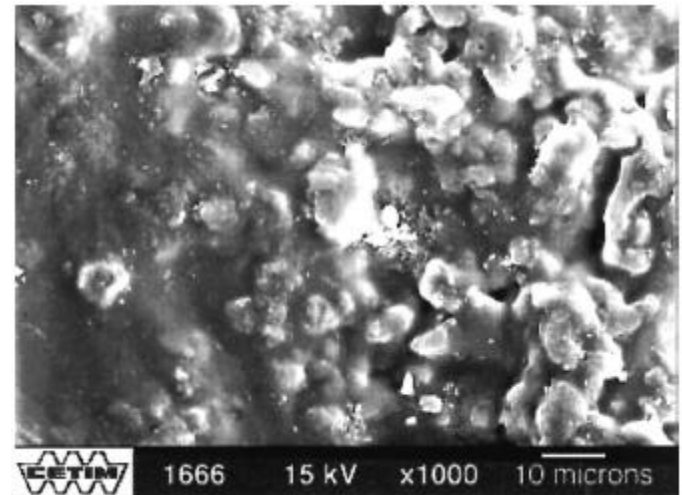
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (6)

L'analyse microscopique des surfaces décollées au MEB permet de préciser la qualité des zones où il y a eu contact entre le mastic et le stoppeur ou le coude. De nombreux défauts (vides) sont visibles à l'interface entre le mastic et la paroi du coude ou du stoppeur (à gauche) et que, lorsqu'il y a contact entre la paroi de la pièce composite et le mastic, cela ne signifie pas obligatoirement que le collage est de bonne qualité (à droite).



Rupture du mastic à l'interface avec le coude



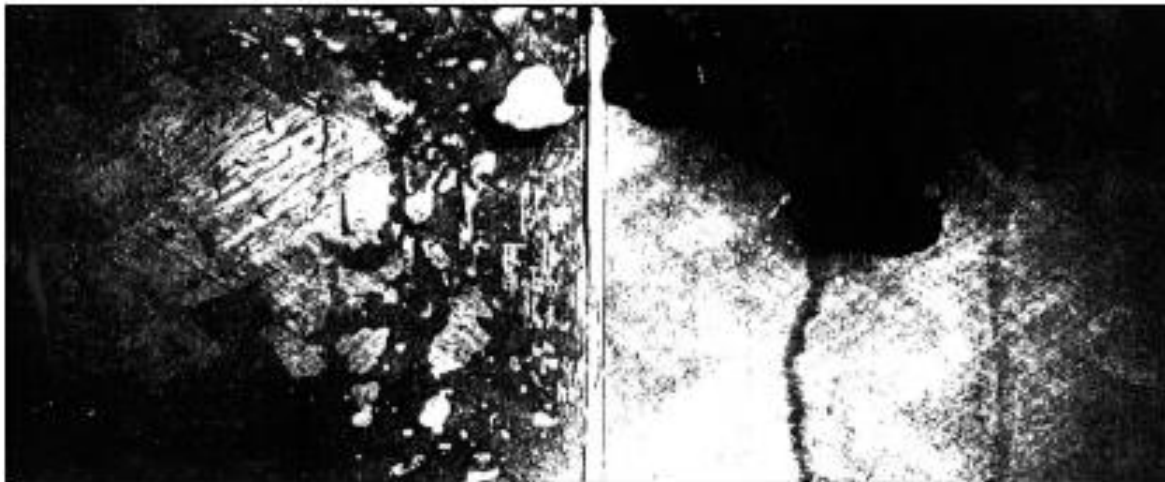
Mauvais collage à l'interface mastic²stopp

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (7)

Contrôle de la qualité des assemblages par radiographie: afin de valider la qualité des assemblages, un contrôle radiographique avec pénétrant opaque (iodure de zinc) est réalisé sur les stoppeurs dont le collage au coude ne s'est pas rompu en service. Les clichés obtenus sur différentes parties de la structure tubulaire confirment la présence de manques importants de colle (surfaces noires sur la figure) et le contact limité du mastic sur les parties composites (surfaces en gris plus foncé sur la figure).



Défaut de collage et mauvaise qualité de collage révélés par le pénétrant opaque aux rayons X

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 2

Défaillance d'une structure de ballastage de navire (8)

Synthèse:

- 60 à 70 % de la surface de collage entre les stoppeurs et le mastic n'est pas de bonne qualité.
- quart de la surface totale d'assemblage reprend les efforts de cisaillement en service.
- Le coefficient de sécurité prévu en théorie est de l'ordre de 11. La réduction de la surface de collage et la présence de manques de colle (avec un facteur d'intensification des contraintes de 3 à 4) contribuent à faire chuter le coefficient de sécurité.

Remèdes: La conception des stoppeurs est en cause. Il est indispensable de mettre en place des stoppeurs adaptés à la forme des tubes et accessoires utilisés pour avoir un joint de colle d'épaisseur constante et réparti uniformément selon toute la circonférence des structures.

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (1)

Éléments résultant de l'enquête

-Structure : circuit secondaire de chauffage urbain par géothermie réalisé par assemblage collé de tubes en composites verre-époxyde.

Environnement : eau sous pression à 10 bar jusqu'à une température de 110°C. En certains endroits du réseau, du fait des conditions géologiques, la parois externe des tubes est en contact avec l'eau au niveau de toutes les parties non calorifugées.



Aspect de la structure mise en évidence après ouverture de tranchées

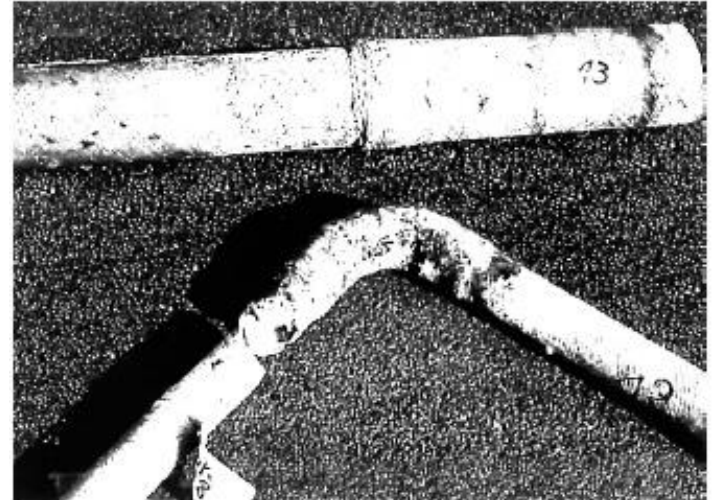
Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (2)

Éléments résultant de l'enquête

- Rupture : fuites successives sur un réseau en composites destinés au transport d'eau chaude.
- Ces fuites conduisent à un perçage ou à la rupture des tubes de jonctions non calorifugées. un changement de teinte des tubes est visible.
- La figure présente deux pièces défailtantes



Aspect de l'endommagement des canalisations

Indices

- Rupture précoce au sein des tubes (les collages ne sont pas affectés).
- Défaillances apparaissant en différents points du réseau de manière a priori aléatoire.
- Défibrage montrant la destruction progressive de la résine.

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (3)

Analyses effectuées

Pour s'assurer que les canalisations peuvent remplir leur fonction de transport d'eau chaude à une température maximale de 110°C, une analyse complète des matériaux et des tubes a été proposée. Compléter par une analyse de l'état de dégradation de la résine et, parallèlement, par une validation de la conception des pièces.

Analyse des différents composants des tubes

L'identification de la résine par spectrophotométrie infrarouge met en évidence deux types de résine : une résine époxyde novolaque côté paroi interne des tubes et une résine époxyde de type DGEBA (diglycidyléther du bisphénol A) côté paroi externe.

Les tubes sont constitués de 16 couches de mèches de fibres de verre unidirectionnelles orientées à $\pm 70^\circ$ par rapport à l'axe du tube . Le taux volumique de renfort mesuré par calcination est de 60 % (analyse par calcination).

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (4)

Caractérisation du dommage

La mesure de la transition vitreuse des polymères par analyse enthalpique différentielle (AED) permet de vérifier l'état de dégradation des résines. Des tubes présentant différents états ont été analysés :

- tube endommagé à l'état désorbé dans une zone a priori non endommagée ;
- tube endommagé à l'état désorbé dans une zone endommagée;
- tube neuf à l'état désorbé ;
- tube neuf saturé en eau.

État du tube	Zone étudiée	$T_v(^{\circ}\text{C})$		
		État neuf	Dans la zone endommagée	Loin de la zone endommagée
Tube endommagé (état désorbé)	Résine paroi externe (DGEBA)		120	130
	Résine paroi interne (novolaque)		155	155
Tube neuf	Résine paroi interne (état désorbé)	155		
	Résine paroi interne (état saturé en eau)	140		

Température moyenne de transition vitreuse T_v des résines selon leur état

Analyse de défaillance de pièces

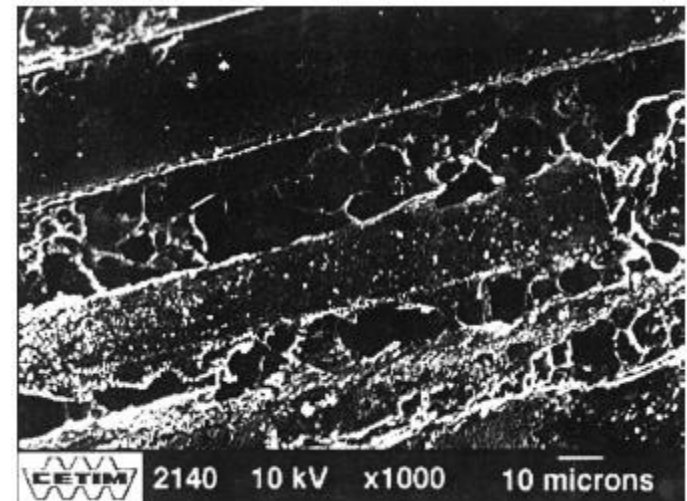
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (5)

- pour la résine époxyde DGEBA standard dont la T_g est de 130°C à l'état neuf désorbé, la saturation en eau peut faire passer la $T_g < 110^\circ\text{C}$.
- l'étude par MEB des surfaces délaminées présentant les fibres dénudées côté externe met en évidence l'état poreux de la matrice, caractéristique du départ d'une phase du matériau.
- l'endommagement est prépondérant en face externe.

Un retour sur les conditions de service permet d'expliquer le processus de ruine :

- de l'eau entre en contact avec la paroi externe.
- la $T^\circ\text{C}$ de l'eau croît par échange thermique pour atteindre la T_g de la résine époxyde DGEBA saturée en eau.
- l'environnement est propice à amorcer puis développer la dégradation du polymère.



Analyse de défaillance de pièces

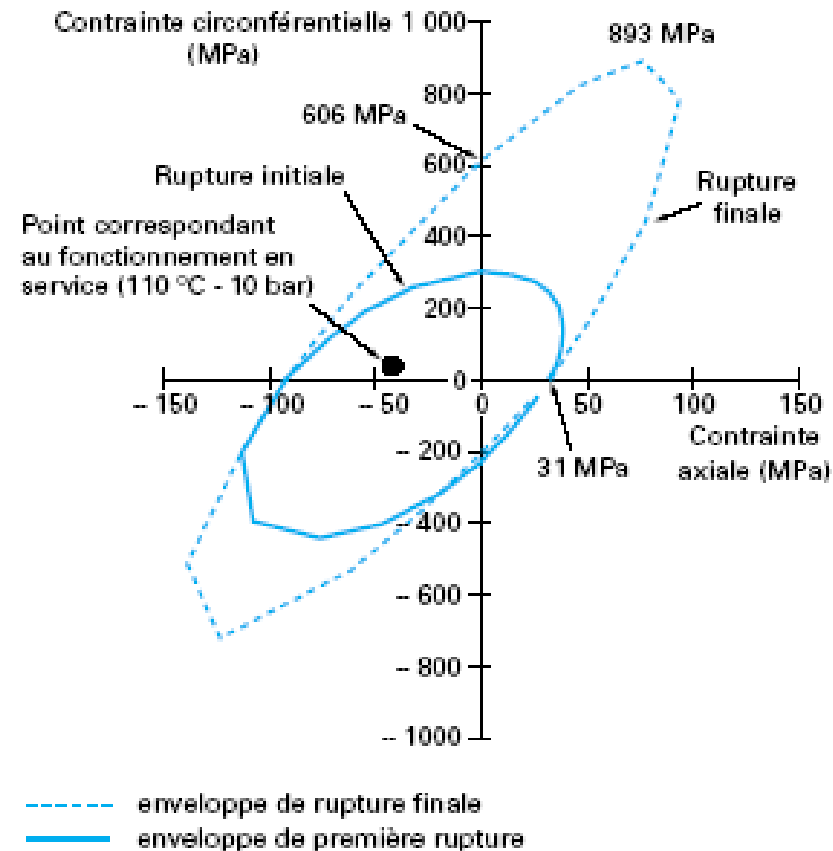
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (6)

Prévision par calcul des propriétés mécaniques et du comportement des tubes

L'utilisation de logiciels permet de prévoir les caractéristiques élastiques de chaque couche du stratifié et du stratifié global et le comportement à la rupture des tubes soumis à la pression hydrostatique et à la dilatation différentielle induite par les variations de température du fluide caloporteur.

L'information majeure, à travers le calcul, est la position du point de fonctionnement par rapport à l'enveloppe de rupture dans un diagramme reportant la contrainte appliquée du tube dans le sens axial vs de la contrainte circonférentielle.



Enveloppes de rupture prévues par calcul

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (7)

Prévision par calcul des propriétés mécaniques et du comportement des tubes

la contrainte circonférentielle à rupture des tubes est vérifiée par des essais de traction d'anneaux (Nol ring) sur :

- un tube neuf ;
- un tube endommagé dans une partie a priori saine.

La résistance circonférentielle théorique est très éloignée de la valeur expérimentale. Un tel écart peut simplement signifier que la qualité du matériau n'est pas correcte, en particulier en termes de porosités.

État du tube	Résistance (MPa)
Neuf	250
Endommagé (en partie a priori saine)	160

Valeurs expérimentales des résistances circonférentielles à rupture

Analyse de défaillance de pièces

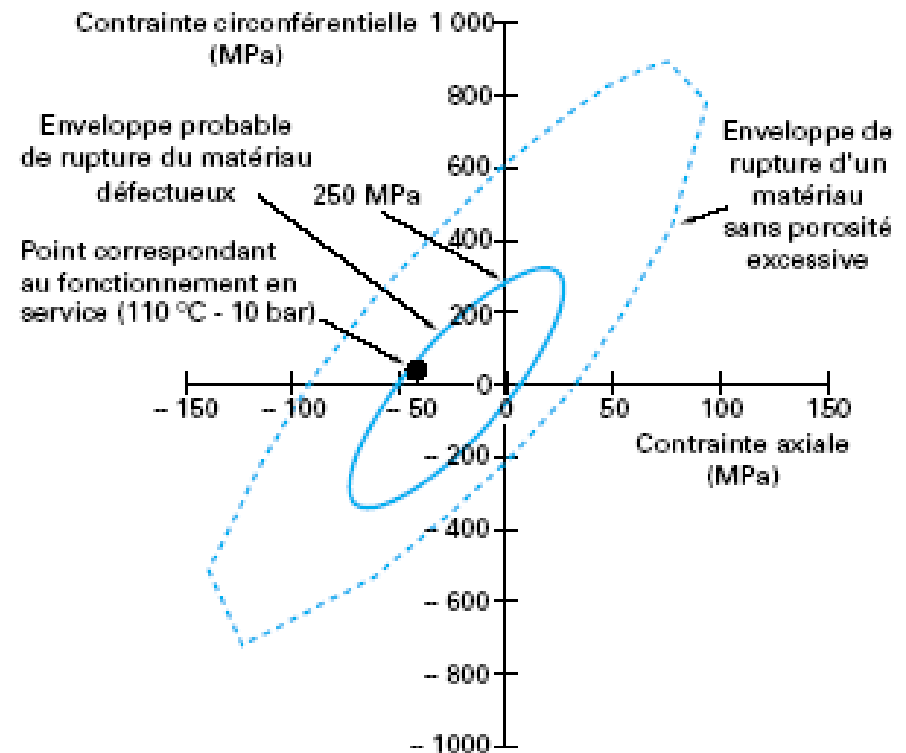
Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (8)

Prévision par calcul des propriétés mécaniques et du comportement des tubes

Le taux surfacique de porosité au sein de la matrice de différents tubes est de l'ordre de 6 à 8 %.

la porosité est sensible lorsque le mode de sollicitation appliqué au matériau concerne principalement la matrice, ce qui est le cas pour les tubes soumis en service à des contraintes de cisaillement, de traction transverse ou de compression transverse.



Enveloppe de rupture finale d'un tube comprenant un taux élevé de porosité

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (9)

Synthèse

La défaillance résulte d'un choix de résine inadaptée aux conditions de température : la Tg de l'une des résines employées a été de l'ordre de la température de service.

Cela a conduit à une dégradation rapide du polymère au contact de l'eau et à une perte importante des propriétés mécaniques du stratifié

Dans le cadre particulier de cette expertise, même si le polymère avait été bien choisi initialement, les tubes se seraient quand même progressivement rompus en service du fait de leur mauvaise qualité de fabrication (porosité)

Analyse de défaillance de pièces

Démarche analyse de défaillance - Études de cas 3

Défaillance d'un réseau de chauffage par géothermie (10)

Remède

- Utiliser un couple (résine époxyde-durcisseur) adapté → le polymère réticulé ait une $T_g >$ à la $T^{\circ}\text{C}$ de service.
- Choisir une séquence judicieuse d'empilement des couches pour réduire les effets du cisaillement, de la traction transverse et de la compression transverse en service.
- Optimiser le process de fabrication par enroulement filamentaire des tubes.
- Assurer la continuité du calorifugeage lors de la pose de la structure tubulaire sur site.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Le contrôle par US permet, **sans nuire à l'intégrité d'une structure**, de caractériser les défauts et de porter un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.

La méthode peut être employée à différents stades (fabrication, mise en service, réparation). Elle **nécessite une comparaison avec un étalon**. Les limites et les probabilités de détection sont variables selon **l'appareil, le matériau, la surface à inspecter et l'opérateur**.

Les méthodes de CND sont mises en oeuvre dans un **système qualité** pour garantir la fiabilité du processus dans un environnement de production.

Les installations de contrôle doivent répondre aux notions de « flexibilité », de « juste à temps », de changement rapide d'outils SMED (Single Minute Exchange of Die) pour être en adéquation avec la politique des « flux tendus ».

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

deux techniques par ultrasons, très utilisées, en aéronautique, pour les matériaux composites :

— la méthode **par transmission**, mise en oeuvre pour la recherche d'anomalies internes dont les dimensions, la forme ou la localisation ne permettent pas un contrôle par réflexion. On l'utilise pour **les matériaux de forte absorption**, surtout les matériaux sandwiches et les pièces d'un seul bloc (monolithes) de grande surface ;

— la méthode **par réflexion**, qui s'applique à la détection des défauts propres à **la matière des composites à fibres de carbone, de verre, d'aramide** (Kevlar, Twaron) et permet la vérification manuelle de défauts détectés par la méthode de transmission.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode par transmission (1):

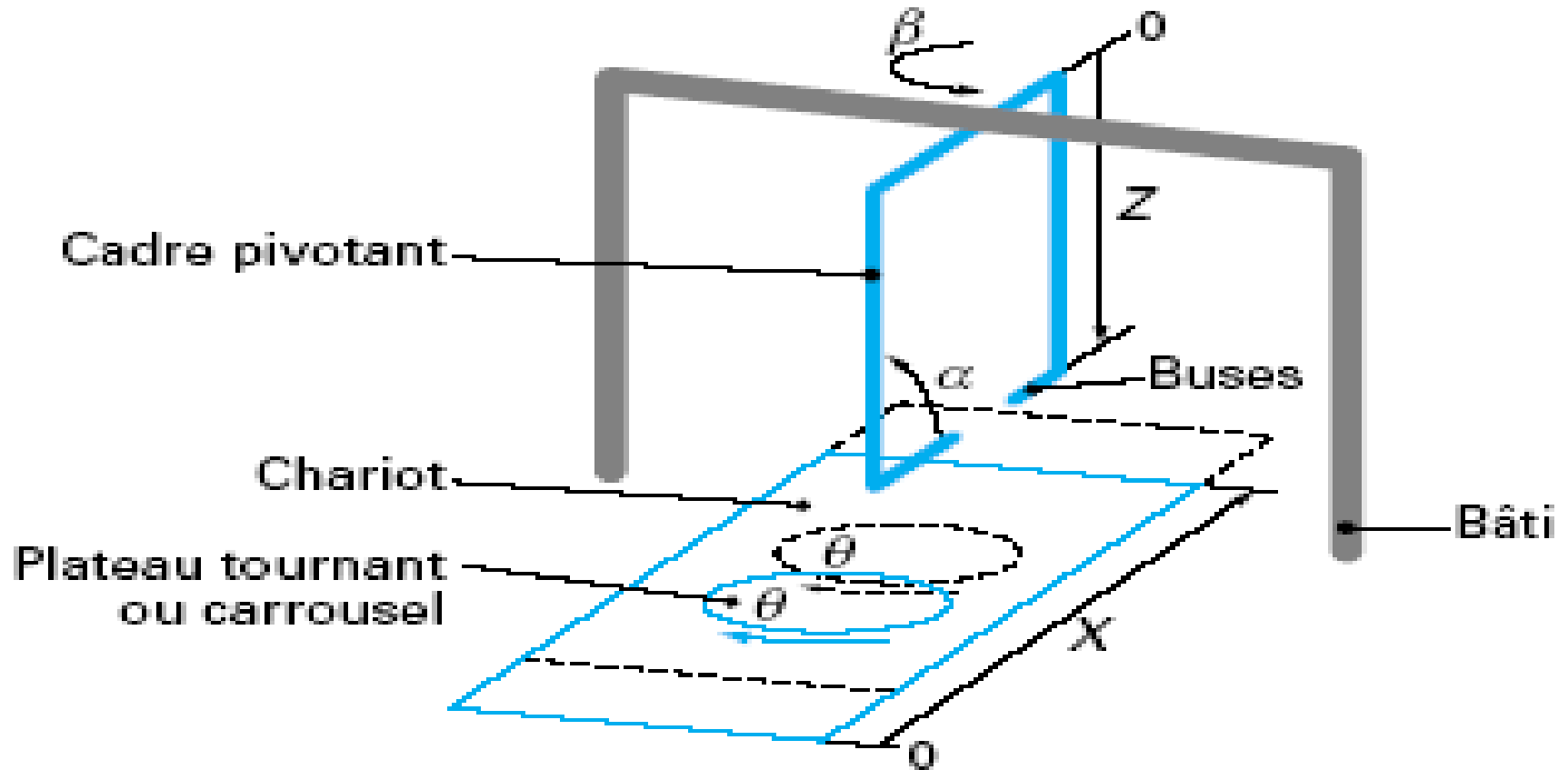
le couplage des transducteurs ultrasonores avec la pièce à contrôler est assuré par **deux jets d'eau horizontaux en opposition** (les ondes ultrasonores ne se propagent pas dans l'air).

Le contrôle est réalisé par un balayage de la surface de la pièce à vérifier par des transducteurs :

- soit dans un plan vertical de dimensions maximales : 1,5 m (longueur) x 3 m (hauteur) ;
- soit un cylindre vertical de 1,3 m (rayon) x 3 m (hauteur).

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

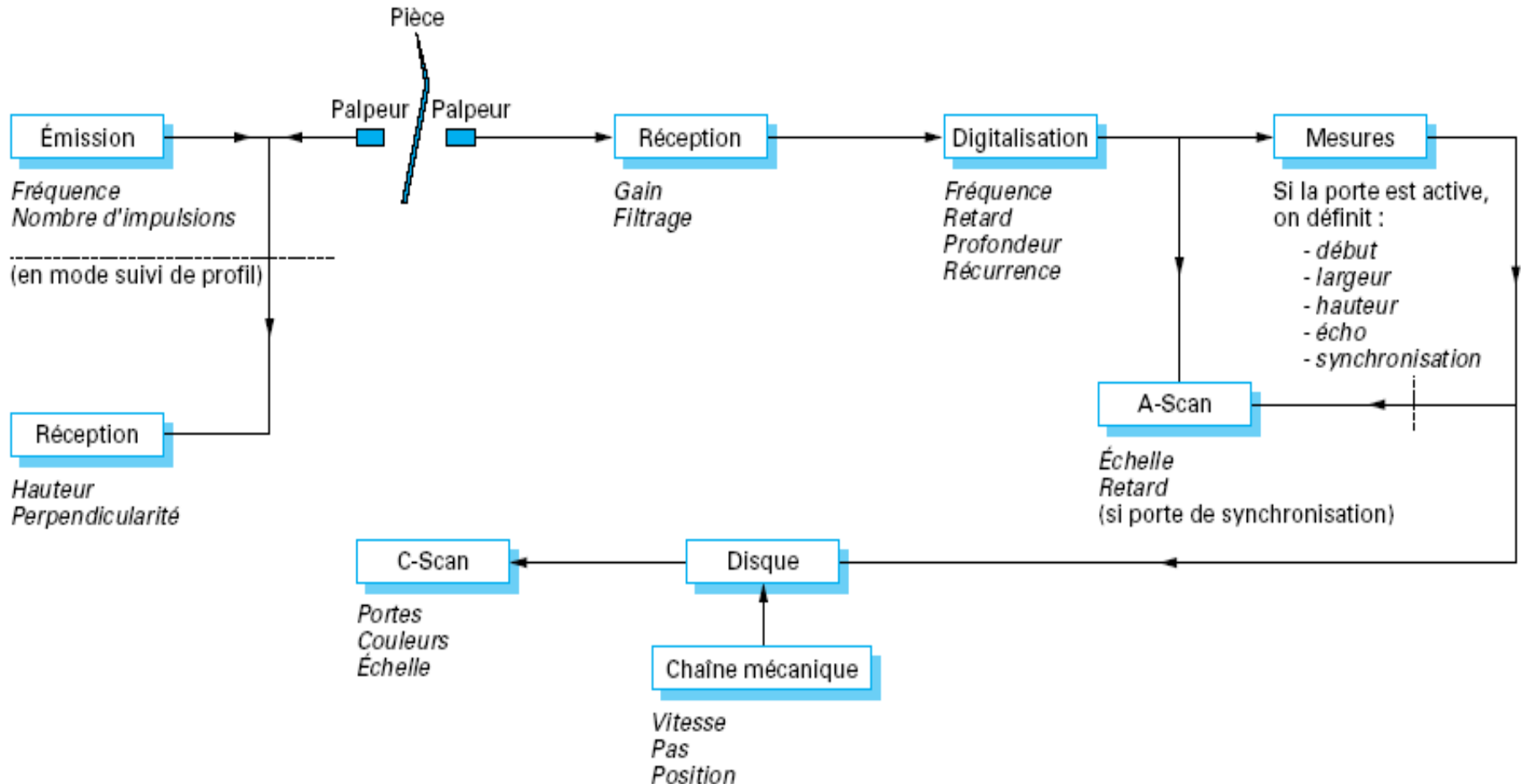
Principe de la méthode par transmission (2):



Installation de contrôle à jet d'eau par transmission cinématique

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode par transmission (3): La chaîne de mesure



En italique sont notés les paramètres associés à chaque fonction

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Défauts recherchés (1):

Terminologie des défauts

Le **délamination** est une décohésion franche entre deux plis de composite.

La **porosité** désigne la présence d'une grande quantité de cavités de diamètre inférieur à 1 mm, dispersées dans le matériau, généralement des bulles d'air.

Les **défauts de collage** sont des absences de liaison entre le revêtement et le nida ou entre deux peaux.

Les **écrasements de mailles du nida** correspondent à des déformations ou **flambage** des mailles.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Défauts recherchés (2):

Dimensionnement des défauts

Les **défauts** sont classés en deux catégories : les défauts surfaciques et les défauts longilignes.

Ils sont caractérisés par des grandeurs qui définissent l'importance du défaut, ses limites afin de considérer deux défauts comme un défaut unique ou comme deux défauts distincts.

La **densité de défauts** est la somme des surfaces de tous les défauts de la même famille rapportée à la surface totale

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (1)

La mesure par réflexion utilise **un seul transducteur ultrason** excité par des impulsions électriques. Le transducteur est **alternativement émetteur et récepteur**. Il émet une onde ultrasonore longitudinale qui se propage dans la pièce à contrôler et de direction perpendiculaire à la surface à examiner.

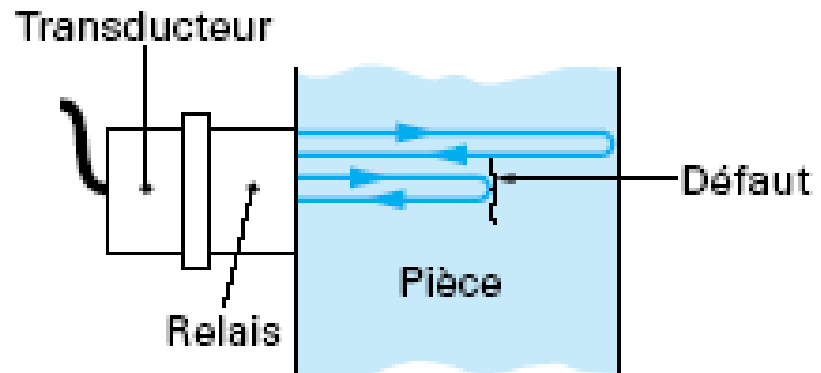
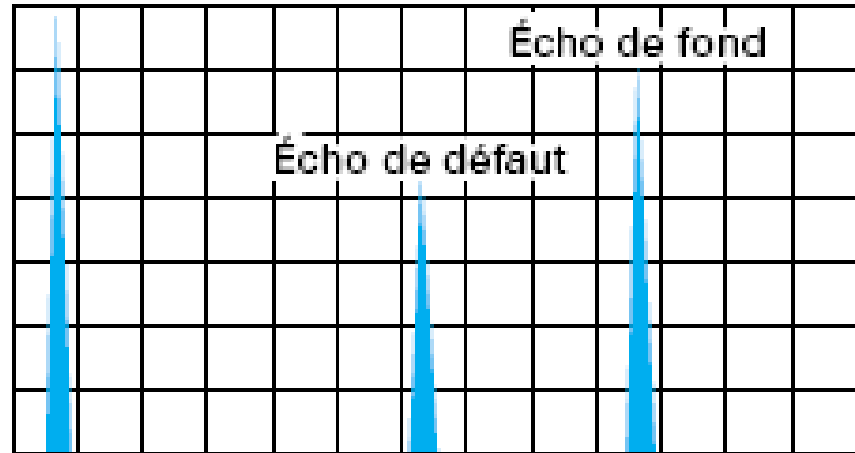
Toute discontinuité du milieu sondé entraîne la réflexion d'une partie de l'onde ultrasonore. L'analyse a pour but d'évaluer les échos réfléchis. La mesure de **l'intervalle de temps** séparant le signal électrique d'entrée et le signal électrique de retour indique la position en profondeur du défaut. **L'amplitude et la forme** des échos de défauts sont caractéristiques de la nature et de la dimension des défauts.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (2)

La mesure consiste à détecter les échos US
Caractéristiques des défauts ayant des amplitudes supérieures à 50 % de l'écran

Écho d'entrée



**Contrôle par réflexion :
identification d'un défaut**

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (3)

Appareil

Le **générateur d'ultrasons** doit avoir une haute résolution : bande passante large, compatible avec les conditions d'examen, large dynamique, bonne linéarité du système d'amplification.

Transducteurs

Les transducteurs utilisés sont fortement amortis à une fréquence nominale d'environ 10 MHz (large bande passante) et équipés d'une ligne de retard.

Étalons

Ces étalons doivent permettre de dimensionner les défauts constatés sur les pièces. Il faut donc prévoir des **pièces témoins** appelées cales dont l'épaisseur est au moins égale à celle de la pièce à contrôler et comportant des défauts artificiels de façon à se rapprocher de la réalité. Les étalons doivent être constitués du **même matériau** et être représentatifs de la forme et de l'état de surface des pièces inspecter.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (4)

Application de l'agent couplant

Cet agent est nécessaire pour assurer la bonne propagation des ondes ultrasons entre le palpeur et la pièce. Il doit être non agressif vis-à-vis du matériau à contrôler. L'agent couplant peut être :

- de l'eau ;
- de l'eau et du Teepol ;
- du gel (savon et de l'eau sous forme de pâte).

Étalonnage en distance et en amplitude

La base de temps de l'appareil à ultrasons doit être calibrée avec la cale de référence sur une zone d'épaisseur au moins égale à celle de la pièce à contrôler.

L'amplitude de l'écho de fond correspondant est obtenue sur une cale à défauts correspondant à la configuration de la pièce à contrôler.

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (5)

Dimensionnement des défauts dus au délaminage

La longueur du défaut est inférieure au diamètre du palpeur (l'écho de défaut reste inférieur à 90 % de la hauteur d'écran). Dans ce cas, on recherche sur la cale étalon le défaut de référence situé à la profondeur la plus proche du défaut à dimensionner donnant un écho de hauteur sensiblement égale à la hauteur d'écho de défaut rencontré sur la pièce. Le défaut sera caractérisé par le diamètre de ce défaut de référence (défaut réel de diamètre équivalent au diamètre du défaut simulé).

La dimension du défaut est supérieure au diamètre du palpeur (l'écho de défaut dépasse 90 % de la hauteur d'écran). Dans ce cas, on utilise la méthode à -6 dB décrite

Essais non destructifs - Contrôle par ultrasons

Principe de la méthode de contrôle par réflexion (6)

Dimensionnement des défauts dus au délaminage

On recherche sur la pièce le maximum d'amplitude du défaut détecté. On règle le gain de l'appareil de manière à ce que cet écho de défaut représente 100 % de la hauteur d'écran. On détermine sur la pièce la surface dont les contours sont caractérisés par une diminution de 50 % (– 6 dB) de l'amplitude de l'écho de défaut. On assimilera à un seul défaut les défauts multiples rapprochés entre lesquels il n'est pas possible de détecter avec le palpeur US une zone saine.

On indique la dimension du défaut équivalent ou la surface mesurée sur un croquis de la pièce en précisant sa position et sa profondeur exprimée en nombre de plis.

