



## RAPPORT D'EXPERTISE

### ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE NEUFCHATEAU

**DOC026480 / MES011537**

*La commercialisation de nos prestations est assurée par :*

**EURAILTEST**  
RAILWAY CONSULTANCY, ENGINEERING AND TESTING

1 boulevard Saint-Martin – 75003 Paris France  
Tél. 00 +33 (0)1 44 61 93 20 - Fax 00 +33 (0)1 44 61 93 21  
eurailtest@eurailtest.com - <http://www.eurailtest.com>

**Laboratoire Matériaux - Environnement - Structures**

<b>Destinataire :</b>	M. Bruno COZZI Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement BEA-TT Tour Voltaire 92055 La défense Cedex
-----------------------	---

**ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE NEUFCHATEAU****Résumé :**

Les expertises sont basées sur une comparaison :

- des faciès de rupture simulés en laboratoire, en essais de fatigue sur éprouvettes ;
- aux faciès constatés sur des toiles de roues de wagon.

Cette comparaison est construite à partir d'analyses en diffraction de rayons X, de microfractographies au microscope électronique à balayage (MEB), et de coupes micrographiques.

Les faciès de rupture des roues correspondent à une propagation en fatigue à grand nombre de cycles ( $\geq 1\ 000\ 000$ ). Cette étude n'écarte pas l'hypothèse d'un endommagement en fatigue à grand nombre de cycles, avec des surcharges ponctuelles.

**Références de la demande :** BEA-TT/19-2011**N° Affaire ERT :** 4284

<b>Elaboration du rapport</b>	<b>Approbation du rapport</b>
<u>Rédacteur</u> Nom : BANTING / CHEYNET / FERAUD Fonction : Expertises Matériaux	Nom : Jean-Luc TRANCART Fonction : Responsable de pôle Tel : 01 47 18 83 53
<u>Vérificateur</u> Nom : Benoît DODIN Fonction : Assemblages Fatigue	

**Avertissement :**

Les résultats présentés dans ce document ne se rapportent qu'aux produits soumis à l'essai, suivant les conditions indiquées dans son contenu. La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Il comporte 24 pages de texte et 7 pages d'annexes.

## DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE EXTERNE AEF

Références	Intitulé
NF A 03-400 (1983)	Essais de fatigue – Principes généraux
NF A 03-405 (1991)	Essais de fatigue – Traitement statistique des données
NF EN ISO 4288 (1988)	Spécification géométrique des produits (GPS) – Etat de surface : Méthode du profil
ERRI B 169/RP 9	Standardisation des essieux – Définition du cahier des charges des roues – Dimensionnement mécanique ; tenue à la fatigue
ERRI B 169/RP 19	Dimensionnement des roues – Critère de fatigue multiaxial

## DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE INTERNE AEF

Références	Intitulé
DOC024723	Expertise de roues de l'essieu type 9052 du wagon n° 3387 932 4340-7 de la société EVS
DOC021901	Expertise de deux roues de l'essieu type 9054 du wagon n°03780 6371-8 de la société Nacco
E07009A	Essai de fatigue en flexion plane 4 points
C07022A	Machine de fatigue « 25kN »
C06014C	Mesures de contraintes : mise en œuvre des produits d'extensométrie
C07009A	Fiche méthode de pilotage MTS
C07019A	Fiche méthode de réglage du PID
T91001C	Mise sous pression et asservissement des vérins excitateurs hydrauliques
MEE2AH 94017A	Boîtier de report d'étalonnage
MEE2AC95018A	Module de compensation pour jauges de contraintes
E06002A	Mesure d'état de surface avec appareil S2

## TABLE DES MATIÈRES

		<u>Page</u>
1 -	OBJET	4
2 -	PIECES SOUMISES A ESSAIS ET EXPERTISES	5
3 -	ESSAIS ET EXAMENS – METHODOLOGIE	5
3.1 -	Mesures de rugosité	5
3.2 -	Essais de fatigue	5
3.3 -	Examens microfractographiques	7
3.4 -	Examens micrographiques	8
3.5 -	Diffraction de rayons X	8
4 -	RESULTATS	9
4.1 -	Mesures de rugosité	9
4.2 -	Essais de fatigue	9
4.3 -	Examens microfractographiques	10
4.4 -	Examens micrographiques	18
4.5 -	Diffraction des Rayons X	20
5 -	CONCLUSIONS ET AVIS AEF	24

## ANNEXES

Annexe 1	Plan 10-4005 784 de la roue	1 feuille
Annexe 2	Prélèvement des éprouvettes	1 feuille
Annexe 3	Dessin des éprouvettes	1 feuille
Annexe 4	Photos d'une éprouvette	1 feuille
Annexe 5	Relevés de profils	2 feuilles
Annexe 6	Résultats des essais de fatigue	1 feuille

## 1 - OBJET

Dans le cadre de son enquête technique sur le déraillement d'un train de marchandises à Neufchâteau (88) le 22 mai 2010, suite à une rupture d'une roue d'un wagon, le bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a confié à l'AEF une mission d'assistance technique. Cette prestation a pour objet d'étudier le mode de fissuration des toiles de roue de wagon, afin de vérifier l'hypothèse d'une fissuration en service sous un chargement de fatigue oligocyclique (contraintes élevées, faible nombre de cycles).

Afin de lever le doute sur l'intensité du chargement mécanique subi par la roue défaillante, l'AEF a réalisé une étude pour :

- simuler par essais mécaniques des fissurations du matériau constitutif de la roue à partir de sollicitations maîtrisées en laboratoire ;
- comparer les morphologies de faciès de rupture obtenus en essais avec ceux constatés en service.

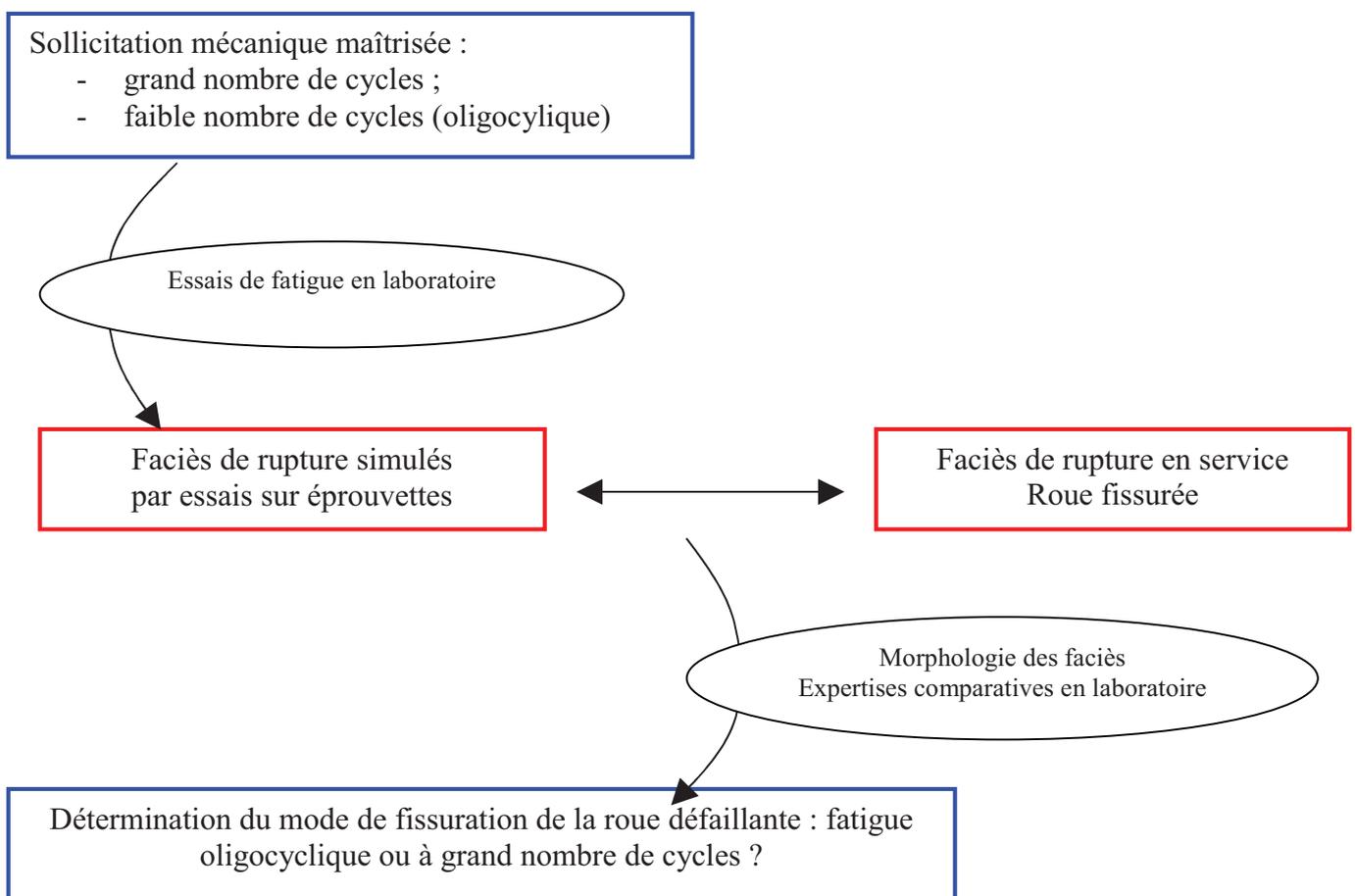


Figure 1 : présentation de la démarche de l'étude

## **2 - PIECES SOUMISES A ESSAIS ET EXPERTISES**

Suite à l'avarie de Neufchâteau des mesures conservatoires décidées par l'Etablissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) ont permis de détecter un nombre important de roues de wagon fissurées dans la toile.

Les éprouvettes d'essais de fatigue ont été prélevées dans la toile d'une de ces roues fissurées, essieu type 9054 n°543075 du wagon n°3780 784 6371-8, (*repérée A2, rapport d'expertises AEF DOC021901*) et détectée à Thionville. Cette roue de fabrication Valdunes porte le marquage "UV B 8337 7 95 R7". Elle a été fabriquée selon le plan SNCF 10-4005 784 (annexe 1).

Ces éprouvettes (spéciales de flexion, non normalisées) ont été conçues par l'AEF afin de conserver l'état brut de la toile de roue sur une face de l'éprouvette. Des photos des prélèvements et de l'ébauchage sont reprises en annexe 2.

Les éprouvettes usinées répondent au dessin AEF 29083. Ce dessin est repris en annexe 3. Des photos d'une éprouvette sont reprises en annexe 4.

Pour les besoins de l'étude les éprouvettes sont repérées de 1 à 21.

Les faciès des fissures constatées en service proviennent de :

- la roue A1 "Thionville", selon le rapport AEF DOC021091;  
*Roue "UV B 8337 7 95 R7", essieu type 9054 n°543075, wagon n°3780 784 6371-8,*
- la roue (échantillons B42, B43 et B44) "EVS", selon le rapport AEF DOC024723;  
*Roue 64 "82064 UV 376 R7", essieu 9052 n° 621979, wagon n°3387 932 4340-7*

## **3 - ESSAIS ET EXAMENS – METHODOLOGIE**

### **3.1 - Mesures de rugosité**

Des mesures d'état de surface ont été réalisées selon la norme ISO 4288. Les profils sont réalisés sur chaque face de l'éprouvette, à l'état brut et usiné des éprouvettes 2 à 11.

### **3.2 - Essais de fatigue**

#### **3.2.1 - Objectif**

L'objectif était de reproduire sur éprouvettes des amorçages et des fissurations sous différents niveaux de sollicitation maîtrisés afin de disposer de faciès de rupture caractéristiques d'amorçage et de fissuration en fatigue :

- à faible nombre de cycles (< 100 000 cycles) ;
- à grand nombre de cycles (> 100 000 cycles).

De plus, cette étude permet de comparer les limites de fatigue pour les états de surface brutes et usinés, afin de vérifier le coefficient d'abattement à appliquer sur état brute de forgeage, ce dernier prenant en compte d'une part l'aspect géométrique (état de surface) et métallurgique (éventuels défauts de surface tels que décarburation, incrustation d'oxydes).

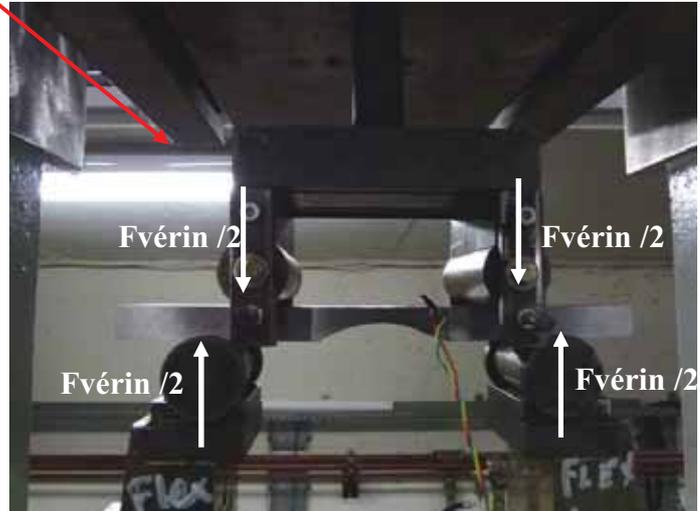
#### **3.2.2 - Banc d'essai et montage**

Le banc d'essai utilisé pour solliciter les éprouvettes est la machine de traction-compression AEF « 25 kN ». La machine est équipée d'un vérin à paliers hydrostatiques muni d'un capteur de force de  $\pm 25$  kN. Le vérin est piloté par une électronique MTS.

Afin de reproduire des sollicitations de flexion, le montage d'essai utilisé est de flexion 4 points. Le principe du montage ainsi qu'une photo du banc d'essai sont repris ci-après.



**Photo 1** : banc d'essai de fatigue



**Photo 2** : montage de flexion 4 points  
(pour ce cas, la surface usinée est testée)

L'influence de l'état de surface a été étudiée en mettant en tension la surface usinée ou la surface brute de l'éprouvette au cours des essais de flexion.

### 3.2.3 - Instrumentation de l'éprouvette de flexion

Afin de vérifier l'application des sollicitations de flexion, l'éprouvette spéciale de flexion a été instrumentée avec une jauge unidirectionnelle de déformation de longueur de grille 5 mm positionnée au centre de la face usinée dans le sens long. Une photo de l'éprouvette instrumentée est reprise ci-dessous.



**Photo 3** : éprouvette instrumentée

La chaîne de mesure utilisée pour les acquisitions était une chaîne de mesure intégrée à l'électronique de pilotage MTS du banc d'essai.

La section de l'éprouvette n'étant pas tout à fait constante sur la longueur de la jauge, les mesures sont moyennées et légèrement inférieures (ordre de grandeur : 15 MPa) à la contrainte maximum calculée au niveau de la section la plus faible.

### 3.2.4 - Paramètres d'essai

L'essai consiste à faire subir aux éprouvettes des sollicitations mécaniques de flexion ondulée, sinusoïdale monotone, dont les paramètres sont définis ci-dessous :

- rapport de charge positif.  $R = 0,1$  ;
- fréquence d'essai  $f = 25$  Hz ;
- critère d'arrêt :  $10^7$  cycles ou rupture de l'éprouvette.

Les essais sont réalisés à des températures estimées entre +15 et +30°C (non régulées). Aucune sollicitation thermique n'a été simulée.

### 3.3 - Examens microfractographiques

A l'aide de la microscopie électronique à balayage, il est possible d'identifier les modes de propagations des ruptures, par analyse qualitative des faciès (stries de fatigue, cupules, intergranulaire, clivage). Cette technique s'appelle la microfractographie.

Depuis les années 2000, il est clairement établi que la répartition surfacique des types de faciès de rupture prédominants traduit la réponse du matériau à une sollicitation externe. Il est donc possible de corréler la répartition de ces faciès aux facteurs mécaniques gouvernant la résistance à la fissuration (contrainte maximale et amplitude). La répartition des faciès de rupture est alors déterminée à partir de clichés réalisés en microscopie à balayage.

La coexistence de différents types de faciès de rupture sur une rupture par fatigue peut s'expliquer comme suit. Considérons le cas d'un matériau polycristallin, soumis à une contrainte globale. La contrainte locale au niveau d'un grain est déterminée par l'orientation de celui-ci par rapport à l'axe de sollicitation. La même situation peut être traduite dans le cas d'une sollicitation en fatigue. Suivant le raisonnement présenté ci-dessus, on comprend que l'intensité des contraintes locales, dépendant de l'orientation locale du grain, peut varier d'un grain à l'autre.

Selon cette hypothèse, pour une sollicitation globale, l'intensité des contraintes peut varier localement le long du front de fissure.

Ceci explique pourquoi sur une surface de rupture peuvent coexister plusieurs modes de ruptures, caractérisés par plusieurs types de faciès.

Il est également possible d'observer le faciès propre à la fatigue, à savoir les stries de fatigue et plus particulièrement leur espacement. En effet, l'avancée de la fissure se fait avec des pas différents selon le niveau de chargement local, car selon la théorie couramment admise de Laird, l'apparition des stries de fatigue est la conséquence d'une création irréversible de nouvelles surfaces libres, générées par un défaut d'accommodation du matériau (déformation plastique locale) sous une contrainte cyclique. En conséquence l'espacement des stries de fatigue peut être un indicateur du chargement subi par la pièce ou l'éprouvette.

C'est à l'aide de cette méthode que nous cherchons à identifier la présence ou non d'un chargement oligocyclique. L'étude se base sur l'identification des faciès caractéristiques des éprouvettes fissurées sous des sollicitations connues, puis sur leur comparaison avec ceux retrouvés sur la roue expertisée.

### **3.4 - Examens micrographiques**

Une coupe micrographique est réalisée perpendiculairement au faciès, au droit d'une zone d'amorçage. La fatigue oligocyclique peut laisser des « traces » sur la microstructure, en laissant apparaître des plans de glissement, aussi appelés bandes de Lüders. Ces bandes sont en général orientées à 45° par rapport à la direction de la contrainte appliquée.

L'observation est réalisée au microscope optique, après attaque métallographique au nital 4%.

Il est à noter que sur une structure perlitique, ces bandes ne sont pas observables. Mais dans le cas des éprouvettes brutes, une décarburation totale a pu être observée lors des expertises précédentes. L'observation de ces grains de ferrite, en surface, aux abords de l'amorçage de la fissuration peut permettre de mettre en évidence une éventuelle plastification lors de la fissuration.

### **3.5 - Diffraction de rayons X**

Le matériau est bombardé par un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles de longueur d'onde connue, produit grâce à une anticathode. Un détecteur mesure l'intensité et l'angle du rayonnement X diffracté pour un angle d'incidence donné. L'enregistrement réalisé est la courbe de l'intensité des rayons X diffractés en fonction des angles de diffraction.

L'acquisition est effectuée par une unité de contrôle. Le traitement des diffractogrammes, ou spectres, s'effectue à l'aide d'un logiciel faisant correspondre les distances interréticulaires aux angles enregistrés. La position des pics de diffraction permet l'identification des structures ou phases cristallines présentes. Le déplacement des pics peut également servir à mesurer des contraintes résiduelles, tandis que leur forme peut permettre d'identifier des micro-déformations (taux d'écroutissage).

Cette dernière propriété est utilisée dans cette étude. En effet, la fatigue oligocyclique, aussi couramment appelée "fatigue plastique", se caractérise par une déformation plastique à chaque cycle plus importante qu'en fatigue classique.

Une analyse des pics de diffraction acquis sur la surface des faciès de fissuration des éprouvettes de fatigue, dans les zones d'amorçage, va permettre de caractériser un niveau de déformation. Il est comparé à celui des faciès de rupture des roues.

## 4 - RESULTATS

### 4.1 - Mesures de rugosité

Les résultats des mesures de rugosité Ra et Rz sont repris dans le tableau 1 ci-dessous.

N° Eprouvette	Ra (µm)		Rz (µm)	
	Face Brute	Face Usinée	Face Brute	Face Usinée
2	18,5	1,6	89,4	11,1
3	17,4	1,2	84,5	8,6
4	19,9	1,2	91,6	8,0
5	19,7	1,4	95,6	9,4
6	21,2	1,4	97,8	10,2
7	17,2	1,2	85,5	7,6
8	19,9	1,1	102,0	7,7
9	19,6	0,7	96,8	5,2
10	21,5	1,1	104,7	7,4
11	19,0	1,3	93,4	8,1
Moyenne	19,4	1,2	94,1	8,3

**Tableau 1 : résultats des mesures de rugosité**

A titre d'exemple, les relévés de profil de l'éprouvette 3 sur faces brute et usinée sont donnés en annexe 5.

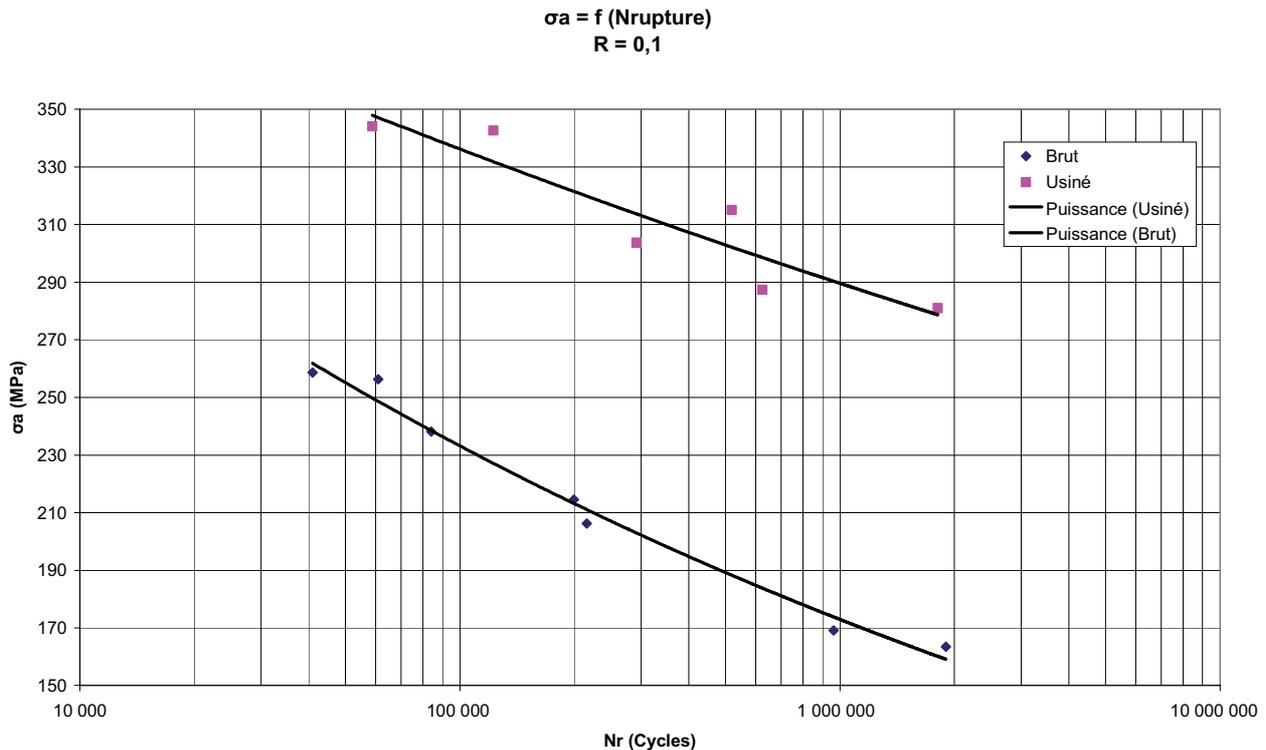
Les valeurs obtenues sur les surfaces brutes sont représentatives de la population des roues expertisées dans le cadre de l'affaire du déraillement de Neufchateau.

Les valeurs de rugosité Ra des faces usinées des éprouvettes sont inférieures à celles spécifiées dans la norme produit roue (NF EN 13262), à savoir 3,2µm pour les roues de catégorie 1 et 12,5 µm pour les roues de catégorie 2.

### 4.2 - Essais de fatigue

Les résultats des essais de fatigue sont repris en annexe 6.

Ces résultats sont représentés sur une courbe représentant l'amplitude de contrainte ( $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ ) en fonction du nombre de cycles à rupture.



**Figure 2 : représentation graphique des résultats des essais de fatigue**

Les essais de fatigue ont permis de disposer d'éprouvettes rompues à faible (<100 000 cycles) et grand nombre de cycles ( $\geq 1\,000\,000$ ) avec amorçage sur face usinée et sur face brute.

Pour un nombre de cycles à rupture donné, l'amplitude de contrainte nécessaire pour aboutir à la ruine de l'éprouvette, avec amorçage sur état de surface brut, est de l'ordre de 60 à 70% de l'amplitude de contrainte nécessaire pour rompre une éprouvette avec initiation sur état de surface usiné.

A titre de comparaison, on peut relever dans le RP 19 du comité ERRI B 169 que la limite d'endurance en flexion, déterminée à partir d'essais sur un grand nombre d'éprouvettes prélevées dans la toile d'une roue en ER7, à 50% de probabilité de survie à  $10^7$  cycles est de :

- 242 MPa à R=0,1 pour un état de surface usiné ( $1,5\ \mu\text{m} < \text{Ra} < 4,5\ \mu\text{m}$ );
- 135 MPa à R=0,1 pour un état de surface brut (rugosité non précisée).

Par ailleurs, on peut relever dans le RP 9 du comité ERRI B 169 que la limite d'endurance en flexion, déterminée à partir d'essais sur roue à l'échelle 1, à 50% de probabilité de survie à  $10^7$  cycles pour des toiles de roue usinée est 281 MPa à R=-1, et 277 MPa à R=-0,6. :

#### **4.3 - Examens microfractographiques**

Les observations au microscope électronique à balayage ont été réalisées selon les conditions expérimentales et la méthodologie suivantes :

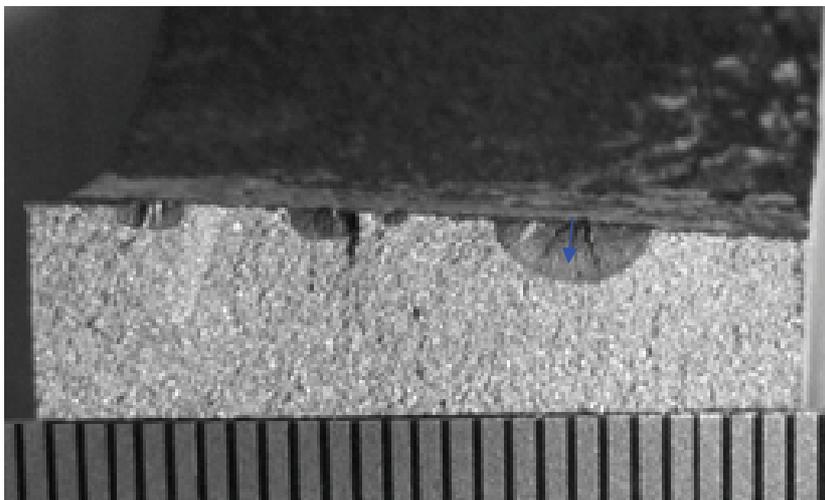
- détecteurs d'électron secondaire ;
- tension d'accélération 15kv ;
- distance de travail : 10mm ;
- grandissement 3000X.

L'observation est réalisée par balayage de la rupture, sur une ligne perpendiculaire au front de propagation, en partant d'une amorce, « a » représente la distance du cliché à l'amorçage.

Dans un but de représentativité des sollicitations d'amorçage, seules les éprouvettes avec une "peau brute" sont observées :



**Photo 4 :** Exemple d'exploration d'éprouvette  
(échelle : 1 graduation = 0.5 mm)



**Photo 5 :** Exemple d'exploration d'échantillon de roue  
(échelle : 1 graduation = 0.5 mm)

L'ensemble des éprouvettes et des échantillons de roues analysées sont repris dans le tableau n°2.

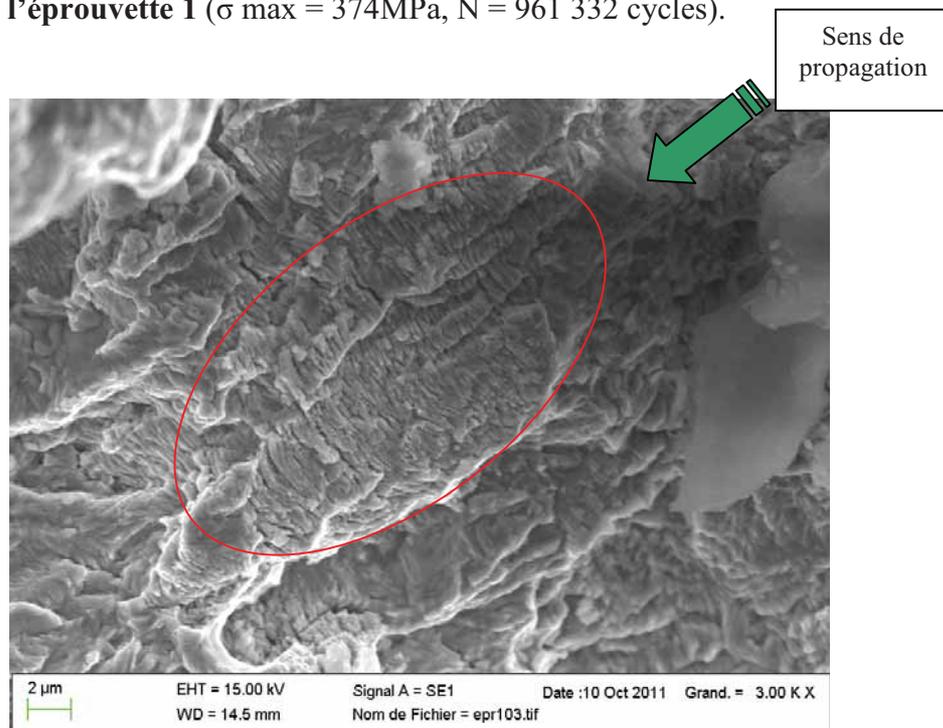
Echantillon n°	$\sigma$ max (MPa)	N (cycles)
<b>Eprouvettes</b>		
1	374	961 332
2	333	1 898 101
11	440	34 226
17	458	215 433
19	569	66 976
<b>Roue "EVS"</b>		
B42	? (inconnu)	? (inconnu)
B43	? (inconnu)	? (inconnu)
B44	? (inconnu)	? (inconnu)

**Tableau 2 : Eprouvettes et échantillons de roues analysées.**

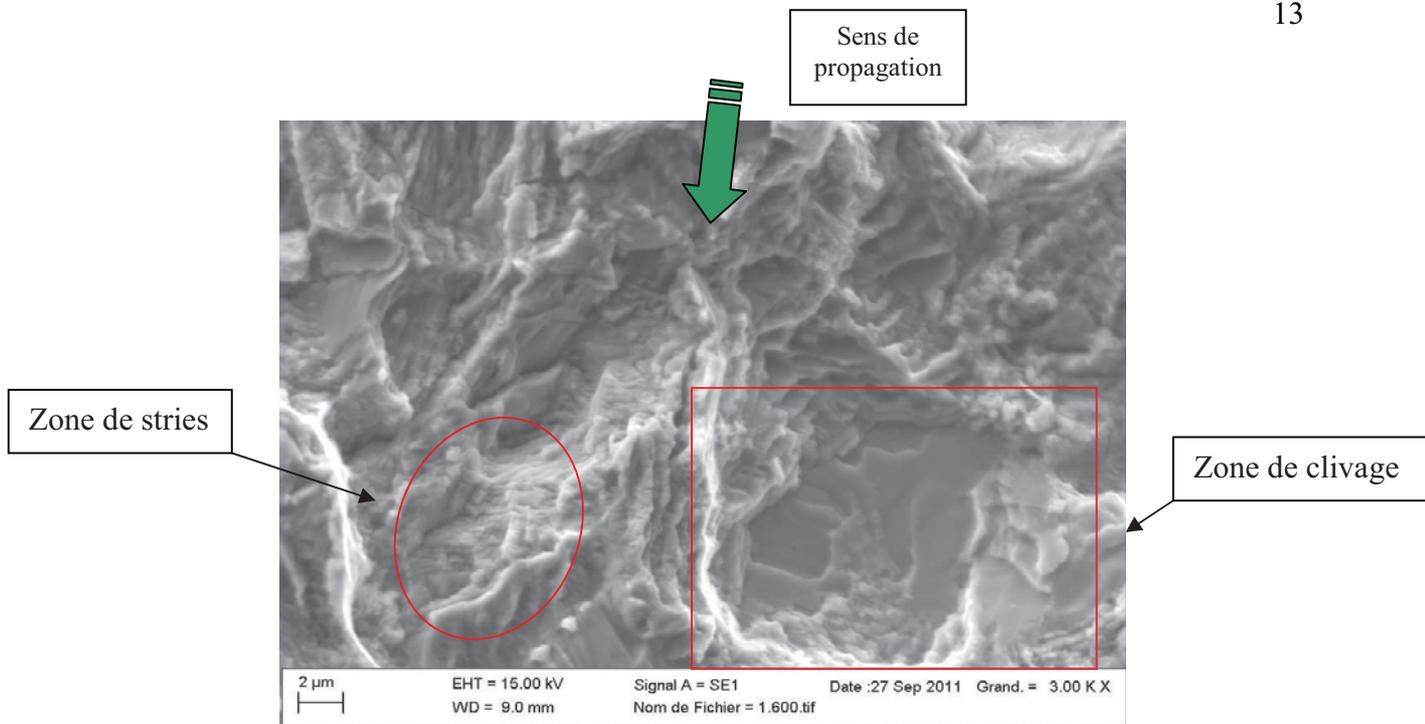
Les clichés représentatifs de chaque faciès de rupture sont repris ci-dessous. Ils sont positionnés à partir :

- du sens de propagation de la fissure principale (faciès de rupture) ;
- de la distance de l'amorçage (a).

- **Observations de l'éprouvette 1** ( $\sigma$  max = 374MPa, N = 961 332 cycles).



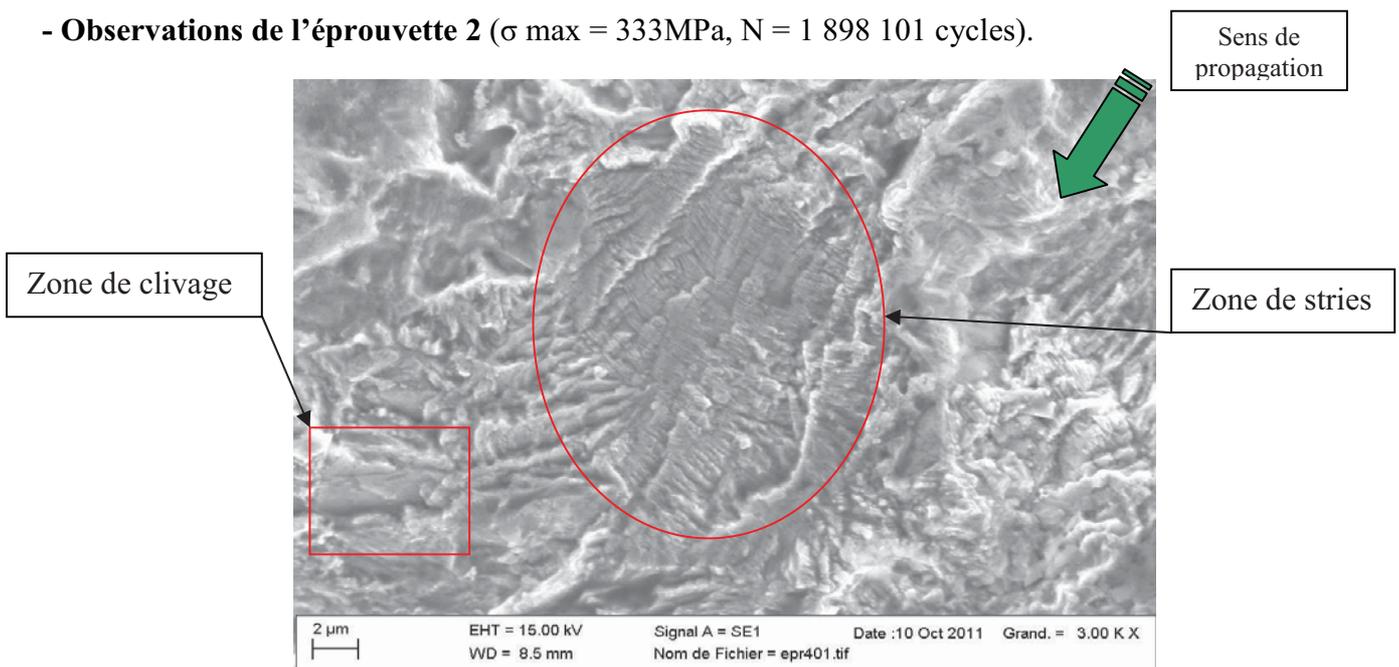
**Photo 6 : Zone de propagation à stries serrées (a=300μm).**



**Photo 7 :** Zone de propagation à stries serrées et clivage (a=200μm).

On observe sur cette éprouvette des zones de stries de fatigue serrées et des zones de clivages.

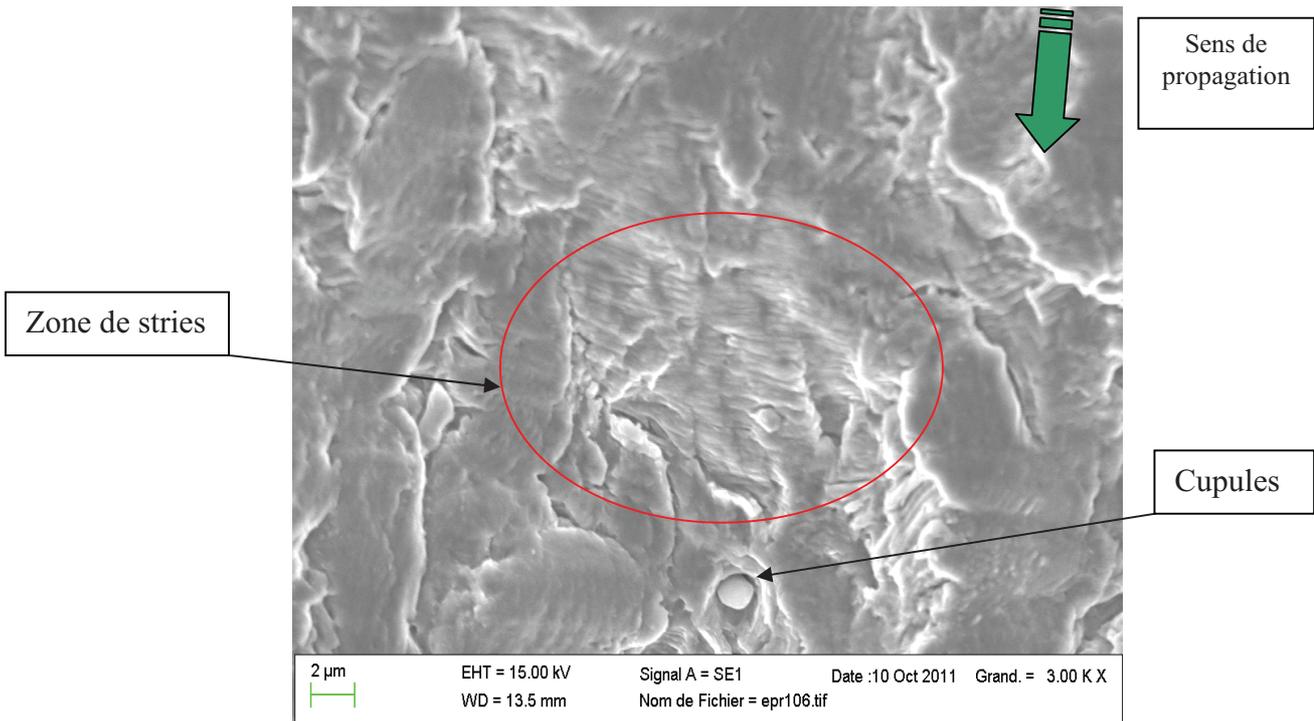
- **Observations de l'éprouvette 2** ( $\sigma_{\max} = 333\text{MPa}$ ,  $N = 1\,898\,101$  cycles).



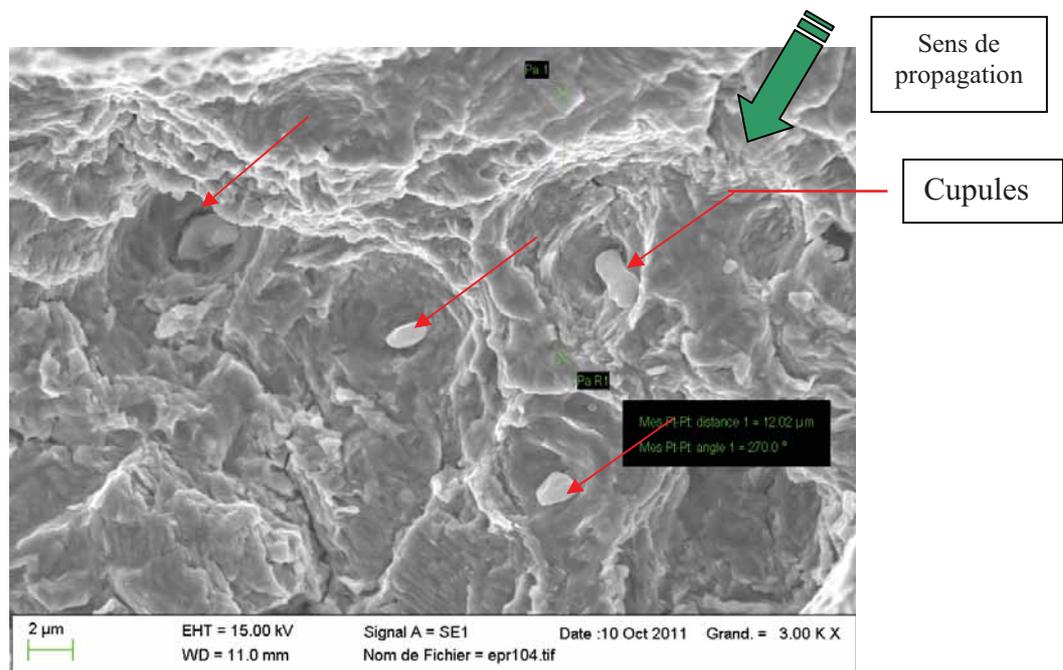
**Photo 8 :** Zone de propagation à stries serrées et clivage (a=400μm).

On observe sur cette éprouvette des zones de stries de fatigue serrées et des zones de clivages.

- Observations de l'éprouvette 11 ( $\sigma_{max} = 440$  MPa,  $N = 34\,226$  cycles).



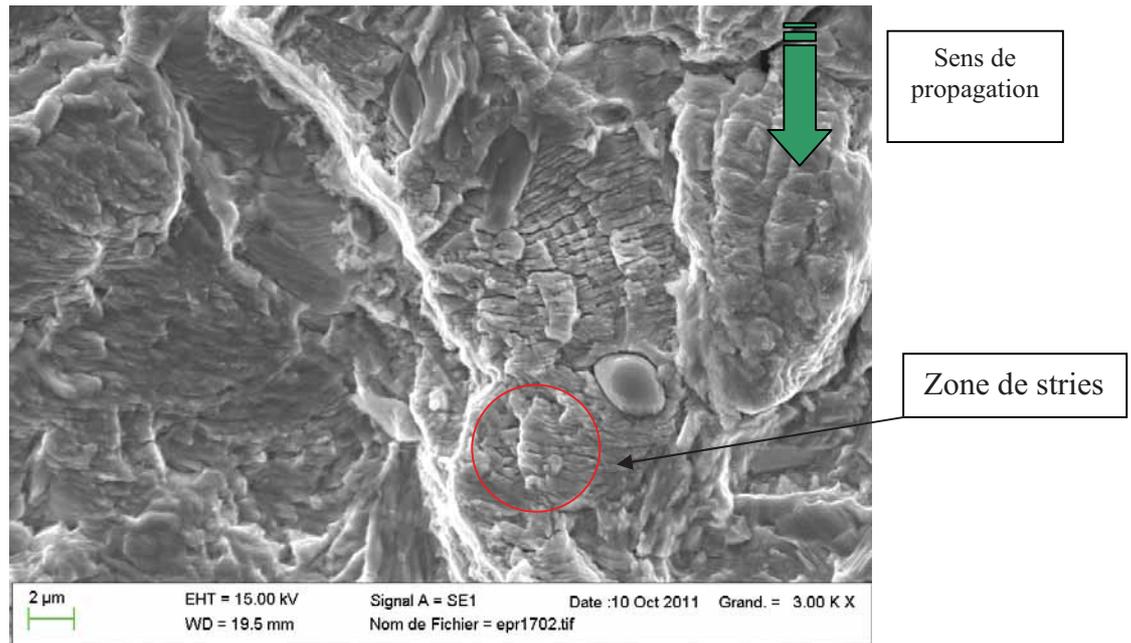
**Photo 9 :** Zone de propagation à stries larges et cupules ( $a=140\mu\text{m}$ ).



**Photo 10 :** Zone de cupules ( $a=140\mu\text{m}$ ).

On observe sur cette éprouvette des zones de stries de fatigue larges et des zones de cupules, à des distances inférieures à  $150\mu\text{m}$  de profondeur.

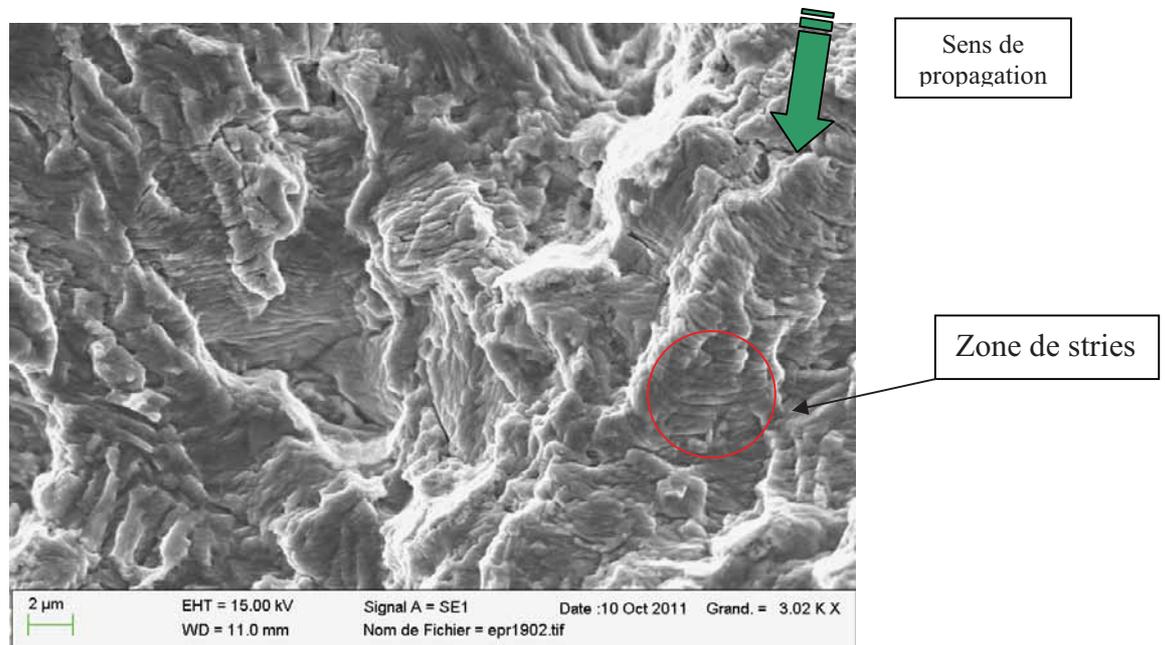
- **Observations de l'éprouvette 17** ( $\sigma_{\max} = 458$  MPa,  $N = 215\,433$  cycles).



**Photo 11** : Zone de propagation à stries larges ( $a=150\mu\text{m}$ ).

On observe sur cette éprouvette des zones de stries de fatigue larges et des zones de cupules (non visibles sur cette photo).

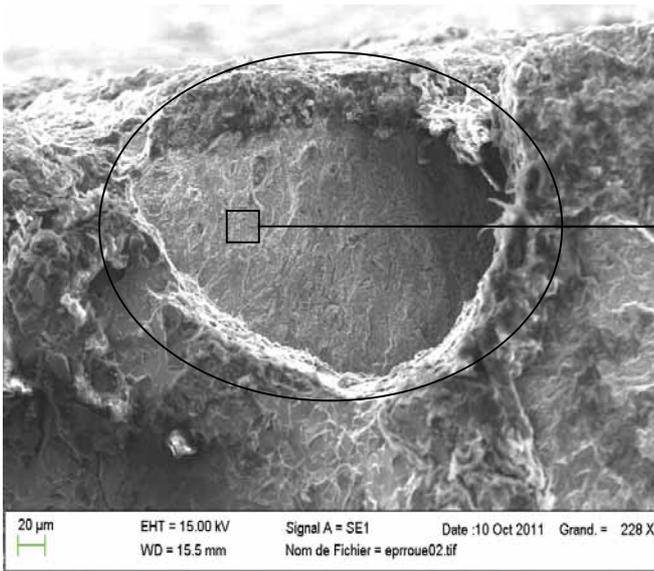
- **Observations de l'éprouvette 19** ( $\sigma_{\max} = 569$  MPa,  $N = 66\,976$  cycles).



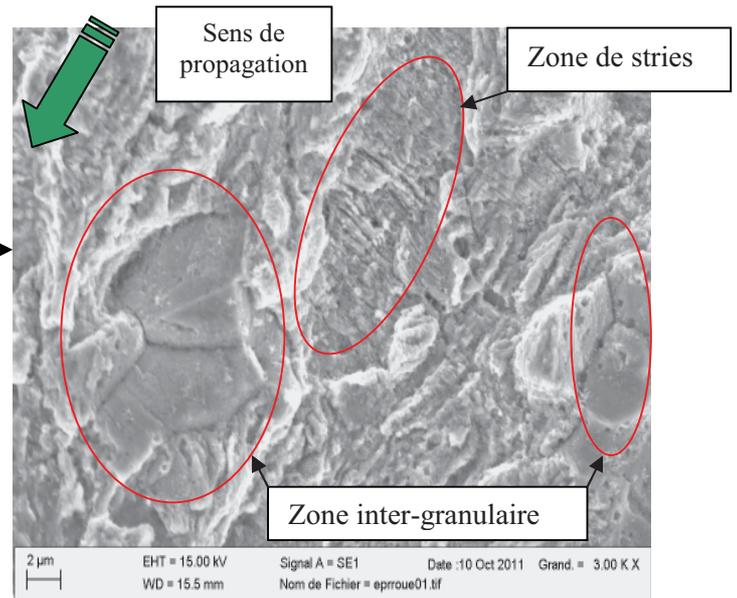
**Photo 12** : Zone de propagation à stries larges ( $a=200\mu\text{m}$ ).

On observe sur cette éprouvette des zones de stries de fatigue larges et des zones de cupules (non visibles sur cette photo).

- Observations de l'échantillon de roue B42 ( $\sigma_{max} = ?$  MPa,  $N = ?$  cycles).



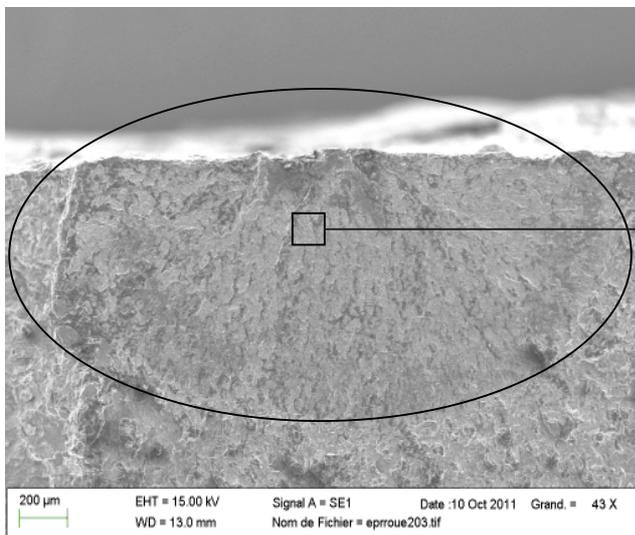
**Photo 13** : Zone de fissuration.



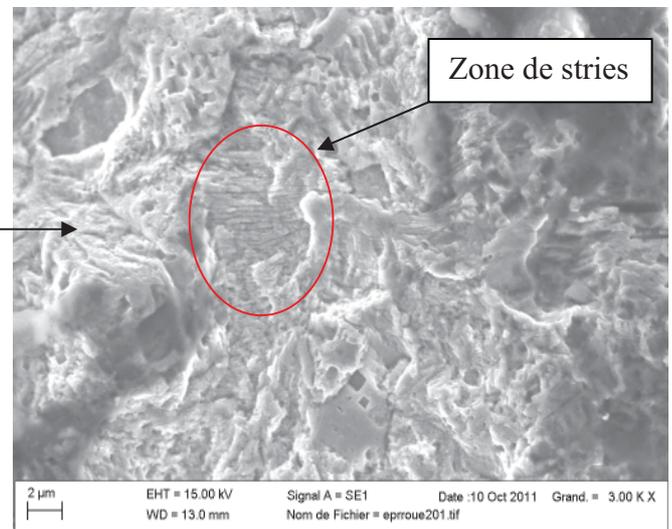
**Photo 14** : Zone de propagation à stries serrées et décohésion inter-granulaire ( $a=125\mu\text{m}$ ).

On observe sur cet échantillon de roue des zones de stries de fatigue serrées et des zones de zones de décohésion inter-granulaire.

- Observations de l'échantillon de roue B43 ( $\sigma_{max} = ?$  MPa,  $N = ?$  cycles).



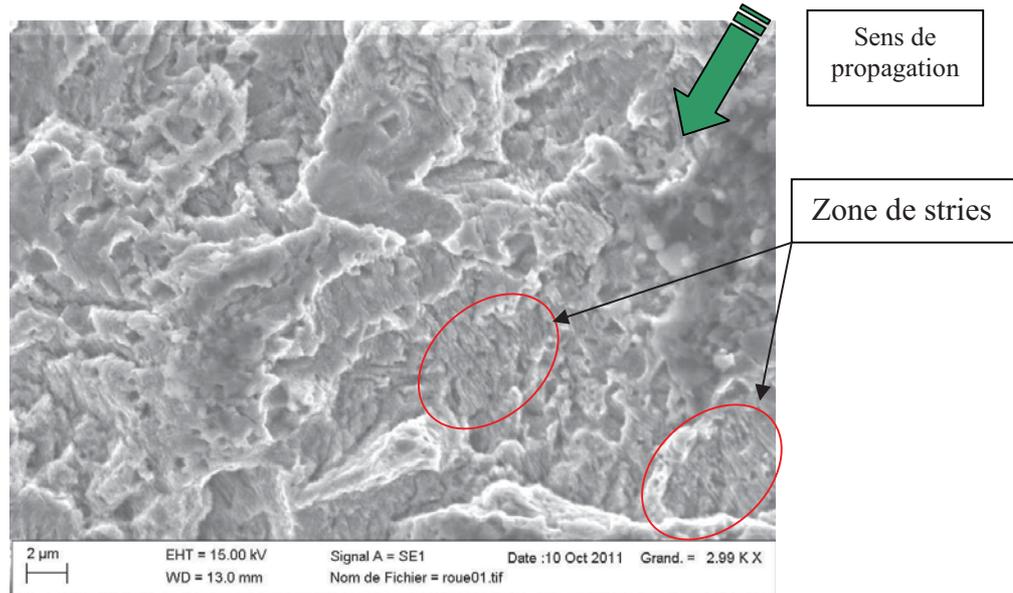
**Photo 15** : Zone de fissuration.



**Photo 16** : Zone de propagation à stries serrées ( $a=200\mu\text{m}$ ).

On observe sur cet échantillon de roue des zones de stries de fatigue serrées et des zones de décohésion inter-granulaire (non visibles sur cette photo).

- Observations de l'échantillon de roue B44 ( $\sigma_{max} = ?$  MPa,  $N = ?$  cycles).



**Photo 17 :** Zone de propagation à stries serrées ( $a=130\mu\text{m}$ ).

On observe sur cet échantillon de roue des zones de stries de fatigue serrées et des zones de décohésion inter-granulaire (non visibles sur cette photo).

Les différentes observations réalisées sur les éprouvettes classent celles-ci en deux catégories :

- les éprouvettes 1 et 2, avec des stries serrées et du clivage ;
- les éprouvettes 11, 12, 17 et 19 avec des stries plus larges et des cupules.

Les trois échantillons de roue présentent des stries plutôt serrées et des zones de décohésion inter-granulaire.

Si l'on considère le mécanisme de rupture d'un point de vue énergétique, le clivage et la décohésion inter-granulaire sont des mécanismes demandant peu d'énergie pour s'activer. En revanche, celui de formation de cupules demande plus d'énergie (déformation plastique).

De par les stries serrées et par un mode de rupture (local) faiblement énergétique, les morphologies des fissures des éprouvettes 1 et 2 sont les plus proches de celles de roues analysées. Les éprouvettes 1 et 2 sont deux éprouvettes de fissuration de fatigue à grand nombres de cycles ( $\geq 1\ 000\ 000$  cycles). Selon l'analyse microfractographique, les fissurations de fatigue des roues se rapprochent plus d'une fissuration par fatigue à grand nombres de cycles.

#### 4.4 - Examens micrographiques

Il est à noter que sur une structure perlitique, les bandes de glissement ne sont pas observables. Mais dans le cas des éprouvettes brutes, une décarburation totale a pu être observée lors des expertises précédentes. L'observation de ces grains de ferrite, en surface, aux abords de l'amorçage de la fissuration peut mettre en évidence une éventuelle plastification lors de la fissuration.

L'observation est réalisée après attaque métallographique au nital 4%.

L'examen est réalisé sur huit éprouvettes, selon le tableau ci-dessous.

Repère	Type de fatigue	Etat de surface	Microstructure	Présence de bandes de glissement
1	Grand nb	Brut	Décarburation totale	Néant
2	Grand nb	Brut	Décarburation partielle	Néant
11	Oligo	Brut	Décarburation partielle	Néant
12	Oligo	Brut	Décarburation partielle	Néant
6	Grand nb	Usiné	Ferrito-perlitique	Néant
8	Grand nb	Usiné	Ferrito-perlitique	Néant
13	Oligo	Usiné	Ferrito-perlitique	Néant
16	Oligo	Usiné	Ferrito-perlitique	Néant

Tableau 3 : bilan des observations micrographiques

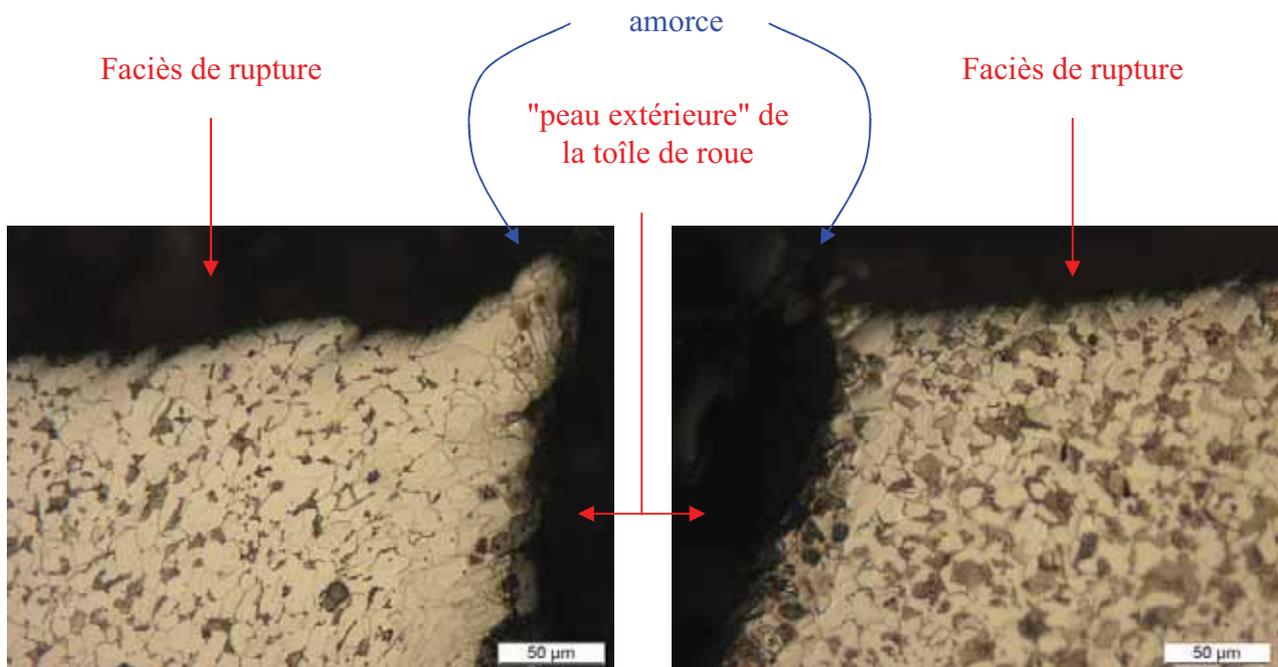
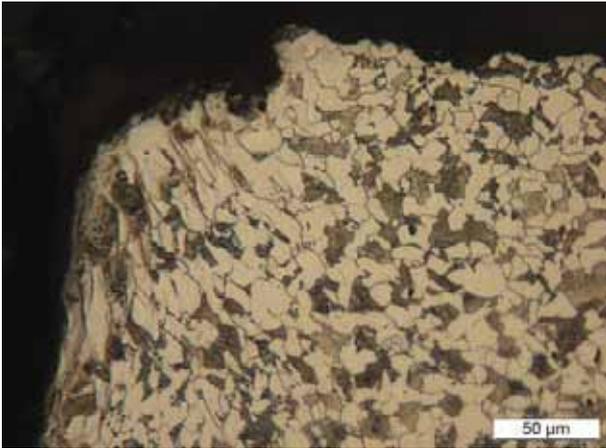
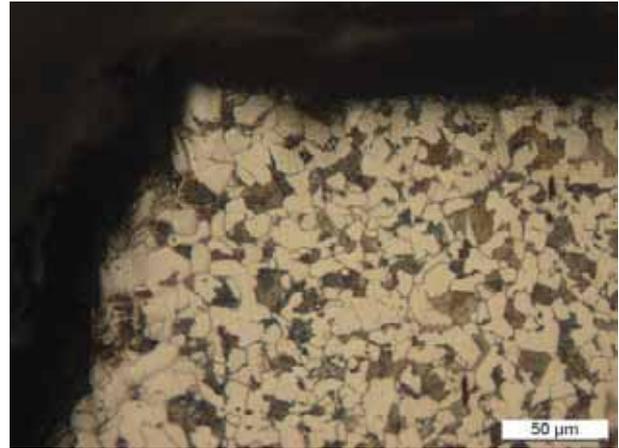


Photo 18 : Eprouvette 1

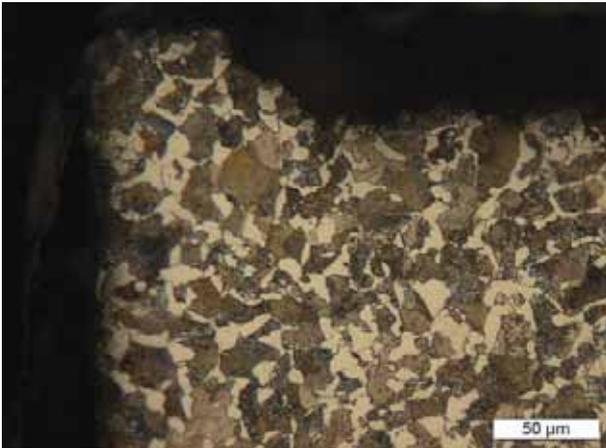
Photo 19: Eprouvette 2



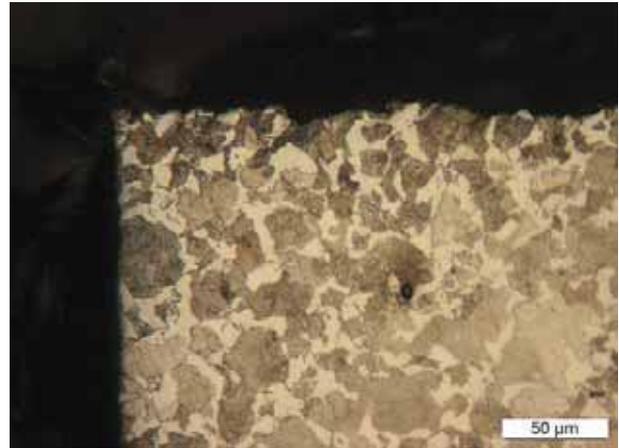
**Photo 20 :** Eprouvette 11



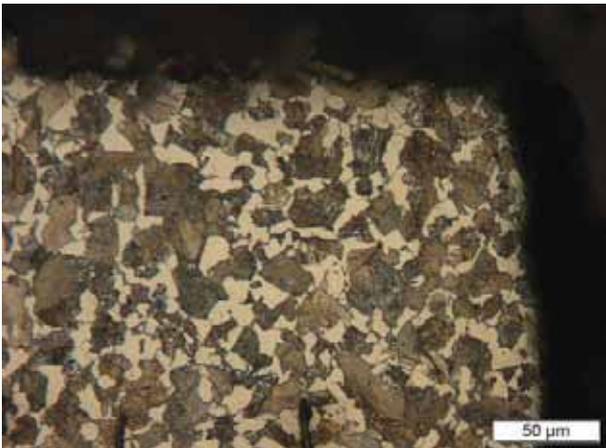
**Photo 21 :** Eprouvette 12



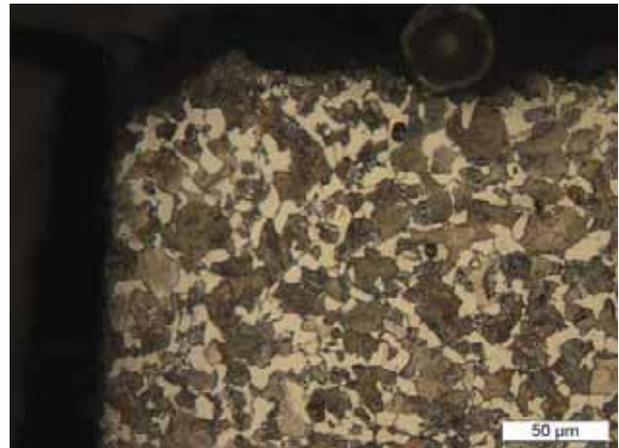
**Photo 22 :** Eprouvette 6



**Photo 23 :** Eprouvette 8



**Photo 24 :** Eprouvette 13



**Photo 25 :** Eprouvette 16

Aucune singularité de microstructure n'est mise en évidence permettant de différencier les éprouvettes rompues en fatigue classique ou en fatigue à faible nombre de cycles ; que ce soit sur les fissurations amorcées côté brut ou côté usiné.

A noter la présence d'incrustation de calamine pouvant dépasser les 50  $\mu\text{m}$  :

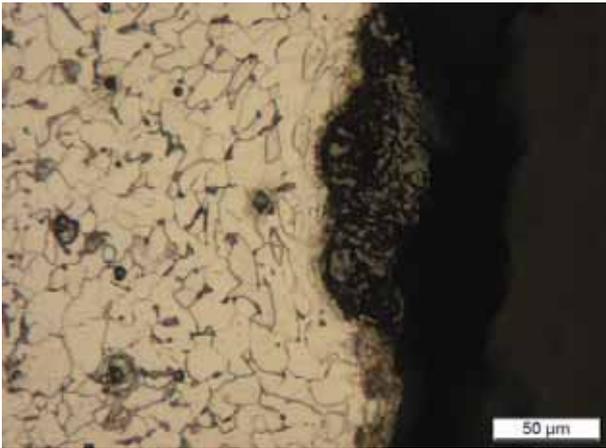


Photo 26 : Epreuve 13

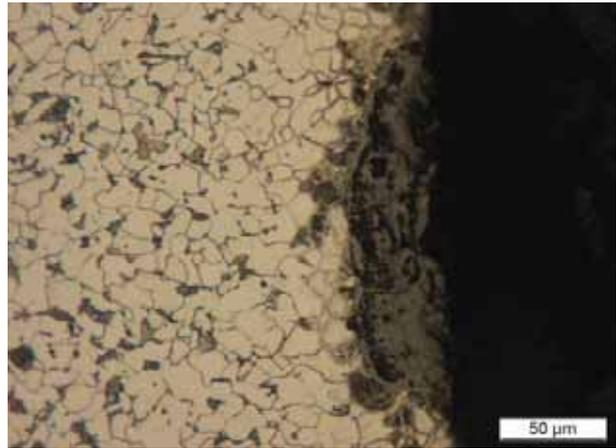


Photo 27 : Epreuve 16

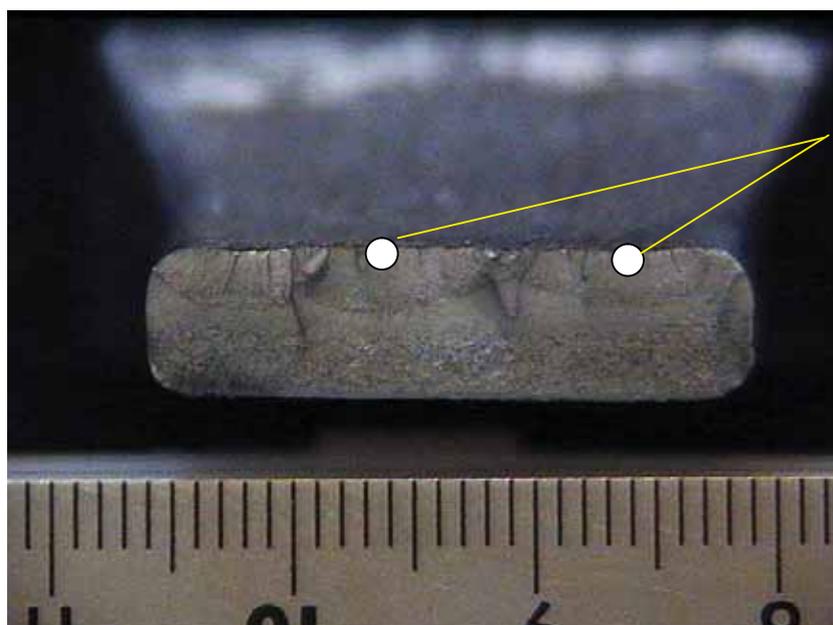
#### 4.5 - Diffraction des Rayons X

L'essai de diffraction de rayons X est réalisé à l'aide d'un appareil portatif de type IXRD MG40P de la marque PROTO manufacturing. Les paramètres d'essais sont présentés dans le tableau ci-dessous.

<b>Constantes</b>		<b>Acquisition</b>		<b>Localisation des pics</b>	
Anode	Cr	Angles B	5	Méthode	gaussienne
$\lambda$	2,291 s-1	B max	30°	Hauteur	60%
Plan	[211]	Temps	20 s	Corrections	P/G
2 $\theta$	156,31°	Moyenne sur	5		LPA
1/2 S2	5,832E-06	Oscillation	sans		
S1	1,277E-06	Collimateur	1 mm		
D	1,17042242				

Tableau 4 : paramètres d'essais en diffraction de rayons X

Deux mesures de largeurs de pics sont réalisées pour chaque faciès. Les points de mesures correspondent aux amorces de fissuration. Un exemple est donné à la figure 3.



Points de mesure  
(diamètre 1 mm)

Figure 3 : position des points d'analyse (exemple de l'épreuve 11)

Les résultats obtenus, dont la largeur à mi-hauteur (FWHM), sont indiqués dans le tableau 5.

	nb cycle	$\sigma_{moy}$ (MPa)	Amplit (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	FWHM	Face amorçage
1	961932	205	169	374	1,75	Brute
2	1898101	199	163	362	1,74	Brute
15	40942	317	259	576	1,89	Brute
17	215433	252	206	458	1,87	Brute
18	84061	291	238	529	1,87	Brute
19	60976	313	256	569	1,81	Brute
4	291470	371	304	675	1,84	Usinée
5	519710	385	315	700	1,83	Usinée
6	625167	351	287	638	1,80	Usinée
8	1807968	343	281	624	1,82	Usinée
13	58821	419	344	763	1,86	Usinée
16	122500	417	343	760	1,88	Usinée

Tableau 5 : résultats d'analyse par diffraction de rayons X sur éprouvettes de fatigue

En rapprochant les résultats de diffraction de rayons X aux valeurs d'amplitude de contrainte appliquées lors des essais de fatigue, la figure n°4 est tracée. On y observe une augmentation des largeurs de pics en fonction de l'augmentation de l'amplitude et de la nature de l'état de surface.

Des mesures sont également réalisées sur les fissures réelles des roues "EVS". Les valeurs sont reprises dans le tableau 6 :

	FWHM	Face amorçage
B42	1,80	Brute
B43	1,74	Brute
B44	1,73	Brute

Tableau 6 : résultats d'analyse par diffraction de rayons X sur fissures réelles

La moyenne de ces valeurs est matérialisée par la ligne rouge sur la figure 4.

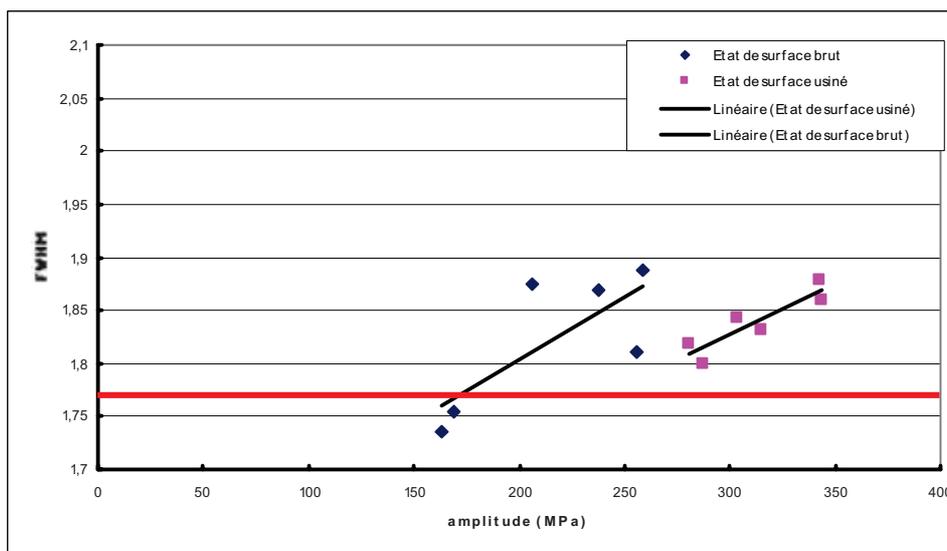


Figure 4 : résultats de diffraction de rayons X en fonction de l'amplitude de contrainte en essais de fatigue

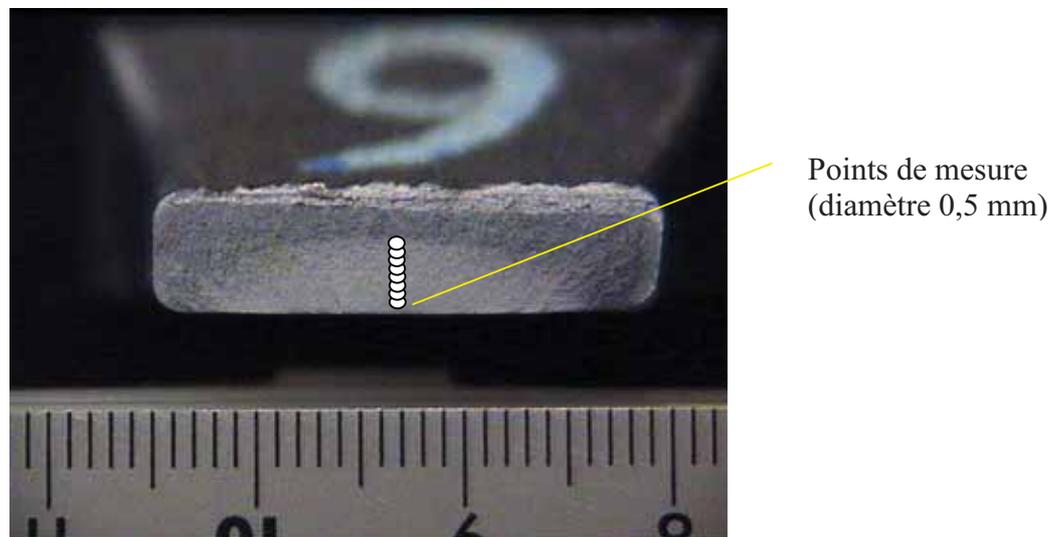
On note une dispersion des résultats sur les éprouvettes fissurées côté état de surface brut plus importante que celle obtenue sur les éprouvettes fissurées côté usiné.

En effet, du fait de la présence de multi amorçages, des lignes radiales perturbent la planéité du faciès et donc la forme du pic.

Les faciès des fissures des roues présentent des largeurs de pics sensiblement égales à celles observées sur les faciès des éprouvettes rompues par fatigue à grand nombre de cycles ("faible amplitude").

Pour confirmer l'influence du chargement (amplitude) sur la largeur de pic, des filiations d'acquisitions sont réalisées :

- sur les éprouvettes 6 et 13 ;
- sur deux fissures des roues de Thionville (position des points à la figure 5). La dimension des points d'analyse est de 0,5 mm de diamètre.



**Figure 5 : position des points d'analyse**

Ces résultats, présentés à la figure 6, confirment l'augmentation des largeurs de pics en fonction de l'augmentation de la contrainte. En effet, les essais de fatigue étant pilotés en force, la contrainte augmente en fonction de la réduction de section due à l'évolution de la fissuration.

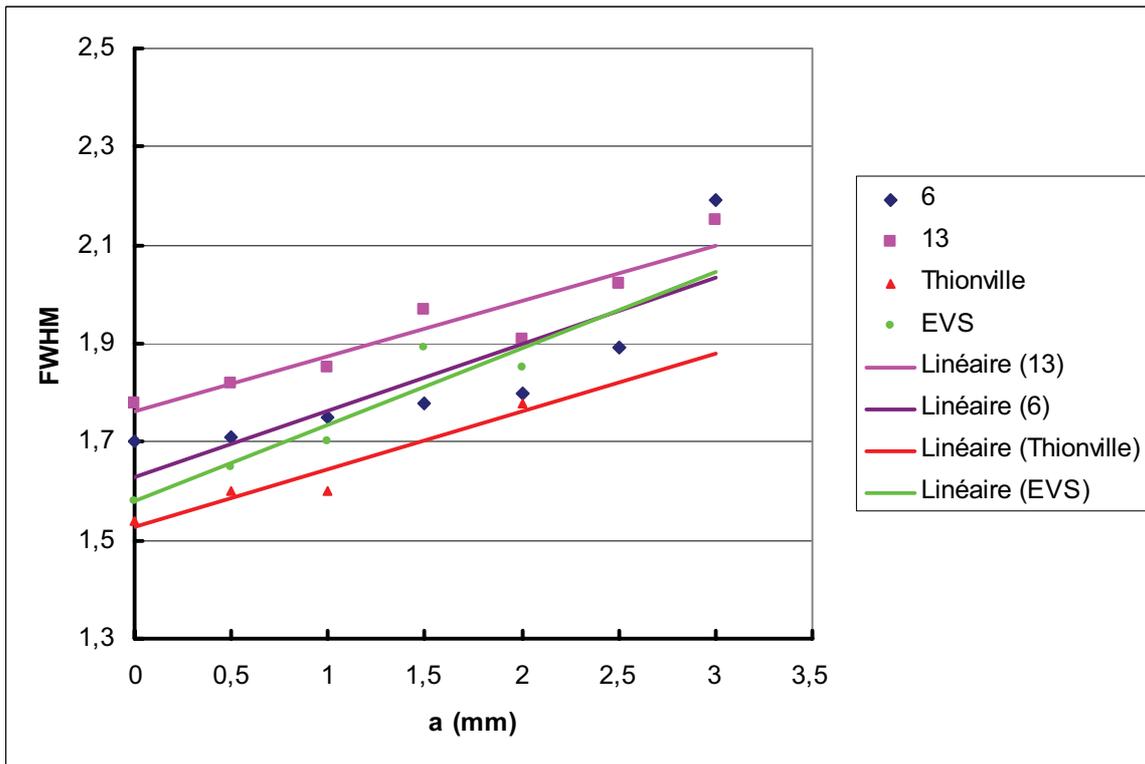


Figure 6 : résultats de diffraction de rayons X en fonction des paramètres de fatigue

On constate que les courbes tracées à partir des largeurs de pics mesurées sur les faciès des fissures des roues ont un comportement proche de celles obtenues à partir du faciès de l'éprouvette 6 (fatigue à grand nombre de cycles) et en dessous de celles tracées à partir du faciès de l'éprouvette 13 (fatigue oligocyclique).

Cet examen indique que les fissures des roues de Thionville et EVS semblent se propager en fatigue à grand nombre de cycles.

## **5 - CONCLUSION ET AVIS AEF**

Les expertises sont basées sur une comparaison :

- des faciès de rupture simulés en laboratoire, en essais de fatigue sur éprouvettes (flexion 4 points, rapport de charge positif) ;
- aux faciès constatés sur des toiles de roues de wagon.

Cette comparaison est construite à partir d'analyses en diffraction de rayons X, de microfractographies au microscope électronique à balayage (MEB) et coupes micrographiques.

### Microfractographies :

De par les stries serrées et par un mode de rupture (local) faiblement énergétique, les morphologies des fissures des éprouvettes à grand nombre de cycles ( $\geq 1\ 000\ 000$  cycles) sont les plus proches de celles de roues analysées.

### Micrographies :

Aucune singularité de microstructure n'est mise en évidence permettant de différencier les éprouvettes rompues en fatigue classique ou en fatigue à faible nombre de cycles ; que ce soit sur les fissurations amorcées côté brut ou côté usiné.

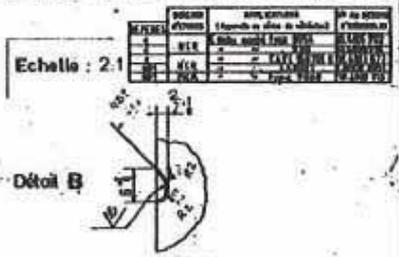
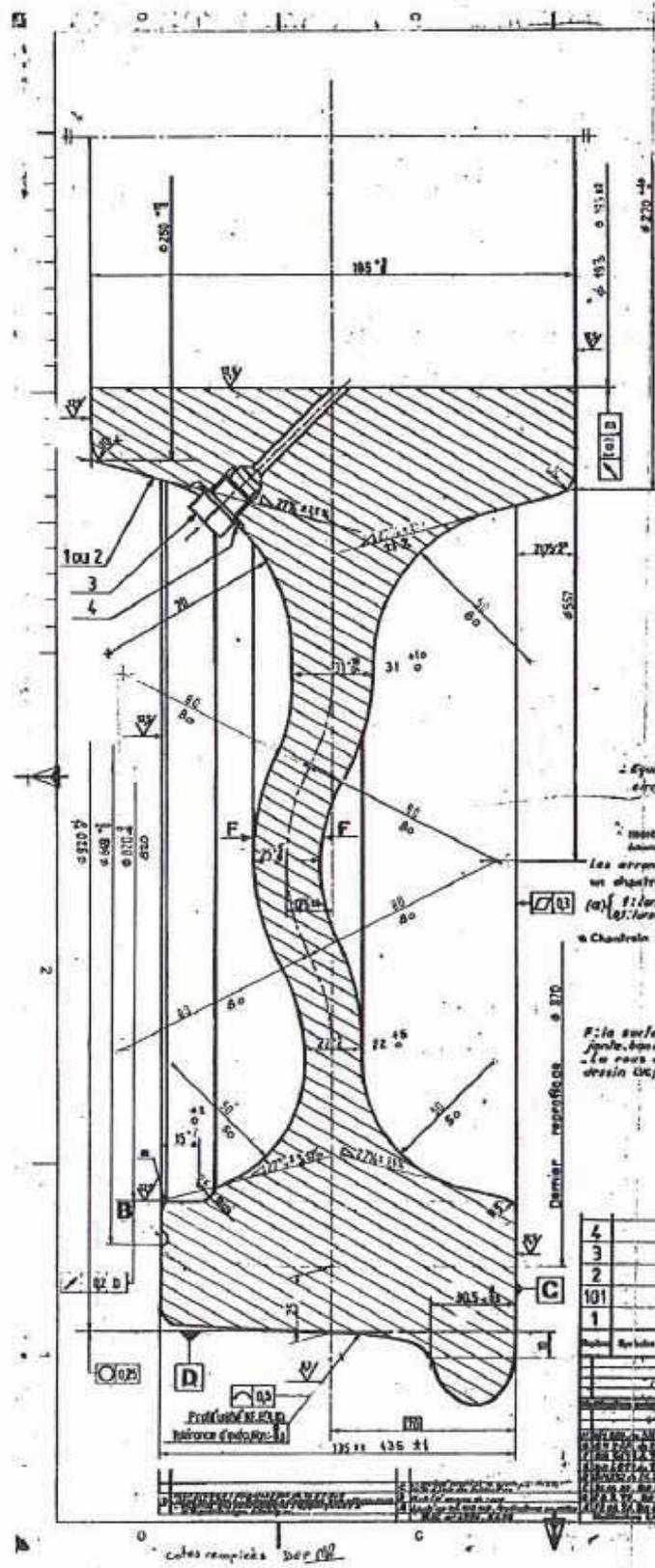
A noter la présence d'incrustation de calamine pouvant dépasser les 50  $\mu\text{m}$ .

### Diffraction de rayons X :

Les courbes représentant les largeurs de pics en fonction de l'amplitude de contrainte appliquée indiquent que les faciès des roues "Thionville" et "EVS" ont un comportement proche de celles obtenues à partir du faciès d'éprouvette à grand nombre de cycles, et en dessous des tracés des éprouvettes en fatigue oligocyclique.

En conclusion, les faciès de rupture des roues correspondent à une propagation en fatigue à grand nombre de cycles ( $\geq 1\ 000\ 000$ ). Cette étude n'écarte pas l'hypothèse d'un endommagement en fatigue à grand nombre de cycles, avec des surcharges ponctuelles.

10 4005784 H 19951127 AM2D 00068 1 / 1 47100011 10 4005784 H 19951127 AM2D 00068 1 / 1 47100011



Equilibrage statique à balourd réduit pour roues de véhicules circulant à une vitesse inférieure ou égale à 120 km/h.

INDICATIONS PARTICULIÈRES DE FABRICATION: Ces roue doivent satisfaire aux conditions "essais" de la norme d'équilibrage et de roulement (C.C.F.).  
Les arêtes de 80 mm peuvent être remplacés par un chanfrein de 30° à 60°.

(a) Si l'équilibrage est obtenu à partir de la table de roulement.  
(b) lorsque l'équilibrage est obtenu à partir de l'alignement du moyeu.

Chanfrein ou arête de 2 mm.

La surface de la roue et de ses congés de raccordement avec la jante, le moyeu et le moyeu peut être brute de laminage ou de forgeage.  
Le roue défilé par ce dessin est identique à celle représentée par le dessin d'axe n° 209 et 1111 001 sauf en ce qui concerne le profil de roue.

4	1	Ronde de frein	NF F02 049	
3	1	Bouchon à tête hexagonale 1/4	NF F02 049	
2	1	Roue monobloc à treu de décalage	ACRILITE 343	
101		ROUE MONOBLOC (ensemble) comprenant:		
1	1	Roue monobloc sans trou de décalage	ACRILITE 343	
Roues		Déclaration des pièces		Matériaux, épaisseurs, dimensions, caractéristiques techniques
<p><b>ROUE MONOBLOC</b> (Diamètre au roulement 320)</p> <p>21502</p> <p>10-4005784</p>				

10 4005784 H 19951127 AM2D 00068 1 / 1 47100012

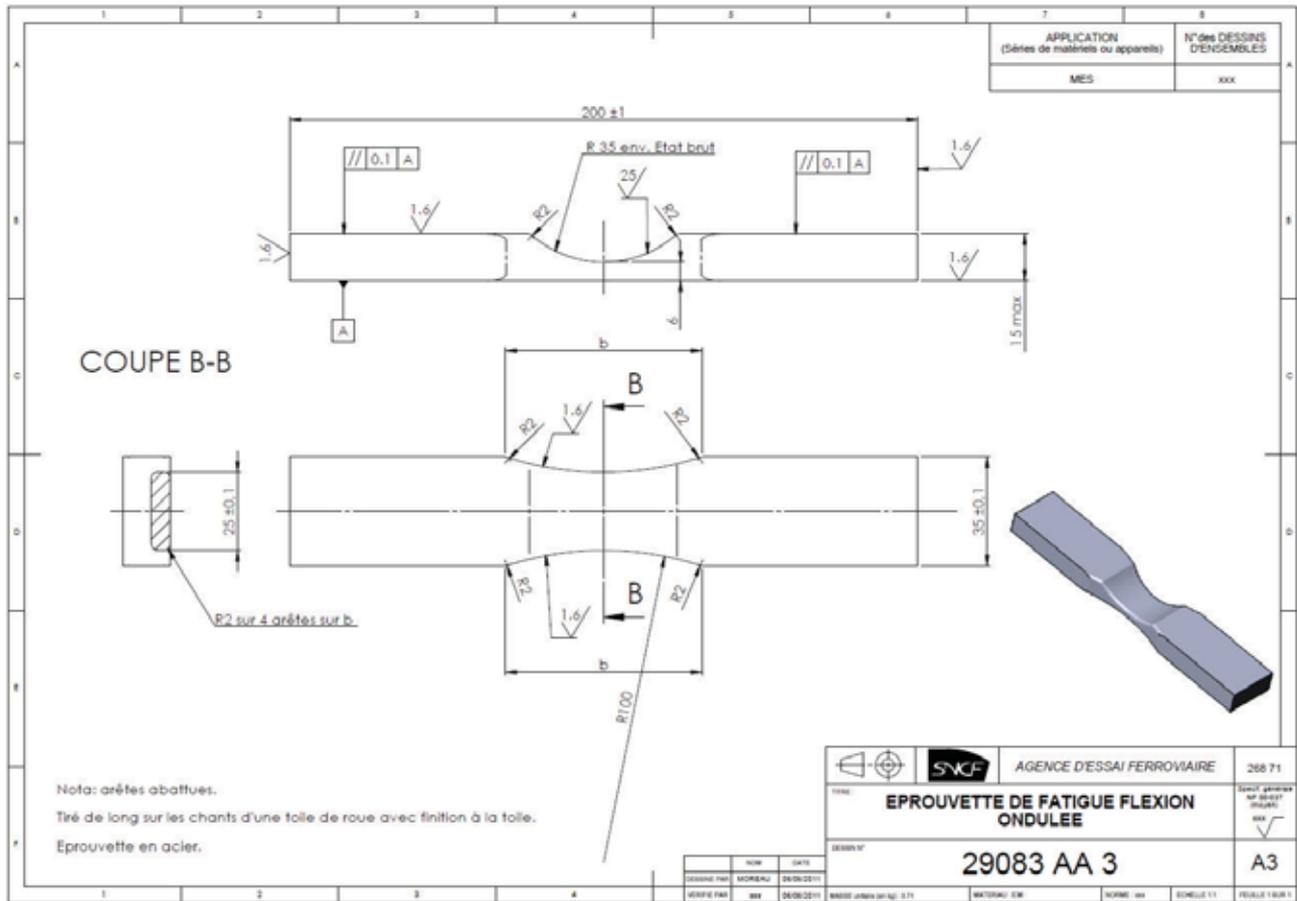
<p>AEF MES011537 DOC026480</p>	<p>ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE NEUFCHATEAU Prélèvement des éprouvettes</p>	<p>Annexe 2  f 1/1</p>
--	--	--------------------------------



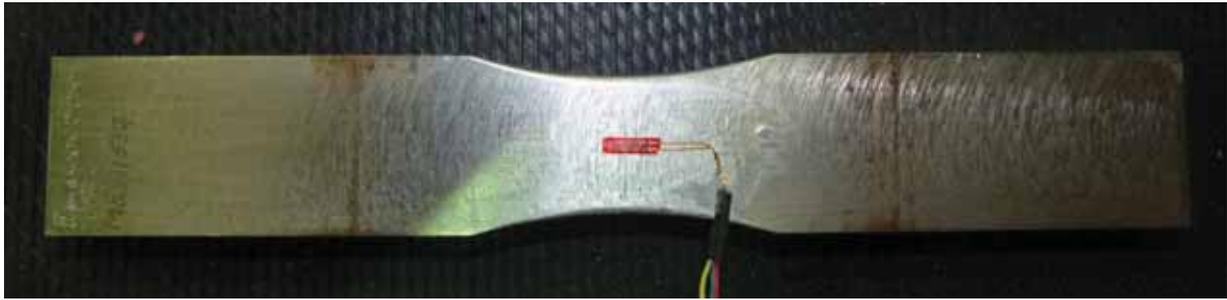
**Photo 4:** prélèvement des tranches dans la toile d'une roue fissurée de l'essieu type 9054 n°543075 du wagon n°3780 784 6371-8 repérée A2 et détectée à Thionville



**Photo 5:** ébauche



<b>AEF</b> <b>MES011537</b> <b>DOC026480</b>	<b>ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE</b> <b>ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE</b> <b>NEUFCHATEAU</b> <b>Photos d'une éprouvette</b>	<b>Annexe 4</b>  <b>f 1/1</b>
--	--	-------------------------------------



**Photo 6** : éprouvette face usinée

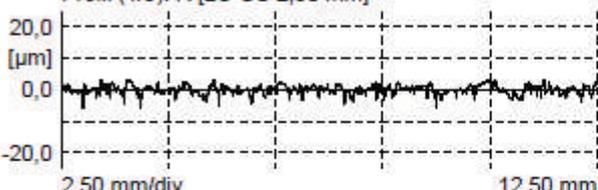
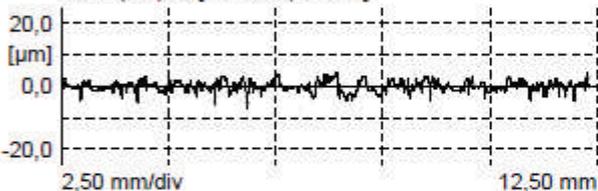
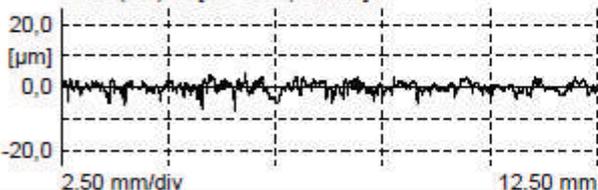


**Photo 7** : éprouvette de côté

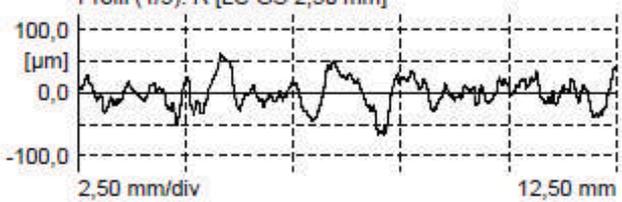
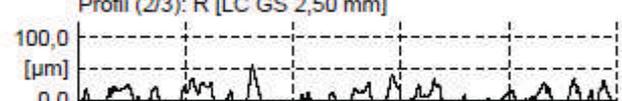
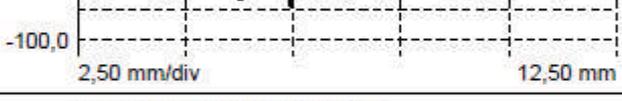


**Photo 8** : éprouvette face brute

<b>AEF</b> <b>MES011537</b> <b>DOC026480</b>	<b>ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE NEUFCHATEAU</b> <b>Relevés de profil</b>	<b>Annexe 5</b>  <b>f 1/2</b>
--	--	-------------------------------------

<b>Repère : Eprouvette 3</b> <b>Localisation : face usinée</b>																																												
<b>Configuration portable</b>																																												
<table border="1"> <tr> <th>LC (GS)</th> <th>LT</th> <th>LM</th> <th>Z</th> <th>VB</th> </tr> <tr> <td>mm</td> <td>mm</td> <td>mm</td> <td></td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>1: 2,50</td> <td>17,50</td> <td>12,50</td> <td>5</td> <td>±250</td> </tr> <tr> <td>2: 2,50</td> <td>17,50</td> <td>12,50</td> <td>5</td> <td>±250</td> </tr> <tr> <td>3: 2,50</td> <td>17,50</td> <td>12,50</td> <td>5</td> <td>±250</td> </tr> </table>	LC (GS)	LT	LM	Z	VB	mm	mm	mm		µm	1: 2,50	17,50	12,50	5	±250	2: 2,50	17,50	12,50	5	±250	3: 2,50	17,50	12,50	5	±250	Essai réalisé selon la norme ISO 4288  Appareil utilisé : Perthometer S2 de MAHR Unité d'avance : PZK Type de palpeur : MFW250 Tête de palpéage : xxxx																		
LC (GS)	LT	LM	Z	VB																																								
mm	mm	mm		µm																																								
1: 2,50	17,50	12,50	5	±250																																								
2: 2,50	17,50	12,50	5	±250																																								
3: 2,50	17,50	12,50	5	±250																																								
<b>Profil (1/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ra</th> <th>Rz</th> <th>Rt</th> </tr> <tr> <th></th> <th>µm</th> <th>µm</th> <th>µm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:</td> <td>1,12</td> <td>8,08</td> <td>9,24</td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>1,29</td> <td>8,89</td> <td>11,64</td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>1,27</td> <td>8,85</td> <td>11,94</td> </tr> <tr> <td><math>\bar{X}</math></td> <td>1,23</td> <td>8,61</td> <td>10,94</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>0,08</td> <td>0,37</td> <td>1,21</td> </tr> <tr> <td>Min.</td> <td>1,12</td> <td>8,08</td> <td>9,24</td> </tr> <tr> <td>Max.</td> <td>1,29</td> <td>8,89</td> <td>11,94</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>0,17</td> <td>0,81</td> <td>2,70</td> </tr> </tbody> </table>					Ra	Rz	Rt		µm	µm	µm	1:	1,12	8,08	9,24	2:	1,29	8,89	11,64	3:	1,27	8,85	11,94	$\bar{X}$	1,23	8,61	10,94	S	0,08	0,37	1,21	Min.	1,12	8,08	9,24	Max.	1,29	8,89	11,94	R	0,17	0,81	2,70
	Ra	Rz	Rt																																									
	µm	µm	µm																																									
1:	1,12	8,08	9,24																																									
2:	1,29	8,89	11,64																																									
3:	1,27	8,85	11,94																																									
$\bar{X}$	1,23	8,61	10,94																																									
S	0,08	0,37	1,21																																									
Min.	1,12	8,08	9,24																																									
Max.	1,29	8,89	11,94																																									
R	0,17	0,81	2,70																																									
<b>Profil (2/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 																																												
<b>Profil (3/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 																																												

<b>AEF</b> <b>MES011537</b> <b>DOC026480</b>	<b>ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE NEUFCHATEAU</b> <b>Relevés de profil</b>	<b>Annexe 5</b>  <b>f 2/2</b>
--	--	-------------------------------------

<b>Repère : Eprouvette 3</b> <b>Localisation : face brute</b>																																													
<b>Configuration portable</b>					<b>Essai réalisé selon la norme ISO 4288</b>																																								
<b>LC (GS)</b> mm	<b>LT</b> mm	<b>LM</b> mm	<b>Z</b> 5	<b>VB</b> μm ±250 ±250 ±250	Appareil utilisé : Perthometer S2 de MAHR Unité d'avance : PZK Type de palpeur : MFW250 Tête de palpépage : xxxx																																								
1: 2,50	17,50	12,50	5																																										
2: 2,50	17,50	12,50	5																																										
3: 2,50	17,50	12,50	5																																										
<b>Profil (1/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 					<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Ra</th> <th>Rz</th> <th>Rt</th> </tr> <tr> <th></th> <th>μm</th> <th>μm</th> <th>μm</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1:</td> <td>17,88</td> <td>87,22</td> <td>128,12</td> </tr> <tr> <td>2:</td> <td>13,68</td> <td>70,47</td> <td>102,73</td> </tr> <tr> <td>3:</td> <td>20,48</td> <td>95,94</td> <td>109,55</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>17,35</td> <td>84,54</td> <td>113,46</td> </tr> <tr> <td>S</td> <td>2,80</td> <td>10,57</td> <td>10,73</td> </tr> <tr> <td>Min.</td> <td>13,68</td> <td>70,47</td> <td>102,73</td> </tr> <tr> <td>Max.</td> <td>20,48</td> <td>95,94</td> <td>128,12</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>6,80</td> <td>25,47</td> <td>25,39</td> </tr> </tbody> </table>		Ra	Rz	Rt		μm	μm	μm	1:	17,88	87,22	128,12	2:	13,68	70,47	102,73	3:	20,48	95,94	109,55	X	17,35	84,54	113,46	S	2,80	10,57	10,73	Min.	13,68	70,47	102,73	Max.	20,48	95,94	128,12	R	6,80	25,47	25,39
	Ra	Rz	Rt																																										
	μm	μm	μm																																										
1:	17,88	87,22	128,12																																										
2:	13,68	70,47	102,73																																										
3:	20,48	95,94	109,55																																										
X	17,35	84,54	113,46																																										
S	2,80	10,57	10,73																																										
Min.	13,68	70,47	102,73																																										
Max.	20,48	95,94	128,12																																										
R	6,80	25,47	25,39																																										
<b>Profil (2/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 																																													
<b>Profil (3/3): R [LC GS 2,50 mm]</b> 																																													

<b>AEF</b> <b>MES011537</b> <b>DOC026480</b>	<b>ETUDE DU MODE DE FISSURATION DE TOILES DE</b> <b>ROUE DE WAGON SUITE A L'INCIDENT DE</b> <b>NEUFCHATEAU</b> <b>Résultats des essais de fatigue</b>	<b>Annexe 6</b>  <b>f 1/1</b>
--	--	-------------------------------------

Eprouvettes	Eprouvettes flexion roue	Matériau	ER7
Machine d'essai	banc "25 kN"	Capteur	72207
Prestation	MES011537	Opérateurs	Autret / Banting
Sollicitation	Flexion 4 points ondulée	R	0,1
Fréquence	25 Hz	Boîtier de report	94163

#### Etat de surface brut

N° éprouv.	Date		$\sigma_{min}$ MPa	$\sigma_{max}$ MPa	$\sigma_{moy}$ MPa	$\sigma_a$ MPa	Nb de cycles	Observations
	Début	Fin						
15	27/09/2011	27/09/2011	58	575	317	259	40 942	
19	06/10/2011	06/10/2011	57	569	313	256	60 976	
18	06/10/2011	06/10/2011	53	529	291	238	84 061	
7	03/10/2011	03/10/2011	47	476	262	215	199 511	Surcharge au montage
17	06/10/2011	06/10/2011	46	458	252	206	215 433	
1	04/08/2011	05/08/2011	36	374	205	169	961 932	
2	08/08/2011	11/08/2011	36	333	199	163	1 898 101	
9	03/10/2011	03/10/2011	56	560	308	252	(1000000) +18747	Eprouvette déjà sollicitée côté usiné réutilisée Non représenté sur courbe $\sigma_a = f(Nr)$ Non rompue
12	14/09/2011	14/09/2011	52	521	287	235	100 000	Non représenté sur courbe $\sigma_a = f(Nr)$ Eprouvette réutilisée
12	14/09/2011	14/09/2011	63	615	339	276	(100000) + 4791	Non représenté sur courbe $\sigma_a = f(Nr)$
11	14/09/2011	14/09/2011	44	440	242	198	34 226	Décalage d'un appui en cours d'essai Essai non valide

#### Etat de surface usiné

N° éprouv.	Date		$\sigma_{min}$ MPa	$\sigma_{max}$ MPa	$\sigma_{moy}$ MPa	$\sigma_a$ MPa	Nb de cycles	Observations
	Début	Fin						
13	14/09/2011	14/09/2011	75	763	419	344	58 821	
16	27/09/2011	27/09/2011	74	760	417	343	122 500	
4	02/09/2011	02/09/2011	67	675	371	304	291 470	
5	05/09/2011	06/09/2011	70	700	385	315	519 710	
6	07/09/2011	08/09/2011	64	638	351	287	625 167	
8	08/09/2011	09/09/2011	62	624	343	281	1 807 968	
9	09/09/2011	12/09/2011	56	560	308	252	10 000 000	Non rompue Non représenté sur courbe $\sigma_a = f(Nr)$ Non rompue
3	16/08/2011	23/08/2011	44	444	244	200	10 000 000	Non représenté sur courbe $\sigma_a = f(Nr)$

Les niveaux de contrainte sont déterminés par calcul en fonction de la force appliquée par le vérin, des distances entre appuis et de la section du faciès de rupture mesurée.