
Effet du procédé de poinçonnage sur la tenue en fatigue des tôles minces ferromagnétiques

Sommaire

I.	Essais de fatigue à grand nombre de cycles	66
II.	Résultats des essais de fatigue HCF : courbes S-N.....	71
III.	Analyse et discussion des résultats de fatigue à grand nombre de cycles	78
IV.	Étude des défauts géométriques sur les bords poinçonnés	96
V.	Conclusion du chapitre.....	100

*« L'éducation est l'arme la plus puissante
qu'on puisse utiliser pour changer le
monde »*

Nelson Mandela

Chapitre III : Effet du procédé de poinçonnage sur la tenue en fatigue des tôles minces ferromagnétiques

Le chapitre précédent a été consacré à la caractérisation du matériau ainsi qu'à l'étude de son comportement mécanique cyclique. Ce chapitre sera consacré à l'étude de la résistance en fatigue à grand nombre de cycles de cet alliage Fe-Si. Pour ce faire, des essais de fatigue sont réalisés sur des éprouvettes lisses et entaillées en utilisant différentes conditions de chargement et différentes températures. Les résultats de cette campagne d'essais ont permis d'étudier l'effet des différents paramètres tels que le procédé de poinçonnage, le rapport de charge, la température ainsi que les concentrations de contraintes sur la résistance en fatigue du matériau étudié. Les résultats montrent qu'il y a une importante influence du procédé sur la tenue en fatigue de ce matériau. L'effet du procédé de poinçonnage est donc investigué d'avantage. Les bords des éprouvettes poinçonnées sont altérés par l'opération de poinçonnage. Ils sont donc analysés en utilisant différentes techniques expérimentales telles que la micro-dureté, la diffraction des rayons X, la microscopie optique et la microscopie électronique à balayage ainsi que la profilométrie optique sans contact. Ensuite, des essais de fatigue à grand nombre de cycles sur différentes configurations d'éprouvettes lisses ont permis d'étudier l'influence de chaque effet induit par le procédé sur la résistance en fatigue de cet alliage. Ces aspects sont détaillés dans ce chapitre.

I. Essais de fatigue à grand nombre de cycles

1. Procédé d'obtention des éprouvettes de fatigue

Le procédé d'obtention des pièces industrielles est un facteur important pour la résistance en fatigue. En effet, chaque procédé induit des effets différents qui peuvent être bénéfiques ou bien néfastes sur la résistance en fatigue des pièces en service. Les pièces des moteurs électriques sont fabriquées par poinçonnage. Ce procédé, couramment utilisé pour la découpe des tôles, est connu pour induire des altérations importantes des bords poinçonnés (contraintes résiduelles, écrouissage...). La prise en compte de ces effets est nécessaire pour estimer d'une façon fiable la résistance en fatigue des pièces découpées.

1.1. Obtention des éprouvettes

Dans le but d'avoir des éprouvettes représentatives des pièces industrielles, les conditions industrielles ont été utilisées lors de la découpe des éprouvettes de fatigue. Un outil à suivre a été conçu et réalisé à cette fin (Figure III-1), il permet de fabriquer des éprouvettes lisses et entaillées. Pour la fabrication des éprouvettes entaillées, deux opérations sont nécessaires, tandis que les éprouvettes lisses ne nécessitent qu'une seule opération. La tôle défile sous l'outil jusqu'au premier poste qui permet de faire l'entaille. Le poinçonnage de l'éprouvette entaillée est alors effectué au deuxième poste. Pour les éprouvettes lisses, une seule opération au deuxième poste est nécessaire. L'outil est monté sur la presse utilisée pour la fabrication des pièces industrielles. Le poinçonnage est ainsi réalisé en utilisant les mêmes conditions, et notamment la même vitesse de frappe. La tôle déroulée de la bobine passe par un redresseur avant d'être découpée.

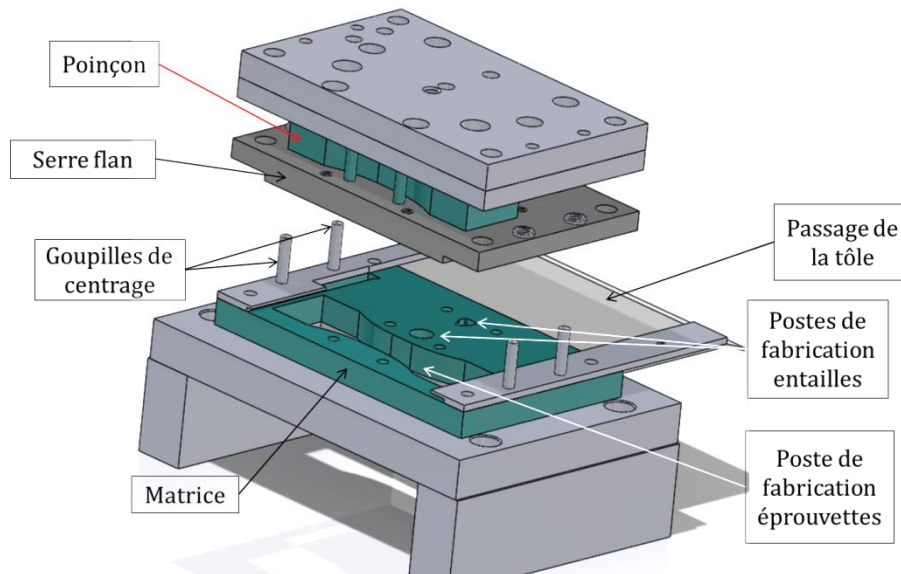


Figure III-1 : Outil utilisé pour la fabrication des éprouvettes de fatigue lisses et entaillées

1.2. Différentes configurations d'éprouvettes testées en fatigue HCF

Afin de quantifier l'effet du procédé sur la tenue en fatigue des pièces rotors, des essais de fatigue à grand nombre de cycles ont été réalisés sur les quatre configurations d'éprouvettes suivantes :

1. Éprouvettes poinçonnées
2. Éprouvettes poinçonnées puis polies
3. Éprouvettes poinçonnées puis recuites
4. Éprouvettes poinçonnées puis polies ensuite recuites (configuration de référence)

La première configuration est relative aux éprouvettes poinçonnées représentatives des pièces industrielles. La deuxième est relative aux éprouvettes poinçonnées dont le bord a été ensuite poli en utilisant du papier abrasif. La troisième configuration est celle des éprouvettes poinçonnées qui ont subi un traitement thermique de détensionnement. Et la dernière configuration est relative aux éprouvettes obtenues par poinçonnage dont le bord a été poli, elles ont ensuite subi un traitement thermique de détensionnement. Le but de cette dernière configuration est de définir une référence, représentative de la tenue en fatigue intrinsèque du matériau, à laquelle comparer les résultats des essais sur les différentes configurations d'éprouvettes testées. L'opération de polissage a été effectuée à la main jusqu'à l'enlèvement des défauts géométriques visibles sur le bord. Deux grades de papier abrasif ont été utilisés. Le premier grade (P1200) a été utilisé jusqu'à la disparition des défauts visibles sur le bord. Ensuite, le deuxième (P4000) a été utilisé pour enlever les rayures suite à l'opération de polissage sur les deux bords. En plus des défauts géométriques, l'opération de polissage permet d'enlever une partie de la zone écrouie et elle modifie l'état de contraintes résiduelles sur le bord [61]. Le traitement thermique de détensionnement a été réalisé, les détails de ce traitement sont confidentiels. Le schéma (Figure III-2) présente le cycle de traitement thermique qu'ont subi les éprouvettes pour éliminer l'écrouissage et les contraintes résiduelles induites par le procédé de poinçonnage. Dès la réception des éprouvettes, nous avons vérifié l'efficacité de ce traitement en utilisant les techniques de micro-dureté et de diffraction des rayons X. Les résultats seront présentés dans ce chapitre.

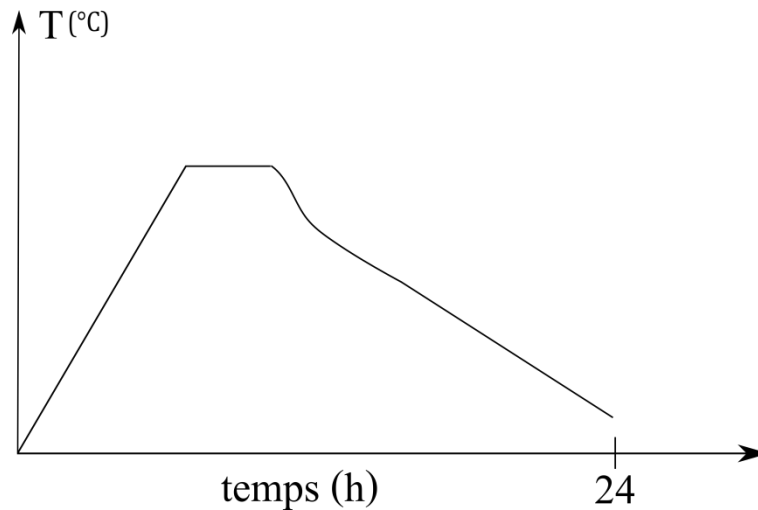


Figure III-2 : Schéma représentant le traitement thermique appliqué aux éprouvettes de fatigue

La réalisation d'essais de fatigue sur ces différentes configurations doit permettre de mettre en évidence l'effet du procédé de poinçonnage sur la tenue en fatigue des pièces industrielles et de découpler les différents effets : défauts géométriques, écrouissage et contraintes résiduelles. Ces effets induits par le procédé influent d'une façon notable la résistance en fatigue de cet alliage. La contribution de chaque paramètre sur la modification des propriétés en fatigue sera quantifiée et les résultats seront présentés tout au long de ce chapitre.

2. Géométrie des éprouvettes de fatigue lisses et entaillées

Étant donné la faible épaisseur de la tôle, la rigidité des éprouvettes peut limiter la faisabilité des essais de fatigue. En effet, il est nécessaire d'avoir une éprouvette dont la rigidité est suffisamment élevée pour qu'elle puisse résonner sur la machine utilisée (de type vibrophore) entre 50 et 250 Hz. Une campagne d'essais de fatigue préliminaires sur différentes formes d'éprouvettes a été menée. Après plusieurs tentatives, la géométrie lisse donnée par la Figure III-3 a été retenue.

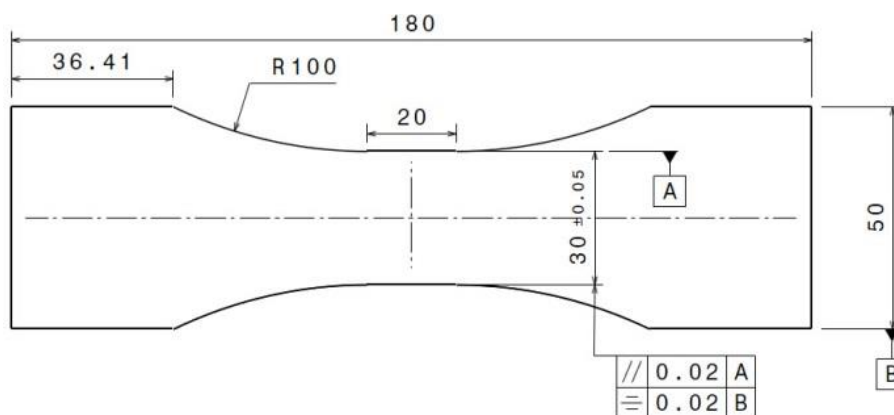


Figure III-3 : Géométrie lisse des éprouvettes de fatigue

Comme présenté au premier chapitre, le poinçonnage génère des défauts sur le bord. La géométrie choisie présente une partie calibrée de 20 mm de longueur. Le choix d'une géométrie à bords parallèles permet d'avoir un état de contrainte homogène au milieu de l'éprouvette. Ceci laisse la possibilité aux différents défauts de la partie calibrée d'évoluer dans les mêmes

conditions, et d'être critique tout le long de cette partie. Ceci permet d'étudier leur effet sur la tenue en fatigue.

En fonction de la conception du circuit magnétique du moteur, les pièces rotors présentent plusieurs zones de concentration de contraintes plus au moins critiques. Ces accidents géométriques doivent être pris en compte lors du dimensionnement en fatigue de ces pièces. Il est donc nécessaire de faire des essais sur des éprouvettes entaillées dont la valeur du coefficient théorique de concentration de contrainte (K_t) est représentative des pièces industrielles.

Le coefficient théorique de concentration de contrainte maximal estimé sur les pièces des moteurs est de 2,6 en traction. Les deux géométries d'éprouvettes entaillées présentées par la Figure III-4 et la Figure III-5 ont été utilisées. Elles sont relatives à un coefficient de concentration de contrainte $K_t=2$ et $K_t=3$, respectivement. Ces valeurs ont été choisies pour encadrer la valeur maximale estimée sur les pièces industrielles. Les deux entailles ont la même profondeur qui vaut 2,4 mm. Ce choix est justifié par le fait qu'au-dessus de cette valeur, des problèmes de faisabilité des essais liés à la rigidité de l'éprouvette se manifestent. En plus, les entailles ont été positionnées sur un seul des bords parallèles pour pouvoir faire plus facilement des essais instrumentés permettant de suivre la propagation de la fissure de fatigue au cours de l'essai. Les formes d'entailles ont été calculées par éléments finis (voir détails en annexe 2).

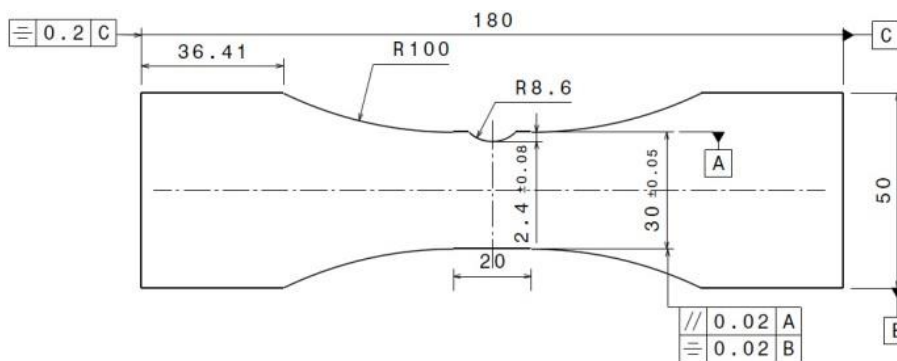


Figure III-4 : Géométrie de l'éprouvette de fatigue entaillée $K_t=2$

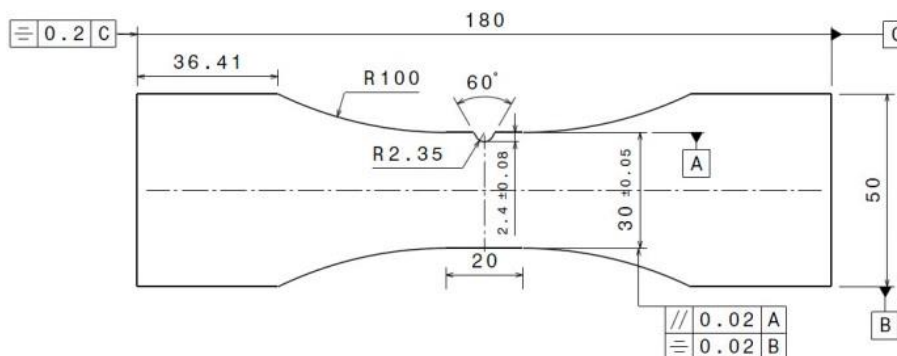


Figure III-5 : Géométrie de l'éprouvette de fatigue entaillée $K_t=3$

3. Machine et conditions d'essai

Une machine à résonance (de type vibrophore) a été utilisée pour faire les essais de fatigue à grand nombre de cycles. La géométrie utilisée résonne à une fréquence d'environ 64 Hz. Le

critère d'arrêt utilisé est une dérive de fréquence de 1 Hz. Le nombre de cycles maximal choisi pour arrêter l'essai est 5×10^6 cycles. Un essai sans rupture dure donc environ 22 h. La résistance en fatigue est déterminée pour chacune des configurations en utilisant la méthode de l'escalier (staircase) sur 13 éprouvettes. Pour chaque courbe S-N, 25 éprouvettes ont été testées. Pour des configurations/conditions particulières, la limite de fatigue a été déterminée par un escalier court sur 8 à 9 éprouvettes.

Étant donné la faible épaisseur de la tôle (350 μm), un léger mode de flexion parasite apparaît parfois sur quelques éprouvettes. Afin de l'éliminer, deux doigts anti-flambement ont été utilisés comme illustré par la Figure III-6.

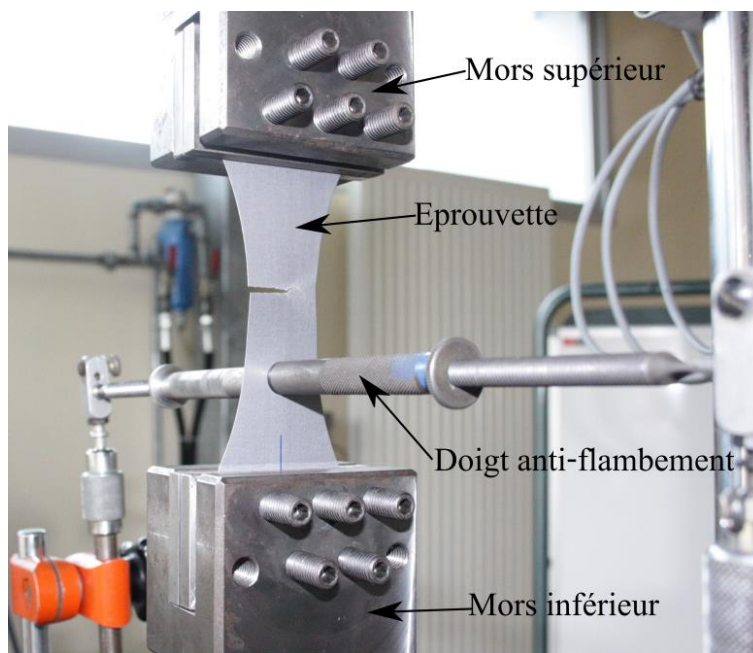


Figure III-6 : Essai de fatigue sur une éprouvette lisse en utilisant les deux doigts anti-flambement

Pour les pièces rotors, les chargements cycliques appliqués à la structure sont principalement dus à la force centrifuge. Des contraintes d'assemblage engendrent également des pré-charges statiques dans la structure. En fonction du moteur et de la méthode d'assemblage, il existe différents niveaux de pré-charge. Afin de prendre en compte cet effet, les essais de fatigue ont été réalisés en utilisant différents rapports de charge positifs : $R=0,1$; $R=0,3$; $R=0,5$ et $R=0,8$. Les différents rapports de charge testés permettent de balayer tout le domaine de fonctionnement des pièces industrielles et permettent d'identifier les paramètres des critères de fatigue utilisés pour le dimensionnement.

Les essais de fatigue à grand nombre de cycles ont été réalisés à température ambiante sur les trois géométries d'éprouvettes. Par contre, en fonctionnement, le moteur électrique chauffe à cause des pertes magnétiques (dans le rotor et le stator) qui se transforment en chaleur. La température maximale qui peut être atteinte à l'intérieur du moteur en régime de fonctionnement est de l'ordre de 180°C . Pour pouvoir dimensionner d'une façon fiable les pièces industrielles, il est donc nécessaire de connaître le comportement en fatigue en température de ces tôles en régime stabilisé. L'influence de la température sur la résistance en fatigue de ces tôles a été étudiée à travers des essais de fatigue réalisés à 180°C .

Les essais en température ont été conduits en utilisant une enceinte thermique. La température à l'intérieur de l'enceinte a été mesurée en utilisant le thermocouple de l'enceinte, tandis que la température au milieu de l'éprouvette et sur les deux mors a été mesurée en utilisant trois autres thermocouples. Le protocole d'essai consiste à chauffer les mors en premier (à cause de leur inertie thermique), avant de monter l'éprouvette. Une phase de maintien en température suit pour homogénéiser la température de l'ensemble. Durant cette phase, un asservissement en force est activé pour éviter que l'éprouvette ne flambe à cause de l'expansion thermique. Une fois que la température voulue au milieu de l'éprouvette est atteinte, l'essai est lancé de la même manière que les essais à température ambiante.

Une ligne d'amarrage constituée de deux rallonges a été spécialement conçue et fabriquée pour faire les essais en température. Étant donnée la durée de l'essai et le nombre d'éprouvettes à tester, l'échauffement de la cellule de charge ne peut pas être négligé. Pour s'assurer des valeurs de force mesurées, il est nécessaire que la température de la cellule reste faible. Un circuit de refroidissement intégré aux rallonges a donc été conçu et réalisé. Un refroidisseur utilisant un fluide calorifique a été utilisé pour le refroidissement forcé des rallonges.

Dans l'enceinte thermique, le mode de flexion parasite disparaît. En effet, l'utilisation des rallonges rend l'ensemble (éprouvette + ligne d'amarrage), excités par la machine de fatigue, plus souple. Il n'est ainsi plus nécessaire d'utiliser les doigts anti-flambement pour les essais en température. Les mêmes conditions d'arrêt que pour les essais à la température ambiante ont été utilisés (dérive de fréquence de 1 Hz ou bien si les 5×10^6 cycles sont atteints).

II. Résultats des essais de fatigue HCF : courbes S-N

1. Effet du poinçonnage

Dans le premier chapitre, il a été mis en évidence par plusieurs auteurs que le procédé de poinçonnage influe d'une façon néfaste la résistance en fatigue. Afin de quantifier l'effet du procédé sur la tenue en fatigue dans le cas des tôles minces, des essais de fatigue ont été réalisés sur des éprouvettes brutes de poinçonnage et sur des éprouvettes recuites dont les bords ont été polis après poinçonnage : configurations 1 et 4. Les conditions d'essais utilisés sont identiques pour les deux configurations.

Les résultats des essais réalisés à température ambiante pour un rapport de charge $R=0,1$, présentés dans la Figure III-7, montrent un abattement d'environ 25% sur la résistance en fatigue médiane à 5×10^6 cycles des éprouvettes poinçonnées (configuration 1) par rapport aux éprouvettes poinçonnées-polies (configuration 2). Par contre, pour les hauts niveaux de chargement, les points expérimentaux sont proches. Ceci s'explique par le fait qu'à ces niveaux, la plasticité macroscopique gouverne l'amorçage des fissures de fatigue : son effet devient prépondérant par rapport à l'effet du procédé, qui joue un rôle plus important pour les faibles niveaux de chargements. Nous verrons par la suite qu'il s'agit de l'effet des défauts de poinçonnage, des contraintes résiduelles et de l'écroutissage.

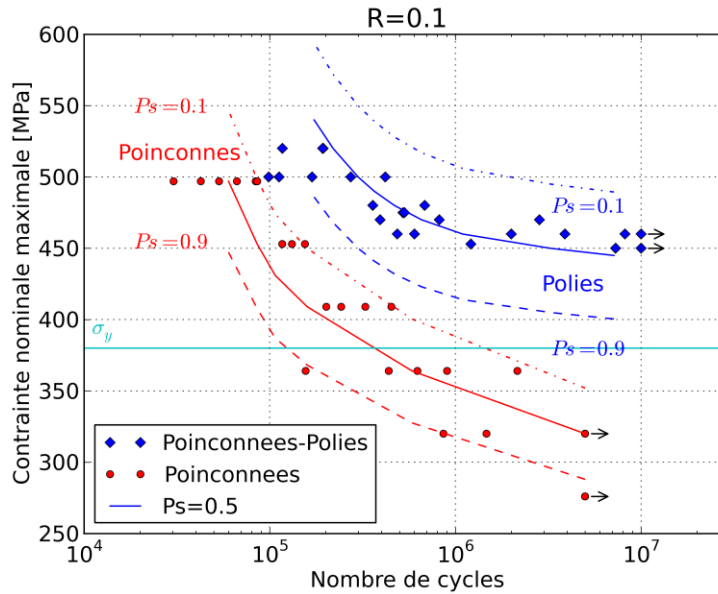


Figure III-7 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées et polies pour R=0,1 (Température ambiante, Modèle de Stromeyer)

Pour le rapport R=0,5, une courbe S-N a été réalisée avec 25 éprouvettes poinçonnées (configuration 1). Afin de pouvoir quantifier l'effet du procédé pour ce rapport de charge, la résistance en fatigue médiane à 5×10^6 cycles a été déterminée avec un escalier court en utilisant des éprouvettes poinçonnées-polies (configuration 2). Les résultats (Figure III-8) montrent un abattement moins important sur la résistance en fatigue que les résultats à R=0,1 (environ 17% au lieu de 25%).

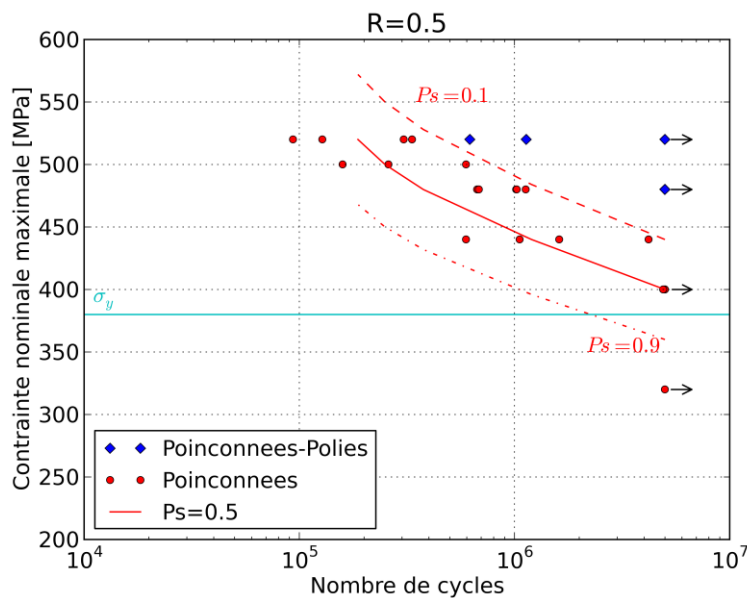


Figure III-8 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées et poinçonnées-polies pour R=0,5 (Température ambiante, Modèle de Stromeyer)

Cet abattement plus faible s'explique par le fait que la plasticité macroscopique est plus importante dans le cas des éprouvettes testées à R=0,5. En effet, la courbe S-N à R=0,5 sur

éprouvettes poinçonnées est intégralement au-dessus de la limite d'élasticité macroscopique. L'influence du procédé est donc moins importante que pour les éprouvettes testées à $R=0,1$.

Dans les deux cas testés, la dégradation de la résistance en fatigue des éprouvettes poinçonnées est principalement liée au procédé d'obtention. Il a été montré dans la littérature [28] [2] que le poinçonnage dégrade de façon considérable la résistance en fatigue du matériau car il induit des défauts géométriques et des contraintes résiduelles de traction localement sur le bord. Ces effets seront étudiés en détails dans la suite de ce chapitre.

2. Effet du rapport de charge

L'effet du rapport de charge a été étudié en complétant les essais sur des éprouvettes poinçonnées (configuration 1) réalisés pour des rapports de charge $R=0,1$ et $R=0,5$ par des essais à $R=0,3$ et $R=0,8$ qui sont présentés dans la Figure III-9 et Figure III-10.

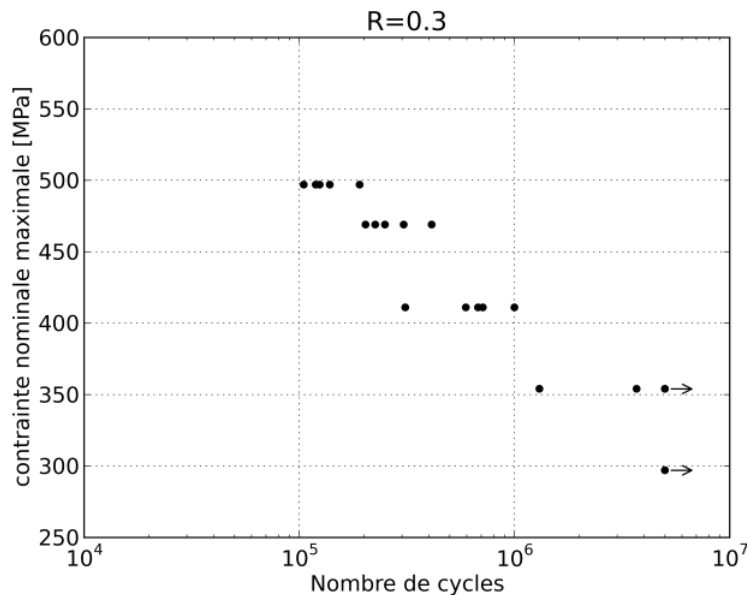


Figure III-9 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées pour $R=0,3$ (Température ambiante)

L'ensemble des résultats a été regroupé dans un diagramme de Haigh (Figure III-11). La droite de Goodman a été tracée en utilisant les rapports $R=0,1$ et $R=0,5$. Le point relatif au rapport $R=0,3$ a été placé dans le diagramme pour vérifier si la droite de Goodman donne une bonne prévision de l'effet du rapport de charge. Le point $R=0,3$ n'est pas parfaitement aligné avec les deux autres points mais l'écart est faible.

Le rapport $R=0,8$ représente les situations où il y a une plastification initiale importante. Les courbes S-N obtenues pour $R=0,8$ sont très plates, ce qui est souvent observé dans la littérature dès lors que le rapport de charge est élevé. Puisque la résistance maximale du matériau étudié varie en fonction de la vitesse de déformation, trois seuils représentant ($\sigma_{max} = Rm$) relatifs à chaque vitesse testée ont été tracés sur la courbe S-N correspondant à $R=0,8$ et sur le diagramme de Haigh.

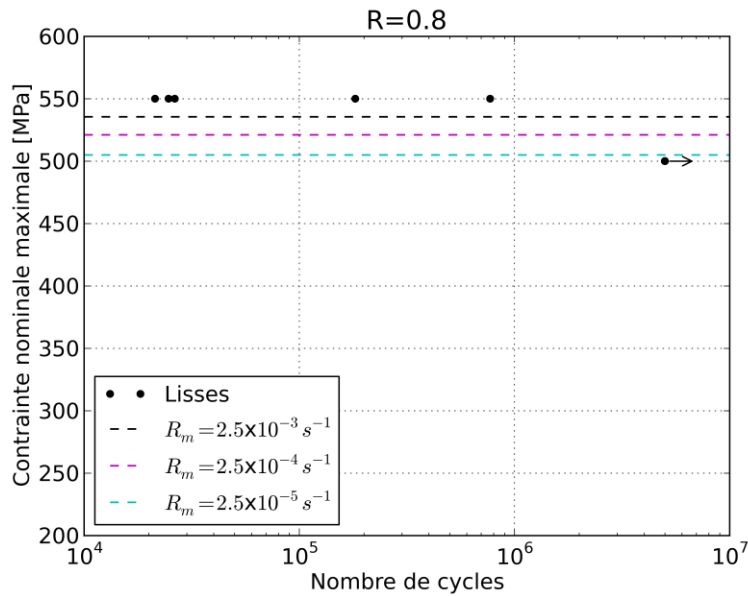


Figure III-10 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées pour R=0,8 (Température ambiante)

L'alliage Fe-Si étudié présente un durcissement cyclique dès les premiers cycles. Ceci explique le fait que les points sont situés au-dessus des limites maximales quasi-statiques du matériau. D'autre part, le signal de la force imposée par la machine est sinusoïdal. La valeur maximale de la vitesse de déformation sur la partie utile de l'éprouvette est de l'ordre de $6 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Le diagramme de Haigh donne une bonne prévision de l'effet du rapport de charge dans le cas des chargements testés (traction), y compris pour des valeurs élevées du rapport de charge. Les barres d'erreurs présentées sur les points sont relatives aux dispersions sur les résultats expérimentaux obtenus.

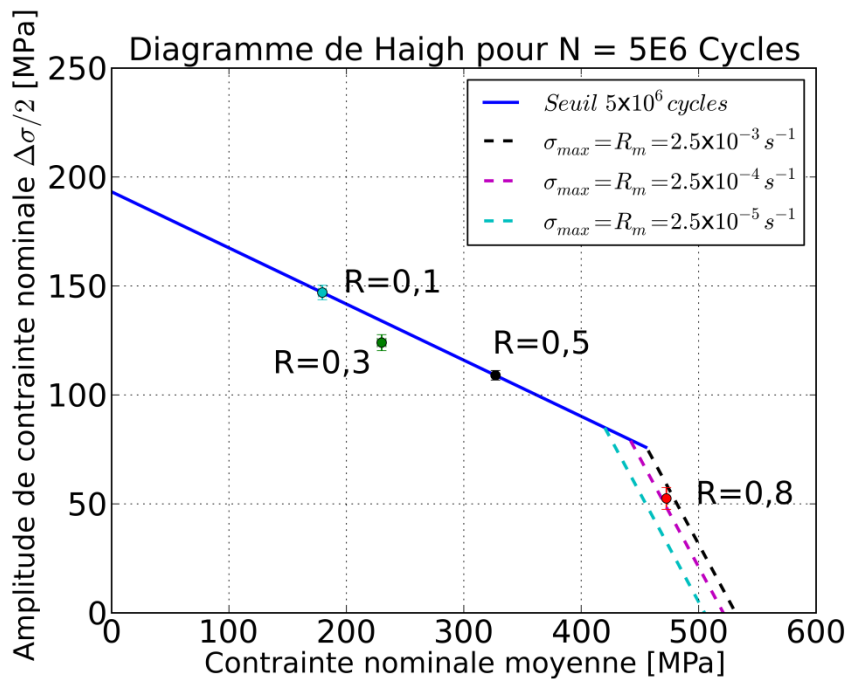


Figure III-11 : Diagramme de Haigh à la température ambiante pour $N=5 \times 10^6$ cycles

3. Effet de la température

En fonctionnement, les rotors peuvent atteindre une température maximale d'environ 180°C. Pour étudier l'influence éventuelle de cet échauffement sur le comportement en fatigue, des essais ont été menés à 180°C dans les mêmes conditions que pour les essais à température ambiante sur des éprouvettes poinçonnées (configuration 1). Une comparaison des résultats pour les deux températures est présentée à travers les courbes de Wöhler obtenues (Figure III-12). Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'influence de la température sur la limite d'endurance à 5×10^6 cycles. En revanche, pour les hauts niveaux de chargement (faible durée de vie), l'effet de la température est plus visible. En effet, à 180°C, le nombre de cycles à rupture est plus faible qu'à température ambiante pour les mêmes niveaux de chargement. Pour les éprouvettes testées à $R=0,5$, il n'y a pas de différence significative. L'effet de la température est donc influencée par la contrainte moyenne, on observe notamment que la température influence la résistance en fatigue d'autant plus que la contrainte moyenne est élevée.

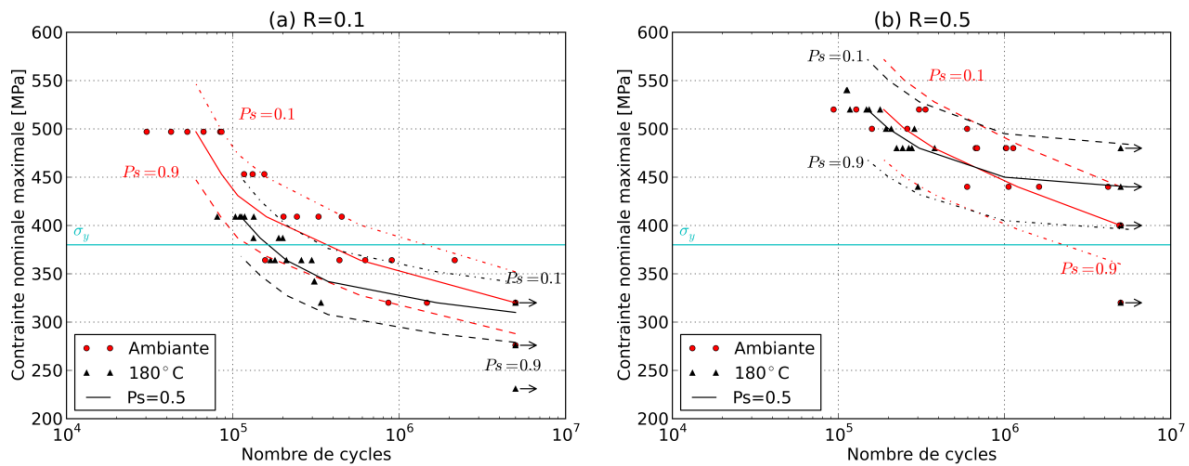


Figure III-12 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées lisses testées à température ambiante et à 180°C pour a) $R=0,1$ et b) $R=0,5$ (Modèle de Stromeyer)

4. Effet des concentrations de contraintes : éprouvettes entaillées

Les pièces rotors présentent des formes géométriques relativement complexes qui dépendent de la configuration du moteur (nombre de pôles, vitesse de rotation ...). Les évidements réalisés dans la tôle pour loger les aimants génèrent plusieurs zones de concentration de contraintes (Figure III-13). Les calculs de dimensionnement ainsi que les essais sur des prototypes montrent que ces zones sont les plus critiques pour la résistance en fatigue de la pièce. Il est donc nécessaire d'étudier l'effet des concentrations de contraintes sur la tenue en fatigue. Pour cela, des essais de fatigue à grand nombre de cycles ont été réalisés sur des éprouvettes entaillées ($K_t=2$ et $K_t=3$) pour les deux températures étudiées (ambiante et 180°C). Les éprouvettes n'ont subi aucun traitement après poinçonnage (configuration 1).

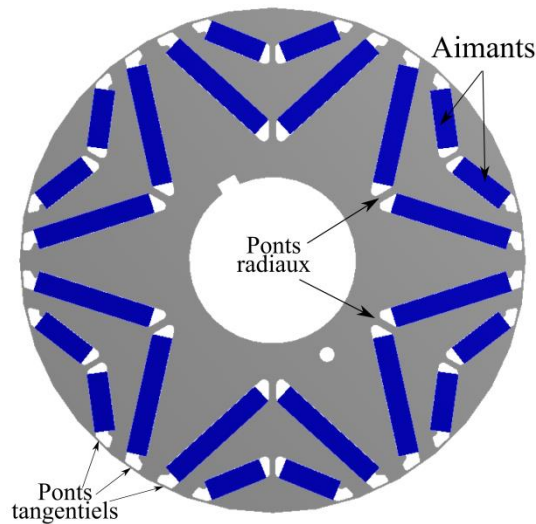


Figure III-13 : Exemple de pièce d'un rotor de moteur électrique

La comparaison des résultats des essais de fatigue sur les éprouvettes entaillées (Figure III-14) montre que la température n'a pas d'effet sur la résistance en fatigue. En revanche, les éprouvettes testées à haut niveau cassent plus tôt à haute température (180°C), surtout pour les éprouvettes $Kt=3$ où la plasticité est plus importante. Ceci est plus visible sur les courbes S-N tracées en contrainte locale élastique maximale pour les deux températures et les trois géométries (Figure III-15). Ces courbes montrent la plastification importante dans le cas des éprouvettes entaillées, notamment pour $Kt=3$. La résistance en fatigue est nettement supérieure à la limite d'élasticité. Ceci montre bien la plasticité importante au fond de l'entaille.

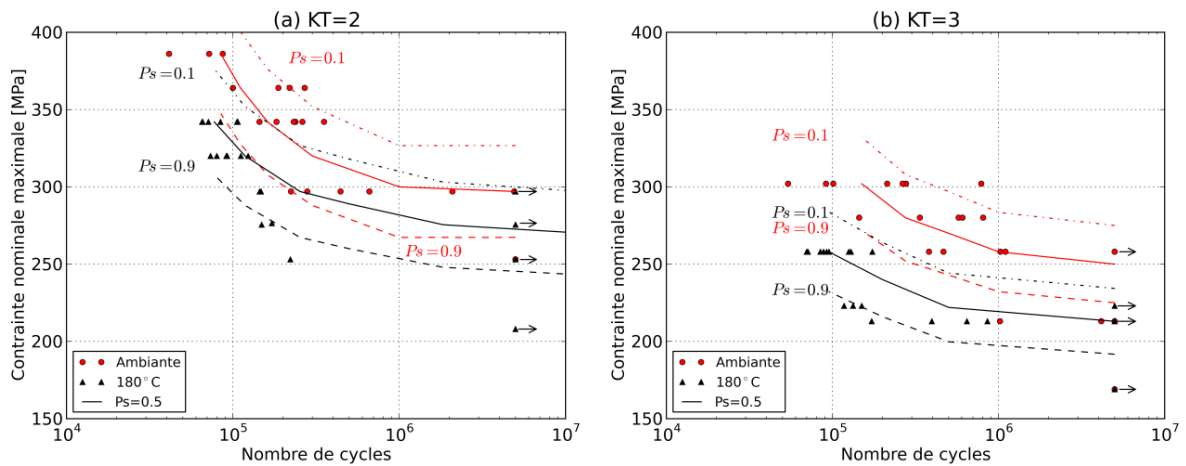


Figure III-14 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées entaillées testées à la température ambiante et à 180°C : a) $Kt=2$ b) $Kt=3$ ($R=0,1$; Modèle de Stromeyer)

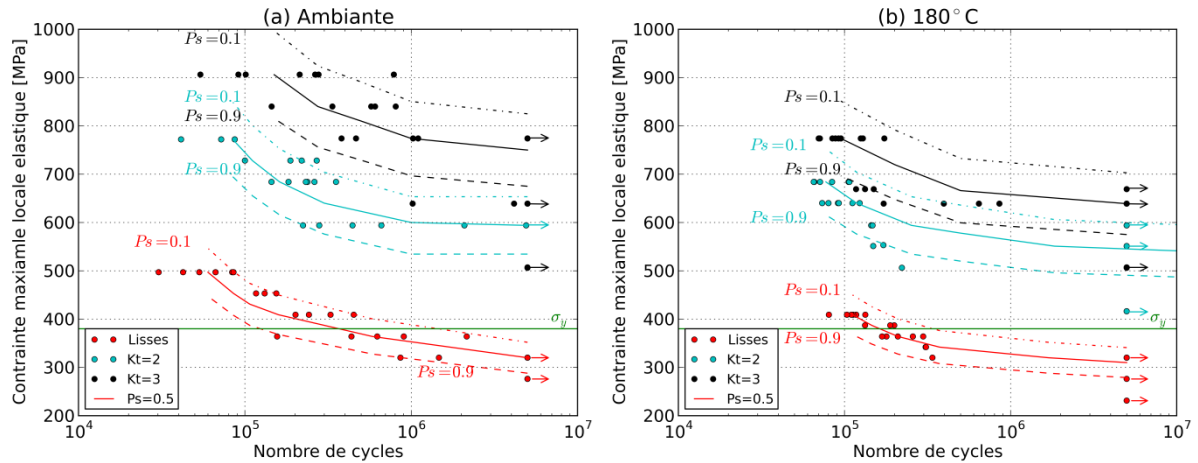


Figure III-15 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées lisses et entaillées tracées en *contrainte locale élastique* : a) température ambiante b) 180°C (R=0,1 ; Modèle de Stromeyer)

Un escalier court a été réalisé sur des éprouvettes entaillées (Kt=2) en utilisant le rapport de charge R=0,8. Le but de ces essais est de déterminer l'influence du rapport de charge sur la résistance en fatigue dans le cas des éprouvettes Kt=2. Les résultats montrent que la limite de fatigue médiane à 5×10^6 cycles passe de 282 MPa pour le rapport R=0,1 à 475 MPa (en contrainte maximale) pour le rapport R=0,8. Ceci est expliqué par la plasticité importante qui domine l'amorçage des fissures de fatigue. Ces essais serviront aussi à vérifier si la démarche de calcul est valable sur des géométries entaillées à un rapport de charge élevé.

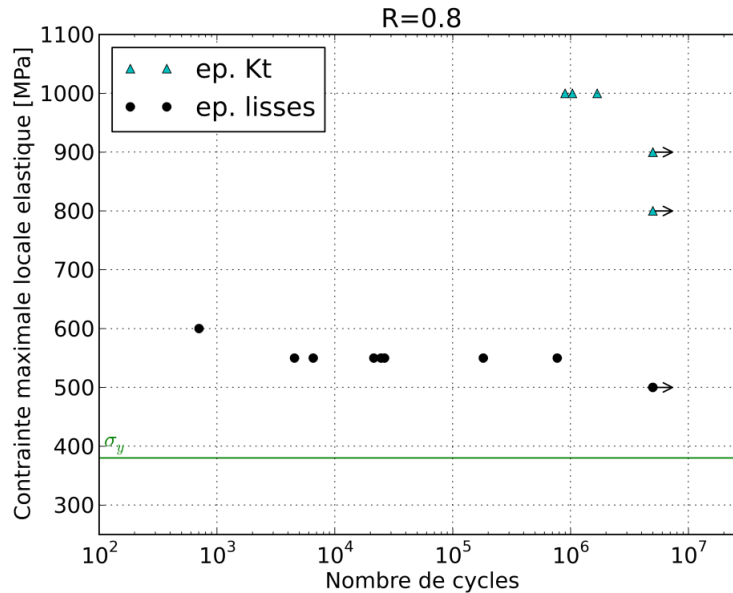


Figure III-16 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées lisses et entaillées tracées en *contrainte locale élastique* (R=0,8 ; température ambiante)

Le Tableau III-1 regroupe les valeurs de la limite de fatigue médiane à 5×10^6 cycles pour toutes les configurations d'éprouvettes testées. L'écart type n'est pas estimable dans la majorité des cas. Il sera pris égal au pas de l'escalier (20 MPa).

R	Kt	Température	Configuration N°	σ_D [MPa]	Écart type [MPa]
0,1	lisse	Ambiante	Poinçonnées-polies-recuites (4)	184	–
			Poinçonnées-polies (2)	204	–
			Poinçonnées-recuites (3)	169	–
	Poinçonnées (1)		147	–	
		2	127	–	
		3	109	16,2	
		lisse	150	–	
		180°C	2	130	18,9
			3	99	–
	0,5	lisse	Ambiante	106	–
180°C			Poinçonnées-polies (2)	128	–
0,3	Lisse	Ambiante	Poinçonnées (1)	120	–
0,8	Lisse			127	–
	2			52,5	–
				47,5	–

Tableau III-1 : Récapitulatif des essais de fatigue à grand nombre de cycles pour les différentes configurations testées

Les résultats relatifs aux essais sur éprouvettes entaillées serviront pour valider la démarche de dimensionnement en fatigue des pièces industrielles présentant des zones de concentration de contrainte. La compétition entre les concentrations de contrainte à l'échelle macroscopique (entaillées) et celles à l'échelle mésoscopique (défauts de poinçonnage) nécessite plus d'investigations afin de déterminer la plus nocive de ces configuration. Dans la suite de ce document, l'effet des défauts géométriques sera étudié plus en détail et une comparaison entre les concentrations de contraintes locales (engendrées par les défauts de poinçonnage) et globales (relatives au entaillées) a été réalisée.

III. Analyse et discussion des résultats de fatigue à grand nombre de cycles

1. Amorçage et propagation des fissures de fatigue

Les essais sont interrompus si le nombre de cycles fixé est atteint ou suite à une dérive de fréquence de 1 Hz. Bien que cette valeur soit faible, la majorité des éprouvettes sont rompues en deux parties lorsqu'une telle dérive est observée. La chute très rapide de la fréquence en fin d'essai de fatigue (Figure III-17) souligne alors que la vitesse de la propagation de la fissure est rapide.

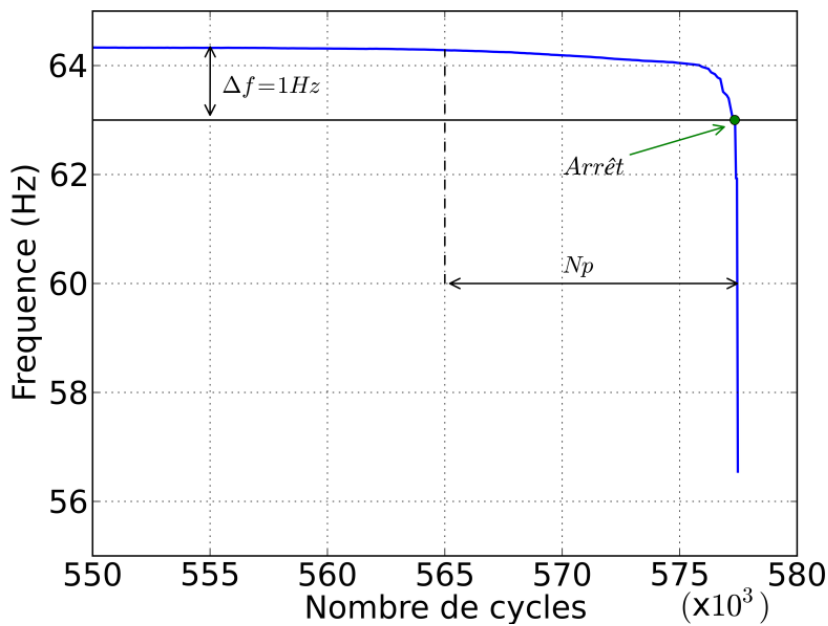


Figure III-17 : Chute de la fréquence à la fin d'un essai de fatigue sur une éprouvette entaillée ($K_t=3$) pour $\sigma_{max} = 280 \text{ MPa}$ et $N_r=575\ 226$ cycles, $R=0,1$

Des essais avec suivi de fissure ont été réalisés sur quelques éprouvettes poinçonnées. Une caméra CCD a été utilisée pour filmer la propagation de fissure (Figure III-18). La longueur de la fissure a été mesurée sur les images capturées, ce qui a permis de tracer la courbe de propagation de fissure ($a = f(N)$) (Figure III-19). Ces mesures n'ont été réalisées que sur des éprouvettes poinçonnées (configuration 1). Ceci est dû au fait que la profondeur affectée par le poinçonnage (0,2 mm) est du même ordre de grandeur que la résolution spatiale de la technique de mesure utilisée (0,17 mm). Ceci rend la différence entre les éprouvettes polies et poinçonnées difficilement détectable. Les résultats montrent une propagation très rapide de la fissure une fois qu'elle s'est amorcée.

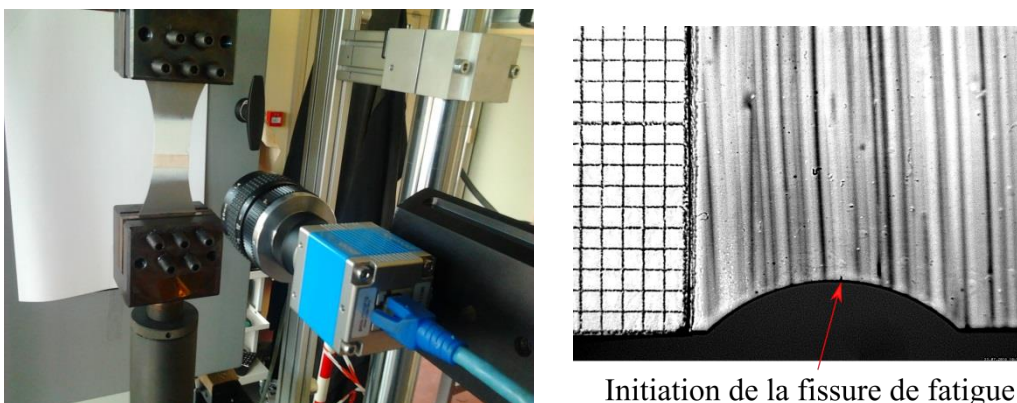


Figure III-18 : Essai de fatigue avec suivi de fissure par caméra CCD sur une éprouvette entaillée ($K_t=2$)

Afin de faciliter la détection de la fissure une fois qu'elle s'est amorcée, la surface de l'éprouvette a été couverte par une couche fine d'un mélange de glycérine et d'oxyde de zinc [62]. Cette peinture initialement blanche se colore localement en noir dans la zone d'amorçage de la fissure.

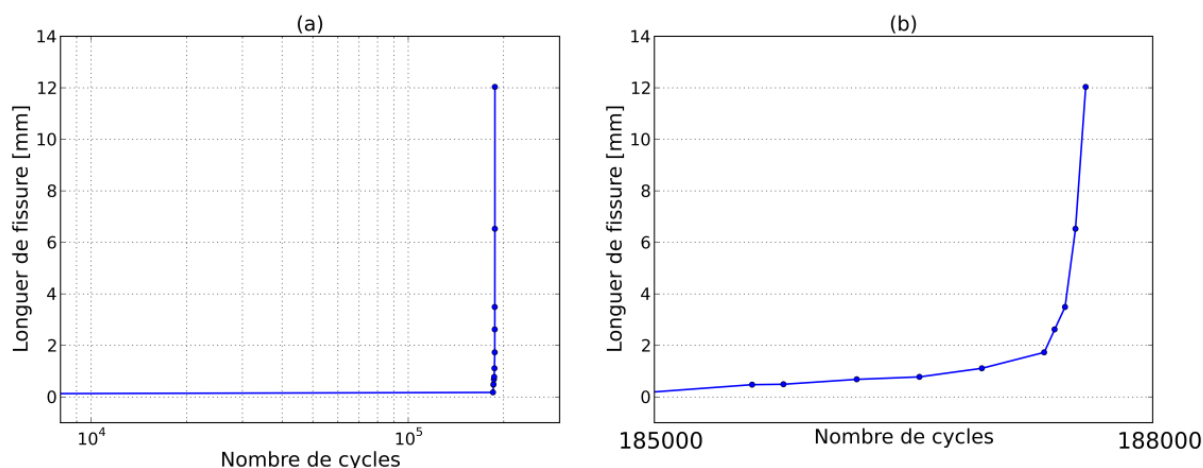


Figure III-19 : a) Courbe de propagation de fissure dans une éprouvette entaillée (Kt=2) b) zoom sur la fin de la courbe ($\sigma_{max} = 361 \text{ MPa}$ et $N_r = 187\,909$ cycles ; $R = 0,1$)

Pour l'essai présenté dans la Figure III-19, la rupture totale de l'éprouvette après amorçage nécessite une durée de 39 secondes, ce qui correspond à environ 2500 cycles. Pour tous les essais réalisés avec un suivi de fissure, le nombre de cycles durant la propagation ne dépasse pas 1,5% du nombre de cycles total. On peut en conclure que l'amorçage domine la durée de vie en fatigue de cet alliage et que les courbes S-N sont données à l'amorçage d'une fissure courte ($\approx 0,17 \text{ mm}$).

2. Analyses des faciès de rupture

Afin d'investiguer les origines de l'abatement de la résistance en fatigue à 5×10^6 cycles dans le cas des éprouvettes poinçonnées par rapport aux éprouvettes polies (Figure III-7), les faciès de rupture des éprouvettes ont été observés en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB). Vu que la différence de durée de vie entre les deux configurations est surtout observée pour les faibles niveaux de chargements, la majorité des éprouvettes observées ont été testées à des niveaux de chargement proches de la résistance en fatigue à 5×10^6 cycles. Quelques éprouvettes testées à des niveaux de chargement relativement élevés ont aussi été observées.

2.1. Éprouvettes poinçonnées

Les résultats des observations montrent que les fissures de fatigue s'amorcent toujours sur le bord des éprouvettes poinçonnées (configuration 1). Pour la plupart des éprouvettes, l'amorçage a lieu sur **un défaut engendré par le procédé de poinçonnage situé dans la zone arrachée** (Figure III-20 et Figure III-21). Sur quelques éprouvettes, il est difficile de localiser avec précision le site d'amorçage, mais ce dernier est toujours situé sur le bord poinçonné.

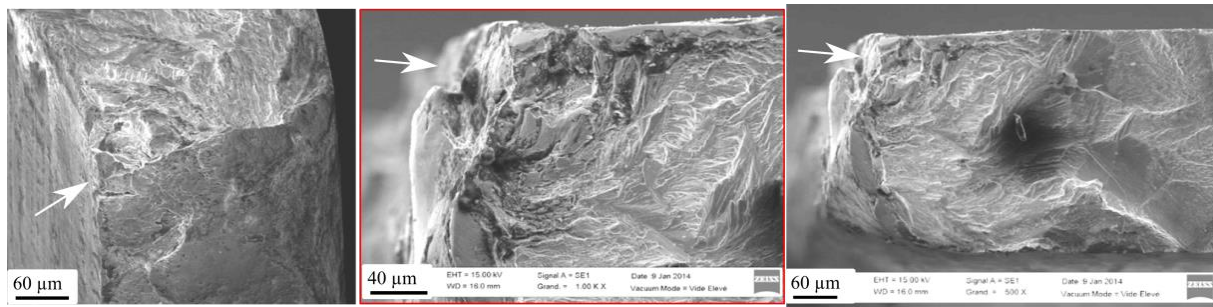


Figure III-20 : Faciès de rupture de l'éprouvette poinçonnée V.22, amorçage sur un défaut de poinçonnage ($R=0,1$; $\sigma_{max} = 409 \text{ MPa}$ et $N_r=242\ 869$ cycles)

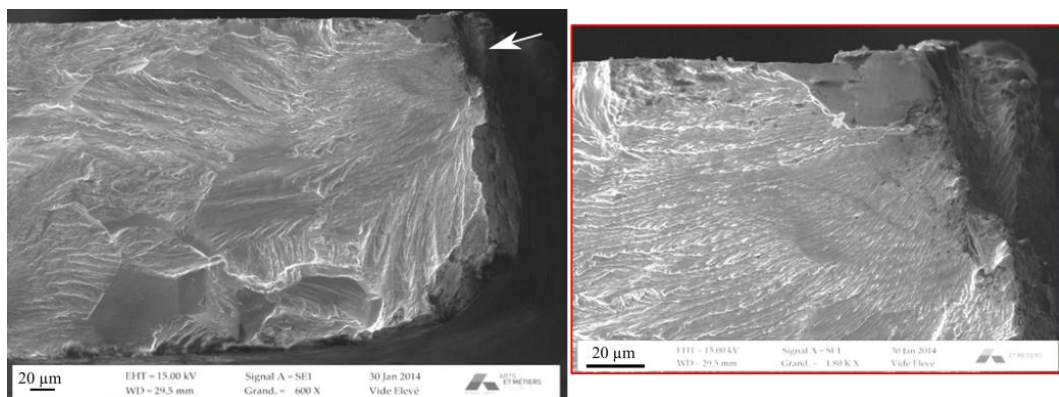


Figure III-21 : Faciès de rupture de l'éprouvette poinçonnée V.9, amorçage sur un défaut de poinçonnage ($R=0,1$; $\sigma_{max} = 364 \text{ MPa}$ et $N_r=437\ 473$ cycles)

Sur un même faciès, il existe différentes zones qui peuvent être identifiées (Figure III-22).

- Une première zone comprend l'amorçage et la propagation de la fissure physiquement courte [8] [9] [10].
- Une deuxième correspond à la propagation de la fissure longue (macroscopique).
- Une troisième zone relative à la rupture finale en traction du ligament.

La longueur de la première zone est comprise entre 0,5 mm et 1,5 mm (Figure III-23). L'étendue de la troisième zone est fonction du niveau de chargement appliqué.

Un changement de mode de propagation de la fissure de fatigue entre la première et la deuxième zone est clairement observé (Figure III-23). Il a été identifié sur plusieurs faciès de rupture des éprouvettes cassées en fatigue. Un échantillon de 5 éprouvettes a été utilisé pour étudier ce changement de mode de propagation de fissure dans le but de comprendre son origine. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau III-2. La propagation de la fissure de fatigue change dès lors qu'elle a une longueur comprise entre 0,68 mm et 1,27 mm. Le facteur d'intensité de contrainte (ΔK) associé a été calculé (voir annexe 3 pour les détails de calcul). Il est compris entre $18,81 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ et $23,42 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$.

Éprouvette	σ_{max} [MPa]	a (mm)	r_p (mm)	ΔK (MPa \sqrt{m})
V.9	364	1,27	0,143	23,42
V.22	409	0,95	0,135	22,71
V.123	364	1,14	0,128	22,13
V.157	364	0,83	0,092	18,81
V.33	409	0,68	0,096	19,18

Tableau III-2 : Facteurs d'intensité de contrainte et rayon plastique en fond d'entaille calculés pour différentes éprouvettes cassées en fatigue

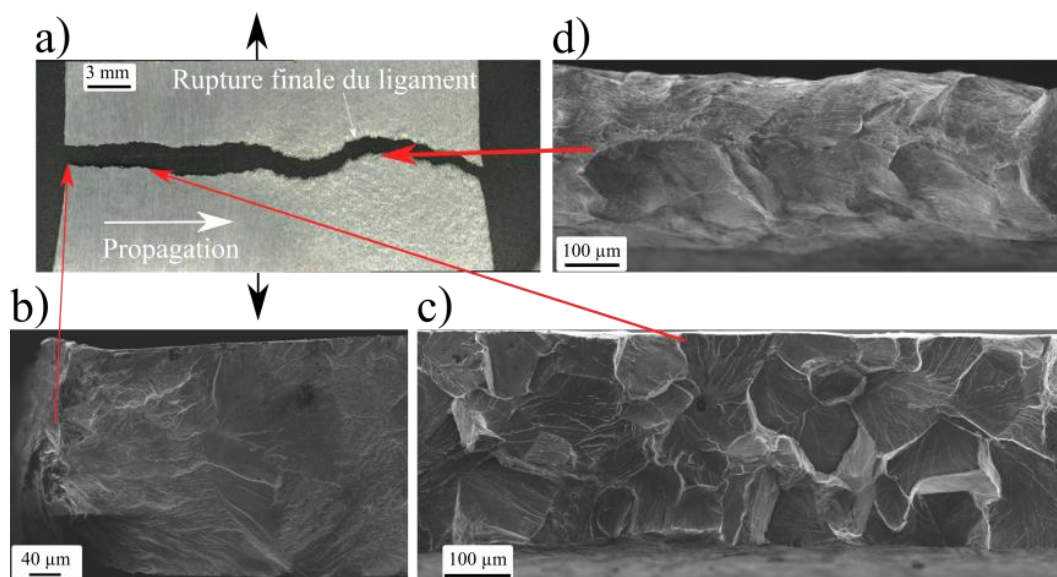


Figure III-22 : Différentes zones observées sur le faciès de rupture en fatigue : a) vue globale d'une éprouvette rompue en fatigue à un niveau de chargement élevé b) zone d'amorçage et propagation de la fissure courte, c) zone de propagation de la fissure macroscopique d) rupture finale du ligament en traction

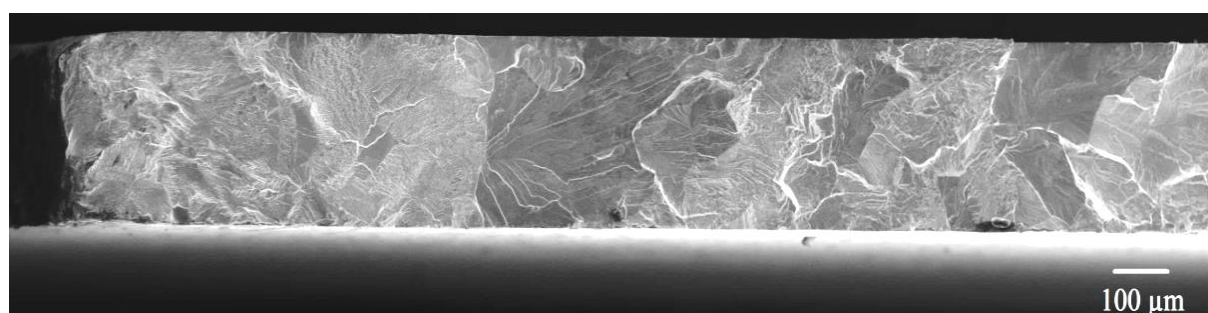


Figure III-23 : Faciès de rupture illustrant le changement du mode de propagation de la fissure de fatigue ($R=0,1$; $\sigma_{max} = 364$ MPa et $N_r=903\ 004$ cycles)

2.2. Éprouvettes polies

Pour les éprouvettes poinçonnées, la cause de l'amorçage des fissures de fatigue est claire. Il s'agit des défauts de poinçonnage. En revanche, pour les éprouvettes polies (configuration 2), l'identification de la cause de l'amorçage est moins évidente. Bien qu'on retrouve les trois zones observées sur les éprouvettes poinçonnées, le site d'amorçage n'est pas facile à identifier (Figure III-24). On ne retrouve pas les lignes de rivière qui convergent vers une seule zone comme dans

le cas des éprouvettes poinçonnées. Sur la majorité des éprouvettes polies observées, l'amorçage des fissures de fatigue est un amorçage transgranulaire. Parfois, il y a une compétition entre deux sites d'amorçage différents : amorçage sur un défaut sur la face de la tôle généré par le procédé de laminage et amorçage transgranulaire (Figure III-25).

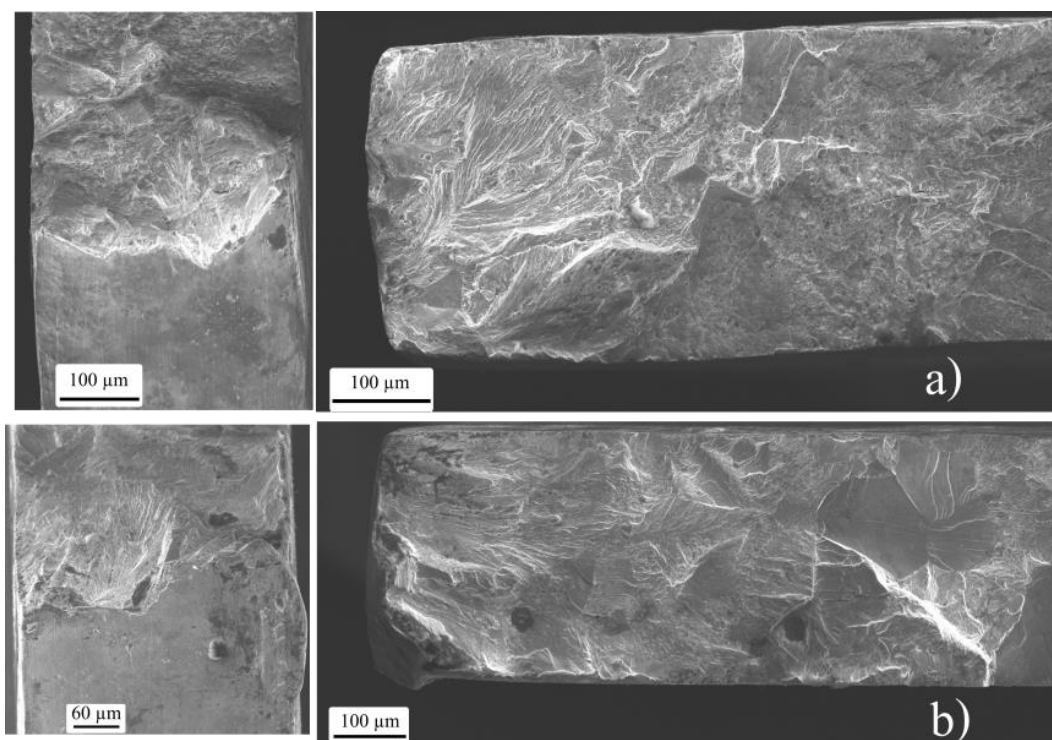


Figure III-24 : Faciès de rupture des éprouvettes poinçonnées-polies a) V.47 ($R=0,1$ $\sigma_{max} = 497$ MPa et $Nr=98\ 752$ cycles) et b) V.128 ($R=0,1$ $\sigma_{max} = 475$ MPa et $Nr=531\ 709$ cycles)

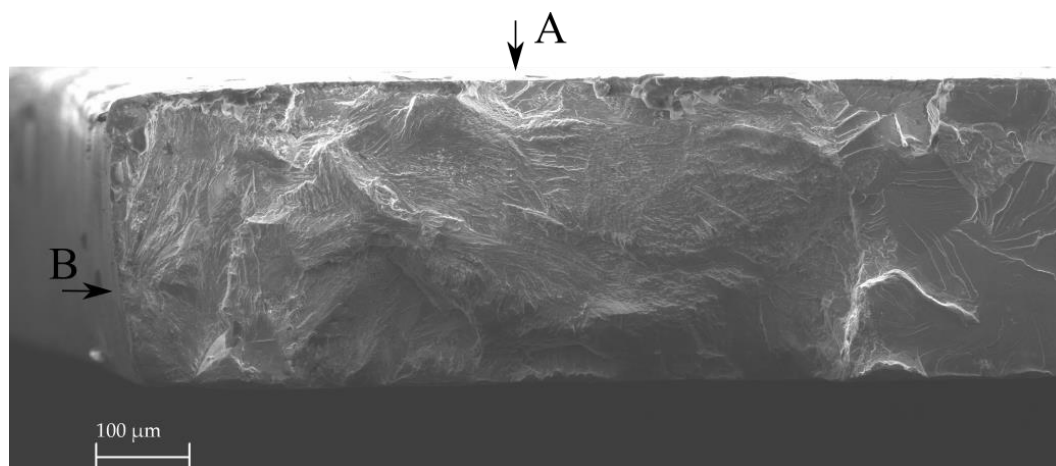


Figure III-25 : Compétition entre deux sites d'amorçage de fissure de fatigue sur une éprouvette poinçonnées-polie ($R=0,1$ $\sigma_{max} = 453$ MPa et $Nr=1\ 211\ 035$ cycles)

Cette différence des mécanismes d'amorçage explique une partie de l'abatement sur la résistance en fatigue dans le cas des éprouvettes poinçonnées par rapport aux éprouvettes polies. En effet, les défauts localisés sur le bord sont des sites potentiels pour l'amorçage des fissures de fatigue vu qu'ils génèrent une concentration de contraintes. Mais il a été montré dans le premier chapitre que le procédé de poinçonnage ne génère pas seulement des défauts géométriques, mais aussi de l'écroutissage et des contraintes résiduelles.

Dans le cas des éprouvettes polies, les défauts géométriques ont été supprimés, mais une grande partie de l'écrouissage a aussi été enlevée par le polissage, et l'état des contraintes résiduelles a également été modifié. La suite de ce document vise à mieux comprendre l'effet respectif de ces trois facteurs sur la résistance en fatigue des tôles minces poinçonnées.

3. Mesures de micro-dureté sur les bords poinçonnés

Des mesures de micro-dureté ont été réalisées près des bords dans le but de déterminer l'étendue de la zone écrouie suite à l'opération du poinçonnage (configuration 1).

Afin de se rapprocher au maximum du bord, une masse de 100 grammes est utilisée (HV0,1). La première indentation peut alors être réalisée à une distance de 50 μm du bord. Les indentations sont ensuite espacées de 75 μm (Figure III-26-a).

Le profil obtenu est illustré dans la Figure III-26-b. La valeur maximale de la dureté est relative à la première indentation (la plus proche du bord). La dureté décroît en s'éloignant du bord jusqu'à une distance de 200 μm où le gradient de dureté disparaît et les valeurs sont stables. Sur la tôle M330-35A, la profondeur de la zone écrouie est donc d'environ 200 μm . Ce même type de profil a aussi été observé pour des tôles d'épaisseur plus importantes (0,5 mm et 15 mm) par [2] et [30].

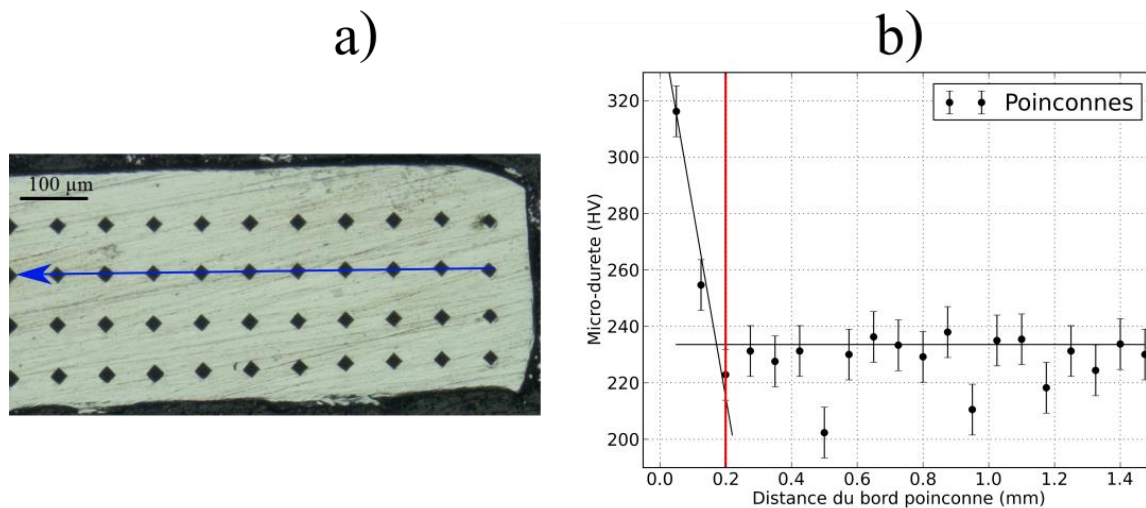


Figure III-26 : a) Indentations HV0,1 en partant du bord poinçonné b) Profil de micro-dureté en partant du bord poinçonné

Des mesures de micro-dureté HV0,1 ont aussi été réalisées sur les éprouvettes polies (configuration 2) afin de vérifier l'enlèvement de la zone écrouie par le polissage. Les mêmes conditions de mesures ont été utilisées, la première indentation étant située à 50 μm du bord poli. Les valeurs sont quasi-stables sur tout le profil comme l'illustre la Figure III-27.

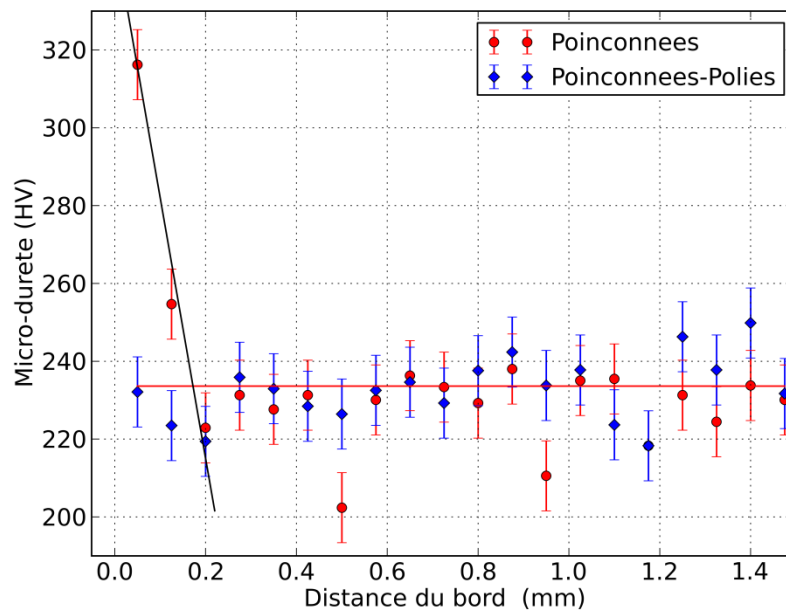


Figure III-27 : Profil de micro-dureté sur les éprouvettes poinçonnées et poinçonnées-polies

4. Analyse des contraintes résiduelles et de l'écrouissage

L'étude fractographique a montré que les fissures de fatigue s'amorcent toujours sur le bord, que ce soit pour les éprouvettes poinçonnées ou bien polies. Bien que les défauts géométriques jouent un rôle important sur l'amorçage des fissures de fatigue, d'autres effets induits par le procédé, et notamment les contraintes résiduelles, sont aussi importants.

Les contraintes résiduelles jouent un rôle important dans l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue. Il a été montré dans la littérature [2] que les contraintes résiduelles de traction favorisent l'amorçage et l'ouverture des fissures de fatigue, tandis que les contraintes résiduelles de compression permettent de fermer les fissures et ainsi de retarder leur propagation.

Dans la littérature, les analyses des contraintes résiduelles sur des tôles relativement épaisses montrent que le procédé de poinçonnage induit des contraintes résiduelles de traction localement sur le bord [28]. Les valeurs de ces contraintes varient en fonction de plusieurs paramètres qui sont liés principalement au matériau et aux conditions de poinçonnage. Le polissage du bord est connu pour modifier l'état de contraintes résiduelles sur le bord [61]. Ce procédé induit généralement des contraintes résiduelles de traction sur les bords. Au milieu de la pièce les contraintes résiduelles sont redistribuées pour que la pièce puisse avoir un état d'équilibre.

Pour mieux comprendre les mécanismes d'amorçage de fissures de fatigue sur les tôles poinçonnées, il est donc nécessaire d'analyser les contraintes résiduelles induites par ce procédé.

4.1. Détails de la campagne d'analyses par diffraction des rayons X

Les analyses de contraintes résiduelles ont été réalisées en utilisant la technique de diffraction des rayons X (DRX). Elle consiste à irradier par un faisceau de rayons X monochromatique la surface de la pièce à analyser. Un ou plusieurs détecteurs permettent de mesurer l'intensité du faisceau diffracté (Figure III-28). Le phénomène de diffraction sur les matériaux métalliques n'est possible que si l'onde de rayonnement incidente vérifie la loi de Bragg (1).

$$2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (34)$$

où :

- n : l'ordre de diffraction
- λ : la longueur d'onde du rayonnement
- θ : l'angle de réflexion, demi-angle de diffraction

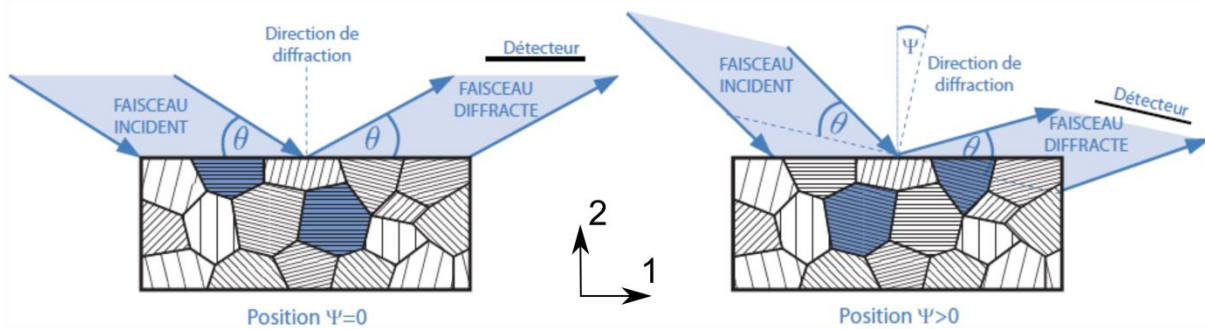


Figure III-28 : Principe de la technique de diffraction des rayons X

La technique de DRX permet de mesurer la distance inter-réticulaire d'une famille de plans $\{hkl\}$. Cette distance inter-réticulaire, puisqu'elle est représentative des déformations thermoélastiques du volume irradié, est modifiée en présence de contraintes résiduelles. Les analyses des contraintes par diffraction des rayons X visent alors à mesurer la variation de cette distance, qui engendre un déplacement des pics de diffraction, pour en déduire les déformations élastiques associées. La déformation élastique $\varepsilon(\psi)$ dans une direction repérée par l'angle ψ est ainsi reliée à la distance inter-réticulaire $d_{hkl}(\psi)$ par (35):

$$\varepsilon(\psi) = \ln \left(\frac{d_{hkl}(\psi)}{d_{hkl}^0} \right) \approx \frac{d_{hkl}(\psi) - d_{hkl}^0}{d_{hkl}^0} \quad (35)$$

Il est ensuite possible de calculer les contraintes en se basant sur les équations de la mécanique des milieux continus isotropes et homogènes connaissant les déformations élastiques. Dans le cas d'un état de contrainte plane, les contraintes résiduelles sont calculées en utilisant le modèle mécanique décrit par l'équation (36) :

$$\varepsilon(\psi) = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_{11} \sin^2(\psi) - \frac{\nu}{E} Tr(\sigma) \quad (36)$$

La relation précédente, parfois appelée la loi du $\sin^2(\psi)$, montre qu'il est possible d'évaluer la contrainte s'exerçant selon une direction à partir des mesures de déformations élastiques réalisées dans différentes directions par diffraction. L'hypothèse de contraintes planes est justifiée par la faible profondeur de pénétration des rayons X dans les alliages métalliques. En

effet, puisque le volume irradié est proche d'une surface libre, il n'est soumis à aucun effort normal.

Les analyses de contraintes résiduelles ont été réalisées selon la norme NF EN 15305 (Avril 2009). Un diffractomètre PROTO iXRD équipé d'une anode de chrome a été utilisé. Les positions des pics de diffraction ont été mesurées avec deux détecteurs à scintillation avec une plage 2θ de $18,5^\circ$ chacun. Les contraintes résiduelles ont été analysées sur le bord (Figure III-29) de la tôle, sur une zone délimitée par un collimateur. Pour les mesures sur le bord, un collimateur cylindrique de diamètre 2 mm est utilisé. Les analyses sur le bord ont été également réalisées en profondeur sur des surfaces obtenues après enlèvement successif de matière jusqu'à une profondeur maximale de 300 μm . La technique de polissage électrochimique avec une solution d'eau salée a été utilisée pour les opérations d'enlèvement de matière. La vérification de l'alignement du goniomètre de diffraction a été effectuée en utilisant de la poudre de fer pour laquelle les contraintes résiduelles sont négligeables.

La difficulté des analyses de contraintes sur les tôles étudiées est liée à la taille de grain relativement importante. En effet, le volume irradié doit contenir un minimum de grains pour que le rayon diffracté ait suffisamment d'informations pour avoir des résultats fiables (i.e. représentatif en moyenne des contraintes macroscopiques). Ce problème est principalement présent lors des analyses sur le bord de l'éprouvette. En effet, les micrographies du bord montrent des zones où on ne trouve parfois que deux grains dans l'épaisseur. Afin de contourner ce problème, la solution retenue est de faire des analyses sur un empilement de 10 tôles (Figure III-29), ce qui permet d'utiliser le collimateur le plus large possible et donc de maximiser le volume diffracté.

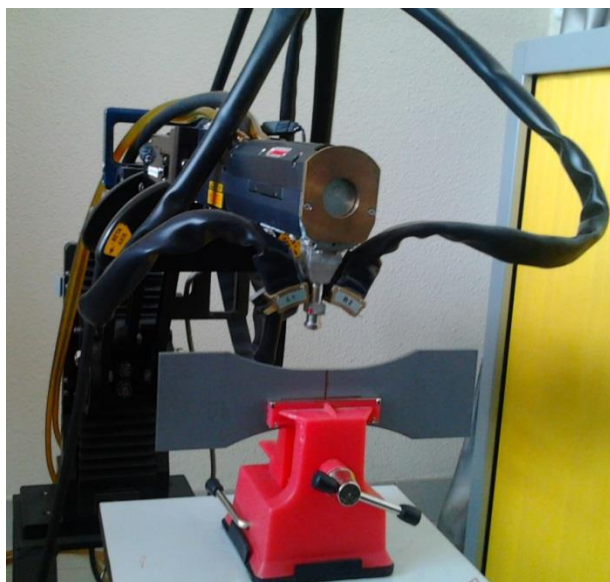


Figure III-29 : Analyses de contraintes résiduelles sur le bord de l'empilement

4.2. Contraintes résiduelles sur le bord poinçonné avec ou sans polissage

Pour les éprouvettes dont les bords ont été poinçonnés (configuration 1) ou poinçonnés puis polis (configuration 2), étant donné la faible épaisseur de la tôle et la taille de grain relativement élevée, le volume irradié lorsqu'on analyse le bord d'une seule tôle ne contient pas assez de cristaux pour avoir des résultats exploitables. Afin de résoudre ce problème, un empilement de

10 éprouvettes orientées de la même manière (bavure en Z négatif) a été utilisé (Figure III-30). Ainsi, le volume irradié par le faisceau de rayons X contient suffisamment de cristaux pour obtenir des résultats fiables.

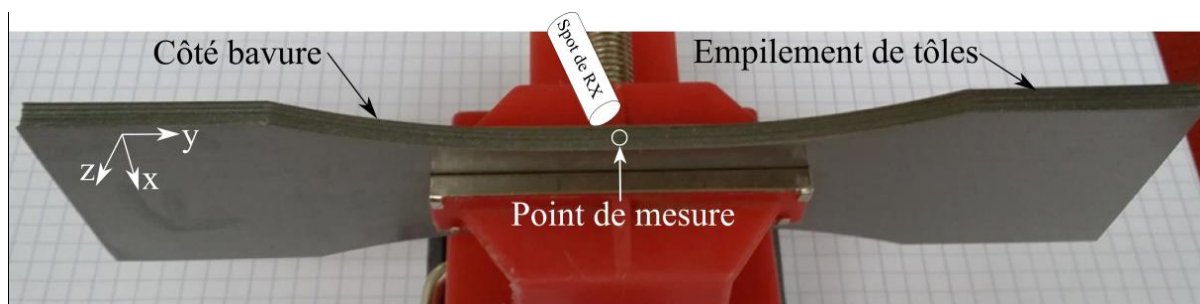


Figure III-30 : Analyses de contraintes résiduelles sur le bord de l'empilement de 10 éprouvettes

L'objectif de cette campagne de mesures est de déterminer le profil des contraintes résiduelles induites par le procédé de poinçonnage, ainsi que l'étendue de la zone affectée. Les analyses de contrainte ont été effectuées sur les deux bords poinçonnés, dans une zone située au milieu de la zone utile. Pour les éprouvettes avec des bords polis, les analyses ont été réalisées sur un seul bord. Pour ces deux configurations, après les analyses superficielles, des couches de matière ont été enlevées successivement par polissage électrochimique afin d'obtenir le profil de contraintes résiduelles en profondeur. Dans le cas présent, les enlèvements de matière ont été réalisés jusqu'à une profondeur de 300 μm pour les éprouvettes poinçonnées et de 100 μm pour les éprouvettes polies. L'enlèvement de matière est susceptible d'engendrer une redistribution du champ de contrainte résiduelle. Lors de l'analyse des résultats, cet effet de redistribution n'est toutefois pas considéré.

Les analyses de contraintes résiduelles ont pu être réalisées, sur le bord, dans le sens de laminage. En effet, l'écrouissage local sur le bord induit par le poinçonnage engendre une distorsion importante du réseau cristallin, ce qui est bénéfique pour les analyses de contraintes résiduelles. Les formes des pics de diffraction en surface et pour les premières couches enlevées sont correctes au sens où la détermination de la position de ces pics ne pose pas de difficulté particulière. Lorsque la profondeur augmente, la forme devient irrégulière à cause de l'enlèvement de la couche écrouie et de la taille de grain élevée, donc les incertitudes augmentent.

Cette explication est cohérente avec les valeurs de la largeur du pic de diffraction à mi-hauteur (Figure III-31). Cette grandeur, qui est un indicateur de la densité de défauts internes du matériau (dislocations par exemple ...), baisse de façon très significative sur les 200 premiers micromètres. Il est intéressant de remarquer que la zone écrouie, déterminée à partir des analyses par diffraction, est de taille semblable à celle obtenue par les mesures de micro-dureté.

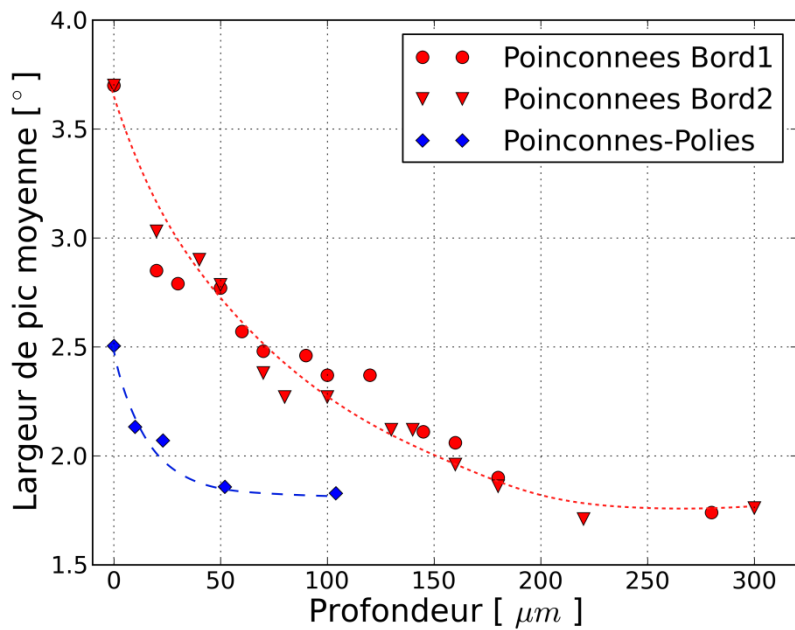


Figure III-31 : Largueur du pic de diffraction à mi-hauteur pour les bords analysés dans la direction de laminage

Les profils des contraintes résiduelles dans la direction de laminage sur les deux bords sont représentés sur la Figure III-32. Le modèle mécanique de calcul donne des incertitudes raisonnables (nettement inférieures aux valeurs des contraintes calculées). Le maximum de contrainte se trouve à une profondeur comprise entre 20 μm et 50 μm . Après une légère montée jusqu'à cette valeur, les contraintes diminuent en fonction de la profondeur jusqu'à une profondeur d'environ 200 μm après laquelle les mesures ne sont plus fiables –à cause des problèmes relatifs à la forme du pic de diffraction– et ceci pour les différents bords analysés.

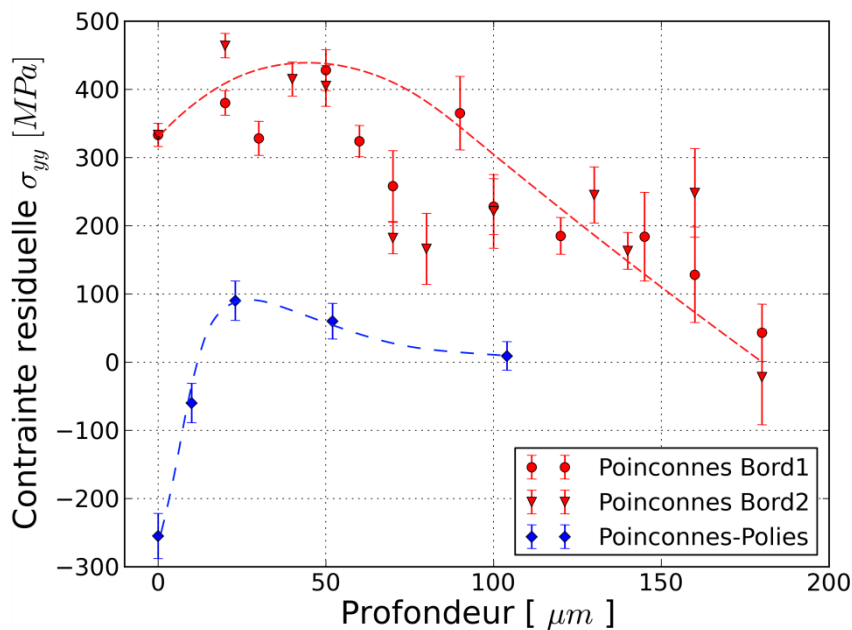


Figure III-32 : Profil de contraintes résiduelles en profondeur depuis le bord de découpe sur l'empilement de tôles dans la direction de laminage σ_{yy}

5. Relaxation des contraintes résiduelles sur le bord après cyclage

Les analyses présentées précédemment sont représentatives de l'état initial des bords poinçonnés et éventuellement polis. Afin de déterminer s'il existe ou non un phénomène de redistribution des contraintes suite à l'application d'un chargement cyclique, des analyses ont été réalisées sur deux empilements d'éprouvettes testées jusqu'à 5×10^6 cycles sans rupture à des niveaux de chargement proches de la résistance en fatigue médiane à 5×10^6 . Les deux empilements correspondent à des éprouvettes testées pour les rapports de charges $R=0,1$ et $R=0,5$, respectivement. Les analyses ont été effectuées **sur le bord en surface** en trois zones situées le long de la zone utile correspondant à six points de mesures sur les deux bords. Les résultats présentés dans le Tableau III-3 et le Tableau III-4 sont les moyennes des trois valeurs obtenues.

	Éprouvettes	MAX	MIN	MOY	Écart-type
σ_{yy} [MPa]	NON cyclées	381	285	338	36,5
	R=0,1	354	248	317	37,1
	R=0,5	459	418	445	15,9
Différence	R=0,1	-27	-37	-21	-
	R=0,5	78	133	107	-
LPM (°)	NON cyclées	3,72	3,66	3,69	0,021
	R=0,1	3,66	3,51	3,59	0,049
	R=0,5	3,48	3,41	3,44	0,027
Différence	R=0,1	-0,06	-0,15	-0,1	-
	R=0,5	-0,24	-0,25	-0,25	-

Tableau III-3 : Comparaison des contraintes résiduelles σ_{yy} sur le bord d'éprouvettes vierges ou testées en fatigue jusqu'à 5×10^6 sans rupture à $R=0,1$ et $R=0,5$

	Éprouvettes	MAX	MIN	MOY	Écart-type
σ_{zz} [MPa]	NON cyclées	205	69	130	53,41
	R=0,1	143	92	111	23,66
	R=0,5	53	-31	-9	32,12
Différence	R=0,1	-62	23	-19	-
	R=0,5	-90	-100	-139	-
LPM (°)	NON cyclées	3,77	3,57	3,68	0,08
	R=0,1	3,68	3,6	3,63	0,03
	R=0,5	3,36	3,31	3,34	0,02
Différence	R=0,1	-0,09	0,03	-0,05	-
	R=0,5	-0,41	-0,26	-0,34	-

Tableau III-4 : Comparaison des contraintes résiduelles σ_{zz} sur le bord d'éprouvettes vierges ou testées en fatigue jusqu'à 5×10^6 sans rupture à $R=0,1$ et $R=0,5$

Pour le rapport $R=0,1$, les résultats d'analyses montrent qu'il n'y a presque pas de relaxation : les valeurs de contraintes résiduelles obtenues dans la direction de laminage et dans la direction normale à la tôle avant et après cyclage sont les mêmes si on considère les incertitudes liées à la méthode d'analyse. En revanche, pour le rapport $R=0,5$, les contraintes résiduelles en surface dans le sens de laminage (σ_{yy}) augmentent considérablement après essai de fatigue. Dans le même temps, les contraintes résiduelles dans la direction normale (σ_{zz}) se relaxent de la même valeur (toujours en considérant les incertitudes de mesure). L'explication proposée est la

suivante : pour les éprouvettes vierges, les analyses sur le bord et sur la face ont montré qu'il existe d'importantes contraintes résiduelles de traction sur le bord engendrées par le procédé de poinçonnage et de faibles contraintes résiduelles de compression réparties sur la largeur de l'éprouvette pour avoir un état d'équilibre. Les niveaux de chargement appliqués aux éprouvettes testées à $R=0,5$ au voisinage de la résistance en fatigue sont suffisamment élevés pour plastifier globalement l'éprouvette au cours de l'essai. Or, les bords étant très écrouis, la déformation plastique au cours de l'essai est donc principalement localisée au milieu de l'éprouvette. Après cyclage, les contraintes résiduelles de compression augmentent donc au milieu de l'éprouvette, ce qui engendre l'augmentation des contraintes de traction sur le bord pour maintenir l'équilibre. C'est pour cette raison que les contraintes dans le sens normal (σ_{zz}) se relaxent. Ceci n'est pas visible pour les éprouvettes testées à $R=0,1$ car les niveaux de chargements appliqués ne dépassent pas la limite d'élasticité statique du matériau, l'état d'équilibre dans l'éprouvette n'est donc pas modifié : la distribution des contraintes résiduelles dans l'éprouvette ne change pas après l'essai de fatigue.

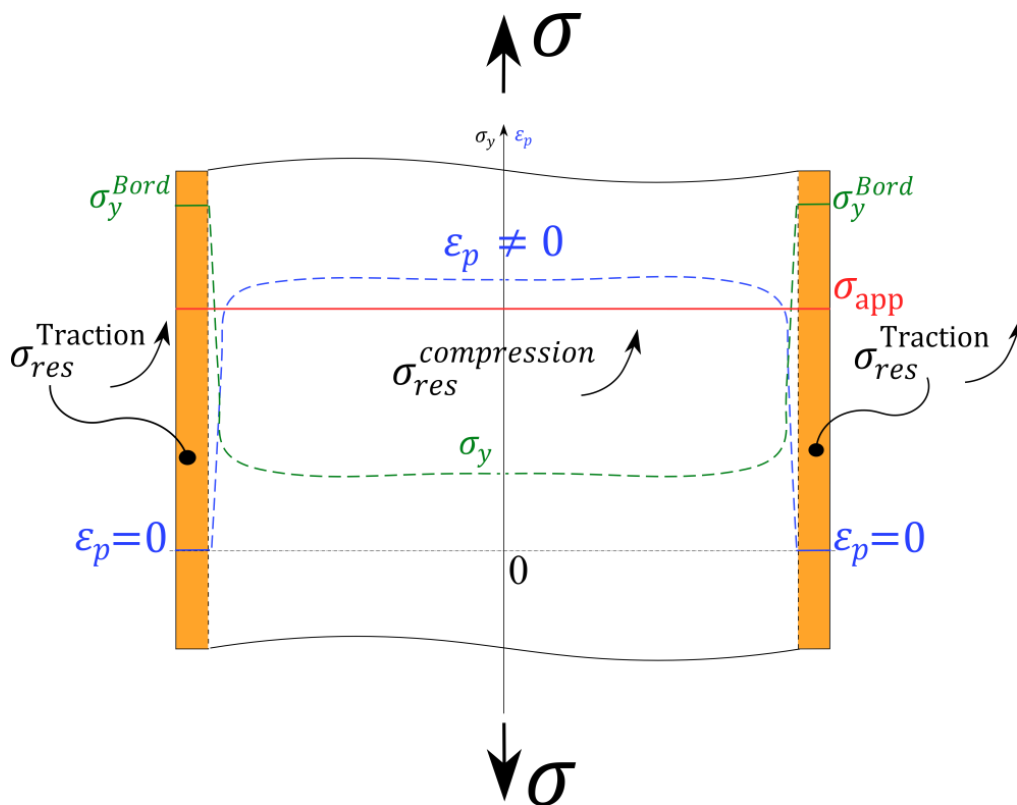


Figure III-33 : Schéma explicatif de la distribution des contraintes résiduelles après essai de fatigue

6. Quantification de la contribution des effets induits par le poinçonnage sur la tenue en fatigue des tôles minces

Nous avons vu que le procédé de poinçonnage génère d'importantes contraintes résiduelles de traction ainsi qu'une zone écrouie de $200\ \mu\text{m}$ de profondeur sur les bords. Ces contraintes générées suite à la déformation plastique importante sur le bord sont néfastes pour la tenue en fatigue puisqu'elles favorisent l'amorçage et la propagation des fissures de fatigue. Afin de quantifier les effets liés au procédé sur la dégradation de la résistance en fatigue, il est nécessaire de déterminer la contribution de chaque paramètre. Un traitement thermique de relaxation a été réalisé sur les éprouvettes poinçonnées. Ce traitement thermique permet

d'enlever l'écroissage et les contraintes résiduelles induits par le procédé et ainsi de découpler l'effet des contraintes résiduelles et de l'écroissage et celui des défauts géométriques. Il a été réalisé sous atmosphère contrôlée (azote) pour éviter l'oxydation et la carburation des éprouvettes. Le traitement thermique est effectué en trois phases : la première consiste à chauffer les éprouvettes jusqu'à une température inférieure à celle de la transformation magnétique. La deuxième est une phase de maintien et la troisième phase est un refroidissement dans le four. Ce traitement permet de restaurer les propriétés mécaniques et magnétiques du matériau avant découpe. Afin de s'assurer que l'écroissage et les contraintes résiduelles ont été enlevés suite au traitement thermique, des mesures de micro-dureté ont été réalisées sur les éprouvettes poinçonnées recuites (configuration 3) en utilisant les mêmes conditions (HV 0,1) que sur celles non traitées. Le profil tracé dans la Figure III-34-b montre que les valeurs sont presque stables le long de la tranche, alors qu'on observait un gradient de dureté pour les éprouvettes non traitées (configuration 1). Les observations micrographiques sur le bord après traitement thermique montrent qu'il y a une recristallisation sur une profondeur d'environ 50 μm par rapport à la surface du bord. Les grains écrois initialement présents sur le bord sont transformés en grains non écrois de tailles plus faibles Figure III-34a.

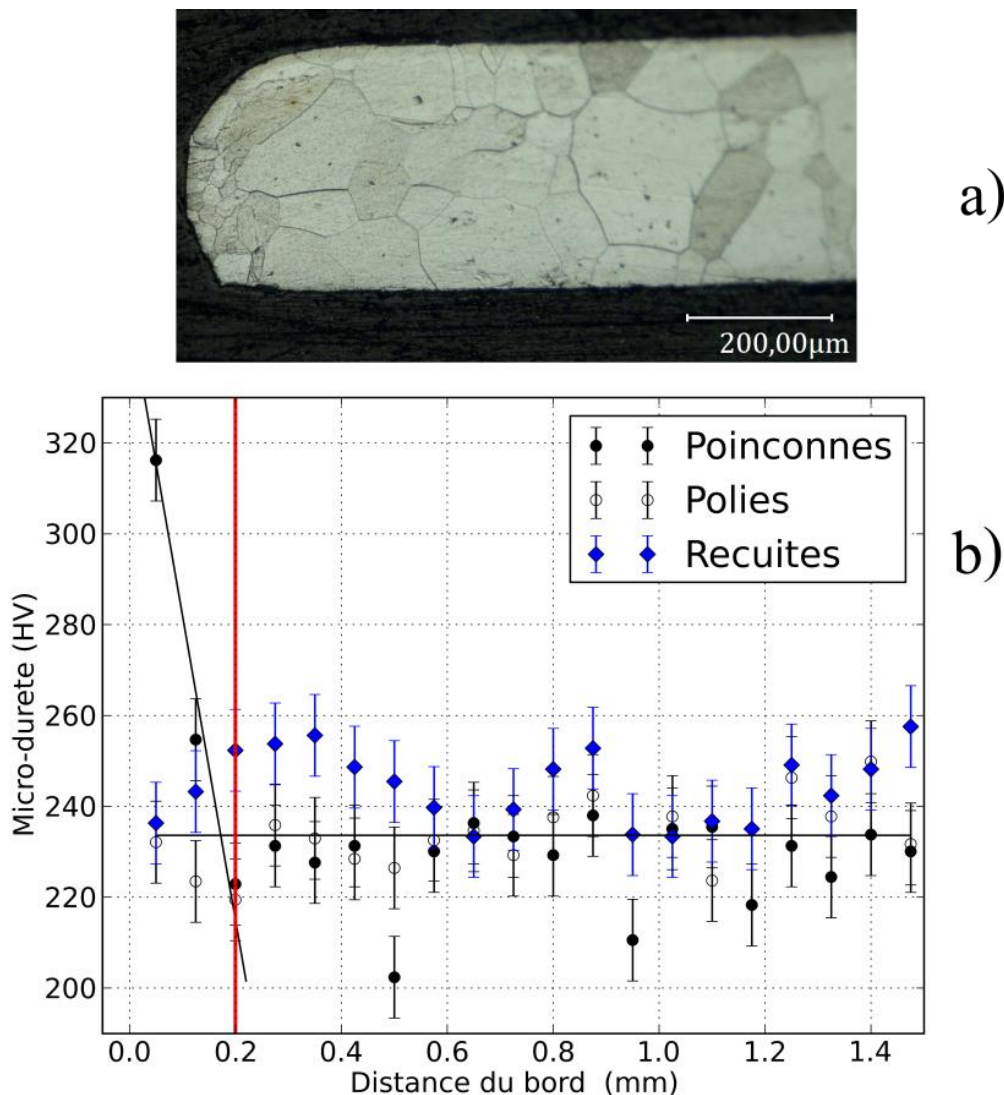


Figure III-34 : a) Micrographie du bord après traitement thermique b) Profil de dureté en partant du bord pour différentes configurations d'éprouvettes : poinçonnées, poinçonnées-polies et poinçonnées-recuites

Les contraintes résiduelles ont aussi été analysées après le traitement thermique. Les résultats présentés dans le Tableau III-5 montrent que les contraintes résiduelles de traction initialement induites par le procédé de poinçonnage disparaissent avec le traitement thermique appliqué.

σ_{yy} [MPa]	Incertitude [MPa]	σ_{zz} [MPa]	Incertitude [MPa]	LPM (°)
22	20	-18	16	2,16

Tableau III-5 : Résultats des analyses de contraintes résiduelles sur les éprouvettes poinçonnées recuites

Afin de quantifier l'effet des contraintes résiduelles et de l'érouissage, des essais de fatigue à grand nombre de cycles ont été réalisés sur les éprouvettes poinçonnées recuites (configuration 3) sans contraintes résiduelles et sans érouissage. Pour pouvoir comparer les résultats, les essais ont été réalisés en utilisant les mêmes conditions que pour les éprouvettes poinçonnées non traitées (configuration) et les éprouvettes à bords polis (configuration 2). Les résultats sont présentés dans la Figure III-35.

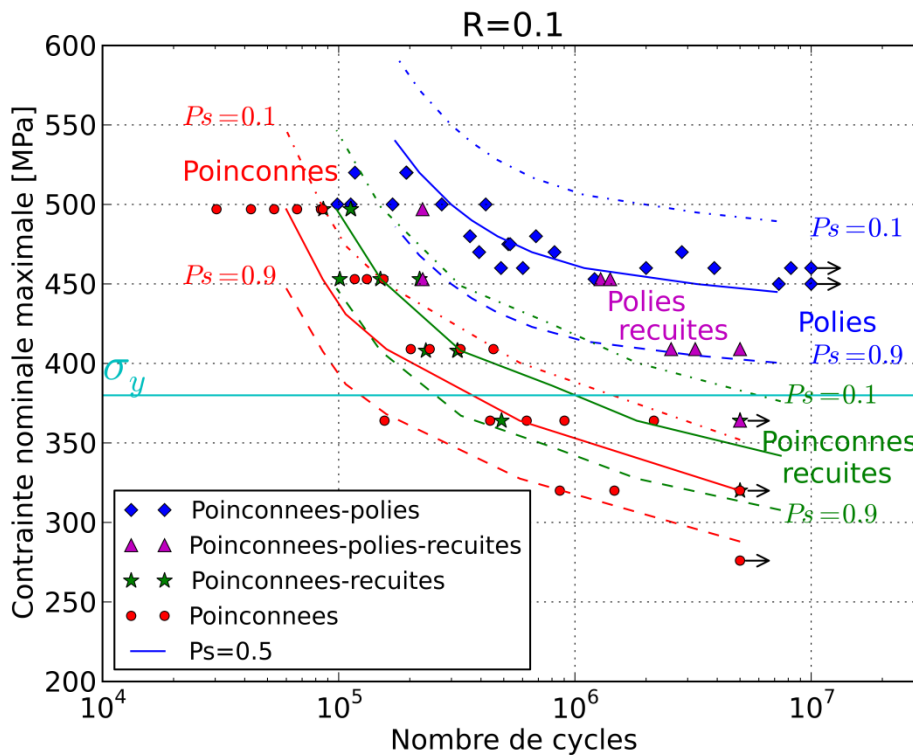


Figure III-35 : Courbes S-N relatives aux éprouvettes poinçonnées ou poinçonnées-polies, avec ou sans traitement de recuit, pour R=0,1 (Température ambiante, Modèle de Stromeyer)

Le polissage mécanique induit des contraintes résiduelles de compression en surface [61]. Afin de quantifier l'effet de ces contraintes résiduelles sur la résistance en fatigue de la M330-35A, des essais ont également été réalisés sur des éprouvettes poinçonnées polies et recuites (configuration 4). Une augmentation d'environ 11% de la résistance en fatigue médiane à 5×10^6 cycles a été observée entre la configuration 4 sans contraintes résiduelles et la configuration 3 avec des contraintes résiduelles de compression associées au polissage. Ceci montre l'effet bénéfique des contraintes résiduelles de compression sur la tenue en fatigue et confirme les résultats couramment trouvés dans la littérature.

Dans le but de quantifier la contribution des différents effets induits par le polissage sur la résistance en fatigue de l'alliage étudié, les résultats obtenus pour les différentes configurations d'éprouvettes sont comparés. La configuration 4 relative aux éprouvettes poinçonnées-polies-recuites est prise comme référence puisqu'elle représente le matériau sain (sans aucun effet du poinçonnage ni de polissage). Un abattement d'environ 20% est observé dans le cas d'éprouvettes poinçonnées (configuration 1). Cet abattement est lié à l'effet du procédé de poinçonnage. Dans le cas des éprouvettes poinçonnées recuites (configuration 3), un abattement d'environ 8% est observé sur la résistance en fatigue médiane à 5×10^6 cycles. On supposant que les phénomènes sont additifs, il est possible d'attribuer cet abattement à l'effet géométrique des défauts. La contribution des contraintes résiduelles et de l'écaillage sur l'abattement de la résistance en fatigue vaut alors 12%.

Les faciès de rupture des éprouvettes poinçonnées recuites (configuration 3) ont aussi été examinés. Pour les éprouvettes testées à des niveaux proches de la résistance en fatigue à 5×10^6 cycles, l'amorçage des fissures de fatigue est localisé sur le bord, sur un défaut situé dans la zone arrachée (Figure III-36). Pour les hauts niveaux de chargement, la plasticité macroscopique gouverne l'amorçage. On retrouve donc les mêmes mécanismes que sur les éprouvettes poinçonnées non traitées.

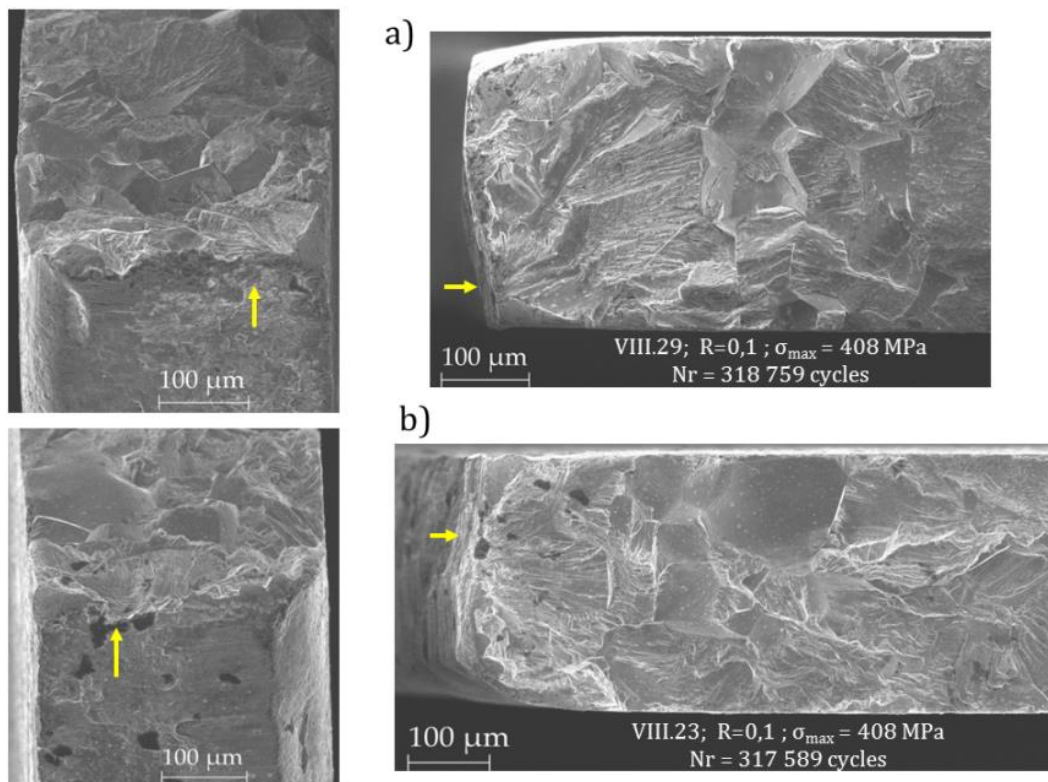


Figure III-36 : Faciès de rupture des éprouvettes poinçonnées-recuites a) VIII.29 ($R=0,1$ $\sigma_{max} = 408$ MPa et $Nr=318\ 756$ cycles), b) VIII.23 ($R=0,1$ $\sigma_{max} = 408$ MPa et $Nr=317\ 589$ cycles)

La présence de défauts géométriques le long du bord et les concentrations de contraintes locales qu'ils engendrent influence notablement la tenue en fatigue.

L'effet important des défauts est plus visible sur l'exemple illustré par la Figure III-37. Sur l'éprouvette entaillée testée, l'amorçage de la fissure de fatigue devrait se faire au niveau de l'entaille, qui présente la section la plus faible de l'éprouvette et un coefficient de concentration

des contraintes $K_t=2$. Mais la fissure a démarré au début du rayon de raccordement, où la contrainte est sensée être plus faible vu la différence des sections. Elle a donc démarré sur un défaut dont le K_t associé est probablement plus important que le $K_t=2$ de l'entaille associé au K_t relatif aux défauts au fond de l'entaille.

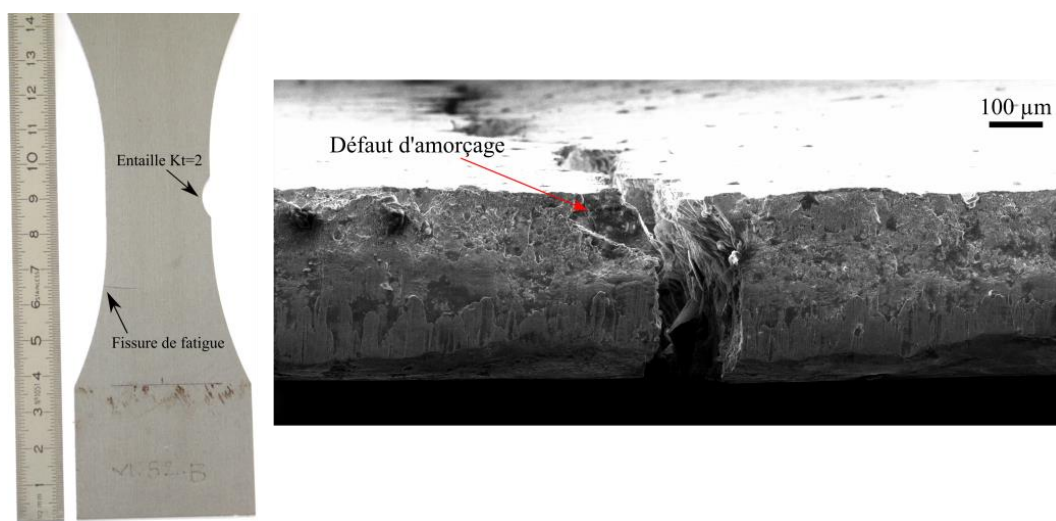


Figure III-37 : Amorçage d'une fissure de fatigue sur un défaut hors de l'entaille

Dans le cas des pièces industrielles, différentes configurations peuvent être trouvées. (i) Une concentration de contrainte macroscopique due à l'entaille. (ii) Une concentration de contrainte mésoscopique due aux défauts géométriques induits par le poinçonnage et (iii) une concentration de contrainte qu'on peut appeler « double » qui regroupe les deux cas comme le cas d'un ou plusieurs défauts de poinçonnage au fond d'une entaille (Figure III-38).

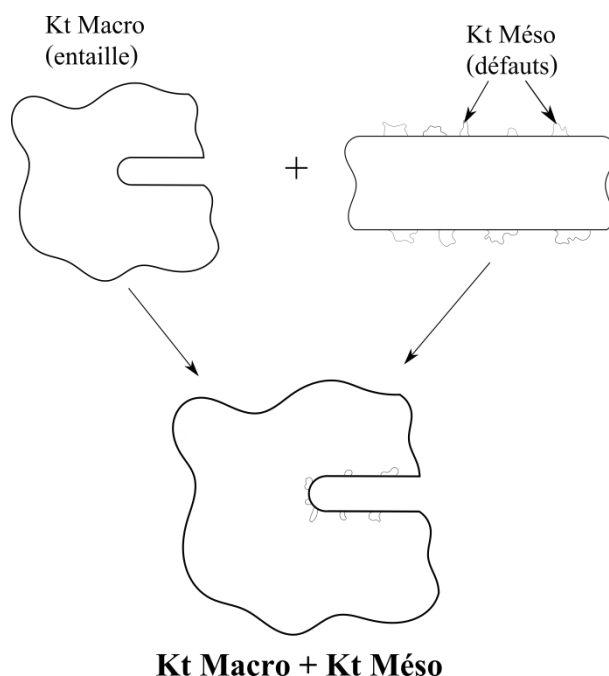


Figure III-38 : Différents types de concentration de contraintes sur les pièces industrielles

Étant donné son rôle important sur la dégradation des propriétés en fatigue des tôles étudiées, l'effet des défauts géométriques sera étudié dans la suite de ce document.

IV. Étude des défauts géométriques sur les bords poinçonnés

1. Typologie des défauts

En vue de quantifier l'effet des défauts géométriques sur la tenue en fatigue des tôles minces ferromagnétiques poinçonnées, des observations microscopiques ont tout d'abord été réalisées sur les bords poinçonnés des éprouvettes lisses ($K_t \approx 1$) afin de caractériser les différents types de défauts engendrés par le procédé. En se basant sur ces observations, les défauts peuvent être classés en quatre familles (Figure III-39) :

- Dépressions dans la surface supérieure dues à l'entrée du poinçon
- Rayures verticales causées par le mouvement descendant du poinçon
- Défauts dans la zone lisse
- Défauts dans la zone arrachée

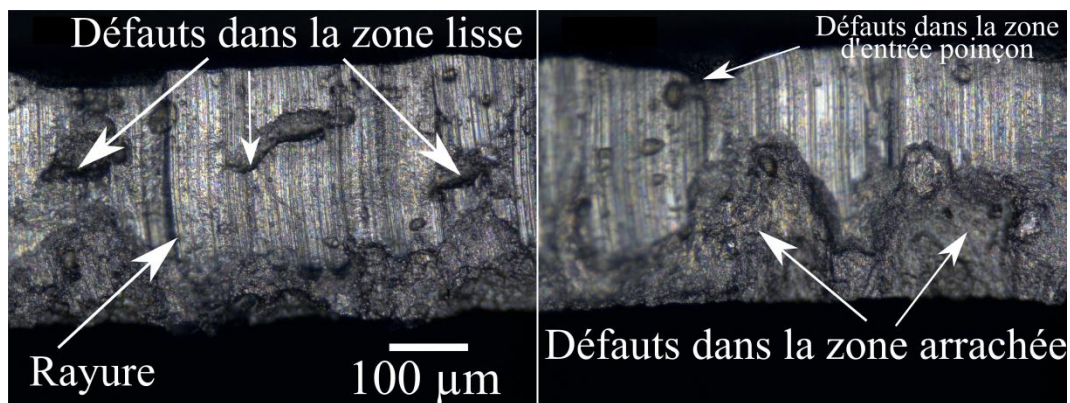


Figure III-39 : Différents types de défauts présents sur le bord poinçonné

Les défauts situés dans la zone arrachée présentent les dimensions les plus importantes, typiquement de l'ordre de grandeur de la taille de grain. Dans certains cas, la hauteur de ces défauts dépasse la moitié de l'épaisseur.

2. Densité des défauts sur le bord poinçonné

Comme nous avons vu sur les clichés MEB des faciès de rupture, les défauts de taille importante sont situés dans la zone arrachée. Afin de déterminer la densité linéique de ces défauts, il est nécessaire de choisir un critère. Le critère choisi est la taille du défaut présentée par le paramètre de Murakami \sqrt{aire} . Sur une longueur totale scannée de 645 mm la valeur moyenne de la taille des défauts selon le paramètre de Murakami est de 56 μm . La distribution des défauts dont les \sqrt{aire} sont supérieures à 56 μm est présentée dans l'histogramme de la Figure III-40. Les résultats montrent qu'une grande partie des défauts ont une taille comprise entre 60 μm et 70 μm . En revanche, il existe des défauts de taille importante qui dépassent les 80 μm . Mais la question qui se pose est la suivante : Est-ce que c'est *la taille* ou bien *la forme* du défaut qui permet de déterminer sa nocivité ?

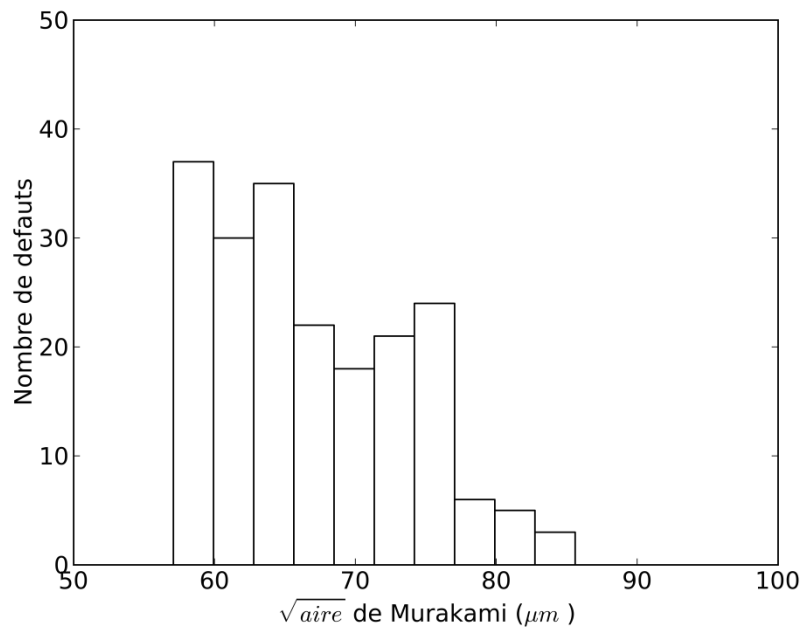


Figure III-40 : Histogramme de distribution des défauts de taille importante

Afin de répondre à cette question, des calculs par EF ont été réalisés au chapitre 4 sur des géométries réelles de défauts. Cette étude permettra de donner un critère plus objectif pour classer les défauts selon leur nocivité. La méthodologie adoptée pour identifier les défauts sur lesquels l'amorçage de la fissure de fatigue a lieu est présentée dans le paragraphe suivant.

3. Méthodologie adoptée pour la prise en compte des défauts

Afin de prendre en compte ces défauts lors du dimensionnement en fatigue, il faut localiser le défaut critique responsable de l'amorçage de la fissure de fatigue. La stratégie illustrée schématiquement par la Figure III-41 a été adoptée pour identifier le défaut critique et quantifier son influence sur la tenue en fatigue : (a) les bords d'un échantillon de 11 éprouvettes vierges ont été scannés en utilisant un profilomètre optique sans contact (b) ceci permet d'obtenir la morphologie réelle des deux bords poinçonnés de chaque éprouvette vierge, qui comprennent quatre types de défauts (c) les éprouvettes scannées sont ensuite testées en fatigue jusqu'à rupture (d) les observations microscopiques et au MEB des éprouvettes rompues permettent, par comparaison avec le scan de l'éprouvette, de localiser la zone de rupture puis d'identifier le défaut critique sur lequel l'amorçage a eu lieu. Les géométries 3D des défauts critiques sont extraites des données du scan pour générer un maillage 3D des géométries réelles des défauts (e) un calcul par éléments finis permet de déterminer les champs de contraintes et de déformations autour des défauts. Ces champs seront par la suite utilisés pour appliquer un critère de fatigue. Les différentes étapes de cette démarche seront détaillées dans le chapitre 4.

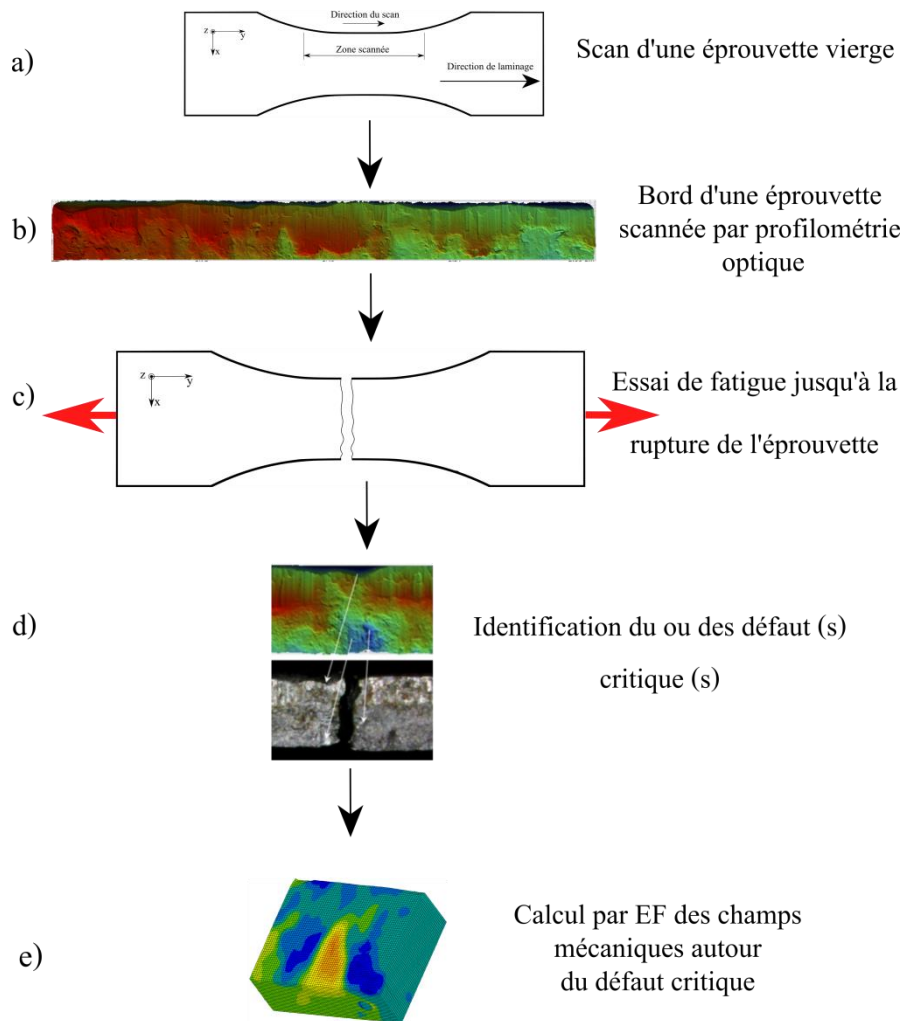


Figure III-41 : Représentation schématique de la stratégie adoptée pour déterminer puis tenir compte de l'effet des défauts sur la tenue en fatigue des tôles minces poinçonnées

4. Profilométrie optique et identification des défauts critiques

4.1. Mesures

Un profilomètre optique Brüker Contour GT a été utilisé pour scanner les bords des éprouvettes avant essai de fatigue. La zone scannée mesurait environ 30 mm de longueur. Elle contient toute la partie utile et une partie des rayons de raccordements (voir la Figure III-42 pour la définition des axes). La résolution utilisée pour l'échantillonnage de surface est de $0,89 \mu\text{m}$ selon les directions Y et Z et 10 nm le long de la direction X. Pour réduire le bruit, un filtre statistique est appliqué aux données après l'échantillonnage.

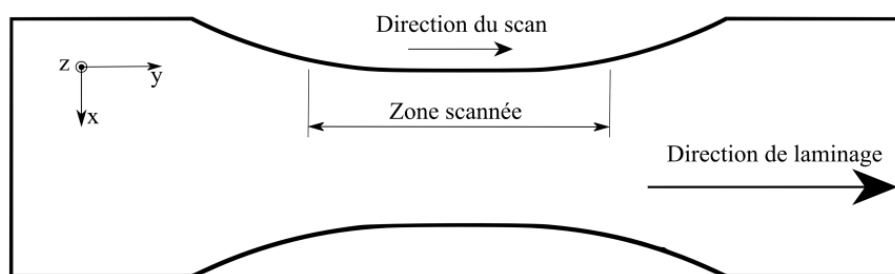


Figure III-42 : Détails des zones scannées sur les éprouvettes lisses

4.2. Identification des défauts d'amorçage

Les résultats montrent que les bords endommagés par le poinçonnage présentent les défauts situés dans les quatre différentes zones déjà citées. Les éprouvettes scannées sont ensuite testées à un niveau proche de la résistance en fatigue. Après rupture, l'analyse comparative de la morphologie des bords découpés enregistrés au profilomètre optique avec les photographies post-mortem faites au microscope optique permet d'identifier le défaut sur lequel l'amorçage a eu lieu (Figure III-44). Ces résultats confirment les observations MEB : les défauts les plus critiques sont situés dans la zone arrachée. Les dimensions typiques des défauts critiques sont une profondeur d'environ 40 μm et une hauteur d'environ 150 μm , ce qui constitue presque la moitié de l'épaisseur de la tôle (voir schéma explicatif Figure III-43 pour annotations). La géométrie réelle de ces défauts peut être extraite à partir des données du scan de l'éprouvette (voir chapitre 4).

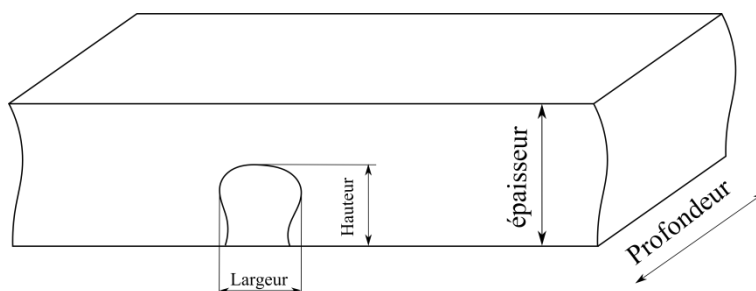


Figure III-43 : Schéma explicatif des directions sur le bord poinçonné

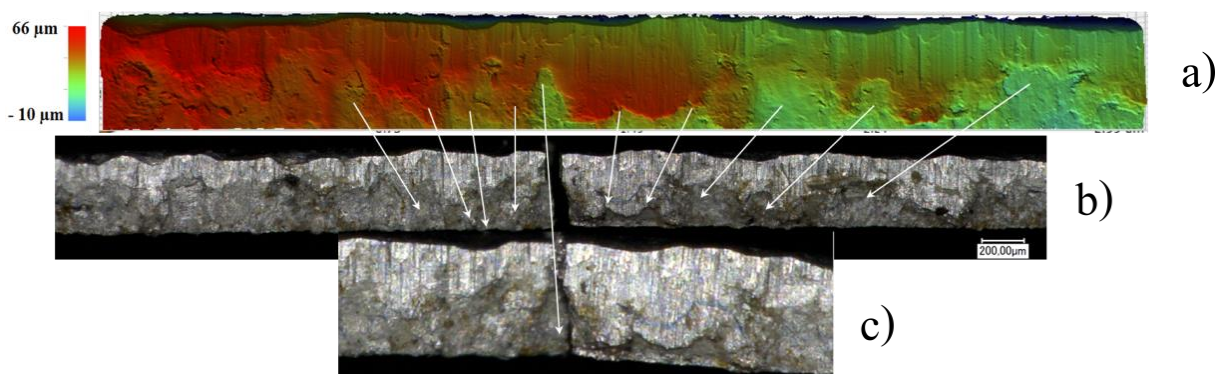


Figure III-44 : Identification du défaut critique responsable de l'amorçage de la fissure de fatigue a) profilométrie optique, b et c) les deux parties de l'éprouvette rompue en fatigue (photo au microscope optique)