

Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

Travail de bachelor Diplôme 2016

Bruno Gex

Utilisation d'un capteur à courant de Foucault pour prévenir la fissuration dans des structures métalliques

- *Professeur*
Samuel Rey-Mermet
- *Expert*
Gilles Santi
- *Date de la remise du rapport*
15.07.2016

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

TABLE DES MATIERES

1.	INTRODUCTION	2
1.1.	Buts.....	2
1.2.	Contexte	2
2.	ÉTAT DE L'ART	3
2.1.	Les capteurs à courants de Foucault.....	3
2.2.	La magnétoscopie.....	4
2.3.	Les jauges de contraintes extensométriques	5
2.4.	Le capteur de Sensima Inspection Sarl.	5
2.5.	Applications actuelles	5
3.	BASES THÉORIQUES.....	6
3.1.	Mécanique de la rupture.....	6
3.1.1.	K1c la résistance à la propagation de fissure.....	6
3.1.2.	La zone de plastification.....	9
3.2.	Interactions entre matériau et champ magnétique	9
3.3.	Fatigue.....	10
4.	MÉTHODOLOGIE	11
4.1.	Calibration et montage du capteur	11
4.2.	Déchirement	13
4.3.	Fatigue.....	16
5.	CALCULS, RÉSULTATS ET ANALYSES	18
5.1.	Simulation par éléments finis.....	18
5.2.	Essais de déchirement	19
5.2.1.	Essai de traction	19
5.2.2.	La zone plastifiée.....	20
5.2.3.	La résistance à la propagation de fissure, K1c	25
5.2.4.	Les signaux du capteur : composante Y	27
5.2.5.	Les signaux du capteur : composante X	30
5.3.	Les essais de fatigue	32
5.4.	Comparaison entre déchirement et fatigue.....	36
5.5.	La surface de rupture	37
6.	SYNTHÈSE	41
7.	PERSPECTIVES.....	42
8.	CONCLUSION	43
9.	REMERCIEMENTS	44
10.	SIGNATURE.....	44
11.	ANNEXES.....	44

1. INTRODUCTION

1.1. Buts

Sensima Inspection Sàrl. a développé un capteur à courant de Foucault flexible et peu intrusif qui permet de surveiller la propagation de fissures dans des éléments métalliques. Il est actuellement testé in-situ sur des ponts. Le but de ce projet est de démontrer que ce capteur peut être utilisé dans le cadre du suivi conditionnel d'installations hydroélectriques et en particulier des machines tournantes. Il devrait, à terme, permettre d'arrêter certains organes dans le cas où les fissures suivies dépasseraient une taille critique déterminée à partir de la mécanique de la rupture. Les jalons de ce projet sont de démontrer que le capteur permet de suivre l'évolution de fissures dans des tôles minces lors d'essais de traction en déchirement et en fatigue, et de valider expérimentalement s'il est possible de corréliser le signal obtenu par le capteur en pointe de fissure avec d'autres mesures expérimentales comme des tests de dureté et des observations métallographiques.

1.2. Contexte

Dans le contexte économique actuel, les installations hydroélectriques suisses peinent à être rentables. Certaines centrales possèdent des groupes de production datant du début du XX^{ème} siècle, et cela a pour conséquence d'augmenter les frais d'entretien, et un remplacement complet de certains organes coûterait également très cher. Doublié à cela, le phénomène de baisse du prix de vente de la puissance électrique produite vient s'ajouter aux problèmes de rentabilisation des installations. Ainsi, si les entreprises de production sont dans l'incapacité de gagner plus d'argent à cause des restrictions du marché, il leur est possible d'en dépenser moins. En effet, beaucoup de pièces entrant dans la conception des machines électriques sont changées afin de réduire, voire d'éliminer tous risques de rupture dangereuse et coûteuse. Les pièces en question peuvent être à 50%, comme à 95% de leur durée de vie, selon leur niveau de fissuration, mais sont dans tous les cas remplacées après un temps de travail défini. Cela conduit en outre à un arrêt temporaire de la production électrique du groupe auquel elles appartiennent, accompagné de frais de montage/démontage, de l'achat des pièces à remplacer, etc. Autant de dépenses dont se passeraient les entreprises concernées.

Dans cette optique, l'adaptation d'un capteur permettant de suivre l'évolution d'une fissure dans les pièces offre l'avantage de pouvoir optimiser leur durée d'utilisation.

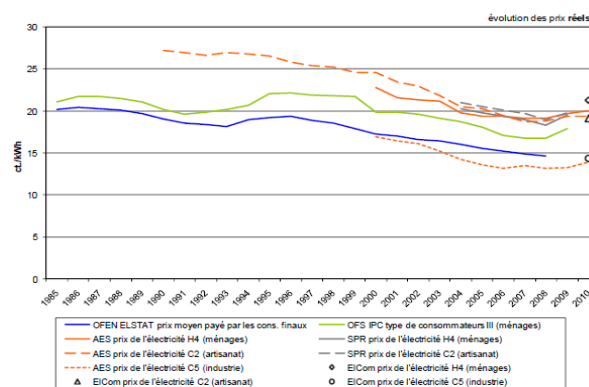


Figure 1: Prix de l'électricité en Suisse entre 1985 et 2010¹

¹ Office Fédérale de l'énergie (OFEN) ; Rapport du Conseil fédéral sur l'évolution du prix de l'électricité, juin 2011

2. ÉTAT DE L'ART

La détection de microfissures via un capteur à courants de Foucault s'inscrit dans les méthodes de contrôles non destructifs. C'est un vaste domaine regroupant toutes les technologies permettant de déterminer si une pièce mécanique est apte à remplir la fonction à laquelle elle est destinée, sans avoir besoin de la préparer. On évite par exemple les phases de découpage et de polissage nécessaires à une métallographie. Par analogie, on pourrait comparer ces méthodes de contrôles avec le « diagnostic que le médecin formule lors de l'examen de son patient »². Les différentes techniques de contrôle peuvent être classées en fonction du degré de profondeur qu'elles peuvent atteindre lors de l'analyse² :

- ◆ Les méthodes permettant de contrôler la surface des objets :
 - Les contrôles visuels ;
 - Le ressuage ;
- ◆ Les méthodes permettant de contrôler la surface ainsi que les zones proches de la surface (peau) :
 - La magnétoscopie ;
 - Les courants de Foucault ;
 - Les jauges de contraintes extensiométriques ;
- ◆ Les méthodes permettant de contrôler tout le volume des objets :
 - La radiographie ;
 - Les ultrasons ;

Toutes ces méthodes d'analyse ne seront pas explicitées dans le cadre de ce travail, seule la famille des capteurs qui contrôlent la peau de la structure métallique.

2.1. Les capteurs à courants de Foucault

La première technologie qui sera présentée est celle concernant les capteurs à courants de Foucault. La naissance de courants de Foucault dans des pièces métalliques est indissociable du principe de l'induction électromagnétique. Le contrôle par courants de Foucault consiste à « soumettre une pièce à contrôler à l'action d'un champ magnétique variable dans le temps, de manière à induire des courants électriques (dits de Foucault) en circuit fermé dans le matériau »³. Ce champ magnétique variable est souvent créé par une bobine parcourue par du courant alternatif. Sous l'action de ces courants induits se forme alors un champ magnétique secondaire opposé au champ primaire. La figure ci-dessous illustre ce phénomène :

² J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.1.2

³ J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.6.2

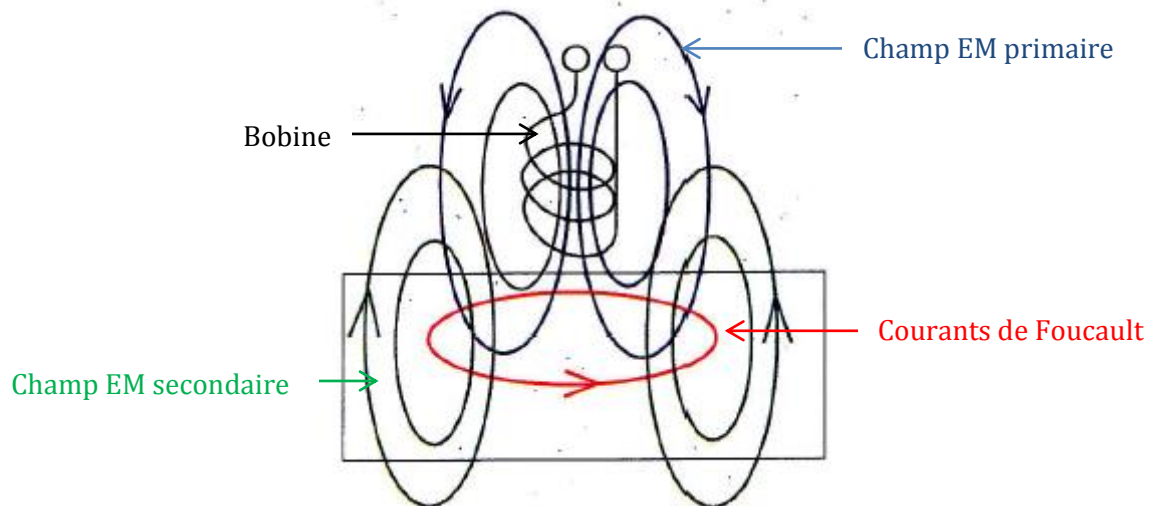


Figure 2: Induction de courants de Foucault⁴

Ces deux champs sont en équilibre lorsque le matériau composant la pièce étudiée est homogène et que le capteur reste à une distance constante. Lorsqu'une fissure ou un champ de déformation plastique en pointe de celle-ci apparaît dans le champ de détection d'une bobine, l'impédance de ladite bobine change. Les contrôles par courants de Foucault se basent sur la mesure de cette variation d'impédance. Les résultats peuvent être représentés sous la forme d'un vecteur dont le point de départ se trouve sur l'origine du système. L'analyse peut se faire soit de manière cartésienne (traitement des composantes en X et Y du vecteur) ou polaire (norme du vecteur et angle formé avec l'axe des X). C'est la première manière qui sera appliquée. Ces capteurs peuvent être engagés sur la plupart des matières conductrices, à l'air ou sous l'eau, et ne sont pas influencés par des recouvrement fins non-conducteurs (p.ex. peinture).

2.2. La magnétoscopie

Le contrôle par magnétoscopie consiste à générer un champ magnétique dans une pièce que l'on veut étudier par le biais d'une bobine parcourue par un courant électrique. De cette façon, à la manière d'un aimant permanent, la pièce va se polariser. Si celle-ci possède à sa surface des défauts, un nouveau champ magnétique apparaît aux abords de celui-ci que l'on appelle champ de fuite. La détection par magnétoscopie consiste à asperger les pièces à analyser d'un liquide contenant des particules ferromagnétiques en suspension. Les champs de fuite vont alors attirer vers eux ces particules qui vont remplir le défaut et créer un contraste sur la pièce. Selon l'environnement, il existe deux types de magnétoscopie :

- ◆ La magnétoscopie noir-blanc : utilisée pour le travail en lumière blanche, les particules ferromagnétiques apparaissent en noir dans les défauts, c'est pourquoi il est souvent préférable d'appliquer une sous-couche blanche sur la pièce.
- ◆ La magnétoscopie fluorescente : Les particules réagissent à la lumière UV, aucune sous-couche n'est nécessaire et la résolution de détection est nettement supérieure qu'en noir-blanc.

⁴ J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.6.3

Les avantages par rapport aux capteurs à courants de Foucault sont la sensibilité de détection (jusqu'à 1 micron d'épaisseur de défaut)⁵ et la lisibilité des résultats, puisque ceux-ci apparaissent directement sur la pièce à contrôler. Cette méthode possède cependant plusieurs inconvénients :

- ◆ Les pièces à analyser doivent être magnétisées ce qui peut être très contraignant pour le contrôle d'organes volumineux ;
- ◆ Si les fissures se propagent dans la même direction que le champ magnétique, le champ de fuite sera très faible et le défaut risque de ne pas apparaître ;
- ◆ Seuls les matériaux ferromagnétiques peuvent être analysés ;
- ◆ Des utilisations dans l'eau, sur des revêtements isolants, ou des revêtements magnétiques de plus d'un centième de millimètre sont impossibles ;

2.3. Les jauges de contraintes extensométriques

Les jauges de contraintes mesurent par le biais d'un pont de Wheatstone la différence de résistance électrique d'une branche du pont due à un allongement de la matière. Cette variation de résistance trouble l'équilibre du pont, lequel renvoie une valeur de tension non-nulle qu'il est possible de convertir en contrainte ou en allongement. L'échantillon doit être en contact intime avec la pièce, tout glissement fausse le résultat et risque d'endommager le capteur. Les jauges de contraintes sont une solution bon marché, fiable et facile d'accès. Cependant, elles ne tolèrent que de faibles déformations (de l'ordre de quelques microns), et leur consommation électrique est supérieure à celle d'une bobine d'induction.

2.4. Le capteur de Sensima Inspection Sarl.

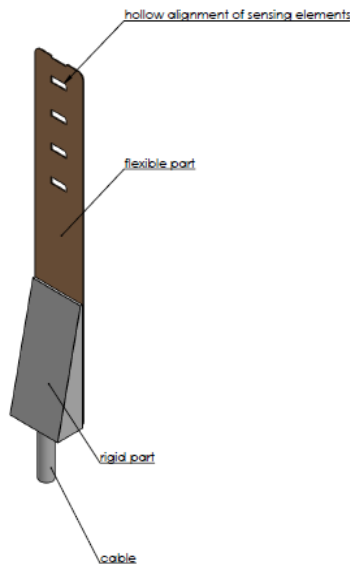


Figure 3 : Capteur de Sensima utilisé

Le capteur conçu par Sensima Inspection se compose de quatre bobines émettrices-réceptrices. Chacune d'entre elles induit son propre champ magnétique et analyse la réponse d'impédance de celui-ci. Son poids réduit, la faible épaisseur de la zone des capteurs ainsi que la plaque aimantée qui est fixée sur la partie rigide rendent son positionnement facile. La partie contenant les bobines est très flexible et peut donc s'adapter à des reliefs de surface très variés. Il est entièrement étanche et peut à ce titre être engagés sous l'eau. La communication avec le Software d'acquisition se fait ici par prise USB, mais d'autres moyens de communication sans fils (Bluetooth, GSM) sont également compatibles, ce qui lui permet de fonctionner sur des organes tournants. Il est capable de fournir une mesure directe de la longueur de fissure en traitant les signaux des bobines.

2.5. Applications actuelles

Ce type de capteurs est actuellement utilisé dans des projets variés, mais orientés vers des applications plutôt statiques dans le génie civil. Des études ont par exemple été menées sur le pont de Kirchenberg, qui est un nœud important du trafic routier en

⁵ J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.5.15

ville de Berne. Cet important flux de véhicule fait constamment varier la charge supportée par le pont, recréant des efforts de fatigue dans les barres qui le composent. Il est également engagé à Genève, dans la centrale électrique au fil de l'eau du Seujet. Avant que l'eau n'entre dans les turbines, des grilles sont chargées de filtrer les déchets qui pourraient y causer des dommages. Le capteur a permis de détecter des fissures de taille importante causées par la soudure de l'assemblage. Les défauts étaient impossibles à repérer à l'œil nu à cause d'une épaisse couche de rouille qui les recouvrait, mais le capteur a pu connaître leur position exacte.

3. BASES THÉORIQUES

L'état de contrainte d'un corps n'équivaut pas à son niveau d'endommagement. La limite élastique seule ne devrait pas être utilisée pour calculer un facteur de sécurité ou prédire la durée de vie d'une pièce. D'autres phénomènes tels que la fatigue ou la corrosion sont susceptibles de fragiliser jusqu'à la rupture des pièces soumises à des contraintes largement admissibles en temps normal. Des signes avant-coureurs apparaissent généralement à partir d'un certain stade de sollicitation, ce que l'on nomme plastification dans le cas des métaux.

3.1. Mécanique de la rupture

Le domaine de la mécanique de rupture étant essentiellement empirique, l'ensemble des modèles théoriques présentés ci-après sont des approches permettant d'établir des valeurs de référence qui serviront à l'analyse des autres résultats. Dans certains cas, un simple contrôle visuel permet de pouvoir critiquer les calculs correspondant. Ces commentaires font l'objet du chapitre 4.

3.1.1. K_{1c} la résistance à la propagation de fissure

Le phénomène de fissuration implique nombre de changements dans les métaux, dont certains permettent la détection de la fissure, et de sa propagation. Les relations exposées ci-après sont tirées du cours de Pr. Andreas Mortensen *Déformation et rupture Chap.IV : La rupture à basse température*, édition 1999.

Premièrement, une plastification du métal précède la rupture transgranulaire (ou par glissement dans un grain) ou intergranulaire (par glissement le long des joints de grains)⁶. Comme le montre la figure suivante, cette énergie nécessaire à plastifier le métal est stockée dans un demi-cylindre dans le matériau en pointe de fissure et peut être calculée selon la formule suivante :

$$E_{stockée} = \frac{1}{2} * \frac{\sigma^2}{E} * \pi * c \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

L'énergie relâchée pour un allongement de fissure dc devient :

$$dE_{relâchée} = E_{stockée} * dc \left[\frac{J}{m^3} \right]$$

⁶ <http://www.lem3.fr/mmisp/cours/Poly%20du%20cours%20P5-chapitre%20MLR.pdf>; Abderrahim Zeghloul, *Concept fondamentaux de la mécanique de la rupture, Chapitre II : Mécanique linéaire de la rupture*. Université de Lorraine, 2015-2016, p.17

Où : $E_{stockée}$ est l'énergie élastique emmagasinée dans le matériau, en $\frac{J}{m^3}$;
 σ est la contrainte de traction appliquée sur l'échantillon, en MPa;
 E est le module d'élasticité du matériau, en MPa ;
 c est la longueur de la fissure, et δc son allongement infinitésimal, en mm;

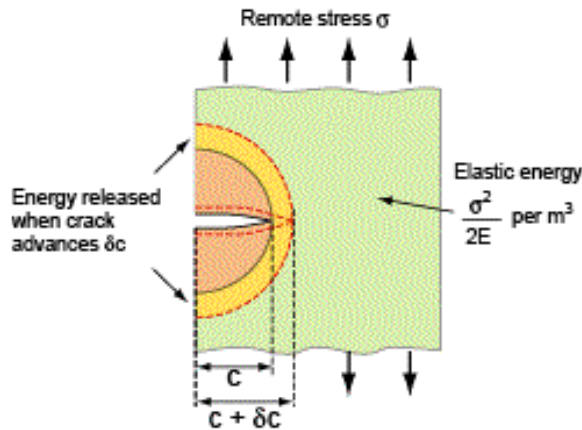


Figure 4: Relâchement d'énergie lors de la propagation de fissure⁷

De plus, la propagation de la fissure s'accompagne forcément d'une création de nouvelles surfaces, ayant une énergie dite de surface γ , en $[\frac{J}{m^2}]$. On peut ainsi exprimer la condition de fracture en fonction de l'énergie nécessaire à la création d'une surface, et du nombre de faces créées. On obtient ainsi pour une fissuration le taux de libération d'énergie G selon la formule :

$$G \geq 2\gamma \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

Il faut cependant ajouter l'énergie stockée dans la pointe de fissure par plastification, qui doit également être fournie pour permettre l'avancement de la fissure. On obtient de cette manière l'énergie critique de fracture du matériau notée G_c , qui correspond au critère de Griffith de rupture d'un matériau soumis à une contrainte plane :

$$G \geq G_c = \frac{\sigma^2 * \pi * c}{E} \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

Deuxièmement, un autre facteur influence la contrainte nécessaire à la rupture d'un matériau en traction. Les lignes de forces ne se répartissent qu'à l'intérieur de la matière où elles sont appliquées. Ainsi, pour une charge répartie sur une surface initiale A_0 , on obtient une contrainte σ constante pour autant que la section s'opposant aux efforts ne varie pas. Dans le cas d'un déchirement, la section diminue à mesure que la fissure se propage et induit ainsi une densité de contraintes plus élevée en pointe de fissure comme le montre la figure 2. Ce facteur K_t diminuant la contrainte nécessaire à la rupture d'un échantillon est appelé facteur de concentration de contrainte, et peut être calculé comme étant le ratio entre la limite de résistance en traction R_e sur la contrainte nominale appliquée.

⁷ <http://inventor.grantadesign.com/en/notes/science/material/S07%20Fracture%20toughness.htm>, Granta Material Intelligence, 2011

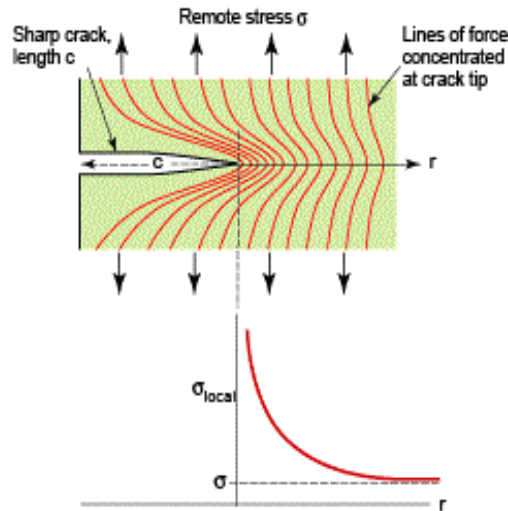


Figure 5: Lignes de forces dans un corps fissuré et effet de concentration de contrainte⁸

G.R.Irwin a apporté des modifications à la théorie de Griffith où l'intensité de contrainte remplace le taux de restitution de l'énergie. Il a également introduit une nouvelle propriété de matériau K_{1c} caractérisant la résistance d'un matériau à la propagation brutale des fissures, que l'on définit d'après les relations précitées et qui livre :

$$K_{1c} = \sqrt{E * G_c}$$

$$= \alpha * \sigma * \sqrt{\pi * c} \quad [MPa\sqrt{mm}]$$

Où : α est un facteur de correction dépendant de la géométrie de la fissure

Cette propriété est appelée K_{1c} en référence au mode de sollicitation I que subit la pièce :

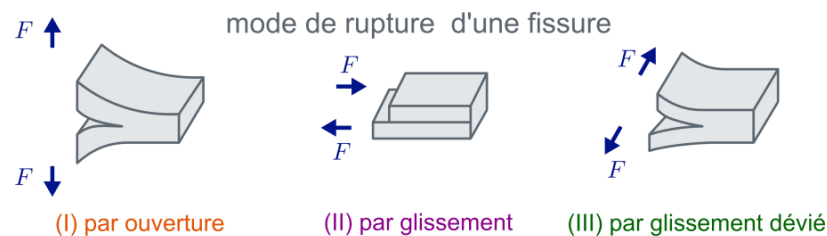


Figure 6 : Les 3 modes de propagation de fissure⁹

Idéalement, la simulation d'une fissure dans une tôle devrait être représentée par une entaille ayant un rayon infiniment petit à son extrémité. Obtenir une telle sorte de défaut est possible en soumettant les éprouvettes à un effort cyclique sur une longue durée. De telles prédispositions auraient requis un grand investissement de temps, la fissure n'a donc pas été induite par un phénomène de fatigue, mais par un effort important de traction causant une fissuration partielle de l'éprouvette.

⁸ <http://inventor.grantadesign.com/en/notes/science/material/S07%20Fracture%20toughness.htm>

Granta Material Intelligence, 2011

⁹ <http://nte.mines-albi.fr/SciMat/co/SM6uc2-1.html>, École des mines d'Albi-Carmaux, Au cœur des matériaux cristallins - Facteur d'intensité de contraintes

3.1.2. La zone de plastification

Depuis le calcul de cette valeur K_{1c} , il est possible de retrouver le rayon r_y de la zone de plastification en pointe de fissure. La plastification engendrée dans la matière à cause de la propagation de la fissure se traduit par une striction précédant celle-ci. Des formules permettent de calculer la longueur d'avance qu'a cette zone de striction par rapport à la fissure, qui n'est autre que r_y . Ces formules décrivent une approximation, étant donné que cette zone n'est jamais réellement circulaire, et s'appliquent selon une différentiation de cas¹⁰ :

- ◆ Contrainte plane :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{\sigma * \alpha} \right)^2 [mm]$$

- ◆ Déformation plane :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{3 * \sigma_y} \right)^2 = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{3 * (\sigma * \alpha)} \right)^2 [mm]$$

Ces deux modèles de calculs sont théoriques et décrivent des cas où un phénomène existe sans l'autre. La réalité est plus complexe et le résultat se situera entre ces deux valeurs. En appliquant ces calculs pour un point de travail réalisé en laboratoire, les résultats sont :

- ◆ Rayon mesuré sur l'éprouvette : 2.65 mm ;
- ◆ Rayon calculé en contrainte plane : 4.17 mm ;
- ◆ Rayon calculé en déformation plane : 0.46 mm ;

On s'aperçoit donc que le phénomène est mixte, mais plus rapproché du modèle en contrainte plane. Si l'éprouvette est suffisamment épaisse, l'analyse des surfaces de rupture montrera que la surface de l'éprouvette subit une contrainte plane tandis que le cœur est en déformation plane. Un calcul pour évaluer cette distance servira à comprendre et interpréter les réactions des signaux du capteur lorsque celui-ci détecte la zone de striction précédant la fissure.

3.2. Interactions entre matériau et champ magnétique

Si un matériau conducteur est placé à l'intérieur un champ d'induction magnétique homogène, un flux magnétique se forme à l'intérieur de la matière selon la loi¹¹ :

$$B = \mu * H [T]$$

Avec : - B l'induction magnétique dans la matière [T]

- μ la perméabilité $\left[\frac{H}{m} \right]$

- H le champ d'excitation magnétique $\left[\frac{A}{m} \right]$

La perméabilité μ est une propriété de chaque matériau et correspond au produit de la perméabilité μ_0 du vide et de la perméabilité relative μ_r :

¹⁰ Andreas Mortensen, *Déformation et rupture – Chapitre 4 : la rupture à basse température*, Ecublens : EPFL, 1999, p.6-49 et 6-50

¹¹ J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.5.3

$$\mu = \mu_0 * \mu_r = \mu_0 * \frac{B}{B_0} \left[\frac{H}{m} \right]$$

Avec : B_0 l'induction magnétique dans le vide [T]

3.3. Fatigue

Le phénomène de fatigue concerne tous les matériaux soumis à des efforts cycliques. Ces efforts peuvent mener à une rupture de la pièce bien que la déformation atteinte ne dépasse pas le domaine élastique du matériau, c'est l'addition de ces cycles de sollicitations qui provoque un vieillissement de la pièce. Les diagrammes de Wöhler constituent l'outil le plus utilisé pour déterminer la durée de vie d'une pièce en fonction de la contrainte appliquée (par durée de vie on entend le nombre de cycles que pourra subir la pièce). La figure ci-dessous illustre deux comportements de métaux en fatigue :

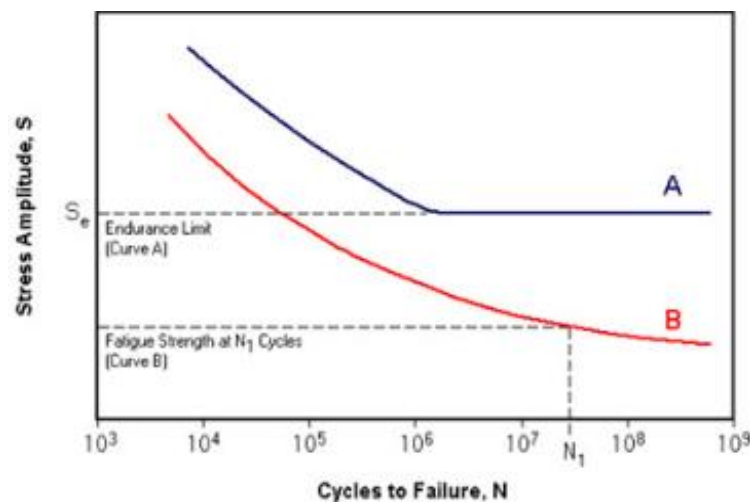


Figure 7 : Comportement typique de métaux en fatigue (A: Aciers ; B: Aluminium)

Pour la courbe A, la valeur de contrainte S_e appelée limite d'endurance est la contrainte au dessous de laquelle il n'y aura statistiquement jamais de rupture, peu importe le nombre de cycles. C'est un comportement typique des alliages ferreux. Pour la courbe B, il n'y a pas de limite d'endurance et le diagramme de Wöhler peut se lire dans les deux sens. A chargement fixé, on connaît la contrainte que subira la pièce durant son service, et on se sert de la courbe pour estimer combien de temps elle pourra remplir sa fonction. Inversement, si le nombre de sollicitations est connu, la lecture du diagramme indique pour quelle contrainte maximale sa durée de vie est assurée. La défaillance de la pièce passe par la création d'une fissure. Des facteurs tels qu'un mauvais état de surface, de la corrosion à la surface de la pièce ou des défauts microstructuraux (inclusions, porosités, précipités, etc..) sont entre autres des éléments encourageant l'amorçage d'une fissure. Dans le cas très rare où aucun de ces facteurs ne serait en cause, c'est une plasticité localisée inévitable causée par la succession des cycles qui causerait la fissuration. Une fois la fissure formée, la loi de Paris quantifie la vitesse de propagation de fissure:

$$\frac{da}{dN} = C * (\Delta K)^m [mm]$$

- Avec :
- da la variation de longueur de fissure ;
 - dN le nombre de cycles nécessaires à l'avancée de la fissure d'une valeur da ;
 - ΔK la variation de facteur de concentration de contrainte sur un cycle ;
 - C et m des coefficients propres au matériau en question ;

4. MÉTHODOLOGIE

4.1. Calibration et montage du capteur

Une calibration correcte du capteur est primordiale pour faciliter l'analyse des résultats. Pour que les bobines du capteur aient une sensibilité égale, il est recommandé d'effectuer cette procédure de calibration sur une pièce de même matière que celle à étudier dans le cas où celle-ci est connue, et de grandes dimensions de sorte à limiter l'effet d'environnement. Le programme d'acquisition se compose des éléments suivants :







Bouton	Dénomination	Fonction
	Start/Stop Acquisition	Lancer ou arrêter l'acquisition Si on charge des données au format .sidata, il est remplacé par une croix et sert à fermer la fenêtre chargée
	Balancing	Ramène le signal de chaque bobine sur l'origine de la fenêtre d'acquisition. A faire avant chaque série de mesure
	Autoscale	Modifie automatiquement l'échelle des axes X et Y selon la part d'acquisition affichée
	Acquisition Settings	Ouvre le panel des options d'acquisition : <ul style="list-style-type: none"> • Fréquence d'acquisition • Fréquence d'excitation • Gain avant et après démodulation du signal
	Filter Settings	Permet de modifier le signal avant, pendant et après l'acquisition, d'avoir les valeurs moyennes du signal pour une fourchette de temps, etc...
	Data and Application Settings	Permet de sauver, charger des données, de créer des tiles stockant les configurations etc...

Tableau 1 : Explications du software

La marche à suivre exposée ci-après est à respecter pour les essais de déchirement :

- ◆ Fixer la fréquence d'excitation. La changer en cours d'essai ou après modifie beaucoup les résultats, la valeur par défaut est correcte pour l'acquisition, elle n'a pas été modifiée ;
- ◆ Placer le capteur sur une zone de la pièce aux grandes dimensions, dessiner les bords du capteur de sorte à le remettre toujours au même endroit ;
- ◆ Lancer une acquisition et cliquer sur « Balancing » pour calibrer tous les signaux des bobines sur l'origine en plaquant la capteur contre l'éprouvette à l'aide d'un support quelconque **plat et non conducteur**;
- ◆ Effectuer un lift-off progressif avec des feuillards normalisés pour connaître l'effet (direction sur le soft d'acquisition) de lift-off de l'éprouvette avec le

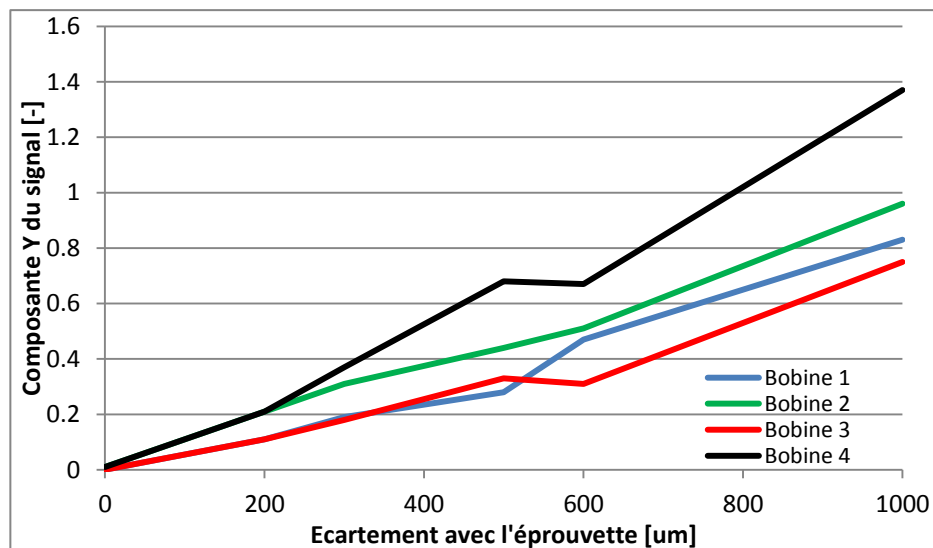
capteur. Pour chaque écartement choisi, lancer une acquisition de 2-3 secondes sans cliquer sur « Balancing » entre les acquisitions;

- ◆ Tourner le signal pour que la tendance du lift-off se retrouve sur la partie négative de l'axe horizontal. Relever la valeur de « phase angle » puisque celle-ci devra rester la même ;
- ◆ Placer le capteur sur l'éprouvette et contrôler que les valeurs soient restées le plus proche possible de « 0 ». Si les valeurs se sont trop éloignées, recommencer la procédure de calibration ;
- ◆ Lancer l'essai de traction, la vidéo, et l'acquisition en même temps afin de corriger l'échelle de temps du software ;
- ◆ Si les mesures doivent être prises durant un grand laps de temps ou que l'opérateur laisse l'essai en stand-by pour un moment, il faut s'assurer que l'ordinateur sur lequel tourne le soft ne s'éteign pas, sous peine de perdre toute la calibration du capteur ;

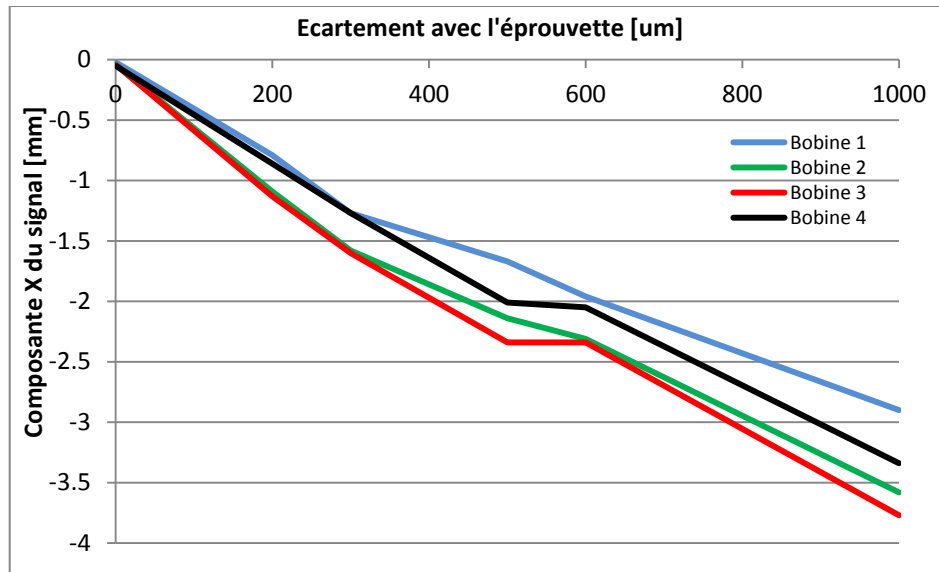
Cette calibration a fourni les résultats suivants :

Ecartement um	Bobine 1		Bobine 2		Bobine 3		Bobine 4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
0	-0.02	0	-0.04	0.01	-0.04	0	-0.05	0.01
200	-0.79	0.11	-1.09	0.21	-1.13	0.11	-0.86	0.21
300	-1.27	0.19	-1.58	0.31	-1.6	0.18	-1.27	0.37
500	-1.67	0.28	-2.14	0.44	-2.34	0.33	-2.01	0.68
600	-1.96	0.47	-2.31	0.51	-2.34	0.31	-2.05	0.67
1000	-2.9	0.83	-3.58	0.96	-3.77	0.75	-3.34	1.37

Tableau 2 : Valeurs acquises en fonction du lift-off



Graphe 1 : Résultats de la calibration en Y



Graphe 2 : Résultats de la calibration en X

L'intensité des signaux progresse de manière linéaire, ce qui servira à interpréter certains résultats par la suite. En calibrant le capteur de cette manière, la striction en pointe de fissure se reportera sur l'axe X négatif, et l'avancée de la fissure sous les bobines sur l'axe Y positif. C'est selon ces hypothèses que seront traités les résultats des acquisitions.

Remarque : L'exportation des données acquises par le capteur se présente sous la forme de fichier .csv. La colonne « Channel/State » sert à différencier les signaux en fonction de bobines. Pour le capteur fourni, les indices des bobines 2 et 3 sont inversés (la bobine 1 étant celle tout au bout du capteur, puis suivent dans l'ordre les bobines 2, 3 et finalement la bobine 4 se trouvant au plus proche de la partie rigide).

Bobine	1	2	3	4
Channel / State	0	512	256	768

Tableau 3 : Correspondance des canaux et des bobines

Le capteur présente ses résultats en fonction du temps d'acquisition. L'échelle de temps avec laquelle il travaille est faussée d'à peu près 25%. D'où l'importance de lancer et d'arrêter simultanément l'acquisition du capteur et la vidéo. Cela permet de créer une nouvelle échelle de temps correcte pour le traitement des résultats avec :

$$t_{\text{corrigé}} = \frac{t_{\text{final,capteur}}}{t_{\text{final,vidéo}}} * t_{\text{capteur}} [\text{sec}]$$

4.2. Déchirement

La machine de traction utilisée pour les tests :

- ◆ Machine de traction : ZWICK/ROELL Materialprüfung 1475



Figure 8 : Machine de traction

Données importantes : - Force de traction maximale : 100 kN ;
- Largeur en prise des mors : 40 mm ;
- Pression hydraulique de serrage : 200 bar ;

Condition d'arrêt :

Pour optimiser les chances d'avoir de bons résultats, les essais de déchirement doivent être pilotés en écartement de traverse, à une vitesse de $1 \frac{mm}{min}$. Deux conditions d'arrêt d'essai ont été utilisées :

- ◆ Si la courbe de force perd plus de 80% de la valeur maximale atteinte pendant l'essai, celui-ci s'arrête ;
- ◆ Si les traverses s'écartent de plus de 7 mm, l'essai s'arrête ;

La première condition offre un moins bon contrôle que la seconde. La valeur de force maximale qui sera atteinte pendant l'essai est difficile à prévoir. Il est favorable de pouvoir intervenir sur la longueur maximale de fissuration. Des essais avec une condition d'arrêt « Ecartement maximal » permettent des corrections plus précises si les résultats ne correspondent pas aux attentes, ainsi qu'une meilleure reproductibilité.

Placement du capteur :

Il est important que le capteur ne s'éloigne pas de l'éprouvette lors des essais. Il faut également qu'il ne soit pas trop solidaire avec l'éprouvette, pour ne pas l'endommager pendant le déchirement.

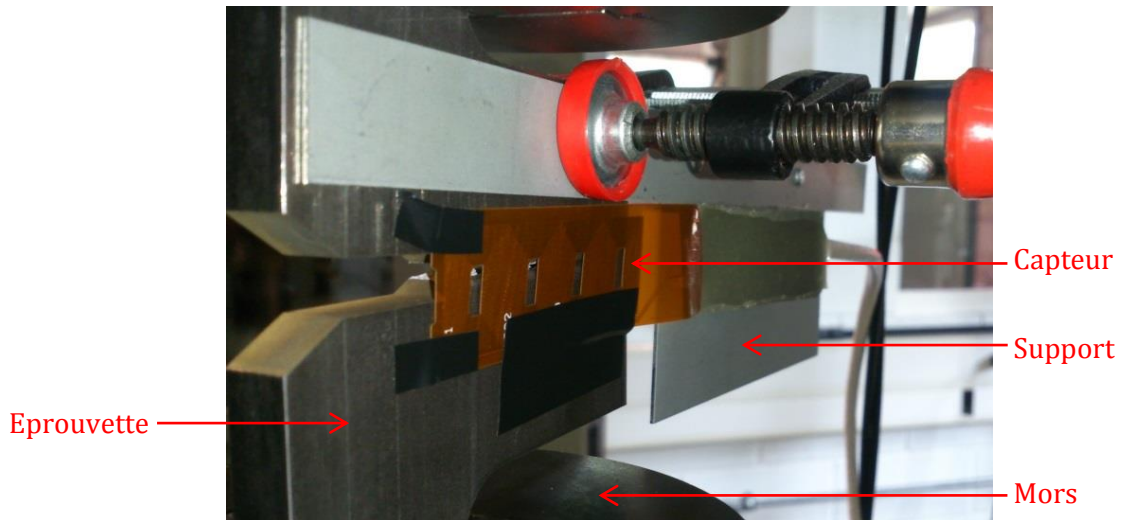


Figure 9 : Montage du support et du capteur

Dimensionnement des éprouvettes :

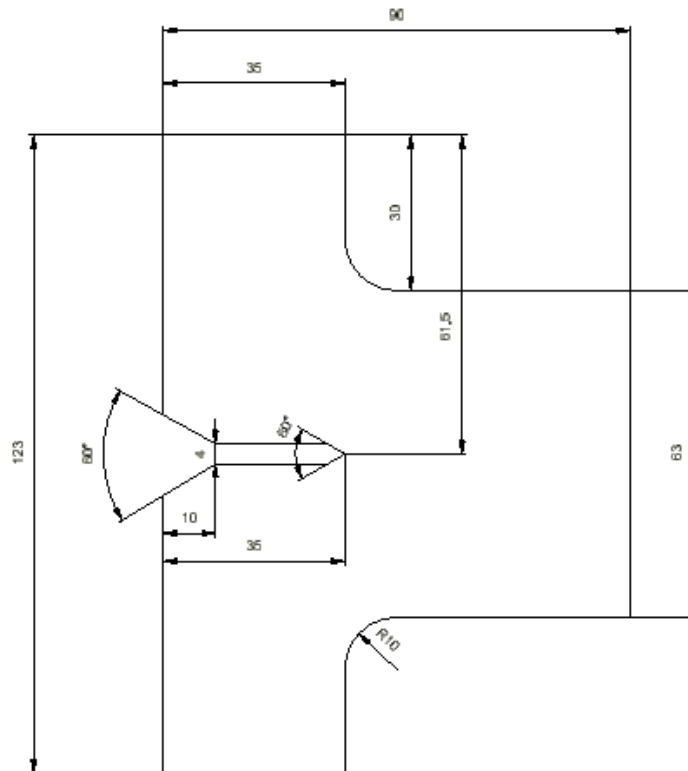


Figure 10 : Eprouvettes conçues pour les tests de déchirement

Les premiers prototypes testés possédaient ces dimensions, mais étaient des tôles d'acier inoxydable de 3mm d'épaisseur. Un premier essai a tout de suite soulevé un problème concernant ce dimensionnement. La ductilité de l'acier inoxydable comparé aux aciers de construction, le manque de rigidité dans une direction perpendiculaire à la contrainte, et une sollicitation par pincement des oreilles a mené à un voilement de l'éprouvette. Soumise à de telles forces, celle-ci se déchirait à la manière d'une feuille de papier. Finalement, la même géométrie apposée sur de l'acier St50 (ou E295) avec une épaisseur de 10mm a pallié cet obstacle à la prise de mesure.

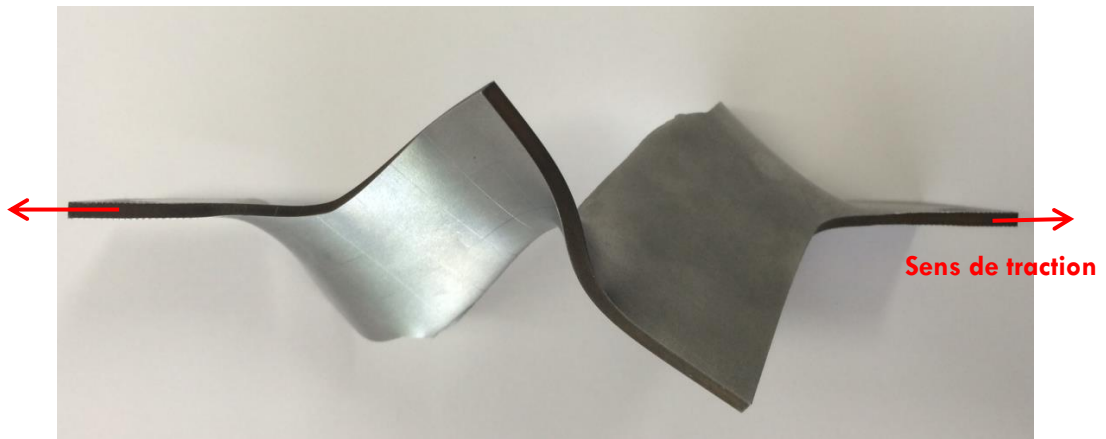


Figure 11: Epreuve d'épaisseur 3 mm voilée après traction

D'autres essais ont montré qu'une tôle si mince peut être déchirée sans se voiler pour autant que la force soit appliquée au milieu de l'éprouvette.

4.3. Fatigue

Le développement d'une machine de fatigue avait fait l'objet d'un travail de diplôme au sein de l'école en 1998. Quelques révisions ont été nécessaires afin de la remettre en état de service :

- ◆ La broche a été entièrement réusinée dans les ateliers mécaniques de l'école ;
- ◆ Un variateur de fréquence a été ajouté au montage, et un module composé d'un interrupteur et d'un potentiomètre a été fabriqué pour assurer respectivement l'alimentation du moteur et la régulation de sa vitesse ;
- ◆ Un nouvel accouplement élastique à mâchoires a été installé avec une rondelle d'amortissement adaptée à une longue durée de vie et un bon amortissement des chocs ;

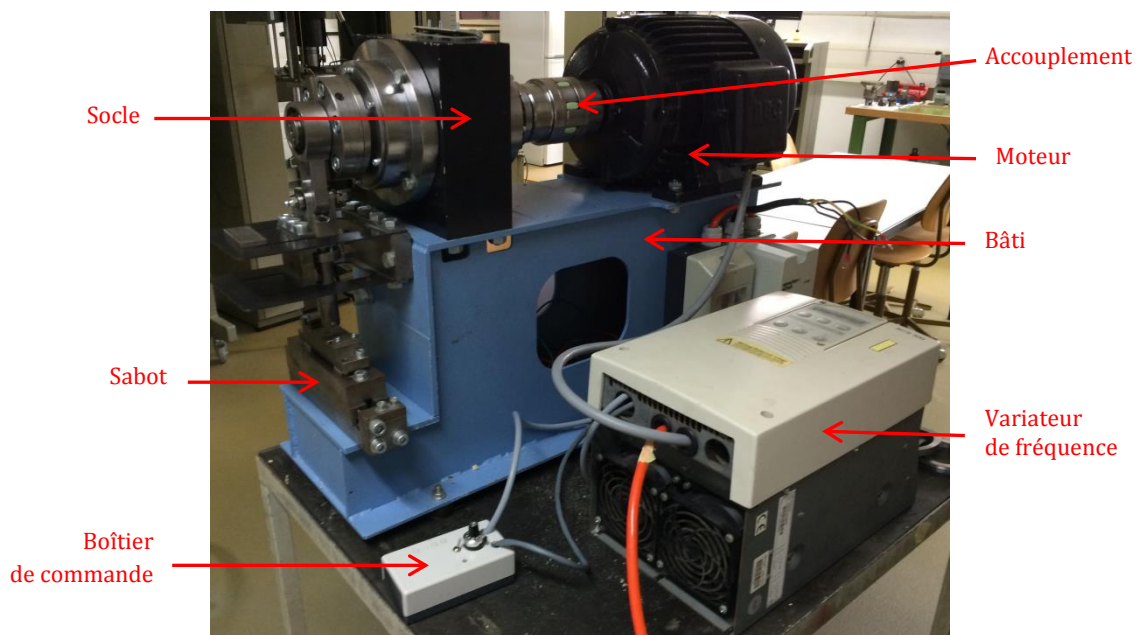


Figure 12 : Machine de fatigue

A présent, la machine présente les caractéristiques suivantes :

Fabricant :	BBC
Type :	QU 1 12 M4 AZ
Moteur numéro :	GT 3.304.168
Alimentation :	380V , 8.9A
Puissance :	4kW
Vitesse max. :	1420 t/min (réseau 1500 t/min , mais moteur asynchrone)
Facteur de puissance :	$\cos(\varphi) = 0.83$
Autres données :	IP54 , Isolation Classe B , VDE 053/11.72

De nouvelles éprouvettes non normalisées ont été conçues de telle sorte qu'elles remplissent les exigences d'une rupture en fatigue, et que la fissure créée soit détectable par le capteur. Une mise en plan de ces éprouvettes peut être trouvée en annexe. L'entaille au centre de l'éprouvette fait office de concentration de contrainte et ses extrémités sont les endroits où s'amorce la fissure. L'épaisseur est de 10mm car la machine était initialement prévue pour fatiguer des éprouvettes Charpy, lesquelles ont un section carrée de 10x10mm². Si une éprouvette plus fine doit être installée, il est nécessaire de caler le sabot comportant les appuis de la flexion 3 points de la distance amputée à la hauteur des éprouvettes.

Il est important que la machine soit réglée correctement avant de lancer un essai de fatigue. L'excentricité imposant la déformation à l'éprouvette, et donc la contrainte, est réglable sur la tête de la broche. Les 4kW du moteur permettent à la machine de délivrer une force considérable sur l'éprouvette, il faut donc veiller à ce que les efforts soient canalisés au bon endroit. Pour ce faire (les numéros de pièces correspondent à la numérotation originale des mises en plan):

- ◆ Devisser la pièce no 8 de la broche (pas entièrement, juste dégager les vis) ;
- ◆ Tenir celle-ci avec la main et faire pivoter la pièce no 9 jusqu'à la position souhaitée, puis resserer les vis ;
- ◆ Sans éprouvette ,mesurer l'excentricité avec un comparateur sous la pièce no 23, appelée ici le pointeau ;
- ◆ Placer l'éprouvette à fatiguer quand le pointeau est au point neutre haut, de sorte qu'il appuie au milieu de l'éprouvette;
- ◆ Régler la hauteur du patin no 24 en tournant la vis no 70 de sorte à laisser un jeu de 0.1mm entre le pointeau au point haut et la surface de l'éprouvette ;
- ◆ Serrer les vis 61 ;
- ◆ Lancer l'essai et mesurer au comparateur la déformée sous l'éprouvette ;
- ◆ Mesurer la déflexion du socle no 1 ;

En réitérant ces manipulations pour plusieurs valeurs d'excentricité, il s'agit de trouver la valeur assurant la déformée maximale de l'éprouvette (celle-ci plafonne pour plusieurs valeurs d'excentricité) pour une déflexion minimale du socle. Cet aspect est primordial car les dégâts qui se répercutent sur la machine sont considérables : matage de la broche, grippage des roulements, fatigue localisée du bâti, etc... La valeur d'excentricité maximale que peut atteindre la broche est de 1mm (soit $\pm 0.5\text{mm}$).

5. CALCULS, RÉSULTATS ET ANALYSES

5.1. Simulation par éléments finis

Plusieurs calculs FEM ont été menés au long de ce travail, ils servent pour la plupart d'illustrations et permettent de comprendre les tendances qui se dégagent pour certains phénomènes. Ces calculs permettent de comparer qualitativement les résultats expérimentaux. Le premier problème rencontré est que le modèle utilisé pour simuler le comportement du matériau est bilinéaire. Dans la partie élastique, la contrainte et la déformation sont proportionnelles selon la loi de Hooke au module de Young E , jusqu'à la limite d'élasticité R_e . Au-delà de cette contrainte, la progression est proportionnelle au module tangent, qui est une valeur fixée par l'utilisateur. Ce module tangent n'ayant pas pu être calculé, il a été remplacé par le module sécant illustré ci-dessous :

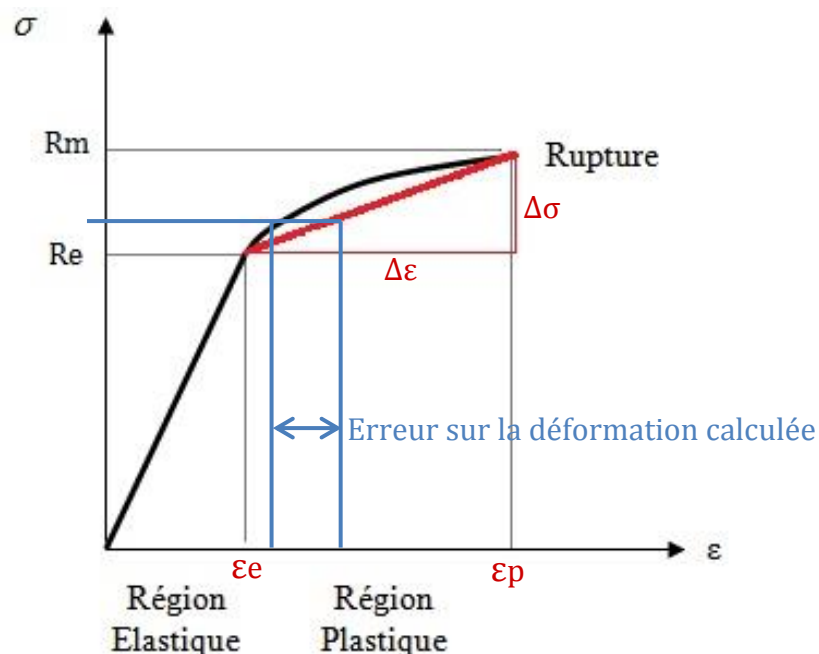


Figure 13 : Comportement réel en traction et comportement modélisé¹²

Cette simplification a été obtenue sur la base des calculs suivants :

$$\text{Module sécant} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{R_m - R_e}{\varepsilon_m - \varepsilon_e} = \frac{R_m - R_e}{\varepsilon_m - \frac{R_e}{E}} = \frac{490 - 295}{0.07 - 0.0014} = 2842 \text{ MPa}$$

Les 7% de déformation correspondant à ε_m sont une valeur estimée. Ce modèle possède cependant deux failles principales dont il faut tenir compte. Premièrement on remarque que pour des contraintes légèrement supérieures à la limite d'élasticité, les déplacements et déformations correspondant seront surévalués. De plus, le programme ne peut pas prendre en compte la condition de rupture. C'est-à-dire qu'il continuera de modéliser des déplacements correspondant à des contraintes bien au-dessus de R_m . Voici le résultat d'une simulation illustrant le problème :

¹² <http://theses.ulaval.ca/archimede/fichiers/23550/ch02.html>, Carmen Mariella De la Cruz Sanchez, Université Laval, Collection Mémoires et thèses électroniques, 2006

D: Fissure finale
 Contrainte équivalente
 Type: Contrainte équivalente (Von-Mises)
 Unité: MPa
 Temps: 1
 11.07.2016 16:25

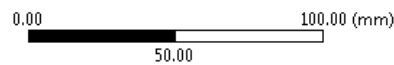
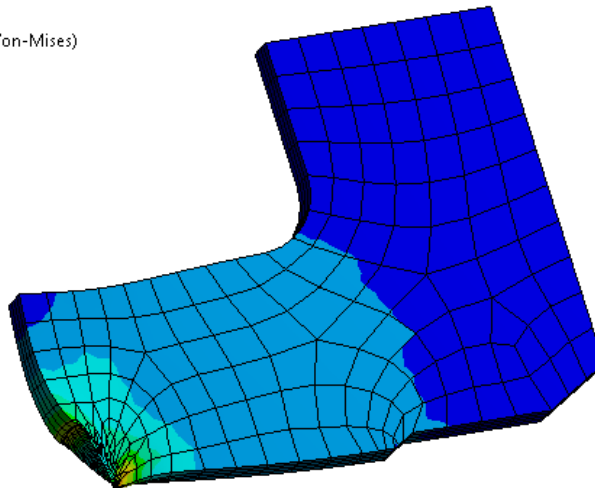
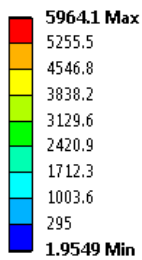


Figure 14 : Simulation FEM incohérente

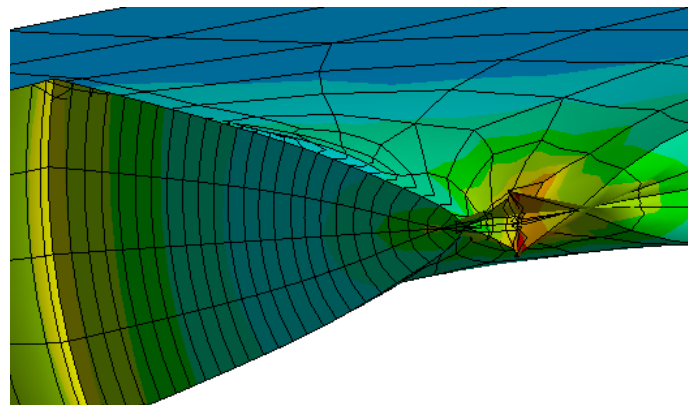


Figure 15 : Vue détaillée de la pointe de fissure

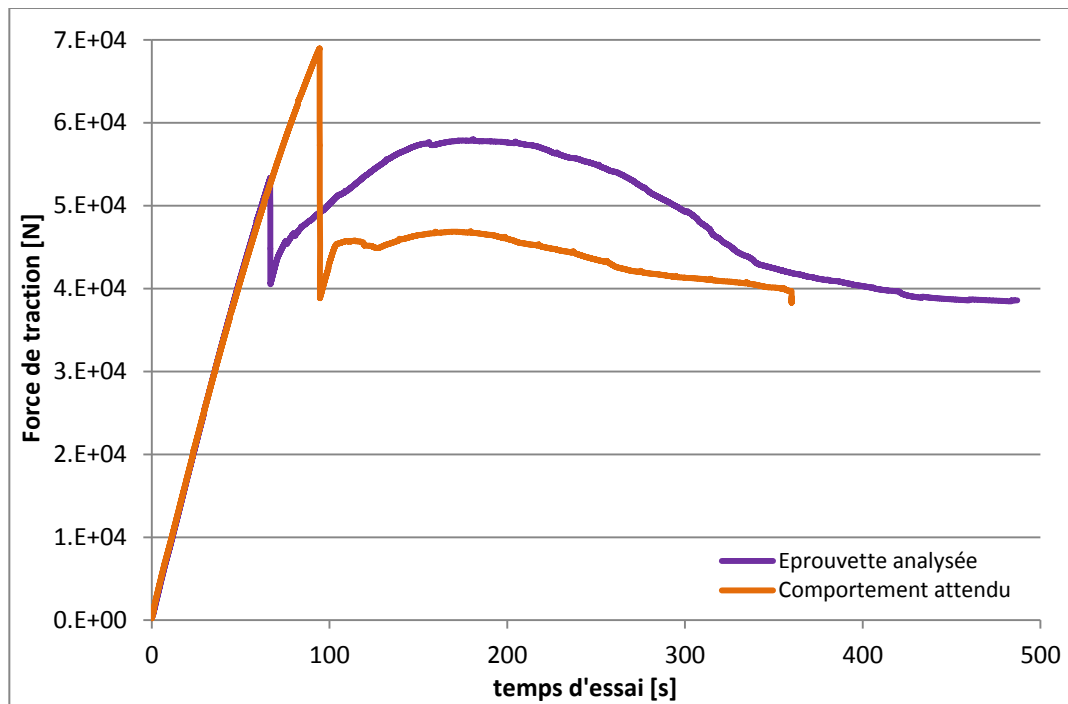
Les figures ci-dessus montrent que la contrainte augmente jusqu'à 5'694 MPa, soit plus de 11 fois R_m , et que les déplacements équivalents n'ont aucune signification réelle. Ceci provient de l'approche qui a été faite en utilisant le module sécant.

5.2. Essais de déchirement

Ce qui est appelé ici essai de déchirement englobe tous les résultats obtenus depuis l'essai de traction servant à la propagation de fissure décrit plus haut.

5.2.1. Essai de traction

Les essais ont permis de d'analyser le comportement du capteur lorsque celui-ci perçoit un défaut ou la zone de striction qui le précède. Ci-dessous se trouve la courbe de traction ayant permis l'acquisition de données avec le capteur :



Graph 3: Courbe de traction de référence pour l'acquisition de données

La chute de force intervenant aux alentours de 70s correspond à une première fissuration de l'éprouvette et au point de départ pour les analyses des données du capteur. Les normes pour appliquer le modèle de référence de la mécanique de rupture voudraient que cette pré-fissuration soit obtenue par fatigue, mais cela serait très compliqué au vu des dimensions de l'éprouvette conçue. La suite de la courbe adopte un comportement imprévu. Les attentes pour essai de déchirement piloté en écartement de traverse (en orange) seraient de voir la force se stabiliser autour d'une valeur proche des 44 kN, de telle sorte que se forme un plateau de propagation. Ici, la courbe augmente jusqu'à excéder la valeur de la première fissuration, ce qui vient peut-être du fait que les lots d'acier produits ne sont jamais entièrement homogènes et qu'ainsi, un défaut structural perturbe le développement de l'essai. La fissure a été déviée lors de sa propagation. Cependant, ce phénomène n'a pas empêché le capteur d'acquiesir des données. Celui-ci a donc été calibré et positionné sur l'éprouvette comme illustré plus haut.

5.2.2. La zone plastifiée

La mécanique de la rupture dit qu'une certaine zone en pointe de fissure est plastifiée. Ce phénomène modifie beaucoup de propriétés du matériau (magnétiques, électriques, mécaniques, etc...). Des tests de duretés ont été faits sur les éprouvettes après déchirement pour quantifier les répercussions de la plastification aux abords de la zone fissurée (les lèvres), et en pointe de fissure. Les résultats exposés ci-dessous confirment une variation de la densité de dislocation qui se trouve être plus accentuée dans un rayon de 4mm en pointe de fissure que sur une bande de 2mm sur les lèvres de fissuration:

	Référence [HV50]		Lèvres [HV50]		Pointe de fissure [HV50]	
	Résultats	Moyenne	Résultats	Moyenne	Résultats	Moyenne
Eprouvette 5	219	223.25	233	235	235	240.25
	221		226		247	
	237		236		246	
	216		245		233	
Eprouvette 8	216	221.5	257	239	247	244.25
	216		233		244	
	224		235		242	
	230		231		244	

Tableau 4 : Mesures de dureté



Figure 16 : Localisation des tests de dureté

Lors de l'essai de traction, une vidéo a enregistré la propagation de la fissure du côté de l'éprouvette opposé au capteur. Cela a permis de tracer la position de la fissure et de la zone de striction en fonction du temps. Cependant, la méthode de mesure ne permettait qu'une évaluation des distances approximatives. Comme le montre la figure suivante, une imprécision estimée de $\pm 2\text{mm}$ entache la mesure de la longueur de la fissure (en rouge), et de $\pm 3.5\text{mm}$ pour la longueur de la zone de striction (en jaune).

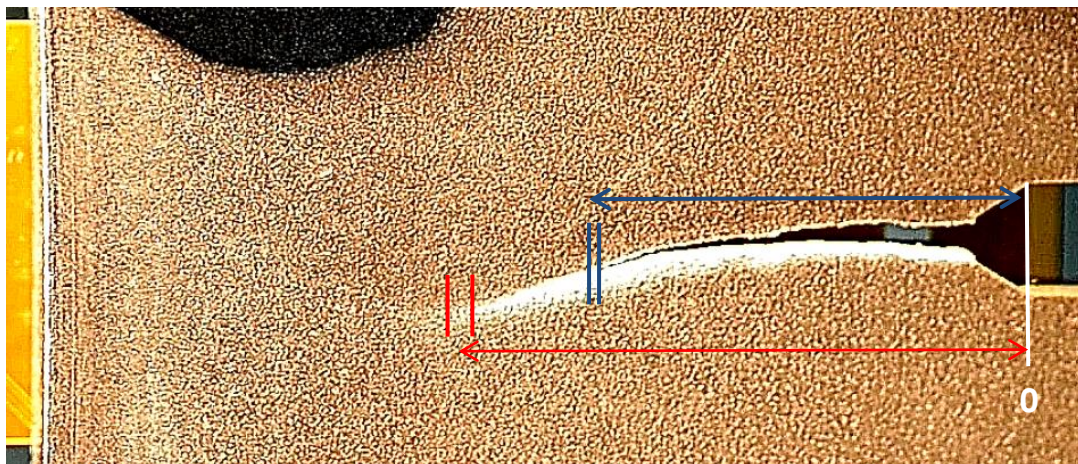
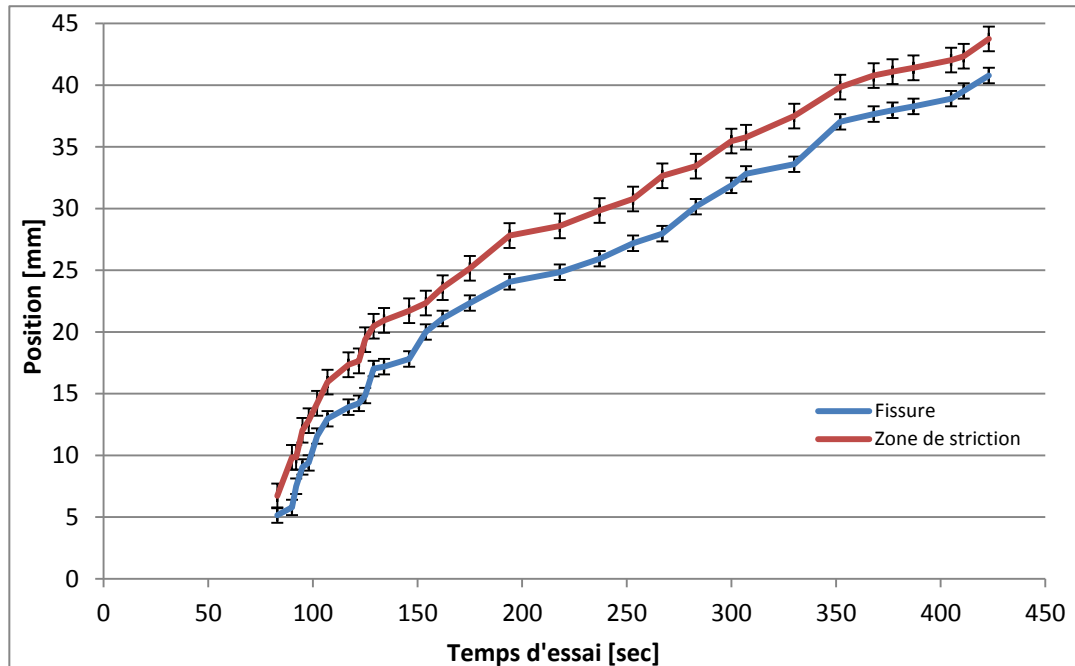


Figure 17 : Source des imprécisions de mesures

La vidéo rognée pour l'analyse présentait un grossissement de 320%, ce qui réduit les erreurs à $\pm 0.625\text{mm}$ pour la fissure, et $\pm 1.09\text{mm}$ pour la zone de striction. Ces mesures ont délivré le résultat suivant :



Graphique 4 : Propagation de la fissure et de la zone de striction

L'écart entre les deux courbes reste relativement constant, ce qui contredit les résultats FEM, probablement car la pente du module sécant devrait être plus élevée. Vu le temps important qu'exigent les simulations, seuls quelques états de fissuration ont été simulés, correspondant à des longueurs de fissure de 3.27mm, 15mm, 30mm, et 37.5mm.

Le problème a été modélisé comme suit :

- ◆ La géométrie représente la moitié de l'éprouvette afin de minimiser l'inhomogénéité du maillage sur les résultats. Une symétrie appliquée selon le plan de la surface résistante permet que les deux demi pièces aient un comportement identique ;
- ◆ Le plan de la surface est bloqué en déplacement dans le sens de la contrainte seulement. Ceci permet de simuler également la striction ;
- ◆ L'intensité de la force appliquée sur la face supérieure est égale à la force indiquée par la machine de traction au moment de l'état de propagation considéré ;
- ◆ Pour le post-processing, le niveau plancher de l'échelle des iso-valeurs est fixé à la valeur de basculement entre le domaine élastique et plastique ($R_e = 295\text{ MPa}$ pour les contraintes et $\varepsilon_e = 0.14\%$ pour les déformations) ;
- ◆ Le dimensionnement des éléments de maillage de la face fissurée est de 0.6mm ;

Les calculs FEM ont rendus les résultats suivants :

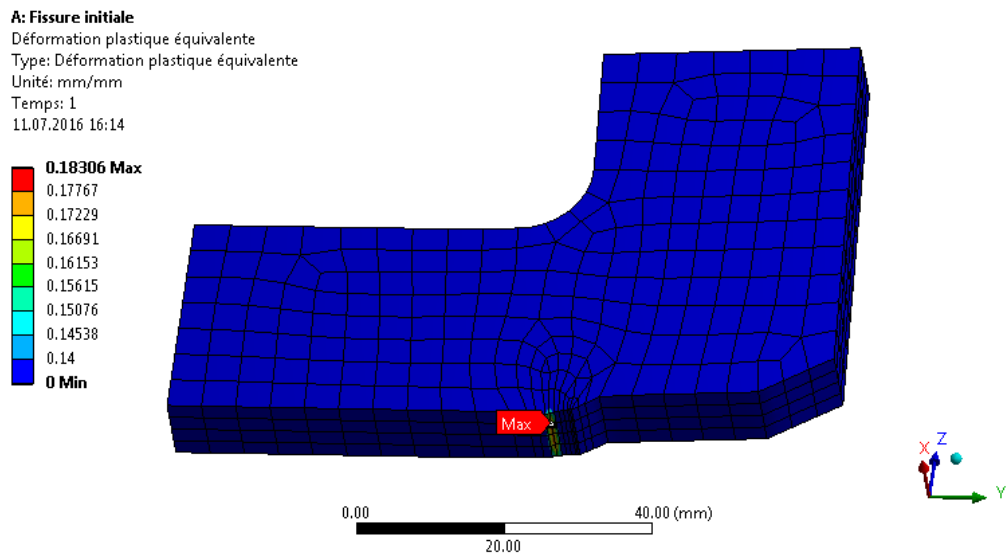


Figure 18 : Simulation du rayon de plastification pour une fissure de 3.27mm

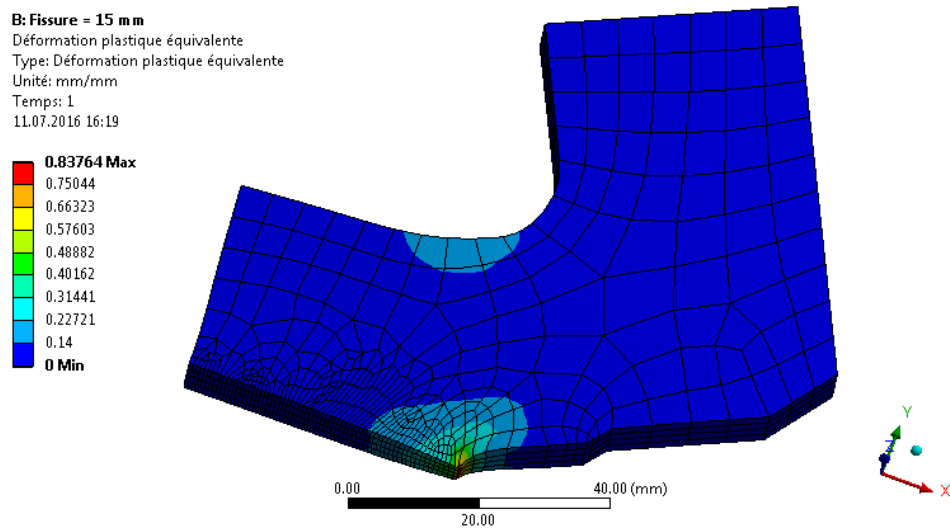


Figure 19 : Simulation du rayon de plastification pour une fissure de 15mm

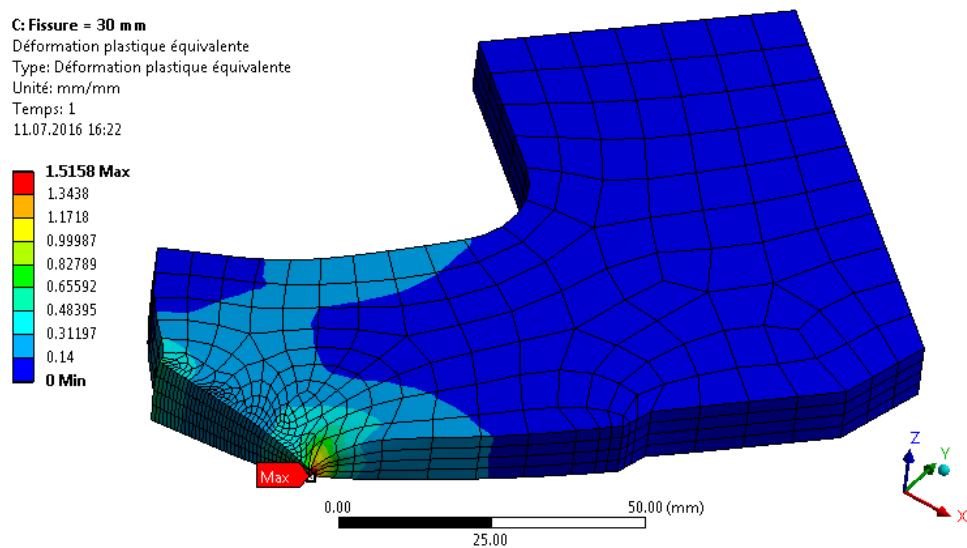


Figure 20 : Simulation du rayon de plastification pour une fissure de 30mm

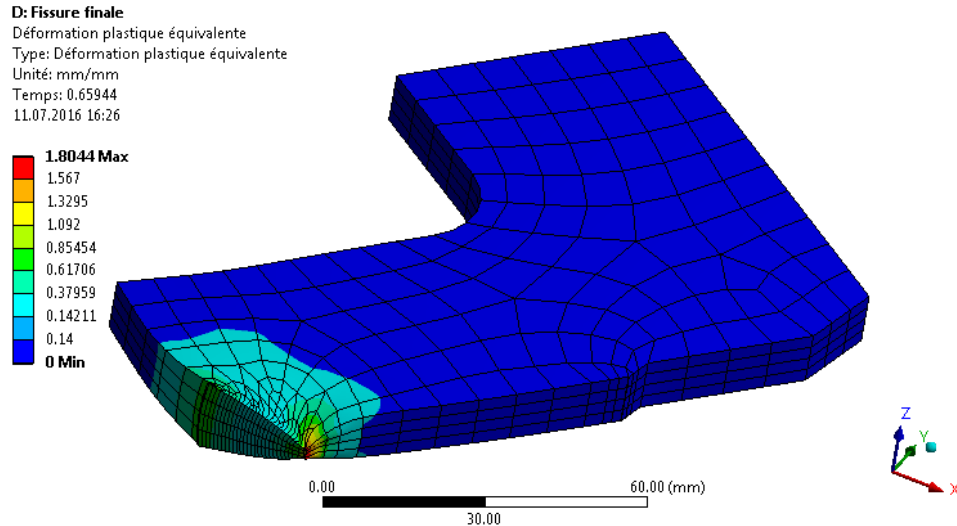
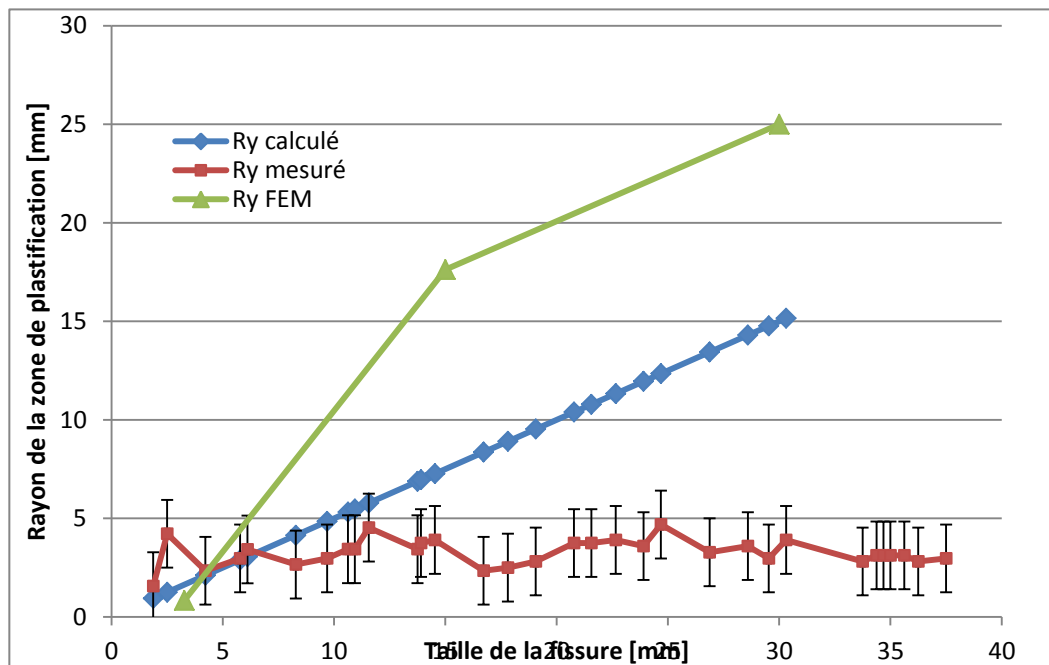


Figure 21 : Simulation du rayon de plastification pour une fissure de 37.5mm

A nouveau, la modification de l'échelle des valeurs permet de filtrer les résultats de manière à n'afficher que ceux excédant la partie élastique. On remarque que cette zone coloriée est très localisée lorsque la fissure est petite, et prend de plus en plus d'importance avec la propagation. A nouveau, les déformations sont trop importantes à cause de la valeur du module sécant utilisé qui est sous-évaluée.

Les calculs du modèle théorique exposé au chapitre 3 ont livré les résultats suivants :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_{1c}}{\sigma * a} \right)^2 [mm]$$



Graph 5 : Evolution du rayon de la zone plastifiée

En bref, les différentes manières de calculer r_y livrent trois tendances différentes :

- ♦ La théorie dit que l'écart entre la longueur de la fissure et de la zone de striction augmente de manière linéaire ;

- ◆ Les simulations FEM ne donnent qu'une idée de la tendance. Elles indiquent également une croissance de la zone plastifiée avec la progression de la fissure ;
- ◆ Les mesures deuis la vidéo indiquent de r_y reste constant, bien qu'irrégulier. Les erreurs de mesures ont été additionnées;

Beaucoup de facteurs peuvent influencer la plausibilité de ces résultats comme l'imprécision dans la méthode de mesure, une inhomogénéité du matériau pouvant peut-être ralentir l'une ou l'autre des propagations, ou encore le risque que le modèle théorique appliqué soit inexact.

5.2.3. La résistance à la propagation de fissure, K_{1c}

En combinant les données de la machine de traction et la vidéo de l'éprouvette pendant l'essai, il est possible de calculer la résistance du matériau à la propagation brutale des fissures notée K_{1c} . Voici les formules et les données pour l'application numérique :

$$K_{1c} = \alpha * \sigma * \sqrt{\pi * c} = \alpha * \frac{F}{S} * \sqrt{\pi * c}$$

$$\alpha = 1.12 - 0.231 \left(\frac{c}{w}\right) + 10.55 \left(\frac{c}{w}\right)^2 - 21.72 \left(\frac{c}{w}\right)^3 + 30.39 \left(\frac{c}{w}\right)^4 \quad [-]^{13}$$

Formule valable pour $\frac{c}{w} \leq 0.6$

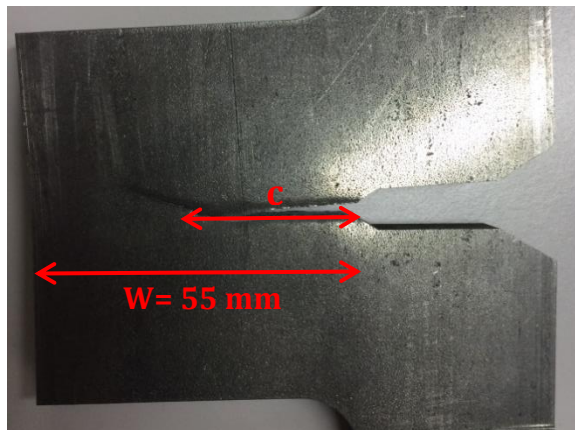
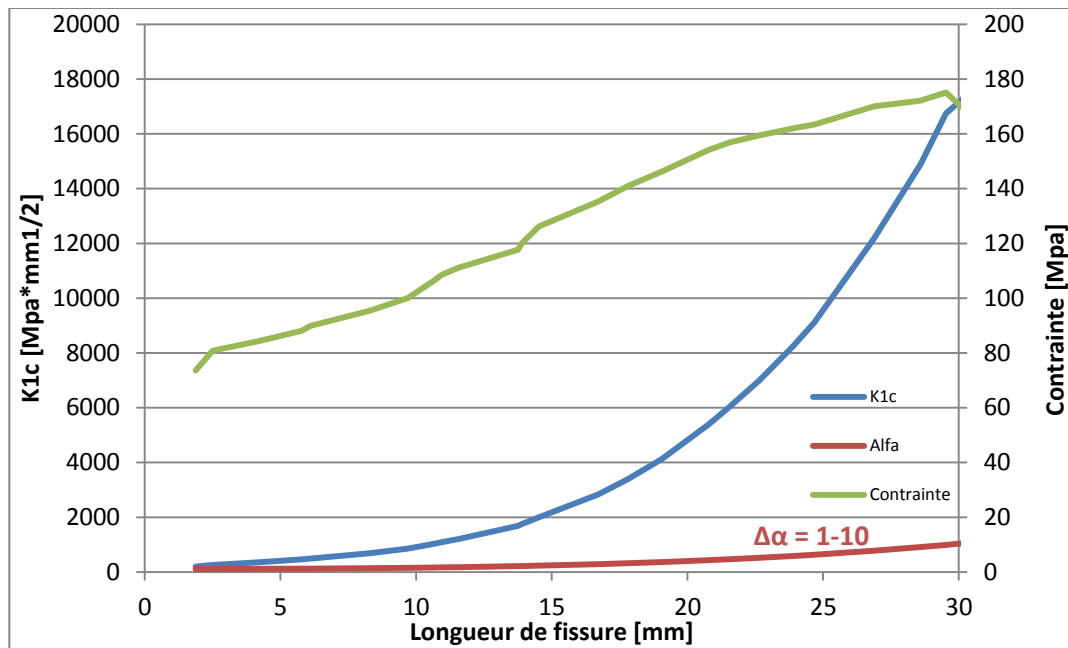


Figure 22 : Illustration du rapport c/w

Le graphe suivant montre l'évolution de K_{1c} en fonction de la taille de la fissure :

¹³ Andreas Mortensen, *Déformation et rupture – Chapitre 4 : la rupture à basse température*, Ecublens : EPFL, 1999, p.6-29



Graph 6 : K1c calculé

Le comportement exponentiel de cette courbe provient de la modification au cours du temps de toutes les variables composant K_{1c} . Avec la propagation de la fissure, la section baisse alors que la longueur de fissure augmente, mais également la force, ce qui est moins attendu, mais qui encourage également la montée de K_{1c} . On peut en conclure que la valeur de K est comprise entre 201 et 40'365 [$MPa \cdot \sqrt{mm}$]. Comme K augmente avec la propagation de fissure, la pièce ne subira pas de rupture brutale. Une autre explication serait la transition du mode de fissuration de ϵ_{plane} à σ_{plane} . La figure suivante montre l'évolution de la contrainte en fonction de ces modes de fissuration :

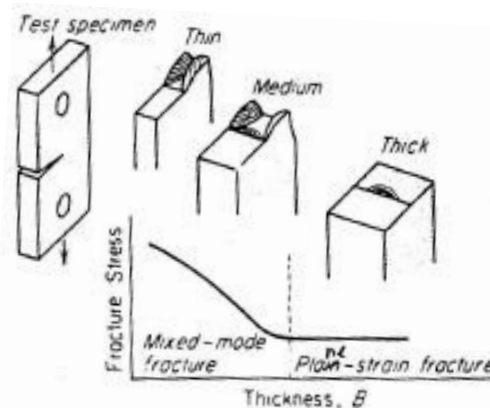


Figure 23 : Les différents modes de fracture¹⁴

Sur la figure ci-dessus, on remarque que la contrainte de rupture augmente lorsque le mode de rupture passe de déformation à contrainte plane, pour une longueur de section résistance constante. Pour un cas d'épaisseur constante, la croissance de la fissure fait la transition dans le sens inverse : de contrainte à déformation plane. Cela impliquerait que la contrainte de rupture baisse, de même que le rayon de plastification. Les résultats obtenus indiquent que la contrainte augmente lors de la fissuration, et que le rayon reste constant. On en conclut donc qu'il n'y a pas ici de

¹⁴ C.C. Osgood, Machine Design : Figure 11-7, 1971, p.91.

transition nette entre ε_{plane} et σ_{plane} . Les calculs de r_y et l'apparence de la surface de rupture indiquent que le mode de fissuration est mixte, et qu'il n'y pas de transition marquée d'un à l'autre. On peut facilement voir que des lèvres sont apparues au bord de la section fissurée, mais qu'elles ne concernent pas toute l'épaisseur de l'éprouvette.



Figure 24 : Lèvres aux bords de la surface de rupture

5.2.4. Les signaux du capteur : composante Y

Pour rappel, le signal a été orienté pendant la calibration de telle sorte que ses composantes décrivent deux phénomènes indépendants :

- ◆ Les composantes en X de chaque bobine correspondent à l'effet de lift-off, c'est-à-dire d'écartement entre le capteur et l'éprouvette ;
- ◆ Les composantes en Y donnent l'état de fissuration sous chaque bobine ;

Le graphe suivant montre le comportement temporel des signaux :

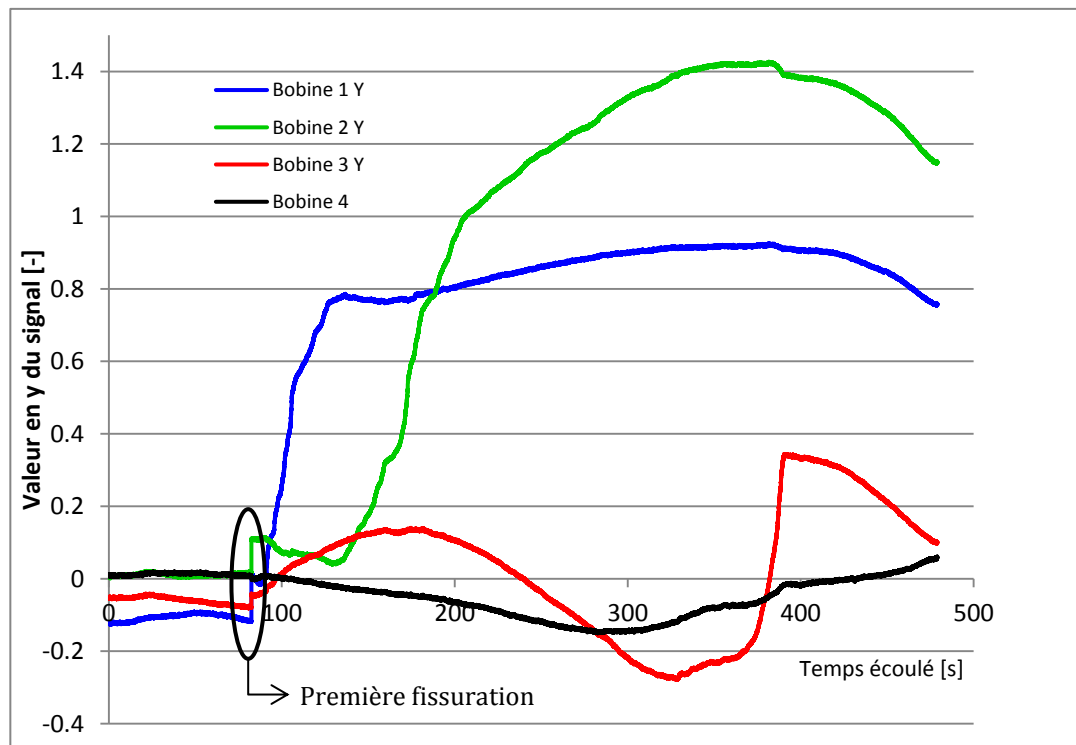
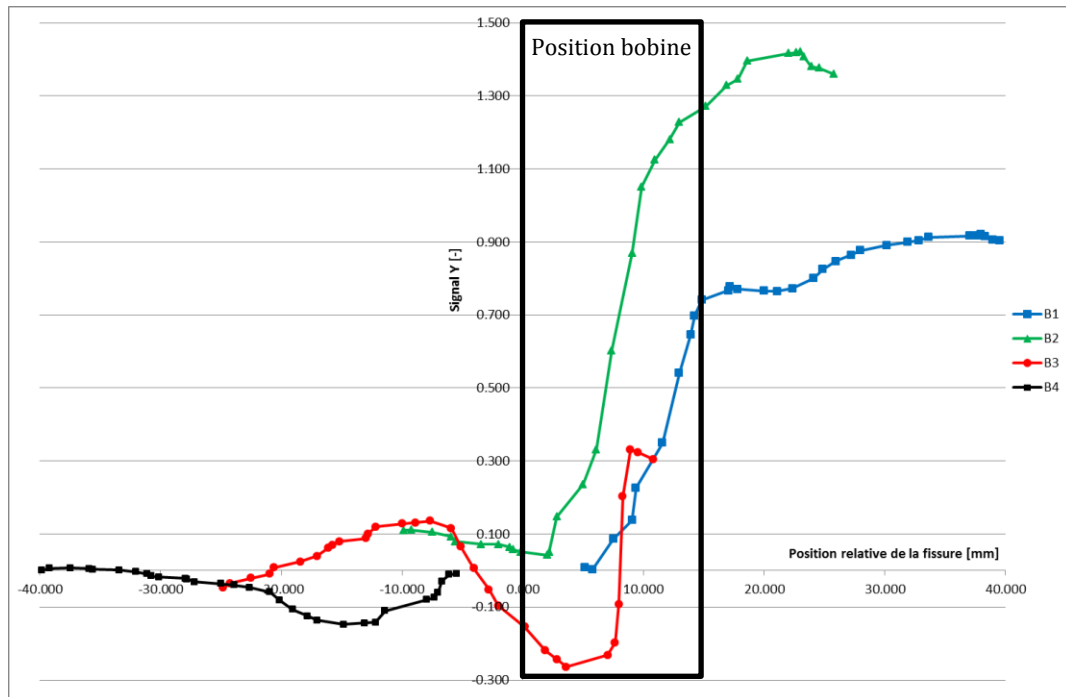


Figure 25 : Variation des signaux en Y pendant l'essai

Une étude de la vidéo de l'essai a permis de tracer sur un graphe les différentes composantes du signal en fonction de la position de la fissure. Pour des longueurs de

fissures estimées, les composantes de chaque bobine ont été relevées et ont ainsi livré le graphe suivant pour leur dimension en Y:



Graphe 7: Composante Y des signaux

Chaque courbe a été placée sur le graphe selon le repère relatif de la bobine. Le point zéro de chaque courbe représente le premier bord de la bobine que la fissure va rencontrer dans son sens de propagation.

Bobine 1 (B1) :

Le signal perçu semble amorcer une montée linéaire entre 5 et 15mm. Ce qui apparaît est en réalité la partie centrale d'un signal en forme de S. Depuis la calibration, l'entaille usinée se trouvait dans le champ de détection de la bobine. C'est pour cela que le début du signal n'est pas plat, la bobine n'a pas « vu » la fissure entrer dans son champ de détection. Lorsque la fissure dépasse les 15mm de la bobine, le signal se stabilise doucement.

Bobine 2 (B2) :

Cette bobine a été entièrement traversée par la fissure. Le signal adopte une forme en S très claire et possède la valeur de saturation la plus élevée. La bobine a été calibrée à un endroit limitant l'effet d'environnement et positionnée de telle sorte que la fissure la traverse entièrement.

Bobine 3 (B3) :

Le signal présente aussi une progression en S mais celui-ci est perturbé. Lors de l'essai, il a été remarqué que la fissure a dû apparemment se dévier autour d'un défaut. Lors de la destruction de l'éprouvette pour l'analyse du faciès de rupture, le plan de fissuration n'était pas du tout perpendiculaire à la face où a été placé le capteur. La fissure avait tourné autour de son axe de progression, de telle sorte qu'elle était à peu près 10mm « plus bas » sur cette face que celle opposée. Après avoir contourné ce défaut, le capteur a repris l'acquisition et a enregistré la nouvelle position de fissure. C'est pourquoi la montée se fait si brutalement.

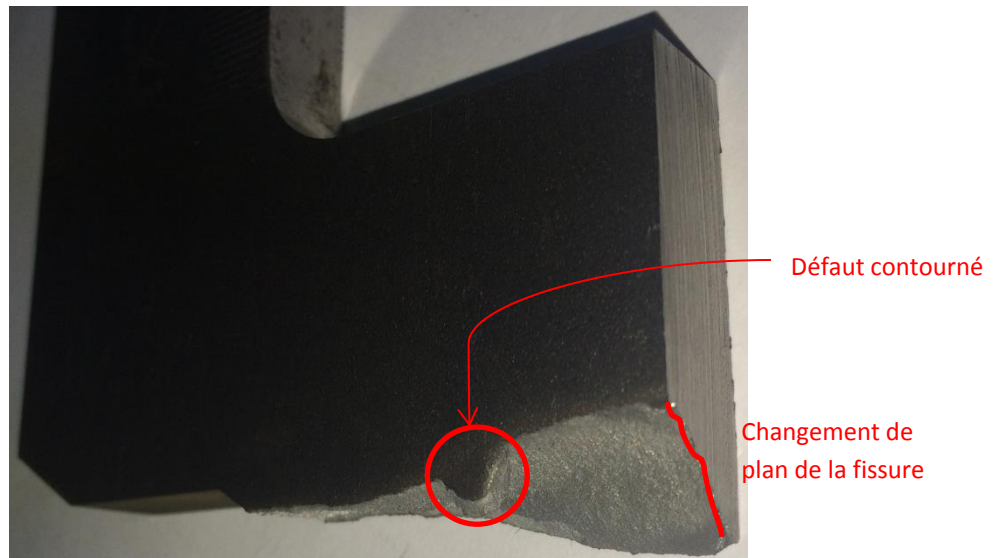


Figure 26 : Détail de la surface de rupture et du défaut de fissuration

La condition d'arrêt de l'essai de déchirement était un écartement maximal de 7mm entre les traverses. Cela a empêché la fissure de traverser entièrement la bobine 3, son seuil de saturation est donc plus bas.

Bobine 4 :

Cette bobine n'a pas été concernée par la progression de la fissure. La baisse du signal avant l'arrivée de la fissure n'est confirmée par aucun autre signal, même contredite par la bobine 3. Ce résultat ne sera pas interprété.

De manière générale, on remarque pour les bobines 1, 2 et 3 que les signaux sont de forme sigmoïdale. Cette non-linéarité de la sensibilité des bobines s'explique par le profil de détection qu'ont les bobines à l'intérieur de la matière.

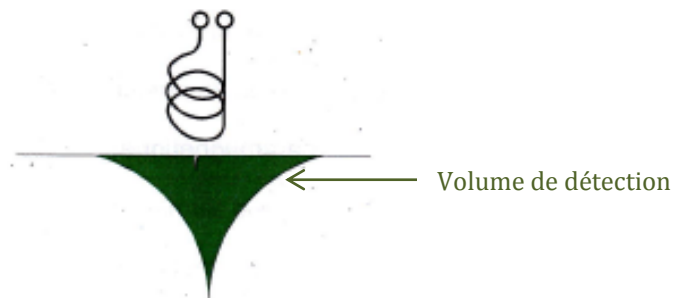


Figure 27: Profil de détection d'un capteur à courant de Foucault¹⁵

Comme on le voit ci-dessus, le volume dans lequel circulent les courants de Foucault prend la forme d'un cône concave dont la base serait à la surface de l'éprouvette. Lorsque la fissure pénètre sous les bords des champs de détection des bobines, celle-ci ne trouble que peu l'intensité du signal, tandis qu'en se rapprochant du centre, une toute petite progression du défaut suscite un important changement d'impédance. Puis lorsque la fissure dépasse le bord opposé de la bobine, le signal se stabilise autour d'une valeur de saturation. Ces valeurs maximales sont influencées par deux facteurs :

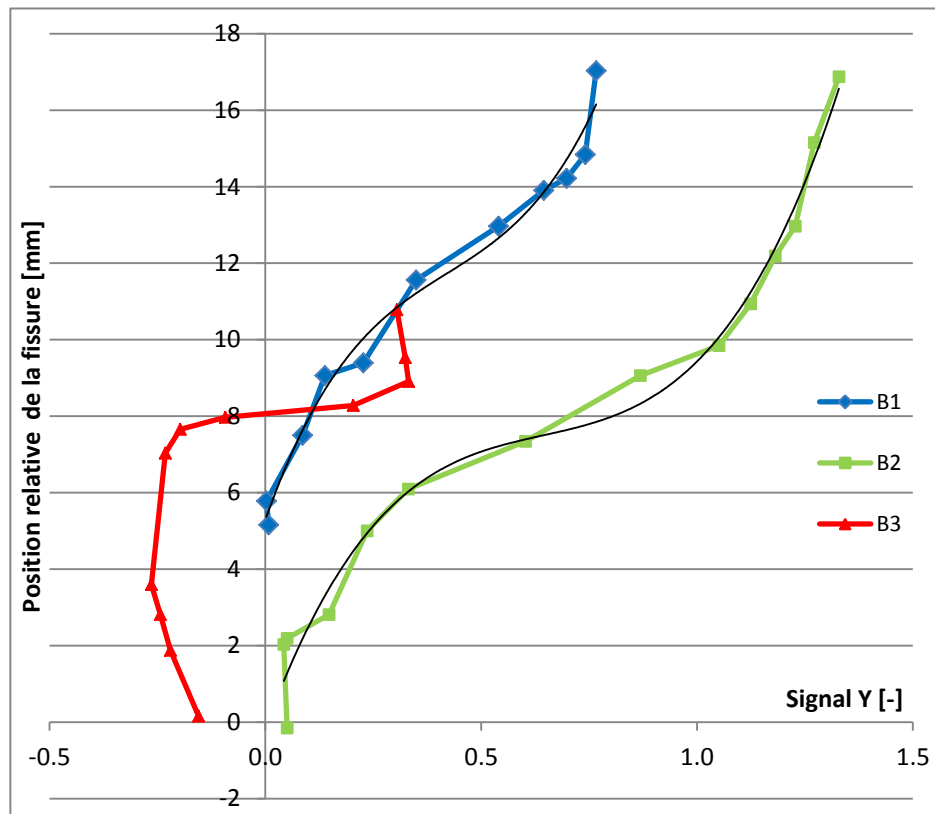
- ◆ Le placement du capteur sur l'éprouvette : lors de la calibration, les bobines étaient placées directement sur la pièce à inspecter. Les dimensions de celles-ci étant insuffisantes pour se prémunir d'un effet néfaste d'environnement,

¹⁵ J-P. Reymondin. *Essais non-destructifs – Bases théoriques*. Yverdon-les-Bains : HEIG-VD, 2015, p.6.12

une perte de sensibilité s'est répercutée sur les bobines les moins favorablement placées.

- ◆ La longueur et l'ouverture de fissure sous la bobine : Comme expliqué plus haut, le signal évolue en fonction des lignes de courants coupées par le défaut. Si la fissure ne traverse pas l'entier d'une bobine, ou si sa trajectoire n'atteint pas le centre, l'amplitude du signal sera plus basse. Après que la fissure ait traversé entièrement la bobine, les lèvres continuent de s'ouvrir. Le signal est aussi affecté par cet écartement.

La tendance des signaux en fonction de la position de la fissure sous les bobines est désormais connue. Les axes du graphe suivant sont inversés ce qui permet d'exprimer l'inverse de la fonction sigmoïdale et ainsi de trouver c en fonction des données du capteur :



Graphe 8 : Composante Y des signaux (axes inversés)

En approximant les courbes des bobines 1 et 2, on obtient les formules suivantes :

- ◆ Bobine 1 : $c_1(y) = 47.39y^3 - 59.565y^2 + 31.998y + 5.2836 [mm]$;
- ◆ Bobine 2 : $c_2(y) = 22.77y^3 - 43.91y^2 + 30.732y - 0.126 [mm]$;

Le coefficient de détermination R^2 indiquant la qualité de prédiction est de respectivement 0.9828 et 0.9846. Ces relations démontrent qu'il est possible de suivre la longueur de fissure à l'aide du capteur.

5.2.5. Les signaux du capteur : composante X

Voici l'évolution temporelle des composantes X des signaux pendant l'essai :

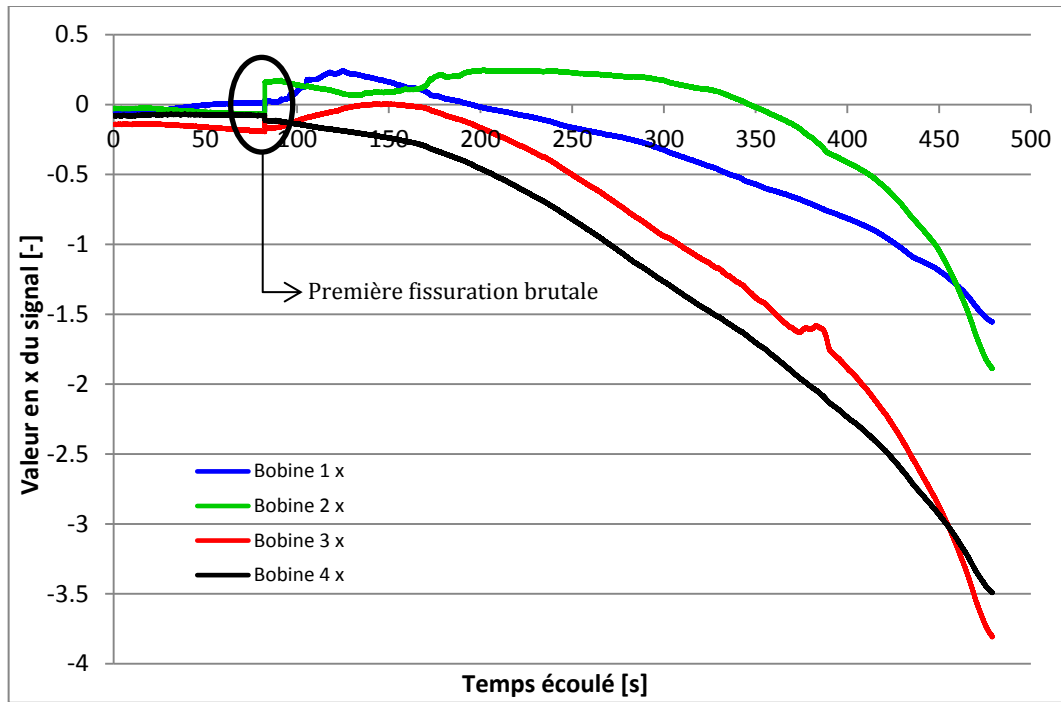
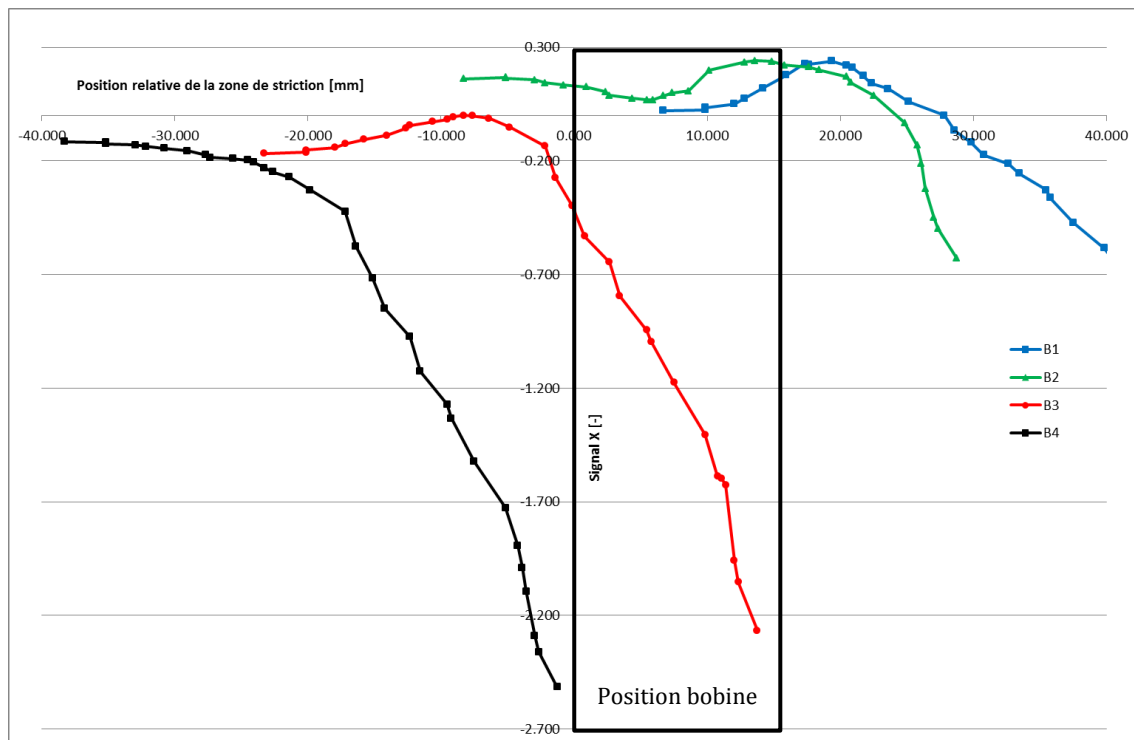


Figure 28 : Variation des signaux en X pendant l'essai

Les composantes en X des signaux des bobines sont influencées par l'écartement de la matière avec le capteur. Ainsi, il a été choisi de ploter ces valeurs d'après la position relative à chaque bobine de la zone de striction et non de la fissure, puisque c'est avant tout l'effet de lift-off qui les affecte. Ce qui a délivré le graphe suivant :



Graphe 9: Composante X des signaux

Comme il l'a été montré au chapitre 4, les courbes de calibration en fonction du lift-off adoptent un comportement quasi-linéaire tant pour les composantes X que Y. Bien que le modèle FEM doivent être amélioré pour traiter des problèmes de striction, en se servant de la linéarité des composantes X lors de la calibration, on peut estimer

cette valeur depuis les données du capteur. Les droites de tendance obtenues depuis les courbes tracées sur Excel donnent les pentes suivantes :

- ◆ Bobine 1 : $\frac{-2.9}{1000} \left[\frac{\text{unité X}}{\mu\text{m}} \right]$;
- ◆ Bobine 2 : $\frac{-3.58}{1000} \left[\frac{\text{unité X}}{\mu\text{m}} \right]$;
- ◆ Bobine 3 : $\frac{-3.77}{1000} \left[\frac{\text{unité X}}{\mu\text{m}} \right]$;
- ◆ Bobine 4 : $\frac{-3.34}{1000} \left[\frac{\text{unité X}}{\mu\text{m}} \right]$;

Depuis ces pentes, il est possible de calculer en fonction du signal aux moments choisis la striction impliquée par la plastification de l'éprouvette :

Position de la fissure [mm]	Bobine concernée [-]	Signal X [-]	Striction [um]
5.16	1	0.023	-7.799
20	2	0.100	-28.009
33.59	3	-1.176	328.480
40.78	3	-2.267	601.326

Tableau 5: Valeurs calculées de striction depuis le signal du capteur

De toute évidence, il y a un autre effet que simplement l'écartement de l'éprouvette avec le capteur qui entre en ligne de compte pour l'influence des composantes X. En effet, les premières valeurs positives impliquent un « gonflement » de la pièce ce qui ne fait aucun sens dans la pratique. Une éventuelle explication de ce phénomène serait peut-être que la plastification et la multiplication des dislocations accompagnant la striction auraient un impact plus important que l'écartement progressif du capteur avec la matière. L'ampleur des changements de propriétés magnétiques causés par la plastification de la matière ne sont pas suffisamment quantifiables pour en tirer de conclusions.

Par contre, par la suite, toutes les courbes ont une tendance à la baisse. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ce comportement. Tout d'abord, en reprenant l'hypothèse que les changements de propriétés magnétiques parasitent l'analyse, ceux-ci sont également dépendants de la position de la fissure. Il est possible qu'avec la propagation, les bobines finissent par perdre l'acquisition de ces zones, et que par conséquent, la baisse du signal corresponde à l'effet de lift-off. Deuxièmement, pour que la fissure continue de se propager, il est nécessaire que la machine de traction continue d'écartier ses traverses. Les lèvres créées par la fissure continuent également de s'éloigner l'une de l'autre. Ainsi, le volume de détection des bobines se retrouve en partie ou entièrement dans l'air, ce qui entretient la descente du signal.

5.3. Les essais de fatigue

Les premiers essais de fatigue ont été menés sur des éprouvettes Charpy car la machine avait été dimensionnée en fonction. Une simulation par éléments finis a simulé les champs de contraintes dans l'éprouvette. Les valeurs d'effort atteintes excèdent la limite élastique du matériau localement car le modèle choisi pour la simulation est parfaitement élastique, la contrainte et la déformation suivent la loi linéaire de Hooke et le programme ne considère pas les conditions de rupture :

C: Epreuve Charpy
 Contrainte équivalente
 Type: Contrainte équivalente (Von-Mises)
 Unité: MPa
 Temps: 1
 10.07.2016 17:40

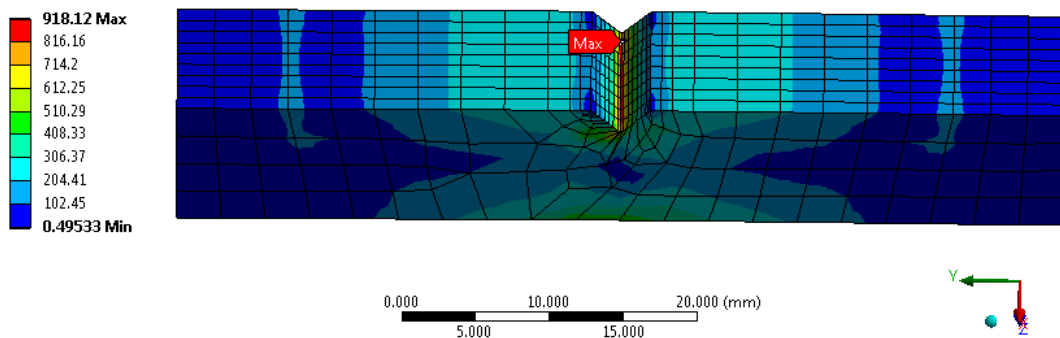


Figure 29 : Calcul FEM éprouvette Charpy

Cette simulation a imposé un déplacement de 0.1mm sur le milieu de la face opposée à l'entaille, de sorte à représenter la flèche qui avait été mesurée sous l'entaille lors de l'essai.. Les cycles n'ont pas été comptés précisément mais peuvent être estimés :

$$N_{cycles} = t_{essai} * f = (55 * 60) * 20 = 66000[-]$$

Avec : t_{essai} est la durée en minutes ;
 f est la fréquence de sollicitations [Hz] ;

Depuis la contrainte, d'autres calculs FEM ont permis de retrouver la force nécessaire à reproduire la même contrainte. En passant en paramètre la force F dans Ansys, quelques itérations permettent de définir que $F = 6170N$.

Les mêmes opérations ont été faites avec la géométrie mise au point pour la détection de la fissure :

A: Epreuve fatigue
 Contrainte équivalente
 Type: Contrainte équivalente (Von-Mises)
 Unité: MPa
 Temps: 1
 10.07.2016 17:42

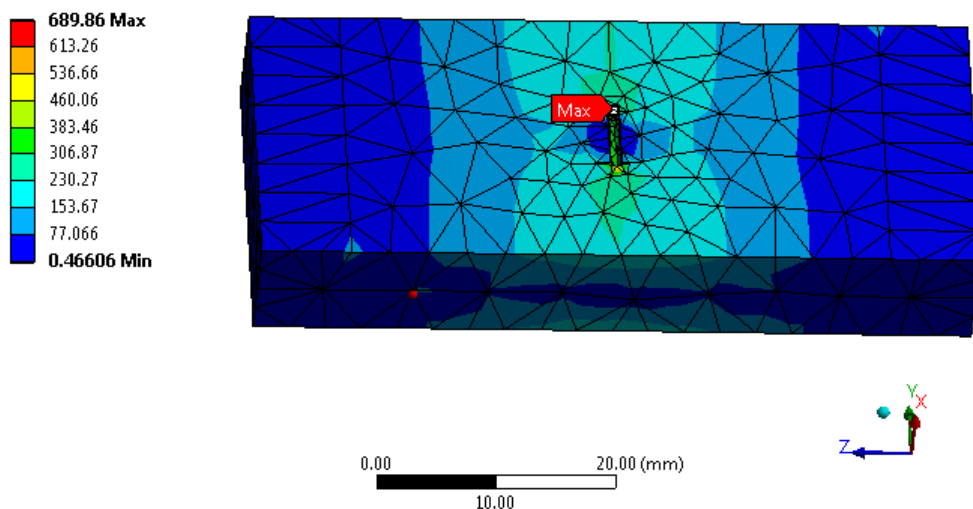


Figure 30 : Calcul FEM éprouvette de fatigue

La contrainte affichée correspond cette fois à une flèche de 0.05mm, soit la moitié de l'éprouvette Charpy, qui représente la déformée maximale qui a pu être mesurée sous l'échantillon. Pour se convaincre de la différence de rigidité des deux designs testés, il

suffit de comparer les forces nécessaires à induire cette déformation. Pour atteindre cette contrainte dans l'entaille de la pièce, 9300N sont nécessaires d'après les calculs FEM.

Il a également été remarqué qu'une telle différence de force nuisait au bon fonctionnement de la machine. Après plus de 7h d'essai à 50 Hz soit plus d'un million de cycles, la pièce n'avait toujours pas été endommagée. En revanche, le haut du bâti se fléchissait de plus de 0.2mm. On en conclut que la rigidité de la machine de fatigue n'est pas suffisante pour ce design d'éprouvette et qu'une utilisation dans cette configuration endommage l'ensemble de l'entraînement (roulements, accouplement, bâti, etc...).

Il a été décidé de corriger ce problème en fraisant les éprouvettes sur la moitié de leur épaisseur. Cette dimension est la plus importante à réduire dans un cas de flexion car son influence est cubique dans le calcul du moment d'inertie I_z qui caractérise la résistance du matériau à la flexion:

$$I_z = \frac{b * h^3}{12} [mm^4], \text{ pour des sections rectangulaires}$$

Le calcul FEM a livré le résultat suivant :

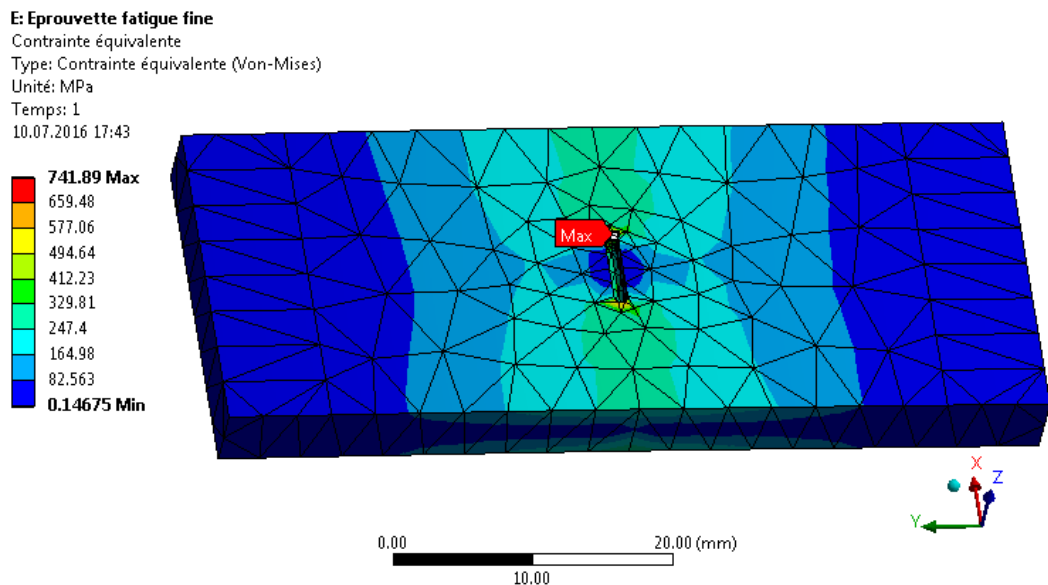


Figure 31 : Calcul FEM éprouvette fine

Cette valeur de contrainte correspond à une déformée imposée de 0.1mm, ce qui semble être atteignable puisque le moment cinétique de l'éprouvette Charpy est 3 fois supérieure à celle du nouveau design de pièce.

$$\text{Charpy} : I_z = \frac{10 * 10^3}{12} = 833 \text{ mm}^4$$

$$\text{Nouveau design} : I_z = \frac{25 * 5^3}{12} = 260 \text{ mm}^4$$

Cela se voit également sur la différence de force dans la simulation. Pour une contrainte d'env. 742 MPa, la force qu'il faut appliquer est de 2400N. La réduction de moitié de l'épaisseur a donc permis d'augmenter la contrainte jusqu'à une valeur convenable tout en abaissant drastiquement la force appliquée. Un essai a permis de mesurer que la flèche sous l'éprouvette est de 0.4mm, cela implique que la contrainte calculée par le programme est largement atteignable. De plus, la réduction de rigidité

de la pièce évite que le socle de la broche ne subisse trop de flexion. En revanche, le sabot doit être surélevé de la distance qui a été enlevée à l'éprouvette à l'aide de cales.

Les mesures avec le capteur ont été faites à intervalle de temps régulier, chaque 30 minutes pour le début, et chaque 60 minutes pour les trois dernières mesures. Pour la calibration et l'acquisition de données, le capteur a été positionné sur la pièce comme illustré ci-dessous :

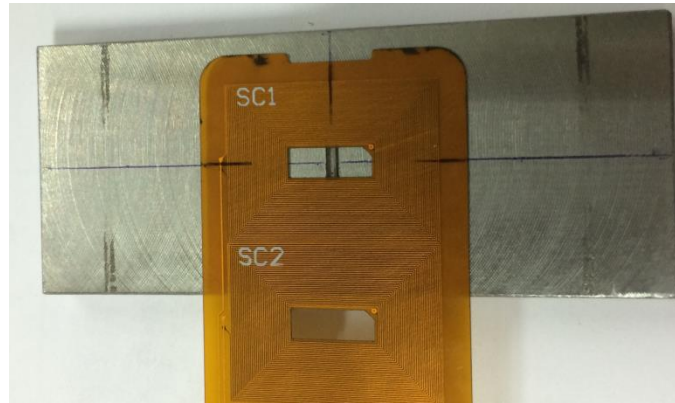


Figure 32 : Positionnement de la bobine sur l'éprouvette de fatigue

L'éprouvette s'est rompue entre 330 et 390 minutes d'essai à 500 t/min à l'endroit prédit par les analyses FEM. Lors de chaque mesure, la surface supposée se fissurer a été inspectée à l'œil nu et au binoculaire. La fissure n'a pu être vue que lorsque l'éprouvette était rompue :

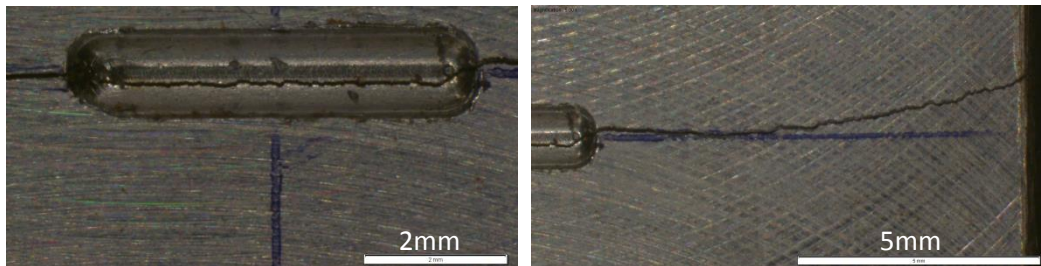


Figure 33 : Fissuration de l'éprouvette de fatigue

Les mesures du capteur ont donné les résultats suivants :

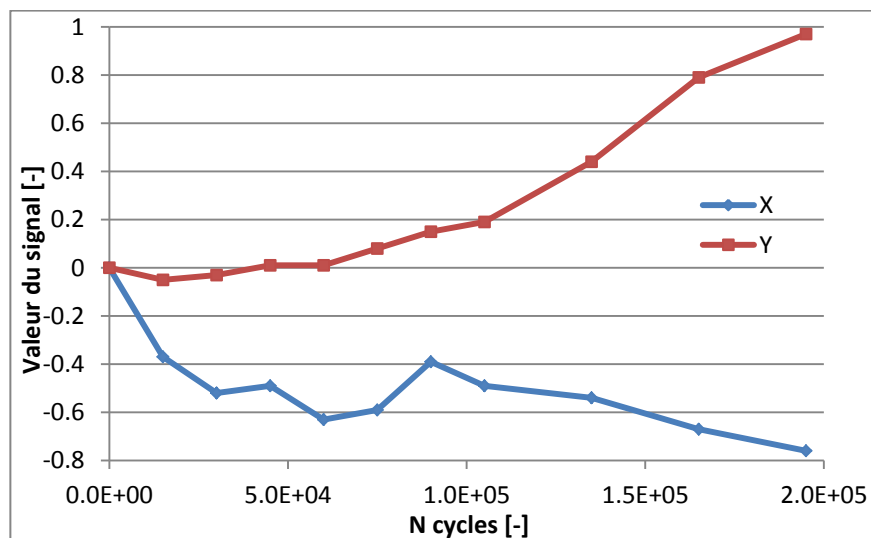


Figure 34 : Données acquises par le capteur lors du test de fatigue

La croissance des composantes Y acquises par le capteur suit à nouveau une forme de S, mais celle-ci est plus propre que lors des essais de déchirement. Cela prouve que le capteur est capable de déceler des défauts indétectables à l'œil nu.

5.4. Comparaison entre déchirement et fatigue

Les deux méthodes utilisées pour reproduire la propagation d'une fissure ont livré des résultats cohérents, mais pas similaires. Afin de les comparer au mieux, il convient de rapporter les valeurs des signaux en fonction de la longueur de fissure. Comme l'amorce de fissure n'a jamais été remarquée en fatigue, il n'y avait pas le prérequis pour appliquer la même méthode de calcul que pour le déchirement. Sa taille a pu être calculée depuis les formules établies grâce aux essais de déchirement. La même formule a donc été utilisée bien que la calibration du capteur ne soit pas la même pour les deux essais. Seule la bobine 1 a été engagée pour cet essai, c'est donc la formule lui correspondant qui a été utilisée :

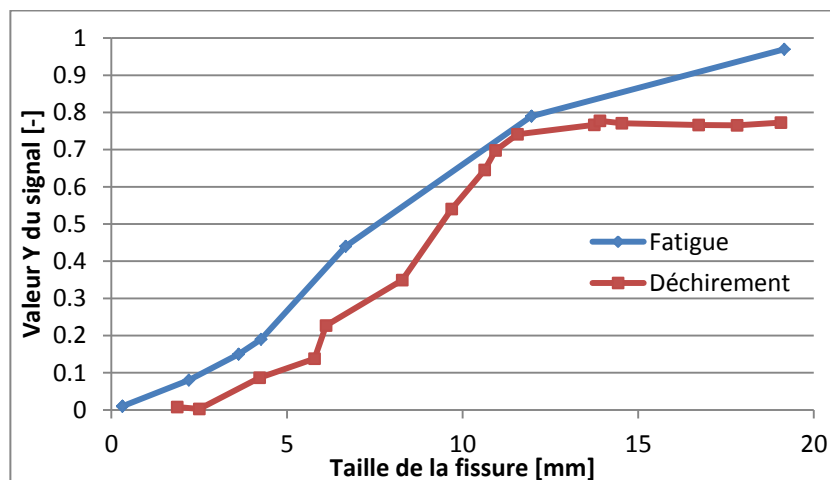
Temps [min]	N cycles [-]	Signal X [-]	Signal Y [-]	Taille de fissure [mm]
0	0	0	0	0
30	15000	-0.37	-0.05	-1.75
60	30000	-0.52	-0.03	-1.01
90	45000	-0.49	0.01	0.31
120	60000	-0.63	0.01	0.31
150	75000	-0.59	0.08	2.20
180	90000	-0.39	0.15	3.62
210	105000	-0.49	0.19	4.26
270	135000	-0.54	0.44	6.67
330	165000	-0.67	0.79	11.96
390	195000	-0.76	0.97	19.16

Tableau 6 : Calcul de la taille de fissure en fatigue

Ce calcul semble correct car la longueur maximale de fissure calculée de 19.16mm est très proche de la valeur mesurable. En effet, lors de la calibration du capteur, celui-ci était apposé sur la zone contenant l'entaille de concentration de contrainte. Il n'a ainsi pas considéré que c'était un défaut. Par conséquent, de son point de vue la longueur totale fissurable était :

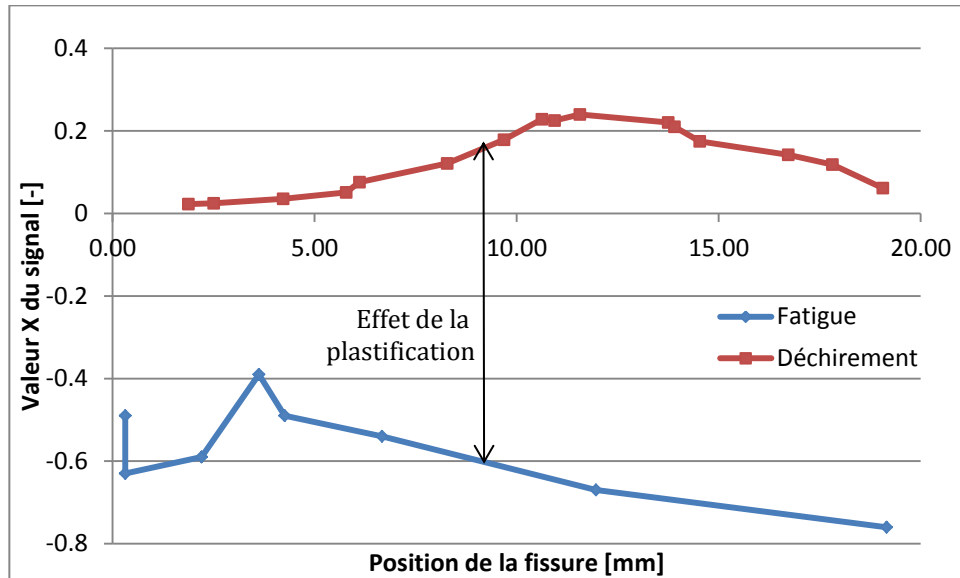
$$l_{fissurable} = L_{éprouvette} - l_{entaille} = 25 - 5.9 = 19.1 \text{ [mm]}$$

On a donc pu mettre les signaux du capteur en relation avec la taille de la fissure :



Graphe 10 : Comparaisons des composantes Y des signaux

Les deux courbes adoptent le même comportement en fonction de la taille de la fissure, même si elles dépendent de facteurs tels que la calibration, la morphologie de la fissure ou encore la géométrie de la pièce. L'amplitude du signal semble être à peu près identique dans les deux cas, bien que la courbe des résultats en fatigue manque de points de mesure.



Graph 11 : Comparaisons des composantes X des signaux

Le comportement en X des signaux varie beaucoup entre les essais de déchirement et les tests de fatigue. On notera que l'éprouvette de fatigue n'est pas soumise à de la striction durant l'essai, et qu'ainsi l'effet de lift-off ne rentre pas en ligne de compte. Or peu ou pas de striction provient d'un taux d'écroutissage bas. La comparaison entre les signaux renforce l'idée que les composantes X du signal réagissent à la plastification de la matière : en fatigue, l'effet de lift-off est complètement absent, et en déchirement, il ne fait varier la composante X que négativement. Ainsi, le seul facteur cohérent qui pourrait expliquer cette tendance positive est le changement des propriétés de la matière par plastification. Il faudra néanmoins vérifier et valider cette hypothèse.

5.5. La surface de rupture

L'étude des faciès de rupture des éprouvettes de déchirement a confirmé ce qu'avait laissé sous-entendre l'analyse de la valeur de contrainte durant l'essai. Il était question de savoir si le mode de rupture passait de σ_{plane} à ε_{plane} . Finalement, il a été conclu que ces éprouvettes se rompent selon un mode mixte, plus proche de la contrainte plane que de la déformation, et qu'il n'y a pas d'indication permettant de déceler une transition en fonction de la longueur de fissure. Les images suivantes prises au microscope électronique le démontrent :

Au départ de la fissure :

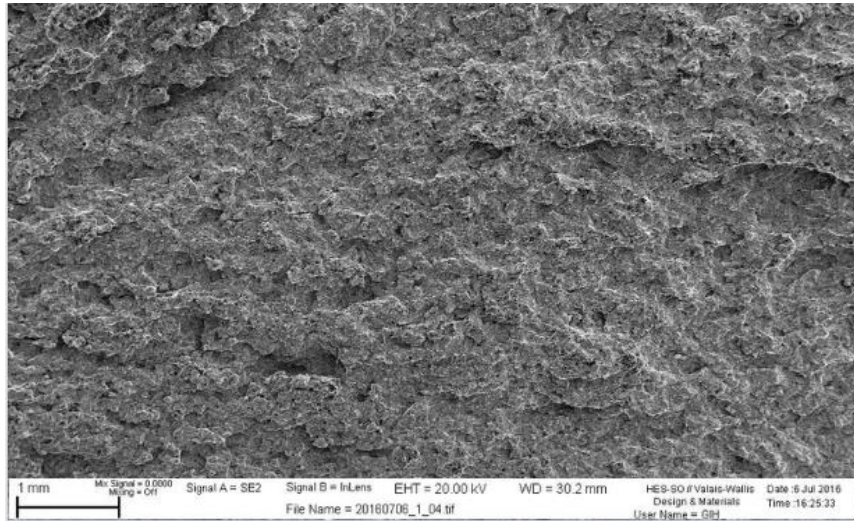


Figure 35 : Faciès de rupture au départ de la fissure (grossissement faible)

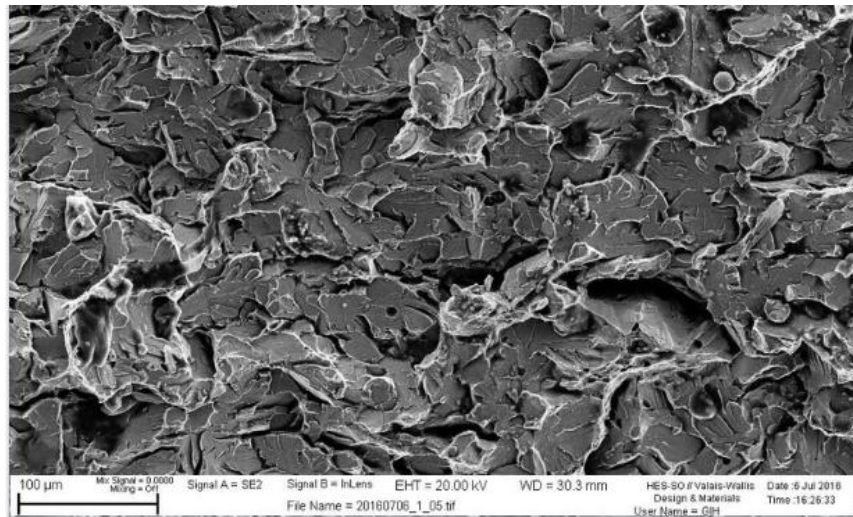


Figure 36 : Faciès de rupture au départ de la fissure (grossissement moyen)

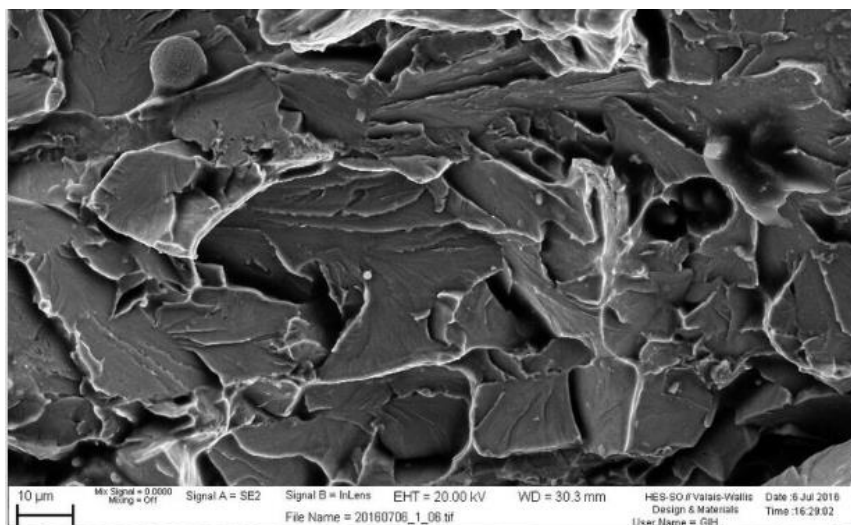


Figure 37 : Faciès de rupture au départ de la fissure (Grossissement fort)

Au milieu de la zone de la fissuration :

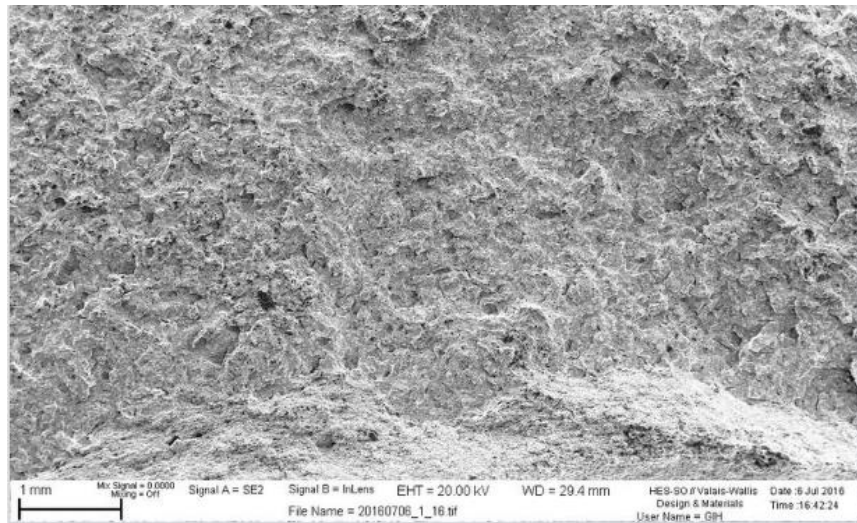


Figure 38 : Faciès de rupture au milieu de la fissure (grossissement faible)

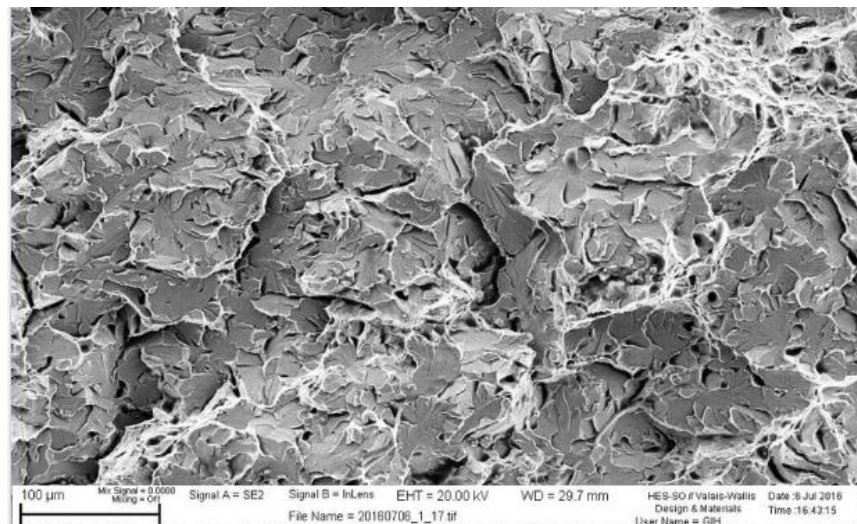


Figure 39 : Faciès de rupture au milieu de la fissure (grossissement moyen)

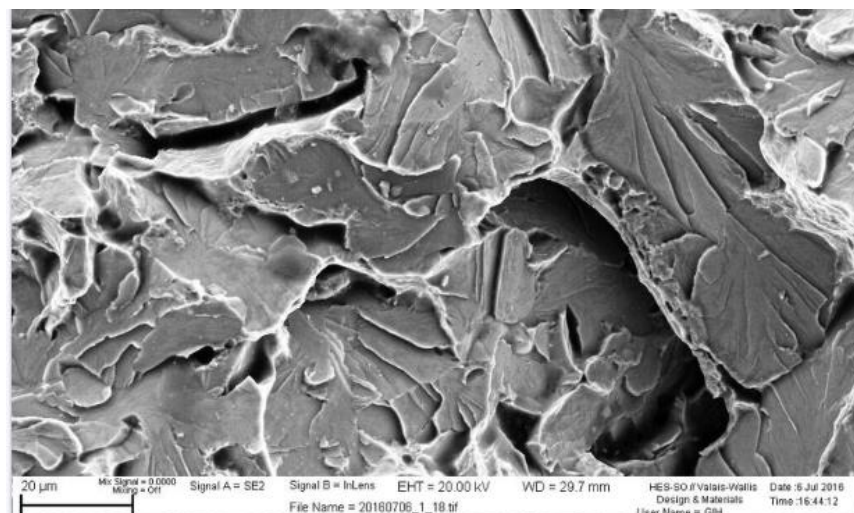


Figure 40 : Faciès de rupture au milieu de la fissure (Grossissement fort)

A la fin de la fissure :

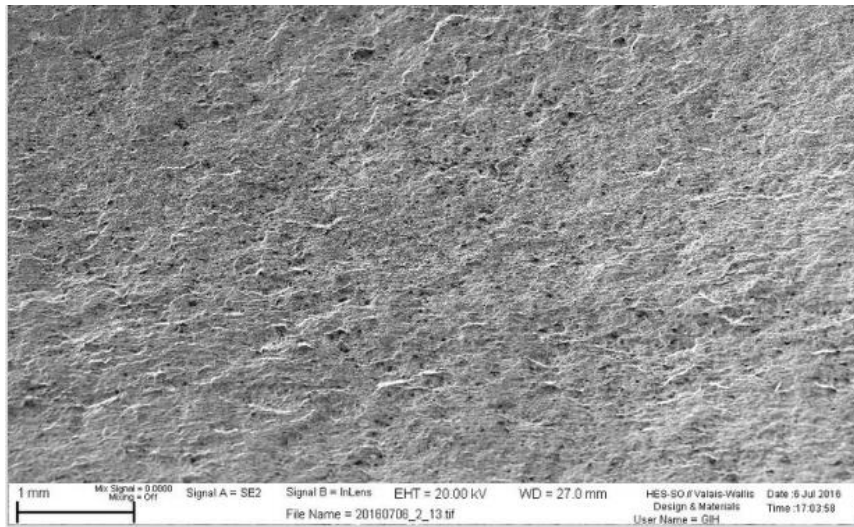


Figure 41 : Faciès de rupture à la fin de la fissure (grossissement faible)

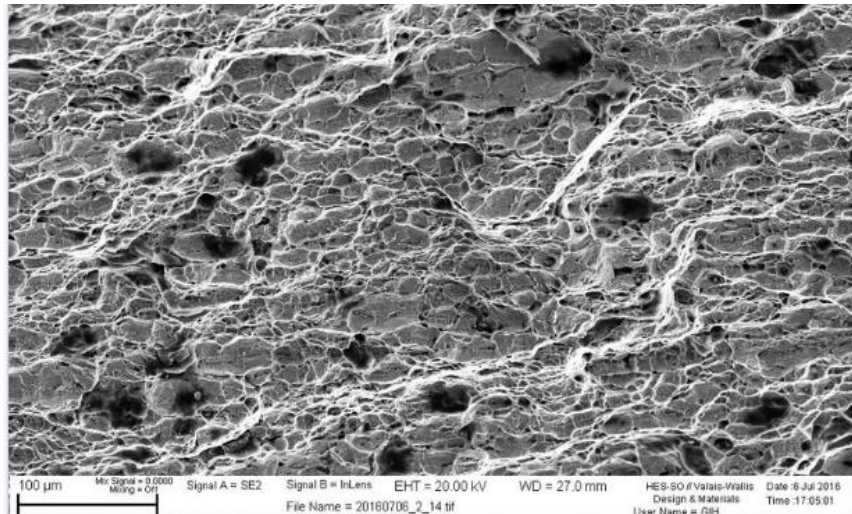


Figure 42 : Faciès de rupture à la fin de la fissure (grossissement moyen)

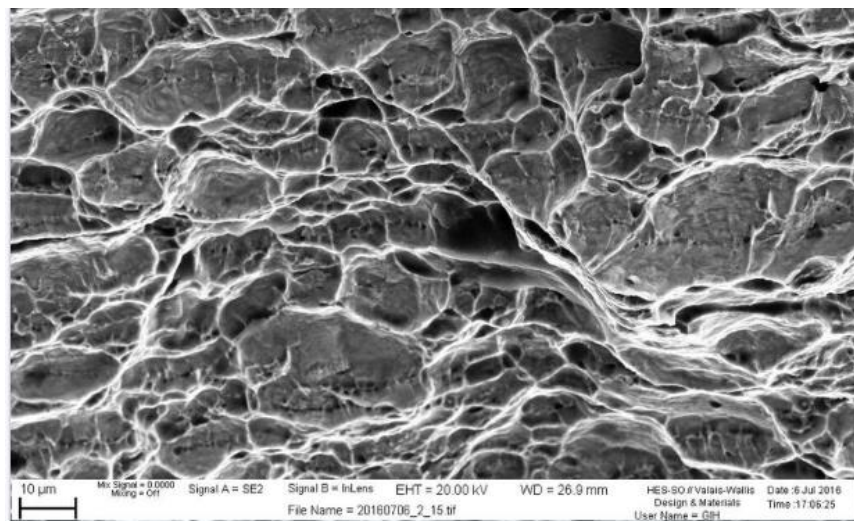


Figure 43 : Faciès de rupture à la fin de la fissure (Grossissement fort)

Comme on le voit sur les photos, il n'y a pas de changement notable dans les différents faciès de rupture, l'hypothèse est donc confirmée.

6. SYNTHÈSE

Au terme de ce travail, les objectifs suivants ont été atteints :

- ◆ Développer un design d'éprouvette d'essai de déchirement permettant l'acquisition de données du capteur ;

Une première conception d'éprouvette avait mis en évidence l'importance d'une épaisseur suffisante et de la position du point d'application de la force pour éviter le voilement de la pièce et la destruction du capteur. La longueur de l'éprouvette a été augmentée pour que la fissure traverse le maximum de bobines du capteur. Cela a nécessité de réduire la section de l'éprouvette, car la machine de traction est limitée à 100 kN.

- ◆ Définir des conditions d'essais et une procédure de calibration du capteur capables de reproduire une propagation de fissure contrôlée par déchirement ;

Piloter la machine de traction en écartement de traverse augmente le contrôle de l'opérateur sur le déroulement de l'essai et permet une propagation lente de la fissure. La calibration du capteur a été optimisée selon le mode opératoire présenté plus haut. L'expérience a montré qu'il est nécessaire d'utiliser une pièce de grandes dimensions et de la même matière que l'échantillon à analyser. Les bobines peuvent aussi être influencées par le bord de l'éprouvette, ce qui peut engendrer des différences entre les bobines au centre de la pièce et les autres.

- ◆ Comprendre et analyser les effets de striction, d'écrouissage et de fissuration sur les données du capteur et les lier à des paramètres physiques ;

Les signaux ont pu être interprétés par corrélation avec des calculs et des résultats obtenus par des autres méthodes (éléments finis, tests de dureté, test de lift-off). Le signal de la bobine est décomposé en deux parties. La première est dépendante de la longueur de la fissure, l'autre comprend les autres phénomènes. L'analyse de cette deuxième composante semble montrer que les variations de ce signal sont dues à la multiplication des dislocations en pointe de fissure (écrouissage) ou aux déformations géométriques de la pièce (striction et ouverture de fissure) et que ces causes ont des impacts différents. L'analyse vidéo de l'essai de déchirement a permis d'évaluer le rayon de la zone plastifiée en tête de fissure.

- ◆ Démontrer l'aptitude du capteur au suivi conditionnel et à la caractérisation de taille de fissure ;

Le signal du capteur a permis de retrouver la taille de la fissure. Pour les échantillons en fatigue, le capteur a permis de repérer la fissure avant qu'elle soit visible à l'œil nu.

- ◆ Rénover une machine de fatigue en flexion 3 points ;

Bien qu'elle nécessite encore quelques modifications pour être optimale, la machine est en état de marche, l'arbre et l'accouplement ont été changés ou renforcés et un variateur de fréquence a été installé.

- ◆ Mener des essais de fatigue concluants sur des éprouvettes spécifiques permettant au capteur de détecter la fissuration par fatigue ;

La compréhension du comportement du capteur lors de la détection de fissures en fatigue doit encore être améliorée, mais il a été prouvé que le capteur perçoit la propagation de fissure sous une charge cyclique.

- ◆ Le capteur permet de mesurer ou de calculer les propriétés des matériaux tels que le K_{1c} ;

7. PERSPECTIVES

Conditionnement des éprouvettes et des essais de déchirement :

Comme il a déjà été dit, les résultats de ces essais pourraient sûrement être améliorés en déchirant des éprouvettes plus fines et plus longues (il y a là un optimum à trouver pour éviter le voilement) avec une force appliquée en leur milieu. Concernant l'essai, la calibration devra être faite sur des pièces plus grandes dans le but de se prémunir des effets de bord.

Conditionnement des éprouvettes et des essais de fatigue :

Le bâti de la machine devra être rigidifié en y apposant soit des équerres de renfort contre le socle contenant la broche, soit en épaississant la plaque sur laquelle celui-ci est monté. Des cales adaptées au design du sabot doivent être usinées et installées si les éprouvettes sollicitées sont plus fines que 10mm. Il serait également judicieux d'optimiser la position et la géométrie de l'entaille de concentration de contrainte pour que la fissure se développe mieux sous la bobine. Quelques modifications des éprouvettes rapprocheraient les essais de tests normalisés permettant une meilleure exploitation des résultats. Le pointeau de la machine possède une jauge extensométrique. Réaffecter cette jauge de contrainte permettrait un comptage précis du nombre de sollicitations imposées à l'éprouvette.

Analyse des données :

La mise au point de nouveaux tests pourraient améliorer la compréhension des signaux du capteur. Des laminages successifs sur des échantillons d'aluminium rendraient compte de l'influence du taux d'érouissage sur l'acquisition. Si le capteur est posé sur deux plaques métalliques mitoyennes se touchant au centre des bobines, puis que l'on écarte progressivement d'une valeur connue, l'étude des données ainsi acquises permettrait de quantifier l'effet d'écartement des lèvres sur les signaux après le passage de la fissure.

Utilisations du capteur pour la caractérisation des matériaux :

Le capteur et la machine de fatigue pourraient réunir les informations nécessaires à définir le K_{1c} d'autre matériaux. Ces données seraient également utiles pour

concevoir en interne des courbes de Wöhler pour différents matériaux afin de prédire leur durée de vie, ou des courbes de Paris pour pouvoir estimer la vitesse de propagation d'un défaut soumis à des charges cycliques.

Utilisations du capteur pour la surveillance d'une structure existante :

Dans sa continuité, ce projet portera sur l'installation du capteur sur une ou plusieurs installations hydroélectriques existantes. Une phase de développement précèdera l'installation pour observer si le capteur est en mesure de détecter des fissures et leur propagation lorsque celles-ci passent sous son champ de détection à des vitesses tangentielles équivalentes à celles d'un arbre d'alternateur par exemple.

Dans le cas où des mesures doivent être prises sur un arbre en rotation, toute transmission de données câblées devient impossible. Il est donc préférable d'adapter un système de communication sans fil pour l'acquisition.

Pour la surveillance des structure complexes telles que des ponts, un réseau de capteurs pourraient être disposés aux endroits des défauts existant ou dans les zones les plus sollicitées. Un suivi intelligent des signaux des capteurs permettrait d'optimiser les périodes de maintenance et si nécessaire de fermer les ponts à la circulation.

8. CONCLUSION

Ce travail a sollicité la combinaison de connaissances de technologie des matériaux, en mécanique, en électricité et en simulation.

Les objectifs principaux de ce travail ont été atteints. Le capteur est capable de surveiller la propagation d'une fissure induite par déchirement de tôle ou par fatigue. Ces essais ont été réalisés sur des fissures réelles se propageant sous l'effet d'un déplacement constant ou cyclique. Bien qu'il ne s'agisse que de mesures en laboratoire, ces expériences démontrent que les capteurs de Sensima peuvent suivre des fissures « réelles ».

Les résultats récoltés ont été mis en relation avec d'autres mesures qui ont permis de discerner les phénomènes de striction, de fissuration, et de plastification. Les essais de déchirement et de fatigue sont complémentaires car les premiers imposent une grande déformation plastique à l'échantillons contrairement aux seconds. La comparaison de résultats obtenus dans les deux cas pourrait permettre d'améliorer l'interprétation du signal compte tenu de la plastification et peut-être de prédire la fissuration avant même qu'elle ne se produise.

Ce travail s'inscrit dans la continuité, beaucoup de paramètres peuvent être améliorés pour optimiser le traitement des résultats. Les premiers pas effectués placent le travail sous le signe de la recherche, mais il semble que les résultats obtenus et les analyses qui en découlent sont aussi intéressants qu'encourageants.

9. REMERCIEMENTS

Pour l'accomplissement de ce travail de diplôme, j'ai pu compter sur l'aide précieuse de :

- ◆ M. Samuel Rey-Mermet, responsable du projet, qui a été d'une grande disponibilité, très impliqué dans le suivi du travail, et ouvert pour l'ensemble des questions et discussions ;
- ◆ MM. Gilles Santi et Enrico Gasparin, collaborateurs auprès de Sensima Inspection qui sont venus jusqu'au sein de l'école pour donner des directives claires et indispensable quant à l'utilisation du capteur ;
- ◆ M. Hervé Girard, responsable des laboratoires de matériaux, qui s'est chargé de superviser tous les essais de déchirement, les tests de dureté et les analyses métallographiques ;
- ◆ MM. Éric Mabillard et David Berthouzoz, collaborateurs des ateliers mécaniques de l'école sans qui la révision de la machine de fatigue n'aurait pas vu le jour ;
- ◆ M. Alain Moreillon, enseignant en mécanique qui a mis à disposition la machine de fatigue ainsi que toutes les informations nécessaires pour son utilisation et sa réaffectation.
- ◆ MM. Anthony Caldeira et Sébastien Luisier, diplômants à l'école qui ont partagé leur savoir pour adapter le schéma électrique existant au module variateur de fréquence ;

10. SIGNATURE

Bruno Gex

11. ANNEXES

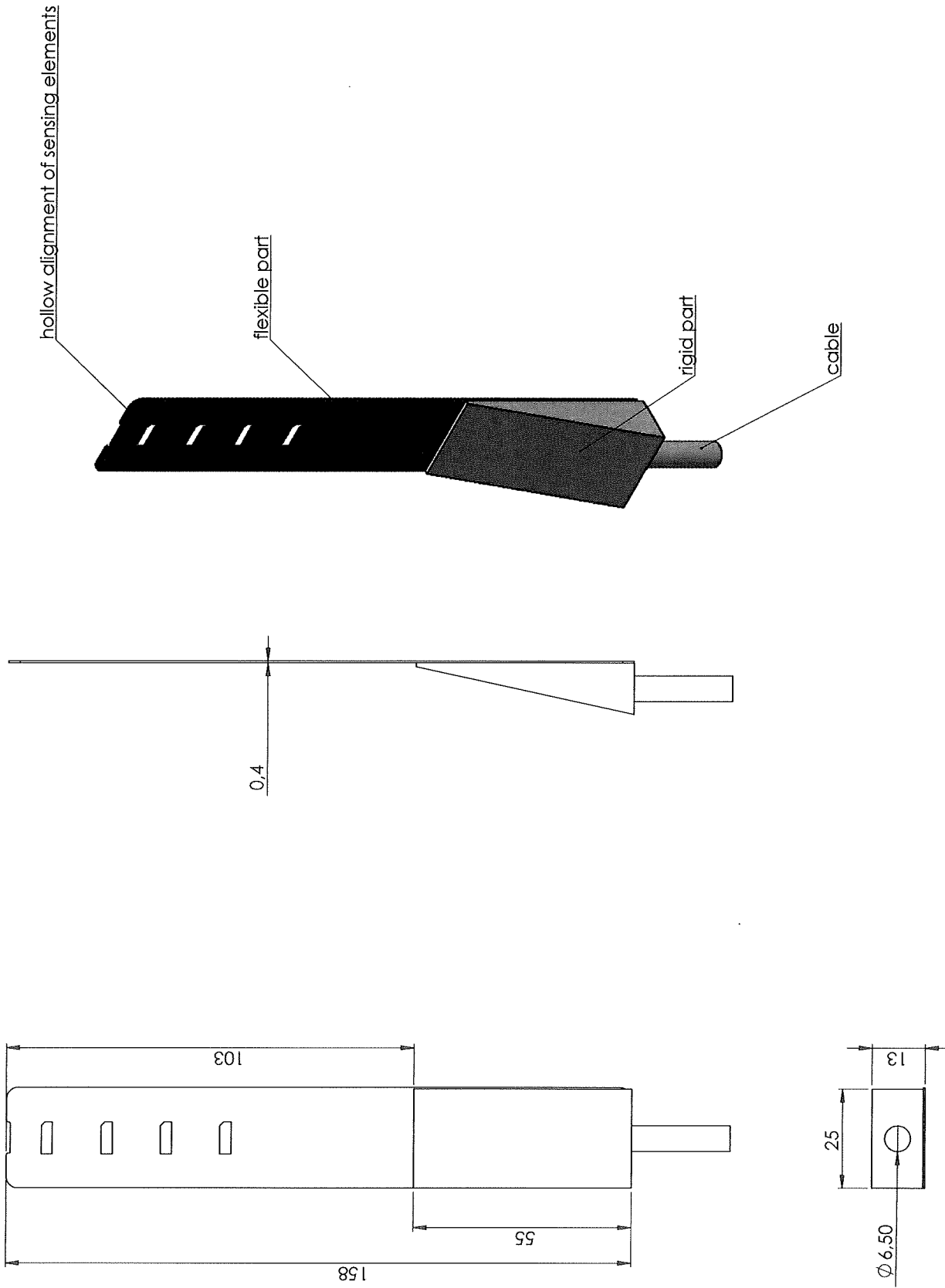
Annexe 1 : Dimensions du capteur (fiche fournie par Sensima Inspection Sarl)

Annexe 2 : Dimensionnement des éprouvettes de déchirement

Annexe 3 : Dimensionnement des éprouvettes de fatigue

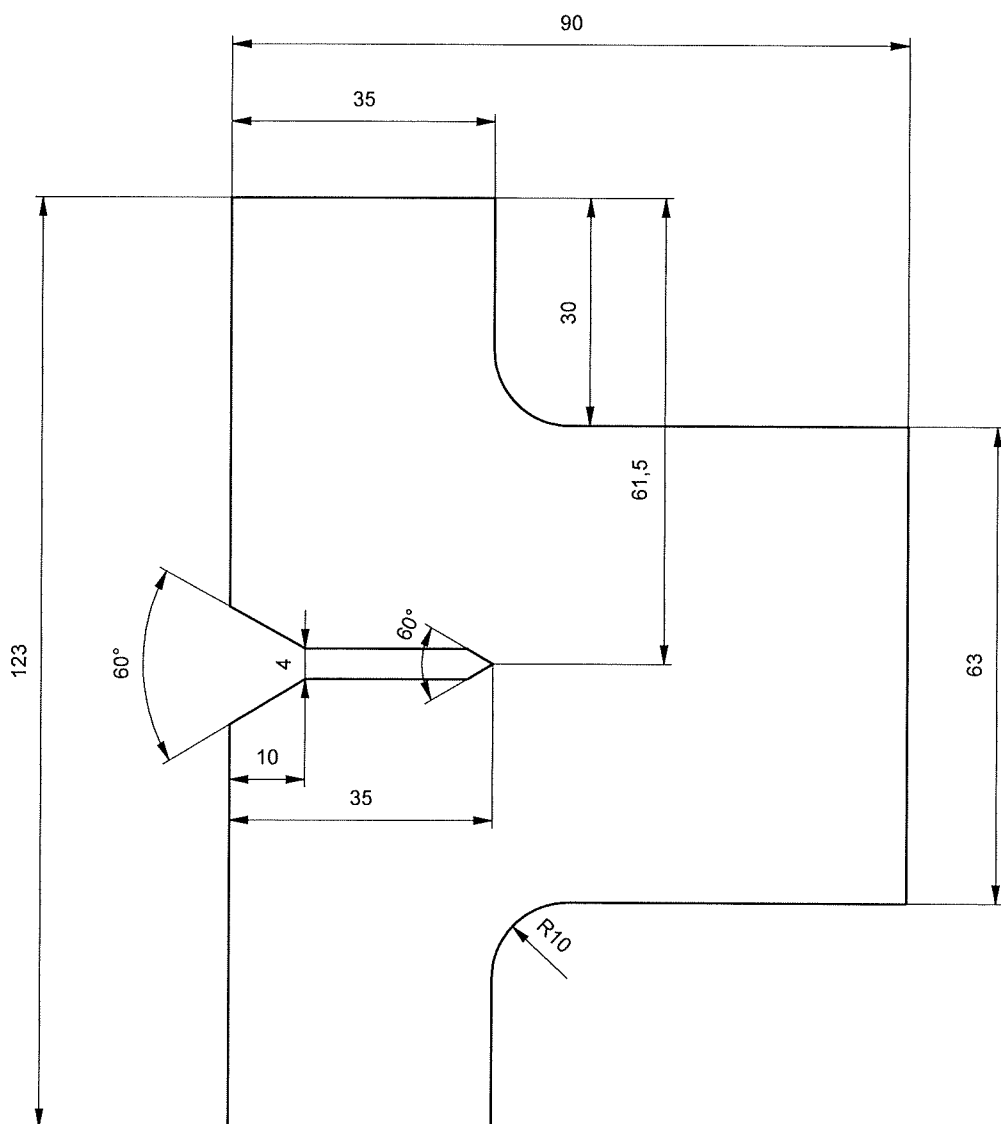
Annexe 4 : Dimensionnement des guidages latéraux des éprouvettes

Annexe 1



Annexe 2

Eprouvette de déchirement: épaisseur 10 mm

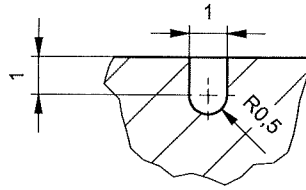


Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
P02	10	Acier	Eprouvette de déchirement en pincement		
Design éprouvette de déchirement			Dessiné Gezeichnet	bruno.gex	11.03.2016
			Contrôlé Geprüft		Echelle Massstab 1:1
Fichier Datei Y:\bruno.gex\PrS\Eprouvette_Dechirement_1.idw					

Annexe 3 Eprouvette de fatigue

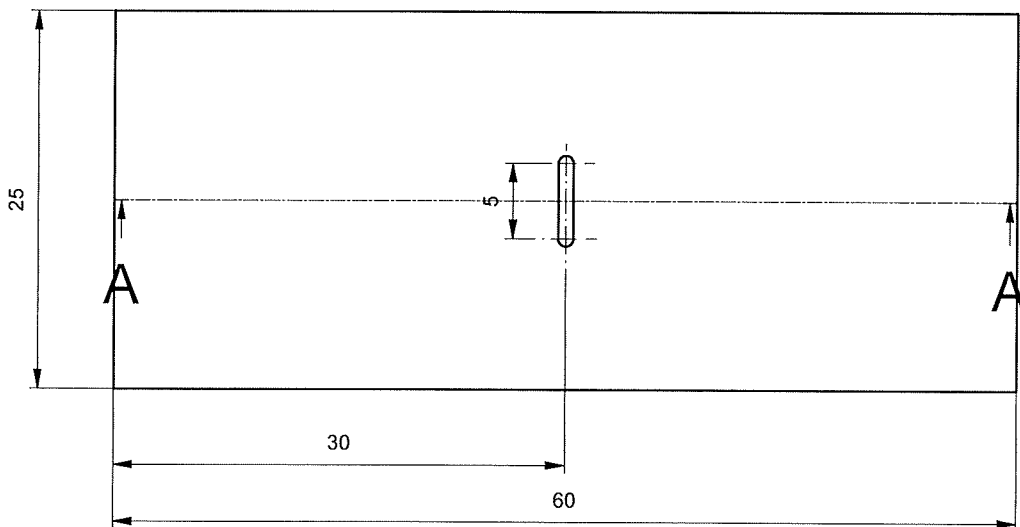
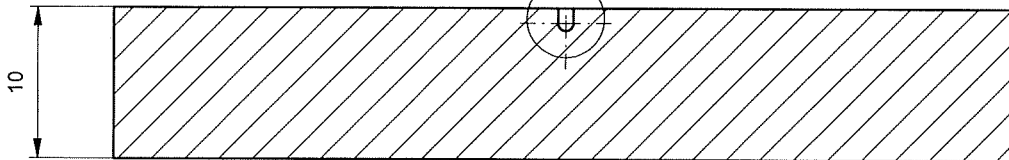
Contact: Gex Bruno : 079/228.30.21

B (5 : 1)



A-A (2 : 1)

B

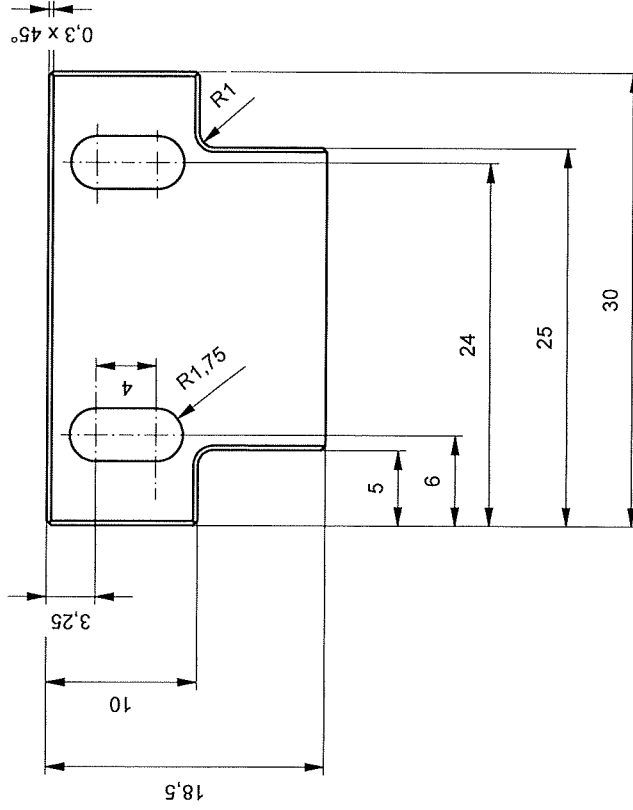


Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
01	10	E295 ou Aluminium	Eprouvette de fatigue		
Prototype d'éprouvette pour tests de fatigue			Dessiné Gezeichnet	bruno.gex	07.06.2016
Entaille selon entretien avec M.Eric Mabillard (outillage en stock)			Contrôlé Geprüft		Echelle Massstab 1:1
Fichier Y:\bruno.gex\PrS\Fatigue_Epr_Entaillee.idw Datei					

Guidage longitudinal des éprouvettes

Contact: Gex Bruno : 079/228.30.21

Épaisseur: selon stock atelier, mais >6mm



Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale
8	2	E295 (St50)	Guidage d'éprouvettes de fatigue

Support de guidage des éprouvettes		Dessiné Gezeichnet	bruno.gex	07.06.2016	Echelle Masstab
		Contrôlé Geprüft			2:1

Fichier: Y:\bruno.gex\PrS\Fatigue_Guidage_Longitudinal.idw
Datei

