

Etude du comportement à l'impact de matériaux composites par mouton de Charpy



Etudiants :

Morgan LETOURNEUR

Michel LIVNEY

Cedric FRAGNAUD

Manuel CORRAL

Corentin PASSERON

Enseignant-responsable du projet :

David BOUSCARRAT

Date de remise du rapport : *13/06/2016*

Référence du projet : *STPI/P6/2016 – 020*

Intitulé du projet : *Étude du comportement à l'impact de matériaux composites par mouton de Charpy.*

Type de projet : *expérimental, théorique, documentation.*

Objectifs du projet (10 lignes maxi) : L'objectif du projet est de réhabiliter un banc à essai Mouton de Charpy qui a été fabriqué depuis environ un siècle. Il s'agit aussi de l'équiper avec des outils plus modernes pour obtenir des résultats expérimentaux plus précis et variés. Nous allons donc rajouter un accéléromètre, et vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble des outils rajoutés et présent avant notre projet comme les jauges de déformations sur le couteau.

Nous devons aussi acquérir et rassembler des informations théoriques à propos de la résistance des matériaux et de la résilience pour appréhender le projet dans son intégralité.

Mots-clés du projet (4 maxi) : *Charpy, matériau composite, accéléromètre, instrumentation.*

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : *xxx*

TABLE DES MATIERES

Recherche sur les matériaux composites :

Définition et histoire

Notre matériau composite: Matrice PPS et fibres carbone

Résistance des matériaux

Contrainte

Déformation

Loi de comportement

Flexion

Recherche sur la ténacité d'un matériau- Résistance d'un matériau à la rupture

Qu'est ce que la ténacité ?

Définition :

Propriété mécanique :

Les théories de Griffith et d'Irwin :

La mesure de la ténacité d'un matériau- Les différentes essais :

Essai de Charpy théorique :

Les éprouvettes de test :

Essai par traction :

Les éprouvettes de test :

Recherche sur les jauges de déformations et pont de Wheatstone

Mouton de Charpy: étude expérimentale

première approche

Conclusion sur le travail réalisé :

Conclusions personnelles sur l'apport de cet E.C projet :

Perspectives pour la poursuite de ce projet :

6.1 Démonstration accélération tangentielle :

6.1 Courbes obtenues lors des tests expérimentaux :

NOTATIONS, ACRONYMES

PPS: Polysulfure de phénylène
RDM: Résistance des Matériaux

I. Introduction

Les ruptures surviennent sous l'effet des sollicitations que supportent les pièces excédant la résistance à la rupture des matériaux dont elles sont constituées. Il est important de connaître le mieux possible cette dernière propriété, qui dépend de divers facteurs : température, vitesse de déformation, environnement. En effet, le dimensionnement des différentes pièces en fonction de leur résistance est une étape importante dans la réalisation d'un outil ou d'un ouvrage. Aussi de nombreux essais ont été imaginés pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux et certains d'entre eux sont depuis longtemps couramment pratiqués dans l'industrie. En effet, les test de tractions ou de compression, les test de Charpy et beaucoup d'autres se sont largement développés avec l'industrialisation de la société.

La compréhension des mécanismes de ruptures permet d'apprécier l'intérêt des essais de choc sur éprouvettes entaillées mis au point notamment par Georges Charpy il y a une centaine d'années. Ces essais procurent des données pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux sous forme de la résilience, énergie absorbée lors du choc. Ils permettent, tout particulièrement, de déterminer le risque de rupture fragile des aciers, aux températures inférieures à la température de transition fragile-ductile. « Ils sont particulièrement utiles pour les constructions soudées. Simples à mettre en œuvre et peu coûteux, les essais Charpy sont donc extrêmement répandus et conservent une très grande utilité »- Dominique François.

La mécanique de la rupture nécessite la détermination de la ténacité des matériaux. Les essais qui permettent cette détermination utilisent des éprouvettes comportant des fissures calibrées et une instrumentation particulière. Grâce à l'INSA de Rouen, nous avons pu acquérir une machine à Essai mouton de Charpy. Notre projet physique consiste à la réhabiliter c'est à dire regarder si les résultats expérimentaux sont validés par la théorie. Le travail de groupe va nous permettre de faire les recherches théoriques nécessaires à la compréhension mais aussi de confronter des hypothèses et des idées pour avancer dans notre projet.

Cette machine a presque 1 siècle d'activité, nous allons donc devoir la moderniser et rajouter des outils de mesures supplémentaires comme un accéléromètre et un système de chauffage des éprouvettes. De plus il est important de vérifier le bon fonctionnement des outils de mesures déjà présent comme les jauges de déformations présentes sur le couteau d'impact.

II. Méthodologie et Organisation du travail

Le thème du projet étant presque complètement inconnu de la plupart des éléments du groupe, nous avons toutes effectué des recherches bibliographiques afin de mieux cerner le sujet. Et avoir une première approche générale du sujet. Ces recherches ont été guidées par les explications données par notre professeur encadrant, en début de projet.

Après avoir trouvé les grands axes du projet, c'est à dire: les jauges de déformation, la ténacité (traction, compression etc...), des notions générales sur la résistance des matériaux que nous étudions dans la matière P9, et enfin des recherches sur les matériaux composites; nous nous sommes répartis les différents travaux de rédaction afin d'être efficaces sur l'avancement du rapport. Afin de faciliter le travail à distance, nous partageons tout ce que nous faisons chacune de notre côté sur le réseau social Facebook. Ce moyen de communication nous permettait d'échanger et de communiquer facilement à distance : partage de fichiers, questions, mise en place de planning...

Nous disposions aussi d'un Dossier dans le google drive où nous pouvions modifier et échanger tous les fichiers se rapportant au sujet et rédiger le rapport final.

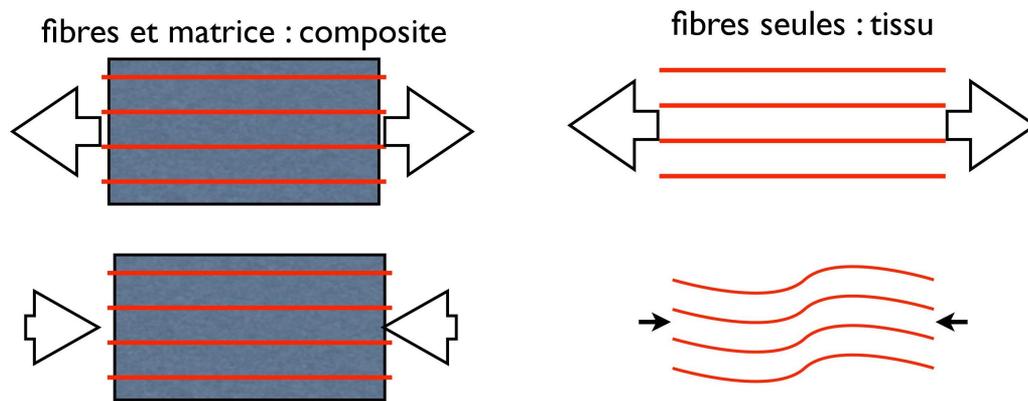
- Ainsi, Cédric a axé ses recherches sur l'étude de la résistance des matériaux.
- Morgan s'est, quand à lui, penché sur la notion de ténacité et les différents tests pour l'obtenir expérimentalement.
- Michel et Corentin ont choisi d'étudier les différentes jauges de déformation, car le couteau du mouton de Charpy en est équipé d'une.
- Manuel s'est occupé de la partie concernant toutes les recherches sur les matériaux composites.
- Pour la partie expérimentale, tout le groupe s'est attelé dessus et elle résulte du travail de groupe. Elle a été rédigé par Corentin.

III. Recherches théoriques fondamentales :

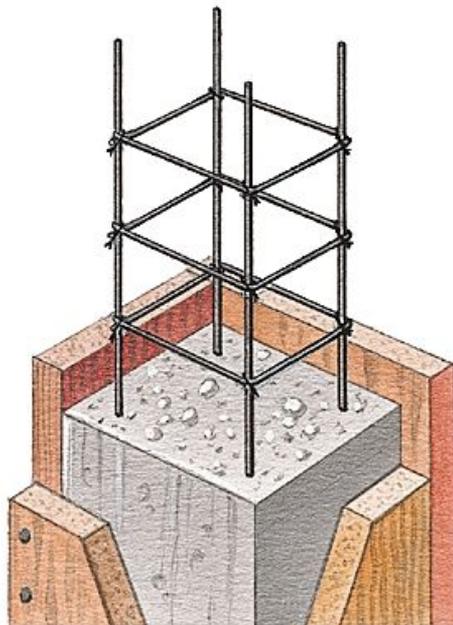
III.1. Recherche sur les matériaux composites :

III.1.a. Définition et histoire

Un matériau composite résulte de l'assemblage de 2 matériaux non miscibles dont les propriétés se complètent. Le matériau ainsi créé a de nouvelles caractéristiques, des propriétés que n'ont pas les matériaux d'origines seuls. C'est ce nouveau phénomène qui a permis le développement de l'utilisation des matériaux composites dans le secteur industriel, par exemple afin de rendre un matériau plus léger ou encore plus rigide à l'effort.



Un matériau composite est constitué d'une ossature appelée renfort et d'un liant appelée matrice.



Par exemple, le béton armé est composé d'un renfort en acier et d'une matrice béton.

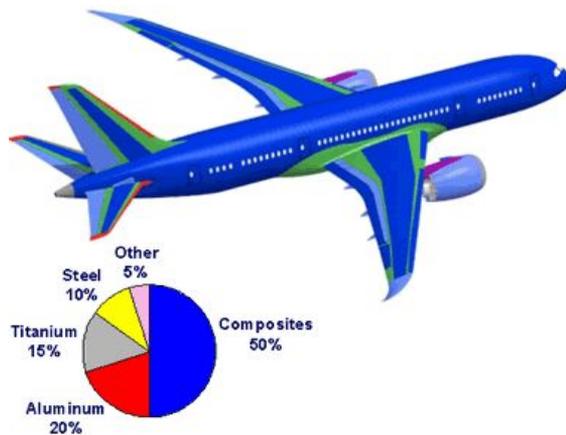
D'ailleurs, le renfort est souvent composé de fibre, et la matrice, dont le rôle est d'éviter aux fibres de flamber en compression et en cisaillement, est souvent une matière plastique thermodurcissable. Il existe des matériaux composites naturels comme le bois ou l'os et des matériaux composites fabriqués par l'homme.



Le premier matériau composite utilisé par l'Homme est sans aucun doute le bois. Et dès le Néolithique, le torchis (mélange d'argile, d'eau et de fibres naturelles (paille, foin, crin de chevaux)) a beaucoup été utilisé dans le bâtiment, notamment pour servir de matrice avec du bois en renfort. Le torchis a été longtemps utilisé pour ses propriétés d'isolation et son faible coût.

Parmi les premiers composites créés par l'Homme, on peut aussi noter l'arc mongole (entre -3000 et -2000 avant JC) De la corne de yak, des nerfs ou tendons effilochés et séchés, du collagène, de la colle et du bois sont les assemblages les plus communs parmi ces arcs composites.

Viennent ensuite des composites formés de matière synthétique. Par exemple l'imperméable de Macintosh en 1823, par l'ajout de caoutchouc au tissu. Ou encore le béton armé de François Hennebique en 1892. Puis plus tard le verre-epoxy dans les années 1940 notamment pour son utilisation dans l'aéronautique lors de la 2nd guerre mondiale.



Aujourd'hui encore, les avions que nous utilisons sont constitués d'environ 50% de matériaux composites.

III.1.b. Notre matériau composite: Matrice PPS et fibres carbone

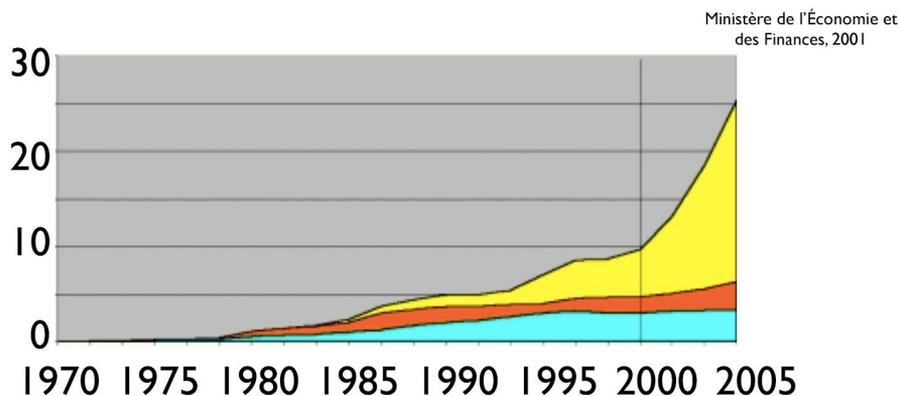
LES FIBRES DE CARBONES:

Les fibres de carbone utilisées pour des applications structurelles visant à obtenir une plus grande légèreté et une meilleure rigidité qu'avec la fibre de verre. Elles sont obtenues par la pyrolyse d'un précurseur organique ou non sous atmosphère contrôlée. Le plus utilisé de ces précurseurs est le polyacrylonitrile (PAN). Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions (Formule 1, mâts de bateaux).

En France, les industriels s'intéressent fortement à la production de fibre de carbone, notamment pour le marché de l'aéronautique un consortium d'entreprises françaises était en train de se monter pour industrialiser la production de ce matériau composite. La production mondiale est actuellement de 112.000 tonnes et devrait atteindre 190.000 tonnes en 2025.

Les fibres de carbone

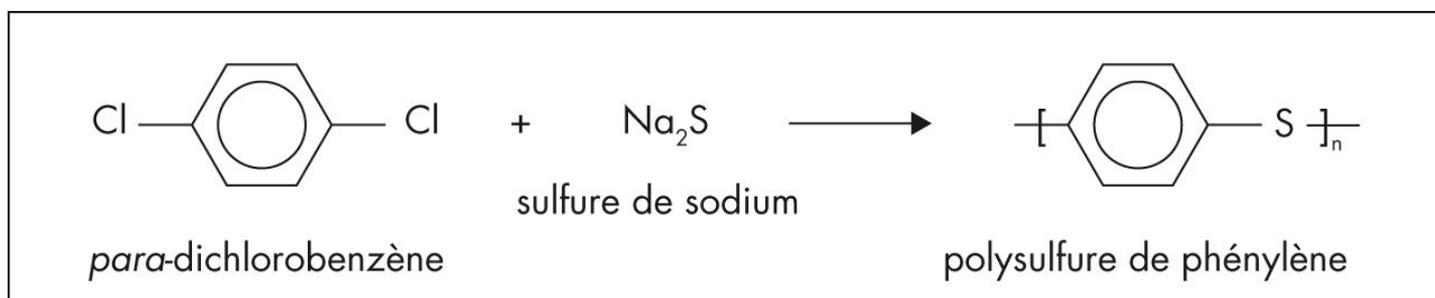
- Sports et loisirs
- Aéronautique et spatial
- Construction et équipements industriels



LA MATRICE PPS

Le polysulfure de phénylène a été préparé pour la première fois en 1897 par le chercheur Grenvesse. Mais, c'est à la fin de l'année 1967, soit 70 ans plus tard que la société « Phillips

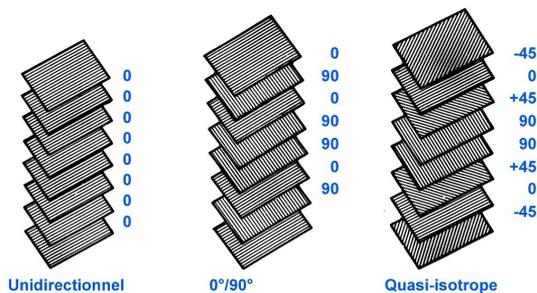
Petroleum Company » annonce la mise au point d'un nouveau polymère ramifié dont la matrice est le polysulfure de phénylène.



En 2000, la production de PPS s'élevait à 55 000 tonnes et, malgré les prix élevés de ce techno-polymère (Engineering plastic), la production ne cesse de progresser grâce à sa haute résistance à la chaleur. Les principaux consommateurs sont :

- Industries aéronautique et automobile : 50 %
- Industries électronique et électrique : 28 %
- Industrie mécanique : 12 %
- Appareils électroménagers (fours à micro-ondes, sèche-cheveux...) : 7 %
- Autres, divers : 3 %

Stratifiés typiques



Pr Soutis (Sheffield)

Le matériau utilisé lors de ce projet est un composite tressé de 5. Le composite n'est pas unidirectionnel. Le tressage est intéressant afin d'éviter le délaminage. Le délaminage est la propriété d'un matériau composite à se cisailer dans son épaisseur longitudinalement. Ici nous avons une stratification quasi-isotrope.

III.2. Résistance des matériaux

La résistance des matériaux est la science du dimensionnement de pièces et structures. Également appelée RDM, il s'agit d'une discipline particulière de la mécanique permettant le calcul des contraintes et déformations dans les structures des différents matériaux.

Concevoir une structure (pièce, machine, etc.), c'est tout d'abord déterminer les formes globales et les squelettes géométriques remplissant les fonctions demandées, puis évaluer les quantités de matière permettant la réalisation de ces formes et assurer une résistance (sans dommages) de l'objet à tous les efforts auxquels il sera soumis. Ce dimensionnement fait appel à des calculs qui prévoient le comportement de l'objet soumis à différentes efforts et moments.

Des essais sur des éprouvettes normalisées permettent de mettre en évidence plusieurs comportements possibles lorsqu'un matériau est soumis à une sollicitation:

- Déformation élastique (le matériau se déforme proportionnellement à l'effort appliqué et reprend sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît);
- Déformation plastique (le matériau ne reprend pas sa forme initiale lorsque la sollicitation disparaît, il subsiste une déformation résiduelle);
- Rupture (la sollicitation dépasse la résistance intrinsèque du matériau).

Lorsque l'intensité de la sollicitation est faible, la déformation est élastique, mais quand celle-ci augmente et atteint une certaine valeur (appelée limite d'élasticité), la déformation devient plastique.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il est nécessaire de parler de contrainte et déformation.

Hypothèses de la RDM: On admettra, pour les matériaux : l'homogénéité (tous les éléments du matériau ont une structure identique), l'isotropie (les matériaux possèdent les mêmes propriétés mécaniques en tout points et dans toutes les directions), la continuité (la matière est continue). Les équations de la RDM n'étant vraies que pour les matériaux idéaux, on introduira, dans la réalité, un coefficient de sécurité.

Pour les déformations, on utilisera l'hypothèse de Navier-Bernouilli (les sections planes normales aux fibres avant déformations restent planes et normales aux fibres après déformations), et l'hypothèse Barré de Saint Venant (les résultats de la RDM ne sont valables qu'à une certaine distance des points d'application).

III.2.a. Contrainte

La contrainte est une notion destinée à exprimer comment les efforts se répartissent dans les milieux continus. C'est l'objet mathématique permettant de quantifier les tensions internes à la matière.

Une méthode pour définir correctement la notion de contrainte est de couper virtuellement le solide étudié.

Ainsi, en un point A, on isole une partie de l'objet, défini par un plan (appelé plan de coupure) orienté par le vecteur normale \vec{n} (orienté vers l'extérieur du solide).

En chaque point de la surface de coupure, on remplace la partie manquante du solide par une densité surfacique d'effort représentant l'action de cette dernière sur le solide isolé.

Cette densité d'effort, définie en un point A et orienté par le vecteur \vec{n} , est appelée vecteur de contrainte $\vec{C}(A, \vec{n})$.

En désignant par σ_n la contrainte normale (portée par \vec{n}) et par τ la contrainte de cisaillement (portée par \vec{t} tel que $\vec{n} \perp \vec{t}$), on peut décomposer le vecteur contrainte de la façon suivante: $\vec{C}(A, \vec{n}) = \sigma_n \vec{n} + \vec{\tau}$.

Dans un repère $\mathfrak{R}_0(A, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, on peut écrire \vec{n} de la façon suivante : $\vec{n}(a, b, c)$ avec $a^2+b^2+c^2=1$.

On peut démontrer que $\vec{C}(A, \vec{n}) = a \vec{C}(A, \vec{x}) + b \vec{C}(A, \vec{y}) + c \vec{C}(A, \vec{z})$.

On a ainsi $\vec{C}(A, \vec{n}) = \sigma(A) \cdot \vec{n}$, où $\sigma(A)$ correspond au tenseur des contraintes, qui dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ prend la forme d'une matrice symétrique (théorème de Cauchy):

$$\text{avec } \sigma_i = \vec{C}(A, \vec{i}) \cdot \vec{i} \text{ et } \tau_{ij} = \tau_{ji} = \vec{C}(A, \vec{i}) \cdot \vec{j}$$

Par ailleurs, on peut démontrer qu'il existe un repère orthonormé $\mathfrak{R}(A, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ tel

$$\begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

que pour les facettes de direction \vec{X} , \vec{Y} et \vec{Z} , les contraintes de cisaillement sont nulles et les contraintes normales valent respectivement σ_x , σ_y , σ_z (cela revient à dire que le tenseur des contraintes est une matrice diagonale). Les directions des normales \vec{X} , \vec{Y} et \vec{Z} sont qualifiées de directions principales, et les valeurs σ_x , σ_y , σ_z sont les contraintes principales associées à ces directions.

Une méthode pour obtenir ces contraintes et directions consiste en la construction du tricercler de Mohr.

III.2.b. Déformation

La déformation est la variation relative de longueur d'un solide lorsque ce dernier est soumis à une action.

Les déformations résultant de l'application des sollicitations mécaniques sont supposées petites, et le solide garde son caractère rigide.

On peut démontrer que le tenseur des déformations $[N]$, dans la base $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$, s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{\partial u_x}{\partial y} & \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_z}{\partial x} & \frac{\partial u_z}{\partial y} & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{vmatrix}$$

où $\vec{U}(u_x, u_y, u_z)$ correspond au champ de déplacement.

Cette matrice peut être écrite comme étant la somme de deux matrices, dont l'une est symétrique (les termes symétriques par rapport à la diagonale sont égaux) et l'autre est antisymétrique (les termes symétriques par rapport à la diagonale sont opposés).

On a ainsi la matrice (symétrique) des déformations pures $[\varepsilon]$:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{zx} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{zy} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix}$$

où $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right)$;

Et la matrice (antisymétrique) de rotation $[\omega]$:

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

où $\omega_x = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)$; $\omega_y = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} - \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)$; $\omega_z = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)$.

On peut, de même que pour le tenseur des contraintes, démontrer qu'il existe un repère orthonormé $\mathfrak{R}(A, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ tel que la matrice $[\varepsilon]$ est diagonale (les coefficients de la diagonale sont appelées déformations principales).

De même, le tricerle de Mohr peut être utilisé pour déterminer les déformations principales.

III.2.c. Loi de comportement

La relation liant le tenseur des contraintes et le tenseur de déformation est la loi de comportement. Ainsi, la loi de Hooke généralisée met en jeu deux paramètres propres au matériau: le module d'Young E et le coefficient de Poisson ν ; suivant la relation:

$$[\varepsilon] = \frac{1+\nu}{E} [\sigma] - \frac{\nu}{E} tr([\sigma]) \cdot Id;$$

où $[\sigma]$ et $[\varepsilon]$ sont respectivement les tenseurs de contraintes et de déformations pures, exprimés dans le repère $\mathfrak{R}(A, \vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$ dans lequel ils sont représentés par une matrice diagonale, et $tr(A)$ correspond à la trace de la matrice A (somme des coefficients diagonaux).

Le module de Young E correspond à la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation du matériau.

Le coefficient de Poisson ν , quant à lui, est défini comme étant le rapport entre la contraction transversale unitaire et l'allongement axial unitaire.

A l'inverse, une autre relation (faisant intervenir les coefficients de Lamé λ et μ qui s'expriment en fonction de E et de ν), permet d'exprimer $[\sigma]$ en fonction de $[\varepsilon]$:

$$[\sigma] = 2\mu [\varepsilon] + \lambda tr([\varepsilon]) \cdot Id$$

III.2.d. Flexion

On appelle poutre un solide dans lequel la ligne moyenne (ensemble de centres de gravité des sections droites) est continue et sa longueur grande par rapport aux deux autres longueurs du solide. Par ailleurs, la ligne moyenne doit être droite ou à fort rayon de courbure, et les sections droites sont perpendiculaires à cette ligne, continues et constantes (ou varient progressivement).

Si l'on coupe une poutre en deux sections E1 et E2 (où E1 est "à gauche" de la coupure) par un plan P orthogonal à la ligne moyenne, le torseur de cohésion nous permet de modéliser les actions mécaniques que E2 exerce sur E1 au travers de la section S (section droite fictive de la poutre définie par le plan P).

Selon la nature du torseur de cohésion, on distingue plusieurs types de flexion: la flexion pure, la flexion plane, la flexion plane simple, et la flexion déviée.

Dans le cas d'un essai par Mouton de Charpy, il apparaît que l'éprouvette à tester (considérée comme étant une poutre) est sollicitée en flexion 3 points, ce qui correspond à une flexion plane simple. Son torseur de cohésion s'écrit donc sous la forme:

$$\{\tau_{coh}\} = \left\{ T_y \bar{y} / m_{fz} \bar{z} \right\} .$$

(Nb: l'axe \bar{x} correspond à l'axe de la ligne moyenne).

III.3. Recherche sur la ténacité d'un matériau- Résistance d'un matériau à la rupture

III.3.a. Qu'est ce que la ténacité ?

Définition :

La ténacité fait partie de la carte d'identité du matériau au même titre que son module d'élasticité ou encore sa limite d'élasticité, c'est une caractéristique intrinsèque du matériau dans un état bien défini (température, traitement thermique donné, etc.). Elle est définie comme la résistance à la propagation brutale de fissures, c'est à dire l'énergie nécessaire pour entraîner la rupture (le contraire de la ténacité est la fragilité). Aujourd'hui la ténacité est aussi appelée la résilience, unité [Kg.m/cm²] ou [J/cm²].

III.3.b. Mécanique de la rupture - Sous quelles conditions une fissure se propage t-elle brutalement ?

Propriété mécanique :

La mécanique de la rupture est une étude qui met en jeu les paramètres habituels de la mécanique à partir d'une discontinuité existante : fissure ou défaut. Elle permet dans certains cas de prévoir, en fonction des dimensions d'une fissure et de l'état de chargement, la vitesse de propagation de la fissure et la dimension à partir de laquelle cette fissure peut entraîner une rupture brutale.

Remarque : une rupture brutale correspond à la propagation d'une fissure dans le matériau à une vitesse pouvant atteindre 40% de la vitesse du son.

En ne considérant que les fissures planes se propageant dans leur propre plan, on montre que l'état le plus général de propagation se ramène à la superposition de trois modes:

- mode I (mode par ouverture) : les surfaces de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure ;
- mode II (glissement de translation) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure ;
- mode III (glissement dévié) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure.

La rupture plate correspond au mode I ; les ruptures inclinées aux modes II et III.

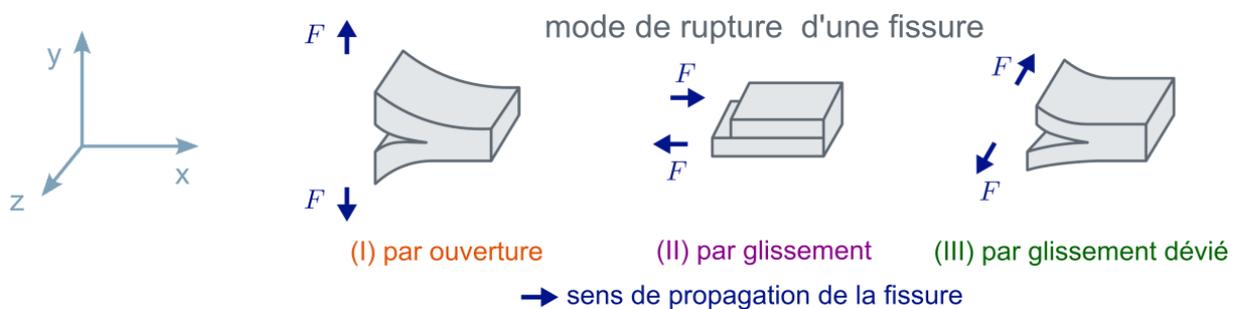


Illustration 1: Les différents modes d'ouvertures d'une fissure

Les théories de Griffith et d'Irwin :

Dans un milieu solide élastique linéaire (avec la limite élastique conventionnelle à 0,2 % Re égale à la résistance à la rupture R_r) contenant une fissure de surface A et soumis à un champ de forces F , la progression de la fissure est stable tant que l'énergie libérée par l'extension de cette fissures est absorbée par la création de nouvelles surfaces.

L'expérience a montré que la progression des fissures et la résistance résiduelle d'une structure possédant un défaut sont gouvernées par le facteur d'intensité des contraintes K . L'hypothèse d'un milieu bidimensionnel élastique (en ignorant les phénomènes plastiques) permet de déterminer l'expression de K par la théorie de l'élasticité plane. On se place dans le cas du mode d'ouverture I.

Définition : Le facteur d'intensité des contraintes K , est calculable à partir de la géométrie de la structure, de la longueur de la fissure et des efforts extérieurs.

Il permet d'exprimer les conditions d'instabilité c'est à dire que la rupture par instabilité se produit quand ce facteur atteint une valeur critique qui est une caractéristique du matériau.

Pour une contrainte σ s'appliquant normalement au plan de la fissure de longueur $2a$:

$$K = \sigma * (\pi * a)^{1/2}$$

Dans les cas généraux $K = \sigma * \alpha * (\pi * a)^{1/2}$ où α est un facteur de correction.

La rupture par instabilité a lieu quand $K = K_c$, ténacité du matériau déterminée expérimentalement par des essais de rupture d'éprouvettes fissurées.

III.3.c. La mesure de la ténacité d'un matériau- Les différentes essais :

Essai de Charpy théorique :

La définition de l'essai Charpy, encore communément appelé l'« essai de résilience », existe depuis plus d'un siècle. Georges Charpy a contribué à rendre l'essai quantitatif et reproductible et a développé la machine d'essai correspondante. Les moutons-pendules actuels sont toujours construits sur le modèle décrit par Charpy en 1904.

Le principe de base consiste à mesurer l'énergie absorbée par la rupture lors du choc d'un barreau rectangulaire de dimensions $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$, présentant une entaille de 2 mm de profondeur en son milieu (cas de l'éprouvette avec entaille en V), et sollicité en flexion 3 points.

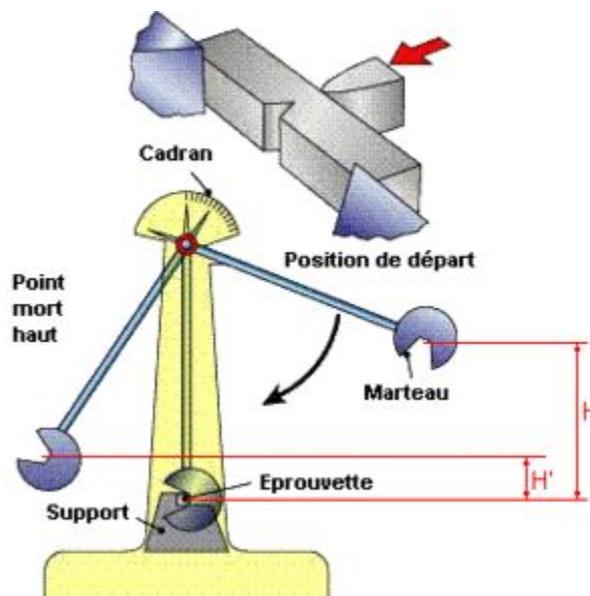


Illustration 2: Pendule du test de mouton de Charpy

Le pendule permet d'évaluer l'énergie qu'il a fallu pour briser l'éprouvette grâce au théorème la conservation de l'énergie mécanique. En effet, un bilan énergétique serait (si l'on suppose que l'énergie mécanique de départ est seulement dissipée dans la rupture de l'éprouvette) :

→ au point 1 :

- énergie de position (1) = $mgh = mgL(1 - \cos\theta)$ avec θ l'angle d'incidence de départ et L la longueur du balancier ;
- énergie cinétique(1) = 0 ;

→ au point 2 :

- énergie de position (2) = $mgh' = mgL(1 - \cos\theta')$ avec θ' l'angle d'incidence suite à la rupture de l'éprouvette
- énergie cinétique = 0 ;

Conclusion : $Energie\ Rupture = mgL(cos\theta - cos\theta')$

ici Ténacité = Énergie rupture ;

Les éprouvettes de test :

L'ISO 179-1:2010 spécifie une méthode de détermination de la résistance au choc Charpy des plastiques dans des conditions définies. De nombreux types différents d'éprouvettes et de configurations d'essai sont définis. Divers paramètres d'essai sont spécifiés selon le type de matériau, le type d'éprouvette et le type d'entaille.

Le domaine d'application de la méthode est plus étendu que celui de l'ISO 180 (essai de choc Izod) et il convient mieux à l'essai des matériaux qui présentent des défaillances de type cisaillement interlaminaire ou de ceux qui présentent des effets de surface dus à des facteurs d'environnement.

La méthode est applicable à la gamme des matériaux suivants:

- matières thermoplastiques rigides pour moulage et extrusion (y compris les compositions chargées et renforcées en plus des types non chargés) et feuilles thermoplastiques rigides.
- matières thermodurcissables rigides pour moulage (y compris les compositions chargées et renforcées) et feuilles thermodurcissables rigides (y compris les stratifiés);
- composites thermoplastiques et thermodurcissables renforcés par des fibres comportant des renforts unidirectionnels ou multidirectionnels (tels que mats, tissus, tissus stratifiés, fils de base coupés, combinaison de renforcements et hybrides, stratifiés et fibres broyées) ou comportant des feuilles réalisées à partir de matières préimprégnées (prepregs), y compris les compositions chargées et renforcées.
- polymères de cristaux liquides thermotropes.

Pour notre projet, l'éprouvette est constituée d'un barreau entaillé par usinage en son milieu. La forme d'entaille la plus fréquente est la forme en V (type A dans la norme ASTM) d'une profondeur de 2 mm. Il existe également une éprouvette avec une entaille en U (type C dans la norme ASTM), c'est le type d'éprouvette que nous avons utilisé lors de ce projet.

L'éprouvette avec une entaille en U possède les caractéristiques suivantes :

- longueur : 55mm ;
- largeur : 10 mm ;
- hauteur : 10 mm
- hauteur éprouvette à fond d'entaille : 5 mm ;
- rayon à fond d'entaille : 1 mm
- angle de l'entaille : bords parallèles ;

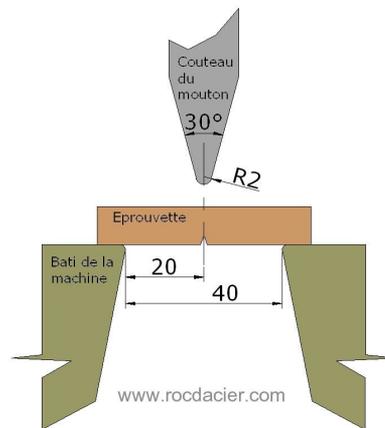


Illustration 3: Epreuve et couteau du pendule - Les valeurs sont arbitraires

Essai par traction :

Un essai de traction est une expérience physique qui permet de déterminer le comportement élastique d'un matériau mesurer le degré de résistance à la rupture d'un matériau. L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- le module d'Young, E , ou module d'élasticité longitudinale, exprimé en mégapascals (MPa) ou en gigapascals (GPa) ;
- la limite d'élasticité (lorsqu'elle existe), R_e , σ_e , σ_y qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- la résistance à la traction R_m , σ_m qui définit la limite à la rupture ;
- l'allongement à la rupture A , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- le coefficient de Poisson ν , qui correspond la proportion entre la déformation transversale (diminution de section) et l'allongement de la pièce dans le domaine élastique.

Pour notre projet nous nous intéressons plus particulièrement à la limite à la rupture R_m ; En résistance des matériaux, l'essai de traction correspond à l'extension simple d'une poutre. Il est possible de déterminer R_m grâce à la courbe de traction.

Les éprouvettes de test :

On peut effectuer les essais sur un barreau cylindrique ou de section rectangulaire (épreuve plate). Les extrémités de l'éprouvette sont élargies, avec un congé, afin d'être sûr que la déformation plastique et la rupture auront lieu dans la partie centrale de l'éprouvette : les phénomènes de contact au niveau de la liaison à la machine ne représentent pas ce que l'on veut tester, on limite donc l'impact de l'essai sur ces zones.

L'ISO 527 prescrit des conditions d'essai pour la détermination des propriétés en traction des composites plastiques renforcés de fibres isotropes et orthotropes, basées sur les principes généraux établis dans l'ISO 527-1. Les matériaux renforcés unidirectionnels sont traités dans l'ISO 527-5. 1.2

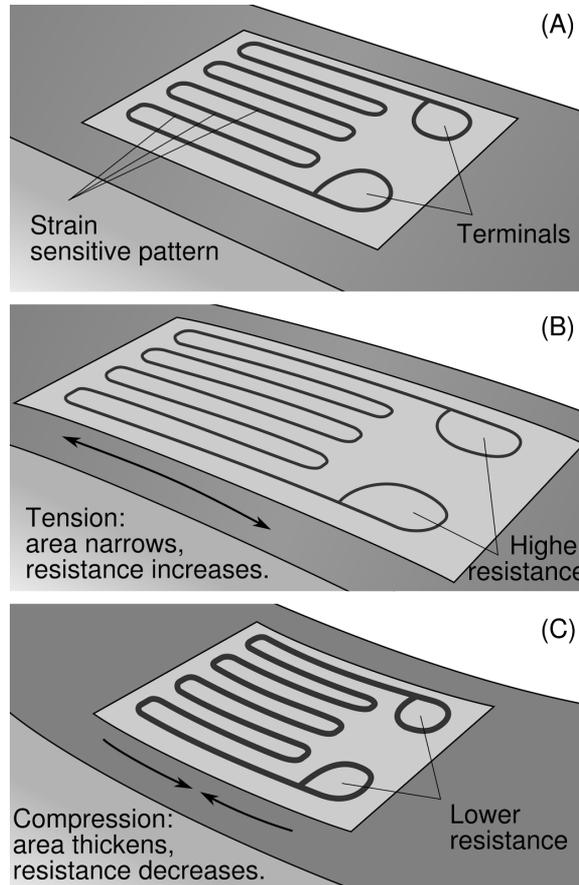
La méthode est mise en oeuvre en utilisant des éprouvettes usiné 235es dans un panneau d'essai réalisé conformément à l'ISO 1268 ou par des méthodes équivalentes, ou dans des produits finis ou semi-finis présentant des zones planes adaptées. 1.5 Voir ISO 527-1.

III.4. Recherche sur les jauges de déformations et pont de Wheatstone

Les jauges de déformations sont un dispositif permettant de mesurer la déformation subit pas une pièce de manière précise, en la traduisant en variation de résistance électrique.

Une jauge de déformation est composé de deux parties :

- un fil des métal plié de manière à former des brins parallèles. Le métal est important si on veut des mesures précises ; on cherche à utiliser des métaux ayant un coefficient de jauge constant. Le coefficient de jauge permet de relier l'allongement relatif de la pièce (la déformation) à la variation relative de sa résistance électrique. Les métaux couramment utilisés sont le constantan, les alliages nickel/chrome, l'élinvar et le platine/tungstène.
- Un support qui servira à fixer les spires à la pièce. Le support doit répondre à certains critères : il doit être un très bon isolant électrique pour éviter les perturbations, mais aussi un bon isolant thermique avec un coefficient de dilatation très faible. C'est pourquoi le support est souvent fait en résine époxyde car c'est un matériau qui regroupe ces capacités. Il existe plusieurs modèles de jauge de déformation adaptés à différentes utilisations. Certains jauges vont être très allongés permettant ainsi une plus grande sensibilité dans une direction donnée. D'autres vont avoir deux voir trois jauges dans trois directions différentes afin de déterminer le sens principale des déformations quand il est inconnue.
Pour faire des mesures, il est important que le dispositif expérimental soit isolé électriquement et thermiquement afin de réduire au maximum le bruit ambiant.



La résistance électrique d'une jauge cylindrique est donnée par :

$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

avec :

- ρ , résistivité du conducteur ;
- l sa longueur ;
- A , l'aire de sa section ;
- D , le diamètre de la section.

Donc après déformation de la jauge, on obtient :

$$R_0 + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \frac{4(l + \Delta l)}{(D - \Delta D)^2 \pi}$$

On peut alors exprimer la variation relative de la résistance par :

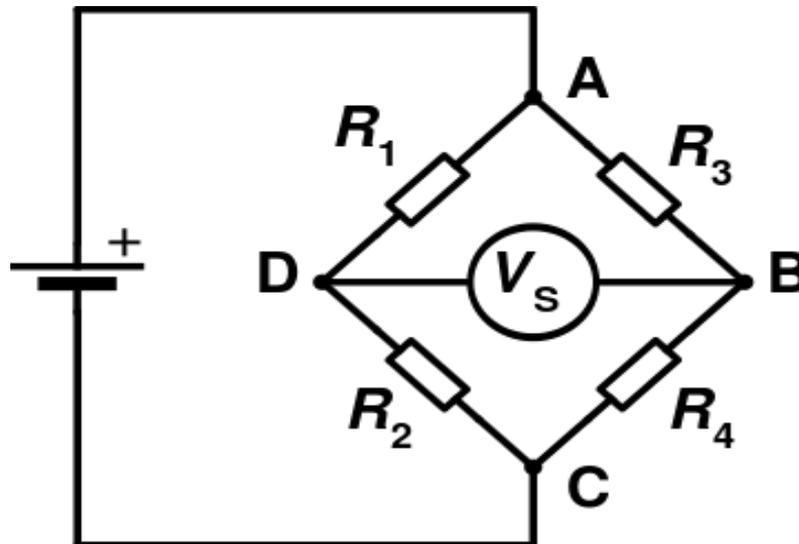
$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \frac{\Delta L}{L_0} = k \cdot \varepsilon_l$$

avec :

- k , la sensibilité d'un appareil piézorésistant, dépend principalement du constituant de la jauge ;

- $\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$ la variation relative de longueur ;
- R la résistance.

Ici, le facteur k est égal à 130, R_0 est égal à 350 Ohms, pour avoir la déformation il nous suffit plus que d'avoir le R . Or, La mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de conductivité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone qui se présente comme ci dessous:



Ce montage consiste en 4 résistances qui, peut importe la tension d'entrée, aura une tension de sortie nul. En faisant varier la résistance électrique de l'une des résistances, on observe une tension en sortie. Dans le cadre des jauge de déformations, on remplace les résistances par une (quart de pont), deux (demi pont) ou quatre (pont complet) jauge de déformations. Plus il y aura de jauges et plus le système sera précis. Dans notre cas, nous utilisons un pont de Wheatstone en demi pont.

Pour notre projet, les jauges de déformations sont placées sur le couteau du mouton de Charpy. Cela devrait nous permettre de remonter sur la force appliqué par le couteau sur l'éprouvette en fonction du temps.

III.5. Mouton de Charpy: étude expérimentale

III.5.a. première approche

Après s'être documenté sur le sujet, M. Bouscarrat nous a présenté à la machine réelle, qui est bien plus grande que l'on ne l'imaginait.

Ils nous a donc expliqué le but des manipulations que nous allons effectuer, c'est à dire confronter des données théoriques et expérimentales. Cela nous permet de utiliser des

méthodes d'acquisitions précises pour étudier la résistance des matériaux utilisés plutôt que l'afficheur mécanique, présent de base dans le mouton de Charpy.



Pour pouvoir effectuer ça, M. Bouscarrat s'est procuré un premier accéléromètre : le 333b30, qui est un accéléromètre piézoélectrique. Les accéléromètres piézoélectriques sont les plus utilisés dans le monde de l'industrie. Leur fonctionnement en résumé est de mesurer la force inertielle grâce à un cristal qui se charge ou se décharge selon ses déformations. Néanmoins, cet accéléromètre présentait un problème majeur : au lancement du bras mécanique

il envoyait un « pic » d'accélération d'origine inconnue.

Malgré de longues recherches sur les causes possibles de ce pic, nous n'avons pas réussi à résoudre le problème.

Après de longues conversations avec un ingénieur de l'entreprise qui commercialisait ce dernier, notre maître de soutenance, M. Bouscarrat a réussi à obtenir un deuxième type d'accéléromètre, un accéléromètre piezorésistif.

Les courbes données pour l'accélération par cet accéléromètre ne présentaient plus le pic d'accélération mais présentaient beaucoup de bruit, il était donc très difficile d'étudier ces résultats. Nous avons réfléchi là encore sur l'origine de ces perturbations : installation électriques etc.

Mais la solution qui en est ressorti est d'appliquer un filtre passe bas au signal, car les perturbations que l'on avait eues étaient de l'ordre de plusieurs centaines de Hertz et l'oscillation que nous voulions étudier, seulement de l'ordre de 0,5 Hz.

Enfin le dernier test expérimental consiste à mesurer la déformation du couteau pour déterminer l'effort exercé sur la pièce lors de l'impact. Nous avons donc dû déterminer le rapport entre cette déformation et la force qui est une fonction linéaire, après plusieurs tests de valeurs pour déterminer cette fonction nous sommes arrivés à un certain résultat, qui malheureusement était faux. Cela était dû au fait que sur le pont de Wheatstone, seulement deux jauges étaient actives sur les quatre (il s'apparentait donc à un demi pont : cf partie sur le pont de Wheatstone), de nouveaux essais ont été effectués afin de déterminer le nouveau coefficient pour déterminer le rapport entre le voltage et la déformation.

III.5.b.exploitation des résultats

Angle téta	accélération tangentielle (porté par ω_0) en m.s-2
-10	1,7034886229
-9	1,534622102
-8	1,3652881204
-7	1,1955382588
-6	1,0254242247
-5	0,8549978364
-4	0,6843110074
-3	0,5134157307
-2	0,3423640627
-1	0,1712081071
0	0
1	-0,1712081071
2	-0,3423640627
3	-0,5134157307
4	-0,6843110074
5	-0,8549978364
6	-1,0254242247
7	-1,1955382588
8	-1,3652881204
9	-1,534622102
10	-1,7034886229

Ce que nous voulons calculer est l'accélération tangentielle, et l'énergie dissipée. Nos formules théoriques obtenues grâce à la matière P2 et P9 (mécanique du point et du solide) nous ont permis d'obtenir sur Excel les valeurs théorique qui suivent.

Malheureusement, après exploitation des courbes données par les accéléromètres, nous nous sommes rendu compte d'une erreur d'amplitude sur l'accéléromètre piezorésistif.

Néanmoins, grâce aux informations des angles nous avons pu quand même effectuer des tests sur cinq éprouvettes de carbone PPS et nous avons pu les comparer avec l'afficheur mécanique.

Nous avons les valeurs suivantes par exemple sur l'essai numéro 3 :

	troisième test	teta	afficheur mecanique
epp avant	5,3482823057	15	295
epp après	3,4299525888	12	293
delta epp	1,9183297168		2

Ces Valeurs ont été confirmées par les valeurs expérimentales, nous avons donc bien réussi à déterminer, d'une première manière, l'énergie dissipée en joules lors de l'impact.

En ce qui concerne la relation de la déformation du couteau et de la force appliquée à l'impact pour la rupture, nous la présenterons lors de l'oral comme autre type de test expérimental.

IV. Conclusion et perspectives :

IV.1.a. Conclusion sur le travail réalisé :

La partie expérimentale de ce projet fut complexe, d'autant plus que les résultats obtenus étaient souvent incohérents avec ceux de la théorie. Nous avons eu beaucoup de mal à comprendre, analyser, et régler les problèmes rencontrés lors de ces expériences.

Ce projet a permis à chacun d'entre nous de prendre conscience des obstacles auxquels on peut se heurter lors des expériences, ainsi que de la difficulté à avoir des informations précises sur un produit auprès d'un fournisseur. Il nous a montré qu'il fallait persévérer, et cela malgré les aléas rencontrés.

De plus, nous avons du travailler efficacement en groupe, ce qui fut formateur, autant du point de vue des avantages (concertation, rassemblement des informations et des connaissances) que des inconvénients (difficultés rencontrées, emploi du temps de chacun). Nous avons donc du faire preuve d'un esprit de cohésion et d'organisation, afin que notre projet puisse aboutir. Nous nous connaissions peu au début de ce projet; ce projet nous a aussi permis de partager une expérience qui nous lie désormais, c'est donc aussi très enrichissant humainement.

Par ailleurs, nous avons du réfléchir à une problématique réelle, proposée par un doctorant dans le cadre de sa thèse, nous prouvant ainsi que nous avons, avec un peu d'aide, les capacités à résoudre un problème concret.

IV.1.b. Conclusions personnelles sur l'apport de cet E.C projet :

Manuel: Il est vrai que le projet ne correspond pas aux thématiques que j'ai choisi, ni à mon projet professionnel. Cependant, il est certain que l'étude des matériaux est un domaine fondamental des technologies de demain. Les futures technologies devront utiliser des capteurs, et autres instruments électroniques adaptés aux exigences d'un nouveau produit qui se veut toujours innovant. C'est la raison pour laquelle j'ai trouvé plaisant d'en apprendre plus sur les matériaux composites, leurs atouts et leurs différentes utilisations.

Cédric: Ce projet fut pour moi l'occasion d'en apprendre plus sur la résistance des matériaux, domaine qui m'intéresse fortement et dans lequel je pourrais envisager une carrière professionnelle. J'ai pu approfondir mes connaissances de P9-1, et me rendre compte que les notions abordées dans cette matière sont en réalité beaucoup plus complexes qu'elle ne le laisse supposer.

Corentin: Nous sommes actuellement en STPI, où nous apprenons les bases pour devenir ingénieur, ce qui implique que nous faisons principalement des exercices théoriques, et nous avons en général du mal à nous imaginer en quoi cela pourrait être utile dans la vie. Je pense que ce projet a été une première approche de l'utilité de matières comme la P2 ou la P9 dans le monde de l'industrie.

Michel: Cet projet était centré sur la résistance de matériaux, la matière qui m'a posé le plus de difficulté pendant mon quatrième semestre. Et pourtant ce projet m'a beaucoup intéressé, particulièrement dans le cadre du travail de groupe et de la recherche empirique. Je pense que c'est dans toutes les difficultés rencontrées que j'ai le plus appris en méthodologie et en organisation.

Morgan : Le projet s'est révélé très riche d'un point de vue théorique et expérimental. En effet, les cours de Résistances des matériaux (P9) m'ont permis de bien comprendre la partie pratique du projet, grâce à laquelle j'ai progressé en compréhension sur la matière. De plus, j'ai gagné en expérience au niveau du travail de groupe. D'un point de vue plus professionnel, les échanges avec Mr Bouscarrat ont été formateur car il est resté accessible lorsque nous ne comprenions pas certains points théoriques.

IV.1.c. Perspectives pour la poursuite de ce projet :

La mise en place et la vérification du bon fonctionnement de l'accéléromètre nous ont pris beaucoup plus de temps que ce que nous pensions auparavant. En effet, l'accéléromètre piezo-électrique nous a fait perdre du temps notamment pour comprendre un pic au début du lancement du balancier. De plus les échanges avec le fournisseur ne nous ont pas réellement aidé. De ce fait, nous n'avons pas pu réfléchir à un système de chauffage des éprouvettes pour faire des tests encore plus proches de la réalité.

Il aurait été possible d'installer un système avec une cuve comportant des résistances. Toutefois, nous aurions dû faire l'approximation que les éprouvettes perdent quelques degrés le temps que nous les sortions de la cuve et de les mettre en place sur le banc.



Illustration 1 : Cuve thermostatée envisageable pour le système de chauffage

De plus il aurait été possible de comparer les résultats de la machine à des résultats de tests en traction. En effet, la possibilité de comparer ces résultats nous aurait grandement aidé notamment pour savoir lorsque les résultats théoriques et ceux des tests de Charpy n'étaient pas en accord.

V. Bibliographie :

- [1] Noms des auteurs, "Titre du livre", *Editeur*, année.
- [2] Noms des auteurs, "Titre de l'article", *Titre du journal*, volume, pages, année.
- [3] lien internet : <http://www.####> (valide à la date du ##/##/201#).

Composites:

Sites :

https://cours.etsmtl.ca/sys849/Documents/Notes_de_cours/2013/SYS849-Cours%20%20-%20Tenacite%20et%20mecanique%20de%20la%20rupture.pdf

http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2008/Club08_RMPitti.pdf

http://lamcos.insa-lyon.fr/files/actualites/672_FR.pdf

http://www.lesechos.fr/03/10/2014/lesechos.fr/0203830421376_fibre-de-carbone---po-urquoi-la-france-attire-les-investissements.htm (valide à la date du 13/10/2014)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite (valide à la date du 31/05/2016)

<http://www.compositec.com/compositec-promotion/les-materiaux-composites> (date d'édition non communiquée)

<http://brindesciences.pagesperso-orange.fr/rdm.htm>

<http://freddy.univ-tln.fr/enseignement/RDM.pdf>

<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/essais-mecaniques-sur-les-metaux-et-alliages-42531210/essais-de-mesure-de-la-tenacite-m4166/>

Crédit images:

Marc François, IUT Cachan, Module M227, Matériaux non métalliques.

techniques-ingenieur.fr

larousse.fr

reporterre.fr

P. Agati, F Lerouge, M. Rosetto; "Résistance des Matériaux"; Edition Dunod, 2008.

<http://www.universalis-edu.com/ezproxy.normandie-univ.fr/encyclopedie/resistance-des-materiaux/>

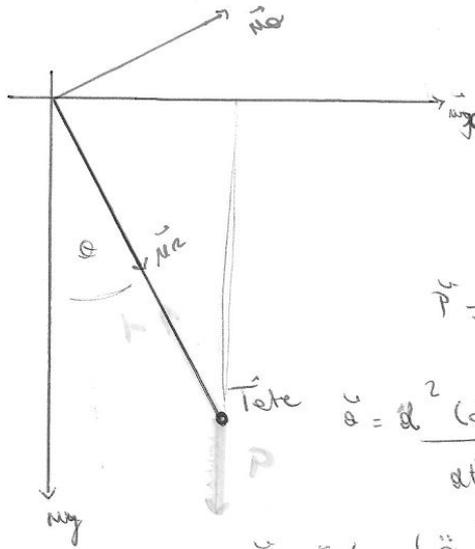
<http://12pro.perso.sfr.fr/LIVRES/M%e9canique/M%e9canique%20des%20structures%20%20R%e9sistance%20des%20mat%e9riaux.pdf>

http://www.ecole.ensicaen.fr/~chateign/enseig/meca/Resistance_des_Materiaux.pdf

VI. Annexes

VII. 6.1 Démonstration accélération tangentielle :

Résolution problème Newton de Chapry:



on néglige : - le poids du bras
- les frottements sur le bras et la tête du balancier.

$$\vec{P} = mg \vec{u}_y \quad \vec{T} = T \vec{u}_r \quad \vec{OT} = L \vec{u}_r$$

$$\vec{a} = \frac{d^2}{dt^2} (\vec{OT}) = L \frac{d^2 \vec{u}_r}{dt^2} = L \frac{d^2 \theta}{dt^2} \vec{u}_\theta$$

$$\vec{a} = L \times (\ddot{\theta} \vec{u}_\theta - \dot{\theta}^2 \vec{u}_r)$$

$$(\vec{u}_\theta)' = -\dot{\theta} \vec{u}_r$$

$$(\vec{u}_r)' = \dot{\theta} \vec{u}_\theta$$

PFD

$$mg \vec{u}_y - T \vec{u}_r = m L \ddot{\theta} \vec{u}_\theta - m L \dot{\theta}^2 \vec{u}_r$$

projeté sur \vec{u}_r :

$$mg \cos(\theta) - T = -L \dot{\theta}^2$$

$$\dot{\theta}^2 = \frac{T - mg \cos(\theta)}{m L}$$

projeté sur \vec{u}_θ :

$$- \frac{g \sin(\theta)}{L} = \ddot{\theta}$$

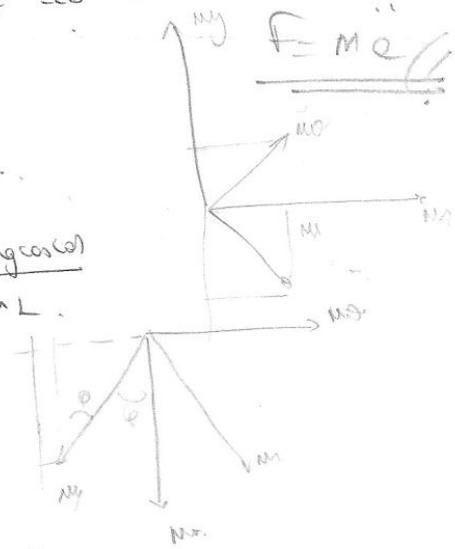
si θ est de petite oscillation $\ddot{\theta} + \frac{g}{L} \theta = 0$

alors $\vec{a} = -g \sin(\theta) \vec{u}_\theta + \frac{(T + mg \cos(\theta)) \vec{u}_r}{m}$

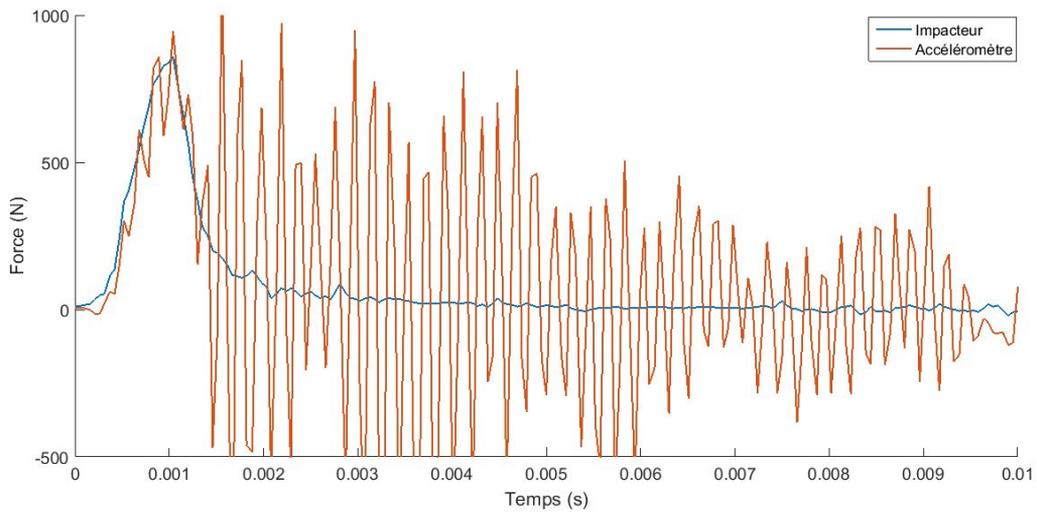
accélération tangentielle = $-g \sin(\theta) \vec{u}_\theta$

$$F = m \frac{dV}{dt}$$

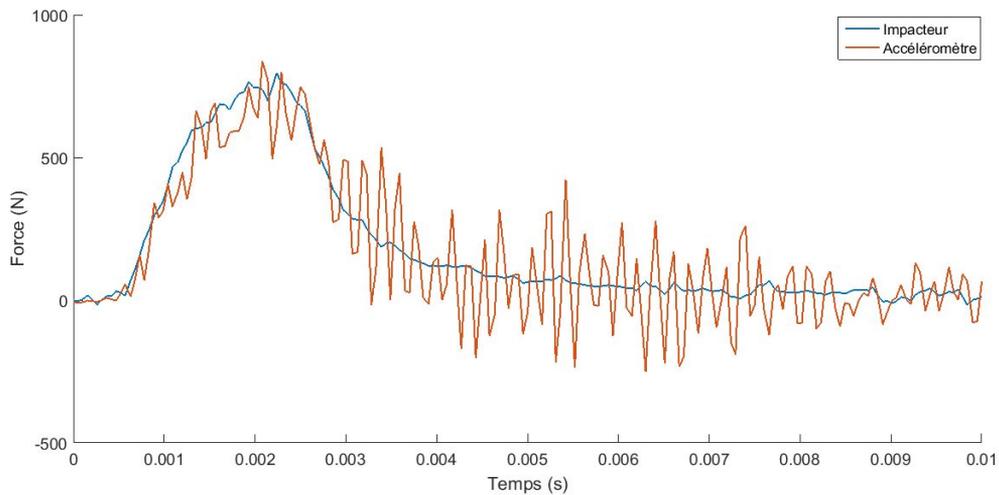
$$F = m \ddot{e}$$



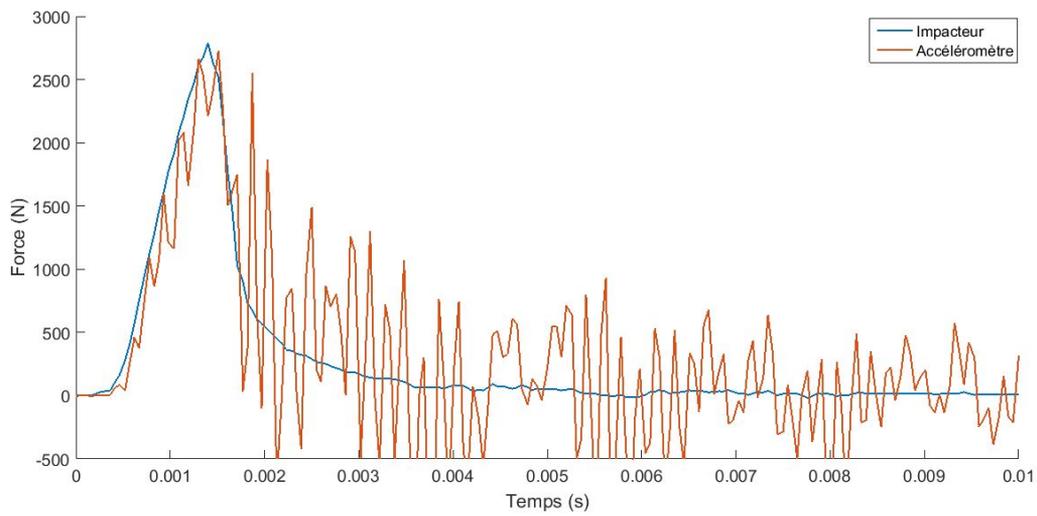
VII.1. 6.1 Courbes obtenues lors des tests expérimentaux :



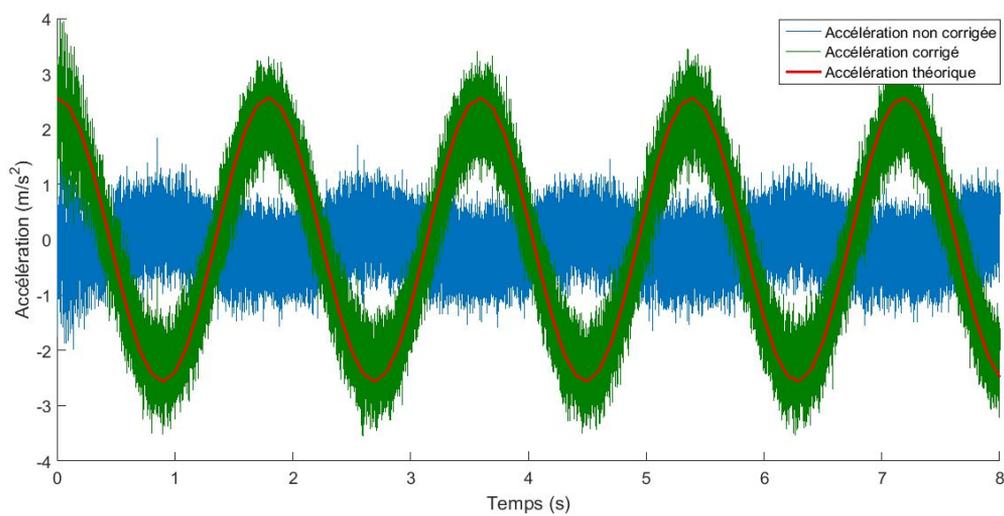
Courbe 1: Force exercée sur l'éprouvette par le couteau au cours du temps (le pic correspond à l'impact)



Courbe 2 : Force exercée par le couteau sur l'éprouvette au cours du temps



Courbe 3 : Idem



Courbe 4 : Accélération tangentielle expérimentale et théorique (ici elles sont quasiment identiques donc l'accéléromètre a été correctement étalonné)