

*Projet de Physique P6*  
*STPI/P6/2014 – 015*



**Étude du comportement mécanique en traction du  
fer pur**

**Etudiants :**

**Pierre MULLER**

**Shaochen GUO**

**Yang LI**

**Clément COLLET**

**Mohamed BOUKHARI**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Clément Keller**



Date de remise du rapport : **16/06/2014**

Référence du projet : **STPI/P6/2014 – 015**

Intitulé du projet :

## ***Étude du comportement mécanique en traction du fer pur***

Type de projet : ***Expérimental***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

***Le rapport entre la température et la taille de grains, la dureté, et les caractéristiques d'essai de traction (Module de Young, limite rupture etc.)***

***Les relations entre le temps de cuisson et la taille de grains, la dureté, et les caractéristiques en essai de traction.***

***L'évolution de tailles de grains en fonction du temps de cuisson et de la température.***

Mots-clefs du projet :

***fer pur, température, dureté, essai de traction***

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : ***non-existant***

# TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie & Organisation du travail.....	7
3. Théories et procédures expérimentales.....	7
3.1. Polissage .....	7
3.2. L'attaque chimique .....	7
3.3. La dureté.....	8
3.4. Le microscope.....	9
3.4.1 La méthode par comptage du nombre de grains.....	10
3.4.2 La méthode par intersection.....	10
3.4.3 Méthode par comparaison avec des images types.....	11
3.5. Essai de traction .....	11
3.5.1 Généralités sur l'essai de traction.....	11
3.5.2 Protocole : Traitement des données .....	15
3.5.3 Protocole de l'essai de traction.....	16
4. Résultats obtenues et explications.....	17
4.1. Essai de dureté .....	17
4.1.1 Dureté en fonction du temps.....	17
4.1.2 Dureté en fonction de la taille de grain.....	19
4.2. Microscope.....	20
4.3. Essai de traction.....	21
4.3.1 Résultats et analyse.....	21
4.3.2 Problèmes rencontrés et raisons probables.....	22
5. Conclusion.....	23

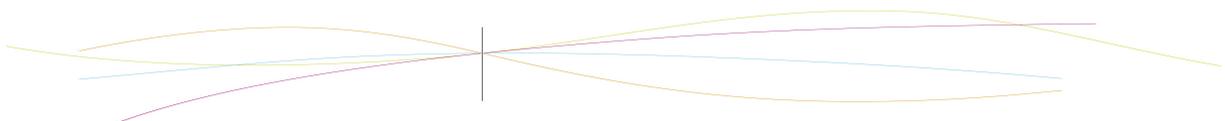
## NOTATIONS, ACRONYMES

HV : Symbole normalisé de la dureté Vickers, pour étudier la dureté des matériaux.

ng : Nombre de grains observé dans un périmètre.

dm : Taille moyenne des grains dans un échantillon.

$\sigma$  : La contrainte subit par un matériau.



## 1. INTRODUCTION

Dans le cadre de nos études à l'INSA et dans le but de devenir de véritables ingénieurs, il nous est demandé de mener à bien plusieurs projets pour acquérir une méthode de travail efficace en groupe. Chacun de ces projets nous permet d'enrichir individuellement nos compétences dans les sciences appliquées de hier et de demain.

Pour notre projet de physique P6, nous avons choisi de travailler sur le comportement mécanique du fer. Pourquoi le fer ? Certes c'est un matériau qui symbolise le passé industriel mais aussi les débuts de la mécanique et du développement humain ; il n'est pas ridicule de dire que cet élément a joué un rôle central dans le développement de l'Humanité.

De plus, il nous a semblé évident que sa contribution à l'économie et la science était loin de s'achever. Connaître les caractéristiques comportementales du métal le plus incontournable de la science des matériaux est un atout non négligeable pour un élève ingénieur.

Nous avons convenu que notre projet prendra la forme d'une étude expérimentale pour mettre à jour les liens entre les facteurs définissant la structure métallique et les données issues des différents tests de comportement. Au vu de l'intitulé du projet, il paraît évident que l'essai de traction devait avoir une place centrale, mais nous avons complété ces essais avec des tests au duromètre. Nous nous sommes aussi penché sur le rôle joué par la taille des grains dans la structure du métal.

Au final, notre projet est une étude statistique sur l'influence de plusieurs paramètres, ceux du recuit (Température de cuisson et temps), la taille de grain, l'épaisseur de l'échantillon, sur des données comme la dureté, le module de Young, la limite élastique et la limite à la rupture.



## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous sommes cinq dans le groupe. Au début de notre projet, nous travaillions tous ensemble pour bien connaître l'utilisation des machines et élaborer la marche à suivre pour achever notre projet. Pour des raisons d'efficacité, nous avons divisé le groupe : Mohammed et Clément se sont concentrés sur la machine à essai de traction, dans la salle de travaux pratiques voisines, et ont obtenus la bibliographie et les résultats pour le module de Young, la limite élastique et à la rupture. Dans le même temps, Shaochen, Yang et Pierre se sont concentré sur la préparation, l'essai de dureté des échantillons et l'analyse des résultats obtenus.

De même, l'élaboration du rapport s'est fait grâce à plusieurs Google doc, permettant à chacun de travailler séparément pour regrouper facilement les rapports écrits.

## 3. LA THÉORIE ET LES PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

### 3.1. Polissage

Avant de procéder, il faut mettre les gants et le blouson en raison de sécurité.

Grâce à la machine de polissage, nous avons pu polir les échantillons enrobés d'une façon efficace.

Nous avons commencé les polissages avec le papier à polir de 600# pour enlever la partie plastique noire, et faire apparaître la partie métallique.

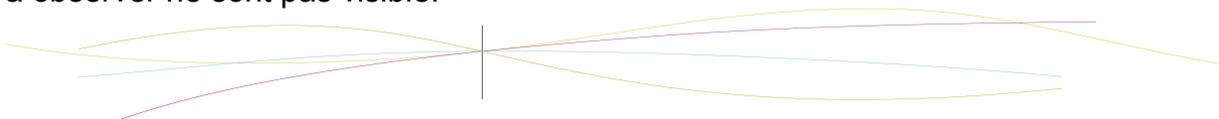
Une fois l'échantillon est bien visible, on place le papier à polir de 1200#. Le point délicat du changement de papier c'est qu'il faut polir d'une manière perpendiculaire avec précédemment afin d'enlever les rayures précédentes.

Nous avons répété ce processus en utilisant les papiers à polir de 600#, 1200#, 2000# et fini par le 4000#.

Finalement, nous avons obtenu les échantillons avec des surfaces assez fines pour l'essai de dureté ainsi que l'attaque chimique.

### 3.2. Attaque chimique

Après polissage, la surface d'un échantillon n'est pas observable ; la paroi est strié par le traitement. Au microscope, on voit que la mise au point n'est pas faisable pour observer uniformément la surface, de plus les cristaux de matières que l'on cherche à observer ne sont pas visible.



Pour résoudre ces deux problèmes, on recourt au Nitral, qui est une solution d'acide nitrique dissous fortement dans l'éthanol (à peu près 10%). L'attaque du produit sur l'échantillon aplanit dans un premier temps la surface, éliminant les stries dû au polissage ; après quoi, l'acide s'attaque aux espaces entre les cristaux, permettant de les mettre en relief et de les rendre clairement visible au microscope.

Pour effectuer l'attaque chimique, il faut au préalable être équipé d'une blouse, une paire de gants pour chimiste, des lunettes de protection et s'installer sous une hotte.

-Verser une goutte de Nitral sur l'échantillon, s'assurer qu'elle recouvre la surface polie.

-Laisser agir quelques secondes.

-Nettoyer à eau vive rapidement.

-Finir de nettoyer avec de l'éthanol pour éviter que l'eau corrode le fer, puis sécher.

L'échantillon est alors observable par microscope.

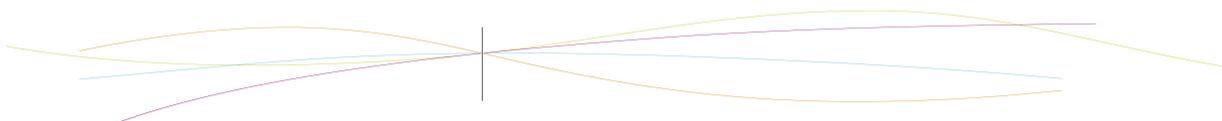
### 3.3. Dureté

Nous avons huit échantillons de fer :

- Brute
- 2 heures à 780° et à 900°
- 8 heures à 780° et à 900°
- 16 heures à 780° et à 900°
- 24 heures à 900°

Pour chaque pièce, grâce au duromètre, nous avons apposé un poids de 40 kg pour une durée de trois secondes minimum. Nous avons ensuite mesuré les diagonales du carré formé dans la pièce à l'aide du système d'observation. A l'aide de la formule ci dessous, nous avons déterminer la dureté pour chaque « poinçon » puis calculé la moyenne de ces valeurs et l'écart type.

$$Hv = 1.8544 * \text{Poids ( Kg )} / (\text{Distance (mm)})^2$$

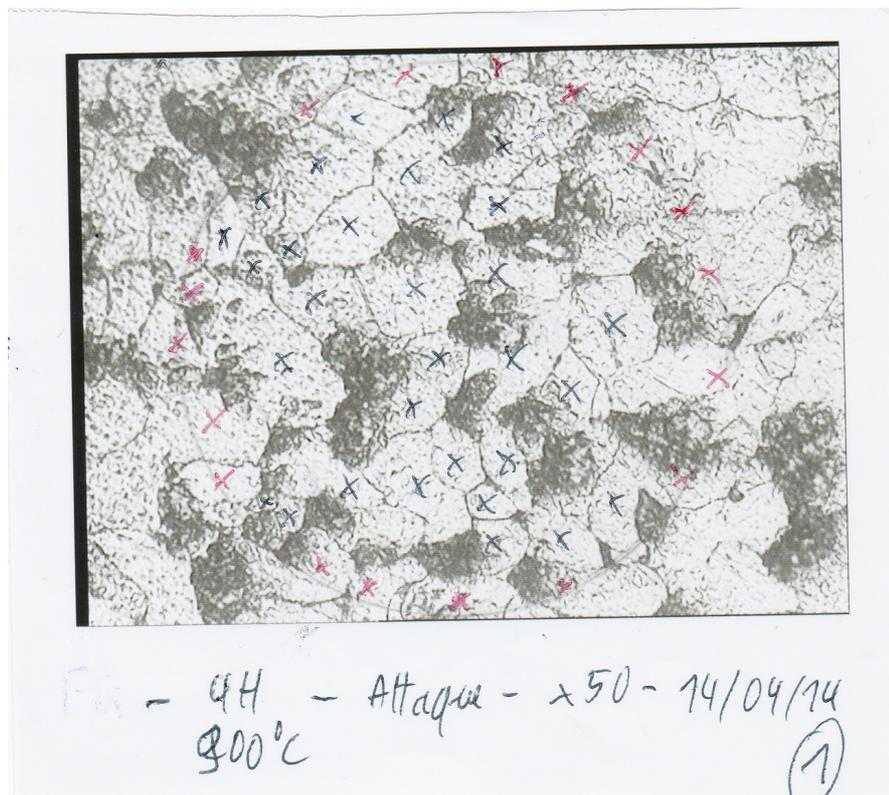


### 3.4. Microscope

Nous avons différents échantillons de fer ( brut, 2h, 8h, 16H, 24h) que nous avons observé au microscope optique, afin d'obtenir une photographie (x50). Ce grossissement était le plus adéquat pour permettre d'observer correctement les grains.

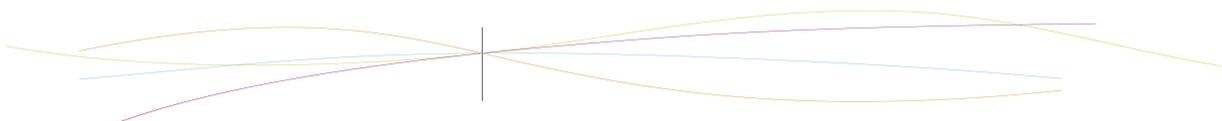
Il était important pour notre projet d'observer la taille des grains, car c'est un élément déterminant de la structure des métaux et donc du fer, et le microscope optique nous offrait un bon moyen de les observer avec suffisamment de précision.

Nous avons observé sur les photos qu'en gris nous avons les grains et en noir le phénomène d'oxydation ( le fer s'oxydant facilement).



*Illustration 1: Exemple d'observation au microscope*

Afin de déterminer la taille des grains, nous avons à notre disposition le manuel *Des Matériaux*, emprunté à la BU, qui nous proposait 3 solutions:



### 3.4.1. La méthode par comptage du nombre de grains

Cela consistait à tracer un cercle d'un certain diamètre ( de sorte à ce que ça tienne sur la photo évidemment) et de compter les grains à l'intérieur de ce cercle et sur le cercle. On a noté  $n_1$  le nombre de grains à l'intérieur et  $n_2$  le nombre de grains sur le cercle.

On pouvait ensuite appliquer la formule  $n_g = n_1 + n_2/2$ , ce qui nous donnait le nombre de grains.

La formule suivante nous donnait le nombre  $m$  de grains par unité d'aire de la surface de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ ).

$m = 2 * n_g * (g/100)^2$  avec  $g$  le grossissement linéaire, ici 50.

A partir de cela on obtient la taille moyenne du grain  $d_m = 1/\text{racine carré}(m)$ .

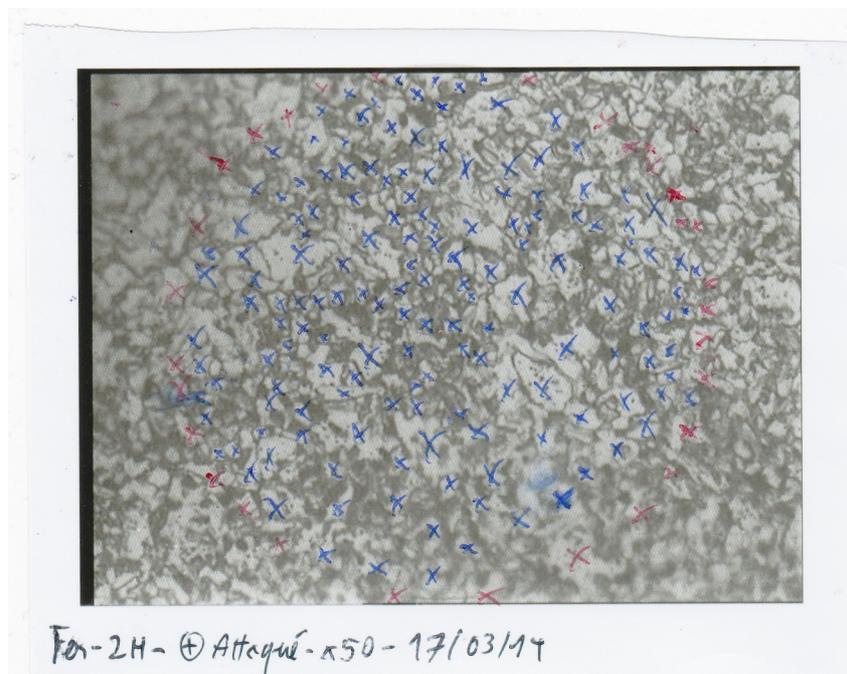


Illustration 2: Exemple de comptage de grain

### 3.4.2. La méthode par intersection

#### 1) linéaire

Cela consistait à tracer 4 segments sur notre photo, dont la taille totale était 500mm (diminuée car la photo était trop petite) . Il fallait un segment horizontale, un verticale et deux diagonales.



Selon certaines règles, il fallait compter les grains qui étaient placés sur ces segments, cela revenait donc à compter le nombre d'intersections. Il était nécessaire d'avoir 50 intersections par mesure.

## 2) circulaire

Cela revenait au même principe pour compter à l'exception qu'il fallait tracer trois cercles à défaut de 4 segments.

### 3.4.3. Méthode par comparaison avec des images types

Nous ne pouvions appliquer cette méthode parce qu'elle était trop compliquée. Il fallait attribuer des indices aux grains puis compter, et ensuite évaluer grâce à un tableau.

Nous avons pris un échantillon et avons essayé les deux premières méthodes sur ce même échantillon afin de comparer la précision. Il nous a semblé que la première méthode était la plus efficace bien qu'elle soit fastidieuse.

## 3.5. Essai de traction

### 3.5.1. Généralités sur l'essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental ainsi que le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à une traction et à mesurer l'allongement correspondant. Un essai de traction nous permet de mettre en évidence et de caractériser certaines propriétés mécaniques grâce au dépouillement de la courbe d'essai de traction, nous permettant de tracer la contrainte en fonction de la déformation.

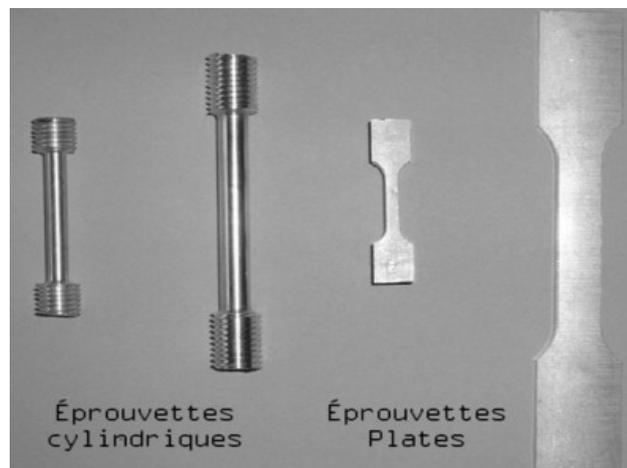


Illustration 3: Les différents types d'éprouvettes



Il est donc nécessaire pour réaliser un essai de traction, d'avoir en notre possession une éprouvette, vérifiant certaines normes. Il existe différents types d'éprouvettes, comme présenté ci dessus (illustration 3).

Nous avons travaillé avec des éprouvettes plates.

Cet essai destructif, pratiqué à température ambiante 20°C, consiste à imposer une déformation croissante à vitesse constante et à mesurer l'effort nécessaire pour imposer cette déformation.

Sur un diagramme contrainte-déformation, il nous est possible d'observer différentes phases :

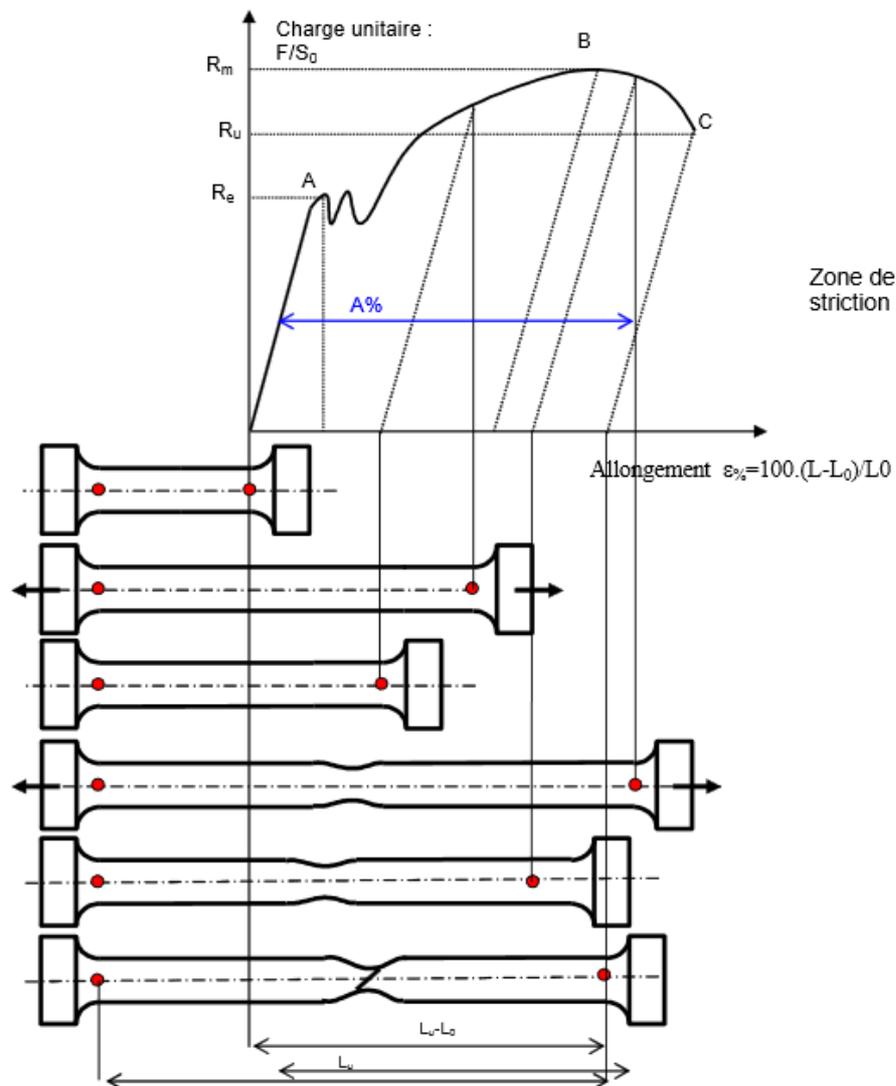


Illustration 4: Diagramme contrainte-déformation, et observation de l'éprouvette.



ZONE OA : domaine des déformations élastiques ou réversibles (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales.

ZONE AB : la déformation n'est plus complètement réversible. La déformation est plastique (ou permanente) homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

ZONE BC : la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la striction, on aboutit à la rupture en C, les allongements croissent avec une diminution de la charge.

Il est maintenant nécessaire de donner quelques définitions concernant les valeurs que nous pourrions extraire de cette courbe de traction. On utilisera les coordonnées suivantes :

-en abscisse : l'allongement relatif d'une éprouvette ou plutôt d'une certaine base  $L_0$ ,

Donc on a :

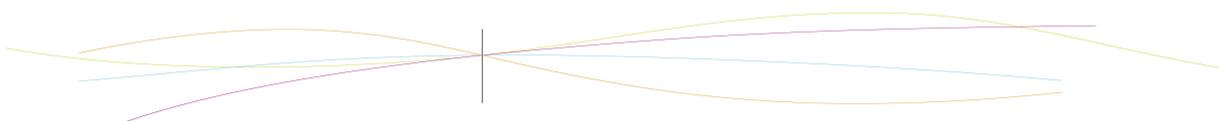
$$\frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\left| \varepsilon\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0} \right|$$

-en ordonnée : la charge unitaire (Mpa) définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette  $S_0$  :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Le point A correspond à la limite d'élasticité ou résistance élastique à la traction. C'est la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est à dire au moment où apparaît la première déformation plastique irréversible. La limite d'élasticité devrait donc correspondre à la contrainte à partir de laquelle il n'y a plus proportionnalité entre contrainte et déformation. Bien que la définition soit simple, une telle limite de proportionnalité est difficile à juger puisque le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive.



Cela dépend donc de la précision que l'on a sur les mesures de l'allongement. C'est pour cela que l'on définit la limite conventionnelle à 0,2%, notée  $R_{e(0,2)}$  qui est la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à 0,2%.  $R_e$  s'exprime en Méga Pascal.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}$$

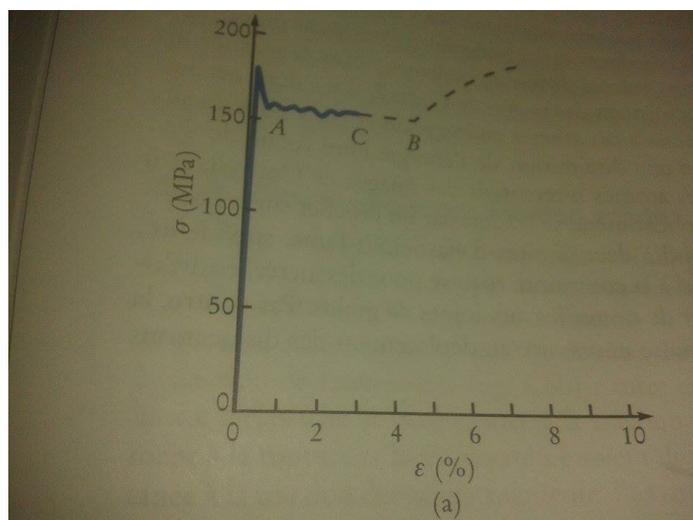
Le point B correspond à la charge maximale; il est appelé résistance à la traction ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) :

$$R_m = \frac{F_r}{S_0}$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction et s'exprime en Méga Pascal. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au delà du point B. Le point C correspond lui à la charge ultime.

A partir de cette courbe, nous pouvons également obtenir le module de Young ou le module d'élasticité. Il est définie comme la pente de la partie droite partant de l'origine du diagramme. En théorie, pour déterminer cette valeur il est nécessaire d'utiliser un extensomètre de bonne précision.

En effet, la rigidité finie, même de la machine la plus robuste, est susceptible de modifier la pente. Il est également nécessaire de faire en sorte que l'éprouvette soit proprement alignée, afin que la première partie de la courbe ne soit pas trop alignée. Durant nos expériences, nous avons également pu évaluer le palier de Lüders.



*Illustration 5: Palier de Lüders sur un graphe de contrainte-déformation*

La courbe de traction présente une discontinuité à la limite d'élasticité, discontinuité suivie d'un palier de A à B dont on doit mesurer le pourcentage d'allongement. Ce palier correspond au palier de Lüders.

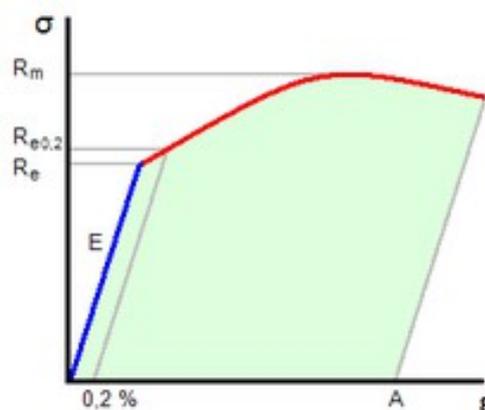
### 3.5.2. **Protocole : Traitement des données**

Après avoir effectué les différents essais de traction, nous avons été obligé d'importer les données, à la base en fichier *text*, sur le logiciel *Excel*. Il a été nécessaire de faire certaines modifications sur la forme qu'avaient nos données. En effet, elles n'étaient pas triées il fallait donc réorganiser ces données en colonne distincte. Les données étant triées, il ne reste qu'à effectuer nos calculs. Nos dispositions de différentes variables : « Time, Sequence, Block, Cycle, Position, Load, Strain, None Volts ». Toutes ces variables ne sont pas nécessaire pour notre étude. En effet, nous allons tracer une courbe d'essai de traction, il nous faut donc la contrainte en fonction de la déformation.

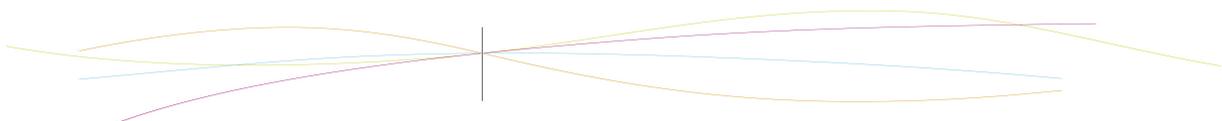
La contrainte s'exprime en MPa, et correspond à la force divisée par la section. Nous avons déjà la forme en kN (Load), mais nous ferons attention à la convertir en Newton donc à multiplier par 1000. Il nous faut donc calculer la section qui correspond à l'épaisseur de l'éprouvette multipliée par la largeur.

Il nous faut maintenant obtenir la déformation, sans unité, et correspond à la valeur absolue de la différence entre la position à un instant t et la position initiale, le tout divisé par la longueur entre les mors, c'est à dire  $L_0$ .

Ce travail réalisé, il ne nous reste qu'à tracer les courbes. Pour plus de commodité, on précisera que l'on veut 7 décimales pour la déformation. Cela permettra d'avoir une précision plus importante lors de nos prochains calculs.



*Illustration 6: Exemple type de courbe-résultat*



Nous devons ensuite, à l'aide de la courbe d'essai de traction, extraire les paramètres qui nous intéressent : « le module de Young, la limite élastique, la contrainte de rupture, le palier de Lüders ».

Le module de Young correspond au coefficient direction de la pente :

$$\sigma = E \varepsilon$$

\*sigma est la contrainte (MPa);

\*E est le **module de Young** (MPa);

\*epsilon est l'allongement relatif, ou déformation (dimensionnel).

Pour déterminer le plus précisément possible ce coefficient, nous allons prendre une faible portion de données, approximativement, celles correspondantes à la pente de notre essai de traction. Après avoir obtenu cette courbe, il nous suffit de faire apparaître une courbe de tendance => afficher l'équation. Le coefficient directeur est donc notre module de Young en MPa.

### 3.5.3. **Protocole de l'essai de traction**

Il nous a été fourni différentes éprouvettes de fer, ayant été soumis à différentes température et durant différentes durées. Nous allons détaillé les étapes essentiels d'un essai de traction.

- Mesurer la pièce afin d'obtenir la largeur, la longueur totale, la distance entre les 2 mors et l'épaisseur de la pièce . Pour chaque valeur, nous procédions à 3 mesures : aux deux extrémités et au milieu. Nous obtenions aussi la valeur moyenne. Ces valeurs nous donnent la section de la pièce ( largeur\*épaisseur).
- Placer l'éprouvette dans le vérin, vérifier l'alignement et serrer légèrement. Monter doucement l'éprouvette dans le mors du haut et afin serrez au maximum.
- Au niveau de l'ordinateur, il faut lancer WaxeEdit et régler le mode « Position », Extrémité « 40mm », cadence « 2mm/min » et enfin lancer WaveRun pour procéder à l'essai.

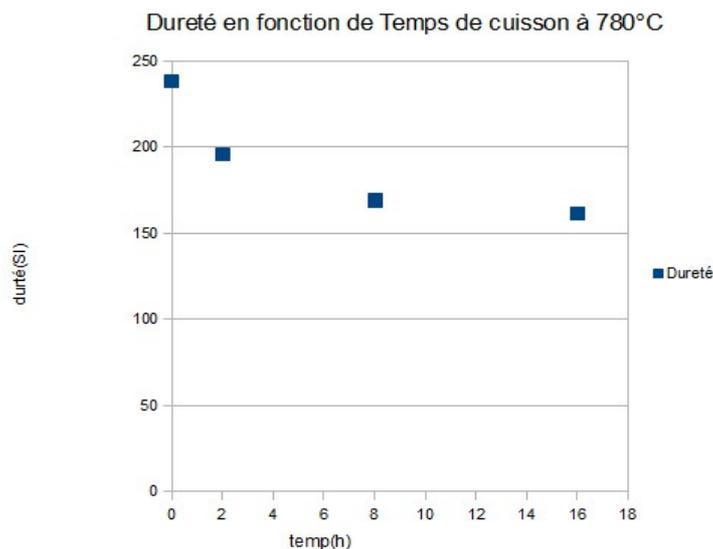


- Durant l'essai à proprement parlé, il n'y a rien à faire.
- Une fois l'essai fini, il faut desserrer et retirer les morceaux d'éprouvette bloqués dans les mors, et désactiver la machine.
- Transférer les données sur un ordinateur récent. Les données étant encodés dans un format particuliers, on doit lors de l'ouverture avec Open Office préciser que les « : » représentent des séparation de colonnes.

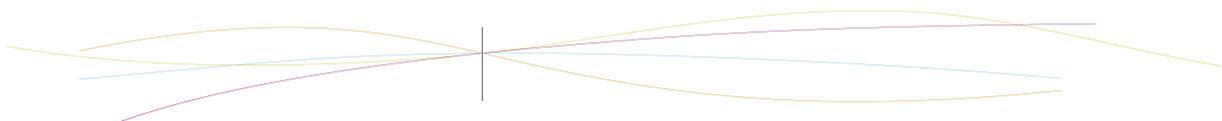
## 4. RÉSULTATS OBTENUS ET EXPLICATIONS

### 4.1. Essai de dureté

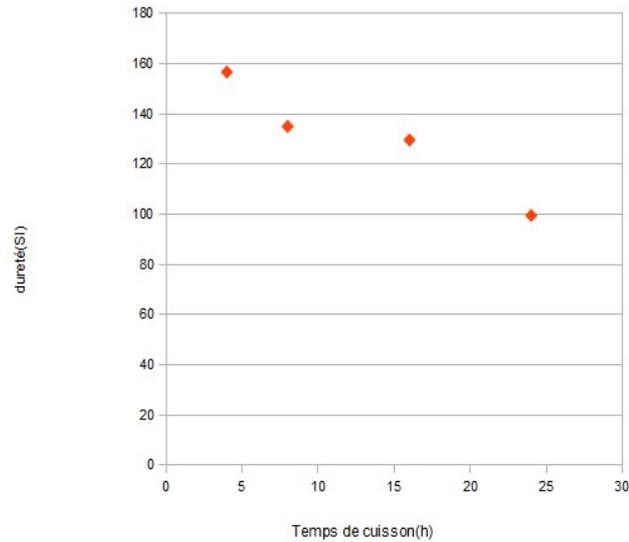
#### 4.1.1. Dureté en fonction de temps de cuisson



Premièrement nous observons que la dureté diminue en augmentant le temps de cuisson à 780°C. Ce résultat est-il vrai ? Nous l'avons vérifié en augmentant la température de cuisson , de 780°C à 900.



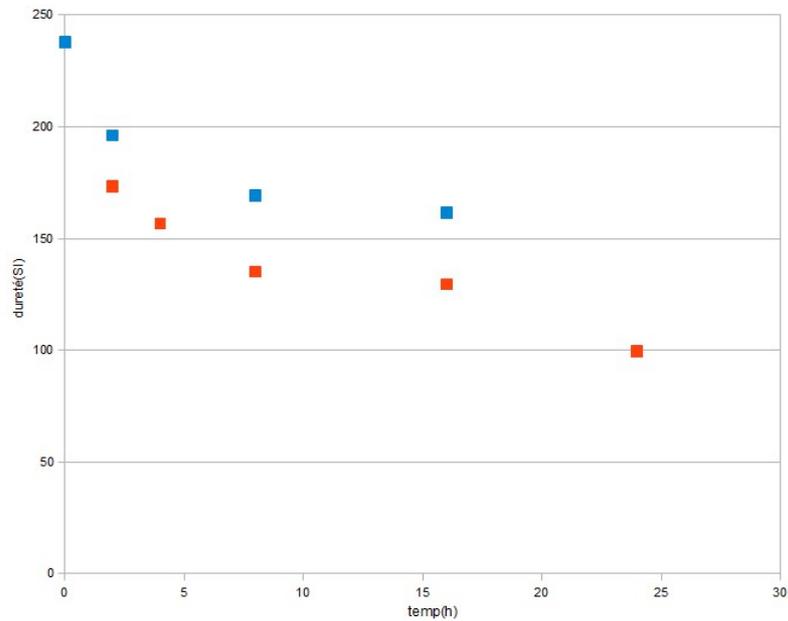
Dureté en fonction de Temps de cuisson à 900°C



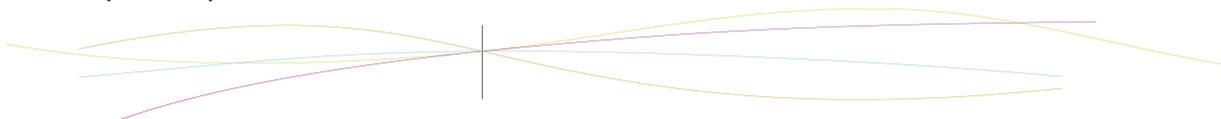
Ici on peut remarquer qu'à 900°C, l'évolution de la dureté est la même que celle à 780°C. Ceci vérifie l'hypothèse précédente : La dureté diminue avec la durée de recuit.

Vue que nous observons que la dureté diminue en augmentant la température, nous voulons savoir l'influence de température sur la dureté. C'est pourquoi nous avons élaboré le diagramme ci-dessous :

Comparaison d'évolution de la dureté

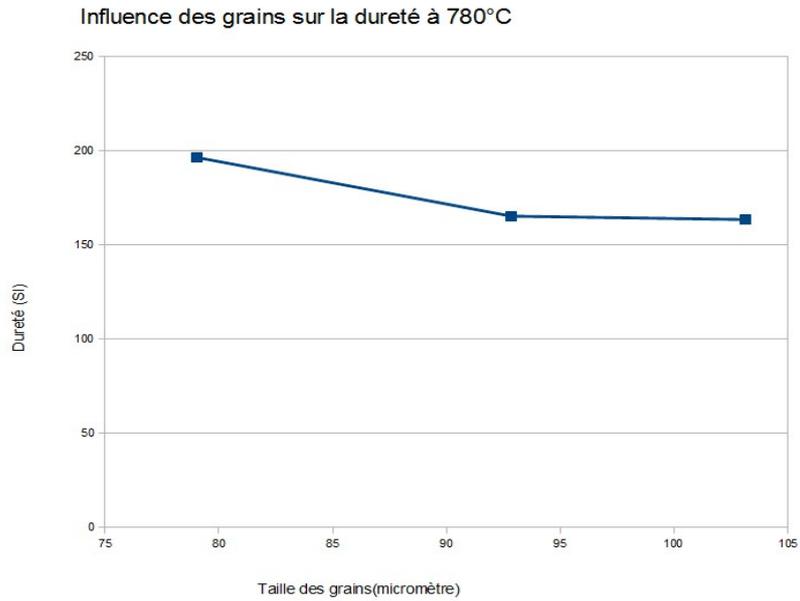


Une première constatation est qu'en subissant le même temps de cuisson, l'échantillon qui à une température de recuit plus faible a une tendance à avoir une dureté plus importante.

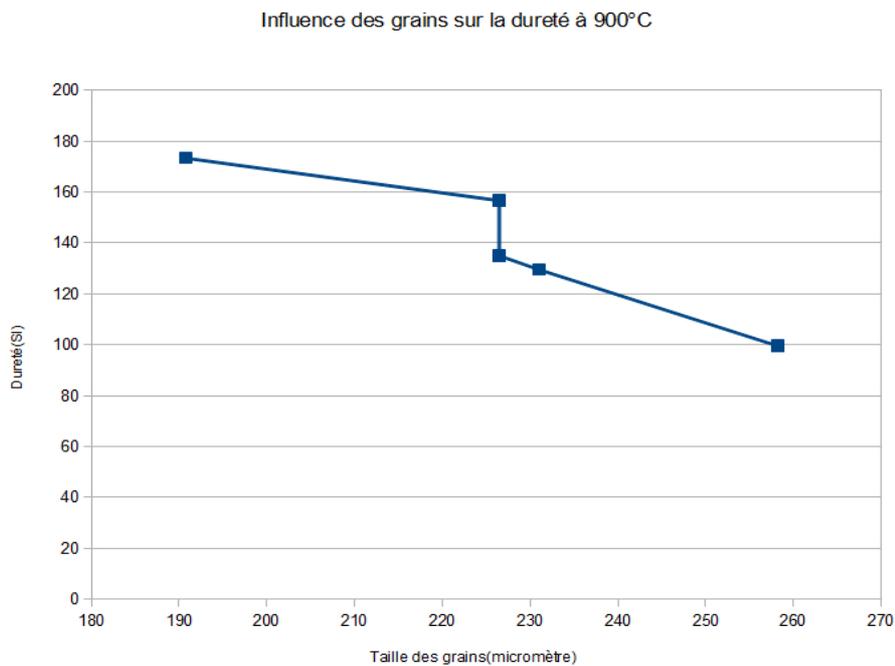


### 4.1.2. Dureté en fonction de taille de grains

Grâce au microscope, nous avons pu obtenir les tailles de grains en fonction de différentes températures et également le temps de cuisson.



Ici on constate que la dureté diminue en fonction de temps de cuisson à 780°C. Le même résultat est obtenu à 900°C.



Cela signifie que la taille de grains est la cause structurelle de l'évolution de la dureté. Plus gros sont les grains, moins dur sera l'échantillon.

#### 4.2. Microscope

Lors de l'observation des échantillons au microscope, on pouvait observer ceci :

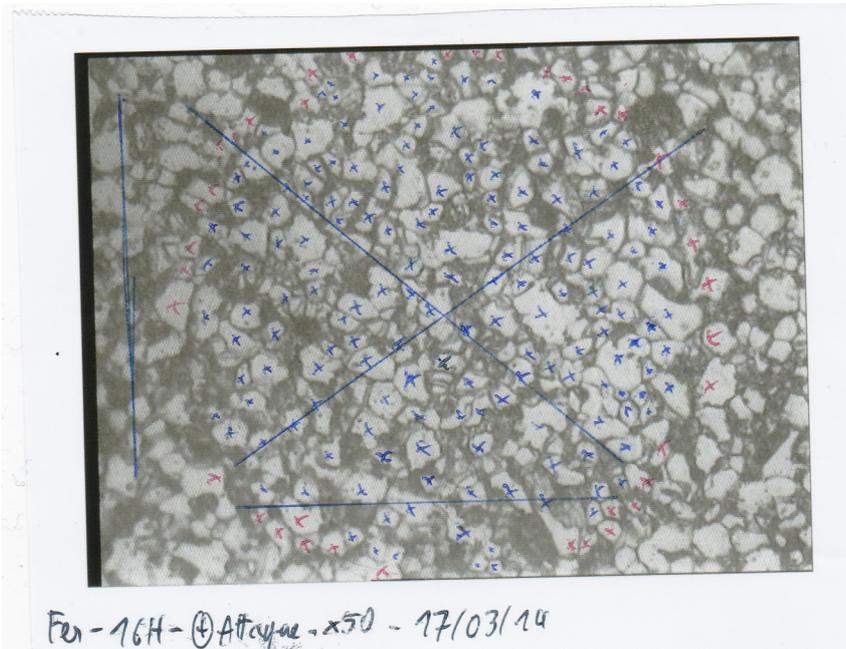
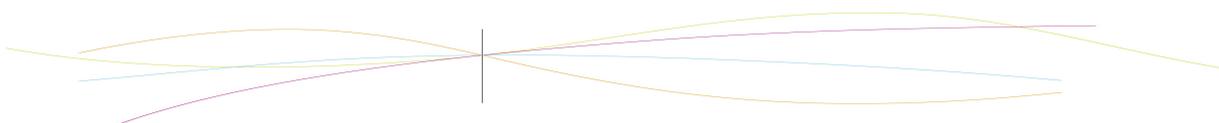


Illustration 7: Observation de l'échantillon 16h à 780°C au grossissement x50

Grâce à la formule de détermination de la taille des grains vu en 3.4), nous avons pu obtenir un tableau de données sur l'influence du recuit sur la taille des grains du fer :

Temps de recuit	Brut	2 heures (780°C)	4 heures (900°C)	8 heures (780°C)	16 heures (780°C)	16 heures (900°C)	24 heures (900°C)
Taille de grains (µm)	142,86	79,06	226,46	92,85	103,14	577,35	2582

Le tableau étant tronqué car nous n'avons pas la place de présenter toutes les valeurs, nous ne montrons qu'un échantillon significatif.



En conclusion, on observe que l'augmentation du temps de cuisson augmente sensiblement la taille des grains dans la structure.

De plus, on observe que l'augmentation de la température de cuisson augmente aussi la taille de grain, et ce de façon beaucoup plus drastique : la taille des grains dans la structure des échantillons de 16 heures passe de 100 à plus de 500 avec l'augmentation de température !

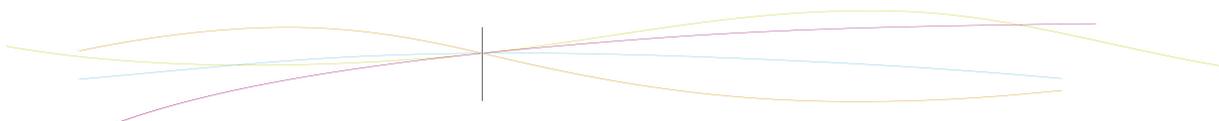
### 4.3. Essai de traction

#### 4.3.1. Résultats et analyse

Temps de cuisson	2 heures (900°C)	4 heures (900°C)	8 heures (780°C)	16 heures (780°C)	Pur
Module de Young (GPa)	13,55	14,55	23,85	51,4	196
Limite élastique (MPa)	23,02	33,7	61,06	88,7	180
Contrainte de rupture (MPa)	564	514,49	621,12	535,11	300
Palier de Lüders (%)	X	X	5	11,48	X

Nous constatons que plus nous chauffons à une haute température, plus le module de Young diminue, donc moins le matériaux est rigide. Par contre, à une température donnée, plus on chauffe longtemps, plus le module de Young augmente.

Pour la contrainte de rupture, plus la température augmente, plus elle est faible, tout en restant supérieur à celle du fer pur non chauffé. Cette contrainte correspond à la contrainte maximal que peut subir le matériaux. Donc la cuisson permet au fer de subir des contraintes plus importantes sans céder.



Pour le palier de Lüders, il augmente avec le temps de cuisson. Nous remarquons qu'il n'y a pas de palier avec une température trop importante.

La limite élastique est la contrainte pour laquelle un matériaux arrête de se déformer de manière réversible. On remarque que plus nous soumettons le fer a des fortes températures, plus celle-ci baisse mais qu'a une même température, plus le fer est chauffé longtemps, plus celle-ci augmente.

#### **4.3.2. Problèmes rencontrés et raisons probables**

A plusieurs reprises, les éprouvettes ont glissé de un à deux centimètres durant l'essai. Ce décalage peut signifier une importante incertitude sur les données obtenus. Nous avons essayé de mieux caler les mors, de serrer à l'extrême mais ce problème fut présent à chaque essai. Aujourd'hui, on utilise des mors hydrauliques qui assurent un serrage homogène.

Un autre problème rencontré lors des deux derniers essai est que les éprouvettes ont cédé dans les mors et non pas entre les deux. Cela est du au faite que nos éprouvettes n'étaient pas « parfaites », elles étaient rectangulaires et donc ne pressentaient pas de zone plus fine au milieu qui auraient pu placées la cassure à l'endroit choisi.

Malgré cela, notre démarche globale étant bonne, nos données peuvent être utilisés pour les calculs, afin d'obtenir une estimation des paramètres étudiés.



## 5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre projet s'est articulé autour du fer, qui est le métal le plus utilisé dans notre industrie. Cette étude nous a permis non seulement d'avoir plus de connaissances sur le fer, mais aussi sur les démarches expérimentales permettant d'étudier un métal, à savoir les études de la dureté ; les études des grains grâce à la machine de polissage et le microscope ; et les études du comportement mécanique en essai de traction.

En outre, nous avons appliqué la méthode scientifique dans une expérience. Celle-ci nous permet d'affirmer que les hypothèses suivantes sont raisonnablement validées :

- Nos deux paramètres, le temps de recuit et la température sont indépendants ;
- La taille des grains dans la structure augmente avec la température et la durée de recuit ;
- Le module de Young diminue quand la température augmente. Cependant, à une température donnée, plus la durée de recuit augmente, plus le module de Young augmente.
- La contrainte de rupture diminue lorsque la température augmente.

Ce projet nous a permis de découvrir l'usage de plusieurs machines, notamment la machine de polissage ou le duromètre, et aussi d'avoir vécu l'expérience de mener à bien un projet de physique.

Nous voudrions remercier M. KELLER, grâce à qui nous avons pu mener ce projet à bien car il a pris le temps de nous expliquer précisément les fonctionnements et les démarches qu'il fallait suivre pour obtenir un résultat valable, et qui nous a encadré du début à la fin de ce projet.

Cependant, même si nous avons obtenu des connaissances sur le fer, à cause des contraintes de temps principalement, nous n'avons travaillé que sur un domaine assez limité sur les propriétés du fer.

Pour cette raison, nous proposons une perspective sur l'étude du fer :

*Comportements mécaniques d'acier en fonction de la teneur en carbone.*



## 6. BIBLIOGRAPHIE

Jean Paul BAILON, « Des Matériaux », Presse Internationale Polytechnique, 2000  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite\\_d%27%C3%A9lasticit%C3%A9](http://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_d%27%C3%A9lasticit%C3%A9) (24/03/2014)  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Module\\_de\\_Young](http://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_Young) (24/03/2014)  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance\\_%C3%A0\\_la\\_traction](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistance_%C3%A0_la_traction) (07/04/2014)  
[http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement\\_%C3%A0\\_la\\_rupture](http://fr.wikipedia.org/wiki/Allongement_%C3%A0_la_rupture) (14/02/2014)  
[http://www.atomer.fr/1/1\\_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html](http://www.atomer.fr/1/1_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html) (24/03/2014)  
  
<http://www.youtube.com/watch?v=hdk0VhOshb4> (visionnée le 10/03/2014)

Les illustrations 1), 2) et 7) ont été obtenues par photographie des échantillons du projet.

Les illustrations 4) et 5) proviennent du livre “Des Matériaux”.

Les illustrations 3) et 6) proviennent du site Wikipédia  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eprouvettes\\_traction.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eprouvettes_traction.jpg) (24/03/2014)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Courbe\\_contrainte\\_vs\\_deformation.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Courbe_contrainte_vs_deformation.png) (24/03/2014)

L'illustration de couverture provient du site de l'entreprise bronzeAlu <http://www.bronze-alu.fr/>  
[http://www.bronze-alu.fr/medias/images/entreprise/fonderie\\_01.jpg](http://www.bronze-alu.fr/medias/images/entreprise/fonderie_01.jpg) (15/06/2014)

