

EFFET D'UN LAMINAGE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE D'ACIER FAIBLEMENT ALLIE



Etudiants :

**Julien CARMONA
Eva MAIRE
Cyril ROUSSEL**

**Laure FERCHAUD
Antoine ROBIN**

Enseignant-responsable du projet :

Clément KELLER

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

Référence du projet : **STPI/P6/2014 – 18**

Intitulé du projet : **Effet d'un laminage sur le comportement mécanique d'un acier faiblement allié**

Type de projet : **Bibliographie et Expérimentation**

Objectifs du projet:

Le laminage est une technique très répandue de mise en forme de tôles métalliques. Il a pour objectif de diminuer l'épaisseur d'un échantillon métallique pour l'adapter aux conditions d'utilisations usuelles dans l'industrie. Néanmoins, cette technique n'est pas sans modifier les propriétés mécaniques et microstructurales des matériaux pouvant influencer la tenue mécanique des pièces mises en forme. L'objectif de ce projet est ainsi de comprendre l'influence d'un laminage sur les caractéristiques microstructurales ainsi que sur le comportement mécanique en traction.

Mots-clefs du projet :

Laminage, Acier, microstructure, comportement mécanique.

Table des matières

Introduction	1
I) Théorie	2
1) Structure et caractéristiques d'un acier	2
a) Les éléments métalliques	2
b) Le fer	2
c) Caractériser l'acier	3
2) La métallographie	4
a) Tronçonnage	4
b) Enrobage	5
c) Polissage	5
3) Essais mécaniques : Traction et Laminage :	6
1) Les essais de traction :	6
2) Laminage	7
II) Expériences	8
1) Choix du témoin	8
a) Dureté	8
Polissage	8
Expérience	8
Résultats	10
Interprétation	10
b) Calcul de la taille des grains	10
Attaque chimique	10
Détermination du diamètre moyen du grain	11
Résultats	11
Interprétation :	11
Conclusion	12
2) Laminage	12
a) Dureté	13
Expérience	13
Résultats	13
Interprétation	13
b) Etude des grains	13

Expérience:	13
Résultats:	13
Interprétation:	14
c) Les essais de traction	15
Expérience:	15
Résultats :	16
Interprétation :	16
Conclusion générale	18
Bibliographie	19
Annexes	20
Annexe 1 : Tableau détaillé des propriétés du fer	20
Annexe 2 : Diagramme binaire Fer-Carbone	21
Annexe 3 : Résultats des tests de dureté après différents recuits.....	22
Annexe 4 : Photos des zones de comptage de grains	23
Annexe 5 : Résultats des essais de traction	24
Echantillon non laminé :	24
Echantillon laminé 1 fois	25
Echantillon laminé 2 fois	26
Echantillon laminé 3 fois	27

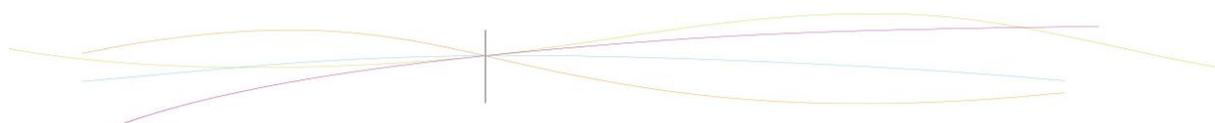
Introduction :

Le laminage est une technique de mise en forme, très utilisée, notamment en métallurgie pour former des plaques de tôles. Son utilité est de réduire l'épaisseur d'un échantillon, pour l'adapter aux différents besoins. Toutefois, il semble probable que cette technique influe sur les propriétés du matériau.

L'objectif de notre projet était donc d'étudier les modifications engendrées au niveau des caractéristiques mécaniques et microstructurales par le laminage sur un acier faiblement allié. Nous avons donc procédé en deux temps. Tout d'abord, nous avons testé la dureté et calculé la taille des grains de différents recuits d'un acier faiblement allié afin de déterminer lequel serait donnerait les résultats les plus fiables pour notre étude. L'échantillon sélectionné a ensuite subi des essais mécaniques. Puis, nous avons laminé une, deux ou trois fois des échantillons du recuit sélectionné, avant de les soumettre à leur tour à des tests de dureté, à une étude microstructurale et à des essais mécaniques. Pour finir, nous avons comparé les différents résultats obtenus.

Pour mener à bien notre projet, après avoir fait ensemble une étude théorique, Laure, Eva et Antoine se sont occupés plus particulièrement de la préparation des échantillons et de l'étude microstructurale, tandis que Cyril et Julien ont effectué les essais de traction et les tests de dureté.

Dans ce rapport, nous commencerons, dans un premier temps, par caractériser les métaux et plus particulièrement les aciers, par présenter la métallographie, les essais de traction et le laminage. Dans un second temps, nous détaillerons nos expériences (choix du recuit, tests) et nos interprétations.



1) Structure et caractéristiques d'un acier

a) Les éléments métalliques

Les métaux sont un groupe d'éléments chimiques partageant un certain nombre de propriétés. Dans le tableau périodique, il s'agit des éléments à gauche de la diagonale entre le bore et le polonium.

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES																	
1 IA 1 H 1,00794 Hydrogène	2 IIA 3 Li 6,941 Lithium	4 IIIA 4 Be 9,01218 Béryllium	5 IIIA 5 B 10,811 Bore	6 IVA 6 C 12,0107 Carbone	7 VA 7 N 14,0067 Azote	8 VA 8 O 15,9994 Oxygène	9 VIA 9 F 18,9984 Fluor	10 VIA 10 Ne 20,1797 Neon	11 VIIA 11 Na 22,9898 Sodium	12 VIIA 12 Mg 24,305 Magnésium	13 VIIIA 13 Al 26,9815 Aluminium	14 VIIIA 14 Si 28,0855 Silicium	15 VIIIA 15 P 30,9738 Phosphore	16 VIIIA 16 S 32,065 Soufre	17 VIIIA 17 Cl 35,453 Chlore	18 VIIIA 18 Ar 39,948 Argon	
19 IIA 19 K 39,0983 Potassium	20 IIA 20 Ca 40,078 Calcium	21 IIIB 21 Sc 44,9559 Scandium	22 IIIB 22 Ti 47,867 Titane	23 IIIB 23 V 50,9415 Vanadium	24 IIIB 24 Cr 51,9961 Chrome	25 IIIB 25 Mn 54,9380 Manganèse	26 IIIB 26 Fe 55,845 Fer	27 IIIB 27 Co 58,9332 Cobalt	28 IIIB 28 Ni 58,6934 Nickel	29 IIIB 29 Cu 63,546 Cuivre	30 IIIB 30 Zn 65,38 Zinc	31 IIIB 31 Ga 69,723 Gallium	32 IIIB 32 Ge 72,63 Germanium	33 IIIB 33 As 74,9216 Arsenic	34 IIIB 34 Se 78,96 Sélénium	35 IIIB 35 Br 79,904 Brome	36 IIIB 36 Kr 83,798 Krypton
37 IIA 37 Rb 85,4678 Rubidium	38 IIA 38 Sr 87,62 Strontium	39 IIIB 39 Y 88,9058 Yttrium	40 IIIB 40 Zr 91,224 Zirconium	41 IIIB 41 Nb 92,9064 Niobium	42 IIIB 42 Mo 95,96 Molybdène	43 IIIB 43 Tc [98] Technétium	44 IIIB 44 Ru 101,07 Ruthénium	45 IIIB 45 Rh 102,905 Rhodium	46 IIIB 46 Pd 106,42 Palladium	47 IIIB 47 Ag 107,868 Argent	48 IIIB 48 Cd 112,411 Cadmium	49 IIIB 49 In 114,818 Indium	50 IIIB 50 Sn 118,71 Étain	51 IIIB 51 Sb 121,76 Antimoine	52 IIIB 52 Te 127,6 Tellure	53 IIIB 53 I 126,905 Iode	54 IIIB 54 Xe 131,293 Xénon
55 IIA 55 Cs 132,905 Césium	56 IIA 56 Ba 137,327 Baryum	57 IIIB 57 La 138,906 Lanthane	58 IIIB 58 Ce 140,116 Cérium	59 IIIB 59 Pr 140,908 Praseodyme	60 IIIB 60 Nd 144,242 Néodyme	61 IIIB 61 Pm [145] Prométhée	62 IIIB 62 Sm 150,36 Samarium	63 IIIB 63 Eu 151,964 Europium	64 IIIB 64 Gd 157,25 Gadolinium	65 IIIB 65 Tb 158,925 Terbium	66 IIIB 66 Dy 162,5 Dysprosium	67 IIIB 67 Ho 164,930 Holmium	68 IIIB 68 Er 167,259 Erbium	69 IIIB 69 Tm 168,934 Thulium	70 IIIB 70 Yb 173,054 Ytterbium	71 IIIB 71 Lu 174,967 Lutécium	
87 IIA 87 Fr [223] Francium	88 IIA 88 Ra [226] Radium	89 IIIB 89 Ac [227] Actinium	90 IIIB 90 Th 232,038 Thorium	91 IIIB 91 Pa 231,036 Protactinium	92 IIIB 92 U 238,029 Uranium	93 IIIB 93 Np [237] Neptunium	94 IIIB 94 Pu [244] Plutonium	95 IIIB 95 Am [243] Americium	96 IIIB 96 Cm [247] Curium	97 IIIB 97 Bk [247] Berkélium	98 IIIB 98 Cf [251] Californium	99 IIIB 99 Es [252] Einsteinium	100 IIIB 100 Fm [257] Fermium	101 IIIB 101 Md [258] Mélium	102 IIIB 102 No [259] Nébulium	103 IIIB 103 Lr [262] Lawrencium	

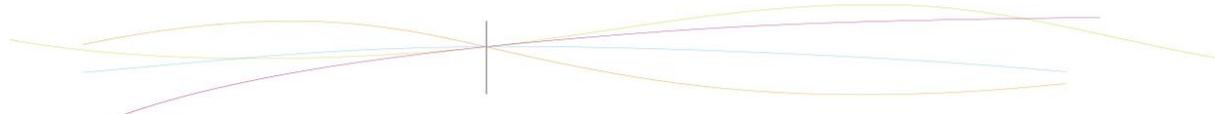
Les plus couramment utilisés sont le fer, l'aluminium, ou encore le cuivre.

Tous sauf le mercure sont solides sous les conditions normales de température et pression (CNTP). Un grand nombre de métaux tend à former une structure cristalline lorsqu'ils sont présents sous une forme pure. Dans la nature, on retrouve ces métaux associés à des éléments non-métalliques (oxydes, sulfates) ou sous forme native (pure, ou en alliage).

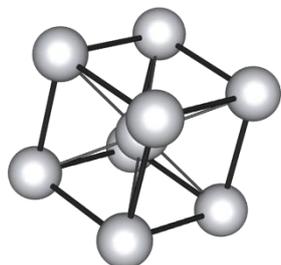
Les atomes métalliques forment entre eux des structures qui se répètent (les mailles), à l'intérieur desquelles circulent des électrons relativement libres. Ceci explique la capacité des métaux à conduire très efficacement la chaleur.

b) Le fer

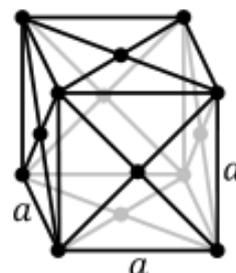
Le fer est l'élément chimique de numéro atomique 26 et de symbole Fe. Il s'agit du sixième élément le plus commun dans l'univers, et le quatrième plus courant dans la croûte terrestre.



Dans les CNTP, il a la forme d'un solide cristallin de structure cubique centrée, la ferrite. Au-dessus de 912°C, on parle de fer gamma, ou d'austénite, le fer prend alors une structure cubique à faces centrées. Au-delà de 1394°C, il reprend une structure cubique centrée, appelée fer delta. Sa température de fusion est de 1538°C.



Structure cubique centrée



Structure cubique à faces centrées

A l'état pur, il s'agit d'un matériau mécaniquement peu performant, avec des caractéristiques de résistance faibles. En contrepartie, il a une plasticité élevée.¹

Pour ces raisons, il est peu utilisé seul, en revanche il est couramment présent dans les alliages, comme par exemple en tant que composant principal de l'acier (alliage de fer et de carbone). En réalité, la plupart des objets que l'on pense en fer sont en acier doux, très malléable c'est le cas du fil de fer, par exemple.

De plus, il servait auparavant à fixer l'information, par exemple sur les disquettes, les bandes magnétiques, ainsi que les cassettes, mais a été supplanté par d'autres composés plus performants.

c) Caractériser l'acier

Tout d'abord, l'acier est un alliage de fer et de carbone, avec une concentration massique en carbone comprise entre 0,02% et 2%. En-dessous, on parle de fer, et au-dessus de fonte, qui a des propriétés très différentes.

Cet ajout de carbone, par rapport au fer pur, a une influence considérable sur les propriétés du matériau. De manière générale, on assiste avec l'augmentation en carbone, à une augmentation de dureté, et une diminution de l'allongement à la rupture, comme indiqué sur le schéma ci-contre.

Il y a deux grandes catégories d'acier : les hypoeutectoïdes et les hypereutectoïdes. Dans le premier cas, l'acier est formé de perlite et de ferrite, dans le second, de perlite et de cémentite.

La perlite prend une forme de lamelles alternées

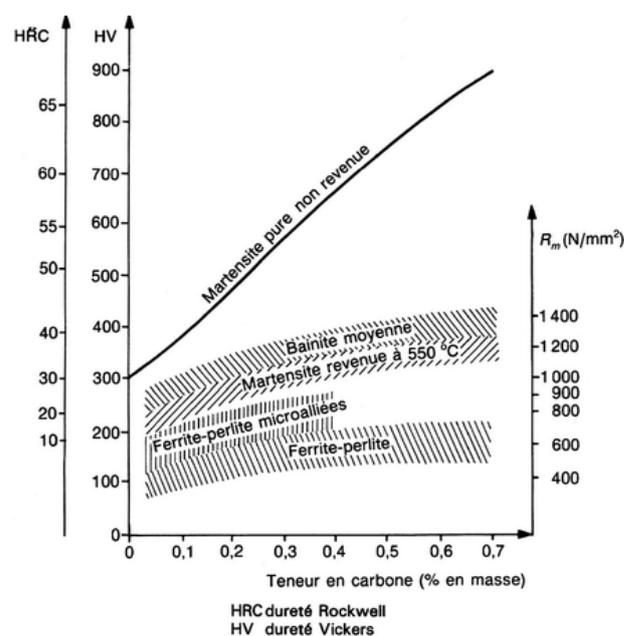
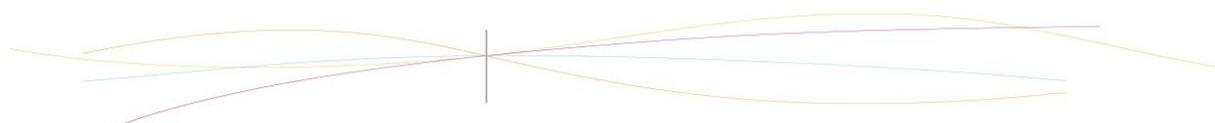


Diagramme mécanique des aciers selon leur structure

¹ Voir tableau détaillé des propriétés du fer en Annexe 1.



de cémentites et de ferrite. Au microscope, la ferrite paraît très claire, alors que la cémentite (carbure de fer, Fe_3C) paraît sombre.

En cas de chauffage, l'acier se comporte comme indiqué dans le diagramme ci-dessous, c'est-à-dire que suivant la température et la concentration en carbone, la structure change. A partir de 727°C , la structure normale devient progressivement de l'austénite gamma qui, comme le fer gamma, est une structure cubique à faces centrées².

Au cours d'un refroidissement lent, la majeure partie de l'acier se transforme en perlite qui est un agrégat de grains de ferrite ou de carbures, d'autant plus fins que le refroidissement est lent. Ses caractéristiques de résistance sont faibles.

Si le refroidissement est rapide, on assiste à la formation de martensite : le carbone n'a pas le temps de précipiter, et se retrouve coincé au sein du réseau de fer, devenu ainsi tétragonal. C'est la structure de l'acier qui est la plus dure, mais aussi la plus fragile. Pour cela, elle est rarement utilisée dans la conception d'objets. A titre d'exemple, on peut citer le tranchant des katanas japonais, où elle est formée lors d'un refroidissement brutal. Apparaissant sous la forme d'un dépôt blanc, elle confère ainsi au tranchant une dureté exceptionnelle.

L'acier est utilisé en réalité depuis l'âge de fer. Le fer était en fait de l'acier, puisque le combustible des fours se mêlait au fer brut chauffé. Toutefois, il fallut attendre 1722, et Réaumur, pour que naisse la science de la métallurgie moderne. L'abondance de matière première, mais aussi ses excellentes propriétés mécaniques ont rendu son utilisation importante, à tel point qu'il a notamment rapidement remplacé le bronze dans le domaine de l'armement.

C'est un matériau qui a toutefois plusieurs défauts. En effet, son oxydation est très rapide et importante ce qui oblige un entretien régulier. De plus, il peut être difficile à mouler, et sa masse volumique est importante ce qui le rend impropre à un certain nombre de tâches.

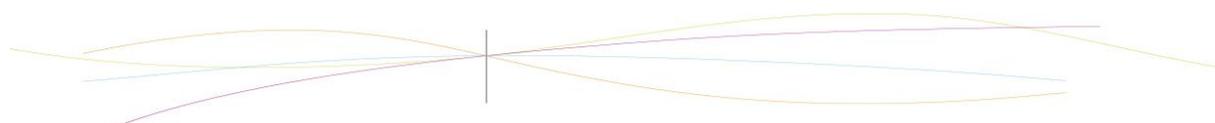
2) La métallographie

La métallographie est la science d'analyse et d'évaluation des structures internes des matériaux. A ce jour, il s'agit de la méthode la plus répandue dans la recherche des matières pour les scientifiques et les ingénieurs. Grâce à une procédure de tronçonnage, d'enrobage et de polissage, il est possible d'obtenir une surface parfaitement lisse, afin de voir la vraie structure de la matière.

a) Tronçonnage

Le tronçonnage consiste à découper un échantillon dans le matériau étudié. Lors du tronçonnage, la structure de l'échantillon à prélever ne doit pas être modifiée.

² Voir le diagramme binaire fer-carbone en Annexe 2.



b) Enrobage

L'enrobage (à froid ou à chaud) d'échantillon métallographique permet de limiter les effets de bords pendant l'étape de polissage. La résine qui sera choisie sera adaptée à la dureté du matériau à polir afin de rendre possible l'examen microscopique de l'échantillon.

c) Polissage

Le polissage est l'étape principale de la métallographie. En effet, pour pouvoir observer les détails microscopiques de la structure, il faut avoir une surface lisse. C'est pourquoi le polissage est nécessaire dans toute analyse de détails microscopiques de métaux puisqu'il permet de supprimer les rayures ou défauts résiduels lors du tronçonnage de métaux.

De plus, il est également utilisé lorsque l'on veut faire un essai mécanique :

- en compression, pour réduire le frottement de l'échantillon sur le tas de compression et éviter la déformation « en tonneau » et le flambage ;
- de manière générale (en traction, compression et flexion) pour éviter les concentrations de contraintes ;
- il est également indispensable pour observer les traces dans les essais de microdureté.

Enfin, le polissage peut être utilisé pour enlever la couche superficielle et avoir accès au cœur du matériau, qui n'a pas nécessairement les mêmes propriétés.

On vise en général le « poli miroir », c'est-à-dire qu'aucun défaut, aucune rayure n'est visible au microscope optique, les défauts résiduels ont donc une taille inférieure au micromètre. Mais on se contente souvent d'une impression à l'œil nu ou à la loupe binoculaire, selon les applications.

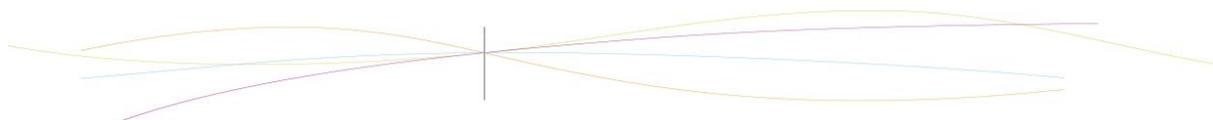
Le polissage est d'abord mécanique ; pour les métaux, on termine parfois par un polissage électrolytique (dissolution contrôlée de la couche superficielle).

Pour le polissage mécanique, on utilise des papiers avec des particules abrasives (toile émeri, plus connue sous le nom de papier de verre). Si la surface n'est pas plane, on commence par un papier « à gros grain », puis on passe successivement à des papiers à grain plus fin. Entre deux papiers, il faut :

- bien nettoyer l'échantillon, afin de le débarrasser des particules du papier précédent qui auraient pu s'incruster (on peut utiliser un bain à ultrasons).
- croiser la direction de polissage : pour un papier donné, on polit toujours dans le même sens, et on croise les sens d'un papier à l'autre, ce qui permet de faire ressortir les rayures résiduelles de l'étape précédente.

Pour un fini parfait, on peut utiliser une toile sur laquelle on dépose des diamants artificiels de taille maîtrisée (6 μm , 3 μm et 1 μm), soit en pulvérisant un aérosol, soit en étalant une pâte.

Les matériaux très durs sont longs à polir et usent beaucoup de consommables (papiers, pâte ou aérosol diamantés). Les matériaux très mous (comme le cuivre) sont difficiles à polir car on crée facilement des facettes (facetage), et les particules abrasives s'incruster plus facilement ; on ne peut, de fait, pas utiliser de polissage diamant.



Le polissage électrolytique se fait en général avec un acide, ou plutôt un mélange d'acide dépendant du métal considéré, et en appliquant une tension électrique de l'ordre de quelques volts. Le danger de ce mélange d'acide impose des précautions : ne pas manipuler en étant seul dans le laboratoire, porter des équipements de protection individuelle, respecter les consignes selon les produits (travailler sous hotte...).

3) Essais mécaniques : Traction et Laminage :

1) Les essais de traction :

Le but des essais mécaniques est d'obtenir des valeurs qui caractérisent les propriétés du matériau ou, qui permettent d'apprécier son comportement lorsqu'il est soumis à une contrainte. Ces valeurs pourront ensuite être utilisées dans des calculs de résistance des matériaux. La détermination de ces valeurs se fait par l'application de contraintes simples et d'interprétation facile et non-équivoque.

Dans notre étude de la caractérisation des aciers faiblement alliés, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux essais de traction.

Ces essais consistent à étirer un échantillon à l'aide d'une machine. On mesure la force F qui est appliquée à l'échantillon que l'on trace en fonction de son allongement Δl . La courbe ainsi obtenue est appelée courbe de traction. Elle est constituée de 2 zones : le domaine élastique, puis, le domaine plastique. Le domaine élastique correspond à la zone où les déformations de l'échantillon sont réversibles. A contrario, dans le domaine plastique, les déformations sont irréversibles.



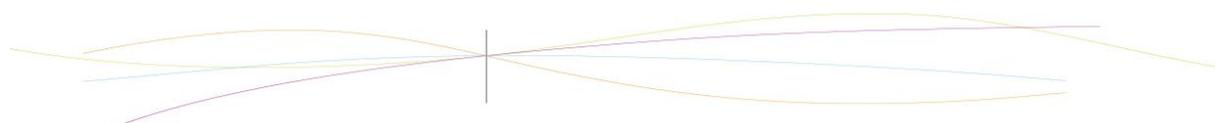
Machine à essais de traction

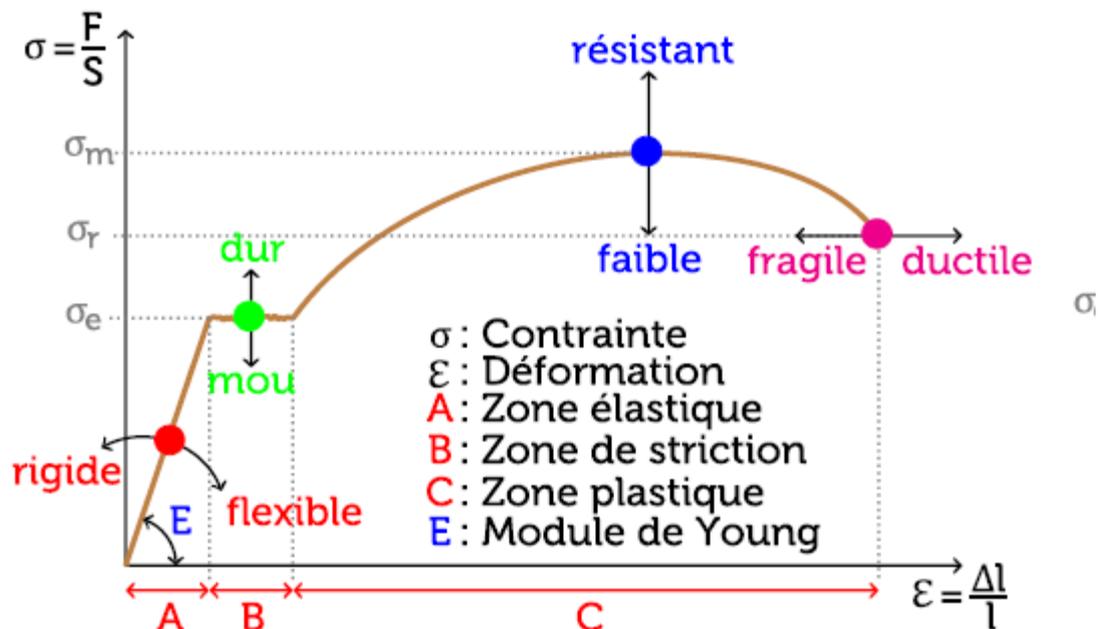
En outre, la courbe de traction permet de mesurer plusieurs valeurs intéressantes qui caractérisent le matériau.

Tout d'abord, le coefficient directeur de la courbe (modélisable par une droite) en zone élastique est appelé module de Young (E). Le plus souvent exprimé en méga pascals, il définit la rigidité du matériau. En effet, plus E sera élevé, plus le matériau sera rigide. Pour les aciers, il est en théorie de l'ordre de 200 000 MPa.

Ensuite, la limite entre la zone élastique et la zone plastique est appelé la limite élastique. C'est la force limite à partir de laquelle l'allongement de l'échantillon n'est plus réversible.

Pour finir, la force qui correspond au point de rupture de l'échantillon sur la courbe est appelé limite à la rupture. C'est la force maximale que peut supporter l'échantillon.

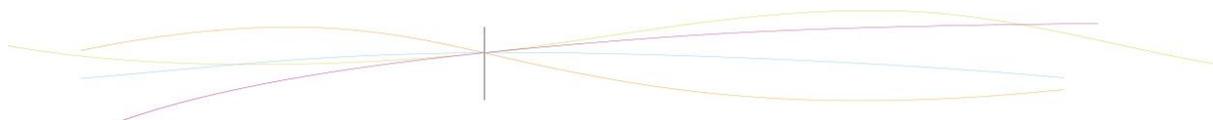




Courbe de traction

2) Laminage

Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique. Il concerne différents matériaux comme les métaux ou tout autre matériau sous forme pâteuse comme le papier ou les pâtes alimentaires. La déformation est obtenue par compression continue au passage entre deux cylindres appelés *laminoirs*. Ces cylindres sont groupés par paires et tournent en sens inverses. Ils sont lisses pour l'obtention de produits plats, et cannelés pour les autres formes. Les vitesses de sortie peuvent atteindre 90km/h pour les tôles et 360km/h pour les fils.



II) Expériences

1) Choix du témoin

a) Dureté

Polissage

La première étape avant un test de dureté consiste à traiter l'échantillon de manière à permettre une bonne visibilité des résultats. Ainsi, on commence par enrober l'échantillon, puis on le polit. Pour cela, nous avons utilisé des papiers de verre d'un grain allant de 800 à 4000, afin de poncer les défauts initiaux du matériau. En effet, pour visualiser la marque que le duromètre laisse dans le matériau, il est hautement préférable de ne pas avoir de rayures ou d'impuretés qui pourraient fausser la lisibilité.

A l'issue de ce polissage, l'échantillon étudié ne présente plus de reliefs, et réfléchit la lumière (même au microscope, le métal ne présente que peu de défauts), on a atteint le « poli miroir ».



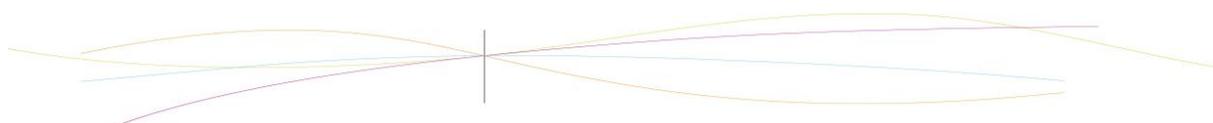
Polissage raté : on distingue nettement les rayures (grossissementx5)

Expérience

Un test de dureté permet de savoir si un matériau est dur ou mou. Pour cela, on va définir sa dureté grâce à la pénétration d'un poinçon dans une surface plane du matériau considéré. Dans notre cas, on fait des tests de Vickers, c'est-à-dire que le poinçon est une pointe pyramidale en diamant (l'autre test de dureté est la dureté Brinell, où le poinçon est une bille d'acier trempé).

Si le matériau résiste bien au poinçonnage, il est dit dur, sinon il est mou.

Lors de nos tests de dureté, nous avons réglé une charge de 40 kg. Cette charge est suffisante pour observer aisément la marque laissée par le poinçon, sans que les résultats ne soient faussés par une éventuelle traversée de l'échantillon par le poinçon.



Méthode :

- Placer l'échantillon sur le duromètre (réglage en hauteur).
- Lâcher le poinçon (rectangulaire dans notre cas).
- Mesurer les diagonales de la marque.
- Calculer la dureté Hu avec la formule suivante :

$$Hu = 1.8544 \times \frac{P}{d^2}$$

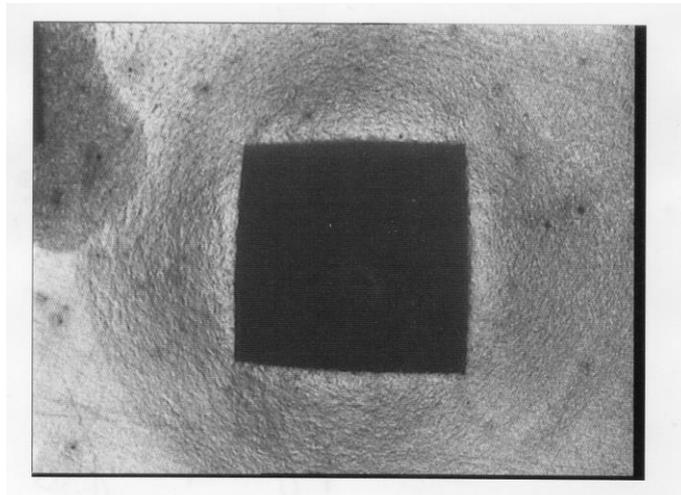
Avec : Hu : dureté (kg/mm²)

P : force appliqué par le duromètre

d : longueur moyenne des diagonales (mm)

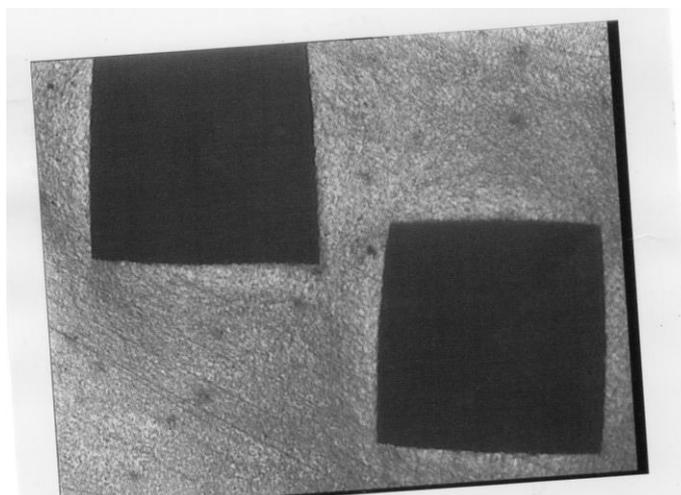
1.8544 coefficient dû à la surface de la pyramide

Chaque test de dureté a été répété sur le même échantillon dix fois, afin d'obtenir les résultats les plus précis possibles.



Déformation plastique due au duromètre (grossissement x5)

En outre, il faudra penser à suffisamment espacer les tests. En effet, chaque test engendre des déformations locales sur la matière à proximité (cf photo). Ainsi, faire un test sur une zone déformée par un test précédent fausserait les résultats.



*Exemple de deux tests trop rapprochés, le deuxième n'est pas fiable
(grossissement x5)*

Tests de dureté (traitement thermique à 780 degrés)				
Nature	Charge (kg)	Moyenne des diagonales (mm)	Dureté (kg/mm ²)	Ecart Type
Brute	40	0,5430	251,5728	0,0200
2h	40	0,5985	207,0785	0,0263
8h	40	0,6600	170,2847	0,0212
16h	40	0,6712	164,6737	0,0142

Interprétation

On constate que la dureté a tendance à augmenter avec le temps de chauffe. Cependant, elle semble se stabiliser à partir de 8h de chauffe à environ 165 kg/mm². Ainsi, on en conclut que le temps de chauffe n'influence plus la dureté à la température de 780°C à partir de 8h. De plus, on observe que l'écart type à 16h est plus faible que pour les autres tests, ce qui signifie que l'échantillon est plus homogène : le test est donc plus reproductible et plus fiable.

b) Calcul de la taille des grains

Nous allons ensuite regarder l'influence de la durée de chauffe de l'échantillon sur la taille et le nombre de grains.

Attaque chimique

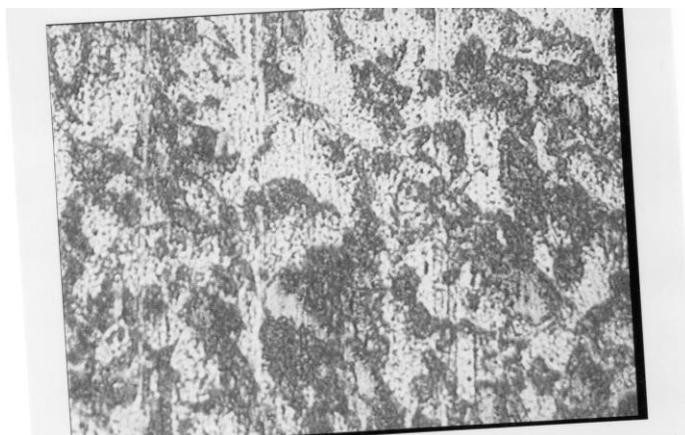
Pour mettre le grain en évidence, on réalise une attaque chimique sur l'échantillon après polissage.

Méthode :

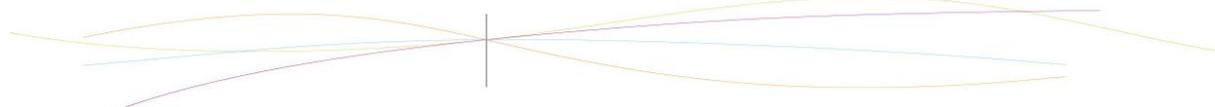
On dépose quelques gouttes d'acide sur l'échantillon, puis on attend 30 secondes. Ensuite, on rince à l'eau pour enlever l'acide, puis, à l'éthanol pour enlever les résidus d'eau et d'acide et éviter ainsi l'oxydation de l'échantillon.

Dans notre cas, cette méthode s'est révélée inefficace, comme on peut le voir sur la photo ci-contre.

Pour pallier à ce problème, l'enseignant en charge de notre projet, M. Keller, a effectué un électro-polissage qui s'est avéré concluant. Cette méthode consiste à placer l'échantillon dans un bain d'acide composé de deux électrodes (l'échantillon et une électrode de référence) et à appliquer une différence de potentiel. Ainsi,



Attaque chimique ratée (sur un échantillon passé 3 fois au laminoir) (grossissement x50)



par les effets combinés de l'acide et de la différence de potentiel, les aspérités sont réduites de l'ordre d'une dizaine de micromètres et on obtient un échantillon parfaitement plan.

Détermination du diamètre moyen du grain

Afin de déterminer le diamètre moyen d'un grain dans l'échantillon étudié, nous avons appliqué la méthode par comptage du nombre de grains.

Une fois le grain mis en évidence, le comptage est alors effectué sur une coupe plane du matériau, sur laquelle apparaissent les contours des sections des cristaux par le plan de coupe³. On trace alors une aire (ici un cercle de rayon de 3cm) et on compte les grains dans cette dernière de la manière suivante :

n_1 : le nombre de grain complètement à l'intérieur de l'aire

n_2 : le nombre de grains coupés par la circonférence

On obtient n_g , le nombre de grains dans la circonférence tracée : $n_g = n_1 + \frac{n_2}{2}$

On calcule ensuite m , le nombre de grains par unité d'aire de la surface de l'éprouvette :

$$m = 2 \times \left(\frac{g}{100}\right)^2 \times n_g$$

Avec g : le grossissement du microscope (ici : $g = 150$)

On calcule ensuite le nombre de grains par mm^2 . Enfin, on peut déterminer d_m , le diamètre moyen du grain (en micromètre) :

$$d_m = \frac{1000}{\sqrt{m}}$$

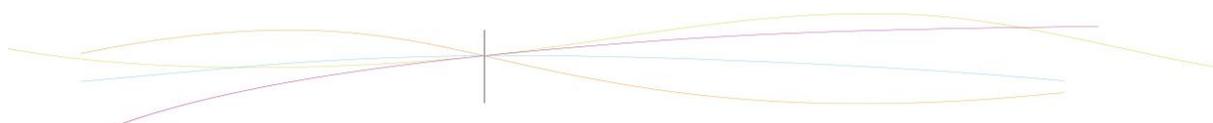
Résultats

Taille des grains	
Nature de l'échantillon	Diamètre moyen d_m (μm)
Brut	45,264
2h	46,726
8h	47,751
16h	57,339

Interprétation :

Les résultats montrent que le diamètre moyen des grains d_m augmente avec le temps de chauffe. De fait, sur une même surface, les grains sont plus gros, et donc, moins nombreux et plus visibles.

³ Voir photos en Annexe 4.



Conclusion

Les tests de dureté et le calcul de la taille des grains, nous ont permis de choisir l'échantillon qui servira de témoin pour tester les effets du laminage. Ainsi, nous avons choisi de prendre l'échantillon chauffé pendant 16h à 780°C. En effet, le recuit à 780°C permet d'éliminer les impuretés et d'homogénéiser la matière pour lui redonner ses caractéristiques d'origine. De plus, les tests de dureté ont montré qu'un échantillon chauffé pendant 16h possède une dureté stable et homogène (écart type faible). De surcroît, ses grains étant les plus gros, les effets du laminage seront plus facilement observables.

2) Laminage



Laminoir sur lequel nous avons travaillé

Nous allons maintenant laminier trois échantillons.

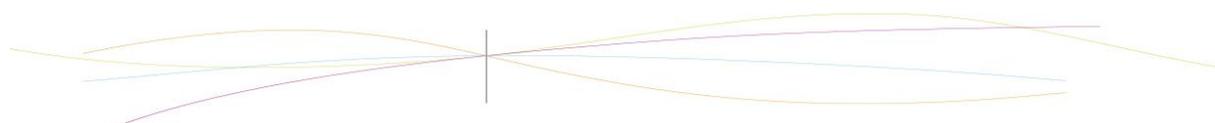
Avant de les laminier, on mesure leur épaisseur respective. Ensuite, on positionne les deux cylindres du laminoir l'un par rapport à l'autre, en vérifiant que l'espace entre les deux est environ égale à l'épaisseur de l'échantillon à laminier. Pour cela, on vérifie que l'échantillon peut être placé entre les deux cylindres. Après, on rapproche les deux cylindres de 0,5 mm grâce à un système d'engrenages du laminoir. On présente ensuite l'échantillon devant les deux cylindres dans le but de le laminier.

Pour le premier échantillon, le laminage s'arrête là. Pour l'échantillon suivant, après le premier passage entre les cylindres, on les rapproche encore une fois de 0,5 mm puis on repasse l'échantillon entre les deux cylindres. Pour le troisième échantillon, on fait encore un dernier passage après avoir rapproché les cylindres encore une fois de 0,5 mm.

On mesure l'épaisseur des échantillons à la sortie, voici le tableau récapitulatif de ces valeurs :

		Epaisseur (en mm)	Variation d'épaisseur
Echantillon 1	Avant laminage	2,06	2,91%
	Après 1 laminage	2,00	
Echantillon 2	Avant laminage	2,06	13,25%
	Après 2 laminages	1,78	
Echantillon 3	Avant laminage	1,72	40,74%
	Après 3 laminages	1,02	

Pour le dernier échantillon qui a été laminé 3 fois, on remarque une réduction importante. On peut d'ailleurs noter que, lors du troisième passage du dernier échantillon, le laminoir s'est bloqué plusieurs fois, car l'effort à fournir pour une telle réduction était trop important.



a) Dureté

Expérience

Pour les tests de dureté, on applique la même méthode que pour les échantillons non laminés. Mais pour l'échantillon ayant subi 3 laminages, le test précédent n'a pas fonctionné comme espéré. En fait, l'échantillon était trop fin pour subir une charge de 40 kg, les tests effectués donnaient donc des résultats totalement incohérents.

Pour palier à ce problème, il a été nécessaire de changer de machine pour les essais. Nous avons donc travaillé sur un microduromètre, qui utilisait des charges bien inférieures permettant de ne pas traverser l'échantillon. Ainsi, la charge utilisée pour l'échantillon à 3 passes était de 1kg.

Résultats

Test de dureté après laminages			
Nombre de passages	Moyenne des diagonales (mm)	Dureté (kg/mm ²)	Ecart Type
0	0,6712	164,674	0,0142
1	0,5735	225,526	0,0058
2	0,5175	276,976	0,0068
3	Calculée directement par le microduromètre	252,1	0,0731

Interprétation

On remarque que la dureté augmente après le laminage. On note dès le premier passage que la dureté augmente très nettement. De plus, les écarts-types sont faibles, ce qui rend l'expérience plutôt fiable. En revanche, les résultats de la dureté après le troisième passage ne suivent pas la tendance générale. Ceci est vraisemblablement dû au fait que les expériences ont été effectuées avec une autre machine, le microduromètre.

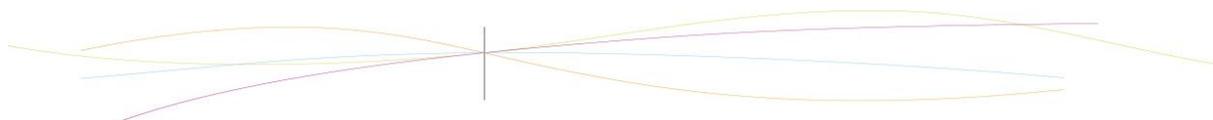
b) Etude des grains

Expérience:

On réalise la même attaque chimique que celle effectuée sur les échantillons non laminés, c'est-à-dire l'électropolissage. Ensuite on observe la structure au microscope.

Résultats:

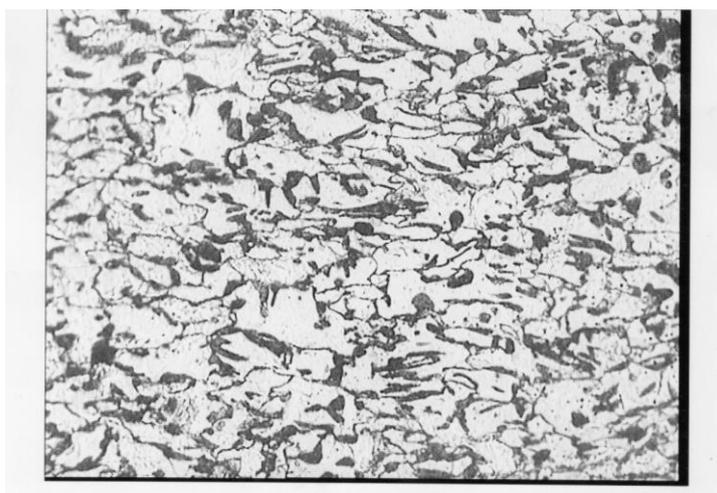
1 et 2 laminages: On reconnaît deux types de grain. Les grains blancs, la ferrite déjà identifiée sur l'échantillon non laminé. Et des grains striés qui s'avèrent être de la perlite. On ne distingue pas de géométrie de grain particulière.





1 et 2 laminages (grossissement x100)

3 laminages: Les grains observés sont de même type que ceux rencontrés sur l'échantillon non laminé: ils sont essentiellement composés de ferrite. En revanche, ils possèdent une géométrie allongée dans le sens du laminage. De plus, le nombre de grains a très nettement diminué et les grains sont plus gros.



3 laminages (grossissement x20)

Interprétation:

1 et 2 laminages: La présence de perlite indique un taux de carbone compris entre 0,1 et 0,8%⁴. Cette présence de perlite est inattendue, nous émettons donc l'hypothèse suivante: les échantillons ayant subi 1 ou 2 laminage ne sont pas composés du même matériau les échantillons non laminé et laminé 3 fois.

3 laminages: On suppose que le nombre de grains est resté sensiblement le même. Mais du fait de la géométrie allongée, une seule partie des grains est visible dans le plan de coupe choisi.

⁴Voir diagramme d'équilibre fer-carbone en Annexe 2.

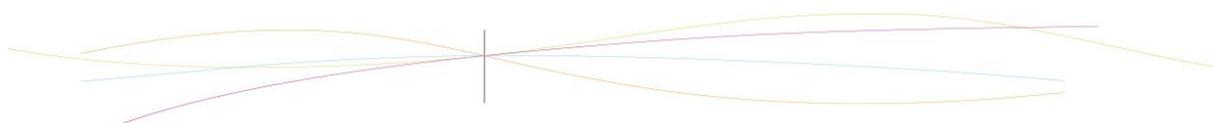
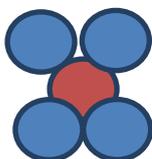
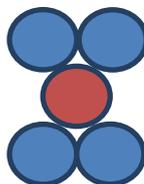


Schéma permettant de visualiser les grains sous différents plans :

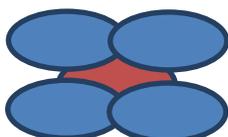
Vue du dessus avant laminage :



Vue latérale avant laminage:



Vue du dessus après laminage :



Vue latérale après laminage:



Lors de nos observations au microscope, nous avons étudié une vue de dessus.

On remarque que la taille des grains augmente dans la vue de dessus, et qu'ils s'allongent dans la vue latérale, dans le sens de laminage. C'est pour cela que lorsqu'on décompte les grains, on a l'impression qu'ils sont plus gros, et moins nombreux. En effet, après laminage certains grains sont « cachés » par les grains des couches supérieures (voir grain rouge sur le schéma).

On peut donc affirmer que le laminage modifie la géométrie des grains mais ne fait pas varier le nombre de grains dans l'échantillon.

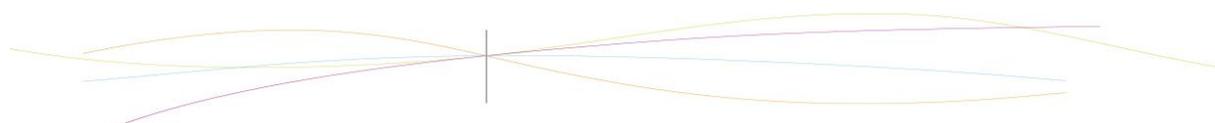
c) Les essais de traction

Expérience:

- Etalonnage de la machine.
- Mesure des dimensions de l'échantillon et délimitation de la longueur utile.
- Serrage des mords sur l'échantillon.
- Lancement du test.

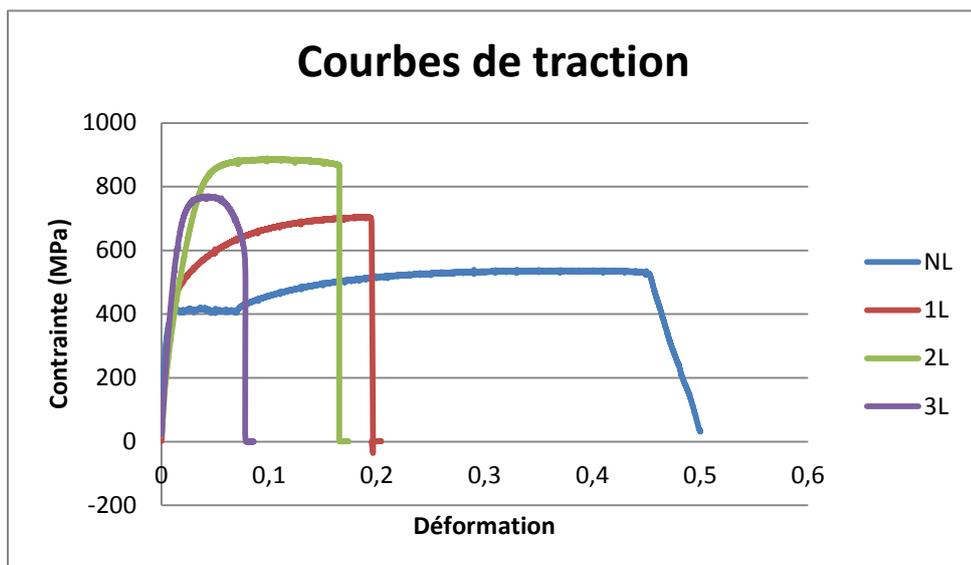
Pour chaque essai, la vitesse de déplacement de la traverse a été fixée à 2mm/min. De plus, les valeurs relevées étaient la position de la traverse et la force exercée par la machine sur l'échantillon en fonction du temps (échantillonnage : 0,01 kHz).

La distance utile (L_0) de l'échantillon a été fixée à 40mm à (0,01 près) pour les 2 premiers essais. Puis, cette dernière a dû être diminuée à 30mm pour les 2 derniers essais en raison de résultats incohérents. En effet, la surface dans les mords devenait trop petite en comparaison avec la longueur utile et l'épaisseur de l'échantillon, de fait, la contrainte exercée par les mords était trop forte provoquant une rupture prématuré de l'échantillon dans cette zone.



Légende :

- NL : Non-laminé
- 1L : 1 laminage
- 2L : 2 laminage
- 3L : 3 laminage

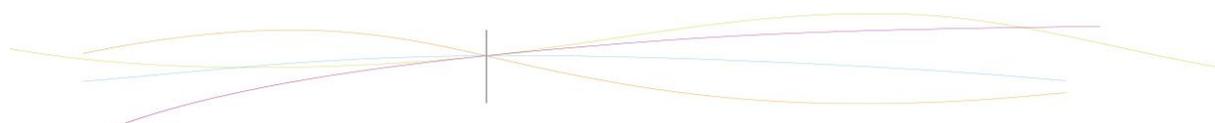


	NL	1L	2L	3L	Tendance générale
Contrainte à la rupture (Mpa)	527,58	684,89	869,57	487,42	Augmentation
Déformation maximal (mm)	0,45	0,19	0,16	0,08	Diminution
Module de Young (Mpa)	68134	56161	49116	56978	Constant
Contrainte maximale (Mpa)	540,07	706,57	889,49	770,09	Augmentation
Contrainte Limite élastique (Mpa)	406,73	435,95	360,12	483,00	Augmentation
Déformation à la limite élastique (mm)	0,01	0,01	0,01	0,01	Cohérent

Interprétation :

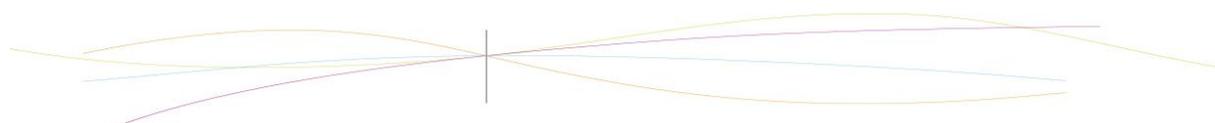
Comme le montre les résultats, les essais de traction ont un module de Young d'environ 57 000 MPa. Cette valeur est près de 4 fois moins élevée que la valeur théorique pour un métal faiblement allié (environ 200 000 MPa). Ceci est très certainement dû aux problèmes que nous avons rencontrés avec la machine (notamment le glissement des échantillons entre les mords pendant le test) et au fait que les essais de traction ne sont pas les plus précis pour la détermination du module de Young. Cependant, on peut noter que les modules de Young des différents essais sont du même ordre de grandeur. Ainsi, il semble constant (aux erreurs de mesures près) pour tous les essais, ce qui valide le fait que le module de Young est une caractéristique intrinsèque du matériau et donc n'est pas modifié par le laminage.

En outre, les courbes de tractions montrent que la contrainte à la rupture a tendance à augmenter avec le nombre de passes de laminage. De même, la contrainte maximum et la contrainte à la limite élastique sont plus élevées. Le laminage d'un acier faiblement allié a donc pour effet de rendre le matériau plus dur. En contrepartie, on note une diminution de la déformation maximale de l'échantillon avec le nombre de laminage. Ceci met en évidence un caractère plus fragile du matériau avec le nombre de passes.



De plus, si on fait une étude qualitative des courbes de traction, on observe une disparition du palier de Lüders après un laminage. On peut donc en conclure que le laminage constitue l'effort mécanique nécessaire à la disparition du palier de Lüders.

Pour finir, on observe que la courbe obtenue à partir de l'essai de traction sur un échantillon laminé 3 fois n'est pas tout à fait en accord avec la tendance général des autres courbes à l'augmentation de la contrainte maximale avec le nombre de passe. Ceci peut être dû au fait que ce test n'a pas pu être réalisé correctement puisque, lors de l'augmentation de la charge sur un échantillon de ce type, ce dernier cassait systématiquement dans les mors de la machine de façon prématurée. Il convient, donc, de ne pas prendre en compte la contrainte maximale enregistré pour ce test.



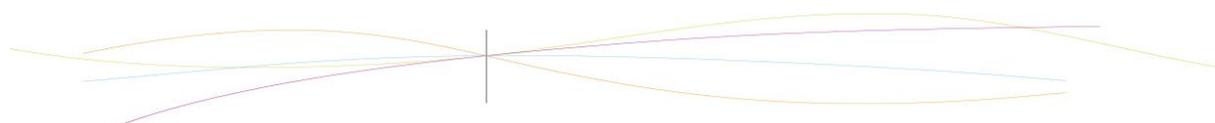
Conclusion générale

L'ensemble des tests menés au cours de ce projet nous a permis de comprendre, tant d'un point de vue mécanique que microstructural, les effets du laminage sur les aciers faiblement alliés.

D'un point de vue mécanique, l'augmentation de la dureté, de la contrainte à la rupture, de la contrainte maximum, ainsi que celle de la contrainte à la limite élastique montre que l'aplatissement de l'acier par laminage rend le matériau plus dur. En contrepartie, le matériau devient aussi plus fragile, c'est-à-dire que la déformation maximale supportée par l'échantillon diminue et le matériau casse plus rapidement. De plus, il est important de noter que le laminage n'influe pas sur les propriétés intrinsèques de l'acier puisque le module de Young reste inchangé avec le laminage.

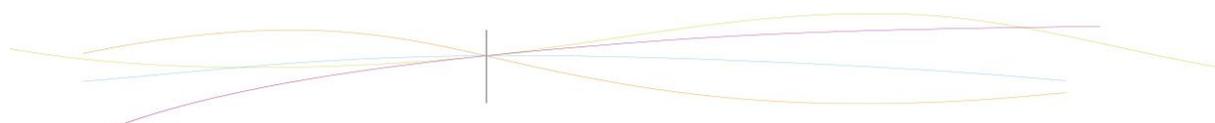
D'un point de vue microstructural, le nombre de grains constituant l'échantillon d'acier ne change pas, mais, leur géométrie est modifiée. En effet, les grains sont plus allongés et plus resserrés. Cette modification de microstructure peut expliquer les résultats des essais mécaniques et des tests de dureté qui montrent que l'acier est de plus en plus dur mais aussi plus fragile en fonction du nombre de passe de laminage.

Pour finir, ce projet fut, non seulement, l'occasion pour nous d'acquérir une plus grande expérience de travail en groupe, mais aussi, de mettre en application nos cours pour étudier un phénomène physique. Il nous a permis de confronter des résultats pratiques à une étude théorique. De fait, avec ce travail, nous avons pu saisir les enjeux d'une étude expérimentale, et ainsi, enrichir nos connaissances personnelles.



Bibliographie

- *Métallurgie, Elaboration, Structure, Propriétés, Normalisation* de Jean Barralis et Gérard Maeder
- *Des matériaux* de Jean Paul Bailon, Jean Marie Dorlot, Presses internationales Polytechniques.

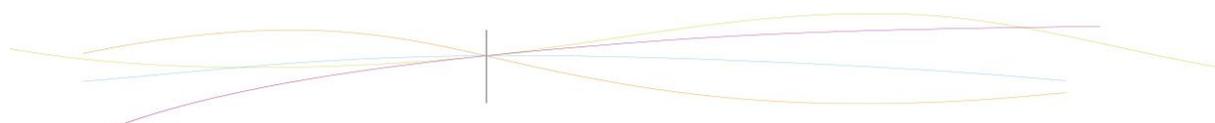


Annexe 1 : Tableau détaillé des propriétés du fer

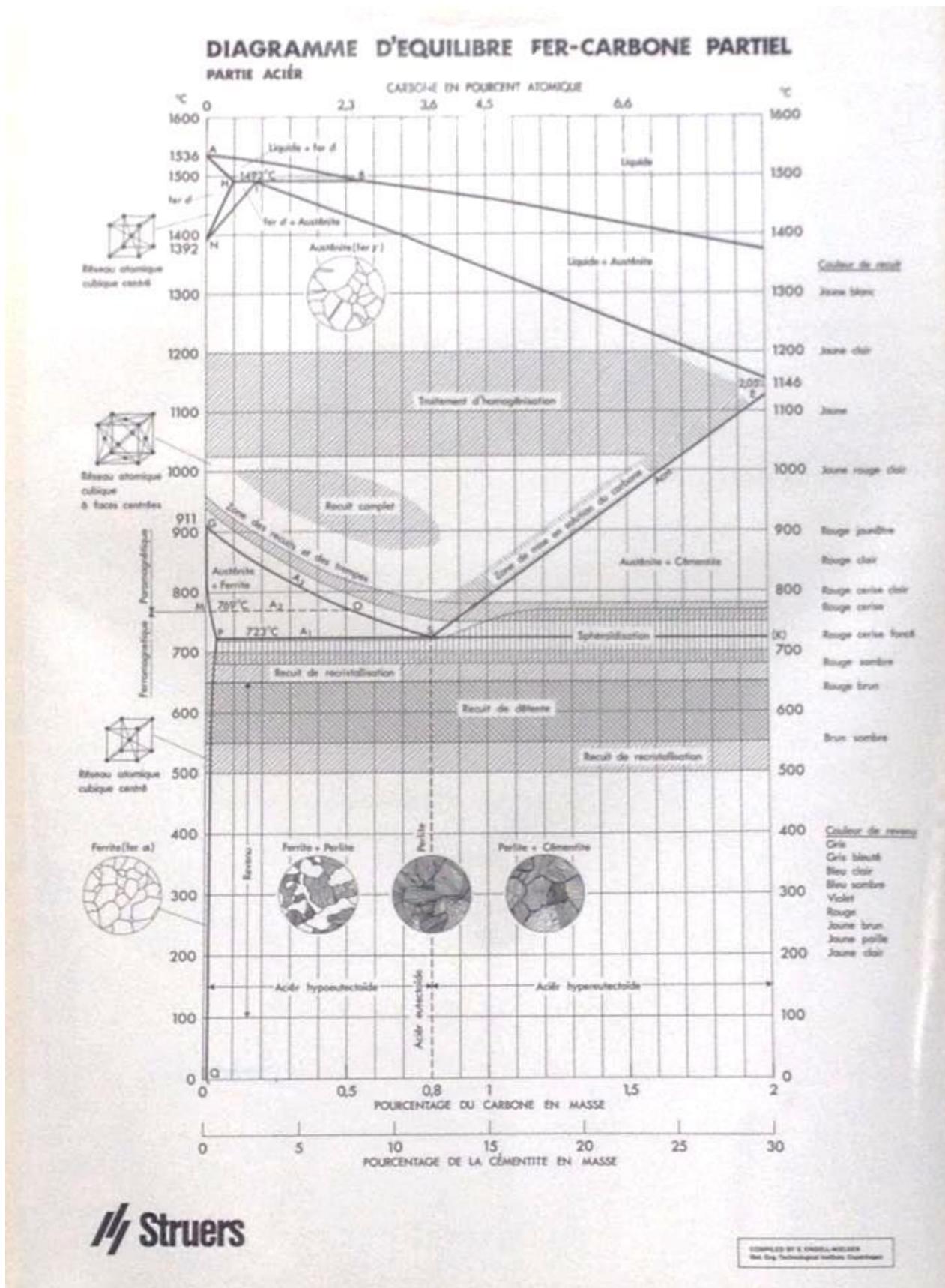
Propriétés du fer

Caractéristiques	Température (°C)	Valeur	Caractéristiques	Température (°C)	Valeur
Propriétés physiques			Propriétés mécaniques		
Masse volumique	20	7 870 kg/m ³	C % = 0,02 à 0,04 Mn % = 0,02 à 0,03		N % inconnu
Module d'élasticité longitudinal (module d'Young) E	20	211 400 N/mm ²	Limite d'élasticité R_e	- 100	367 N/mm ²
				20	168 N/mm ²
				200	165 N/mm ²
Module de Coulomb G	20	81 600 N/mm ²		400	98 N/mm ²
Coefficient de dilatation	20	$11,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$		400	98 N/mm ²
Coefficient de dilatation moyen	0 à 100	$12,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	Résistance à la traction R_m	- 100	480 N/mm ²
Capacité thermique massique	20	$444 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		20	310 N/mm ²
Capacité thermique massique moyenne	0 à 100	$456 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		200	400 N/mm ²
Conductivité thermique	20	$73,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$		400	280 N/mm ²
Conductivité thermique moyenne	0 à 100	$78,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Allongement à la rupture A	- 100	25 %
Résistivité	20	$10,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$		20	42 %
Résistivité moyenne	0 à 100	$10,3 \mu\Omega \cdot \text{cm}$		200	26 %
				400	16 %
				20	+/- 185 N/mm ²
			Limite d'endurance à 10^7 cycles	200	+/- 178 N/mm ²
				400	+/- 178 N/mm ²

<http://www.techniques-ingenieur.fr/res/media/docbase/table/sl4076662-web/SL4076662TBL-web.xml>

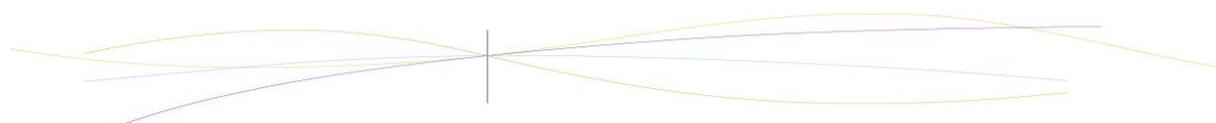


Annexe 2 : Diagramme binaire Fer-Carbone

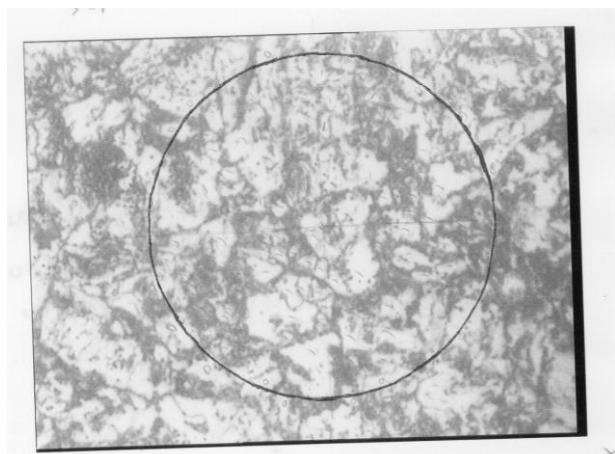


Annexe 3 : Résultats des tests de dureté après différents recuits

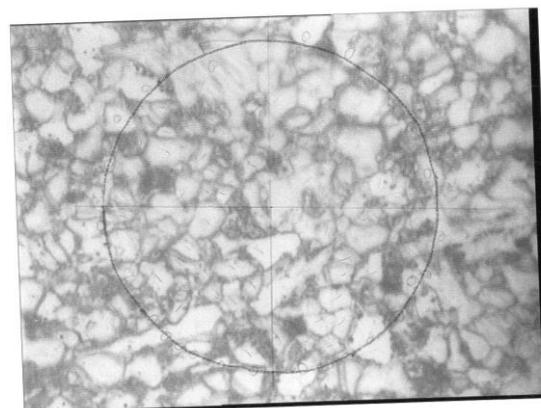
Tests de dureté (traitement thermique à 780 degrés)					
Nature	Diagonale 1 (mm)	Diagonale 2 (mm)	Moyenne	Dureté	Ecart Type
Brute	0,5400	0,5400	0,5400	254,3759	
	0,5300	0,5400	0,5350	259,1528	
	0,5500	0,5300	0,5400	254,3759	
	0,5400	0,5500	0,5450	249,7298	
	0,5500	0,5300	0,5400	254,3759	
	0,5450	0,5500	0,5475	247,4544	
	0,5500	0,5600	0,5550	240,8116	
	0,5500	0,5400	0,5450	249,7298	
	0,5400	0,5450	0,5425	252,0368	
	0,5300	0,5500	0,5400	254,3759	
			0,5430	251,5728	0,0200
2h	0,6000	0,6100	0,6050	202,6528	
	0,6000	0,6100	0,6050	202,6528	
	0,5900	0,5900	0,5900	213,0882	
	0,5900	0,5800	0,5850	216,7463	
	0,6000	0,6000	0,6000	206,0444	
	0,6000	0,5900	0,5950	209,5219	
	0,5900	0,6000	0,5950	209,5219	
	0,6000	0,6100	0,6050	202,6528	
	0,6100	0,6100	0,6100	199,3443	
	0,5900	0,6000	0,5950	209,5219	
			0,5985	207,0785	0,0263
8h	0,6600	0,6600	0,6600	170,2847	
	0,6500	0,6600	0,6550	172,8944	
	0,6500	0,6600	0,6550	172,8944	
	0,6600	0,6500	0,6550	172,8944	
	0,6500	0,6500	0,6500	175,5645	
	0,6700	0,6600	0,6650	167,7336	
	0,6800	0,6700	0,6750	162,8005	
	0,6600	0,6700	0,6650	167,7336	
	0,6600	0,6600	0,6600	170,2847	
	0,6600	0,6600	0,6600	170,2847	
			0,6600	170,2847	0,0212
16h	0,6800	0,6600	0,6700	165,2395	
	0,6700	0,6600	0,6650	167,7336	
	0,6800	0,6730	0,6765	162,0794	
	0,6800	0,6700	0,6750	162,8005	
	0,6800	0,6700	0,6750	162,8005	
	0,6800	0,6700	0,6750	162,8005	
	0,6700	0,6600	0,6650	167,7336	
	0,6800	0,6600	0,6700	165,2395	
	0,6800	0,6700	0,6750	162,8005	
	0,6700	0,6600	0,6650	167,7336	
			0,6712	164,6737	0,0142



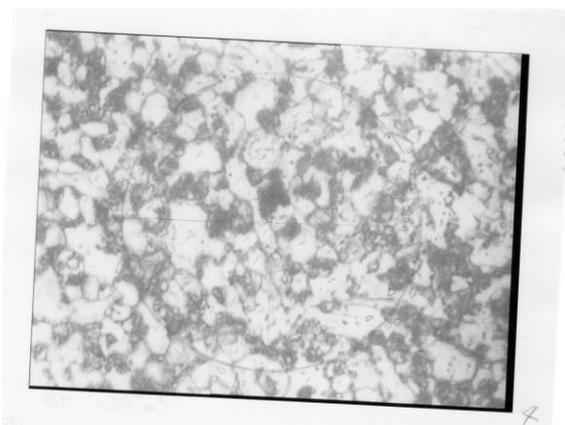
Annexe 4 : Photos des zones de comptage de grains



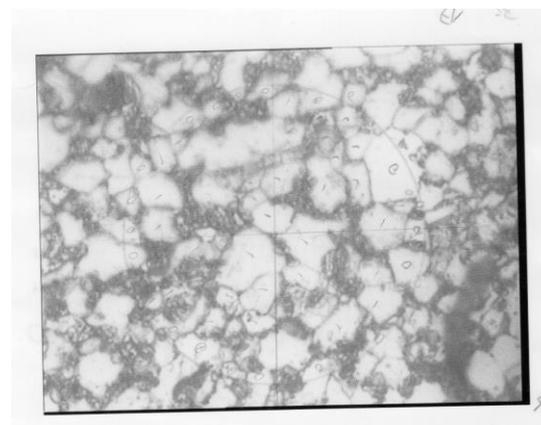
Echantillon Brut (Grossissement x100)



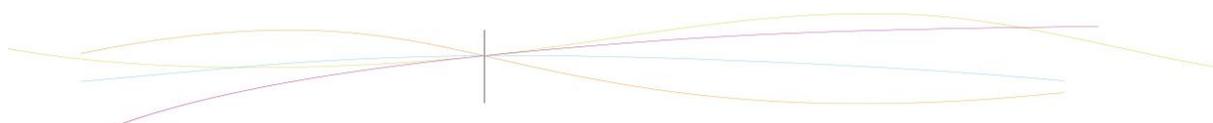
*Echantillon chauffé 2h, à 780°C
(Grossissement x100)*



*Echantillon chauffé 8h, à 780°C
(Grossissement x100)*



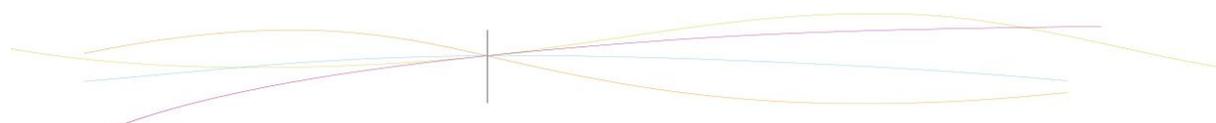
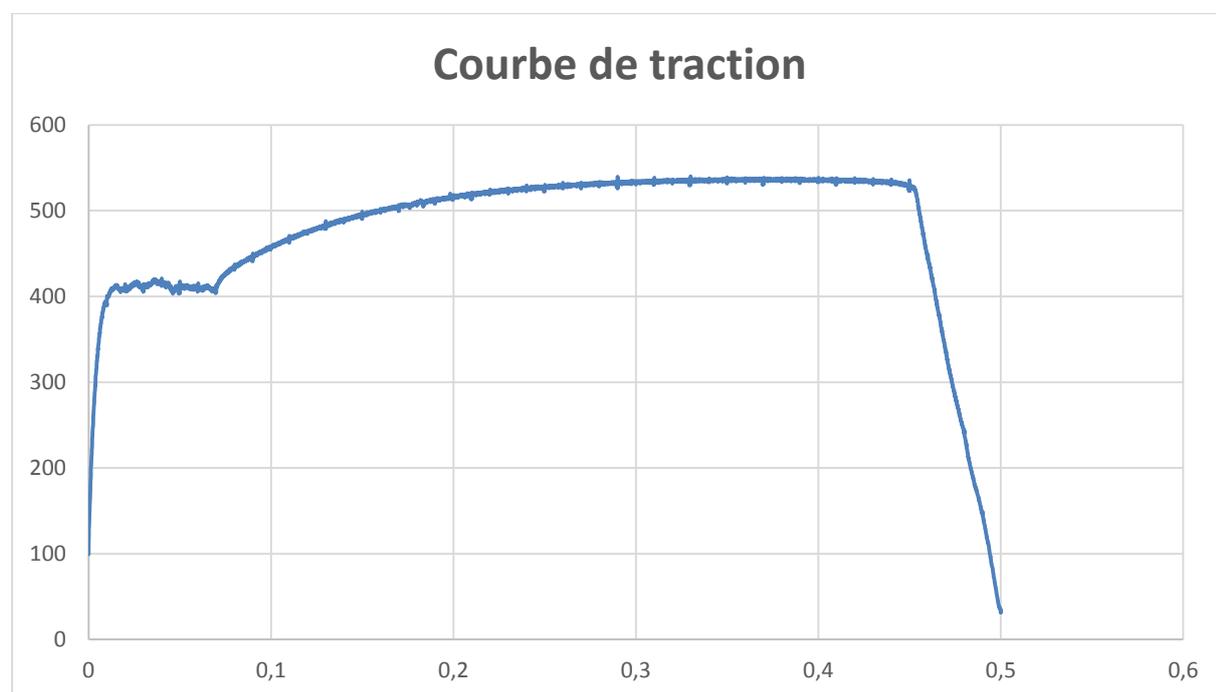
*Echantillon chauffé 16h, à 780°C
(Grossissement x100)*



Annexe 5 : Résultats des essais de traction

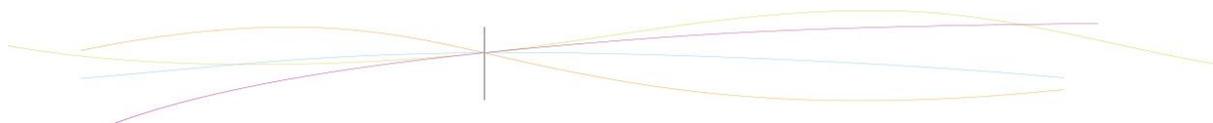
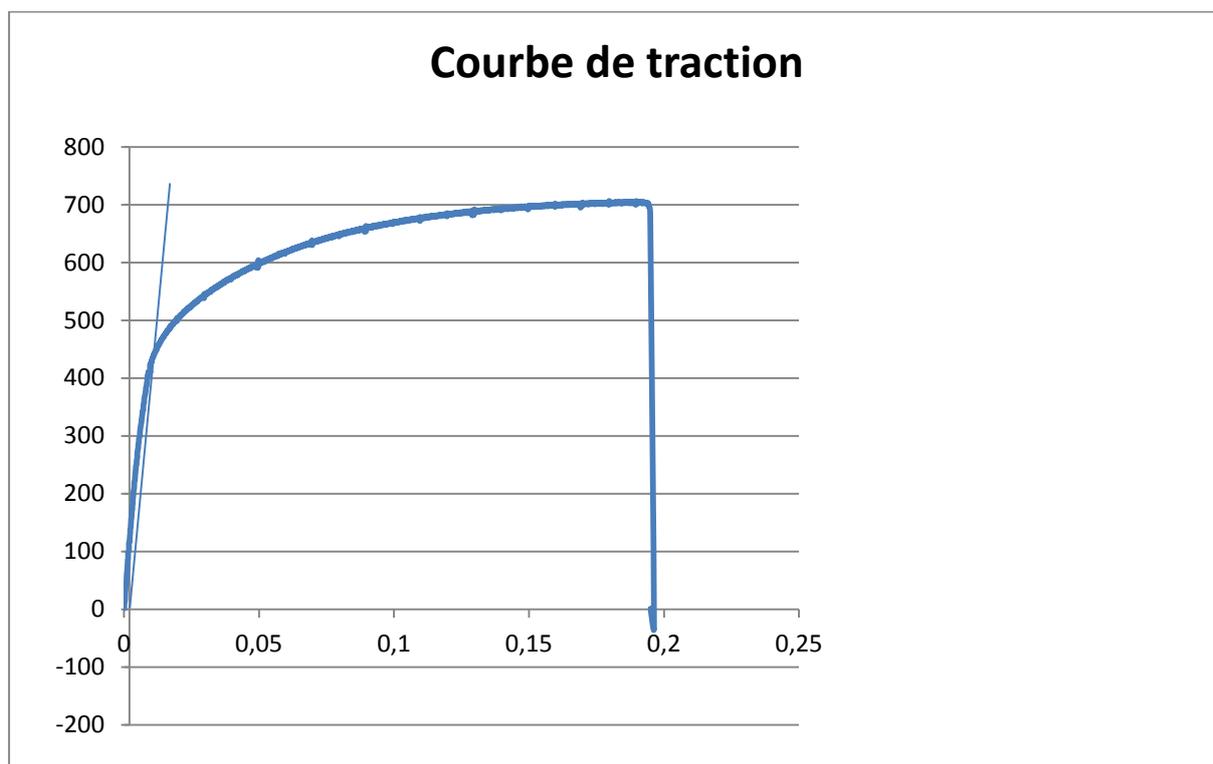
Echantillon non laminé :

Contrainte à la rupture (Mpa)	527,577965
Déformation maximal (mm)	0,4525453
Module de Young (Mpa)	68134
Contrainte maximale (Mpa)	540,074412
Contrainte Limite élastique (Mpa)	406,726219
Déformation à la limite élastique (mm)	0,01195225



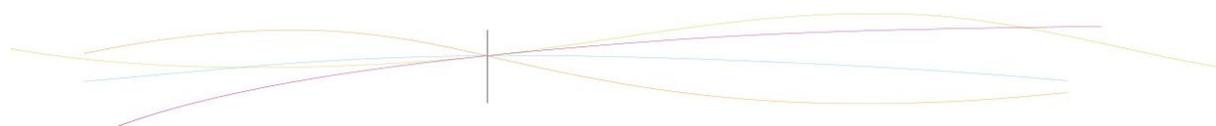
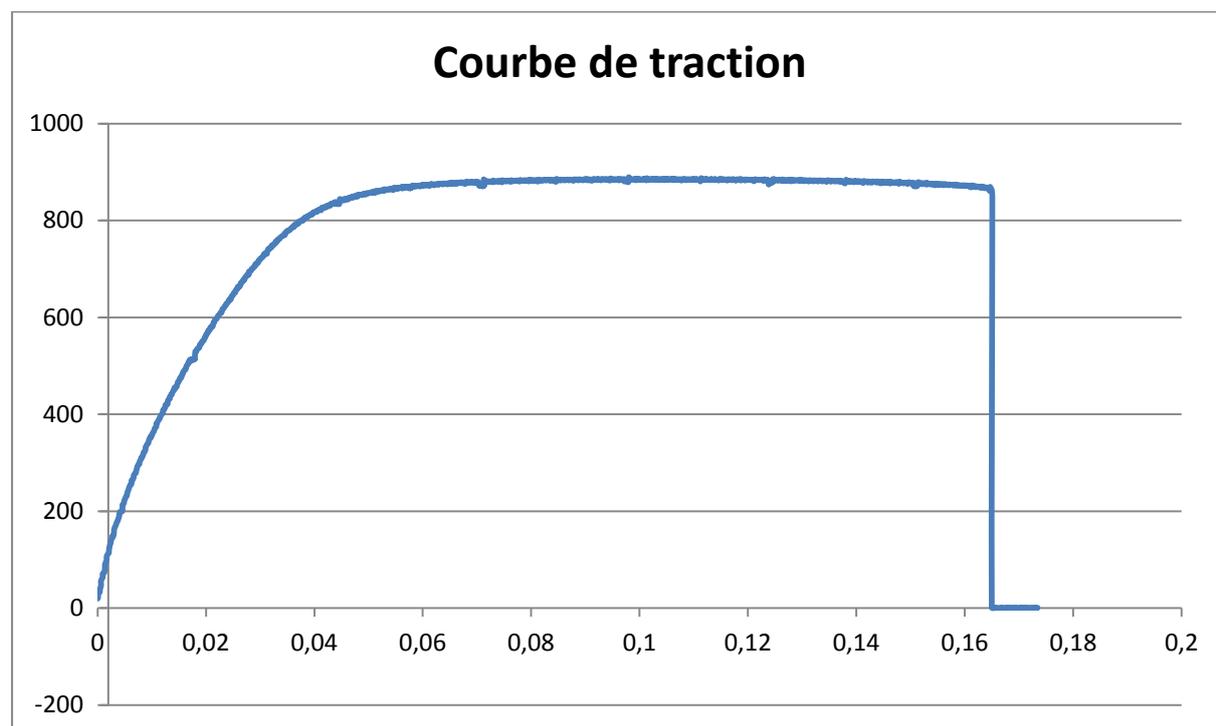
Echantillon laminé 1 fois

Contrainte à la rupture (Mpa)	684,8889961
Déformation maximal (mm)	0,19490775
Module de Young (Mpa)	56161
Contrainte maximale (Mpa)	706,5734329
Contrainte Limite élastique (Mpa)	435,9538012
Déformation à la limite élastique (mm)	0,01062425



Echantillon laminé 2 fois

Contrainte à la rupture (Mpa)	869,567983
Déformation maximal (mm)	0,16467557
Module de Young (Mpa)	49116
Contrainte maximale (Mpa)	889,489355
Contrainte Limite élastique (Mpa)	360,124444
Déformation à la limite élastique (mm)	0,01010343



Echantillon laminé 3 fois

Contrainte à la rupture (Mpa)	487,4216112
Déformation maximal (mm)	0,077911
Module de Young (Mpa)	56978
Contrainte maximale (Mpa)	770,089922
Contrainte Limite élastique (Mpa)	482,9993842
Déformation à la limite élastique (mm)	0,0102076

