

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE
ENSM-Annaba-



DÉPARTEMENT SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX
Mémoire de fin d'études
INGENIEUR

THEME

**CARACTÉRISATION DE L'ACIER PERLITIQUE
DESTINÉ À LA FABRICATION DES FILS
PRÉCONTRAINTS AU NIVEAU DE TREFISOUD.**

Présenté(e) par : - Mlle. SADALLAH Abouthaina.
Encadré(e) par : - Dr. LEMBOUB Samia.

Membres du jury : -Pr.Retima.Mohamed
-Dr.Bendjeddou Louisa

Président
Rapporteur

Juin 2017

Dédicace

A mes parents, ma joie et ma lumière Said et Hadjer.

A mes sœurs : Sabrine et Djihane.

Et mes frères : Kader et Mortadha.

*A mon encadreur Mme Lemboub qui ne m'a jamais
abandonné.*

*A Ma grande famille : mes tantes, mes oncles et mes
cousin(e)s.*

*A Toi : Imy, ma copine de chambre, mon amie intime
et mon âme sœur.*

*A mes amies pour toujours : Houda, Panda, Sarsour,
tikou, Asma et Zizou qui m'ont toujours soutenue.*

A tous mes amies de L'ENSM :

*Imen, Nasra, Marwa, Soumia, merieme, Fathia, Amina,
Manel*

Ossama, Mouiz, Hamza et Imad

Je vous aime tous.

Remerciements

Je remercie tout d'abord le grand puissant Dieu qui m'a éclairé le chemin pour réaliser ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à finaliser mes études.

- A mes chers parents qui grâce à eux je suis arrivée à atteindre mes objectifs durant toute ma formation.
- A mon encadreur qui m'a beaucoup aidé dans mon chemin, et qui malgré ses autres obligations, elle a toujours été à mes côtés.
- A mon encadreur à l'entreprise Tréfisoud Mr ABID et mes promoteurs Mr REDOUANE, Mr GUERAICHE et Mr Mourad qui *m'ont aidé et soutenu tout au long de mon stage*.
- Au personnel du laboratoire de l'ENSM et très particulièrement à :

Mr Hichem Brahmia.

Mr Nadir Benamira.

Mme Ali Tatar Rym.

Mme Zedouri Hakima.

- A Mr Boudebane Said et Mme Kahloul Latifa pour leur patience et soutien durant la période de mon PFE
- A mes chères amies

Je tiens à remercier également Mr Mohamed RETIMA et Mme Bendjeddou qui ont acceptés sans aucune hésitation de faire partie du jury de ma soutenance de PFE malgré leurs nombreuses obligations.

RESUME

Dans le cadre de la diversification de sa gamme de production en nouveaux produits issus du procédé de tréfilage, l'entreprise nationale de tréfilage et fabrication des produits de soudage (TREFISOUD) s'est dotée récemment de nouvelles lignes de fabrication d'acier de précontrainte. Ce processus de fabrication des plus modernes justifie la garantie de ces produits de haute sensibilité. Le but principal de ce travail est d'entreprendre une étude de caractérisation des fils en acier dur perlitique à haute résistance pour la fabrication des fils précontraints. Afin de bien cerner ce nouveau processus de fabrication et obtenir des produits de qualité, répondant aux besoins et exigences en vigueur, cette étude sera orientée d'une part sur la connaissance des propriétés des fils perlitiques à l'état brut de laminage et d'autre part à l'évolution microstructurale et des propriétés mécaniques des fils tréfilés et stabilisés. La bonne maîtrise du processus de production permettra de mieux connaître l'origine de certains défauts du produit qui pourraient altérer les propriétés du matériau et par conséquent la qualité exigée par les clients.

Mots clés :

Fil machine, acier perlitique, tréfilage, déformation plastique, microstructure, propriétés mécaniques, fil précontraint

ABSTRACT

As part of the diversification in the range of new products from the wiredrawing process, the national company for wiredrawing and fabrication of welding products (TREFISOUD) has recently acquired new lines for the manufacturing of pre-stressed steel . This state-of-the-art manufacturing process justifies the guarantee of these high-sensitivity products. The main aim of this work is to undertake a characterization study of the high-strength pearlitic steel.

In order to better understand this new manufacturing process and to obtain products with high quality that meet current needs and requirements, this study will focus on the knowledge of rods properties after rolling, and also to the microstructural evolution and the mechanical properties of the drawn and stabilized wire. The best control of the production process will make it possible to know more about the origin of some product defects which could alter the properties of the material and consequently the quality wanted by the customers.

Keywords:

Wire rod, pearlitic steel, wiredrawing, plastic deformation, microstructure, mechanical properties, pre-stressed wire

Table de matière

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1.Introduction.....	2
I.2. Définition.....	2
I.3. Procédés de fabrication des aciers de précontrainte.....	3
I.3.1.La fabrication du fil machine.....	3
I.3.2.Préparation de surface du fil machine.....	4
I.3.2.1. Caractérisation de couches phosphatées.....	4
I.3.3.Tréfilage à froid.....	6
I.3.4.La stabilisation.....	13
I.3.5.Traitements thermiques associés au tréfilage.....	14
I.4.Les caractéristiques des aciers de précontraintes.....	14
I.4.1.Les caractéristiques géométriques.....	14
I.4.2.Caractéristiques mécaniques.....	15
I.4.3. Le comportement en relaxation.....	15
I.4.4. La résistance à la fatigue.....	15
I.4.3. La résistance à la corrosion sous contrainte.....	15
I.4.4. La résistance à la traction déviée.....	15
I.4.5. L'aptitude au pliage alterné.....	16
I.4.5.L'adhérence.....	16
I.5.Les défauts des aciers de précontrainte.....	16
I.5.1. La composition chimique.....	16
I.5.2. Etat de surface.....	17
I.5.3. La microstructure.....	18
I.6. Les inclusions non métalliques dans l'acier.....	18
I.6.Les applications de l'acier de précontrainte.....	21

Table de matière

Chapitre II : Aspect Technologique

II.1.Introduction.....	22
II.2.Présentation général de l'entreprise TREFISOUD.....	22
II.3.Aperçu sur l'unité ACR.....	23
II.3.1.Programme de production.....	23
II.3.2.Caractéristiques du fil de précontrainte.....	23
II.3.3.Conditions du site d'implantation.....	23
II.4. Gammes produits de la Tréfilerie.....	24
II.5. Principales utilisations des produits de la tréfilerie.....	25

Chapitre III : Matériaux et techniques expérimentales

III.1.Introduction.....	26
III.2.Matériaux étudiés.....	26
III.3.L'analyse chimique.....	27
III.4.Dimensions.....	28
III.5.Les caractéristiques mécaniques du fil machine.....	28
III.6.Préparation de surface du fil machine à TREFISOUD.....	28
III.6.1. Contrôle du bain de phosphatation.....	39
III.6.2.Maintenance du bain de phosphatation.....	30
III.6.3.Détermination de la couche de phosphatation.....	31
III.7.Prélèvement des échantillons.....	32
III.8.Analyse métallographique.....	33
III.8.1.Préparation des échantillons.....	33
III.8.1.1.Découpage.....	33
III.8.1.2 : Polissage.....	34
III.8.1.3. Attaque chimique.....	35
III.8.1.4. Nettoyage aux ultra-sons.....	36
III.8.2. Observation par microscope optique.....	36
III.8.3. Observation par microscopie électronique à balayage.....	37
III.9. Les essais mécaniques.....	38

Table de matière

III.9.1. La dureté.....	38
III.9.2. La micro-dureté.....	38
III.9.3. La traction.....	39
III.9.3. Le pliage alterné.....	40
III.10. Analyse électrochimique	41
III.10.1.Introduction.....	41
III.10.2. Préparation des échantillons.....	41
III.10.3.Matériel électrochimique.....	42
III.10.4.La vitesse de corrosion.....	44
III.10.5.Le potentiel libre.....	44
III.10.6.Choix de la vitesse de balayage.....	44
III.10.7. Condition de polarisation.....	45

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1.Introduction.....	46
IV.2. Contrôle de la composition chimique	46
IV.3. Contrôle des paramètres de la phosphatation.....	47
IV.4.Résultats des observations métallographiques	48
IV.5.Résultats de l'observation par microscope électronique à balayage.....	52
IV.6.Résultats et discussions des essais mécaniques.....	56
IV.6.1. Résultats de la dureté HV	57
IV.6.2.Résultats de la Microdureté HV.....	58
IV.6.3. La traction et le pliage alterné.....	60
IV. 7.L'analyse électrochimique.....	65
IV.7.1. Résultats du test de potentiel électrochimique.....	65
IV.7.2.Les courbes de Tafel.....	66
Conclusion générale.....	67

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: fil de précontrainte cranté.....	3
Figure I.2: fil de précontrainte lisse.....	3
Figure I.3: toron de précontrainte.....	3
Figure I.4: Barre de précontrainte.....	3
Figure I.5: Le Fil machine.....	4
Figure I.6: Effet de l'écrouissage.....	7
Figure I.7: Profil de la filière.....	8
Figure I.8: Filières de tréfilage.....	8
Figure I.9: Décomposition des forces au cours de l'écrouissage.....	10
Figure I.10: Machine de tréfilage.....	11
Figure I.11: Mise en rosace.....	12
Figure I.12: Dévidoir.....	13
Figure I.13: Cabestan de tirage.....	13
Figure I.14: Pinch Wheel.....	13
Figure I.15: Présence d'inclusion d'alumine.....	16
Figure I.16: Décohésion lors du tréfilage.....	17
Figure I.17: Casse initiale en surface.....	18
Figure I.18: Lignes horizontales.....	18
Figure I.19: Enrichissement de carbone en surface et fissurations.....	18
Figure I.20. Les différents types d'inclusions de MnS.....	19
Figure I.21. (a) Les inclusions de MnS de type. (b) Les inclusions de MnS de type II...	20

Liste des figures

Figure I.22.(a) Les inclusions de MnS de type III. (b) Les inclusion de Mns de type IV.21

Figure I.23: Viaduc des trois bassins à La Réunion.....21

Chapitre III

Figure II.1. Le fil machine de Tréfisoud.....26

Figure III.2.Le fil machine avant et après phosphatation.....29

Figure III.3. Le matériel du contrôle des bains de phosphatation.....30

Figure III.4. Vaisselle et appareil de détermination de la couche de phosphatation....31

Figure III.5 : Les échantillons conformes de la première bobine.....32

Figure III.6:L'échantillon tréfilé non conforme avec l'apparition des défauts à la surface.....33

Figure III.7. Vue du Macro tronçonneuse.....34

Figure III.8. Vue du Micro tronçonneuse.....34

Figure III.9.Eprouvette de traction et de pliage.34

Figure III.10.Echantillons pour la métallographie, la Dureté et la Microdureté.....34

Figure III.11: Enrobeuse à chaud.....35

Figure III.12: Polisseuse.....35

Figure III.13.Vue de l'appareil de l'ultra-sons.....36

Figure III.14.Vue du Microscope optique NIKON.....36

Figure III.15.Vue du Microscope électronique à balayage.....37

Figure III.16.Vue de la Duromètre Vickers.....38

Figure III.17. Vue de la Microdurometre Vickers.....38

Figure III.18. Vue de la miche à traction.....39

Figure III.19.Vue de la machine de pliage alterné.....39

Liste des figures

Figure III.20. Matériel de la préparation des échantillons destinés pour l'analyse électrochimique.....	41
Figure III.21. Les échantillons destinés pour l'analyse électrochimique.....	41
Figure III.22. Schéma du montage électrochimique.....	42
Figure III.23. Montage électrochimique.....	43
Figure III.24. Courbe $\log I = f(E)$ et les droites de Tafel.....	44
 Chapitre IV	
Figure IV.1. Observation au microscope optique du fil machine.....	48
Figure IV.2. Observation au microscope optique du fil	49
Figure IV.3. Observation au microscope optique du fil semi fini non conforme.....	49
Figure IV.4. Observation au microscope optique du fil tréfilé fini.....	50
Figure IV.5. Observation au microscope optique du fil machine et du fil semi fini (tréfilé) conforme.....	51
Figure IV.5. Observation au microscope optique du défaut de surface observé sur le fil non conforme.....	52
Figure IV.6. Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon fil machine.....	52
Figure IV.7. Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini conforme.....	53
Figure IV.8. Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini non conforme.....	53
Figure IV.9. Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil fini conforme.....	53
Figure IV.10. Observation par MEB de la fissure à la surface du fil semi fini non conforme.....	54

Liste des figures

Figure IV.11.Observation au MEB des inclusions dans une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini non conforme.....	55
Figure IV.12 Comparaison entre les valeurs de la Dureté Vickers de différent état de fil.....	57
Figure IV.13.L'évolution de la Microdureté HV des différents états du file conforme en fonction de la distance en mm.....	59
Figure IV.14.Comparaison entre les évolutions de la Microdureté HV du fil semi fini conforme et du fil semi fini non conforme.....	59
Figure IV. 15.Les courbes de la traction du fil semi fini conforme.....	61
Figure IV. 16. Les courbes de traction du fil semi fini non conforme.....	61
Figure IV.17. Les courbes de traction du fil fini stabilisé non conforme.....	61
Figure IV.18. Les courbes de traction du fil fini stabilisé conforme.....	62
Figure IV.19 : représentation graphique d'E=f (t) dans le milieu d'eau de robinet: (a) Fil semi fini conforme, (b) Fil semi fini non conforme.....	65
Figure III.20 : représentation graphique des courbes de TAFEL des deux échantillons.....	66

List des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I.1. Correspondance entre poids et épaisseur de la couche.....</i>	<i>6</i>
---	----------

Chapitr II

<i>Tableau II.1 : Le programme de production de l'ACR.....</i>	<i>23</i>
--	-----------

<i>Tableau II.2 : La composition chimique du fil de précontrainte.....</i>	<i>23</i>
--	-----------

<i>Tableau II.3 : Les caractéristiques mécaniques du fil en acier de précontrainte.....</i>	<i>23</i>
---	-----------

Chapitre III

<i>Tableau III.1.la composition chimique du fil machine selon Tréfisoud.....</i>	<i>27</i>
--	-----------

<i>Tableau III.2.Composition chimique du fil machine selon la norme.....</i>	<i>27</i>
--	-----------

<i>Tableau III.3.Les marges des valeurs De l'acidité totale avec les rapports entre l'acidité totale et l'acidité libre et totale d'oxalate.....</i>	<i>30</i>
--	-----------

<i>Tableau III.4: Performance de la ligne de tréfilage pour notre fil machine conforme de diamètre $\varphi=11\text{mm}$.....</i>	<i>33</i>
--	-----------

Chapitre IV

<i>Tableau IV.1. Composition chimique du fil semi fini conforme.....</i>	<i>46</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.2.Composition chimique du fil semi fini non conforme.....</i>	<i>46</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.3 : Les acidités du bain de phosphatation.....</i>	<i>47</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.4: Les rapports des acidités du bain de phosphatation.....</i>	<i>47</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.5. Les mesures de la dureté HV pour les différents états du fil conforme et le fil non conforme.....</i>	<i>57</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.6. Les mesures de la Microdureté HV des différents états du fil conformes et le fil non conforme.....</i>	<i>58</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.7. Les caractéristiques mécaniques mesurées à partir de l'essai de traction....</i>	<i>60</i>
---	-----------

<i>Tableau IV.8.Résultats du pliage alterné.....</i>	<i>62</i>
--	-----------

<i>Tableau IV.9.Résultats des paramètres de corrosion.....</i>	<i>66</i>
--	-----------

Introduction générale

L'acier dur perlitique appelé acier de précontrainte constitue une nouvelle gamme de produits élaborés en Algérie par TREFISOUD. Ces aciers sont d'une importance capitale dans la fabrication des ouvrages d'art tels que les bâtiments, les ponts, ...etc.

Leur élaboration est basé sur le tréfilage à froid du fil machine et qui consiste à réduire les dimensions jusqu'à obtenir un produit sous forme de fil et dont les caractéristiques de résistance sont élevées et les propriétés de ductilité sont assez basses et définies selon l'utilisation ultérieure.

La réussite des caractéristiques de ces aciers précontraints repose sur une bonne maîtrise des conditions de tréfilage, les taux de réduction, les vitesses de déformation, le choix des filières, le choix du lubrifiant utilisé, ...etc.

Par ailleurs, la réussite de la qualité des aciers perlitiques est le souci majeur de cette entreprise qui contribue fortement au développement économique du pays.

Dans cette optique, une étude a été proposée par TREFISOUD dans le cadre d'un mémoire de fin d'études pour une meilleure caractérisation du produit et une contribution à l'élimination de certains défauts qui pourraient nuire particulièrement à la qualité du produit et l'image de marque de l'entreprise.

Cette étude s'intitule « Caractérisation de l'acier perlitique destiné à la fabrication des fils précontraints au niveau de TREFISOUD » et comporte quatre grands chapitres :

- Une analyse bibliographique est réalisée pour présenter l'état de l'art sur les aciers de précontrainte et leur tréfilage ainsi que quelques notions théoriques.

- Le deuxième chapitre est exclusivement réservé à l'aspect technologique, où nous décrivons l'entreprise TREFISOUD.

- Le troisième chapitre décrit toutes les techniques expérimentales qui ont servi pour la caractérisation de notre matériau.

- Le quatrième chapitre comportera tous les résultats obtenus ainsi que leurs discussions et interprétations.

Enfin, pour finir une conclusion générale récapitulera l'essentiel des résultats.

A l'issue de ce travail, des recommandations pratiques ont été suggérées pour l'entreprise TREFISOUD – El Eulma.

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

I.1.Introduction

Le principe de la précontrainte consiste à soumettre le béton connu pour sa mauvaise résistance à la traction, à une compression quand il n'est pas sollicité de telle manière que sous les effets des charges de service, il demeure comprimé. Eugène Freyssinet a pensé que le béton armé ne permet pas de tirer le meilleur parti des deux éléments qui le composent, et que le mariage du béton et de l'acier peut être beaucoup plus fécond. Une longue réflexion le conduit à approfondir une idée simple : il faut préparer le béton à faire face sans risque de dommage d'être soumis à des charges et donc à des tractions dangereuses pour son intégrité (fissures puis rupture). La compression préalable du béton est la « précontrainte », ce vocable a été utilisé pour la première fois par Eugène Freyssinet en 1933. Le précontraint est mis en œuvre selon deux techniques bien distinctes dénommées respectivement :

- Précontrainte par **pré-tension** : cette technique est utilisée pour la préfabrication d'éléments précontraints destinés au bâtiment. Elle consiste à tendre sur un banc de mise en tension un acier de précontrainte qui passe dans le coffrage de l'élément à confectionner et où le béton frais est coulé.
- Précontrainte par **post-tension** : cette technique est utilisée en génie civil (ponts, centrales nucléaires par exemple) mais également dans le bâtiment (par exemple dalles). Elle consiste à tendre des câbles de précontrainte préalablement enfilés dans des conduits ou gaines insérées dans la structure. [1, 2] .

I.2. Définition

Les aciers de précontrainte sont des aciers à haute résistance, à teneur élevée en carbone (comprise généralement entre 0,65 % et 0,85%). Ils se présentent sous la forme :

- De **fils** lisses de diamètre 2,5 mm à 12,2 mm (**Figure I.1**) ou crantés, (**Figure I.2**) (ces derniers étant utilisés en précontrainte par pré-tension) – les diamètres de fils crantés couramment utilisés se situent entre 4 et 8 mm. [3,4] .



Figure I.1. Fil de précontrainte cranté.



Figure I.2. Fil de précontrainte lisse.

● De **torons** à 2, 3 ou 7 fils (**Figure I.3**) sont des produits constitués de fils enroulés les uns autour des autres) de diamètre 4,8 à 18 mm – les diamètres des torons couramment utilisés ; les torons 3 fils de diamètre 5,2 mm et les torons à 7 fils de diamètre 6,85 mm à 15,7 mm ● Ou de **barres**, (**Figure I.4**) lisses ou à reliefs de diamètres 15 mm à 75 mm.

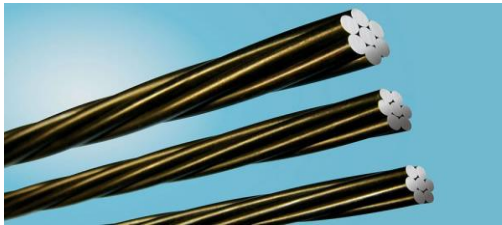


Figure I.3. Toron de précontrainte.



Figure I.4 .Barre de précontrainte.

I.3. Procédés de fabrication des aciers de précontrainte

I.3.1. La fabrication du fil machine

La matière première utilisée pour la fabrication de nos fils, est appelée fil machine (**Figure I.5**). Le fil machine est un produit long laminé à chaud ayant subi un refroidissement contrôlé et produit selon la norme EN 10016-4. Il a un diamètre de 8 à 15 mm et une teneur en carbone variant de 0,70 à 0,85%. Il se présente sous forme de rouleau de poids unitaire de 1500 à 3000 kg.

Sur les trains modernes, le fil machine atteint, à la sortie de la dernière cage et donc juste avant enroulement, une température située aux environs de 1000°C. Après sa mise en spires, le fil machine subit un refroidissement modulable pour permettre d'obtenir une structure apte aux déformations ultérieures. Au cours de ce refroidissement, le fil machine se recouvre d'une couche d'oxydes dont la qualité est elle-même fonction de la température initiale et de la température de refroidissement [6].



Figure I.5 : Le fil machine

I.3.2.Préparation de surface du fil machine

La surface de fil machine contient à la base une couche de calamine (oxydes de fer types : FeO , Fe_2O_3 & Fe_3O_4). Cette couche est préjudiciable à l'opération de tréfilage et doit être impérativement éliminée. Le nettoyage peut se faire par voie chimique (acide chlorhydrique ou sulfurique) ou par voie mécanique en utilisant une ligne de grenaillage (shotblasting). Après, le fil machine subit un traitement de surface consistant à déposer une couche de phosphate de zinc poreux (ZnPO_4), permettant un meilleur entrainement de savon dans les filières lors du tréfilage [6].

I.3.2.1. Caractérisation de couches phosphatées

a. Contrôle des bains de phosphatation

✚ Détermination de l'acidité libre (FA)

Elle est liée à la concentration en acide phosphorique libre du bain et elle est exprimée, dans la pratique, par le volume (en millilitres) de solution de soude 0,1 N nécessaire pour amener le pH d'une prise de bain de 10 ml autour de la valeur de 3,8(début de la neutralisation de la première acidité de H_3PO_4) en présence de bleu de bromophénol (virage du jaune au bleu-violet) [7].

✚ Détermination de la teneur en acidité totale (TA)

Elle est liée à la concentration totale en produits acides (H_3PO_4 libre et combiné) et également en produits réagissant avec NaOH utilisée pour le titrage (par exemple le nitrate de zinc). Dans la pratique, elle est exprimée en millilitres (points d'acidité totale) de NaOH 0,1 N, sur un prélèvement de bain de 10 ml, nécessaires pour amener le pH autour de la valeur de 8,2 (début de neutralisation de la deuxième acidité de H_3PO_4) en présence de phénolphthaléine (virage de l'incolore au rose pâle).

✚ Détermination de l'acidité totale d'oxalate (OX)

Ce dosage est effectué comme l'acidité totale (AT) sur 10 ml de bain, mais on ajoute 20 ml de solution d'oxalate de potassium à 30 % en masse puis quelques gouttes de phénolphtaléine. On titre avec NaOH 0,1 N jusqu'à coloration rose stable. On lit le nombre de millilitres versés qui représentent l'OX (appelés encore points phosphate). Dans cette acidité, le zinc combiné à l'acide phosphorique ou au nitrate n'intervient plus dans le dosage car il est complexé par l'oxalate de potassium $[(\text{COO})_2\text{K}_2]$. On l'appelle également l'acidité totale corrigée, ou points en phosphates primaires (Ps). L'OX considérée seule ne donne que peu d'indication, mais elle permet de calculer le rapport $T = (\text{AT}/\text{OX})$, dont la valeur permet de déterminer le ré enrichissement du bain.

✚ Rapport d'acidités

Les acidités totale et libre influencent la formation de phosphate c'est deux paramètres étant deux caractéristiques importantes d'un bain phosphatant soit r le rapport de ces deux acidités :

$$r = \frac{\text{acidité totale}}{\text{acidité libre}}. \quad (1)$$

b. Détermination de la couche de phosphatation

la couche phosphatée est évaluée par la quantité de phosphates déposée sur la surface d'un échantillon de fil de longueur $L=50$ mm par immersion de l'échantillon dans l'eau bouillante pendant 10 min et le sécher à l'air pendant 30 secondes puis peser l'échantillon et noter P_1 puis l'immersion de cette échantillon dans une solution d'hydroxyde de sodium NaOH chauffée à une température de 80°C pendant 10 min après ça l'échantillon est émergée immédiatement dans l'eau froide. Cet échantillon est retiré de l'eau frottée soigneusement en utilisant de nombreux tissus trempés dans le solvant, l'échantillon est repesé pour noter P_2 En fin le poids de la couche est calculé par cette équation :

$$P = \frac{[(P_1 - P_2)]}{P_2} \times 1962 \times d \quad (2)$$

Ou :

d : Le diamètre de fil machine.

P_1 : Poids du fil machine phosphaté.

P_2 : Poids du fil machine après déphosphatation.

c. Correspondance entre poids et épaisseur de la couche

Cette correspondance est donnée, à titre indicatif, dans le pour les principales couches de phosphatation. Dans le cas où le bain de phosphate contient du fer II en plus du zinc ou du manganèse, le rapport P/E est très variable, ce qui s'explique par les variations de densité des couches déposées. Cette densité est non seulement fonction de la nuance de l'acier traité, son état de surface mais également de la teneur en Fe^{2+} du bain et des paramètres de son utilisation, c'est-à-dire concentration et température.

Enfin, la préparation initiale (dégraissage, décapage) influe également sur la taille des cristaux.

Tableau I.1. Correspondance entre poids et épaisseur de la couche. [7].

Type de phosphatation :	Poids de couche. P (g /m ²)	Epaisseur E (μm)	P /E
Cristalline au Zn :	7.5 à 15	5 à 10	1.5

I.3.3.Tréfilage à froid

Le fil machine passe ensuite à l'étape de tréfilage à froid qui consiste à réduire sa section jusqu'à 85%, par passage à travers 7 à 9 filières (parfois moins) en carbure de tungstène et un effort de traction exercé par un cabestan entraîné par un moteur électrique. Au passage dans la filière, le fil entraîne une quantité de savon de tréfilage qui permet de lubrifier et de protéger la filière.

Un circuit fermé d'eau de refroidissement, permet de refroidir les filières et les cabestans de tréfilage. Cette opération permet d'accroître sensiblement la résistance à la traction du fil machine de ~1250 -1300 MPa à >1.600- 2.000 MPa grâce à cette déformation à froid dans le domaine plastique de l'acier dur [8, 9,10].

a. L'écrouissage

La déformation du fil au cours de l'étirage à travers la filière provoque une modification générale de ses propriétés. La variation des caractéristiques mécaniques : résistance, limite d'élasticité, allongement, striction, retient tout particulièrement l'attention du tréfileur. En règle générale, on entend par **degré d'écrouissage** ou **taux d'écrouissage**

la réduction de section relative. Il est cependant nécessaire de préciser si cette réduction de section est rapportée à la section initiale S ou à la section finale.

En accord avec la théorie on retrouve les désignations suivantes:

- Réduction de section pour cent l'expression :

$$\frac{S-s}{S} \times 100 \text{ soit } \left(\frac{S}{s} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

- Allongement par tréfilage pour cent l'expression :

$$\frac{S-s}{S} \times 100 \text{ soit } \left(1 - \frac{s}{S} \right) \times 100 \quad (4)$$

Il est rappelé, pour mémoire, que la déformation rationnelle est définie par :

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{S}{s} \quad (5)$$

Avec : L_0 longueur initiale, correspondant à la section S ,

L longueur obtenue, correspondant à la section s .

b. Variation des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écroutissage

Au fur et à mesure que le fil s'écroute :

- sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite.
- sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.

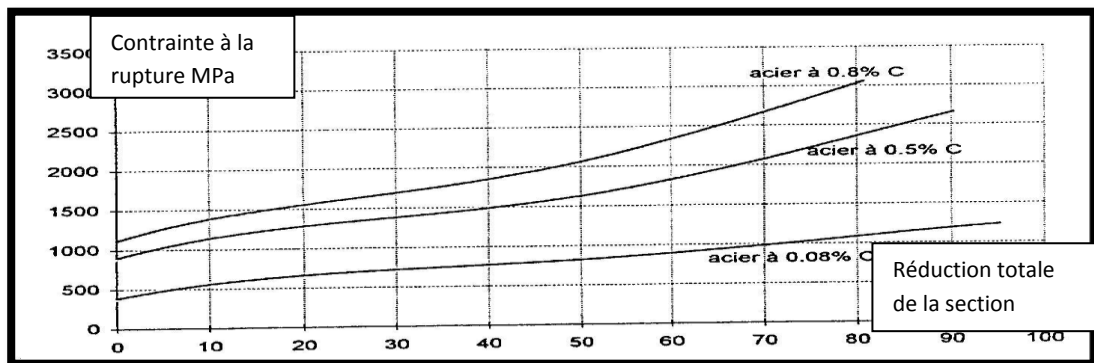


Figure I 6 : Effet de l'écroutissage [6]

- l'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement
Ces conséquences sont exploitées en tréfilage pour obtenir des fils avec des caractéristiques de résistance à la traction, de limite d'élasticité et d'allongement définies en fonction de l'utilisation ultérieure. [6]

c. La filière de tréfilage

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage, (Figures I.7, I.8)
La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théoriques ou expérimentaux. Elle est constituée d'un **Noyau** dur généralement en carbure de tungstène (lié au cobalt) ou en diamant, fretté dans une **Monture** généralement en acier. La surface intérieure est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrices généralement rectilignes :

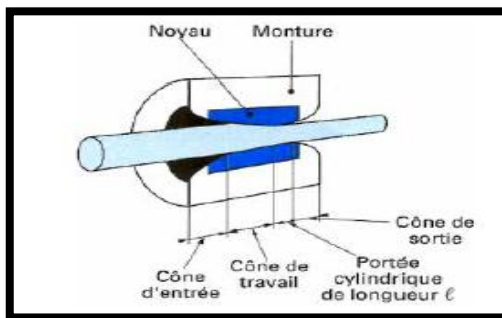


Figure I.7: Profil de la filière

Figure I.8: Filières de tréfilage.

- **Cône d'entrée** : permettant l'entraînement du lubrifiant.
- **Cône de travail** : d'angle au sommet 2α .
- **Portée cylindrique** : dont la longueur est comprise entre $1/3$ et $1/2$ du diamètre à obtenir.
- **Cône de sortie** : ou chanfrein de dégagement.
- La forme de la partie active de la filière composée du **Cône de travail** (ou cône d'étrage) peut varier suivant :
 - la nature et l'état de l'acier.
 - le taux de réduction de section.
 - la recherche du minimum de perte d'énergie par frottement sur les parois.
 - la progressivité régulière de la déformation.
 - le minimum d'usure recherchée dans la zone de calibrage du fil.

- le type de lubrifiant.

Les valeurs généralement adoptées pour l'angle 2α varient entre 8 et 20° en fonction des éléments cités précédemment : l'optimum pour lequel les frottements et l'effort de tréfilage sont minimaux est compris entre 10 et 12° [6,8].

d. La force de tréfilage

Lors de l'étirage des fils à travers une filière, les contraintes influencent considérablement les conditions de travail. La déformation plastique intervient dans la filière sous l'effet combiné de la *force de traction* appliquée au fil et de la *compression latérale* qui apparaît le long des parois de la filière comme une force de réaction (**Figure I.9**). À défaut de solution mathématique rigoureuse, des formules ont été établies, donnant des valeurs approchées des forces nécessaires au tréfilage. Ces formules cumulent :

- l'effort principal de déformation ;
- l'effort de frottement sur la paroi ;
- les pertes par cisaillement internes dues à l'inclinaison provisoire des *fibres* du métal lors de son passage à travers la filière.

La plus couramment employée de ces formules est celle dite de **Siebel-Bonzel** qui donne la force de traction unitaire (par unité d'aire de section finale du fil) à la sortie de la filière :

$$F_u = \sigma_m \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2\alpha}{3\varepsilon} \mu^v \right) \quad (6)$$

avec F_u force unitaire de tréfilage,
 σ_m contrainte moyenne d'écoulement,
 ε déformation appliquée ($\ln S/s$),
 μ coefficient de frottement,
 α (rad) demi-angle d'ouverture de la filière,
 v paramètre expérimental.

La contrainte moyenne d'écoulement σ_m correspond approximativement à la moyenne arithmétique de la résistance à la traction σ_0 avant et σ_1 après le tréfilage ; cette valeur est très proche de celle de la limite d'élasticité. Par ailleurs, le docteur Siebel propose

une formule simplifiée dont l'approximation est suffisante du fait de l'incertitude de l'exposant v :

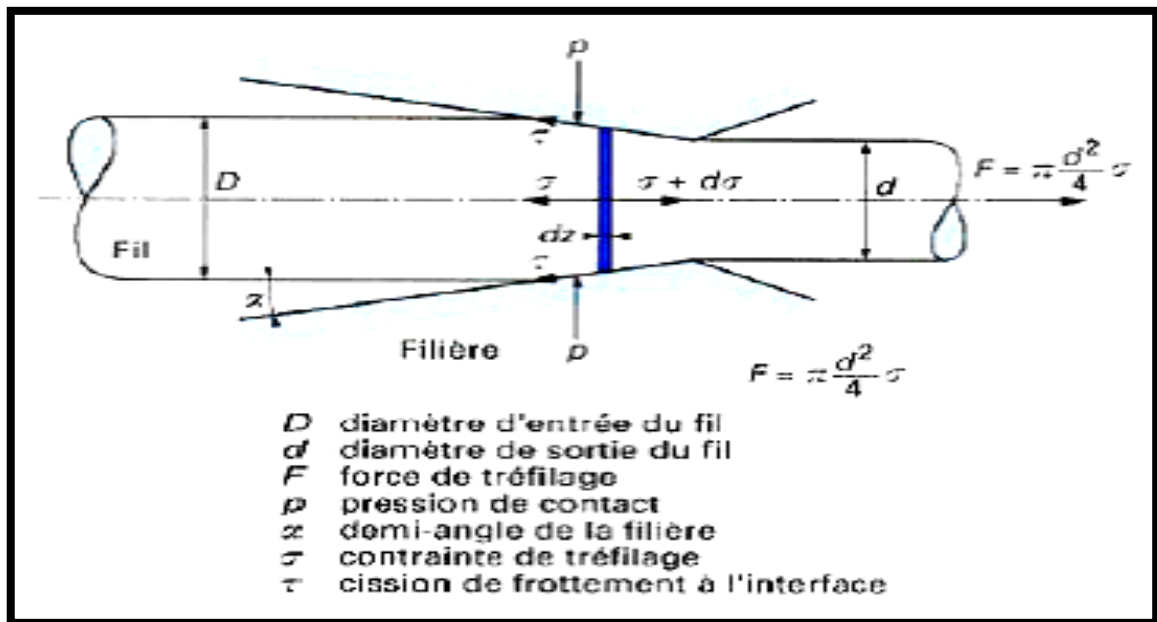


Figure I.9 : Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [6].

e. Matériel de tréfilage

L'ensemble du matériel de tréfilage permettant la transformation du fil machine en fil dit *écroui* comporte trois éléments :

🔧 dispositif de dévidage du fil machine

L'augmentation de la masse des couronnes a fait abandonner le système sur dévidoir tournant au profit du **dévidage statique**.

Pour un fonctionnement régulier de l'ensemble du tréfilage, diverses dispositions ingénieuses sont utilisées, dans le but de :

- Faciliter la manutention ;
- Eviter l'emmêlement des fils et leur rupture ;
- Obtenir l'arrêt immédiat de la machine dans le cas d'emmêlement et pour la sécurité de l'opérateur.

Suivant la place dont dispose l'atelier, les dévidoirs sont :

- à axe horizontal ;
- à axe vertical, ce dernier système imposant des galets de renvoi qui pratiquent un décalaminage préalable.

machine à tréfiler

Les organes principaux de ces machines, (**Figure I.10**) sont :

- les organes d'entraînement (moteur, boîtes de vitesses).
- les bobines d'enroulement servant de cabestan pour la traction du fil à travers la filière, comportant en général à leur base une zone appelée *chasse* dont le profil est tel que chaque nouvelle spire chasse la précédente pour prendre sa place au cours de l'enroulement et permette ainsi une bonne accumulation des diverses spires en vue d'un dévidage ultérieur correct ; tout en faisant diminuer progressivement la contrainte de traction du fil ;
- les supports de filières précédés, dans le cas des tréfilages à sec, d'un réservoir de lubrifiant (par exemple : stéarate) que le fil traverse pour l'entraîner vers la filière ; des dispositifs de refroidissement énergétique de la filière sont prévus sur ces supports [6].



Figure I.10.Machine à tréfiler.

dispositif de récupération du fil écroui

Le fil obtenu sur les machines à tréfiler doit être conditionné pour sa manutention vers les lieux de transformations ultérieures : les types de conditionnements les plus couramment pratiqués sont :

- la botte ;
- la bobine ou roquette ;
- la couronne ;

— la rosace ;

— le pilon (panier métallique).

a) Le fil en **botte** est obtenu sur la dernière bobine de la machine en prélevant, après arrêt, le fil qui a été accumulé. La masse des bottes est limitée à quelques centaines de kilogrammes, par ailleurs, leur enlèvement impose un arrêt de la machine.

b) Bobine ou roquette : l'appareil reprend en direct le fil sur la dernière bobine de chasse de la machine à tréfiler et l'enroule sur une bobine à flasques en le plaçant en spires libres ou jointives et en couches successives. Il est ainsi obtenu des unités de manutention denses pouvant peser plusieurs tonnes.

c) La couronne est obtenue par bobinage du fil en direct à la sortie de machine à tréfiler sur un moule démontable. En fin de bobinage, la masse de fil est maintenue par des liens et la couronne est extraite du moule. Le poids des couronnes peut dépasser plusieurs tonnes.

d) Rosace : un dispositif récupère le fil sur la dernière bobine de la machine à tréfiler et le place sur une bobine fixe à chasse (repère B **Figure I.12**). Chaque spire enroulée sur la bobine fixe pousse la précédente qui est récupérée orbitalement sur un support tournant (S) dont l'axe est excentré de (E) par rapport à l'axe de la bobine. La récupération du fil en rosace permet d'obtenir des conditionnements de plus de 1 t sans arrêt de la machine à tréfiler ni du dispositif de réception du fil.

e) Pilon : le fil est réceptionné sur un panier métallique (le pilon) soit par enroulement libre, soit par enroulement orbital à partir d'un dispositif semblable à celui utilisé pour le conditionnement en rosace. Ce mode de conditionnement permet des manutentions particulièrement simples de masse de fil de 1 à 2 t.

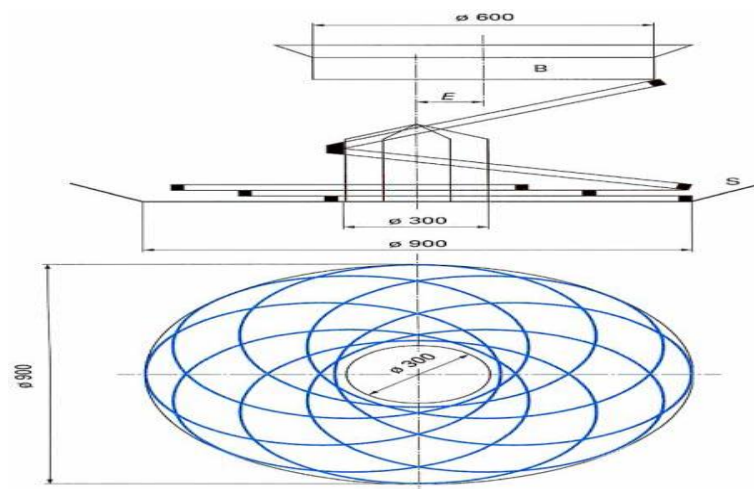


Figure I.11: Mise en rosace.

f. Lubrification

Le lubrifiant doit offrir un film épais pour la rugosité du fil, et obtenir une bonne séparation entre le fil et la filière afin atténuer le frottement. Ce dernier, produit un échauffement du fil, par conséquent le fil tréfilé est rayé et la filière est usée.

On trouve dans la composition des lubrifiants employés en tréfilerie un grand nombre de corps dont, certains sont assez inattendus, mais qui rentrent généralement dans l'un des groupes ci-dessous :

- Les corps gras (huile, végétales, graisses animales).
- Les huiles minérales et graisses consistantes.
- Les savons.
- Certaines lubrifiants minéraux (talc, graphite,...etc.).

Dans le tréfilage des aciers, il est préférable d'utiliser souvent de savon de calcium à faible teneur en matière grasse.

I.3.4.La stabilisation

Une fois le fil tréfilé produit, il est bobiné sur une bobine de 6 tonnes qui sera montée sur le dévidoir de la ligne de stabilisation. Le fil subit un traitement thermomécanique, durant lequel le fil est simultanément chauffé à $\sim 380^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ et mis sous une tension de l'ordre $\sim 40 - 50\%$ de la charge de rupture minimale du fil. Ce procès élimine les tensions résiduelles de la surface du fil générées lors du tréfilage et améliore les caractéristiques mécaniques en augmentant la limite élastique, le module d'élasticité et en réduisant la perte par relaxation. Le fil est ensuite refroidi à l'air et conditionné en bobine ayant les dimensions et le poids tels que requis par le client final.

Les figures I.12, I.13, I.14 présentent les différents composants du linge de stabilisation :



Figure I.12: Dévidoir.

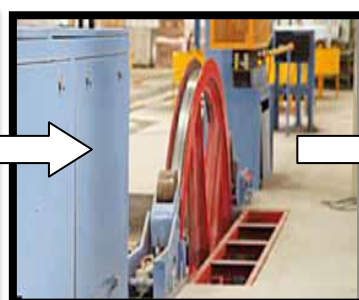


Figure I.13: Cabestan de tirage.



Figure I.14: Pinch Wheel.

I.3.5.Traitements thermiques associés au tréfilage

a. Patentage

Le patentage est un traitement thermique isotherme réalisé sur fil d'acier à haute ou moyen teneur en carbone pour affiner la structure perlitique. Ce traitement peut être réalisé sur fil brut. Mais il est plus souvent mis en œuvre après un premier tréfilage.

Outre l'affinement de la perlite, le Patentage permet de régénérer une structure écrouie et de poursuivre le tréfilage de fils très fins avec de bonnes caractéristiques mécaniques, tant en résistance, qu'en striction. L'application la plus connue est le *steel cord* ou un patentage est réalisé vers 1mm [11].

b. Traitement de relaxation

Ce traitement spécifique est réalisé quand, sur le produit fini, comme par exemple les torons de précontrainte, il est nécessaire d'augmenter le niveau limite élastique pour le rapprocher du niveau de résistance R_m de manière à ce que le toron ne se déforme pas en cours de sollicitation.

Il s'agit d'un traitement court, effectué en ligne avec passage dans un four indexé vers 400°C, avec application d'une légère tension sur le toron [11].

I.4.Les caractéristiques des aciers de précontraintes

Les aciers de précontraintes fabriqués à Tréfisoud d'El Eulma doivent répondre à certaines caractéristiques exigées par la norme en vigueur pour ce type de produit. La conformité de ces résultats avec les propriétés des fils en acier de précontraintes est strictement demandée pour affirmer la qualité des contrôles réception des produits de départ en l'occurrence le fil machine et des propriétés du fil tréfilé et stabilisé qui constitue le produit final de la chaîne de production [5].

I.4.1.Les caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques du fil tréfilé sont contrôlées, en effet le contrôle du produit commence par la vérification des diamètres nominaux, des sections nominales et de la masse linéique nominale (calculée à partir de la masse volumique du fer égale à 7,81 g/cm³). La conformité des résultats nécessite la vérification également des tolérances exigées pour les dimensions demandées NF EN ISO 15630-3.

I.4.2. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques exigées pour les aciers de précontraintes sont tirées des essais de traction réalisés conformément à la norme en vigueur. On détermine alors :

- La force de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,1% ($F_{p0,1}$)^[2]
- La force maximale (F_m)² ;
- L'allongement total en (%) à la force maximale (A_{gt})² ;
- Le coefficient de striction (Z) (ou l'assurance d'une rupture ductile visible à l'œil nu) ;
- Le module d'élasticité E (il est conventionnellement égal à 205 GPa pour les fils et barres et à 195 GPa pour les torons).

I.4.3. Le comportement en relaxation

Le comportement en **relaxation** des aciers de précontraintes correspond à la perte de force observée à un allongement maintenu constant. Il est caractérisé par les essais décrits par la norme NF EN ISO 15630-3. Les spécifications retiennent la perte maximale par relaxation à partir de 1000 h pour une force appliquée égale à 70 % ou 80 % de la force maximale effective de l'acier (F_{me}) lors d'un essai effectué à une température ambiante de 20 °C.

I.4.4. La résistance à la fatigue

La résistance à la fatigue sous force axiale exprimée par une courbe de Wöhler (courbe SN) ou un diagramme de type Goodman-Smith. Les spécifications des produits retiennent pour les essais des conditions correspondant à un point de la courbe SN.[2] .

I.4.3. La résistance à la corrosion sous contrainte

Ce phénomène se traduit par une fissuration sous contrainte due à la fragilisation par l'hydrogène. Le comportement peut être évalué par un essai de corrosion au thiocyanate d'ammonium décrit dans la norme NF EN ISO 15630-3 ou un essai de corrosion à l'eau distillé le décrit dans la norme NF A 05-302.

I.4.4. La résistance à la traction déviée

La connaissance de cette caractéristique permet d'évaluer le comportement d'un acier de précontrainte (torons de diamètre nominal $\geq 12,5$ mm utilisés en précontrainte par

post-tension) soumis à des contraintes multiaxiales comme celles engendrées au niveau d'une déviation ou des ancrages. Elle est caractérisée par un essai (voir NF EN ISO 15630-3) et s'exprime sous la forme d'un coefficient de traction déviée correspondant à la réduction de la force constatée lors de l'essai.

I.4.5. L'aptitude au pliage alterné

Uniquement déterminée pour les fils. Elle caractérise la ductilité des produits. Elle est caractérisée par un essai (voir les normes NF EN ISO 15630-3 et ISO 7801).

I.4.5.L'adhérence

L'**adhérence** au béton qui est en relation avec les caractéristiques de forme (pour les torons) ou de surface (fils crantés ou barres à reliefs). Elle dépend du pas de toronnage dans le cas des torons ou des caractéristiques géométriques des reliefs (hauteur ou profondeur, espacement) dans le cas des fils crantés ou barres à reliefs.

I.5.Les défauts des aciers de précontrainte

I.5.1. La composition chimique

L'acier de précontrainte doit comprendre le moins d'inclusions possible, la formation d'oxydes non déformables est nuisible pour la mise en forme et la tenue en fatigue car le taux de déformation des inclusions est inférieur à celui de déformation de l'acier les inclusions nocives pour l'acier de précontrainte sont des inclusions contenant :

- de l'aluminium (Al),
(Figure I.15).
- du calcium (Ca).
- de l'oxygène (O).
- du magnésium (Mg).

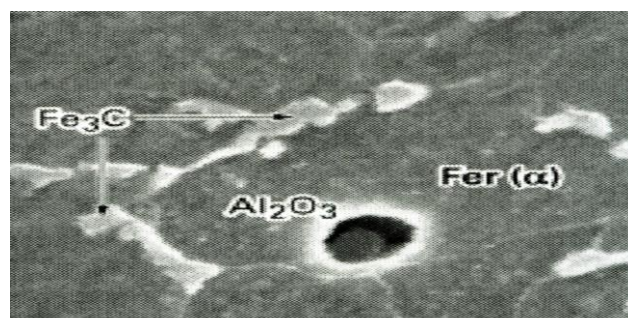


Figure I.15 : Présence d'inclusion

Lors du tréfilage la décohésion à l'interface inclusion-métal provoque la propagation des fissures et rupture du fil, (Figure I.16)

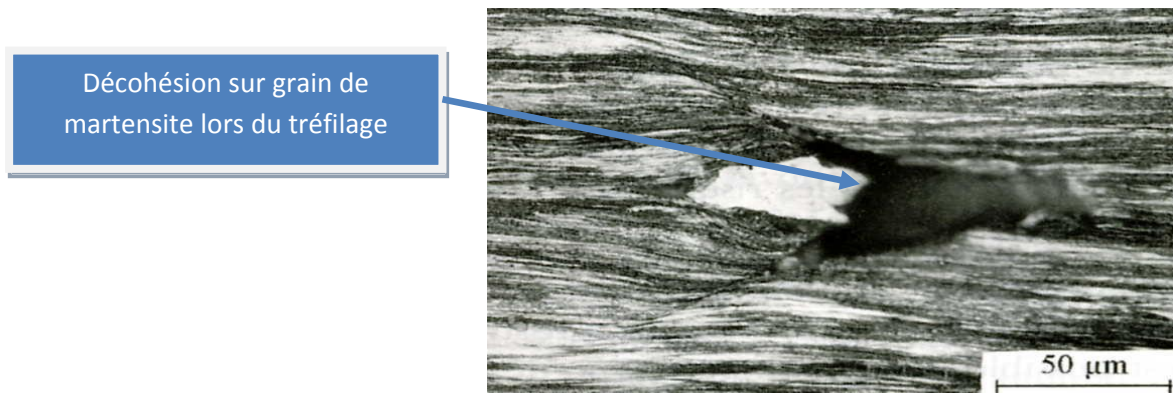


Figure I.16 : Décohésion lors du tréfilage

I.5.2. Etat de surface

Les défauts de surface sont la cause principale de rupture lors des opérations de mise en forme à froid, (**Figure I.17**) ces ruptures s'accompagnent d'un écrouissage important qui accélère la rupture finale.

Les principaux défauts de surface sont les suivants :

- défauts traditionnels : fissures, repliures, pailles.
- Incrustations lors du laminage.
- Ségrégation de carbone ou des impuretés à la surface du métal de la coulée.
- Lignes horizontales : importante déformation des grains dans une direction privilégiée et en surface, (**Figure I.18**).
- Présence d'une couche d'oxyde en surface qui a tendance à augmenter son écrouissage.

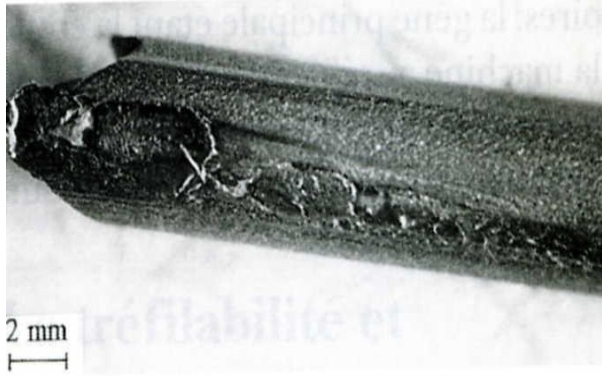


Figure I.17 : Casse initiale en surface.



Figure I.18: Lignes horizontales.

I.5.3. La microstructure :

La microstructure conditionne l'aptitude du métal à être tréfilé, pour une même teneur en carbone les aciers ayant une structure perlitique fine acquièrent une meilleure résistance mécanique.

Le comportement au tréfilage dépend de la proportion de ferrite dans la structure, car le taux de déformation de la ferrite libre est supérieure à celle de la perlite mais également des modifications de la perlite par écrouissage. La concentration locale de carbone entrainant une diminution de la ductile, (**Figure I.19**).

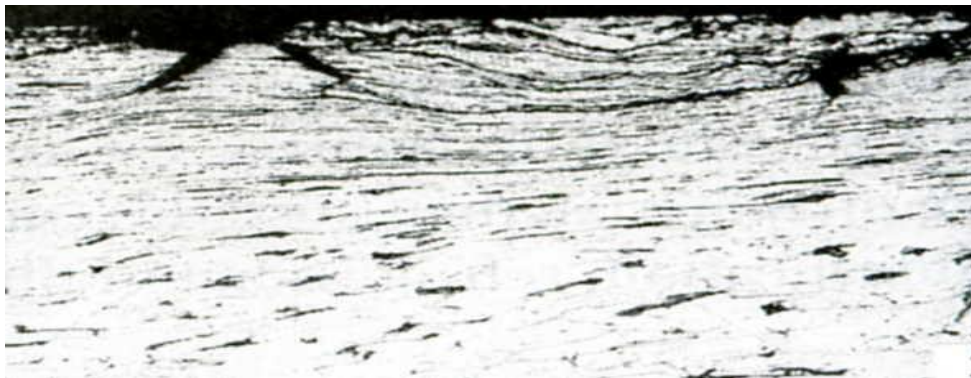


Figure I.19 : Enrichissement de carbone en surface et fissurations.

I.6. Les inclusions non métalliques dans l'acier

Outre le carbone, les aciers contiennent les éléments d'addition et des impuretés dont leur présence découle de leur mode d'élaboration : manganèse (Mn), silicium (Si), Aluminium (Al), soufre (S) et phosphore (P).

Lors de l'affinage de l'acier, le Mn utilisé sous forme de ferromanganèse comme désoxydant et comme désulfurant, augmente la proportion de perlite dans l'acier car il se substitue en partie au fer de la cémentite. En solution solide dans le fer, il exerce un effet durcissant et de plus il abaisse la température de transition ductile-fragile. Combiné au soufre, il forme le sulfure de manganèse MnS qu'on retrouve sous forme d'inclusions.

On utilise également le silicium comme agent désoxydant, soluble dans la ferrite, le silicium (Si) a un effet durcissant comparable à celui du Mn mais il a tendance cependant à diminuer la soudabilité de l'acier.

Le soufre et le phosphore constituent des impuretés dont on cherche à abaisser leur teneur car ils rendent l'acier fragile et difficilement soudable. D'où l'intérêt de l'addition de Mn qui produit du sulfure de manganèse (MnS).

Lorsqu'on ajoute des éléments désoxydants (Si, Al ou Mn) avant ou pendant la coulée de l'acier, on réduit la teneur en oxygène, par conséquent l'effervescence ne se produit plus et l'acier est dit alors calmé. La ségrégation du carbone est peu importante dans les aciers calmés. L'acier calmé à l'aluminium peut engendrer la formation d'oxydes (Al_2O_3) qui persistent dans l'acier même après désoxydation, d'où formation d'inclusions de Al_2O_3 qui altèrent également les caractéristiques mécaniques de l'acier [13].

Les ajouts de manganèse dans le bain métallique fixe le soufre sous forme de MnS. Il a été établi que les propriétés des aciers coulés ou moulés sont fortement affectés par la morphologie des inclusions de MnS.

Il existe quatre types d'inclusions de MnS selon leur forme (Figure I.20).

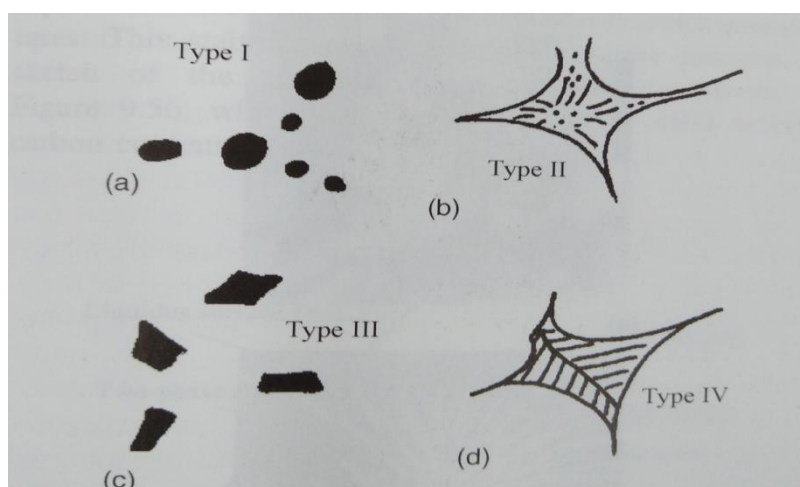


Figure I.20. Les différents types d'inclusions de MnS.

-Inclusion MnS de type II et IV : ces dernières sont plus dangereuses que celles du type I et III. Il est donc important d'éviter les précipités de MnS de type II, ces précipités sont à l'origine d'effets négatifs maximum sur les propriétés mécaniques des matériaux. Ils entraînent une forte dégradation de la ductilité, de la ténacité et de la résistance à la traction.

Les aciers contenant des inclusions de MnS de type II perdent leurs caractéristiques dans le sens transversal, c'est le cas des produits plats laminés.

Lorsque le pourcentage de Mn est faible, il y a précipitation du sulfure de fer FeS. Ces précipités prennent l'apparence d'un film et altèrent fortement les propriétés de l'acier. Ils sont aussi dangereux que les précipités de MnS de type II, il est donc important d'éviter la formation des inclusions FeS.

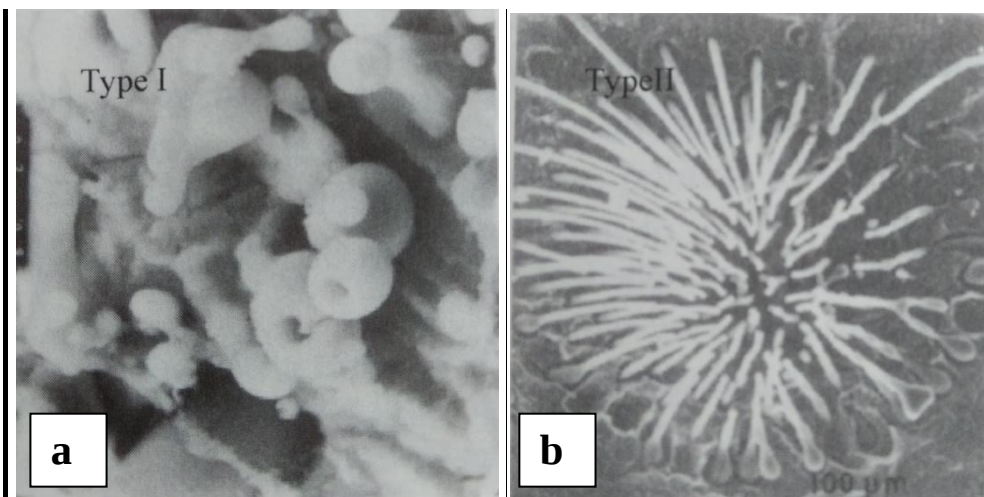


Figure I.21. (a) Les inclusions de MnS de type. (b) Les inclusions de MnS de type II.

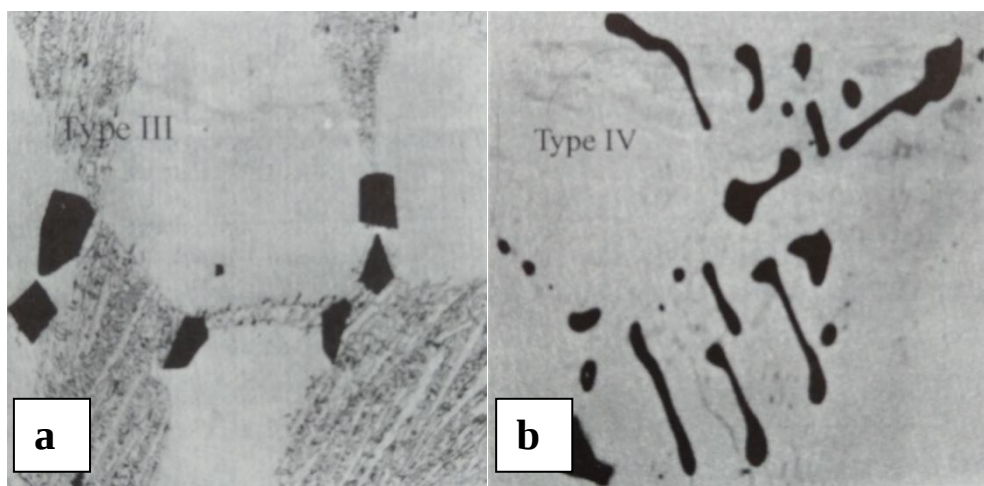


Figure I.22. (a) Les inclusions de MnS de type III. (b) Les inclusion de Mns de type IV.

L'apparition de différents types d'inclusions de MnS dépend de la teneur en carbone.

-Inclusion MnS de type I et II apparaissent dans les aciers à bas carbone.

-inclusion MnS de type III et IV se forment dans les aciers à haute teneur en carbone et dans les aciers moulés. Cependant leur apparition est conditionnée par la concentration en soufre et par la vitesse de refroidissement du bain liquide ou en d'autres termes par la vitesse de germination et par les variations de la solubilité du soufre dans le réseau du fer. La solidification du liquide conduit à un rejet du S dans les joints de grains du fait que la ferrite dissoute peu de soufre [14]

I.6. Les applications de l'acier de précontrainte

Les aciers de précontrainte sont utilisés dans le domaine de la construction et principalement pour :

- Les tabliers et les haubans de ponts, (**Figure I.23**).



Figure I.23. Viaduc des trois bassins à La Réunion

- Les hourdis, poutrelles et planchers précontraints pour les bâtiments.
- Les enceintes de confinement pour centrales nucléaires.
- Les ouvrages maritimes et les plates-formes pétrolières en béton.
- Les poteaux support des lampadaires de l'éclairage public.
- Les réservoirs contenant du gaz naturel liquéfié (LNG).
- Les châteaux d'eau, tunnels, tirants d'ancrage.

CHAPITRE II : Aspect technologique

II.1.Introduction

Ce chapitre nommé aspect technologique a été rédigé afin de décrire l'entreprise qui m'a accueillie durant mon stage de fin d'études (PFE). Dans cet objectif nous allons présenter en quelques lignes, et très brièvement, une description de l'entreprise TREFISOUD ainsi que l'unité de tréfilerie de l'acier dur, lieu de stage. On retrouvera également dans ce chapitre, les caractéristiques des aciers de précontraint suivi des gammes produits de TREFISOUD et leurs principales utilisations.

II.2.Présentation général de l'entreprise TREFISOUD

La Société TREFISOUD est une filiale du Groupe de Transformation des Produits Longs dont le siège se trouve à Oran, sous tutelle du Ministère de l'Industrie Lourde.

TREFISOUD est située dans la zone Industrielle côté Sud de la Daïra d'EL-EULMA.

Le démarrage en production a débuté en 1980 avec un objectif de 32000 Tonnes de fil tréfilé/An.

La Société s'approvisionne en Fil Machine rond qui constitue sa matière première principale depuis le laminoir fil rond L.F.R du complexe Sidérurgique Arcelor Mittal El Hadjar et Allemagne.

L'unité est composée de trois directions principales :

1. Direction d'exploitation: Comporte trois divisions :
 - Division électrode et flux de soudage (E.F.S).
 - Division tréfilerie de l'acier doux (T.A.D).
 - Division acier dur (A.C.R) : lieu de stage de PFE.
2. Direction développement :
3. Direction commerciale : L'occupation principale de l'établissement industrielle consiste en une unité de production et de vente des produits tréfilés et des produits de soudage.

II.3.Aperçu sur l'unité ACR

II.3.1.Programme de production

Tableau II.1 : Le programme de production de l'ACR

Diamètre (mm)	5,00	6,00	7,00	Total
Quantité (t/an)	1200	8500	300	10000

II.3.2.Caractéristiques du fil de précontrainte

- ✚ Diamètre du fil : 4,00-5,00-6,00-7,00 et 8,00 mm
- ✚ Tolérance : $\pm 0,030$ mm.
- ✚ Analyse chimique :

Tableau II.2 : La composition chimique du fil de précontrainte.

Eléments	C	Mn	Si	S	P
(%)	0,75-0,85	0,60-0,90	0,10-0,30	$\leq 0,03$	$\leq 0,03$

✚ Caractéristiques mécaniques

Tableau II.3 : Les caractéristiques mécaniques du fil en acier de précontrainte

Caractéristiques Exigées	R _m (MPa)	R _{e 0.1%} (MPa)	Relaxation à 1000 heures	Crantage profondeur (mm)
Valeur	1550 -1750	1160	$\leq 2,5$ %	0,050-0,100

✚ Conditionnement

Le fil doit être conditionné en couronnes de diamètre variable entre 1500 mm pour les diamètres fins et de 2400 mm pour les gros diamètres. Le poids de chaque couronne doit être supérieur à 750 kg.

II.3.3.Conditions du site d'implantation

L'usine de TREFISOUD est implantée à El-Eulma, ville située au centre nord de l'Algérie, dans la région des hauts plateaux.

Les caractéristiques climatiques de la région d'El Eulma sont :

- Altitude : 860 m
- Température : -5°C à +45°C
- Humidité relative : 30 à 80%
- Pression atmosphérique variable de 720 à 760 mm de mercure.
- Eau courante de dureté TH de 30 à 40° français.
- Eau décarbonatée de refroidissement : Dureté inférieure à 22° français.

II.4. Gammes produits de la Tréfilerie

Les produits fabriqués au niveau de la Division Tréfilerie sont :

Cités ci-dessous, ces produits sont réalisés en fonction des besoins de la clientèle et du marché national en général.

Les produits fabriqués par TREFISOUD sont compétitifs et répondent surtout à des exigences de qualité du produit. On distingue :

- fil tréfilé clair écroui.
- fil tréfilé clair écroui pour électrodes de soudure.
- fil galvanisé de type essuyé.
- fil galvanisé de type riche.
- fil galvanisé retréfilé.
- fil cuivré de soudage.
- fil cuivré ordinaire.
- grillage simple torsion de différentes mailles.
- grillage fin à maille hexagonale.
- fil de précontrainte lisse et cranté.
- Toron de précontrainte.
- grillage triple torsion ou gabion.
- fil recuit.
- fil recuit d'attache.
- fil recuit retréfilé.
- fil pick-up (recuit bobiné pour l'agriculture).

II.5. Principales utilisations des produits de la tréfilerie

Parmi les principales utilisations et usages des produits de la tréfilerie

On peut citer :

- Fil cuivré de soudage utilisé notamment pour le soudage automatique ou semi automatique sous flux solide en poudre :
- Fil pour pick-up : utilisé dans l'agriculture pour le bottelage des fourrages sur les presses ramasseuses botteleuses.
- Fil galvanisé : utilisé pour la confection des différents grillages simple torsion, triple torsion, grillage hexagonal fin, grillage plastifié, serres, confection des différents axes de jouets divers, supports divers d'éléments et cadres métalliques etc.
- Fil galvanisé retraits : généralement utilisé pour la confection des pinces à linges, cages d'oiseaux.
- Fil Recuit livré en l'état : pour les différents emballages des produits, pour les attaches des armatures différentes de faible et moyenne sollicitation, pour la confection de certains éléments d'articles divers de la quincaillerie générale, utilisé aussi dans les bâtiments comme fil d'attache reliant les ronds à béton dans l'industrie, ou bien comme matière première pour une seconde ou multiple transformation le cas de fil ébauche devant servir comme semi-fini pour la réalisation des produits finis.

CHAPITRE III : Matériaux et techniques expérimentales

III.1.Introduction

Le tréfilage est un procédé de mise en forme très utilisé dans l'industrie pour l'obtention des fils. Parmi les entreprises Algériennes spécialisées dans ce domaine, on peut citer à titre d'exemple TREFISOUD (El-Eulma). Le stage effectué au sein de cette entreprise avait pour objectif de connaître le principe de fabrication des produits de cette dernière et de recenser les problèmes de qualité des produits.

Parmi les différents sujets proposés, nous avons donc décidé de choisir un sujet pour le mémoire de PFE, il s'agit donc du travail qui a pour intitulé « Caractérisation de l'acier perlitique destiné à la fabrication des fils précontraints au niveau de TREFISOUD ». Les fils en acier de précontrainte produit par cette entreprise nationale, répondent bien aux besoins du marché Algérien et aux normes de conformité.

Dans ce chapitre, nous allons mettre l'accent sur les matériaux utilisés en l'occurrence le fil machine, le fil tréfilé, stabilisé et le produit final afin d'étudier l'évolution des différentes caractéristiques et de voir leur conformité. Nous décrirons également les différentes techniques de caractérisation utilisées pour mener à bien ce travail.

III.2.Matériaux étudiés

La connaissance parfaite des conditions de tréfilage de notre acier dur, impose une étude complète du fil tréfilé en commençant bien évidemment par la matière première c'est à dire le fil machine importé (**Figure III.1**). La composition utilisée par l'entreprise TREFISOUD d'El-Eulma est l'acier perlitique de nuance C78D connu sous la désignation numérique 1.0620 dont le diamètre initial est égal à 11 mm et avec un numéro de coulée N : 483920. La matière première est livrée par l'entreprise Allemande « Arcelor Mittal » Il se présente sous forme de bobines de poids unitaire de 1500 à 3000 kg dont les dimensions sont citées dans le chapitre précédent.



Figure II.1. Le fil machine de Tréfisoud

III.3.L'analyse chimique

A l'arrivée de la matière première, La composition du fil machine est obligatoirement vérifiée au niveau du laboratoire de TREFISOUD. Les tolérances de la composition selon l'entreprise Allemande « Arcelor Mittal » sont présentées sur le **Tableau III.1**. Les analyses chimiques réalisées au niveau de TREFISOUD.

Tableau III.1. Composition chimique du fil machine selon TREFISOUD.

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Composition massique (%)	0,809	0,206	0,549	0,001	0,005	0,033	0,001	0,001	0,013	0,001

Les résultats obtenus dans le **Tableau III.1** donnent les teneurs en élément de la nuance utilisée pour l'acier dur perlitique de précontrainte importé d'Arcelor Mittal.

Les caractéristiques de la nuance C78D utilisée pour l'acier dur sont spécifiées dans la norme EN 10016-1 et EN 10016-2 :

- a) EN 10016-1 / Partie 1 : Prescriptions générales.
- b) EN 10016-2 / Partie 2 : Prescriptions spécifiques au fil machine d'usage général.
- c) Nuance : C78D de la norme européenne EN 10016-2 correspond à la désignation numérique 1.0620 de la norme Afnor NF A 35 051 avec la composition chimique spécifique ci-dessous **Tableau III.2**.

Tableau III.2. Composition chimique du fil machine de nuance C78D selon la norme.

Nuance d'acier		Composition chimique (%)									
Désignation symbolique	Désignation numérique :	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
C78D	1.0620	0,75	0,15	0,65	0,02	0,02	0,15	0,20	0,05	0,15	0,02
		-	-	-							
		0,8	0,30	0,85							

III.4.Dimensions

Les fils utilisés pour ce type d'acier précontraint ont les dimensions suivantes. Ces dimensions sont contrôlées avec les moyens appropriés conformément à la norme citée ci-dessous.

- Diamètre : 11,00 mm.
- Tolérances sur diamètre : selon les prescriptions de l'EU 17 conformément au §8 de la norme EN 10016-1

III.5.Les caractéristiques mécaniques du fil machine

Les caractéristiques mécaniques du fil machine réceptionné au niveau de TREFISOUD avant tréfilage sont les suivants :

- Résistance à la rupture $R_m = 100$ à 115 Kg/mm^2 .
- La limite élastique $Re_{0,1\%} = 83$ à $95,45 \text{ Kg/mm}^2$.
- Allongement $A = 20\%$ au minimum.

III.6.Préparation de surface du fil machine à TREFISOUD

Avant toute opération de tréfilage, il est nécessaire en premier temps d'enlever la couche d'oxyde qui revêt la surface du fil machine. L'installation complète (Figure III.2) de ce procédé est composée de cinq phases :

1. **Décapage avec l'acide sulfurique** : Le décapage chimique à l'acide sulfurique consiste à immerger les bobines de fil dans un bain de H_2SO_4 chauffé à une température de 56°C à 58°C à l'aide d'un échangeur de chaleur et à la vapeur, avec une concentration de 140g/l et un temps d'immersion d'environ 15mm.
2. **Rinçage à l'eau** : Pour éliminer les traces d'acide sulfurique restantes à la surface du fil.
3. **Phosphatation** : Pour favoriser en plus une passivation de la matière contre la corrosion, et la lubrification de la filière lors du tréfilage.
4. **Immersion au borax** : Pour une élimination complète des traces d'acide sulfurique le fil est immergé dans une solution du borax.
5. **Séchage** : Se réalise à une température de 150 à 180°C dans un tunnel par soufflage d'air pour fixer le borax.

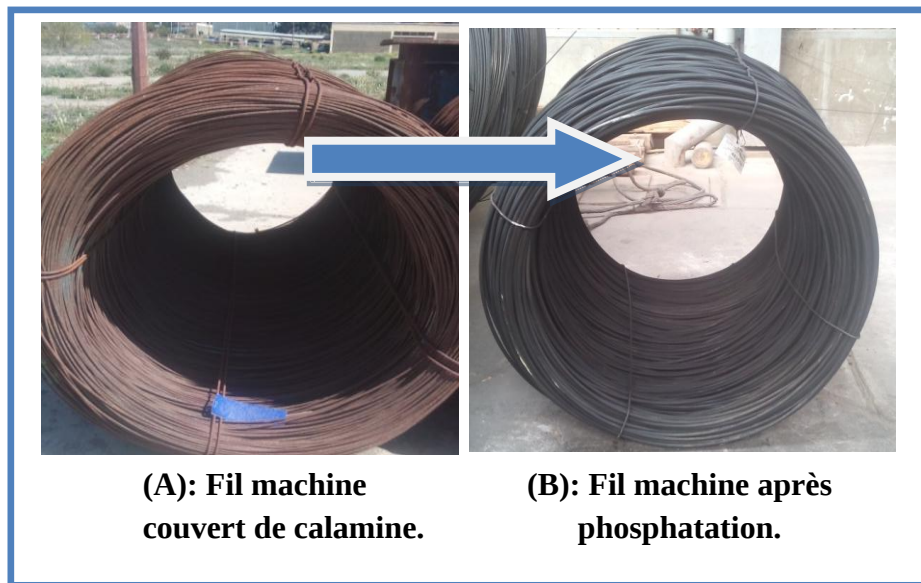


Figure III.2. Le fil machine avant et après phosphatation.

III.6.1. Contrôle du bain de phosphatation

Pour réussir ce contrôle on a suivi trois modes opératoires décrivant les méthodes de mesure de la teneur en acidité libre, acidité totale et acidité totale d'oxalate comme suivant :

1. Détermination de la teneur en acidité libre (FA)

- Prélever 10 ml du bain en service.
- Verser dans un bécher, ajouter quelque gouttes de bromophénol bleu (indicateur coloré).
- Titrer sous agitation avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) 0,1N jusqu'à ce que l'échantillon (de couleur jaune) vire au vert (bleuté).
- Noter le volume final de NaOH ajouté.

2. Détermination de la teneur en acidité totale (TA)

- Prélever 10 ml du bain en service.
- Verser dans un bécher, ajouter quelques gouttes de phénolphtaléine (indicateur coloré).
- Titrer sous agitation avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à 0,1N jusqu'à ce que l'échantillon (incolore) vire au rose.
- Noter le volume de NaOH ajouté en points.

3. Détermination de l'acidité totale d'oxalate (OX)

- Prélever 10ml du bain en service.
- Ajouter 2g d'oxalate de potassium.
- Ajouter 5 gouttes de phénolphtaléine.
- Titrer sous agitation avec de l'hydroxyde de sodium (NaOH) à 0,1N jusqu'à ce que l'échantillon (incolore) vire au rose.
- Noter le volume final de NaOH versé.



(A) : Solution d'hydroxyde de sodium

(B) : Appareillage de titrage.

(C) : Les indicateurs colorés

(D) : Oxalate de potassium.

Figure III.3. Le matériel du contrôle des bains de phosphatation.

III.6.2.Maintenance du bain de phosphatation

Pour un bon fonctionnement du bain on peut déterminer les ajustements éventuels à partir des paramètres calculés l'acidité totale (TA), l'acidité libre (FA) et l'acidité totale d'oxalate (OX) du bain de phosphatation.

Le tableau ci-joint indique les volumes à titre indicatif qui seront adapté selon l'application.

Tableau III.3 : Les marges des valeurs de l'acidité totale avec les rapports entre l'acidité totale et l'acidité libre et totale d'oxalate.

	<i>Application Batch</i>	<i>Application au défilé</i>
Acidité totale (TA)	40 - 45	80 - 90
Ratio TA /FA	06 - 10	06 - 08
Ratio TA/OX	1,8 -2,2	1,7 – 2,0

III.6.3.Détermination de la couche de phosphatation

Ce mode opératoire décrit la procédure de détermination de la couche de phosphatation du fil dur de diamètre 13,00, 12,00 et 11,00 mm :

- Prélever un échantillon de fil phosphaté de longueur $L=50\text{mm}$.
- Plonger l'échantillon dans de l'eau bouillante pendant 10min, le sécher à l'aire pendant 30 secondes.
- Peser l'échantillon et noté P_1 .
- Mettre l'échantillon dans une solution d'hydroxyde de sodium, chauffée à une température de 80°C pendant 10 min.
- Immerger immédiatement l'échantillon dans l'eau froide.
- Retirer l'échantillon de l'eau et le frotter soigneusement, en utilisant de nombreux tissus trempés dans le solvant.
- Repeser l'échantillon et noter P_2 .
- Expression du résultat : $P = \frac{[(P_1 - P_2)]}{P_2} \times 1962 \times d$, avec d le diamètre de l'échantillon en mm.

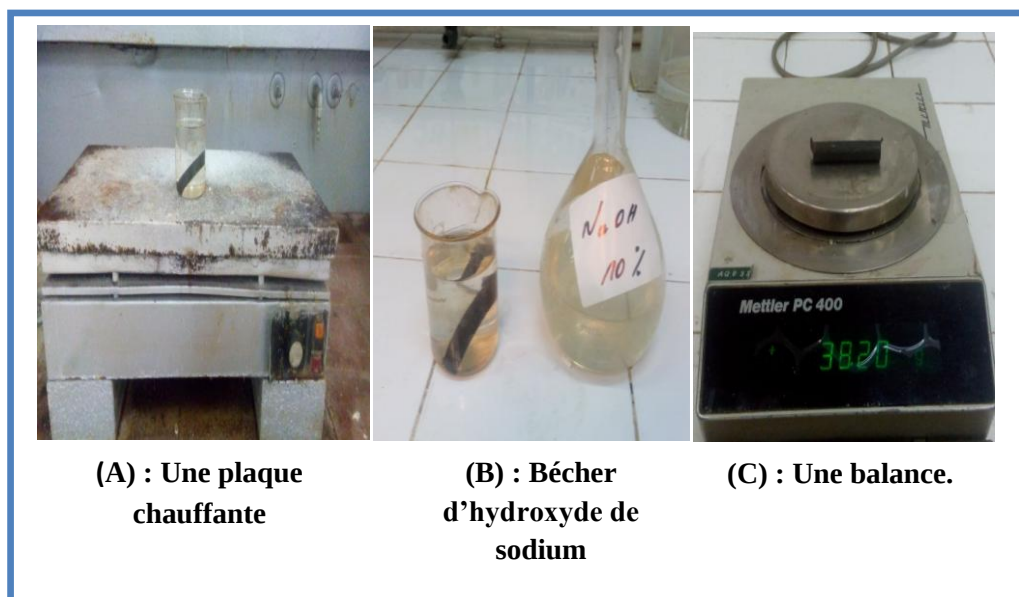


Figure III.4. Vaisselle et appareil de détermination de la couche de phosphatation.

III.7.Prélèvement des échantillons

La matière qui nous a été fournie par l'entreprise concerne la nuance C78D, on a choisi deux bobines avec différents numéro de coulé, l'une d'elle est conforme et l'autre non

conforme. Pour mener à bien notre étude nous avons fait des prélèvements d'échantillons suivants :

1. Fil machine (1) de diamètre $\varphi=11\text{mm}$ (Figure III.5), qui est directement prélevé d'une bobine qui a subi une préparation de surface; décapage puis phosphatation.
2. Fil tréfilé conforme (2) (Figure III.5) de diamètre $\varphi= 6,93\text{mm}$ de la même bobine du fil machine précédant. Ce fil a été sélectionné et prélevé depuis la chaîne de tréfilage par le personnel de l'ACR. Il a subi un tréfilage par une tréfileuse à cabestans à axe incliné, de type MTS 900/6, dont les filières sont en carbure de tungstène, les lubrifiants utilisés pour la première et la deuxième passe sont un savon à base de calcium, et pour le reste des passes ils sont à base de sodium.
3. Un fil tréfilé et stabilisé (3) (Figure III.5) de diamètre $\varphi=6.00\text{mm}$ de la même bobine précédente.
4. Un fil tréfilé (Figure III.6) prélevé du stock de fils tréfilés non conformes qui n'ont pas subi de stabilisation à cause de l'apparition des défauts de surface.

Dans le **Tableau III.4** on trouve les différents diamètres des files de la ligne de tréfilage avec leurs réductions.

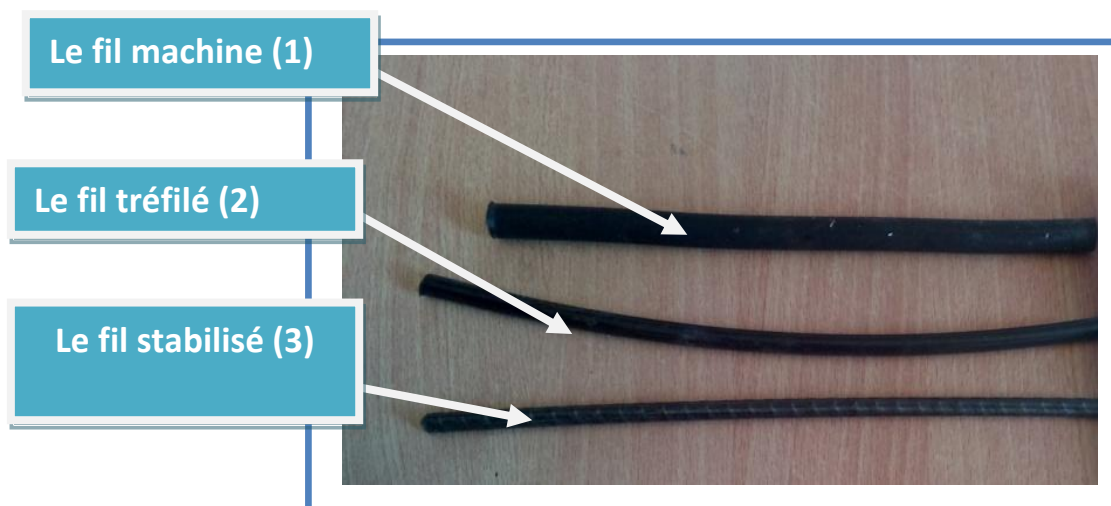


Figure III.5 : Les échantillons conformes de la première bobine.



Figure III.6: L'échantillon tréfilé non conforme avec L'apparition des défauts à la surface.

Tableau III.4: Performance de la ligne de tréfilage pour notre fil machine conforme de diamètre $\varphi = 11\text{mm}$.

Passe	Diamètre de fil (mm)	Réduction (%)	Vitesse (m/s)
1	11		
2	9,8	17,97	2,46
3	8,93	16,97	2,90
4	8,16	16,50	3,37
5	7,5	15,52	3,92
6	6,93	14,62	4,50

III.8. Analyse métallographique :

III.8.1. Préparation des échantillons

III.8.1.1. Découpage

Le découpage des échantillons a été réalisé à l'aide d'une macro et une micro tronçonneuses (Figure III.7, III.8) avec une vitesse lente et sous une coulée d'eau pour le refroidissement afin d'éviter d'altérer la microstructure. Les échantillons destinés pour les essais de traction et de pliage alterné sont découpés à une longueur de 30cm (Figure III.9) et ceux des autres caractérisations sont découpés à 1 cm de longueur, certains sont échantillons découpés dans le sens travers et d'autres dans le sens longitudinale. (Figure III.10)



Figure III.7. Vue de la macro-tronconneuse.

Figure III.8. Vue de la micro-tronconneuse.



Figure III.9. Epreuve de traction et de pliage.

Figure III.10. Echantillons pour la métallographie, dureté et micro-dureté.

III.8.1.2 : Polissage

Les échantillons destinés à la métallographie, à l'essai de Dureté et à l'essai du Micro-dureté ont été enrobés à chaud avec une enrobeuse (Figure III.11) puis polis à l'aide des papiers abrasifs à base de carbure de silicium de différentes granulométries. Le polissage est effectué au niveau des laboratoires de l'école ENSMM d'Annaba sur une polisseuse mécanique (Figure III.12).



Figure III.11: Enrobeuse à chaud.



Figure III.12: Polisseuse.

Le Pré-polissage

Comme la surface des échantillons est recouverte par la résine noire après l'enrobage à chaud nous avons fait un pré-polissage pour nos échantillons pour faire apparaître la surface grâce à l'utilisation des papiers abrasifs de : 120, 180, 240, 320 et 400.

Le polissage

Après le pré-polissage nos échantillons ont subis un polissage avec les papiers abrasifs suivants: 600 pendant 5 min, 800 pendant 5 min, 1000 pendant 5 min, 1200 pendant 3 min. A la fin, on a effectué un polissage de finition grâce au papier feutre.

III.8.1.3. Attaque chimique

Les échantillons destinés à l'observation métallographique subissent une attaque chimique adéquate d'une durée de 5s à 1,5min à température ambiante pour révéler leur microstructure grâce au Nital à 3% constitué de :

- 2 à 5 ml d'acide nitrique ($\rho_{20} = 1,33 \text{ g.ml}^{-1}$).
- 100 ml d'éthanol pur.

Avant l'observation, les échantillons sont lavés à l'eau et l'éthanol puis séchés.

III.8.1.4. Nettoyage aux ultra-sons

Les échantillons destinés à l'observation métallographique au microscope électronique à balayage MEB subissent un nettoyage par des ultra-sons afin d'éliminer toute trace d'impuretés qui pourraient subsister en surface, les échantillons découpés sont mis dans

un bécher rempli d'éthanol et introduit dans l'appareil ultrasonique (Figure III.13) pendant 15 min puis les échantillons sont rincés à l'eau distillée et séchés à l'air chaud.



Figure III.13. Vue de l'appareil de l'ultra-son.

III.8.2. Observation par microscope optique

Les observations métallographiques ont été effectuées sur un microscope optique de marque NIKON (Figure III.14), muni de 4 objectifs X50, X100, X500, X1000, et équipé d'un appareil photo numérique. Cette technique nous a permis de faire l'observation et de révéler les phases ainsi que leurs morphologies respectives.

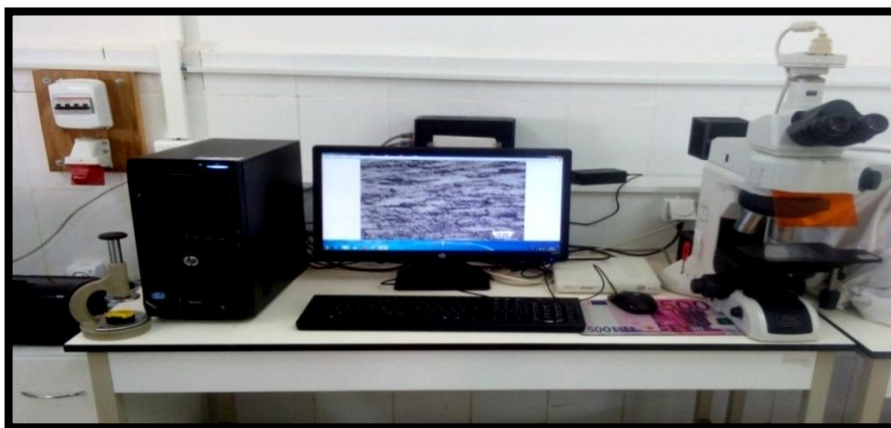


Figure III.14. Vue du Microscope optique NIKON.

III.8.3. Observation par microscopie électronique à balayage

Les observations au MEB ont permis de reconnaître les phases recherchées et par conséquent la microstructure spécifique des produits tréfilés. Grâce au microscope électronique à balayage nous avons pu identifier certaines inclusions de par leur forme facilement reconnaissable à des grossissements élevés (Figure III.15). Cette analyse qualitative de la microstructure a été faite grâce au microscope de l'ENSMM d'Annaba de type QUANTA FEI.



Figure III.15. Vue du Microscope électronique à balayage.

III.9. Les essais mécaniques

Les investigations réalisées aux laboratoires de TREFISOUD ont permis de bien caractériser le fil en acier de précontrainte. En effet, les caractéristiques mécaniques du produit sont tirées des essais suivants : Dureté, micro-dureté, Traction et enfin le pliage.

III.9.1. La dureté

Les mesures de dureté ont été faites à l'aide d'un appareil de dureté Vickers de type INNOVATEST (Figure III.16) muni d'un pénétrateur pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . Elle consiste à faire une empreinte sur la surface de l'échantillon, mesurer les diagonales de celles-ci et afficher directement la valeur de la dureté. Le but est de connaître la dureté de nos échantillons prélevés. Nous avons appliqué une charge de 2kgf.

III.9.2. La micro-dureté

Cette méthode est nécessaire pour estimer et suivre l'évolution des propriétés mécaniques des différentes phases des fils après chaque étape de tréfilage. Les mesures de la Microdureté ont été effectuées avec une charge de 100g à l'aide d'un Microduromètre Vickers de type INNOVATEST (Figure III.17) muni d'un pénétrateur pyramidal en diamant à base carrée et d'angle au sommet égal à 136° . Elle consiste à faire une empreinte sur la surface de l'échantillon, mesurer les diagonales de celles-ci et afficher directement la valeur de la Microdureté. Les essais de micro-dureté ont permis de mesurer les duretés au niveau des différentes phases, ces duretés sont plus sensibles à la présence d'inclusion à l'échelle microscopique.



Figure III.16. Vue du Duromètre Vickers.



Figure III.17. Vue du Micro-durometre Vickers

III.9.3. La traction

L'essai de traction est effectué au niveau du laboratoire physique de TREFISOUD sur une machine automatisée de type ZWICK-ROELL (figure III.18), dotée d'une capacité de mesure 250kN ; elle est commandée et pilotée par un ordinateur.

Pour chaque essai de traction, on a mesuré :

- La résistance à la traction (**R_m**), et la force maximale correspondante (**F_m**).
- La limite d'élasticité (**R_{e0,1%}**), et la force correspondante (**F_{p0,1%}**).
- L'allongement minimal sous charge maximal **A (%)**.
- Le coefficient de striction **Z (%)**.

Ces résultats sont alors comparés avec ceux spécifiés par la norme.



Figure III.18. Vue de la machine de traction.

III.9.3. Le pliage alterné

L'essai de pliage alterné a été effectué au niveau du laboratoire physique de Trévisoud sur une machine de pliage alterné (figure III.20). Cet essai permet de tester la déformation de l'acier en question dans les cas extrêmes. Pour un allongement maximal correspond un nombre de pliage alterné maximal, le pliage est altéré dans le cas où il y a présence de corps étrangers tels que les impuretés ou les inclusions.



Figure III.19. Vue de la machine de pliage alterné.

III.10. Analyse électrochimique :

Les aciers de précontraintes ou encore les aciers perlitiques subissent pendant leur vie ou leur exploitation des dégradations liées essentiellement à la corrosion. Ces aciers sont sujets à plusieurs types de corrosion à savoir la corrosion sous contrainte, corrosion par piquuration et la corrosion due à la fragilisation par l'hydrogène.

III.10.1.Introduction

Le but de notre travail est l'évaluation des paramètres cinétiques sur une droite de Tafel, lors de la corrosion de l'acier de précontrainte dans un milieu d'eau de robinet, cette dernière est basée sur le tracé des courbes de polarisation ($\log i = f(E)$), tirées de l'équation principale électrochimique de Butler- Volmer.

D'après les hypothèses de Tafel, une polarisation anodique et cathodique permet d'obtenir des courbes avec des branches linéaires connues sous l'appellation « droites de Tafel ». Cette linéarité donne une proportionnalité entre le potentiel et le courant, ce qui permet de déterminer par extrapolation le courant de corrosion, le potentiel de corrosion et la vitesse de corrosion exprimée par le coefficient de Tafel anodique et cathodique et la résistance de polarisation.

III.10.2. Préparation des échantillons

Les échantillons prélevés pour les tests de corrosion sont (Figure III.21) :

- Fil semi fini conforme.
- Fil semi fini non conforme.

Ces échantillons étant découpés, fixés à un fil conducteur, enrobés à froid puis subissant un polissage mécanique avant d'être placés dans l'appareil de corrosion.



Figure III.20.Matériel de la préparation des échantillons destinés pour l'analyse électrochimique.



Figure III.21.Les échantillons destinés pour l'analyse électrochimique.

III.10.3.Matériel électrochimique

Les essais se font dans un milieu d'eau de robinet qui est similaire à l'eau utilisé dans le béton de précontrainte ; le milieu de travail de notre acier de précontrainte.

La cellule électrochimique à double paroi est maintenue, par l'intermédiaire d'un bain Thermostaté, a une température constante et définie de 37°C (**Figure III.22,II.23**).

Les trois électrodes utilisées sont :

- **l'électrode de travail** : il s'agit de l'échantillon à étudier, l'échantillon constitue l'embout de l'électrode à disque tournant afin de travailler sous un régime d'agitation dynamique reproductible assurant l'homogénéisation de la solution.
- **l'électrode de référence** : les tensions sont mesurées par rapport à une électrode de référence, celle-ci le plus souvent utilisée en laboratoire est saturée en chlorure de potassium (ECS). Elle est immergée dans une allonge qui communique avec l'électrolyte de la cellule par l'intermédiaire d'une fritte.
- **l'électrode auxiliaire** : un fil de platine est utilisé comme contre-électrode dans les études où des perturbations en tension ou en courant sont imposées au système. Le montage fait intervenir un potentiostat qui permet d'imposer un potentiel à l'électrode de travail, géré par des microprocesseurs.

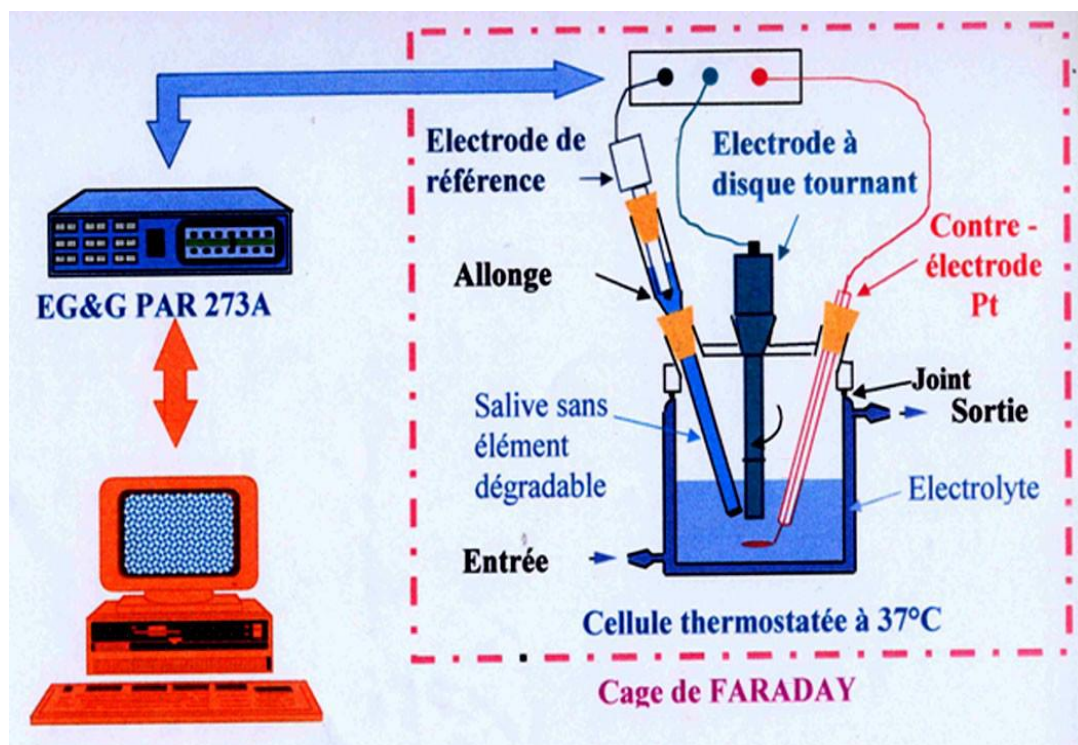


Figure III.22.Schéma du montage électrochimique.



Figure III.23. Montage électrochimique.

III.10.4.La vitesse de corrosion

La vitesse d'une réaction chimique peut être définie comme le nombre de moles d'atomes réagissant par unité de temps et de surface d'électrode. Toutefois, cette quantité peut se révéler difficile à apprécier directement.

Dans le cas des réactions électrochimiques, qui mettent en jeu un transfert de charges, on exprimera la vitesse de corrosion en termes d'équivalent de courant :

$$\mathbf{J = z F . v}$$

Où : J : densité de courant de transfert de charges ($A. m^{-2}$).

z : valence du métal.

F : constante de Faraday (96500 C. mol⁻¹).

v : vitesse de réaction (mol. s.m).

III.10.5.Le potentiel libre

Les courbes de polarisation nécessitent la connaissance du potentiel libre, après différents essais, nous avons choisi pour une immersion de l'échantillon une durée de 60 minutes. Ce temps est suffisant pour obtenir une stabilisation satisfaisante du potentiel libre.

III.10.6.Choix de la vitesse de balayage

Nous avons opté à une vitesse de balayage égale à 1 mV/s, cette dernière nous permet une bonne reproductibilité des résultats sans masquer les phénomènes à étudier.

III.10.7. Condition de polarisation

- **Courbes de polarisation** : le tracé des courbes a été effectué dans un domaine de potentiel allant de -1 à +1 V.
- **Courbes de Tafel** : pour le tracé de ces courbes on a choisi le domaine de linéarité des branches cathodiques et anodiques de la courbe $\log I = f(E)$.

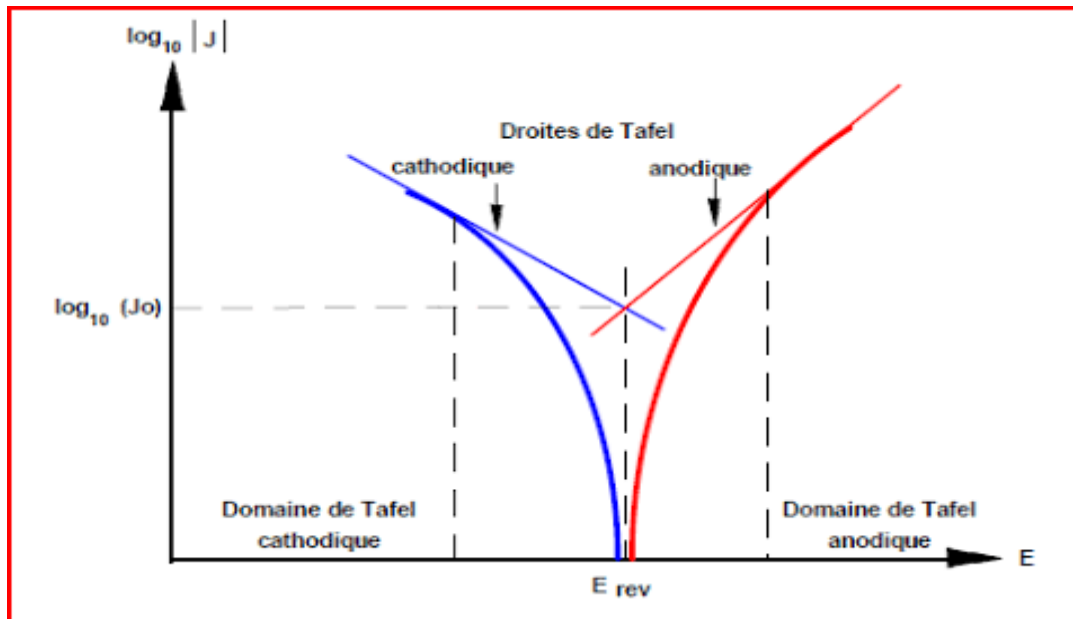


Figure III.24. Courbe $\log |I| = f(E)$ et les droites de Tafel

CHAPITRE IV : Résultats et discussions

IV.1.Introduction

Dans le but de caractériser l'acier perlitique destiné à la réalisation de fils en acier de précontrainte obtenu par tréfilage, différentes techniques de caractérisation ont été utilisées. L'étude en question a permis de montrer l'effet du taux de réduction pendant le tréfilage sur les propriétés de ces aciers avec une tentative d'optimisation des paramètres technologiques. La présence de certains défauts du produit altère le comportement de l'acier lors du tréfilage et par conséquent lors de l'exploitation. La connaissance de l'origine de ces défauts pourrait alors faciliter la résolution de la problématique et améliorer la qualité du produit avec les incidences financières qui en découlent.

IV.2. Contrôle de la composition chimique :

L'analyse chimique a été faite afin de vérifier la composition chimique de notre acier par rapport aux normes du produit en vigueur.

Tableau IV.1. Composition chimique du fil semi fini conforme.

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Composition massique (%)	0,855	0,535	0,596	0,001	0,008	0,166	0,04	0,013	0,158	0,001

Tableau IV.2.Composition chimique du fil semi fini non conforme.

Elément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
Composition massique (%)	0,853	0,479	0,754	0,082	0,008	0,205	0,06	0,013	0,229	0,001

➤ **Discussion**

Les résultats des analyses chimiques montrent que la composition chimique en générale est conforme (le % de carbone est de 0.85 pour les deux échantillons) seul la teneur en Mn est légèrement élevée dans le cas de l'échantillon non conforme ainsi que le P pour l'échantillon conforme.

Nous pouvons considérer que la composition chimique est conforme par rapport à la norme en vigueur.

IV. 3. Contrôle des paramètres de la phosphatation :

Après le contrôle de la composition chimique, ce sont les paramètres de la phosphatation qui ont fait l'objet d'une vérification pour décider de la conformité de l'épaisseur de la couche de phosphatation qui pourrait conduire à une amélioration de la tenue à l'oxydation.

✚ **Résultats de l'analyse du bain de phosphatation**

Le tableau (IV.1) montre les valeurs des acidités du bain de phosphatation qui assurent le bon fonctionnement du traitement de phosphatation alors que le tableau (IV.2) montre les rapports entre acidités qui assurent la conservation de la composition exigée du bain de phosphatation.

Tableau IV.3 : Les acidités du bain de phosphatation

L'acidité	TA	OX	FA
Les points	46	24	08

Tableau IV.4: Les rapports des acidités du bain de phosphatation.

le rapport	TA/OX	TA/FA
	1,91	5,75

➤ **Discussion :**

L'acidité totale et les rapports des acidités TA/OX, TA/FA sont conformes selon la norme citée dans le chapitre précédent.

✚ Calcul de la couche de phosphatation

Le calcul de la couche de notre fil machine de diamètre $\varphi=11$ mm a montré que l'épaisseur de la couche est de $11,20 \text{ g/m}^2$.

➤ Discussion

L'épaisseur de la couche de phosphatation est bien comprise entre $7,5$ et 15 g/m^2 ceci nous permet d'avancer que la couche de phosphatation est conforme aux normes.

IV.4. Résultats des observations métallographiques

Les figures (IV.1, IV.2, IV.3) montrent les résultats de l'analyse microstructurale faites sur des coupes transversales et longitudinales des échantillons prélevés sur du fil machine, du fil semi fini conforme, du fil semi fini non conforme et enfin du fil fini conforme

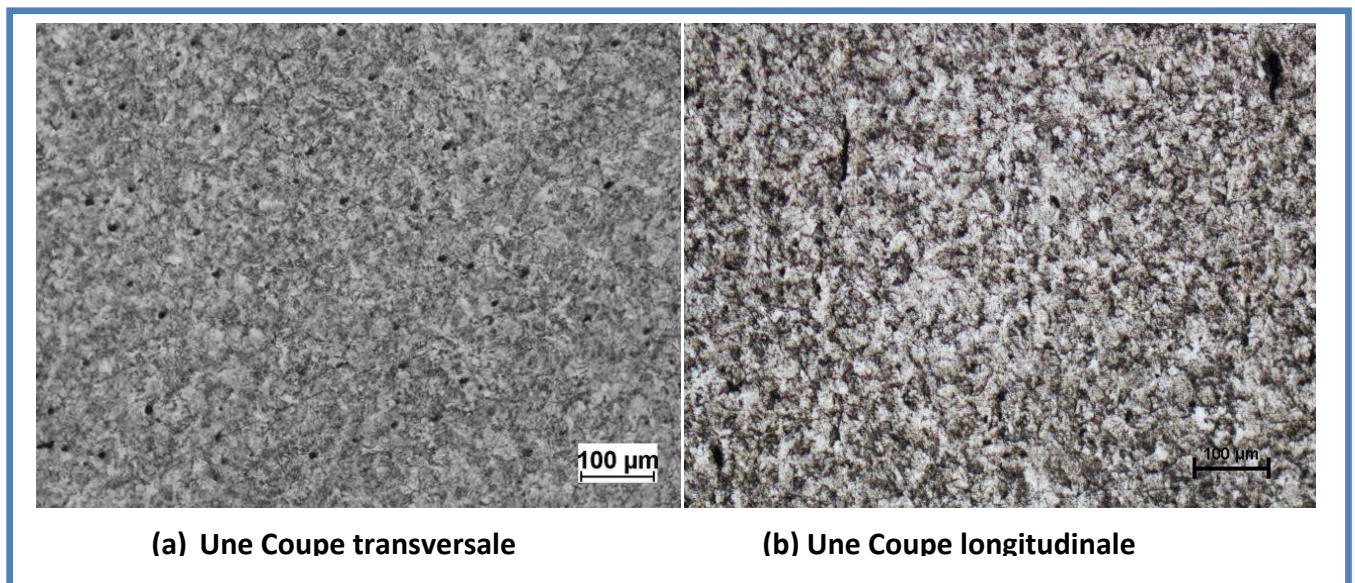


Figure IV.1. Observation au microscope optique du fil machine.

➤ Discussion

La figure IV.I montre une structure perlitique à grains equiaxes (sans texture) avec $\varepsilon = 0$. Les grains dans le sens longitudinal (b) paraissent légèrement plus gros que ceux dans le sens transversal (a).

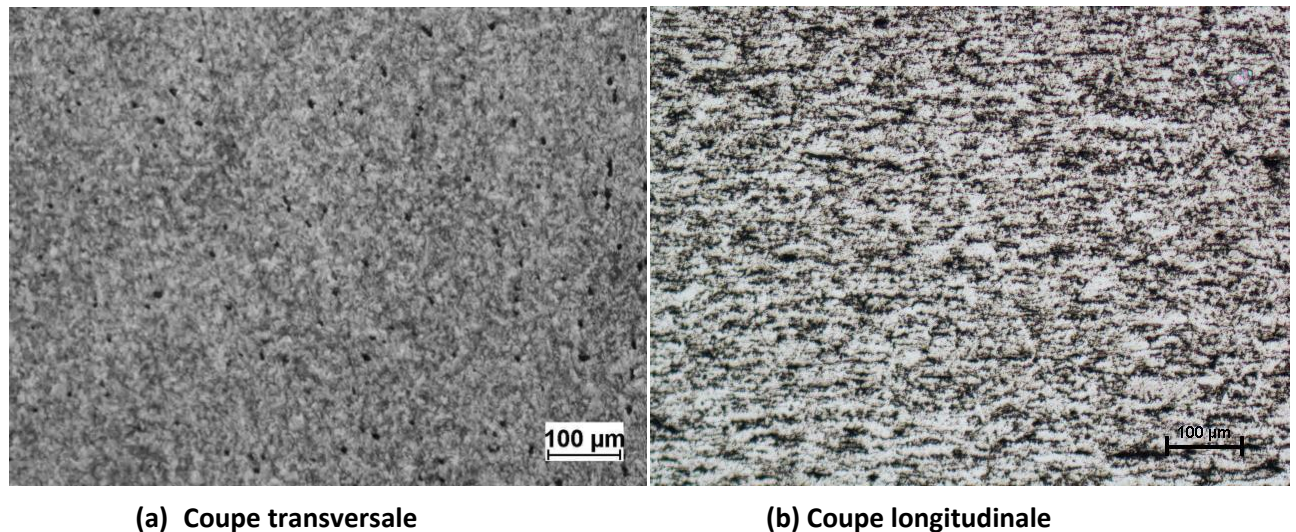


Figure IV.2. Observation au microscope optique du fil

➤ *Discussion*

Dans le cas du fil semi fini conforme (Figure IV.2), on note l'apparition d'une texture dans le sens du tréfilage (longitudinal) du fait que le fil a subi un taux de réduction $\epsilon \neq 0$.

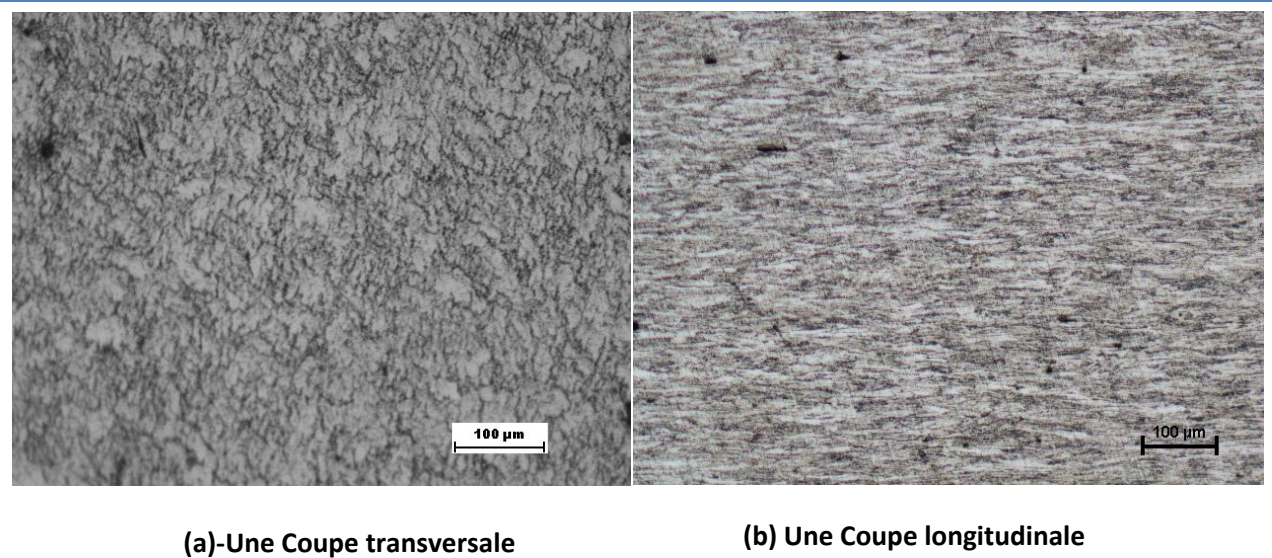


Figure IV.3. Observation au microscope optique du fil semi fini non conforme.

➤ **Discussion**

Dans le cas du fil semi fini non conforme (Figure IV.3), la structure dans le sens du tréfilage se distingue par une texture plus prononcée et légèrement perturbée relativement au fil semi fini conforme. Pour un même taux de déformation la structure est plus écrouie.

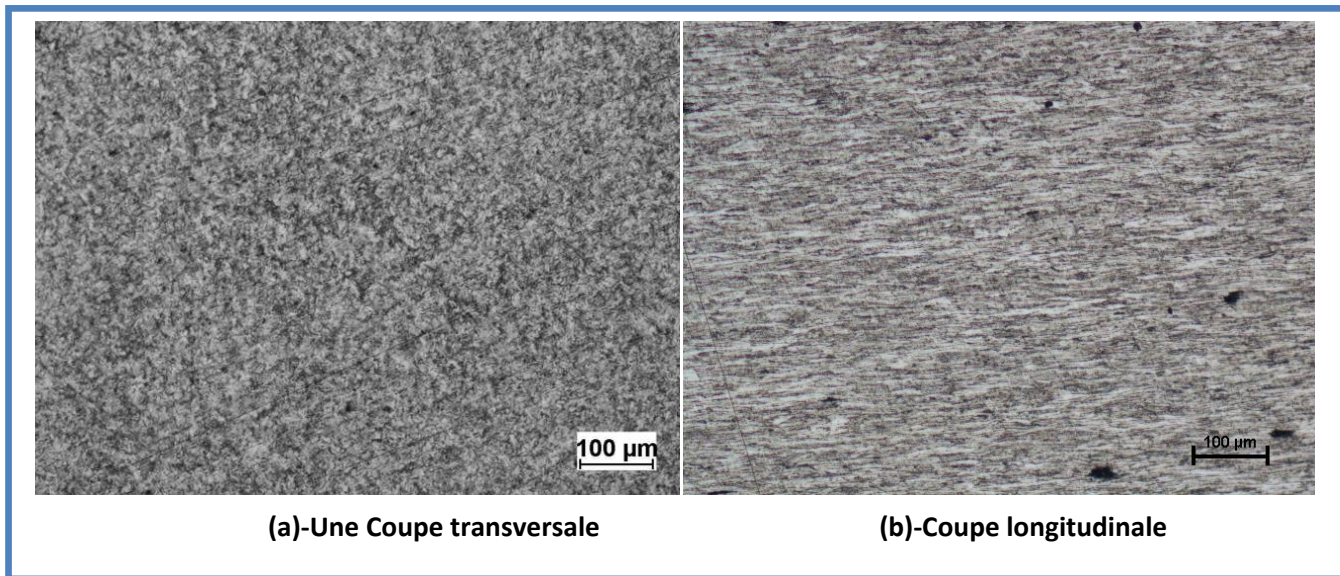


Figure IV.4.Observation au microscope optique du fil tréfilé fini.

➤ **Discussion**

Concernant le fil fini (Figure IV.4), en fin de tréfilage et après stabilisation à 380°C, la microstructure conserve une texture dans le sens longitudinal, même si cette structure paraît plus fine. A premier abord, le traitement de stabilisation affine le grain pour améliorer les propriétés mécaniques.

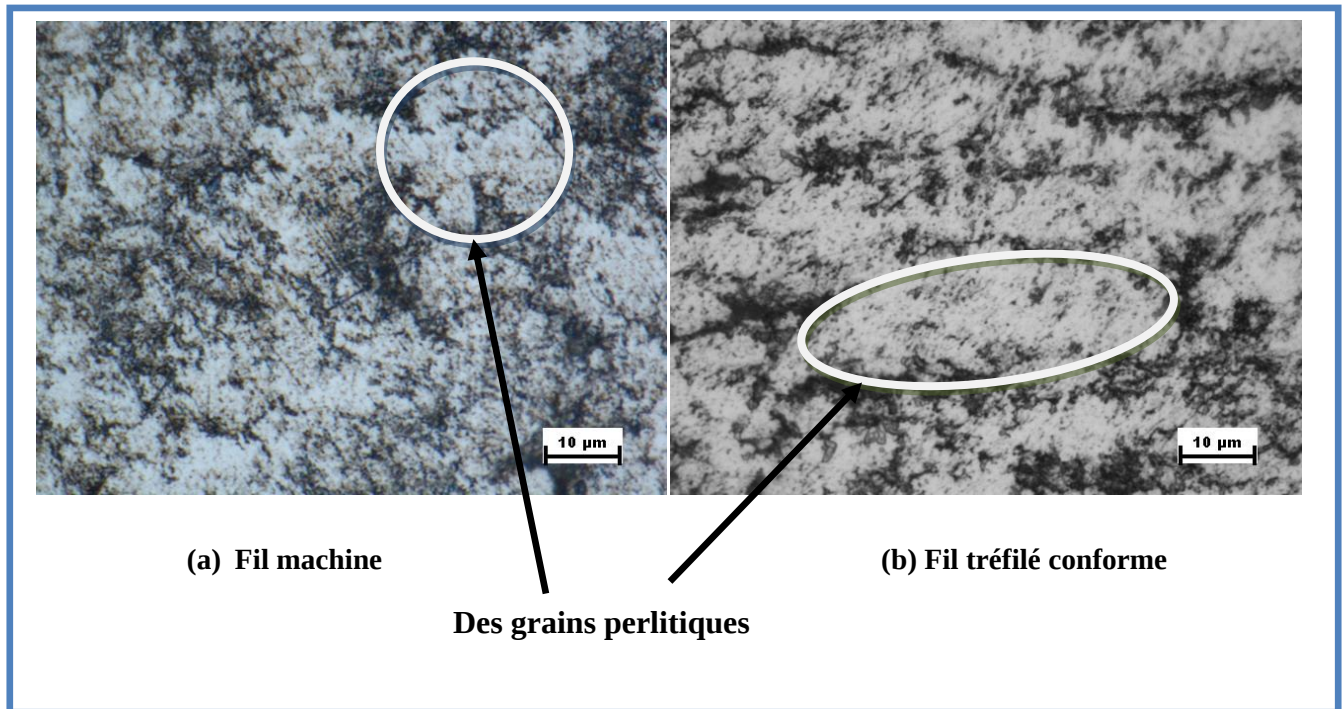


Figure IV.5. Observation au microscope optique du fil machine et du fil semi fini (tréfilé) conforme.

➤ *Discussion*

Les figures (IV.1, IV.2, IV.3) montrent l'évolution de la microstructure du fil machine après tréfilage à froid qui nous donne le fil semi fini et puis le fil fini stabilisé qui a subi un traitement thermomécanique de relaxation à 380°C, la figure (IV.4) montre la structure du fil semi fini tréfilé non conforme.

D'autre part l'examen des coupes transversales nous révèle un phénomène d'affinement des grains qui est très remarquable après tréfilage.

La figure (IV.5.a), montre la microstructure du fil machine après laminage à chaud, le fil initial a une structure perlitique, le perlite a une structure lamellaire les distances inter-lamellaires sont de l'ordre nanométrique c'est pour cela les lamelles de perlite ne révèlent pas par l'observation par microscope optique, la caractérisation de la microstructure révèle une microstructure relativement hétérogène, nous pose que c'est due à la variation de refroidissement durant la déformation entre le cœur et le bord du fil machine.

La figure (IV.5.b), dans cette figure on peut voir clairement l'allongement des grains perlitiques après tréfilage, on peut voir aussi le sens de la déformation selon l'axe de tréfilage.

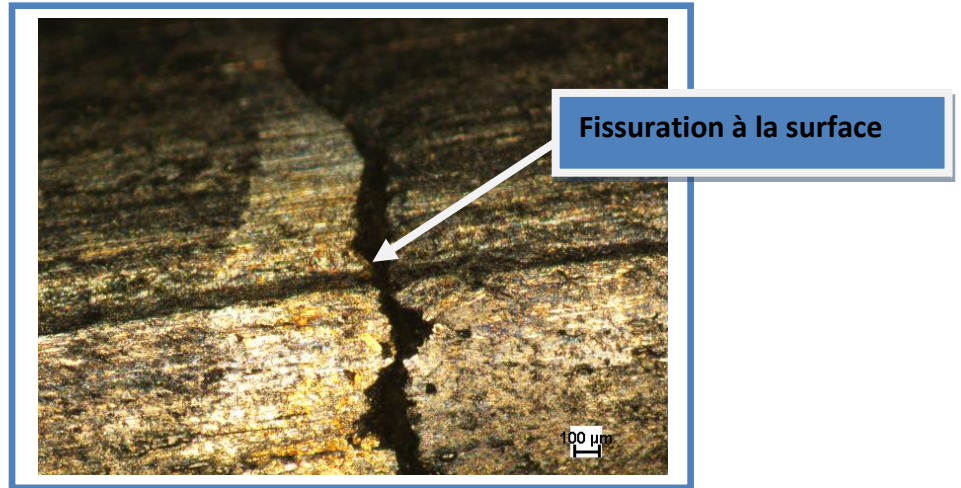


Figure IV.5. Observation au microscope optique du défaut de surface observé sur le fil non conforme.

➤ **Discussion :**

La figure (IV.5) montre une fissuration à la surface du fil semi fini non conforme, on peut voir que la fissuration est très profonde d'autre côté cette observation révèle une zone fragile qui n'a pas pu supporter la force, la vitesse et les grandes réductions dans la section de fil au cours de tréfilage du fil machine de la bobine non conforme.

IV.5. Résultats de l'observation par microscope électronique à balayage

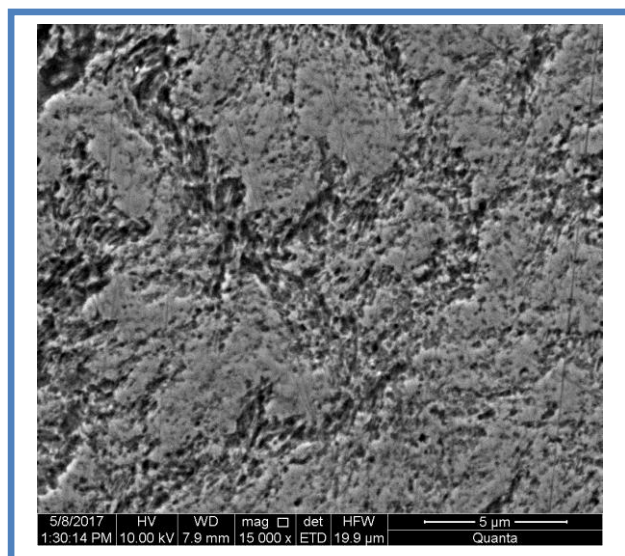


Figure IV.6. Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon fil machine.

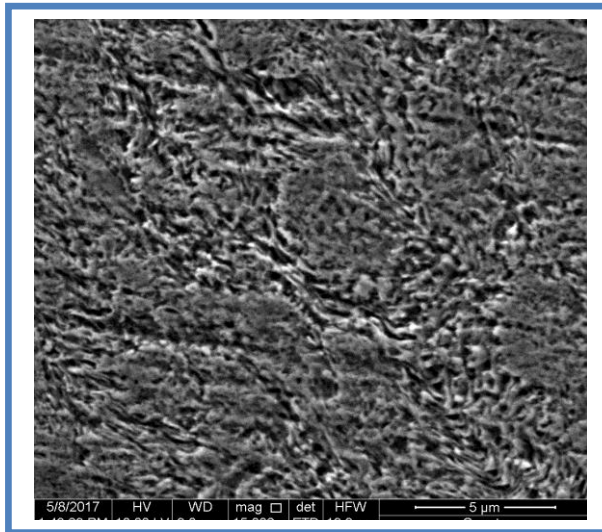


Figure IV.7.Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini conforme.

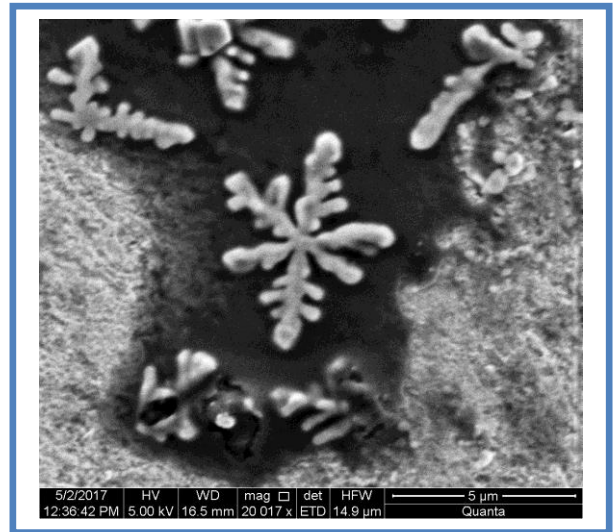


Figure IV.8.Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini non conforme.

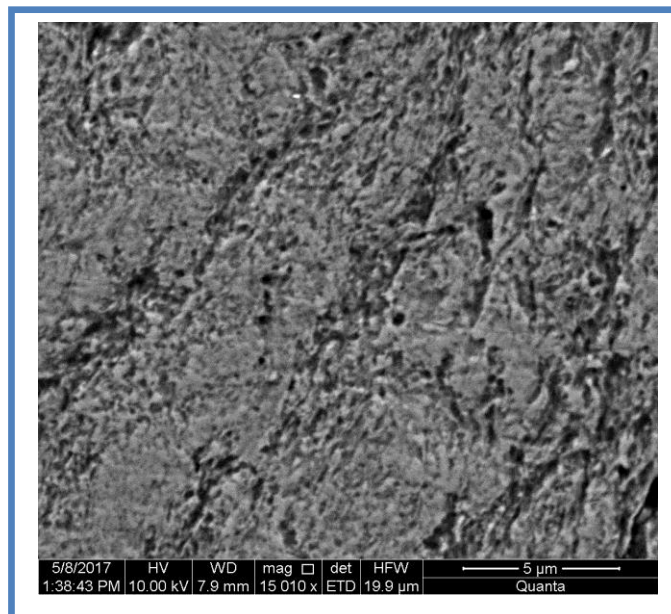
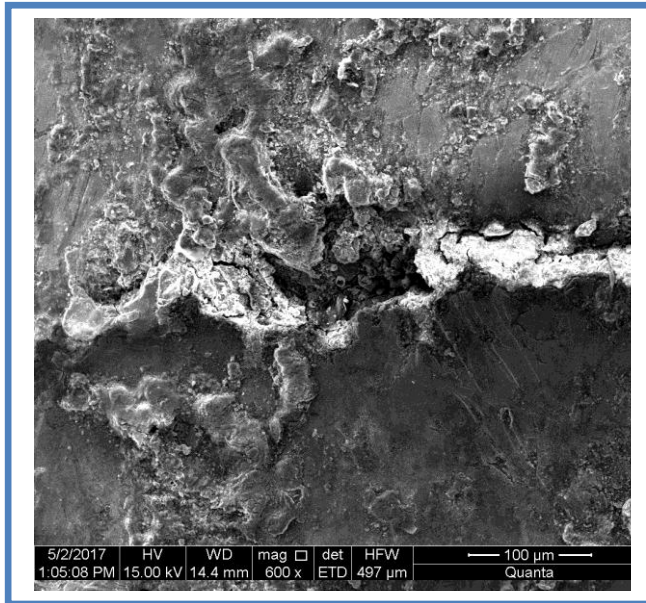
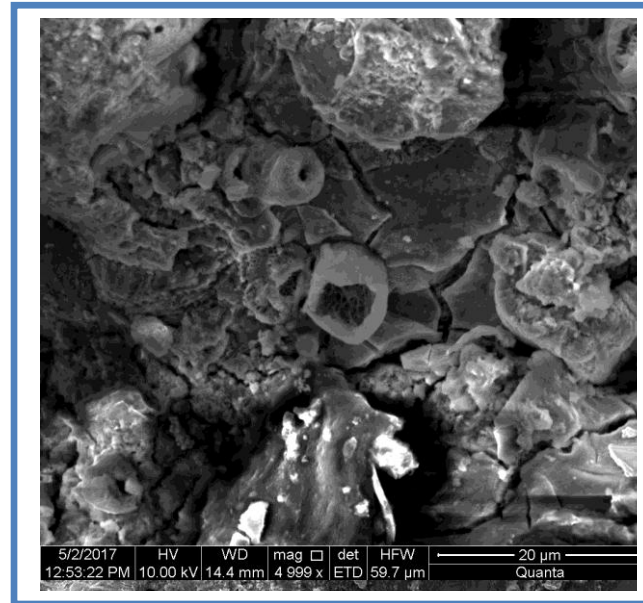


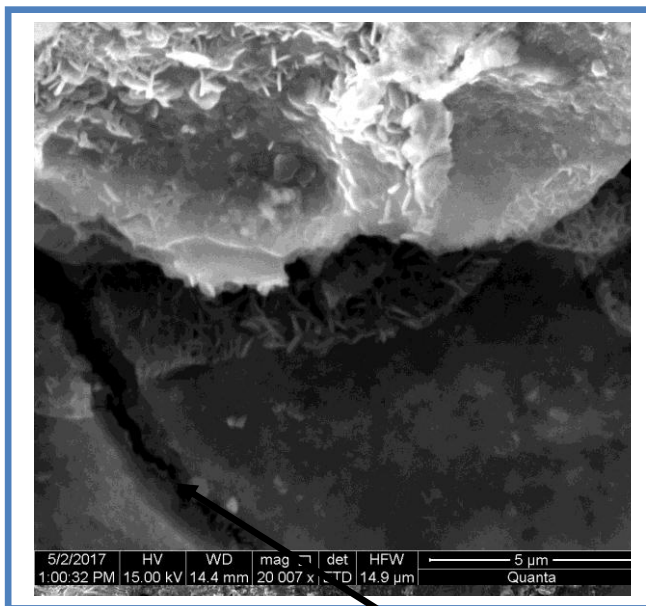
Figure IV.9.Observation par MEB d'une coupe longitudinale dans un échantillon du fil fini conforme.



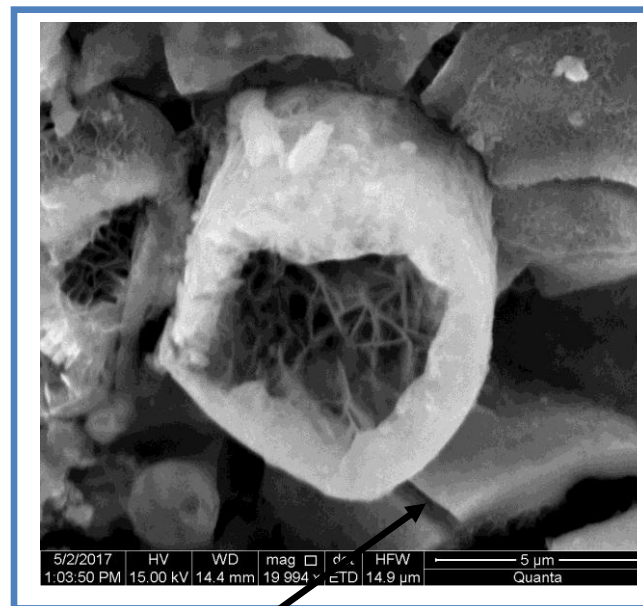
(a)



(b)



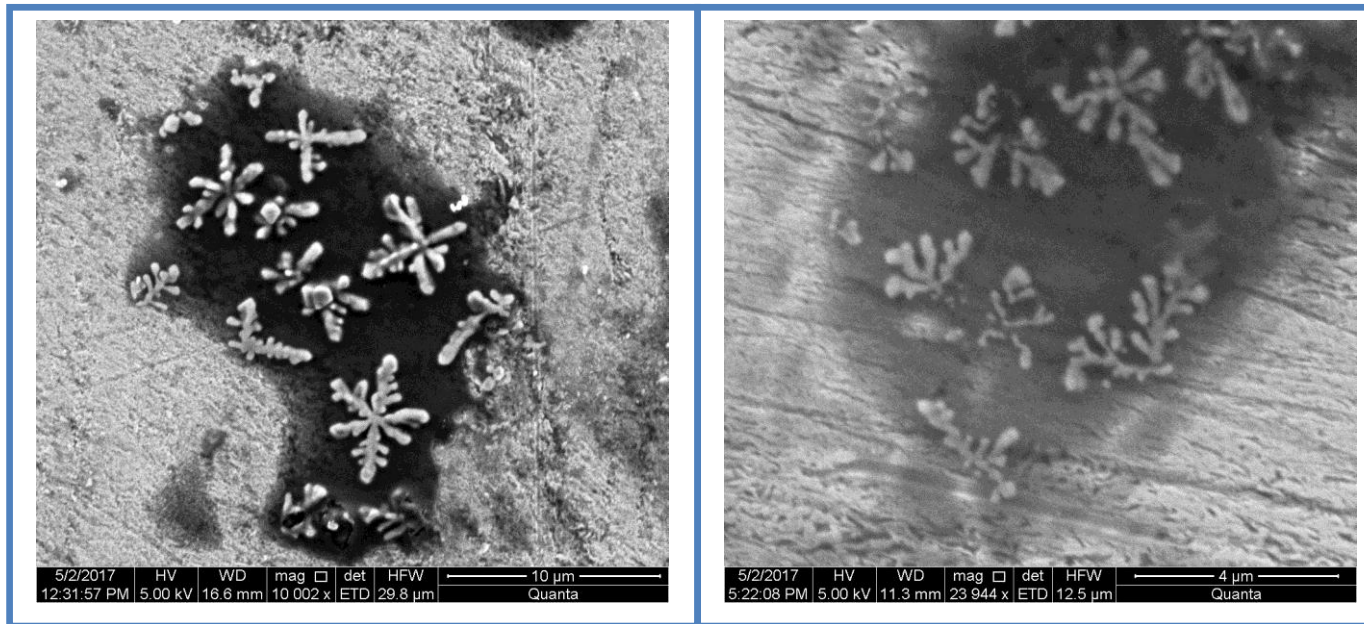
(c)



(d)

Origine de la fissure

Figure IV.10.Observation par MEB de la fissure à la surface du fil
semi fini non conforme



(a)

(b)

Figure IV.11. Observation au MEB des inclusions dans une coupe longitudinale dans un échantillon du fil semi fini non conforme

➤ *Discussion*

L'observation au microscope électronique à balayage a bien révélé les structures de nos échantillons ; le fil machine (Figure IV.6), le fil semi fini conforme (Figure IV.7), le fil semi fini non conforme (Figure IV.8), le fil (Figure IV.9), ainsi que le défaut de surface et les différents types des inclusions dans le fil semi fini non conforme.

Entre les différents états du fil, fil machine semi fini et fini on peut distingués l'affinement des grains et leurs orientation privilégié dans le sens de déformation (la texture).

On comparant entre les figures des coupes longitudinales du fil semi fini conforme (Figure IV.7) et du non conforme (IV.8) on peut dire que le fil semi fini conforme et plein des inclusions de type dendritique qui selon la composition chimique de notre fil non conforme on suppose qu'elles sont des inclusions de MnS.

Dans la figure (IV.10 a, b, c, d) qui montre l'observation de la fissure à la surface du fil non conforme avec différents grossissements qui nous a permis de

voir l'intérieur de la fissure, ces observations ont bien révélé d'autres types d'inclusions qui sont sphériques.

D'autre part les figures (IV.10.a) et (IV.10.b) nous ont permis de conclure que le l'origine de ces fissures dans le fil non conforme se fait sur ces inclusions qui à cause de leur dureté extrêmement élevée par rapport à notre matrice métallique empêchent la déformation du fil lors du tréfilage.

IV.6. Résultats et discussions des essais mécaniques

La connaissance des caractéristiques mécaniques des aciers tréfilés nous renseigne sur l'état de la structure et sur le comportement du fil lors du tréfilage. A cet effet, plusieurs prélèvements d'échantillons dans différents états ont fait l'objet d'investigations. Il s'agit des états suivants :

- Fil machine.
- Fil semi fini non conforme.
- Fil semi fini conforme.
- Fil fini conforme.

IV.6.1. Résultats de la dureté HV

Tableau IV.5. Les mesures de la dureté HV pour les différents états du fil conforme et le fil non conforme

<i>test</i>	<i>Fil machine</i>	<i>Semi fini conforme</i>	<i>Semi fini non conforme</i>	<i>Fini conforme</i>
01	321,3	393,5	448,0	452,7
02	374,7	392,4	426,5	555,3
03	367,7	397,8	414,6	401,7
04	342,1	370,2	432,6	435,2
05	351,6	422,2	483,5	459,4
06	337,5	394,7	429,1	534,1
07	327,7	453,6	431,7	540,2
08	333,3	387,8	455,5	496,4
09	360,8	372,2	450,3	532,1

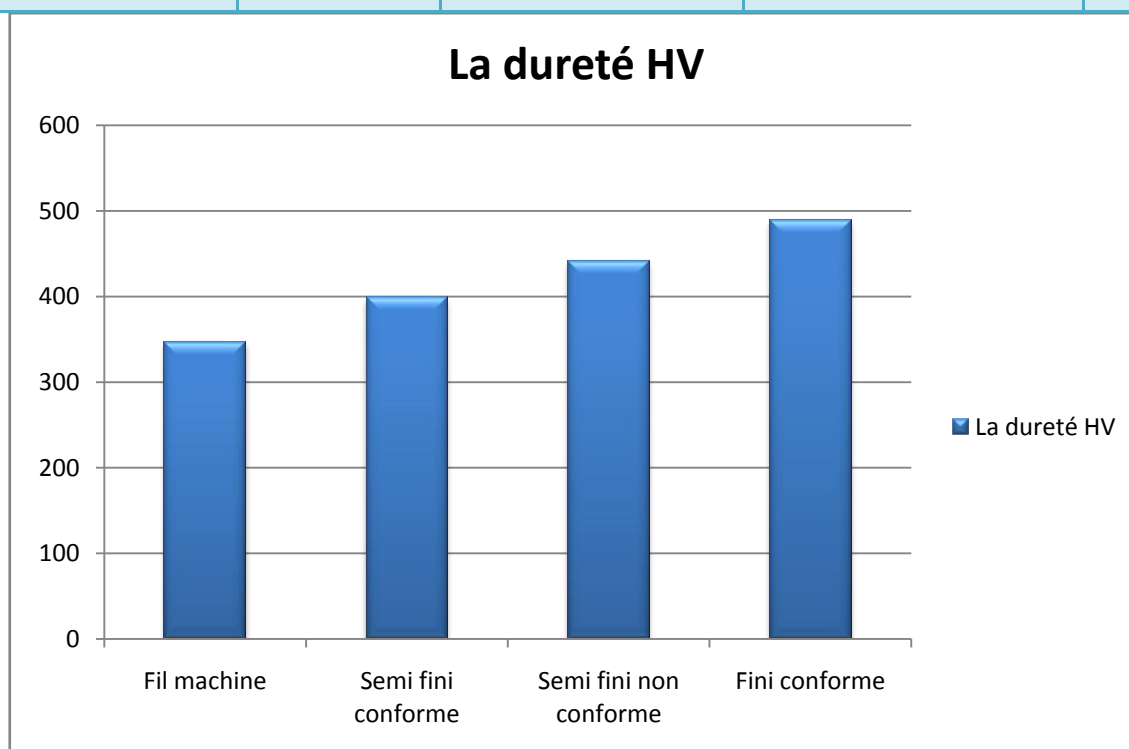


Figure IV.12 Comparaison entre les valeurs de la Dureté Vickers de différent état de fil.

➤ **Discussion**

La figure (IV.12) montre que le tréfilage à froid influe sur la dureté du fil comparé au fil machine qui a la plus faible dureté. D'autre part on remarque que la dureté du fil semi fini non conforme est plus élevée que celle du fil semi fini conforme, cela est du probablement à la présence d'inclusions dans la matrice métallique.

IV.6.2. Résultats de la Microdureté HV

Tableau IV.6. Les mesures de la Microdureté HV des différents états du fil conformes et le fil non conforme.

d (mm)	Fil machine	Semi fini conforme	Semi fini non conforme	Fini conforme
0,5	441,4	486,7	572,8	532,1
1	397,6	490,4	613	503,3
1,5	422,7	475,7	458,1	508,6
2	461,5	505,1	508,6	499,3
2,5	409,8	500,1	522,2	545,1
3	439,9	505,3	580,4	514,2
3,5	446,1	483,7	539,7	540,5
4	397,5	477,9	541,2	532,1
4,5	440,6	489,3	533,2	501,9

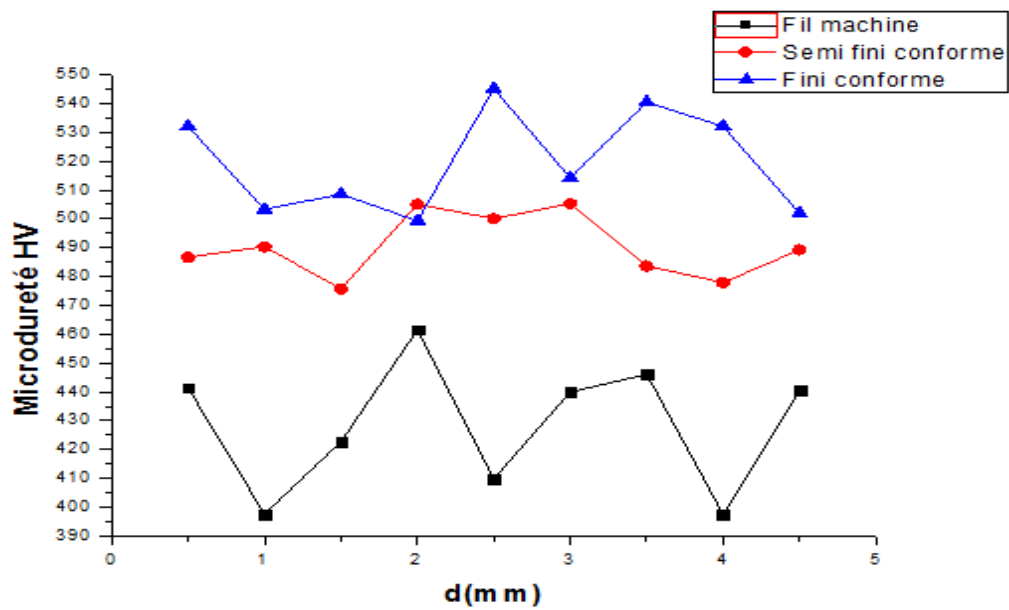


Figure IV.13. L'évolution de la Microdureté HV des différents états du file conforme en fonction de la distance en mm

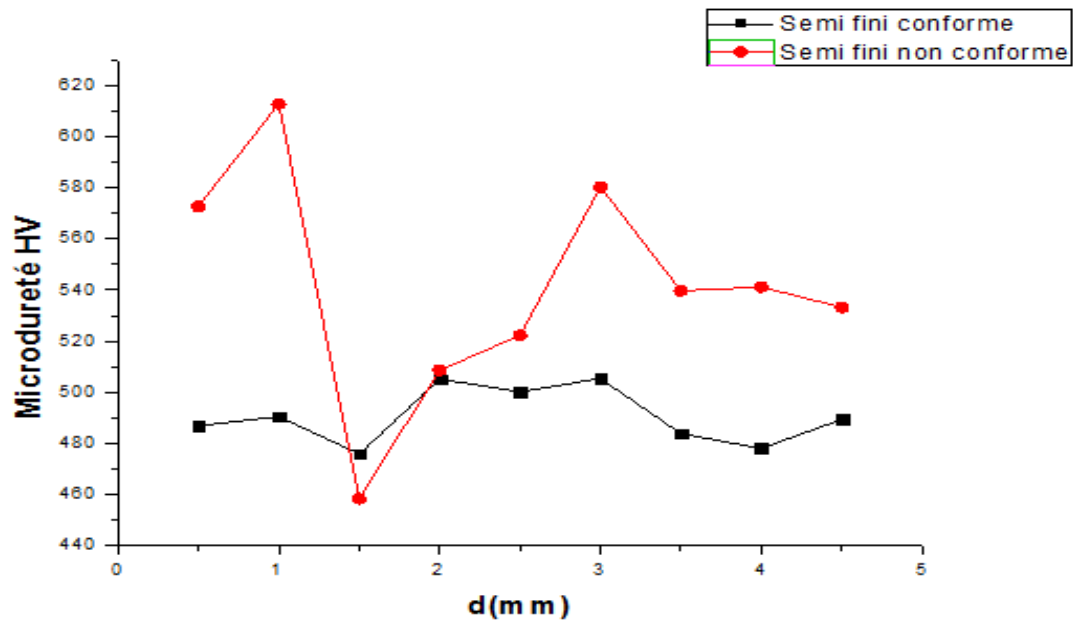


Figure IV.14. Comparaison entre les évolutions de la Microdureté HV du fil semi fini conforme et du fil semi fini non conforme.

➤ Discussion

Les mesures de la Microdureté HV suivant le sens travers du fil montrent une augmentation des valeurs de la Microdureté en passant du fil machine au fil semi fini et fini (figure (IV.13))

La comparaison des Microduretés des échantillons semi fini conforme et semi fini non conforme (figure IV.14) montre que les valeurs de Microdureté des échantillons non conforme sont plus élevées que ceux de la Microdureté des échantillons conforme.

En comparant entre les évolutions de la Microdureté HV du fil semi fini conforme et du fil semi fini non conforme on peut voir une grande différence entre les deux fils, la courbe du fil non conforme montre une grande dispersion des résultats de Microdureté par rapport à celle du fil conforme ceci est due à l'existence de phases très dures comme les inclusions par endroit et à des phases moins dures qui pourraient correspondre aux défauts de surface

IV.6.3. La traction et le pliage alterné

Tableau IV.7. Les caractéristiques mécaniques mesurées à partir de l'essai de traction

Etat Produit	Ech	Ø Réel (mm)	Fm (N)	Rm (Kgf /mm ²)	Fp _{0,1%} (N)	Re _{0,1%} (Kgf/mm ²)	A (%)	Z (%)
Semi fini conforme	01	6,96	60999,94	163,49	52459,95	140,60	3,5	45,25
	02	6,96	62298,25	166,97	53576,50	143,59	4	49,01
Semi fini non conforme	01	6,93	46062,38	124,53	/	/	0,5	0,29
	02	6,93	47279,77	127,82	/	/	1	0,00
Fini conforme	01	6,00	51275,60	184,93	44097,02	159,04	4	42,49
	02	6,00	49544,65	178,68	42608,40	153,66	4	39,94
Fini non conforme	01	6,00	41749,33	150,57	/	/	0,5	4,94
	02	6,00	44980,33	162,22	/	/	1	1,66

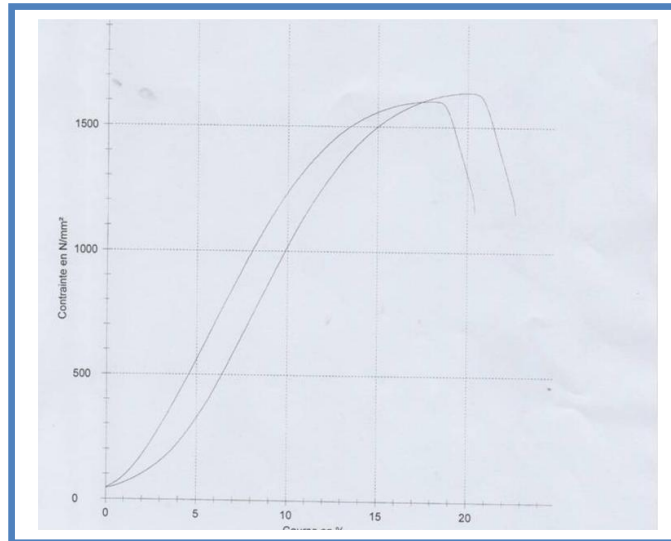


Figure IV. 15. Les courbes de la traction du fil semi fini conforme

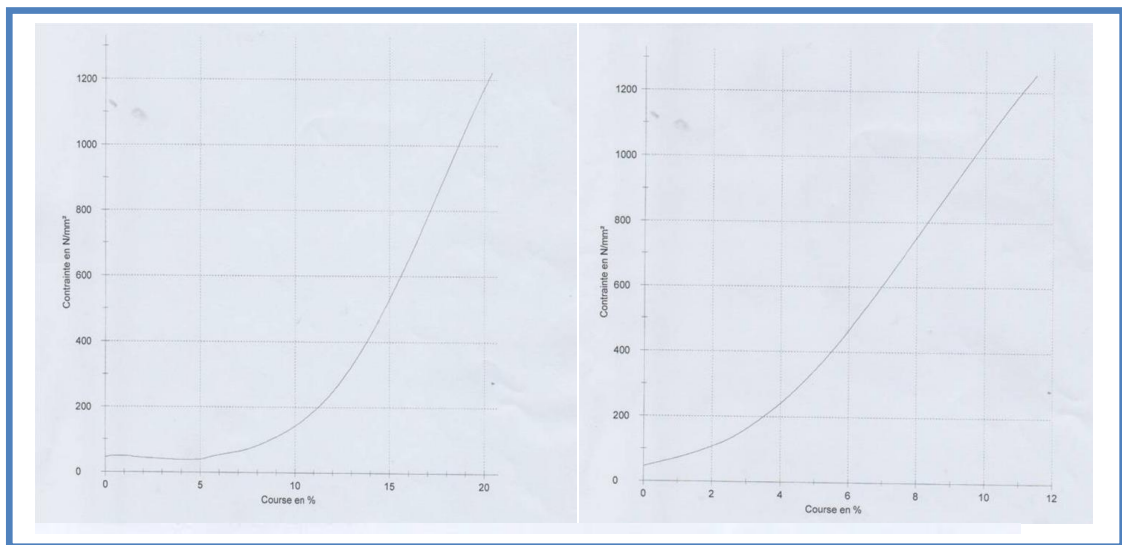


Figure IV. 16. Les courbes de traction du fil semi fini non conforme.

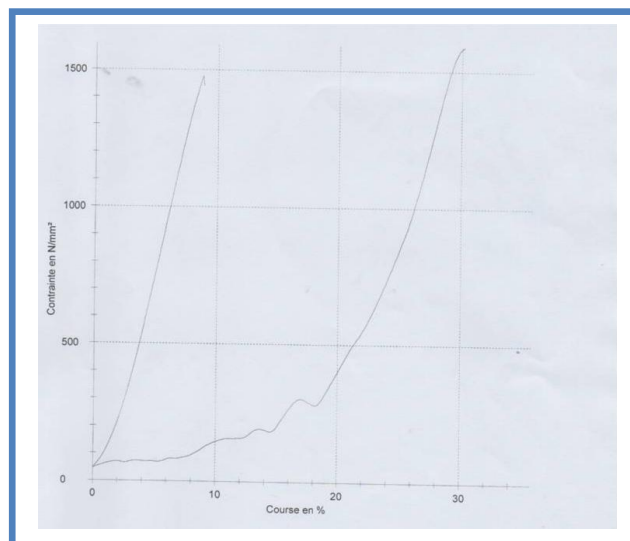


Figure IV.17. Les courbes de traction du fil fini stabilisé non conforme.

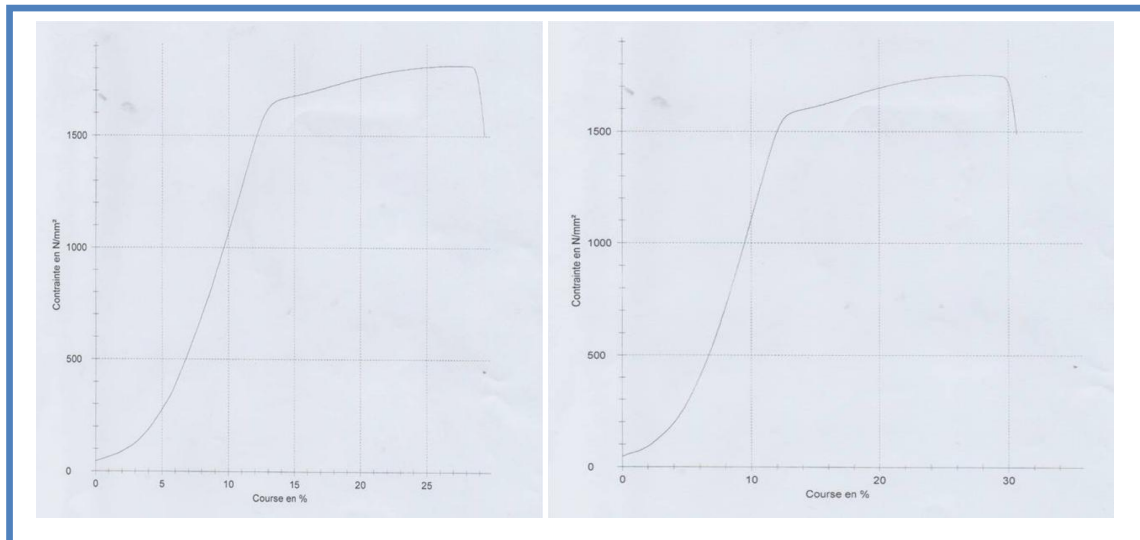


Figure IV.18. Les courbes de traction du fil fini stabilisé conforme.

Tableau IV.8. Résultats du pliage alterné.

	N° Ech	Semi fini conforme	Semi fini non conforme	Fini conforme	Fini non conforme
Nombre de pliage	01	9	2	8	2
	02	9	1	7	1

➤ **Discussion**

Dans cette étude, nous avons essayé de rechercher des critères d'aptitude d'un métal à être déformé à froid par tréfilage et tenté de prédire les caractéristiques des matériaux déformés.

Pour cela, nous avons comparé le comportement en tréfilage de plusieurs états de fils en acier dur, en examinant l'évolution des caractéristiques mesurées après chaque étape de fabrication (Tréfilage et Stabilisation).

L'analyse des résultats générés par les tests de traction et de pliage alterné, et mentionnés dans le tableau ci-dessus montre ce qui suit :

a) État du produit semi-fini (Fil Tréfilé) :

1) La résistance à la traction (R_m) et la limite d'élasticité ($Re_{0,1\%}$) :

On a remarqué que la résistance à la traction (R_m) et la limite d'élasticité ($Re_{0,1\%}$) du fil tréfilé semi-fini 6,93 mm pour les échantillons 01 et 02 du produit conforme

(**Figure IV. 15**) ont connues une augmentation de 115 à 166,97 Kgf/mm² pour la **Rm** et de 95,45 kgf/mm² jusqu'à 143,59 Kgf/mm² environ pour la $Re_{0,1\%}$. (Voir le chapitre précédant) Cette amélioration significative par rapport à celles de l'état brut (fil machine) est obtenue suite à l'effet de la déformation à froid induite par tréfilage (écrouissage).

Toutefois, et comparativement à l'état conforme, la résistance et la limite d'élasticité enregistrées pour les échantillons 01 et 02 du produit non conforme (**Figure IV.16**) (Courbe 02 et 03) ont connu une nette diminution de 166,97 à 124,53 Kgf/mm² pour la **Rm** et de 143,59 Kgf/mm² à une valeur indéterminée pour la $Re_{0,1\%}$. Cette régression de ces deux propriétés est essentiellement dû aux ruptures prématurées qui ont eu lieu lors du tréfilage et durant le test de traction (car la force de tréfilage reste suffisamment faible pour que le tréfilage puisse se poursuivre).

2) Allongement, Striction et Pliage alterné :

En comparaison de l'échantillon 01 et 02 du produit conforme, on a constaté que les propriétés de ductilité (Allongement, Striction et Pliage alterné) des échantillons 01 et 02 du produit non conforme ont connu une diminution remarquable de 4 à 0,5% pour l'Allongement, et de 49,01 à 0,00% pour le coefficient de Striction et de 9 à 1 pour le Pliage alterné.

Afin de mieux comprendre les causes éventuelles de cette régression des propriétés de résistance (**Rm** et $Re_{0,1\%}$) et celles de ductilité (A(%), Z(%) et Pliage alterné), nous avons procédé à poursuivre nos tests sur le fil produit fini (diamètre 6,00 mm Cranté).

Le fil semi-fini issu du tréfilage en six (06) passes subira par la suite un traitement thermomécanique appelé Stabilisation (durant lequel le fil est simultanément chauffé entre 380°C et 400°C et mis sous une tension).

b) État du produit fini (Fil Tréfilé et Stabilisé) :

1) La résistance à la traction (Rm**) et la limite d'élasticité ($Re_{0,1\%}$) :**

L'essai de traction des fils tréfilés et stabilisés Ø 6,00 mm pour les échantillons 01 et 02 état non Conforme (**Figure IV.17**) (Courbe 04) a révélé que la résistance à la traction et la limite d'élasticité ont subi une nette diminution comparativement aux valeurs enregistrées avec les échantillons conformes (**Figure IV.18**) (Courbes 05 et 06) ayant subi la même séquence de tréfilage et de traitement thermomécanique (soit une diminution de 184,93 à 150,57 Kgf/mm² pour **Rm** et 159,04 à une valeur

indéterminée pour $Re_{0,1\%}$), ceci est essentiellement expliqué par l'apparition du défaut appelé cône lors du tréfilage.

2) Allongement, Striction et Pliage alterné :

De même les propriétés de ductilité des échantillons 01 et 02 du produit non conforme ont connu une diminution remarquable de 4 à 0,5% pour l'Allongement, de 42,49 à 1,66% pour le coefficient de Striction et de 8 à 1 pour le Pliage alterné comparées à celles des échantillons 01 et 02 du produit conforme.

En effet, il est possible de comparer pour des conditions identiques les strictions sur cassures **normales** (échantillons 01 et 02 état Conforme) et les strictions sur **défait** (échantillons 01 et 02 état non conforme).

Outre cette influence de l'intensité de la déformation, il convient également de noter le rôle joué par les inclusions dans le processus de formation des défauts de surface appelés cônes et où il a été observé une grosse inclusion est assez souvent présente au sommet des cônes (Figure IV.14).

Enfin, Il semble que l'obstacle majeur à un bon comportement à la déformation à froid par tréfilage est l'apparition des défauts en forme de cônes qui provoquent des ruptures en filière ou des ruptures prématurées lors des essais de traction (la striction correspondante est alors très faible).

L'évolution de la striction avec la déformation totale et l'aspect des ruptures en défauts montrent que la définition et l'appréciation de l'aptitude au formage à froid par tréfilage dépend d'une manière importante de la connaissance des conditions d'apparition des défauts qui paraissent nettement liées au caractère hétérogène de la déformation.

Par ailleurs, un rôle primordial doit être donné aux conditions géométriques et physiques du tréfilage dont l'influence est non négligeable (nombre et importance des passes, géométrie de filière, vitesse de tréfilage, lubrification, température , ...)

IV.7..L'analyse électrochimique

IV.7.1. Résultats du test de potentiel électrochimique

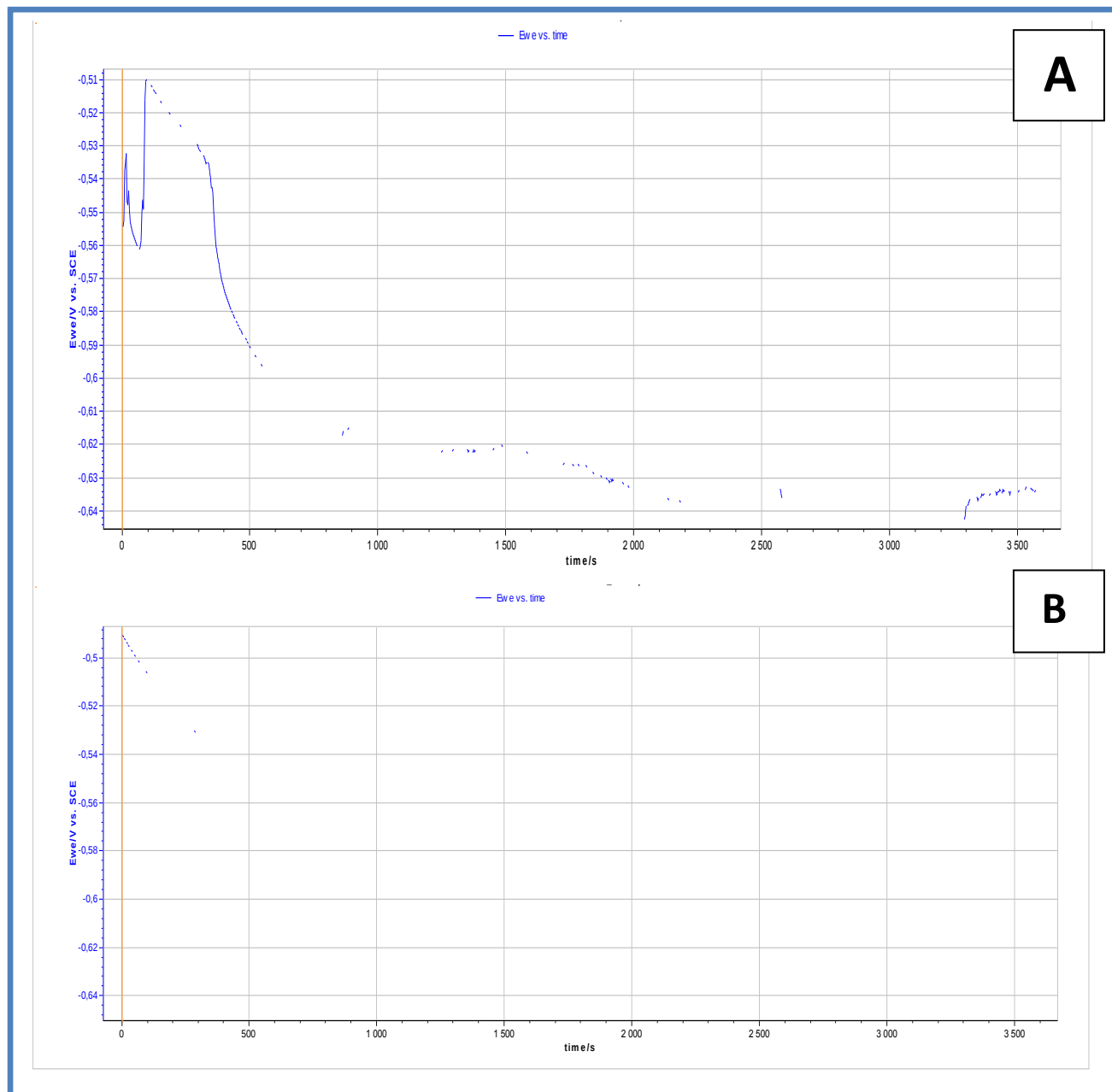


Figure IV.19 : représentation graphique d' $E=f(t)$ dans le milieu d'eau de robinet: (a) Fil semi fini conforme, (b) Fil semi fini non conforme

IV.7.2. Les courbes de Tafel

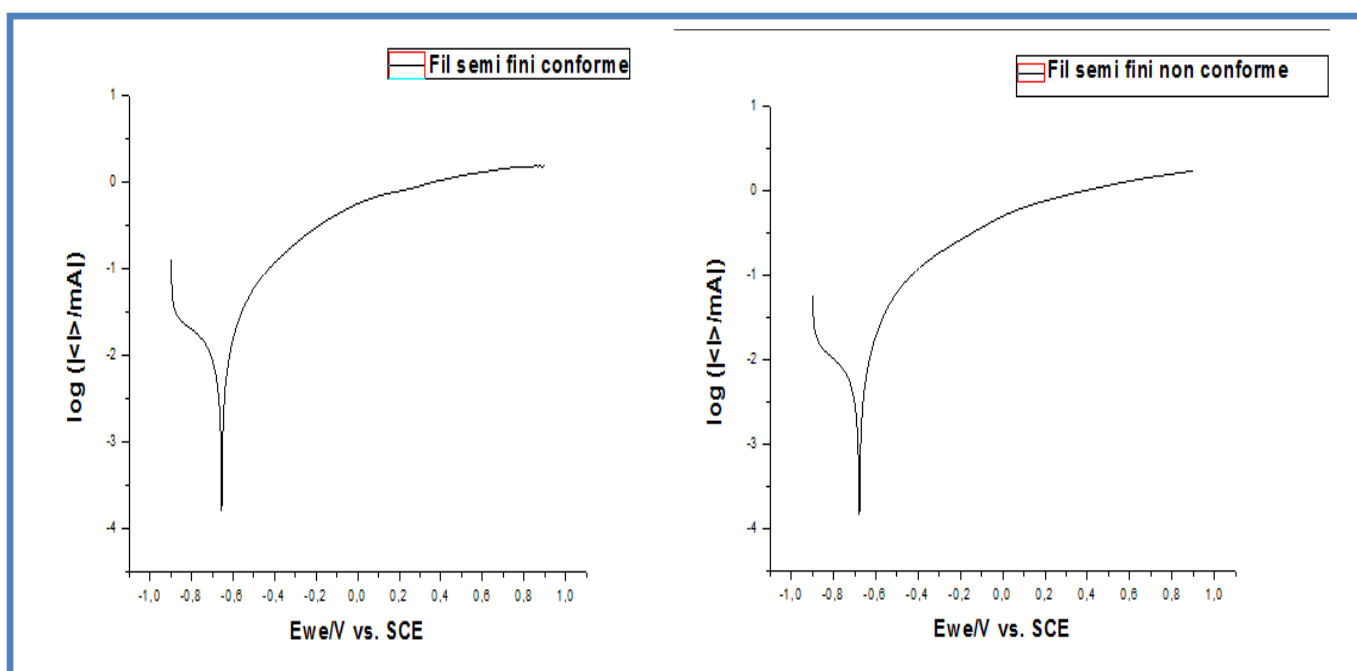


Figure III.20 : représentation graphique des courbes de TAFEL des deux échantillons.

Les valeurs représentées au tableau (**Tableau III.1**) sont des valeurs calculées à partir des courbes de TAFEL avec le logiciel EC-Lab.

Tableau IV.9. Résultats des paramètres de corrosion

Echantillon	E_{corr} (mV)	I_{corr} (μm)	V_{corr} (mm/an)
Fil semi fini conforme	-657,869	8,746	0,186699
Fil semi fini non conforme	-677,907	17,005	0,332891

Où :

E_{corr} : le potentiel de corrosion en millivolt.

I_{corr} : le courant de corrosion microampère.

V_{corr} : la vitesse de corrosion millimètre par an.

➤ **Discussion**

✚ **la technique OCP**

Dans l'objectif de l'étude du comportement électrochimique de l'acier de fil dans les deux cas (conforme et non conforme). Nous avons au premier temps suivi l'évolution du potentiel d'abandon, en traçant les courbes Potentiel-Temps (**Figure IV.19**). Ces courbes révèlent que le potentiel à circuit ouvert diminue avec la durée d'immersion dans l'eau de robinet pour les deux échantillons. Cela se traduit par la variation des valeurs du potentiel dès les premiers instants vers des valeurs moins nobles (de -510mV à -646mV pour l'acier semi fini conforme et de -448mV au -648mV pour l'acier semi fini non conforme).

On constate donc que les deux fils conforme et non conforme ont subi une dégradation. Cette dégradation pourrait être attribuée à l'état de contrainte spécifique lié à la déformation hétérogène causé par la présence d'inclusions et d'impuretés.

✚ **Polarisation potentiodynamique**

Les courbes de polarisation potentiodynamique des deux échantillons dans l'eau de robinet sont présentées par la (**Figure III.20**). Ces courbes montrent clairement l'augmentation de la densité du courant avec la variation de potentiel. Ce qui confirme que le produit de l'interaction de deux matériaux avec la solution sont des d'oxydes qui se passent directement dans la solution et ne se déposent pas sur surface pour la protéger ce la est prouvé par le changement de la couleur de solution.

Le (**Tableau IV.9**) résume les différents paramètres de corrosion obtenus à partir de ces courbes. On remarque que l'acier de fil semi fini conforme présente un potentiel de corrosion légèrement plus noble, une faible densité de courant et une faible vitesse de corrosion par rapport à celles de l'acier non conforme. Ce qui pourrait signifié que l'acier de fil non conforme se corrode plus que l'acier du fil conforme, ces résultats semblent logiques car les inclusions et les défauts dans l'acier non conforme provoquent une diminution des propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion.

Conclusion générale

Au terme de ce travail dédié à la caractérisation du fil en acier précontraint obtenu par tréfilage au niveau de l'entreprise TREFISOUD nous pouvons retenir ce qui suit :

1-L'aptitude au tréfilage de notre acier est fortement conditionné par les paramètres suivants :

a-La composition chimique

b-La couche de phosphatation

c-L'état du fil (tréfilé ou semi fini, stabilisé ou fini)

d-La propreté inclusionnaire de l'acier

e-L'évolution microstructurale

2-Une teneur sur élevée en C, P, S conduit à l'apparition d'inclusions de type MnS ou autres dont la morphologie a un impact certain sur les propriétés mécaniques. Par ailleurs, un excès de C dans l'acier entraînerait un écrouissage excessif de la structure et par conséquent altération des caractéristiques de plasticité et apparition du défaut appelé « cône » fragilisant.

3-La microstructure type des aciers tréfilés et stabilisés présente une morphologie particulière composée de Perlite en lamelles où la distance inter lamellaire est de l'ordre du nanomètre. Cet état de la structure est favorisé par l'augmentation du taux de réduction et du traitement de stabilisation en fin de processus.

4-Il a été établi que l'état non conforme se distingue par la présence massive d'inclusions non métalliques principalement le MnS sous diverses morphologies. Cet état de l'acier se répercute sur les caractéristiques mécaniques de résistance :

-Dureté élevée (écrouissage plus intense).

-Résistance à la traction R_m plus faible (fragilisation de la structure).

5-Concernant les caractéristiques de plasticité, la non conformité de l'acier se traduit par une chute brutale de l'allongement et la striction ainsi que de l'aptitude au pliage. L'effet fragilisant engendré par la présence d'inclusions et un sur écrouissage.

Recommandations pratiques

-Control rigoureux des caractéristiques (composition chimique, propreté inclusionnaire, caractéristiques mécaniques, ...) du fil machine.

-Respect des gammes de réduction pour éviter les sur déformations (écrouissage).

-Assurer une lubrification maximale au niveau des filières de tréfilage

Références bibliographiques

- [1] La précontrainte dans le bâtiment – SEDIP– Disponible sur www.egfbtp.com et www.fntp.fr
- [2] Eurocode 2 – Partie 1-1 (NF EN 1992-1-1 et son annexe nationale NF EN 1992-1-1/NA)
- [3] Programme de calcul des dalles précontraintes par post-tension – Feuille Excel N° DT0103, disponible sur www.egfbtp.com
- [4] <http://efreyssinet-association.com/un-peu-de-technique-pour-comprendre-la-precontrainte/le-beton-precontraint/>.
- [5] http://www.ats-ffa.org/fiches/acier_precontrainte.htm
- [6] par Groupe d'ingénieurs des Tréfileries de Conflandey Mise à jour du texte de Guy SIMONNET, Techniques de l'ingénieur, Tréfilage de l'acier, M 645.
- [7] Théophile GUÉGUEN, Techniques d'ingénieur, phosphatation, M 1 575.
- [8] Dieter, G.E., Mechanical metallurgy, 1988, SI metric edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-100406-8.
- [9] Edwards, L. and Endean, M., Manufacturing with materials, 1990, Butterworth Heinemann, ISBN 0-7506-2754-9.
- [10] Beddoes, J. and Bibbly M.J., Principles of metal manufacturing process, 1999, Arnold, ISBN 0-470-35241-8.
- [11] A. CONSTANT et G.HENRY et J.C.CHARBONNIER .Principes de base des traitements thermiques thermomécaniques et thermochimiques des aciers,1992, PYC Edition, ISBN 2-85330-110-9.
- [12] Annick POKORNY et Jean POKORNY, Techniques d'ingénieur, Inclusion non métalliques dans l'acier, M220.
- [13] Jean-Paul Bailon et Jean-Marie Dorlot. Des matériaux. 3^e édition, Gouvernement du Québec, 2000, ISBN 978-2-553-00770-5.

Références bibliographiques

[14] Hasse Fredriksson and Ulla Akerlind. Materials Processing during Casting. Copyright 2006. John Wiley & Sons Ltd , The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England (ISBN-13 : 978-0-470-01513-1).

[15] Bernard Baroux, LA CORROSION DES METAUX, Passivité et corrosion localisée, © Dunod, Paris, 2014, ISBN 978-2-10-070546-7.

[16] Cours sur la corrosion – Durabilité et réparations du béton-Université de Sherbrooke GCI 714.

[17] Cours sur Les Différentes Formes de Corrosion Aqueuse – Matériaux Métalliques - Phénomènes de Corrosion

[18] Ioan Pepenar, Gilbert Grimaldi, André Raharinaivo - Fluctuation du potentiel des aciers dans le béton et sous protection cathodique- Paris – Septembre 1994.

[19] S. Ramadan, M. Perrin, L. Gaillet, C. Tessier, H. Idrissi - Intéret de l'application de la technique d'émission acoustique dans la détection de la corrosion sous contrainte des câbles tendus utilisés dans les ouvrages d'art- laboratoire MATEIS-INSA de Lyon.