

République Algérienne Démocratique et Populaire

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique*



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Laboratoire CATEL

Mémoire de Master en génie des matériaux

Thème:

*Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques
d'un fil de contact caténaire et comparaison avec un même
fil allier au graphène*

Réalisé par :

Mohamed Mbarek AZZI

Proposé et dirigé par :

M. H. YOUSFI

Professeur

Mme. I. CHIHAOUI

Ingénieur d'état

Présenté(e) et soutenue publiquement le (28/06/2018)

Composition du Jury :

Président : M. K. ABADLI, Professeur ENP Alger

Promoteur : M. H. YOUSFI, Professeur ENP Alger

Examineur : M. M. E. DJEGHLAL, Professeur ENP Alger

Invité : M. A. KASSER, Docteur ENP Alger

ENP (2018)

République Algérienne Démocratique et Populaire

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique*



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Métallurgie

Laboratoire CATEL

Mémoire de Master en génie des matériaux

Thème:

*Caractérisation des propriétés mécaniques et électriques
d'un fil de contact caténaire et comparaison avec un même
fil allier au graphène*

Réalisé par :

Mohamed Mbarek AZZI

Proposé et dirigé par :

M. H. YOUSFI

Professeur

Mme. I. CHIHAOUI

Ingénieur d'état

Présenté(e) et soutenue publiquement le (28/06/2018)

Composition du Jury :

Président : M. K. ABADLI, Professeur ENP Alger

Promoteur : M. H. YOUSFI, Professeur ENP Alger

Examineur : M. M. E. DJEGHLAL, Professeur ENP Alger

Invité : M. A. KASSER, Docteur ENP Alger

ENP (2018)

ملخص:

يتناول هذا المشروع دراسة الخواص الميكانيكية والكهربائية لسلك تلامس نحاس سلسالي مرسوم بالرسم السلكي إذا ما ، والمخصص للاستخدام في النقل بالسكك الحديدية. هدفنا الرئيسي هو CVD حصلت ثم الالتصاق بالجرافين بواسطة ومقارنة مع الأسلاك النحاسية 107 mm^2 و 150 mm^2 جعل توصيف نوعين من الأسلاك السلسلة بعد رسم الأسلاك 150 (SolidWork). الجرافين من نفس النوع. لهذا ، أجرينا العديد من الاختبارات على العديد من العينات ومحاكاة البرامج تعطي خصائص أفضل بكثير لإضافة الجرافين ، على جميع خواصها CVD أوضحت النتائج أن المواد المعالجة بال- الميكانيكية والكهربائية أكثر بكثير مما تطلب ، بما في ذلك استطالة ومقاومة كهربائية ومقاومة للطي ، التواء والتلف .

الكلمات المفتاحية: سحب الأسلاك ، CVD ، الجرافين ، الطي ، الأبعاد ، الإستطالة ، المقاومة.

Abstract:

This project deals with the study of the mechanical and electrical properties of a copper catenary contact wire drawn by wire drawing and subsequently the adhesion of graphene by CVD, intended for use in rail transport. Our main goal is to make a characterization of two types of catenary wire after 150 mm^2 and 107 mm^2 wire drawing and compared with graphene copper wires of the same type. For this, we performed several tests on several samples and software simulation (SolidWork). The results showed that the material treated by CVD give significantly better characteristics to the addition of graphene, that if gets all of its mechanical and electrical properties much more than ask for, including elongation and electrical resistance and resistance to folding, twisting and winding.

Key words: wire drawing, CVD, graphene, folding, dimension, elongation, resistivity

Résumé :

Ce projet porte sur l'étude des propriétés mécaniques et électriques d'un fil de contact caténaire en cuivre élaboré par tréfilage et en suite l'adhésion de graphène par CVD, destiné à être utilisé dans le transport ferroviaire. Notre but principal est de faire une caractérisation de deux type de fil caténaire après tréfilage le 150 mm^2 et le 107 mm^2 et comparé avec les fils cuivre graphène du même type. Pour cela nous avons procédé à plusieurs essais sur plusieurs échantillons et simulation sur logiciel (SolidWork). Les résultats ont montré que le matériau traité par CVD donner des caractéristiques nettement meilleur due a l'ajout de graphène, celui si obtient la totalité de ses propriétés mécaniques et électriques bien plus que demander, notamment l'allongement et la résistance électrique et la résistance au pliage, a la torsion et a l'enroulement.

Mots clés : tréfilage, CVD, graphène, pliage, dimension, allongement, résistivité.

Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma famille bien aimés et à
tous mes amis d'ailleurs ou d'ici*

Mohamed.

REMERCIEMENTS

Je remercie tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire, en premier lieu Mlle I. CHIHAOUI mon encadreur à CATEL, et Mr H.YOUSFI mon promoteur pour m'avoir soutenu, aidé et fait profiter de leurs connaissances.

Pour avoir accepté de siéger en tant que jury à notre soutenance, je tiens à remercier Mr ABADLI président de jury, ainsi que Mr KASSER et Mr DJEGHLAL membres de jury et examinateurs.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe de CATEL, d'avoir mis toutes les ressources humaines et matérielles à notre disposition, en particulier Mrs. ALIANE qui a partagé avec nous tout son savoir et ces compétences.

Je remercie mes très chers camarades de classe pour m'avoir aidé dans mes expériences réalisées à l'école.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

PARTIE A : INTRODUCTION GENERALE	12
PARTIE B :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	13
CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	14
B.I.1. Introduction [CATEL]	15
B.I.2. Présentation de CATEL	15
B.I.2.1. Localisation	15
B.I.2.2. Historique	16
B.I.2.3. Dates clefs.....	16
B.I.2.4. Démarche qualité.....	17
B.I.2.5. Gamme de produits.....	18
B.I.2.6. Processus de production de câbles en cuivre.....	9
B.I.2.7. Marché de CATEL	10
B.I.2.8. Organisation de CATEL.....	10
CHAPITRE II : SYSTEME PANTOGRAPHE-CATENAIRE ET ELECTRIFICATION FERROVIAIRE.....	11
B.II.1. Introduction	12
B.II.2. Electrification ferroviaire	12
B.II.2.1. Historique de l'électrification ferroviaire.....	12
B.II.2.2. Système d'électrification ferroviaire :	13
B.II.3. DESCRIPTION DU SYSTEME PANTOGRAPHE-CATÉNAIRE.....	14
B.II.3.1. LA CATÉNAIRE	14
B.II.3.2. LE FIL DE CONTACT	15
B.II.3.3. Le pantographe	16
B.II.3.4. La bande de captage	16
B.II.3.5. Alimentation du train.....	18
B.II.3.5.1. Captage a l'arrêt	18
B.II.3.5.2. Captage en marche	18
CHAPITRE III :PROPRIETES PHYSIQUES, MECANIQUES ET CHIMIQUES DES CUIVRES	
INDUSTRIELS	19
B.III.1. Cuivres industriels non alliés	31
B.III.1.1. Définitions	31
B.III.1.2. Le cuivre dans l'industrie	31
B.III.1.2.1. Evolution de la production mondiale.....	31
B.III.1.2.2. Consommation et principaux domaines d'utilisation	32
B.III.2. Les alliages de cuivre utilisés dans l'industrie	33
B.III.2.1. Alliages à faible teneur en éléments d'addition.....	33
B.III.2.2. Alliages à haute teneur en éléments d'addition	34
B.III.2.2.1. Les Laitons.....	34
B.III.2.2.2. Les bronzes.....	35
B.III.3. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre.....	36
B.III.4. Propriétés chimiques du cuivre	38
B.III.4.1. Le cuivre et l'oxygène	38
B.III.4.2. Résistance à la corrosion	38
B.III.4.2.1. Caractéristiques de base.....	38
B.III.4.2.2. Fatigue sous corrosion	39
CHAPITRE IV : GRAPHENE ET SA CROISSANCE PAR CVD SUR SUBSTRAT METALLIQUE	40

B.IV.1.	Introduction	41
B.IV.2.	Graphène	41
B.IV.3.	Croissance de graphène par CVD sur substrat métallique	42
B.IV.3.1.	Définition	42
B.IV.3.2.	Mise en œuvre de la croissance par CVD sur substrat métallique	44
B.IV.3.2.1.	Transfert	45
B.IV.3.2.2.	Les différents substrats métalliques utilisés	46
B.IV.4.	Mesure et contrôle des caractéristiques du graphène	47
CHAPITRE V : LE TREFILAGE		48
B.V.1.	Introduction	49
B.V.2.	Définition	49
B.V.3.	Fil machine	50
B.V.4.	Les machines et outils utilisés	50
B.V.4.1.	Machines simples	51
B.V.4.1.1.	Dévidoir	51
B.V.4.1.2.	Filières	53
B.V.4.1.3.	Mandrins	54
B.V.4.1.4.	Lubrifiants	55
B.V.4.2.	Machines multiples	55
B.V.5.	Paramètres du tréfilage	57
B.V.5.1.	Vitesse de déformation	58
B.V.5.2.	Force de tréfilage	58
B.V.5.3.	Frottements	60
B.V.5.4.	Echauffement du fil	60
B.V.6.	Ecrouissage et conséquences sur les caractéristiques des fils	61
PARTIE C : ETUDE EXPERIMENTAL		62
CHAPITRE I : TECHNIQUES EXPERIMENTALES		63
C.I.1.	Caractérisation du fil machine et fil finie	64
C.I.1.1.	Composition chimique du fil machine	64
C.I.1.2.	Méthode d'échantillonnage	65
C.I.1.3.	Mesure du diamètre	65
C.I.2.	Processus CATEL	68
C.I.2.1.	Tréfilage	68
C.I.2.1.1.	Dérouleur dynamique de couronnes ABV-Ta	69
C.I.2.1.2.	Dispositif d'avance du fil (entraîneur)	69
C.I.2.1.3.	Dispositif de dressage	70
C.I.2.1.4.	Jeu de filières	70
C.I.2.1.5.	Tréfileuse 4 passes à cabestans horizontaux ZH 35/4	72
C.I.2.1.6.	Lubrification et refroidissement	54
C.I.2.1.7.	Bobinoir horizontal auto-trancannant SH-TR 2000 ST	55
C.I.2.1.8.	Dispositifs de protection	56
C.I.3.	Les essais mécaniques et électriques	57
C.I.3.1.	L'essai de résistance	57
C.I.3.2.	L'essai de traction	58
C.I.3.3.	L'essai de pliage	60
C.I.3.4.	Synthèse de graphène sur cobalt par dépôt chimique en phase vapeur (CVD)	62
C.I.4.	Techniques de préparation à l'étude métallographique	63
C.I.4.1.	Découpage et enrobage	63
C.I.4.2.	Polissage	64
C.I.4.3.	Attaque chimique	65
C.I.4.4.	Observation au microscope optique	65
C.I.4.5.	Analyse quantitative	65
CHAPITRE II : RESULTATS ET DISCUSSIONS		66

C.II.1.	Résultats d'essai sur le fil machine	67
C.II.2.	Résultats des tests effectués sur les fils de section 107mm ² et 150 mm ²	69
C.II.2.1.	Etude des échantillons CATEL	69
C.II.2.1.1.	Calcul de sections	69
C.II.2.1.2.	Essai de résistance	71
C.II.2.1.3.	Essai de traction.....	72
C.II.2.1.4.	Essai de pliage	73
C.II.2.1.5.	Microstructure	74
PARTIE D : CONCLUSION ET PERSPECTIVES		77
CHAPITRE I : CONCLUSION GENERALE.....		98
CHAPITRE II : PERSPECTIVES		99
PARTIE E : REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		100
PARTIE F : ANNEXES		102
F.I.1.	1- La norme IACS (International Annealed Copper Standard) :	103
F.I.2.	La norme ISO 9001:.....	104
F.I.3.	Le Système de Management Environnemental 14001 (SME 14001):.....	105
F.I.4.	La norme EN 1977:.....	106
F.I.5.	La norme EN 50149:.....	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Répartition des réserves mondiales de cuivre par continent	32
Tableau II. Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre	37
Tableau III. Potentiels d'équilibre standards mesurés par rapport à l'électrode à hydrogène	39
Tableau IV. Vitesse de corrosion du cuivre et de ses alliages en atmosphère sèche.....	39
Tableau V. Résistance à la fatigue sous corrosion du cuivre et des alliages.....	39
Tableau VI. Type de transfert avec application	45
Tableau VII. Association filière mandrin.....	54
Tableau VIII. Composition chimique du cuivre donnée par UNITED METALS en % massique	64
Tableau IX. Diamètre 20,00 à 11,762 mm (170 mm ²) a 48 m/min	70
Tableau X. Diamètre 22,00 à 13,820 mm (150 mm ²) a 48 m/min.....	71
Tableau XI. Résultats obtenus pour des diamètres calculés via un Palmer.....	87
Tableau XII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés en connaissant le poids métrique.....	88
Tableau XIII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés par projecteurs de profils pour le 150 mm ²	89
Tableau XIV. Résultats obtenus pour des diamètres calculés par projecteurs de profils pour le 107 mm ²	90
Tableau XV. Résultats de l'essai de résistance sur les échantillons de CATEL	91
Tableau XVI. Résultats de l'essai de traction sur les échantillons de CATEL	92

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Le plan d'accès au site de CATE	17
Figure I.2. Etapes de production du câble en cuivre.....	20
Figure I.3. Organigramme de CATEL [CATEL]	21
Figure II.1. Schéma descriptif du système caténaire avec porteur principal et porteur auxiliaire sur un réseau 1,5 kV	25
Figure II.2. Schéma descriptif du fil de contact de la caténaire, (a) vue en coupe radiale d'un fil neuf de 107 mm ² , (b) position axiale de la caténaire vue du dessus	26
Figure II.3. Schéma de principe du système d'identification des différents fils de contact de la caténaire pour les matériaux les plus répandus.....	27
Figure II.4. Schéma descriptif d'un pantographe à deux bandes de captage.....	27
Figure II.5. Schéma descriptif d'un archet de pantographe vue en coupe.....	28
Figure II.2. Schéma descriptif du fil de contact de la caténaire, (a) vue en coupe radiale d'un fil neuf de 107 mm ² , (b) position axiale de la caténaire vue du dessus	29
Figure II.3. Schéma de principe du système d'identification des différents fils de contact de la caténaire pour les matériaux les plus répandus.....	29
Figure II.6. Captage à l'arrêt, contact électrique entre le fil de contact de la caténaire et la bande de captage du pantographe permettant l'alimentation du train en énergie lorsqu'il est à l'arrêt	41
Figure II.7. Captage en marche d'un train et system d'alimentations sellons les zones	42
Figure IV.1. Allotropes du graphène [10].....	43
Figure IV.2. System type CVD (Chemical Vapour Deposition)	43
Figure IV.3. Schématisation d'une Exfoliation mécanique.	44
Figure IV.4. Schématisation d'une Exfoliation chimique	46
Figure IV.5. Schématisation d'une Synthèse épitaxiée sur SiC	46
Figure IV.6. schéma des transfert en CVD	49
Figure IV.7. substrat de cuivre	51
Figure V.1. Principe du tréfilage [3].	52
Figure V.2. Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple [13]	53
Figure V.3. Dévidoirs [19]	54
Figure V.4. Profil d'une filière [19]	56
Figure V.5. Outillage pour tréfilage [20]	56
Figure V.6. Machine multiple continue [19]	57

Figure V.7. Machine multiple à accumulation [19]	57
Figure V.8. Dispositif d'accumulation du fil [19]	58
Figure V.9. Machine multiple à glissement (à cône) [19]	59
Figure V.10. Passage d'un fil dans une filière [25]	64
Figure V.11. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [26]	65
Figure VI.1. Bottes de fil machine et fini stockées dans le parc de CATEL	66
Figure VI.2. Bottes de fil machine stockées dans le parc de CATEL	66
Figure VI.3. Palmer utilisé pour la mesure du diamètre	67
Figure VI.4. Balance pour le calcul de la masse métrique	67
Figure VI.5. Micro tour	68
Figure VI.6. Projecteur de profile numérique	68
Figure VI.7. Block de tréfilage du fil de contact caténaire	69
Figure VI.8. Vue d'ensemble (vue de dessus)	69
Figure VI.9. Structure du dérouleur dynamique de couronnes ABV-Ta	70
Figure VI.10. Structure du dispositif d'avance du fil	71
Figure VI.11. Structure du dispositif de dressage	72
Figure VI.12. appointeuse type DWU-3D	73
Figure VI.13. Structure d'un bloc de tréfilage	73
Figure VI.14. Structure du porte-filière	75
Figure VI.15. Structure du Cabestan	76
Figure VI.16. Structure du bobinoir horizontal auto-trancannant SH-TR 2000 ST	77
Figure VI.17. dispositif de d'enclos de protection des tréfileuses	78
Figure VI.19. PV d'essai de résistance sur un fil de cuivre de 150mm ² de sexions	79
Figure VI.20. Machine de traction reliée à un ordinateur	80
Figure VI.21. Diagramme d'essai de traction	81
Figure VI.22. Essai de pliages alternés - Montage d'essai	82
Figure VI.23. Essai de pliages alternés – Méthode	83
Figure VI.24. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage	83
Figure VI.25. Echantillons d'un fil de cuivre de section 150mm ² après enrobage	83
Figure VI.26. Echantillons d'un fil de cuivre de section 107mm ² après enrobage	84
Figure VI.27. Polisseuse utilisée	85

Figure VI.28. Microscope métallographique OPTIKA M-789	89
Figure VII.1. Résultats schématisés du projecteur de profil pour le 150mm ²	90
Figure VII.2. résultat schématiser du projecteur de profil pour le 107mm ²	91
Figure VII.3. Courbes de traction moyenne du 150mm ²	92
Figure VII.4. Courbes de traction moyenne du 107mm ²	92
Figure VII.5. Essai de pliage pour le 150mm ² et le 107mm ²	93
Figure VII.6. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage	94
Figure VII.7. Echantillons d'un fil de cuivre de section 150mm ² après enrobage.....	94
Figure VII.8. Echantillons d'un fil de cuivre de section 107mm ² après enrobage.....	94
Figure VII.9. Micrographies de l'échantillon fil machine avant tréfilage.....	95
Figure VII.10. Micrographies de l'échantillon 150mm ² après tréfilage.....	95
Figure VII.11. Micrographies de l'échantillon 107mm ² après tréfilage.....	95

Partie A : INTRODUCTION GENERALE

Les différents besoins de l'être humain font très souvent appel à l'utilisation de l'énergie électrique pour l'élaboration et le fonctionnement des différents programmes et produits conçus.

Nous vivons entourés en permanence de câbles électriques qui assurent la transmission d'énergie et d'informations dans les installations de tous les secteurs. Le secteur du transport n'en reste pas moins le plus touché. Par exemple le secteur ferroviaire subit un développement incommensurable depuis l'arrivée des fils de contact caténaire.

Le matériau le plus utilisé pour fabriquer ce dernier est le cuivre dont la caractéristique principale est sa très bonne conductivité électrique associée à une ductilité élevée. Avec ses alliages, le cuivre est employé dans plusieurs autres applications, notamment grâce à ses autres bonnes propriétés comme la bonne tenue à la corrosion. On le trouve également dans les échangeurs thermiques, les tuyauteries et dans les produits électriques et électroniques d'une façon générale.

Depuis la découverte du Graphène, de nouvelles idées en germe sur son utilisation autant qu'alliage ou composite plus correctement en vue de ses capacités surnaturelles, il octroie des caractéristiques fabuleuses au cuivre.

Pour arriver au stade du fil, le cuivre est d'abord extrait des minerais puis subit une première transformation qui est l'affinage électrolytique avec lequel on obtient des cathodes de cuivre d'une pureté de 99,9%. Ces cathodes sont ensuite fondues puis coulées sous forme de lingots cylindriques. Ces lingots sont alors extrudés à chaud pour affiner leur structure et réduire leur diamètre. Le produit extrudé est finalement laminé à chaud en utilisant des cylindres cannelés pour obtenir des fils ayant un diamètre de 22mm appelés : fil machine. Ce fil va passer à la deuxième étape de transformation qui est le tréfilage et la mise en forme du caténaire et en suite dans une démarche de simulation va subir une CVD (Chimical Vapeur Depostion) pour l'allier au graphène, et qui fait justement l'objet de notre étude.

Ce travail est divisé en sept (07) chapitres :

Le premier est consacré à une présentation générale de l'entreprise CATEL au sein de laquelle j'ai effectué mon stage avec une explication de son principe de fonctionnement et de ses principaux constituants.

Le second chapitre est destiné au système Pantographe-caténaire et électrification ferroviaire, ou en explique l'évolution des chemins de fer jusqu'à l'arrivée de l'électrification ferroviaire et du système d'alimentations le plus utilisé et dans notre étude concerne une partie je cite le système Pantographe-caténaire dans lequel on découvrira l'Object de notre étude le fil de contact.

Le troisième chapitre est consacré à la description des propriétés physiques, chimiques et

mécaniques des cuivres industriels. Le cuivre et ses différents alliages sont également exposés ainsi que les domaines de leurs applications industrielles.

La déformation plastique à froid a été détaillée dans le quatrième chapitre, où l'on a fait une description des dislocations et de ses mécanismes et citer les mécanismes de déformation plastique dans les poly cristaux.

Dans le cinquième chapitre, on a cité les différents procédés du tréfilage en précisant les outils et les paramètres qui lui sont associés.

Les différentes techniques expérimentales utilisées au laboratoire de CATEL et l'ENP et à l'entreprise ainsi que le procédé de tréfilage appliqué au sein de la tréfilerie CATEL sont énumérés et détaillés dans le sixième chapitre.

Les résultats obtenus lors de notre étude sont relatés et interprétés dans le septième et dernier chapitre.

Partie B : **Etude Bibliographique**

Chapitre I : Présentation de l'entreprise

B.I.1. Introduction [CATEL]

Nous procéderons dans ce chapitre à la présentation de l'entreprise CATEL où j'ai effectué mon stage, ainsi que tous mes essais de traction et de résistivité électrique et de pliage.

B.I.2. Présentation de CATEL

Bien que créée seulement en 1998 par scission de l'E.N.I.C.A.B, l'entreprise CATEL exerce un métier s'appuyant sur une activité qui remonte à plus de 70 ans, lorsque fut née l'activité CÂBLERIE DE TÉLÉCOMMUNICATION.

B.I.2.1. Localisation

Les câbleries de télécommunication d'Algérie « CATEL » est située à une quinzaine de kilomètres à l'est d'Alger, dans la zone industrielle de Oued Smar. Elle s'étend sur une superficie globale de 37.657m².

La figure I.1 ci-dessous montre la localisation de « CATEL » sur une carte géographique.

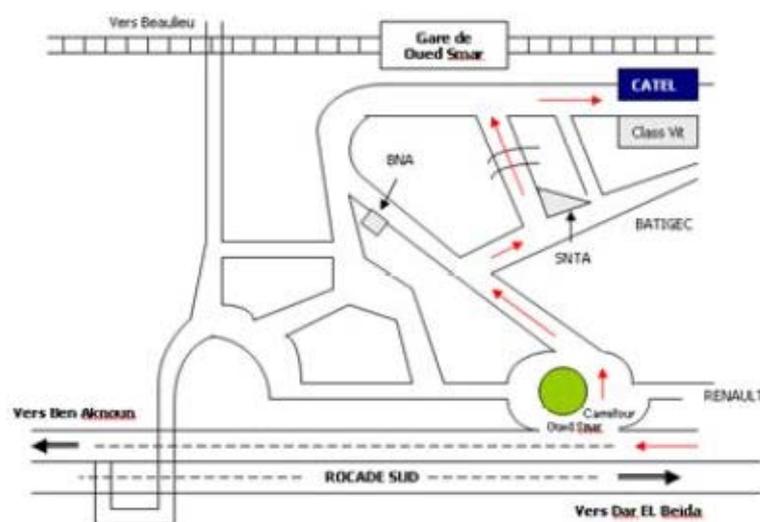


Figure I.1. Le plan d'accès au site de CATEL.

B.I.2.2. Historique

L'usine a été créée en 1928 sur décision de la société française « Lignes Télégraphiques & Téléphoniques » de France. Elle fut nationalisée en 1968. Depuis, elle a été rattachée par la SN METAL et puis en 1969 par la SONELEC.

L'entreprise nationale des industries du câble ENICAB a rattaché en 1983 les activités de l'Ex LTT et a donné naissance, après sa restructuration en 1977, à la société CATEL qui a pour principales activités : Le tréfilage, la production et la commercialisation des Câbles de Télécommunications en cuivre. Elle a créé en 2005 en partenariat avec le Holding MATELEC Sal, la société CATEL FIBROPTIC, spécialisée dans la production et la commercialisation des câbles à fibre optique.

En 2007, elle a ouvert son capital au même Holding qui actuellement en détient 60%. Les 40% des actions restantes sont détenues par la SGP Cabeleq. Le capital actuel de CATEL est de 1.002.800.000 DA soit approximativement 10.000.000 € et celui de CATEL FIBROPTIC est de 250.000.000 DA soit approximativement 2.493.000 €

En 2010, CATEL compte dans ses rangs 326 fonctionnaires, en 2011 318, en 2012 301 et 298 travailleurs pour cette année.

B.I.2.3. Dates clefs

1928 : Création de l'unité câblerie téléphonique de Oued Smar par la société française LTT « Lignes Télégraphiques & Téléphoniques Nord Africaines » - Période coloniale.

1929 : Construction du premier câble téléphonique souterrain d'Afrique du Nord entre Oran, Alger et Constantine. L'effectif de l'usine était de 1500 travailleurs.

1933 : Période difficile pour LTT engendrée par la crise mondiale de 1929. L'effectif est passé de 1500 à 800 en 1950 puis tombé à 350 en 1965, après le recouvrement de l'indépendance de l'Algérie.

1968 : Nationalisation de l'usine LTT par le gouvernement algérien et rattachement de l'unité à la société nationale SN METAL.

1969 : Transfert de l'unité de la SN METAL à la société nationale SONELEC.

1983 : Restructuration organique de la SONELEC et naissance de l'entreprise ENICAB.

1989 : ENICAB accède à l'autonomie et devient une Entreprise Publique Economique.

1998 : Restructuration par scission de l'ENICAB et naissance de trois sociétés dotées de statut de SPA dont CATEL au capital de 50 MDA.

2003 : Notification par le CNCI du plan de mise à niveau. Obtention de la certification à la norme ISO 9001 version 2000.

2004 : Augmentation du capital social de l'entreprise qui passe de 50 MDA à 180 MDA.

2005 : Création d'une joint-venture avec le Holding MATELEC Sal, pour la production de câbles à fibres optiques.

2007 : CATEL a ouvert son capital au même Holding.

Augmentation du capital social de l'entreprise qui passe de 180 MDA à 1 002 MDA.
Reconduction de la certification à la norme ISO 9001 version 2000.

2009 : Certification du câble de signalisation ZPAU par SGS Qualitest.

2010 : Certification à la norme ISO 9001 version 2008. Certification des câbles télécommunication à conducteur en cuivre et à fibre optique par LABEL Qualité France.

2011 : Reconduction de la certification de CATEL à la norme ISO 9001 version 2008.
Engagement de l'entreprise dans la certification du SME 14001.

2017 : Acquisition d'une unité de fabrication de fil de contact caténaire .

B.I.2.4. Démarche qualité

Dans un marché imprévisible et de plus en plus exigeant, CATEL s'est engagée volontairement dans la mise en place d'un système de management de la qualité pour améliorer les performances de son management et mettre en œuvre une véritable dynamique d'amélioration continue, afin de s'adapter aux exigences du marché et d'assurer sa pérennité.

Dotée de ce système, CATEL s'oriente en permanence vers la satisfaction de ses clients ainsi que l'anticipation de leurs besoins explicites et implicites. A travers cette démarche "d'amélioration continue", CATEL s'engage à fournir d'une manière régulière un produit conforme aux exigences de ses clients.

Depuis 2003, CATEL est certifiée conformément à la norme ISO 9001 version 2000, et depuis 2010 selon la norme ISO 9001 version 2008.

Afin d'accroître davantage la satisfaction de ses clients et répondre à une clientèle plus exigeante, ses produits en cuivre et en fibre optique sont certifiés par l'organisme français « Label Qualité ».

B.I.2.5. Gamme de produits

La société CATEL propose une gamme de produits très variée : Télécom Cuivre, Télécom Fibre Optique, Signalisation ferroviaire, Applications industrielles. Pour l'année 2012 CATEL a commencé la fabrication du câble d'énergie.

Télécom Cuivre

Série 88 : câble urbain souterrain Série 89 : câble urbain souterrain Série 98 : câble urbain autoporté Série 99 : câble urbain autoporté

Paire 5/9 : câble unipolaire de raccordement aérien Paire 5/1 : câble unipolaire de raccordement aérien Paire 5/3 : câble unipolaire de raccordement aérien

Série 281 : câble de raccordement pour équipement centraux Série 278 : câble de raccordement pour équipement intérieurs

Série SYT1 /NTHG : câble téléphonique pour installations privées Série SYT2 /MFG : câble téléphonique armé

Télécom Fibre Optique

Câbles à fibres optiques monomode armés Câbles à fibres optiques monomode non armés
Câbles à fibres optiques multi mode armés Câbles à fibres optiques multi mode non armé

Signalisation ferroviaire

Série ZPGU : câble locale de signalisation

Série ZPFU : câble principal de signalisation de voie Série ZPAU : câble principal de signalisation de voie Série ZC03 : câble principal de signalisation d'aiguillage

Applications industrielles

Câble de détection d'incendie SYT rouge Fil de câblage rigide : Série H07 V-U

Applications énergétique

Fil de contact 150 mm² Tramways

Fil de contact 107 mm² trains

B.I.2.6. Processus de production de câbles en cuivre

Le processus de production des câbles en cuivre est régi par cinq étapes :

Tréfilage : Tréfilage du fil en cuivre de 8 mm.

Isolation : protection du fil de cuivre nu par une couche de polyéthylène ou de PVC.

Assemblage : Assemblage des fils isolés en paires ou en quartes.

Assemblage des quartes en torons de huit, quatorze ou vingt-huit paires. Assemblage des torons en câbles.

Gainage : Revêtement final du câble : enrobage à chaud en polyéthylène.

Conditionnement : Conditionnement du câble.

La figure I.2 ci-dessous représente le processus de production du câble en cuivre.

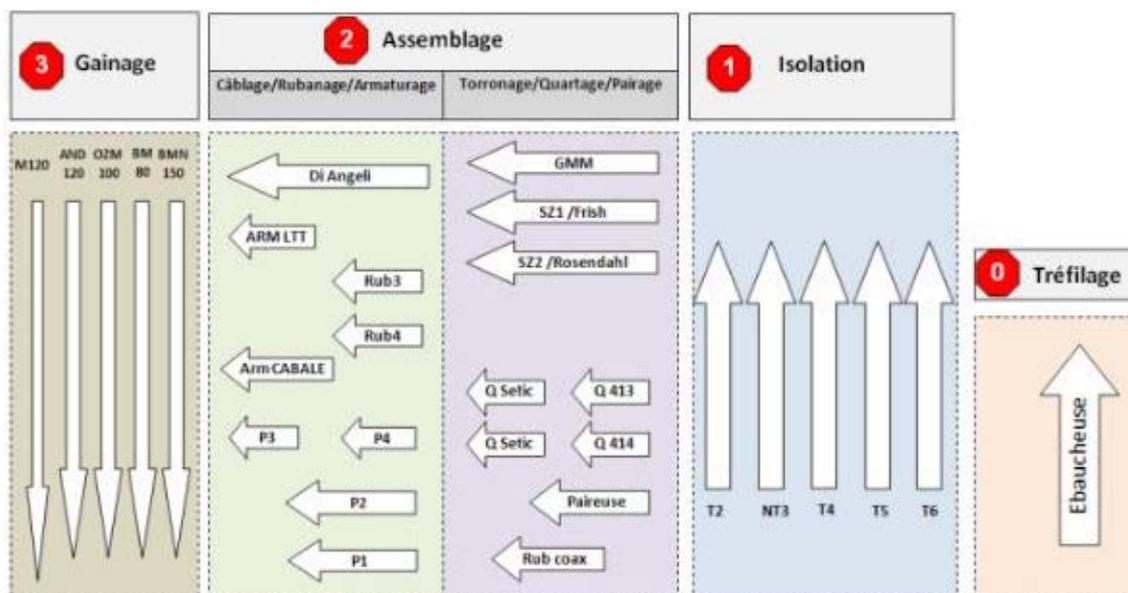


Figure I.2. Etapes de production du câble en cuivre.

B.I.2.7. Marché de CATEL

Le portefeuille clients de la société CATEL est constitué principalement d'Algérie Télécom, d'institutions de l'Etat, d'ESTEL (Filiale SNTF/Siemens Rail) et de la SONATRACH. Il englobe également plusieurs clients nationaux et étrangers, citons entre autres: INFRATELE, RETELEM, THALES, MARTEC, SNEF, Global Telecom System, Fil phone, Beta Télécommunications et autres.

B.I.2.8. Organisation de CATEL

L'organisation actuelle de CATEL peut être schématisée dans la figure I.3 ci-dessous :

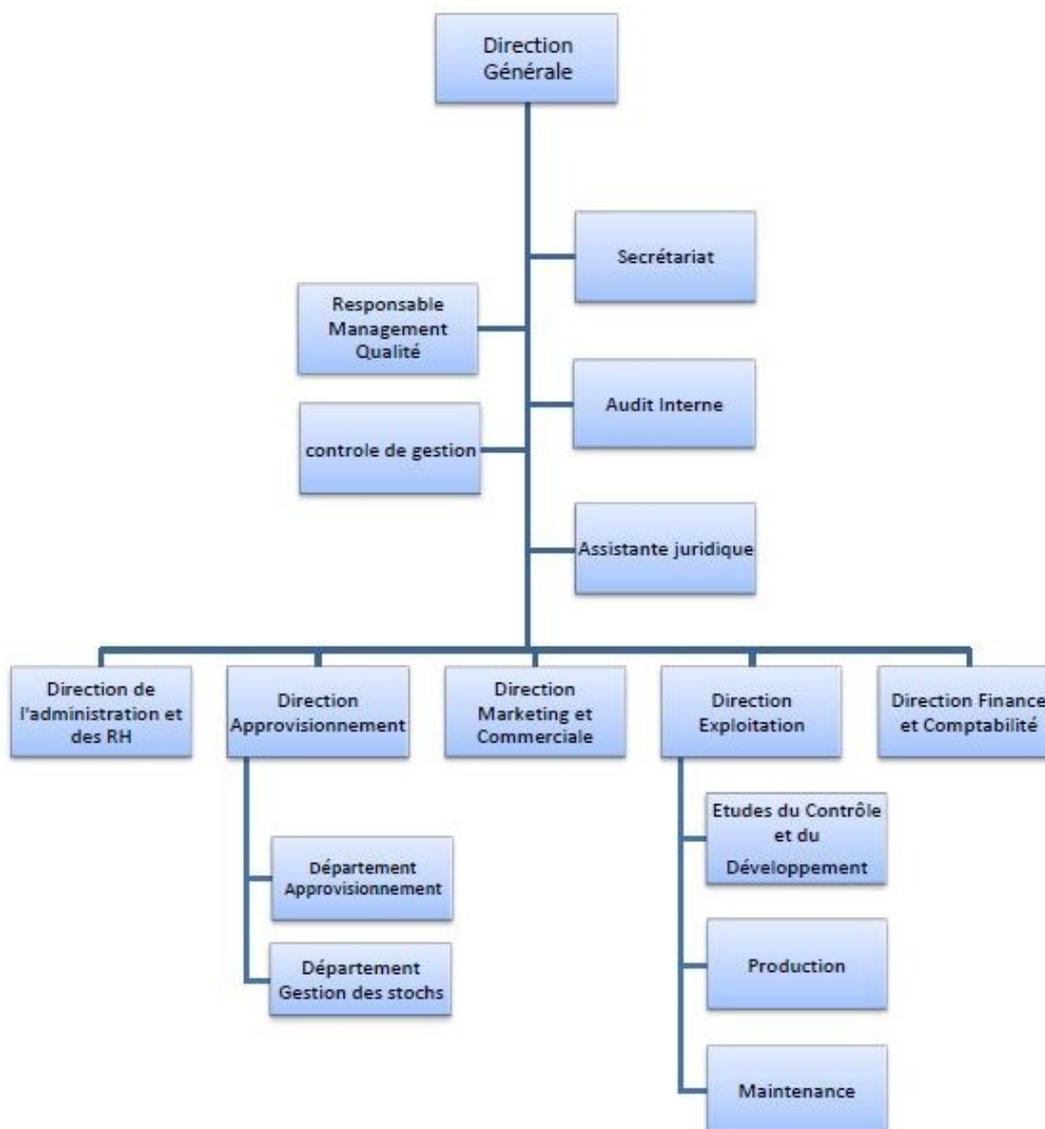


Figure I.3. Organigramme de CATEL [CATEL].

Chapitre II : Système Pantographe-caténaire et électrification ferroviaire

B.II.1. Introduction

Le transport ferroviaire a toujours su perdurer durant des siècles après sa création, Des années durant, il a dominé le transport à bas coûts des marchandises et des voyageurs, et favorisé la croissance des secteurs minier et agricole. La concurrence féroce qu'il se livre avec le transport routier l'a amené à se moderniser et à se diversifier, ainsi il a attaqué avec de nouvelles machines tel que le tramway et le métro pour couvrir plus de secteurs et de marchés et a changé graduellement son mode d'alimentation en passant par le charbon en suite le pétrole (gasoil) pour arriver à l'électricité qui est le sujet même de ce chapitre .

B.II.2. Electrification ferroviaire

B.II.2.1. Historique de l'électrification ferroviaire.

21 fév. 1804 : Première circulation d'une locomotive à vapeur sur rails en Angleterre.

1837 : Première ligne de voyageurs en France .

Fin du 19^{ème} siècle : Premiers essais d'utilisation de l'énergie électrique en Europe et aux Etats-Unis. A cette époque le choix se pose entre 2 solutions :

1. La traction autonome par un combustible embarqué : moteur à explosion, diesel, turbines à gaz qui ne nécessite comme infrastructure que des stations d'approvisionnement
2. La traction électrique qui nécessite une infrastructure de distribution répartie le long des lignes ferroviaires par caténaire ou 3^{ème} rail. L'électrification apparaît comme une solution alternative viable économiquement. Les moteurs électriques ont un rendement très supérieurs (contre 5% pour les moteurs thermiques de l'époque), un couple au démarrage important, permettent l'utilisation en tunnel ou sous terrain sans pollution, présentent un confort de conduite nettement amélioré, des économies d'entretien du matériel moteur...

•1900 : Premières électrifications dans les métros des grandes villes par 3^{ème} rail 600 ou 750V continu (Paris, New York) et en montagne.

•1910: Premières alimentations par caténaire

•1920 : Harmonisation des tensions. Adoption en France du courant continu 1500V pour les électrifications futures. En courant continu, l'adoption d'une tension

plus élevée s'avérait alors défavorable pour la réalisation des moteurs de traction série et, de plus, l'emploi du courant monophasé à la fréquence industrielle de 50Hz n'était pas techniquement viable.

- Années 1930 : Tests et développements du « système » 25kV 50Hz en Europe.
- 7 juin 1944 : Erreur historique dans l'électrification ferroviaire française : décision est prise de réserver le courant continu (1,5kV) pour les électrifications lourdes et l'alternatif (20/25kV) pour les électrifications les plus légères.
- Années 1950 : - Reconstruction d'une grande partie du réseau (dont beaucoup de 15 00Vcc). - Tests des premières lignes 25kV 50Hz dans les Alpes.
- A partir de 1954 : Généralisation progressive du 25000V alternatif.
- 1976: création de la SNTF Société nationale des transports ferroviaires algérienne.
- 2005 : Première utilisation du 2 x 25000V en Algérie modernisations des trains et équipement. Alimentation par une caténaire 25000V et un feeder en opposition de phase. Solution adoptée pour la plupart des électrifications nouvelles.

B.II.2.2. Système d'électrification ferroviaire :

Un système d'électrification ferroviaire est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour alimenter en énergie électrique les trains (locomotive électrique ou rame automotrice électrique). Les trains sont alimentés en courant alternatif haute tension ou en courant continu. L'alimentation passe par un troisième rail ou une caténaire et le retour de courant se fait par les rails de la voie ou un quatrième rail dédié

B.II.3. DESCRIPTION DU SYSTÈME PANTOGRAPHE-CATÉNAIRE

B.II.3.1. LA CATÉNAIRE

Le terme caténaire désigne une structure mécanique alimentant en électricité les trains par voie aérienne sous une tension de 25 kV alternative ou de 1,5 kV continue sur le réseau ferroviaire [1]. L'alimentation du train est appelée captage, le courant est acheminé par la caténaire vers le train depuis des sous-stations qui sont distantes de 10 à 15 km sur les réseaux 1,5 kV continu.

Les éléments qui composent la caténaire sont tous des conducteurs électriques. L'architecture de la caténaire, en particulier pour le transport de l'énergie sous un potentiel de 1,5 kV, est en général constituée d'un porteur principal, d'un porteur auxiliaire en cuivre et d'un ou deux fils de contact en cuivre, pur ou allié.

Le ou les fils de contact sont reliés au porteur auxiliaire par l'intermédiaire de pendules.

Ces derniers sont fixés sur le fil de contact grâce à un système d'accroche communément appelé griffe. La caténaire est retenue au poteau (ou support) via le bras de rappel et l'anti balançant. Le porteur principal quant à lui est suspendu à la console. La console et l'anti balançant sont fixés au poteau et sont isolés électriquement de la caténaire par des isolateurs (fig. II.1).

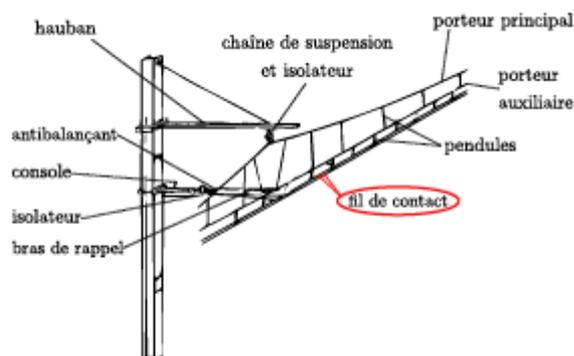


Figure II.1. Schéma descriptif du système caténaire avec porteur principal et porteur auxiliaire sur un réseau 1,5 kV

B.II.3.2. LE FIL DE CONTACT

La Dans l'ensemble caténaire nous nous intéresserons plus particulièrement au fil de contact. Il s'agit d'un conducteur nu, historiquement en cuivre pur ou en alliage à base de cuivre, de 107 ou 150 mm² sillonné en deux endroits de la partie haute (appelée tête) de façon à être suspendu par les pendules grâce aux griffes (fig. II.2.a). Pour limiter l'usure ponctuelle par frottement du pantographe, la caténaire est installée en "Z" de façon à éviter d'avoir un tronçon de fil de contact droit par rapport au pantographe. Lorsque le train est en mouvement le contact glissant entre le pantographe et le fil de la caténaire est oscillant.

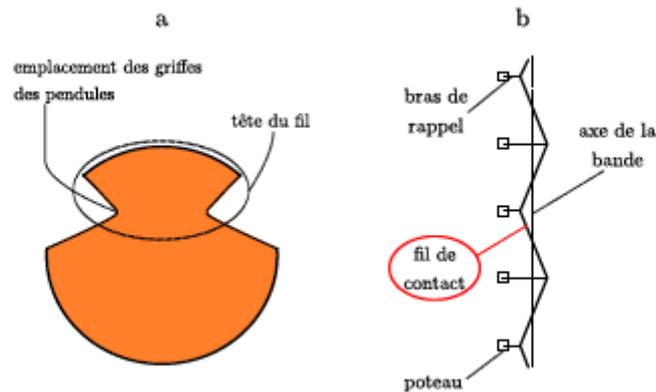


Figure II.2. Schéma descriptif du fil de contact de la caténaire, (a) vue en coupe radiale d'un fil neuf de 107 mm², (b) position axiale de la caténaire vue du dessus

Le zigzag, ou désaxement, est assuré par les bras de rappel placés en quinconce et qui ont pour but de tendre le fil et d'y appliquer une force contraire à celle qu'applique la caténaire sur la console (fig. II.2.b). Le système peut comporter un ou deux fils de contact, la configuration mono ou bifilaire est justifiée par les appels de courant électrique nécessaires en fonction de la circulation sur certains tronçons. De nouvelles nuances de cuivre allié à base d'étain et de magnésium ont été mises au point [2]. Ces nouveaux alliages ont été créés afin de répondre à une interdiction de poser du cuivre allié au cadmium pour des raisons écologiques, et à l'augmentation de la tension mécanique en service pour les lignes grandes vitesses (LGV) qui demandent une résistance mécanique accrue. Il y a donc aujourd'hui plusieurs types de fils qui coexistent sur le réseau français. Pour les reconnaître un système d'identification a été mis au point, il consiste en un nombre défini de rainures sur la tête du fil en fonction du matériau (fig. II.3) :

- Cuivre pur (Cu pur), aucune rainure.
- Cuivre allié au cadmium, qui tend à disparaître (Cu Cd), une rainure en haut de la tête.
- Cuivre allié à l'étain (Cu Sn), une rainure décalée de 24°.
- Cuivre allié au magnésium (Cu Mg), trois rainures.

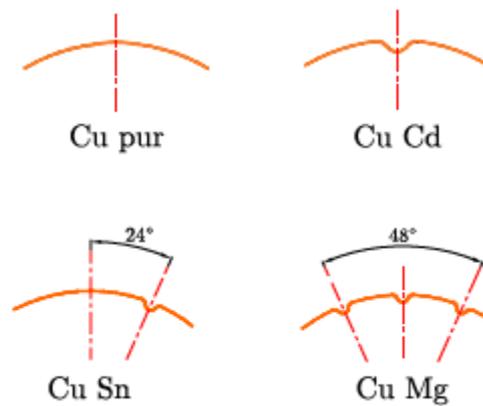
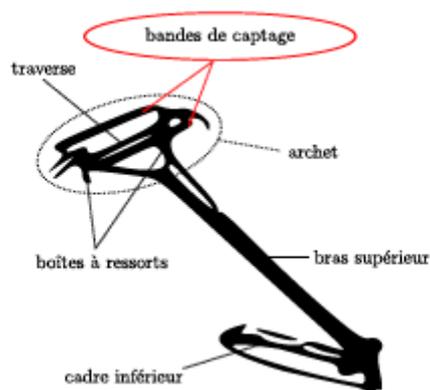


Figure II.3. Schéma de principe du système d'identification des différents fils de contact de la caténaire pour les matériaux les plus répandus.

B.II.3.3. Le pantographe

Le pantographe est un bras articulé fixé sur le toit des locomotives électriques par des isolateurs. Il permet d'alimenter électriquement les trains à l'aide d'un contact par frottement glissant avec la caténaire. Le pantographe est composé de deux parties, le cadre inférieur et le bras supérieur, jointes par une articulation. Le contact avec la caténaire se fait via la partie haute du pantographe appelée archet et plus particulièrement par les bandes de captage (fig. II.4). Les bandes peuvent être en cuivre, en carbone ou usinées, c'est à dire en carbone imprégné de cuivre ou avec des éléments en cuivre insérés à l'intérieur. Le contact entre la bande de captage et le fil de contact est toujours maintenu par un Système annexe contrôlant la pression sur la caténaire, soit des vérins pneumatiques, soit un moteur électrique. L'ensemble est équilibré par des éléments appelés boîtes à ressorts.

Figure II.4. Schéma descriptif d'un pantographe à deux bandes de captage



B.II.3.4. La bande de captage

L'élément du pantographe essentiel à notre étude est la bande de captage. La bande est fixée à une structure métallique appelée palette. Les archets peuvent être bi-palette, c'est à dire équipés de deux bandes de captage. Pour le consolider l'archet est muni d'un élément central métallique, la traverse. Plusieurs technologies sont utilisées sur le réseau français mais aujourd'hui les bandes en cuivre sont remplacées par des bandes à base de carbone (fig. II.5). Ce changement

de matériel fait suite à une volonté de réduire l'usure mécanique du fil de contact lorsque le train roule [3]. Pour des raisons pratiques et financières il est préférable de réaliser la maintenance sur le pantographe plutôt que sur la caténaire.

Les dénominations de bandes utilisées dans la suite sont :

- carbone pur (Ca pur)
- carbone imprégnée de cuivre (Ca imp.)
- carbone avec éléments de cuivre plein inséré à l'intérieur (Ca avec insert)

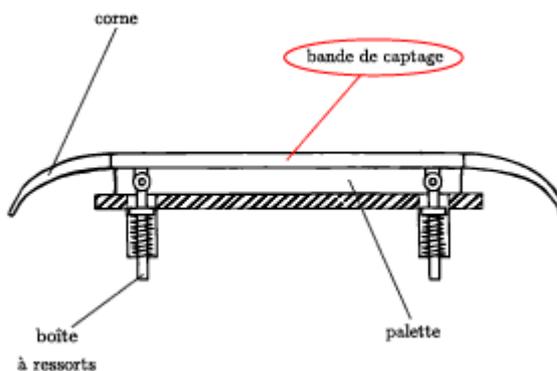


Figure II.5. Schéma descriptif d'un archet de pantographe vue en coupe.

B.II.3.5. Alimentation du train

B.II.3.5.1. Captage a l'arrêt

Le captage à l'arrêt est l'alimentation du train via le contact pantographe/caténaire lorsque le train est à l'arrêt (fig. II.6). Ce cas de figure se présente lors du pré conditionnement des rames ou lors d'arrêts prolongés, à cause d'incidents sur la voie

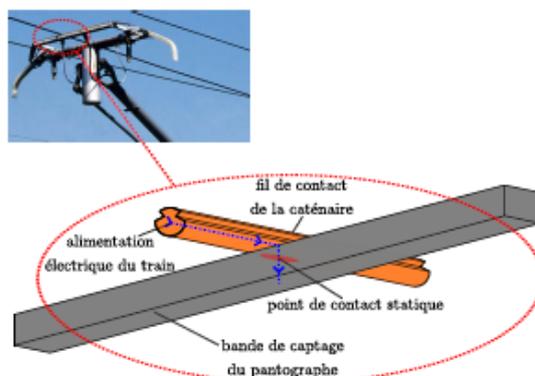


Figure II.6. Captage à l'arrêt, contact électrique entre le fil de contact de la caténaire et la bande de captage du pantographe permettant l'alimentation du train en énergie lorsqu'il est à l'arrêt.

par exemple. Pendant le pré conditionnement le train est alimenté par un profil de courant prédéfini.

B.II.3.5.2. Captage en marche

C'est le cas le plus fréquent dans ce genre de machine grâce au pantographe qui permet à une locomotive électrique ou à un tramway ou à d'autres systèmes automoteurs électriques de capter le courant par frottement sur une caténaire. Et celas tout en restant en marche(fig. II.7)

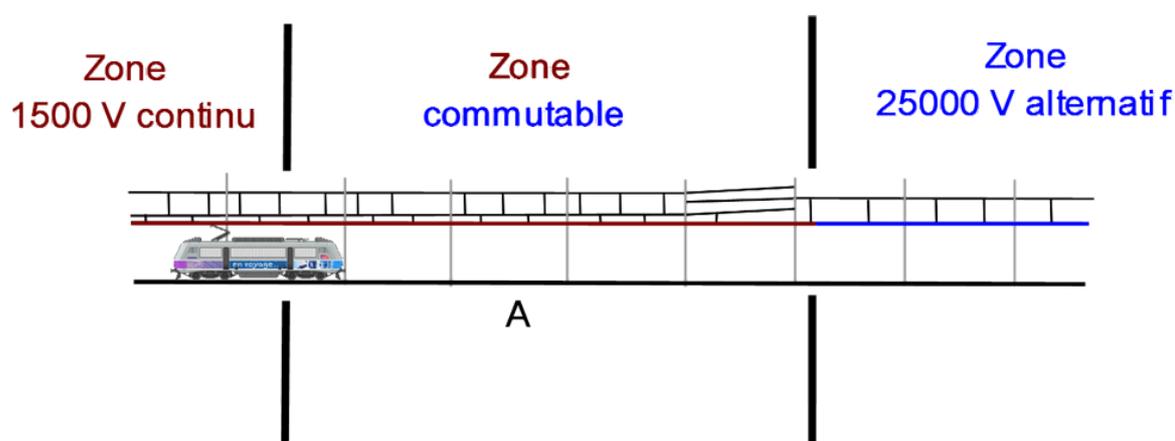


Figure II.7. Captage en marche d'un train et system d'alimentations sellons les zones.

Chapitre III : Propriétés physiques, mécaniques et chimiques des cuivres industriels

B.III.1. Cuivres industriels non alliés

B.III.1.1. Définitions

Les cuivres industriels non alliés peuvent, en général, être classés en trois grandes catégories qui sont, d'après la nomenclature française, Cu-a, Cu-b et Cu-c :

◆ Le cuivre Cu-a contenant de l'oxygène, existe sous forme de trois nuances normalisées dépendant du procédé d'affinage : Cu-a1, Cu-a2 et Cu-a3. Le cuivre Cu-a1, obtenu par affinage électrolytique, contient une teneur en cuivre supérieure ou égale à 99,90% en masse. C'est le cuivre le plus pur chargé en oxygène et aussi le plus couramment utilisé. Il a de hautes conductivités électrique et thermique et est destiné à des usages électriques (ou thermiques). Il est difficilement soudable et ne peut être utilisé sous vide. Les deux autres nuances (Cu-a2 : 99,90% de Cu et Cu-a3 : 99,85% de Cu) sont obtenues par affinage thermique, seule la première étant de conductivité électrique garantie. Ces cuivres sont cependant moins utilisés que le cuivre Cu-a1, en raison de présence d'un taux d'impuretés plus élevé.

◆ Le cuivre Cu-b, exempt d'oxygène et désoxydé au phosphore, contient au moins 99,90% en masse de cuivre et entre 0,013% et 0,050% (Cu-b1) ou entre 0,004% et 0,012% (Cu-b2) de phosphore. Ce cuivre présente de bonnes caractéristiques mécaniques (bonne soudabilité, meilleure tenue mécanique à température moyenne), mais sa conductivité électrique est limitée par rapport au cuivre Cu-a.

◆ Le cuivre Cu-c, exempt d'oxygène et de désoxydant résiduel, se présente sous forme de deux nuances qui se distinguent par leur niveau de pureté, Cu-c1 (cuivre pur) qui comprend 99,95 % de cuivre et Cu-c2 (cuivre extra pur) qui en comprend 99,99 %. Ce cuivre est utilisé à la fois pour des usages électriques (ou thermiques) et mécaniques (conductivité élevée et aussi bonne soudabilité) [4].

B.III.1.2. Le cuivre dans l'industrie

B.III.1.2.1. Evolution de la production mondiale

Si l'on classe le cuivre en terme de tonnage vis-à-vis des autres métaux, il occupe la troisième place (acier : 790 Mt, aluminium : 22 Mt, cuivre : 13,5 Mt, manganèse : 9,6 Mt, zinc : 7,6 Mt).

Si l'on classe la production minière en terme de valeur, le cuivre prend aussi la troisième place, la première et la deuxième étant respectivement occupées par le fer et l'or.

En 1999, la production minière de cuivre a été assurée principalement par sept pays :

- Chili (34,6 %) ;
- États-Unis (12,6 %) ;
- Canada (4,8 %) ;
- Indonésie (6,2 %) ;
- Russie (4,0 %) ;
- Australie (5,7 %) ;
- Pérou (4,2 %).

Il faut noter cependant, dans les deux premiers pays producteurs, l'extrême concentration de l'industrie du cuivre. Le tableau I ci-dessous nous donne les réserves mondiales de cuivre par continent [5].

Tableau I. Répartition des réserves mondiales de cuivre par continent [5].

Continent	Quantité (Mt)	Répartition (%)
Amérique du nord	55	16,3
Amérique du sud	130	38,6
Europe	49	14,5
Afrique	22	6,5
Asie	70	20,8
Océanie	11	3,3
Total	337	100

B.III.1.2.2. Consommation et principaux domaines d'utilisation

Il est difficile de fournir une idée précise sur la consommation de cuivre à l'échelle mondiale. En effet, la consommation apparente est le solde de la production interne et des importations moins les exportations, mais elle ne tient pas compte du stockage et du déstockage. Au niveau mondial, la demande annuelle est restée en constante progression:

- de 1,52 à 2 % de 1981 à 1985 ;
- de 2 à 2,5 % de 1986 à 1995 ;
- de 4,5 à 5 % de 1996 à 2000.

Les utilisations du cuivre tiennent compte de l'ensemble de ses propriétés fonctionnelles : les conductivités électrique et thermique, la résistance à la corrosion, la ductilité, l'aptitude à recevoir des revêtements divers, l'aptitude au soudage et au brasage, les propriétés fongicides.

En 1999, le secteur de la construction électrique est le premier consommateur (50 % des utilisations). Le deuxième secteur est le bâtiment (20 %) où des usages en toitures offrent des opportunités intéressantes. Le troisième secteur est celui des biens d'équipements (15 %). Le secteur du transport, avec 5 %, représente une part croissante de la consommation. Des usages divers et nouveaux apparaissent, notamment dans le

domaine de la haute technologie ; ils s'élèvent à 10 % (sels de cuivre, électronique, supraconducteurs, alliages à mémoire de forme, supraconducteurs à base d'oxyde de cuivre).

Au niveau mondial, pour pouvoir répondre à l'accroissement de la consommation du cuivre, la capacité effective de production des pays industrialisés s'élevait, en 1994, à

8 Mt/an pour les mines, à 9,5 Mt/an pour les fonderies et à 9,3 Mt/an pour les raffineries. En 1998, les productions de ces deux dernières industries sont passées respectivement à 10,2 et 10 Mt ; et l'on prévoit pour la seule fusion un accroissement qui atteindrait 1,4 Mt en 2002. La consommation mondiale de cuivre raffiné est de l'ordre de 11,5 Mt/an, dont 88 % sont consommés dans le monde industrialisé[5].

B.III.2. Les alliages de cuivre utilisés dans l'industrie

B.III.2.1. Alliages à faible teneur en éléments d'addition

La teneur en éléments d'addition est inférieure à 3%, les principaux alliages sont : a- Cuivre à l'argent :

L'apport moyen est de 0,08%. La température de recristallisation et donc d'adoucissement du cuivre est augmentés de 100 à 150°C. Ceci permet de conserver les caractéristiques mécaniques à une température où le cuivre pur s'adoucit. Les applications sont dans l'étamage, l'émaillage et les fils conducteurs.

b- Cuivre au cadmium:

Ajouté dans la teneur de 0,7 à 1%, le Ca améliore sensiblement les caractéristiques mécaniques, la limite de fatigue et le fluage, la conductibilité électrique est d'environ 90% de celle du cuivre pur. Cet alliage trouve ses applications dans les fils conducteurs, les bagues de collecteurs, les supports de balais...

c- cuivre au tellure:

La masse de tellure ajoutée est de 0,3 à 0,7%. Pratiquement immiscibles à l'état solide, la dissémination des tellures formés augmente l'usinabilité, sans fragilité particulière. La conductibilité reste élevée (98% de celle du cuivre). Ces alliages sont utilisés pour les pièces à haute conductibilité ; tuyères pour soudage au gaz, segment decollecteur...

d- Cuivre au chrome:

La teneur en chrome est de 0,6 à 1%, cet alliage est utilisé lorsque la conductibilité et la résistance doivent être élevées : électrodes de soudage, éléments de frein...

e- Cuivre au zirconium:

Le zirconium donne des caractéristiques intéressantes avec des additions infimes. La solution Cu-Zr est saturée à 980°C avec 0,15% de Zr seulement. Ces alliages doivent être élaborés sous vide ou en atmosphère sans oxygène.

f- Cuivre au nickel et silicium:

Cet alliage contient environ 2,5% de Ni et 0,5% de Si. La conductibilité électrique de cet alliage est réduite à 35% de celle du cuivre. Cet alliage trouve son emploi en mécanique : tête et pied de bielle, guide de soupape, poussoir et mâchoires de machines électriques à forger.

g- Cuivre au nickel et phosphore:

Les teneurs sont : 1 à 1,2% de Ni et 0,2 à 0,3% de P. conductibilité électrique approchant 60% celle du cuivre. Il est utilisé pour les soudures par point, les électrodes de soudure à l'arc et les tuyères pour soudure.

h- Cuivre au nickel et béryllium:

Le béryllium, même pour de très faibles teneurs d'addition, engendre une grande variation des propriétés. La limite de solubilité du Be dans le Cu est de 2,7 % à 866°C, presque nulle à 0°C. Ces alliages sont connus pour avoir des conductibilités thermique et électrique très élevées, une meilleure résistance à la corrosion ainsi qu'une excellente aptitude au moulage[6].

B.III.2.2. Alliages à haute teneur en éléments d'addition

Ce sont spécialement les alliages Cuivre-Zinc appelés Laitons et les alliages Cuivre- Etain appelés Bronzes, il existe d'autres alliages comme Cu-Al, Cu-Pb et Cu-Ni mais ils sont nettement moins importants et peu utilisés comparés aux Bronzes et Laitons [6].

B.III.2.2.1. Les Laitons

Les laitons sont des alliages à base de cuivre et de zinc renfermant de 5 à 45 % de ce dernier.

a- Les laitons simples:

Ce sont ceux qui sont constitués uniquement de cuivre et de zinc.

Au-dessous de 36% de zinc, notamment dans la gamme de 30 à 36 %, ces laitons présentent une aptitude très élevée au formage à froid permettant, par exemple, des emboutissages profonds.

Au-dessus de 36% de zinc, les aptitudes au formage à chaud (filage, matriçage) et a l'usinage devienne en prépondérants.

b- Les laitons au plomb:(Zn=33à42%,Pb=1à3,5%)

Ces alliages sont particulièrement destinés à l'usinage à grande vitesse de coupe. Selon leurs teneurs en zinc et en plomb, ces laitons peuvent satisfaire des exigences de mise en œuvre très variées:

- décolletage pur : Cu-Zn 40Pb3,
 - décolletage et légères déformations à froid: Cu-Zn36Pb3,
 - matriçage avec reprises d'usinage Cu-Zn 39Pb2,
 - frappe à froid avec reprises d'usinage Cu-Zn 35 Pb2.
- c- Les laitons spéciaux:

Leur teneur en cuivre est comprise entre 52 et 70% et ils renferment, outre le zinc, différents éléments d'additions, seuls ou associés, dans les proportions suivantes:

$$\begin{array}{ll} \text{Al} \leq 5 \%, & \text{Ni} \leq 5 \%, \text{ Fe} \leq 3 \% \\ \text{Mn} \leq 4 \%, & \text{Sn} \leq 2 \%, \text{ Pb} \leq 3 \%. \end{array}$$

Selon leur nature et leurs teneurs, ces additions améliorent les caractéristiques mécaniques, l'aptitude au frottement, la résistance à la corrosion, etc.

Les caractéristiques mécaniques des laitons sont fortement influencées par la teneur en zinc (et en éléments d'additions pour les laitons spéciaux), par l'écroutissage et, à l'état recuit, par la grosseur du grain [7].

B.III.2.2.2. Les bronzes

Les bronzes sont essentiellement des alliages de cuivre et d'étain.

Ils contiennent de 5 à 20% d'étain. Les additions les plus fréquentes sont :

- le zinc : 1 à 7%,
- le plomb : 3 à 7 % pour les usages généraux, jusqu'à 30 % pour les alliages de frottement,
- le phosphore : 0,01 à 0,5 %. provenant de l'excès utilisé pour la désoxydation et qui, aux plus fortes teneurs, améliore les propriétés de frottement.

En raison de leur excellente aptitude au moulage, les bronzes sont surtout des alliages de fonderie. Néanmoins, certaines nuances à moins de 10 % d'étain, sont utilisées à l'état corroyé sous forme de barres, tôles, bandes, rubans, fils et tubes [7].

B.III.3. Propriétés physiques et mécaniques du cuivre

Le cuivre Cu-1 est un matériau diamagnétique de structure cristalline cubique à faces centrées (c.f.c.) ; son paramètre de maille est égal à 3,608Å à 18°C. Il a une température de fusion de 1084°C, une masse volumique variant entre 8,89.10³ et 8,92.10³ kg/m³ à 20°C (selon la teneur en oxygène) et une résistivité électrique variant entre 1,724 à 1,682 μ Ω .cm à 20°C. Les propriétés essentielles de ce matériau sont ses conductivités électrique (C) et thermique, qui sont particulièrement élevées (respectivement de l'ordre de 101 % IACS et de 391 W/(m.K) à 20°C) ; cette dernière est très influencée par la teneur en oxygène. Le coefficient de dilatation linéaire (de 20° à 300°C) est de 17,6.10⁻⁶K⁻¹, c'est-à-dire 50% plus important que l'acier. Les propriétés mécaniques dépendent surtout de l'écrouissage et de la pureté du matériau [8].

Les principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre sont résumées dans le tableau II.

Tableau II. Principales propriétés physiques et mécaniques du cuivre [8].

Élément				
Cu (M = 63,54, Z = 29)				
Propriétés physiques				
Enthalpie de fusion	211850 J/kg			
Température de fusion	1065° à 1083°C			
Coefficient de dilatation (en 10 ⁻⁶ K ⁻¹)	de -190° à 16°C		14 ,1	
	de 25° à 100°C		16,8	
	de 20° à 200°C		17,3	
	de 20° à 300°C		17,7	
Capacité thermique massique (en J/ (Kg.K))	20°C		386	
	100°C		393	
	200°C		403	
	900°C		528	
Conductivité thermique (en W/(m.K))	20°C		400	
	100°C		385	
	200°C		381	
	300°C		377	
Conductivité électrique (%IACS)	(état recuit)	20°C	100 à 102,5	
		100°C	76	
		200°C	58	
	(état écroui)	20°C	97	
Résistivité électrique ρ (en μΩ.cm)	(état recuit)	20°C	1,724 à 1,682	
		100°C	2,27	
		200°C	2,95	
	(état écroui)	20°C	1,78 à 1,70	
Propriétés mécaniques				
Etat de livraison	Rp 0 , 2	Rm (MPa)	Allongement (A %)	Dureté Vickers HV
Recuit	70	230	45	50
¼ dur	190	270	25	80
½ dur	250	300	14	100
4 / 4 dur	320	350	6	110
<p><i>L'état de recuit signifie 0% d'écrouissage</i></p> <p><i>¼ dur : 10% d'écrouissage</i></p> <p><i>½ dur : 25% d'écrouissage 4 / 4dur : 50% d'écrouissage</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Rp0 , 2 limite élastique à 0,2% d'allongement</i></p>				

B.III.4. Propriétés chimiques du cuivre

Le cuivre ne s'altère pas dans l'air sec à la température ambiante. Si on le chauffe, il s'oxyde, devient rouge brun (Cu_2O), puis noir (CuO). Cette oxydation se produit sans incandescence.

Il s'altère lentement dans l'acide chlorhydrique, est dissous rapidement dans l'acide nitrique et décompose l'acide sulfurique concentré et chaud.

Bien qu'il ne décompose pas l'eau, il se recouvre dans l'air humide, d'une couche imperméable de *vert-de-gris* qui le protège contre une corrosion éventuelle.

La fusibilité du cuivre est médiocre, il ne convient pas pour la fabrication d'objets moulés, car il se solidifie rapidement et donne une masse bulleuse.

C'est, après l'argent, le métal qui conduit le mieux la chaleur et l'électricité d'où son utilisation dans la confection de batteries de cuisine, chaudières à évaporer, cuves de brasseries, alambics, serpents, fils et câbles pour lignes de transport d'énergie électrique...[6].

B.III.4.1. Le cuivre et l'oxygène

La solubilité de l'oxygène dans le cuivre est de 0,007% à 300°C et 0,01% à 950°C. Au dessus de la saturation il y a formation de Cu_2O , qui s'isole au joint de grains et diminue la forgeabilité. En faible teneur, il améliore la conductibilité électrique ; il est nécessaire pour l'obtention de lingots sans retassure. L'oxygène influence la solubilité de l'hydrogène ; l'expérience montre que le meilleur équilibre oxygène-hydrogène se situe aux environs de 0,00003% d'hydrogène et 0,045-0,055% d'oxygène. Lorsque l'on désire un minimum d'oxygène dans le cuivre, on désoxyde par perchage et l'on continue par incorporation d'éléments donnant des produits de réaction solides (phosphore, calcium, béryllium, etc.)[6].

B.III.4.2. Résistance à la corrosion

B.III.4.2.1. Caractéristiques de base

En général, les alliages à haute teneur en Cu ont une résistance à la corrosion analogue à celle du cuivre non allié qui présente une remarquable tenue dans de nombreux milieux corrosifs.

Le cuivre figure parmi les métaux les plus nobles, au sens thermodynamique, après les métaux précieux, comme l'indique le tableau III où sont reportés les potentiels d'oxydoréduction standard (E°) des principaux métaux [9] :

Tableau III. Potentiels d'équilibre standards mesurés par rapport à l'électrode à hydrogène [9].

Métal	E°	Métal	E°
Magnésium	- 2,37 V	Etain	- 0,14 V
Aluminium	- 1,66 V	Plomb	- 0,13 V
Titane	-1,63V	Hydrogène	0V
Zinc	- 0,76 V	Antimoine	+0,15V
Chrome	- 0,74 V	Bismuth	+ 0,31 V
Fer	- 0,45 V	Cuivre	+ 0,34 V
Cadmium	- 0,40 V	Argent	+ 0,80 V
Cobalt	- 0,28 V	Platine	+1,18V
Nickel	- 0,26 V	Or	+ 1,69 V

Dans les alliages, les éléments d'addition comme Ni, Al, Sn, As améliorent considérablement la *résistance* du *cuivre* à différents types de corrosion. D'autres comme Fe et Zn peuvent l'altérer ou l'améliorer suivant les cas.

Le tableau IV donne les vitesses de corrosion atmosphériques (corrosion sèche) du cuivre et de ses principaux alliages [9].

Tableau IV. Vitesse de corrosion du cuivre et de ses alliages en atmosphère sèche [9].

Alliage	Vitesse (mg/dm ² /jour)	Alliage	Vitesse (mg/dm ² /jour)
Cu-al/Cu-b1	0,31	CuSn8P	0,56
CuA18	0,40	CuNi20Zn5	0,60
CuSi3Mn	0,43	CuNi29Sn1	0,62
CuZn29Sn1	0,47	CuZn3O	0,71
CuZn15	0,48	CuZn22Al5Mn3Fe3	2,00

B.III.4.2.2. Fatigue sous corrosion

Le cuivre et les alliages cuivreux présentent une résistance à la fatigue sous corrosion peu différente de leur limite de fatigue dans l'air. Le tableau V ci-dessous donne les résultats d'essais comparatifs de résistance à la fatigue poursuivis jusqu'à 10 à 100 millions de cycles en eau douce et en eau salée[9].

Tableau V. Résistance à la fatigue sous corrosion du cuivre et de ses alliages [9].

Alliage	Etat	Nombre de cycles × 10 ⁶	Air R (MPa)	Eau douce R (Mpa)	Eau salée R (MPa)
Cu-b1	Recuit	100	70	70	-
CuZn35	Recuit	50	120	85	85
CuSn5	Recuit	12	140	140	140
CuAl13Fe4Mn3	Filé	50	280	210	210
CuAl10Ni5Fe5	Forgé	50	355	-	300
	Coulé	100	220	200	150
CuNi20MnFe	Recuit	50	125	125	125

Chapitre IV : Graphène et sa croissance par CVD sur substrat métallique

B.IV.1. Introduction

Le graphène, plan d'atomes de carbone agencés en nid d'abeille, a été le premier cristal en deux dimensions à être isolé et étudié. Depuis 2004 avec les travaux de K.S Novoselov et A.K. Geim, l'essor pour ce matériau est grandissant tant ses propriétés électroniques et mécaniques sont intéressantes.

Parmi les différentes manières de synthétiser du graphène ou de créer des alliages avec, le procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour Chemical Vapour Deposition) mettant en œuvre un substrat métallique et un précurseur carboné, souvent un hydrocarbure, semble être l'un des plus prometteurs en vue d'une production de graphène à plus grande échelle.

B.IV.2. Graphène

Depuis 2004 avec les travaux de K.S Novoselov et A.K. Geim, l'essor pour ce matériau est grandissant tant ses propriétés électroniques et mécaniques sont intéressantes. En particulier, le graphène est le matériau ayant la plus grande mobilité électrique à température ambiante (de l'ordre de $200\,000\text{ cm}^2/(\text{V.s})$) [10]. Il est également très flexible, extrêmement solide. La résistance à la rupture du graphène est évaluée à 130 GPa est un excellent conducteur thermique [11]. Ces propriétés confèrent au graphène un potentiel incroyable pour de nombreuses applications dans les domaines de l'électronique, des matériaux composites, du stockage d'énergie, etc. Le passage du laboratoire à l'industrie repose avant tout sur la possibilité de produire du graphène à grande échelle et à un coût raisonnable.

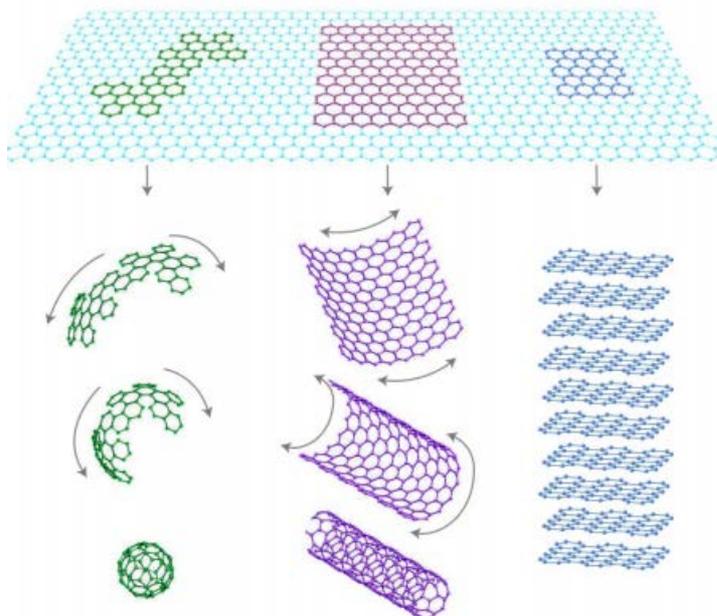


Figure IV.1. Allotropes du graphène [10].

La configuration électronique du carbone est $1s^2 2s^2 2p^2$, le carbone possède donc quatre électrons de valence. Dans le graphène, l'orbitale s et deux orbitales p d'un atome de C présentent une hybridation et forment trois orbitales sp^2 . Ces orbitales sp^2 sont orientées à 120° dans le plan du graphène et pointent vers les trois plus proches voisins. Elles forment des liaisons fortes σ et σ^* responsables de la cohésion du réseau en nid d'abeille. Le quatrième électron, de l'orbitale $2p_z$ perpendiculaire au plan du graphène, forme les liaisons π et π^* . Ce sont ces électrons impliqués dans les liaisons π qui sont responsables des propriétés particulières du graphène [12].

B.IV.3. Croissance de graphène par CVD sur substrat métallique

B.IV.3.1. Définition

Il existe de nombreuses méthodes pour obtenir du graphène, chacune ayant ses particularités. Après une brève introduction sur ces différentes méthodes, cette partie est consacrée à une technique de synthèse spécifique : la croissance de graphène par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour l'anglais Chemical Vapour Deposition) sur substrat métallique.

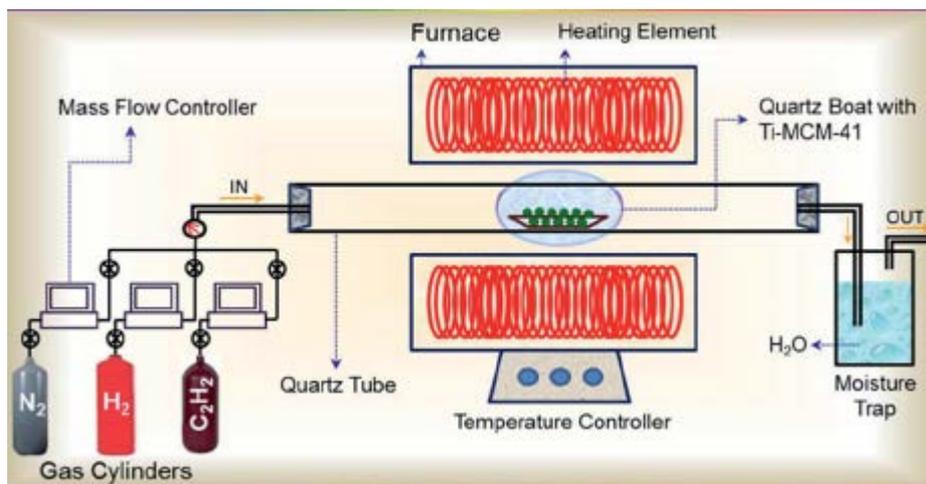


Figure IV.2. System type CVD (Chemical Vapour Deposition)

Les Exfoliation mécanique

L'exfoliation mécanique consiste à séparer mécaniquement un feuillet de graphène à partir de graphite pyrolytique massif hautement orienté. L'interaction faible de type Van der Waals entre les feuillets de graphène permet d'isoler une monocouche de graphène par une méthode simple utilisant un ruban adhésif.

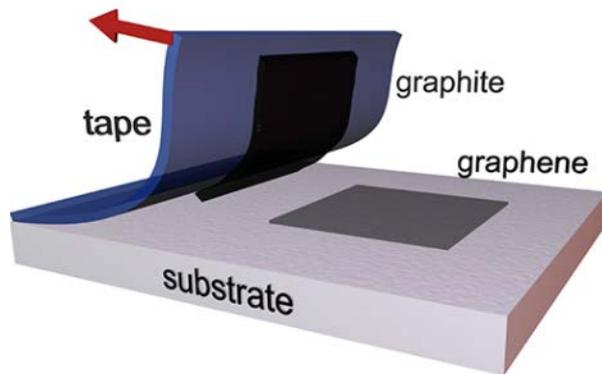


Figure IV.3. Schématisation d'une Exfoliation mécanique.

Exfoliation chimique

A la manière de l'exfoliation mécanique, il s'agit là aussi de séparer les feuillets de graphène d'un graphite massif mais par voie chimique. La première étape est l'oxydation du graphite par un traitement acide. L'oxyde de graphite étant fortement hydrophile, il est alors possible de disperser les feuillets de graphène dans un solvant aqueux à l'aide d'ultrasons.

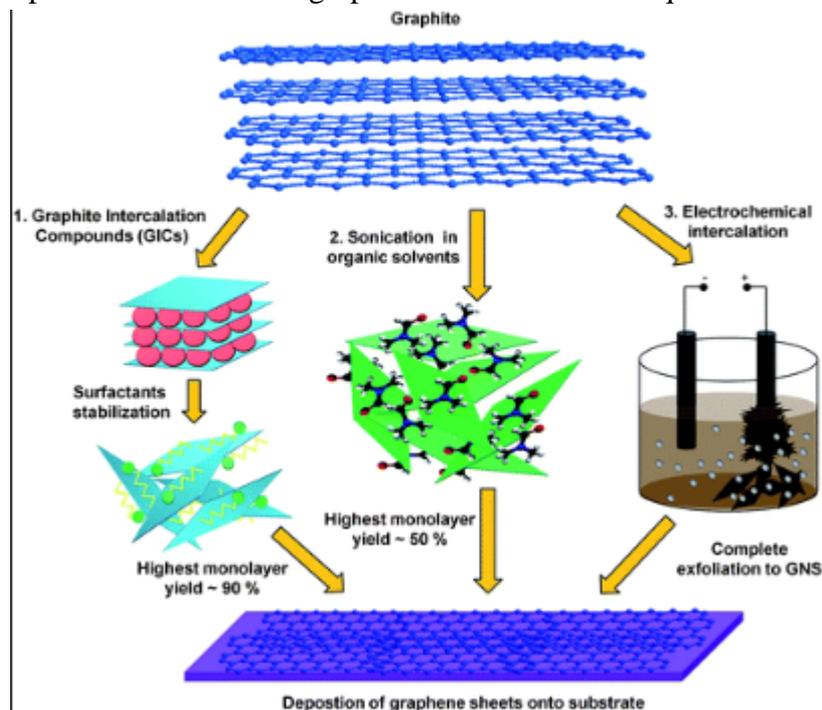


Figure IV.4. Schématisation d'une Exfoliation chimique.

La Synthèse épitaxiée sur SiC

Ce procédé de croissance de graphène consiste à chauffer à haute température sous vide, ou sous pression atmosphérique d'argon un substrat de carbure de silicium (SiC) jusqu'à la sublimation des atomes de Si en surface. Les atomes de C restant se réorganisent sous forme de structure graphitique. Le graphène formé est majoritairement multicouches mais il est possible d'obtenir localement du graphène monocouche ("right hand"). [13]

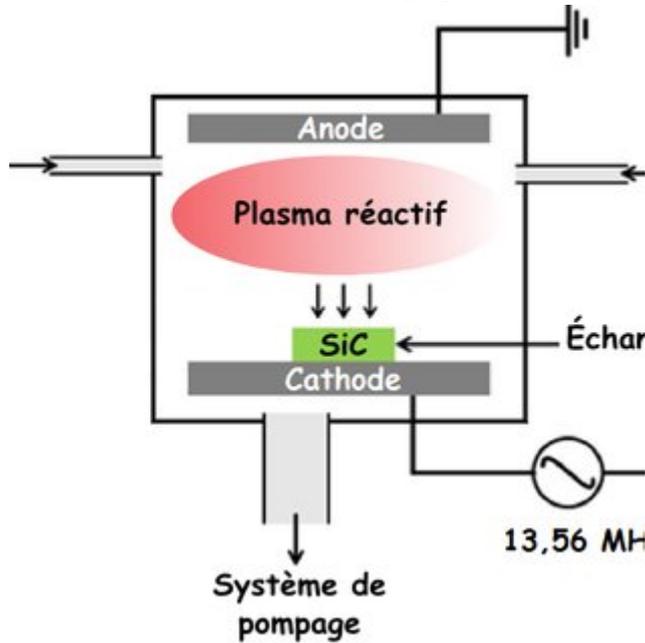


Figure IV.5. Schématisation d'une Synthèse épitaxiée sur SiC .

B.IV.3.2. Mise en œuvre de la croissance par CVD sur substrat métallique

Le principe de la croissance de graphène par CVD sur substrat métallique est relativement simple. Un précurseur carboné, un hydrocarbure tel que le méthane par exemple, est amené à la surface d'un substrat métallique porté à une température élevée (400 °C à 1100 °C). La molécule d'hydrocarbure est adsorbée puis dissociée à la surface du métal qui joue le rôle du catalyseur. Les atomes de carbone issus de la décomposition catalytique et thermique du précurseur carboné sont mobiles et peuvent former du graphène suivant deux processus possibles, qui se distinguent par le niveau de solubilité du carbone dans le métal. Ces deux processus existants sont mis en évidence par les travaux de Li et al., [14] qui rapportent l'étude de la synthèse par CVD sur cuivre et sur nickel à l'aide de méthane $^{12}\text{CH}_4$ et de méthane marqué $^{13}\text{CH}_4$.

Dans le cas des métaux pour lesquels la solubilité du carbone est faible, tel que le cuivre (0,01 % at. à 1000°C), les atomes de carbone adsorbés à la surface après la décomposition du méthane se réorganisent en graphène selon un processus surfacique. En effet, lors de la synthèse sur Cu [14], l'injection de $^{13}\text{CH}_4$ puis de $^{12}\text{CH}_4$ entraîne la formation de graphène ^{13}C entouré de graphène ^{12}C identifiés par spectroscopie Raman (Figure 4). Cela signifie qu'il s'agit d'un mécanisme surfacique, les atomes de carbone ne diffusant pas, ou très peu, dans le volume du Cu à cause de la trop faible solubilité.

B.IV.3.2.1. Transfert

Une des caractéristiques importantes de l'utilisation d'un procédé de CVD sur substrat métallique est la nécessité de transférer le graphène vers un autre substrat (diélectrique, transparent,...) pour de nombreuses applications. Le transfert du graphène est une étape délicate pendant laquelle il faut limiter l'endommagement du film de graphène et sa contamination. Deux méthodes sont principalement utilisées pour transférer du graphène formé par CVD.

Method	Applications
Mechanical exfoliation	Research
Chemical exfoliation	Coatings, paint/ink, composites, transparent conductive layers, energy storage, bioapplications
Chemical exfoliation via graphene oxide	Coatings, paint/ink, composites, transparent conductive layers, energy storage, bioapplications
CVD	Photonics, nanoelectronics, transparent conductive layers, sensors, bioapplications
SiC	High-frequency transistors and other electronic devices

Tableau VI. Type de transfert avec application .

La première consiste à déposer une fine épaisseur de PMMA sur le graphène pour le protéger puis à dissoudre le métal sur lequel il repose. Plusieurs solutions sont utilisées pour dissoudre le substrat métallique, on peut citer par exemple le chlorure de fer FeCl_3 (Co, Ni), HCl (Ni) ou $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (Cu). Après dissolution du métal, le graphène recouvert de PMMA est en contact avec la solution et est sujet à de la contamination. La seconde méthode permet de détacher le graphène de son substrat métallique sans dissoudre ce dernier. Le graphène est également recouvert de PMMA puis le système PMMA/graphène/métal est utilisé comme cathode dans un dispositif électrochimique.

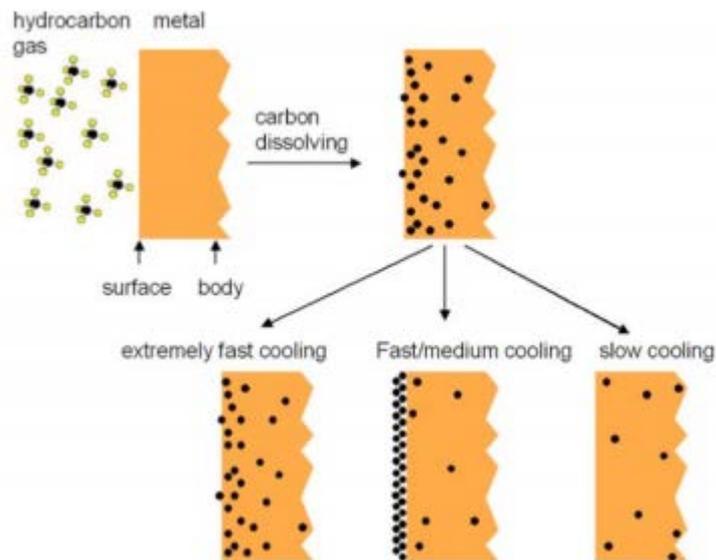


Figure IV.6. schéma des transferts en CVD .

B.IV.3.2.2. Les différents substrats métalliques utilisés

La croissance de graphène par CVD a été réalisée pour un grand nombre de métaux dans des conditions expérimentales très variées. Si l'utilisation de Cu et Ni est très largement prédominante, on recense la croissance de graphène sur du Co, Fe , Ir , Rh , Pt , Au. Pour chacun de ces métaux, selon la valeur de la solubilité de C, la croissance suit le modèle du processus d'adsorption surfacique (type Cu) qui permet d'obtenir du graphène plutôt monocouche ou le processus de ségrégation/précipitation (type Ni) qui entraîne la formation de graphène plutôt multicouches.

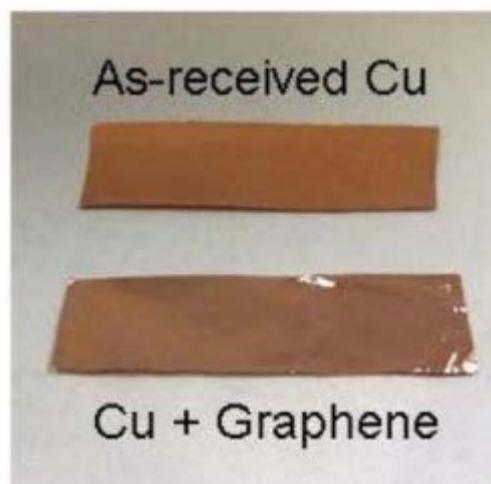


Figure IV.7. substrat de cuivre .

La nature du substrat n'influence pas seulement le type de mécanisme de croissance mais également l'interaction métal-graphène qui modifie sensiblement la structure électronique du graphène. Dans le cas des métaux à forte interaction métal-graphène, tels que Ni, Ru ou Co, il y a une interaction de type chimisorption. La distance métal-graphène est faible, de l'ordre de 2,1 Å et la structure électronique du graphène est fortement modifiée. La structure du graphène est fortement liée à celle du substrat lors de la croissance. Dans le cas des métaux à faible interaction métal-graphène, tels que Cu ou Ir, il y a une interaction de type physisorption avec une distance métal-graphène de l'ordre de 3,3 Å. Dans ce cas, la structure du graphène formé est moins dépendante de celle du substrat, cela se traduit par une bonne homogénéité du graphène sur toute la surface. De plus, la séparation mécanique du graphène de son substrat, par la méthode électrochimique, est facilitée.

B.IV.4. Mesure et contrôle des caractéristiques du graphène

Lorsqu'on parle de graphène, il faut toujours le définir par ses caractéristiques tant il existe de « types » de graphène différents selon le procédé de croissance utilisé. Or, que ce soit à propos du nombre de couches, du niveau de dopage et de contrainte ou de sa structure, ces caractéristiques ont une forte influence sur les propriétés du graphène et, par extension, sur la performance des dispositifs utilisant du graphène. Le contrôle des caractéristiques du graphène formé est donc un enjeu majeur des travaux menés sur la croissance de graphène par CVD. Pour améliorer la maîtrise de la synthèse et ainsi pouvoir concevoir des films de graphène ayant les caractéristiques souhaitées, il est nécessaire de savoir mesurer correctement les caractéristiques du graphène.

Le graphène a une signature Raman tout à fait particulière, son spectre présentant trois bandes principales G, D et 2D, liées aux vibrations dans le plan. La Figure 8 montre un spectre classique de graphène monocouche.

L'étude et la quantification des défauts dans le graphène sont essentielles pour évaluer et améliorer les performances du graphène synthétisé. Certaines applications, notamment en micro-électronique, nécessitent en effet une très bonne qualité structurale.[15]

Chapitre V : Le tréfilage

B.V.1. Introduction

De nos jours, le tréfilage reste un procédé très important dans l'industrie. Ce procédé de mise en forme est utilisé pour la fabrication de fils métalliques, il consiste en la diminution du diamètre des fils par une, ou plusieurs passes de réduction jusqu'à l'obtention de la section désirée. Par ailleurs, le tréfilage a été par le passé, et continue d'être le sujet de plusieurs recherches qui ont pour but l'amélioration des caractéristiques mécaniques et électriques des fils[17,18].

Le principe du tréfilage est défini dans l'étymologie du mot, qui fait appel à deux notions : celle de « traction » et celle de « fil ». Il s'agit d'un procédé de transformation à froid consistant à faire passer le métal à travers un orifice calibré, appelé « filière », sous l'action d'une traction continue[19].

B.V.2. Définition

En tant que procédés, le tréfilage et l'étirage sont comparables. Ils consistent à déformer une ébauche au travers d'une filière et font appel au même mode de déformation plastique. Le tréfilage est plus spécifique aux fils, l'étirage aux tubes et aux barres [13,20].

La figure V.1 ci-dessous montre le principe général du fonctionnement du tréfilage.

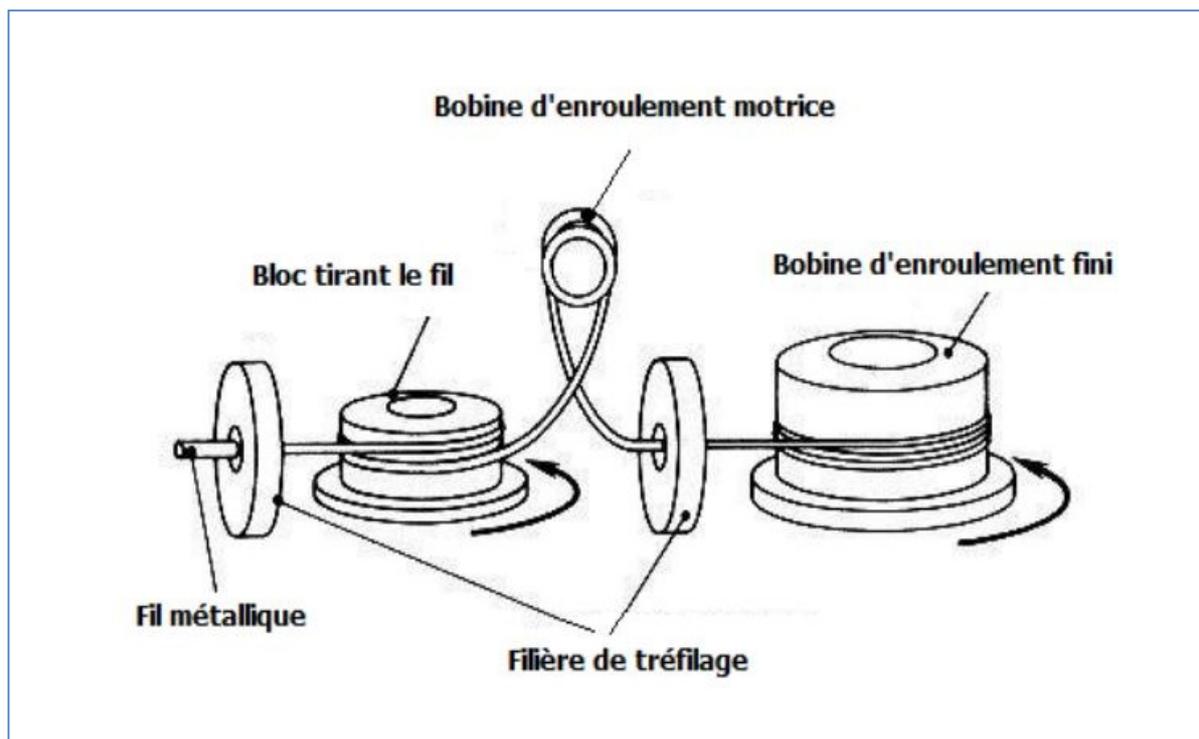


Figure V.1. Principe du tréfilage [3].

Le tréfilage comme l'étirage peuvent avoir plusieurs objectifs :

- réduire à des dimensions plus faibles une ébauche filée ou laminée ; en effet, le filage ou le procédé CLC (Coulée et Laminage Continu) ne permettent pas d'obtenir directement de petits fils, de petites barres ou des tubes à parois minces;
- calibrer des produits filés de manière à réaliser des tolérances dimensionnelles plus étroites que celles possibles par filage;
- augmenter les caractéristiques mécaniques des ébauches obtenues à chaud.

Les demi-produits obtenus par tréfilage sont destinés à des applications électriques et mécaniques. Dans les applications électriques on trouve les câbles nus de transport d'énergie, les câbles isolés de distribution d'énergie ainsi que des câbles souples et de la filerie domestique. Les applications mécaniques regroupent des produits aussi variés que les rivets civils et aéronautiques, les aiguilles à tricoter ou le fil de soudure. La palette des produits y est très large [20].

B.V.3. Fil machine

Le tréfilage utilise comme produit de départ le fil machine qui est défini comme un produit de section pleine, laminé sur un train approprié et enroulé à chaud en couronnes à spires non rangées. La forme de la section peut être circulaire, carrée, hexagonale, octogonale, demi-ronde, rectangulaire ou autre.

La forme la plus couramment utilisée est la forme circulaire dans les diamètres varient entre 5,5 et 30 mm[19].

B.V.4. Les machines et outils utilisés

Dans le présent chapitre, on citera l'ensemble du matériel de tréfilage permettant la transformation du fil machine en fil dit écroui (ou, dans l'ancienne appellation, clair) ; cette transformation nécessite en général trois éléments :

- dispositif de dévidage du fil machine;
- machine à tréfiler;
- dispositif de récupération du fil écroui[19].

B.V.4.1. Machines simples

Qu'elles soient simples ou multiples, les organes principaux des machines de tréfilage 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 ou mandrins** 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 [19].

Pour ce qui est des machines simples, c'est la configuration de base qui ne peut effectuer qu'une seule réduction (35% au maximum). Elle se compose d'un système de dévidage du fil, d'un bloc à tréfiler et d'un dispositif de traction/réception comme schématisée dans la figure V.2 [13].

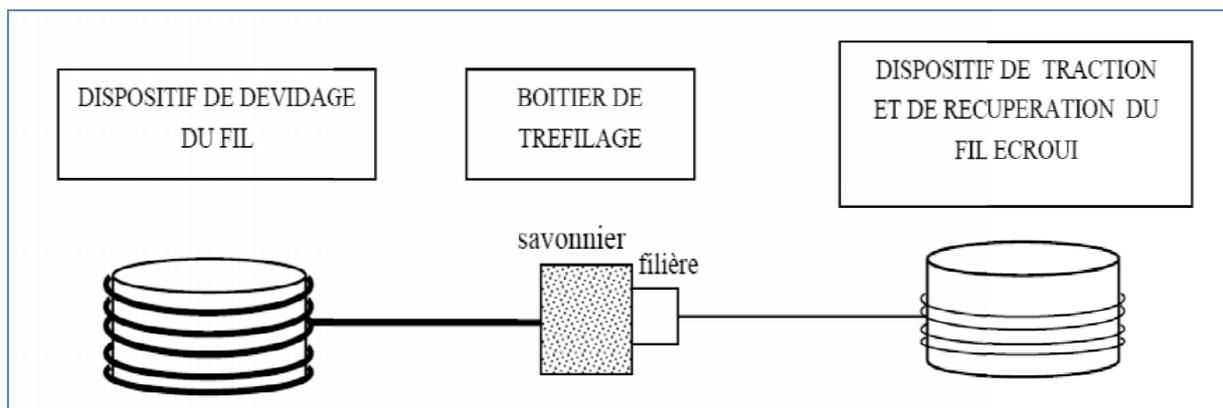


Figure V.2. Schéma du principe d'une machine de tréfilage simple [13].

B.V.4.1.1. Dévidoir

La matière première, c'est-à-dire le fil machine, est présenté sous forme de bobines ou plus rarement de fils enroulés dans des octabins (cartons octogonaux sur palette dans lesquels on enroule les fils avec un diamètre de 1 m) à l'entrée de la ligne d'extrusion. La première fonction des dévidoirs est de permettre une alimentation continue de la ligne en conducteur, fil ou câble. Selon les applications, on utilise des dévidoirs différents (figureV.3).

Dans le cas de la fibre optique ou de fils sensibles mécaniquement, chaque dévidoir est constitué d'un axe perpendiculaire au sens de la ligne sur lequel est fixée une bobine. Le fil étant fragile, l'axe est entraîné en rotation par un moteur (en général à courant alternatif), dont la vitesse est réglée par un pantin pneumatique permettant d'assurer une tension constante.[21]

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

- de faciliter la manutention ;
- d'éviter l'emmêlement des fils et leur rupture ;
- d'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[19].

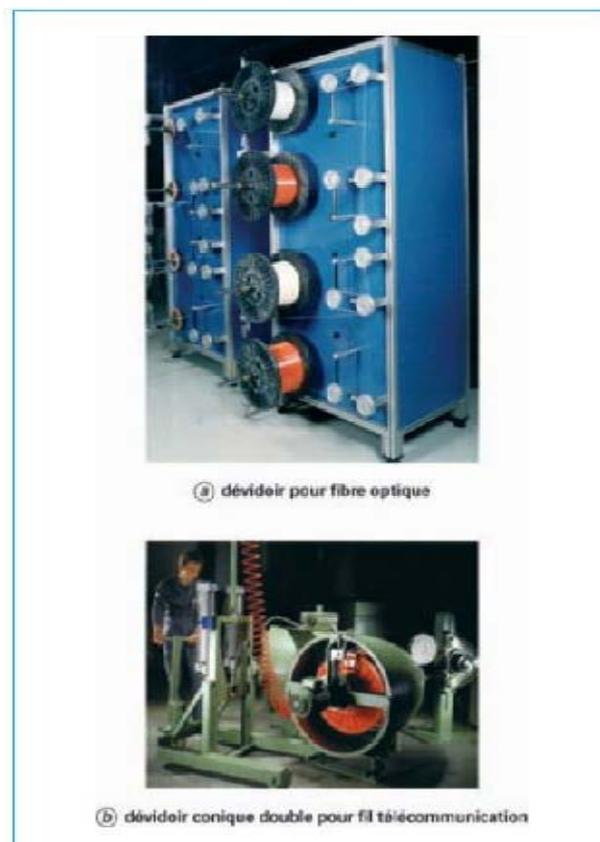


Figure V.3. Dévidoirs [19].

Pour la production de câbles de section plus importante, le dévidoir est parfois conique. La bobine est fixe à l'intérieur d'un cône. Le fil sort de ce cône à la défilée, par son extrémité la plus petite. L'avantage de ce système est la possibilité de production en continu à coût réduit[21].

B.V.4.1.2. Filières

La filière constitue l'élément fondamental de l'opération de tréfilage. La forme qu'il convient de lui donner a fait l'objet de nombreux travaux théoriques ou expérimentaux. Elles sont généralement en carbure de tungstène, tout au moins pour la portée de travail. Elles peuvent aussi être éventuellement en diamant, ou en céramique [20,22].

La surface intérieure des filières (figure V.4) est constituée d'une succession de formes de révolution à génératrices généralement rectilignes :

- le cône d'entrée, qui permet l'entraînement du lubrifiant ayant un angle entre 18° et 20° ;
- le cône de travail D ayant un angle compris entre 6° et 14° ;
- portée cylindrique, dont la longueur est comprise entre $1/3$ et $1/2$ du diamètre à obtenir ;
- cône de sortie ou chanfrein de dégagement [19].

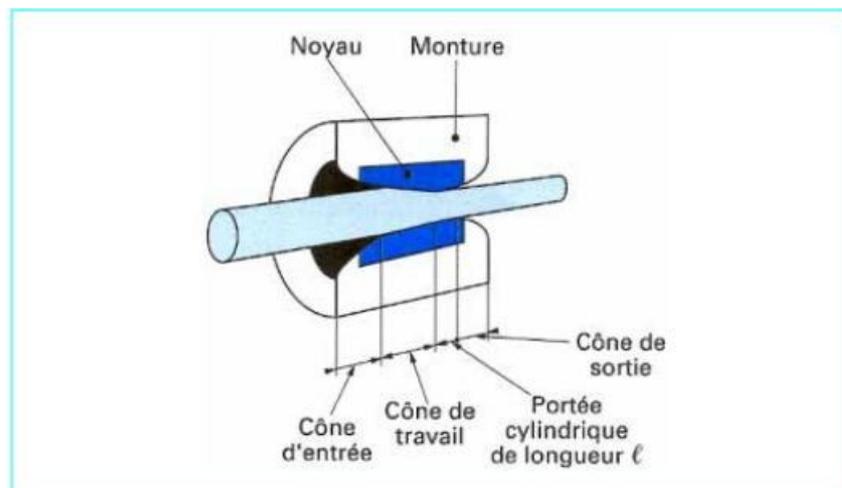


Figure V.4. Profil d'une filière [19].

La forme de la partie active de la filière composée du cône de travail (ou cône d'étirage) peut varier suivant plusieurs facteurs comme la nature et l'état du métal à tréfiler ou le taux de réduction de section [19].

B.V.4.1.3. Mandrins

Ils sont assortis aux filières et au produit à étirer (tableau VII):

- mandrin flottant utilisé essentiellement pour l'étirage des tubes en couronne (figure V.5c);
- mandrin long permettant un taux d'écroissage important, trois fois supérieur à un mandrin court mais nécessitant une opération de dé mandrinage (retrait du mandrin de l'intérieur du tube, qui oblige généralement à gonfler le tube);
- mandrin fixe à longue portée permettant d'obtenir des tolérances dimensionnelles très serrées ;
- mandrin fixe de forme *poire* assurant un aspect de surface intérieur très brillant (figure V.5b) [20].

Tableau VII. Association filière – mandrin [20].

Mandrin	Filière		
	Parabolique	Conique à angle 28°	Conique à angle 10°
Long	Aspect de surface extérieur brillant Écroissage très important		Déconseillé Aspect de surface defectueux
Flottant		Étirage de tubes en couronne	
Fixe à longue portée	Aspect de surface extérieur brillant	Respect des tolérances dimensionnelles serrées	
Fixe de forme poire	Déconseillé Non-respect des tolérances dimensionnelles	Aspect de surface intérieur brillant	
Sans	Déconseillé Destruction de l'aspect de surface intérieur	Déconseillé Destruction de l'aspect de surface intérieur	Réduction des diamètres sans réduction d'épaisseur

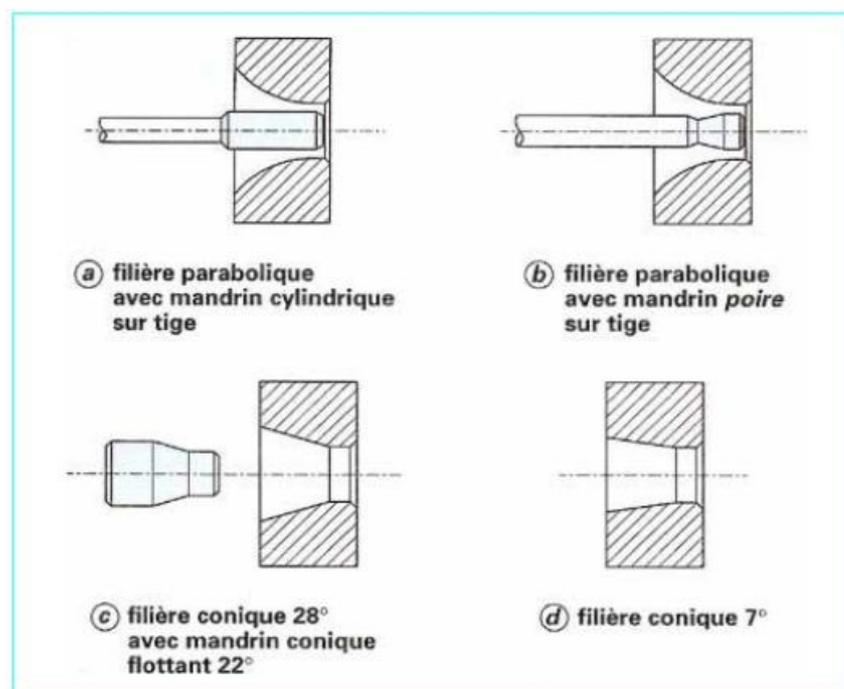


Figure V.5. Outillage pour tréfilage [20].

Il est également possible d'étirer sans mandrin, c'est-à-dire à creux, ce qui permet de réduire le diamètre sans trop changer l'épaisseur, mais cela au détriment de la surface intérieure qui a une tendance à plisser longitudinalement.

Il est possible aussi d'étirer avec deux filières, la première filière étirant à creux. Cette technique permet d'obtenir en une seule passe un très bel aspect de surface extérieur et un respect des tolérances serrées. Il faut cependant s'assurer du parfait alignement des deux filières [20].

B.V.4.1.4. Lubrifiants

L'utilisation d'un lubrifiant est capitale au cours du procédé pour limiter le frottement et l'usure. Son rôle est de diminuer les forces d'étirage, d'éviter les échauffements excessifs aux grandes vitesses, et d'améliorer ainsi la durée de vie des outils et du fil [22].

En général, pour les gros et moyens diamètres, ce sont des savons qui sont utilisés (tréfilage à sec) : il s'agit de corps pulvérulents composés d'une matière grasse (sel métalliques d'acides gras) et de charges minérales. Le rôle de ces lubrifiants est de former un film suffisamment épais sur le fil de manière à éviter toute interaction entre le métal et la filière qui pourrait conduire à une dégradation de l'état de surface. Ils permettent ainsi des réductions successives [23].

B.V.4.2. Machines multiples

Sur ces machines, des réductions de section importantes sont obtenues par des réductions successives effectuées sur le même appareil.

Dans ce cas, le fil passe d'une bobine à une autre en traversant une filière, et il subit à chaque fois une réduction de section et un accroissement de vitesse (loi de conservation du débit de matière).

On distingue trois types de machines multiples.

- **Machines continues** ou à passage direct (figure V.6) dans lesquelles les vitesses des bobines sont automatiquement équilibrées de façon que chacune débite la quantité de fil nécessaire à la suivante. Chaque bobine se comporte comme une bobine simple sans qu'il y ait glissement du fil par rapport à la bobine. Sur chacune, un certain nombre de tours de fil est empilé à l'enfilage, ce qui permet le refroidissement du fil entre chaque passe [19].

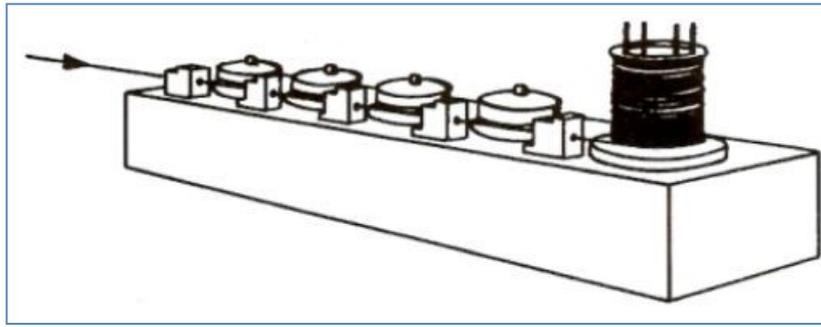


Figure V.6. Machine multiple continue [19].

- **Machines à accumulation** (figure V.7) : dans ces machines, il n'y a pas d'équilibrage automatique des vitesses. Les séries de filières, ou passes, sont calculées pour que chaque filière débite plus de fil que ce qui est nécessaire à la suivante, d'où une accumulation du fil sur chaque bobine. Cette accumulation de fils permet :

- de refroidir le fil ;
- de ne pas interrompre la production des bobines aval dans le cas d'un arrêt des bobines amont.

Le dispositif classique provoquant une torsion du fil au cours de son dévidage de la bobine amont (figure V.8a), des modifications ont été apportées pour obtenir un dévidage sans torsion (figure V.8b) qui a, par ailleurs, l'avantage d'augmenter la quantité de fil accumulée et donc d'accroître la possibilité de refroidissement [19].

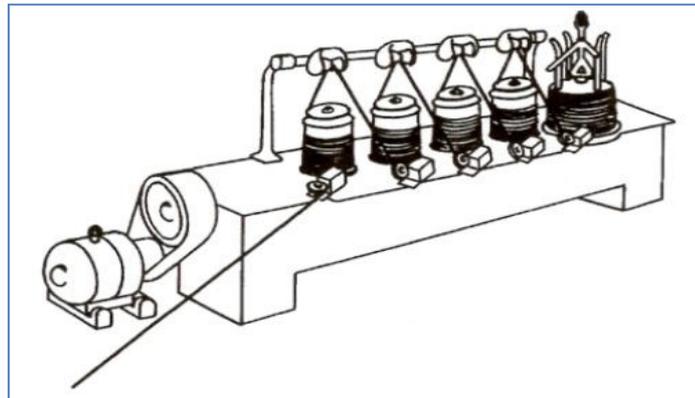


Figure V.7. Machine multiple à accumulation [19].

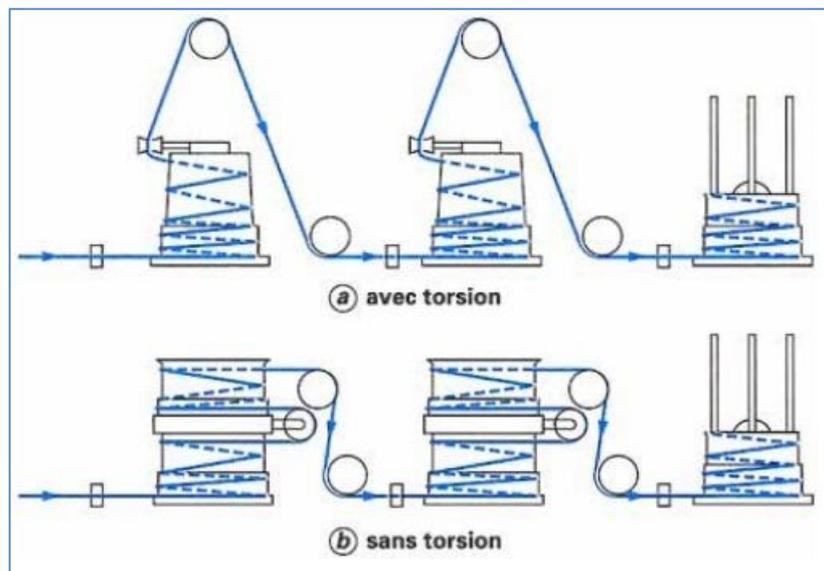


Figure V.8. Dispositif d'accumulation du fil [19].

- **Machines à glissement** (figure V.9) : dans ces machines, il n'y a ni équilibrage des vitesses entre les passes ni accumulation. Pour compenser les différences de vitesses, il y a un léger glissement du fil sur les bobines. Ce type de machine est surtout utilisé pour les tréfilages dits humides ou immergés (de fils fins $\varnothing < 1 \text{ mm}$) l'ensemble bobine et filière étant arrosé ou immergé dans le liquide lubrifiant qui joue le rôle d'élément de refroidissement du fil [19].

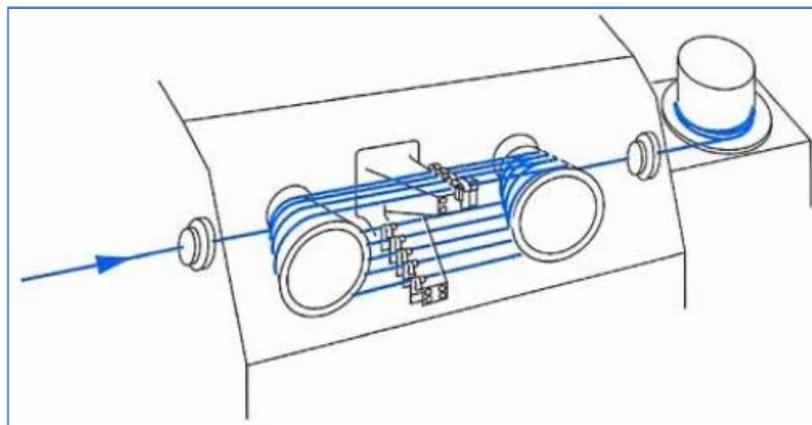


Figure V.9. Machine multiple à glissement (à cône) [19].

B.V.5. Paramètres du tréfilage

L'identification et l'analyse des principaux facteurs intervenant lors du tréfilage sont nécessaires si l'on veut optimiser l'opération du tréfilage. Ces paramètres influent surtout sur le phénomène d'usure des filières [24].

B.V.5.1. Vitesse de déformation

Les vitesses de déformation du métal dépendent essentiellement de la vitesse d'entrée du fil dans la filière, du taux de réduction et de l'angle de la filière. Ces vitesses varient de quelques dizaines de s^{-1} à plusieurs centaines de s^{-1} . En partant du modèle de borne supérieure d'Avitzur on peut obtenir une expression approchée de la vitesse de déformation au point de contact du fil avec la filière en fin de la zone de travail ; qui est donnée par la relation (4) [25]:

$$\dot{\epsilon} \approx 2 V_e \frac{r_e^2}{r_s^3} \sin \alpha$$

Les paramètres de l'équation (4) sont définis sur la figure V.10

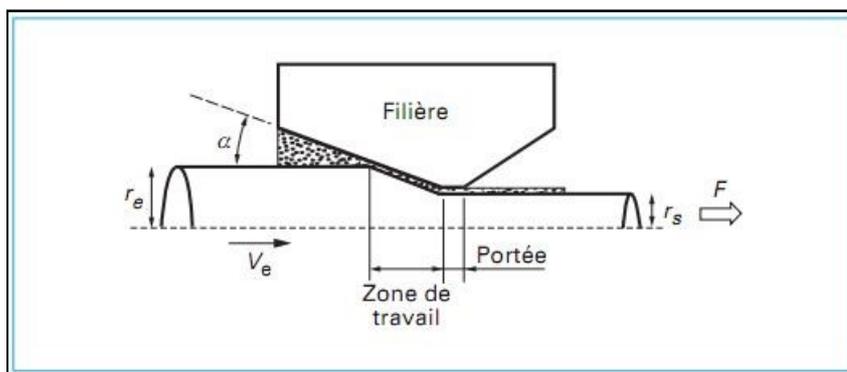


Figure V.10. Passage d'un fil dans une filière [25].

B.V.5.2. Force de tréfilage

Le fil est tiré au travers de la filière par une force de traction. L'écoulement plastique du métal est rendu possible par l'action combinée de la traction axiale et de la compression radiale imposée par la filière. A l'interface fil-filière, s'exerce en plus de la pression latérale imposée par la filière, un cisaillement fonction des conditions de frottement. La force nécessaire pour tréfiler le fil est donc la somme de la force nécessaire pour déformer plastiquement le fil et de la force nécessaire pour vaincre le frottement [22].

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 interne dues à l'inclinaison provisoire des fibres du métal lors de son passage à travers la filière.

Le contact lubrifié fil-filière, se traduit par un cisaillement, représenté par un coefficient de frottement (μ). Le fil est caractérisé, par sa contrainte d'écoulement plastique (σ_0) et les diamètres d'entrée (D_0) et de sortie (D_1). Différents modèles ont été proposés pour évaluer l'effort de tréfilage à appliquer (F), pour tirer le fil à travers la filière. Les modèles de Siebel et Bonzel (équation (5)), donnent la contrainte de tréfilage (σ) en fonction de la déformation appliquée ε [26].

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{3}{4} \frac{\alpha}{\varepsilon} \right) \quad \text{avec} \quad \varepsilon = \ln(D_0/D_1)^2 \quad (5)$$

La figure V.11 ci-dessous montre les forces en présence pendant le tréfilage.

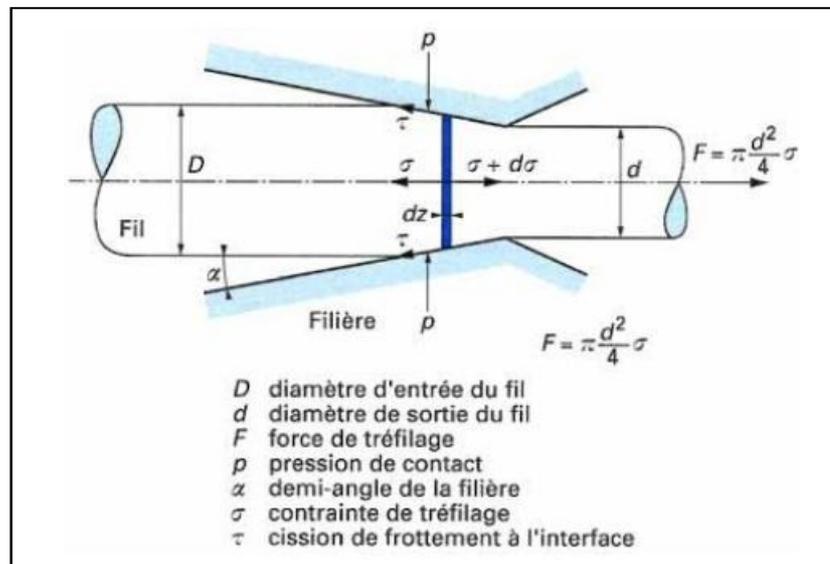


Figure V.11. Décomposition des forces au cours de l'écoulement en filière [26].

La force de tréfilage F est obtenue par multiplication de σ par l'aire de la section finale du fil S (équation (6)) [26].

$$\mathbf{F = s \sigma(6)}$$

La formule permet d'estimer la force et la puissance de tréfilage, si l'on se donne la vitesse de tréfilage, et ainsi la conception des tréfileuses [19].

B.V.5.3. Frottements

Contrairement à d'autres procédés où il est moteur, le frottement est un phénomène qui gêne le procédé du tréfilage. Il génère une augmentation de la force de tréfilage et de la température au cours de l'opération et peut causer plusieurs défauts comme les rayures sur les fils et il est aussi responsable en partie de l'usure de la filière. Pour le minimiser il faut faire un ajustement optimal des paramètres de tréfilage (réduction du fil, angle de filière, et/ou une bonne utilisation des lubrifiants)[23].

Le frottement peut être estimé de manière expérimentale, lors d'essais de tréfilage, par mesures directe ou indirecte:

- la mesure directe consiste à mesurer la force axiale et la force normale de tréfilage. Néanmoins cette méthode nécessite d'avoir un matériel de tréfilage moderne et sophistiqué. La technique la plus connue est le "split-die", développée par Mc Lellan en 1952-53 puis améliorée par Wistreich qui consiste à utiliser une filière coupée en deux et à mesurer conjointement la force qui tend à séparer les deux parties ainsi que la force axiale lors du tréfilage,
- la mesure indirecte consiste à mesurer la force axiale de tréfilage et à calculer le coefficient de frottement grâce à un modèle mécanique et à la connaissance de la contrainte d'écoulement du fil. Ce type de calcul peut toutefois être entaché d'erreurs qui découlent d'une connaissance qu'approchée de la contrainte d'écoulement ou d'hypothèses plus ou moins discutables sur le frottement et le travail redondant. Cette approche fournit quoi qu'il en soit de bonnes estimations[23].

B.V.5.4. Echauffement du fil

L'énergie de tréfilage est dissipée et chauffe fil et filière. Aux vitesses pratiques, l'opération peut, avec une très bonne approximation, être considérée comme adiabatique et, à la sortie de la filière, l'échauffement $\Delta\theta$ du fil s'uniformise rapidement à une valeur donnée par la formule (7) suivante[19].

$$(7) \quad \Delta\theta \approx \frac{F_u}{\rho c}$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fil;
- c : capacité calorifique massique fil.

Pour certains matériaux, les températures des fils peuvent être élevées, par exemple pour les aciers à 0.8% de carbone, après une réduction de 95%, le fil atteint une température de 310°C. Il s'agit là d'un échauffement élevé, c'est pour ça que pour certains matériaux, il est important d'avoir un système de refroidissements entre les passes pour éviter une dégradation, ou une modification de la structure des fils pendant le tréfilage[19].

B.V.6. Ecouissage et conséquences sur les caractéristiques des fils

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. [19]

En règle générale, on entend par degré d'écouissage ou taux d'écouissage la réduction de section relative. Les équations (8,9 et 10) suivantes sont les règles générales utilisées au tréfilage.

- L'allongement A(%) : $A(\%) = (L_{i+1}-L_i)/L_i$ (8)

Où, L_i est la longueur initiale du fil.

Et L_{i+1} la longueur du fil à la sortie de la filière.

- Le coefficient d'allongement μ : $\mu = L_{i+1}/L_i$ (9)

- La taux de déformation ε : $\varepsilon = \ln L_{i+1}/L_i$ [3]. (10)

Au fur et à mesure que le fil s'écrouit, une variation des caractéristiques est constatée :

- 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.
- 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 [26].

Partie C : **Etude Expérimental**

Chapitre I : Techniques expérimentales

C.I.1. Caractérisation du fil machine et fil finie

Le fil machine est importé par CATEL sous forme de bottes de cuivre a l de 22mm de diamètre pour ce qui concerne le fil de contact caténaire (figure VI.1). Le fil fini et entreposer dans le dépôt après usinage.



Figure VI.1. Bottes de fil machine et fini stockées dans le parc de CATEL.

C.I.1.1. Composition chimique du fil machine

La composition chimique du cuivre est donnée par le fournisseur, ce cuivre est pur à 99.96%. Le tableau VIII ci-dessous donne la composition chimique du cuivre fournie par le fournisseur UNITEDMETALS.

Tableau VIII. Composition chimique du cuivre donnée par UNITED METALS en %massique.

	Ag	As	Bi	Cd	Co	Cr	Fe	Mn	Ni
%	0.0025	0.0005	0.0002	-	-	-	0.001	-	-
	O	P	Pb	S	Sb	Se	Si	Sn	Te
%	0.04	-	0.0005	0.0015	0.0001	0.0002	-	-	0.0002

$\%As + \%Cd + \%Mn + \%P + \%Sb$ ne doit pas excéder 0.0015%

$\%Bi + \%Se + \%Te$ ne doit pas excéder 0.003%

$\%Co + \%Fe + \%Ni + \%Si$ ne doit pas excéder 0.002%.

C.I.1.2. Méthode d'échantillonnage

Avant de parler du tréfilage, des échantillons de cuivre issus des bottes stockées dans le parc sont envoyés au laboratoire de l'usine pour subir des essais mécaniques et électriques afin de vérifier l'allongement (essai de traction), la résistance au pli (essai de pliage), mais aussi la résistance électrique (essai de résistance). La méthode d'échantillonnage ainsi que les intervalles englobant les valeurs minimales et maximales de l'allongement et de la résistance électrique du fil machine sont données par la norme NF EN 1977 pour le fil machine et par la norme NF EN 50149 pour le fil fini (fil de contact). Pour la norme NF EN 1977 le nombre d'échantillons à prélever correspond à 10% des bottes présentes dans le parc. De ce fait, un échantillon pour 10 bottes a été prélevé. Pour la norme NF EN 50149 il est préférable de prendre un échantillon par botte fini en début de production et une fois lancer passer a une production a grande échelle réduire a un échantillon sur 5 bottes .

Le jour où on a procédé à l'échantillonnage, on a compté aucune bote machine que quelque chute et 3 bottes de fil fini 107 mm² et 3 bottes de fil fini 150 mm². Un prélèvement de 3 échantillons de 1,80 m de longueur a été effectué sur chaque botte de fil fini et quelque morceau du fil machine. Ainsi pouvoir aisément réaliser nos essais de traction et de résistance électrique et de pliage sur les fil fini .

Pour la partie CVD et alliage ou composite au graphène ,les échantillons sont fictif et les essais c'effectueront par logiciel de simulation (SolidWorks) en vue de l'indisponibilité de la technologie.

C.I.1.3. Mesure du diamètre

Après avoir prélevé des échantillons sur chaque type de bottes, et avant de commencer à faire les essais mécaniques et électriques, on a procédé à la vérification du diamètre des échantillons car l'écart acceptable sur le diamètre du fil machine ne doit pas dépasser les 0,6mm et ceci selon la norme NF EN 1977 ($d = 8 \pm 0,6\text{mm}$). En revanche le fil fini ne doit pas dépasser les 0,4 mm selon la norme NF EN 1977 ($d = 8 \pm 0,4\text{mm}$) et respecter une certaine géométrie et dimension selon la norme NF EN 50149 (figure VI.2).

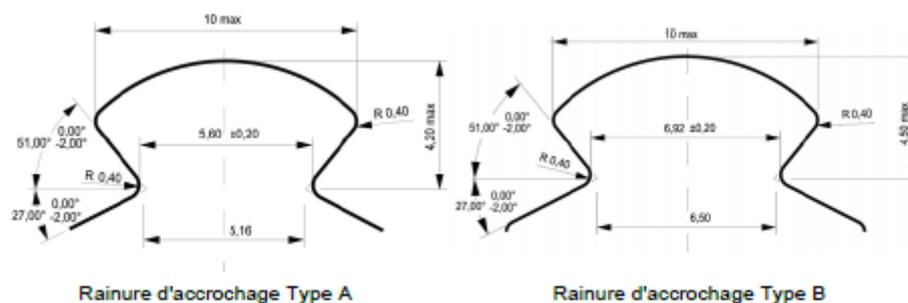


Figure VI.2. Bottes de fil machine stockées dans le parc de CATEL.

On a procédé à la mesure du diamètre de trois manières différentes : a- Expérimentalement à l'aide d'un Palmer (figure VI.3) :

On prend 3 points du barreau, sur chaque point on mesure le diamètre sur 2 endroits différents puis on calcule la moyenne, le diamètre obtenu et le diamètre moyen du barreau de cuivre. A noter que cette méthode est dédiée au fil de section uniforme dans notre cas il s'agit du fil machine.



Figure VI.3. Palmer utilisé pour la mesure du diamètre.

b- Théoriquement en calculant le poids métrique des échantillons :

Le poids métrique M/L est obtenu en pesant un barreau de cuivre de 1m avec une balance électronique (figure VI.4).

$$M = \rho \cdot V \text{ donc } V = M / \rho \text{ et } V = S \cdot L = \pi \cdot D^2 \cdot L / 4 \text{ donc } M = \rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot L / 4 \text{ } D = (4 \cdot M / \rho \cdot \pi \cdot L)^{1/2}$$

Où :

ρ est la masse volumique théorique du cuivre donnée par la norme IACS.



Figure VI.4. Balance pour le calcul de la masse métrique.

c-Expérimentalement à l'aide d'un projecteur de profil :

Cette méthode est de loin la plus efficace et précise dans notre cas, pour ce qui s'agit de la géométrie du fil de contact. Cette opération nécessite l'obtention d'une section de largeur de 1

mm qu'on obtiens a l'aide d'un micro tour (figure VI.5) . par la suite en place les échantillons dans le projecteur a profil (figure VI.6) et en obtiens directement les dimension de celle si.



Figure VI.5. Micro tour



Figure VI.6. Projecteur de profile numérique

C.I.2. Processus CATEL

C.I.2.1. Tréfilage

Le tréfilage est une opération qui consiste en la diminution de la section et donc du diamètre en déformant le fil machine au travers de plusieurs filières jusqu'à obtention du diamètre désiré (figure VI.7). Avant d'obtenir le fil de cuivre de diamètre désiré (ou exigé par la commande) le fil machine passe par plusieurs étapes (figure VI.8):.

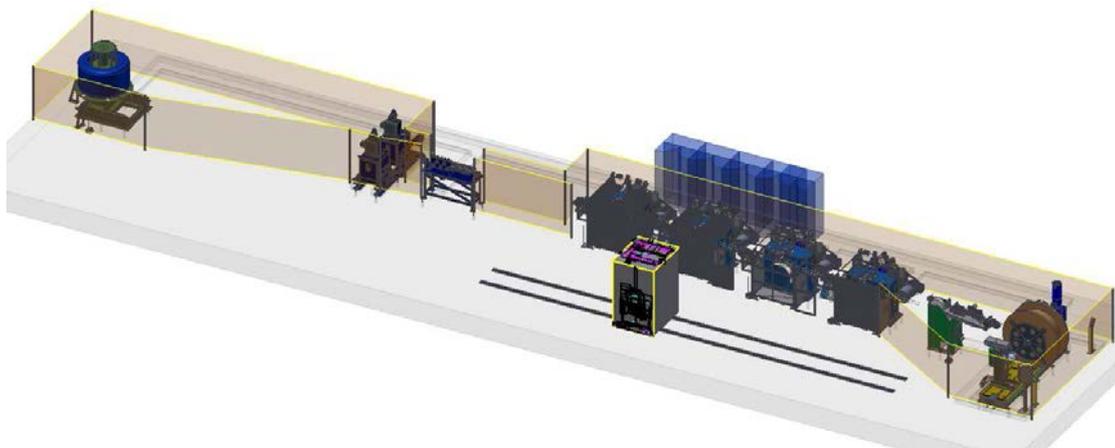


Figure VI.7. Block de tréfilage du fil de contact caténaire

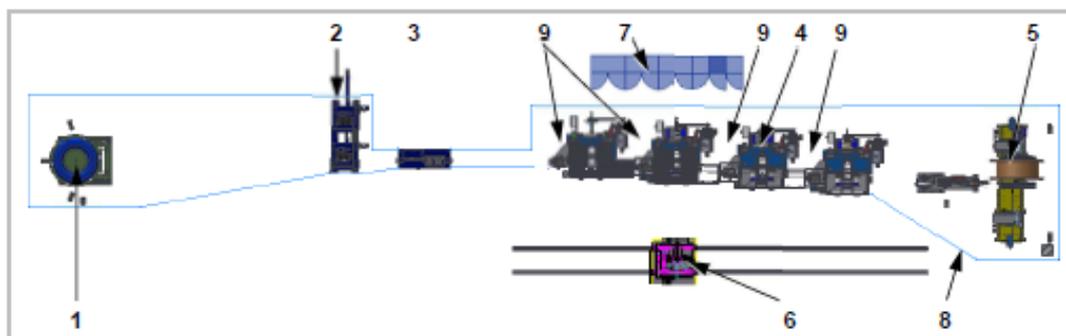


Figure VI.8. Vue d'ensemble (vue de dessus).

1 – Dérouleur dynamique de couronnes ABV-Ta
2 – Dispositif d'avance du fil (entraîneur)
3 – Dresserie
4 – Tréfileuse 4 passes à cabestans horizontaux
ZH 35/4

5 – Bobinoir SH-TR 2000 ST
6 – Appointeuse Type DWU-3D
7 – Armoire électrique
8 – Grillages de protection
9 – Réservoir d'huile de tréfilage

C.I.2.1.1. Dérouleur dynamique de couronnes ABV-Ta

Le fil machine, est présenté sous forme de bottes à qu'o dispose à l'aide d'une grue élévatrice. La première fonction du dérouleur est de permettre une alimentation continue de la ligne de production en fil machine. Il est munit d'un frein et d'un tableau

de bord pour paramétré la vitesse de déroulement, de débit et un boutons d'arrêt d'urgence (figure VI.9) .

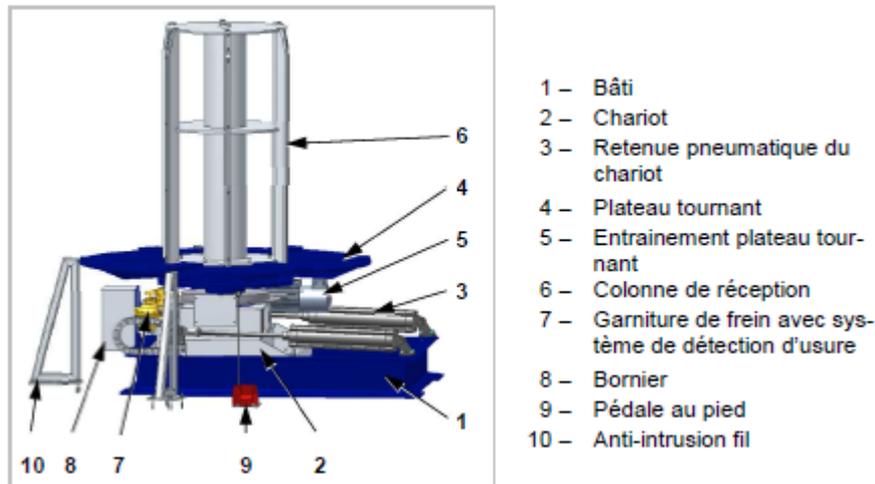


Figure VI.9. Structure du dérouleur dynamique de couronnes ABV-Ta.

C.I.2.1.2. Dispositif d'avance du fil (entraîneur)

Le dispositif d'avance du fil ou l'entraîneur (figure VI.10) a pour objectif d'entraîner le fil dérouler vers la suite du processus et il est mis sur des rails. Le système de rails est à intégrer à la fondation perpendiculairement à la trajectoire du fil de manière à ce que l'on puisse reculer le dispositif d'avance hors de la trajectoire du fil dès qu'on en n'a plus besoin, une fois l'enfilage terminé. La position de travail du dispositif d'avance du fil est verrouillée mécaniquement.

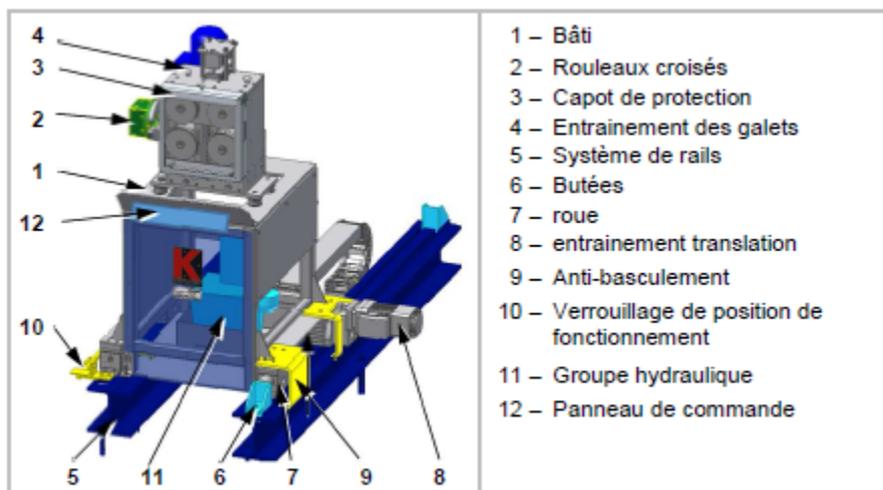


Figure VI.10. Structure du dispositif d'avance du fil.

C.I.2.1.3. Dispositif de dressage

Le dispositif de dressage est installé entre le dispositif d'avance du fil et l'entrée de la tréfileuse et permet d'alimenter la tréfileuse avec un fil redressé pour éviter des emmêlements (figure VI.11). L'opérateur fait passer le fil à la main entre les galets en crois, entre les galets de dressage des deux dresserie et entre les galets en crois de sortie.

Le redressage du fil est effectué grâce aux déformations élastiques-plastiques alternées qui se produisent entre les galets. Les déformations alternées doivent avoir une amplitude déterminée pour obtenir une courbure résiduelle du fil aussi petite que possible.



Figure VI.11. Structure du dispositif de dressage.

C.I.2.1.4. Jeu de filières

La filière est l'élément fondamental du tréfilage, elle est faite de sorte que la section de sortie soit inférieure à la section d'entrée, mais à un taux de réduction calculé de sorte que le fil en cuivre ne soit pas soumis à une contrainte supérieure à sa résistance à la rupture, donc il faut que le fil passe par l'œillet mais ne casse pas en aval, les tableaux IX et X ci-dessous donnent des exemples sur les jeux de filières à utiliser pour l'obtention de 2 diamètres différents :

Tableau IX. Diamètre 20,00 mm à 11,762 mm (107 mm²) à 48 m/min.

Zug Nr.	d [mm]	QV [%]	DV [%]	kf [MPa]	v [m/s]	F [N]	Pzieh [kW]	Tr-d [mm]	Tr-n [1/min]	i	Mot-N [1/min]	Nnenn [1/min]	Mot-P [kW]	Mot-M [Nm]
E	20.000			180	0.27									
01	16.985	27.88	38.66	346	0.38	32510	12.27	1000	7	200.00000	1443	1500	15.01	95.62
02	14.703	25.06	33.44	382	0.50	29760	14.99	800	12	120.00000	1444	1500	18.32	116.71
03	12.975	22.13	28.41	412	0.65	21911	14.18	800	15	100.00000	1545	1500	16.68	103.11
04	11.672	19.08	23.58	432	0.80	15955	12.76	800	19	80.00000	1528	1500	15.01	93.85

Tableau X. Diamètre 22,00 mm à 13,820 mm (150 mm²) à 48 m/min

Zug Nr.	d [mm]	QV [%]	DV [%]	kf [MPa]	v [m/s]	F [N]	Pzieh [kW]	Tr-d [mm]	Tr-n [1/min]	i	Mot-N [1/min]	Nnenn [1/min]	Mot-P [kW]	Mot-M [Nm]
E	22.000			180	0.32									
01	19.086	24.74	32.87	339	0.42	35270	14.79	1000	8	200.00000	1602	1500	17.39	103.74
02	16.845	22.10	28.37	373	0.54	33098	17.81	800	13	120.00000	1543	1500	20.95	129.79
03	15.127	19.36	24.01	395	0.67	24809	16.56	800	16	100.00000	1594	1500	19.48	116.75
04	13.820	16.53	19.81	421	0.80	18481	14.78	800	19	80.00000	1528	1500	17.38	108.71

Le passage du fil par la première filière se fait manuellement via une appointeuse type DWU-3D (figure VI.12), le bout du fil est ravaudé en pointe, puis on le fait passer manuellement par la première filière.



Figure VI.12. appointeuse type DWU-3D.

C.I.2.1.5. Tréfileuse 4 passes à cabestans horizontaux ZH 35/4

La tréfileuse horizontale à 4 passes ZH 35/4 (figure VI.13) est constituée de 4 blocs de tréfilage de conception identique pour assurer une ligne de fil rectiligne, les blocs sont décalés entre eux en fonction de la largeur d'accumulation du fil sur le cabestan. Le fil entre à chaque bloc par le porte-filière (figure VI.14) avec boîte à savon intégrée. Le porte-filière est orientable dans le plan horizontal et dans le plan vertical pour permettre d'ajuster la trajectoire du fil entre filière et cabestan (figure VI.15). La boîte à savon est conçue pour tréfilage à sec ou par voie humide. La filière est refroidie à l'eau.

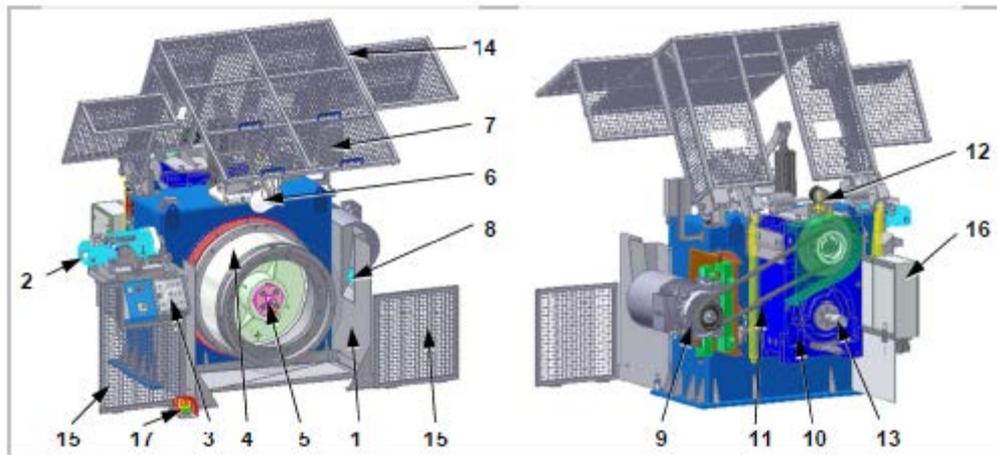


Figure VI.13. Structure d'un bloc de tréfilage.

- | | |
|-------------------------------|---------------------------------|
| 1 – bâti | 10 – réducteur |
| 2 – porte-filière | 11 – transmission par courroies |
| 3 – tableau de commande local | 12 – frein à disque |
| 4 – cabestan | 13 – refroidissement cabestan |
| 5 – arbre principal | 14 – capot de protection |
| 6 – galet de précision | 15 – grille de protection |
| 7 – ampèremètre | 16 – bornier |
| 8 – détection casse-fil | 17 – pédale au pied |
| 9 – moteur d'entraînement | |

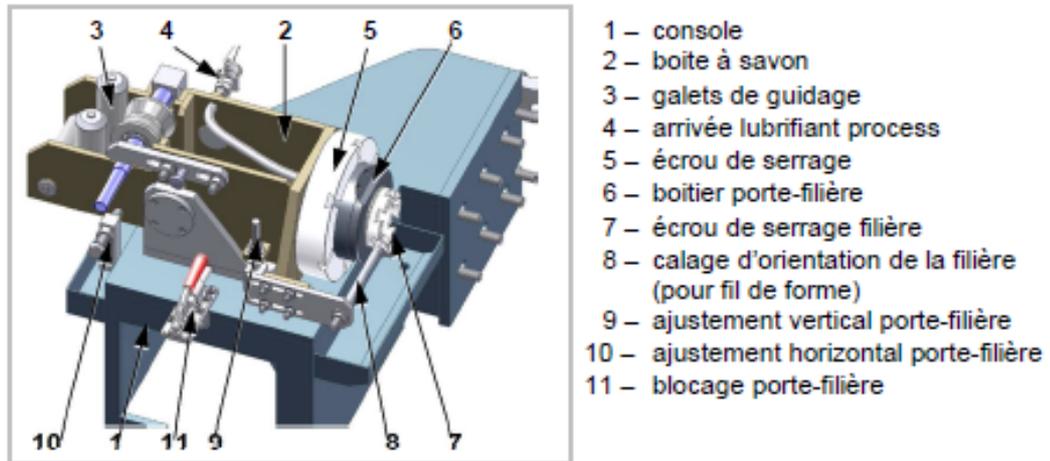


Figure VI.14. Structure du porte-filière

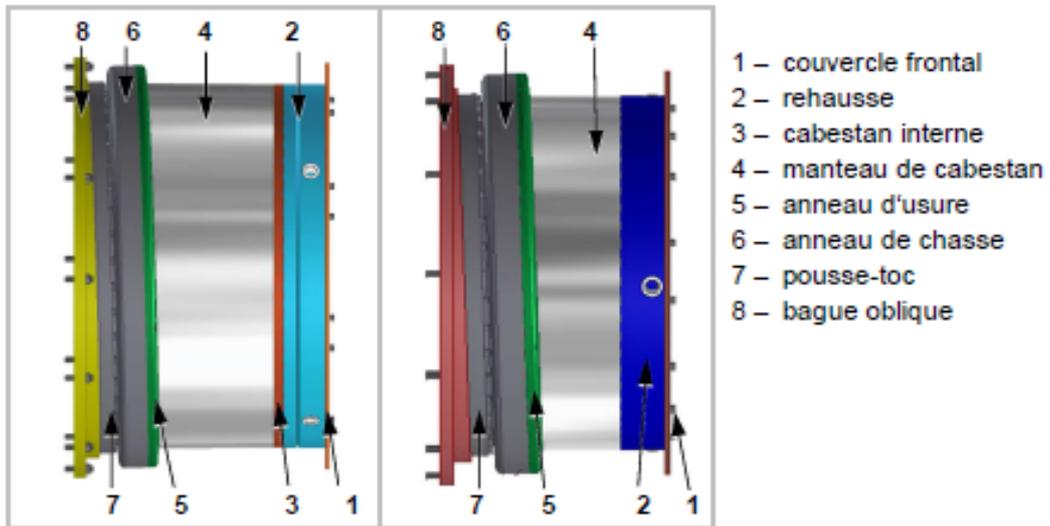


Figure VI.15. Structure du Cabestan

C.I.2.1.6. Lubrification et refroidissement

La lubrification come le refroidissement sont des opérations très importantes lors du tréfilage, il ne faut surtout pas les négliger du fait qu'elles diminuent les frottements et limite l'usure des filières, ceci en diminuant les forces d'étirage mais aussi en évitant l'échauffement excessif aux grandes vitesses (ce qui est notre cas).

On peut assurer que sans lubrification et refroidissement, le fil cassera, il s'échauffera de plus en plus, les filières s'useront beaucoup plus vite, ce qui causera des pertes énormes pour l'entreprise de même pour les cabestans qui font un travail de charge énorme et qui sont très couteuse au remplacement.

L'approvisionnement en eau de refroidissement et en lubrifiant pour cabestans et pour filières se fait à partir de la centrale de l'exploitant. La quantité d'eau nécessaire dépend des conditions technologiques de tréfilage mises en œuvre. Le débit d'eau de refroidissement peut être ajusté individuellement à chaque bloc de tréfilage

C.I.2.1.7. Bobinoir horizontal auto-trancannant SH-TR 2000 ST

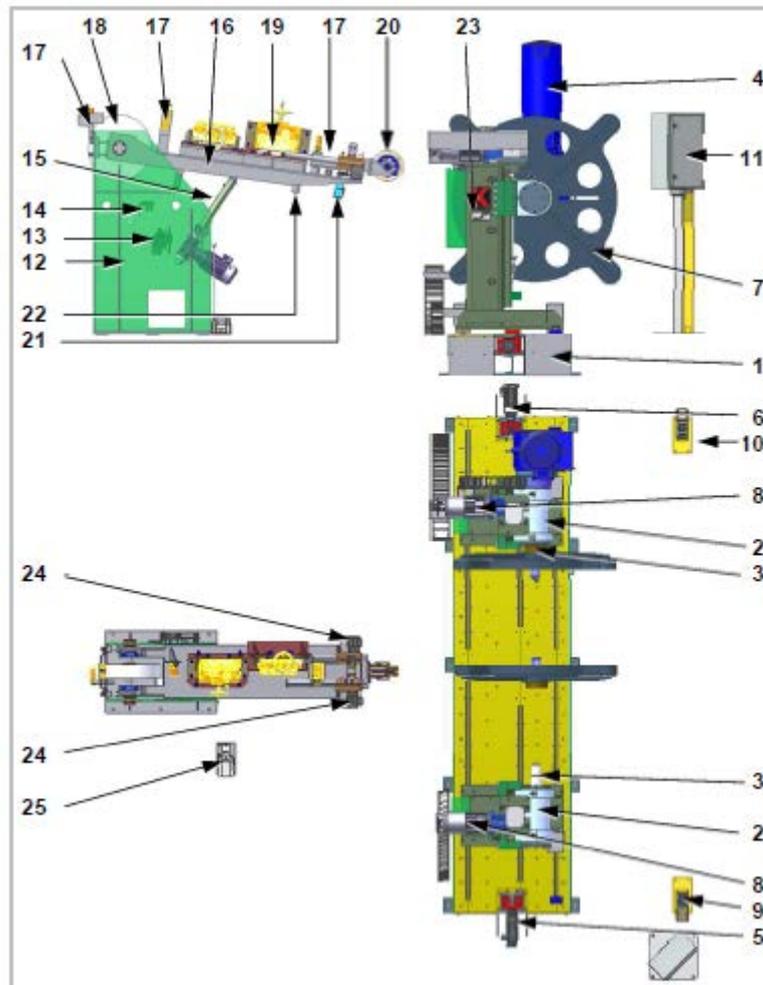


Figure VI.16. Structure du bobinoir horizontal auto-trancannant SH-TR 2000 ST

- | | |
|--|--|
| 1 – Base de bobinoir | 13 – Unité de maintenance pneuma. |
| 2 – Broche | 14 – Tableau cde. table de dressage |
| 3 – Pièce réception touret | 15 – Vis course de table de dressage |
| 4 – Entraînement principal | 16 – Table de dressage |
| 5 – Entraînement translation gauche | 17 – Galets de guidage |
| 6 – Entraînement translation droit | 18 – Galet de déviation |
| 7 – Flasque support pour touret en bois | 19 – Dresserie dans les deux plans |
| 8 – Entraînement broche de levage
(chariot vertical relever/abaisser) | 20 – Galet de calage |
| 9 – Tableau commande local gauche | 21 – Détection flasque |
| 10 – Tableau commande local droit | 22 – Guidage fil avec codeur angulaire |
| 11 – Pupitre de commande bobinoir | 23 – Bornier |
| 12 – Socle de table de dressage | 24 – Vérin pneumatique de calage |
| | 25 – Pédale au pied |

Le dispositif de bobinage se compose d'une table de dressage fixe et d'un bobinoir auto-trancannant (figure VI.16). La table de dressage permet de redresser le fil une fois tréfiler pour rendre la tache du bobinoir plus facile . Le bobinoir auto-trancannant permet d'embobiner le fil une fois redresser après tréfilage dans des bobine en bois , le bobinage doit se faire d'une manière très surveiller pour ne pas endommager le fil fini.

C.I.2.1.8. Dispositifs de protection

La ligne de tréfilage est protégée par une enceinte grillagée(figure VI.17) avec portes d'accès sécurisé (fournies par le client). Le dispositif d'entrainement dispose d'un capot de protection qui peut être électro mécaniquement verrouillé .Les blocs de tréfilage sont protégés par des protections rabattables individuelles avec verrouillage pneumatique surveillé électriquement .Dès qu'un moteur sur la machine fonctionne, les capots sont verrouillés automatiquement .Si tous les capots de protection ne sont pas fermés et verrouillés, la ligne de tréfilage ne peut pas démarrer. L'ouverture de capots de protection pendant la production est impossible.

A l'arrêt de la machine, les capots sont déverrouillés automatiquement



Figure VI.17. dispositif de d'enclos de protection des tréfileuses

C.I.3. Les essais mécaniques et électriques

C.I.3.1. L'essai de résistance

L'essai de résistance se fait via une machine appelée « pont de résistance » (figure VI.18), l'éprouvette de l'essai de résistance doit avoir une longueur supérieure à celle du pont, de sorte que le barreau (fil) puisse être fixé entre les deux extrémités du pont, un courant est envoyé à travers le fil, et la machine mesure la résistance électrique. La partie du barreau dans laquelle le courant passe est de 1m, la résistance est donc donnée en $m\Omega / km$.



Figure VI.18. Pont de résistance.

Avant de commencer l'essai, l'opérateur doit insérer une valeur de la résistance donnée par la norme NF EN 50149. Cette valeur est caractéristique à chaque diamètre du fil. La machine, en fonction de cette valeur et de la valeur calculée, nous donne la qualité du cuivre utilisé. Dans notre cas le cuivre est de qualité supérieure.

A la fin de l'essai, on peut imprimer le PV de ce dernier par le biais d'une petite imprimante reliée au pont de résistance, il est sous forme d'une petite étiquette (figure VI.21) contenant les informations suivantes :

- L'identifiant (introduit par l'opérateur) : c'est le nom que donne l'opérateur à l'échantillon.
- La date de l'essai.
- La valeur de la résistance donnée par la norme (introduite par l'opérateur).
- La résistance mesurée.
- La température à laquelle l'essai a été effectué.
- L'heure à laquelle l'essai a été réalisé.
- L'écart entre la résistance mesurée est celle spécifiée par la norme.
- La durée de l'essai.

La figure VI.19 ci-dessous montre le PV d'essai de résistance d'un fil de contact de 150mm² de sections.

CATEL SPA		ResTest 1	
Linear Resistance Bridge			
ID	150mm ²	SN	17101#06450
Date	09/04/2018	Heure	12:52:43
α CU	0.393 %/°C	ØN1	20 °C
R _N	122 mΩ/km	Ecart	-5.97 %
R _{mes}	114.72 mΩ/km	Durée	00:00:49 / 5
T _{mes}	+21.25 °C		
Statut mes. : Conforme mais hors tolérance			

Figure VI.19. PV d'essai de résistance sur un fil de cuivre de 150mm² de sections.

C.I.3.2. L'essai de traction

L'essai de traction a une grande importance dans les essais mécaniques. Un fil de contact travaille à la traction quand il est soumis à l'action de deux forces égales et directement opposées qui tendent à l'allonger.

L'essai se fait sur des éprouvettes standardisées sur une machine d'essai de traction (figure VI.20).

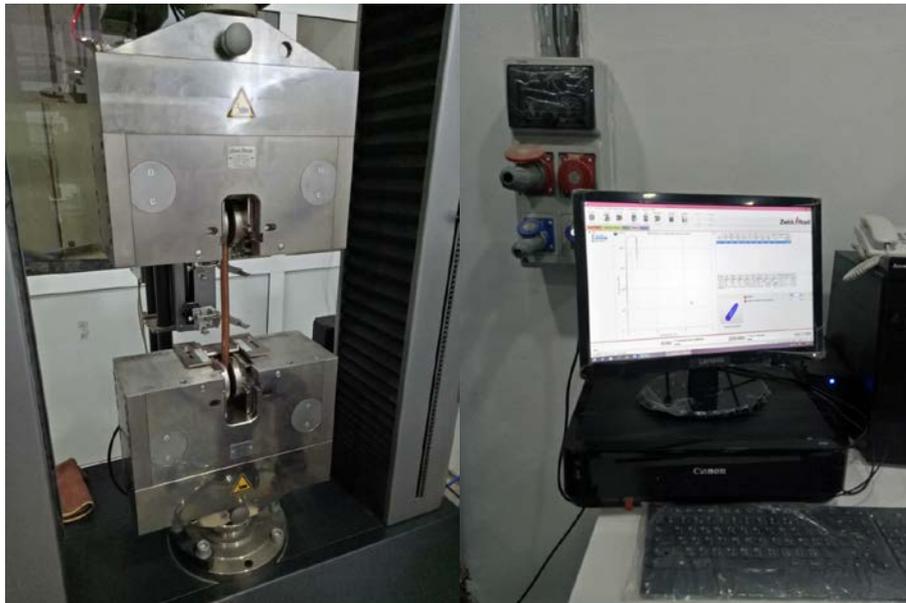


Figure VI.20. Machine de traction reliée à un ordinateur.

Les éprouvettes sont d'une longueur de 300mm, la longueur de l'éprouvette normalisée pour l'essai de traction est de 200mm, les 100mm ont été laissés pour maintenir solidement l'éprouvette entre les deux mâchoires de la machine et sont soumises à l'action d'une charge (éloignement des mâchoires l'une de l'autre) jusqu'à un allongement provoquant la rupture. Les fils soumis à la traction sont épais dont la machine est munie de mandrin hydraulique qui marche sous une pression de 8 bar.

La machine de traction est reliée à un micro ordinateur muni d'un logiciel qui permet d'enregistrer instantanément les valeurs de l'effort de traction et l'allongement correspondant. Il permet également de tracer au fur et à mesure le diagramme de l'essai de traction (figure VI.21).

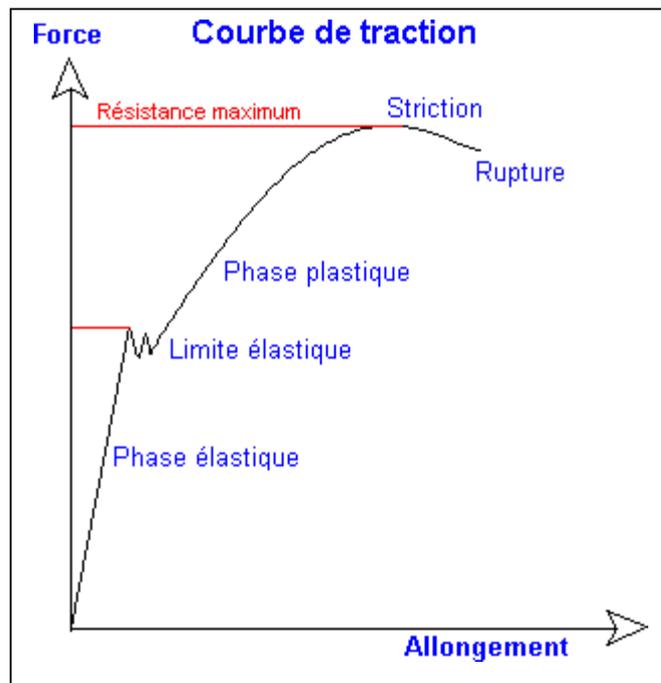


Figure VI.21. Diagramme d'essai de traction.

L'essai de traction permet de déterminer les caractéristiques mécaniques principales du cuivre :

- La limite élastique.
- La résistance maximum.
- La résistance à la rupture.
- L'allongement à la rupture.
- La striction relative à la rupture.
- Le module d'élasticité.

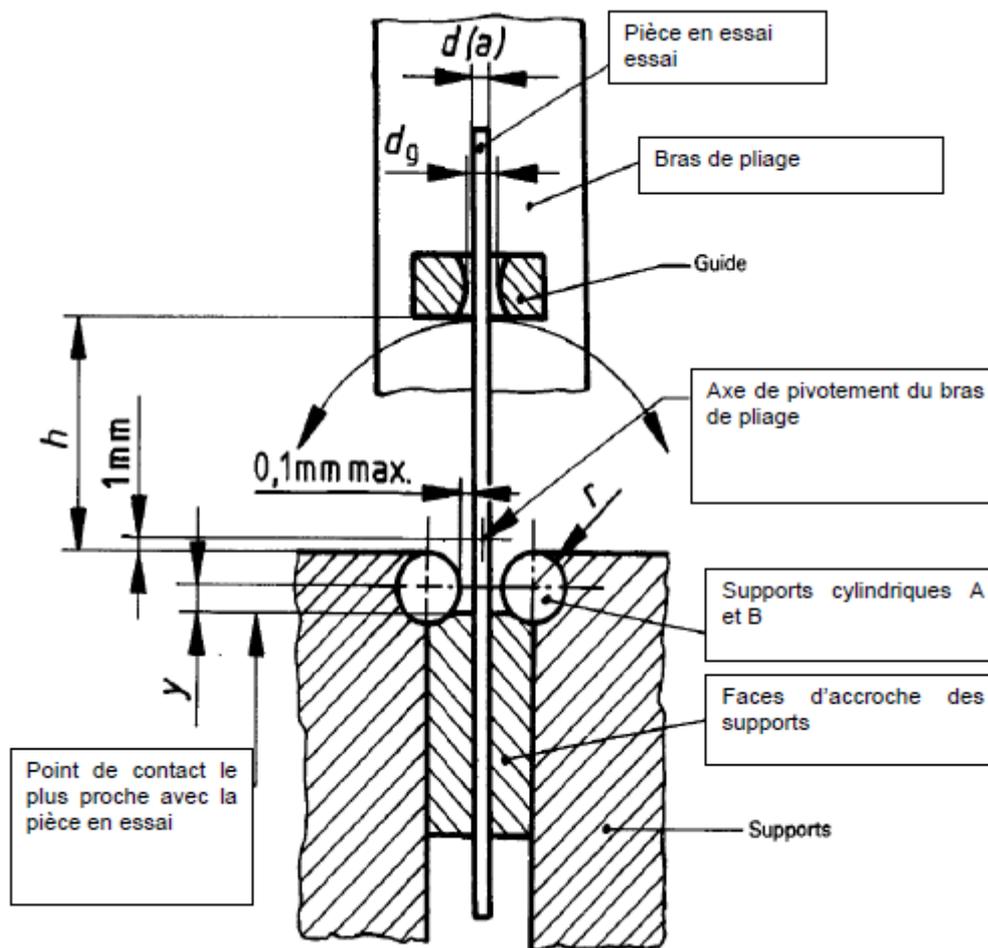
Dans le cadre de notre étude, l'allongement est la caractéristique principale sur laquelle on se base pour déterminer si le fil de contact est bon à utiliser ou pas. L'allongement est la capacité d'un matériau à se déformer et à s'allonger sans rupture. Il exprime en quelque sorte la ductilité du matériau.

C.I.3.3. L'essai de pliage

L'essai est réalisé en utilisant une méthode similaire à celle donnée dans l'ISO 7801:1984 et à la Figure VI.22. La distance entre le plan tangentiel supérieur des supports cylindriques et la face inférieure du guide doit être de 200 mm au maximum. Le fil doit être placé de telle manière que la partie inférieure et la tête du fil soient tangentes aux faces d'accroche du support (comme le montre la Figure VI.23). Pour le premier pliage, la face inférieure du fil doit se trouver à l'intérieur et la tête du fil à l'extérieur.

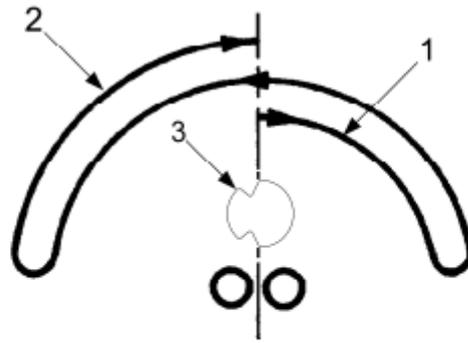
Le fil doit être soumis à un certain nombre de pliages, en passant à 90° dans des directions opposées, autour d'un mandrin ayant un rayon de 30 mm. Un pliage consiste à plier l'extrémité libre du spécimen d'essai à 90° et à le ramener à sa position d'origine, conformément à la Figure VI.23. Les pliages peuvent être réalisés manuellement.

Le fil doit résister à au moins 6 pliages sans présenter de rupture.



Symbole	Désignation	Unité
d	Diamètre du fil	mm
a	Épaisseur minimale du fil de section non-circulaire pouvant être maintenu entre des dispositifs de maintien parallèles	mm
r	Rayon des supports cylindriques (mandrin)	mm
h	Distance entre le plan tangentiel supérieur des supports cylindriques et la face inférieure du guide	mm
d_g	Diamètre du trou de guidage	mm
y	Distance entre un plan, défini par les axes des supports cylindriques, et le point de contact le plus proche avec la pièce en essai	mm
Nb	Nombre de pliages alternés	

Figure VI.22. Essai de pliages alternés - Montage d'essai.



Légende

- 1 Premier pliage
- 2 Deuxième pliage
- 3 Orientation du fil

Figure VI.23. Essai de pliages alternés - Méthode.

C.I.3.4. Synthèse de graphène sur cobalt par dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour Chemical Vapor Deposition) permet de former un matériau solide sur un substrat choisi. Ce procédé consiste à exposer une surface à recouvrir à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse de façon à provoquer une réaction chimique. L'énergie d'activation nécessaire pour entraîner la réaction chimique est apportée par un chauffage à température élevée, généralement comprise entre 600°C et 1100°C. De nombreuses variantes ont été développées, dont la CVD à pression atmosphérique ou à basse et très basse pression ou encore des procédés à plus basses températures utilisant des sources d'énergie additionnelles telles que les plasmas ou les lasers. Cette souplesse du procédé de CVD permet l'élaboration de nombreuses variétés de revêtements ou de couches minces, qu'ils soient métalliques ou conducteurs, organiques ou inorganiques, cristallins ou vitreux. Le procédé de CVD est largement utilisé dans l'industrie pour réaliser des revêtements protecteurs contre l'usure mécanique ou la corrosion ainsi que pour obtenir des couches minces utilisées dans la réalisation de composants pour l'optique ou la microélectronique. Le procédé de CVD est notamment largement utilisé pour produire toutes sortes de matériaux carbonés tels que des couches de pyrocarbone ou de DLC (Diamond Like Carbon) ou encore des nanotubes de carbone, matériau prometteur dont la technologie est plus mature que celle du graphène. Dans le contexte spécifique du graphène, la synthèse par un procédé de CVD est actuellement la plus adaptée en vue d'une production à plus grande échelle car elle est reproductible et autorise la formation de couches de haute qualité cristalline.

C.I.4. Techniques de préparation à l'étude métallographique

C.I.4.1. Découpage et enrobage

Les échantillons destinés à la caractérisation microstructurale ont été découpés à l'aide d'une tronçonneuse à partir des prélèvements effectués sur les bottes. Pour faciliter la manipulation de nos échantillons, on a effectué un enrobage à froid. Les figures VI.24 et VI.25, VI.26 montrent des échantillons après leurs enrobages.

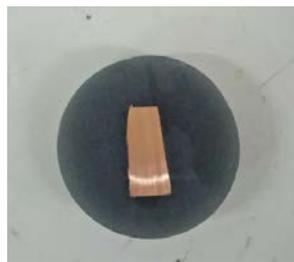


a)-coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VI.24. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage.



a)-coupe longitudinale

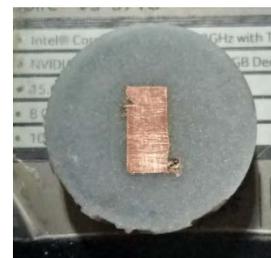


b)- coupe transversale

Figure VI.25. Echantillons d'un fil de cuivre de section 150mm² après enrobage.



a)-coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VI.26. Echantillons d'un fil de cuivre de section 107mm² après enrobage.

C.I.4.2. Polissage

Le polissage a pour but l'obtention d'une surface plane, de rugosité minimale et également l'élimination de la couche d'oxyde superficielle dont la microstructure n'est pas représentative du matériau étudié. Il est effectué en deux étapes : la première consiste en un polissage grossier avec des papiers abrasifs de granulométrie décroissante (120, 240, 400, 800, 1000 et 1200). La deuxième est celle du polissage de finition qui permet d'améliorer davantage l'état de surface en utilisant des feutres imbibés de suspensions d'alumine diluées dans l'eau. La granulométrie de la poudre d'alumine utilisée est de $0,05\ \mu\text{m}$. La figure VI.27 qui suit montre la polisseuse utilisée.



Figure VI.27. Polisseuse utilisée.

Après polissage, la surface des échantillons possède un aspect miroir. Une fois lavés et séchés, ils sont donc prêts à l'attaque chimique.

C.I.4.3. Attaque chimique

Après le polissage de finition l'échantillon subit une attaque chimique afin de révéler sa microstructure. Le réactif utilisé est une solution composée de 120 ml d'eau distillée, 50 ml d'acide hydro-chlorhydrique (HCL) et de 10g de chlorure de fer (III). Après l'attaque, l'échantillon est immergé dans l'eau distillée puis séché à l'aide d'un séchoir.

C.I.4.4. Observation au microscope optique

L'observation des microstructures a été réalisée à l'aide d'un microscope métallographique de marque OPTIKA M-789, ce dernier est connecté à un ordinateur muni d'un logiciel de traitement d'image (OPTIKA-VIEW). La figure VI.28 montre une image de ce microscope.

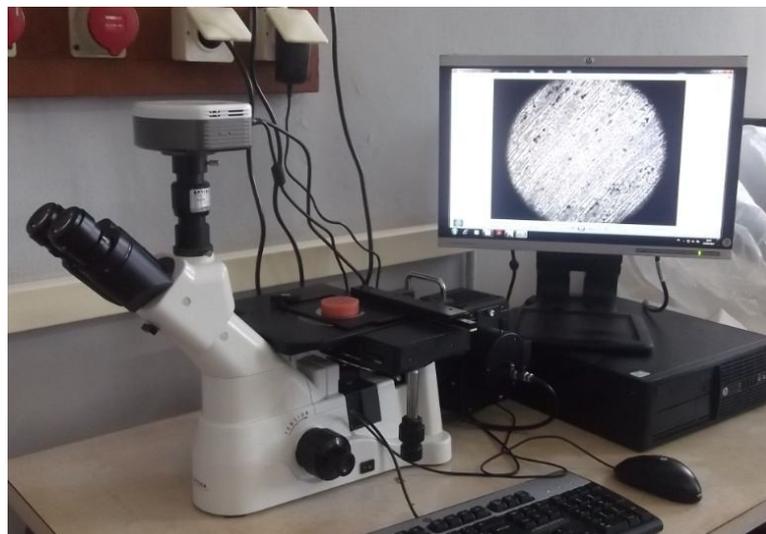


Figure VI.28. Microscope métallographique OPTIKA M-789.

C.I.4.5. Analyse quantitative

Les micrographies obtenues après l'observation au microscope ont été exploitées à l'aide du logiciel de traitement d'image "Visilog" dans le but de calculer la fraction des grains recristallisés. Ce logiciel permet de calculer pour chaque micrographie la fraction de la surface des grains allongés par rapport à la surface totale.

Chapitre II : Résultats et discussions

Dans le présent chapitre, nous allons exposer les différents résultats obtenus lors des différentes expériences que nous avons entrepris. On a d'abord réalisé quelques essais sur la matière première (fil machine de diamètre 22 mm) pour vérifier sa conformité avec la norme. Ensuite on a effectué une caractérisation des fils de contact en cuivre tréfilé de sections 150mm² et 107mm² sur plusieurs aspect exigé par les cahiers de charge des clients destinés à ce produit. Par la suite nous avons comparé les résultats obtenus avec les caractéristiques du même fil allié en graphène par CVD.

C.II.1. Résultats d'essai sur le fil machine

Pour le fil machine en raison du manque de matière première nous avons pu faire que la micro structure et le calcul du diamètre.

Par ailleurs notre étude se base sur le fil de contact fini donc l'étude du fil machine et purement facultatif dans ce cas de figure.

Puisque le calcul du diamètre s'est fait de deux manières différentes pour le fil machine, et que celui-ci influe directement sur la section et donc la contrainte et la résistivité, cette dernière ayant un rapport direct avec la conductivité, on résumera nos résultats obtenus sous forme de deux tableaux XI, XII. Le premier donnant les résultats obtenus pour des diamètres calculés expérimentalement, le deuxième pour ceux calculés théoriquement.

Tableau XI. Résultats obtenus pour des diamètres calculés via un Palmer.

Echantillon	Diamètre (mm)	Section (mm ²)
1	22,165	385,85
2	22,109	383,90
3	22,161	385,71
Moyenne	22,124	384,42

Tableau XII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés en connaissant le poids métrique.

Echantillon	poids métrique (g/m)	Diamètre (mm)	Section (mm ²)
1	1463,9	22,153	385,43
2	1458,6	22,106	383,32
3	1465,8	22,170	386,03
Moyenne	1463,6	22,150	385,24

Avec :

La section : $S = \pi \cdot D^2 / 4$.

Pour la méthode du poids métrique :

$$m = d V = d S L = d \pi L D^2 / 4 \text{ donc: } D = \sqrt{4m / d \pi L} :$$

m/L étant le poids métrique,

d étant la densité du cuivre qui est égale à 8890 Kg/m³.

Les résultats obtenus pour les deux méthodes de calcul de diamètre étant très proches, on peut dire que les deux sont acceptables.

Les résultats illustrés dans les tableaux, XI, XII prouvent que le lot de cuivre sur lequel nous avons procédé à l'échantillonnage est bien conforme aux normes car :

- son diamètre ne dépasse pas les 22mm ± 0,6mm,

C.II.2. Résultats des tests effectués sur les fils de section 107mm² et 150 mm²

Les fils de contacts de 107mm² et 150mm² sont obtenu par tréfilage successif du fil machine de diamètre initial 22mm.

C.II.2.1. Etude des échantillons CATEL

On a pris 12échantillons, 6 de fil de 107mm² de section et 6 de fil 150mm² de section. Nous avons effectué sur ces échantillons un essai de résistance électrique, un essai de traction, un essai de pliage et mesuré la dimension de chaque section, puis une observation de la microstructure par microscopie optique.

C.II.2.1.1. Calcul de sections

En vue de la géométrie assée complexe des deux type de fil la seul méthode disponible et adéquate et la projection de profil. Les deux tableaux suivent XIII et XIV font un récapitulatif des essais effectuer il sont suivie par les deux schémas récapitulatif obtenue par le projecteur de profil (figure VII.1 , VII.2).

Tableau XIII. Résultats obtenus pour des diamètres calculés projecteur de profil pour le 150mm².

Echantillon	Diamètre (mm)	Section (mm ²)
1	14,24	149,72
2	14,32	149,90
3	14,59	150,71
4	14,55	150,24
5	14,45	149,92
6	14,52	150,18
Moyenne	14,50	150,10
Graphène-Cu	14,50	150,10

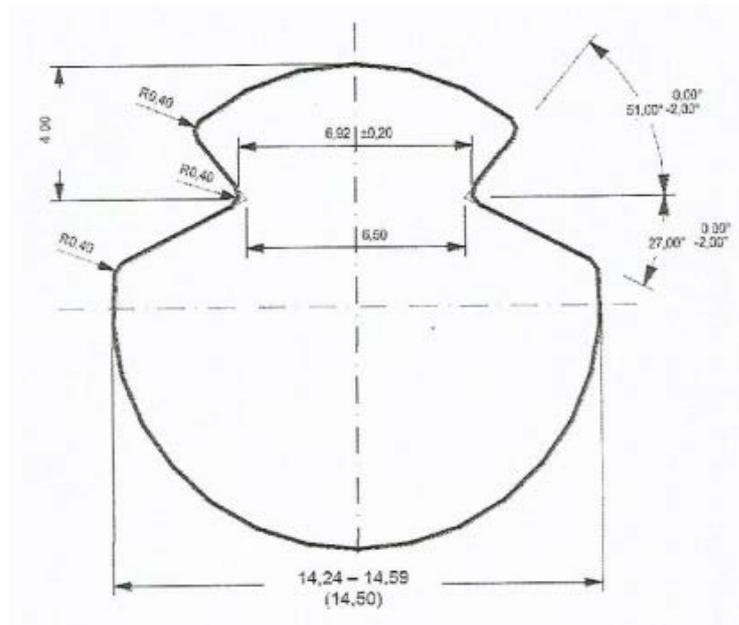


Figure VII.1. Résultats schématisés du projecteur de profil pour le 150mm²

Tableau XIV. Résultats obtenus pour des diamètres calculés projecteur de profil pour le 107mm².

Echantillon	Diamètre (mm)	Section (mm ²)
1	12,01	106,08
2	12,21	106,23
3	12,26	107,20
4	12,28	107,31
5	12,20	106,78
6	12,25	107,12
Moyenne	12,24	107,06
Graphène-Cu	12,24	107,06

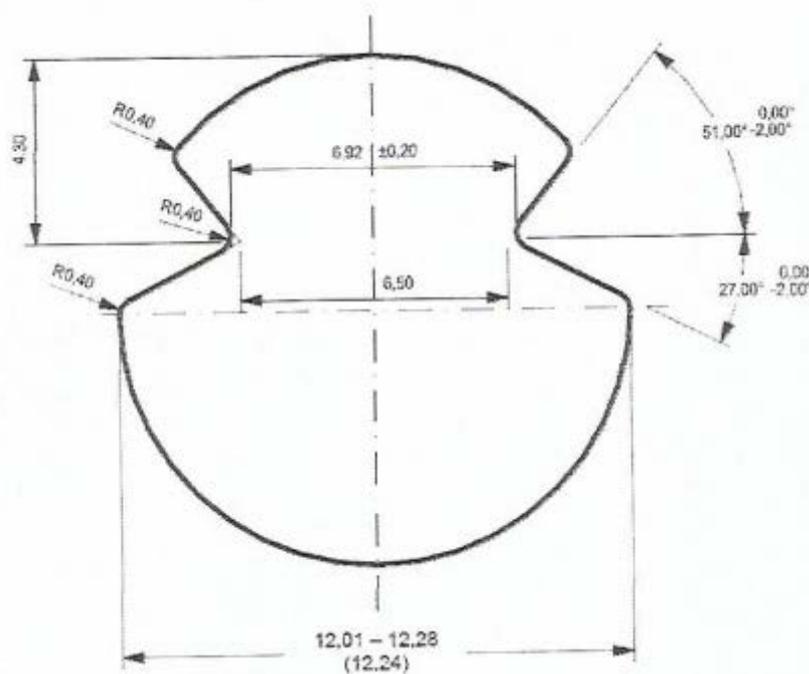


Figure VII.2. résultat schématiser du projecteur de profil pour le 107mm²

Les résultats obtenus pour les deux type de fil sont en moyen très acceptable, avec une erreur de $\pm 0,2$ mm. Pour l'alliage graphène-Cu il n'ajoute que quelque ångström donc et négligeable.

Les résultats illustrés dans les tableaux, XI, XII prouvent que les deux lot de fil fini sur lequel nous avons procédé à l'échantillonnage est bien conforme aux normes car :

- son diamètre ne dépasse pas les 14mm $\pm 0,4$ mm pour le 150mm²,
- son diamètre ne dépasse pas les 12 mm $\pm 0,4$ mm pour le 107mm²,
- écart des rainures d'accroche acceptable

C.II.2.1.2. Essai de résistance

Les résultats de l'essai sont résumés dans le tableau XV ci-dessous.

Tableau XV. Résultats de l'essai de résistance sur les échantillons de CATEL.

Echantillon	R _{calculée} (mΩ/km)	Section (mm ²)	Résistivité (Ω.m. 10 ⁻⁸)
150mm ²	114,72	150,10	1,721
Graphène-Cu	57,36	150,10	0,8605
107mm ²	159,63	107,06	1,708
Graphène-Cu	79,815	107,06	0,8592

Les résultats obtenus pour la résistivité électrique montrent qu'elle est presque la même pour les deux échantillons, ce qui est normal car c'est une caractéristique intrinsèque du matériau de même pour le cuivre-graphène. On peut aussi vérifier ces résultats en revenant au tableau II (page 15) qui donne la résistivité du cuivre pour un état recuit et un état écroui.

Par contre, on remarque en comparant les résultats obtenus pour la résistance pour le 150mm² et celle du 107mm² que celle-ci augmente avec la diminution du diamètre, ce résultat peut être interprété mathématiquement ainsi :

$$R = \rho L/S = 4\rho L/\pi D^2,$$

La résistivité étant constante et puisque le diamètre diminue, la résistance va automatiquement augmenter. Par ailleurs, on sait qu'un métal écroui devient un mauvais conducteur d'électricité car sa structure devient disloquée, hétérogène et instable donc sa résistance électrique augmente. Ceci est illustré par les résultats du tableau ci-dessus. Cependant, la différence entre les deux résistances est relativement faible. La raison réside peut-être dans la haute pureté du cuivre utilisé (99,96% pur) qui fait que la distorsion du réseau cristallin n'est pas aussi affectée que si le cuivre utilisé était sous forme d'alliage. Aussi, en sachant qu'un courant électrique n'est rien d'autre qu'un mouvement d'électron, on peut donc dire que plus un métal est stable structuralement (structure recristallisée) plus les électrons se déplacent facilement, plus la résistance est faible. Ce phénomène est beaucoup plus accentué si le métal est un alliage donc moins pur, ce qui n'est pas le cas ici. Donc on peut facilement affirmer que nos résultats d'étude de la résistance sont très cohérents et conforme a la norme NF EN 50149:

- Pour le 150mm² R<0,122Ω/km
- Pour le 107mm² R<0,171Ω/km

Cette dernière déduction conforte les résultats obtenus par logiciel SolidWorks sur le même type de fil allié au graphène, car celle-ci augmente grandement sa conductivité car les électrons se déplacent très rapidement dans le graphène en surface et du coup nous avons une résistivité réduite de moitié.

C.II.2.1.3. Essai de traction

Suite à de nombreux essais de tractions seul 3/6 essais ont été concluant pour chaque type de fil, nous avons fait la moyenne pour obtenir un résultat optimal .

Les résultats de l'essai de traction sont résumés dans le tableau XVI ci-dessous :

Tableau XVI. Résultats de l'essai de traction sur les échantillons de CATEL.

Echantillon	Allongement %	Charge a la rupture (kN)	Charge à la traction (MPa)
150mm ²	4,64	50,12	352,03
Graphène-Cu	1.024	25060,04	176010,52
107mm ²	3,29	55,85	367,93
Graphène-Cu	0.987	27925,47	183965,12

Les figures VII.3 et VII.4 montrent les courbes de traction respectives de l'échantillon moyen du 150mm² et du 107mm².

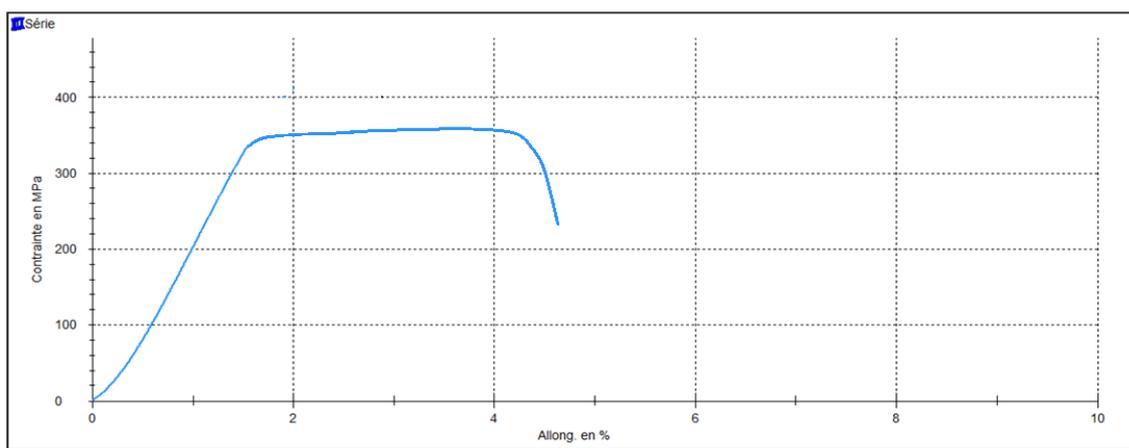


Figure VII.3. Courbes de traction moyenne du 150mm²

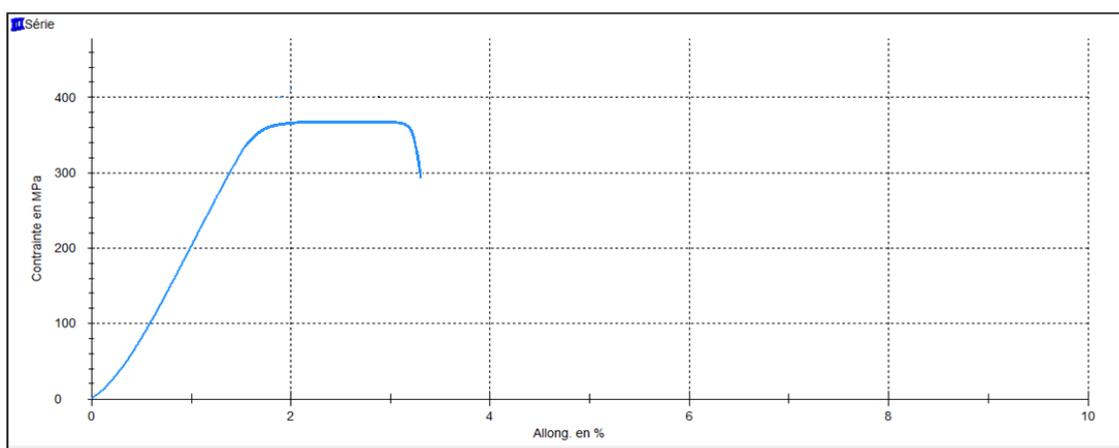


Figure VII.4. Courbes de traction moyenne du 107m

Les résultats du tableau XVI sont assez logiques car un échantillon de cuivre écroui a un allongement médiocre car l'écrouissage rend le matériau dur donc rapidement cassable de ce fait le 107mm² et a un taux d'allongement moins important que celui du 150mm².

Par contraste, on remarque que la charge à la rupture évolue inversement avec l'allongement. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il faut appliquer une grande charge pour pouvoir déformer du cuivre dur (écroui) et donc arriver à le rompre. Ce cas de figure peut être illustré par un exemple simple d'un matériau dur (métal) et d'un autre malléable (polymère). En effet il faut une grande force pour allonger un métal (cuivre par exemple) que pour un polymère (gaine en PE par exemple) alors que l'allongement de ce dernier à la rupture est de 20 fois celui du cuivre (d'après des résultats d'essais observés à CATEL).

Nous remarquerons aussi que nos échantillon (les 3 trois non biaiser du 107mm² et les 3 non biaiser du 150mm²) on donnais des résultat satisfaisant qui sont dans les norme stipuler dans la EN 50149 :

-150mm² Charge de rupture 50,12kN >45,1kN / 150mm² allongement % 3 < 4,64 <10

-107mm² Charge de rupture 55,85kN >36,3kN / 107mm² allongement % 3 < 3,29 <10

Pour ce qui est du cuivre-graphène on remarque une augmentation de la résistance a la rupture phénoménal soit plus de 500 fois l'originale se qui est une très bonne chose vue qui il deviens **500** plus résistant, pour l'allongement en remarque une régression importante due a l'augmentations de l'élasticité de ce dernier et de sa dureté.

C.II.2.1.4. Essai de pliage

Nous avons suivie scrupuleusement le procédé d'essai décrit précédemment (figure VII.5), note premier gamme d'essai c'est fait sur les échantillons de 150mm² sur les trois échantillons on obtiens la rupture a : 8 plis ,7 plis , 9 plis ce qui nous donne en moyenne 8 plis a la rupture ce qui rentre dans les norme . Pour le 107mm² on obtiens la rupture a : 8 plis , 10 plis , 11 plis ce qui nous donne en moyenne 10 plis se qui rentre dans les norme.

Due a l'aspect élastique que le graphène procure au cuivre on estime par logiciel que le nombre de plus peux allé a plus de **300** fois sa normal pour les deux type de fil.



Figure VII.5. Essai de pliage pour le 150mm² et le 107mm²

C.II.2.1.5. Microstructure

La préparation et l'observation de la microstructure s'est faite au laboratoire de métallographie du département de métallurgie de l'ENP. Mais avant de passer à l'observation au microscope il faut d'abord procéder à la préparation métallographique des échantillons. Pour cela six échantillons ont été préparés. 3 en coupe longitudinale les autres en coupe transversale puis enrobés dans une résine comme montrés dans les figures VII.6, VII.7, VII.8 ci-dessous. Nous avons donc 6 échantillons ; 2 fil machine 2 fil 150mm² et 2 fil 107mm²



a)-coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VII.6. Echantillons du fil machine de cuivre après enrobage.



a)-coupe longitudinale

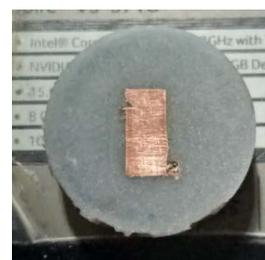


b)- coupe transversale

Figure VII.7. Echantillons d'un fil de cuivre de section 150mm² après enrobage.



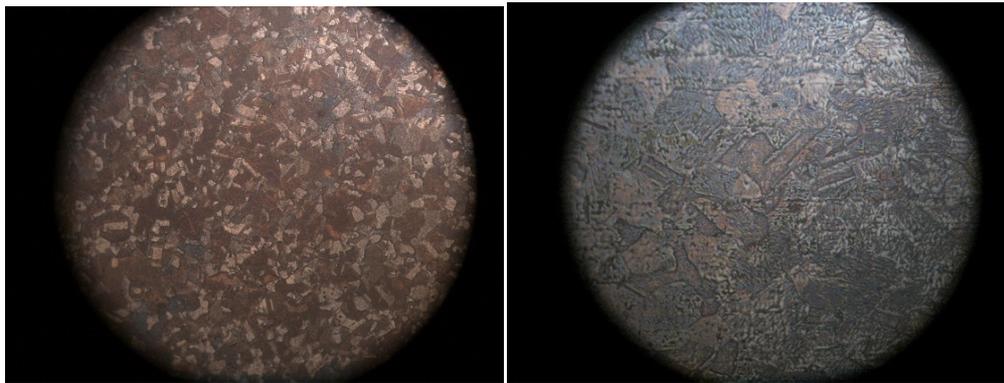
a)-coupe longitudinale



b)- coupe transversale

Figure VII.8. Echantillons d'un fil de cuivre de section 107mm² après enrobage.

Les micrographies du fil de cuivre avant tréfilage et après tréfilage sont illustrées respectivement dans les figures VII.9 et VII.10, VII.11.

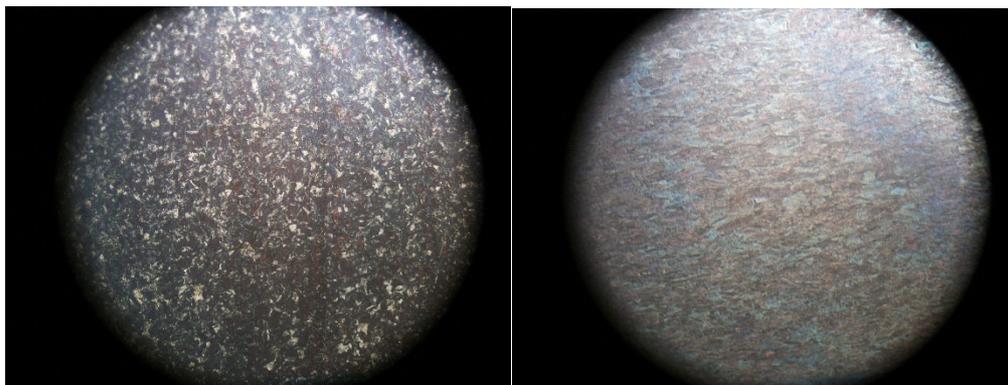


a) Coup en section

b) Coup en longueur

Figure VII.9. Micrographies de l'échantillon fil machine avant tréfilage.

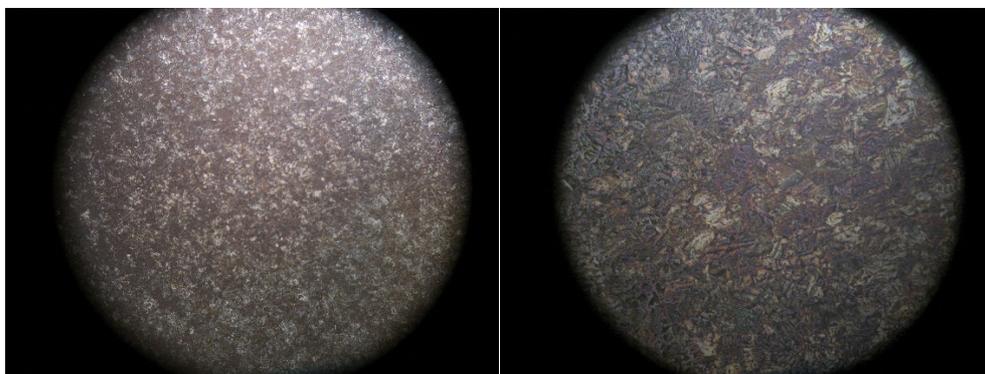
On remarque que le grain a une forme équiaxial régulière avec de tailles plutôt grandes dans le coup en section (VII.9.a). en revanche on remarque une certaine forme de directions de grains dans le sens de la coup longitudinal due a la forme du fil machine et au sens de sa mise en forme par le fournisseur, on distingue des forme irrégulier de grain qui tend a s'aiguillonner(VII.9.b)



a) Coup en section

b) Coup en longueur

Figure VII.10. Micrographies de l'échantillon 150mm² après tréfilage.



a) Coup en section

b) Coup en longueur

Figure VII.11. Micrographies de l'échantillon 107mm² après tréfilage.

On voit bien que l'étirage par traction des fils provoque un allongement des grains (VII.10.b)

dans le sens du tréfilage (coupe en longueur). En revanche dans la section transversale (VII.10.a), les grains paraissent équiaxes mais plus dense et moins grand, ce qui est logique, car le système de contrainte dans le sens radial est le même car imposé par la forme des filières, mais différent dans le sens longitudinal. Donc les grains équiaxes que nous percevons dans cette dernière section ne sont rien d'autre que les sections transversales des grains allongés dans le sens longitudinal qui ont la forme d'aiguille et qui ont diminuer de diamètres augmenté de nombre et densité du à l'écroutissage provoquer par le tréfilage à froid. C'est le même phénomène qui se reproduit pour le (VII.11.b) un grain plus allongé en forme d'aiguille plus fine que sont précédant et une densité de grains plus importante dans la sections transversale et moins grande que sa précédente ce qui confirme notre analyse .

Remarque : seul cette essai n'as pas pue être fait par (SolidWork) pour ce qui concerne le graphène cuivre, en manque de l'outil ou des connaissances requise .

Partie D : **Conclusion et perspectives**

Chapitre I : CONCLUSION GENERALE

Le tréfilage a froid une étape primordiale lors du processus de fabrication des fils de cuivre de contact caténaire. En effet, nous avons pu constater l'importance de ce traitement à travers les analyses que l'on a effectué sur différents échantillons de fils ayant subi un tréfilage à partir du fil machine. Par la suite la CVD qui a permis d'ajouter du graphène au cuivre a grandement amélioré sont rendement. Ces analyses nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les observations micrographiques nous ont amené à comprendre que la microstructure du fil est altérée par la déformation imposée par le tréfilage, en effet on a pu observer un allongement des grains qui s'est fait dans le sens du tréfilage.
- Les essais de traction nous ont fait valoir que la caractéristique d'allongement du fil est celle qui est la plus atteinte après le tréfilage. Néanmoins, l'effet d'écrouissage est donc de dureté du fil et un aspect rechercher dans les fils de contact caténaire, et dans notre cas le 150mm² et 107mm² sont conforme à la norme exigée, et que le graphène amélioré grandement la résistance a la traction du caténaire (plus de 500 fois),
- Les essais de résistivité ont confirmé que la conductivité électrique est une caractéristique intrinsèque du cuivre qui n'est pas influencée par la déformation causée par le tréfilage. Par contre la résistivité et relative a la section donc plus la section diminue plus le fil et écrouit plus la résistivité augmente, dans ce cas nos deux produit sont parfaitement dans les normes exiger, pur ce qui est du cuivre allier au graphène il réduit la résistance du fil de deux fois son origine et donc augment la conductivité de 2 fois
- Les essais de pliage on confirmer à leur tour que l'épaisseur joue un rôle très important a la résistance au pliage alterné car plus rayons diminue plus la résistance au plie augmente, cela est due à la souplesse et à la surface de contact sur le mandrins qui diminue et donc réduit l'effort sur la bar. Par ailleurs nos deux types de bar sont parfaitement dans les normes exigées, pour le cuivre allier on remarque qu'il donne un aspect très élastique au deux échantillon de plus de 300 fois la normal se qui est extraordinaire,

Pour ce qui est de la distinctions entre les deux type de fil de contact le 150mm² est destiné pour le tramway et le 107mm² pour les trains électriques, cela est due au différent besoins d'énergie de ces deux type de transport et aussi à la résistance du fil dans ces deux environnement différent, néanmoins on peut trouver le contraire ou d'autre type de fil celas vas dépendre du client, de l'environnement, du nombre de gare ou d'arrêt, de pont de maintien, et du type de locomotif .

Pour ce qui est de la distinctions entre les deux type de fil le normal et le traiter par CVD pour ajouter du graphène, il est claire que le fil de contacte allier et grandement meilleur que l'original et sa dans tout les aspect meme se qui ne sont pas cité tel que la corrosion ou la résistance a la chaleur et sa pour un ajout massique de 0,00004%.

Chapitre II : Perspectives

Ce travail, même si le thème principal est la caractérisation, pourra servir de base à une production future de ce type de fil effectué à CATEL. Ces travaux pourraient aussi aider prévoir la main d'œuvre nécessaire dans l'unité de productions du fil caténaire car les machine utiliser sont certes très moderne mais demande un savoir-faire, une certaine force physique, et un sens du détail irréprochable.

En effet, un tel travail nécessite une connaissance serrée des paramètres de la tréfileuse (courant électrique, différence de potentiel, vitesse de tréfilage...), il faut aussi avoir un programme de fabrications et d'analyse laboratoire synchroniser car vue le temps que les deux prene optimiser les plannings pourrais faire économiser beaucoup d'argent a CATEL une fois la production lancer.

Une telle étude et en s'inspirant des résultats trouvés dans ce présent document, pourra aider l'entreprise CATEL a démarré sa production du nouveaux produit, et augmenter la vitesse de production tout en gardant la même qualité de produit.

Le ministère des transport publique a commander a la SNTF 6000km de chemin de fer électrique en 2017 en plus d'autre ville qui vont être équiper en tramway, un projet colossale que la SNTF selon les directif actuelle économique devrais soustraite le maximum des produit/service lier au projet a des société local, donc CATEL a un marché très prometteur en visions et de ce fait doit assurer sur ce coup car elle est l'une ou même la seul a proposer ce genre de produit dans le marché .

Pour ce qui est du graphène les résultat parle d'eux même il n'y a pas lieux de comparé les méthode actuel a celle si car elle n'est que leur évolution , car le déficit d'aujourd'hui n'est pas dans la technologie elle-même mais dans sa démocratisation de celle si, car même si c'est propriété sont incroyable sa production a une grande échelle reste très couteuse et peux métriser .

Le challenge de nous les ingénieur du 21ème siècle est de concilier ces nouvelle découverte et avancer et les rendre faisable dans le future pour un monde meilleur .

Partie E : Références Bibliographiques

[CATEL]. Documents et archives de CATEL.

[1] AFNOR, “Norme ferroviaire européenne 50318 et 50149,” Technical report, 2002

[2] ORE, “Rapport captage de courant a grande vitesse et a puissance elevee, A129 RP 6-F,” Technical report, SNCF, 1976

[3] G.Bucca, A.Collina, E.Tanzi, “Effect of impregnated carbon on contact wire lifetime. Comparative wear tests on plain carbon and impregnated carbon collector strips,” Technical report, Universite Politechnique de Milan, 2009

[4]. S. JAKANI. « Effet des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé ». Mémoire de doctorat. Université Paris Sud-Orsay. (2004).

[5]. E. JDID, P. BLAZY. « Cuivre : ressources, procédés et produits ». Techniques de l'ingénieur. M2240. (2002).

[6]. J. LIGNON, R. MAILLEBUAU. « Etude des matériaux – II : matériaux non ferreux ». Technologies des fabrications mécaniques, fascicule 21. (1977).

[7]. J. B. GUILLOT. « Elaboration des matériaux ». Génie des matériaux, Ecole Centrale de Paris. (2001).

[8]. V. S. ANANTHAN, T.LEFFERS, N.HANSEN. « Materials, scienceand technology». Vol.7, p.1069.(1991).

[9]. B. ALONSO. « Résistance à la corrosion ». Centre d'Information du Cuivre, Laitons et Alliages CICLA.(2011).

[10]. K. I. Bolotin, K. J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, and H. L. Stormer, “Ultrahigh electron mobility in suspended graphene,” Solid State Commun., vol. 146, no. 9– 10, pp. 351–355, 2008

[11]. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, and J. Hone, “Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene,” Sci. , vol. 321 , no. 5887 , pp. 385–388, Jul. 2008.

[12]. V. BRANGER, M.H.MATHON, T.BAUDIN. « Recrystallization, fundamental aspects and relations to de formation microstructure ». p.257. (2000).

[13]. A. H. C. Neto, “The electronic properties of graphene,” vol. 81, no. March, 2009.

[14]. X. Li, W. Cai, L. Colombo, and R. S. Ruoff, “Evolution of graphene growth on Ni and Cu by carbon isotope labeling.,” Nano Lett., vol. 9, no. 12, pp. 4268–72, Dec. 2009.

[15]. F. Tuinstra and J. L. Koenig, “Raman Spectrum of Graphite Raman Spectrum of Graphite Layers in Indian Coal Raman Spectrum of Graphite,” vol. 1126, pp. 10–15, 1970.

- [16]. N. CHIHANI. « Etudes des propriétés électriques de tréfilés en alliages du système (SnZn), en vue de les remplacer par l'alliage (CuZn37) ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger.(2012).
- [17]. G. R. SIMONS, M. R. STOKES. « Computer simulation of an industrial wire drawing process ». Ed. Elsevier Science. P.937. (1993).
- [18]. N. YU, J. P. LE ROY. « Tréfilage des fils cuivreux ultra fins ». Techniques de l'ingénieur. M646. (1995).
- [19]. Groupe d'ingénieurs des tréfileries de CONFLANDEY. « Tréfilage de l'acier ». Techniques de l'ingénieur. M645. (1996).
- [20]. R. CHARPIGNY, R. NOSSENT. « Mise en forme de l'aluminium – tréfilage et étirage ». Techniques de l'ingénieur. M652. (1997).
- [21]. S. PUISSANT, P. Y. BONVIN. « Lignes d'extrusion en câbleries – étapes de fabrication ». Techniques de l'ingénieur. Am3641. (2006).
- [22]. M. D. HADID. « Evolution de la microstructure et des propriétés mécaniques et électriques lors d'un revenu après tréfilage d'un alliage d'aluminium ». Mémoire de magister. ENP Alger. (2012).
- [23]. C. LEVRAU. « Compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs ». Mémoire de doctorat. ENSM Paris. (2006).
- [24]. B. LAPOSTOLLE. « Conditions de travail des filières de tréfilage ». Revue de métallurgie CIT. p1003. (1980).
- [25]. M. MANTEL, C. VACHEY. « Formage à grande vitesse – détermination d'une loi de comportement ». Techniques de l'ingénieur. M3025. (2006).
- [26]. I. MERDAS. « Caractérisation structurale et mécanique d'un fil d'acier après tréfilage ». Mémoire de fin d'études. ENP Alger. (2009).

Partie F : **Annexes**

F.I.1. 1- La norme IACS (International Annealed Copper Standard) :

La Commission Electrotechnique Internationale se sert de données des années antérieures afin d'établir une valeur fixe pour la résistance au passage d'un courant électrique à l'intérieur d'un cuivre recuit étalon. Cette valeur repose sur une résistivité volumique de $1,7241 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ à $20^{\circ}C$. De même, sur la base de ces données, il est attribué au cuivre recuit étalon une masse volumique de 8890 Kg/m^3 .

Par conséquent la résistivité massique étant le produit de la résistivité volumique par la masse volumique, la résistivité massique du cuivre recuit étalon est de $0.15328 \Omega \cdot g/m^2$.

Cette norme spécifie aussi une conductivité du cuivre de 100 à 103%.

F.I.2. La norme ISO 9001:

La présente Norme internationale ne vise ni l'uniformité des structures des systèmes de management de la qualité, ni l'uniformité de la documentation.

Les exigences en matière de système de management de la qualité spécifiées dans la présente Norme internationale sont complémentaires aux exigences relatives aux produits. Les informations sous forme de «NOTE» sont fournies pour clarifier l'exigence associée ou en faciliter la compréhension.

La présente Norme internationale peut être utilisée aussi bien par l'organisme en interne que par des parties externes, y compris des organismes de certification, pour évaluer sa capacité à satisfaire les exigences des clients, les exigences légales et réglementaires applicables au produit, ainsi que les exigences de l'organisme lui-même.

Les principes de management de la qualité présentés dans l'ISO 9000 et l'ISO 9004 ont été pris en compte au cours du développement de la présente Norme internationale.

La présente Norme internationale spécifie les exigences relatives au système de management de la qualité lorsqu'un organisme

a) doit démontrer son aptitude à fournir régulièrement un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables,

b) vise à accroître la satisfaction de ses clients par l'application efficace du système, y compris les processus pour l'amélioration continue du système et l'assurance de la conformité aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables.

Toutes les exigences de la présente Norme internationale sont génériques et prévues pour s'appliquer à tout organisme, quels que soient son type, sa taille et le produit fourni.

Lorsque l'une ou plusieurs exigences de la présente Norme internationale ne peuvent pas être appliquées en raison de la nature d'un organisme et de son produit, leur exclusion peut être envisagée.

Lorsque des exclusions sont faites, les demandes de conformité à la présente Norme internationale ne sont acceptables que si ces exclusions n'ont pas d'incidence sur l'aptitude ou la responsabilité des organismes à fournir un produit conforme aux exigences des clients et aux exigences légales et réglementaires applicables.

F.I.3. Le Système de Management Environnemental 14001 (SME 14001):

Le Management environnemental permet d'améliorer les performances de tout organisme vis-à-vis de l'environnement.

La norme ISO 14001 définit les exigences auxquelles doit répondre un SME pour être reconnu à travers une certification. A travers la mise en place d'une politique d'actions à l'égard de l'environnement, l'organisme dispose ainsi d'un cadre lui permettant :

- d'identifier et de maîtriser l'impact environnemental de ses activités, produits ou services ;
- d'améliorer en permanence sa performance environnementale ;
- de mettre en œuvre une approche systématique pour définir des objectifs et cibles environnementaux, les atteindre et démontrer qu'ils ont été atteints.

L'ISO 14001 exige un engagement envers la conformité à la législation et à la réglementation applicables en matière d'environnement, ainsi qu'une démarche d'amélioration continue (principe d'un SME). Précisons que le SME peut être un moyen d'atteindre la conformité réglementaire. Il n'est pas nécessaire que cette conformité soit complète pour être certifié.

F.I.4. La norme EN 1977:

La présente norme européenne a été adoptée par le CEN (Comité Européen de Normalisation) le 28 Février 1998, elle spécifie la composition, les propriétés mécaniques, électriques et physiques pour le fil machine en cuivre à haute conductivité destiné à la fabrication du fil étiré à froid, principalement pour la fabrication des conducteurs électriques. La norme s'applique au fil machine dans neuf nuances de cuivre et neuf cuivres à l'argent. Normalement la section droite est ronde, dans la plage des diamètres situés au-dessus de 6mm.

- L'échantillonnage :

Le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité d'échantillonnage prélevé pour 60 t du fil machine.

Pour la détermination de la composition chimique autre que l'oxygène, et pour le mesurage de l'allongement, le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité pour 500 t de fil machine.

Pour la détermination de la résistivité électrique, le taux minimum d'échantillonnage doit être d'une unité par 200 t de fil machine.

Les unités d'échantillonnage doivent être découpées dans le matériau fini et les échantillons pour essai ou les éprouvettes préparées à partir de ceux-ci ne doivent être soumis à aucun traitement ultérieur, autre l'usinage nécessaire à la préparation des éprouvettes.

- L'allongement :

L'essai d'allongement doit se faire sur la section transversale totale du fil machine en utilisant la méthode d'essai de traction.

La charge doit être appliquée graduellement et uniformément à une longueur dressée de l'unité d'échantillonnage, en utilisant une longueur originale entre repères de 200mm. La vitesse de séparation des coulisses de la machine ne doit pas être supérieure à 240 mm/min.

- Résistivité électrique :

La résistivité volumique, rapportée à 20°C, doit être déterminée sur l'unité d'échantillonnage du fil machine soit :

- a- Par mesurage direct sur une unité d'échantillonnage nettoyé du fil machine, où
- b- Par mesurage d'une longueur de fil machine qui a été étiré depuis l'unité d'échantillonnage jusqu'à un diamètre de $2,00 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, embobinée sur un diamètre non inférieur à 200mm et recuit dans une atmosphère inerte à $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ pendant au moins 30min.

F.I.5. La norme EN 50149:

Le présent document (EN 50149:2012) a été élaboré par le CLC/SC 9XC "Alimentation électrique et mise à la terre des équipements de transport public et appareillage auxiliaire (installations fixes)". La présente Norme européenne spécifie les caractéristiques des fils en cuivre et en alliage de cuivre de sections 80 mm², 100 mm², 107 mm², 120 mm² et 150 mm² destinés aux lignes aériennes de contact. Elle établit les caractéristiques des produits, les méthodes d'essais, les procédures de vérification des fils ainsi que les aspects concernant la commande et les conditions de livraison.

- Aspect et santé du fil

Les fils ne doivent présenter aucun défaut (aspérité, éclat, strie, inclusion ou craquelures) susceptible d'affecter les caractéristiques mécaniques et/ou électriques spécifiées dans la présente Norme européenne ou de causer des difficultés lors de l'installation/de l'exploitation.

La surface doit être propre et exempte de toute inclusion d'oxyde ou de sulfure produit pendant le processus de fabrication ou de matières étrangères telles que des résidus de décapage. Un changement de couleur de la surface métallique brillante dû aux influences atmosphériques peut intervenir immédiatement après la fabrication et est acceptable.

- Sections

La présente Norme européenne énumère les sections nominales suivantes : 80 mm², 100 mm², 107 mm², 120 mm² et 150 mm².

- Profils

Les profils sont de deux types principaux, le profil circulaire et le profil méplat.

- Résistivité

La résistivité du fil à 20°C ne doit pas dépasser $1,777 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ pour le Cu-ETP. Pour les autres alliages en cuivre, les valeurs doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

- Résistance linéique par kilomètre

La résistance par unité de longueur du fil à 20 °C ne doit pas dépasser les valeurs 0,171 Ω /km pour le 107mm²Cu-ETP, 0,122 Ω /km pour le 150mm²Cu-ETP.

Pour les autres alliages en cuivre, les valeurs doivent faire l'objet d'un accord entre l'acheteur et le fabricant.

- Résistance à la traction et pourcentage d'allongement après rupture

La résistance à la traction et le pourcentage d'allongement après rupture du fil doivent être conformes aux valeurs indiquées :

-Cu-ETP 107mm² pourcentage d'allongement après rupture : $3 < x < 10$

-Cu-ETP 150mm² pourcentage d'allongement après rupture : $3 < x < 10$

-Cu-ETP 107mm² Résistance minimale à la traction: 350 MPa

-Cu-ETP 150mm² Résistance minimale à la traction: 310 MPa