

UNIVERSITE D'ALGER

2ED

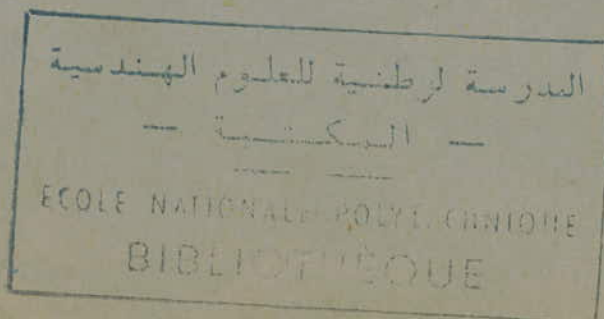
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT MINES ET METALLURGIE

Projet de Fin d'Etudes présenté par Abdelmadjid DJEBARI

ETUDE DE L'EFFET BAUSCHINGER

Sujet proposé :  
par SNS



Dirigé :  
par M. ROCLETTE

UNIVERSITE D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

"EFFET BAUSCHINGER"

INCIDENCE SUR LA FABRICATION DES TUBES SOUDES EN SPIRALE

ETUDIEE PAR :

Abdelmadjid DJEBARI

## BIBLIOGRAPHIE

- ..Documents S.N.S.
- ..B. CHALMERS / : Métallurgie physique
- ..C. CHAUSSIN : Métallurgie (Alliages métalliques t1)  
G. HILLY
- ..H. DE LEIRIS : Métaux et alliages (t1)
- ..J. BENARD : Métallurgie général
- ..GILLES - POMEY : Etude expérimentale de la déformation  
(IRSID) plastique par l'essai de traction

## TABLE DES MATIERES

### INTRODUCTION

### PREMIERE PARTIE

#### CHAPITRE I : LAMINOIR A CHAUD

1.1-	Parc à brames .....	1
1.2-	Four poussant .....	2
1.3-	Dégrossisseur .....	2
1.4-	Train finisseur continu .....	3
1.5-	Table de refroidissement .....	4
1.6-	Bobineuse .....	4

#### CHAPITRE II : TUBERIE SPIRALE

2.1-	Hall de réception .....	5
2.1.1-	Contrôle visuel .....	5
2.1.2-	Contrôle aux ultra-sons .....	5
2.2-	Machine de soudage et oxycoupage .....	5
2.3-	Cage de formage .....	6
2.4-	Contrôle aux ultra-sons .....	6
2.5-	Oxycoupage au chalumeau .....	7
2.6-	Zône de reverification de contrôle .....	7
2.7-	Zône de réparation et radiographie aux R.X ..	7
2.8-	Epreuve hydrostatique .....	8
2.9-	Double jointing .....	8
2.10-	Contrôle final .....	8
2.11-	Parc de stockage .....	8
2.12-	Soudabilité .....	9
2.13-	Résultats généraux .(X52).....	9
2.14-	Vitesse, intensité et tension de soudage ...	9
2.14.1-	Tension de soudage .....	9
2.14.2-	Intensité de soudage .....	9
2.14.3-	Vitesse de soudage .....	9

#### CHAPITRE III : TUBES SOUDES EN SPIRALE CONFOR- -MEMENT A LA SPECIFICATION A.P.I

3.1-	Objet .....	10
3.2-	BUT .....	10



3.3-	Domaine d'application .....	10
3.4-	Politique .....	10
3.5-	Procédé de fabrication .....	11
3.5.1-	Soudage par résistance électrique .....	11
3.5.2-	Soudage automatique à l'arc immergé .....	11
3.5.3-	Métal .....	11
3.6-	Traitement thermique .....	11
3.7-	Exigences chimiques de l'analyse de coulée .....	12
3.8-	Propriétés physique et essai hydrostatique .....	12
3.8.1-	Essai de traction .....	13
3.8.2-	Essai hydrostatique .....	14
3.9-	Tolérances sur les dimensions .....	14
3.9.1-	Diamètre extérieur .....	14
3.9.2-	Epaisseur .....	14

CHAPITRE IV : DONNEES THEORIQUES DE LA FABRICATION

4.1-	Calcul de l'angle bande-tube .....	15
4.1.1-	Cas général .....	15
4.1.2-	Calcul pour la nuance X52 .....	16
4.1.3-	Calcul pour la nuance X60 .....	16
4.2-	Longueur de soudure par mètre linéaire de tube .....	16
4.3-	Calcul de la longueur fabriquée .....	17
4.3.1-	Exemple: bande de 1700mm .....	17
4.3.2-	Exemple: bande de 1500mm .....	18
4.3.3-	Gain .....	18
4.4-	Mise au mille .....	18

CHAPITRE V : PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS.

EPROUVETTES ET MACHINE DE TRACTION

5.1-	Prélèvement et usinage .....	19
5.1.1-	Oxycoupage .....	19
5.1.2-	Poinçonnage .....	19
5.1.3-	Rabotage .....	19
5.1.4-	Fraisage .....	19

5.2-	Forme et dimensions des éprouvettes .....	19
5.2.1-	Longueur entre repères .....	19
5.2.2-	Longueur calibrée .....	20
5.2.3-	Longueur totale .....	20
5.3-	Machine de traction .....	20

## DEUXIEME PARTIE

### CHAPITRE I : INTRODUCTION DE LA NOTION DE DEFOR- -MATION PLASTIQUE DES METAUX ET ALLIAGES . ECROUISSAGE ET EFFET BAUSCHINGER .

1.1-	Propriétés générales des métaux et alliages.	21
1.1.1-	Considérations générales .....	21
1.1.2-	Elasticité .....	21
1.1.3-	Plasticité .....	21
1.2-	Etude sommaire des monocristaux .....	22
1.2.1-	Anisotropie .....	22
1.2.2-	Mécanisme de la déformation plastique ....	22
1.2.2.1-	Glissement .....	22
1.2.2.2-	Maclage .....	22
1.2.2.3-	Pliage .....	23
1.2.3-	Cisaillement critique .....	23
1.2.3.1-	Loi de SCHMID .....	23
1.2.3.2-	Dislocation .....	24
1.2.4-	Ecrouissage du monocristal .....	24
1.3-	Propriétés mécaniques des agrégats poly-	
	-cristallins .....	24
1.4-	Développement ultérieur de la déformation	
	plastique : effet BAUSCHINGER .....	25

### CHAPITRE II : ETUDE DE LA DEFORMATION PLASTIQUE PAR L'ESSAI DE TRACTION

2.1-	Courbe charge-allongement .....	26
2.2-	Courbe rationnelle de traction .....	27
2.3-	Déformation plastique homogène ... ..	29..
2.3.1-	Ecrouissage .....	29
2.3.2-	Effet Bauschinger .....	30



2.4-	Déformation du tube .....	31
2.4.1-	Cas de la partie de l'échantillon tractionnée .....	31
2.4.2-	Cas de la partie de l'échantillon comprimée .....	32
2.4.3-	Effet global .....	32
2.4.4-	Relation entre longueur comprimée et longueur tractionnée de l'échantillon .....	33

CHAPITRE III : ETUDE DE L'EFFET DAUSCHINGER  
SUR LA NUANCE X52

3.1-	Caractères généraux des essais de traction .. effectués .....	34
3.1.1-	Essais de traction .....	34
3.1.1.1-	Prélèvement sur la bobine .....	34
3.1.1.2-	Prélèvement sur le tube .....	34
3.2-	Analyse chimique .....	35
3.3-	Températures de laminage .....	35
3.4-	Dimensions .....	35
3.5-	Tableaux des résultats .....	36
3.6-	Dispersion des valeurs <del>des valeurs</del> de la limite élastique et de la résistance sur bobine ..	43
3.7-	Dispersion des valeurs sur le tube .....	43
3.7.1-	Limite élastique .....	43
3.7.1.1-	Détermination du coefficient de corrél- -ation .....	43
3.7.1.2-	Droite de régression .....	44
3.7.2-	Résistance à la rupture .....	44
3.8-	Etude des variations par une méthode graphique .....	44
3.8.1-	Limite élastique .....	44
3.8.1.1-	Graphe de E.perpendiculaire à l'axe du tube en fonction de E.à 39° de la direction du laminage .....	44

3.8.1.1.1-	Coefficient de corrélation .....	45
3.8.1.1.2-	Droite de régression .....	45
3.8.1.2-	Graphes de la limite élastique parallèle à l'axe du tube en fonction de la limite élastique parallèle à la direction de laminage .....	45
3.8.2-	Résistance à la rupture .....	45
3.8.2.1-	Graphes de R. perpendiculaire à l'axe du tube en fonction de R. à 39° LE la direction du laminage.	45
3.8.2.1.1-	Coefficient de corrélation .....	45
3.8.2.1.2-	Droite de régression .....	46
3.8.2.2-	Graphes de R. parallèle en fonction de R. parallèle à la direction du laminage .....	46
3.8.3-	Allongement .....	46
3.9-	Calcul des variations moyennes .....	46
3.9.1-	Tableaux des variations .....	47
3.9.2-	Conclusion .....	52
3.10-	Influence du Niobium sur la variation de la limite élastique .....	52
3.11-	Variation de la limite élastique avec le diamètre du tube .....	53

CHAPITRE IV : ETUDE DE L'EFFET BAUSCHINGER  
SUR LA NUANCE X52.

4.1-	Généralités .....	54
4.2-	Dimensions .....	54
4.3-	Composition chimique .....	54
4.4-	Prélèvement .....	54
4.4.1-	Bande .....	55
4.4.2-	Tube .....	55
4.5-	Essais de traction effectués .....	55
4.5.1-	Bande .....	55
4.5.2-	Tube .....	55
4.6-	Tableaux des résultats .....	56
4.7-	Variations moyennes .....	59



4.7.1-	Limite élastique .....	59
4.7.2-	Résistance à la rupture .....	59
4.8-	Variations de la limite élastique avec la nuance de l'acier .....	60
4.9-	Influence de l'épreuve hydrostatique .....	60
4.9.1-	Déroulement de l'épreuve .....	60
4.9.2-	Prélèvement après l'épreuve .....	61
4.9.3-	Résultats .....	61
4.9.4-	Exploitation des résultats .....	62..
	CONCLUSION .....	64
	ANNEXE .....	68

Il m'est très agréable de saisir  
cette occasion pour exprimer toute ma gratitude et  
mes remerciements à tous les professeurs de l'ENPA  
qui ont contribué à ma formation.

Abdelmadjid DJEBARI

## INTRODUCTION

L'oléoduc Haoud El-Hamra -Skikda de diamètre 34 pouces (863,6mm) , en acier X52 , a constitué la première fabrication de la tuberie spirale d'El-Hadjar . Cet oléoduc de 500km de long , d'épaisseur 7,92 à 12,70mm a été fabriqué durant la période juillet 1969 à décembre 1970 .

Le problème qui se pose jusqu'à maintenant est la diminution des propriétés mécaniques lors de la fabrication , connue sous le nom d'effet Bauschinger .

Nous nous sommes orientés dans cette étude à expliquer l'effet Bauschinger et à dégager les paramètres susceptibles de l'influencer lors de la fabrication des tubes , et ceci compte tenu des éléments d'information que nous possédons .

Dans cette optique une description des procédés de fabrication nous a parue nécessaire .

PREMIERE PARTIE

---



CHAPITRE I

LAMINOIR A CHAUD.

Il a pour rôle de transformer, par de gros efforts de compression, les brames en produits plats.

Cette diminution d'épaisseur s'opère d'une manière progressive à l'aide de grosses cages dégrossisseuses.

Le passage d'une brame à une tôle est qui correspond à une réduction de 10 à 1 exige un métal préalablement chauffé pour avoir une forgeabilité suffisante.

Le produit obtenu peut être sous forme de tôle à plat (forte) ou sous forme de bobines.

Les résultats enregistrés correspondent à des tôles fortes de 5 à 20 mm d'épaisseur et 600 à 2000 mm de largeur et à des bobines de 1,8 à 12,7 mm d'épaisseur et 600 à 1350 mm de largeur.

Le laminoir comprend :

1 1 - Un parc à brames :

Celles ci sont refroidies, inspectées, écriquées (au chalumeau) et stockées.

Un pont roulant place la brame à laminier sur une table à rouleaux permettant l'enfournement dans le four poussant.

1 2 - Four poussant : ( schéma 1 )

L'introduction des brames se fait en une ou deux files. Le réchauffage se fait jusqu'à la température de laminage avec un maximum de 1250°C.

Le four comporte cinq zones de chauffage afin d'obtenir une bonne répartition de la température.

A signaler une "régulation" de la marche des brames, c'est à dire l'enfournement d'une brame froide provoque le défournement d'une brame chaude sur la table à rouleaux.

Le transport se fait jusqu'à la laveuse à brame où un jet d'eau à haute pression retire la majeure partie de la calamine formée à la surface de la brame pendant son séjour dans le four.

La brame passe alors devant un laminoir vertical, Edger, qui présente la brame dans l'axe du dégrossisseur.

Le combustible actuellement utilisé est le fuel.

1 3 - Le dégrossisseur : ( schéma 1 )

caractéristiques mécaniques :

- Largeur de table : 2800 mm ,
- Diamètre des cylindres
  - \* d'appui : 1600 mm ,
  - \* de travail : 950 mm ,
- Pression de laminage : 3000 t ,
- Vitesse de laminage : jusqu'à 5,5 m.

Chaque cylindre de travail est entraîné par un moteur à courant continu de 5000 CV .

Le dégrossisseur est un laminoir réversible "quarto". Ainsi la brame peut être laminée dans les deux sens.

Le laminoir comprend quatre cylindres : deux de travail et deux d'appui.

La brame passe entre les deux cylindres de travail dont l'écartement est nettement inférieur à son épaisseur; elle est alors déformée plastiquement.

Les cylindres d'appui servent de support aux deux autres cylindres et encaissent et transmettent aux colonnes du laminoir les énormes efforts du laminage.

A partir de ce "quarto" les processus de fabrication des tôles et des bobines divergent. On s'intéressera par la suite à la fabrication des bobines.

#### Fabrication des bobines :

Compte tenu de l'épaisseur de bobine désirée et jusqu'à une épaisseur programmée, la brame subit sur le "quarto" un certain nombre de passes dans le sens de la longueur. Pendant ces passes, la cage verticale permet de rattraper l'élargissement de l'ébauche en cours de laminage.

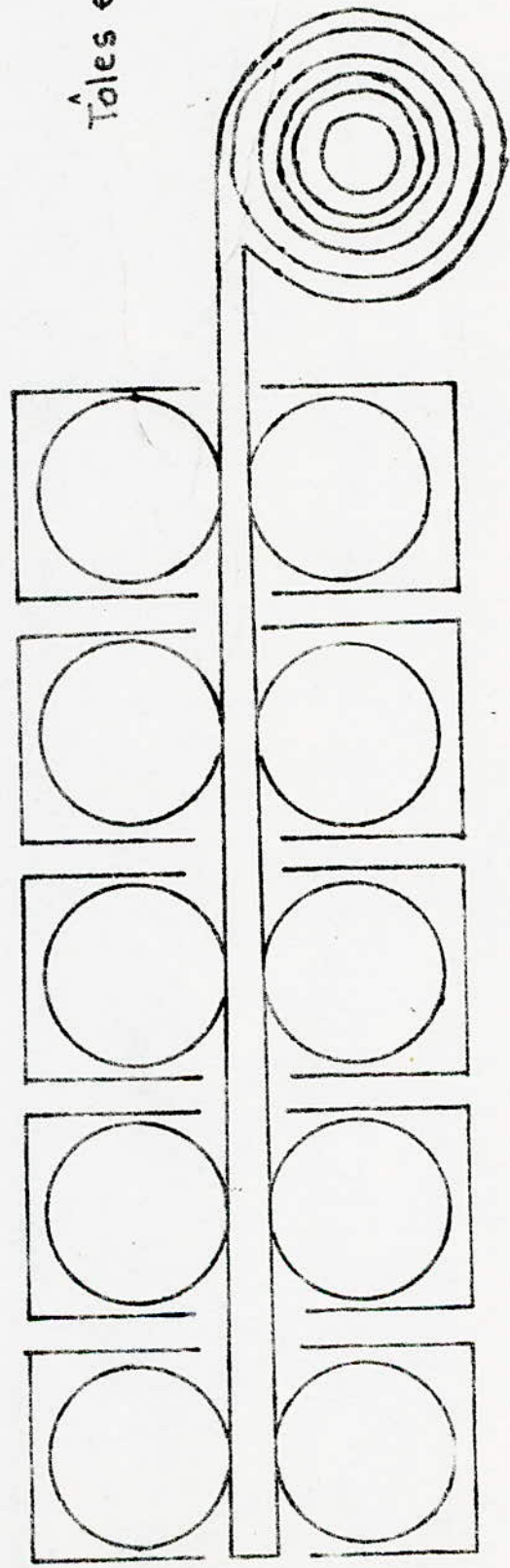
L'ébauche se présente alors devant le train finisseur continu. La tête est coupée, parce que arrondie, elle est inutilisable par le client.

#### 1 4 - Train finisseur continu : ( schéma 2 )

Il comprend cinq cages "quarto" non réversibles.



Tôles en bobines



Cages Finisseuses

Schema 2



L'ébauché est soumise à un laminage supplémentaire de cage en cage . Sa vitesse d'écoulement ira en augmentant proportionnellement. La vitesse de sortie est de : 12,5 m/s.

1.5 - Table de refroidissement :

Le métal passe sur une table de refroidissement rapide par arrosage à jet d'eau à haute pression.

1.6 - Bobineuses :

Leur rôle est d'enrouler le métal autour d'un mandrin. Les bobineuses se trouvent à l'extrémité de la table de refroidissement.

Les bobines sont dirigées :

- Soit vers la ligne de cisailage, refendage,
- Soit vers le laminoir à froid,
- Soit vers la tuberie spirale,
- Soit vers le Hall d'expédition.

Caractéristiques du four poussant :

- Dimension intérieure : 6,3 x 31,5 (m)
- Capacité de réchauffage : 125 t/heure
- Combustible : fuel lourd (ou gaz naturel).

Caractéristiques du train finisseur continu :

- Largeur de table : 1500 mm
- Diamètre des cylindres
  - \* de travail : 700 mm
  - \* d'appui : 1425 mm
- Pression de laminage : 1750 t.

Chaque couple de cylindres de travail est entraîné par un moteur à courant continu de 6000 CV.

## CHAPITRE II

### TUBERIE SPIRALE.

Elle comprend les parties suivantes :

#### 2. 1 - Un Hall de réception,

Les bobines, importées ou produites par la S.N.S, sont stockées afin de subir des contrôles.

##### 2. 1.1 Contrôle visuel :

Celui-ci consiste à vérifier les dimensions des bobines et éventuellement les défauts superficiels.

##### 2. 1.2 Contrôle aux ultrasons :

Les défauts internes sont décelés.

Il existe une machine de préparation des bobines; la tête est rendue droite par oxycoupage.

#### 2. 2 - Machine de soudage et oxycoupage :

Cette machine comprend :

- Un dévidoir pour dérouler les bobines,
- Un replaneur pour empêcher les irrégularités de la bande ,
- Un chalumeau : on fait, en fin de bobine, une coupe droite puis une soudure pour rendre solidaire deux bobines qui se suivent.

Ce travail est assuré par trois opérateurs et afin d'assurer :

- Le guidage de la bande,

- La direction de la tête de soudure,
- La surveillance du soudage.

Les bords de la bande sont cisailés et ceci a une très grande importance pour la soudure ultérieure.

Des rouleaux entraineurs poussent alors la bande vers la cage de formage.

### 2. 3 - Cage de formage :

Elle comprend :

- Des galets combreurs qui permettent d'incurver la bande sur les deux bords,
- La machine de formage : l'angle de formage est calculé en fonction du diamètre du tube à fabriquer et de la largeur de la bande,
- Arc de soudure : on utilise une passe à l'intérieur et une autre à l'extérieur. La vitesse de soudage est fonction de la qualité de soudure.

### 2. 4 - Contrôle aux ultrasons :

\* Soudure : nous avons des défauts du type

- inclusion de laitier
- fissures
- collage
- manque de liaison.

\* Bande

Il y a en outre un refroidissement pour faciliter la propagation des ondes ultrasonores.



2. 5 - Oxycoupage au chalumeau :

Le travail étant continu, on coupe le tube en tronçons suivant le programme de commande.

Exemple : pour le X60 la longueur du tube est de 12,3 m.

2.6 - Zône de vérification de contrôle et soudage :

- Revérification de contrôle
- Nettoyage des tubes
- Reprise du soudage externe.

Contrôle visuel :

- Dimension des tubes
- Reprise des soudures à la main des interruptions laissées par la machine à souder.

2.7 - Zône de réparation et radiographie aux rayons X :

- Soudure à la main
- Sur chaque marquage provoqué par les ultrasons, on fait une radiographie aux RX. Les défauts décelés sont réparés.

Ce contrôle radiographique a permis de déceler les défauts suivants : inclusion gazeuse et de laitier, manque de liaison, et micro-fissures.

2.8 - Epreuve hydrostatique :

Les pressions d'épreuve pour les tubes de dimension 457 mm et au dessous seront maintenues pendant cinq secondes au moins.

Les tubes de 508 mm et au dessus, les pressions d'épreuve seront maintenues pendant 10 secondes au moins.

Les pressions d'épreuve pour les nuances X52 et X60 sont calculées à l'aide de la formule :

$$P = \frac{200 \cdot t \cdot e}{D} \quad \text{arrondie à 1 bar près.}$$

P : pression d'épreuve hydrostatique en bars

t : taux du travail du métal en hectobar qui est égal à un pourcentage de la limite élastique spécifiée et variable avec les dimensions du tube

e : épaisseur minimale en mm

D : diamètre extérieur du tube.

#### 2.9 - Double jointing :

A la demande du client, en l'occurrence la SONATRACH, on prépare les bords extérieurs des tubes (chanfreinage).

#### 2.10 - Contrôle final :

Il est exigé par le client.

Toutes les réparations manuelles subissent une radiographie au RX; de même le début et la fin des tubes.

Après un contrôle visuel qui permet de juger le travail on réceptionne les tubes par lots de 50.

#### 2.11 - Parc de stockage :

Les tubes sont stockés et peints à l'intérieur.

2.12 - Soudabilité :

Lors du soudage du X52, on a utilisé un fil à 1% de Mn d'origine Hoesch de diamètre 4;4,5;5 mm.

Pour le X60 on a utilisé un fil de diamètre 4 mm.

Les contrôles effectués :

- Contrôle automatique de la soudure aux ultrasons
- Contrôle des marquages US automatiques
- Radiographie de tous les marquages et les extrémités du tube.

2.13 - Résultats généraux : (X52)

Epaisseur : 7,92 à 22,7 mm

Largeur de la soudure intérieure : 10,5 à 11,8 mm

Largeur de la soudure extérieure : 15,3 à 16,5 mm

Pénétration intérieure 60 à 75%

Pénétration extérieure 70 à 75% ;

2.14 - Vitesse, Intensité et Tension de soudage :

2.14.1 Tension de soudage :

- X52 U = 27 V

- X60 U = 29 V

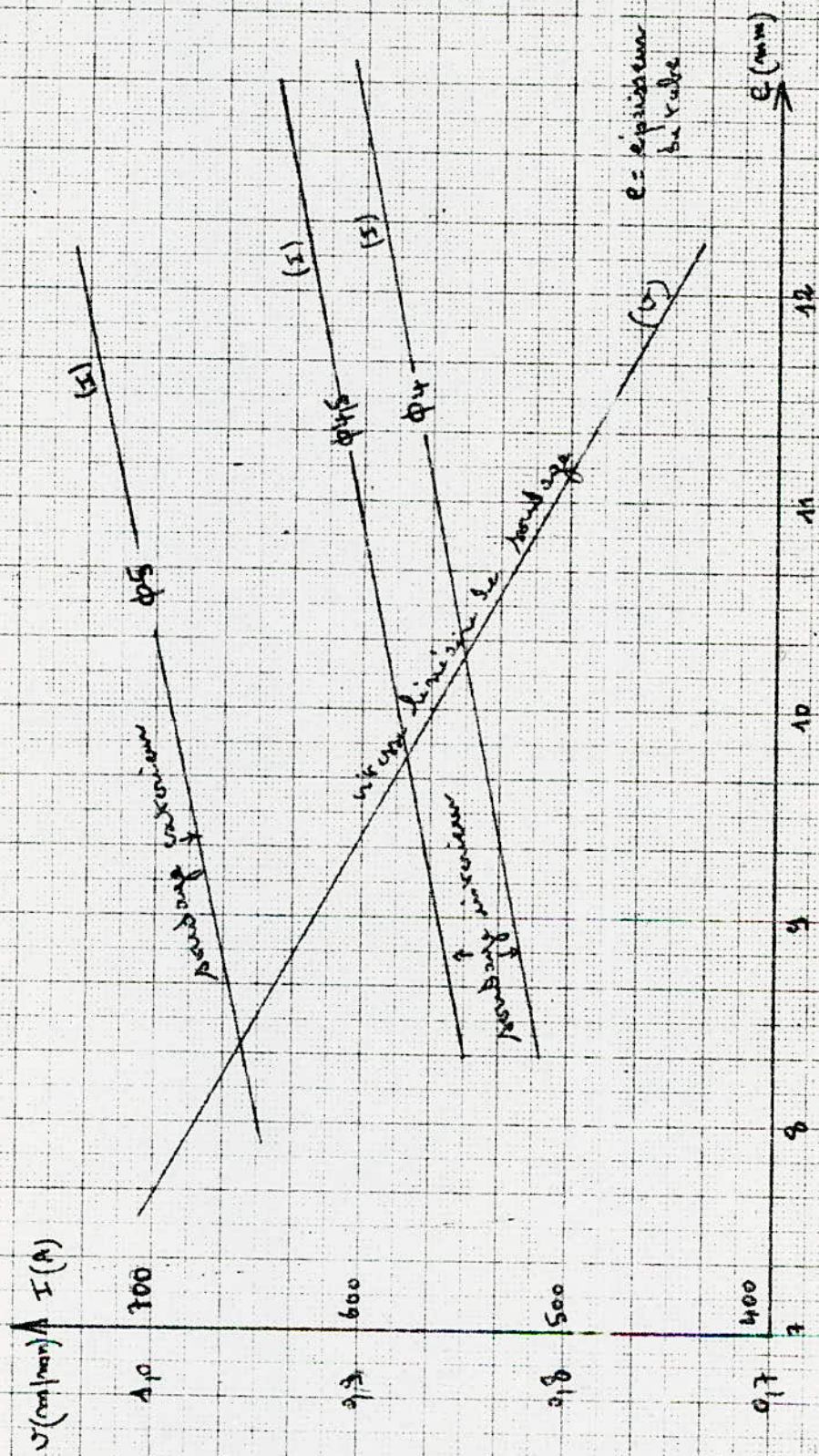
2.14.2 Intensité de soudage :

- X52 I : (Voir graphe)

- X60 I = 820 A

2.14.3 Vitesse de soudage : (Voir graphe).





Réponses de l'exercice. Fabrication X52



CHAPITRE III

---

TUBES SOUDES EN SPIRALE CONFORMEMENT A LA

SPECIFICATION A.P.I

( Institut Américain du Pétrole )

---

3. 1 - Cette spécification est placée sous la juridiction du comité de normalisation des produits tubulaires de l'American Petroleum Institute .
3. 2 - Son but est d'établir une norme pour les tubes de conduites soudés en spirale correspondant aux besoins de transport de gaz , eau et pétrole , dans les industries pétrolières et du gaz naturel .
3. 3 - Domaine d'application
- Les nuances sont A, B , X42 , X46 , X52 , X56 , X60 , X60 , X65 , X70 .
- Les chiffres 42,46 etc... désignent la valeur minimale de la limite élastique de l'acier ; ils sont exprimés dans les unités américaines : p.s.i (pound, square, inch) .
- La composition chimique et certaines propriétés physiques de ces nuances sont soumises à une entente entre l'acheteur et le fabricant .
- 3.4- Politique
- Les spécifications de l'A.P.I sont publiées en vue d'aider à l'obtention des matériaux et des équipements standardisés .
- Ces spécifications n'empêchent pas les acheteurs et les

fabricants d'acheter ou de fabriquer des tubes produits selon des spécifications autres que celles de l'A.P.I.

3. 5- Procédé de fabrication :

Les tubes soudés en spirale fournis d'après cette spécification doivent être fabriqués par l'un des procédés de soudage ci-après :

3.5.1 Soudage par résistance électrique/

La soudure des tubes de nuance B est supérieure subira un traitement thermique après soudage à une température minimale de 538°C où sera traitée de telle sorte qu'il ne reste pas de marténsite non recuite.

3.5.2 Soudage automatique à l'arc immergé utilisant une passe au moins à l'intérieure et une autre au moins à l'extérieur.

3.5.3 Métal :

Les tubes seront en acier martin, acier au four électrique ou acier au convertisseur à l'oxygène (basique).

3.6 - Traitement thermique :

Les tubes de toutes les nuances peuvent être bruts de laminage, normalisés, normalisés et revenus, avoir subi un recuit de détente ou trempés par vieillissement à température sous critique. Les tubes de nuance X peuvent être aussi trempés à l'eau et revenus.

3.7 - Exigences chimiques de l'analyse de coulée :



Nuances	C % max	Mn % max	P % max	S % max	Nb % min	V % min	Ti % min
A	0,21	0,9	0,04	0,05			
B	0,26	1,15	0,04	0,05			
X42	0,28	1,25	0,04	0,05			
X46	0,30	1,35	0,04	0,05			
X52	0,30	1,35	0,04	0,05			
X56	0,26	1,35	0,04	0,05	0,005	0,02	0,03
X60	0,26	1,35	0,04	0,05	0,005	0,02	0,03
X65	0,26	1,40	0,04	0,05	0,005	0,02	
X70	0,23	1,60	0,04	0,05			

Pour chaque réduction de 0,01% au dessous de teneur en carbone maximum spécifiée, une augmentation de 0,05% de manganèse au dessus du maximum spécifiée est permise jusqu'à un maximum égal à 1,45% et cela pour les nuance d'acier allant du X42 au X65 .

### 3. 8- Propriétés physiques et essais hydrostatiques

#### 3. 8.1 Essai de traction :

Le tableau suivant donne la limite élastique et la résistance à la rupture minimales :

Nuance	E min		R min	
	hbar	kgf/mm <sup>2</sup>	hbar	kgf/mm <sup>2</sup>
A	20,7	21,1	33,1	33,8
B	24,1	24,6	41,3	42,1
X42	28,9	29,5	41,3	42,1
X46	31,7	32,3	43,4	44,3
X52	35,8	36,6	45,5 et 49,6	46,4 et 50,6
X56	38,6	39,4	48,9 et 51,7	49,9 et 52,7
X60	41,3	42,1	51,7 et 53,7	52,7 et 54,7
X65	44,8	45,7	53 et 55,1	54 et 56,2
X70	48,2	49,2	56,5	57,7

La première valeur de R est pour les diamètres inférieures à 508 mm et en épaisseur supérieure à 9,52. La deuxième valeur est pour les diamètres supérieures ou égales à 508 mm et en épaisseur plus petite ou égale à 9,52 mm .

3. 8.2 Essais hydrostatiques :

$$P = \frac{200 \cdot t \cdot e}{D}$$

t : pourcentage de E (N%).

Diamètre du tube (mm)	N%
114	60
141	75
168 à 219	75
273 à 457	85
508 et Plus	90

3.9 - Tolérances sur les dimensions :

3.9.1 Diamètre extérieur (D)

D 508 mm  $\pm 0,75 \%$

D 508 mm  $\pm 1,00 \%$  ;

3.9.2 Epaisseur :

Elle est variable selon les dimensions.



CHAPITRE IV

DONNEES THEORIQUES DE LA FABRICATION.

4.1 - Calcul de l'angle bande-tube (ou angle de formation)

Les tôles cisailées à la largeur convenable sont pincées et entraînées dans un dispositif mécanique qui les pousse tangentiuellement dans une boîte inclinée par rapport à l'axe de la tôle avec un angle déterminé pour former le tube spiral.

Une même largeur de bande est capable d'une certaine gamme de diamètres; il suffit de changer l'inclinaison de l'hélice enroulée. Après enroulement le tube est soudé extérieurement et intérieurement par des têtes de soudure à l'arc sous flux. Le formage est continu.

4.1.1 Cas général (voir schéma 3):

Le triangle ABD représente le développement de la partie du tube située à gauche de l'axe  $xx'$ . AB est alors égal à la longueur de la circonférence du tube

$$AB = \pi \cdot \phi$$

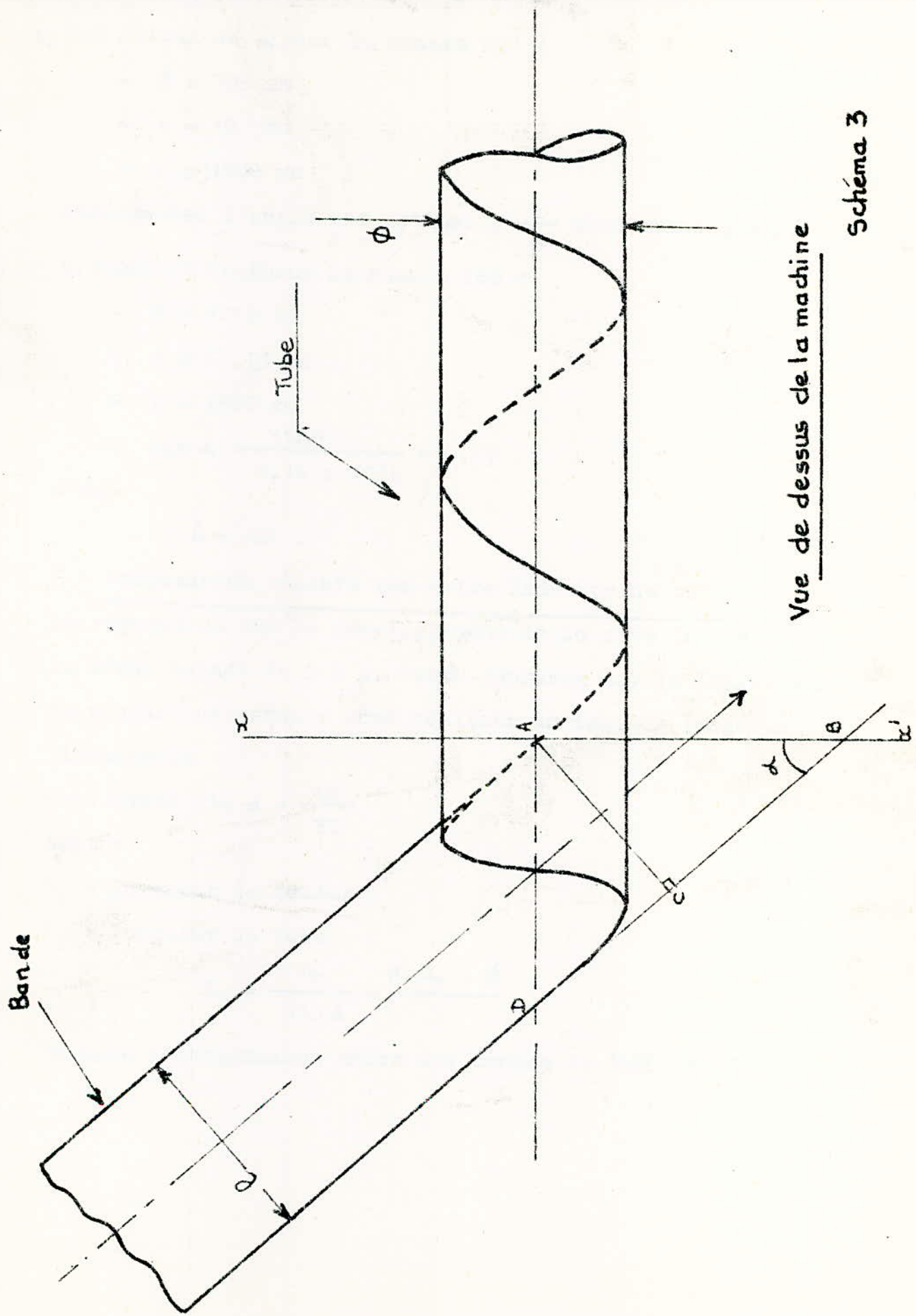
AC = l = largeur de la bande après cisailage

nous avons 
$$\sin \alpha = \frac{AC}{AB} = \frac{l}{\pi \cdot \phi}$$

L'angle bande-tube est égal à :  $\pi/2 - \alpha$

On considère en général que l'on obtient l'angle optimal lorsque :  $l/\phi = 2$

Soit  $\sin \alpha = 0,636$        $\alpha = 39^{\circ}30'$ .



Vue de dessus de la machine

Schéma 3

Pour une même longueur de soudure les longueurs de tube seront (pour  $\phi = 1016$  mm)

$$L_{T1500} = \frac{L_S \cdot l}{\pi \cdot \phi} = L_S \cdot \frac{1480}{3,14 \cdot 1016} = 0,464 L_S$$

$$L_{T1700} = \frac{L_S \cdot l}{\pi \cdot \phi} = L_S \cdot \frac{1680}{3,14 \cdot 1016} \cong 0,526 L_S$$

En utilisant une bande de 1700 mm le gain par rapport à une bande de 1500 mm est de :

$$g = \frac{0,526 L_S - 0,464 L_S}{0,464 L_S} = 13,4 \%$$

#### 4.3 - Calcul de la longueur fabriquée :

Connaissant la vitesse de soudage et le taux d'utilisation des machines (temps d'arc) on peut calculer la longueur de soudure réalisée par une unité de temps.

A l'aide de la relation :

$$L_S = \frac{L_T}{\sin \alpha}$$

cela nous donne :  $L_T = L_S \cdot \sin \alpha = V_S \cdot t \cdot \sin \alpha \cdot A$

$V_S$  : vitesse de soudage

$t$  : temps considéré en minutes

$A$  : taux d'utilisation

$$L_T = V_S \cdot t \cdot A \cdot \sin \alpha$$

##### 4.3.1 Exemple : bande de 1700 mm



$$A = 70 \% \quad V_S = 0,75 \text{ m/mn} \quad t = 24 \text{ heures}$$

$$L_T = 0,75 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 0,70 \cdot \frac{1680}{3,14 \cdot 1016} = 397 \text{ m}$$

soit 33 tubes de 12 m.

#### 4.3.2 bande de 1500 mm

$$A = 70 \% \quad V_S = 0,75 \text{ m/mn} \quad t = 24 \text{ heures}$$

$$L_T = 0,75 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 0,70 \cdot \frac{1480}{3,14 \cdot 1016} = 350 \text{ m}$$

soit 29 tubes de 12 m.

#### 4.3.3 gain

$$g = \frac{397 - 350}{350} = \frac{47}{350} = 13,4 \%$$

#### 4.4 - Mise au mille ( $\frac{\%}{100}$ )

$$\text{- mise au mille machine} = \frac{\text{Poids des bobines consommées}}{\text{Poids des tubes fabriqués}}$$

$$\text{- mise au mille finition} = \frac{\text{Poids des tubes fabriqués}}{\text{Poids des tubes réceptionnés}}$$

PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS . EPROUVETTES  
ET MACHINE DE TRACTION

---

5. 1 - Prélèvement et usinage :

Le prélèvement s'effectue au moyen de l'oxycoupage au chalumeau.

L'échantillon subit alors les opérations suivantes :

5. 1.1 Oxycoupage : on prélève les échantillons au moyen d'un chalumeau .

5. 1.2 Poinçonnage : on donne un numéro de bobine et de programme à l'échantillon.

5. 1.3 Raboutage : la partie oxydée par le chalumeau est enlevée.

5. 1.4 Fraisage : la forme et les dimensions des éprouvettes de traction sont obtenues avec une tolérance de  $\pm 0,1$  mm;

5. 2 - Forme et dimensions des éprouvettes soumises aux essais de traction : (schéma 4 )

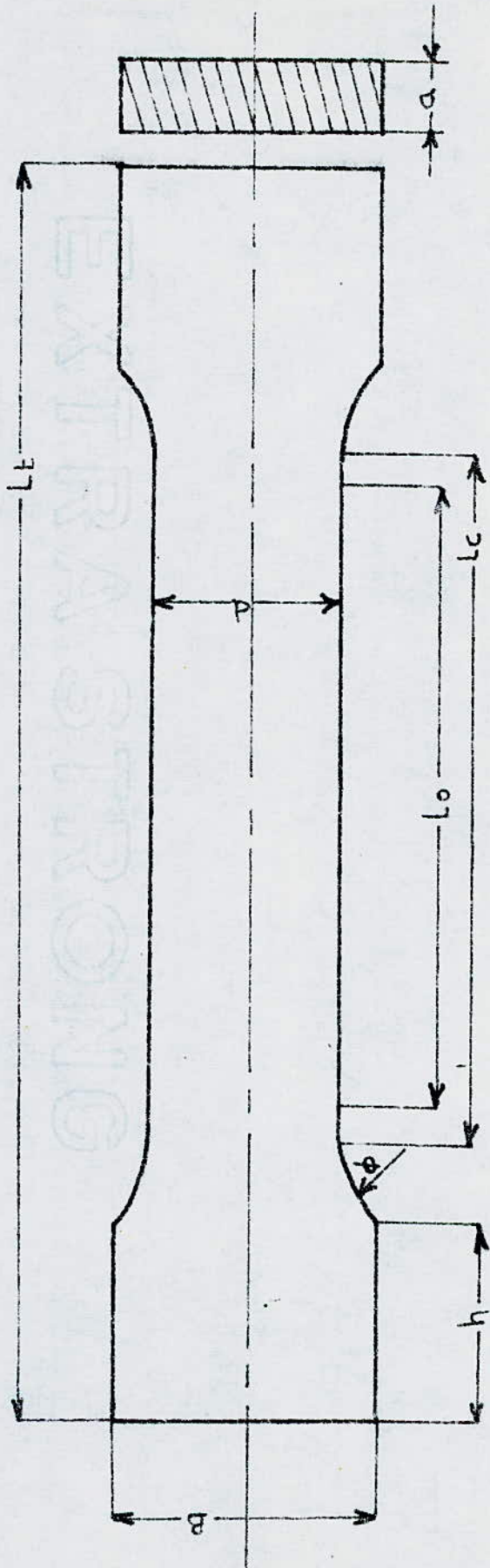
On utilise des éprouvettes rectangulaires ; les dimensions sont les suivantes :

5. 2.1 Longueur entre repères  $L_0 = K \sqrt{S_0}$

$$S_0 = a \cdot d$$

$$K = 5,65$$

5. 2.2 Longueur calibrée :  $L_C = L_0 + d/2$  à  $2d$



Eprouvette de traction

Schéma 4



5.2.3 Longueur totale :  $L_t = L_C + 2d$  à  $4d$   
ou suivant le mode d'attache.

Les autres longueurs étaient généralement :

$$B = 40 \text{ mm}$$

$$h = 2d + 10 \text{ mm}$$

$$\phi = 35 \text{ mm.}$$

La section  $S_0$  était variable mais généralement voisine de  $314 \text{ mm}^2$ .

On a employé une gamme d'épaisseur a variant de 10,5 à 12 mm.

### 5. 3 - Machine de traction :

On a employé des machines de marque allemande Møhr et Federhaff AG ( MANNHEIM) à trois échelles :

12 tonnes

30 tonnes

60 tonnes.

DEUXIEME PARTIE

---

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION DE LA NOTION DE DEFORMATION

### PLASTIQUE DES METAUX ET ALLIAGES

### ECROUISSAGE ET EFFET BAUSCHINGER

---

#### 1.1-Propriétés générales des métaux et alliages

##### 1.1.1 Considérations générales

L'utilisation industrielle des métaux et alliages est justifiée par les propriétés chimiques et physiques. D'autre part la tenacité est requise dans des travaux mettant en jeu des efforts importants.

Enfin les propriétés mécaniques, telles que la dureté, la limite élastique, la résistance, l'allongement... définies de façon conventionnelle permettent de prévoir avec une probabilité suffisante le comportement ultérieur des alliages.

Les propriétés usuelles sont l'élasticité et la plasticité

1.1.2 L'élasticité: c'est la faculté que possède le métal de subir une déformation élevée mais qui cesse à la suppression de l'effort.

1.1.3 La plasticité: c'est la faculté que possède le métal de subir une déformation élevée sans qu'il y ait rupture. Cette dernière propriété se traduit par deux aspects:

- malléabilité (réduction en feuilles minces)
- ductilité (réduction en fils)



1.2- Etude sommaire des propriétés des monocristaux :

1.2.1 Un monocristal est anisotrope (sauf dans les structures cubiques)

exemple : cuivre (Cu)

$E = 6700$  hectobars dans la direction (100)

$E = 19200$  hectobars dans la direction (111)

Dans le domaine plastique cela se traduit par

l'existence de plans et directions privilégiés de déformation .

1.2.2 Mécanisme de la déformation plastique :

Les types principaux sont le glissement (ou translation) la formation de macles et le pliage .

1.2.2.1 Le glissement : c'est une translation d'une partie du cristal par rapport à la partie adjacente selon la direction et le plan de glissement .

On admet que l'amplitude est un nombre entier de mailles du réseau .Donc le plan est reconstitué après le glissement .

1.2.2.2 Formation de macles : nous avons un glissement relatif des couches successives d'atomes et il se produit un rabattement des files d'atomes non contenues dans ces couches .

On aura alors une structure cristalline symétrique par rapport au plan des couches :le cristal s'est dédoublé

à partir d'un plan de maclage en formant une macle.

Les deux modes de déformation, glissement et maclage, peuvent s'associer ou se succéder au cours d'une déformation plastique.

1.2.2.3 Pliage : la géométrie du glissement ne se présente pas toujours aussi simplement. Dans les polycristaux, les divers grains doivent "s'adapter" les uns aux autres, pour, malgré leur déformation, rester exactement en contact suivant leurs joints. Cela n'est pas toujours possible. La situation se complique encore du fait de la rotation du cristal. Celle-ci est rattrapée localement par des glissements sur un autre système qui se traduisent à l'observation par des "bandes de pliage".

Les plans cristallographiques se plient.

1.2.3 Cisaillement critique

1.2.3.1 Loi de SCHMID : si l'on soumet un monocristal à un effort croissant, de direction fixe, la déformation plastique n'augmente rapidement qu'au delà d'une certaine limite. Celle-ci est obtenue lorsque la composante de l'effort suivant la direction de glissement correspond à un certain cisaillement critique.

N.B : le cisaillement critique a une signification parallèle à celle de la limite élastique dans les polycristaux.

La faiblesse de ce cisaillement critique, pour les métaux purs, s'explique par l'existence d'imperfections



dans le réseau cristallin .

Ces imperfections sont des dislocations (certains atomes ne se trouvent pas au lieu qu'ils devraient régulièrement occuper ) .

Il existe aussi des défauts ponctuels (lacune, interstice) .

#### 1. 2.3.2 Dislocation :

Cette imperfection est linéaire et supposée mobile dans le réseau. La résistance à vaincre par le cisaillement est celle qui s'oppose au déplacement d'une imperfection linéaire dans le plan de glissement.

La perturbation de la structure que constitue un joint de grains peut être représentée à l'aide d'assemblage de dislocation.

#### 1. 2.4 Ecrouissage du monocristal :

Il y a écrouissage quand la composante de l'effort suivant la direction de glissement, c'est à dire le cisaillement au sens de Schmid, continue à croître au delà du cisaillement critique. Le glissement ne se poursuit en général que dans ce cas.

#### 1. 3 - Propriétés mécaniques des agrégats polycristallins :

Sous efforts croissants les déformations plastiques s'étendent à un nombre de cristaux de plus en plus grand. La limite d'élasticité est atteinte dans la région où tous les cristaux sont touchés. Elle dépasse celle du monocristal parce que les cristaux diversement orientés



opposent leur résistance au glissement.

Les joints de grains se comportent comme des squelettes plus résistants que les cristaux eux-même. Dans les aciers, les déformations d'ensemble se manifestent d'abord suivant des bandes de glissement, parfois visible sur la surface.

1. 4 - Développement ultérieur de la déformation plastique :  
effet Bauschinger

Les déformations plastiques s'accompagnent d'une orientation des cristaux qui tend à égaliser leurs résistances au glissement sous l'effort qui produit ces déformations.

Ces déformations plastiques entraînent également un écrouissage . Ce dernier est une modification que subit un métal par suite d'une déformation plastique permanente et d'où résulte une variation de ses propriétés.

L'écrouissage s'accompagne d'un net effet Bauschinger, c'est à dire qu'un métal écroui par traction par exemple voit dans la direction de cette traction croître sa limite d'élasticité à la traction et décroître sa limite d'élasticité à la compression (signalé la première fois en 1881).

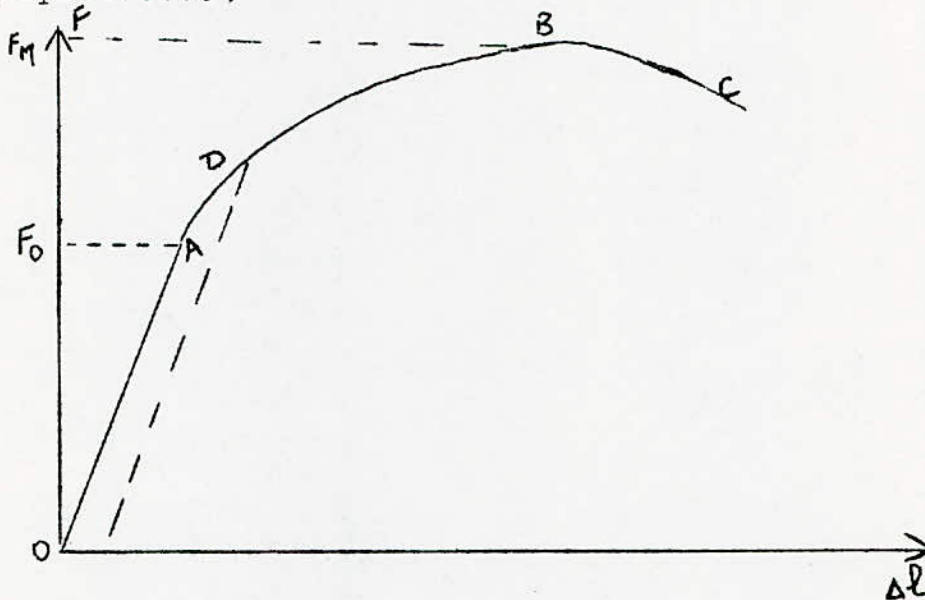
Ainsi lorsqu'on essaie en compression un métal écroui par traction, la limite élastique est abaissée.

CHAPITRE II

Etude de la déformation plastique par  
l'essai de traction

---

2.1. Au cours d'un essai de traction ,la courbe enregistré  
donne la charge  $F$  en fonction de l'allongement de  
l'éprouvette ;



La courbe charge-allongement présente les zones suivantes:  
-la partie OA de la courbe correspond à la déformation  
élastique .

La pente est reliée au module d'Young

-la partie AB est la zone de déformation plastique.

- La partie BC correspond à la chute ;la rupture s'obtient  
au point C.

Le point A correspond à la limite élastique proportionnelle

Le point D correspond à la limite d'élasticité conven-

-tionnelle; elle est égale à :

Charge nécessaire pour produire un allongement de 0,2%

Section initiale

ceci pour les métaux ne présentant pas de discontinuité marquée au point A.

Les caractéristiques conventionnelles de traction sont :

- la limite d'élasticité E (au point A) :

$$E = \frac{F_0}{S_0}$$

E en daN/mm<sup>2</sup>

S<sub>0</sub> : section initiale de l'éprouvette en mm<sup>2</sup>

F<sub>0</sub> : charge en daN

- la résistance à la traction : c'est le maximum de la charge au point B.

$$R = \frac{F_M}{S_0} \quad R \text{ en daN/mm}^2$$

- l'allongement relatif total après rupture :

$$A \% = \frac{L_C - L_0}{L_0}$$

L<sub>0</sub> : longueur initiale de l'éprouvette

L<sub>C</sub> : longueur de l'éprouvette après rupture.

## 2.2 - Courbe rationnelle de traction :

On rapporte à chaque instant la charge appliquée F à la section instantanée de l'éprouvette S.

La contrainte est alors :



$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{\text{Charge}}{\text{Section de l'éprouvette à chaque instant}}$$

En admettant qu'au cours de la déformation plastique le volume est conservé :

$$S_0 \cdot L_0 = S \cdot L = S \cdot (L_0 + L)$$

$$S = \frac{S_0 \cdot L_0}{L_0 + L} = \frac{S_0}{1 + L/L_0} = \frac{S_0}{1 + e}$$

$e = L/L_0 =$  allongement relatif conventionnel à un instant donné.

L'ordonnée de la courbe rationnelle est :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \cdot (1 + e)$$

L'allongement relatif élémentaire à considérer est :

$$\frac{dL}{L} \text{ et non } \frac{dL}{L_0}$$

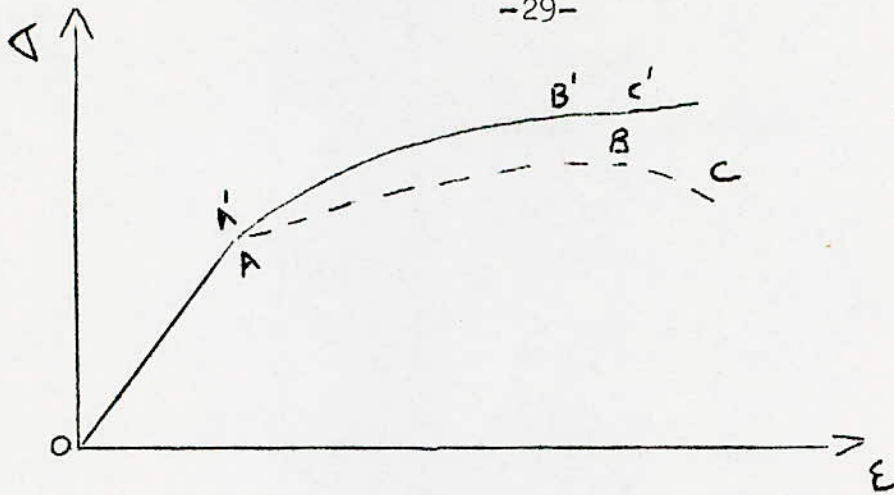
l'allongement relatif total est :

$$\int_{L_0}^{L_0 + \Delta L} \frac{dL}{L} = \text{Log} \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \text{Log} \frac{S_0}{S} = \text{Log} (1 + e)$$

$\xi = \text{Log} (1 + e)$  est l'abscisse de la courbe rationnelle

Allure de la courbe rationnelle :

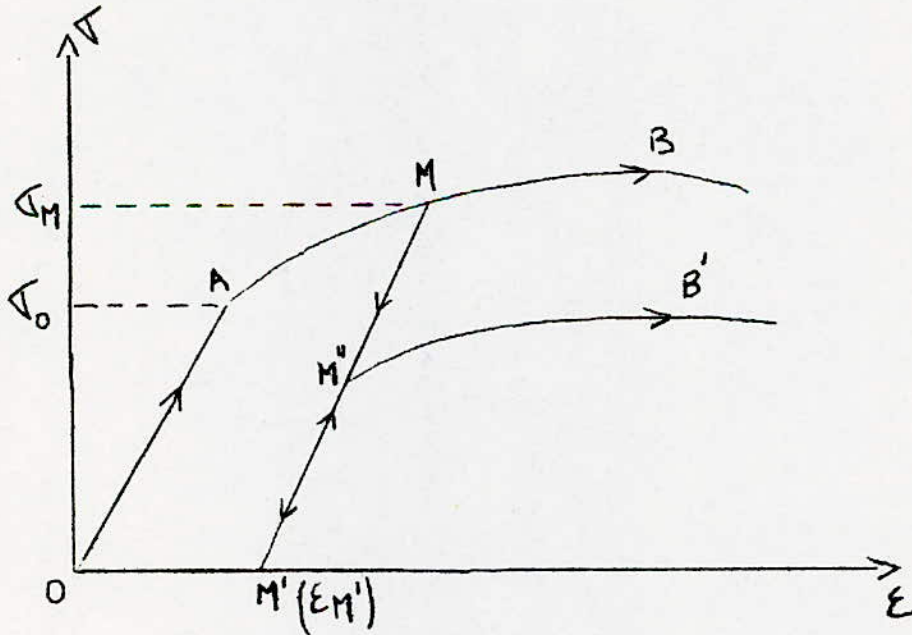
$$\sigma = f(\xi) :$$



La courbe présente une partie rectiligne  $OA'$  pratiquement confondue avec  $OA$ , puis une partie d'allure parabolique  $A'B'C'$  située au dessus de la courbe  $ABC$ .

### 2.3 Déformation plastique homogène

#### 2.3.1 Ecrouissage



Reprenons la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$ .

Au delà du point A commence la déformation plastique homogène , permanente , à volume constant .

En augmentant la contrainte au delà du point A , et si arrivé au point M on supprime cette contrainte , on observe une décharge élastique  $MM'$  parallèle à OA avec une contraction  $\epsilon_M$ . Inversement si en  $M'$  on rétablit la contrainte , il faut alors appliquer une contrainte supérieure à  $\sigma_M$  pour obtenir une nouvelle déformation plastique ;  $\sigma_M$  est la nouvelle limite d'élasticité du métal écroui en M .

Au delà du point M on suit la courbe AMB .

### 2.3.2 Effet Bauschinger

En pratique , on ne peut caractériser l'écrouissage par la valeur de la limite d'élasticité que si le mode de sollicitation reste le même . S'il change l'écrouissage n'est plus le même par suite de l'effet Bauschinger . Ainsi si à une traction on fait succéder une compression on observe une nouvelle limite d'élasticité en compression notablement plus faible . Elle le sera d'autant plus que la déformation initiale était elle même faible . Exemple : la nouvelle limite en compression sera en  $M''$  pour un métal ayant une déformation permanente  $\epsilon_M'$  obtenue par traction et la courbe sera  $M''M'$  .

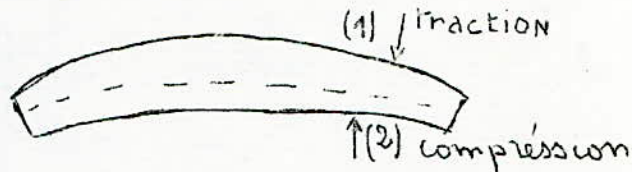
N.B : dans le cas de la compression la courbe enregistrée est la même que celle de l'essai de traction mais en signe moins ( - ) .



## 2.4- Cas de la déformation du tube

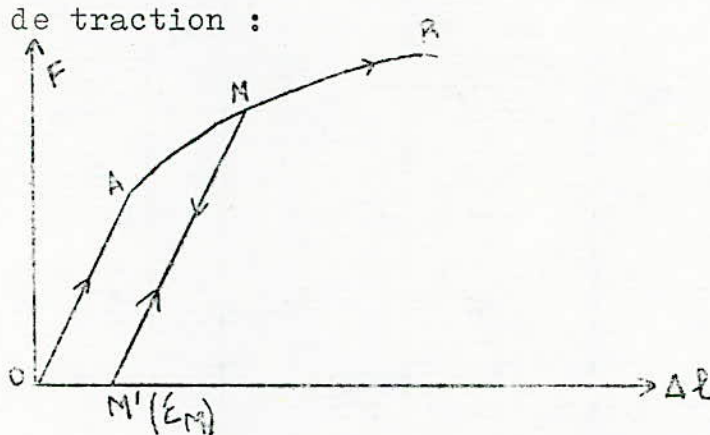
un échantillon prélevé sur toute l'épaisseur du tube présente deux parties essentielles de déformation :

- une partie supérieure (1) qui a subit une traction
- une partie inférieure (2) qui a subit une compression



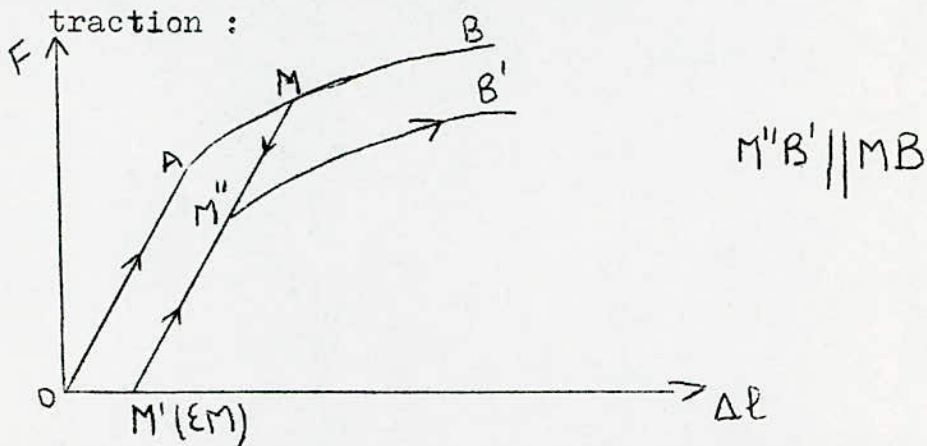
Remarque : après prélèvement l'échantillon est dans un état de contrainte un peu plus faible que sur le tube, mais néanmoins la proportion de contrainte (1) et (2) reste la même.

### 2.4.1 Cas de la partie supérieure (1) soumise à l'essai de traction :



L'échantillon prélevé présente une déformation permanente ( $\epsilon_M$ ). Si on soumet cette partie à l'essai de traction, la courbe décrite sera M'MB avec une limite élastique en M qui est due à l'écrouissage du métal et qui est supérieure à celle représentée par A : c'est le phénomène de consolidation.

2.4.2 Cas de la partie inférieure (2) soumise à l'essai de



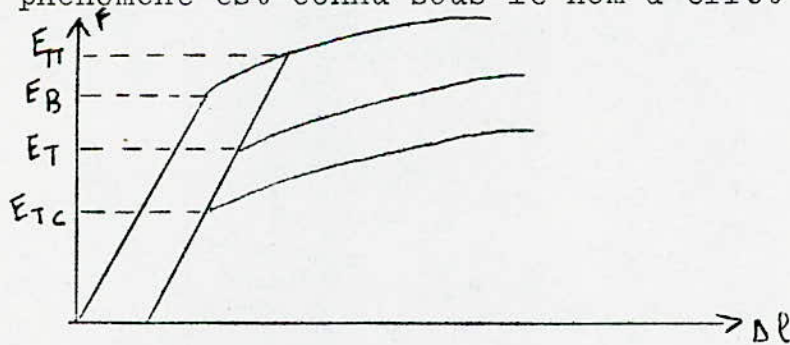
L'échantillon prélevé présente une déformation permanente

( $\epsilon_M$ ). Si on soumet cette partie à l'essai de traction, la courbe décrite sera  $M'M''B'$  avec une limite élastique en  $M''$  inférieure à celle due à l'écroutissage du métal.

2.4.3 Effet global :

Sur l'échantillon nous aurons une nouvelle limite élastique plus faible que celle due à l'écroutissage du métal.

Ce phénomène est connu sous le nom d'effet Bauschinger.



$E_B$  = limite élastique sur la bande.

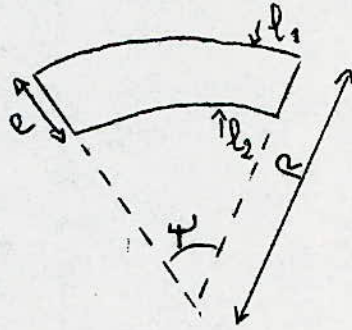
$E_{TT}$  = limite élastique de la partie du tube en traction.

$E_{Tc}$  = limite élastique de la partie du tube en compression.

$E_T$  = limite élastique sur le tube.

$$E_T < E_B$$

2.4.4 Relation entre la longueur compressée (2) et la longueur tractionnée (1) sur un échantillon :



$$l_1 = R\psi$$

$$l_2 = (R - e)\psi$$

$$R = \frac{508}{2} = 254 \text{ mm}$$

$$e = 10 \text{ mm}$$

pour la nuance X52

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{244}{254} = 0,96$$

$$l_2 = 96\% l_1 ;$$

$$R = 508 \text{ mm}$$

$$e = 11,13$$

pour la nuance X60

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{496,87}{508} = 0,98$$

$$l_2 = 98\% l_1$$



CHAPITRE III

ETUDE DE L EFFET BAUSCHINGER SUR

LA NUANCE X52

---

3. 1- Caractères généraux des essais de traction effectués

3. 1.1 Essais de traction :

les essais de traction sont effectués sur des éprouvettes d'acier de coulées différentes . D'autre part on a essayé de prélever des échantillons sur le tube au voisinage de ceux qui ont servi à l'essai de traction de la bobine .

3. 1.1.1 Prélèvement sur bobine :

il est effectué généralement au milieu de la bobine suivi d'un raboutage ; on a prélevé les éprouvettes dans trois directions différentes :

- parallèle à la direction de laminage
- à 39° de la direction de laminage
- perpendiculaire à la direction de laminage

3. 1.1.2 Prélèvement sur le tube :

il s'effectue essentiellement dans deux directions :

- longitudinale à l'axe du tube
- perpendiculaire à l'axe du tube .

3. 2- Analyse chimique

La composition chimique est obtenue par une analyse spectro-photométrique . Elle donne généralement :

C%	Mn%	Si%	P%	S%	Al%
0,14-0,20	1,12-1,36	0,19-0,28	0,013-0,031	0,09-0,03	0,02-0,05

Il est à noter que le carbone équivalent (C.Eq) est calculé selon la formule empirique utilisée par les laboratoires de la S.NS :

$$\%C.Eq = \%C + \%Mn/6$$

### 3. 3-Températures de laminage

Les températures de fin de fin de laminage (T.F.L) prises à la sortie de la dernière cage finisseuse , les températures de bobinage (T.B) prises après refroidissement par les sections d'eau et les variations correspondantes ( T) sont données à titre d'information .

Ces paramètres sont très importants car ils ont une influence directe sur la structure des grains .

### 3. 4-Dimensions

\*bobines : la largeur est égal à 1500mm

l'épaisseur est de : 10mm

\*tubes : le diamètre est égal à 508mm

l'épaisseur restant constante .

### 3.5-Tableaux des résultats

Les résultats des essais de traction sont consignés dans les tableaux (1) .

Les éléments chimiques : C, Mn , Si , S , P , Al , Nb , C.Eq. ont été respectivement multipliés par 100 , 100 , 100 , 1000 , 1000 , 1000 , 1000 , et 100 .



Coulter No.	ROBINES No.	TEMPERATURE			ANALYSE CHIMIQUE							ESSAIS ROBINES			ESSAIS TUBES			
		TEL. °C	T.B. °C	AT. %	C. mg	Mn. mg	Si. mg	S. mg	P. mg	Al. mg	Nb. mg	C. mg	R. K/g/min	E. K/g/min	A. %	R. K/g/min	E. K/g/min	A. %
2842	604131	310	675	235	15	128	13	19	31	29	32	267	71.568 22.570 I - 57.3	44.7 44.0 43.0	28.1 18.1 26.3	I - 58.4 53.1	39.1 38.5	32.5
2825	604133	300	665	235	15	128	22	23	31	51	30	377	58.7 59.0 50.3	46.4 46.2 47.6	26.8 28.1 32.3	55.6 56.0	49.4 49.1	32.1
2853	604134	235	655	240	15	129.5	13	10	11	29	40	342	58.3 58.1 60.5	43.3 45.4 50.4	26.8 29.3 28.1	54.1 53.7	49.3 39.2	34.1
2027	604135	235	665	230	16	122	21	18	18	24	26	363	53.7 53.6 54.5	41.6 44.1 45.1	30.5 30.1 26.1	51.7 52.7	47.2 37.2	39
2322	602287	310	640	270	18	128	24	11	13	38	32	223	60.5 53.2 61.0	47.3 47.4 51.8	25.0 23.3 28.8	58.5 58.6	45.5 46.1	32
2840	604138	275	655	220	16	136	29	12	21	26	40	386	53.3 53.9 62.2	48.6 48.2 48.3	28.3 31.7 28.1	57.0 56.0	43.3 43.3	30.1
4086	603208	270	650	220	13	122	26	32	26	31	34	495	56.8 55.8 55.8	44.3 43.6 45.2	30.7 30.7 28.4	51.7 52.0	47.5 38.7	33



colonne 1 (note)

COULEES No	BOBINES No	TEMPERATURE				ANALYSE CHIMIQUE							Bq	ESSAIS - BOBINES			ESSAIS - TUBES		
		TFL	TB	ΔT	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	R		E	A	R	E	A	
					x100	x100	x1000	x1000	x1000	x1000	x1000	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	%	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	%		
4170	604200	895	675	220	16	114	87	13	24	16	34	35	11.56,2 35.56,4 1.57,1	44,2 43,3 44,0	30,5 29,9 29,2	L 54,7 T 54,0	43,4 41,8	30,6	
4190	604184	885	660	225	17	112	85	13	17	36	34	35,6	54,3 55,4 55,2	43,8 41,6 42,2	25,0 28,1 24,3	55,0 54,3	40,7 37,4	33,3	
4222	604201	895	665	230	18	121	87	13	24	39	37	38,1	58,6 53,1 53,2	44,8 48,1 46,1	26,3 26,3 28,1	55,2 50,5	37,7 37,3	30,6	
4234	514334	325	690	365	16,5	116	25	13	26	37	26	35,8	60,8 61,7 63,1	48,7 50,0 49,4	29,3 28,1 26,8	54,8 54,7	42,7 40,7	33,3	
4254	512173	315	660	345	16,5	116	22	11	21	23	34	37,5	58,4 60,1 61,2	48,1 46,4 51,2	24,2 26,3 26,2	54,3 54,5	40,1 41,4	30,6	
4260	512183	880	645	235	15	116	22	9	18	26	28	34,0	56,4 55,3 57,1	44,0 45,1 48,3	28,1 30,5 28,1	52,2 52,4	33,9 38,5	33,3	
4295	512219	905	650	255	17	117	24	10	20	43	2,3	36,5	59,3 53,0 53,1	46,6 44,8 46,2	28,1 31,7 29,3	56,1 55,8	42,4 33,4	38,5	



Colleur 1 (white)

COULEES N°	BOBINES N°	TEMPERATURE			ANALYSE CHIMIQUE							ESSAIS - BOBINES			ESSAIS - TIGES			
		TEL	TB	DT	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	U	R	E	A	R	E	A
					x100	x100	x100	x1000	x1000	x1000	x1000	x1000	Kg/mm <sup>2</sup>	Kg/mm <sup>2</sup>	%	Kg/mm <sup>2</sup>	Kg/mm <sup>2</sup>	%
4315	51434	910	685	255	14	118	17,5	3	20	32	36	33,6	H. 54,4 32. 54,3 I. 54,2	40,6 48,4 44,4	32,1 31,3 3,9	L. 58,2 I. 57,7	38,5 37,7	39,0
4305	51525	830	685	255	17	185	22	11	20	40	38	37,8	61,4 61,3 65,1	59,1 59,1 53,1	32,1 38,0 33,2	57,8 57,8	44,6 43,2	30,6
4349	604190	900	675	225	21	124	23	10	17	36	26	47,6	55,8 55,8 55,4	43,3 43,0 43,2	28,1 32,5 24,4	53,1 53,4	40,4 37,3	34,6
4353	513293	305	650	255	18,5	123	26	11	23	41	40	40	64,4 64,6 63,4	43,1 50,3 48,1	26,8 24,4 24,4	53,4 53,4	43,3 33,3	38,0
4363	514317	870	635	235	16,2	125,5	25	10	17	36,5	40	37,6	60,7 53,8 60,4	47,5 48,3 51,2	28,4 26,1 26,1	55,5 56,1	44,3 42,8	28,2
4373	514337	885	630	255	18	122	22	7	23	33	31	38,3	63,1 63,7 64,4	43,7 48,3 52,3	26,8 28,1 24,4	56,2 56,0	42,8 47,4	30,6
4406	515352	905	670	235	17	128	26	13	18	23	40	38,3	55,8 58,3 58,2	43,7 45,0 46,5	23,3 23,3 23,3	51,1 53,5	47,8 59,2	32,3



Tableau 1 (suite)

COULEES N°	BOBINES N°	TEMPERATURE				ANALYSE CHIMIQUE							ESSAIS - BOBINES				ESSAIS - TUYAUX			
		TELE	T.B	ΔT	C	Mn x100	Si x100	S x1000	P x1000	Al x1000	Nb x1000	V x100	R kg/mm <sup>2</sup>	E kg/mm <sup>2</sup>	A %	R kg/mm <sup>2</sup>	E kg/mm <sup>2</sup>	A %		
4440	515305	870	650	220	16	127	24	15	17	33	28	371	54,0 39,5 53,0 L - 55,2	4412 4217 4616	23,6 30,7 28,4	L 53,2 T 53,1	4418 371	23,3		
4448	515378	880	645	235	16	138	21	11	14	32	22	330	57,1 56,2 53,5	4412 4514 4318	28,4 28,4 23,9	54,5 54,2	4423 373	33,3		
4518	601330	850	660	130	20	143	22	15	12	21	30	338	58,6 55,8 55,2	4317 4518 4218	30,5 23,3 28,1	54,8 54,6	36,8 36,8	33,3		
4551	515334	325	630	235	13	119,5	28	9,5	17	30,5	33,5	377	59,6 60,1 64,4	4414 4513 4818	23,3 23,3 26,8	57,5 51,5	380 361	360		
4576	601373	915	660	255	17	124	27	17	14	34	33	376	54,4 54,6 54,3	4413 4516 4212	30,5 23,3 30,5	53,2 53,8	4417 371	396		
4532	604206	875	665	210	16	112	28	8	18	40	26	346	55,9 55,1 54,3	4213 4214 4412	32,9 32,3 25,6	54,3 53,3	4412 381	306		
4601	606098	880	655	225	18	136	23	20	20	42	42	426	61,8 61,1 64,6	443 43,6 59,5	20,7 20,7 20,7	55,8 56,0	443 378	306		

100



Caldeira 1 (suite)

COULEES No	BOBINES No	TEMPERATURE			ANALYSE CHIMIQUE							C %	ESSAIS - BOBINES			ESSAIS - TUBES		
		T.FEL	T.B	ΔT	C x100	Mn x100	Si x100	S x1000	P x1000	Al x1000	Nb x1000		R Kg/mm <sup>2</sup>	E Kg/mm <sup>2</sup>	A %	R Kg/mm <sup>2</sup>	E Kg/mm <sup>2</sup>	A %
4653	602282	320	700	220	18	124	25	14	15	31	50	38,6	11-57,8 32-58,2 1-58,7	45,2 44,7 45,3	30,5 29,3 25,6	59,5 57,6	37,8 35,8	36,0
5022	608123	895	665	230	18	123	24	9	13	31	33	32,5	69,7 60,3 60,4	47,6 45,6 47,5	27,6 27,3 23,3	56,1 56,3	44,4 40,0	29,3
5058	609286	880	645	235	15	121	24	10	13	44	32	35,1	69,0 61,4 63,0	43,9 51,3 55,1	28,4 30,7 27,7	58,0 58,0	45,6 43,5	29,3
5063	608200	900	650	250	18	116	25	14	14	35	28	39,3	58,3 58,3 58,4	46,6 48,2 50,2	28,4 28,3 27,3	56,2 55,6	41,0 39,4	29,0
5075	608097	890	630	260									61,4 61,7 58,3	45,3 47,5 48,4	22,9 26,1 23,3	58,2 59,2	42,9 42,5	29,3
5078	608105	905	650	255	17	115	23	13	17	47	31	36,1	57,5 57,0 58,4	44,7 44,7 47,3	29,6 39,7 26,1	56,0 55,6	43,2 39,0	22,6
5084	609246	905	670	235	17	123	23	16	18	42	50	37,5	57,0 57,5 57,3	44,2 44,4 46,1	29,6 39,7 25,0	43,3 51,1	38,0 37,7	30,6



Calculus 1 (notes)

COUPLER NO	ROBINES NO	TEMPERATURE					ANALYSE CHIMIQUE										EQ	ESSAIS - ROBINES				ESSAIS - TUBES			
		T.F.L	T.R	ΔT	C x100	Mn x100	Si x100	S x1000	P x1000	Al x1000	Nb x1000	C x1000	R kg/mm <sup>2</sup>	E kg/mm <sup>2</sup>	A %	R kg/mm <sup>2</sup>		E kg/mm <sup>2</sup>	A %						
5094	609238				16.7	108.5	16	14.5	22.5	47.5	34.5	37.1	11.5	57.3	45.6	37.7	59.3	38.5	29.3						
					35	56.6		45.4	26.4				35	56.6	45.4	26.4	59.3	38.5	29.3						
					58.2			43.3	28.4				58.2		43.3	28.4									
5098	603247	845	645	250	18	13.1	18	16	8.1	5.2	4.3	33.8		58.7	45.4	32.7	7.4	49.3	33.3						
					58.4			44.8	26.1				58.4		44.8	26.1									
					58.2			45.3	30.7				58.2		45.3	30.7									
5200	708141	870	625	245	17	13.2	25	18	16	4.1	4.0	38.0		60.8	50.6	26.1	53.7	44.0	36.0						
					58.8			51.0	25.1				58.8		51.0	25.1									
					58.4			52.0	28.4				58.4		52.0	28.4									
5216	708118	880	600	280	16	12.5	27	18	18	1.8	3.8	26.8		60.7	43.4	28.4	61.2	48.8	32.0						
					59.4			48.7	26.4				59.4		48.7	26.4									
					59.7			50.2	28.3				59.7		50.2	28.3									
5245	704123	830	640	250	18	11.3	28	18	20	5.2	3.3	37.8		63.7	57.7	25.6	57.1	44.7	32.4						
					62.6			47.7	26.1				62.6		47.7	26.1									
					61.7			43.7	26.8				61.7		43.7	26.8									
5246	706154	830	620	270	18	10.6	24	13	11	3.1	3.2	37.3		53.3	47.8	28.4	59.5	48.6	32.4						
					53.8			42.7	27.3				53.8		42.7	27.3									
					61.2			52.0	26.1				61.2		52.0	26.1									
5248	706181	830	580	310	15.5	12.5	26	13	13	2.8	3.5	35.1		58.8	47.3	28.4	62.1	50.0	32.0						
					56.2			45.6	25.0				56.2		45.6	25.0									
					59.7			50.3	20.5				59.7		50.3	20.5									



Colbeur 1 (suite)

COULEES No	ROBINES No	TEMPERATURE				ANALYSE CHIMIQUE											ESQ.	ESSAIS - ROBINES				ESSAIS - TUBES				
		T.F.L	T.B	ΔT	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	R	E	A	R		E	A							
					x100	x100	x100	x1000	x1000	x1000	x1000	x1000	x1000	x1000	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	%	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>2</sup>	%						
5266	706110	310	580	330	16	103	2.1	12	16	2.1	3.1	34.1		58.8	53.4	60.2		43.6	43.7	51.1	22.7	58.0	57.4	46.1	42.1	32.0
5267	706124	880	600	280	16	115	2.5	13	15	3.5	2.5	35.1		58.3	53.2	60.2		46.7	46.3	51.0	22.7	53.5	53	48.6	44.1	30.6
5300	706140	830	640	250	20	122	2.8	0.8	17	3.8	3.7	40.3		64.5	59.6	60.3		51.0	50.4	54.5	23.6	53.5	52.5	44.0	42.8	34.1
5333	706143	335	630	305	15	119	2.3	2.0	2.0	2.5	2.6	33.6		55.0	56.5	57.3		46.1	47.5	49.8	23.6	55.2	54.7	44.1	43.6	32.0



### 3.6-Dispersion des valeurs de la limite élastique et de la résistance à la rupture sur la bobine

Les trois valeurs de E. et de R. ne présentent pas une grande variation relative entre elles. Cette variation est essentiellement due à l'orientation des grains par laminage, à la structure des grains et aux inclusions chimique et gazeuses.

### 3.7-Dispersion des valeurs sur le tube

#### 3.7.1 Limite élastique : (graphe 1)

les valeurs de E. dans le sens longitudinal sont plus grandes que celles correspondant au sens perpendiculaire. L'explication est que la direction longitudinale est bien moins déformée que la direction perpendiculaire; l'effet Bauschinger est moins marqué parallèlement à l'axe du tube que perpendiculairement. Nous déterminerons par la suite le coefficient de corrélation entre ces deux valeurs et la droite de régression par la méthode des moindres carrés. (voir annexe)

#### 3.7.1.1 Coefficient de corrélation : (voir annexe)

$$\rho = \sin \frac{\pi}{2} \left( \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right) \quad \text{avec } N_1 = (1) + (3) \text{ et } N_2 = (2) + (4) ;$$

- (1) = nombre de points de la partie (1)
- (2) = nombre de points de la partie (2)
- (3) = nombre de points de la partie (3)
- (4) = nombre de points de la partie (4)

dans notre cas : (1)=18 ; (2)=3 ; (3)=22 ; (4)=4

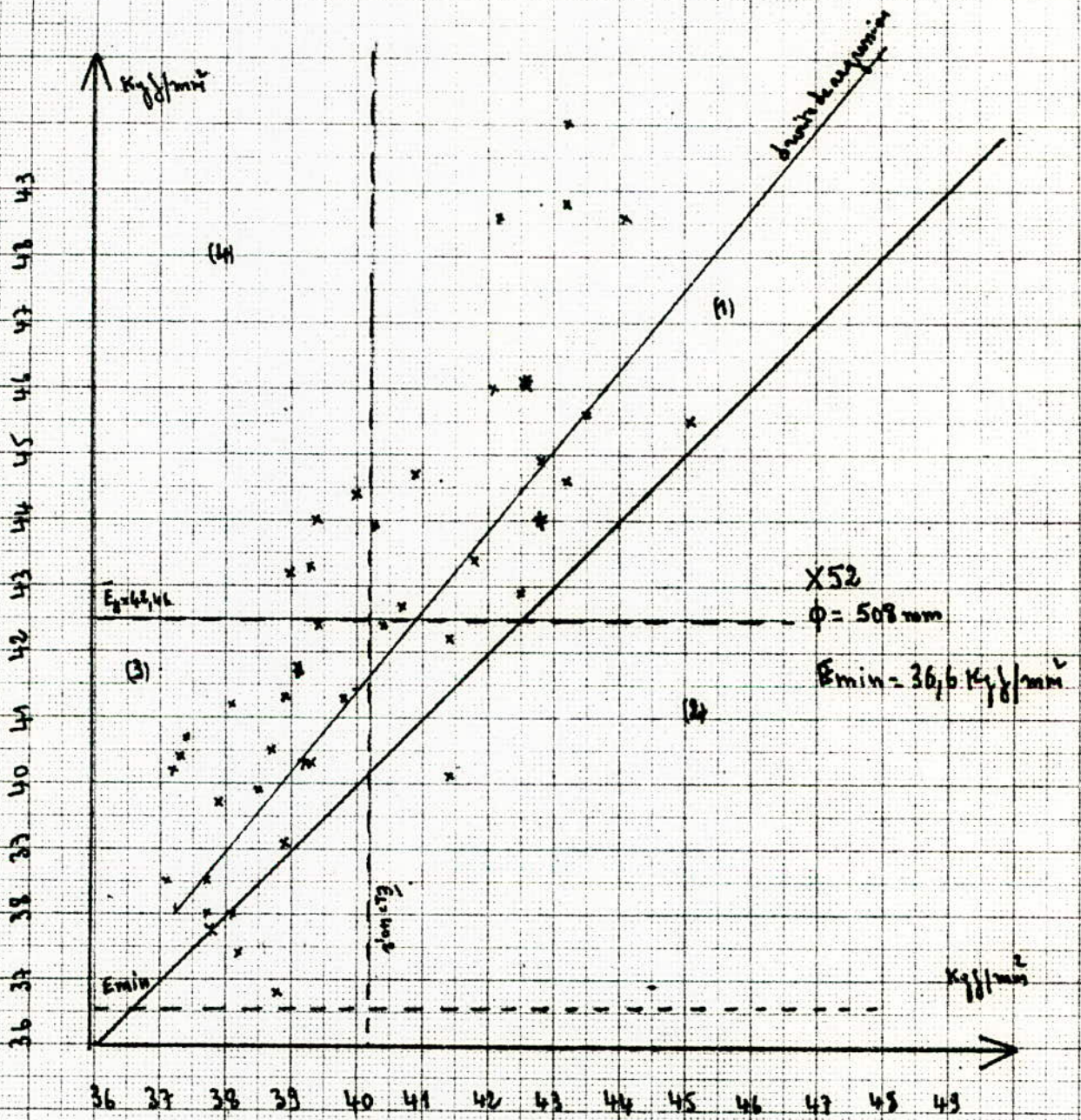
Cela donne :

$$N_1 = 18 + 22 = 40 ; N_2 = 3 + 4 = 7 ; \pi = 180$$

$$\rho = \sin \frac{90 \times 33}{47} = \sin 63,19$$



E. perpendiculaire à l'axe du tube



E. perpendiculaire à l'axe du tube

( graphique 1 )



$$\rho = 0,9$$

### 3.7.1.2 Droite de régression

la droite est de la forme :  $E_{11} = 1,2E_{\perp} - 6,572$

### 3.7.2 Résistance à la rupture ( graphe 2 )

il y a une homogénéité assez marquée , les points s'alignent sur la bissectrice .L'effetBauschinger affecte plus la limite élastique que la résistance à la rupture c'est toute la gravité de l'effet dans la mesure ou les métallurgistes sont obligés d'améliorer surtout la limite élastique de l'acier.

### 3.8-Etude des variations par une méthode graphique

De par les résultats enregistrés , nous constatons que d'une manière général la limite élastique et la résistance à la rupture sont abaissées d'une façon sensible .

Pour avoir une meilleure idée du phénomène ,une représentation graphique est nécessaire .

#### 3.8.1 Limite élastique :

3.8.1.1 Graphe de E.perpendiculaire à l'axe du tube en fonction de E. // de la direction de laminage : ( graphe 3 )

la limite élastique minimale (36,6 kgf/mm<sup>2</sup>) est respectée toutefois on remarque un abaissement très sensible sur le tube .

#### 3.8.1.1.1 Détermination du coefficient de corrélation :

$$\rho = \sin \frac{\pi (N_1 - N_2)}{2(N_1 + N_2)}$$

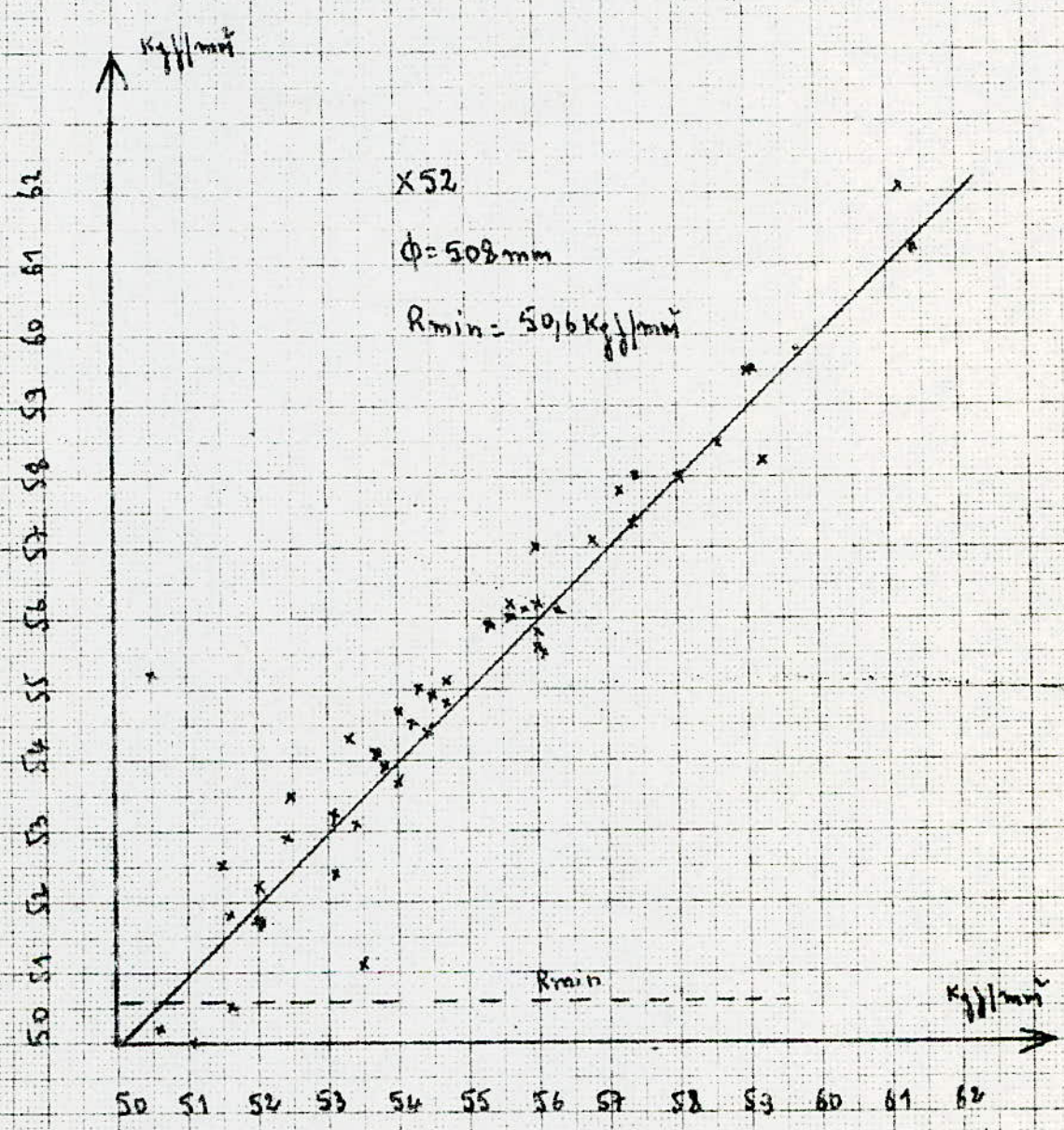
$$N_1 = (1) + (3) = 16 + 22 = 38$$

$$N_2 = (2) + (4) = 4 + 5 = 9$$

$$\rho = \sin \frac{180 \times 29}{2 \times 47} = \sin 55,53$$



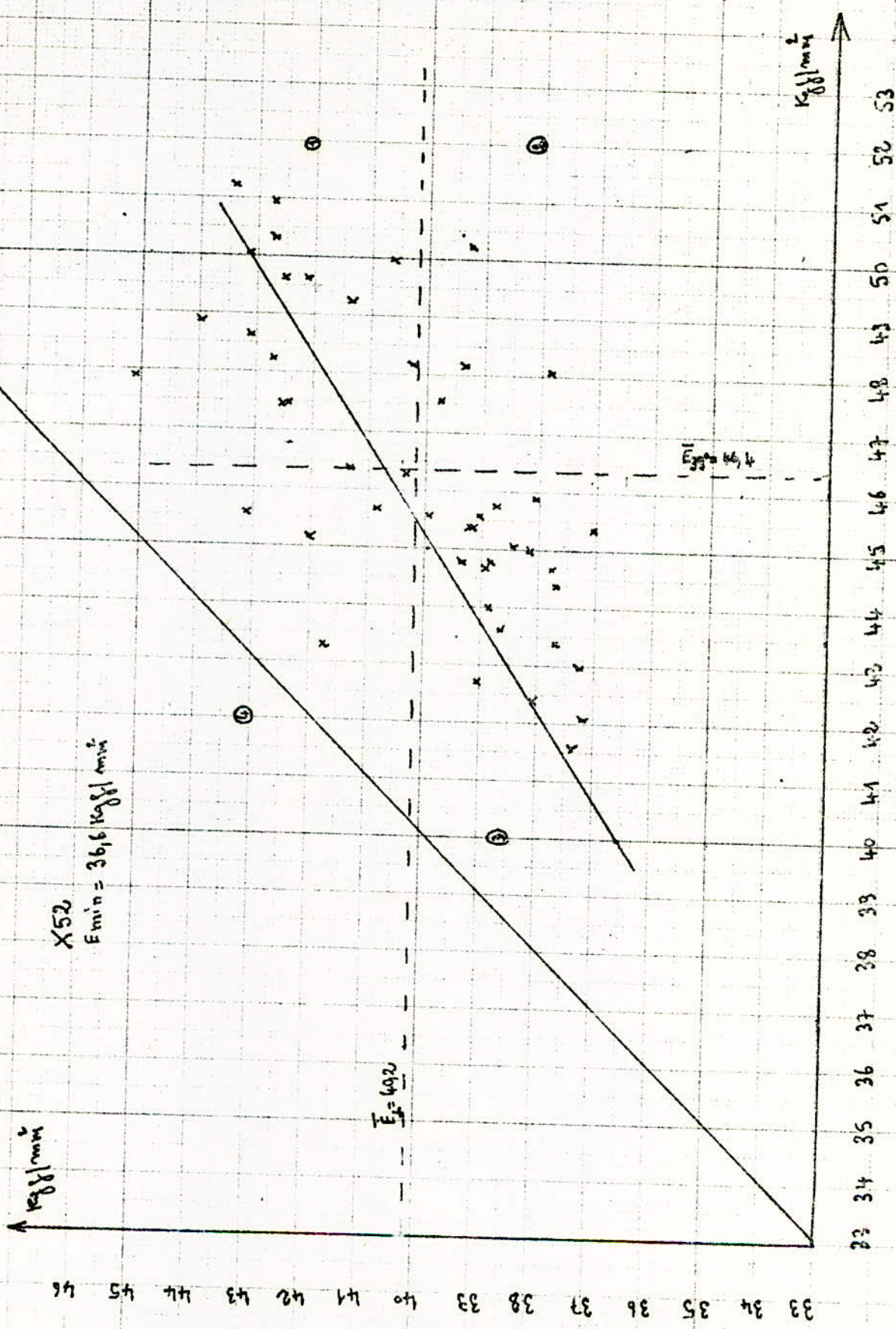
R. perpendiculaire à l'axe du tube.



R. perpendiculaire à l'axe du tube

( graphe 2 )





X52  
 $E_{min} = 36,6 \text{ kg/l min}^2$

$E_{39} = 46,4$

$E_x = 46,2$

33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46

22 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53

E. perpendicularité à l'axe horizontal

E. à 39° de la direction de l'axe horizontal (vertical)



$$\rho = 0,83 \Rightarrow \text{corrélation}$$

### 3.8.1.1.2 Droite de régression :

la droite est de la forme :  $E_L = 0,57E_{33} + 13,8$

### 3.8.1.2 Graphe de E. parallèle à l'axe du tube en fonction

de E. parallèle à la direction de laminage : (graphe 4)

nous avons dans ce cas une variation négative mais moins importante que dans le cas précédent ; ceci s'explique par le fait que nous ne trouvons pas le même sens correspondant à celui de la bobine .

### 3.8.2- Résistance à la rupture

Rappel des différents modes de rupture : les métaux présentent en général quatre modes de rupture et qui sont :

-rupture après déformation plastique ininterrompue

-rupture par clivage

-rupture par séparation des cristaux

-rupture résultant d'une déformation par cisaillement

### 3.8.2.1 Graphe de R. perpendiculaire à l'axe du tube en fonction

de R. à 39° de la direction de laminage : (graphe 5)

Le tracé montre une variation globalement négative.

### 3.8.2.1.1 Détermination du coefficient de corrélation:

$$\rho = \sin^{-1} \frac{(N_1 - N_2)}{(N_1 + N_2)}$$

$$N_1 = (1) + (3) = 17 + 18 = 35$$

$$N_2 = (2) + (4) = 8 + 4 = 12$$

$$\rho = \sin \frac{180 \times 23}{2 \times 47} = \sin 44$$

$$\rho = 0,695 \Rightarrow \text{CORRELATION}$$



(graphique)

X52  
Ecart = 36,6 kg/mm<sup>2</sup>

kg/mm<sup>2</sup>

kg/mm<sup>2</sup>

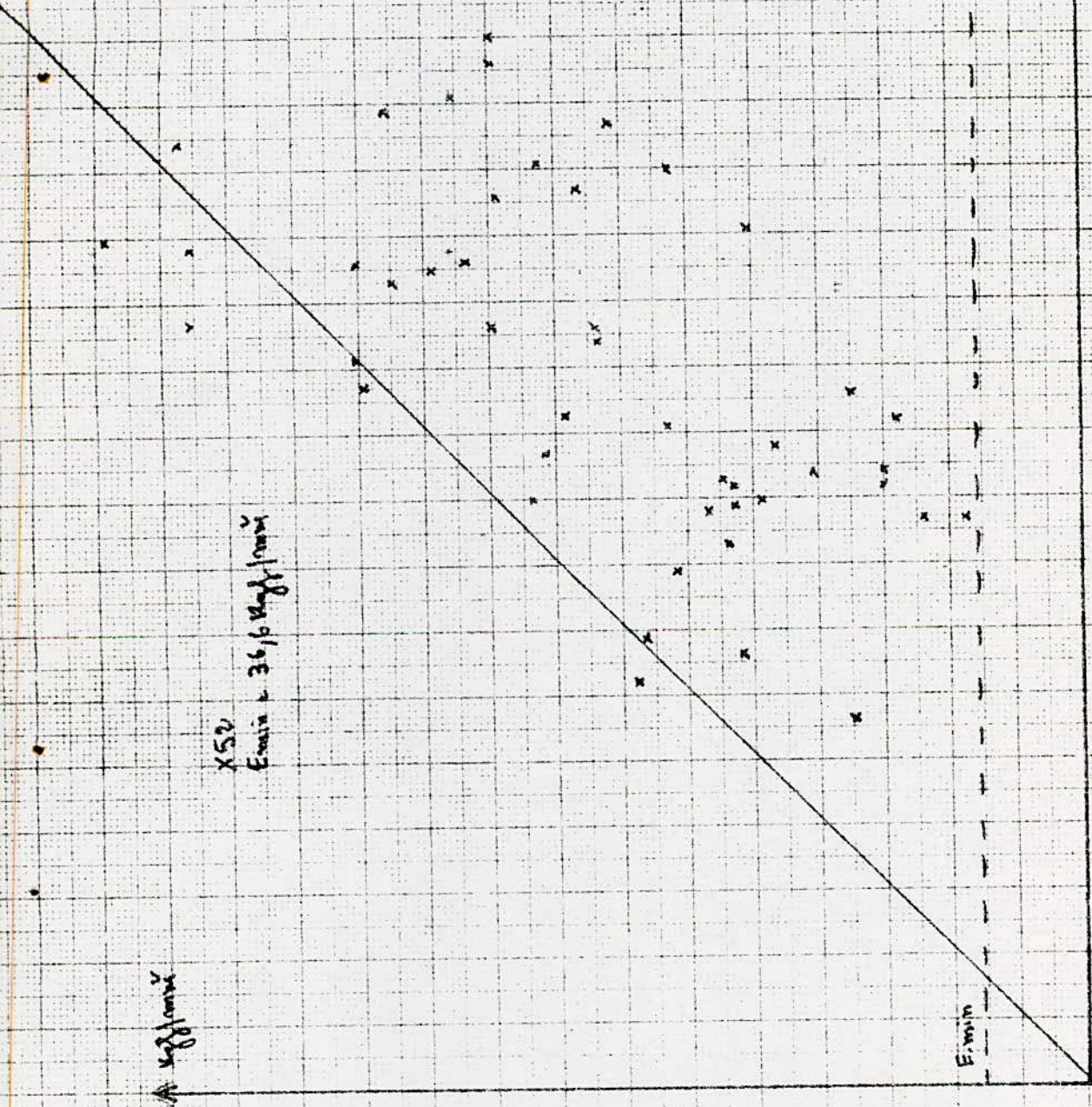
35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54

35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54

E. parallèle à l'axe du ride

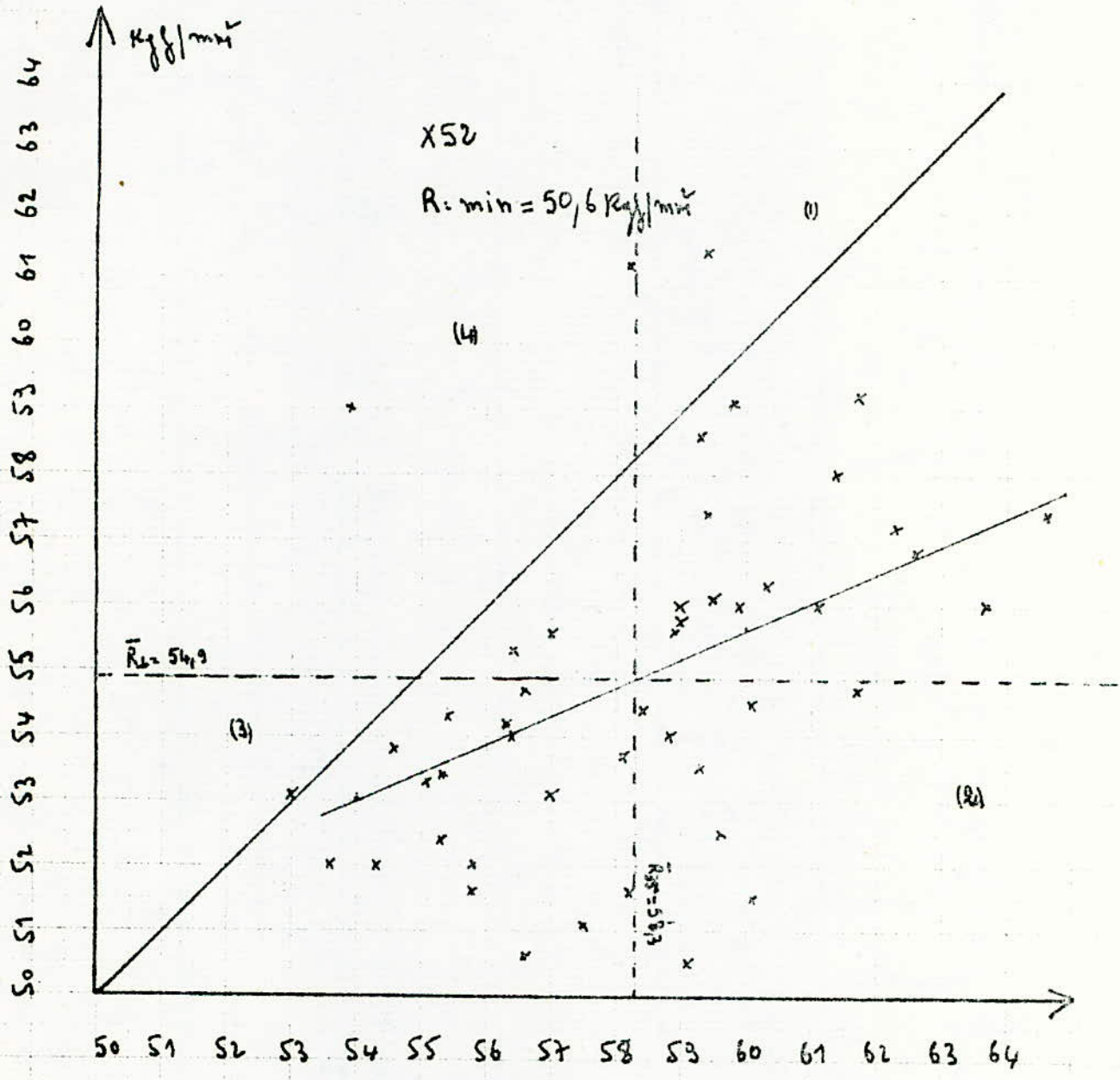
E. parallèle à la bissectrice de l'angle (vertical)

E. min



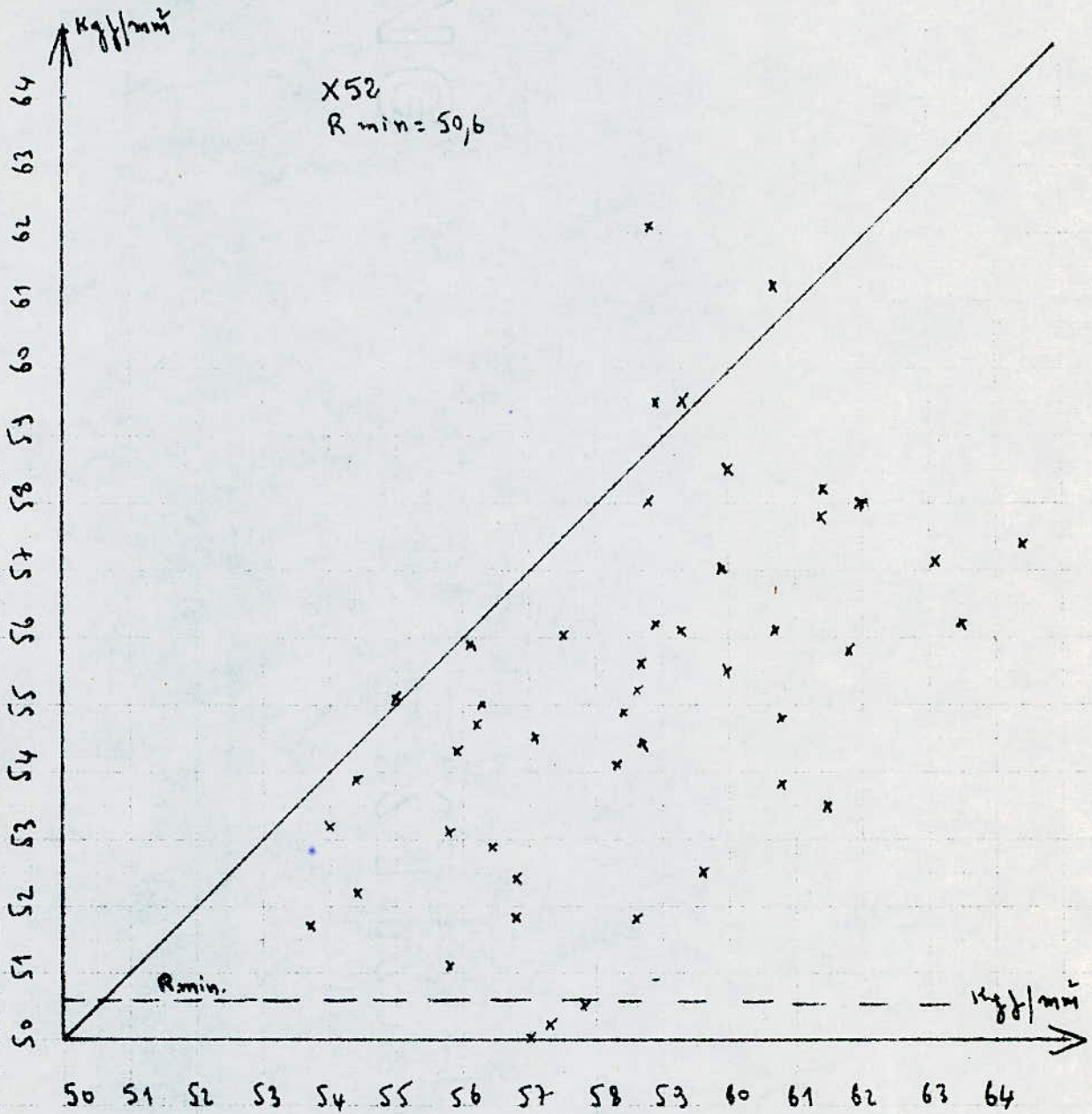


R. perpendiculaire à l'axe butube.



R.  $\approx 33^\circ$  de la direction de laminage  
(graphes)

R. parallèle à l'axe vertical.



R. parallèle à la direction de laminage  
(graphie 6)

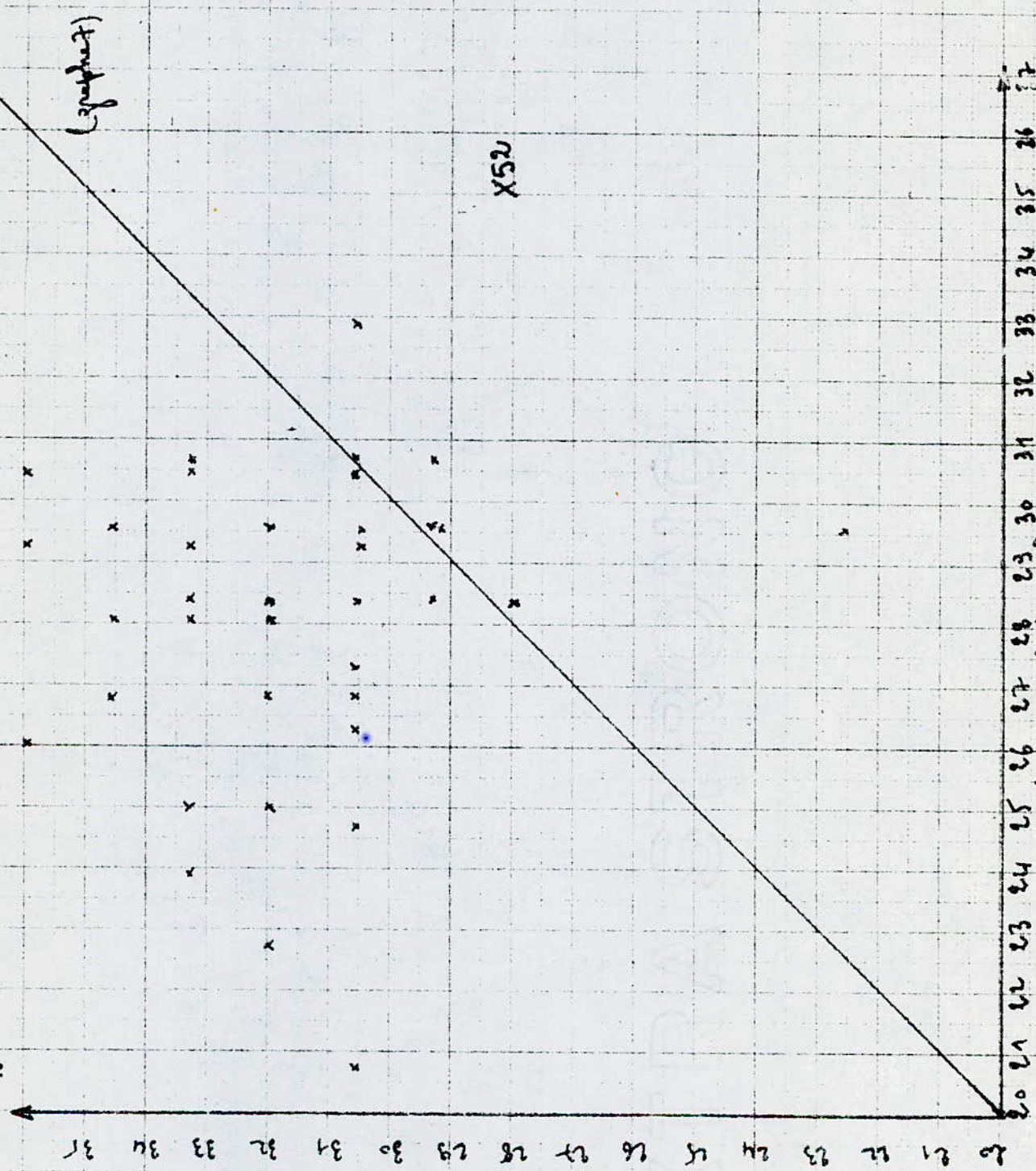


(graphique)

X520

%

%



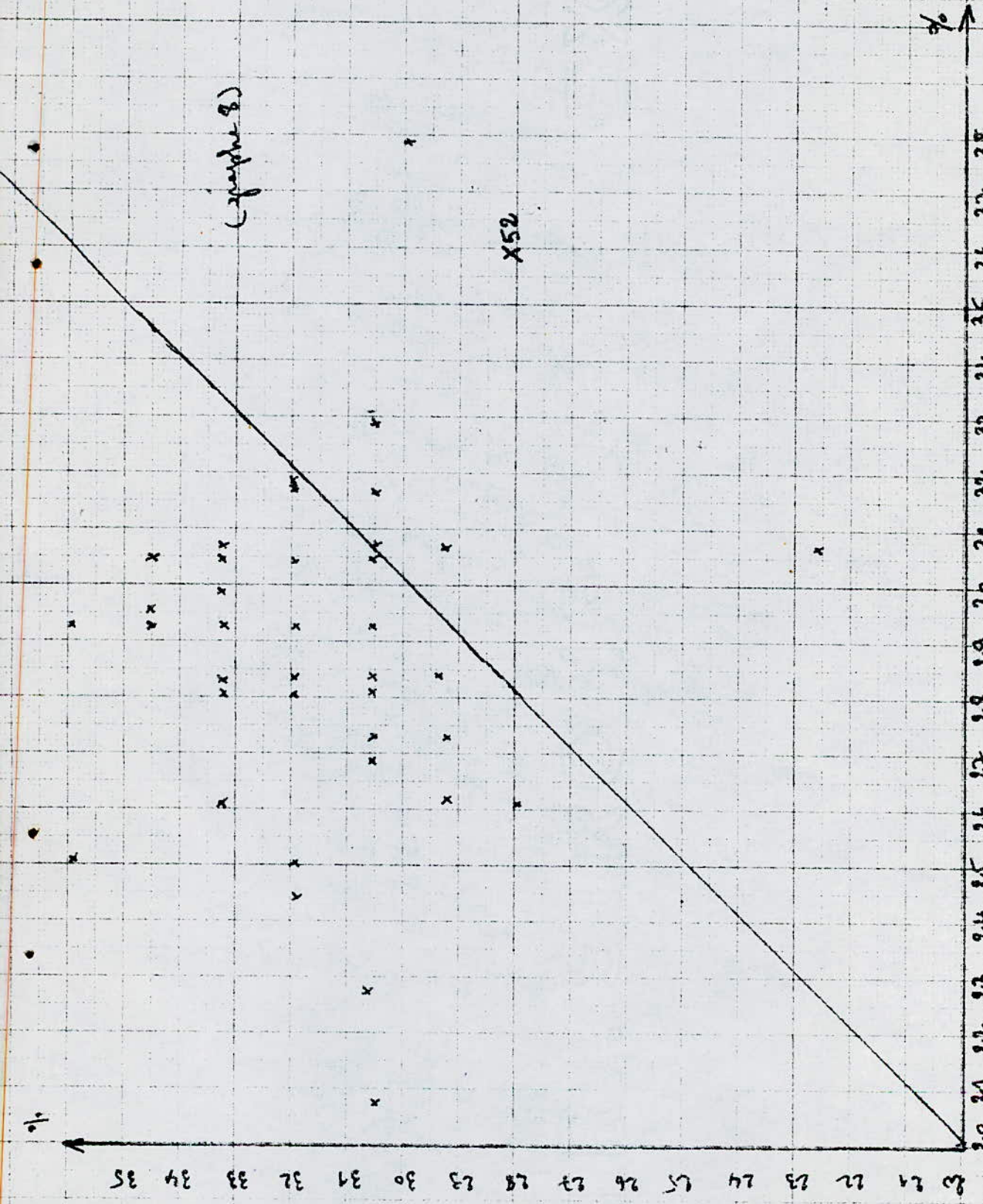
A% possible à l'ère B-réelle



(Figure 8)

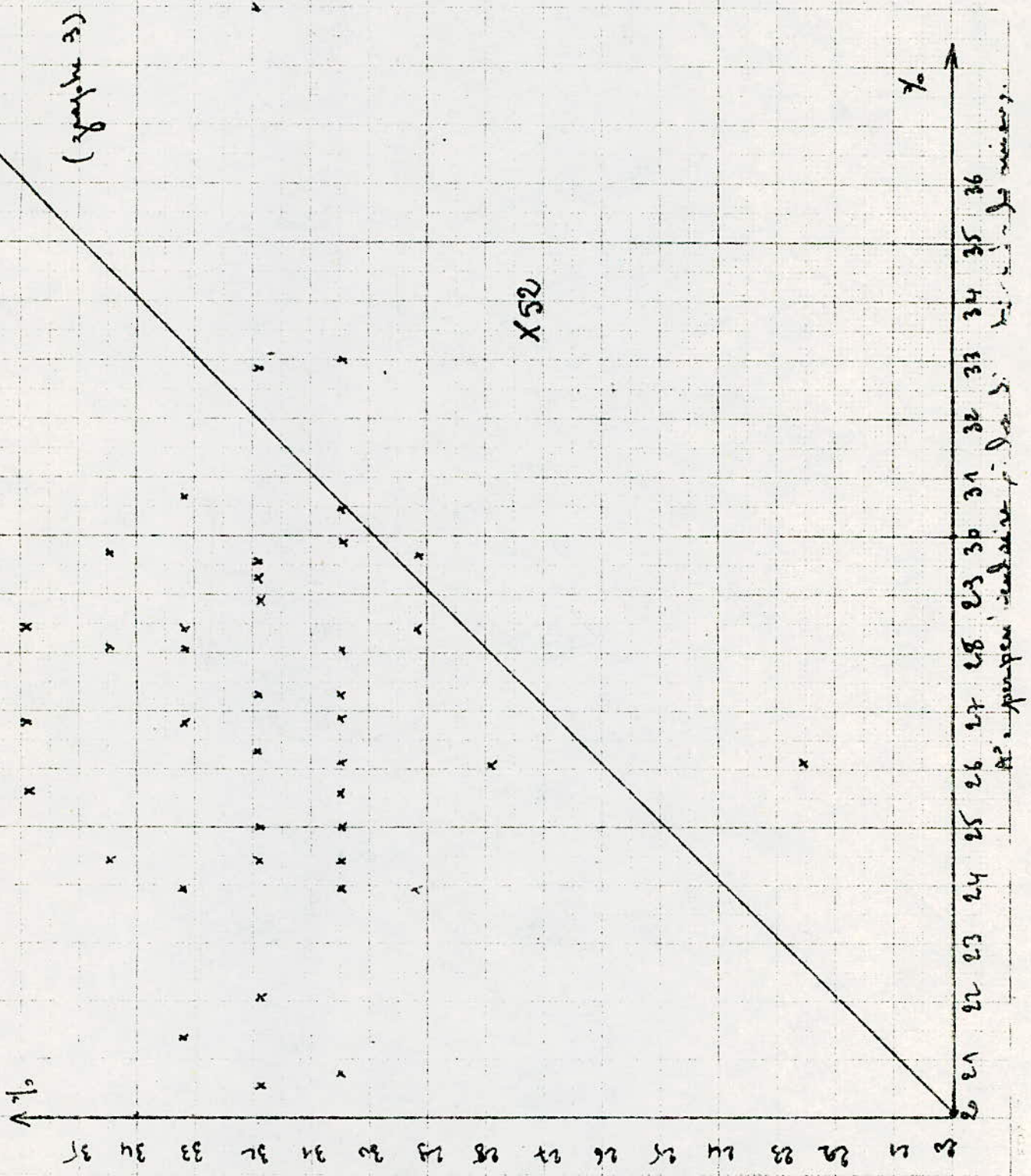
X52

A% at 332: Acetic anhydride determination





At. percent of iron in oxide.



3.8.2.1.2 Droite de régression : elle est de la forme

$$R_{\perp} = 0,435 R_{39} + 29,55$$

3.8.2.2 Graphe de R. parallèle à l'axe du tube en fonction de R. parallèle à la direction de laminage : (graphe 6 )  
la résistance à la rupture minimale n'est pas toujours respectée; la variation est assez importante .

### 3.8.3 Allongement (A%)

Si on compare les allongements(A%) parallèles à l'axe du tube avec :

- (A%) parallèles à la direction du laminage ( graphe 7 )
- (A%) à 39° de la direction du laminage ( graphe 8 )
- (A%) perpendiculaire à la direction du laminage (graphe 9 )

nous constatons que :

- il y a une augmentation quand on passe de la bande au tube
- cette augmentation semble être erratique .

### 3.9-Calculs des variations moyennes

Les variations de E. et de R. sur la bobine et sur le tube et ceci dans toutes les directions données, sont plus faibles que celles enregistrées quand on passe de la bande au tube .  
Pour cela nous avons calculé les variations de E. et de R. en prenant les moyennes des trois résultats sur la bobine et sur le tube .

#### 3.9.1 Tableaux des variations

les tableaux(2) donnent :

$R_M$  = valeur moyenne sur la bande et sur le tube

$E_M$  = valeur moyenne de la limite élastique sur la bande et

sur le tube. ainsi que les variations moyennes correspondantes (absolues et relatives) .



Tableau (2)

N°	BOBINES		TUBES		$\Delta R_M$	$\Delta E_M$	$\Delta R_M/R_M$	$\Delta E_M/E_M$
	$R_T$	$E_T$	$R_M$	$E_M$				
	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	kgf/mm <sup>2</sup>	%	%
604191	57,23	45,13	52,75	39	-4,48	-6,13	-7,8	-13,5
604193	56,20	46,76	55,80	41,40	-0,40	-5,36	-0,71	-11,4
604194	58,96	45,56	53,90	39,75	-5,06	-6,81	-8,5	-14,6
604195	53,93	42,93	51,85	38,70	-2,08	-4,23	-3,86	-9,9
609287	60,26	48,83	58,55	45,30	-1,71	-3,53	-2,84	-7,2
604198	60,66	48,50	56,50	42,10	-4,16	-6,40	-6,8	-13,2
609208	56,13	44,36	51,85	39,60	-4,28	-4,76	-7,6	-10,7
604200	56,56	43,76	54,35	42,60	-2,21	-1,16	-3,9	-2,65
604184	55,63	42,53	54,65	39,05	-0,98	-3,48	-1,76	-8,15
604201	59,2	46,33	52,85	38,80	-6,35	-7,53	-10,7	-16,2

Tableau (2) (suite)

N°	BOBINES		TUBES		$\Delta R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M/R_M$ %	$\Delta E_M/E_M$ %
	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>				
514334	61,86	49,36	54,75	41,70	-7,11	-7,66	-11,5	-15,5
512173	59,90	48,56	54,70	40,75	-5,20	-7,81	-8,7	-16
512183	56,26	45,80	52,65	39,20	-3,61	-6,60	-6,4	-14,4
512219	59,13	45,86	55,95	40,90	-3,18	-4,96	-5,38	-10,8
515254	54,33	42,80	52,10	38,10	-2,23	-4,70	-4,1	-11
515259	62,90	51,10	57,50	43,90	-5,40	-7,20	-8,6	-14,1
604190	55,50	43,33	53,25	38,85	-2,25	-4,48	-4	-10,3
513293	64,13	49,16	57,40	41,30	-6,73	-7,86	-10,5	-16
514317	59,96	49	55,80	43,85	-4,16	-5,15	-6,95	-10,5
514337	63,76	50,43	56,10	41,80	-7,66	-8,63	-12	-17,1



Tableau (2) (suite)

N°	BOBINES		TUBES					
	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M/R_M$ %	$\Delta E_M/E_M$ %
515352	57,76	45,06	52,30	37,80	-5,46	-7,26	-9,5	-16,1
515363	54,06	43,50	53,15	40,45	-0,91	-3,05	-1,7	-7
515378	57,63	45,80	54,35	39,80	-3,28	-6	-5,7	-13,1
601330	56,53	43,76	51,70	37,80	-4,83	-5,96	-8,5	-13,6
515334	60,36	46,36	52	38,05	-8,36	-8,31	-13,9	-18
601373	54,43	43,23	53,85	40,40	-0,58	-2,83	-1	-6,6
604206	55,10	43,16	53,80	39,65	-1,30	-3,51	-2,4	-8,2
606098	61,50	49,36	55,90	40,55	-5,60	-8,81	-9,1	-17,8
602282	58,23	45,06	51,05	37,80	-7,18	-7,26	-12,3	-16,1
608123	60,46	46,93	56,20	42,20	-4,26	-4,73	-7	-10,1

Tableau (2) (suite)

N°	BOBINES		TUBES		$\Delta R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M/R_M$ %	$\Delta E_M/E_M$ %
	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>				
609286	62,13	52,10	58	44,55	-4,13	-7,55	-6,7	-14,5
608200	59,06	48,33	55,90	41,70	-3,16	-6,63	-5,4	-13,7
608097	60,66	47,06	58,70	42,70	-1,96	-4,36	-3,2	-9,3
608105	57,63	45,76	55,80	41,10	-1,83	-4,66	-3,2	-10,2
609246	57,46	44,90	50,50	37,85	-6,96	-7,05	-12,1	-15,7
609238	57,36	46,76	50,40	37,80	-6,96	-8,96	-12,1	-19,1
609217	58,43	45,26	54,40	40,10	-4,03	-5,16	-6,9	-11,4
708111	59,33	51,20	53,85	43,40	-5,48	-7,80	-9,3	-15,2
708118	59,93	49,43	61,30	46	+1,37	-3,43	+2,3	-6,9
704129	62,80	49,03	56,95	42,80	-5,85	-6,23	-9,3	-12,7



Tableau (2) (suite et fin)

N°	BOBINES		TUBES					
	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta E_M$ kgf/mm <sup>2</sup>	$\Delta R_M/R_M$ %	$\Delta E_M/E_M$ %
706154	60,10	49,83	59,30	45,40	-0,80	-4,43	-1,3	-8,9
706131	58,90	47,93	61,65	46,80	+2,75	-1,13	+4,7	-2,4
706145	56,73	45,73	55,60	44,05	-1,13	-1,68	-2,0	-3,7
706110	59,46	49,46	57,7	44,35	-1,76	-5,11	-3,0	-10,3
708124	57,83	48,86	59,25	46,35	+1,42	-2,51	+2,5	-5,2
708140	60,66	51,96	53	43,40	-7,66	-8,56	-12,6	-16,5
706179	56,26	47,46	54,95	44,35	-1,31	-3,11	-2,3	-6,6

### 3.9.2 Conclusion

Le calcul des variations relatives montre que

$\Delta E_M$  est plus grand que  $\Delta R_M$  ; en effet :

-  $\Delta E_M$  oscille généralement entre 6,5 et 18 % avec un minimum de 2,36 % et un maximum de 19,1 %.

-  $\Delta R_M$  est située dans l'écart 2 - 12 %.

-  $\Delta E_M$  et  $\Delta R_M$  sont dans un rapport se situant en général dans l'intervalle 1,5 - 3.

### 3.10 Influence du Niobium sur la variation de E (graphe 10)

Dans les spécifications A.P.I., l'exigence de l'analyse de coulées ne spécifie pas l'addition du Nb pour la nuance X52. Le Nb est un élément qui augmente la résistance de l'acier et la résilience à froid par affinage du grain. Pour établir son influence il faut fixer les paramètres tels que %C, %Mn etc... et étudier, par une méthode graphique, les variations correspondantes de E dans des intervalles limités. Il faut d'autre part considérer la dissolution du Nb dans l'acier; pour cela une analyse chimique adéquate est nécessaire pour les échantillons considérés.

### 3.11 Variation de E avec le diamètre du tube

Les variations moyennes de E sont :

$$- \phi = 508 \text{ mm} \quad \Delta E_M = - 5,54$$

$$- \phi = 863 \text{ mm} \quad \Delta E_M = - 4$$

Cette dernière valeur est donnée par une étude faite par la S.N.S pour la nuance X52 et pour des diamètres de tubes égaux à 34 pouces.

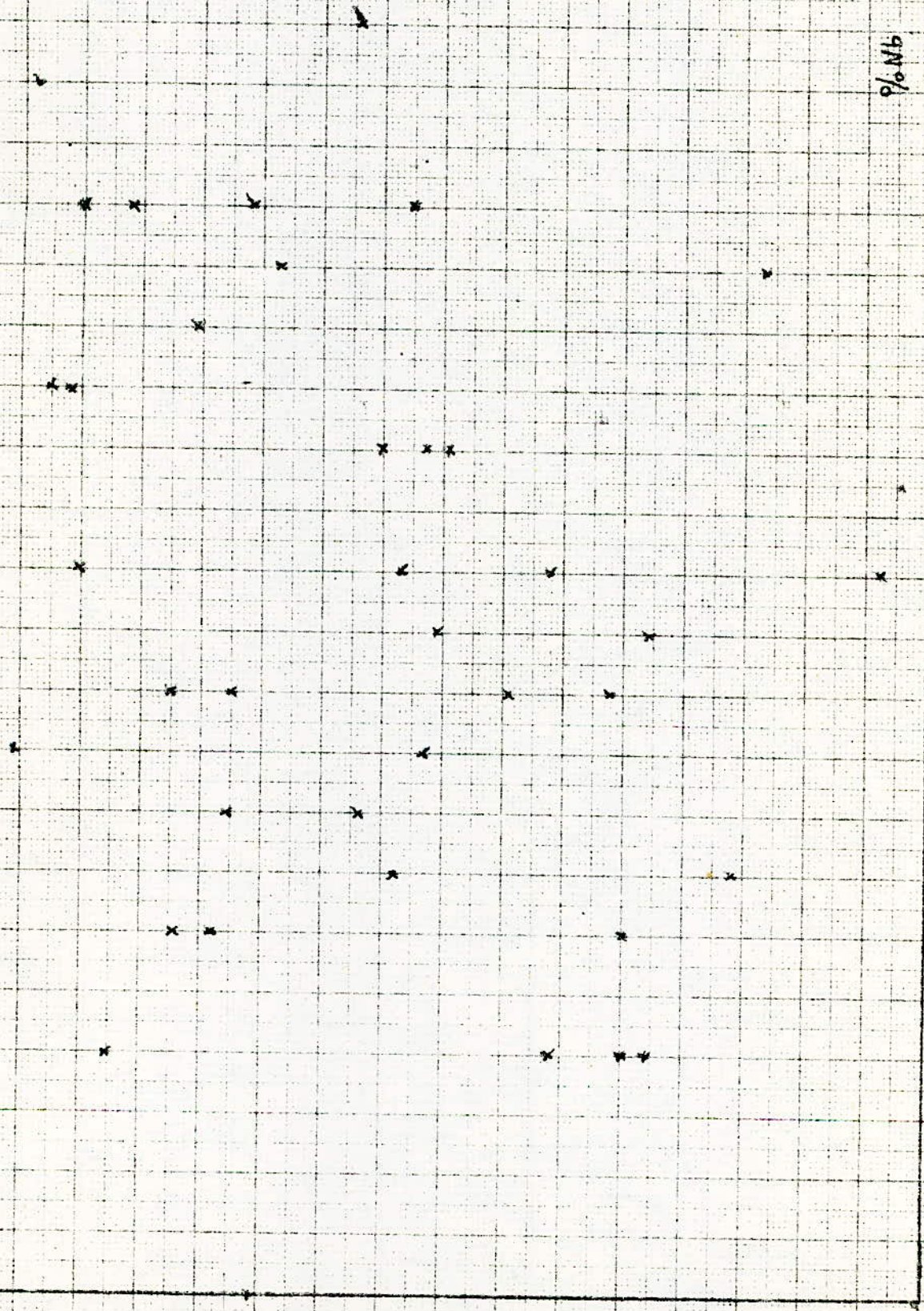


$\frac{\Delta E_{\text{rel}}}{E_{\text{rel}}}$

(percentage)

22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42

%MB



Nous pouvons alors affirmer que la variation de  
E est une fonction décroissante <sup>avec</sup> le diamètre du tube.  
Plus le diamètre du tube est grand, moins l'effet Bauschinger  
est marqué, toute chose étant égale par ailleurs.



CHAPITRE IV

ETUDE DE L'EFFET BAUSCHINGER SUR LA NUANCE X60.

4.1 Généralités

L'étude porte sur trois bobines de coulées différentes. Les numéros de coulées ont été espacés et sont respectivement pour trois bandes 880;943 et 979.

4.2 Dimensions

bande : 11,13 x 1500(mm) ; tube : diamètre = 1016 mm

4.3 Composition chimique

elle est la suivante :

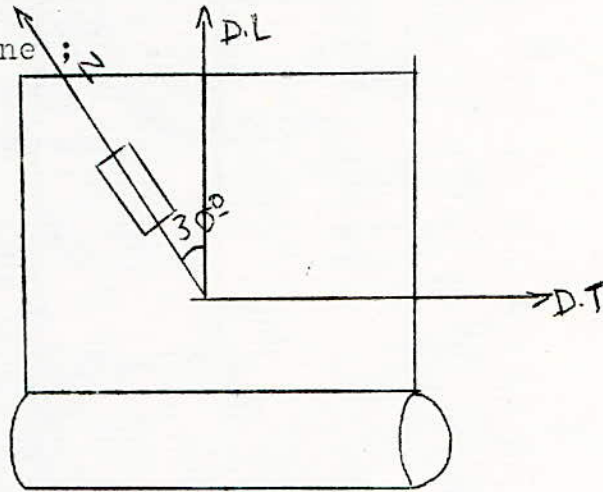
N°	C x100	Mn x100	Si x100	S x1000	P x1000	Al x1000	Nb x1000	V x1000	C.Eq. x100
880	16	150	36	16	15	59	20	60	41
943	12	140	34	14	8,5	41	14	45	35,3
979	14	134	30,5	15	9	54	13	55	36,3

$$\%C.Eq = \%C + \%Mn/6$$

4.4 Prélèvement

4.4.1 Bande : le prélèvement s'est fait au milieu de la bobine suivi d'un raboutage . Le découpage des éprouvettes est dans le sens N correspondant à 30° du sens de laminage .

L'angle de prélèvement sur la bande est orienté vers le début de la bobine ;



4.4.2 Tube : le prélèvement se fait dans le sens perpendiculaire correspondant au sens N .

#### 4.5-Essais de traction effectués

4.5.1 bande : on a effectué 2 à 3 essais sur des éprouvettes prélevées dans un même échantillon .

4.5.2 tube : 2 essais ont été effectués sur des éprouvettes provenant d'un même échantillon .

#### 4.6- Tableaux des résultats

Nous avons enregistré pour chaque essai et sur bobine et sur tube les dimensions des éprouvettes de la partie calibrée, la section initiale( $S_0$ ), la limite élastique( $E$ ), la résistance à la rupture( $R$ ), l'allongement( $\Delta$ ) et les charges correspondantes .

Les mesures sont représentées dans les tableaux suivants(3) :



Tableau (3)

Essais N°	Dimensions échantillons mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	Limite élastique		Résistance à la rupture		A%
			charge kgf	E kgf/mm <sup>2</sup>	charge kgf	R kgf/mm <sup>2</sup>	
BANDE 880							
1	27,1x11,65	316	14000	44,4	20400	64,6	28
2	27,3x11,65	318	14600	45,9	20500	64,5	28
3	27,3x11,65	318	14650	46,2	20400	64,2	28
TUBE 880							
1	27,4x11,6	318	14300	44,9	20600	64,8	26
2	27,5x11,6	319	14000	43,9	20700	65	27

Tableau (3) (suite)

Essai N°	Dimensions éprouvettes mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	Limite élastique		Résistance à la rupture		A%
			charge E kgf	kgf/mm <sup>2</sup>	charge kgf	R kgf/mm <sup>2</sup>	
BANDE 943							
1	28,2x11,55	325	16250	50	21400	65,7	23
2	27,2x11,55	314	15150	48,2	20500	65,3	24
TUBE 943							
1	28,2x11,5	324	15400	47,6	20600	63,6	24
2	28,6x11,5	328	15500	47,2	20900	63,8	26



Tableau (3) (suite et fin)

Essais N °	Dimensions Eprouvettes mm	S <sub>0</sub> mm <sup>2</sup>	Limite élastique		Résistance à la rupture		A%
			charge kgf	E kgf/mm <sup>2</sup>	charge kgf	R kgf/mm <sup>2</sup>	
BANDE 979							
1	28x11,1	311	13600	43,7	19100	61,4	29
2	28x11,1	311	13850	44,5	19200	61,7	29
3	28,4x11,1	315	13900	44,2	19300	61,2	29
TUBE 979							
1	28x11,1	311	13200	42,4	18700	60,1	29
2	27,4x11,1	304	13000	42,8	18500	60,9	28

Ces résultats permettent d'affirmer qu'il y a une diminution de la limite élastique et de la résistance à la rupture quand on passe de la bobine au tube .

4.7- Variations moyennes .

pour chaque échantillon , nous avons pris une valeur moyenne de E. et de R. des deux ou trois essais et ceci sur la bande et sur le tube . Le calcul donne :

ORIGINE	LIMITE ELASTIQUE $E_M$			RESISTANCE A LA RUPTURE $R_M$		
	BANDE	TUBE	$\Delta E_M$	BANDE	TUBE	$\Delta R_M$
	880	45,5	44,4	-1,1	64,43	64,9
943	49,1	47,4	-1,7	65,5	63,7	-1,8
979	44,1	42,6	-1,5	61,43	60,5	-0,93

4.7.1 Limite élastique : la variation est négative ; elle varie entre 1,1 et 1,7 avec une moyenne général de 1,43 .

4.7.2 Résistance à la rupture : la variation est moins importante; elle se situe entre +0,4 et -1,8 .

La variation moyenne est égal à -0,77

4.8- Variation de la limite élastique avec la nuance de l'acier

La variation moyenne de la limite élastique est respectivement :

- pour la nuance X52 avec  $\phi = 508$  mm et  $e = 10$  mm



$$\Delta E_M = - 5,54$$

- pour la nuance X52 avec  $\phi = 863,6$  mm et  $e = 11,13$  mm

$$\Delta E_M = - 3,2$$

Cette dernière valeur est donnée par une étude faite par la S.N.S.

- pour la nuance X60 avec  $\phi = 1016$  mm et  $e = 11,13$  mm

$$\Delta E_M = - 1,43$$

La variation est beaucoup plus importante pour X52 que pour X60.

#### 4. 9 - Influence de l'épreuve hydrostatique (X60)

Cette épreuve a pour but principal de contrôler la fabrication des tubes.

##### 4. 9.1 Déroulement de l'épreuve et calcul de la pression théorique

Le tube, mis dans une fosse, est rempli par un mélange d'eau et d'huile; il subit alors une pression d'air donnée par la formule :

$$P = \frac{200 \times t \times e}{\phi}$$

P : pression intérieure en Kg/cm<sup>2</sup>

t : 90 % E<sub>min</sub> en Kgf/mm<sup>2</sup>

$\phi$  : diamètre extérieur du tube en mm

e : épaisseur en mm

Pour :

$$t = 0,90 \times 42,1 \text{ Kgf/mm}^2$$

$$e = 11,13 \text{ mm}$$

$$\phi = 1016 \text{ mm}$$

$$P = \frac{200 \times 0,9 \times 42,1 \times 11,13}{1016} = 83 \text{ Kg/cm}^2$$

Pour le X60 on a effectué l'essai avec :

$$P_{\text{max}} = 88 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P_{\text{min}} = 85 \text{ Kg/cm}^2$$

#### 4.9.2 Prélèvement après épreuve hydrostatique :

L'échantillon est prélevé dans un voisinage qui a servi au prélèvement des éprouvettes avant l'épreuve.

#### 4.9.3 Résultats :

Le tableau suivant donne les valeurs de E et R avant et après l'épreuve ainsi que les variations correspondantes :

ORIGINE	LIMITE ELASTIQUE			RESISTANCE A LA RUPTURE		
	AVANT	APRES	$\Delta E$	AVANT	APRES	$\Delta R$
880	44,4	45,5	+ 1,1	64,9	65,8	+ 0,9
943	47,4	47,9	+ 0,5	63,7	66,4	+ 2,7
979	42,6	43,7	+ 1,1	60,5	61,6	+ 1,1

#### 4.9.4 Exploitation des résultats :

En général on enregistre les résultats suivants :



- Bande 880 :

$$\Delta E = + 1,1$$

$$\Delta R = + 0,9$$

- Bande 943 :

$$\Delta E = + 0,5$$

$$\Delta R = + 2,7$$

- Bande 979 :

$$\Delta E = + 1,1$$

$$\Delta R = + 1,1$$

Influence de l'épreuve : cette épreuve effectuée à 100 % est très importante pour deux raisons essentielles :

- elle permet de prévoir le comportement du tube dans l'industrie pétrolière et du gaz naturel,
  - elle diminue l'effet Bauschinger d'une manière notable.
- Les diminutions ont été respectivement dans les rapports :

- Bande 880

$$\frac{\Delta E_{av. \text{ hydro. }}}{\Delta E_{ap. \text{ hydro. }}} = \frac{-1,1}{+1,1} = - 1$$

$$\Delta E_{ap. \text{ hydro. }} \quad + 1,1$$

$$\frac{\Delta R_{av. \text{ hydro. }}}{\Delta R_{ap. \text{ hydro. }}} = \frac{+ 0,4}{+ 0,9} = 0,44$$

$$\Delta R_{ap. \text{ hydro. }} \quad + 0,9$$

- Bande 943

$$\frac{\Delta E_{av. \text{ hydro. }}}{\Delta E_{ap. \text{ hydro. }}} = \frac{- 1,7}{+ 0,5} = - 3,4$$

$$\Delta E_{ap. \text{ hydro. }} \quad + 0,5$$

$$\frac{\Delta R_{av. \text{ hydro. }}}{\Delta R_{ap. \text{ hydro. }}} = \frac{- 1,8}{+ 2,7} = - 0,7$$

$$\Delta R_{ap. \text{ hydro. }} \quad + 2,7$$

- Bande 979

$$\frac{\Delta E_{\text{av. hydro.}}}{\Delta E_{\text{ap. hydro.}}} = \frac{- 1,5}{+ 1,1} = - 1,36$$

$$\frac{\Delta R_{\text{av. hydro.}}}{\Delta R_{\text{ap. hydro.}}} = \frac{- 0,93}{+ 1,1} = - 0,84$$

Le signe (-) indique une diminution de E et R due à l'effet Bauschinger donc une augmentation de E et de R après l'épreuve. Il est à noter que le relèvement de E est d'autant plus important que la limite élastique sur le tube est plus faible.



C O N C L U S I O N

La préoccupation primordiale des métallurgistes a toujours été l'amélioration, sans cesse, des performances et qualité des métaux et alliages.

Les propriétés mécaniques font partie, en première urgence, des caractères métalliques donnant des performances et cette qualité. En particulier, on connaît tout l'intérêt qui consiste à faire travailler un acier dans son domaine élastique. L'amélioration de la limite élastique d'un acier a toujours été et sera toujours le souci constant du sidérurgiste.

Dans le cas des aciers à bas carbone de la S.N.S on ne peut se contenter d'ajouter de l'azote comme on le fait pour les aciers inoxydables, ductiles mais à faible limite élastique; pour augmenter cette limite on doit procéder à des transformations, jouer sur les températures et les vitesses de refroidissement, en un mot, chercher la bonne structure; c'est ce que nous avons vu au laminoir à chaud.

Quand le métal est soumis à une contrainte de sens contraire à celle de son emploi, la limite élastique chute sensiblement : c'est l'effet Bauschinger qui entrave cette amélioration de la limite élastique des métaux et alliages quand on les met en forme et que naturellement après on les sollicite dans leur emploi; c'est ce qui se passe sur les tubes soudés en spirale.

Conclusions pratiques de nôtre projet, relatif à l'effet Bauschinger :

- nous avons pu visiter les installations du laminoir à chaud

et de la tuberie spirale; de ce fait nous avons étudié les procédés de fabrication et de contrôle de qualité des tubes roulés soudés en spirale à partir de bobines.

- Nous avons pu analyser toutes les conditions de la norme de l'American Petroleum Institut ( A.P.I) à laquelle doit répondre la fabrication de ces tubes, en ce qui concerne la composition chimique, les propriétés physiques, le traitement thermique et le mode de soudage.

- Dans le domaine du contrôle de qualité nous avons participé aux opérations d'essais mécaniques, d'essais hydrostatiques qui nous ont donné la possibilité d'une étude quantitative de l'effet Bauschinger.

- Sur la nuance X52 :

\* ) de la bobine au tube, dans une même direction au préalable repérées et sur la bobine et sur le tube, l'effet Bauschinger est manifeste pour la limite élastique et la résistance à la rupture.

2) sur le tube lui-même il y a une anisotropie de la limite élastique très marquée due à l'effet Bauschinger, très marquée dans le sens travers. Par contre, pour la résistance à la rupture, on retrouve l'isotropie de la bobine.

3) sur le tube lui-même l'allongement, suivant son axe, est toujours supérieur à l'allongement sur la bobine quel que soit la direction choisie sur celle-ci.

4) l'addition du Niobium (Nb) et son influence sur la perte relative de la limite élastique ne nous a pas paru signi-



ficative.

5) le cintrage, donné quantitativement par le diamètre, a une influence sur la perte de la limite élastique qui est dans la logique du phénomène.

- Sur la nuance X60 :

1) l'addition du Niobium et du Vanadium avec la diminution du cintrage (diamètre plus grand) constitue deux paramètres qui s'ajoutent et qui donnent la diminution de l'effet Bauschinger par rapport à la nuance X52.

2) comme il est logique de <sup>le</sup>prévoir, avec une courbe de traction, l'épreuve hydrostatique, par expansion, rétablit et améliore les caractéristiques mécaniques d'origine.

Nous venons de conclure nôtre étude à partir des résultats d'usine. Mais pour expliquer l'effet Bauschinger d'une manière plus fondamentale il faut faire entrer en ligne de compte les défauts des cristaux métalliques et leurs interactions. Pour cela on doit procéder à l'élaboration de monocristaux, au préalable orientés, très purifiés, par exemple par fusion de zone, et extraire des lames minces aptes à fournir des images au microscope électronique. Ces lames étant sollicitées, au sein du microscope, par des contraintes (une "micro-machine de traction" étant à prévoir dans la chambre du microscope) on pourra alors examiner l'action des défauts créés et interpréter l'effet Bauschinger par les lois de la physique du solide. Ce dernier point de vue est prospectif mais s'inscrit dans la nécessité des re-

cherches à entreprendre pour permettre aux industriels d'avancer et d'améliorer ces performances et cette qualité du matériau.



## ANNEXE

### 1. Coefficient de corrélation

Avant d'entreprendre l'étude de la forme concrète des liaisons entre des variables considérées (X et Y), il faut d'abord établir si une liaison de ce genre existe ou non. Pour décrire le degré d'intensité de cette liaison on utilise le plus souvent le coefficient de corrélation (r).

Le coefficient de corrélation (r) sert à mesurer les relations linéaires entre X et Y et le degré de dépendance entre-elles. Les valeurs de r plus petites que 0,5 témoignent très faible corrélation; tandis que les valeurs de r proches de 1 correspondent à une dépendance presque linéaire.

1.1 - Estimation de r : on estime r à partir de n couples de valeurs expérimentales  $(X_i, Y_i)$  par la relation :

$$r_{XY} = \frac{Z_{XY}}{Z_X Z_Y}$$

avec  $Z_X = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$  et  $Z_Y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}$

et la covariance

$$Z_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

$$\Delta_i a_X = (X_i - X) \quad ; \quad a_Y = (Y_i - Y)$$

$$\Rightarrow r_{XY} = \frac{\sum a_X \cdot a_Y}{\sqrt{\sum a_X^2 \cdot \sum a_Y^2}}$$

$$F(x) = a_1 f_1(x) + \dots + a_n f_n(x)$$

Chaque fonction présente alors une erreur; la différence entre la valeur exacte et valeur approximée est égale à

$$R_i = F(x_i) - y_i$$

Le problème est de minimiser les erreurs ou la somme des carrés de ces erreurs soit :

$$Q = \sum_{i=1}^n R_i^2 = \sum_{i=1}^n (F(x_i) - y_i)^2$$

Q est une fonction de  $a_1, \dots, a_n$  (inconnues)

On minimise alors Q; cela donne:

$$\frac{\partial Q}{\partial a_k} = 2 \left[ \sum_{i=1}^n [F(x_i) - y_i] \frac{\partial F(x)}{\partial a_k} \right] = 0$$

$$\sum F(x_i) \frac{\partial F(x_i)}{\partial a_k} = y_i \frac{\partial F(x_i)}{\partial a_k}$$

Exemple :  $Y_i = aX_i$

$$R = Y_i - aX_i$$

$$\sum R^2 = \sum (aX_i - Y_i)^2$$

$$\frac{\partial \sum R_i}{\partial a} = \sum (aX_i - Y_i)X_i = 0$$

$$a = \frac{\sum Y_i X_i}{\sum X_i^2}$$



