



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Génie Métallurgie**

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :

**BOUMARAF Abla**

Le : jeudi 27 juin 2019

## **Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule.**

---

### **Jury :**

Dr.	MESSAOUDI SALIM	MCB	Université de Biskra	Président
Mme.	FATIMA ZAHRA LEMMADI	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Dr.	ATHMANI MOUSSA	MCA	Université de Biskra	Examinateur

Année universitaire : 2018 - 2019

***Annexes :***

On trouve en annexes ce qui suit :

- Essais de réception de la tôle P265NB, d'épaisseur 3.3 mm destinée à la fabrication du réservoir GPLc ;
- Certificat de réception de la matière P265NB, envoyé par le fournisseur ;
- Attestation de contrôle de fil à souder (soudage de la collerette et plaque d'identification) 1 mm, envoyé par le fournisseur ;
- Certificat du fil à souder 2.4 mm, utilisé pour le soudage du corps du réservoir, envoyé par le fournisseur.
- Exigence de la norme 1442 + A1 Avril 2008 (essai de traction sur éprouvette soudée). Paragraphe 7.4.2 ;
- Exigence de la norme 1442 + A1 Avril 2008 (essai de fatigue). Paragraphe 7.11;
- Plan de l'éprouvette proportionnelle utilisée pour l'essai de traction (selon la norme 10002-1 Octobre 2001).



ENTREPRISE BOUTEILLES A GAZ  
FILIALE NAFTAL  
SPA AU CAPITAL SOCIAL DE 3550200000 DA  
Unité de Batna



Dept Contrôle Qualité  
Sec matières premières

ESSAIS MECANIQUES  
TOLE BS2(3.30mm)

FOURNISSEUR: Arcelor MITTAL		EN 10120 NUANCE : P265 NB(BS2)					ALLONGEMENT	
No Coulee	No Bobines	DIMENSIONS			Limite élastique R <sub>e</sub> (265) (N/mm <sup>2</sup> )	Résistance mécanique		A% (L=100) ALLONGEMENT A <sub>32</sub> min)%
		Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )		Charge (N)	R <sub>m</sub> (410-500) (N/mm <sup>2</sup> )	
82878	6865061CX	20	3.36	67.2	332	30643	456	38
		20	3.33	66.6	345	30836	463	39
		20	3.34	66.8	336	29926	448	40
	6838096CX	20	3.37	67.4	349	29454	437	35
		20	3.32	66.4	340	30876	465	37
		20	3.35	67.0	357	30284	452	39

Les essais conformes à la norme EN 10120

Chef de service contrôle matières premières

BOUKASY

Batna le 16/09/2018

**BOUKAS YOUSSEF**  
Chef de service contrôle  
matières premières et laboratoire

Adresse : zone industrielle KECHIDA BP 374 BATNA 05000  
Tél : 033.22.24.57/033.22.24.69 Fax : 033.22.27.27 COM : 033.22.24.68 E-mail : bagbatna@yahoo.fr /  
Bag.batna@bag.dz Site web: www.bag.dz



### CERTIFICAT DE RECEPTION

NF EN 10204-3.1/DIN 50049-3.1/B/ISO 10474

<p>Site de production <b>FOS SUR MER</b></p>	<p>N° Commande COURT ET CHENI 4 20</p>	<p>N° Economique 3ED19</p>	<p>Nombres et spécifications techniques PANSIN-N/N10120-208 BOBINE DECAPÉE GRAPHEE PHILLE</p>	<p>REQUISITION USIN A01</p>
<p>Expéditeur usine Service de contrôle</p>	<p>Client usine destination A01</p>	<p>N° Commande A01</p>	<p>N° Economique A01</p>	<p>REQUISITION USIN A01</p>
<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>
<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>	<p>ENTREPRISE: ROULETTELE A GAZ SPA ENTREPRISE: FERRARINI SPA ENTREPRISE: M. BERNARDINI ENTREPRISE: ANGELO BERNARDINI</p>

Référence	Description du produit		Dimensions			Masse		Tolérances				Résistance			
	Design	Code	Profil	Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	RA	RA	RA	RA	RA	RA	RA	
02	740 828551	740 828551	S	2217	317	20	315	317	315	412	414	383	383	383	
	740 828552	740 828552	S	2217	317	20	315	317	315	412	414	383	383	383	
	740 828553	740 828553	S	2217	317	20	315	317	315	412	414	383	383	383	
	740 828554	740 828554	S	2217	317	20	315	317	315	412	414	383	383	383	
	740 828555	740 828555	S	2217	317	20	315	317	315	412	414	383	383	383	

<p>Nous certifions que le fournisseur a été sélectionné conformément aux spécifications techniques du contrat et que, dans l'opération de contrôle et d'essai effectués, elle répond aux spécifications indiquées sur les documents.</p> <p>Commande de fabrication: d'aspect et de dimensions satisfaisants</p>	<p>Signature Date: 22/07/18</p>
	<p>Nous certifions que le fournisseur a été sélectionné conformément aux spécifications techniques du contrat et que, dans l'opération de contrôle et d'essai effectués, elle répond aux spécifications indiquées sur les documents.</p> <p>Commande de fabrication: d'aspect et de dimensions satisfaisants</p>

13776-FOS SUR MER-GEDEX

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule



SIAT S.p.A. - Società Italiana Acciai Trefilati  
 Via Feltrina 26, 33013 Gemona del Friuli (UD) Italy  
 Tel. +39 0432 602811 Fax +39 0432 602800  
 E-mail: info@siat.it Web: www.siat.it

Articolo: C.1200017 - Filo Pittarc G6  
 Materiale: SFAAS 18/AWSAS 1E  
 Stato: secondo rapporto di prova

Divisione Pitarc  
 Via Feltrina 26, 33013 Gemona del Friuli (UD) Italy  
 Tel. +39 0432 602811 Fax +39 0432 602800  
 E-mail: info@siat.it



Attestato con i seguenti sistemi di gestione certificati:  
 - qualità secondo UNI EN ISO 9001:2008

### ATTESTATO DI CONTROLLO

Test Report / Werkzeugeignis / Relevé de controle  
 secondo by / nach / selon EN 10204:2004 Z 2



N° 4263/2018/A  
 DATA 24/07/2018

CLIENTE: 20CUI002970 TUXORA S.P.A.  
 Customer VIA DELLA ROCCA, 4 10123 TORINO (TO) IT

DDT N°: 07892 DATA: 24/07/2018  
 BL N° Date

Ns. ORDINE: 201804193 Vs. ORDINE: PO N.6995-6322  
 Our reference N° Your reference N°

ARTICOLO: C1200017 - FILO PITTARC G6 Item ASME Sect. II Part C edition 2017	Ø: 1,00	SFAAS 18/AWSAS 1E	COLATA: 12584 2018	RIGA DDT: 0001	BL position							
Composizione Chimica di Colata % Heat Chemical Analysis %	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
Composizione Chimica di Colata % Chemische Zusammensetzung der Schmelze %	0,06	1,45	0,84	0,009	0,017	0,04	0,04	0,01	0,07	0,008	0,003	0,010
ARTICOLO: C1200017 - FILO PITTARC G6 Item ASME Sect. II Part C edition 2017	Ø: 1,00	SFAAS 18/AWSAS 1E <th>COLATA: 12582 2018</th> <th>RIGA DDT: 0001</th> <th>BL position</th>	COLATA: 12582 2018	RIGA DDT: 0001	BL position							
Composizione Chimica di Colata % Heat Chemical Analysis %	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
Composizione Chimica di Colata % Chemische Zusammensetzung der Schmelze %	0,06	1,45	0,84	0,011	0,017	0,05	0,05	0,01	0,10	0,010	0,003	0,000
ARTICOLO: C1200017 - FILO PITTARC G6 Item ASME Sect. II Part C edition 2017	Ø: 1,00	SFAAS 18/AWSAS 1E <th>COLATA: 12584 2018</th> <th>RIGA DDT: 0001</th> <th>BL position</th>	COLATA: 12584 2018	RIGA DDT: 0001	BL position							
Composizione Chimica di Colata % Heat Chemical Analysis %	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
Composizione Chimica di Colata % Chemische Zusammensetzung der Schmelze %	0,06	1,42	0,87	0,010	0,018	0,05	0,05	0,01	0,10	0,001	0,003	0,000

ALTR E PROVE OPERATIVE: ANNOTAZIONI: Notes

CERTIFICATE VALID FOR:  
 CUSTOMER: BA6  
 ORDER NR: 6A8 589- TUXORA S.p.A. N° 42/18  
 ITEM NR: 4

Si certifica che l'immagine sopra descritta è conforme all'ordine.  
 We hereby certify that the material described above corresponds with the terms of the order.  
 In english language the following data were investigated before inspection: heat n° 42  
 Avant certification sur la livraison est formée des constatations de l'inspection: heat n° 42  
 Note: Quality Control - Contrattista: Esposito in Guida  
 C. ASCANIO

# CERTIFICAT Certificate



EN 10204

Unique  
Mechanical

Gedik Kaynak  
Sınaiye Sitesi No: 308 Sayılı  
Ankara Cad. No: 308 Sayılı  
06503 Beşiklik - SİMA 2/II  
Tel: 0216 378 20 00 (DXX)  
Fax: 0216 378 21 24  
0216 378 20 44  
Web: www.gedik.com.tr  
E-mail: gedik@gedik.com.tr

Numero Number T - 7802  
Page Page 1/1

Date: 31.12.2018

Client	Purchaser	BAG SPA DIRECTION TECHNIQUES ET APPROVISIONNEMENT ROUTE DE BAKARI BP 64 GUE DE CONSTATIN ALGER
No de commande	Order Nr	01/BAG/971-2018
Groupe du produit	Product Group	Fil de soudage sous flux
Nom du produit	Brand Name	FIL DE SOUDAGE GeKa S1 / BOBINE K-435 DE 25 KG
Standard	Standard	ASME SECTION IIC SFAAWS A5.17:97 TS EN ISO 14171-A-2010
Classification	Classification	EL 12
Taille	Size	2,40 mm S 1
Quantite	Quantity	20000 Kg
No de serie	Serial Nr	07245175818
No de charge	Charge Nr	758-18

No de charge / Charge Nr	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu*	Al									
AWS	0,04 - 0,14	<0,10	0,25 - 0,60	<0,030	<0,030	-	-	-	<0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TS/EN ISO	0,05 - 0,15	<0,15	0,35 - 0,60	<0,025	<0,025	<0,15	<0,15	<0,15	<0,30	<0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-
758-18	0,075	0,029	0,545	0,008	0,008	0,052	0,043	0,011	0,132	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\*Recouvert de cuivre / Copper coated

Test de tension / Tensile Test				Test d'impact / Impact Test					
- EN ISO 6892-1				- EN ISO 148-1:2010					
Préparation de l'element a teste / Specimen preparation - EN ISO 5178:2011				Préparation de l'element a teste / Specimen preparation - EN ISO 8016:2011					
Test de Temperature	R <sub>p</sub>	R <sub>m</sub>	A	Test de temperature	KV	KV	Durete	test de radiographie	Commentaire
Test temperature °C	Resistance coule Yield Strength N/mm <sup>2</sup>	resistance a la Tension Tensile Strength N/mm <sup>2</sup>	Elong. % <sub>L=5d</sub>	de temperature °C	Energie d'impact Impact Strength J	Moyenn e Average J	Hardness	Radiographic test	Comment
AWS	20	-	-	-	-	-	-	-	-
TS/EN ISO	20	-	-	-	-	-	-	-	-

Commentaire / Comment

Ville / City: Istanbul

Neelihan Ç. TOHUMCU  
Kalite Kontrol Müdür Yardımcısı  
Quality Control Assistant Manager



F 185 / 02

1  
réservoirs GPL pour véhicule

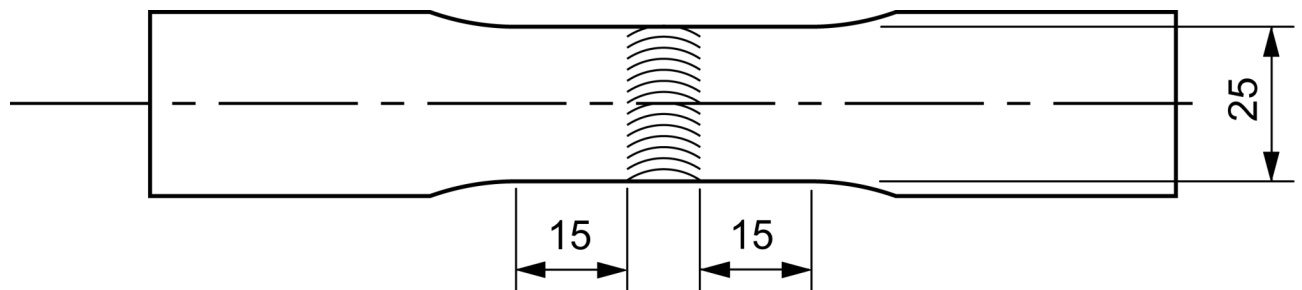
## 7.4.2 Soudures

### 7.4.2.1 Mode opératoire

L'essai de traction perpendiculaire à la soudure doit être réalisé conformément à l'EN 895, sur une éprouvette de largeur réduite à 25 mm sur une longueur s'étendant au-delà de 15 mm de part et d'autre de la soudure (voir Figure 7). Au-delà de cette partie centrale, la largeur de l'éprouvette doit augmenter progressivement.

### 7.4.2.2 Exigences

La valeur de la résistance à la traction obtenue,  $R_m$ , ne doit pas être inférieure à celle garantie par le fabricant de bouteilles,  $R_g$ , quel que soit l'endroit où se produit la rupture dans la section transversale de la partie centrale de l'éprouvette.



**Éprouvette pour l'essai de traction perpendiculaire à la soudure.**

## 7.11 Essai de fatigue

### 7.11.1 Mode opératoire

7.11.1.1 Les bouteilles doivent être remplies d'un liquide non-corrosif, par exemple de l'eau contenant un inhibiteur de la corrosion, et soumises à des variations successives de pression hydraulique.

7.11.1.2 L'essai doit être réalisé à une pression cyclique supérieure égale :

— soit aux deux tiers de la pression d'épreuve, auquel cas la bouteille doit être soumise à 80 000 cycles ;

— soit à la pression d'épreuve, auquel cas la bouteille doit être soumise à 12 000 cycles.

7.11.1.3 La valeur de la pression inférieure du cycle ne doit pas dépasser 10 % de la pression supérieure du cycle.

**7.11.1.4** La fréquence des cycles de pression ne doit pas dépasser 0,25 Hz (15 cycles/min). La température mesurée sur la surface extérieure de la bouteille ne doit pas dépasser 50 °C au cours de l'essai.

#### **7.11.2 Exigences**

La bouteille ne doit présenter aucune fuite.



## V. Bibliographie

[1] **Guy Murry**. Aide Mémoire Métallurgie. Métaux Alliages Propriétés. 2<sup>ème</sup> édition L'USINE NOUVELLE. DUNOD. 2010.

[2] Technique De l'Ingénieur, (Etude et propriétés des métaux).

[3] **Jean P, Mercier Gérald, Zambelli Wilfried Kurz**. Traité Des Matériaux. 3<sup>ème</sup> édition. 2002.

[4] **Michel Colombié**. Matériaux Métallique. 2<sup>ème</sup> édition. 2008.

[5] **Michel Dupeux**. Aide Mémoire Science Des Matériaux. 2005.

#### IV. Conclusion

L'attention portée sur l'amélioration des propriétés mécaniques de l'acier P265NB, ne cesse de grandir car ce matériau occupe une grande place dans l'industrie automobile, pour cause d'augmentation des frais des carburants, et leurs influences sur la pollution de notre terre, ce qui conduit les fabricants des réservoirs à gaz à développer et élargir son utilisation.

Dans ce travail, nous avons essayé d'étudier l'évolution des propriétés mécaniques (résistance à la traction  $R_m$  et la résistance à la fatigue) de l'acier en étude utilisé pour la fabrication des réservoirs GPLc sous l'influence du changement du temps de maintien de 5 à 15 minutes à température 920 °C et refroidissement dans le four et puis à l'air calme.

L'observation des courbes des essais de résistance à la traction des différentes éprouvettes de tôle normale, ainsi les tableaux des essais de fatigue (corps du réservoir), de la soudure longitudinale et la soudure circulaire ont montrés ce qui suit :

- Des variations remarquables des valeurs de la résistance à la traction de l'acier de base avant traitement thermique, d'où  $R_m$  variée entre 410 et 466 Mpa pour la tôle normale et entre 456 et 515 Mpa pour les éprouvettes soudées (soudure circulaire et soudures longitudinales), ce phénomène est dû à la présence des contraintes internes proviennent de l'opération de déformation et soudage des différents composants du réservoir ;
- Stabilisation de la résistance à la traction des échantillons caractérisés à 5, 10 et 15 minutes du temps de maintien et ce par rapport à l'acier de base avant traitement thermique, ce qui explique l'importance du traitement thermique et leur influence sur les composants structuraux de l'acier en étude, la résistance à la rupture variée de 438 à 456 Mpa pour la tôle normale et de 441 à 483 Mpa pour les échantillons soudés ;
- La résistance à la fatigue de notre produit a augmentée en fonction du temps de maintien elle est variée de 18000 à 21600 cycles.

Lors de cette étude, nous avons montré que le traitement de recuit de normalisation contribue à remettre la microstructure en équilibre, donc la densité de dislocations diminue et en parallèle il y'a élimination de l'effet d'écrouissage ; par conséquent on a une modification des propriétés mécaniques ; ces propriétés sont proches à celles de l'état brut de la tôle.

Cette étude nous a permis donc d'optimiser un temps de maintien de 5 minutes (en gardant le paramètre coût et qualité), car les caractéristiques mécaniques de l'acier est presque similaire aux aciers traités avec 10 et 15 minutes du temps de maintien, même s'il y a un abaissement des valeurs de la résistance à la traction, elles restent dans l'intervalle normative (410 à 500 Mpa).

## Résumé

L'acier P265NB ou BS2 est très utilisé dans la fabrication des réceptions à gaz domestique ou bien destinée aux véhicules pour le cas du réservoir GPLc, ce dernier trouve une large utilisation, pour cause de minimiser la pollution atmosphérique et les frais du carburants (gasoil et essence). L'amélioration sans cesse de ses propriétés d'exploitation est toujours d'actualité. C'est dans cet objectif que nous avons opté pour étudier cet acier. Cette étude porte sur l'effet du temps de maintien du traitement thermique (recuit de normalisation), sur la résistance à la traction des éprouvettes de tôle normale et les éprouvettes soudées des parties circulaire et longitudinale du réservoir GPLc, ainsi leur résistance à la fatigue.

Au début, le temps de maintien est fixé à 5 minutes, puis 10 minutes et enfin avec 15 minutes, dans l'optique d'optimiser un temps de maintien pouvant assurer une résistance à la traction, ainsi que celle de la fatigue.

L'utilisation des différents temps de maintien, ont influencées sur les caractéristiques mécaniques et fatigues de l'acier P265NB, avant traitement thermique, nous avons observé une hétérogénéité de la résistance à la traction, par contre après traitement thermique, la résistance à la traction été homogène pour chaque temps de maintien et la résistance à la fatigue a été augmentée de 3600 cycles.

Nous avons montré par cette étude l'importance de variée le temps de maintien des traitements thermique, puisque cette démarche a permis d'optimiser la résistance à la traction et la résistance à la fatigue avec un temps de maintien minimum, où en gardant le rapport coût et qualité du réservoir GPLc d'où l'intérêt de cette étude.

## ملخص

يستخدم الصلب P265NB أو BS2 على نطاق واسع في صناعة الغاز المنزلي أو مستقبلات الغازات في حالة خزان غاز البترول المسال، وهذا الأخير يجد استخدامًا واسعًا بسبب تقليل تلوث الهواء وتكاليف الوقود التحسين المستمر لخصائص التشغيل الخاصة به لا يزال ذا صلة. ولهذا الغرض اخترنا دراسة هذا الفولاذ. نتناول هذه الدراسة تأثير وقت صيانة المعالجة الحرارية (تقوية التطبيع)، وقوة الشد لعينات الصفائح الطبيعية والعينات الملحومة للأجزاء الدائرية والطولية لخزان غاز البترول المسال، بالإضافة إلى مقاومتها للإرهاق. في البداية، يتم ضبط وقت الحجز على 5 دقائق، ثم 10 دقائق، وأخيرًا بـ 15 دقيقة، من أجل تحسين وقت الحجز الذي يمكن أن يضمن قوة الشد، بالإضافة إلى التعب. أثر استخدام أوقات احتجاز مختلفة على الخصائص الميكانيكية والتعب من الفولاذ، قبل المعالجة الحرارية، لاحظنا عدم تجانس قوة الشد، من ناحية أخرى بعد المعالجة الحرارية، قوة الشد كان متجانسًا في كل مرة تم فيها زيادة قوة الإرهاق بمقدار 3600 دورة. لقد أوضحت هذه الدراسة أهمية تنوع وقت صيانة المعالجات الحرارية، حيث أن هذا النهج جعل من الممكن تحسين قوة الشد ومقاومة التعب مع الحد الأدنى من وقت الصيانة، حيث من خلال الحفاظ على التقرير تكلفة وجودة خزان غاز البترول المسال، وبالتالي مصلحة هذه الدراسة.

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste mémoire à :*

*Mes parents qui m'ont soutenu le long de ma vie, mon marié et ma  
fille*

*Tous les membres de ma famille, ainsi Bitam lotfi*

*Et*

*Tous mes copains d'université.*

*A.BUMARAF*

## Remerciements

*Que Allah le tout puissant, nous a aidé durant notre étude et par ses miséricordes on a clôturé le projet de fin d'étude, on le remercie jusqu'à la satisfaction et après la satisfaction, on le prie de réussir dans la vie avenir.*

*Nos tenons à exprimer notre remerciement et notre gratitude au promoteur, Meme: L'AMMEDI qui nous a donnée le courage et nous a aidé pour rendre ce travail effectif.*

*Nos remerciements aussi le département de génie mécanique de l'université de Biskra, enseignants et étudiants.*

*Nos remerciements sont également aux membres de jury qui ont accepté à juger notre modeste travail.*

*Enfin nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.*

*A. BUMARAF*

## **II. Etude bibliographique**

### **II.1. Généralité sur les Aciers spéciaux**

Les aciers spéciaux présentent, par rapport aux aciers de qualité une plus grande pureté, notamment vis-à-vis des inclusions non métalliques. Ils sont généralement destinés à un traitement thermique et se caractérisent par une réponse régulière à ce traitement.

#### **II.1.1. Aciers spéciaux non alliés**

Font partie de cette catégorie :

- des aciers avec garantie de résilience à l'état trempé et revenu;
- les aciers avec garantie de réponse aux traitements thermiques;
- des aciers à teneur faible en inclusions;
- des aciers à teneur en S et P ne dépassant pas 0,020 % à l'analyse sur coulée et 0,025 % à l'analyse sur produit;
- des aciers dont la résilience KV en long à  $-50\text{ °C}$  est supérieure à 27 J sur éprouvettes prélevées en long et 16 J sur éprouvettes prélevées en travers;
- des aciers pour réacteurs nucléaires avec  $\text{Cu} \leq \delta 0,10\%$ ,  $\text{Co} \leq \delta 0,05\%$  et  $\text{V} \leq \delta 0,05\%$ ;
- des aciers ferrito-perlitique micro-alliés au V et/ou Nb dont la teneur en carbone n'est pas supérieure à 0,25 %;
- des aciers pour armature de précontrainte du béton.

#### **II.1.2. Aciers spéciaux alliés**

Tous les aciers alliés qui ne sont ni des aciers de qualité ni des aciers inoxydables. Font partie de cette catégorie :

- les aciers de construction mécanique;
- certains aciers soudables à grains fins pour appareils à pression;
- certains aciers résistant au fluage;
- les aciers pour roulement;
- les aciers à outils et les aciers à coupe rapide;
- des aciers à propriétés physiques spéciales.

#### **II.1.3. Les aciers utilisés à l'état ferrito-perlitique**

Les aciers utilisés à l'état ferrito-perlitique sont des alliages fer/carbone ne contenant généralement pas d'éléments d'alliage (à l'exception d'additions nécessaires à l'élaboration;  $\text{Mn} \leq \delta 1,65\%$  –  $\text{Si} \leq$

$\delta 0,5 \%$  – éventuellement  $Al \leq \delta 0,1 \%$ ). L'état structural d'emploi, qui est aussi l'état de livraison, est obtenu généralement en fin de fabrication à l'aide d'un refroidissement à l'air succédant soit à une austénitisation classique (traitement dit de « normalisation ») soit à un laminage (à l'état austénitique) judicieusement conduit (dit « laminage normalisant »). Leur état structural ne confère pas à ces aciers une résistance mécanique élevée mais il leur donne une grande plasticité qui assure une bonne sécurité d'emploi malgré des mises en œuvre faisant souvent appel à des déformations plastiques importantes et au soudage. Cette dernière opération est, par ailleurs, facilitée par la stabilité de la structure et par une limitation de la teneur en carbone. Parmi ces aciers on trouve :

#### **II.1.4. Les aciers de construction métallique**

Il n'est généralement pas demandé à ces aciers de présenter une limite d'élasticité élevée car les restrictions imposées aux déformations élastiques en service ne permettent pas de les soumettre à des sollicitations importantes. Ces aciers contiennent souvent du manganèse (teneur inférieure à 1,7 % environ) et parfois des micro-additions de niobium ( $< 0,05 \%$ ) et/ou de vanadium ( $< 0,15 \%$ ) pour augmenter l'effet durcissant du carbone à travers des procédures particulières de laminage (ils sont alors dits « aciers thermomécaniques »). Ceux de ces aciers dont l'emploi est le plus habituel sont définis par la norme NF EN 10025 dans ses parties 2 et 3. Leur limite d'élasticité minimale garantie s'étage de 235 à 460 N/mm<sup>2</sup> (sur produits de 16 mm d'épaisseur max.) alors que leur allongement à rupture est  $\geq \varepsilon 12 \%$ . Des aciers plus performants avec des limites d'élasticité minimales allant jusqu'à 460 N/mm<sup>2</sup> (mais toujours des allongements à rupture  $\geq \varepsilon 17 \%$ ) sont définis par la norme NF EN 10025-4; dans leurs versions thermomécaniques (indice *M*) ces aciers présentent une excellente soudabilité. Dans sa la norme NF EN 10025 propose aussi des aciers livrés à l'état trempé et revenu.

#### ***La normalisation des aciers pour appareils à pression***

La norme de base des aciers pour appareils à pression est la norme NF EN 10028. Elle distingue :

- les aciers non alliés et alliés avec caractéristiques spécifiées à température élevée;
- les aciers soudables à grains fins, normalisés;
- les aciers alliés au nickel avec propriétés spécifiées à basse température;
- les aciers soudables à grains fins laminés thermo mécaniquement;
- les aciers soudables à grains fins, trempés et revenus;
- les aciers inoxydables pour appareils à pression.

Les aciers appareils à pression, sont demandés de retrouver leur structure d'emploi par normalisation après mise en forme à chaud (à l'état austénitique). Ces aciers doivent satisfaire à des exigences particulières relatives à leur résistance à la rupture fragile (température de transition) et, lorsqu'ils sont employés à température supérieure à l'ambiante, à leur limite d'élasticité à chaud et à leur tenue au fluage. Leur limite d'élasticité minimale garantie est de 235, 265, 295, 355 ou 460 N/mm<sup>2</sup> (sur produits d'épaisseur 16 mm max.) alors que leur allongement à rupture est  $\geq 17\%$ .

On peut leur adjoindre des aciers faiblement alliés (additions de molybdène et de chrome pour améliorer leur résistance mécanique à chaud – par suite de la trempabilité conférée par ces additions, le traitement de normalisation est suivi, si nécessaire, d'un revenu à haute température, supérieure à 630 °C) leur limite d'élasticité minimale garantie est de 275, 300 ou 310 N/mm<sup>2</sup> alors que leur allongement à rupture est  $\geq 17\%$  (tableau 1).

Nuance	ReH mini (MPa)	Rm (MPa)	A % mini	
			e < 3 mm	3 ≤ e ≤ 5 mm
P245NB	245	360 à 450	26	34
<b>P265NB</b>	<b>265</b>	<b>410 à 500</b>	<b>24</b>	<b>32</b>
P310NB	310	460 à 550	21	28
P355NB	355	510 à 620	19	24

**Tableau 1.** Tôles pour appareils à pression

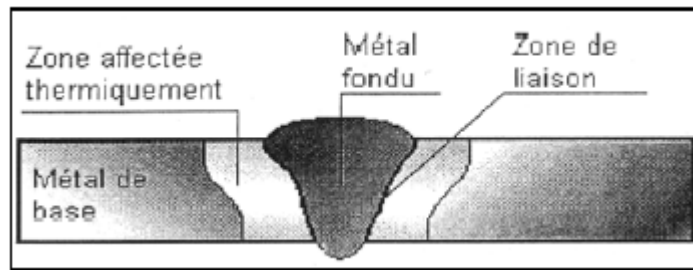
## II.2. Le soudage

### II.2.1. Généralité

Le soudage est une opération d'assemblage où la continuité métallique entre les pièces à souder est assurée par la fusion globale ou de proche en proche de leurs bords. On obtient ainsi, après solidification, un joint homogène de même caractéristique que le métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

Cette opération peut être assimilée à une opération locale d'élaboration métallurgique et à une opération locale de traitement thermique donnant une structure cristalline dépendant à la fois de la composition chimique élaborée et du traitement thermique. Ainsi réalisée, la soudure se décompose en plusieurs zones (figure 1).





**Figure 1.** Cordon de soudure.

**La zone fondue :** (nommée ZF) zone où l'état liquide a été atteint et dans laquelle a été élaborée la composition chimique. La structure métallurgique obtenue après solidification, dépend du cycle de refroidissement. On distingue, au sein de cette zone, des gradients de concentration, de la partie la plus fondue vers la moins fondue. Il est donc possible d'examiner la composition d'une soudure ainsi que les variations de dureté.

**La zone affectée thermiquement :** (nommée ZAT) zone se trouvant en bordure de la zone fondue sur une largeur plus ou moins large ayant été soumise à l'élévation de température sans être portée à la fusion. Le chauffage, la composition chimique et la vitesse de refroidissement de cette zone génèrent des modifications plus ou moins importantes de la structure métallurgique.

**La zone de liaison :** cette zone, située à la frontière entre la zone fondue et la zone affectée thermiquement, correspond à la surface sur laquelle la solidification du métal fondu a commencé.

**Le métal de base :** au delà de la zone affectée thermiquement, l'élévation de température est insuffisante pour engendrer une quelconque transformation structurale. Cette zone est aussi dite non affectée.

La composition chimique de la zone fondue résulte principalement de celles du métal de base et du métal d'apport presque toujours additionné lors de l'opération de soudage. La dilution est alors définie par la proportion de métal de base dans la zone fondue. A ceci, vient s'ajouter la perte de certains constituants par volatilisation et l'action de l'oxygène et de l'azote de l'air, et l'action des constituants du gaz de soudage.

Le soudage revêt également un aspect thermique particulier du fait de :

- Les rapides changements de température (élévation de température et refroidissement) ;
- Le faible temps de maintien de la température maximale ;
- La localisation du point chaud entraînant un gradient de température important entre les parties chaudes et les parties froides ;

- Le cycle thermique résultant est responsable de la structure métallurgique des différentes zones de la soudure. Selon l'analyse chimique des matériaux, un cycle rapide peut conduire à une structure fragile ou au contraire douce et ductile.

Le soudage est donc une opération de métallurgie très complexe au cours de laquelle il faut prendre en compte :

- Le métal de base choisi en fonction de la pièce à réaliser pour ses particularités mécaniques, chimiques ;
- Le couple métal d'apport – gaz de soudage, qui contribue à la composition chimique de la zone fondue. Le métal d'apport sera choisi en fonction de la qualité et des caractéristiques que la soudure devra présenter ;
- L'énergie de soudage qui régit le cycle thermique induisant la structure de la zone fondue et de la zone thermiquement affectée.

### II.2.2. Les procédés de soudage à l'arc

Le soudage à l'arc est un terme générique au cours duquel un arc électrique est créé entre une électrode et les pièces à assembler afin de conduire à une fusion superficielle et à la formation d'un bain de métal fondu qui se solidifie sans action extérieure. Il regroupe quatre procédés :

**Le soudage à l'électrode enrobée :** Afin de limiter l'oxydation et la nitruration du métal, l'âme métallique de l'électrode est enrobée par un oxydant, un acide, un basique ou un cellulosique selon les besoins. Il a pour but de faciliter l'amorçage, de protéger le métal et le cordon contre un refroidissement trop rapide, ainsi que de guider l'arc grâce à un retard à la fusion. Suivant les propriétés recherchées pour le cordon ou le laitier, différents modèles de fil existent.

**Le soudage avec fils pleins (GMAW) :** L'électrode est composée d'un fil fusible continu, servant de métal d'apport et se dévidant automatiquement sous protection gazeuse (Ar ou CO<sub>2</sub>).

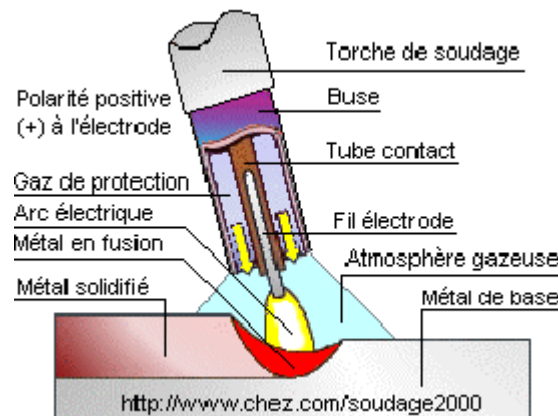
**Le soudage avec une électrode réfractaire :** L'électrode non consommable est constituée d'une pointe de tungstène portée par une torche dotée d'une arrivée annulaire d'un gaz protecteur. On nomme aussi cette technique Tungstène Inert Gaz (TIG).

**Le soudage à arc submergé sous flux solide :** Un flux en poudre est versé en talus autour du fil de l'électrode. L'arc jaillissant à l'intérieur du flux est ainsi protégé de l'oxydation et d'un refroidissement trop rapide.

### 11.2.3. Les soudages MIG/MAG :

Découvert au cours de la Deuxième Guerre mondiale, le développement de ce procédé (nommé aussi Gaz Metal Arc Welding) visait à réduire le coût de soudage des matériaux épais. Il s'est vite imposé dans l'industrie en raison de son efficacité au regard des soudures importantes au point de devenir, selon le Bureau Canadien de Soudage, le procédé le plus utilisé dans le monde. Les soudeurs ont également mis en évidence son efficacité pour souder l'aluminium grâce à son action nettoyante permettant de produire des soudures de qualité.

Enfin, comparativement au procédé TIG, déjà employé à l'époque, le procédé GMAW s'est aussi révélé plus rapide, notamment sur les matériaux plus épais. Aujourd'hui, ce procédé de soudage est indispensable dans l'industrie de la fabrication en général (figure 2).



**Figure 2.** Procédés de soudage MIG/MAG.

La fusion est obtenue grâce à un arc électrique s'établissant entre le fil-électrode, continu et fusible, et le métal de base. Un gaz ou un mélange de gaz provenant d'une source externe assure la protection du bain de fusion contre la contamination atmosphérique durant le soudage. La chaleur que dégage l'arc provoque la fusion de l'extrémité du fil-électrode et du métal de base. Différentes formes de gouttelettes de métal fondu, projetées du fil-électrode vers le bain de fusion où elles se solidifient, produisent la soudure désirée. Le fil-électrode, généralement de petit diamètre, est continuellement amené à l'arc de soudage, par un mécanisme de dévidage. Où il fond sous l'effet de la chaleur qui y est générée.

Selon la nature du gaz de protection employé, le procédé GMAW se divise en deux catégories et est désigné par un acronyme spécifique. Ainsi, on distingue :

**Le procédé MAG :** (Metal Active Gas) qui utilise un gaz actif. Il peut s'agir de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), d'un mélange d'argon et de gaz carbonique (AR-CO<sub>2</sub>) ou d'un mélange d'argon et d'oxygène (Ar-O<sub>2</sub>).

**Le procédé MIG :** (Metal inert gas) qui emploie un gaz inerte, à savoir de l'argon (Ar), de l'hélium (He) ou un mélange d'argon et d'hélium (Ar-He).

Le soudage à l'arc électrique sous protection gazeuse avec fil plein présente de nombreux avantages, mais aussi quelques inconvénients (tableau 2):

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>- Forte productivité.</li><li>- Grande vitesse de soudage (gain de temps).</li><li>- Taux de dépôt de métal important.</li><li>- Limitation des déformations.</li><li>- Nombre de reprises de soudure limité.</li><li>- Pas de laitier à enlever.</li><li>- Large gamme d'épaisseur.</li><li>- Bonnes qualités de joint et bonnes caractéristiques mécaniques.</li><li>- Soudage dans toutes les positions.</li><li>- Contrôle aisé de la pénétration en régime de court-circuit.</li><li>- Aspect de cordon correct.</li><li>- Procédé automatisable.</li><li>- Fatigue moindre du soudeur</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Entretien fréquent et minutieux.</li><li>- Difficile à utiliser dans les endroits exigus et peu pratique pour les applications qui exigent un grand déplacement de la torche entre deux soudures.</li><li>- Les économies de temps réalisées avec ces procédés peuvent être grandement réduites par une technique d'exécution inadéquate. En effet, la vitesse de soudage élevée exige des précautions additionnelles et demande au soudeur de réagir très vite. Ainsi, le fil peut demeurer figé dans le bain de fusion solidifié ou fondre dans le tube contact, ce qui entraîne une perte de temps considérable pour l'extraire avant de poursuivre le travail.</li></ul>

**Tableau 2.** Avantages et inconvénients du soudage MIG/MAG.

#### 11.2.4. L'arc électrique

Les procédés de soudage à l'arc utilisent comme moyen de chauffage l'énergie d'un arc électrique que l'on crée entre une électrode et les pièces à assembler.

**Composition :** Dans un milieu gazeux, entre deux électrodes (une anode reliée au pôle positif d'une source de courant et une cathode connectée au pôle négatif) portées à un potentiel convenable, il est possible d'amorcer et de maintenir un arc électrique. En frottant les électrodes entre elle et sous l'effet de la différence de potentiel, des électrons jaillissent de la cathode et sont attirés vers l'anode. Ces électrons s'accélèrent sous l'action du champ, et ionisent les atomes du gaz environnant, le rendant ainsi conducteur. En écartant l'électrode de quelques millimètres, le processus s'entretient en créant une réaction en chaîne et crée un arc continu. L'arc se compose de trois zones :

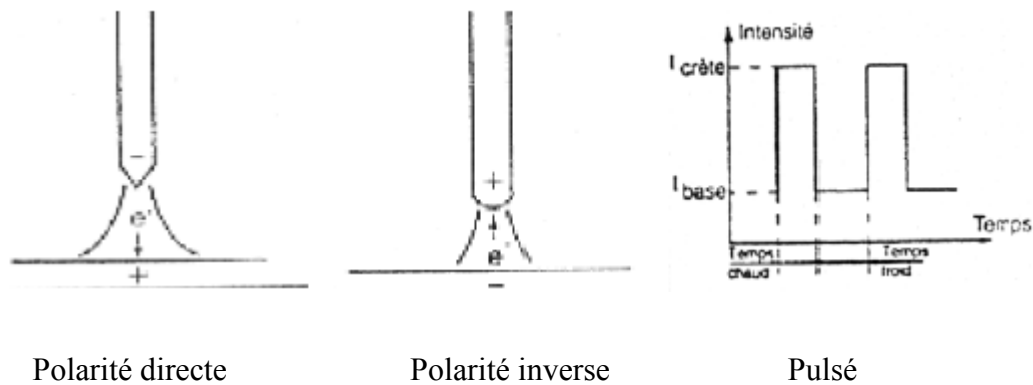
- La tâche cathodique qui reçoit les ions positifs et qui est émettrice d'électrons. Il en résulte une brusque variation de potentiel à proximité de la cathode ;
- La tâche anodique qui est soumise au bombardement électronique. La variation de potentiel est là aussi très brusque ;
- La colonne d'arc, dite aussi colonne de plasma, qui relie les deux tâches en formant un conducteur gazeux. Dans cette partie de l'arc, la chute de tension est faible et linéaire.

Pour que l'opération de soudage se passe correctement, l'arc doit être le plus stable possible. Cependant, celui-ci est conducteur et peut donc être dévié par un champ magnétique créé à partir des particules en mouvement. Ce phénomène ne se produit que dans le cas d'une source continue. Il est possible de redresser le flux en équilibrant la masse, en réduisant la distance tube contact tôle ou en enroulant le câble d'amené du courant autour de la pièce.

**Alimentation de l'arc :** La source d'alimentation d'un poste de soudage à l'arc est un générateur de courant continu ou alternatif, caractérisé par :

- La tension à vide  $U_0$  : elle doit être comprise entre 40 et 100V pour créer l'amorçage ;
- L'intensité du court-circuit  $I_{cc}$  : elle ne doit pas être trop intense pour ne pas endommager le générateur ;
- L'intensité du soudage  $I_S$  : elle correspond à la tension de soudage  $U_S$ . Le choix de la nature du courant dépend de la matière à souder, de la géométrie de soudage et de la qualité recherchée. Nous distinguons :
  - ✓ Le courant continu en polarité directe : L'électrode est reliée à la cathode du générateur et émet des électrons. La pièce à souder joue le rôle d'anode et subit le bombardement électronique.

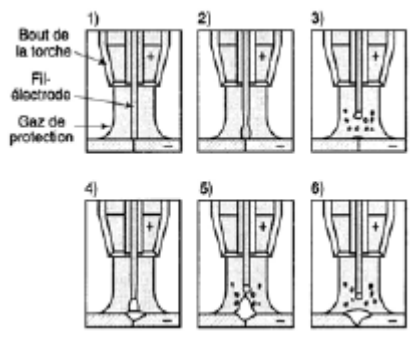
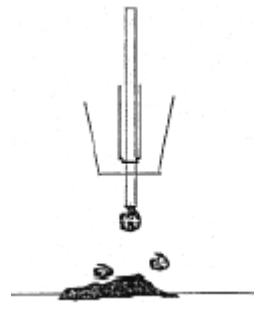
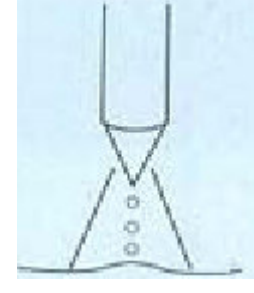
- ✓ Le courant continu en polarité inverse : L'électrode est dans ce cas reliée à l'anode et la pièce à souder à la cathode. La pièce est alors émissive et c'est l'électrode qui subit le bombardement.
- ✓ Le courant pulsé : Variant du courant continu, il engendre une succession de temps froids, avec maintien de l'arc, et de temps chaud (pics d'intensité) assurant la pénétration. Cette technique permet de mieux maîtriser l'énergie apportée à la pièce.
- ✓ Le courant alternatif : Caractérisée par un changement de polarité à chaque demi-période, elle permet d'alterner polarité directe et polarité inverse (figure 3).



**Figure 3.** Les différents courants du générateur.

**Transfert du métal :** Le soudage à l'arc de type MIG/MAG étant toujours alimenté en courant continu avec polarité inverse, l'électrode fusible est reliée au pôle positif. Le fil est alors soumis au flux d'électrons, ce qui favorise la fusion. Le choix de la polarité inverse s'explique par une plus grande stabilité de l'arc. En effet, dans le cas d'une polarisation directe, les gouttes de métal sont plus grosses et se détachent moins facilement, ce qui conduit à l'obtention d'un cordon bombé.

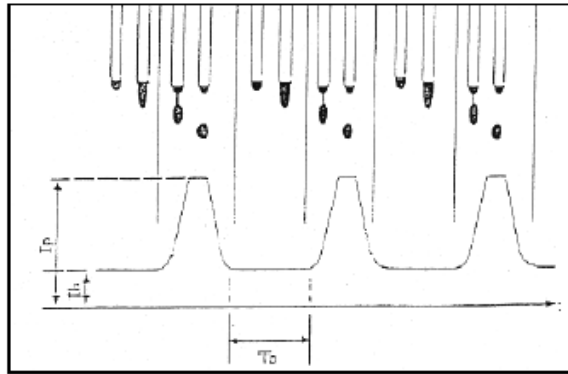
A partir de ce type d'alimentation, le transfert de métal dans l'arc peut s'effectuer de plusieurs façons dépendant de la nature du gaz de protection, de la tension et de l'intensité de l'arc. On dénombre trois modes de transfert de base (tableau 3):

<p><b>Le transfert par court circuit</b> : Obtenue pour de faible énergie d'arc (&lt;200A et 14 à 20V), il se caractérise par la formation d'une goutte en bout de fil venant en contact avec le bain liquide. Le courant augmente alors rapidement, faisant apparaître un pincement facilitant le détachement de la goutte. Ce phénomène se répète à des fréquences de 50 à 200 Hz. Cette technique permet de souder de faibles épaisseurs grâce à une grande maîtrise du bain de fusion mais conduit à un arc court et instable et à des projections de métal sur les pièces soudées.</p>	
<p><b>Le transfert globulaire</b> : Compris entre les deux modes précédents, il se caractérise par une croissance lente des gouttes. L'intensité n'étant pas suffisante pour expulser la goutte, celle-ci va grossir jusqu'à tomber sous son propre poids. La goutte suit alors une trajectoire aléatoire qui n'est pas toujours dans l'axe de l'arc. Ce mode, instable, conduit à de faible profondeur de pénétration et à de nombreuses projections.</p>	
<p><b>Le transfert par pulvérisation axiale</b> : Dans le cas des grandes énergies (&gt; à 30V et à 250A), l'extrémité du fil présente un cône allongé. Le transfert se produit sous forme de fines gouttelettes dont le diamètre est inférieur à celui du fil et qui sont projetées à grande vitesse sur la pièce. Ce mode autorise une grande profondeur de pénétration et des volumes de métal déposés importants.</p>	

**Tableau 3.** Les trois modes de transferts de base.

A ces trois modes de transfert de base, il faut ajouter les trois modes dérivés suivants :

**Le régime pulsé** : Un courant de base maintenant l'arc établi est associé à des pics d'intensité permettant le transfert d'une fine gouttelette. Ce mode de transfert présente les mêmes avantages que la pulvérisation axiale mais à courant moyen inférieur. Il permet de s'affranchir des problèmes liés au transfert globulaire lorsque les conditions exigent son utilisation (figure 4).



**Figure 4.** Transfert par courant pulsé.

**Le transfert par court circuit forcé :** Le transfert par court circuit ne permettant pas dessouder à des vitesses importantes ( $\leq 0,5$  m/min), et le transfert globulaire entraînant de grosses projections, les soudeurs ont souvent recours à ce mode dérivé. Avec une énergie d'arc située dans le domaine globulaire et un poste de soudage transistorisé, il permet de maintenir un transfert par court circuit et d'accroître la vitesse de soudage tout en améliorant le profil de la pénétration.

**Le transfert à veine liquide rotative :** A très forte énergie de soudage, le transfert par pulvérisation axiale est soumis à des forces électromagnétiques importantes. Le métal en transfert se met alors à tourner formant une veine liquide rotative.

#### 11.2.5. Eléments constitutifs d'un poste de soudage

L'appareillage nécessaire pour l'application des procédés semi-automatiques de type MIG/MAG consiste en une source de courant, un dévidoir, un pistolet ou une torche à souder, un câble de retour de courant et une bouteille de gaz, un manodétendeur-débitmètre et sa canalisation.

**Générateur :** Le générateur de courant continu, généralement associé à un boîtier de commande permettant l'ensemble des réglages (U et I), doit avoir une gamme de courant et d'intensité correspondant au mode de transfert souhaité. Ce mode de transfert, comme nous l'avons précisé précédemment est choisi, à partir du boîtier de commande en fonction de l'assemblage à réaliser, c'est à dire des épaisseurs à souder, de la préparation, de la position de soudage...

**Fil :** Le fil tien un rôle prépondérant dans la formation de l'arc électrique et donc dans l'opération d'assemblage, que ce soit par son diamètre ou par sa composition. En effet, plus le diamètre du fil sera grand, plus le taux de dépôt et la profondeur de pénétration décroîtront, plus la largeur du cordon augmentera et plus l'énergie nécessaire à la fusion sera élevée.

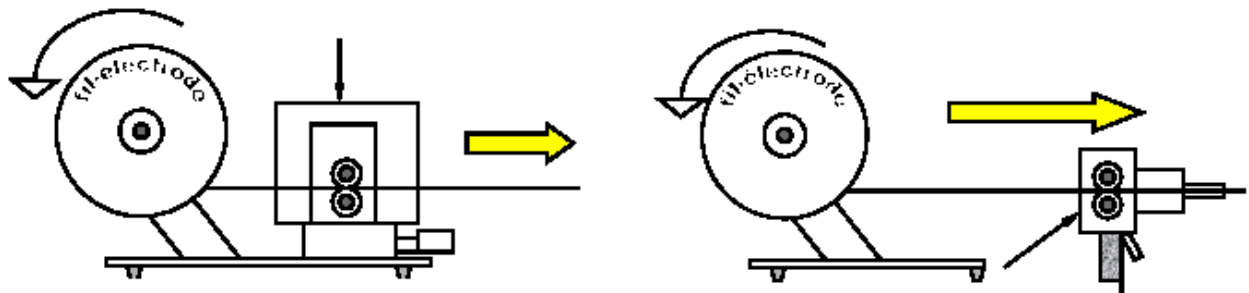
Le fil, de part sa composition, apporte des éléments susceptibles de modifier les caractéristiques de la soudure. Les éléments d'alliages doivent donc être ajustés afin d'obtenir une soudure dont les



propriétés sont au moins égales à celle du métal de base. Le choix de la composition peut aussi conduire à une meilleure stabilisation de l'arc, une réduction des projections et des fumées, et une diminution du taux d'oxygène dans la soudure. Le choix du fil pour l'opération de soudage effectuée en tenant compte de quatre points de l'état de surface de la pièce, de la nature de la pièce à souder, du gaz de protection utilisé ainsi que du degré de résilience requis.

**Dévidage :** Le dévidage est la fonction qui assure l'entraînement du fil électrode de la bobine jusqu'au tube contact. Son rôle est primordial car la vitesse du fil détermine la qualité du soudage et la stabilité de l'arc. Le fil devant s'arrêter instantanément, les supports de bobine sont équipés d'un frein. Dans ce but, les dévidoirs sont munis d'un système d'entraînement du fil utilisant des roues, appelées galets d'entraînement, qui s'appuient de chaque côté du fil. En tournant, les galets entraînent le fil dans la gaine de la torche de soudage.

On distingue trois types de dévidoirs selon que le fil est poussé, tiré ou les deux. Ainsi, les dévidoirs séparés de la torche sont à mode de dévidage «poussé », tandis que ceux intégrés aux pistolets sont à mode «tiré » depuis la torche (figure 5).



**Figure 5.** Les modes poussé et tiré de dévidage.

La vitesse de défilement du fil  $V_f$  doit être adaptée à celle du soudage, c'est à dire que l'arc doit toujours devancer le bain liquide. Une vitesse trop lente conduit à des cordons trop larges et irréguliers et une vitesse trop rapide entraîne un cordon étroit et un mauvais mouillage.

**Torche :** Une torche ou un pistolet, qui assure l'arrivée et le guidage final du fil, dirige l'arc, assure le contact électrique et amène le gaz de protection au travers d'une buse. Elle est reliée au générateur par l'intermédiaire d'un faisceau regroupant le fil électrode, le câble de puissance, le conduit de gaz et dans certain cas une arrivée et un retour d'eau en vue du refroidissement (figure 6).

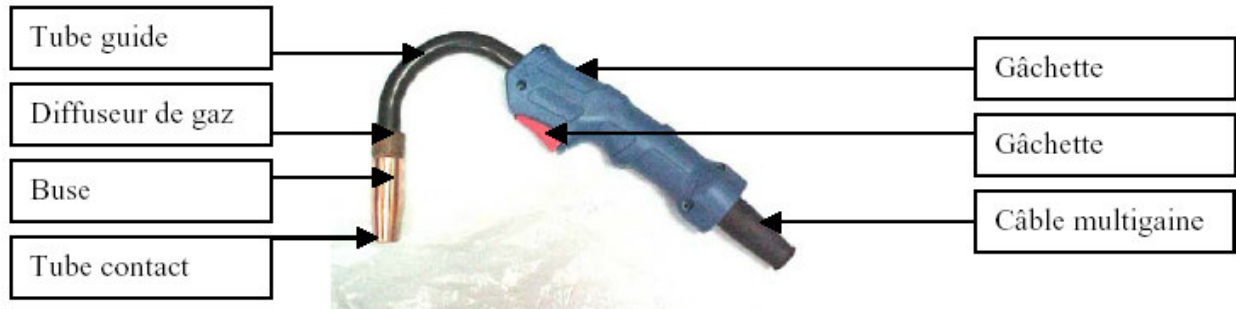


Figure 6. Torche de soudage.

Il existe également des pistolets à dévidoir intégré possédant, en plus un petit boîtier qui peut contenir une bobine de 100 mm de diamètre, soit la grosseur nécessaire pour porter un kilogramme de fil d'acier ou un demi-kilogramme de fil d'aluminium. Le fil n'a alors à être tiré que sur une très courte distance, ce qui est moins exigeant pour le petit moteur intégré à la poignée.

La torche permet de régler la longueur de la partie terminale Pt, c'est à dire la longueur de fil sortie du tube de contact. Cette dernière a ne grande influence sur la fusion du fil car elle se trouve soumise à un échauffement par effet Joules.

$$R = \rho * Pt / s$$

Avec :  $\rho$  : résistivité.

R : résistance du fil.

S : section du fil.

Ainsi, pour une énergie donnée, et lorsque la longueur terminale croît, la résistance croît et l'énergie dissipée par effet Joules ( $W=R.I^2.t$ ) est plus importante. Le fil fond plus vite, déplaçant le point d'équilibre vers une vitesse supérieure. Inversement, pour une diminution de Pt, il faudra diminuer la vitesse de dévidage.

**Gaz :** Lors des travaux de soudage, les métaux ont tendance à réagir avec l'oxygène et l'azote contenus dans l'air pour former des oxydes et des nitrures. L'oxygène très réactif avec le carbone, tend également à former du monoxyde de carbone. Ces différentes réactions contribuant à faire apparaître de nombreux défauts de soudage, l'opération est effectuée sous protection gazeuse.

Dans les procédés de soudage à l'arc avec électrode enrobée, nous distinguons les méthodes MIG et MAG par la nature du gaz utilisé. Dans le cas du MIG, le gaz est inerte, c'est à dire qu'il ne réagit pas avec le métal. Inversement, pour le MAG, le gaz doit réagir et donc être actif.

Parmi les gaz inertes, nous noterons particulièrement la présence de :

- L'argon (Ar) qui est un gaz inerte monoatomique, c'est-à-dire dont la molécule se compose d'un seul atome. Plus lourd que l'air, il a tendance à descendre en sortie de la buse ce qui assure une bonne couverture du bain de fusion ;
- L'hélium (He) : Beaucoup plus léger que l'air, ce gaz monoatomique a tendance à s'élever à la sortie de la buse de soudage. Le débit d'hélium requis pour assurer une bonne couverture du bain de fusion représente pratiquement le double de celui nécessaire avec l'argon (sauf lorsqu'on soude au plafond).

Dans le cas des gaz actifs :

- Le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) : Un atome d'oxygène peut être libéré pendant le soudage et réagir avec le métal en fusion pour l'oxyder. On dit que c'est un gaz carburant; le carbone qu'il contient a tendance à s'incorporer au métal en fusion, ce gaz possède les mêmes caractéristiques que l'argon en ce qui concerne la couverture du bain de fusion. Entraînant beaucoup de projections lorsqu'il est employé seul, on l'utilise fréquemment en mélange avec l'argon pour les aciers à faible teneur en carbone ;
- L'oxygène : Bien que l'oxygène (O<sub>2</sub>) ne soit pas utilisé seul en soudage à l'arc, il fait partie des mélanges. Il s'agit évidemment d'un gaz actif oxydant les métaux en fusion ;
- L'hydrogène (H<sub>2</sub>) n'oxyde pas le métal en fusion comme l'oxygène, mais a au contraire tendance à se combiner avec l'oxygène pour former de l'eau. On dit qu'il est réducteur d'oxydation. Bien qu'il soit deux fois plus léger que l'hélium, son influence est peu marquée sur la couverture du bain de fusion car il est rarement employé seul.

L'utilisation d'un gaz seul est très rare car il ne possède généralement pas toutes les caractéristiques voulues. Les soudeurs font donc appel à des mélanges avec différentes proportions de gaz. L'ensemble des mélanges utilisés pour les soudages MIG et MAG est constitué à partir d'Argon afin de garder ses caractéristiques (amorçage et maintien de l'arc facile, gaz inerte).

Les mélanges les plus couramment utilisés sont :

- Ar + CO<sub>2</sub>; Ar + O<sub>2</sub>; Ar + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>
- Ar + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>; He + Ar + CO<sub>2</sub>
- Ar + He + CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>
- Ar + He.

Le choix du mélange est très important pour le soudeur car il détermine la stabilité de l'arc, le profil de pénétration, l'angle de mouillage, la compacité et la composition chimique du cordon.

Il faut donc prendre en compte les quatre paramètres suivants :

- La masse spécifique : Plus un gaz sera lourd, plus il recouvrera correctement le cordon dans le cas de soudure à plat et mal dans celui de soudure au plafond.
- La stabilité moléculaire : Dans le cas des gaz composés de plusieurs molécules, une décomposition peut se produire au cours du soudage et provoquer une instabilité de l'arc et des éclaboussures par expansion du volume.
- Le potentiel d'ionisation : Exprimé en électronvolts (eV), il indique la quantité minimale d'énergie requise pour ioniser le gaz et donc la facilité d'amorçage et de stabilité du gaz. Plus ce potentiel sera faible, plus l'arc s'amorcera facilement.
- La conductibilité thermique : Elle détermine la capacité du gaz à conduire la chaleur ainsi que la largeur de l'arc. En effet, un gaz avec une forte conductivité thermique évacue la chaleur produite au centre de l'arc plus facilement et conduit à une largeur d'arc plus importante mais moins dense qu'un gaz avec une faible conductivité.

**Le manodétendeur débitmètre** : sert à réduire la pression du gaz de protection se trouvant dans la bonbonne et à en doser le débit lors du soudage. Un débit de gaz régulier est indispensable à la réussite du travail de soudage. Dans le cas des procédés MIG/MAG avec protection gazeuse, on doit donc utiliser des manodétendeurs débitmètres pour contrôler la quantité de gaz de protection.

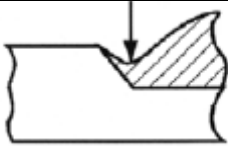
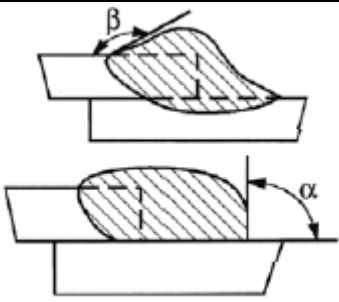
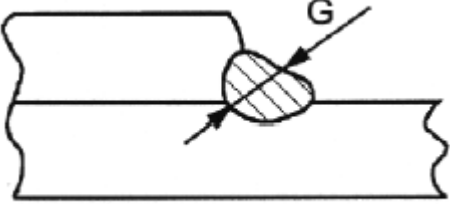
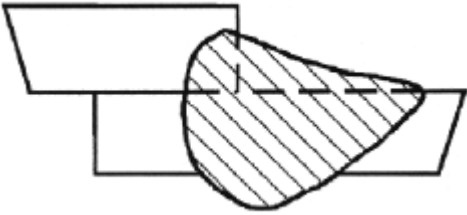
Les débitmètres sont de deux types :

- à bille : le débitmètre prend la forme d'un tube de verre gradué dans lequel est posée une bille dont la position indique le débit.
- à cadran : détendeur surmonté de deux manomètres ; le premier indiquant la pression et le volume du gaz dans la bonbonne, et le second, le débit du gaz de protection.

### **11.2.6. Les défauts de soudage**

Lors d'une opération de soudage, de nombreux paramètres tels que l'énergie de soudage, le gaz ou le fil utilisé, peuvent intervenir sur la qualité du cordon. Ainsi, de mauvais réglages ou un matériel inadapté conduisent généralement à des défauts de soudure, acceptable ou non. De nombreux défauts recensés par les soudeurs sont incorporés et définissant la qualité d'un cordon de soudure sur une ligne d'échappement (tableau 4).

**Les défauts de géométrie :** (tableau 4).

	<p><b>Les caniveaux</b> sont des sillons apparaissant dans le métal fondu. Situé parallèlement à l'axe longitudinal du cordon et sur la ligne de fusion, il indique une inégalité de chauffage.</p>
	<p><b>Cordon bombé et défaut de raccordement</b> (cordon roulé) sont des défauts inacceptables conduisant au rebut (que si <math>P &gt; e</math> pour l'excès). Ce type de défaut est dû à une énergie de soudage trop grande ou à un temps de maintien trop long. Il faut donc adapter la vitesse, l'intensité et/ou la tension de soudage.</p>
	<p><b>Le creusement longitudinal</b> du cordon est caractéristique d'un manque de métal dû à un écartement trop important des bords à souder ou à l'utilisation d'un fil non adapté (diamètre principalement).</p> <p><b>L'effondrement du cordon</b>, se distinguant par un bourrelet de métal à l'envers de la soudure, est le défaut inverse du précédent. Il est dû à l'exécution trop lente de la soudure ou à un écartement initial des bords trop faibles.</p>
	<p><b>Le manque ou l'excès de pénétration</b> proviennent de mauvaises conditions opératoires (vitesse trop grande, intensité de courant insuffisante, carence en métal d'apport, etc.). Ils créent un affaiblissement plus ou moins important du joint et un risque de corrosion ultérieure.</p>

**Tableau 4.** Les défauts de la géométrie.

**Les fissures :** Parmi les défauts existant chez les aciers inoxydables, les plus dangereux sont la fissuration à froid ou à chaud et peuvent conduire à la rupture de la pièce. Il est néanmoins possible de réaliser des retouches au TIG sur ces défauts afin de rendre la pièce conforme (figure 7).

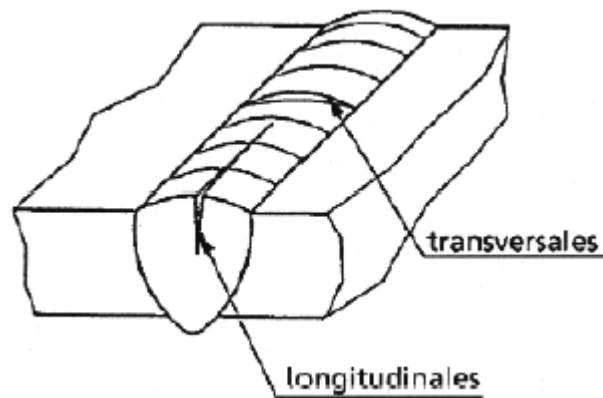


Figure 7. Les fissures dans le cordon.

**La fissuration à chaud** : est due à la présence entre les grains d'un film liquide de sulfure de fer ou de phosphore durant le retrait à la solidification. Ce phénomène résulte soit d'une solidification étalée sur un large intervalle de température et donc à la solidification tardive des éléments possédant un bas point de fusion, soit d'une forme de cordon ou d'un bridage inadéquate, soit d'une vitesse de soudage trop grande. Ce type de défaut se caractérise par des fissures larges, ouvertes, perpendiculaires aux vagues de solidification et généralement oxydées à l'intérieur (figure 8).

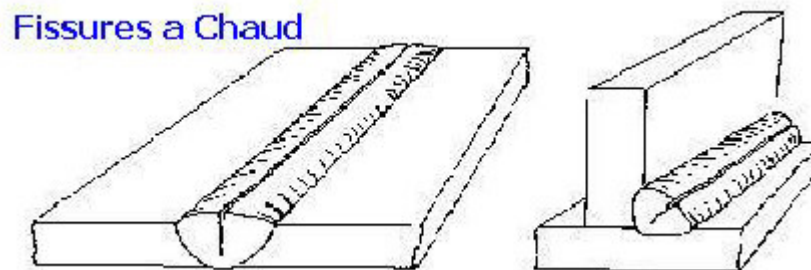


Figure 8. Fissures à chaud.

Le risque de fissuration à chaud peut être diminué en minimisant le bridage afin de faciliter le retrait, en jouant sur les paramètres de soudage et notamment sur la tension et l'intensité, ou en diminuant la vitesse de soudage. Une autre possibilité est de choisir des alliages à basse teneur en carbone, en phosphore et en soufre. L'utilisation d'aciers ferritiques, comme dans le cas des lignes d'échappement, permet également de réduire les risques grâce à une meilleure solubilité de ces éléments dans la ferrite.

**La fissuration à froid** : est essentiellement due à l'hydrogène dissout dans le métal fondu et diffusé dans la ZAT. Au voisinage du métal fondu, l'eau se décompose et se dissout en grande quantité (4

cm<sup>3</sup> pour le soudage MIG). Au cours du refroidissement, sa solubilité diminuant, l'hydrogène se rassemble pour former des molécules H<sub>2</sub> puis des soufflures. Du fait de la diffusion, la pression du gaz va tendre à augmenter et à provoquer l'apparition de fissure dans les zones les moins ductiles comme la partie surchauffée de la ZAT. Ces fissures se forment à basse température, souvent plusieurs heures après le soudage, généralement dans la zone affectée thermiquement. Elles sont fines, non oxydées et perpendiculaires aux directions de contraintes maximales (figure 9).

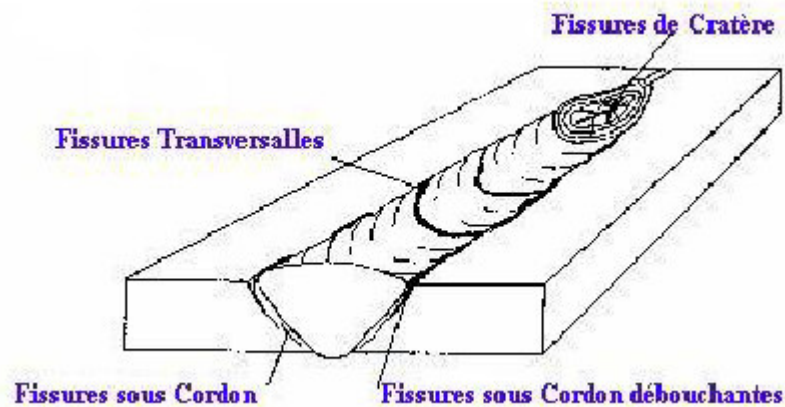
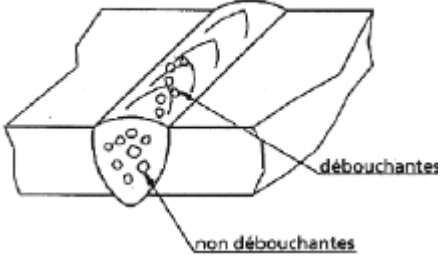
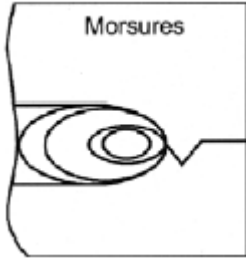

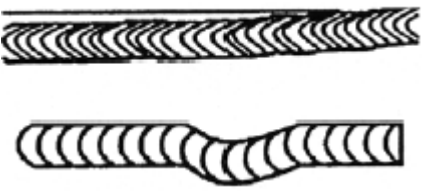
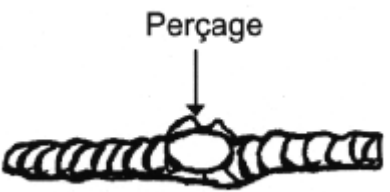


Figure 9. Fissuration à froid.

Afin de réduire les risques de fissuration, il est important de réduire au maximum toute intrusion d'hydrogène, que ce soit avant, pendant ou après le soudage. Les soudeurs ont souvent recours dans ce cas à un préchauffage ou à un post-chauffage. Il est également possible, bien que plus difficile, de diminuer le niveau de contraintes, que ce soit par une relaxation des contraintes résiduelles, une création de contraintes résiduelles favorables ou par une amélioration de la géométrie de raccordement.

**Les autres défauts :** (tableau 5).

<p><b>Les soufflures et les porosités</b> sont des bulles, internes ou débouchantes se trouvant dans le cordon sans alignement spécifique. Leur présence peut avoir deux origines : d'une part la diminution brutale de la solubilité d'un élément gazeux tel que l'azote ou l'hydrogène lors du passage de l'état liquide à l'état solide, et d'autre part la formation d'oxyde de carbone par réaction chimique au sein du métal fondu. Ce type de défaut est inacceptable car source de fissuration ou de piqûres de corrosion.</p> <p>Leur présence implique une retouche au TIG.</p>	
<p><b>Les morsures et les retassures au cratère final</b> sont dues au retrait du métal au cours du refroidissement. Ces défauts sont inacceptables s'ils sont trop importants et si le test d'étanchéité n'est pas validé. De même que dans le cas des soufflures, une retouche au TIG permettant de refondre le métal est réalisable et conforme.</p>	
<p><b>Le recouvrement incomplet ou interrompu de la pièce</b> est dû à la perte de l'arc ou à un défaut de positionnement de la torche. Il est important dans ce cas de réaliser une retouche au TIG.</p>	
<p><b>Défaut de positionnement, sinuosité et rétrécissement du cordon</b> sont souvent présents dans le cas de soudage manuel ou dans celui d'un soudage automatique mal réglé. Ce défaut peut notamment avoir pour origine un soufflage magnétique. Ces défauts sont inacceptables sauf dans le cas où la pièce serait contrôlée bonne en étanchéité. Il nécessite une refusion au TIG de préférence ou au MAG sur une longueur minimale de 30mm.</p>	
<p><b>Le perçage de la pièce à souder</b> est dû à un excès d'énergie lors de l'opération de soudage et donc à un volume de métal fondu trop important. Le cordon perd donc son étanchéité et le trou créé peut être source de fissure puis de rupture de l'assemblage. Une reprise au TIG ou au MAG permet de recouvrir cette zone et de rendre le cordon conforme.</p>	



**Les projections** sont des billes de métal, plus ou moins adhérentes sur les pièces et les outillages de soudage, expulsées en dehors du cordon. Ce défaut, inévitable à l'amorçage et lié au procédé, est facilement supprimé par un brossage ou un décapage. Dans le cas de projections importantes et en grande quantité, un dérèglement de l'appareillage est très sûrement en cause.

**Un résidu de fil** adhérent auprès du cordon provient d'une fusion incomplète du fil d'apport. Bien qu'acceptable, il est important de couper ce résidu pour des raisons de présentation.

**Tableau 5.** Autres défauts de soudage.

### II.3. Traitements thermiques et soudage

La normalisation provoque la recristallisation aussi de l'acier et affine donc la structure à gros grains obtenue par coulée ou laminage (forgeage estampage). Ce traitement s'emploie largement en remplacement de la trempe et du revenu pour améliorer les propriétés des pièces moulées en acier. Un refroidissement accéléré à l'air conduit à la décomposition de l'austénite aux températures plus basses et augmente ainsi la dispersion de la structure ferrite cémentite ainsi que la quantité de la perlite ou plus précisément, de quasi eutectoïde du type sorbite ou troostite. Ceci augmente de (10 à 15 %) la résistance et la dureté de l'acier normalisé à haut et moyen carbone par rapport à l'acier recuit. Le but de la normalisation varie en fonction de la composition de l'acier. Pour les aciers à bas carbone, la normalisation étant une opération bien plus simple, elle s'emploie au lieu du recuit en augmentant quelque peu la dureté.

La normalisation assure en coupe un meilleur état de surface. Pour un acier à teneur moyenne en carbone, la normalisation remplace la trempe et le revenu à haute température. Les propriétés mécaniques obtenues sont plus faibles, mais l'opération produit une déformation bien moindre que celle due à la trempe et la probabilité d'apparition des formes n'existe pratiquement pas. Dans le cas d'un acier à haut carbone (hypereutectoïde), la normalisation est appliquée pour éliminer le réseau de cémentite qui peut apparaître lors d'un refroidissement lent dans l'intervalle de température entre  $A_{cm}$  et  $A_1$ . La normalisation suivie de recuit d'adoucissement (600 à 650°C) est appliquée souvent au lieu du recuit complet pour corriger la structure des aciers alliés, la productivité de ces deux opérations étant plus élevée que celle du recuit tout seul. Donc la normalisation est destinée non seulement à la régénération d'un acier surchauffé (affinage du grain, homogénéisation de la structure), mais aussi à :

- Supprimer les effets de la trempe. - Supprimer l'écrouissage et les tensions internes. La température de normalisation est toujours supérieure à celle de la trempe qui la précède et le

refroidissement doit être lent (à l'abri de l'air). Après la normalisation les aciers trempés retrouvent les caractéristiques qu'ils avaient avant la trempe.

Le soudage en lui-même provoque un véritable traitement thermique dans la zone voisine de la soudure, le plus communément appelée ZAT (zone affectée thermiquement). Il s'ensuit couramment soit un adoucissement local trop important, soit une fragilisation dont les conséquences sont aggravées par les risques de formation de défauts dans la soudure et son voisinage (contraintes ou même fissuration d'origine thermique), et éventuellement une sensibilisation à la corrosion, selon les modifications structurales qui en résultent. Ces inconvénients peuvent en grande partie être atténués par des traitements de préchauffage ou de post chauffage qui ont surtout pour but de diminuer les vitesses de refroidissement après soudage, et par le choix d'un alliage dont la structure est stabilisée et a la faculté de ne subir que des modifications structurales limitées ou non dangereuses. Mais, souvent, il est nécessaire de faire un traitement thermique d'ensemble de la pièce, même pour des constructions énormes, tout au moins pour la relaxation des contraintes résiduelles inévitables après soudage.

Il est intéressant de noter que, dans la classification habituelle des aciers en fonction de leur soudabilité, ceux dont il est question ici se classent pour la plupart (norme Afnor E 83-100) :

- en catégorie 2 : aciers devant être soudés en absence d'hydrogène et nécessitant un préchauffage et un post-chauffage ;
- ou en catégorie 3 : aciers dont le soudage est à éviter, compte tenu des risques importants de fissuration. Seuls quelques-uns d'entre eux, tels C30, C35, 16MnCr4, 18CrMo4, 16NiCr4 et 10NiCr5-4, peuvent être classés en catégorie 1 (aciers à souder avec bas hydrogène et préchauffage) et un plus petit nombre encore, tels C10, C15, C16 en catégorie 0 (aciers sans problème particulier, à souder néanmoins avec des procédés à bas hydrogène quand l'épaisseur dépasse 20 mm).

### **II.3.1. Traitement thermique de recuit**

Le recuit est un processus de traitement thermique utilisé pour réduire la dureté, augmenter la ductilité et faciliter l'élimination des contraintes internes.

#### ***Avantages***

En fonction des propriétés désirées, les avantages varient et incluent :

- Rectification plus aisée ;
- Stabilité dimensionnelle ;

- Amélioration des propriétés mécaniques et électriques.

### ***Applications***

Principalement les produits semi-finis ; par ex., les produits forgés, feuilles et fils travaillés à froid, moulés, etc.

Des variations de recuit peuvent être appliquées à tous les métaux.

### ***Processus***

Le recuit est un terme générique et peut être classé en fonction de la température. Il est appliqué pour diverses raisons :

- Pour adoucir un métal afin de faciliter sa rectification ;
- Pour libérer les contraintes internes induites par certains processus antérieurs (souvent afin de permettre un traitement ultérieur sans fracturation) ;
- Pour corriger une structure à gros grains ;
- Pour amener des éléments d'alliage dans une solution.

Il peut s'effectuer sous vide ou dans une atmosphère réductrice (une finition brillante est requise), dans l'air (les pièces seront ultérieurement rectifiées) ou dans une atmosphère endothermique/neutre (sans décarburation, mais avec une finition non brillante).

## **II.3.2. Normalisation**

La normalisation a pour but d'obtenir un acier uniforme et une structure à grains fins. Le processus permet d'obtenir une microstructure prévisible et la stabilité des propriétés mécaniques de l'acier.

### ***Avantages***

Après le forgeage, le laminage à chaud ou le moulage d'un acier, la microstructure irrégulière, constituée de larges grains et de composants structurels tels que de la bainite et des carbures. Une telle microstructure a un impact négatif sur les propriétés mécaniques de l'acier. A travers la normalisation, l'acier peut obtenir une structure à grains fins plus homogène.

### ***Applications***

La normalisation est principalement appliquée aux aciers au carbone faiblement alliés afin de normaliser leur structure après le forgeage, le laminage à chaud ou la coulée. La dureté obtenue après la normalisation dépend de l'analyse dimensionnelle de l'acier et de la vitesse de refroidissement utilisée (environ 100-250 HB).

### ***Processus***

Pendant la normalisation, le matériau est chauffé à une température environ équivalente à la température de durcissement (800-920 °C). A cette température, de nouveaux grains austénitiques se forment. Les grains austénitiques sont beaucoup plus petits que les grains ferritiques précédents. Après les avoir chauffés pendant un temps de maintien à température court, les composants sont refroidis librement dans l'air (gaz). Pendant le refroidissement, de nouveaux grains ferritiques se forment avec une taille de grain encore plus fine. Dans certains cas, le chauffage et le refroidissement s'effectuent sous un gaz protecteur afin d'éviter l'oxydation et la décarburation.

Parmi les **traitements thermiques**, les recuits sont des traitements fondamentaux. On définit souvent les recuits comme traitements réduisant la dureté ou modifiant la structure des grains de l'acier, mais cette définition reste incomplète, car il est nécessaire de préciser le but recherché afin de fixer les paramètres caractéristiques de l'état initial avant recuit et de la structure à obtenir.

Pratiquement le recuit se définit par deux points principaux:

- La température de chauffage ;
- La durée du traitement.

Mais il ne faut pas négliger deux autres éléments très importants qui sont :

- La vitesse de chauffage ;
- La vitesse de refroidissement.

Les méthodes de traitements thermiques après soudage incluent le plus souvent, le recuit de normalisation et les recuits de dégazage et surtout de détente.

### **II.3.3. Cycle thermique du recuit**

- Chauffage jusqu'à la température de recuit ;
- Maintient isotherme à cette température déterminée, d'une durée variable ou avec des oscillations autour de cette température ;
- Refroidissement généralement lent, le plus souvent à l'air ou dans un four ou parfois dans le sable ;

### ***Recuit de normalisation***

Egalement qualifié de recuit de régénération ou de perlitisation, il sert à affiner les grains (figure 10) pour les pièces ayant subi un grossissement des grains parce qu'ils ont été exposés à une température élevée lors d'une opération de soudage. Il sert également à supprimer les tensions internes et de recuit ainsi que supprimer les zones de trempe et améliorer les propriétés mécaniques (augmentation du coefficient de sécurité). Le traitement s'effectue, pour une durée de quelques

minutes, entre 40 et 50°C au-dessus de la limite inférieure AC3 du domaine austénitique (figure 10).

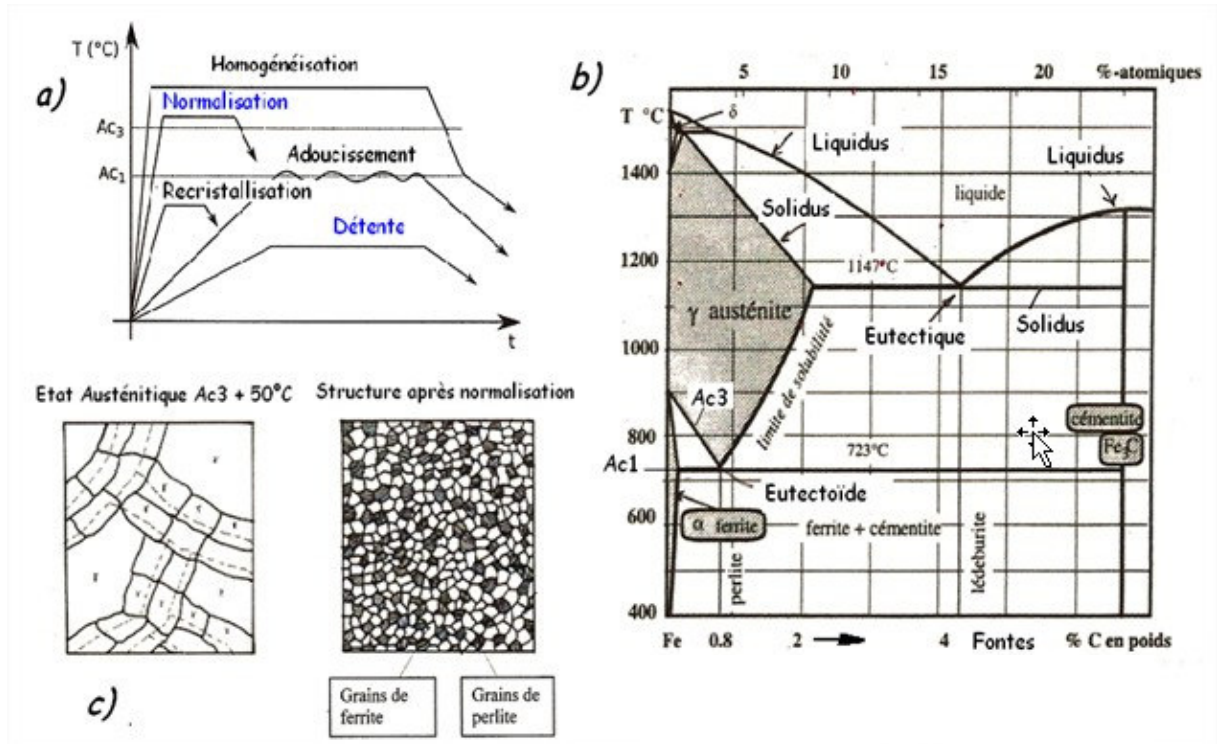


Figure 10. Recuit de normalisation.

## II.4. Les propriétés mécaniques

### II.4.1. La limite d'élasticité

La limite d'élasticité est la limite de la charge unitaire (effort rapporté à la section initiale de l'éprouvette) au-delà de laquelle le métal se déforme d'une manière irréversible c'est-à-dire qu'il ne conserve plus sa géométrie initiale (la pièce considérée n'est plus à la cote). Elle est mesurée au cours du début de l'essai de traction qui est l'essai mécanique de base; sa méthode est décrite par la norme NF EN 10002. Il consiste à soumettre une éprouvette de forme définie à un effort de traction croissant et à enregistrer les variations de la force appliquée et celles de la déformation de l'éprouvette. Le diagramme obtenu constitue la « courbe de traction » (figure 11) qui représente les évolutions de la charge unitaire (effort de traction/section initiale de la partie calibrée de l'éprouvette) à laquelle est soumise l'éprouvette en fonction de l'allongement relatif (allongement/longueur initiale de la base de mesure exprimé en %) qu'elle subit. Cet allongement est mesuré sur la partie calibrée de l'éprouvette; la base de mesure  $l_0$  varie avec la section de la partie calibrée  $S_0$  selon la relation :

La courbe de traction (figure 11) comporte plusieurs domaines :

- une partie linéaire AB, à forte pente dans laquelle le métal subit des déformations réversibles;
- une partie courbe BCD qui correspond au domaine dans lequel le métal subit des déformations irréversibles. Ce domaine peut être divisé en deux parties :
  - ✓ la partie « montante » BC au cours de laquelle l'effort unitaire augmente avec l'allongement. Si l'on s'arrête au point M, le fonctionnement réversible ultérieur du métal se fera selon la droite MN,
  - ✓ la partie « descendante » CD au cours de laquelle l'éprouvette subit une déformation très localisée qui réduit sa section jusqu'à engendrer sa rupture. Les déformations dans la partie AB de la courbe (figure 11) sont réversibles; on les dit « élastiques » et le point B définissant la limite du domaine d'élasticité est dit « limite d'élasticité ». Les figures 11 a et 11 b qui présentent les débuts de deux courbes de traction typiques montrent qu'il n'est pas facile de mesurer sa valeur. En effet on constate que : sur la courbe 11 a, la déformation plastique débute à la faveur d'une instabilité qui se traduit par un crochet. Conventionnellement on détermine alors la limite supérieure d'écoulement  $ReH$  qui est la charge unitaire pour laquelle on observe une chute de l'effort de traction; sur la courbe 11 b, la détermination de la fin de la linéarité dépend de la sensibilité de la mesure des déformations. Conventionnellement on mesure la limite conventionnelle d'élasticité  $R_{px}$

qui est la charge unitaire ayant engendré une déformation plastique (donc permanente) de  $X$  %. En général, on fixe l'allongement plastique à 0,2 % mais, à la condition de disposer d'un extensomètre convenable, on peut adopter 0,1 %, 0,02 % voire 0,01 %. On ne doit jamais perdre de vue que, lorsque cette limite conventionnelle est évaluée, le métal a déjà subi une déformation irréversible. Cette limite peut aussi être mesurée sur les courbes de type 3.2a lorsque la limite  $ReH$  ne peut pas être indéterminée.

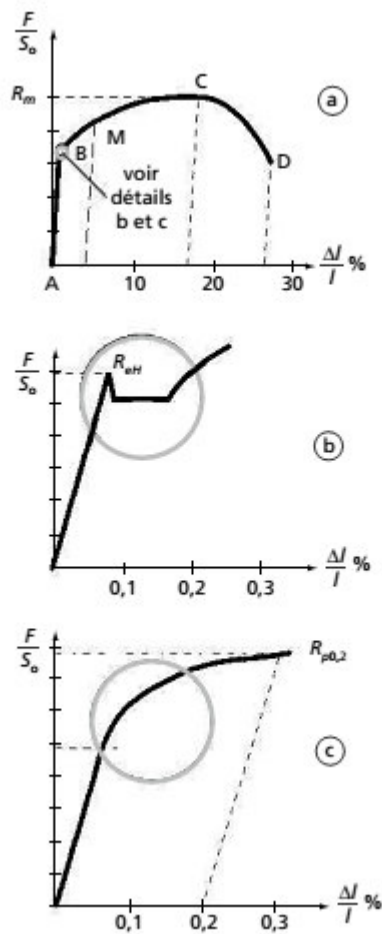


Figure 11. Schéma d'une courbe de traction

#### **II.4.2. La résistance à la traction**

La résistance à la traction  $R_m$  est la charge maximale que peut supporter le métal soumis à une traction pure. Au-delà de cette valeur de la charge unitaire apparaît le phénomène d'instabilité qui conduit à la rupture avec formation de la striction. Sa valeur est déterminée au cours de l'essai de traction; elle correspond au point B de la courbe (figure 11). La résistance à la rupture est une grandeur conventionnelle puisqu'elle fait référence à la section initiale de l'éprouvette mais elle représente une limite que les sollicitations ne doivent pas atteindre pour éviter un risque de ruine. Au-delà du point C (figure 11) l'éprouvette casse. La rupture peut alors se faire selon deux modes: ductile ou fragile.

#### **II.4.3. La résistance à la fatigue**

En cours de service les matériels doivent supporter des charges statiques, mais ils peuvent aussi être soumis à des efforts qui varient dans le temps. Lorsque ces variations prennent une certaine importance et deviennent répétitives, on peut assister à la ruine d'un ensemble alors que les sollicitations qu'il subit atteignent un niveau modeste par rapport à sa capacité de résistance statique. On se heurte alors au phénomène de « fatigue » en face duquel il est nécessaire d'être vigilant car s'il se développe progressivement dans le temps (et parfois sur de très longues durées) il conduit généralement à une rupture brutale. L'analyse des conditions dans lesquelles se produit une rupture par fatigue montre que l'on doit distinguer un stade important qui est celui au cours duquel une fissure se propage jusqu'à diminuer la section travaillante au point de provoquer la rupture brutale de la pièce.





---

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule

Etude

Bibliographique



---

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule

Etude

Expérimentale

# IV

---

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule

# Conclusion



---

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule

# Bibliographie

---

Effet du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécaniques de l'acier utilisé pour la fabrication des réservoirs GPL pour véhicule

# Introduction



## **I. Introduction**

La notion de traitements thermiques recouvre un ensemble d'opérations ayant pour but des transformations structurales effectuées sur les matériaux à l'état solide, sous l'influence de cycles de température convenablement choisis afin de leur conférer des propriétés particulières. Il peut s'y ajouter simultanément des traitements mécaniques (traitements thermomécaniques) ou des traitements chimiques (traitements thermochimiques). On rencontre également des traitements thermiques au cours du refroidissement d'une pièce moulée après solidification et pendant des opérations de mise en forme par déformation plastique, par frittage ou par soudage, etc., quand des transformations structurales, sous l'influence des variations de température au cours de ces opérations, s'ajoutent à celles que ces procédés peuvent eux-mêmes provoquer.

Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent, de conférer à un matériau des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation sous forme de pièce finie, ou à sa mise en œuvre dans les meilleures conditions, sous forme de demi-produit ou d'ébauche. Ces améliorations contribuent très souvent à une diminution des coûts, car elles permettent l'emploi d'alliages bon marché quand on sait les traiter convenablement, ou à diminution du nombre de nuances à utiliser pour un type de fabrication donné, en choisissant un traitement bien adapté à chaque propriété recherchée.

Le présent travail n'a pas vocation à fournir au lecteur une recette particulière. Il a pour objet de mettre en évidence les points essentiels d'où sont issus la plupart des échecs et de contribuer à aider les différents acteurs à aborder un problème de l'influence du temps de maintien du traitement thermique à 920 °C (5 minutes, 10 minutes et 15 minutes) sur les caractéristiques mécanique de l'acier P265 NB destiné aux appareilles à pression de gaz avec les meilleures chances de succès.

# SOMMAIRE

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
I. Introduction.....	1
II. Etude bibliographique.....	2
II.1. Généralité sur les aciers spéciaux.....	2
II.2. Le soudage .....	4
II.3. Traitements thermiques et soudage.....	21
II.4. Les propriétés mécaniques.....	26
III. Etude expérimentale.....	29
III.1. Caractéristiques des matériaux utilisés.....	29
III.2. Essai mécanique avant traitement thermique de l'acier en étude.....	34
III.3. Essais mécanique après traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 5 minutes.....	38
III.4. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 10 minutes.....	43
III.5. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 15 minutes.....	47
III.6. Essai de fatigue pour réservoir GPLc.....	52
IV Conclusion .....	53
V. Bibliographie.....	55
Annexe.....	56



### III. Etude expérimentale

#### III.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

##### III.1.1. Corps

Le corps de réservoir GPLc est fabriqué en tôle d'acier de qualité commerciale BS2 de nomenclature P245NB, défini par la norme (NF/EN 10120).

##### III.1.2. Composition chimique

Le tableau suivant définit les valeurs de coulée et de produit des composés chimiques constituant la tôle de la bouteille à gaz de type réservoir GPLc dont le corps de la bouteille à gaz est conçu.

Qualité	C% max		Mn%	S% max		P% max		Si% max	
	coulée	produit	coulée	coulée	produit	coulée	produit	coulée	produit
P265NB									
BS2	0.19	0.21	0.4	0.015	0.04	0.025	0.04	0.25	0.25

**Tableau 6.** Valeur de coulée et de produit spécifiant les principaux éléments alliés qui compose la BS2.

##### III.1.3. Caractéristiques mécaniques

A chaque livraison des bobines de tôles d'aciers acquis pour la fabrication de la bouteille à gaz de type RES/GPL, une identification mécanique bien détaillé par le fournisseur doit toujours accompagner son produit, la résistance à la traction (selon la norme 10002-1 Octobre 2001) à l'état normalisée doit être comprise entre 410 à 500 N/mm<sup>2</sup> avec un allongement minimum de 32%, comme le montre le tableau suivant :

Qualité	Re mini kg/mm <sup>2</sup>	Rm kg/mm <sup>2</sup>	A% mini
P265NB	265	41-50	32

**Tableau 7.** Données des paramètres mécaniques des tôles d'aciers BS2

##### III.1.4. Equipements de mesure utilisés pour l'acier en étude

Pour caractérisé notre produits (Réservoirs GPLc), nous avons utilisé plusieurs équipements de mesures, ces instruments appartiens au laboratoire du département contrôle qualité de l'entreprise BAG (figures 12, 13, 14 et 15) (l'essai de fatigue est réalisée conformément à la norme de fabrication la norme 1442 + A1 Avril 2008 –voir les exigences en annexe-).

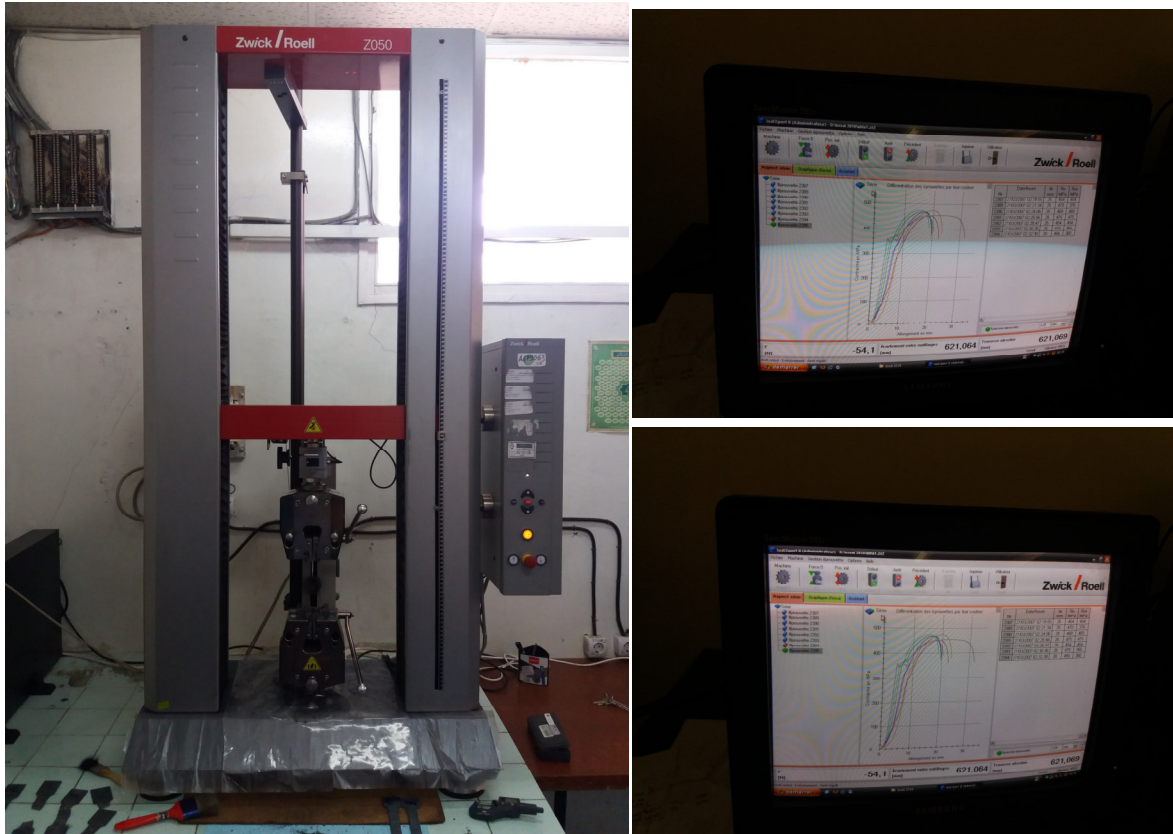


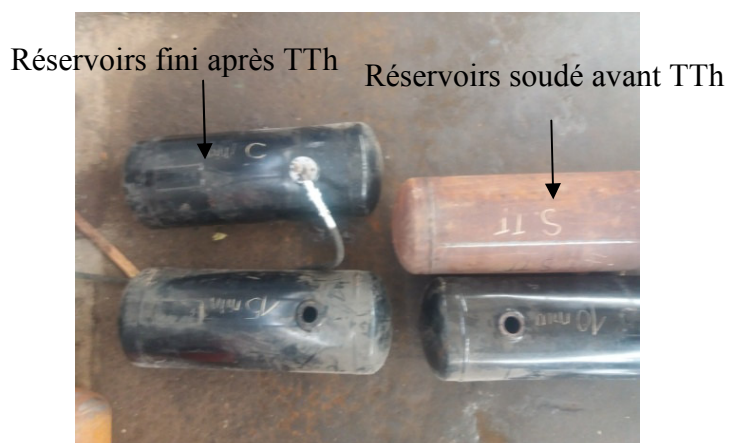
Figure 12. Machine de traction assistée par micro ZWICK/ROELL Z050





**Figure 13.** Instrument de mesure et éprouvettes caractérisées

**Figure 14.** Instrument de l'essai de fatigue.



**Figure 15.** Réservoirs GPLc mises à l'essai de fatigue.

### III.1.5. Étapes de fabrication de RES/GPL

Les étapes de fabrication de réservoir GPLc sont les suivantes (figure 17):

- Découpe des deux disques de la tôle de base qui sont destinés à réaliser les fonds supérieur et inférieur de réservoir ;
- Le virole est découpée et percé, cintrée et soudé (figure 18) ;
- Les emboutis sont formés à partir des disques découpés lors de la première étape ;
- Les pièces sont lessivées avant soudage ;
- La collerette est soudée sur la virole ;
- Les deux fonds sont soudés entre avec la virole ;
- Puis c'est le traitement thermique de normalisation (figure 16) (selon la norme NF EN 10120 Décembre 2008 – température entre 890 °C et 930 °C- le client exige 920 °C) ;

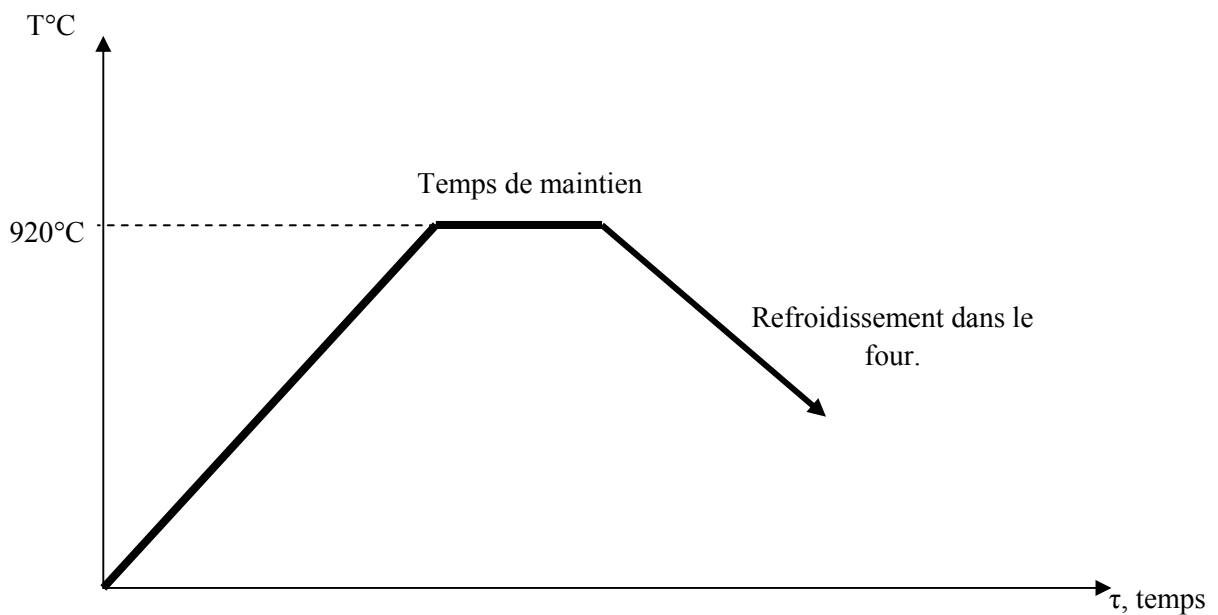


Figure 16. Courbe du traitement thermique utilisée pour l'acier en étude.

- Suivi de l'épreuve hydraulique ;
- Du grenailage (pour éliminer la calamine formée après traitement thermique, et avoir un bon état de surface);
- La métallisation ;
- Et enfin la peinture de réservoir.

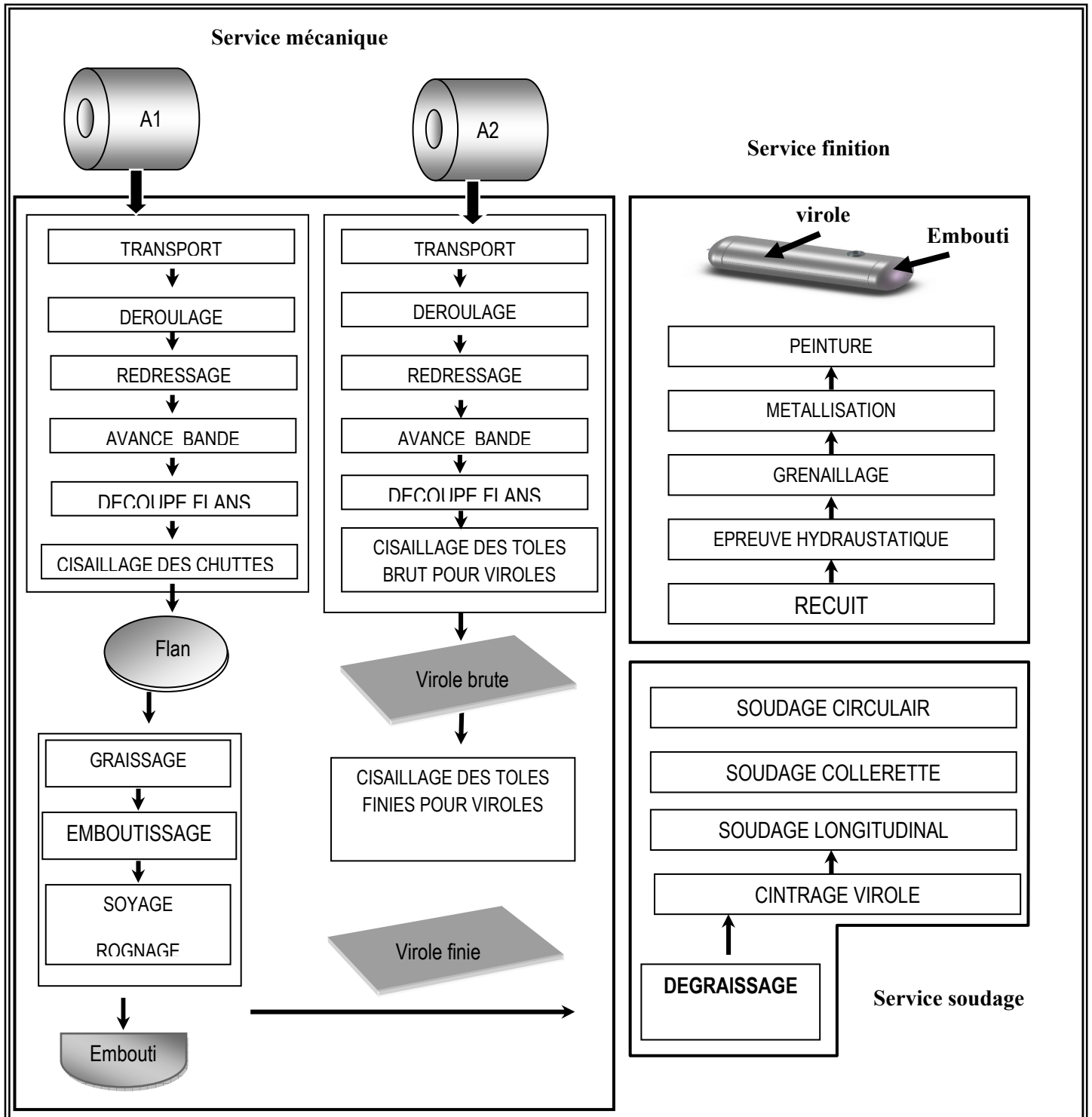
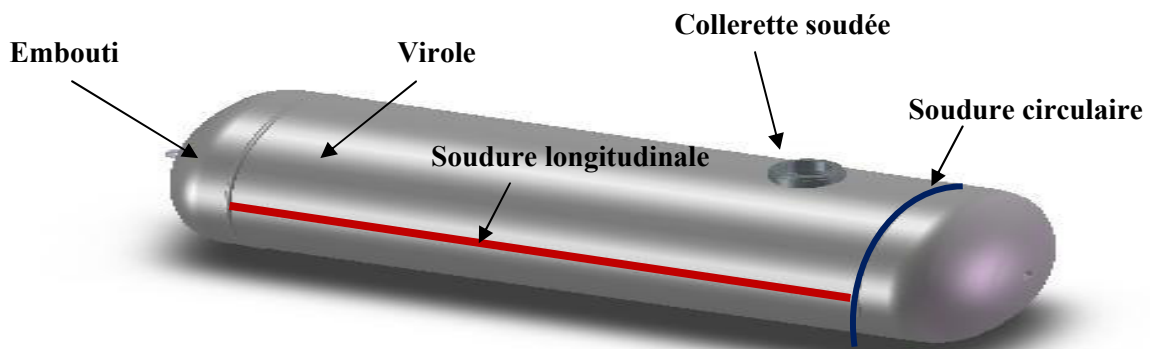


Figure 17. Etapes de fabrication du réservoir à gaz GPLc.

### III.2. Essai mécanique avant traitement thermique de l'acier en étude

#### III.2.1. Essais mécaniques sur tôle (virole) (tableau 8)

	N°	Largeur (mm)	Ep (mm)	S (mm)	Re Mpa	Rm Mpa	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.28	65.6	300	466	45.76	61	33.30
	02	20	3.32	66.4	289	410	46.03	72	56.41
	03	20	3.27	65.4	290	461	45.69	59	29.13



**Figure 18.** Les différentes parties du Réservoirs GPLc.

L'acier en étude, est utilisé pour la fabrication des réceptions à gaz (bouteille à gaz 11/13 kg, GPLc et bouteilles 35 Kg), et ce grâce a ces caractéristiques mécanique pour ce genres de produits dangereux, dans ce cas nous avons opté a étudier l'influence du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécanique (Re, Rm et allongement) de l'acier P265Nb.

En premier lieu, nous avons caractérisé notre acier avant l'étape de traitement thermique sur certaine parties qui compose le réservoir GPLc, (figures 19, 20 et 21) (voir tableau 8).

Les éprouvettes de la soudure longitudinale, la soudure circulaire (embouti + virole) et corps du réservoir (virole), sont prélevées après l'assemblage des différents composants du réservoir (emboutissage, cintrage et soudage), en utilisant le procédé de soudage à l'arc sous flux (SAW) avec un métal d'apport compatible (voir annexe) à la tôle utilisée pour la fabrication du réservoir.

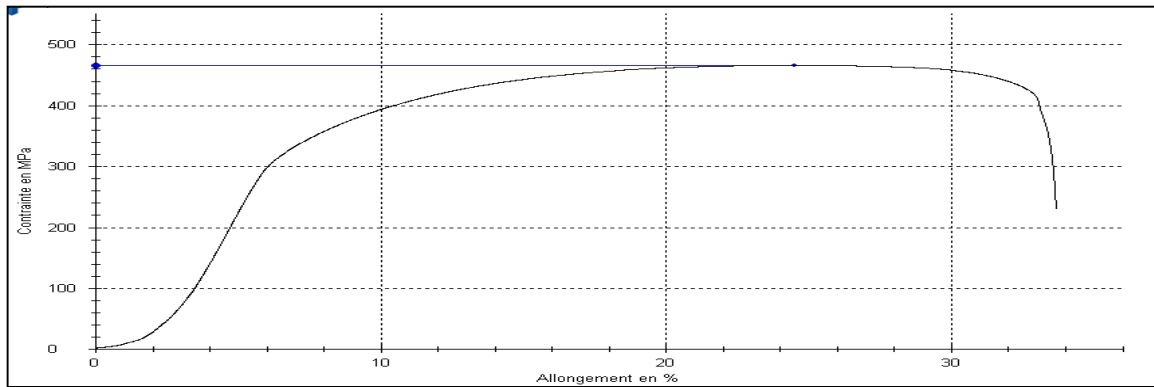


Figure 19. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°1.

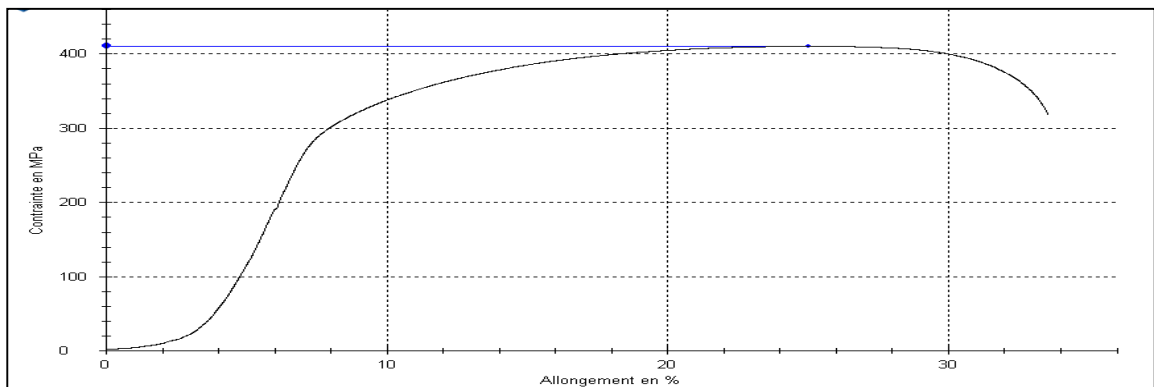


Figure 20. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°2.

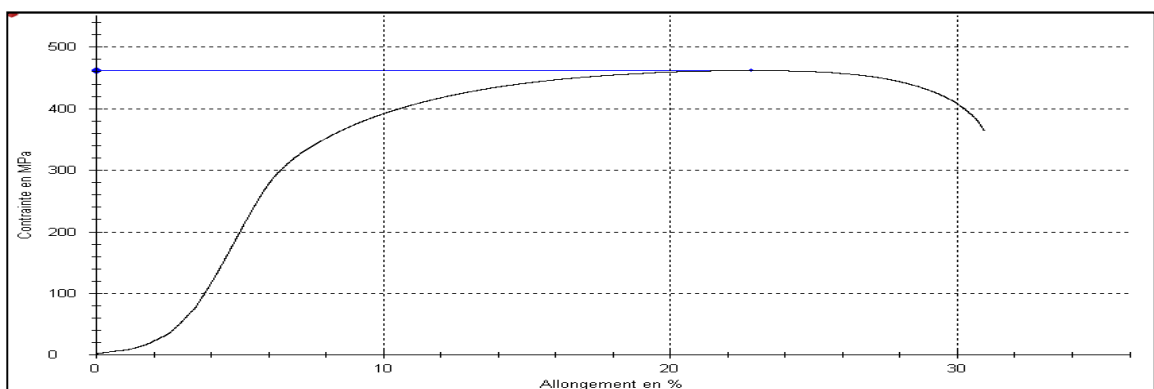
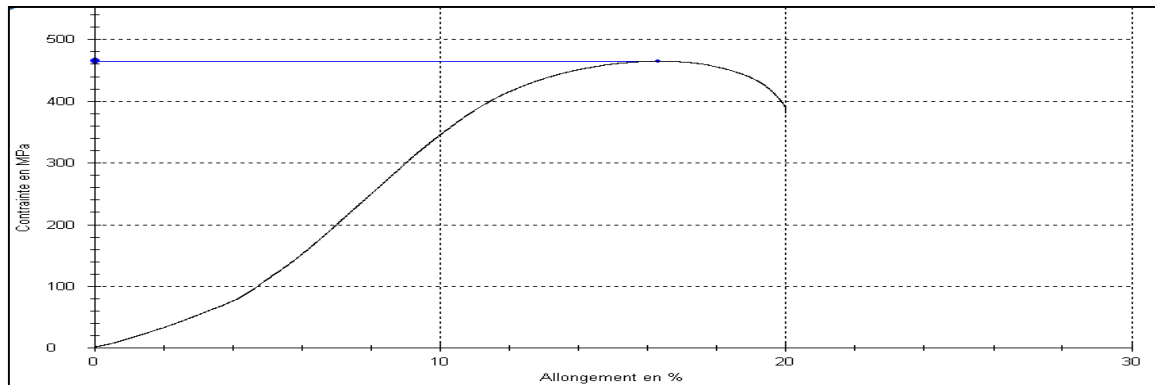


Figure 21. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°3.

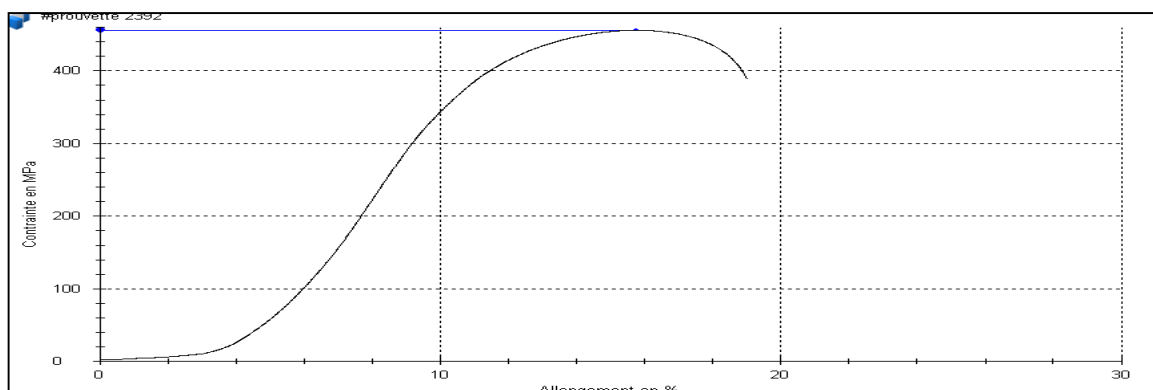
### III.2.1. Essais mécaniques sur la zone circulaire soudée (tableau 9)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.34	83.5	465
	02	25	3.38	84.5	456
	03	25	3.34	83.5	493

Les résultats des essais effectués sur les éprouvettes de la soudure circulaire du réservoir GPLc sans passé par le traitement thermique de normalisation, ont montrés que la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier de base du (tableau 9), (figures 22, 23 et 24), ce qui conduit a une fragilisation de l'éprouvette, causé par les défauts structuraux et les contraintes internes.

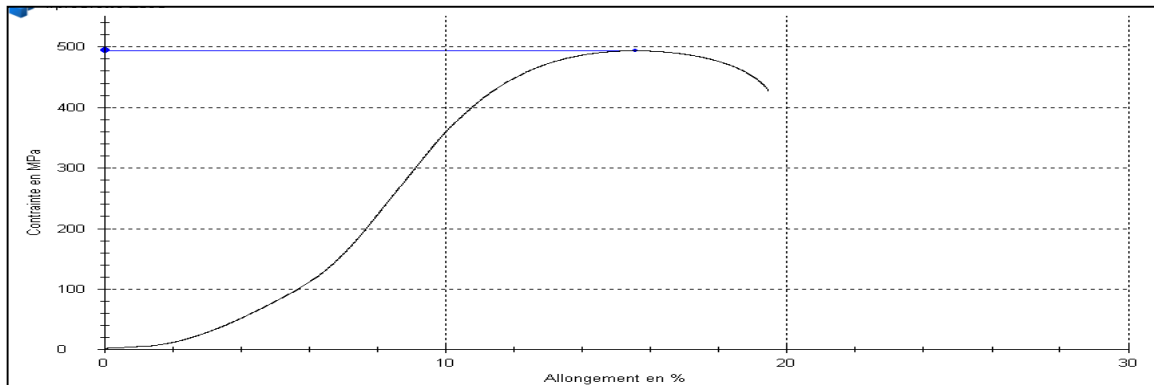


**Figure 22.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure circulaire n°1.



**Figure 23.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure circulaire n°2.



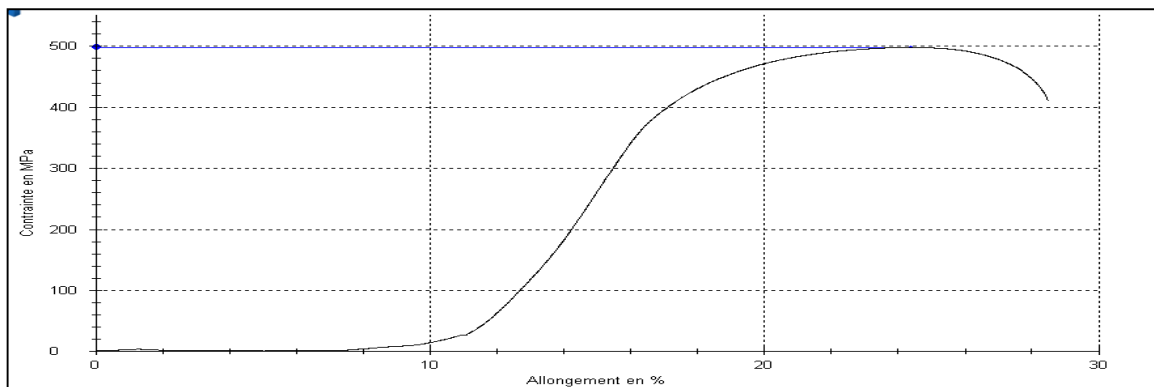


**Figure 24.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette de la soudure circulaire n°3.

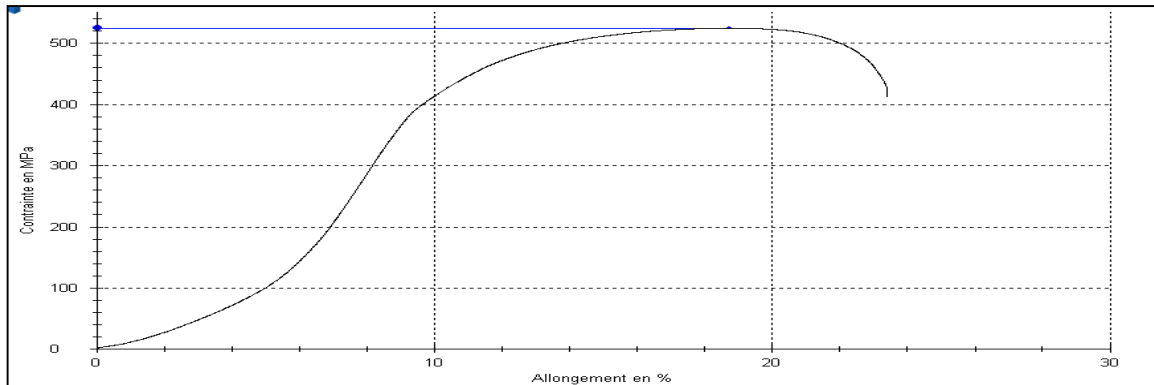
### II.2.2. Essais sur zone longitudinale soudée (tableau 10)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm
Soudure longitudinale	01	25	3.34	83.5	498
	02	25	3.31	82.75	424
	03	25	3.33	83.25	515

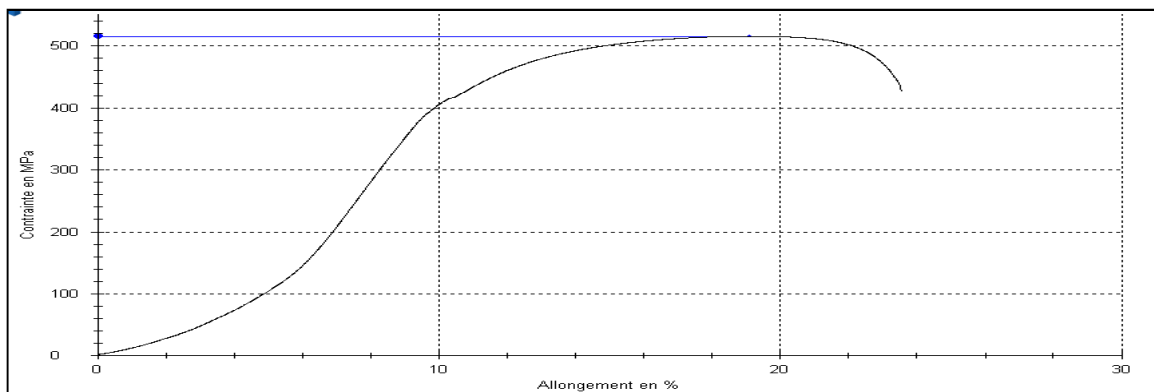
Les résultats des éprouvettes de la soudure longitudinale sont supérieurs à celles de l’acier de base et celles de la soudure circulaires, ils s’expliquent par le type de la soudure effectuée dont la pénétration du métal fondu est très importante par rapport à la soudure circulaire, ce qui donne une résistance élevée des bords soudés (soudure bout à bout), donc une fragilisation importante de l’acier caractériser (figures 25, 26 et 27).



**Figure 25.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette de la soudure longitudinale n°1.



**Figure 26.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure longitudinale n°2.



**Figure 27.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure longitudinale n°3.

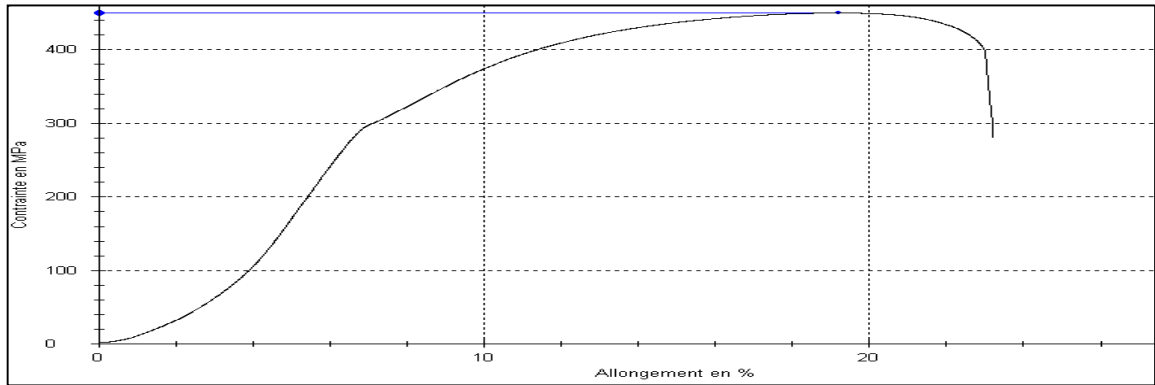
### III.3. Essais mécanique après traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 5 minutes

#### III.3.1. Essais mécaniques pour une tôle normale (tableau 11)

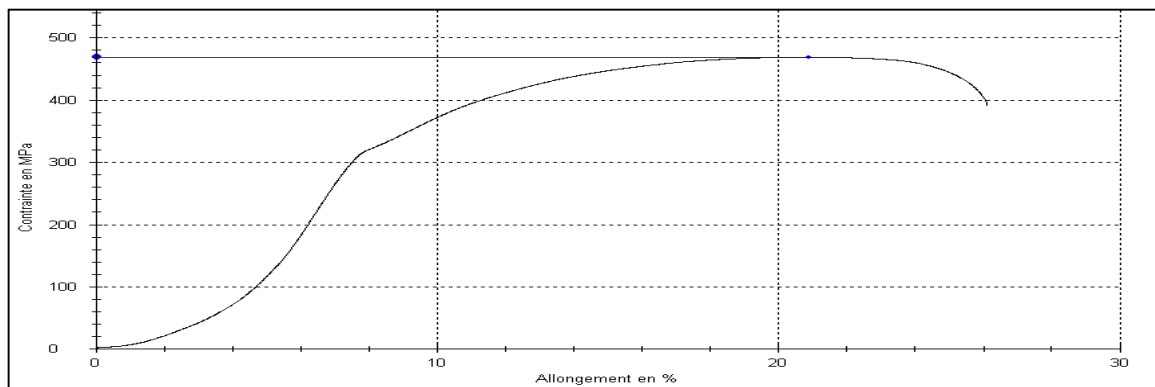
	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Re	Rm	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.35	67	298	438	46.24	62	34.08
	02	20	3.26	65.2	305	449	45.62	59	29.32
	03	20	3.32	66.4	290	442	46.03	60	30.34

Les résultats de la résistance à la traction après traitement thermique de normalisation, sont baissés un peut parrapport a l'acier de base avant traitement thermique, mais ils restent toujours dans l'intervalle 410 à 500 Mpa, ce traitement est pour but d'homogénéiser la structure, donc éliminer les

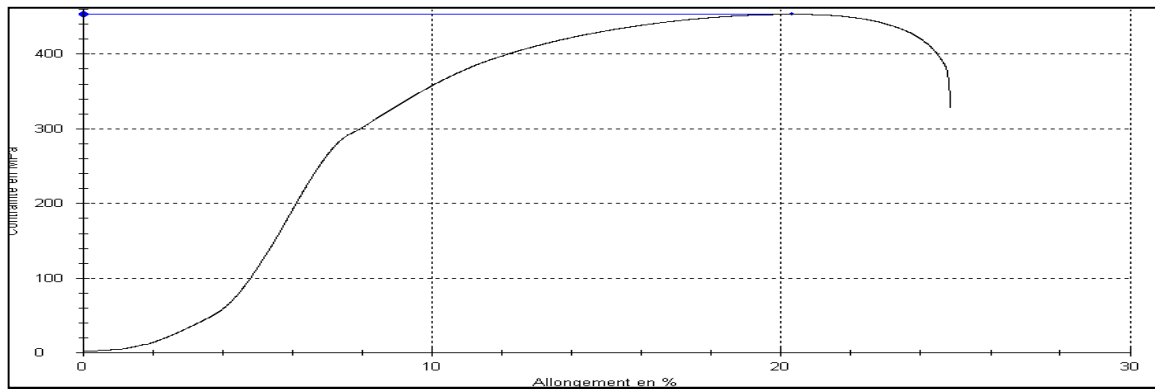
contraintes interne engendrées au cours d'opération d'emboutissage et le soudage l'arc submergé (SAW) sous flux (figures 28, 29 et 30).



**Figure 28.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 29.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

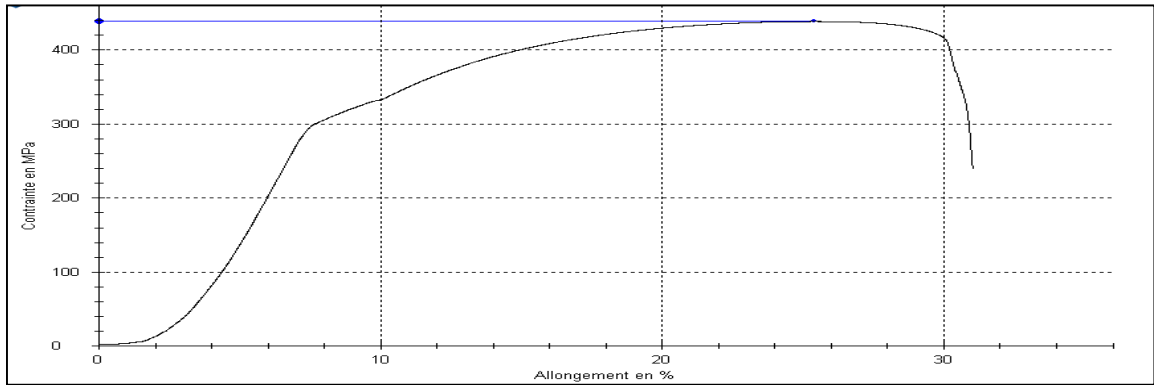


**Figure 30.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

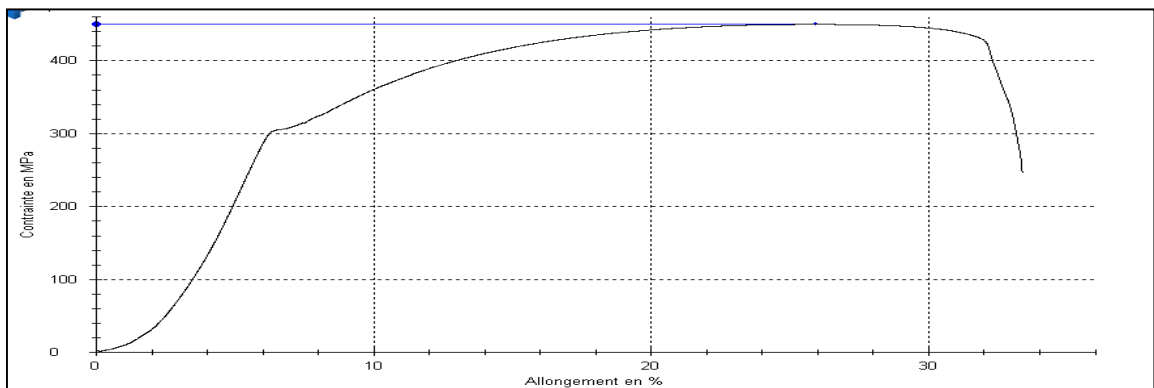
### III.3.2. Essais mécaniques pour zone circulaire soudée (tableau 12)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure Circulaire	01	25	3.25	81.25	450
	02	25	3.24	81	469
	03	25	3.26	81.5	453

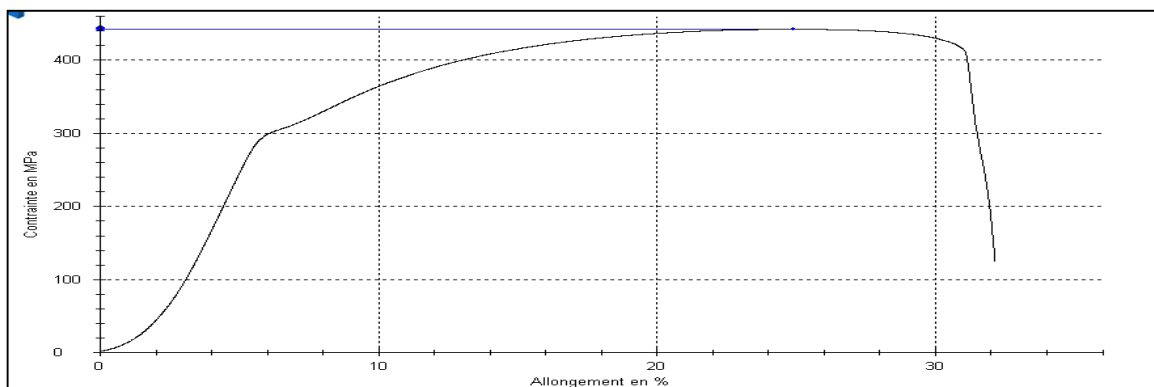
Dans ce type des éprouvettes, on distingue que valeur moyenne de la résistance à la traction est 457 Mpa elle diminue par rapport a la valeur moyenne de celles des éprouvettes citées dans le tableau 9, qui est de 471 Mpa, cette diminution est expliquée par l’homogénéisation structurale après traitement thermique, ainsi on remarque que l’éprouvette avant la rupture elle a exercée les domaines élastique (figures 31, 32 et 33), la structure avant traitement thermique est fine (grain écroué après l’opération d’emboutissage), ce qui augmente la résistance à la traction par rapport a une structure après traitement thermique, où le grain est homogène dans tous les différentes parties du réservoir GPLc et un peut grossier.



**Figure 31.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 32.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).

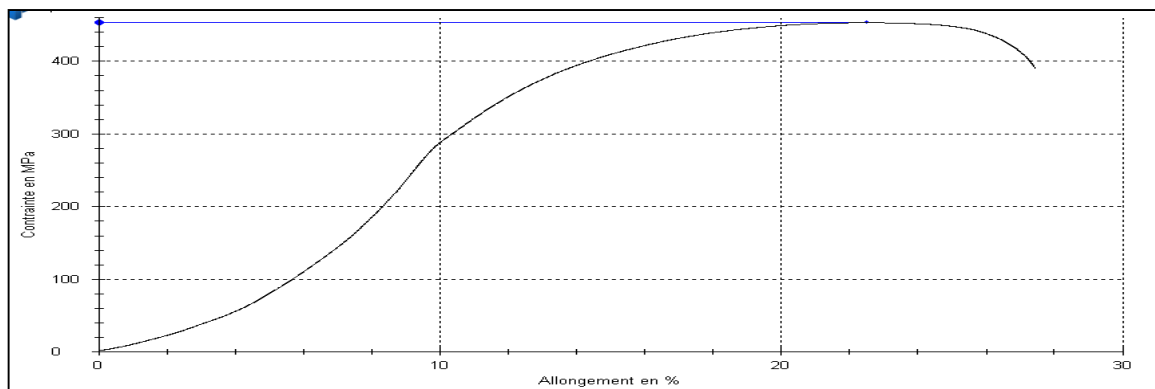


**Figure 33.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).

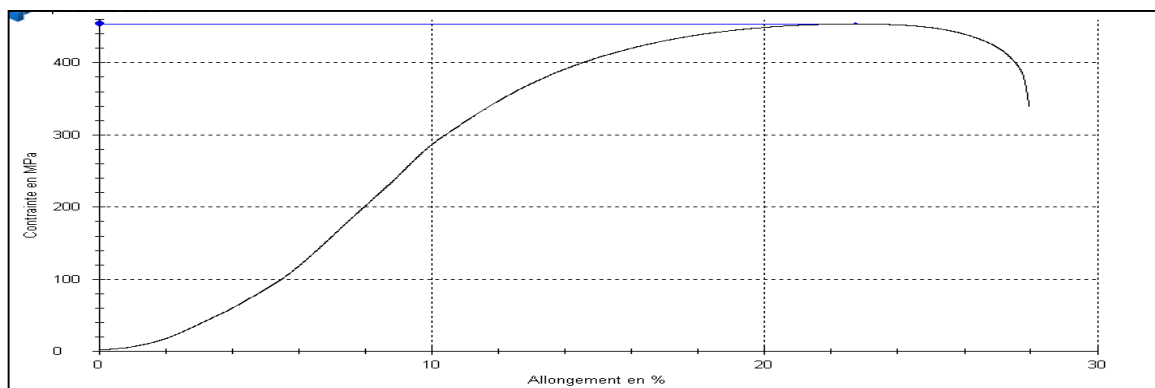
**III.3.3. Essais mécaniques pour zone longitudinale soudée (tableau 13)**

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure longitudinale	01	25	3.33	83.25	453
	02	25	3.32	83	453
	03	25	3.35	83.75	450

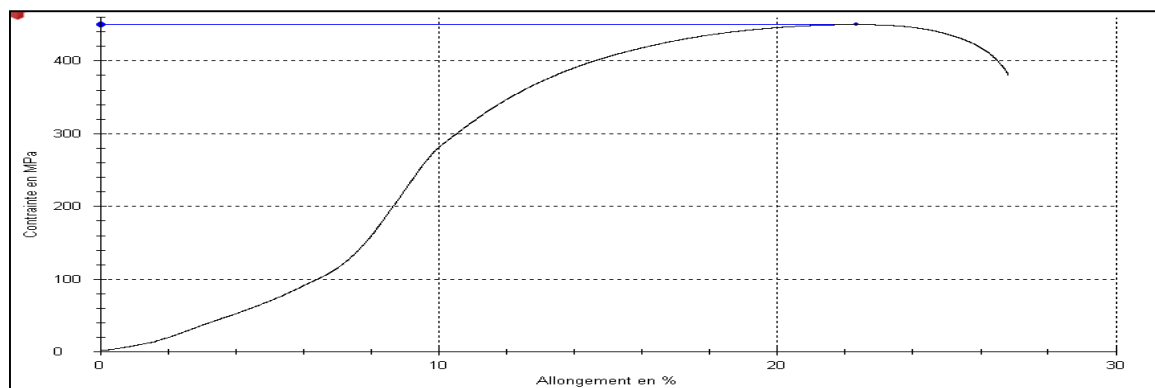
En ce qui concerne la caractérisation des éprouvettes longitudinales soudées après traitement thermique avec 5 minutes, on remarque que la résistance à la traction moyenne est de 452 Mpa, elle est similaire de l'essai précédente (soudure circulaire), ainsi elle a diminué par rapport à la valeur moyenne de l'éprouvette de l'acier brut de coulée qui est de 479 Mpa (figures 34, 35 et 36).



**Figure 34.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 35.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



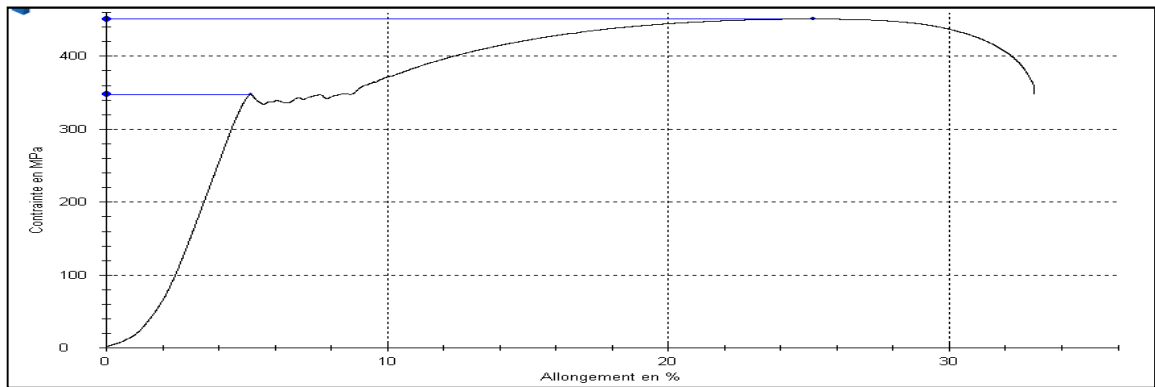
**Figure 36.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

### III.4. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 10 minutes

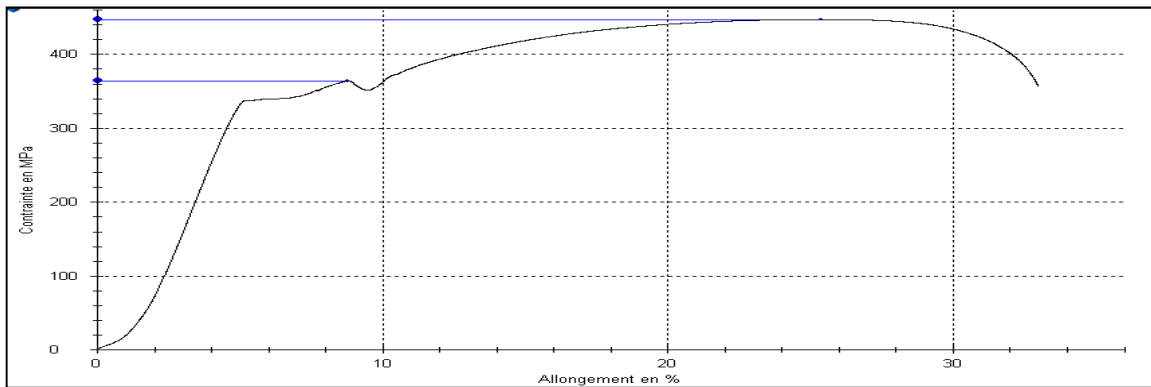
#### III.4.1. Essais mécanique sur tôle normale (tableau 14)

	N°	Larg (mm)	Ep (mm)	S (mm)	Re	Rm	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.30	66	348	451	45.90	68	48.10
	02	20	3.35	67	364	447	46.24	66	42.73
	03	20	3.36	67.2	337	448	46.31	67	44.31

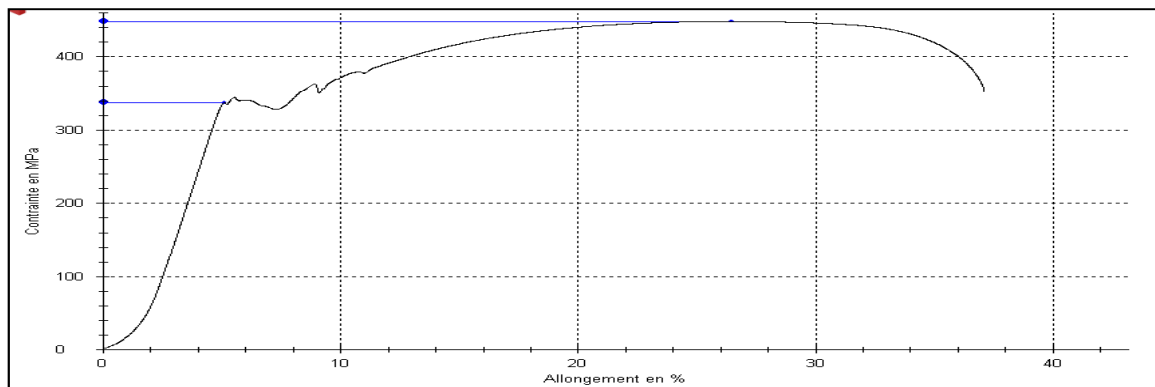
D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance moyenne à la traction est de 448 Mpa, à 5 minutes du temps de maintien elle est de 444 Mpa, à 10 minutes elle est de 449 Mpa, par contre l'allongement moyen a subi une augmentation importante il est de l'ordre de 45 % à 10 minutes et de 31 % à 5 minutes, ce phénomène est expliqué par le grossissement des grains de l'acier en étude après traitement thermique avec augmentation du temps de maintien de 5 minutes à 10 minutes (figures 37, 38 et 39).



**Figure 37.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 38.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



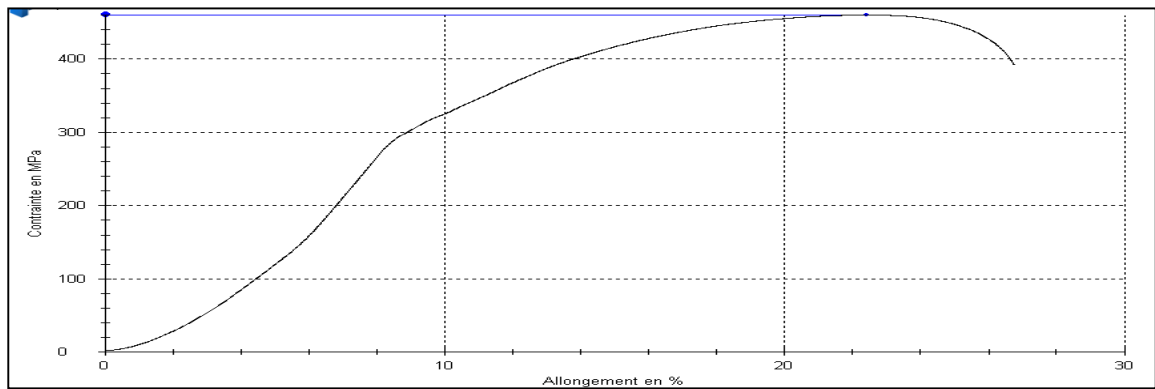
**Figure 39.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



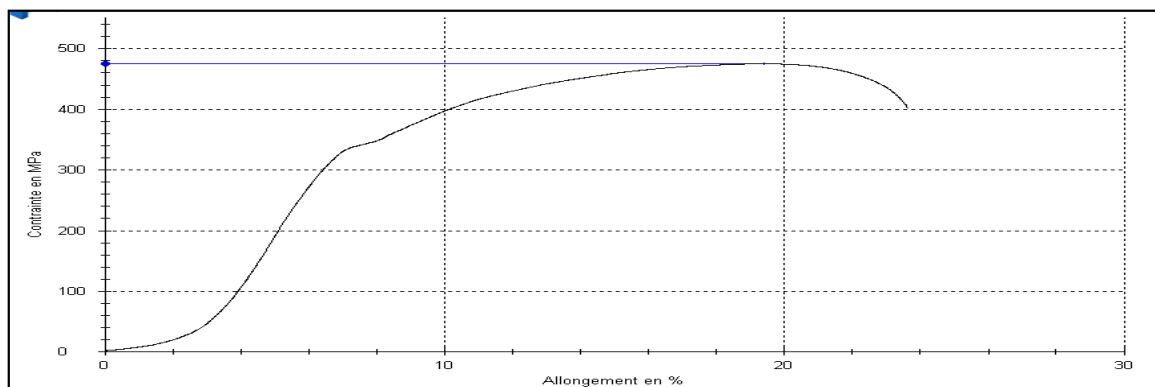
**III.4.2. Essais mécaniques sur la zone circulaire soudée (tableau 15)**

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.40	85	460
	02	25	3.41	85.25	441
	03	25	3.45	86.25	447

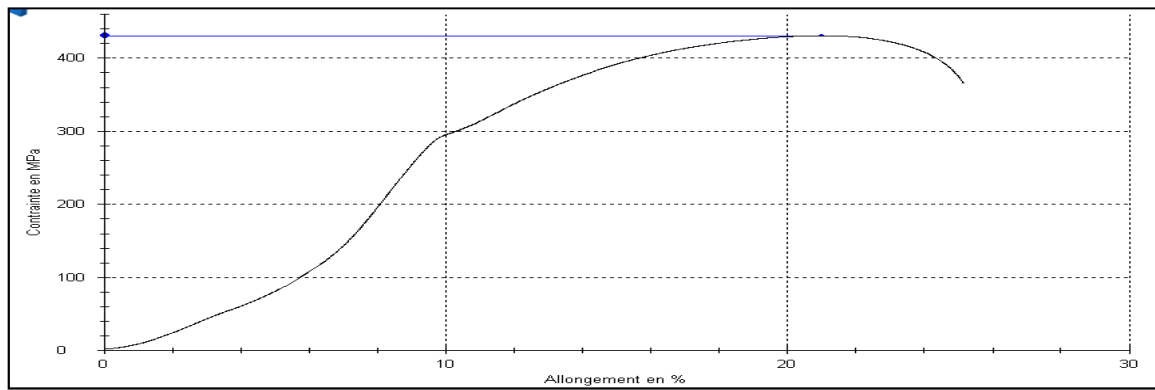
D'après la résistance moyenne des éprouvettes des soudures circulaires qui est de 449 Mpa, on remarque que cette dernière a diminué légèrement par rapport à celles des éprouvettes traitées avec 5 minutes (457 Mpa) du temps de maintien (figures 40, 41 et 42).



**Figure 40.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 41.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

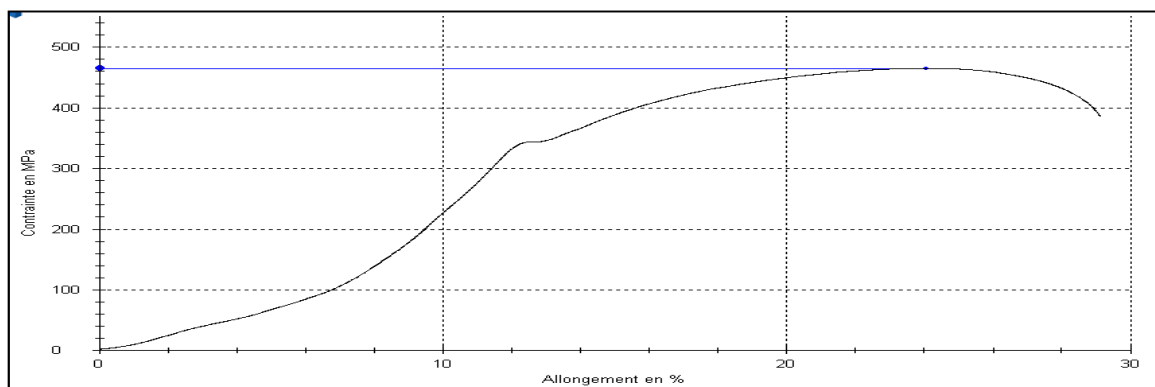


**Figure 42.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

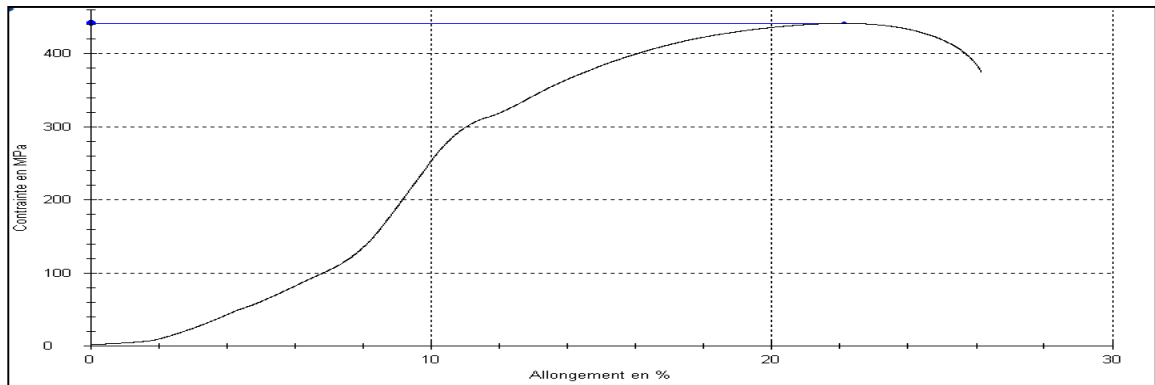
### III.4.3. Essais mécanique sur la zone longitudinale soudée (tableau 16)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure longitudinale	01	25	3.35	83.75	465
	02	25	3.31	82.75	475
	03	25	3.32	83	483

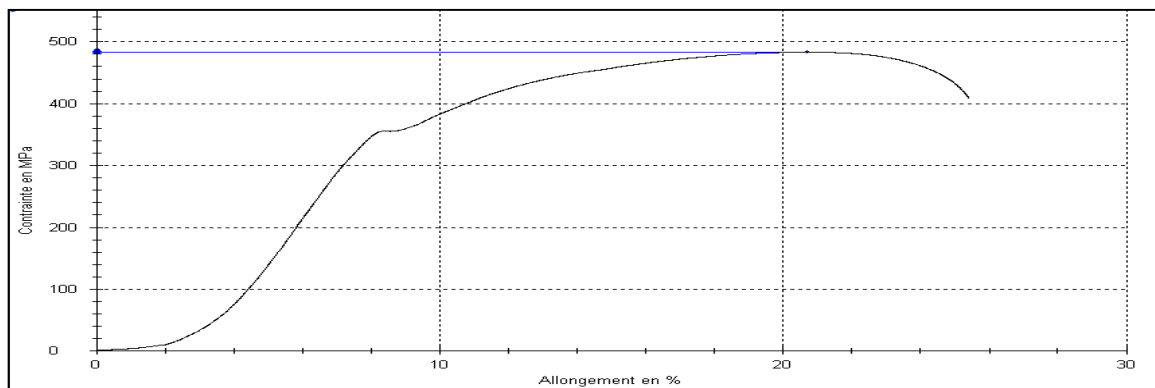
Après traitement thermique et maintient à 920 C° pendant 10 minutes, on remarque que la résistance moyenne des éprouvettes de la zone longitudinale est de 474 Mpa à augmenter presque de 5 % par rapport a celles traiter avec 5 minutes du temps de maintien (figures 43, 44 et 45), ce phénomène peut être s’expliquer par de recristallisation du matériaux en étude.



**Figure 43.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°1 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 44.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°2 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



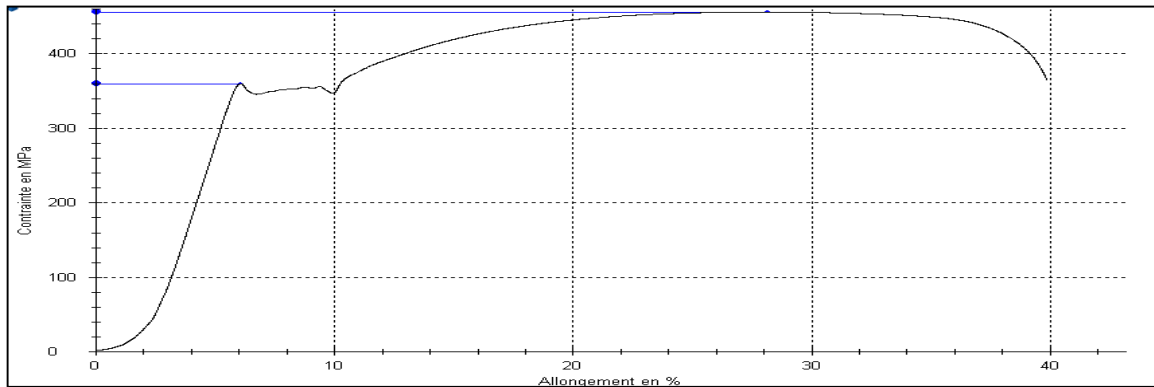
**Figure 45.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

### III.5. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 15 minutes

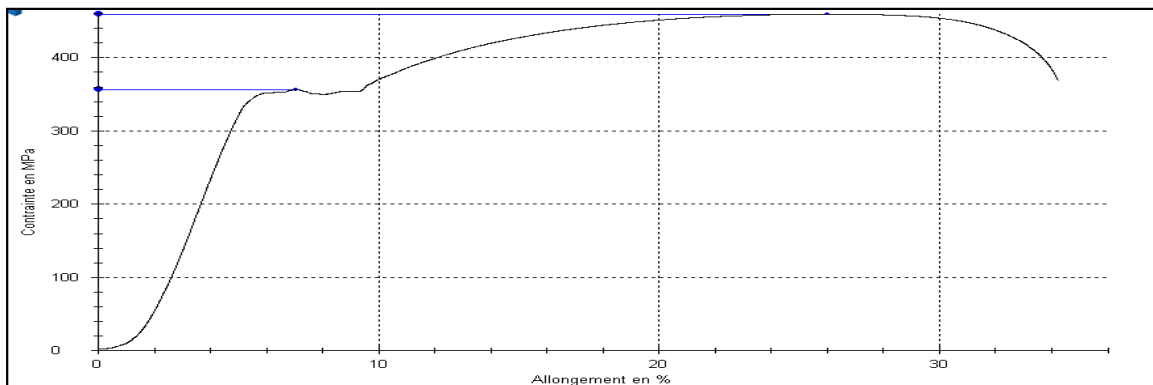
#### III.5.1. Essais mécanique sur tôle (emboutis et virole) (tableau 17)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Re Mpa	Rm Mpa	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.28	65.6	360	456	45.76	71	55.15
	02	20	3.29	65.8	365	459	45.82	69	50.58
	03	20	3.29	65.8	353	456	45.82	75	63.68

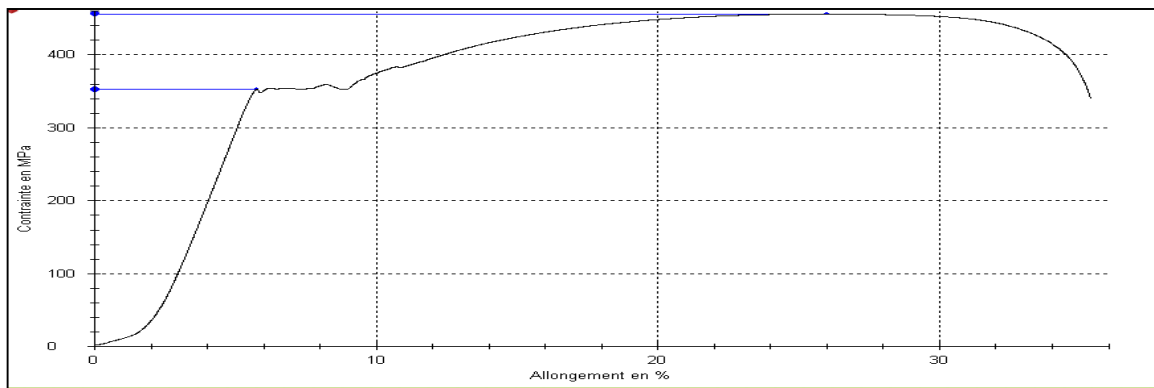
D'après le tableau 17, on constate que les résultats de la résistance moyenne avec est de 457 Mpa à 15 minutes de maintien à augmenter de 3 % par rapport 5 minutes de maintien et 2 % par rapport à 10 minutes de maintien, ainsi que l'allongement moyen à augmenter de 44 % par rapport à 5 minutes de maintien et de 19 % par rapport à 10 minutes de maintien (figures 46, 47 et 48). Quant en augment le temps de maintien les grains de la structures de l'acier en étude vont grossiers, ce qui tend vers l'abaissement de la résistance à la traction et l'augmentation de l'allongement.



**Figure 46.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 47.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).

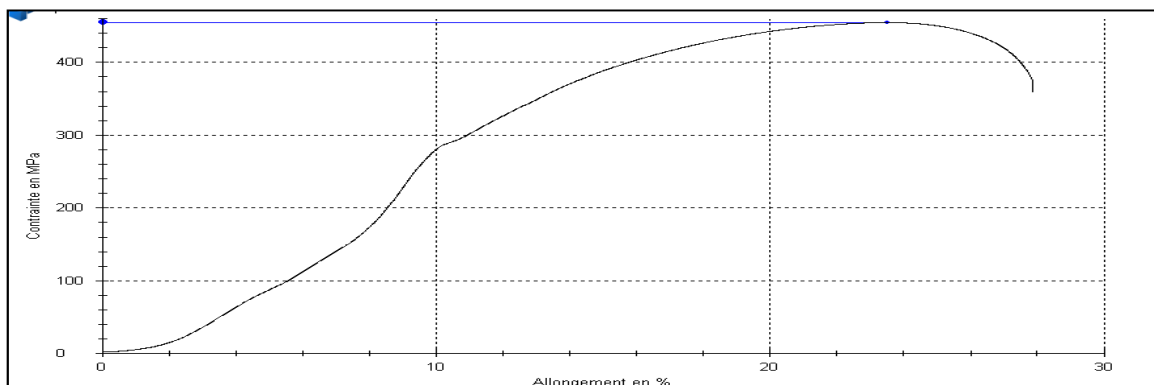


**Figure 48.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).

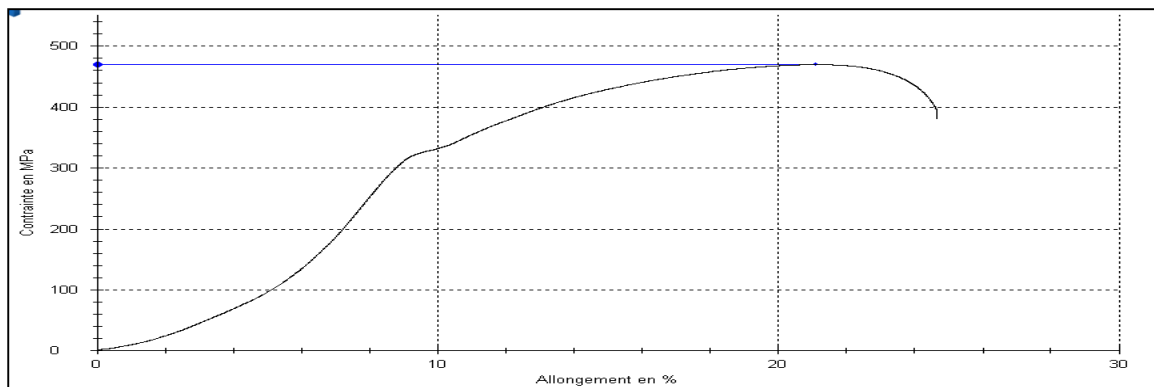
### III.5.2. Essais sur la zone circulaire soudée (tableau 18)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.37	84.25	454
	02	25	3.31	82.75	469
	03	25	3.36	84	454

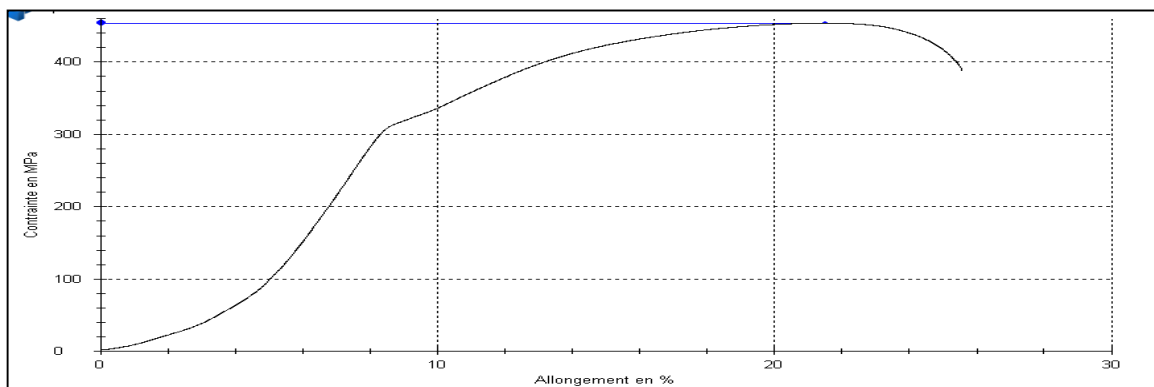
D’après les résultats affichés sur le tableau 18, on remarque une légère (environ 1%) augmentation de la résistance moyenne des éprouvettes de la zone circulaire soudées, par rapport à la résistance moyenne des éprouvettes caractérisées à 10 minutes du temps de maintien et négligeable par rapport à celles traités avec 5 minutes du temps de maintien (figures 49, 50 et 51).



**Figure 49.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°1 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 50.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



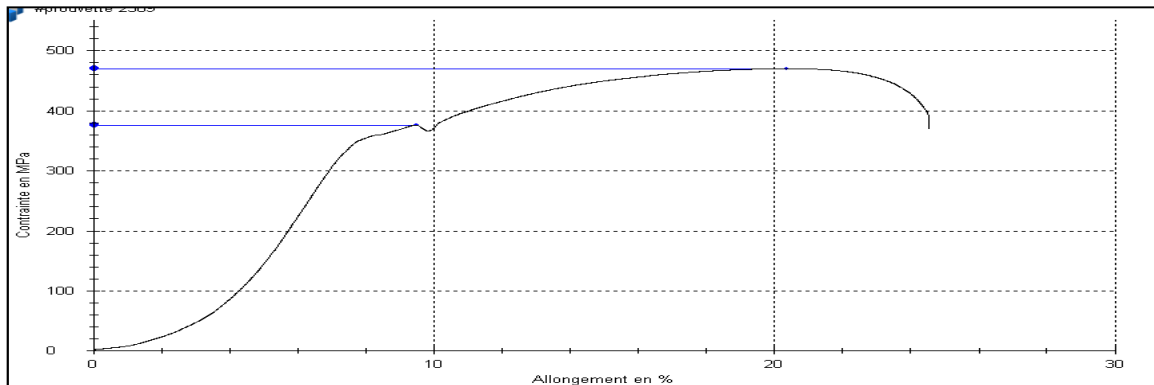
**Figure 51.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).

### III.5.3. Essais sur la zone longitudinale soudée (tableau 19)

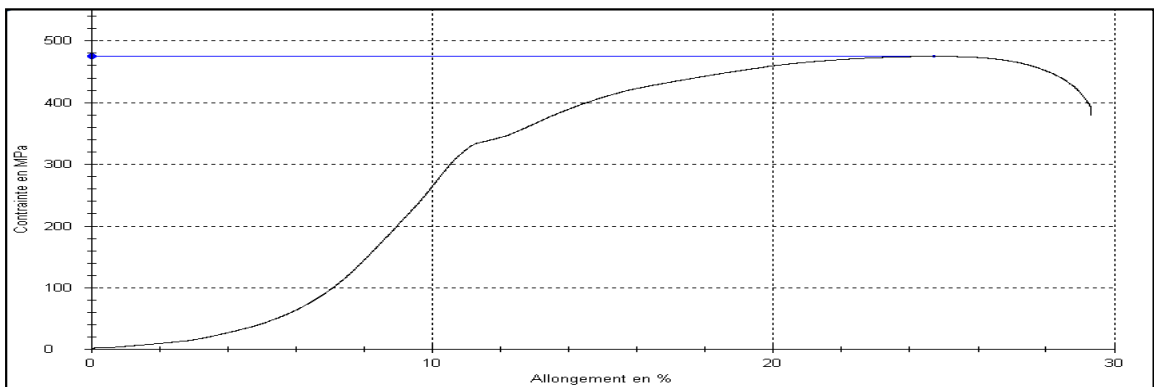
	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm
Soudure longitudinale	01	25	3.34	83.5	470
	02	25	3.33	83.25	475
	03	25	3.32	83	475

En ce qui concerne les éprouvettes de la soudure traitées avec un temps de maintien de 15 minutes, on remarque que la résistance est similaire à celles des éprouvettes avec un temps de maintien de 10

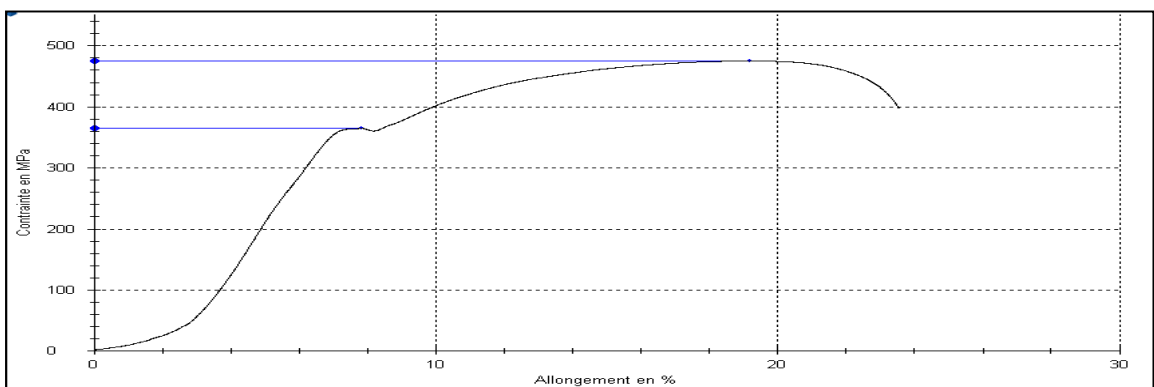
minutes, par contre elle est augmentée d'ordre de 4.5 % par rapport à celles traitées avec maintien de 5 % (figures 52, 53 et 54).



**Figure 52.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 53.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 54.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).

### III.6. Essai de fatigue pour réservoir GPLc

#### III.3.1. Essai de fatigue pour réservoir avant traitement thermique (tableau 20)

Un essai de fatigue a été effectué au niveau du laboratoire du département du contrôle qualité, en utilisant une installation équipée d'une pompe travail d'une manière cyclique à 30 bars relié avec le réservoir soudé plein de l'eau (conformément la norme de fabrication NF EN1442), les résultats de sont affichés sur le tableau 20 :

Les essais de la fatigue on été achevés après une légère déformation des réservoirs GPLc ou bien apparition d'une fuite.

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	10000
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.2. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 5 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	18000
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.3. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 10 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	20400
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.4. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 15 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	21600
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

On remarque que le nombre des cycles où le réservoir a subit une légère déformation sont en augmentations avec l'augmentation du temps de maintien.



### III. Etude expérimentale

#### III.1. Caractéristiques des matériaux utilisés

##### III.1.1. Corps

Le corps de réservoir GPLc est fabriqué en tôle d'acier de qualité commerciale BS2 de nomenclature P245NB, défini par la norme (NF/EN 10120).

##### III.1.2. Composition chimique

Le tableau suivant définit les valeurs de coulée et de produit des composés chimiques constituant la tôle de la bouteille à gaz de type réservoir GPLc dont le corps de la bouteille à gaz est conçu.

Qualité	C% max		Mn%	S% max		P% max		Si% max	
	coulée	produit	coulée	coulée	produit	coulée	produit	coulée	produit
P265NB									
BS2	0.19	0.21	0.4	0.015	0.04	0.025	0.04	0.25	0.25

**Tableau 6.** Valeur de coulée et de produit spécifiant les principaux éléments alliés qui compose la BS2.

##### III.1.3. Caractéristiques mécaniques

A chaque livraison des bobines de tôles d'aciers acquis pour la fabrication de la bouteille à gaz de type RES/GPL, une identification mécanique bien détaillé par le fournisseur doit toujours accompagner son produit, la résistance à la traction (selon la norme 10002-1 Octobre 2001) à l'état normalisée doit être comprise entre 410 à 500 N/mm<sup>2</sup> avec un allongement minimum de 32%, comme le montre le tableau suivant :

Qualité	Re mini kg/mm <sup>2</sup>	Rm kg/mm <sup>2</sup>	A% mini
P265NB	265	41-50	32

**Tableau 7.** Données des paramètres mécaniques des tôles d'aciers BS2

##### III.1.4. Equipements de mesure utilisés pour l'acier en étude

Pour caractérisé notre produits (Réservoirs GPLc), nous avons utilisé plusieurs équipements de mesures, ces instruments appartiens au laboratoire du département contrôle qualité de l'entreprise BAG (figures 12, 13, 14 et 15) (l'essai de fatigue est réalisée conformément à la norme de fabrication la norme 1442 + A1 Avril 2008 –voir les exigences en annexe-).

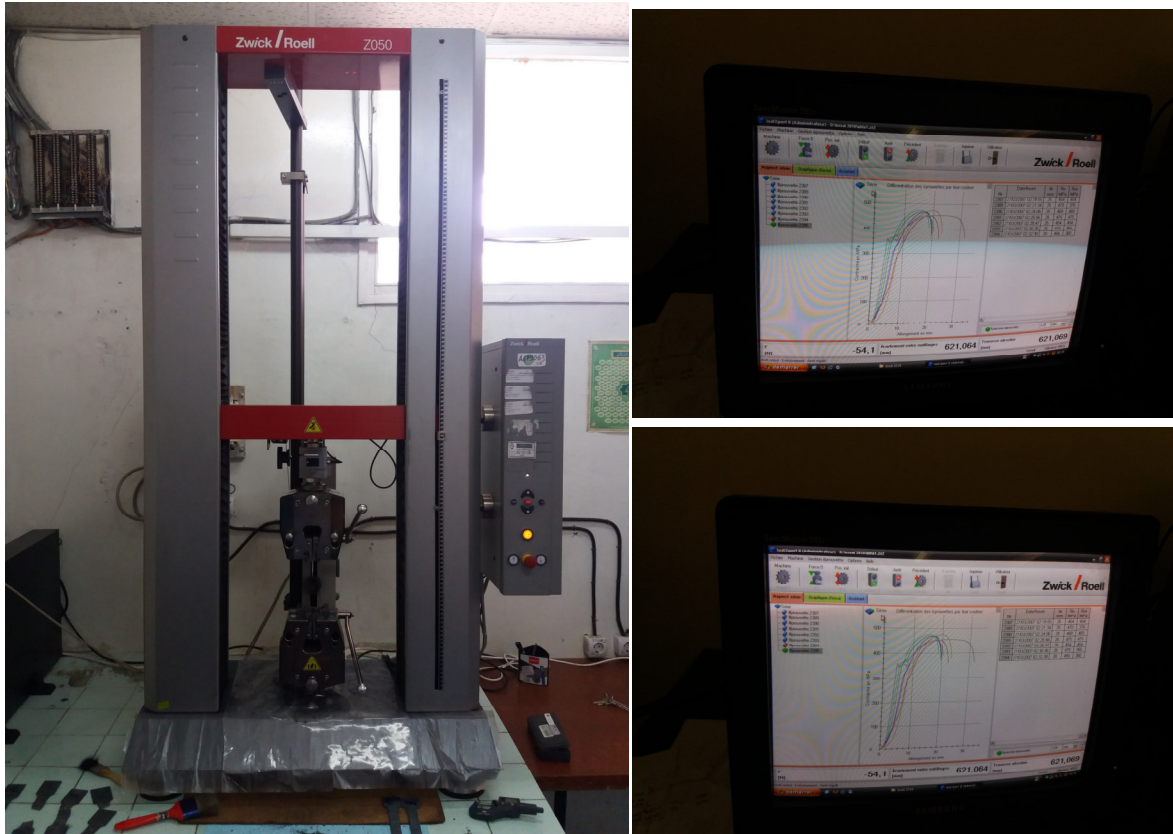


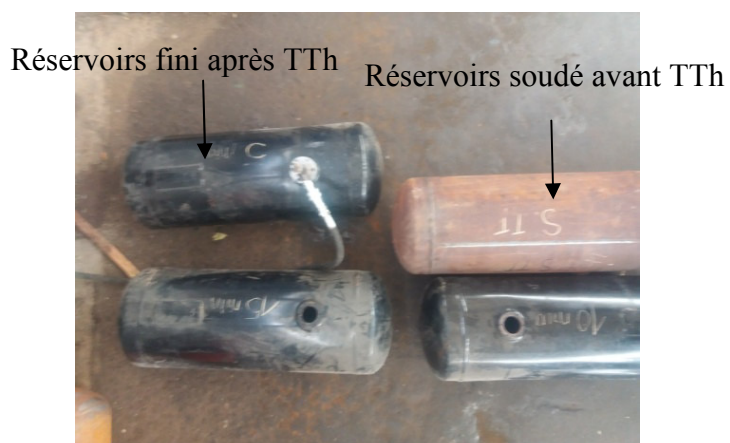
Figure 12. Machine de traction assistée par micro ZWICK/ROELL Z050





**Figure 13.** Instrument de mesure et éprouvettes caractérisées

**Figure 14.** Instrument de l'essai de fatigue.

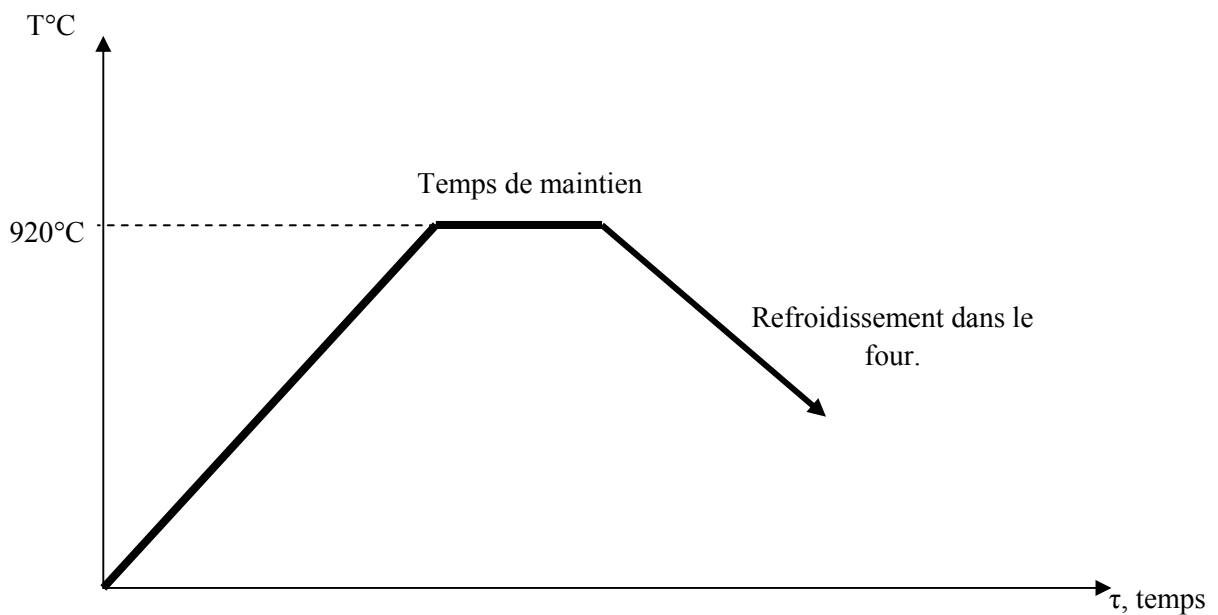


**Figure 15.** Réservoirs GPLc mises à l'essai de fatigue.

### III.1.5. Étapes de fabrication de RES/GPL

Les étapes de fabrication de réservoir GPLc sont les suivantes (figure 17):

- Découpe des deux disques de la tôle de base qui sont destinés à réaliser les fonds supérieur et inférieur de réservoir ;
- Le virole est découpée et percé, cintrée et soudé (figure 18) ;
- Les emboutis sont formés à partir des disques découpés lors de la première étape ;
- Les pièces sont lessivées avant soudage ;
- La collerette est soudée sur la virole ;
- Les deux fonds sont soudés entre avec la virole ;
- Puis c'est le traitement thermique de normalisation (figure 16) (selon la norme NF EN 10120 Décembre 2008 – température entre 890 °C et 930 °C- le client exige 920 °C) ;



**Figure 16.** Courbe du traitement thermique utilisée pour l'acier en étude.

- Suivi de l'épreuve hydraulique ;
- Du grenailage (pour éliminer la calamine formée après traitement thermique, et avoir un bon état de surface);
- La métallisation ;
- Et enfin la peinture de réservoir.

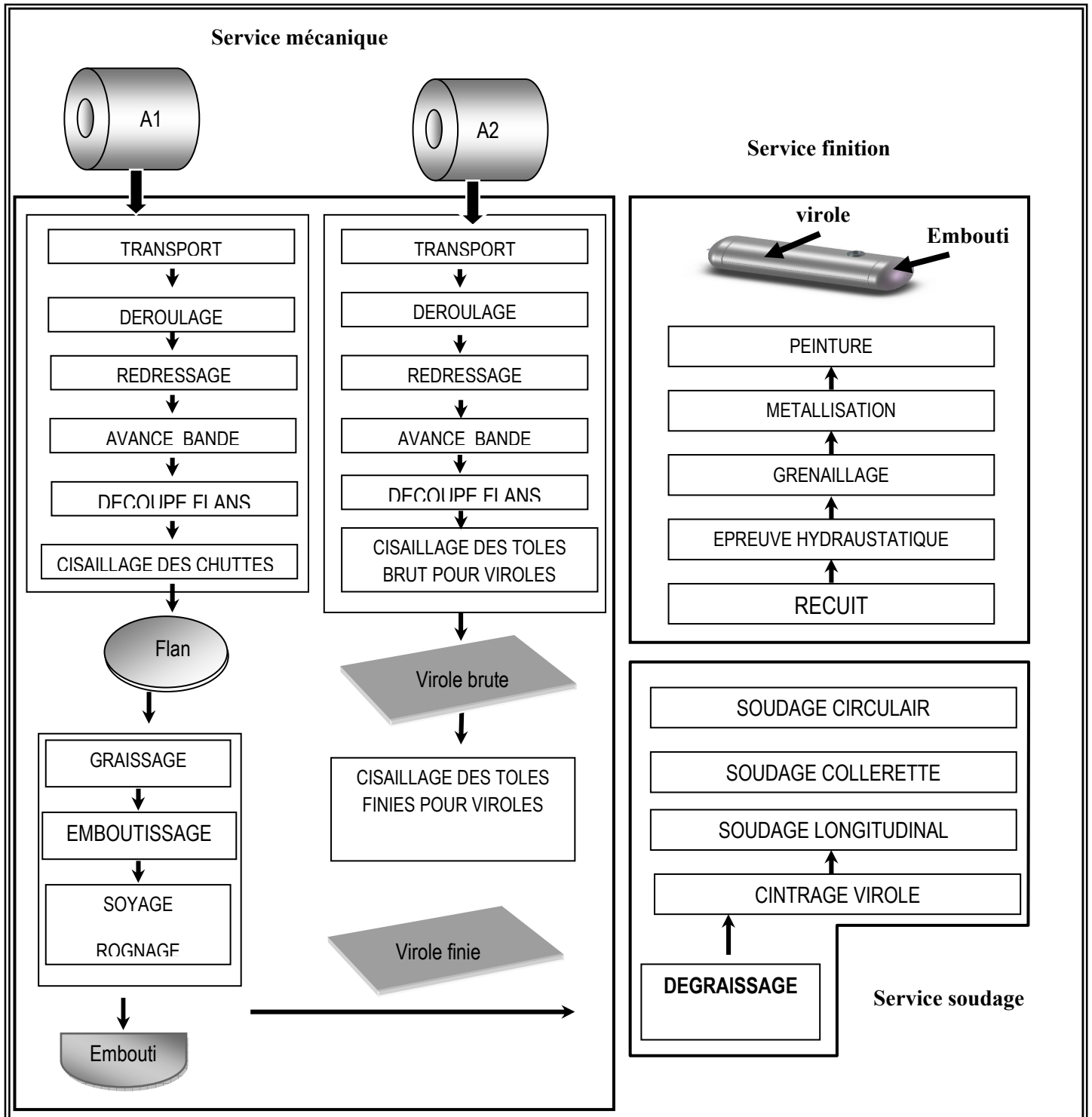
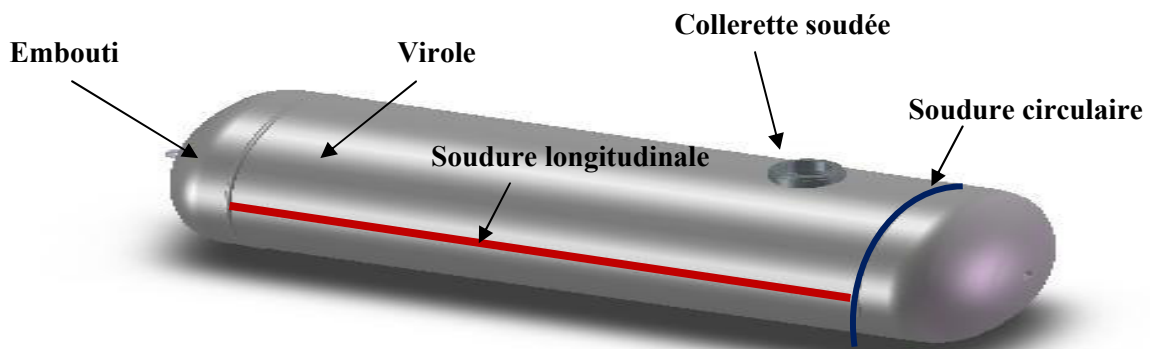


Figure 17. Etapes de fabrication du réservoir à gaz GPLc.

### III.2. Essai mécanique avant traitement thermique de l'acier en étude

#### III.2.1. Essais mécaniques sur tôle (virole) (tableau 8)

	N°	Largeur (mm)	Ep (mm)	S (mm)	Re Mpa	Rm Mpa	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.28	65.6	300	466	45.76	61	33.30
	02	20	3.32	66.4	289	410	46.03	72	56.41
	03	20	3.27	65.4	290	461	45.69	59	29.13



**Figure 18.** Les différentes parties du Réservoirs GPLc.

L'acier en étude, est utilisé pour la fabrication des réceptions à gaz (bouteille à gaz 11/13 kg, GPLc et bouteilles 35 Kg), et ce grâce a ces caractéristiques mécanique pour ce genres de produits dangereux, dans ce cas nous avons opté a étudier l'influence du temps de maintien du traitement thermique sur les caractéristiques mécanique (Re, Rm et allongement) de l'acier P265Nb.

En premier lieu, nous avons caractérisé notre acier avant l'étape de traitement thermique sur certaine parties qui compose le réservoir GPLc, (figures 19, 20 et 21) (voir tableau 8).

Les éprouvettes de la soudure longitudinale, la soudure circulaire (embouti + virole) et corps du réservoir (virole), sont prélevées après l'assemblage des différents composants du réservoir (emboutissage, cintrage et soudage), en utilisant le procédé de soudage à l'arc sous flux (SAW) avec un métal d'apport compatible (voir annexe) à la tôle utilisée pour la fabrication du réservoir.

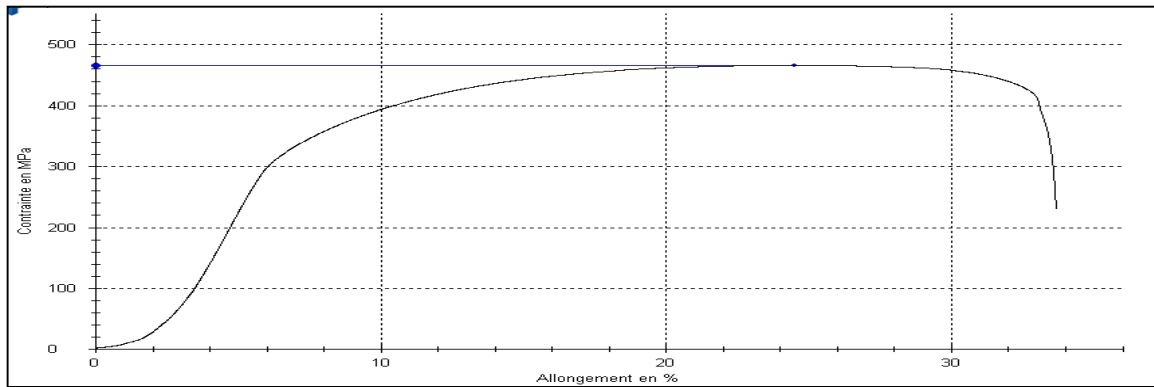


Figure 19. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°1.

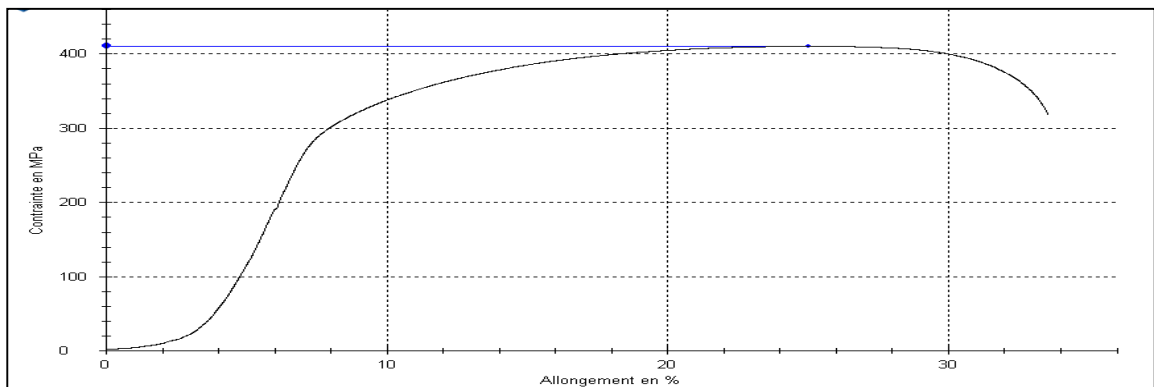


Figure 20. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°2.

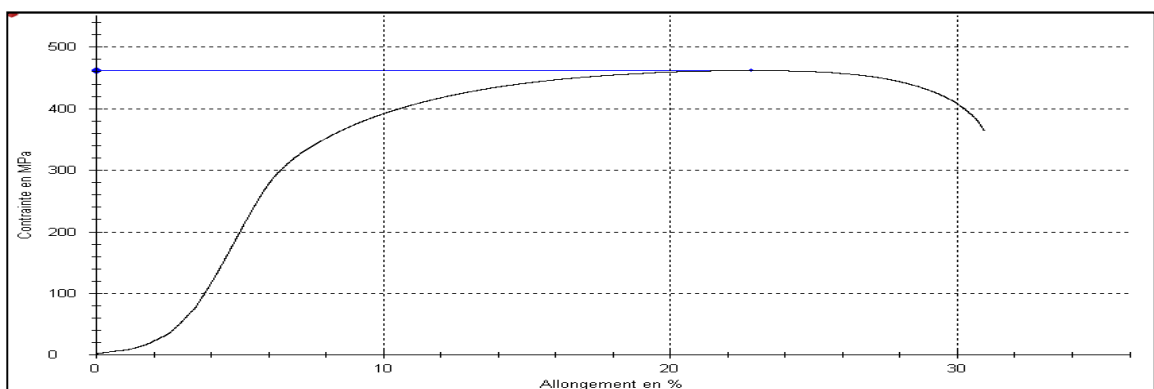
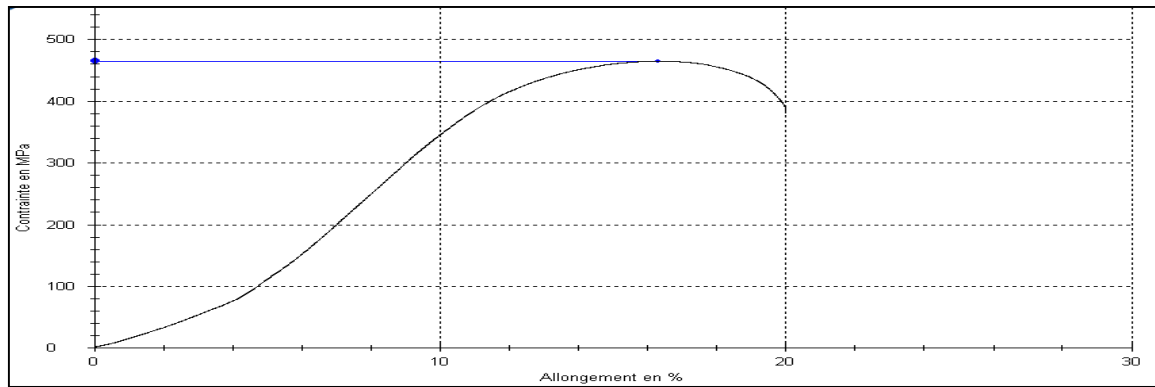


Figure 21. Graphe de l'essai de traction de la tôle n°3.

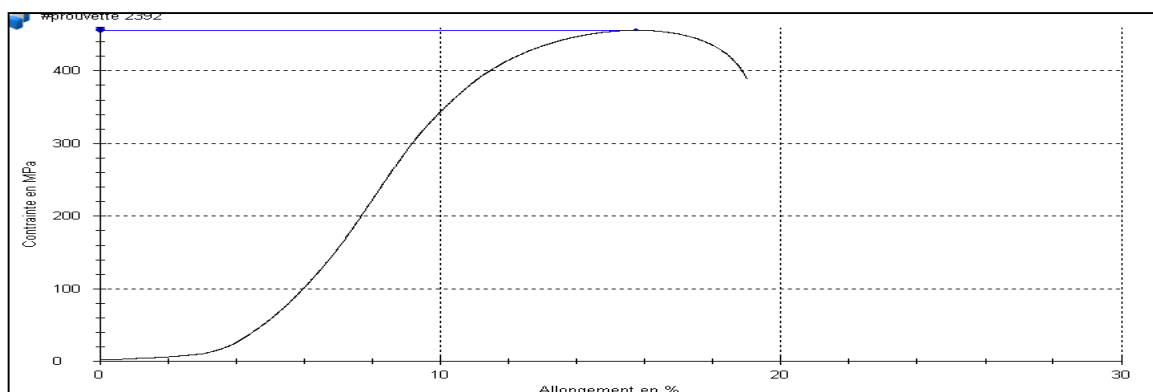
**III.2.1. Essais mécaniques sur la zone circulaire soudée (tableau 9)**

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.34	83.5	465
	02	25	3.38	84.5	456
	03	25	3.34	83.5	493

Les résultats des essais effectués sur les éprouvettes de la soudure circulaire du réservoir GPLc sans passé par le traitement thermique de normalisation, ont montrés que la résistance à la traction est supérieure à celle de l'acier de base du (tableau 9), (figures 22, 23 et 24), ce qui conduit a une fragilisation de l'éprouvette, causé par les défauts structuraux et les contraintes internes.

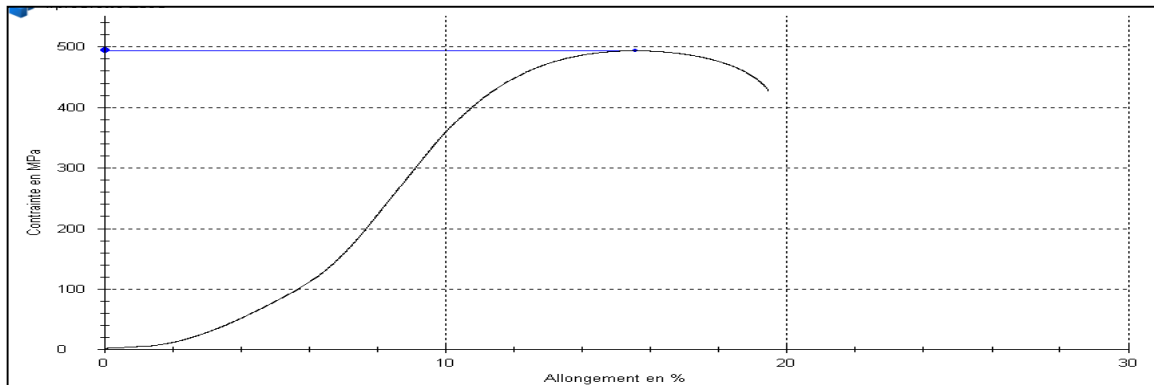


**Figure 22.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure circulaire n°1.



**Figure 23.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure circulaire n°2.



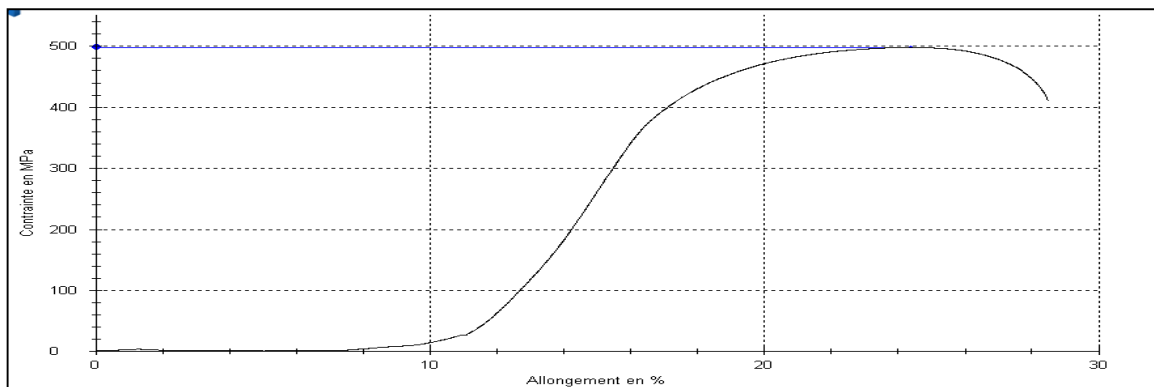


**Figure 24.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette de la soudure circulaire n°3.

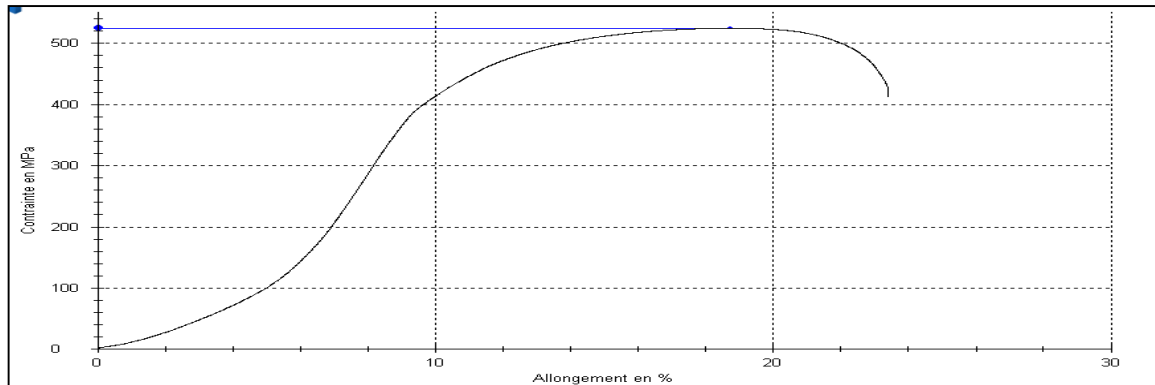
### II.2.2. Essais sur zone longitudinale soudée (tableau 10)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm
Soudure longitudinale	01	25	3.34	83.5	498
	02	25	3.31	82.75	424
	03	25	3.33	83.25	515

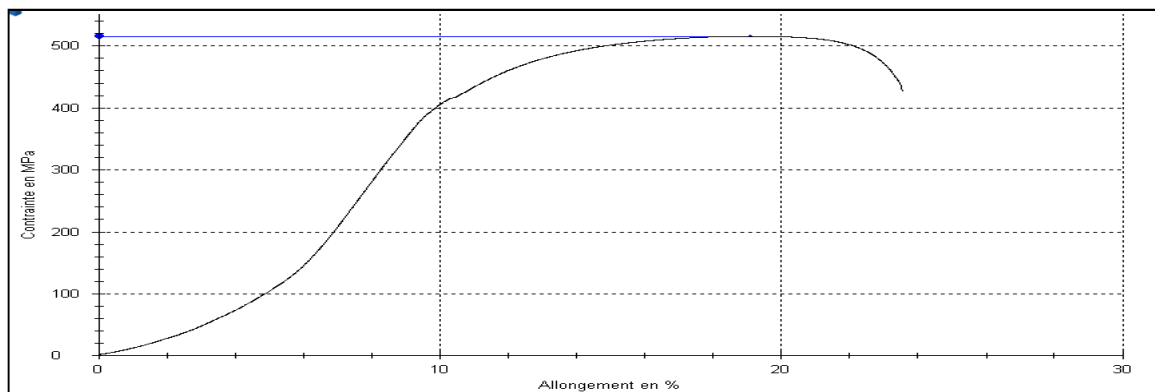
Les résultats des éprouvettes de la soudure longitudinale sont supérieurs à celles de l’acier de base et celles de la soudure circulaires, ils s’expliquent par le type de la soudure effectuée dont la pénétration du métal fondu est très importante par rapport à la soudure circulaire, ce qui donne une résistance élevée des bords soudés (soudure bout à bout), donc une fragilisation importante de l’acier caractériser (figures 25, 26 et 27).



**Figure 25.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette de la soudure longitudinale n°1.



**Figure 26.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure longitudinale n°2.



**Figure 27.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette de la soudure longitudinale n°3.

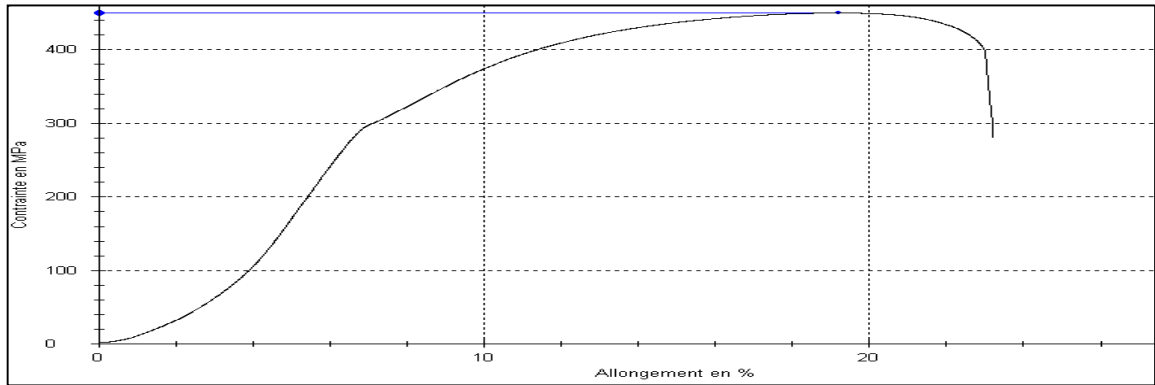
### III.3. Essais mécanique après traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 5 minutes

#### III.3.1. Essais mécaniques pour une tôle normale (tableau 11)

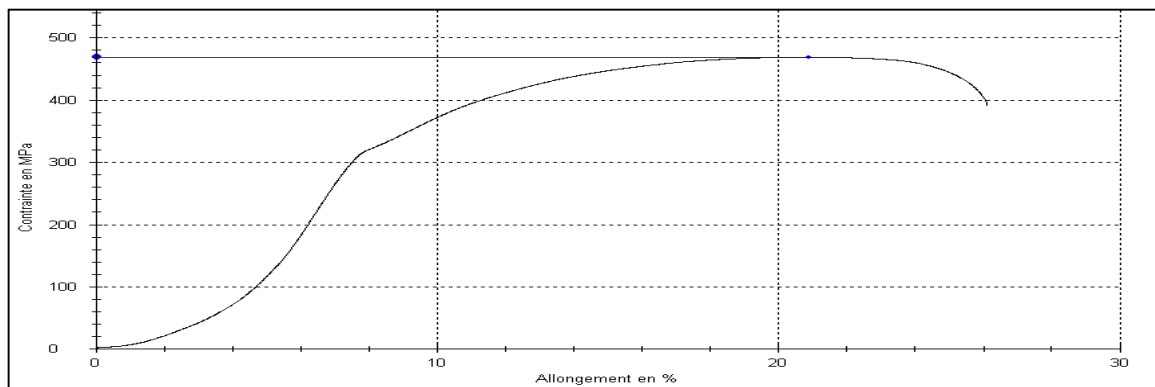
	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Re	Rm	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.35	67	298	438	46.24	62	34.08
	02	20	3.26	65.2	305	449	45.62	59	29.32
	03	20	3.32	66.4	290	442	46.03	60	30.34

Les résultats de la résistance à la traction après traitement thermique de normalisation, sont baissés un peut parrapport a l'acier de base avant traitement thermique, mais ils restent toujours dans l'intervalle 410 à 500 Mpa, ce traitement est pour but d'homogénéiser la structure, donc éliminer les

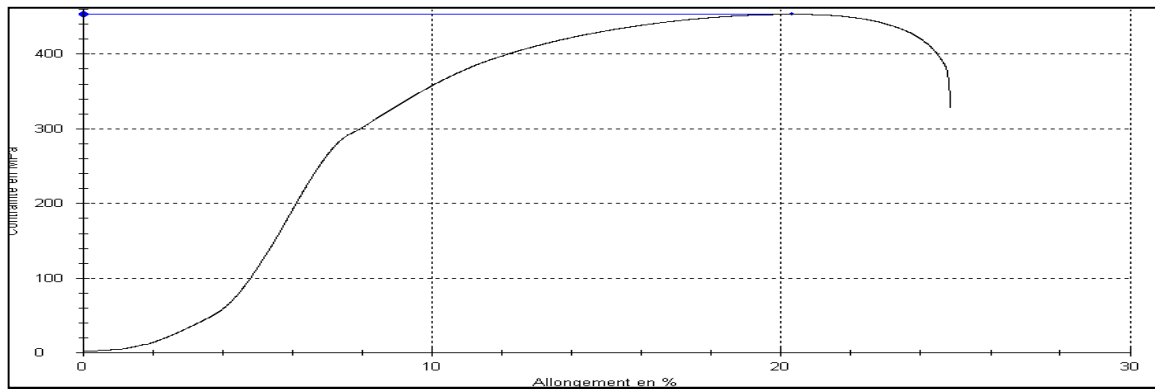
contraintes interne engendrées au cours d'opération d'emboutissage et le soudage l'arc submergé (SAW) sous flux (figures 28, 29 et 30).



**Figure 28.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 29.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

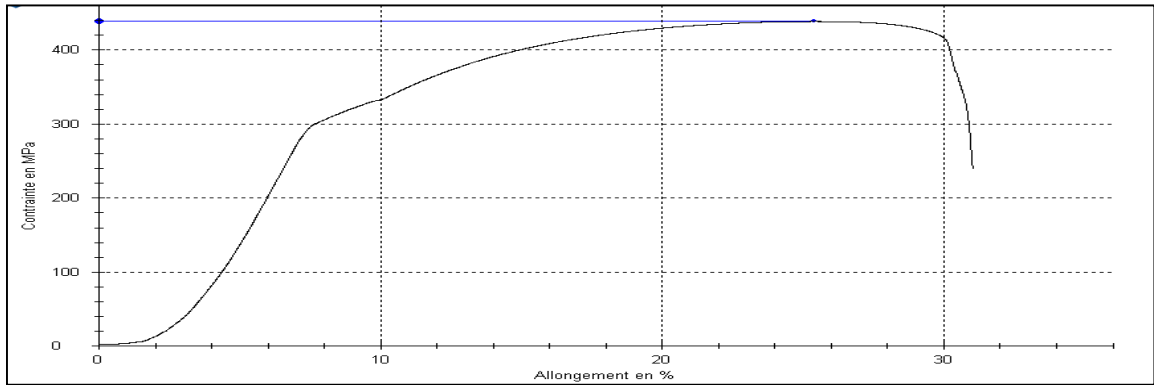


**Figure 30.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la tôle normale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

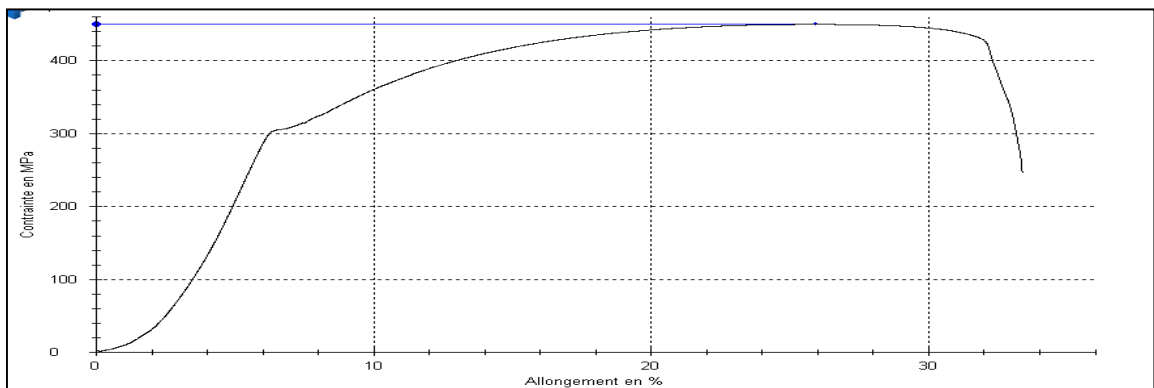
### III.3.2. Essais mécaniques pour zone circulaire soudée (tableau 12)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure Circulaire	01	25	3.25	81.25	450
	02	25	3.24	81	469
	03	25	3.26	81.5	453

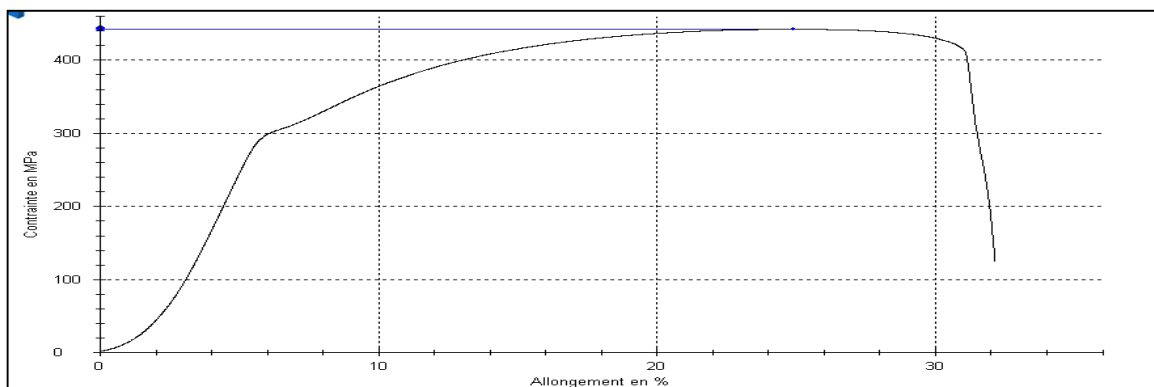
Dans ce type des éprouvettes, on distingue que valeur moyenne de la résistance à la traction est 457 Mpa elle diminue par rapport a la valeur moyenne de celles des éprouvettes citées dans le tableau 9, qui est de 471 Mpa, cette diminution est expliquée par l’homogénéisation structurale après traitement thermique, ainsi on remarque que l’éprouvette avant la rupture elle a exercée les domaines élastique (figures 31, 32 et 33), la structure avant traitement thermique est fine (grain écroué après l’opération d’emboutissage), ce qui augmente la résistance à la traction par rapport a une structure après traitement thermique, où le grain est homogène dans tous les différentes parties du réservoir GPLc et un peut grossier.



**Figure 31.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 32.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).

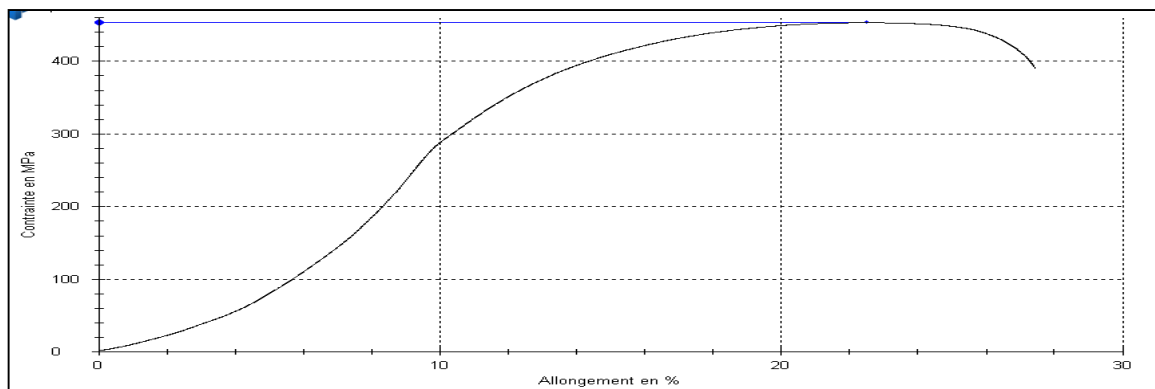


**Figure 33.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la soudure circulaire après traitement thermique (5 min temps de maintien).

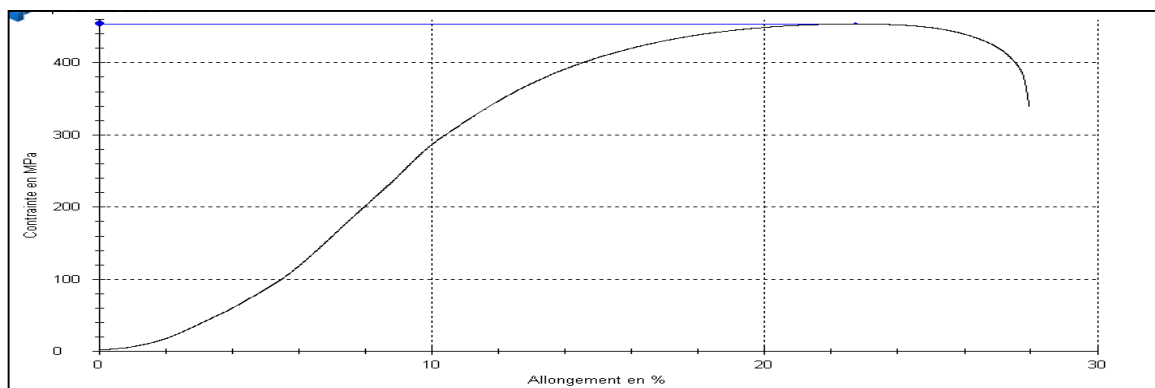
**III.3.3. Essais mécaniques pour zone longitudinale soudée (tableau 13)**

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure longitudinale	01	25	3.33	83.25	453
	02	25	3.32	83	453
	03	25	3.35	83.75	450

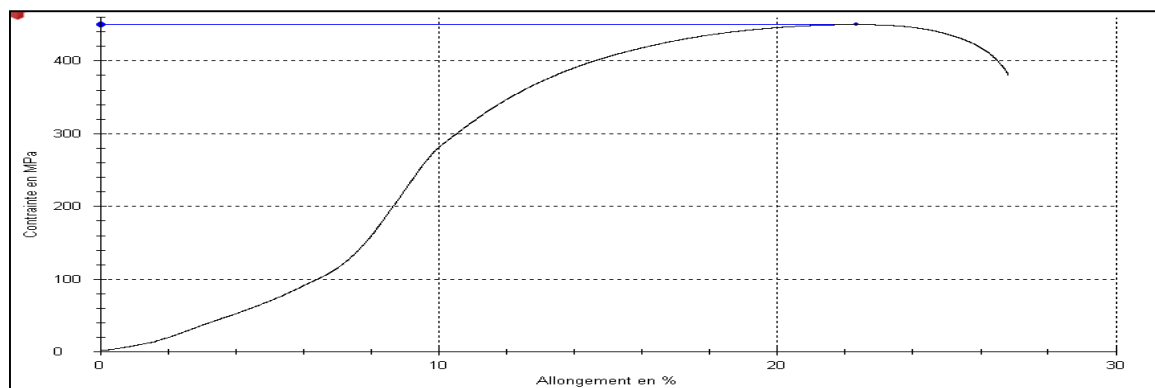
En ce qui concerne la caractérisation des éprouvettes longitudinales soudées après traitement thermique avec 5 minutes, on remarque que la résistance à la traction moyenne est de 452 Mpa, elle est similaire de l'essai précédente (soudure circulaire), ainsi elle a diminué par rapport à la valeur moyenne de l'éprouvette de l'acier brut de coulée qui est de 479 Mpa (figures 34, 35 et 36).



**Figure 34.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



**Figure 35.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).



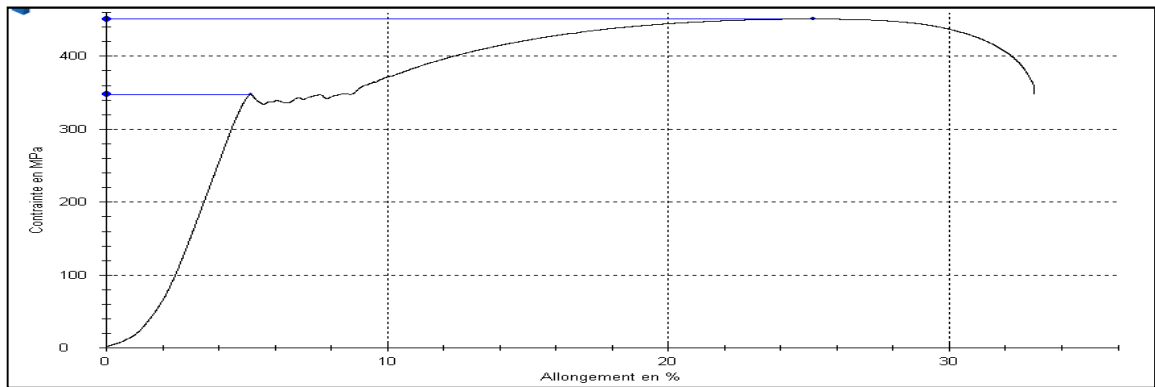
**Figure 36.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la soudure longitudinale après traitement thermique (5 min temps de maintien).

### III.4. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 10 minutes

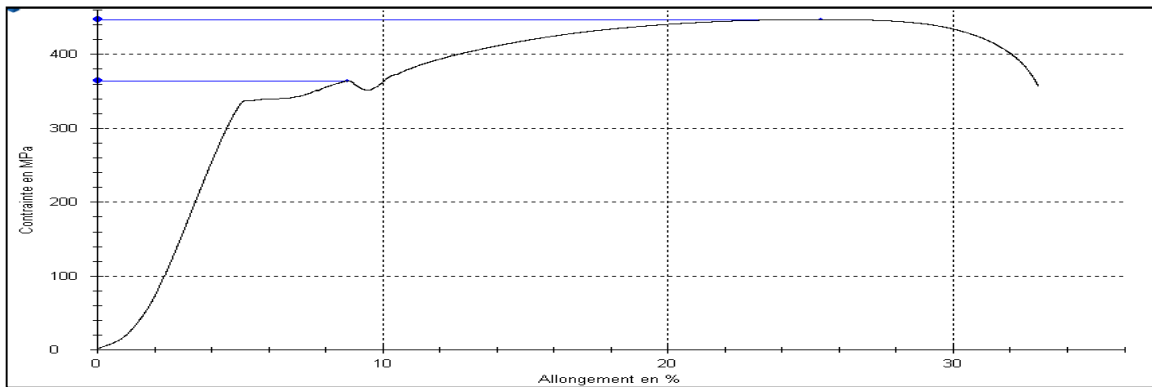
#### III.4.1. Essais mécanique sur tôle normale (tableau 14)

	N°	Larg (mm)	Ep (mm)	S (mm)	Re	Rm	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.30	66	348	451	45.90	68	48.10
	02	20	3.35	67	364	447	46.24	66	42.73
	03	20	3.36	67.2	337	448	46.31	67	44.31

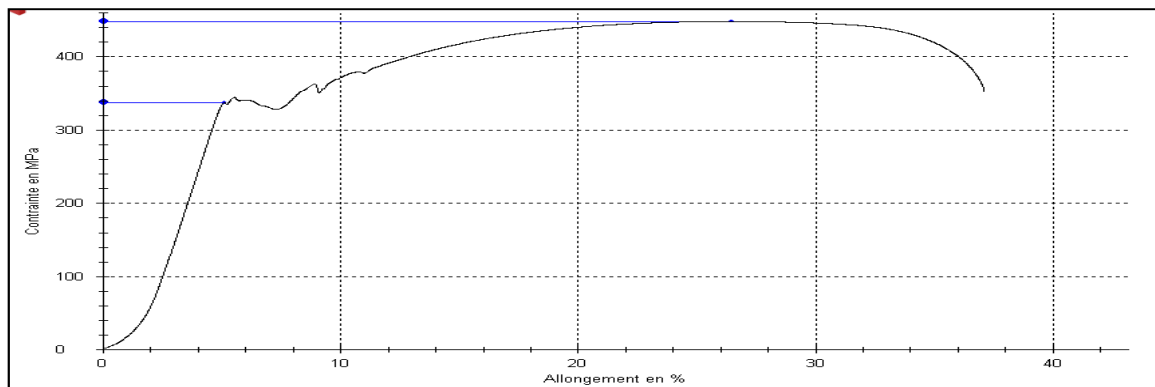
D'après les résultats obtenus, on remarque que la résistance moyenne à la traction est de 448 Mpa, à 5 minutes du temps de maintien elle est de 444 Mpa, à 10 minutes elle est de 449 Mpa, par contre l'allongement moyen a subi une augmentation importante il est de l'ordre de 45 % à 10 minutes et de 31 % à 5 minutes, ce phénomène est expliqué par le grossissement des grains de l'acier en étude après traitement thermique avec augmentation du temps de maintien de 5 minutes à 10 minutes (figures 37, 38 et 39).



**Figure 37.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 38.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



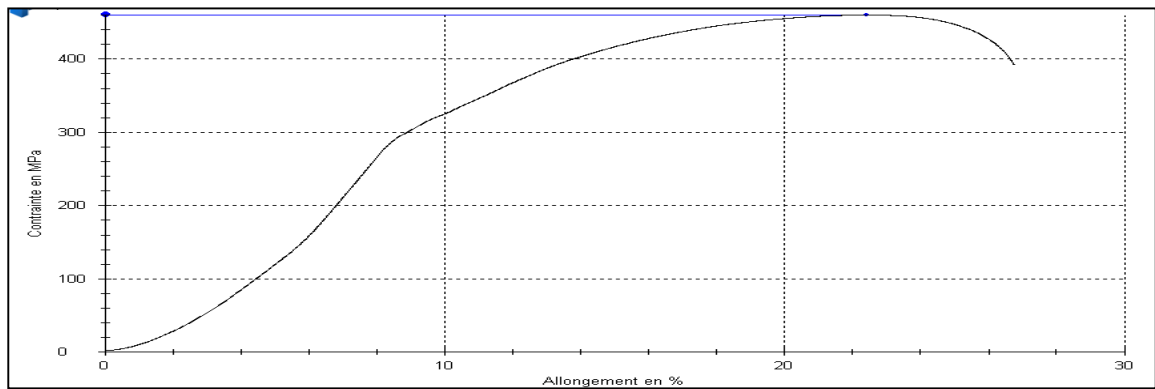
**Figure 39.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la tôle normale après traitement thermique (10 min temps de maintien).



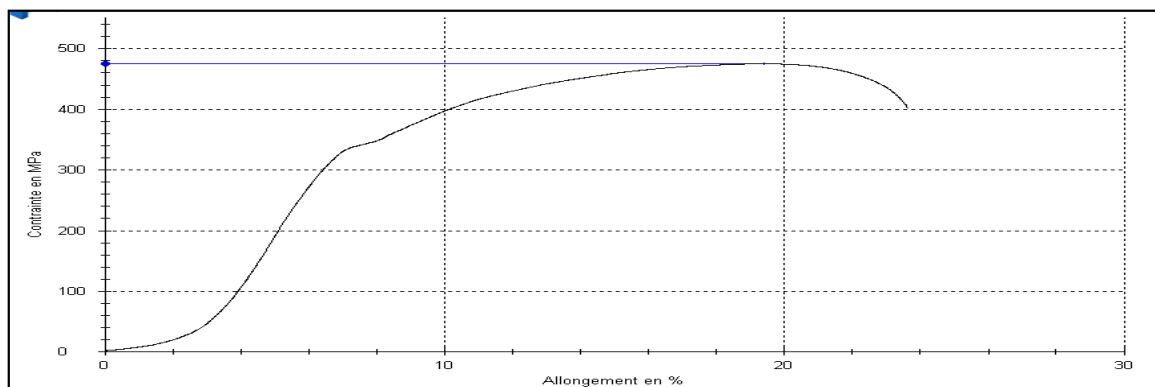
**III.4.2. Essais mécaniques sur la zone circulaire soudée (tableau 15)**

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.40	85	460
	02	25	3.41	85.25	441
	03	25	3.45	86.25	447

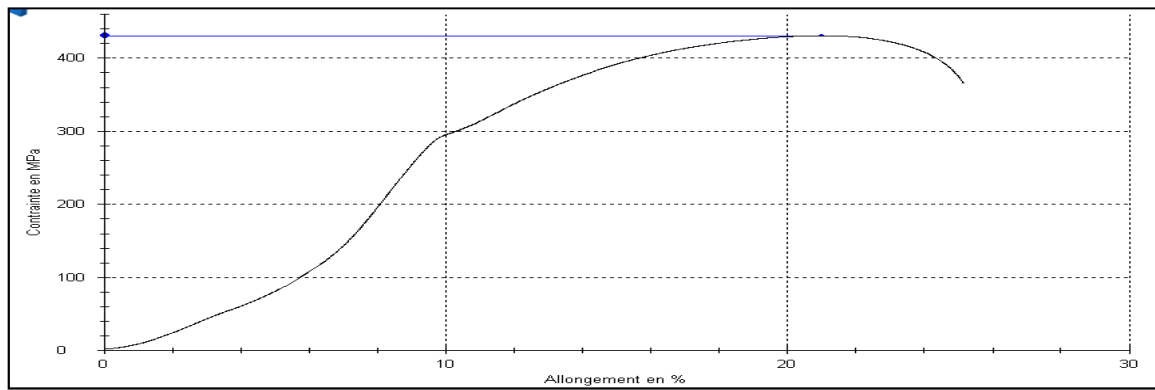
D'après la résistance moyenne des éprouvettes des soudures circulaires qui est de 449 Mpa, on remarque que cette dernière a diminué légèrement par rapport à celles des éprouvettes traitées avec 5 minutes (457 Mpa) du temps de maintien (figures 40, 41 et 42).



**Figure 40.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 41.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

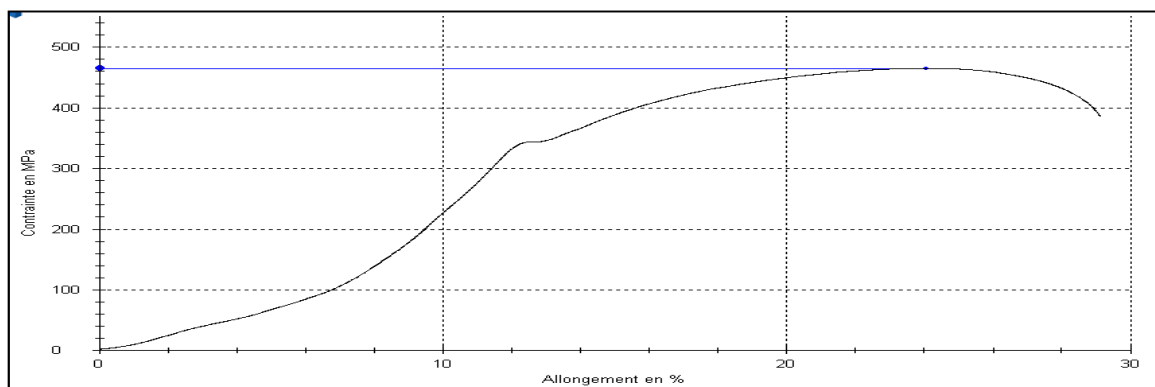


**Figure 42.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

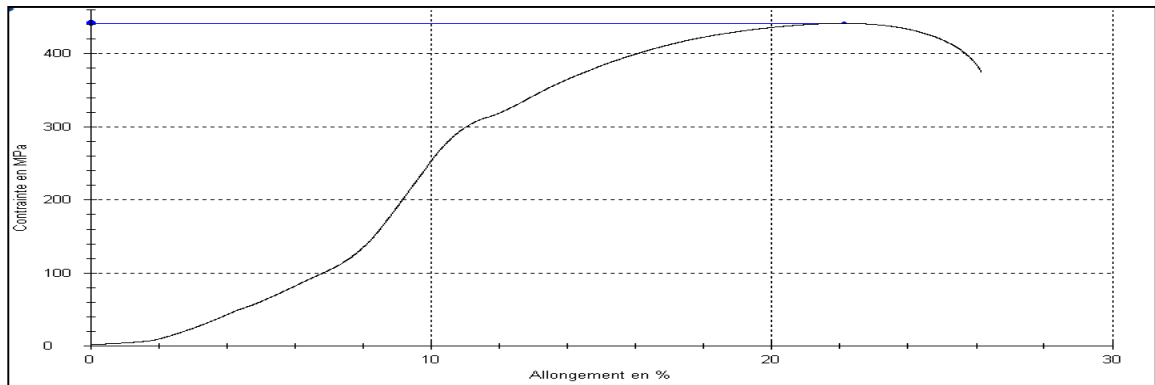
### III.4.3. Essais mécanique sur la zone longitudinale soudée (tableau 16)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure longitudinale	01	25	3.35	83.75	465
	02	25	3.31	82.75	475
	03	25	3.32	83	483

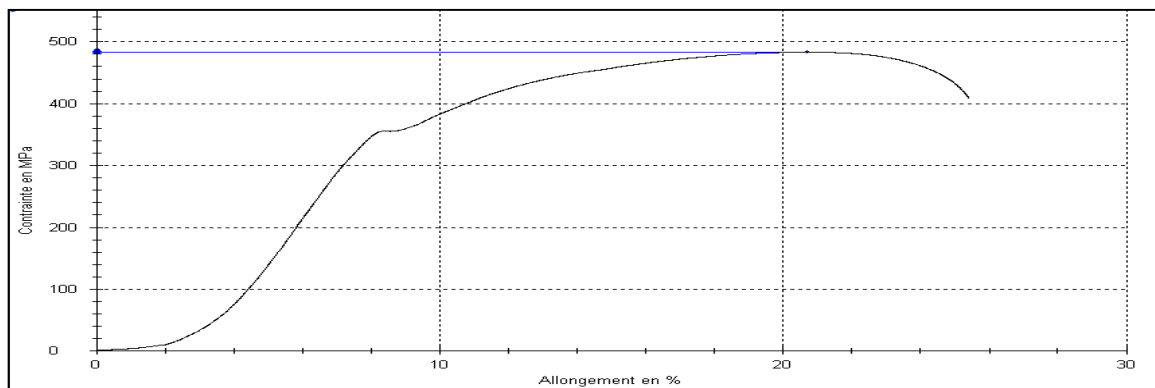
Après traitement thermique et maintient à 920 C° pendant 10 minutes, on remarque que la résistance moyenne des éprouvettes de la zone longitudinale est de 474 Mpa à augmenter presque de 5 % par rapport a celles traiter avec 5 minutes du temps de maintien (figures 43, 44 et 45), ce phénomène peut être s’expliquer par de recristallisation du matériaux en étude.



**Figure 43.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°1 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



**Figure 44.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°2 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).



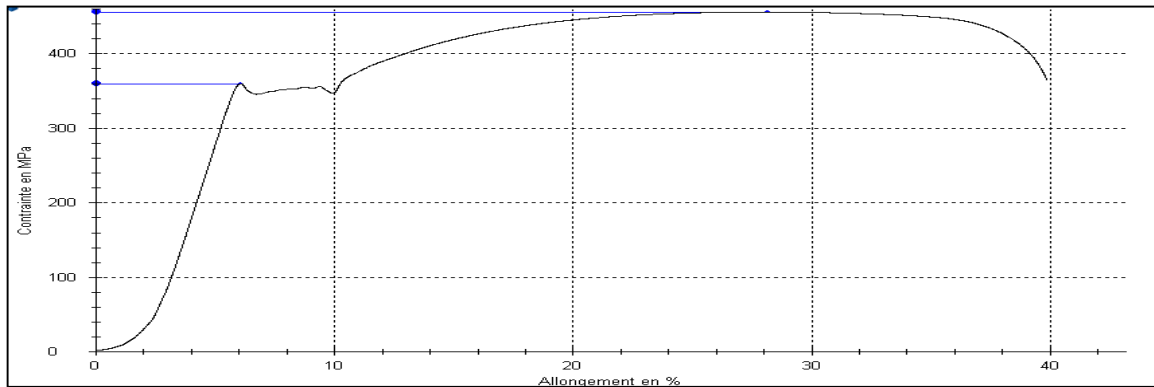
**Figure 45.** Graphe de l’essai de traction de l’éprouvette n°3 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (10 min temps de maintien).

### III.5. Essai mécanique pour traitement thermique à 920 C° et le temps de maintien 15 minutes

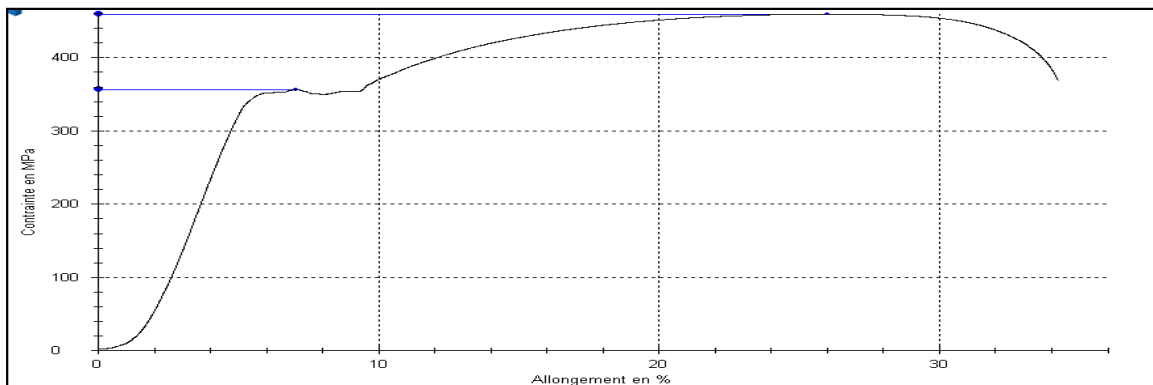
#### III.5.1. Essais mécanique sur tôle (emboutis et virole) (tableau 17)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Re Mpa	Rm Mpa	L0 (mm)	L (mm)	Al (%)
Tôle	01	20	3.28	65.6	360	456	45.76	71	55.15
	02	20	3.29	65.8	365	459	45.82	69	50.58
	03	20	3.29	65.8	353	456	45.82	75	63.68

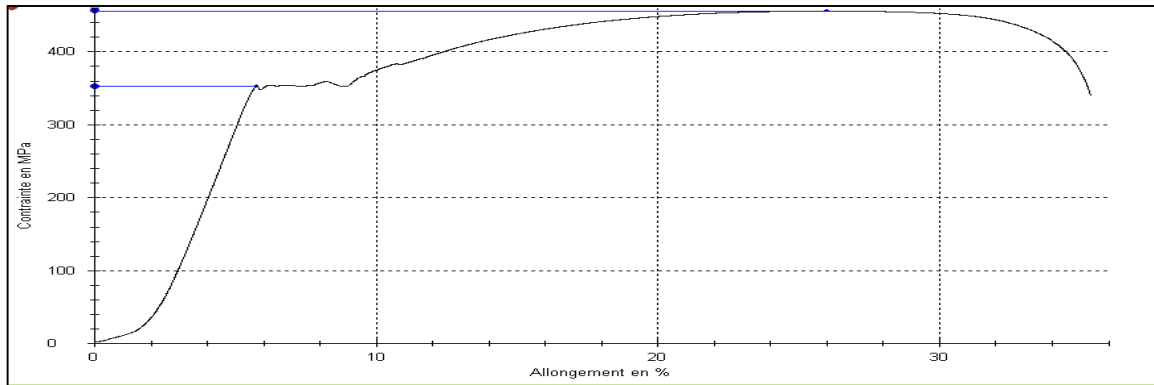
D'après le tableau 17, on constate que les résultats de la résistance moyenne avec est de 457 Mpa à 15 minutes de maintien à augmenter de 3 % par rapport 5 minutes de maintien et 2 % par rapport à 10 minutes de maintien, ainsi que l'allongement moyen à augmenter de 44 % par rapport à 5 minutes de maintien et de 19 % par rapport à 10 minutes de maintien (figures 46, 47 et 48). Quant en augment le temps de maintien les grains de la structures de l'acier en étude vont grossiers, ce qui tend vers l'abaissement de la résistance à la traction et l'augmentation de l'allongement.



**Figure 46.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 47.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).

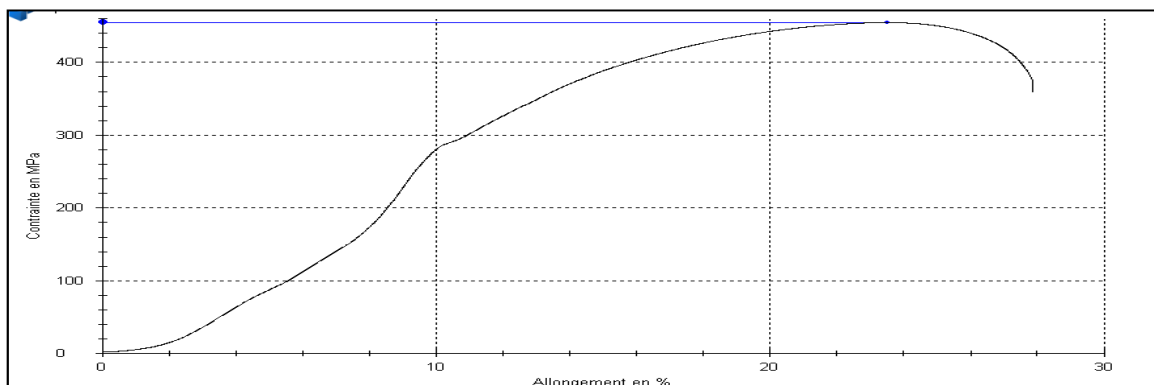


**Figure 48.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la tôle (embouti et virole) après traitement thermique (15 min temps de maintien).

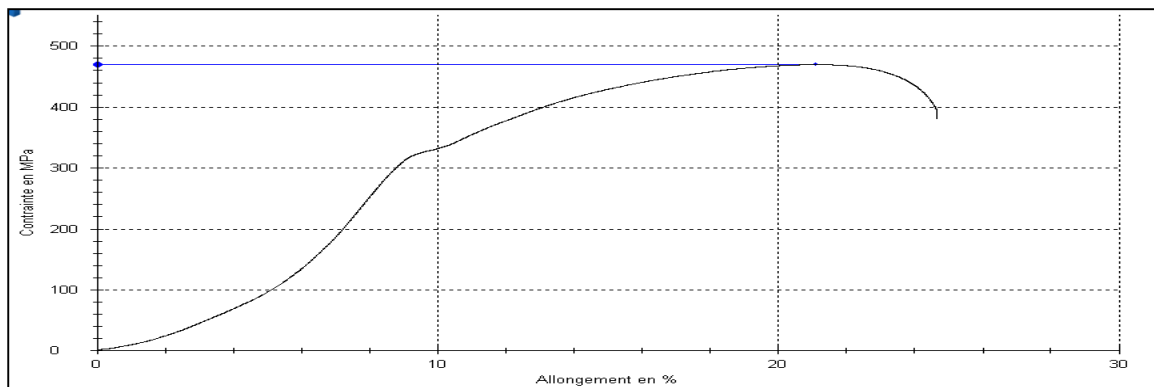
### III.5.2. Essais sur la zone circulaire soudée (tableau 18)

	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm Mpa
Soudure circulaire	01	25	3.37	84.25	454
	02	25	3.31	82.75	469
	03	25	3.36	84	454

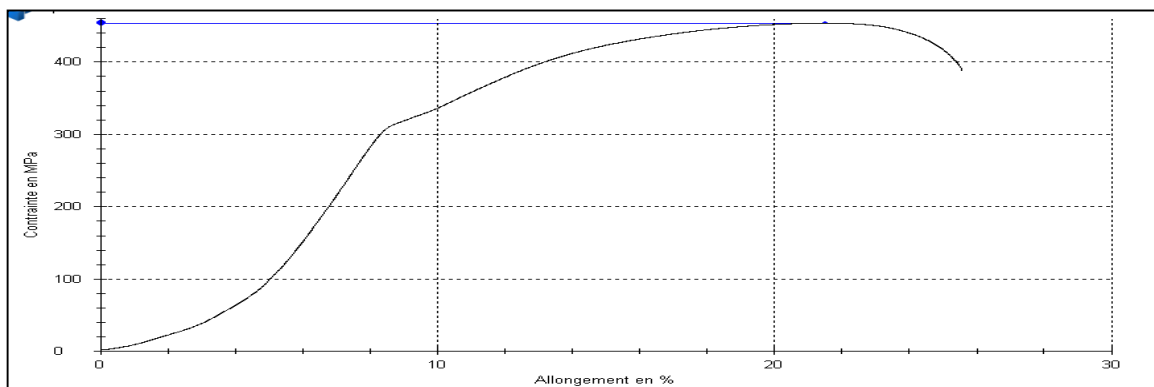
D'après les résultats affichés sur le tableau 18, on remarque une légère (environ 1%) augmentation de la résistance moyenne des éprouvettes de la zone circulaire soudées, par rapport à la résistance moyenne des éprouvettes caractérisées à 10 minutes du temps de maintien et négligeable par rapport à celles traités avec 5 minutes du temps de maintien (figures 49, 50 et 51).



**Figure 49.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 50.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



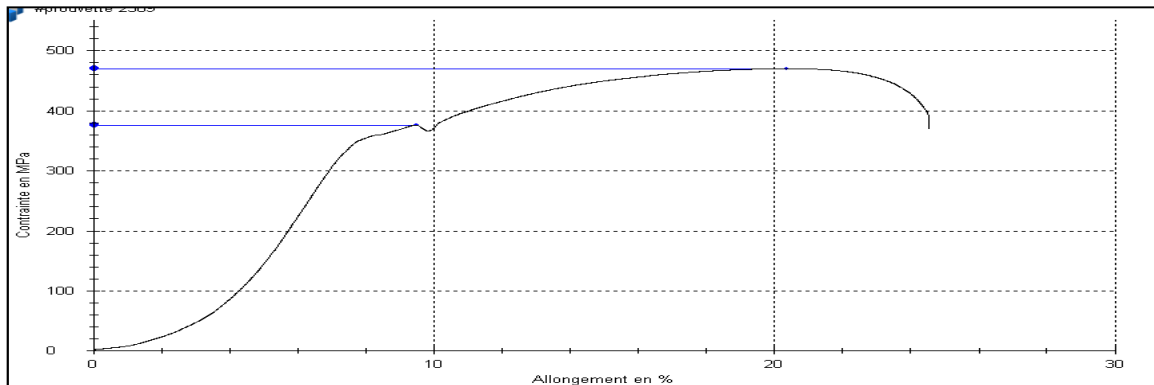
**Figure 51.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la zone circulaire soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).

### III.5.3. Essais sur la zone longitudinale soudée (tableau 19)

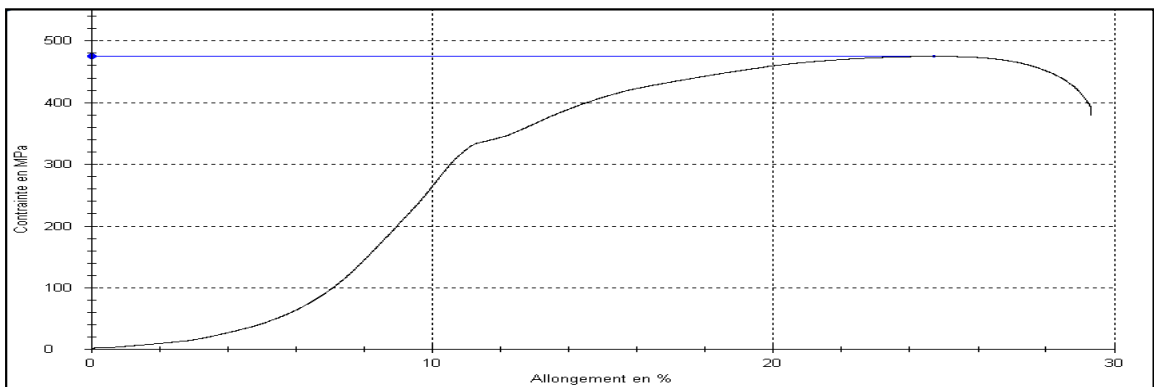
	N°	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	S (mm)	Rm
Soudure longitudinale	01	25	3.34	83.5	470
	02	25	3.33	83.25	475
	03	25	3.32	83	475

En ce qui concerne les éprouvettes de la soudure traitées avec un temps de maintien de 15 minutes, on remarque que la résistance est similaire à celles des éprouvettes avec un temps de maintien de 10

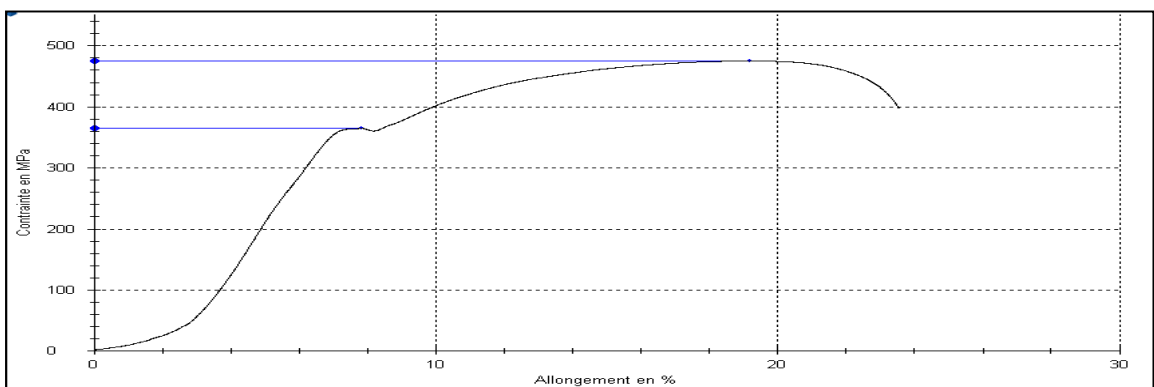
minutes, par contre elle est augmentée d'ordre de 4.5 % par rapport à celles traitées avec maintien de 5 % (figures 52, 53 et 54).



**Figure 52.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°1 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 53.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°2 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).



**Figure 54.** Graphe de l'essai de traction de l'éprouvette n°3 de la zone longitudinale soudée après traitement thermique (15 min temps de maintien).

### III.6. Essai de fatigue pour réservoir GPLc

#### III.3.1. Essai de fatigue pour réservoir avant traitement thermique (tableau 20)

Un essai de fatigue a été effectué au niveau du laboratoire du département du contrôle qualité, en utilisant une installation équipée d'une pompe travail d'une manière cyclique à 30 bars relié avec le réservoir soudé plein de l'eau (conformément la norme de fabrication NF EN1442), les résultats de sont affichés sur le tableau 20 :

Les essais de la fatigue on été achevés après une légère déformation des réservoirs GPLc ou bien apparition d'une fuite.

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	10000
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.2. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 5 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	18000
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.3. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 10 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	20400
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

#### III.3.4. Essai de fatigue pour réservoir après traitement thermique avec 15 minutes du temps de maintien (tableau 21)

<b>Pression d'essai</b>	30 bars
<b>Nombre des cycles</b>	21600
<b>Fréquence de l'essai</b>	15 cycles / min

On remarque que le nombre des cycles où le réservoir a subit une légère déformation sont en augmentations avec l'augmentation du temps de maintien.