

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie mécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie mécanique

Spécialité : Génie des matériaux

Par

➤ Tahraoui Akram & Ghorab Ayoub

Intitulé

**Étude de l'effet du recuit sur le comportement en traction des
aciers DC06 et DX53D+Z**

Soutenu le : 01/07/2026

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. Chikh Noureddine</i>	<i>Professeur</i>	<i>Président</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Boubaaya Rabah</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Djendel Mokhtar</i>	<i>MCA</i>	<i>Co-encadreur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Saidani Lyamine</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>
<i>M. Mechta Ahlem</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de B.B. Arreridj</i>

Année Universitaire 2025/2026

المخلص: تتناول هذه المذكرة دراسة تأثير المعالجة الحرارية بالتخمير (Recuit) على السلوك الميكانيكي لفولاذي DC06 و DX53D+Z المخصصين لعمليات السحب العميق والتشكيل على البارد، حيث بدأت بعرض الجوانب النظرية المتعلقة بعملية السحب العميق وأهميتها الصناعية، ثم قدمت وصفاً مفصلاً للتركيب الكيميائي والخواص الميكانيكية والبنية المجهرية لكل من الفولاذين، مع إبراز الأسباب التي تجعل منهما من أكثر المواد استعمالاً في صناعة السيارات والأجهزة الكهرومنزلية. كما تطرقت إلى دراسة السلوك الميكانيكي تحت تأثير الشد، وشرحت المفاهيم الأساسية مثل حد المرونة، ومقاومة الشد، والاستطالة عند الكسر، ومعامل التصلب بالتشوه (n)، ومعامل الأنيسوتروبي (r)، وعلاقتها بقابلية المادة للتشكيل. بعد ذلك تناولت المذكرة المعالجة الحرارية بالتخمير من الناحية المعدنية، فشرحت آليات الاسترجاع وإعادة التبلور ونمو الحبيبات وتأثير درجة الحرارة وزمن المكوث على تطور البنية المجهرية والخواص الميكانيكية. وفي الجانب التطبيقي أجريت معالجة حرارية لعينات من الفولاذين عند درجات حرارة مختلفة وأزمنة مكوث متعددة، ثم خضعت العينات لاختبارات الشد من أجل مقارنة سلوكها قبل وبعد التخمير، وتحليل منحنيات الإجهاد والانفعال واستخراج الخصائص الميكانيكية الناتجة. كما تمت مقارنة تأثير شروط التخمير المختلفة على كل من DC06 و DX53D+Z بهدف تحديد مدى تحسن المطيلية وقابلية السحب العميق وانخفاض آثار التصلب بالتشوه، مع تفسير النتائج اعتماداً على التحولات المعدنية التي تحدث داخل المادة أثناء المعالجة الحرارية، وذلك للوصول إلى أفضل شروط تشغيل تسمح بالحصول على توازن مناسب بين قابلية التشكيل والخواص الميكانيكية المطلوبة في التطبيقات الصناعية.

الكلمات المفتاحية: السحب العميق، المعالجة الحرارية بالتلدين، الاختبارات الميكانيكية، السلوك الميكانيكي.

Résumé : Ce mémoire porte sur l'étude de l'influence du traitement thermique de recuit sur le comportement mécanique de deux aciers destinés à l'emboutissage profond, à savoir le DC06 et le DX53D+Z. Dans un premier temps, le travail présente les principes généraux de l'emboutissage ainsi que les caractéristiques chimiques, mécaniques et microstructurales de ces deux nuances d'acier largement utilisées dans les secteurs automobile et électroménager en raison de leur excellente aptitude au formage. L'étude aborde ensuite le comportement mécanique en traction en expliquant les principales propriétés telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction, l'allongement à la rupture, le coefficient d'écrouissage et le coefficient d'anisotropie, qui jouent un rôle essentiel dans les opérations d'emboutissage. Le mémoire développe également les aspects théoriques du traitement thermique de recuit en décrivant les phénomènes métallurgiques de récupération, de recristallisation et de croissance des grains, ainsi que leur influence sur la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux. La partie expérimentale consiste à soumettre des éprouvettes de DC06 et de DX53D+Z à différentes températures et durées de recuit, puis à réaliser des essais de traction afin d'évaluer l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques. Les résultats obtenus sont analysés et comparés à travers les courbes de traction et les paramètres mécaniques mesurés, dans le but de déterminer l'effet du recuit sur l'amélioration de la ductilité, la réduction de l'écrouissage et l'aptitude à l'emboutissage. Enfin, une comparaison entre les deux aciers permet de mettre en évidence leur comportement respectif face au traitement thermique et d'identifier les conditions les plus favorables pour optimiser leurs performances dans les applications industrielles de mise en forme.

Mots clés : Emboutissage profond, traitement thermique de recuit, essais mécaniques comportement mécanique.

Abstract: This dissertation focuses on the study of the influence of annealing heat treatment on the mechanical behavior of two steels intended for deep drawing applications, namely DC06 and DX53D+Z. First, the work presents the general principles of deep drawing as well as the chemical, mechanical, and microstructural characteristics of these two steel grades, which are widely used in the automotive and household appliance industries due to their excellent formability. The study then examines the tensile mechanical behavior by explaining the main properties such as yield strength, tensile strength, elongation at break, strain hardening coefficient, and anisotropy coefficient, which play a crucial role in deep drawing operations. The dissertation also develops the theoretical aspects of annealing heat treatment by describing the metallurgical phenomena of recovery, recrystallization, and grain growth, as well as their influence on the microstructure and mechanical properties of materials. The experimental part consists of subjecting DC06 and DX53D+Z specimens to different annealing temperatures and holding times, followed by tensile tests to evaluate the evolution of their mechanical characteristics. The obtained results are analyzed and compared through tensile curves and measured mechanical parameters in order to determine the effect of annealing on improving ductility, reducing strain hardening, and enhancing deep drawing performance. Finally, a comparison between the two steels highlights their respective responses to heat treatment and identifies the most favorable conditions for optimizing their performance in industrial forming applications.

Keywords: Deep drawing, annealing heat treatment, mechanical testing, mechanical behavior.

.

Remerciements

Louange à Allah, par Sa grâce les bonnes œuvres s’accomplissent. Une louange abondante, pure et bénie. Sans la faveur d’Allah, nous n’aurions rien accompli. À Lui revient tout mérite, en premier et en dernier lieu.

Une mention spéciale et des remerciements sincères vont à Monsieur Boubaaya Rabah, encadreur de ce mémoire, pour son soutien constant, ses conseils avisés et son encouragement tout au long de ce travail, mais aussi pour ses qualités humaines.

Nous tenons également à adresser nos sincères remerciements à Monsieur Djendel Mokhtar, pour avoir co-encadré ce mémoire, pour sa grande disponibilité et ses conseils avisés.

Nos remerciements vont également au Président du jury, Monsieur Raouache Elhadj, Professeur à l’université B.I de bordj bou arreridj, de nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.:

Un grand merci à tous les enseignants qui ont marqué ce parcours exceptionnel pour nous, par leur excellence, leur humilité et leur professionnalisme.

Nous n’oublions pas de remercier les ingénieurs des laboratoires des universités de Bordj Bou Arreridj, pour leur assistance technique et leur contribution à la création d'un environnement propice à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à :

Nos parents, dont nous recherchons la satisfaction et à qui nous souhaitons de jouir toujours d'une bonne santé et d'un bien-être constant.

Par ces mots, nous implorons Allah le Tout-Puissant d'envelopper l'âme pure de nos pères de Sa miséricorde, de nous accorder une place au Paradis, et de nous accorder la grâce de continuer à prier pour eux tant que nous vivrons.

Nous dédions également ce modeste travail à nos chères familles,

À tous nos amis et à tous ceux qui nous ont soutenus et accompagnés tout au long de ce parcours.

Liste des figures

Figure 1. L'emboutissage dans l'industrie	6
Figure 2. Presse d'emboutissage.....	8
Figure 3. Aciers DX53D+Z	14
Figure 4. Diagramme contrainte et deformation	21
Figure 5. Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écrouissage d'un fil d'acier à 0,06 % C [14].....	23
Figure 6. Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction	24
Figure 7. Évolution de la microstructure au cours des différentes étapes du recuit	28
Figure 8. [A, B] Cycle thermique du traitement de recuit (chauffage, maintien et refroidissement).	30
Figure 9. Diagramme TRC pour un acier du type 60 NiCrMo 11-03 (0,57 % C - 2,36 % Ni - 0,75 % Cr - 0,41 % Mo) austénitisé à 850 °C pendant 30 min (Murry, 1998).....	38
Figure 10. Comparaison des éprouvettes métalliques : DC06 (à droite) et DX53D+Z (à gauche).....	43
Figure 11. Four électrique de laboratoire Nabertherm pour traitements thermiques des matériaux	45
Figure 12. Machine d'essai de traction universelle.....	48
Figure 13. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 à l'état initial.....	52
Figure 14. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DX53D+Z à l'état initial.	53
Figure 15. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 15 min.....	54
Figure 16. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 15 min.	54
Figure 17. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 30 min	55
Figure 18. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 30 min.	55
Figure 19. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 45 min	56
Figure 20. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 45 min.	57
Figure 21. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 15 min	58
Figure 22. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 après traitement à 450°C pendant 15 min.	58
Figure 23. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 30 min	59

Figure 24. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DC06 après traitement à 450°C pendant 30 min.	59
Figure 25. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 45 min	60
Figure 26. Courbe contrainte - déplacement de l’acier DC06 après traitement à 450°C pendant 45 min.	60
Figure 27. Eprouvettes après recuit à 690 °C pendant 15 min	61
Figure 28. Courbe contrainte - déplacement de l’acier DC06 après traitement à 690°C pendant 15 min.	62
Figure 29. Eprouvettes après recuit à 690 °C pendant 30 min	63
Figure 30. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DC06 après traitement à 690°C pendant 30 min.	63
Figure 31. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 45 min	64
Figure 32. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DC06 après traitement à 690°C pendant 45 min.	64
Figure 33. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 15 min	65
Figure 34. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z Après traitement à 250°C pendant 15 min.	66
Figure 35. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 30 min	67
Figure 36. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z Après traitement à 250°C pendant 30 min.	67
Figure 37. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 45 min	68
Figure 38. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z Après traitement à 250°C pendant 45 min.	68
Figure 39. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 15 min.	69
Figure 40. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 450°C pendant 15 min.	69
Figure 41. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 30 min.	70
Figure 42. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 450°C pendant 30 min.	71
Figure 43. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 45 min.	72
Figure 44. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 450°C pendant 45 min.	72
Figure 45. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 15 min.	73
Figure 46. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 690°C pendant 15 min.	73
Figure 47. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 30 min.	74
Figure 48. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 690°C pendant 30 min.	75
Figure 49. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 45 min.	76
Figure 50. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 690°C pendant 45 min.	76

Liste des tableaux

Tableau 1. Composition chimique selon DIN EN 10346 (en % massique, analyse de coulée)	10
Tableau 2. Composition chimique d'un acier extra-doux	11
Tableau 3. Propriétés mécaniques selon DIN EN 10346	11
Tableau 4. Valeurs moyennes en production (VDA)	12
Tableau 5. Composition chimique maximale (analyse de coulée, en % massique selon EN 10130)	14
Tableau 6. Propriétés mécaniques (épaisseur ≤ 3 mm)	15

Introduction

L'industrie moderne, en particulier le secteur automobile et de l'électroménager, exige des matériaux métalliques présentant un excellent compromis entre une haute formabilité et des propriétés mécaniques optimales. Parmi les procédés de mise en forme les plus répandus, l'emboutissage à froid occupe une place prépondérante, nécessitant l'utilisation d'aciers spécifiquement conçus pour subir de grandes déformations sans rupture ni apparition de défauts de surface.

Les aciers à bas carbone, tels que l'acier DC06 (un acier de type Interstitial Free - IF) et l'acier DX53D+Z (un acier galvanisé), sont largement plébiscités pour ces applications en raison de leur excellente ductilité et de leur aptitude remarquable à l'emboutissage profond. Cependant, lors du processus de laminage à froid indispensable à leur fabrication, ces aciers subissent un écrouissage intense qui augmente leur résistance mécanique mais réduit drastiquement leur ductilité. Pour restaurer leurs propriétés de formabilité, un traitement thermique de recuit (recristallisation ou détente) est structuralement indispensable.

L'objectif principal de ce travail de mémoire est d'étudier comparativement l'influence des paramètres de traitement thermique de recuit – à savoir la température et le temps de maintien – sur le comportement mécanique et structural des aciers DC06 et DX53D+Z. Il s'agit de comprendre comment la microstructure évolue à travers les phénomènes de restauration (recovery) et de recristallisation, et comment ces transformations se traduisent directement sur les caractéristiques mécaniques obtenues par essais de traction.

Pour répondre à cette problématique, notre étude est structurée en quatre chapitres principaux :

- Le premier chapitre est dédié à une étude bibliographique globale sur les aciers destinés à l'emboutissage. Il présente les exigences métallurgiques de ce procédé et expose en détail les caractéristiques chimiques, mécaniques et microstructurales des deux nuances étudiées : l'acier IF (DC06) et l'acier galvanisé (DX53D+Z).
- Le deuxième chapitre abordera les fondements théoriques du traitement thermique de recuit. Nous y détaillerons les mécanismes métallurgiques fondamentaux induits par la température, tels que la restauration, la recristallisation et la croissance des grains, tout en mettant l'accent sur leurs spécificités pour les aciers interstitiels et revêtus.
- Le troisième chapitre décrit le protocole expérimental et les méthodes mis en œuvre. Il présente l'origine des tôles, les cycles thermiques appliqués (températures de 250°C, 450°C et 690°C pour des durées de 15, 30 et 45 minutes), ainsi que les équipements utilisés, notamment le four de traitement et la machine d'essais de traction mécanique.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux. À travers l'étude des courbes contrainte-déplacement obtenues, nous analyserons l'évolution des propriétés mécaniques (limite d'élasticité R_e , résistance à la traction R_m , et capacité de déformation) afin d'identifier les conditions thermiques optimales pour optimiser l'aptitude à l'emboutissage de ces deux aciers.

Enfin, une conclusion générale synthétisera les principaux enseignements de cette étude et ouvrira des perspectives pour des investigations futures, notamment microscopiques.

Chapitre 1

Généralités Sur l'acier pour l'emboutissage

Sommaire

Introduction	4
1.1. Emboutissage à froid	6
1.2. Classification et Les caractéristiques d'un bon acier pour l'emboutissage	7
1.3. Les principaux aciers utilisés en emboutissage	7
1.4. Exigences mécaniques	8
1.5. Exigences technologiques et métallurgiques	9
2. Présentation des aciers DC06 et DX53D+Z	9
2.1. Désignation et normalisation	9
2.2. Composition chimique des aciers Dx53D et DC06	10
2.2.1. Composition selon DIN EN 10346 (en % massique, analyse de coulée	10
2.2.2. Valeurs typiques observées en production (VDA.....	10
2.2.3. Propriétés mécaniques	11
2.2.4 Revêtement de surface	12
2.2.5. Microstructure et comportement métallurgique.....	12
2.3. Applications industrielles.....	13
2.3.1. Désignation et normalisation	14
2.3.2. Composition chimique maximale	14
2.3.3. Propriétés mécaniques	15
2.3.4. Analyse mécanique	16
2.4. Microstructure et comportement métallurgique.....	16
2.5. Aptitude au formage	16
2.6. Applications industrielles.....	17
3. Comportement mécanique en traction	17
3.1. Courbe contrainte-déformation	18
3.1.1. Définition de la contrainte (σ).....	18
3.1.2. Définition de la déformation (ϵ).....	18
3.2. Limite d'élasticité	21
3.3. Résistance à la traction.....	21
3.4. Allongement à la rupture	22
3.5. Coefficient d'écrouissage (n) et anisotropie (r).....	22
3. 5.1. Mécanisme et effet de l'écrouissage	22
3.5.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques	23
4.1 Courbe et coefficient d'écrouissage.....	23
4.2 Coefficient d'anisotropie (r)	24
Bibliographies	26

Introduction

La mise en forme des tôles d'acier par emboutissage à froid occupe une place essentielle dans de nombreux secteurs industriels, notamment l'automobile, l'électroménager et la construction métallique. Ces applications exigent des matériaux présentant une excellente aptitude à la déformation, une bonne résistance mécanique ainsi qu'une stabilité des propriétés après transformation. Dans ce contexte, les aciers à faible teneur en carbone, en particulier les aciers destinés à l'emboutissage profond et les aciers galvanisés, sont largement utilisés en raison de leur bon compromis entre ductilité, résistance et coût de production.

Parmi ces nuances, les aciers DC06 et DX53D+Z occupent une position importante dans l'industrie. L'acier DC06 est spécialement conçu pour l'emboutissage profond et se caractérise par une grande ductilité et une excellente aptitude à la mise en forme. L'acier DX53D+Z, quant à lui, est un acier galvanisé à chaud revêtu d'une couche de zinc, combinant une bonne formabilité avec une protection efficace contre la corrosion. Le choix de ces deux matériaux permet d'étudier l'influence du traitement thermique sur un acier non revêtu et sur un acier galvanisé, et d'analyser leur comportement comparatif en traction.

Le comportement mécanique des tôles laminées à froid est fortement influencé par les traitements thermiques appliqués après déformation. Le recuit constitue une étape déterminante, car il permet de réduire les contraintes internes dues au laminage, d'améliorer la ductilité et d'ajuster les caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction, l'allongement ainsi que les paramètres d'écrouissage et d'anisotropie. Toutefois, l'effet du recuit dépend étroitement de ses paramètres opératoires, notamment la température, le temps de maintien et la vitesse de refroidissement.

La problématique de ce travail consiste donc à étudier l'effet des paramètres du recuit sur le comportement en traction des aciers DC06 et DX53D+Z, et à analyser leur sensibilité respective à ce traitement thermique.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer l'évolution des propriétés mécaniques après différents cycles de recuit, d'identifier les conditions les plus favorables à l'amélioration de la formabilité, et de comparer le comportement des deux nuances. Une attention particulière est portée à l'analyse des courbes contrainte-déformation, à l'évolution de la limite d'élasticité, de la résistance à la traction, de l'allongement ainsi qu'aux coefficients d'écrouissage et d'anisotropie. Lorsque cela est possible, une interprétation métallurgique des résultats est proposée afin d'expliquer les variations observées.

La démarche méthodologique adoptée repose sur une approche expérimentale comprenant la

préparation des échantillons, l'application de différents cycles de recuit dans des conditions contrôlées, puis la réalisation d'essais mécaniques de traction conformément aux normes en vigueur. Les résultats obtenus sont ensuite analysés, comparés et discutés à la lumière des travaux rapportés dans la littérature.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les aciers pour l'emboutissage et introduit les nuances DC06 et DX53D+Z ainsi que leur comportement mécanique en traction. Le deuxième chapitre est consacré au traitement thermique de recuit et aux paramètres influençant ses effets. Le troisième chapitre décrit les matériaux étudiés et les méthodes expérimentales adoptées. Enfin, le quatrième chapitre expose les résultats obtenus, leur discussion et la comparaison entre les deux aciers, avant de conclure par une synthèse générale et des perspectives de recherche.

1. Qu'est-Ce Qu'un Acier Pour L'emboutissage ?

L'acier destiné à l'emboutissage est un acier à faible teneur en carbone spécialement élaboré pour subir d'importantes déformations plastiques sans fissuration ni rupture. Il constitue un matériau de base essentiel dans l'industrie automobile, l'électroménager et la fabrication de pièces métalliques minces.

Grâce à sa grande ductilité et à sa bonne aptitude à la mise en forme à froid, l'acier pour emboutissage permet d'obtenir des pièces de formes complexes avec une bonne qualité de surface et une précision dimensionnelle élevée. Il facilite la production en série, réduit les coûts de fabrication et garantit de bonnes performances mécaniques après transformation [1].

L'emboutissage est un procédé de mise en forme qui consiste à transformer une tôle métallique en une pièce définie grâce à l'action d'un poinçon et d'une matrice. Le choix du matériau, et en particulier de l'acier, est essentiel pour garantir la qualité de la pièce finale. Mais alors, quel type d'acier utiliser pour l'emboutissage ?

1.1. Emboutissage à froid

L'emboutissage à froid suppose, sauf rares exceptions, un outillage double effet et des presses mécaniques. Cette technique est la plus utilisée dans l'industrie automobile car elle comporte de nombreux avantages :

Meilleure précision dimensionnelle

Faible coût

Bonnes propriétés mécaniques des pièces embouties

Cependant elle comporte quelques inconvénients :

- Faible épaisseur des tôles (risque de rupture)
- Écrouissage du matériau (risque de durcissement structural et baisse de la ductilité)
- Contraintes résiduelles (risque de rupture par fatigue)
- Les matériaux concernés par ce type d'emboutissage sont :
 - Acier doux et inoxydable
 - Aluminium [2].

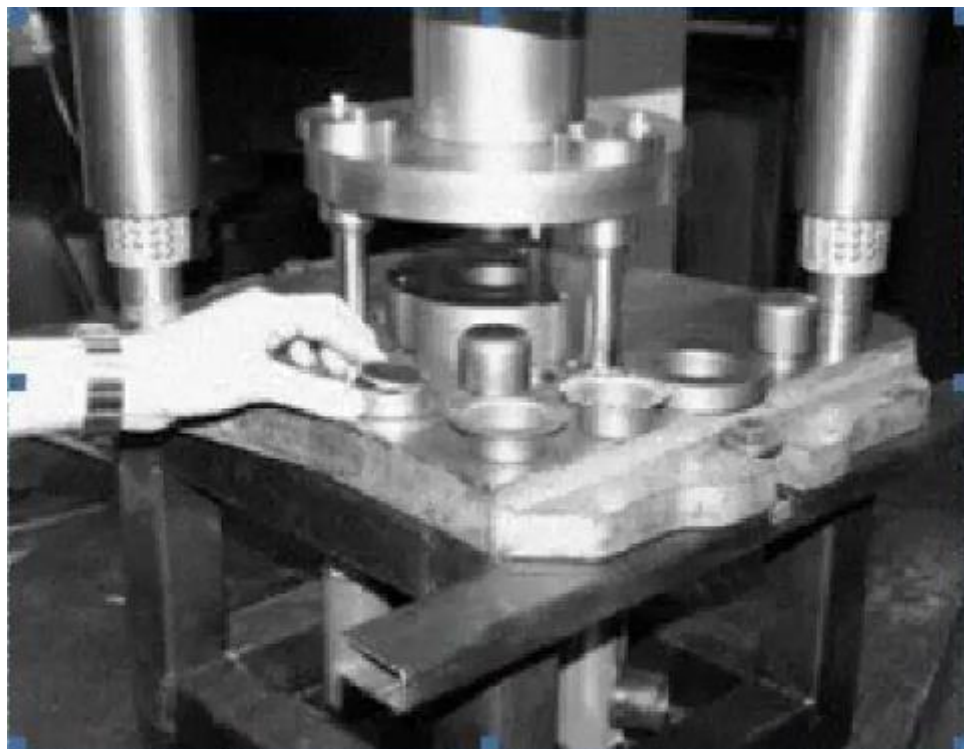


Figure 1. L'emboutissage dans l'industrie

1.2. Classification et Les caractéristiques d'un bon acier pour l'emboutissage

Un acier destiné à l'emboutissage doit posséder :

- Une bonne ductilité : capacité à se déformer sans se rompre.
- Une limite d'élasticité faible : pour faciliter la mise en forme.
- Une bonne homogénéité : éviter les fissures ou ruptures lors de la déformation.
- Une surface de qualité : indispensable pour l'emboutissage profond.

1.3. Les principaux aciers utilisés en emboutissage**➤ Les aciers doux (ou bas carbone)**

- Teneur en carbone $\leq 0,2 \%$
- Très malléables et faciles à emboutir
- Utilisés pour les pièces de carrosserie automobile ainsi que pour les boîtes et contenants métalliques

➤ Les aciers à emboutissage profond

- Conçus spécifiquement pour supporter de fortes déformations
- Exemples aciers IF (Interstitial Free) ou aciers à faible teneur en carbone stabilisé
- Applications réservoirs éviers inox pièces profondes et complexes

➤ Les aciers galvanisés ou revêtus

- Protégés contre la corrosion par un revêtement de zinc ou d'alliage
- Idéals pour l'automobile l'électroménager ou la construction

➤ Les aciers inoxydables

- Alliage de fer carbone et chrome $\geq 10,5 \%$
- Résistants à la corrosion et adaptés à l'emboutissage de pièces pour l'agroalimentaire la chimie ou l'électroménager

❖ Exemples d'applications selon le type d'acier

- Automobile carrosseries aciers doux et galvanisé
- Électroménager cuves éviers aciers inoxydables
- Emballage boîtes de conserve canettes aciers doux
- Industrie lourde réservoirs pièces techniques aciers à emboutissage profond [3].



Figure 2. Presse d'emboutissage

Un acier pour emboutissage nécessite une excellente ductilité (forte capacité d'allongement), une faible limite élastique pour faciliter la déformation, et une haute résilience pour éviter la rupture. Les caractéristiques technologiques incluent une bonne aptitude au pliage, une faible tendance à l'écrouissage, et une stabilité de l'état de surface, souvent optimisées par l'utilisation d'aciers IF (Interstitial Free) ou doux.

1.4. Exigences mécaniques

- **Haute ductilité :** Allongement à la rupture élevé pour supporter des déformations importantes sans rupture.
- **Faible limite élastique (R_e) :** Facilite la déformation plastique dès le début de l'opération.
- **Coefficient d'anisotropie normale (r) élevé :** Indique une bonne résistance à l'amincissement (emboutissage profond).
- **Coefficient d'écrouissage (n) élevé :** Permet une bonne répartition des déformations, évitant la localisation des contraintes.

- **Faible dureté** : Facilite la mise en forme.

1.5. Exigences technologiques et métallurgiques

- **Aptitude à l'emboutissage profond (Deep Drawing)** : Aciers IF (Interstitial Free) ou bas carbone, qui offrent la meilleure déformabilité.
- **Non-vieillessement** : Stabilité des propriétés mécaniques dans le temps, souvent assurée par une désoxydation (calmage) ou une stabilisation au titane/niobium.
- **État de surface** : Propre et adapté (laminé à froid, galvanisé) pour garantir la qualité de la pièce finale et limiter l'usure de l'outillage.
- **Homogénéité** : Structure cristalline et propriétés isotropes régulières pour éviter les défauts, comme les cornes ou les déchirures.
- **Contrôle du retour élastique** : La capacité du matériau à reprendre une partie de sa forme initiale doit être anticipée pour le calibrage de l'outillage.

Ces exigences assurent la fabrication de pièces complexes, précises et sans défauts, comme le décrit [4].

2. Présentation des aciers DC06 et DX53D+Z

2.1. Désignation et normalisation de l'acier DX53D+Z (CR2+Z)

Le matériau DX53D+Z est un acier doux galvanisé destiné principalement au formage à froid.

- Norme de référence : DIN EN 10346
- Numéro de matériau : 1.0355
- Désignation antérieure : CR2+Z

La lettre D indique un acier pour produits plats destinés au formage à froid, X53 correspond au niveau de ductilité élevé, et +Z désigne un revêtement de zinc appliqué par galvanisation à chaud.

2.2. Composition chimique

2.2.1. Composition selon DIN EN 10346 (en % massique, analyse de coulée)

Le Tableau 1. Représente la composition chimique selon DIN EN 10346 (en % massique, analyse de coulée)

Tableau 1. Composition chimique selon DIN EN 10346 (en % massique, analyse de coulée)

Élément	Teneur maximale (%)
C	0,12
Mn	0,60
P	0,10
S	0,045
Si	0,50
N	0,012
Al	0,015 – 0,100

- La faible teneur en carbone ($\leq 0,12$ %) favorise une microstructure ferritique quasi monophasée, assurant une excellente ductilité.
- La limitation du phosphore et du soufre réduit la fragilisation intergranulaire et améliore la ténacité.
- L'aluminium joue un rôle de désoxydant et contribue à la stabilisation de l'azote sous forme de nitrures.

2.2.2. Valeurs typiques observées en production (VDA)

Le Tableau 2 représente les valeurs typiques observées en production (VDA) d'un acier extra-

doux particulièrement adapté aux opérations d'emboutissage profond.

Tableau 2. Composition chimique d'un acier extra-doux

Élément	Teneur typique (%)
C	0,06
Mn	0,25
P	0,025
S	0,015
Si	0,02
Al	0,030
N	0,004

2.2.3. Propriétés mécaniques

Le Tableau 3 représente les Propriétés mécaniques selon la norme DIN EN 10346.

Tableau 3. Propriétés mécaniques selon DIN EN 10346

Propriété	Valeur
Limite d'élasticité ReH	140 – 280 MPa
Résistance à la traction Rm	270 – 380 MPa
Allongement à rupture A80	$\geq 26 \%$
Coefficient d'anisotropie r90	$\geq 1,3$

Le coefficient r (valeur de Lankford) supérieur à 1,3 indique une bonne aptitude à l'emboutissage profond, grâce à une résistance accrue à l'amincissement en direction normale à la tôle. Le Tableau 4 représente les valeurs moyennes en production (VDA) des Propriétés mécaniques.

Tableau 4. Valeurs moyennes en production (VDA)

Propriété	Valeur typique
ReH	140 – 240 MPa
Rm	270 – 370 MPa
A80	≥ 30 %
r90	≥ 1,5

L'allongement élevé confirme une forte capacité de déformation plastique avant rupture.

2.2.4. Revêtement de surface

Le suffixe +Z désigne un revêtement obtenu par galvanisation à chaud, procédé consistant à immerger l'acier dans un bain de zinc fondu. Le revêtement est constitué de zinc pur et est généralement disponible avec des masses de dépôt comprises entre Z100 et Z275 g/m², correspondant à la masse totale appliquée sur les deux faces. Pour un revêtement de type Z275, l'épaisseur est d'environ 20 µm par face.

La galvanisation confère à l'acier une protection efficace contre la corrosion grâce à un double mécanisme : une protection cathodique, assurée par le zinc qui se sacrifie préférentiellement en milieu corrosif, et une protection barrière qui limite le contact entre l'acier et l'environnement oxydant. Ce revêtement améliore ainsi la résistance à l'oxydation atmosphérique et augmente la durabilité du matériau, notamment en milieu humide.

2.2.5. Microstructure et comportement métallurgique

La microstructure du DX53D+Z est principalement ferritique. Elle se caractérise par des grains fins qui favorisent une bonne ductilité, une faible proportion de perlite et une homogénéité microstructurale satisfaisante.

La très faible teneur en carbone limite la formation de carbures au sein de la matrice ferritique. Cette particularité améliore la soudabilité du matériau et diminue les risques de fissuration, en particulier lors des opérations de mise en forme ou d'assemblage.

2.3. Applications industrielles

Grâce à ses propriétés mécaniques équilibrées et à sa protection anticorrosion assurée par la galvanisation, le DX53D+Z est largement utilisé dans différents secteurs industriels. Il est notamment employé pour la fabrication de pièces automobiles embouties, de panneaux de carrosserie secondaires, de profilés formés à froid, ainsi que de composants destinés aux systèmes de ventilation et de chauffage. Il trouve également des applications dans le domaine de l'électroménager.

En définitive, le DX53D+Z est un acier doux galvanisé offrant une excellente aptitude au formage à froid et une très bonne capacité d'emboutissage profond. Il présente en outre une bonne soudabilité et une protection anticorrosion performante grâce à son revêtement en zinc. Ces caractéristiques en font un matériau particulièrement adapté aux applications nécessitant un compromis optimal entre ductilité, résistance mécanique modérée et durabilité en environnement agressif.

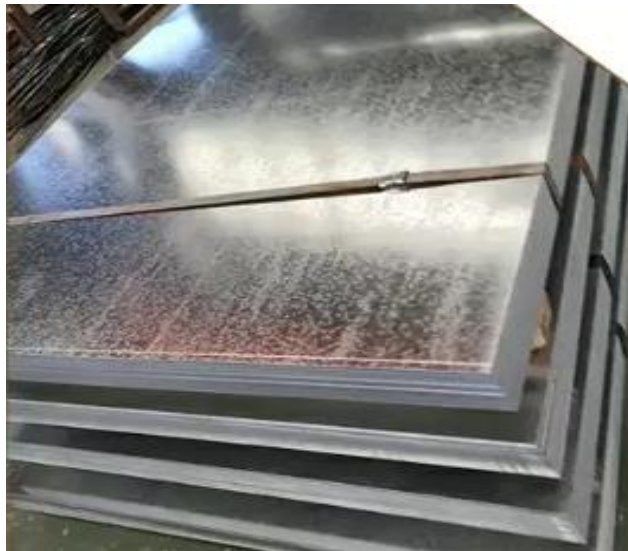


Figure 3. Aciers DX53D+Z

2.3.1. Désignation et normalisation

L'acier DC06 est un acier laminé à froid non revêtu, destiné aux opérations de formage à froid très sévères, en particulier à l'emboutissage extra-profond. Il est défini par la norme EN 10130, qui spécifie les exigences applicables aux aciers plats laminés à froid à faible teneur en carbone. Le DC06 est un acier doux extra-bas carbone de type IF (Interstitial Free), caractérisé par une excellente aptitude à la déformation, une très bonne ductilité et une remarquable formabilité. Grâce à ces propriétés, il est particulièrement utilisé pour la fabrication de pièces complexes nécessitant des déformations importantes tout en limitant le risque de fissuration. La désignation **DC** signifie *Drawing Cold* (acier pour emboutissage laminé à froid) et **06** indique le plus haut niveau d'aptitude au formage dans cette famille (au-dessus de DC01 à DC05).

2.3.2. Composition chimique

Tableau 5. Composition chimique maximale (analyse de coulée, en % massique selon EN 10130)

Élément	Teneur maximale (%)
C	0,02
Mn	0,25

P	0,020
S	0,020
N	0,003
Ti	selon stabilisation
Nb	selon stabilisation

Le DC06 est un acier IF (Interstitial Free). Cela signifie que les éléments interstitiels

- (carbone et azote) sont fixés par des éléments stabilisants comme le titane et/ou le niobium sous forme de carbures et nitrures (TiC, TiN, NbC).

Cette stabilisation permet :

- Une très grande ductilité
- Une excellente homogénéité de déformation
- Une absence de vieillissement par écrouissage

2.3.3. Propriétés mécaniques

Tableau 6. Propriétés mécaniques (épaisseur ≤ 3 mm)

Propriété	Valeur typique
Limite d'élasticité ReL	120 – 180 MPa
Résistance à la traction Rm	260 – 350 MPa
Allongement A80	≥ 41 %
Coefficient d'anisotropie moyen $\bar{r}$	$\geq 1,8$
Indice d'écrouissage n	Élevé ($\sim 0,22-0,25$)

2.3.4. Analyse mécanique

- **Faible limite d'élasticité** → facilité d'amorçage de la déformation plastique
- **Allongement très élevé ($\geq 41\%$)** → excellente capacité de déformation avant rupture
- **Coefficient $\bar{r}$ élevé** → forte résistance à l'amincissement
- **Indice d'écrouissage n élevé** → bonne répartition de la déformation

Ces caractéristiques rendent le DC06 particulièrement adapté aux opérations d'emboutissage profond et extra-profond avec de forts taux de déformation.

2.4. Microstructure et comportement métallurgique

Le DC06 possède une microstructure essentiellement ferritique, pratiquement monophasée, caractérisée par des grains fins et uniformément répartis. Cette structure est dépourvue de carbures libres, ce qui contribue à l'homogénéité du comportement mécanique.

La stabilisation par le titane et/ou le niobium permet de fixer les éléments interstitiels, notamment le carbone et l'azote, sous forme de précipités stables. Cette fixation empêche la présence d'atomes interstitiels libres dans la matrice ferritique, ce qui supprime le phénomène de vieillissement structural, évite l'apparition des bandes ou stries de Lüders et améliore sensiblement la qualité de surface après les opérations de formage.

Par ailleurs, le contrôle thermomécanique appliqué lors du laminage à froid, suivi d'un recuit continu ou en cloche, favorise le développement d'une texture cristallographique adaptée à l'emboutissage, notamment une texture de type γ -fibre, reconnue pour améliorer l'aptitude à la déformation profonde.

2.5. Aptitude au formage

Le DC06 est spécifiquement élaboré pour des opérations de formage sévères, en particulier l'emboutissage profond et extra-profond. Il convient à la fabrication de pièces présentant des

géométries complexes, soumises à des états de déformation multiaxiaux importants, ainsi qu'à des profondeurs d'emboutissage élevées réalisées en une ou plusieurs étapes.

Par comparaison avec les autres nuances de la même famille, le DC03 est destiné à un emboutissage standard, le DC04 à un emboutissage profond, le DC05 à un emboutissage très profond, tandis que le DC06 offre les meilleures performances pour l'emboutissage extra-profond.

2.6. Applications industrielles

En raison de son excellente formabilité, le DC06 est largement employé dans l'industrie automobile, notamment pour la fabrication de panneaux intérieurs et de renforts de formes complexes. Il est également utilisé pour la production de carters et de pièces fortement embouties, ainsi que dans le secteur de l'électroménager et pour des éléments de structure légère nécessitant d'importantes déformations plastiques.

Ce matériau est particulièrement adapté aux composants exigeant de grandes profondeurs d'emboutissage, une qualité de surface élevée après mise en forme et l'absence de défauts liés au vieillissement métallurgique [5].

3. Comportement mécanique en traction

Le comportement mécanique en traction correspond à la réponse d'un matériau lorsqu'il est étiré sous l'action d'une force axiale. L'essai de traction, qui consiste à appliquer progressivement une force de traction sur une éprouvette, permet d'étudier cette réponse jusqu'à la rupture du matériau.

Cet essai fournit des caractéristiques clés telles que :

La limite d'élasticité correspond à la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter sans subir de déformation permanente. La résistance à la traction désigne la contrainte maximale atteinte juste avant la rupture du matériau. Enfin, l'allongement à la rupture représente la déformation totale que le matériau peut subir avant de se rompre.

Ces résultats sont représentés par une courbe contrainte-déformation, qui illustre les différentes

phases du comportement mécanique.

Les protocoles expérimentaux pour réaliser cet essai sont encadrés par des normes internationales reconnues, notamment ISO 6892 et ASTM E8/E8M [6].

3.1. Courbe contrainte–déformation

La courbe contrainte–déformation est un graphique fondamental en mécanique des matériaux, qui représente la relation entre la contrainte appliquée à un matériau et la déformation qu'il subit lors d'un essai de traction. Cette courbe permet de comprendre le comportement mécanique du matériau sous charge et d'en extraire des propriétés essentielles telles que la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la ductilité.

3.1.1. Définition de la contrainte (σ)

La contrainte, notée (σ), est une grandeur qui exprime l'intensité de la force appliquée par unité de surface. Elle est définie par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Où :

- (F) est la force de traction exercée sur l'éprouvette, exprimée en newtons (N).
- (S_0) est la section transversale initiale de l'éprouvette avant l'application de la charge, exprimée en millimètres carrés (mm²).

Cette définition permet de normaliser la force appliquée en fonction de la taille de l'éprouvette, pour comparer le comportement de matériaux de dimensions différentes.

3.1.2. Définition de la déformation (ϵ)

La déformation, notée (ϵ), mesure la variation relative de la longueur de l'éprouvette sous l'effet de la contrainte. Elle est calculée par la relation :

$$\epsilon = \Delta L / L_0$$

où :

- ΔL est l'allongement de l'éprouvette, c'est-à-dire la différence entre la longueur finale et la longueur initiale (en millimètres).
- L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette avant l'application de la charge.

La déformation est une grandeur sans dimension qui exprime donc la variation proportionnelle de la longueur.

-Zones caractéristiques de la courbe contrainte-déformation

La courbe contrainte-déformation présente plusieurs zones distinctes, chacune correspondant à un type de comportement mécanique du matériau :

-Domaine élastique

Dans cette première zone, la déformation subie par le matériau est dite élastique. Cela signifie que, si la charge est supprimée, le matériau revient intégralement à sa forme et à ses dimensions initiales, sans aucune déformation permanente. La relation entre la contrainte et la déformation dans ce domaine est linéaire et peut être décrite par la loi de Hooke, qui énonce que la contrainte est proportionnelle à la déformation où (E) est le module d'élasticité (ou module de Young), une constante caractéristique du matériau exprimant sa rigidité.

La limite supérieure de ce domaine est appelée limite d'élasticité. Au-delà de cette limite, la déformation cesse d'être réversible.

Domaine plastique

Au-delà de la limite d'élasticité, le matériau entre dans le domaine plastique. Dans cette zone, la déformation devient irréversible : même si la charge est retirée, le matériau conserve une déformation permanente. Le comportement n'est plus linéaire, et le matériau commence à se

déformer de manière plastique, ce qui est caractéristique des matériaux ductiles.

Au fur et à mesure que la charge augmente, la déformation plastique s'accroît jusqu'à atteindre une contrainte maximale appelée résistance à la traction.

-Striction et rupture

Après avoir atteint la résistance maximale, la courbe présente généralement une baisse de contrainte associée à un phénomène appelé striction. La striction correspond à une réduction localisée de la section transversale de l'éprouvette due à la concentration des déformations plastiques dans une zone restreinte.

Cette réduction locale de la section se poursuit jusqu'à ce que le matériau se rompe, marquant la fin de l'essai de traction. La déformation totale mesurée à ce stade est appelée allongement à la rupture et donne une indication sur la ductilité du matériau.

Ces différentes étapes et phénomènes sont largement étudiés et expliqués dans la littérature spécialisée, notamment dans des ouvrages de référence comme Science et génie des matériaux, qui offrent des bases solides pour comprendre les comportements mécaniques des matériaux sous traction [7].

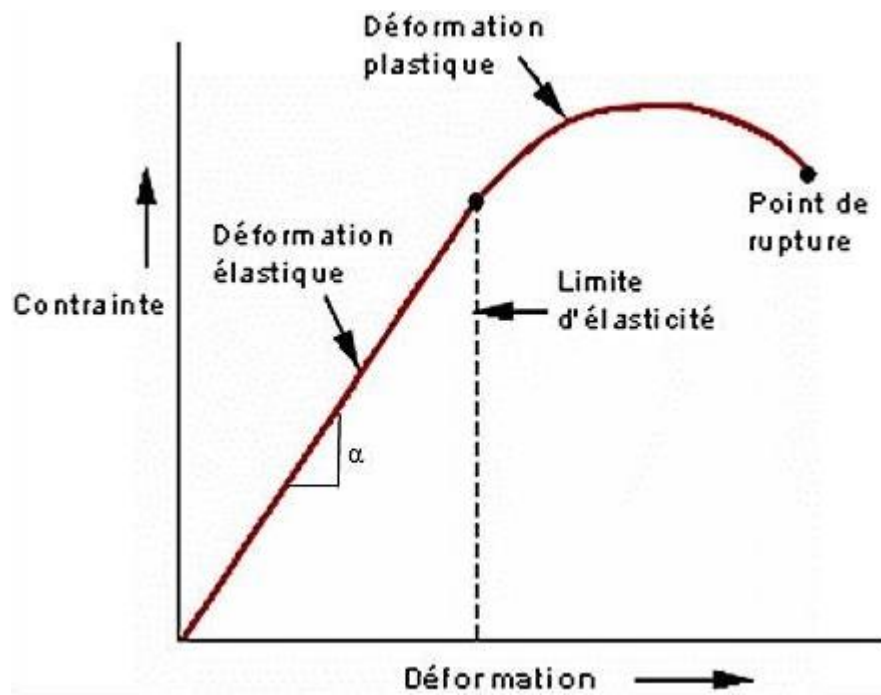


Figure 4. Diagramme contrainte et déformation

3.2. Limite d'élasticité

La limite d'élasticité correspond à la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter sans subir de déformation permanente. Au-delà de cette limite, la déformation devient irréversible.

Pour certains matériaux, cette limite est facilement repérable sur la courbe contrainte-déformation. Pour d'autres, on utilise une valeur conventionnelle appelée limite d'élasticité à 0,2 % de déformation plastique.

Cette caractéristique est essentielle en conception, car elle définit la contrainte maximale admissible afin d'éviter toute déformation permanente dans une structure [8].

3.3. Résistance à la traction

La résistance à la traction, également appelée contrainte maximale, correspond à la valeur la plus élevée de contrainte que le matériau atteint au cours de l'essai de traction. Cette grandeur est déterminante pour évaluer la capacité du matériau à supporter des charges de traction avant rupture. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$R_m = F_{\max} / S_0$$

Où :

- $F_{\max}$: représente la force maximale appliquée sur l'éprouvette lors de l'essai (en newtons, N)
- (S_0) désigne la section transversale initiale de l'éprouvette (en millimètres carrés, mm²).

La résistance à la traction reflète donc la contrainte critique au-delà de laquelle le matériau ne peut plus résister sans se rompre [9].

3.4. Allongement à la rupture

L'allongement à la rupture caractérise la capacité d'un matériau à subir une déformation plastique avant sa rupture effective. Il s'agit d'un indicateur majeur de la ductilité du matériau. L'allongement est exprimé en pourcentage et calculé selon la relation suivante :

$$A = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

Où :

- L_f : correspond à la longueur finale de l'éprouvette après rupture (en millimètres) ;
- (L_0) est la longueur initiale de l'éprouvette avant l'essai (en millimètres).

Un allongement à la rupture élevé est généralement associé à un comportement ductile, caractéristique d'un matériau capable de se déformer plastiquement de manière significative avant de céder. À l'inverse, un allongement faible est typique d'un matériau fragile, qui se rompt avec peu de déformation plastique [10].

3.5. Coefficient d'écrouissage (n) et anisotropie (r)

3.5.1. Mécanisme et effet de l'écrouissage

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne ; ces évolutions de propriétés et de microstructure, appelées écrouissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécaniques du matériau. En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques de nombreux alliages métalliques. Au cours d'un essai de traction, la consolidation d'un matériau est le résultat d'un mouvement et d'une multiplication des dislocations qui balaient les plans de glissement et s'entrecroisent entre elles en augmentant leur densité. Pour un matériau polycristallin, cette consolidation se traduit par une augmentation de la contrainte dans le domaine plastique lorsque la déformation augmente. Cette augmentation de la contrainte persiste jusqu'à ce que sa valeur atteigne un maximum, c'est à dire celle de la résistance à la traction (c_{max}). L'écrouissage c'est l'effet des

interactions entre dislocations qui augmente avec la multiplication des dislocations au cours de la déformation plastique. Cet effet est responsable du fort durcissement des alliages de structure cubique à faces centrées ; tels que les alliages des cuivres.

3.5.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques

L'écrouissage a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. Les effets de ce phénomène se traduisent par l'amélioration des caractéristiques telles que : - sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite ; - sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.

- l'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement.

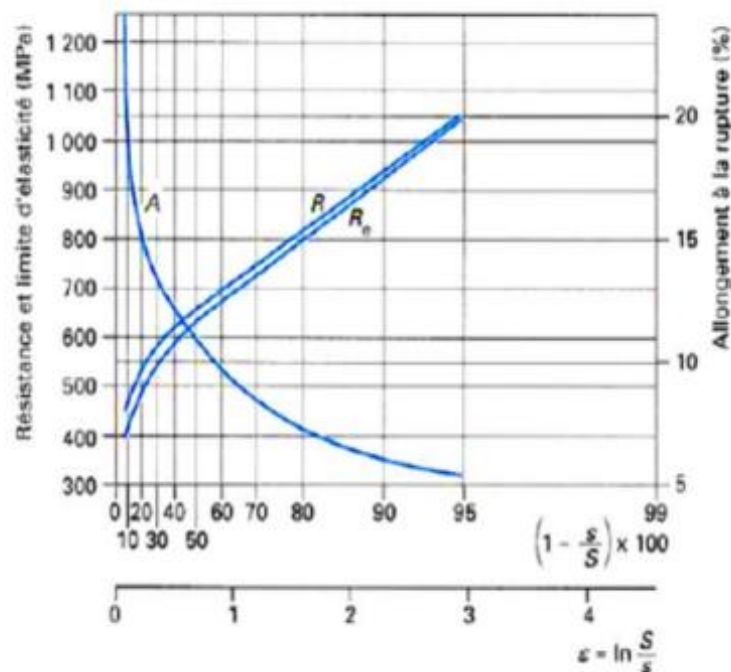


Figure 5. Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écrouissage d'un fil d'acier à 0,06 % C [14].

4.1. Courbe et coefficient d'écrouissage

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes (avant l'apparition de la striction), le phénomène d'écrouissage peut être évalué sur les courbes rationnelles de traction. Sur une courbe de traction classique, la charge à la rupture est une grandeur conventionnelle puisqu'elle ne tient compte que de la section initiale S_0 : $R_m = \sigma_{max} / S_0$

Cela empêche de tenir compte dans les calculs de plasticité car la section est variable dans le temps. A ce effet, on définit une contrainte vraie σ_v qui correspond à la charge appliquée rapportée à la

section instantanées $s(t)$ Une portion parabolique AB de cette Courbe peut être mise sous une certaine forme empirique qui relie la contrainte vraie L'expression la plus utilisée est celle de Lüduik σ_0 et k sont des constantes du matériau et n est le coefficient d'écrouissage

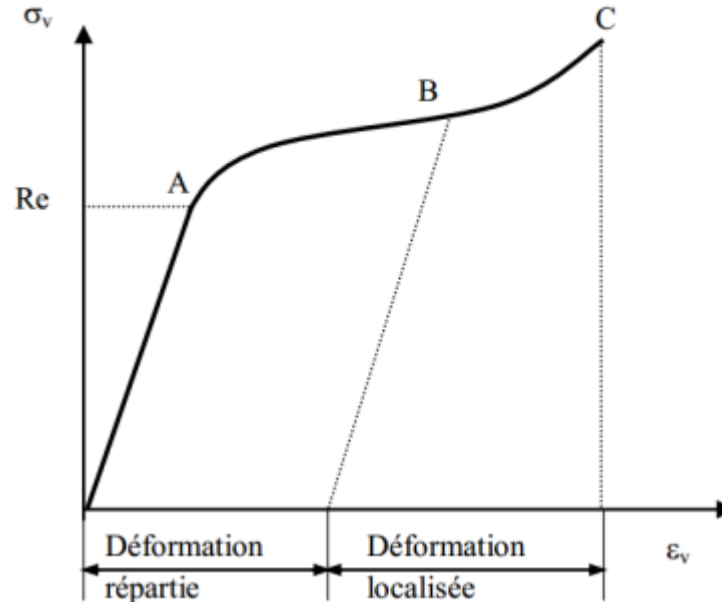


Figure 6. Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction

Le coefficient d'écrouissage caractérise la déformation rationnelle répartie (homogène) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général on a :

N.B:

Si $n = 0,1$: le matériau a une faible consolidation ;

Si $n = 0,4$: le matériau a une forte consolidation ;

Si $n = 0$: Le matériau ne subit aucune consolidation, C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique. [11]

4.2 Coefficient d'anisotropie (r)

Le coefficient (r) caractérise l'anisotropie plastique d'une tôle, c'est-à-dire la variation de déformation selon les différentes directions du matériau.

Il est défini par la formule :

$$r = \frac{\varepsilon_{largeur}}{\varepsilon_{épaisseur}}$$

Avec :

- $\varepsilon_{largeur}$ = déformation en largeur
- $\varepsilon_{épaisseur}$ = déformation en épaisseur

Signification :

Un coefficient (r) élevé indique que la tôle s'amincit peu lors de la déformation.

- Un coefficient (r) faible signifie que la tôle s'amincit facilement.

Importance en emboutissage :

Un coefficient (r) élevé traduit :

- Une meilleure résistance à l'amincissement,
- Une meilleure aptitude à l'emboutissage profond.

Exemple :

Pour un acier destiné à l'emboutissage profond, (r) est généralement compris entre 1,5 et 2. [12]

Bibliographies

- [1]. Cours_1-constructions_metalloques), Dr. SAADI Mohamed Département : Génie civil Université Batna 2
- [2]. Techniques d'emboutissage des métaux.
- [3]. <https://fr.scribd.com/presentation/566093277/Embouti-Ssage>
- [4]. <https://www.chevalier-bertrand.com/quel-acier-pour-emboutissage/> "Quel acier pour emboutissage ? - Chevalier Bertrand".
- [5]. Salzgitter Flachstahl DX53D+Z (CR2) Page 1 from 1 Edition: 09/22
- [6]. Science et génie des matériaux- W.D. Callister Jr., Science et génie des matériaux : Une introduction, Dunod.
- [7]. Callister, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.
- [8]. Dowling, N. E. Mechanical Behavior of Materials. Pearson.
- [9]. ISO 6892 - Metallic materials - Tensile testing.
- [10]. ASTM E8/E8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [11]. MEMOIRE Présenté Université Larbi tébessi -TébessaEn : (Génie Mécanique) Spécialité : (Génie Des Matériaux) Par : (Djabri Salah Eddine) Sujet Comportement du coefficient d'écrouissage des métaux à haute température -Antar berbltl, durcissement d'écrouissage et par affinement des grains, mécanique des matériaux, université Badji Mokhtar -ANNABA ,2016,page : 14-15-16
- [12]. Hosford, W. F., & Caddell, R. M. (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy (4th ed.). Cambridge University Press.

Chapitre2

Le traitement thermique de recuit

Sommaire

1. Principes généraux du recuit	28
1.1. Définition du recuit	28
1.2. Objectifs du recuit	28
1.3. Différents types de recuit	30
1.3.1. Recuit complet	31
1.3.2. Recuit de recristallisation	31
1.3.3. Recuit de détente	31
2. Phénomènes métallurgiques liés au recuit	32
2.1. Récupération (Recovery)	32
2.2. Recristallisation	33
2.3. Croissance des grains	35
3. Influence des paramètres de recuit	36
3.1. Température de recuit	36
3.2. Temps de maintien	36
3.3. Vitesse de refroidissement	37
3.4. Effet spécifique sur les aciers IF et galvanisés	38
3.4.1. Aciers IF (Interstitial Free)	38
3.4.2. Aciers galvanisés	39
Bibliographie	40

1. Principes généraux du recuit

1.1. Définition du recuit

Le recuit est un traitement thermique appliqué aux métaux et aux alliages afin de modifier leur microstructure et d'améliorer leurs propriétés mécaniques et technologiques. Il consiste à chauffer le matériau à une température bien déterminée, à le maintenir pendant un certain temps, puis à le refroidir lentement, le plus souvent dans le four.

Ce refroidissement progressif permet d'obtenir une structure interne plus stable et plus homogène. Le recuit est souvent utilisé après des opérations de fabrication comme le laminage, le forgeage, l'emboutissage ou encore le soudage. Ces opérations provoquent des déformations plastiques dans le matériau et créent des contraintes internes, tout en modifiant la microstructure.

Dans ce cas, le recuit permet de diminuer ces contraintes et d'améliorer l'organisation des grains du matériau.

D'après plusieurs études en métallurgie, le recuit joue un rôle important dans la transformation de la microstructure des aciers. Il favorise la formation de structures stables comme la ferrite et la perlite, ce qui améliore la ductilité et la résistance du matériau.

En général, le traitement de recuit se fait en trois étapes principales :

- Chauffage du matériau jusqu'à une température donnée
- Maintien à cette température pendant un certain temps
- Refroidissement lent pour stabiliser la structure

Ces étapes permettent de modifier les propriétés du matériau de manière progressive, sans provoquer de changements brusques dans sa structure interne. [1-2-3-4]

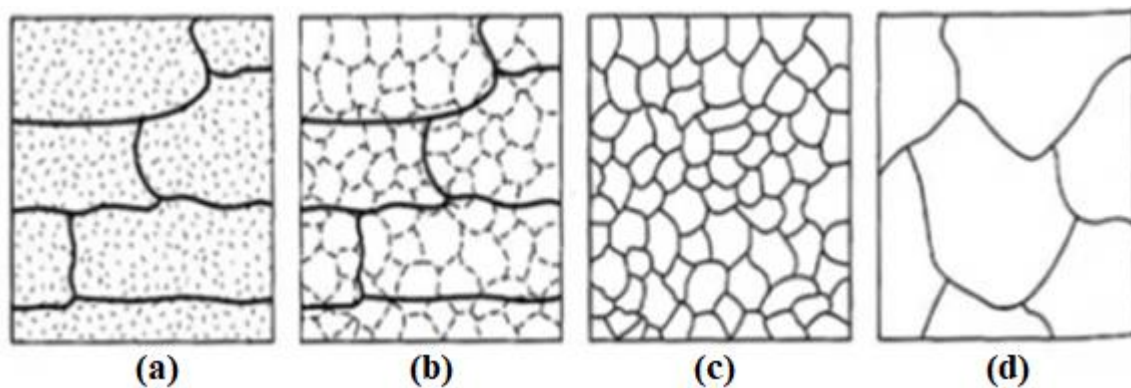


Figure 7. L'effet de la température de recuit sur la microstructure de métaux écrouis à froid : (a) écroui à froid, (b) après restauration, (c) après recristallisation, et (d) après grossissement du grain

1.2. Objectifs du recuit

Le traitement thermique de recuit est utilisé pour atteindre plusieurs objectifs importants dans le domaine des aciers.

Réduction des contraintes internes :

Lors de certaines opérations comme le laminage à froid ou le soudage, des contraintes internes apparaissent dans le matériau. Ces contraintes peuvent provoquer des déformations ou même des fissures.

Le recuit permet de réduire ces contraintes en facilitant la réorganisation de la structure cristalline.

Amélioration de la ductilité :

Après une déformation plastique importante, le matériau devient plus dur mais aussi plus fragile.

Le recuit permet de lui redonner sa capacité à se déformer sans se casser, ce qui facilite les opérations de mise en forme.

Diminution de la dureté :

Le recuit aide aussi à diminuer la dureté des aciers. Cela est important surtout pour les opérations d'usinage, car un matériau moins dur permet de réduire l'usure des outils et d'obtenir une meilleure qualité de surface.[5]

Homogénéisation de la microstructure :

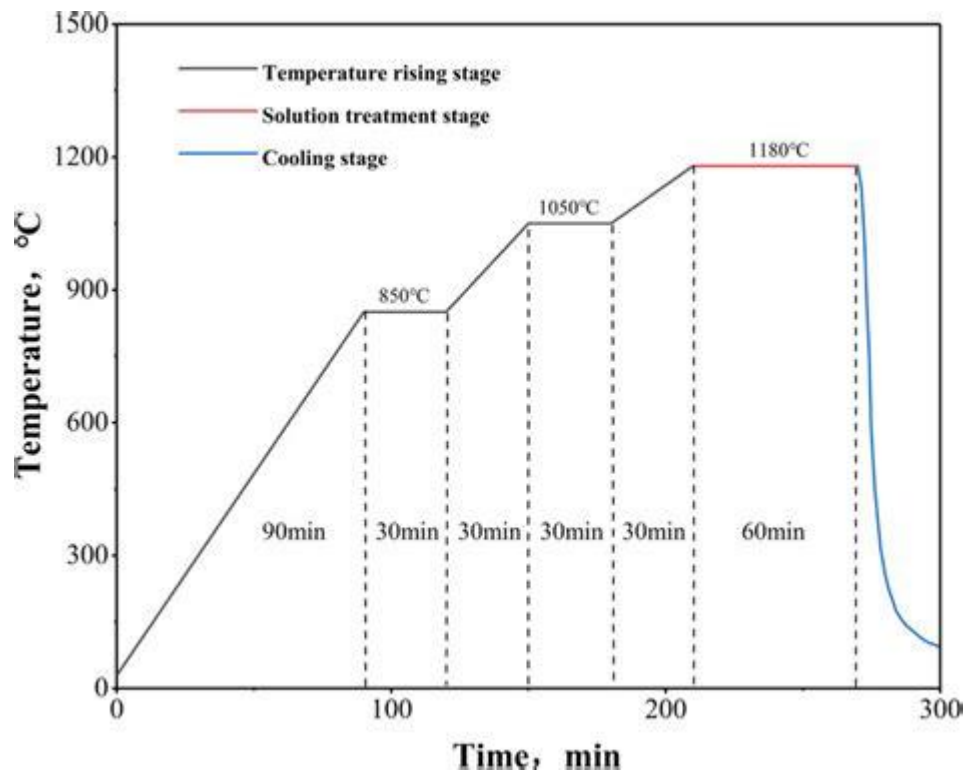
Le recuit permet d'obtenir une structure interne plus uniforme. Cela aide à avoir des propriétés mécaniques réparties de manière plus régulière dans toute la pièce.

Amélioration des propriétés mécaniques :

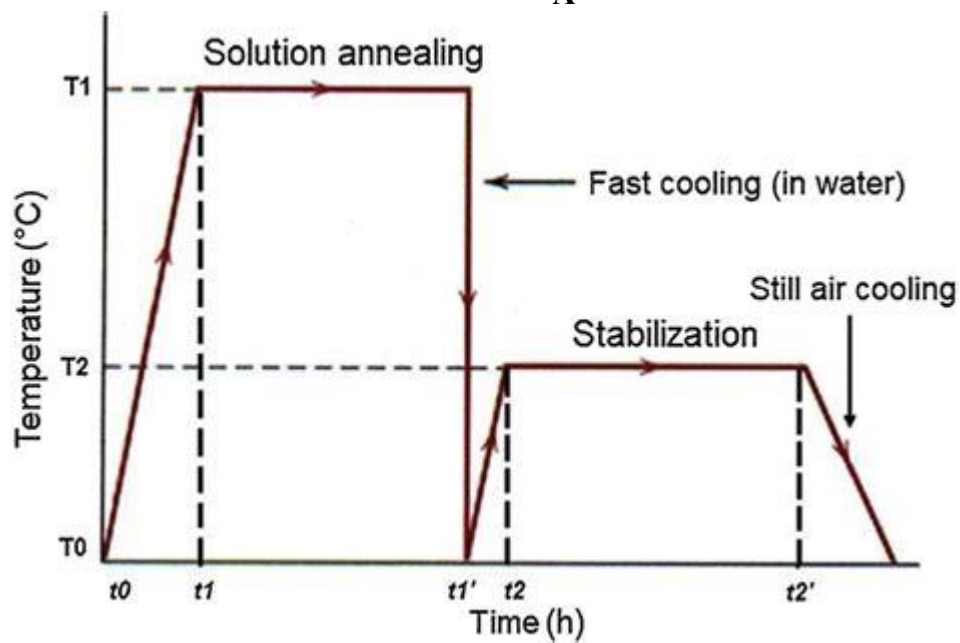
D'après certaines études, le recuit peut améliorer plusieurs propriétés des aciers, comme :

- La ductilité
- La ténacité
- La stabilité dimensionnelle
- La résistance à la fatigue

Ces améliorations dépendent surtout de la température utilisée et du temps de maintien pendant le traitement. [6]



-A-



-B-

Figure 8. [A, B] Cycle thermique du traitement de recuit (chauffage, maintien et refroidissement).

1.3. Différents types de recuit

Il existe plusieurs types de recuit en métallurgie. Le choix du type dépend surtout de l'objectif recherché et de la nature du matériau.

1.3.1. Recuit complet

Le recuit complet est l'un des traitements les plus utilisés pour les aciers. Il consiste à chauffer le matériau au-dessus de la température critique afin d'obtenir une structure austénitique, puis à le refroidir lentement dans le four.

Après ce traitement, on obtient une microstructure composée principalement de ferrite et de perlite. Cette structure permet d'avoir un bon équilibre entre résistance et ductilité.

Le recuit complet est utilisé pour :

- Diminuer la dureté
- Améliorer la ductilité
- Faciliter l'usinage
- Rendre la structure plus homogène

Ce type de recuit est souvent appliqué après le forgeage ou le laminage pour améliorer la qualité du matériau. [7]

1.3.2. Recuit de recristallisation

Le recuit de recristallisation est utilisé surtout après une déformation à froid importante, comme le laminage ou le tréfilage.

Pendant la déformation à froid, les grains deviennent déformés et le nombre de dislocations augmente. Le recuit permet alors la formation de nouveaux grains sans déformation.

Ces nouveaux grains remplacent progressivement les anciens, ce qui entraîne :

- Une diminution de la dureté
- Une augmentation de la ductilité
- Une meilleure aptitude à la mise en forme

La température de recristallisation a une grande influence sur la taille des grains et donc sur les propriétés finales du matériau. [8-9]

1.3.3. Recuit de détente

Le recuit de détente, appelé aussi recuit de relaxation, se fait à une température plus basse que les autres types de recuit. Son but principal est de réduire les contraintes internes sans modifier fortement la microstructure.

Il est souvent utilisé après :

- Le soudage
- L'usinage
- La coulée

- La fabrication de pièces complexes

Ce traitement permet d'améliorer la stabilité dimensionnelle et de diminuer les risques de déformation pendant l'utilisation des pièces.

Il est particulièrement important pour les pièces soumises à des efforts mécaniques élevés. [10]

2. Phénomènes métallurgiques liés au recuit

Le recuit est un traitement thermique utilisé pour modifier la microstructure des métaux afin d'améliorer leurs propriétés.

Dans le cas des aciers, il consiste à chauffer le matériau à une certaine température, à le maintenir pendant un temps donné, puis à le refroidir lentement.

Les principaux objectifs sont :

- Réduire les contraintes internes
- Améliorer la ductilité et la ténacité
- Obtenir une structure plus stable

Pendant le recuit, plusieurs transformations se produisent dans le matériau. Ces transformations se font progressivement et sont liées à des phénomènes comme la diffusion des atomes et le déplacement des joints de grains.

On distingue généralement trois étapes principales :

- La récupération
- La recristallisation
- La croissance des grains

2.1. Récupération (Recovery)

La récupération est la première étape du recuit. Elle se produit à des températures relativement basses, généralement entre 0,1 et 0,3 de la température de fusion du métal (en Kelvin).

Après une déformation à froid, comme le laminage ou le tréfilage, la structure du matériau contient un grand nombre de dislocations. Cela augmente l'énergie interne du matériau et provoque le phénomène d'écrouissage, qui se traduit par une augmentation de la dureté et de la résistance.

L'énergie stockée dans le matériau peut s'exprimer par la relation suivante :

$$E = \frac{1}{2} G b^2 \rho$$

où :

- **E** est l'énergie stockée par unité de volume
- **G** est le module de cisaillement
- **b** est le vecteur de Burgers
- **ρ** est la densité de dislocations

Pendant la récupération, grâce à la chaleur, les dislocations deviennent mobiles et commencent à se réorganiser. Plusieurs phénomènes apparaissent :

- Disparition de certaines dislocations opposées
- Formation de petites structures appelées sous-grains
- Diminution des contraintes internes

Le déplacement des atomes dans cette phase dépend de la diffusion, qui suit une loi de type Arrhenius :

$$D = D_0 \exp \left(\frac{-Q}{RT} \right)$$

Où :

- **D** est le coefficient de diffusion
- **D_0** est une constante
- **Q** est l'énergie d'activation
- **R** est la constante des gaz
- **T** est la température absolue

Pendant cette étape, les propriétés du matériau changent légèrement :

- La dureté diminue un peu
- La conductivité électrique s'améliore
- Les contraintes internes diminuent

Cependant, la forme et la taille des grains restent presque les mêmes. [3-4]

2.2. Recristallisation

La recristallisation est une étape importante du recuit. Elle correspond à la formation de nouveaux grains dans un matériau qui a déjà subi une déformation. Ces nouveaux grains remplacent progressivement les anciens grains déformés.

Ce phénomène se produit lorsque la température atteint une certaine valeur appelée température de recristallisation, généralement comprise entre :

$$T_r \approx 0.3 - 0.5 T_m$$

Où :

- T_r est la température de recristallisation
- T_m est la température de fusion (en Kelvin)

La recristallisation se déroule en deux étapes principales :

- La formation de nouveaux grains (germination)
- La croissance de ces grains dans la structure

Les nouveaux grains apparaissent surtout dans les zones les plus déformées, où la densité de dislocations est élevée, comme au niveau des joints de grains.

La vitesse de recristallisation dépend du nombre de germes formés et de leur vitesse de croissance, ce qui peut s'exprimer par :

$$N = \frac{V}{G}$$

Où :

- N est le nombre de germes formés
- G est leur vitesse de croissance

Pour décrire l'évolution de la recristallisation dans le temps, on utilise souvent une loi appelée **loi de Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov (JMAK)** :

$$X = 1 - e^{-kt^n}$$

Où :

- X est la fraction recristallisée
- k est une constante liée à la température
- t est le temps
- n dépend du mécanisme de transformation

La constante k dépend aussi de la température et suit une loi de type Arrhenius :

$$k = k_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Où :

- k_0 est une constante
- Q est l'énergie d'activation
- R est la constante des gaz
- T est la température absolue

La recristallisation entraîne des changements importants dans les propriétés du matériau :

- Disparition de l'écrouissage
- Diminution de la dureté

- Augmentation de la ductilité

Grâce à ce phénomène, le matériau retrouve de bonnes capacités de déformation, ce qui est très utile dans des procédés comme le laminage à froid. [6]

2.3. Croissance des grains

Après la recristallisation, si le matériau reste à une température élevée pendant un certain temps, les grains formés commencent à grandir. Ce phénomène est appelé croissance des grains.

Cette croissance se produit parce que le matériau cherche à réduire l'énergie liée aux joints de grains. L'énergie totale peut être exprimée par :

$$E = \gamma A$$

Où :

- **E** est l'énergie totale des joints de grains
- γ est l'énergie par unité de surface
- **A** est la surface totale des joints

Pour diminuer cette énergie, le matériau réduit la surface des joints, ce qui entraîne le déplacement des joints de grains. Certains grains grossissent alors au détriment d'autres.

La croissance des grains peut être décrite par la relation suivante :

$$D^n - D_0^n = Kt$$

Où :

- **D** est la taille moyenne des grains à l'instant **t**
- **D₀** est la taille initiale
- **K** est une constante liée à la température
- **n** est un exposant (souvent proche de 2)

La taille des grains influence directement les propriétés mécaniques du matériau. Cette influence est donnée par la relation de Hall-Petch :

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

Où :

- σ_y est la limite d'élasticité
- **d** est la taille des grains
- **k** est une constante du matériau
- σ_0 est la contrainte de base

Cette relation montre que :

- Des grains fins → augmentent la résistance
- Des grains grossiers → améliorent la ductilité mais diminuent la résistance

Donc, il est important de bien contrôler la température et le temps de recuit pour obtenir une structure adaptée à l'utilisation finale. [7]

3. Influence des paramètres de recuit

Le recuit est un traitement thermique essentiel qui modifie la microstructure des aciers afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques et leur capacité à être mis en forme. Les principaux paramètres qui conditionnent ce traitement sont la température, la durée de maintien et la vitesse de refroidissement. [12]

3.1 Température de recuit

La température constitue le facteur clé du recuit, car elle pilote directement les transformations microstructurales.

- À basse température (phase de récupération) :
La réorganisation des dislocations s'effectue sans altération significative de la structure cristalline. Les contraintes internes diminuent, tandis que les propriétés mécaniques restent globalement stables.
- À température intermédiaire (phase de recristallisation) :
De nouveaux grains non déformés apparaissent et remplacent les grains écrouis, ce qui provoque :
Une réduction de la dureté, une augmentation notable de la ductilité, une amélioration de la formabilité.
- À haute température (phase de croissance des grains) :
Les grains recristallisés grossissent pour réduire l'énergie des joints de grains, mais une croissance excessive conduit à :
une diminution de la résistance mécanique, une baisse de la ténacité [13].

3.2 Temps de maintien

Le temps de maintien correspond à la durée pendant laquelle le matériau est maintenu à la température de recuit, ce qui influence fortement l'évolution microstructurale et, par conséquent, les propriétés mécaniques obtenues.

- Temps insuffisant :

Lorsque la durée de maintien est trop courte, la recristallisation ne se déroule pas

totale. Cela conduit à une microstructure partiellement recristallisée, caractérisée par une coexistence de grains déformés et de grains neufs. Cette hétérogénéité engendre des propriétés mécaniques inégales et souvent dégradées, avec des zones encore fragilisées par des contraintes internes résiduelles. [15]

- Temps optimal :

Une durée de maintien adéquate permet d'achever complètement le processus de recristallisation. Les nouveaux grains formés sont fins et uniformes, ce qui assure une microstructure homogène. Cette condition est idéale pour obtenir un compromis favorable entre résistance mécanique et ductilité, ainsi qu'une excellente aptitude à la mise en forme du matériau. [16]

- Temps excessif :

Un maintien prolongé au-delà de la durée optimale favorise la croissance excessive des grains recristallisés. Cette croissance entraîne une diminution de la densité des joints de grains, ce qui affaiblit la structure. En conséquence, la limite d'élasticité baisse, réduisant la résistance initiale du matériau à la déformation, tandis que la résistance à la traction diminue, compromettant la capacité du matériau à supporter des charges élevées sans rupture [17].

3.3 Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement détermine l'obtention de la phase souhaitée de l'acier ainsi que sa proportion : rapide pour de la martensite, moyennement rapide pour de la bainite et lent pour de la ferrite perlite. Chaque acier a des vitesses de refroidissement qui lui sont propres pour l'obtention de ses phases, car elles-mêmes dépendent fortement de la composition de l'acier qui sera décrite à la section 1.3.2.5. Les diagrammes TRC sont pratiques pour visualiser rapidement l'obtention de ces phases. Ils se présentent sous forme de courbes linéaires, mais sur un axe logarithmique résultant en paraboles espacées uniformément. Chaque courbe représente un refroidissement à une vitesse constante et passe par des zones représentant les phases et leurs proportions. Celles-ci sont généralement déterminées par des essais dilatométriques, car ils mettent en évidence les températures de début de transformation et leur proportion à une vitesse de refroidissement donnée après une observation au microscope. La figure 9 donne un exemple de diagramme TRC, mais chaque composition d'acier à un diagramme TRC qui lui est propre.

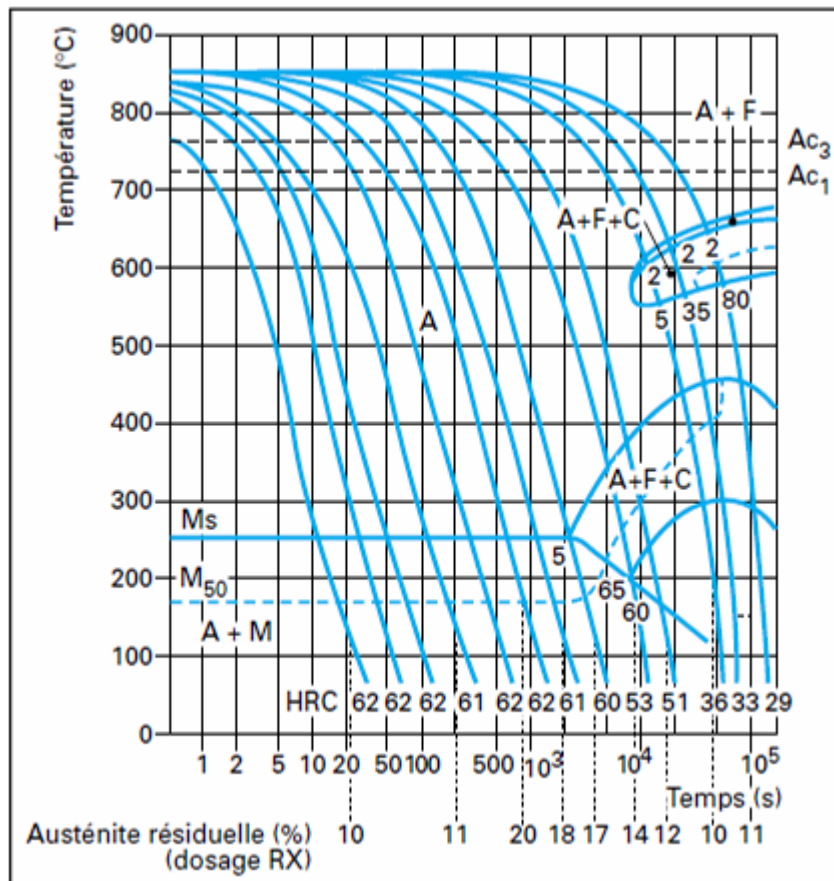


Figure 9. Diagramme TRC pour un acier du type 60 NiCrMo 11-03 (0,57 % C - 2,36 % Ni - 0,75 % Cr - 0,41 % Mo) austénitisé à 850 °C pendant 30 min (Murry, 1998)

Sur le graphique, on repère les courbes de refroidissement continues ainsi que les zones de phase de l'acier et leur température de début de transformation. Dans le cas ci-dessus, il faudrait atteindre 260°C avant 2000 secondes à vitesse de refroidissement constante pour obtenir de la martensite sans résidus de cémentite ou de ferrite, c'est la vitesse critique de trempe. La température M est indiquée comme constante alors que dans la réalité la vitesse de refroidissement peut avoir un impact sur celle-ci au même titre que le nez de bainite et de perlite ferrite [18].

3.4 Effet spécifique sur les aciers IF et galvanisés

3.4.1 Aciers IF (Interstitial Free)

Les aciers IF se caractérisent par une teneur extrêmement faible en éléments interstitiels, notamment le carbone et l'azote, qui sont généralement responsables de la formation de liaisons solides et d'entraves à la mobilité des dislocations. Cette particularité confère aux aciers IF une

très bonne aptitude à la déformation plastique, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications nécessitant une grande formabilité. [19]

Lors du recuit, plusieurs effets positifs sont observés sur ces aciers :

- Le processus permet une recristallisation complète de la microstructure, éliminant les déformations internes accumulées lors des opérations de mise en forme précédentes.
- La formation de grains fins et homogènes est favorisée, ce qui contribue à stabiliser les propriétés mécaniques et à améliorer la régularité du comportement du matériau.
- En conséquence, la formabilité est sensiblement améliorée, facilitant les opérations de formage ultérieures tout en maintenant une bonne résistance mécanique.

Ce traitement thermique est donc essentiel pour optimiser les performances des aciers IF, notamment dans les secteurs où la précision dimensionnelle et la qualité de la surface sont des critères prioritaires [20].

3.4.2 Aciers galvanisés

Dans le cas des aciers galvanisés, le recuit agit à la fois sur la microstructure du substrat en acier et sur l'adhérence du revêtement de zinc appliqué en surface.

Une température trop élevée durant le recuit peut entraîner des effets néfastes, tels que :

- La détérioration ou la dégradation de la couche de zinc protectrice,
- L'apparition de réactions chimiques indésirables à l'interface entre l'acier et le revêtement, compromettant l'adhérence et la protection contre la corrosion.

En revanche, un contrôle rigoureux des paramètres du traitement thermique permet :

- De conserver l'intégrité et la qualité du revêtement de zinc,
- D'optimiser les propriétés mécaniques du substrat tout en maintenant une surface aux caractéristiques adéquates pour les applications finales.

Ainsi, le recuit bien maîtrisé est essentiel pour garantir la performance globale des aciers galvanisés, en alliant protection anticorrosion et performances mécaniques [21].

Bibliographie

- [1] Heat-Treatment of Steel: A Comprehensive Treatise on the Hardening, Tempering, Annealing and Casehardening of Steel, ouvrage disponible en ligne.
- [2] Heat Treatment of Steels, document scientifique, ResearchGate.
- [3] Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels, document scientifique, ResearchGate.
- [4] Traitement thermique d'un métal, Wikipédia, disponible en ligne.
- [5] Effects of Annealing Heat Treatment on the Mechanical and Microstructural Characteristics of Medium Carbon Steel, Academic Journal of Science, Engineering and Technology.
- [6] Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels, ResearchGate.
- [7] The Working of Steel, Annealing, Heat Treating and Hardening of Carbon and Alloy Steel, ouvrage technique.
- [8] Effect of Process Annealing Temperature on Some Tensile Properties and Microstructure of Cold Rolled 1010 Steel, article scientifique.
- [9] Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels, ResearchGate.
- [10] Heat Treatment of Steels, ResearchGate.
- [11] Traitement thermique d'un métal, Wikipédia.
- Figures :**
- Fig. 7 : Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels.
 - Fig. 8 : Heat-Treatment of Steel: A Comprehensive Treatise on the Hardening, Tempering, Annealing and Casehardening of Steel.
- [12] Di Schino, A., & Testani, C. (2021). Heat Treatment of Steels, revue Metals.
- [13] Moreno, M. et al. (2019). Real-Time Investigation of Recovery and Recrystallization, revue Metals.
- [14] Recrystallization annealing of steel, Tec-Science.
- [15] Humphreys, F.J., & Hatherly, M. (2004). Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier.
- [16] Annealing of Steel, Engineering Notes.
- [17] Valdes-Tabernero, M.A. et al. (2019). Effect of soaking time on microstructure.
- [18] Brionne, G. (2018). Influence de la vitesse de refroidissement sur l'évolution de la macroségrégation dans les lingots de grande taille. Mémoire de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal.
- [19] Di Schino, A. (2021). Heat Treatment of Steels.
- [20] Recrystallisation, Bodycote.
- [21] Valdes-Tabernero, M.A. et al. (2020). Microstructure et propriétés des aciers.

Chapitre3

Matériaux et méthodes expérimentales

Sommaire

Introduction	
1. Matériaux étudiés	42
2. Procédure de recuit	43
2.1 type de recuit.....	43
2.2 paramètre expérimental	43
2.2.1 température	43
2.2.2 temps de maintien	44
2.2.3 nombre d'échantillons	44
2.3 refroidissement	45
2.4 Four utilisé et atmosphère.....	45
2.4.1 présentation général	45
2.5 détail des essais expérimental	47
3. Essais mécaniques.....	48
3.1 Machine utilisée	48

Introduction

Ce chapitre présente les matériaux utilisés ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre dans le cadre de cette étude. L'objectif principal est de décrire de manière détaillée les différentes étapes du protocole expérimental, depuis la préparation des échantillons jusqu'à la réalisation des traitements thermiques.

Dans un premier temps, les caractéristiques des matériaux étudiés, à savoir les aciers DC06 et DX53D+Z, sont présentées. Ensuite, la procédure de recuit appliquée est décrite, en précisant les conditions opératoires telles que la température, le temps de maintien et les modalités de refroidissement. Enfin, les essais mécaniques prévus, notamment l'essai de traction, sont introduits avec une description des équipements utilisés et des paramètres qui seront mesurés. Les résultats issus de ces essais feront l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant.

1. Matériaux étudiés :

Dans cette étude, nous avons utilisé deux types d'aciers en tôles : DC06 et DX53D+Z. Ces matériaux sont souvent employés dans l'industrie, surtout pour les applications de formage, grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques et leur aptitude à la déformation.

Le premier matériau, **DC06**, est un acier doux à très faible teneur en carbone. Il est principalement utilisé pour l'emboutissage profond, car il possède une bonne ductilité. Sa composition chimique reste faible en éléments d'alliage, ce qui améliore sa formabilité. Les teneurs maximales des principaux éléments sont les suivantes :

Élément	Teneur maximale (%)
C (Carbone)	$\leq 0,02$
Mn (Manganèse)	$\leq 0,20 - 0,25$
P (Phosphore)	$\leq 0,020$
S (Soufre)	$\leq 0,020$
Ti (Titane)	$\leq 0,30$
C (Carbone)	$\leq 0,02$

Le deuxième matériau, **DX53D+Z**, est un acier destiné au formage, recouvert d'une couche de zinc obtenue par galvanisation à chaud. Ce revêtement permet d'améliorer la résistance à la corrosion. Sa composition chimique est légèrement plus riche que celle du DC06, comme indiqué ci-dessous :

Élément	Teneur maximale (%)
C (Carbone)	$\leq 0,12$
Mn (Manganèse)	$\leq 0,60$
Si (Silicium)	$\leq 0,50$
P (Phosphore)	$\leq 0,10$
S (Soufre)	$\leq 0,045$
Ti (Titane)	$\leq 0,30$

Les tôles utilisées proviennent d'un site industriel de fabrication, sans précision particulière sur le fournisseur.

Concernant l'état initial, le matériau DC06 a subi un laminage à froid et ne possède pas de revêtement de surface, ce qui signifie qu'il est utilisé à l'état brut.

En revanche, le DX53D+Z a d'abord été obtenu par laminage à chaud, puis laminage à froid, avant de subir une galvanisation à chaud. Cette dernière étape consiste à déposer une couche de zinc à la surface, ce qui protège le matériau contre la corrosion et peut influencer son comportement lors des traitements thermiques.

Ces matériaux sont fournis à l'état laminé, sans traitement thermique préalable.



Figure 10. Comparaison des éprouvettes métalliques : DC06 (à droite) et DX53D+Z (à gauche)

2. Procédure de recuit

Cette section décrit le traitement thermique appliqué aux deux aciers étudiés (DC06 et DX53D+Z), dans le but d'analyser l'impact du recuit sur leurs propriétés mécaniques et leur microstructure.

2.1 Type de recuit

Le traitement retenu est un recuit de recristallisation, destiné aux matériaux ayant subi un laminage à froid. Ce procédé vise à réduire l'écrouissage et à recréer une structure à grains plus homogènes, améliorant ainsi la ductilité tout en diminuant la résistance mécanique.

2.2 Paramètres expérimentaux

2.2.1 Température

Le recuit a été réalisé à trois températures distinctes :

- 250 °C

- 450 °C
- 690 °C

Ces valeurs ont été choisies pour couvrir différentes phases d'évolution du matériau :

- À 250 °C, le processus correspond principalement à une restauration sans recristallisation notable.
- À 450 °C, des modifications partielles apparaissent, la recristallisation restante incomplète.
- À 690 °C, la température se situe dans la plage typique de recristallisation des aciers doux, généralement entre 550 et 600 °C.

Au-delà de 700 °C, un risque de grossissement excessif des grains peut survenir, ce qui détériore certaines propriétés mécaniques.

2.2.2 Temps de maintien

Pour chaque température, trois durées de maintien ont été appliquées :

- 15 minutes
- 30 minutes
- 45 minutes

Le temps de maintien correspond à la période pendant laquelle l'échantillon est conservé à la température choisie. Ce paramètre dépend de la température et de l'épaisseur des échantillons.

Un temps court peut entraîner une transformation incomplète, tandis qu'un temps plus long favorise une évolution plus complète de la structure.

2.2.3. Nombre d'échantillons

Trois échantillons ont été préparés pour chaque condition expérimentale afin d'assurer la fiabilité des résultats.

Le nombre total d'essais est donc de :

$3 \text{ températures} \times 3 \text{ temps} \times 2 \text{ échantillons} = 18 \text{ échantillons au total.}$

2.3. Refroidissement

Après le traitement de recuit, les échantillons ont subi un refroidissement lent et contrôlé à l'intérieur du four. Ce mode de refroidissement permet d'éviter l'apparition de nouvelles contraintes thermiques et favorise une réorganisation structurale optimale du matériau.

2.4. Four utilisé et atmosphère

Le recuit a été effectué dans un four électrique à moufle, garantissant un contrôle précis de la température tout au long du traitement.



Figure 11. Four électrique de laboratoire Nabertherm pour traitements thermiques des matériaux

2.4.1. Présentation générale

Le four Nabertherm est un équipement de haute précision fabriqué en Allemagne par la société Nabertherm, qui possède plus de 75 ans d'expérience dans la conception de fours industriels et de laboratoire. Ce four est destiné à diverses applications telles que :

- Les traitements thermiques des métaux,
- Le recuit et le revenu,
- Le séchage thermique,
- Les essais sur matériaux,
- Les analyses en laboratoire,
- Les traitements de céramiques et polymères,
- Ainsi que les usages universitaires et industriels.

2.4.2. Description détaillée du four

2.4.2.1. Structure externe

Le four se compose :

- D'une carcasse métallique inoxydable, résistante à la corrosion,
- D'une isolation thermique performante,
- D'une porte frontale équipée d'une poignée de sécurité,

- De pieds anti vibrations,
- D'un panneau de commande numérique.

Sa conception compacte le rend adapté aussi bien aux laboratoires universitaires qu'aux environnements industriels.

2.4.2.2. Chambre de chauffe :

La chambre interne est fabriquée à partir de matériaux réfractaires isolants, de fibres céramiques haute température ou de briques isolantes spécifiques. Cette conception garantit :

- Une montée rapide en température,
- Une homogénéité thermique optimale,
- Une faible consommation d'énergie.

2.4.2.3. Système de chauffage :

Le chauffage est assuré par des résistances électriques intégrées dans les parois, assurant une diffusion uniforme de la chaleur dans toute la chambre.

2.4.2.4. Température de fonctionnement :

Selon le modèle de la gamme Nabertherm, la température maximale varie généralement entre 300 °C et 1200 °C pour les fours standards de laboratoire, tandis que certains modèles spécifiques peuvent atteindre plus de 1400 °C.

2.4.2.5. Régulateur numérique :

Le panneau de commande, situé sur la droite, comprend :

- Un écran digital,
- Des touches de programmation,
- Un contrôleur de température.

Ce régulateur permet :

- Un réglage précis de la température,
- La programmation des cycles thermiques,
- Le contrôle du temps de maintien,
- Une montée progressive en température,
- et un arrêt automatique.

Les contrôleurs Nabertherm sont reconnus pour leur précision et leur facilité d'utilisation.

2.4.3. Caractéristiques techniques générales :

- Alimentation : 220 V ou 380 V selon le modèle.

- Chauffage : résistances électriques haute température.
- Isolation : fibre céramique réfractaire.
- Contrôle : régulateur électronique programmable.
- Sécurité : protection contre la surchauffe, coupure automatique, isolation thermique externe.
- Uniformité thermique : excellente stabilité de la température dans la chambre.

2.4.4. Applications principales :

- En métallurgie : recuit, normalisation, revenu, traitement thermique des aciers, essais thermiques.
- En science des matériaux : étude des transformations de phases, traitements des alliages, analyses thermiques.
- En laboratoire : séchage, calcination, essais expérimentaux.
- En céramique : cuisson, frittage, traitements thermiques.

Conditions opératoires :

- Atmosphère : **air libre**
- Refroidissement : **lent dans le four**
- Températures : **250 °C, 450 °C, 690 °C**
- Temps de maintien : **15, 30 et 45 minutes**

2.5. Détail des essais expérimentaux

Chaque condition est appliquée aux deux matériaux (DC06 et DX53D+Z).

Les essais de recuit ont été effectués sur les matériaux DC06 et DX53D+Z selon trois plages de températures : 250 °C, 450 °C et 690 °C. Pour chaque température, trois durées de maintien ont été testées : 15, 30 et 45 minutes.

La première série porte sur le recuit à 250 °C, comprenant trois essais :

- un premier à 250 °C pendant 15 minutes avec refroidissement dans le four,
- un deuxième à 250 °C pendant 30 minutes,
- et un troisième à 250 °C pendant 45 minutes.

La deuxième série concerne le recuit à 450 °C, avec trois essais réalisés aux mêmes durées de maintien (15, 30 et 45 minutes).

Enfin, la troisième série correspond au recuit à 690 °C, où les essais ont également été menés avec des temps de maintien de 15, 30 et 45 minutes.

3. Essais mécaniques

3.1 Machine utilisée

Les essais de traction seront réalisés à l'aide d'une machine d'essai universelle de type WANCE.



Figure 12. Machine d'essai de traction universelle

La machine d'essai de traction, aussi appelée Machine Universelle d'Essai (UTM), est un appareil destiné à mesurer les propriétés mécaniques des matériaux en appliquant une force de traction progressive sur une éprouvette jusqu'à sa rupture. Pendant l'essai, l'éprouvette est fixée entre deux mors, supérieur et inférieur, tandis que la machine exerce une charge croissante de manière continue.

Au cours de l'essai, la machine enregistre la contrainte appliquée ainsi que le déplacement de la traverse mobile. Le graphique généré lors de nos expérimentations représente la contrainte (« Stress ») en fonction du déplacement (« Crosshead »). Sur ce graphique, l'axe vertical (Y) correspond à la contrainte exprimée en N/mm^2 , et l'axe horizontal (X) indique le déplacement de la traverse mobile en millimètres (mm).

La machine est composée d'un bâti rigide, de mors de fixation pour maintenir l'éprouvette, d'une cellule de charge mesurant la force exercée, d'un système d'entraînement comprenant un moteur et une vis mécanique, ainsi que d'un système de commande assurant le suivi de l'essai et l'enregistrement des données.

L'essai de traction permet de déterminer des caractéristiques mécaniques essentielles telles que la

limite d'élasticité (R_e), la résistance maximale à la traction (R_m), l'allongement à la rupture ($A\%$), ainsi que le comportement mécanique du matériau à travers la courbe contrainte-déplacement obtenue.

Les éprouvettes utilisées lors de ces essais ont une longueur totale de 140 mm et une largeur de 20 mm. Cette méthode est largement employée pour le contrôle qualité, la comparaison entre matériaux, et l'étude de leur comportement mécanique après différents traitements thermique

Chapitre4

Résultats et Discussions

Sommaire

1. Résultats des essais de traction	51
1.1. Courbes contrainte– déplacement	51
1.2. Évolution des propriétés mécaniques après recuit	51
2. Effet du recuit sur chaque acier	53
2.1. Influence du recuit sur l'acier DC06	53
2.2. Influence du recuit sur l'acier DX53D+Z	65
3. Comparaison entre l'acier DC06 et DX53D+Z	76
4. Interprétation métallurgique	77

1. Résultats des essais de traction

1.1. Courbes contrainte– déplacement

Les essais de traction réalisés sur les aciers DC06 et DX53D+Z ont permis d’obtenir les courbes contrainte– déplacement pour différentes conditions de traitement thermique.

Les courbes obtenues montrent clairement l’influence de la température et du temps de maintien sur le comportement mécanique des deux matériaux.

Les paramètres analysés sont principalement : la limite d’élasticité R_e , la résistance maximale à la traction R_m , le déplacement, la ductilité, ainsi que l’évolution de la zone plastique.

Les résultats montrent que les traitements thermiques modifient progressivement le comportement mécanique des matériaux.

1.2 Évolution des propriétés mécaniques après recuit

A- État initial sans traitement thermique

On observe dans la Figure 13 les points suivants :

- Début de la détermination du module d’Young : déplacement = 1.033mm, contrainte = 119.418 N/mm².
- Limite d’élasticité supérieure : déplacement = 14.05 mm, contrainte = 282.565 N/mm².
- Limite d’élasticité inférieure : déplacement = 14.089 mm, contrainte = 282.548 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.322 mm, contrainte = 297.652 N/mm².
- Fin de la détermination du module d’Young : déplacement = 26.322 mm, contrainte = 297.652 N/mm².
- $F_{\max} = 3.57$ kN

L’acier DC06 dans l’état initial présente une limite d’élasticité R_e : 282.5MPa, une résistance à la traction R_m : 297.6 MPa et un déplacement maximal d’environ 26.3mm.

La courbe obtenue montre un comportement plastique stable avec une bonne résistance mécanique et une ductilité importante.

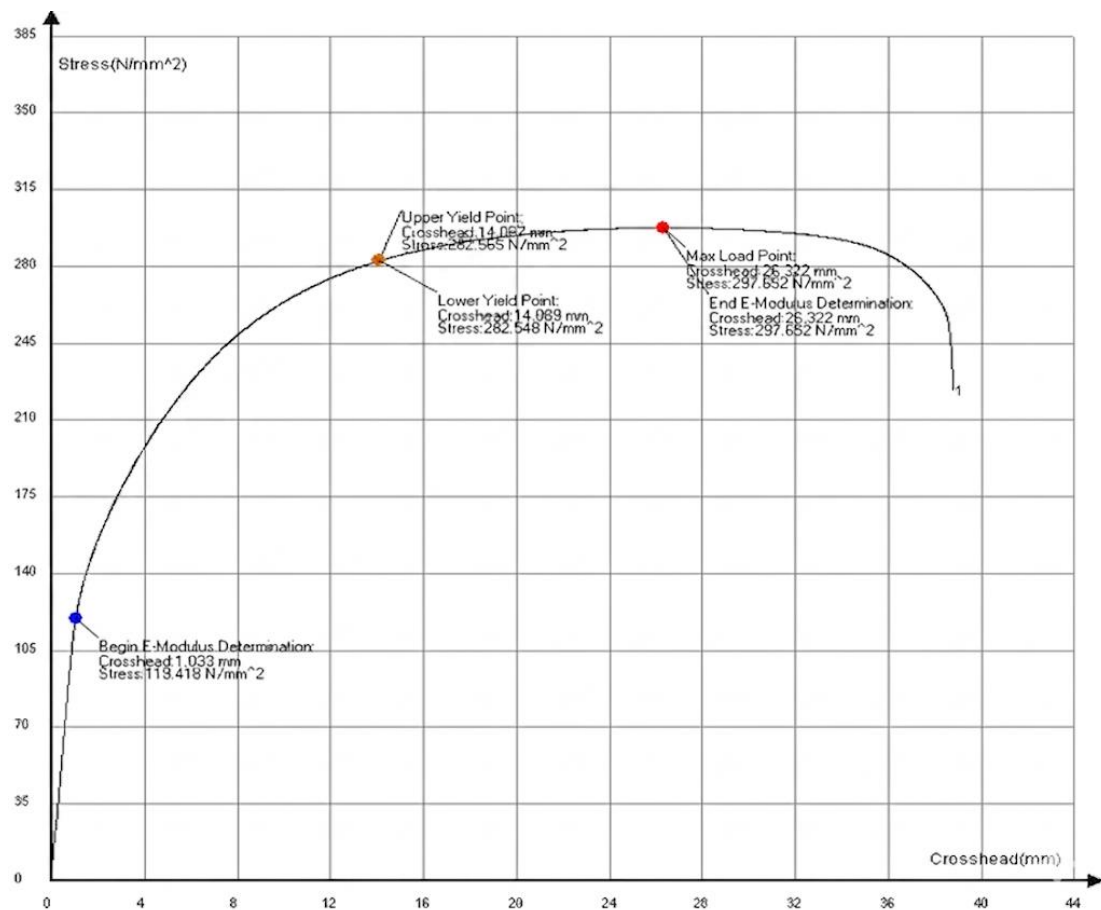


Figure 13. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DC06 à l’état initial.

Pour l’acier DX53D+Z

Figure 14 présente : $R_e = 255 \text{ MPa}$, $R_m = 274 \text{ MPa}$ et un déplacement maximal d’environ 27.2mm. Le matériau présente une résistance légèrement inférieure au DC06, mais une meilleure aptitude à la déformation.

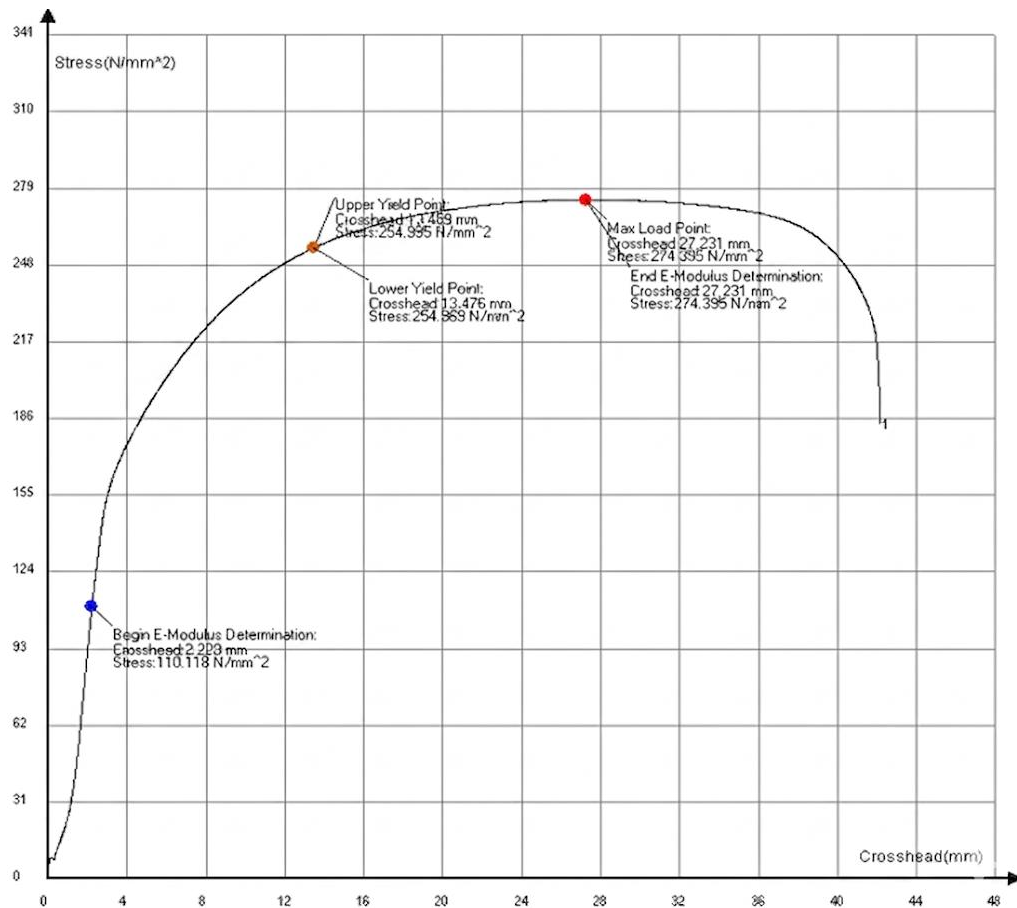


Figure 14. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DX53D+Z à l'état initial.

2. Effet du recuit sur chaque acier

2.1 Influence du recuit sur l'acier DC06

A. Traitement thermique à 250°C

- 250°C – 15 min

On observe dans la Figure 16 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.350 mm, contrainte = 38.999 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.809 mm, contrainte = 96.233 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.989 mm, contrainte = 289.918 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 13.005 mm, contrainte = 289.887 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 24.889 mm, contrainte = 305.656 N/mm².

$F_{\max} = 3.67\text{kN}$, $e=0.6\text{ mm}$, $b=20\text{mm}$.

Après traitement à 250°C pendant 15 min : $R_e = 289.9\text{ MPa}$, $R_m = 305.7\text{ MPa}$ et un déplacement maximal de 24.9mm. Une augmentation de la limite d'élasticité et de la résistance

maximale est observée par rapport à l'état initial. Cependant, le déplacement diminue légèrement, ce qui indique une réduction de la ductilité. Ce comportement s'explique par le phénomène de vieillissement structural (strain aging), provoqué par le blocage des dislocations par les atomes interstitiels.



Figure 15. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 15 min

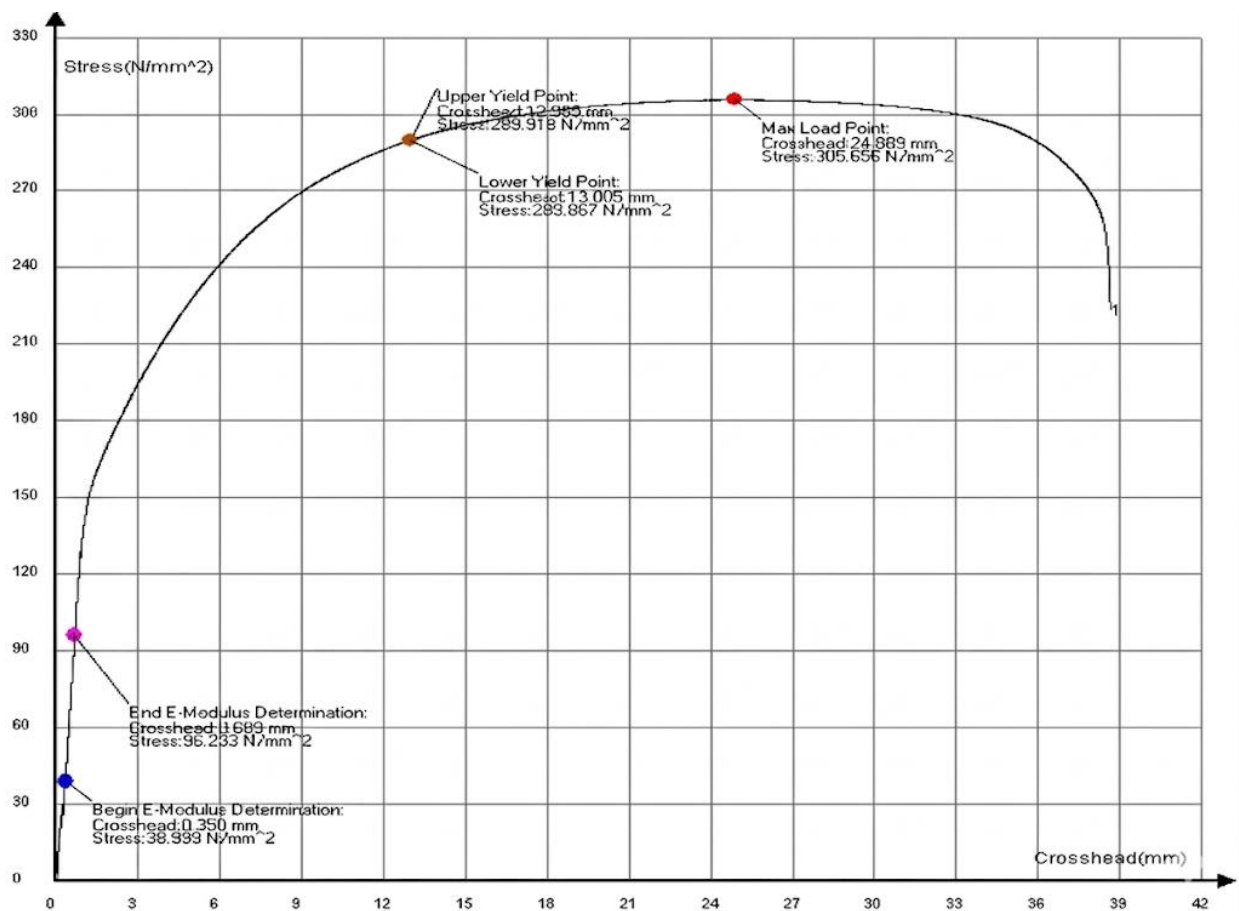


Figure 16. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 15 min.

- 250°C – 30 min

On observe dans la Figure 18 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.794 mm, contrainte = 121.110 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 11.011 mm, contrainte = 279.182 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 11.028 mm, contrainte = 279.129 N/mm².

- Point de charge maximale : déplacement = 24.344 mm, contrainte = 301.620 N/mm²
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 24.344 mm, contrainte = 301.620 N/mm².
- Après traitement thermique à 250°C pendant 30 min, les valeurs obtenues sont : $R_e = 279.1$ MPa, $R_m = 301.6$ MPa et un déplacement maximal de 24.3mm. Une légère diminution des propriétés mécaniques est observée par rapport au traitement de 15 min. La limite d'élasticité ainsi que la résistance maximale diminuent légèrement, tandis que le déplacement reste presque stable. Ce comportement traduit le début d'une relaxation progressive des contraintes internes et une réduction partielle de l'effet de vieillissement structural. Le matériau conserve néanmoins une bonne résistance mécanique avec une ductilité relativement acceptable.



Figure 17. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 30 min

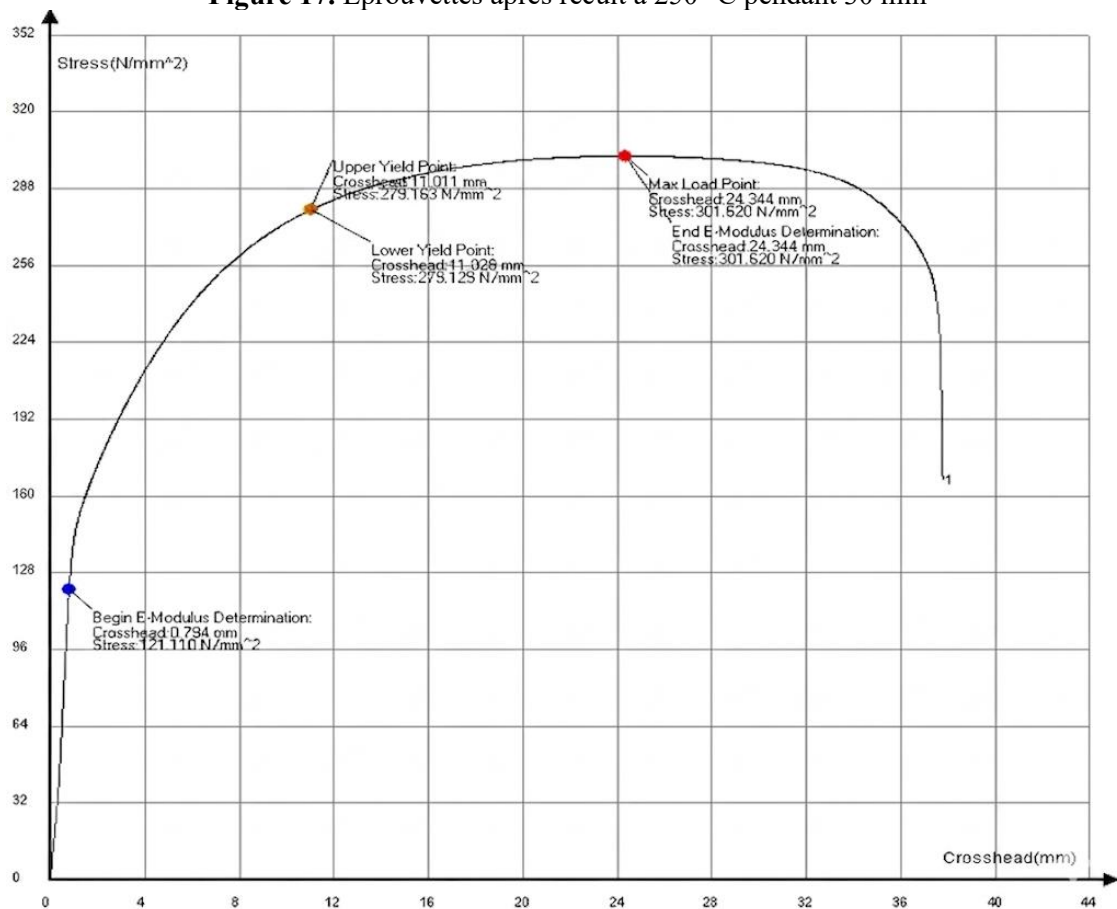


Figure 18. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 30 min.

On observe dans la Figure 18 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.920 mm, contrainte = 119.808 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.154 mm, contrainte = 280.052 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.176 mm, contrainte = 279.384 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 24.426 mm, contrainte = 298.151 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 24.426 mm, contrainte = 298.151 N/mm².

Après traitement thermique à 250°C pendant 45 min, les valeurs obtenues sont : $R_e = 279.4$ MPa, $R_m = 298.2$ MPa et un déplacement maximal de 24.4 mm. Une légère diminution de la résistance mécanique est observée par rapport aux traitements précédents, tandis que le déplacement reste pratiquement stable. Ce comportement indique une stabilisation progressive de la structure interne du matériau accompagnée d'une relaxation des contraintes résiduelles. Malgré cette diminution modérée de la résistance, le matériau conserve de bonnes propriétés mécaniques ainsi qu'une ductilité satisfaisante.



Figure 19. Eprouvettes après recuit à 250 °C pendant 45 min

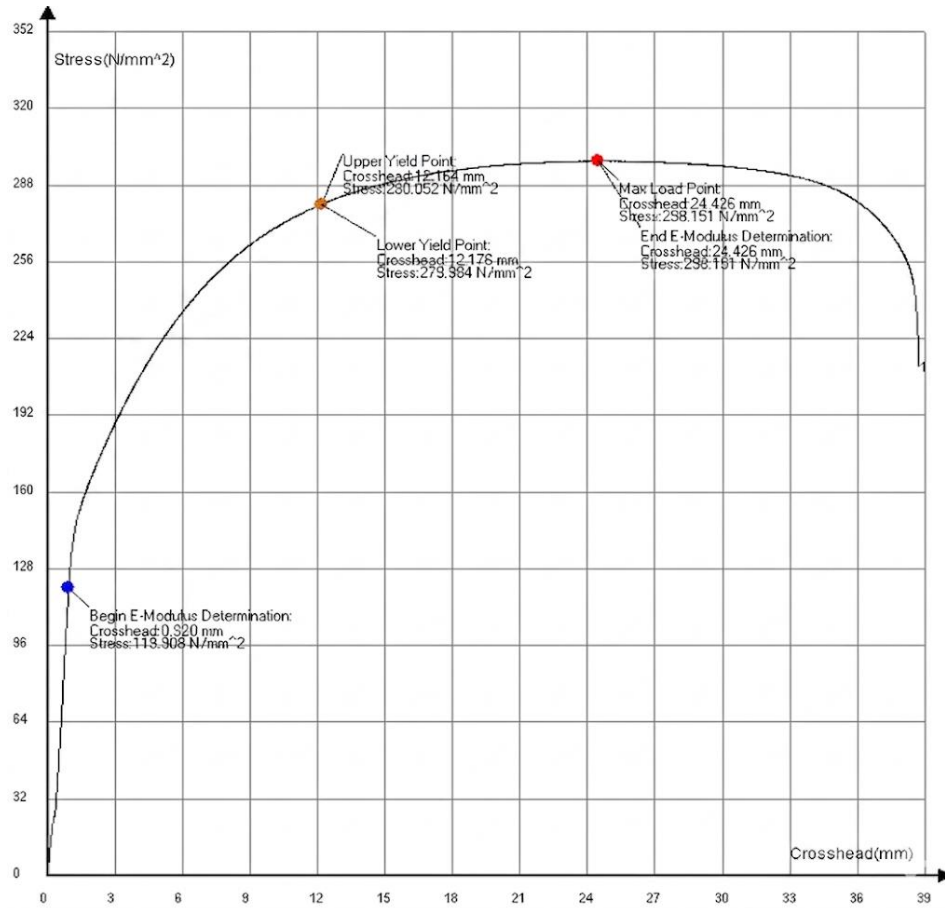


Figure 20. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 250°C pendant 45 min.

B. Traitement thermique à 450°C

- 450°C – 15 min

On observe dans la Figure 22 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 1.239 mm, contrainte = 121.855 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.478 mm, contrainte = 282.142 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.500 mm, contrainte = 282.082 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.450 mm, contrainte = 303.812 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 26.450 mm, contrainte = 303.812 N/mm².

Après traitement thermique à 450°C pendant 15 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 282.1$ MPa, $R_m = 303.8$ MPa et un déplacement maximal de 26.45 mm. Le matériau conserve une résistance mécanique élevée tout en présentant une amélioration de la ductilité, traduite par l'augmentation du déplacement maximal. Ce comportement indique le début du phénomène de recovery, caractérisé par une réorganisation progressive des dislocations et une réduction des

contraintes internes. Le matériau présente ainsi un meilleur compromis entre résistance mécanique et aptitude à la déformation plastique.



Figure 21. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 15 min

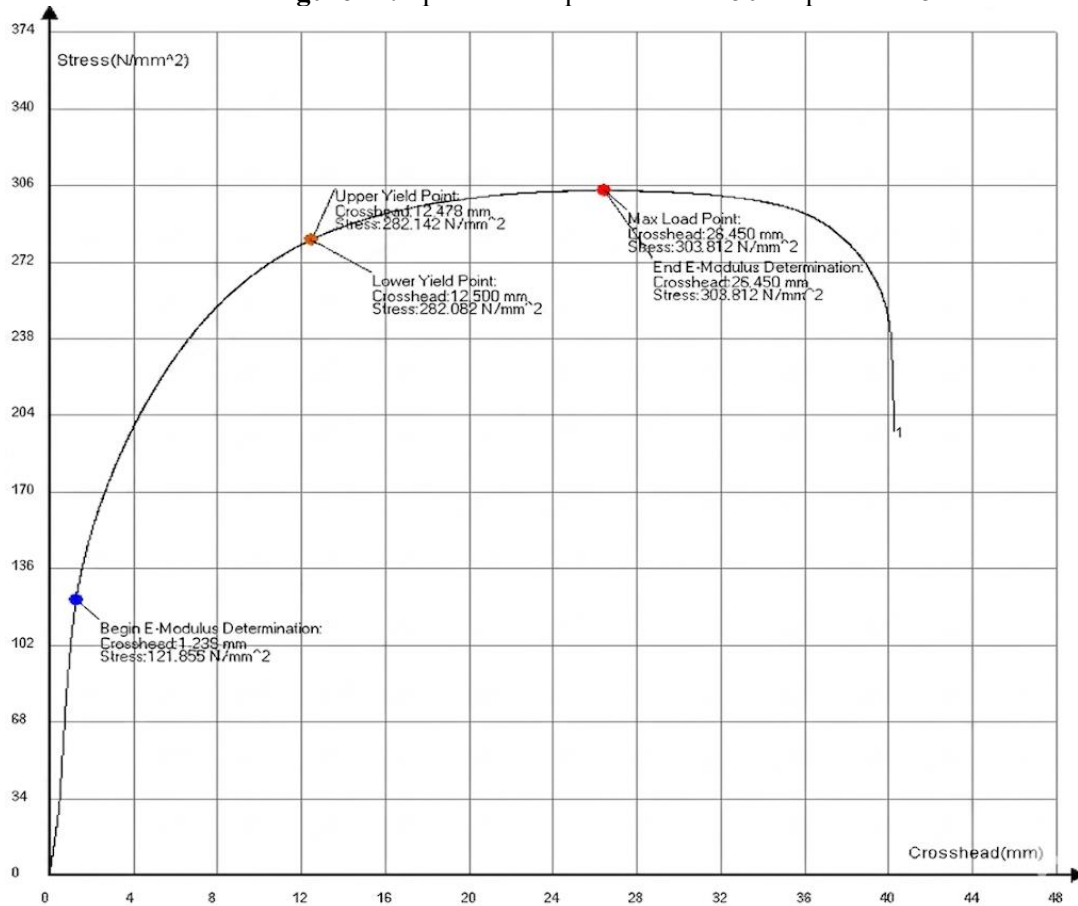


Figure 22. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DC06 après traitement à 450°C pendant 15 min.
- 450°C – 30 min

On observe dans la Figure 22 les points suivants :

- Début de la détermination du module d’Young : déplacement = 1.633 mm, contrainte = 121.355 N/mm².
- Limite d’élasticité supérieure : déplacement = 13.783 mm, contrainte = 286.499 N/mm².
- Limite d’élasticité inférieure : déplacement = 13.794 mm, contrainte = 286.432 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.461 mm, contrainte = 303.084 N/mm².
- Fin de la détermination du module d’Young : déplacement = 26.461 mm, contrainte = 303.084 N/mm².

Après traitement thermique à 450°C pendant 30 min, les propriétés mécaniques obtenues sont: $R_e = 286.4 \text{ MPa}$, $R_m = 303.1 \text{ MPa}$ et un déplacement maximal de 26.46mm. Les propriétés du matériau deviennent relativement stables, avec une bonne résistance mécanique et une ductilité satisfaisante. Ce comportement traduit une homogénéisation progressive de la structure métallique ainsi qu'une stabilisation thermique du matériau. La diminution des contraintes internes et la réorganisation microstructurale permettent d'obtenir un état plus stable et plus uniforme.



Figure 23. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 30 min

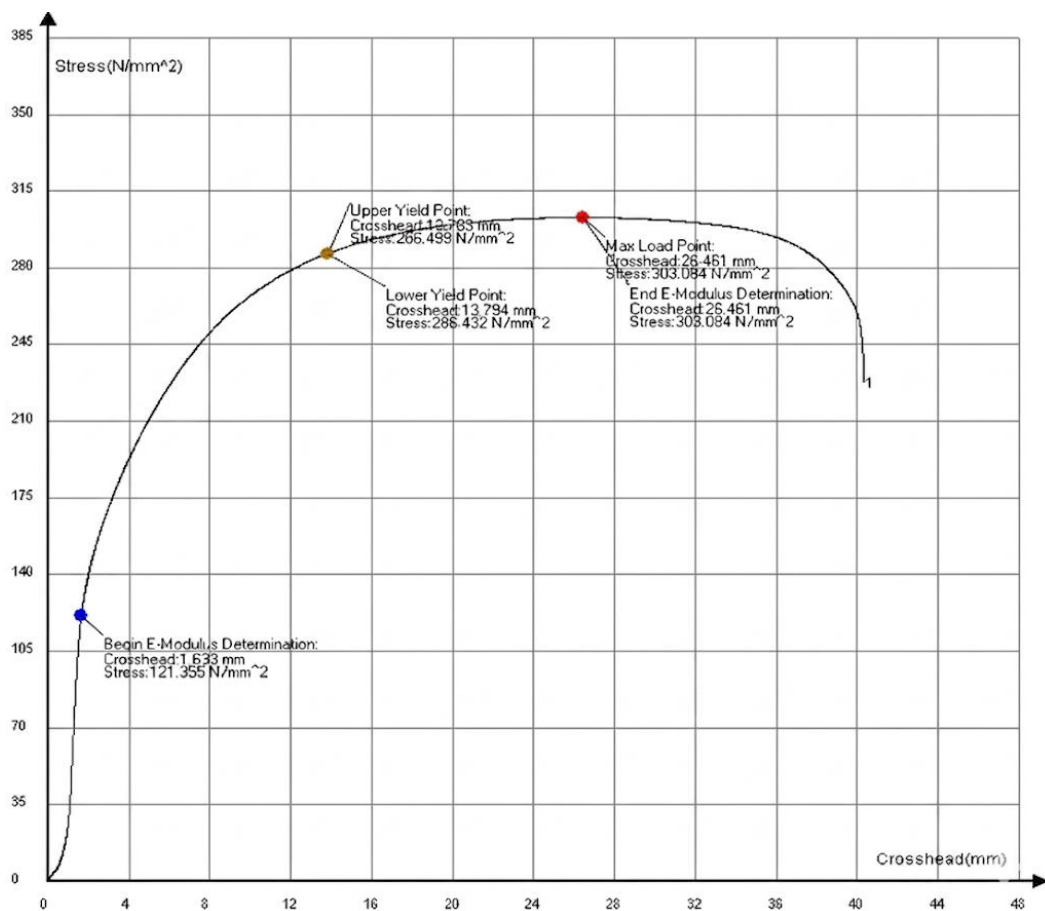


Figure 24. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 après traitement à 450°C pendant 30 min.

- 450°C – 45 min

On observe dans la Figure 26 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.292 mm, contrainte = 35.183 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.514 mm, contrainte =

85.885 N/mm².

- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 10.509 mm, contrainte = 278.681 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 10.520 mm, contrainte = 278.545 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 24.587 mm, contrainte = 303.448 N/mm².

Après traitement thermique à 450°C pendant 45 min, les valeurs obtenues sont : Re = 278.5 MPa, Rm = 303.4 MPa et un déplacement maximal de 24.58 mm. Une légère diminution du déplacement maximal est observée par rapport au traitement de 30 min, traduisant une réduction modérée de la ductilité. Malgré cette baisse, le matériau conserve une bonne aptitude à la déformation plastique ainsi qu'une résistance mécanique satisfaisante.



Figure 25. Eprouvettes après recuit à 450 °C pendant 45 min

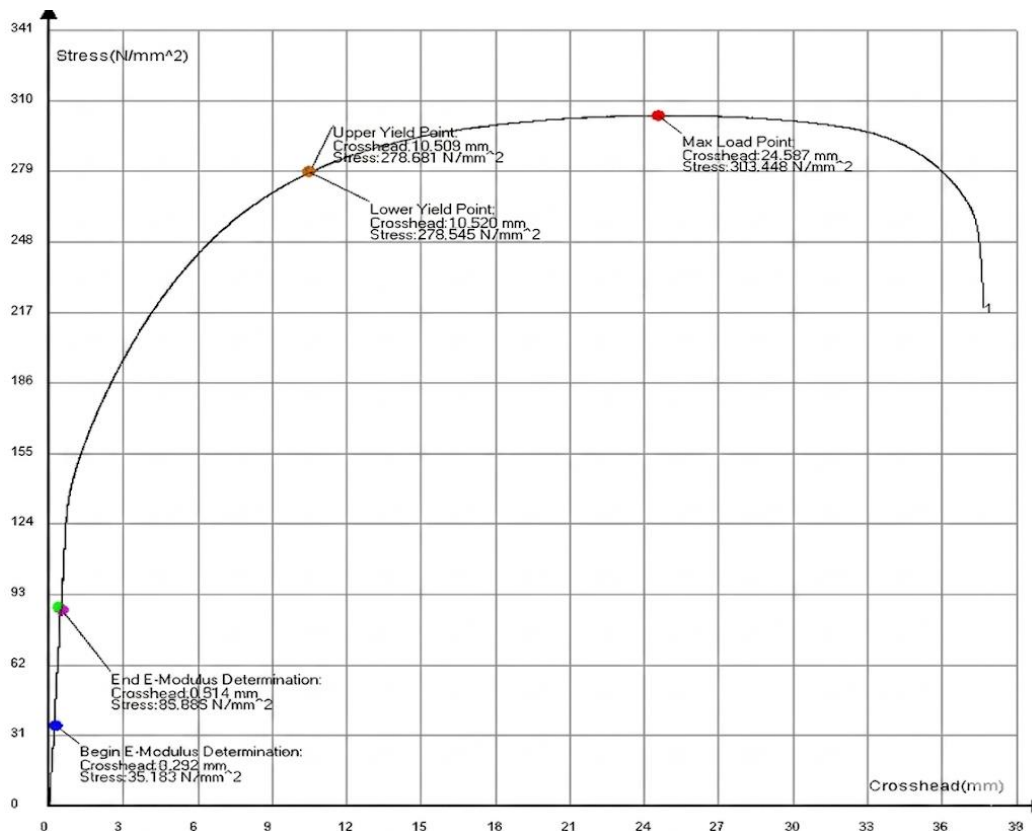


Figure 26. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 450°C pendant 45 min.

C. Traitement thermique à 690°C**- 690°C – 15 min**

On observe dans la Figure 28 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 2.333 mm, contrainte = 117.971 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 16.517 mm, contrainte = 281.092 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 16.533 mm, contrainte = 281.067 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 29.367 mm, contrainte = 294.682 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 29.367 mm, contrainte = 294.682 N/mm².

Après traitement thermique à 690°C pendant 15 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 281.1$ MPa, $R_m = 294.7$ MPa et un déplacement maximal de 29.4 mm. Le matériau présente une augmentation importante de la ductilité, mise en évidence par l'élévation du déplacement maximal, accompagnée d'une légère diminution de la résistance mécanique. Ce comportement indique le début du phénomène de recristallisation, caractérisé par la formation progressive de nouveaux grains plus stables et par une réduction significative des contraintes internes. Le matériau devient ainsi plus apte à la déformation plastique.



Figure 27. Eprouvettes après recuit à 690 °C pendant 15 min

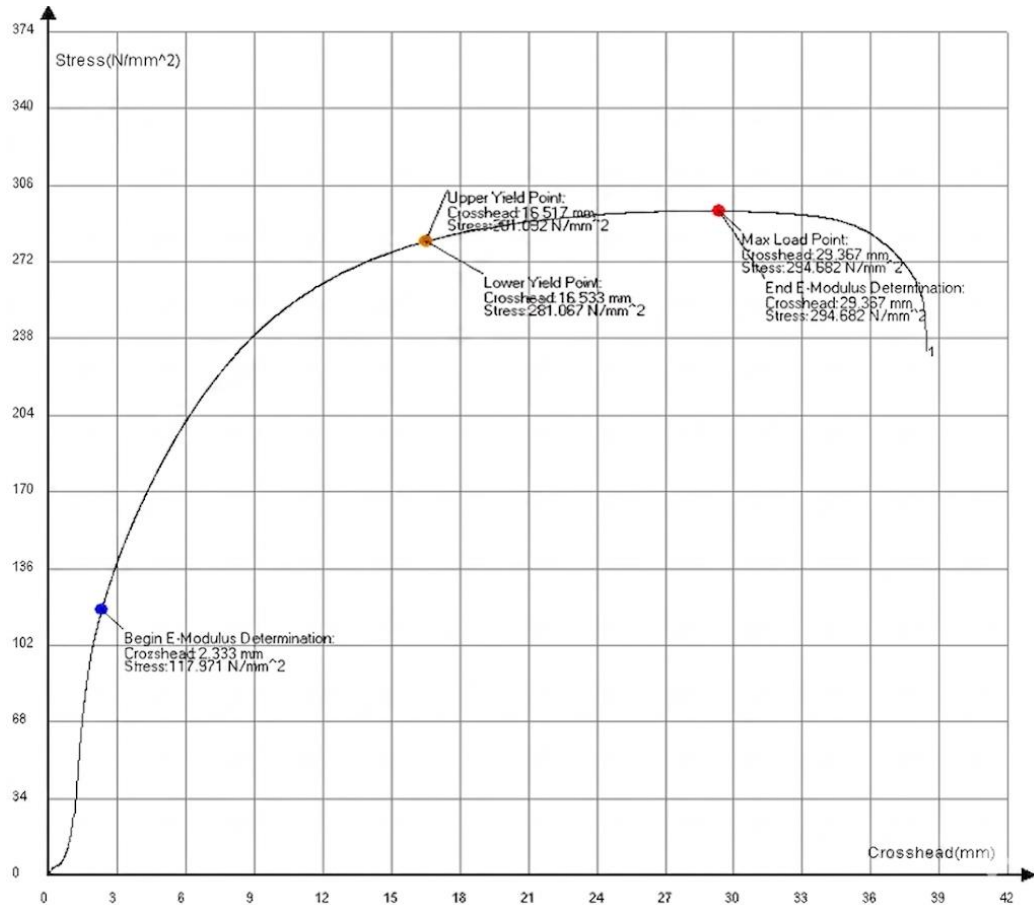


Figure 28. Courbe contrainte - déplacement de l'acier DC06 après traitement à 690°C pendant 15 min.

- 690°C – 30 min

On observe dans la Figure 30 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 2.905 mm, contrainte = 118.148 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 16.939 mm, contrainte = 281.008 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 16.844 mm, contrainte = 280.813 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 29.089 mm, contrainte = 295.037 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 29.089 mm, contrainte = 295.037 N/mm².

Après traitement thermique à 690°C pendant 30 min, les valeurs obtenues sont : $R_e = 281.0$ MPa, $R_m = 295.0$ MPa et un déplacement maximal de 29.1 mm. Le matériau conserve une bonne stabilité mécanique tout en présentant une ductilité importante, caractérisée par un déplacement maximal élevé. Ce comportement indique une évolution plus avancée du phénomène de recristallisation ainsi qu'une réduction notable des contraintes internes. La structure métallique devient plus homogène, permettant d'obtenir un meilleur équilibre entre résistance mécanique et aptitude à la déformation plastique.



Figure 29. Eprouvettes après recuit à 690 °C pendant 30 min

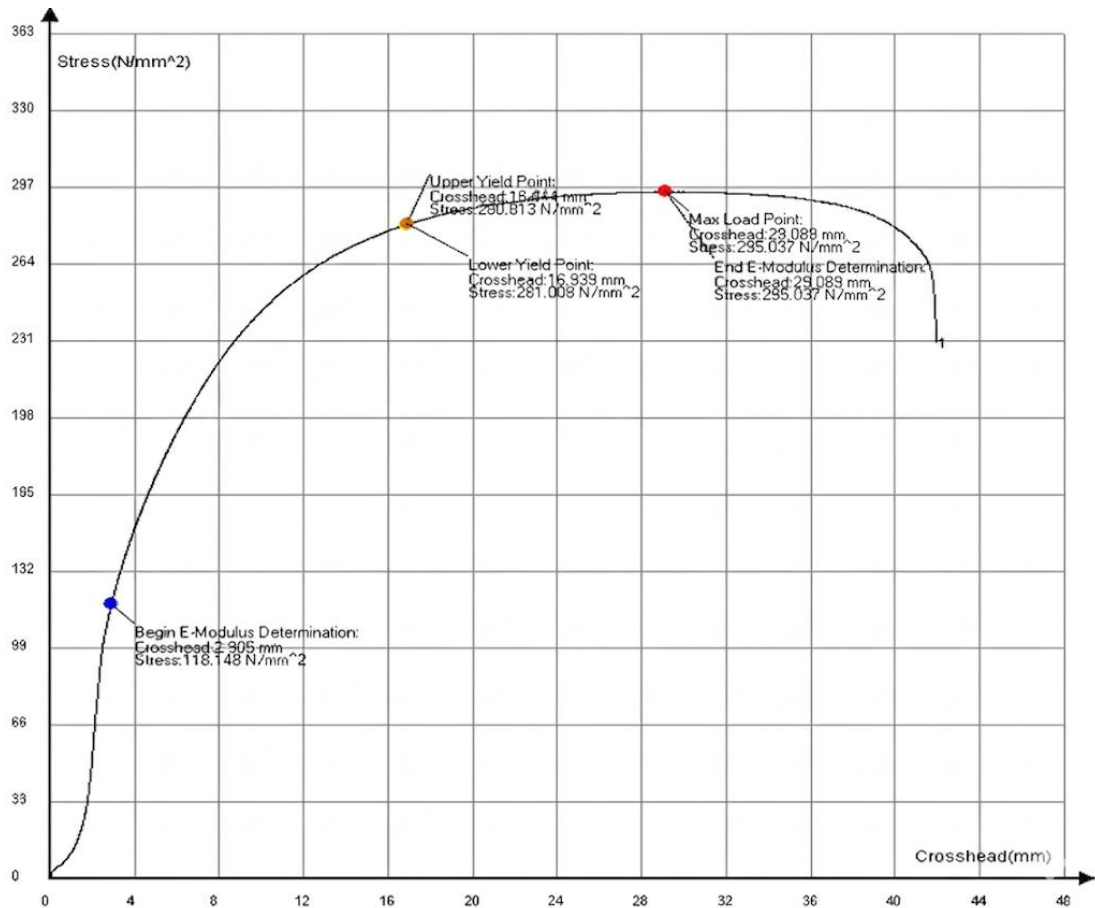


Figure 30. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 après traitement à 690°C pendant 30 min
- 690°C – 45 min

On observe dans la Figure 32 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 18.922 mm, contrainte = 110.939 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 22.700 mm, contrainte = 190.410 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 22.717 mm, contrainte = 190.122 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 45.867 mm, contrainte = 276.862 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 45.867 mm, contrainte = 276.862 N/mm².

Après traitement thermique à 690°C pendant 45 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 190.1 \text{ MPa}$, $R_m = 276.9 \text{ MPa}$ et un déplacement maximal de 45.9mm. Une forte diminution de la limite d'élasticité ainsi qu'une baisse de la résistance mécanique sont observées. En revanche, le déplacement maximal augmente considérablement, ce qui traduit une ductilité très élevée du matériau. Ce comportement s'explique par une recristallisation avancée accompagnée d'une diminution importante de la densité des dislocations et des contraintes internes. La structure métallique devient plus douce et plus stable, favorisant fortement la déformation plastique. Une perturbation au début de la courbe est également observée ; elle peut être liée au repositionnement de l'éprouvette ou à une phase de mise en charge précédant la déformation effective.



Figure 31. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 45 min

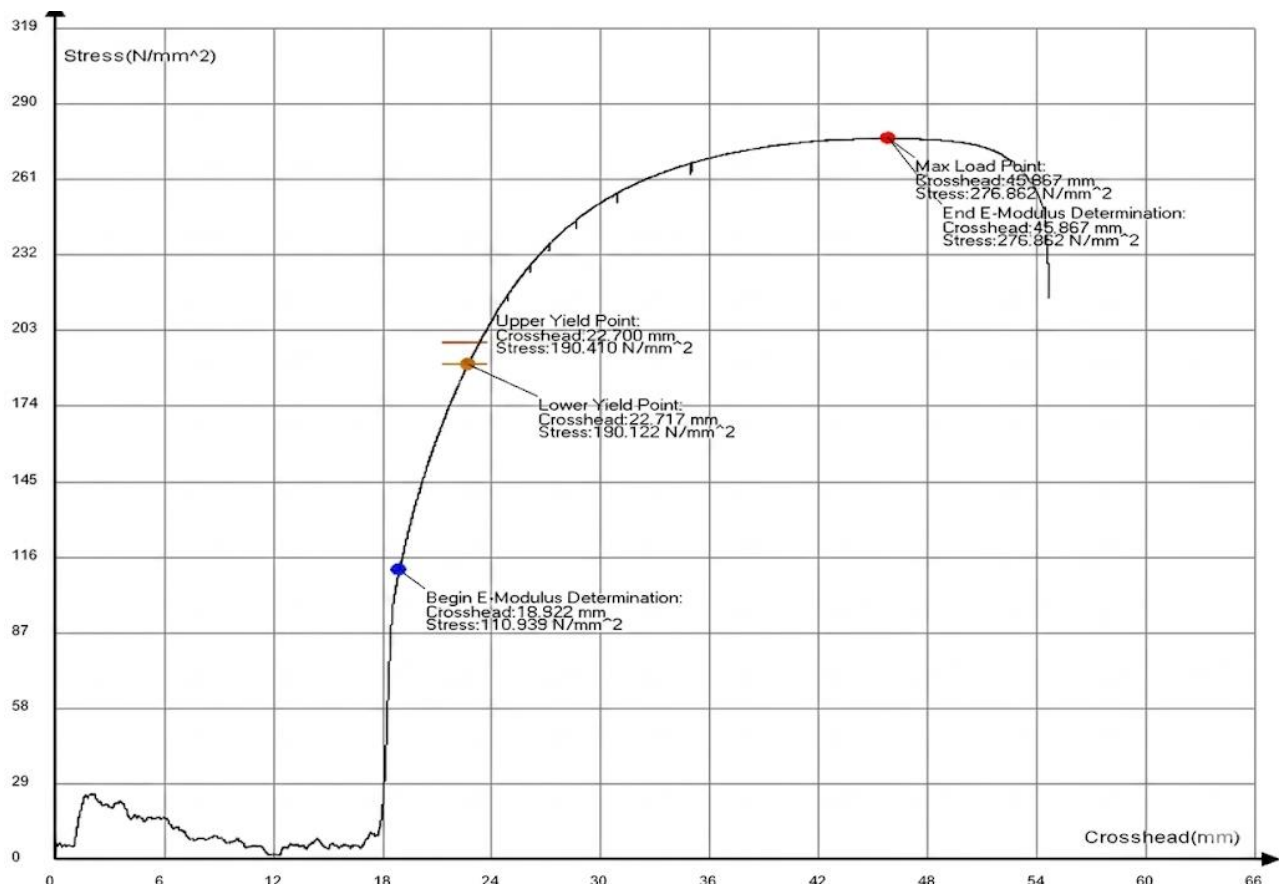


Figure 32. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DC06 Après traitement à 690°C pendant 45 min.

2.2 Influence du recuit sur le DX53D+Z

A. Traitement thermique à 250°C

- 250°C – 15 min

On observe dans la Figure 34 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 2.894 mm, contrainte = 115.043 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 13.122 mm, contrainte = 261.512 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 13.133 mm, contrainte = 261.436 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 28.322 mm, contrainte = 286.998 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 28.322 mm, contrainte = 286.998 N/mm².

Après traitement thermique à 250°C pendant 15 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 261.5$ MPa, $R_m = 287.0$ MPa et un déplacement maximal de 28.3 mm. Une augmentation des propriétés mécaniques est observée tout en conservant une bonne ductilité du matériau. La limite d'élasticité et la résistance maximale restent relativement élevées, tandis que le déplacement important traduit une bonne aptitude à la déformation plastique. Ce comportement peut être associé à un léger durcissement structural accompagné d'une stabilité satisfaisante de la microstructure.

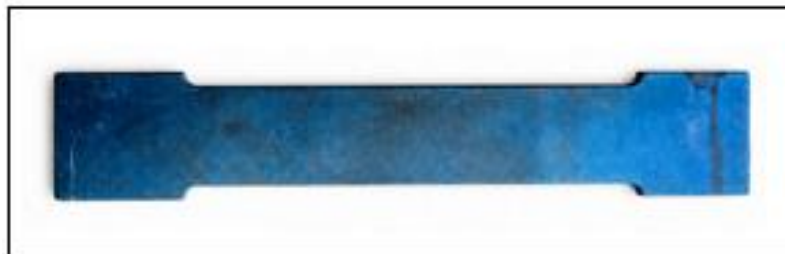


Figure 33. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 15 min

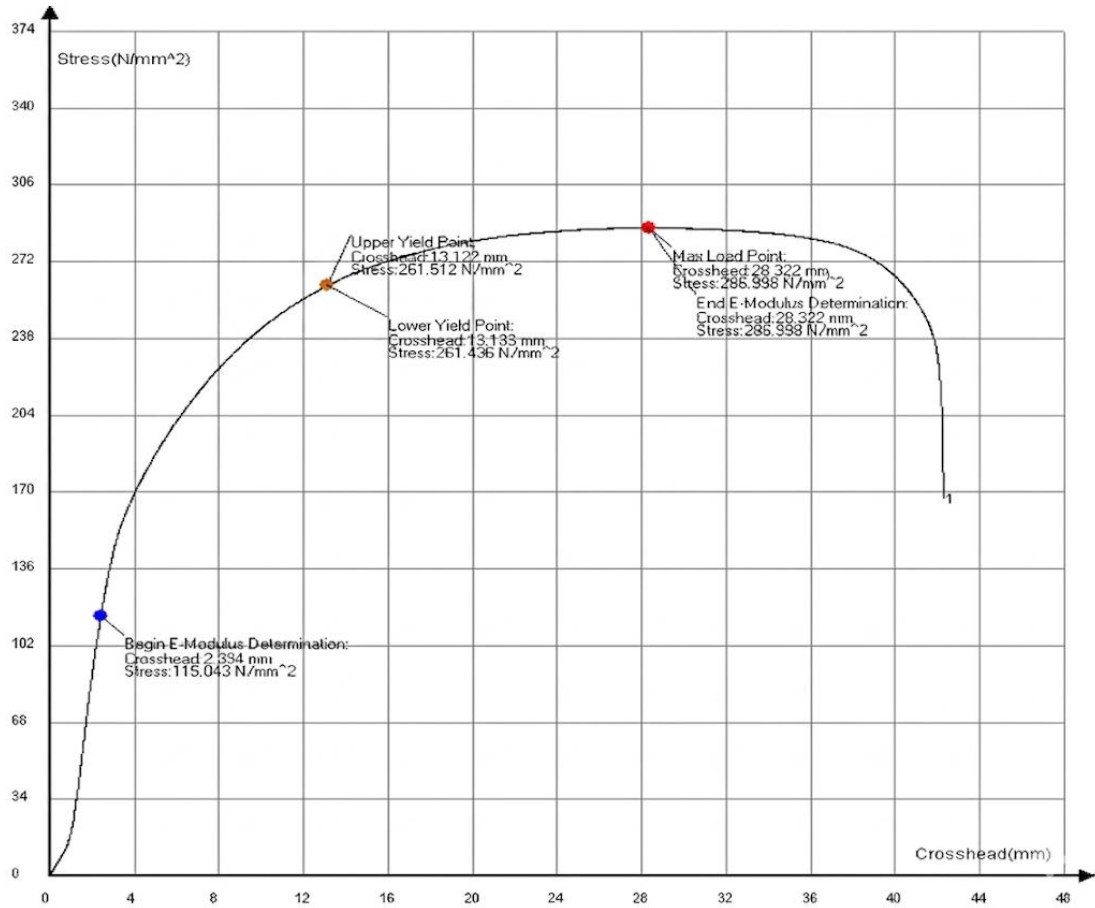


Figure 34. Courbe contrainte-déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 250°C pendant 15 min.

- 250°C – 30 min

On observe dans la Figure 36 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 1.381 mm, contrainte = 114.478 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.576 mm, contrainte = 265.764 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.592 mm, contrainte = 265.726 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 25.154 mm, contrainte = 285.158 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 25.154 mm, contrainte = 285.158 N/mm².
- $F_{max} = 4.56$ kN, $e = 0.8$ mm, $b = 20$ mm.

Après traitement thermique à 250°C pendant 30 min, les valeurs obtenues sont : $R_e = 265.7$ MPa, $R_m = 285.2$ MPa et un déplacement maximal de 25.2 mm. Le matériau présente une légère augmentation de la dureté mécanique accompagnée d'une réduction modérée de la ductilité. La limite d'élasticité augmente légèrement tandis que le déplacement maximal diminue par rapport au traitement précédent. Ce comportement peut être lié à un phénomène de durcissement structural provoqué par l'interaction entre les dislocations et les atomes interstitiels, entraînant une diminution partielle de la capacité de déformation plastique.



Figure 35. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 30 min

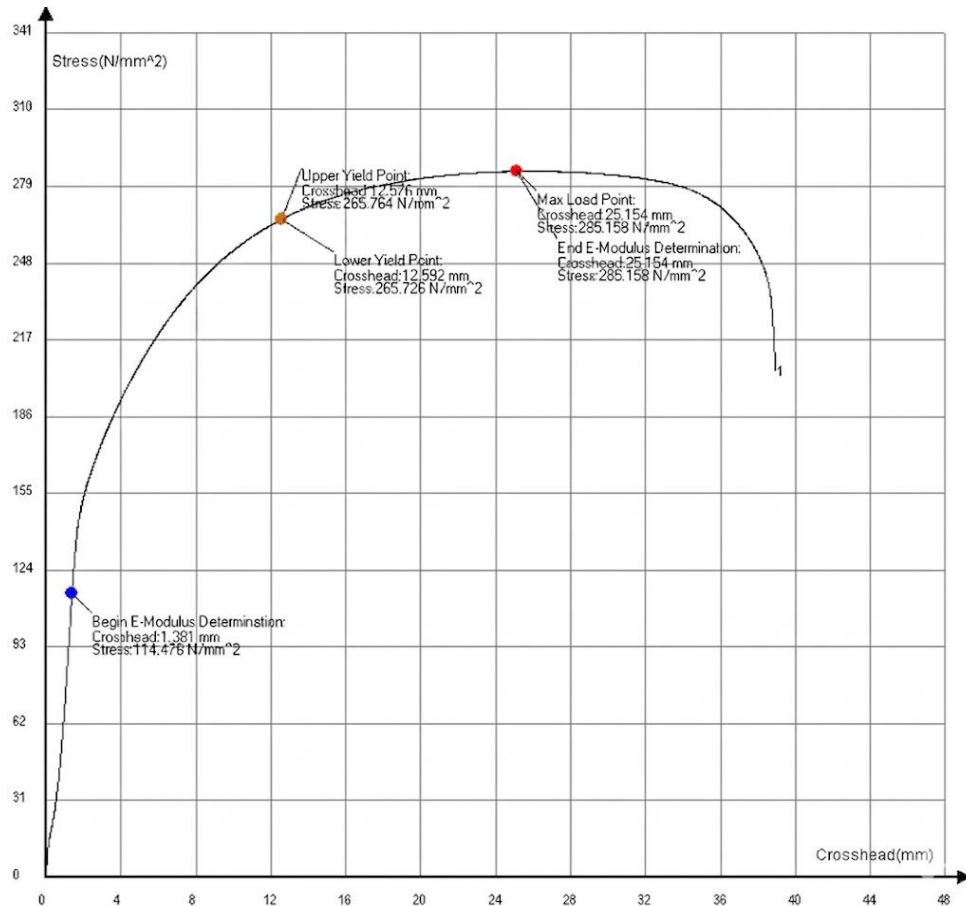


Figure 36. Courbe contrainte-déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 250°C et 30 min.

- 250°C – 45 min

On observe dans la Figure 38 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 1.944 mm, contrainte = 114.935 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 11.217 mm, contrainte = 257.273 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 11.228 mm, contrainte = 257.203 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.783 mm, contrainte = 286.116 N/mm².

Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 26.783 mm, contrainte = 286.116 N/mm².

- $F_{\max} = 4.58 \text{ kN}$.

Après traitement thermique à 250°C pendant 45 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 257.2 \text{ MPa}$, $R_m = 286.1 \text{ MPa}$ et un déplacement maximal de 26.8mm. Une légère récupération de la ductilité

est observée, mise en évidence par l'augmentation du déplacement maximal. La limite d'élasticité diminue légèrement tandis que la résistance maximale reste relativement stable. Ce comportement indique le début d'une relaxation des contraintes internes et d'une réorganisation progressive des dislocations, permettant au matériau de retrouver une meilleure aptitude à la déformation plastique.



Figure 37. Éprouvettes après recuit à 250 °C pendant 45 min

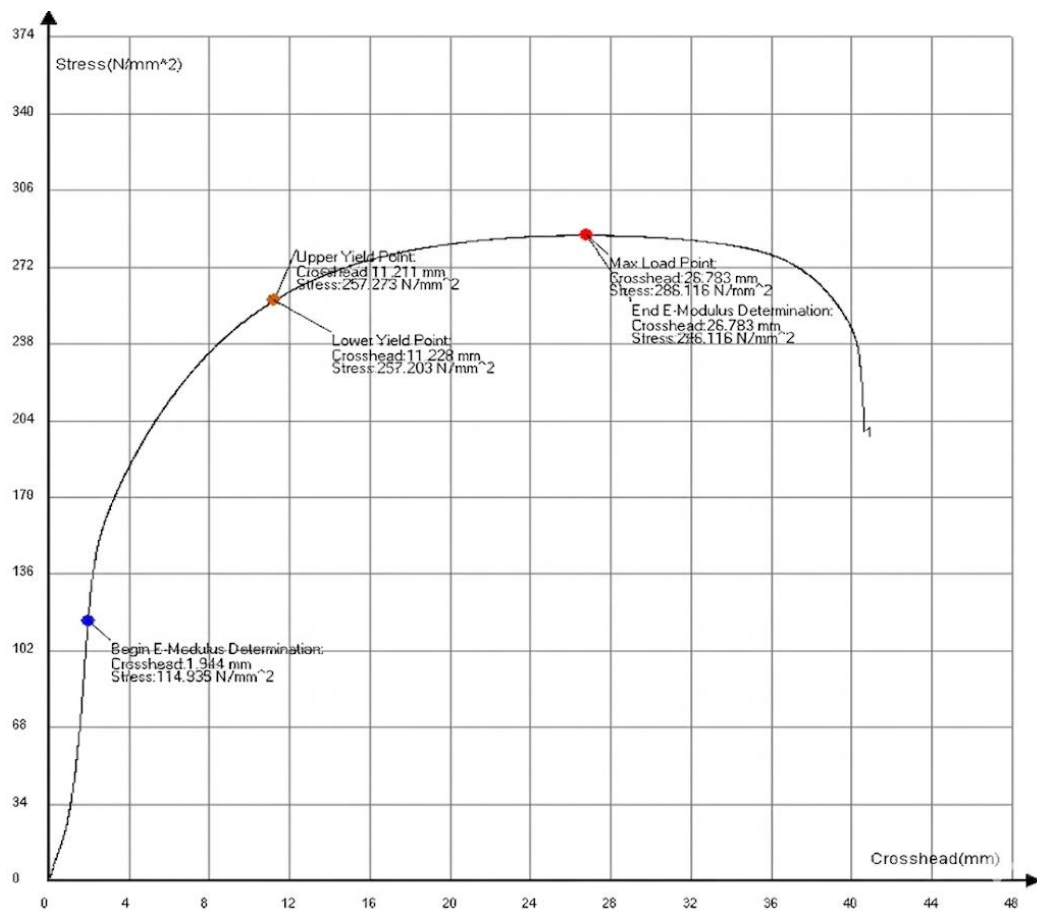


Figure 38. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DX53D+Z Après traitement à 250°C et 45 min.

B. Traitement thermique à 450°C

- 450°C – 15 min

On observe dans la Figure 40 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 1.155 mm, contrainte = 114.151 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.822 mm, contrainte = 269.508 N/mm².

- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.839 mm, contrainte = 269.464 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 24.939 mm, contrainte = 285.355 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 24.939 mm, contrainte = 285.355 N/mm².
- $F_{\max} = 4.57$ kN.

Après traitement thermique à 450°C pendant 15 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 269.5$ MPa, $R_m = 285.4$ MPa et un déplacement maximal de 24.9mm. Le matériau conserve un comportement mécanique relativement résistant avec des valeurs élevées de la limite d'élasticité et de la résistance maximale. Malgré une légère diminution du déplacement maximal, la ductilité reste acceptable. Ce comportement traduit une structure encore peu affectée par la recristallisation, avec une présence importante des dislocations contribuant au maintien des propriétés mécaniques.



Figure 39. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 15 min.

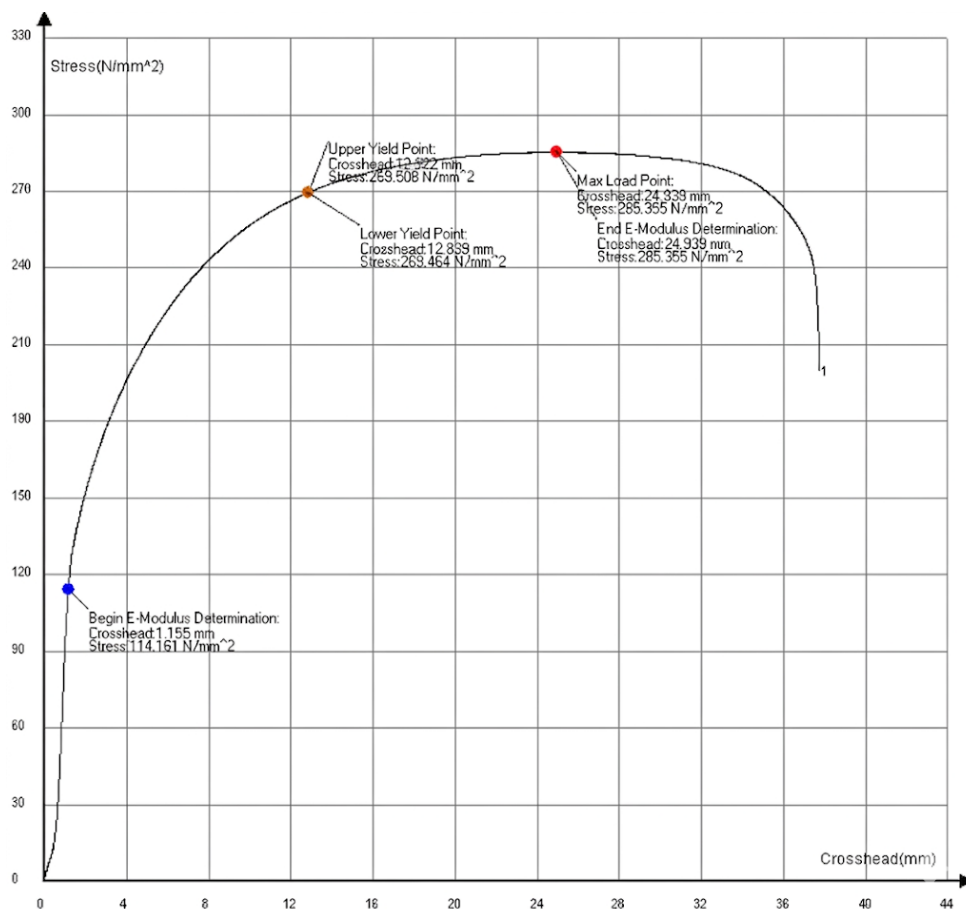


Figure 40. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 450°C et 15 min.

On observe dans la Figure 42 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.172 mm, contrainte = 19.032 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.917 mm, contrainte = 48.307 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 11.622 mm, contrainte = 259.133 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 11.633 mm, contrainte = 259.050 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.439 mm, contrainte = 284.492 N/mm².
- $F_{\max} = 4.55$ kN.

Après traitement thermique à 450°C pendant 30 min, les valeurs obtenues sont : $R_e = 259.1$ MPa, $R_m = 284.5$ MPa et un déplacement maximal de 26.5mm. Une diminution progressive de la limite d'élasticité est observée, accompagnée d'une augmentation du déplacement maximal, traduisant une amélioration de la ductilité. Ce comportement indique que le phénomène d'adoucissement thermique devient plus visible sous l'effet de la relaxation des contraintes internes et de la réorganisation des dislocations. Le matériau conserve néanmoins une bonne stabilité mécanique avec une aptitude accrue à la déformation plastique.



Figure 41. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 30 min.

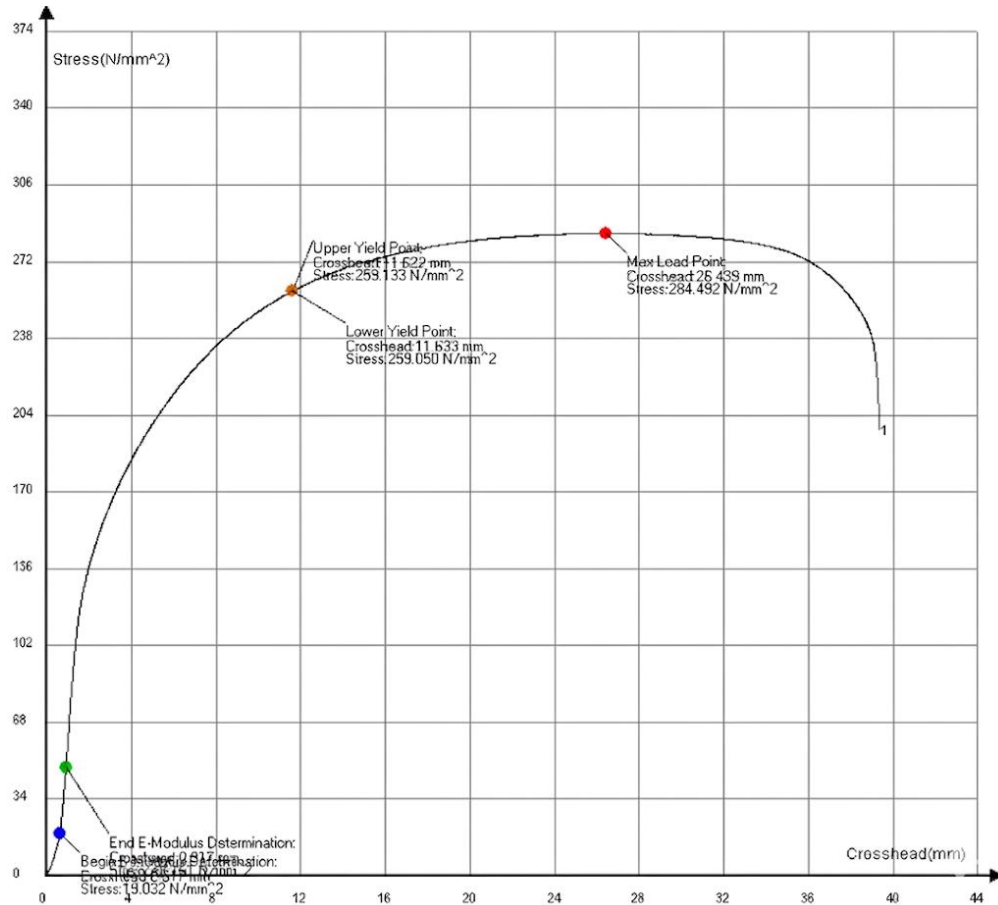


Figure 42. Courbe contrainte– déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 450°C et 30 min.

On observe dans la Figure 44 les points suivants :

- Début de la détermination du module d’Young : déplacement = 2.420 mm, contrainte = 114.973 N/mm².
- Limite d’élasticité supérieure : déplacement = 14.920 mm, contrainte = 273.094 N/mm².
- Limite d’élasticité inférieure : déplacement = 14.976 mm, contrainte = 255.505 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 27.054 mm, contrainte = 287.208 N/mm².
- Fin de la détermination du module d’Young : déplacement = 27.054 mm, contrainte = 287.208 N/mm².
- $F_{\max} = 4.6 \text{ kN}$.

Après traitement thermique à 450°C pendant 45 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 273.1 \text{ MPa}$, $R_m = 287.2 \text{ MPa}$ et un déplacement maximal de 27.1mm. Le matériau devient fortement ductile avec une très grande capacité de déformation avant rupture. Cette augmentation de la ductilité s’accompagne d’une diminution progressive des contraintes internes et d’une amélioration de l’homogénéité microstructurale. Malgré une légère augmentation de la limite d’élasticité par rapport au traitement de 30 min, le matériau conserve une bonne résistance mécanique tout en présentant une aptitude élevée à la déformation plastique.



Figure 43. Éprouvettes après recuit à 450 °C pendant 45 min.

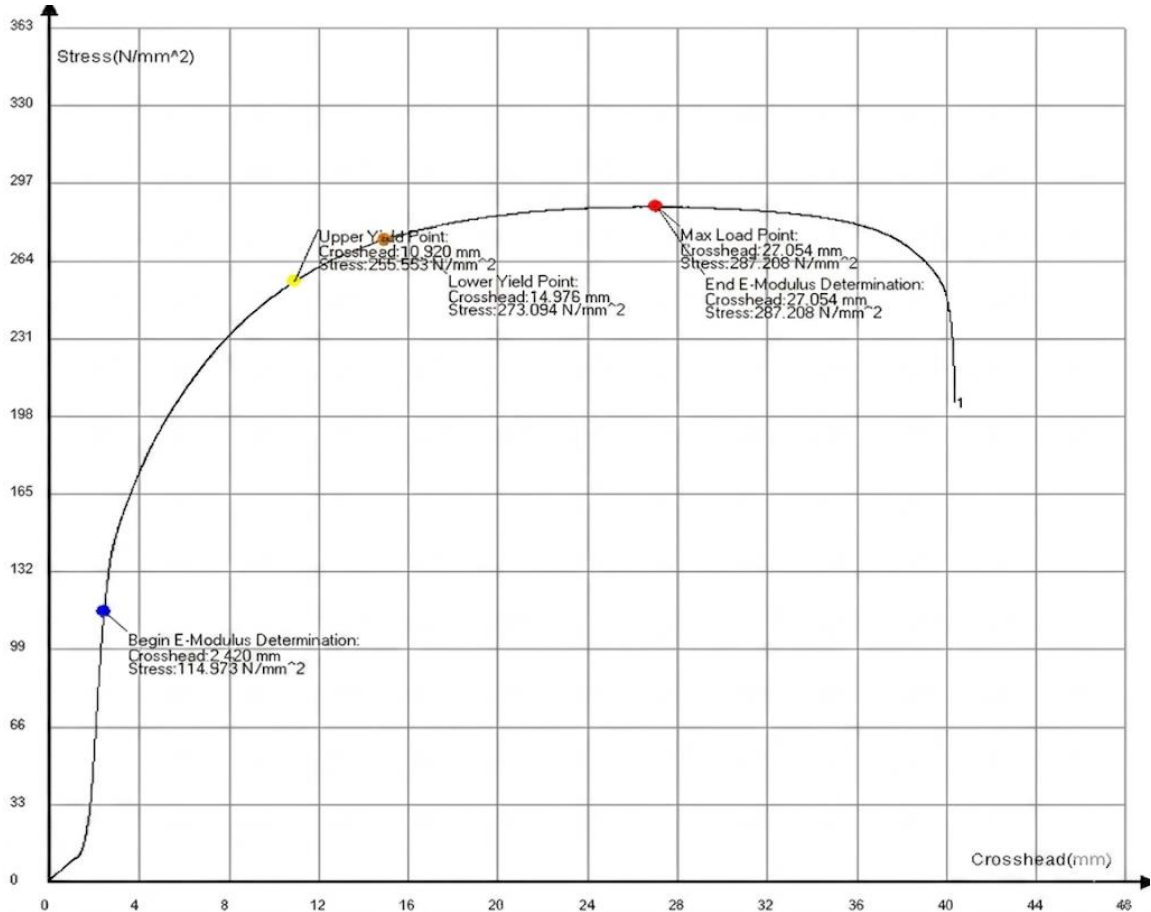


Figure 44. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 450°C et 45 min.

C. Traitement thermique à 690°C

- 690°C – 15 min

On observe dans la Figure 46 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 3.050 mm, contrainte = 112.827 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.250 mm, contrainte = 253.008 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.267 mm, contrainte = 252.945 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 26.189 mm, contrainte = 280.792 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 26.189 mm, contrainte =

280.792 N/mm².

- $F_{\max} = 4.49$ kN.

Après traitement thermique à 690°C pendant 15 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 253.0$ MPa, $R_m = 280.8$ MPa et un déplacement maximal de 26.2mm. Le matériau devient légèrement plus souple avec une diminution modérée de la résistance mécanique. Cette évolution traduit le début d'un adoucissement plus prononcé de la structure métallique sous l'effet de la température élevée. La réduction progressive des contraintes internes et de la densité des dislocations favorise une meilleure aptitude à la déformation plastique tout en conservant des propriétés mécaniques relativement satisfaisantes.



Figure 45. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 15 min.

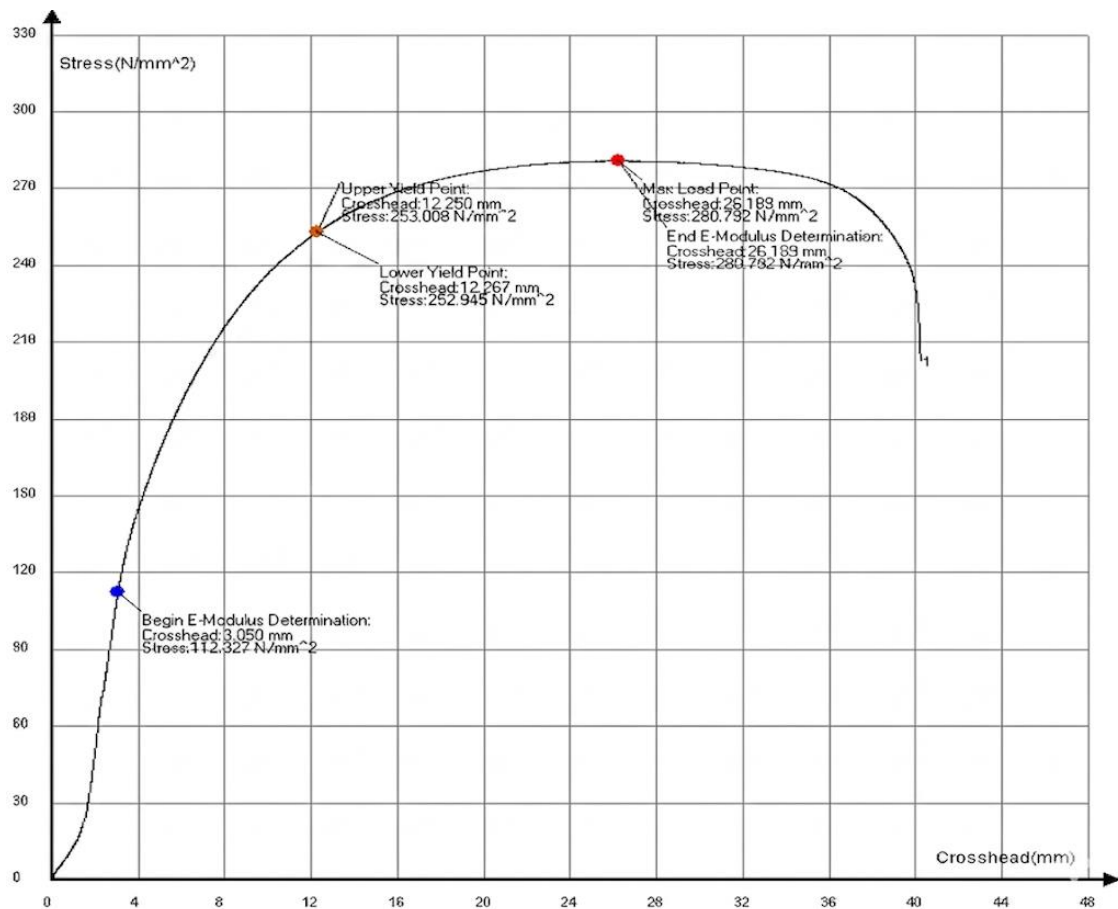


Figure 46. Courbe contrainte-déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 690°C et 15 min.

690°C – 30 min

On observe dans la Figure 48 les points suivants :

- Début de la détermination du module d'Young : déplacement = 0.983 mm, contrainte = 41.206 N/mm².
- R0.0 : déplacement = 1.600 mm, contrainte = 88.212 N/mm².
- Fin de la détermination du module d'Young : déplacement = 1.600 mm, contrainte = 88.212 N/mm².
- Limite d'élasticité supérieure : déplacement = 12.194 mm, contrainte = 258.936 N/mm².
- Limite d'élasticité inférieure : déplacement = 12.211 mm, contrainte = 258.879 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 24.272 mm, contrainte = 280.805 N/mm².
- Fmax = 4.49 kN.

Après traitement thermique à 690°C pendant 30 min, les valeurs obtenues sont : Re = 258.9 MPa, Rm = 280.8 MPa et un déplacement maximal de 24.3 mm. Le matériau conserve un comportement mécanique relativement stable avec une ductilité encore importante. Malgré une légère diminution de la résistance par rapport aux états initiaux, les propriétés mécaniques restent satisfaisantes. Ce comportement traduit une structure plus homogène et une réduction progressive des contraintes internes sous l'effet du traitement thermique prolongé.



Figure 47. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 30 min.

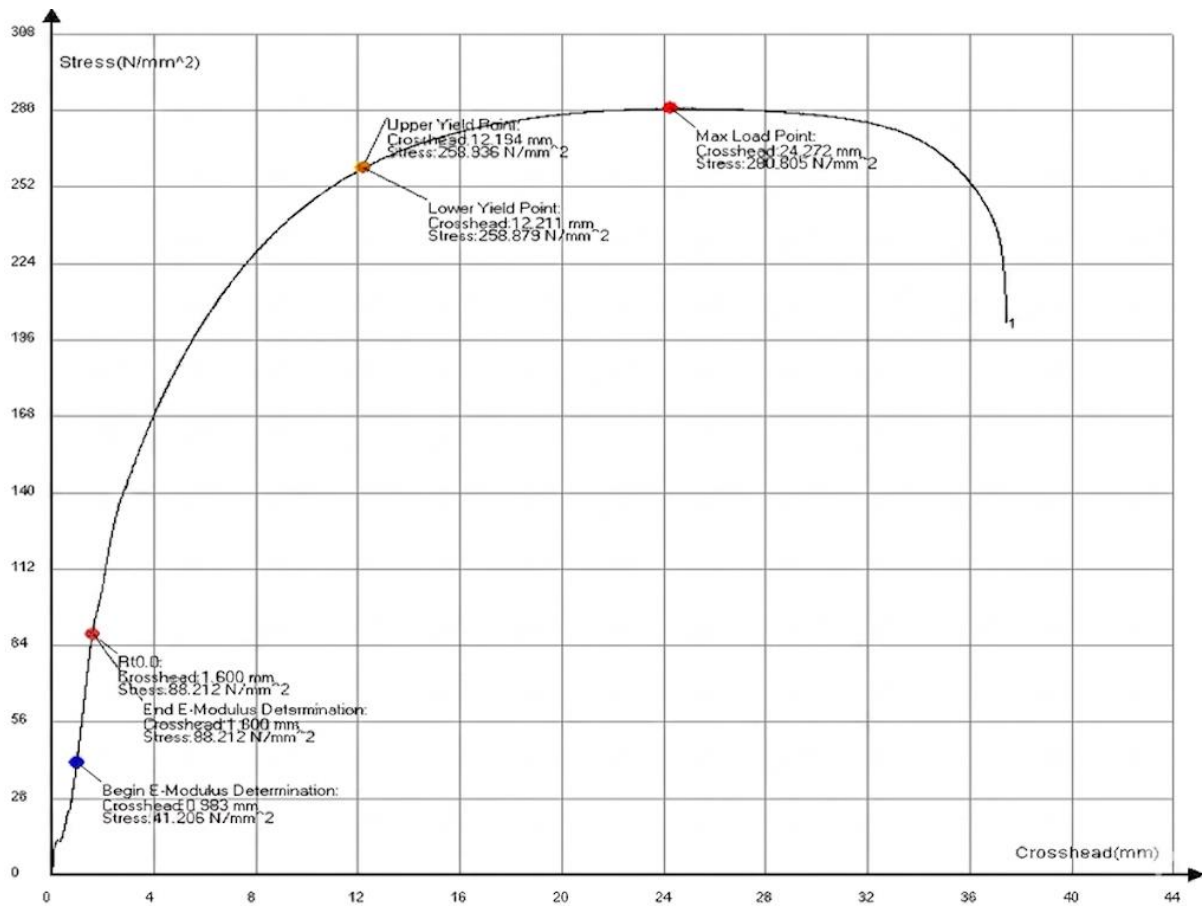


Figure 48. Courbe contrainte–déplacement de l’acier DX53D+Z après traitement à 690°C et 30 min.

- 690°C – 45 min

On observe dans la Figure 50 les points suivants :

- Début de la détermination du module d’Young : déplacement = 24.822 mm, contrainte = 111.813 N/mm².
- Limite d’élasticité supérieure : déplacement = 34.383 mm, contrainte = 249.626 N/mm².
- Limite d’élasticité inférieure : déplacement = 34.400 mm, contrainte = 249.601 N/mm².
- Point de charge maximale : déplacement = 48.555 mm, contrainte = 278.945 N/mm².
- Fin de la détermination du module d’Young : déplacement = 48.555 mm, contrainte = 278.945 N/mm².
- $F_{max} = 4.46$ kN.

Après traitement thermique à 690°C pendant 45 min, les résultats obtenus sont : $R_e = 249.6$ MPa, $R_m = 278.9$ MPa et un déplacement maximal de 48.6 mm. Une très forte augmentation de la ductilité est observée, traduisant une aptitude élevée du matériau à la déformation plastique. En parallèle, une diminution progressive de la résistance mécanique apparaît, indiquant un adoucissement important de la structure métallique sous l’effet du recuit prolongé. Ce comportement est associé à une recristallisation avancée et à une réduction significative de la densité des dislocations. Une perturbation au début de la courbe est également observée ; elle peut

être liée au repositionnement de l'éprouvette ou à une phase de mise en charge précédant la déformation effective.



Figure 49. Éprouvettes après recuit à 690 °C pendant 45 min.

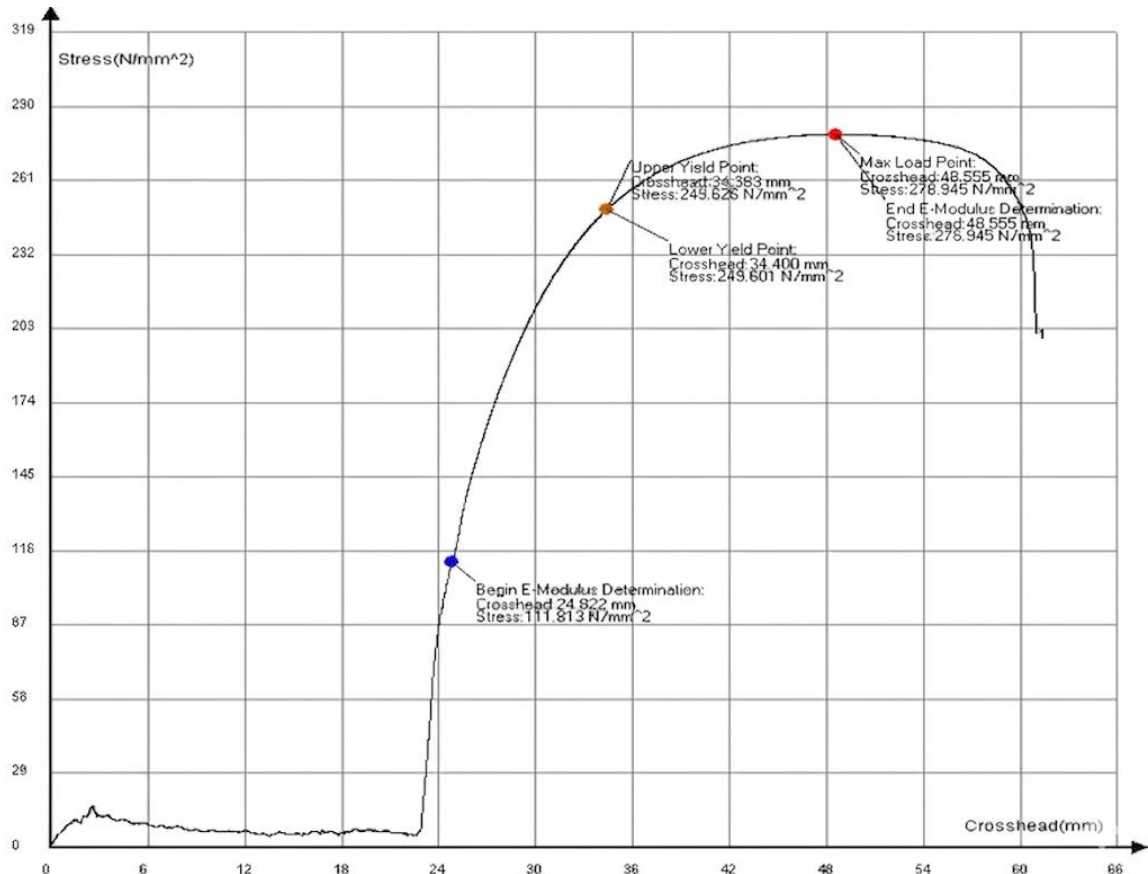


Figure 50. Courbe contrainte– déplacement de l'acier DX53D+Z après traitement à 690°C et 45 min.

3. Comparaison DC06 / DX53D+Z

L'analyse des résultats montre que le DC06 possède une meilleure résistance mécanique globale, tandis que le DX53D+Z présente une ductilité supérieure.

Le DC06 conserve des valeurs de (R_e) et (R_m) plus élevées après traitement thermique.

En revanche, le DX53D+Z présente des valeurs de déplacement plus importantes, particulièrement après les traitements prolongés à haute température.

À 690°C et 45 min :

- le DC06 subit une forte diminution de la limite d'élasticité ;
- les deux matériaux présentent une augmentation très importante de la ductilité ;

- toutefois, le DX53D+Z atteint le déplacement maximal le plus élevé, ce qui traduit une aptitude à la déformation légèrement supérieure à celle du DC06.

Ces différences sont liées à : la composition chimique, la microstructure initiale et la présence du revêtement de zinc pour le DX53D+Z.

4. Interprétation métallurgique

Les différentes évolutions observées peuvent être expliquées par plusieurs phénomènes métallurgiques.

- À 250°C

Le phénomène principal est le vieillissement structural.

Les atomes interstitiels bloquent les dislocations, ce qui provoque : une augmentation de la résistance, une augmentation de la limite d'élasticité et une légère diminution de la ductilité.

- À 450°C

Le phénomène de recovery devient dominant.

Les contraintes internes diminuent progressivement et les dislocations commencent à se réorganiser. Cela provoque : une amélioration de la ductilité, une stabilisation du comportement mécanique et une légère diminution de la résistance.

- À 690°C

Ces observations sont compatibles avec un phénomène de recristallisation qui devrait être confirmé par une analyse microstructurale. La diminution de la résistance mécanique ainsi que l'augmentation importante de la ductilité suggèrent une réduction de la densité des dislocations et une réorganisation de la microstructure. Les matériaux deviennent alors : beaucoup plus ductiles, plus faciles à déformer mais moins résistants mécaniquement.

Conclusion

Les essais de traction réalisés sur les aciers DC06 et DX53D+Z ont permis de mettre en évidence l'influence importante des traitements thermiques sur les propriétés mécaniques.

Les résultats montrent que le traitement à 250 °C provoque un léger durcissement, alors que le traitement à 450 °C permet globalement de maintenir une bonne ductilité tout en assurant une stabilité des propriétés mécaniques. L'évolution de la ductilité reste toutefois dépendante de la durée du maintien thermique tandis que le traitement à 690 °C entraîne une recristallisation importante et un fort adoucissement thermique.

Le DC06 présente globalement une meilleure résistance mécanique, le DX53D+Z présente quant à lui une meilleure aptitude à la déformation et une plus grande ductilité après recuit.

Cette étude permet ainsi de mieux comprendre le comportement mécanique des deux matériaux et de déterminer les conditions thermiques les plus adaptées aux applications industrielles.

Conclusion Générale

Cette étude a permis d'analyser l'influence du traitement thermique de recuit sur le comportement mécanique de deux aciers largement utilisés dans les opérations de formage et d'emboutissage, à savoir le DC06 et le DX53D+Z. L'objectif principal était d'évaluer l'effet de différentes températures et durées de maintien sur les propriétés mécaniques de ces matériaux, en particulier la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la ductilité.

Dans un premier temps, une étude bibliographique a permis de présenter les caractéristiques générales des aciers destinés à l'emboutissage, ainsi que les propriétés spécifiques des aciers DC06 et DX53D+Z. Les notions fondamentales relatives au comportement mécanique des matériaux et aux phénomènes métallurgiques associés au traitement thermique de recuit ont également été développées. Cette partie théorique a mis en évidence l'importance des phénomènes de récupération, de recristallisation et de croissance des grains dans l'évolution des propriétés mécaniques des aciers.

Par la suite, les matériaux étudiés ont été soumis à plusieurs traitements thermiques de recuit réalisés à différentes températures (250 °C, 450 °C et 690 °C) avec des temps de maintien de 15, 30 et 45 minutes. Les essais de traction effectués après traitement ont permis d'obtenir les courbes contrainte-déplacement et d'évaluer l'évolution du comportement mécanique des deux matériaux. Les résultats obtenus montrent que la température et le temps de maintien influencent fortement les propriétés mécaniques des aciers étudiés.

À 250 °C, les deux matériaux présentent généralement une légère augmentation de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique. Ce comportement est principalement lié au phénomène de vieillissement structural, provoqué par l'interaction entre les dislocations et les atomes interstitiels. Cette augmentation de résistance s'accompagne cependant d'une légère diminution de la ductilité.

À 450 °C, les matériaux commencent progressivement à retrouver une meilleure capacité de déformation. Le phénomène de récupération devient dominant, entraînant une réduction des contraintes internes et une réorganisation partielle des dislocations. Les résultats montrent alors

une amélioration progressive de la ductilité tout en conservant des propriétés mécaniques relativement élevées.

À 690 °C, le phénomène de recristallisation devient très important. Les nouveaux grains formés réduisent fortement la densité des dislocations, ce qui provoque une diminution significative de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique. En revanche, les matériaux deviennent beaucoup plus ductiles et présentent une capacité de déformation nettement supérieure.

L'étude comparative entre le DC06 et le DX53D+Z montre également des différences importantes de comportement. Le DC06 conserve globalement une meilleure résistance mécanique après traitement thermique grâce à sa composition chimique et à sa microstructure initiale. Le DX53D+Z présente quant à lui une ductilité plus importante, notamment après les traitements à haute température. La présence du revêtement de zinc ainsi que les caractéristiques métallurgiques propres à ce matériau influencent directement son comportement lors du recuit.

Les résultats expérimentaux obtenus sont en accord avec les phénomènes métallurgiques présentés dans l'étude théorique. Ils confirment que le contrôle des paramètres de recuit constitue un élément essentiel pour adapter les propriétés mécaniques des aciers aux exigences industrielles, notamment dans les procédés de mise en forme et d'emboutissage.

Cette étude a donc permis de mieux comprendre l'évolution du comportement mécanique des aciers DC06 et DX53D+Z après traitement thermique de recuit. Elle met en évidence l'importance du choix des paramètres thermiques afin d'obtenir le meilleur compromis entre résistance mécanique et ductilité selon l'application industrielle recherchée.

Comme perspectives, il serait intéressant de compléter cette étude par :

- une analyse micrographique des structures obtenues après recuit,
- des mesures de dureté,
- des observations au microscope métallographique,
- ainsi qu'une étude plus approfondie de l'évolution des grains et des phases métallurgiques après traitement thermique.

Ces travaux complémentaires permettraient d'établir une corrélation plus précise entre la microstructure et les propriétés mécaniques des matériaux étudiés.