

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية.
République Algérienne Démocratique et Populaire.



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique.
Université d'Oran 2.
Institut de Maintenance et de Sécurité
Industrielle.
Département de Sécurité Industrielle et Environnement

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master
Filière : Génie Industriel
Spécialité : Maintenance de l'automatisme et de l'instrumentation
Thème

L'analyse et l'optimisation du procédé de fabrication par traitement thermique.

Présenté et soutenu publiquement par :
YOUCEF SBA Henni & BEGHADAD Mohammed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
	Pr.	IMSI	Président
Dr.Bachir Bouiadjra	MCB	IMSI	Encadrant
	MCA	IMSI	Examineur
	Ing.		Représentant Partenaire Socio-économique

Proposé et Dirigé par :

Dr. Bachir Bouiadjra

Année :
2025/2026

RESUME :

Le traitement thermique est un procédé très utilisé dans l'industrie métallurgique puisqu'il permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux tout en conservant leur forme initiale. Ce projet s'intéresse à l'analyse et à l'optimisation de ce procédé dans le but d'obtenir des pièces de meilleure qualité, de réduire la consommation d'énergie et d'améliorer le rendement de la production. Pour cela, nous avons étudié les différents paramètres qui influencent le traitement thermique, tels que la température, le temps de maintien, la vitesse de chauffage, la vitesse de refroidissement ainsi que l'atmosphère du four. Dans un premier temps, nous avons présenté les notions de base liées aux traitements thermiques, les transformations métallurgiques des aciers et les principaux procédés utilisés comme le recuit, la trempe, le revenu et les traitements thermochimiques. Par la suite, nous avons analysé différentes méthodes d'optimisation ainsi que les outils modernes de contrôle et de suivi du procédé. Les résultats de cette étude permettent de mieux maîtriser les cycles thermiques, de réduire les défauts de fabrication et d'améliorer les performances des pièces traitées.

ABSTRACT:

Heat treatment is a widely used process in the metallurgical industry because it enhances the mechanical properties of materials while preserving their original shape. This project focuses on the analysis and optimization of the heat treatment process with the aim of producing higher-quality components, reducing energy consumption, and improving production efficiency. To achieve these objectives, we studied the various parameters that influence heat treatment, including temperature, holding time, heating rate, cooling rate, and furnace atmosphere. First, we presented the fundamental concepts of heat treatment, the metallurgical transformations of steels, and the main processes used, such as annealing, quenching, tempering, and thermochemical treatments.

Subsequently, we analyzed different optimization methods as well as modern monitoring and control tools used in heat treatment operations. The results of this study contribute to better control of thermal cycles, reduction of manufacturing defects, and improvement of the performance of treated components.

ملخص:

تُعدّ المعالجة الحرارية من العمليات الأساسية والمستخدمّة على نطاق واسع في الصناعة المعدنيّة، حيث تساهم في تحسين الخواص الميكانيكيّة للمواد مع الحفاظ على شكلها الهندسي الأصلي. يهدف هذا المشروع إلى تحليل وتحسين عملية المعالجة الحرارية بهدف إنتاج مكونات ذات جودة أعلى، وتقليل استهلاك الطاقة، ورفع كفاءة الإنتاج. ولتحقيق هذه الأهداف، تمت دراسة مختلف العوامل المؤثرة في عملية المعالجة الحرارية، بما في ذلك درجة الحرارة، وزمن المكوث، ومعدل التسخين، ومعدل التبريد، والجو الداخلي للفرن. في البداية، تمّ تقديم المفاهيم الأساسية للمعالجة الحرارية، والتحوّلات المعدنيّة التي تطرأ على الفولاذ، بالإضافة إلى أهمّ، والمعالجات (Tempering)، والمراجعة الحرارية (Quenching)، والتقسية (Annealing) العمليات المستخدمة مثل التخمير الحرارية الكيميائيّة. بعد ذلك، تمّ تحليل مختلف أساليب التحسين، إلى جانب أدوات المراقبة والتحكم الحديثة المستخدمة في عمليات المعالجة الحرارية. وقد ساهمت نتائج هذه الدراسة في تحسين التحكم في الدورات الحرارية، وتقليل عيوب التصنيع، وتعزيز أداء المكونات المعالجة حراريّاً.

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Mes sincères remerciements s'adressent tout particulièrement à Monsieur **Bachir Bouiadjra**, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de l'élaboration de ce travail. Son expertise, sa rigueur scientifique et ses orientations pertinentes ont été d'une aide inestimable dans la réussite de ce projet.

Je remercie également l'ensemble des enseignants qui ont participé à ma formation et m'ont transmis les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ce parcours universitaire.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé durant cette période, contribuant ainsi à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à ma chère famille.

À mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements permanents et leur soutien moral tout au long de mes études. Aucun mot ne saurait exprimer ma reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

À mes frères, pour leur affection leur soutien et leur présence à mes côtés dans les moments importants de ma vie.

À tous les membres de ma famille, qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragé à persévérer pour atteindre mes objectifs.

Je dédie également ce travail à Monsieur **Bachir Bouiadjra**, en témoignage de mon profond respect et de ma reconnaissance pour son accompagnement, ses conseils avisés et son dévouement.

À tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin je leur adresse mes plus sincères remerciements.

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	3
DEDICACE	4
SOMMAIRE	5
LISTE DES FIGURES	8
LISTE DES TABLEAUX	8
LISTE DES ABREVIATIONS	9
LISTE DES SYMBOLES	1
Historique perspective	1
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	3
2. Problématique industrielle :	6
2.1.Importance des traitements thermiques dans la fabrication	6
2.2.Enjeux de qualité, coûts énergétiques et productivité.....	8
2.2.1. Influence du traitement thermique sur la qualité des matériaux	8
2.2.2 Rôle de la cinétique des transformations dans les performances du procédé	8
2.2.3 Impact du traitement thermique sur la productivité industrielle	9
2.2.4 Coûts énergétiques associés au traitement thermique.....	9
2.2.5 Synthèse des enjeux industriels	10
2.3 Défis actuels (reproductibilité, consommation d'énergie, distorsions).....	10
Reproductibilité :.....	10
- Contraintes propres :	10
3. Objectifs du projet	13
1. Introduction.....	13
2.1 Les Cinq Paramètres Critiques Identifiés	13
2.2 Méthodes d'Analyse des Paramètres	14
3.1 Propriétés Mécaniques Ciblées	15
3.2 Outils et Méthodes d'Optimisation	15
4.1 Axes de Réduction Énergétique	16
4.2 Objectifs Chiffrés de Réduction.....	17
5.1 Architecture d'un Système de Contrôle en Ligne	18
5.2 Exigences Normatives du Contrôle en Ligne.....	19
5.3 Bénéfices Attendus du Contrôle en Ligne	19
6. Tableau de Synthèse des Quatre Objectifs	20
7. Conclusion	20
CHAPITRE I : PRINCIPES FONDAMENTAUX DES TRAITEMENTS THERMIQUES	21
I.1 Introduction	21

<i>I.2 Transformations de phase.....</i>	<i>21</i>
I.2.1 Dans les aciers — Le diagramme Fer-Carbone	21
I.2.2 Dans les alliages non-ferreux	23
<i>I.3 Recuit, Trempe et Revenu</i>	<i>24</i>
II.3.1 Le recuit	24
II.3.2 La trempe.....	24
II.3.3 Le revenu.....	24
<i>I.4La cinetique des transformations</i>	<i>25</i>
I.4.1 Les diagrammes TTT (Temps-Temperature-Transformation).....	25
I.4.2 Les diagrammes TRC (Transformation en Refroidissement Continu).....	26
I.4.3 Influence des elements d'alliage sur la cinetique	27
<i>I.5 Traitement de surface thermochemiques.....</i>	<i>27</i>
I.5.1 La cementation (carburation)	27
I.5.2 La nitruration	28
I.5.3 La carbonitruration	28
CHAPITRE II : Etat de l'Art.....	29
<i>II.1Introduction.....</i>	<i>29</i>
<i>II.2Fours industriels à atmosphère contrôlée et sous vide.....</i>	<i>29</i>
II.2.1 Principes généraux et classification.....	29
II.2.2 Fours à atmosphère contrôlée	29
II.2.3 Fours sous vide	30
II.2.4 Fours continus et fours à passage	30
<i>II.3Méthode de refroidissement - Trempe.....</i>	<i>31</i>
II.3.1 Principes de la trempe	31
II.3.2 Trempe liquide.....	31
Trempe à l'eau et aux solutions salines.....	31
Trempe à l'huile	31
Trempe en bain de sels fondus	31
II.3.3 Trempe aux polymères	31
II.3.4 Trempe au gaz à haute pression.....	32
<i>II.4Instrumentation et capteurs de mesure</i>	<i>32</i>
II.4.1 Enjeux de la mesure en environnement à haute température	32
II.4.2 Thermocouples	33
II.4.3 Sondes à résistance RTD (Pt100, Pt1000).....	33
II.4.4 Pyromètres infrarouges et imagerie thermique	33
II.4.5 Fibres optiques et capteurs distribués	34
II.4.6 Intégration dans les systèmes de supervision	34
<i>II.5Conclusion.....</i>	<i>34</i>
CHAPITRE III : Méthodes d'optimisation existences.....	35
<i>III.1 Introduction.....</i>	<i>35</i>

III.2	<i>Plans d'expériences appliqués aux traitements thermiques</i>	35
III.2.1	Principes généraux et objectifs	35
	Méthode des surfaces de réponse (MSR) et plan Box-Behnken	35
	Plans de criblage (Plackett-Burman)	36
III.2.3	Exemples d'application aux traitements thermiques	36
	Avantages et limites des plans d'expériences :	36
III.3	<i>Modélisations numériques par éléments finis</i>	36
III.3.1	Principe de la simulation thermo-métallo-mécanique	36
III.3.2	Prédiction des contraintes résiduelles lors de la trempe	37
III.3.3	Logiciels et domaines d'application	37
	Avantages et limites de la modélisation par éléments finis :	38
III.4	<i>Approches fondées sur l'apprentissage automatique et intelligence artificielle</i>	38
III.4.1	Contexte et motivation	38
III.4.2	Principaux algorithmes et leurs applications	38
III.4.3	Application à la nitruration et approches hybrides physique-IA	39
III.4.4	Prédiction de microstructure et conception computationnelle d'alliages	39
	Avantages et limites des approches IA et apprentissage automatique :	40
III.5	<i>Synthèse comparative des trois méthodes</i>	40
	<i>Méthodologie de recherches</i>	40
	<i>Résultats et discussions</i>	49
	<i>CONCLUSION GENERALE</i>	56
	<i>BIBLIOGRAPHIE</i>	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Courbe du traitement thermique.....	6
Figure 2: Différentes zones de contraintes suite à un refroidissement rapide.....	9
Figure 3: Diagramme d'équilibre Fer-Carbone simplifié. [45]	19
Figure 4: Cycle de durcissement structural des alliages d'aluminium.[52]	20
Figure 5: Diagramme TTT schématique pour un acier eutectoïde (0,8 %C).[63].....	22
Figure 6: Diagramme TRC schématique.[68]	23
Figure 7: Comparaison des gradients de dureté obtenus par cémentation,[80]	24
Figure 8: Machine d'essais Servohydrauliques	37
Figure 9: Éprouvette de l'essai traction simple selon la norme ASTM D638 Type5.....	38
Figure 10: Machine de post-traitement.....	38
Figure 11: Four électrique à convection	39
Figure 12: l'effet du traitement thermique sur des échantillons soumis à une contrainte de traction	41
Figure 13: l'effet du traitement thermique sur des échantillons soumis à une contrainte de traction après l'utilisation du rayon ultra-violet	4
2	
Figure 14: Éprouvette de l'essai charpy	43
Figure 15: tableau des données d'entrées et de sortie	45
Figure 16: la valeur optimale après 5000 itérations des contraintes max et résilience max.	46
Figure 17: formule de la prédiction de la contrainte max.....	46
Figure 18: formule de la prédiction de la Résilience	47
Figure 19: La contrainte max en fonction de la capacité thermique et la densité du pla.....	48
Figure 20: La résilience en fonction de la capacité thermique et la densité du pla	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Synthèse des quatre objectifs.....	16
Tableau 2: Synthèse comparative des trois méthodes.....	36
Tableau 3: les valeurs de l'essai de résilience (charpy).....	43
Tableau 4: les valeurs de l'essai de résilience (charpy) après l'utilisation du rayon ultra-violet	43

LISTE DES ABBREVIATIONS

TTT	Temps – Température – Transformation	TRC	Transformation en Refroidissement Continu
CCT	Continuous Cooling Transformation	HV	Dureté Vickers
HRC	Dureté Rockwell C	Re	Limite
	élastique		
Rm	Résistance maximale à la traction	RSM	Response Surface
	Methodology FEM		Finite Element Method DoE
	Design of Experiments		
	ANOVA Analysis of Variance	MSP	Maîtrise Statistique des Procédés
SPC	Statistical Process Control	MEB	Microscopie Électronique à
	Balayage DRX		Diffraction des Rayons XANN
	Artificial Neural Network		
SVM	Support Vector Machine	IEA	International Energy Agency
ADEME	Agence de la Transition Écologique	AMS	Aerospace Material
	Specification		
CQI	Continuous Quality Improvement	ISO	International Organization for Standardization
IIoT	Industrial Internet of Things	IoT	Internet of Things
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	API	Automate Programmable Industriel
PID	Proportionnel – Intégral – Dérivé	IA	Intelligence
	Artificielle TUS		Temperature Uniformity
Survey	ROI Return On Investment		

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Signification
α	Ferrite alpha
A1	Température eutectoïde
Ms	Température de début de transformation martensitique
HV	Dureté Vickers
Re	Limite élastique
K _{1c}	Ténacité à la rupture
KV	Résilience Charpy entaillée
%C	Pourcentage massique de carbone
h	Heure
MWh	Mégawattheure
CO	Monoxyde de carbone
Ar	Argon
Fe ₃ C	Cémentite
Fe ₃ N	Nitride de fer epsilon
Mg ₂ Si	Siliciure de magnésium
±	Plus ou moins
<	Inférieur à

Symbole	Signification
γ	Austénite
AC3	Température critique supérieure
E	Module d'Young
HRC	Dureté Rockwell C
Rm	Résistance maximale à la traction
KCU	Résilience Charpy
°C	Degré Celsius
mm	Millimètre
kW	Kilowatt
CO ₂	Dioxyde de carbone
N ₂	Azote
NH ₃	Ammoniac
Fe ₄ N	Nitride de fer gamma prime
Al ₂ Cu	Composé aluminium-cuivre
MgZn ₂	Composé magnésium-zinc
↓	Diminution
>	Supérieur à

Historique perspective

Prenez quelques instants pour réfléchir à ce que serait votre vie sans tous les matériaux qui existent dans notre monde moderne. Croyez-le ou non, sans ces matériaux, nous n'aurions ni automobiles, ni téléphones portables, ni internet, ni avions, ni maisons confortables avec leurs aménagements, ni vêtements élégants, ni aliments nutritifs (ou même « malbouffe »), ni réfrigérateurs, ni téléviseurs, ni ordinateurs... et la liste continue. Pratiquement chaque aspect de notre vie quotidienne est influencé, à un degré ou à un autre, par les matériaux. Sans eux, notre existence ressemblerait beaucoup à celle de nos ancêtres de l'Âge de pierre.

Historiquement, le développement et le progrès des sociétés ont été étroitement liés à la capacité de leurs membres à produire et à manipuler des matériaux pour répondre à leurs besoins. En effet, les premières civilisations ont été désignées en fonction de leur niveau de développement des matériaux (Âge de pierre, Âge du bronze, Âge du fer).

Les premiers êtres humains n'avaient accès qu'à un nombre très limité de matériaux, ceux qui existaient naturellement : la pierre, le bois, l'argile, les peaux, etc. Avec le temps, ils ont découvert des techniques permettant de produire des matériaux ayant des propriétés supérieures à celles des matériaux naturels ; ces nouveaux matériaux comprenaient la poterie et divers métaux. De plus, il a été découvert que les propriétés d'un matériau pouvaient être modifiées par des traitements thermiques et par l'ajout d'autres substances. À ce stade, l'utilisation des matériaux consistait essentiellement en un processus de sélection : il s'agissait de choisir, parmi un ensemble relativement restreint de matériaux disponibles, celui qui convenait le mieux à une application donnée en fonction de ses caractéristiques.

Ce n'est que relativement récemment que les scientifiques ont compris les relations entre la structure interne des matériaux et leurs propriétés. Ces connaissances, acquises au cours des cent dernières années environ, leur ont permis de concevoir et d'adapter, dans une large mesure, les caractéristiques des matériaux. Ainsi, des dizaines de milliers de matériaux différents ont été développés, présentant des propriétés hautement spécialisées répondant aux besoins de notre société moderne et complexe, notamment les métaux, les plastiques, les verres et les fibres.

Le développement de nombreuses technologies qui rendent notre existence si confortable a été étroitement lié à la disponibilité de matériaux appropriés. Une avancée dans la compréhension d'un type de matériau précède souvent le progrès progressif d'une technologie. Par exemple, les automobiles n'auraient pas été possibles sans la disponibilité d'un acier peu coûteux ou d'un autre matériau équivalent. À l'ère contemporaine, les dispositifs électroniques sophistiqués reposent sur des composants fabriqués à partir de matériaux dits semi-conducteurs. [1]

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le traitement thermique constitue une étape essentielle dans les procédés de fabrication des matériaux métalliques, en particulier des aciers. Il s'agit d'un ensemble d'opérations contrôlées de chauffage, de maintien à température et de refroidissement, destinées à modifier la microstructure d'un matériau afin d'améliorer ses propriétés mécaniques, physiques et technologiques.

Contrairement aux procédés de mise en forme, le traitement thermique ne change pas la géométrie de la pièce, mais agit directement sur son organisation interne (structure cristalline et phases métallurgiques), ce qui influence des caractéristiques telles que la dureté, la résistance mécanique, la ténacité et la ductilité.

Dans le contexte industriel moderne, l'analyse et l'optimisation du procédé de traitement thermique sont devenues indispensables pour garantir la qualité des produits, réduire les coûts de production et améliorer la performance globale des systèmes mécaniques.

L'évolution des exigences techniques dans des secteurs comme l'automobile, l'aéronautique et l'énergie impose un contrôle rigoureux des paramètres du procédé : température de chauffage, durée de maintien, vitesse de refroidissement et atmosphère du four.

Une maîtrise insuffisante de ces paramètres peut entraîner des défauts tels que des fissurations, des déformations ou des contraintes résiduelles, compromettant ainsi la fiabilité des composants.

Les principes scientifiques du traitement thermique reposent sur la métallurgie physique, notamment l'étude des diagrammes d'équilibre et des transformations de phases, comme celles décrites dans le diagramme fer-carbone. Les transformations telles que la formation de la martensite, de la perlite ou de la bainite sont au cœur des mécanismes qui déterminent les propriétés finales des aciers.

Par conséquent, l'optimisation du procédé nécessite une approche intégrée combinant expérimentation, modélisation thermique et outils statistiques tels que les plans d'expériences.

Ainsi, l'analyse et l'optimisation du traitement thermique ne se limitent pas à un simple réglage des paramètres industriels ; elles constituent une démarche scientifique et technique visant à assurer la performance, la durabilité et la compétitivité des produits manufacturés. [2]

Le développement et le progrès des sociétés humaines ont de tout temps été intimement liés à leur capacité à maîtriser et à façonner les matériaux pour répondre à leurs besoins, au point que les grandes ères de notre histoire portent le nom des composants qui les ont définis : l'Âge de pierre, l'Âge du bronze, puis l'Âge du fer. Dans notre monde contemporain, chaque avancée technologique majeure

- qu'il s'agisse de l'industrie automobile, de l'aéronautique, des télécommunications ou de l'énergie

- demeure tributaire de la disponibilité de matériaux aux caractéristiques de plus en plus spécialisées et performantes.

Parmi les techniques permettant de moduler et d'exalter les performances des métaux, le traitement thermique s'impose comme une étape cardinale et incontournable des procédés de fabrication métallurgique. Il se définit comme un cycle contrôlé d'opérations combinant le chauffage, le maintien à une température donnée et le refroidissement d'un matériau. Contrairement aux procédés de mise en forme mécanique tels que le forgeage ou l'usinage, le traitement thermique présente la particularité remarquable de transfigurer les propriétés mécaniques, physiques et technologiques de la pièce sans en altérer la géométrie initiale. En agissant directement sur l'organisation atomique interne, la structure cristalline et les équilibres des phases métallurgiques, il permet d'ajuster avec précision des caractéristiques fondamentales telles que la dureté, la ductilité, la ténacité et la résistance mécanique. Cependant, dans un contexte de production moderne, la gestion de ce procédé fait face à une triple problématique industrielle particulièrement complexe :

Un impératif de qualité et de reproductibilité : Les transformations de phase au cœur du matériau exigent un contrôle rigoureux et sans faille des paramètres opérationnels (température de consigne, cinétique de chauffe, temps de maintien, vitesse de refroidissement et nature chimique de l'atmosphère du four). Une dérive, même mineure, de ces variables peut induire des microstructures indésirables ou générer de violents gradients thermiques, provoquant des défauts rédhibitoires tels que des tapures de trempe, des contraintes résiduelles internes nocives ou des distorsions géométriques.

Un enjeu de productivité : Atteindre l'état microstructural ou l'équilibre thermodynamique souhaité requiert des cinétiques de diffusion atomique qui s'étalent inévitablement dans le temps. La longueur de ces cycles thermiques (chauffage, stabilisation, refroidissement) bride considérablement les cadences de production, faisant de l'optimisation temporelle des cycles un levier majeur de compétitivité.

Le défi de l'efficacité énergétique et de la décarbonation : Par nature thermo-intensif, le traitement thermique nécessite le maintien de charges massives à de très hautes températures (souvent entre 850 °C et 1050 °C) pendant plusieurs heures, ce qui engendre d'importantes factures énergétiques et une empreinte carbone conséquente. Face aux exigences environnementales actuelles, la réduction de la consommation et la chasse aux pertes thermiques sont devenues des priorités absolues.

Pour répondre à ces défis croisés, l'ingénierie moderne a dépassé le stade empirique de la simple sélection de recettes industrielles pour s'approprier une démarche scientifique intégrée. L'analyse et l'optimisation des procédés s'appuient aujourd'hui sur une synergie puissante entre l'expérimentation physique, la planification statistique via les plans d'expériences (DoE), la simulation numérique par

éléments finis (MEF) et, plus récemment, l'apport de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle.

Objectifs et structure du projet

S'inscrivant pleinement dans cette dynamique d'innovation et d'optimisation, ce projet de fin d'études se donne pour objectif d'analyser en profondeur les mécanismes des traitements thermiques afin de proposer des solutions concrètes permettant d'accroître la qualité des pièces manufacturées, d'optimiser le rendement industriel et de minimiser l'impact énergétique du procédé.

Pour mener à bien cette étude, notre cheminement est structuré en plusieurs axes :

- Les Fondements Métallurgiques (Chapitre I) : Une présentation rigoureuse des notions de base liées aux traitements thermiques, détaillant les diagrammes d'équilibre fer-carbone, la cinétique des transformations (diagrammes TTT et TRC) ainsi que les grands procédés classiques (recuit, trempe, revenu) et les traitements thermochimiques superficiels.
- L'État de l'Art et de l'Instrumentation (Chapitre II) : Un panorama des technologies actuelles de fours industriels (à atmosphère contrôlée ou sous vide), des milieux de trempe modernes et des chaînes de capteurs indispensables pour assurer le suivi et la régulation précise du procédé.
- Les Méthodes d'Optimisation Existantes (Chapitre III) : Une analyse comparative des outils d'optimisation mathématiques et numériques, évaluant l'apport des plans d'expériences, de la simulation numérique thermo-métallo-mécanique et des algorithmes d'apprentissage automatique.
- La Méthodologie Expérimentale, Résultats et Discussions (Chapitres IV & V) : La mise en œuvre pratique de nos travaux à travers des essais de caractérisation mécanique (traction, résilience Charpy), corrélés à des modèles de prédiction et des algorithmes d'optimisation, afin de valider concrètement les gains de performance et d'efficacité visés.

2. Problématique industrielle :

2.1. Importance des traitements thermiques dans la fabrication

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- A. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- B. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- C. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

Cet ouvrage traite les fondements technologiques des traitements thermiques des aciers ainsi que leurs classifications, leurs désignations et leurs utilisations. Il expose en détail les aspects purement métallurgiques des traitements thermiques. L'étudiant aura à s'imprégner de l'ensemble des techniques et modes des traitements thermiques ainsi que les transformations structurales et modification des caractéristiques qui les accompagnent.

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but :

- D. D'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes :
 - Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique R_m , R_e , $A\%$ en donnant une meilleure tenue de l'élément.
 - Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs.
- E. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage.
- F. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant subi une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité. Les

traitements thermiques sont appliqués surtout aux aciers XC et aciers alliés ZR alliages non ferreux. En général les traitements thermiques ne changent pas la composition chimique de l'alliage.

Définitions et procédés des traitements thermiques

Effectuer un traitement thermique sur une pièce, c'est faire subir à celle-ci une variation de la température en fonction du temps. Le procédé de traitement thermique se compose de (fig. 1).

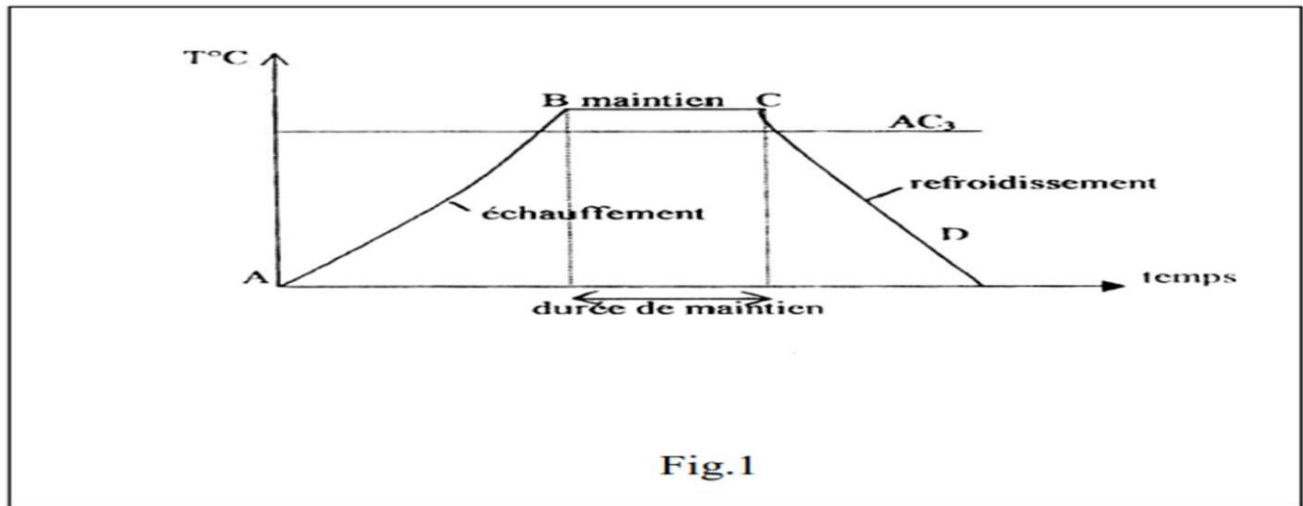


Figure 1: Courbe du traitement thermique

- AB : L'échauffement à des températures supérieures aux températures de transformation (par exemple : AC_3).
- BC : Maintient à une température définie.
- CD : Refroidissement avec une vitesse donnée :
 - lente (dans le four, à l'air).
 - Assez rapide (dans l'huile).
 - Très rapide (dans l'eau). [3] [4] [5]

2.2. Enjeux de qualité, coûts énergétiques et productivité

2.2.1. Influence du traitement thermique sur la qualité des matériaux

Traitement thermique est une opération essentielle dans la production de matières métalliques, car elle offre la possibilité de changer la structure interne de la matière sans modifier sa géométrie. Cet état de microstructure est en grande partie due aux phénomènes de transformation de phase qui se produisent pendant les phases de chauffage et de refroidissement, qui ont une incidence directe sur les caractéristiques de la matière, comme la dureté, la résistance mécanique, la ductilité et la ténacité.

Ainsi, la microstructure de la matière est en grande partie déterminée par le type de traitement thermique, qui inclut la température, la durée pendant laquelle la matière est maintenue à la température choisie, et la vitesse de refroidissement. Le contrôle rigoureux de ces paramètres offre la possibilité de créer une microstructure spécifique de la matière (perlite, bainite, martensite) qui est adaptée aux besoins de ses utilisations futures. Cependant, si ce contrôle n'est pas réalisé correctement, il peut aboutir à la création d'une structure microscopique non désirée, ce qui conduit à une perte de caractéristiques mécaniques et réduit la fiabilité de la pièce.

Compte tenu du fait que la transformation de phase est au centre de la gestion des propriétés des matières, on peut dire que la qualité finale en dépend directement du traitement thermique.[7]

2.2.2 Rôle de la cinétique des transformations dans les performances du procédé

Il est important de noter que le changement de phase n'occupe pas de temps. Il a besoin d'un certain délai, c'est pourquoi il est essentiel de comprendre l'importance de la cinétique de transformation. Elle dépend en grande partie de l'efficacité de la diffusion atomique et de l'initiation et du développement de la phase.

C'est pour cela que le processus de transformation de la matière est directement lié à la température. Lorsque la température est élevée, la diffusion de la matière augmente et, donc, elle se transforme plus rapidement.

Dans le cas contraire, lorsque la température est basse, la transformation se produit plus lentement. Il est donc possible de prévoir la formation de la microstructure par l'étude des diagrammes isothermes (diagramme TTT ou CCT).

En comprenant la cinétique de transformation, il est nécessaire de contrôler le traitement thermique pour obtenir des propriétés de matériau souhaitées. [8]

2.2.3 Impact du traitement thermique sur la productivité industrielle

L'efficacité des procédés industriels est étroitement liée à la durée des cycles de traitement thermique. En raison de la nécessité de passer par différentes phases jusqu'à obtenir un équilibre ou une métastabilité de l'état, le cycle de traitement comprend plusieurs périodes telles que la chauffe, la stabilisation, le refroidissement, qui est assez longues.

Cette limitation de durée est un frein important aux taux de productivité des entreprises industrielles qui passent par des opérations de traitement thermique. Outre cette difficulté, l'impossibilité d'obtenir instantanément l'équilibre thermodynamique impose un contrôle très strict des paramètres de traitement pour éviter certains défauts de microstructure.

Compte tenu de l'état d'équilibre, qui est généralement atteint à la suite d'un certain temps, il s'agit d'un état qui dépend de différents paramètres. Cela fait que tout processus de traitement thermique qui pourrait améliorer l'équilibre de l'état en accélérant son arrivée serait favorable à l'amélioration de la productivité. En outre, un mauvais processus de traitement thermique engendrerait des défauts qui nécessiteraient des réparations et qui seraient des rebuts, diminuant donc l'efficacité générale du processus industriel.[9]

2.2.4 Coûts énergétiques associés au traitement thermique

Le traitement thermique est une méthode énergivore car elle demande des températures élevées et des durées de maintien relativement longues afin d'obtenir une transformation de phase. Si la nature énergétique n'est pas précisée, cela reste compréhensible de la description des différentes étapes de ce processus.

En effet, le chauffage des pièces de fermeture métalliques demande une consommation importante d'énergie, qui est encore plus importante si on tient compte des pertes d'énergie des appareils et du milieu environnant. De plus, le fait que les cycles soient longs implique une consommation importante d'énergie, augmentant ainsi son coût total.

C'est pourquoi l'objectif est de faire des durées de traitement et des cycles thermiques optimisés, afin de limiter la consommation d'énergie. Par conséquent, la gestion du traitement thermique ne se résume pas à la qualité des matériaux mais englobe aussi la dimension économique et énergétique. [10]

2.2.5 Synthèse des enjeux industriels

Le traitement thermique est une question importante qui relie plusieurs aspects industriels cruciaux. Tout d'abord, le traitement thermique est indispensable au maintien de la qualité matérielle, notamment grâce au contrôle des structures et aux propriétés mécaniques.

Ensuite, il a un impact direct sur la productivité, car le temps des processus thermiques dépend de la dynamique des processus.

Finalement, le traitement thermique est une source de dépenses de ressources énergétiques importantes, en raison des conditions de température élevées.

Par conséquent, l'amélioration du traitement thermique est devenue une nécessité pour équilibrer ces questions. La connaissance des processus de transformation et le contrôle des paramètres opérationnels permettent d'optimiser la qualité des produits, la dépense de ressources et la productivité.[10]

2.3 Défis actuels (reproductibilité, consommation d'énergie, distorsions)

Reproductibilité :

Les principaux défauts provoqués par les traitements thermiques des pièces peuvent être résumés en trois points :

- Contraintes propres :

Provoquées par les gradients de température au chauffage et au refroidissement entre les divers points de la pièce. Pour le chauffage, il faudrait que la montée en température dans le four soit faible. Pour le refroidissement, il faudrait que la vitesse soit faible pour réduire le gradient de température, mais pas trop afin d'éviter toute transformation indésirable.

- Tapes (fissures) :

Elles se forment le plus souvent au cours de la trempe. Pour parer à ce défaut incorrigible, on recommande lors du projet des pièces, d'éviter les saillies, les angles vifs, les raccordements brusques etc., de refroidir modérément en utilisant une trempe à deux bains.

- Déformations et gauchissements :

Concernent surtout les pièces trempées à cause du refroidissement qui n'est pas homogène. Au début, seules les couches externes se refroidissent et donc se transforment en martensite, ce qui provoque des contraintes de traction sur le cœur de la pièce qui est encore plastique. Puis les couches internes se transforment à leur tour, la dilatation correspondante, peut exercer sur les couches superficielles plus froides, donc peu plastiques, un effort de traction, le cœur étant en état de compression, voir figure 2.

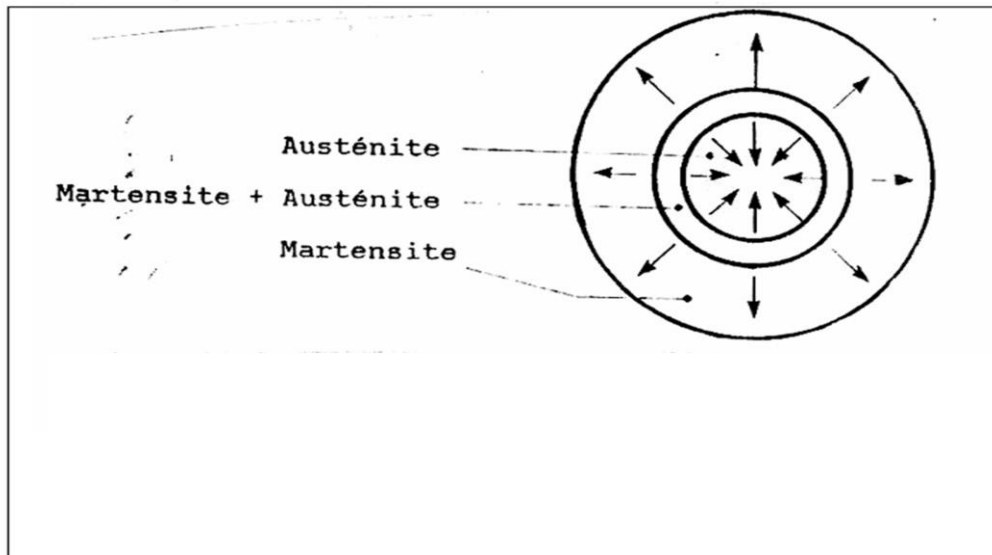


Figure 2: Différentes zones de contraintes suite à un refroidissement rapide

Les contraintes propres peuvent dépasser la limite élastique et induire des déformations permanentes qui se traduisent par des déformations externes des pièces. [11]

La Consommation d'Énergie :

Le Poids de la Décarbonation

Le processus de chauffage est une étape particulièrement consommatrice d'énergie dans l'industrie métallurgique, car elle implique de garder les métaux sous une très forte chaleur pour des heures (typiquement entre 850°C et 1050°C).

Inertie Thermique : Un énorme nombre d'unités d'énergie sont employées pour chauffer les murs du four et les équipements de montage plutôt que les composants eux-mêmes.

Déperdition par Fumée : Dans le cas des fours alimentés au gaz, beaucoup de calories sont perdues par les cheminées lorsqu'il n'y a pas de système de récupération.

Problème du "Maintien" : Il est nécessaire de maintenir les fours en état chaud lors de périodes de temps mort (par exemple, week-ends ou changements de gammes) où l'énergie grise n'a aucune valeur de production supplémentaire.

Transitions Énergétiques : Pour passer de l'énergie gazeuse aux sources électriques ou à l'hydrogène, il est nécessaire d'effectuer de lourds investissements et de modifier la conception complète des brûleurs et des résistances. [12] [13]

Les Distorsions :

La Bataille Contre les Contraintes

La distorsion est la déformation involontaire de la forme et/ou des dimensions de la pièce au cours du processus thermique. C'est la plus grande bataille pour modéliser.

La surprise thermique pendant la trempe : Le changement brusque d'état de chaud vers froid conduit à des gradients de température dans la pièce. Il y a contraction de la surface en comparaison avec la zone centrale, conduisant à de fortes contraintes mécaniques internes.

Les transformations de phase : La transition de l'austénite à la martensite est accompagnée d'une expansion volumique. S'il n'y a pas de transformation de phase uniforme dans tout le corps, la pièce sera soit voilée, soit fissurée.

L'influence de la géométrie de la pièce : L'utilisation de pièces complexes (différenciation d'épaisseur, trous et rainures) mène à un comportement inégal au cours du refroidissement, augmentant la distorsion.

Le prix payé par le traitement ultérieur : Toutefois, si la pièce subit des distorsions après le processus de trempe, cela nécessitera un procédé de redressement (mécanisation finie). Dans certains cas, une distorsion excessive de la pièce entraîne un taux de profondeur nul du revêtement durci. [14] [15]

3. Objectifs du projet

1. Introduction

Le traitement thermique est un procédé de fabrication dont la maîtrise conditionne directement les propriétés microstructurales et mécaniques des pièces produites. Dans un contexte industriel marqué par l'intensification des exigences qualité, la hausse des coûts énergétiques et l'essor de l'industrie 4.0, l'optimisation de ce procédé représente un enjeu stratégique et économique majeur.

Les quatre objectifs du projet s'articulent de manière cohérente et progressive : partir de l'analyse rigoureuse des paramètres critiques, aboutir à l'optimisation des cycles, réduire l'impact environnemental et économique, puis pérenniser les acquis grâce à des outils de contrôle en ligne autonomes et intelligents.

Ces objectifs rejoignent les axes prioritaires définis par les organismes internationaux : **l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA)** en matière d'efficacité industrielle, **l'ADEME** pour la transition énergétique, et les référentiels normatifs **AMS 2750, CQI-9, ISO 9001** pour la qualité des traitements thermiques.[16]

2. Analyser les paramètres critiques du procédé

L'analyse des paramètres critiques constitue le fondement scientifique de tout travail d'optimisation. Sans une identification et une quantification rigoureuse des facteurs qui gouvernent le procédé, toute démarche d'amélioration reste empirique et peu reproductible. Les procédés de traitement thermique mettent en jeu des phénomènes physico-chimiques complexes et fortement couplés : **transferts thermiques, transformations de phases, diffusion des éléments d'alliage, évolution des contraintes résiduelles**. Ces phénomènes sont pilotés par cinq familles de paramètres interdépendants. [17]

2.1 Les Cinq Paramètres Critiques Identifiés

a) Température de traitement

La température est le paramètre le plus déterminant. Elle conditionne la nature des phases formées (austénite, martensite, bainite, perlite), la taille des grains et les propriétés mécaniques finales. Pour les aciers, les plages typiques vont de 750 à 1050 °C selon le traitement visé.

Le but de la trempe est une augmentation de la dureté de l'acier (on passe de **200 < HV < 250 à HV minimum 550**), avec également une amélioration de la limite élastique (Re), la résistance maximale (Rm) et le module d'Young (E). [18]

b) Vitesse de chauffe

La vitesse de chauffe doit assurer une répartition uniforme de la température dans toute la pièce. Trop rapide, elle risque de provoquer un choc thermique ou des fissures par dilatation différentielle. Sa maîtrise est particulièrement critique pour les pièces de grande section ou de géométrie complexe.

c) Vitesse de refroidissement

La vitesse de refroidissement sélectionne la microstructure finale. Une vitesse supérieure à la vitesse critique de trempe empêche la diffusion du carbone et conduit à la formation de martensite dure mais fragile. Les milieux de trempe (eau, huile, polymère, gaz) offrent des sévérités très différentes. [20]

d) Durée des paliers

La durée de maintien garantit l'homogénéité de la transformation microstructurale. Une durée insuffisante produit une austénitisation incomplète ; une durée excessive entraîne la croissance des grains et une surconsommation d'énergie. Règle empirique : 1 heure par 25 mm de section. [21]

e) Composition de l'atmosphère

L'atmosphère du four est une variable de procédé critique. Neutre (N_2 , Ar, vide), elle protège la surface des pièces. Réactive (CO/C_xH_y pour la cémentation, NH_3 pour la nitruration), elle enrichit la surface en éléments d'alliage pour améliorer la dureté superficielle et la résistance à la fatigue. [22]

2.2 Méthodes d'Analyse des Paramètres

L'analyse des paramètres critiques repose sur plusieurs approches complémentaires :

- Plans d'expériences (DoE) : plans de Taguchi, plans factoriels complets ou fractionnaires, plans de surface de réponse (Box-Behnken, Central Composite Design) pour identifier et quantifier les effets principaux et les interactions.
- Analyse de variance (ANOVA) : décomposition de la variabilité totale pour déterminer la contribution statistique de chaque facteur (seuil de signification $\alpha = 5\%$).
- Maîtrise statistique des procédés (MSP/SPC) : cartes de contrôle Shewhart pour surveiller la stabilité du procédé en production.
- Caractérisation expérimentale : essais de dureté Vickers, essais de traction, résilience Charpy, microscopie optique et électronique à balayage (MEB), diffraction des rayons X (DRX) pour mesure des contraintes résiduelles. [23]

3. Optimiser les cycles thermiques pour améliorer les propriétés mécaniques

L'optimisation des cycles thermiques vise à définir les conditions opératoires qui maximisent simultanément plusieurs propriétés mécaniques — dureté, résistance à la traction, ténacité, résistance à la fatigue — tout en respectant les contraintes dimensionnelles (distorsion, contraintes résiduelles) et les spécifications normatives.

Le traitement cryogénique, par exemple, peut **prolonger la durée de vie des pièces entre 200 et 400 %** en complétant la transformation martensitique et en réduisant l'austénite résiduelle, ce qui illustre le potentiel considérable des cycles thermiques optimisés. [24]

3.1 Propriétés Mécaniques Ciblées

Les propriétés mécaniques améliorables par l'optimisation des cycles thermiques couvrent l'ensemble du cahier des charges mécanique d'une pièce industrielle :

- Dureté (HRC, HV) : résistance à la pénétration, indicateur de l'état microstructural — martensite revenue optimale pour aciers de construction entre 55 et 62 HRC.
- Résistance à la traction (R_m) et limite élastique (R_e) : déterminées par l'état de précipitation et la densité de dislocations — optimisables par le cycle trempe-revenu.
- Résilience / Ténacité (KCU, KV, K_{Ic}) : capacité à absorber l'énergie avant rupture — améliorée par le revenu à haute température au détriment de la dureté.
- Résistance à la fatigue : fortement influencée par les contraintes résiduelles de compression en surface, obtenues par la trempe localisée ou la nitruration.
- Résistance à l'usure : gouvernée par la dureté superficielle et la nature des phases en surface — optimisée par cémentation, nitruration ou traitement cryogénique. [25]

3.2 Outils et Méthodes d'Optimisation

a) Méthode des surfaces de réponse (RSM)

La méthode RSM permet de construire un modèle polynomial reliant les paramètres d'entrée (température, durée, milieu de trempe) aux réponses (dureté, distorsion). L'optimisation mathématique de ce modèle identifie les conditions qui maximisent les propriétés souhaitées. [26]

b) Simulation numérique par éléments finis (FEM)

Des logiciels spécialisés comme SIMHEAT®, SYSWELD (ESI Group), DANTE permettent de simuler tous les cycles thermiques : chauffe, trempe, recuit, revenu, cémentation, nitruration et refroidissement contrôlé. La solution est prédictive car les paramètres du four sont utilisés tels quels comme données d'entrée pour prédire les propriétés métallurgiques de la pièce.

La simulation donne des informations détaillées sur le gradient de température entre la surface et le noyau, sur les zones de transformation de phase, sur les distorsions géométriques et les contraintes résiduelles, permettant d'optimiser virtuellement le cycle avant toute expérimentation. [27]

c) Machine Learning et réseaux de neurones

Les modèles de machine Learning — réseaux de neurones artificiels (ANN), forêts aléatoires, machines à vecteurs de support (SVM) — permettent de modéliser des relations non-linéaires complexes entre les paramètres et les propriétés finales. L'IRT M2P développe des modèles capables de prédire les phases de l'acier grâce au machine Learning, exploitant les données EBSD pour distinguer les phases avec une analyse plus précise que les images métallographiques. [28]

d) Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes génétiques et les méthodes d'essaim particulière permettent d'explorer des espaces de solutions complexes pour identifier des cycles thermiques multi-objectifs optimaux : par exemple, maximiser simultanément la dureté superficielle et la ténacité à cœur tout en minimisant les distorsions

4. Réduire la consommation énergétique et les déchets

Dans le paysage industriel, les procédés thermiques constituent le **premier poste de consommation énergétique**.

La production de chaleur représente souvent plus de 60 % de la facture énergétique d'un site industriel, et parfois jusqu'à 80 % dans les secteurs thermo-intensifs comme la métallurgie.

Le parc de fours industriels est souvent vieillissant, avec des rendements thermiques médiocres, **souvent inférieurs à 40 %**. Cela signifie concrètement que 60 % de l'énergie consommée est perdue : une partie part dans les fumées à haute température, et l'autre se dissipe à travers les parois du four mal isolées.

Des études menées par le CETIAT, GRDF et ALLICE estiment que jusqu'à **30 % de l'énergie d'un four industriel peut être perdue** sous forme de chaleur fatale, principalement par rayonnement ou conduction à travers des parois mal isolées. [30]

4.1 Axes de Réduction Énergétique

a) Optimisation des profils de chauffe

L'optimisation des cycles thermiques pour minimiser les remises en température est l'un des leviers les plus efficaces et les moins coûteux. Une montée en température étagée (préchauffage à 400–650 °C puis chauffe finale) réduit la consommation spécifique de 15 à 20 % par rapport à une montée directe en éliminant les gradients thermiques excessifs.

Les progrès récents dans la surveillance de la puissance en ligne ont permis de reconnaître automatiquement le point d'homogénéisation thermique de la charge grâce à un algorithme de contrôle de l'état stationnaire agissant sur la dérivée de la consommation d'énergie — ce qui réduit les temps de traitement et améliore l'utilisation des installations. [31]

b) Amélioration de l'isolation thermique

Le remplacement d'un garnissage brique par un **garnissage fibreux (fibre céramique, laine de roche haute densité)** sur un four de traitement thermique intermittent permet souvent de réduire la consommation de 15 à 20 % simplement en réduisant l'énergie nécessaire pour chauffer le four lui-même.

Cas concret documenté : un four de 800 kW datant de 1995, après remplacement du garnissage brique par de la fibre céramique et installation de 4 brûleurs haute vitesse auto-récupérateurs, a vu son temps de montée en température divisé par 2 et sa consommation gaz réduite de 35 %, avec un ROI de 18 mois après prime CEE. [32]

c) Récupération de chaleur fatale

Les fumées sortant des fours à plus de 200–500 °C représentent une énergie considérable. L'échangeur air-fumées préchauffe l'air de combustion avec la chaleur des fumées, avec un gain énergétique de 15 à 25 % selon la configuration.

Exemple industriel : sur des fours à atmosphère contrôlée riche en hydrogène avec récupérateur indirect, l'air de combustion préchauffé à 538 °C (1 000 °F) a permis une économie d'énergie de 31 %, avec une période de retour sur investissement de 3,6 ans. [33]

d) Réduction des déchets (rebuts et retouches)

L'optimisation du procédé thermique réduit directement la non-qualité. Chaque pièce rebutée représente non seulement la perte de sa valeur ajoutée, mais aussi l'ensemble de l'énergie consommée lors de sa fabrication. Les actions visent :

- Réduction des distorsions : par l'optimisation de la trempe (milieu, agitation, température bain) et le recours à la trempe gaz sous vide.
- Réduction de la décarburation et de l'oxydation : par le contrôle de l'atmosphère du four.
- Optimisation des charges de four : maximiser le taux de remplissage utile pour réduire la consommation spécifique par pièce.
- Maintenance prédictive : anticiper les dérives d'équipements pour éviter les non-conformités de lot. [34]

4.2 Objectifs Chiffrés de Réduction

Les études et retours d'expérience industriels convergent vers des objectifs de réduction réalistes avec les technologies actuelles : 20 à 30 % de réduction de la consommation spécifique avec les bonnes optimisations ; jusqu'à 35 % sur les installations les plus anciennes.

Un four à gaz consommant 1 000 MWh/an, avec un rendement de 70 %, permet par une réduction des pertes thermiques de 20 % d'économiser 60 MWh et d'éviter environ 14 tonnes de CO₂ sur le Scope 1 (facteur d'émission du gaz : 0,227 kgCO₂/kWh selon l'ADEME). [35]

5. Développer des méthodes de contrôle en ligne

Le contrôle en ligne (ou contrôle en temps réel) est le stade ultime de la maîtrise d'un procédé industriel. Il permet de détecter les dérives, d'ajuster automatiquement les paramètres et de garantir la conformité de chaque lot sans attendre les résultats des essais post-traitement.

L'Internet Industriel des Objets (IIoT) transforme la fabrication industrielle d'un modèle linéaire à un modèle dynamique. La collecte de données en temps réel, surveillée par des seuils précis, crée un système de contrôles et d'équilibres constants, offrant une couverture permanente indépendante de l'attention humaine. [36]

5.1 Architecture d'un Système de Contrôle en Ligne

a) Couche capteurs et instrumentation

La base du système repose sur des capteurs précis et fiables disposés stratégiquement dans le four et sur les pièces :

- Thermocouples de type K, N, S, R : mesure de température jusqu'à 1 600 °C, avec identification électronique unique (numéro de série, certificat usine intégré), paramètres de diagnostic et historique de fonctionnement via IO-Link.
- Sondes PT100/PT1000 intelligentes : précision $\pm 0,1$ °C, connectées via IO-Link à la plateforme IIoT, avec alertes automatiques en cas de dérive détectée.
- Sonde lambda (oxygène) ou analyseur infrarouge CO/CO₂ : contrôle du potentiel carbone pour les traitements de cémentation.
- Pyromètres optiques et infrarouges : mesure sans contact pour zones difficilement accessibles ou pièces en mouvement.

Les sondes modernes disposent d'une identification électronique unique, de paramètres de diagnostic (temps de réponse, linéarité, auto-tests périodiques) et d'un historique de fonctionnement. Connectées via IO-Link à la plateforme IIoT, elles génèrent des alertes automatiques en cas de dérive. [37]

b) Couche acquisition et supervision (SCADA)

Les systèmes SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) et les automates programmables industriels (API) avec régulation PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) permettent de maintenir les conditions de fonctionnement optimales, d'enregistrer les paramètres de procédé pour la traçabilité et de déclencher des alarmes en cas de dépassement de seuils.

La surveillance 24h/24 et 7j/7 des équipements, avec alertes en temps réel en cas de données anormales, interaction directe avec le superviseur, et monitoring du matériel sur le long terme, constitue la colonne vertébrale du contrôle en ligne. [38]

c) Couche analytique — Intelligence Artificielle et Jumeaux Numériques

L'intégration de solutions d'**intelligence artificielle (IA)** et de **jumeaux numériques** pour la modélisation prédictive et l'optimisation dynamique des cycles constitue le niveau le plus avancé du contrôle en ligne.

Un jumeau numérique est un modèle informatique en temps réel du four et de la charge, alimenté par les données capteurs, capable de prédire les propriétés finales des pièces dès les premières minutes du cycle et d'ajuster automatiquement les consignes pour atteindre les cibles fixées.

Les entreprises qui mettent en œuvre la maintenance prédictive avec des capteurs IoT bénéficient d'une expérience allant jusqu'à **25 % moins de temps d'arrêt des équipements** et **10 à 20 % de réduction des coûts de maintenance** (Aberdeen Group). [39]

5.2 Exigences Normatives du Contrôle en Ligne

Le contrôle en ligne des traitements thermiques est encadré par des normes strictes qui définissent les exigences de qualification des équipements et d'instrumentation :

- AMS 2750E (SAE International) : pyrométrie — qualification des thermocouples, fréquence de calibration, uniformité de température dans les fours (TUS : Temperature Uniformity Survey).
- CQI-9 (AIAG) : évaluation des systèmes de traitement thermique pour l'industrie automobile — exigences de surveillance, d'enregistrement et de traçabilité.
- EN 9100:2018 : management de la qualité en aéronautique — exigences de maîtrise des procédés spéciaux incluant les traitements thermiques.
- ISO 9001:2015 : exigences générales de surveillance et mesure des procédés — applicable à tous les secteurs. [40]

5.3 Bénéfices Attendus du Contrôle en Ligne

- Reproductibilité totale : chaque cycle est enregistré, validé et tracé — garantie de conformité lot par lot.
- Réactivité immédiate : détection et correction des dérives en quelques secondes, avant qu'elles n'affectent la qualité des pièces.
- Réduction des contrôles destructifs post-traitement : le contrôle en ligne prédit les propriétés finales sans nécessiter d'essais systématiques.
- Optimisation continue : les données accumulées alimentent des modèles d'apprentissage qui affinent automatiquement les recettes de traitement.
- Traçabilité réglementaire : conformité aux normes AMS 2750, CQI-9 et EN 9100 grâce à l'enregistrement automatique de tous les paramètres. [41]

6. Tableau de Synthèse des Quatre Objectifs

Le tableau ci-dessous récapitule les quatre objectifs avec leurs actions clés, indicateurs de succès et outils associés :

Tableau 1: Synthèse des quatre objectifs

Analyse des paramètres	Mesure, cartographie, plans d'expériences	Identification des facteurs influents ($\alpha \geq 95\%$)	DoE, ANOVA, MSP
Optimisation des cycles	Modélisation FEM, RSM, algorithmes évolutionnaires	Dureté cible ± 2 HRC, distorsion $< 0,05$ mm	SYSWELD, DANTE, réseau de neurones
Réduction énergétique	Audit, isolation, récupérateur de chaleur	$\downarrow$ 20–30% consommation spécifique	IEA, CEE, audit ADEME
Contrôle en ligne	Capteurs IoT, SCADA, jumeaux numériques	Détection dérive $< 2^\circ\text{C}$, traçabilité 100%	IIoT, IA, AMS 2750

7. Conclusion

Les quatre objectifs du projet forment une démarche cohérente et progressive qui va de la compréhension scientifique du procédé à son contrôle intelligent en production. Chacun est justifié par des enjeux industriels documentés et s'appuie sur des méthodes et outils éprouvés.

L'objectif 1 (analyse des paramètres) fournit la base de données expérimentale nécessaire à toute démarche d'optimisation. L'objectif 2 (optimisation des cycles) exploite cette base pour définir les conditions optimales via des outils numériques et statistiques avancés. L'objectif 3 (réduction énergétique) s'appuie sur les cycles optimisés pour minimiser les pertes et réduire l'impact environnemental. Enfin, l'objectif 4 (contrôle en ligne) pérennise les acquis grâce à une instrumentation intelligente et des systèmes de pilotage autonomes.

Ensemble, ces quatre objectifs positionnent ce projet à la convergence de la métallurgie fondamentale, de l'ingénierie des procédés et des technologies numériques de l'industrie 4.0, contribuant à la compétitivité industrielle et à la transition énergétique.

CHAPITRE I :
PRINCIPES
FONDAMENTAUX DES
TRAITEMENTS
THERMIQUES

I.1 Introduction

Les traitements thermiques occupent une place centrale dans la metallurgie industrielle. Leur principe repose sur des cycles precis de chauffage et de refroidissement qui permettent de modifier les proprietes mecaniques d'un materiau — durete, ductilite, resilience, resistance a l'usure — sans modifier sa composition chimique. Ils ouvrent une large gamme de possibilites pour adapter un meme alliage a des exigences de service tres differentes, ce qui en fait un outil incontournable dans les secteurs aeronautique, automobile, energetique et de la construction mecanique.

Les objectifs assignes aux traitements des aciers peuvent concerner des domaines aussi varies que l'homogeneisation compositionnelle a chaud, une recristallisation apres ecrouissage, un adoucissement par transformation allotropique, un durcissement par trempe et revenu, ou encore un durcissement superficiel par enrichissement en elements interstitiels. La maitrise de ces procedes exige une connaissance approfondie des diagrammes de phases, de la cinetique des transformations et du comportement thermomecanique des materiaux.[42] [43].

I.2 Transformations de phase

I.2.1 Dans les aciers — Le diagramme Fer-Carbone

Le comportement des aciers lors des traitements thermiques repose fondamentalement sur le diagramme d'equilibre fer-carbone et sur la capacite de l'austenite — phase haute temperature stable au-dessus de la temperature A1 (727 deg C) — a se transformer en differents constituants selon les conditions de refroidissement imposees. Ce diagramme est le point de depart indispensable de toute demarche de specification d'un traitement thermique.

La structure cristalline du fer evolue avec la temperature : en dessous de 912 deg C, le fer est cubique centre (ferrite alpha, alpha) ; entre 912 deg C et 1394 deg C, il devient cubique a faces centrees (austenite, gamma), capable de dissoudre beaucoup plus de carbone en solution solide. C'est cette capacite d'insertion du carbone dans l'austenite — jusqu'a 2,14 % massique — qui fonde la richesse des transformations possibles.[44]

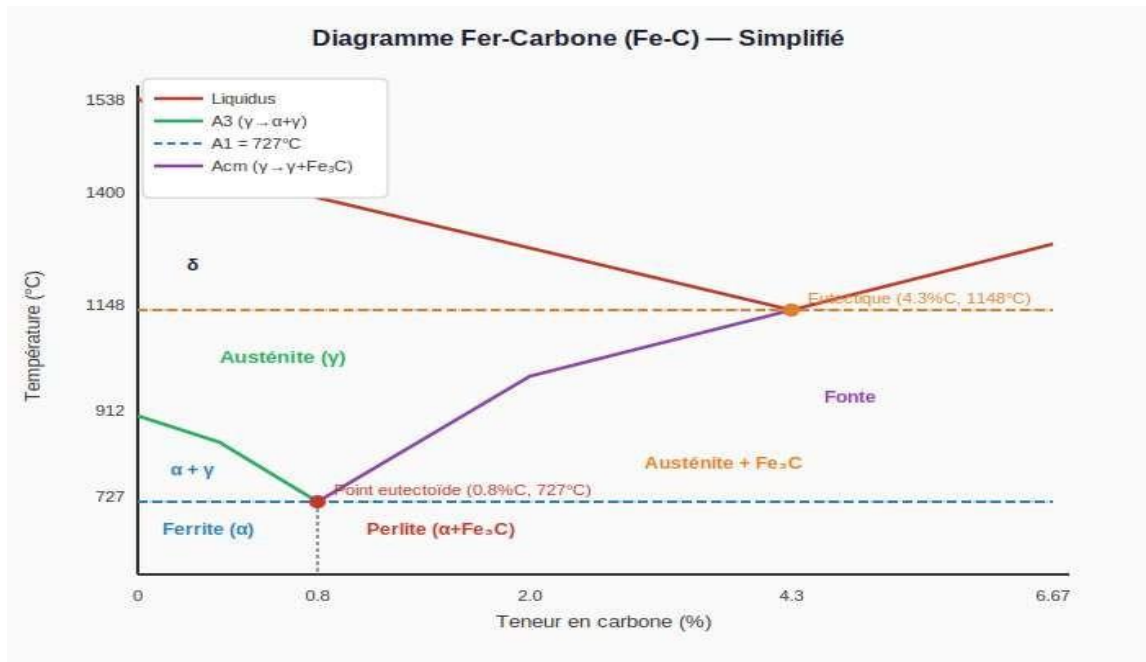


Figure 3: Diagramme d'équilibre Fer-Carbone simplifié. [44]

Avant tout traitement de trempe, une mise en solution des composés chimiques est indispensable. Elle s'obtient par un chauffage au-dessus de la température critique (austénisation) suivi d'un maintien suffisant pour que les éléments dissous dans la ferrite ou les carbures migrent par diffusion dans le réseau austénitique. Ce soin est essentiel : une austénisation incomplète laisse des carbures non dissous qui compromettent le résultat final.[45]

Les transformations possibles de l'austénite lors du refroidissement sont de trois natures principales :

- Transformation perlitique (entre A1 et ~550 deg C) : l'austénite se décompose en un agrégat lamellaire de ferrite et cémentite (Fe_3C), nommé perlite. Plus le refroidissement est rapide, plus les lamelles sont fines et la dureté élevée.
- Transformation bainitique (entre ~550 deg C et la température M_s) : il se forme un agrégat aciculaire de ferrite et carbures fins, plus dur que la perlite lamellaire, mais moins fragile que la martensite. La bainite supérieure (formée près de 550 deg C) est plus grossière que la bainite inférieure.
- Transformation martensitique (en dessous de M_s) : si la vitesse de refroidissement dépasse la vitesse critique, l'austénite se transforme en martensite sans diffusion. La martensite est tétragonale centrée, de dureté très élevée (parfois supérieure à 800 HV), mais aussi très fragile à l'état brut de trempe.

Le but du traitement thermique des aciers est le plus souvent d'obtenir de la martensite. Le passage de la phase austénique à la phase ferritique s'accompagne d'une augmentation de volume sensible, d'autant plus importante dans le cas de la transformation martensitique car le carbone en solution provoque une dilatation de la maille. Ce changement volumique génère des contraintes internes qui doivent être gérées — c'est le rôle du revenu.[46]

1.2.2 Dans les alliages non-ferreux

Pour les alliages non-ferreux — aluminium, cuivre, titane, nickel, magnésium — les mécanismes de traitement thermique sont différents, car ces matériaux ne bénéficient pas de transformation allotropique comparable à celle du fer. Les possibilités de durcissement se limitent principalement à l'écrouissage ou au durcissement structural par précipitation. [47]

Pour les alliages d'aluminium durcissables par précipitation (series 2xxx, 6xxx, 7xxx, 8xxx), le mécanisme repose sur la variation de la solubilité d'éléments d'alliage avec la température. Les précipités Al_2Cu , Mg_2Si ou $MgZn_2$ se dissolvent lors d'une mise en solution à haute température (450–550 °C), puis la trempe bloque les atomes en solution solide sursaturée. Un réchauffage modéré (revenu ou maturation) permet ensuite la nucléation et la croissance de précipités très fins, cohérents avec la matrice, qui bloquent le mouvement des dislocations et durcissent considérablement le matériau.

Le duralumin, alliage Al-Cu (4 %) - Mg (0,5 %), est l'exemple historique de ce procédé : découvert accidentellement par Alfred Wilm en 1906, il reste aujourd'hui la base de nombreuses nuances de l'aéronautique. Son recuit de mise en solution s'effectue à 510 °C. [48] [49] [50]

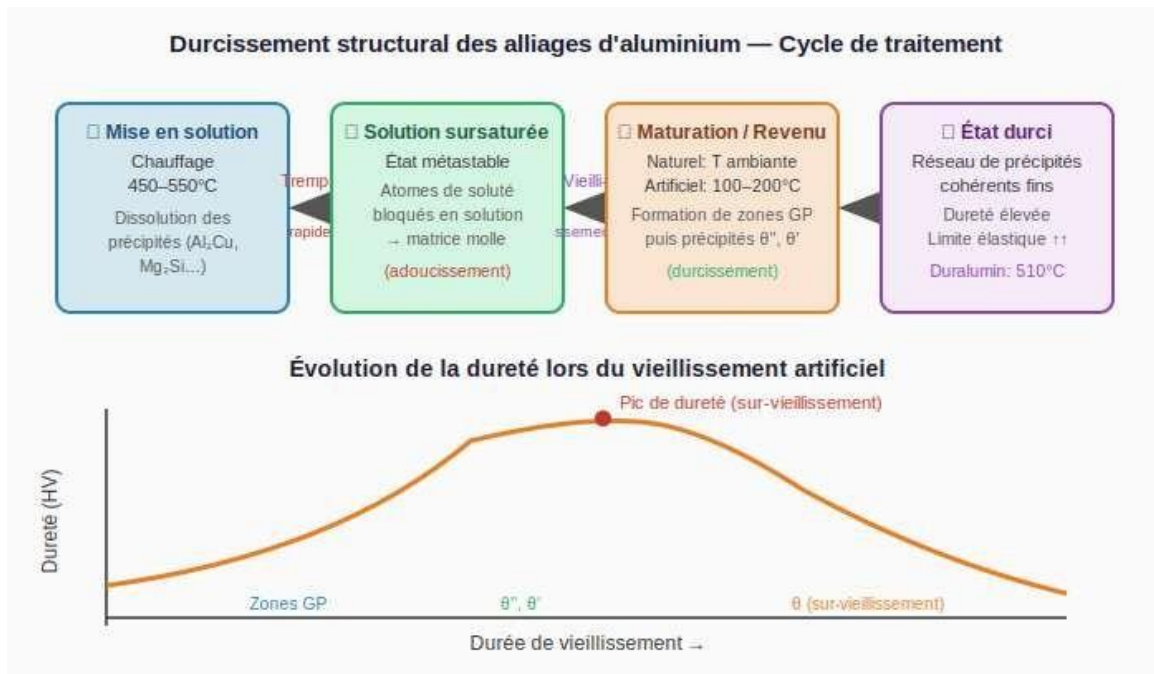


Figure 4: Cycle de durcissement structural des alliages d'aluminium. [51]

I.3 Recuit, Trempe et Revenu

II.3.1 Le recuit

Le recuit est un traitement thermique d'adoucissement qui consiste à chauffer le matériau jusqu'à une température donnée, à maintenir cette température pendant un temps suffisant, puis à refroidir lentement — le plus souvent dans le four lui-même. Selon l'objectif, on distingue plusieurs variantes :

- Recuit d'homogénéisation : élimine les segregations chimiques issues de la solidification par diffusion à très haute température (1100–1300 deg C pour les aciers) pendant des temps longs.
- Recuit de normalisation : obtenu par un refroidissement à l'air après austénisation, il affine les grains grossiers et homogénéise la structure.
- Recuit de régénération : corrige une surchauffe ou un grain grossi par un traitement thermique précédent.
- Recuit de détente : réduit les contraintes résiduelles (après soudage, usinage) sans modifier la microstructure de manière significative.
- Recuit d'adoucissement : ramène la dureté à un niveau propice à l'usinage. [52] [53]

II.3.2 La trempe

La trempe consiste à chauffer l'acier jusqu'à sa température d'austénisation, puis à le refroidir rapidement dans un milieu approprié (eau, saumure, polymère, huile, air pulse ou air calme selon la nuance). Ce refroidissement rapide empêche la formation des phases d'équilibre et impose à la place la formation de martensite, phase dure et métastable.

Le facteur clé est que la vitesse de refroidissement doit dépasser la vitesse critique de trempe de l'acier pour supprimer la formation de ferrite, perlite ou bainite. Cette vitesse critique varie considérablement selon la composition : un acier fortement allié peut être trempé à l'air, quand un acier non allié nécessite une trempe à l'eau. [54] [55]

La trempe et plus généralement les traitements thermiques effectués sur les pièces en acier permettent de leur conférer leurs propriétés d'usage finales : caractéristiques mécaniques, résistance à la corrosion, résistance à l'usure. De nombreux paramètres pilotent une gamme de trempe : le milieu de trempe, les températures, la durée, mais également la géométrie et la position de la pièce dans le bain. Les risques principaux sont les déformations et les tasures (fissures) générées par les gradients thermiques et les contraintes associées. [56]

II.3.3 Le revenu

Effectuée systématiquement après trempe, le revenu consiste à réchauffer la pièce trempée à une température modérée, généralement entre 150 deg C (revenu bas, conservation d'une dureté élevée) et 650 deg C (revenu haut, amélioration de la tenacité au détriment de la dureté). Lors du revenu, la martensite se décompose progressivement : d'abord par ségrégation du carbone en excédent, puis par précipitation de carbures qui assurent la transition vers une structure ferrito-cémentitique fine.

Le revenu permet d'améliorer la résistance mécanique globale des pièces traitées, de rétablir les valeurs de résilience et de rendre l'acier moins fragile et plus ductile. La dureté diminue quelque peu par dissolution de certains composés fragiles tels que les carbures de très haute teneur en carbone. Le couple trempe-revenu constitue la gamme la plus répandue en fabrication mécanique de précision. [57] [58]

I.4 La cinétique des transformations

I.4.1 Les diagrammes TTT (Temps-Température-Transformation)

Le diagramme TTT (aussi appelé diagramme isotherme ou diagramme en C) est l'outil fondamental pour comprendre la cinétique de décomposition de l'austénite dans des conditions isothermes, c'est-à-dire après un refroidissement rapide jusqu'à une température cible et un maintien à cette température. Il a été mis au point dans les années 1930 par Bain et Davenport, sur la base de mesures dilatométriques systématiques.

Sur ce diagramme, on trace les courbes de début et de fin de chaque transformation (perlitique, bainitique, martensitique) dans le plan température-logarithme du temps. La forme en C traduit l'existence d'un nez de transformation — une température à laquelle la cinétique est la plus rapide — généralement autour de 500–550 °C pour les aciers non alliés, car c'est à cette température que la force motrice thermodynamique et la diffusion atomique trouvent leur meilleur compromis. [59] [60] [61]

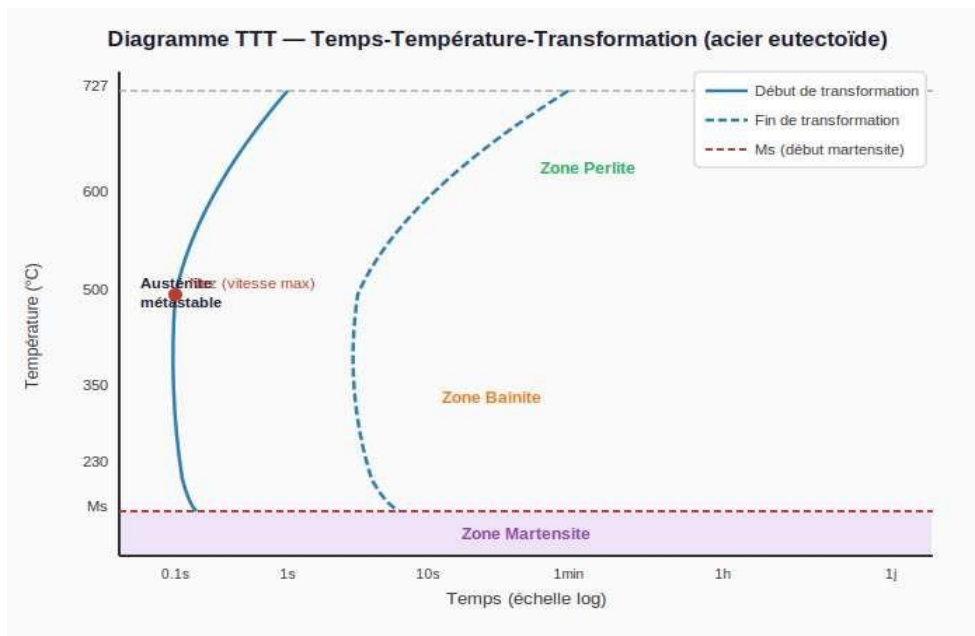


Figure 5: Diagramme TTT schématisé pour un acier eutectoïde (0,8 %C). [62]

I.4.2 Les diagrammes TRC (Transformation en Refroidissement Continu)

Le diagramme TRC décrit les transformations subies par l'austenite lors d'un refroidissement continu, sans palier isotherme. Il est obtenu expérimentalement par dilatométrie sur des éprouvettes refroidies à des vitesses différentes, constantes ou contrôlées. Les courbes TRC sont systématiquement décalées vers la droite (temps plus longs) et vers le bas (températures plus basses) par rapport aux courbes TTT, car le refroidissement continu ne laisse pas le temps à l'austenite d'atteindre des conditions isothermes optimales.

Dans l'industrie, les diagrammes TRC sont préférés car ils correspondent à des conditions de refroidissement industrielles plus réalistes : trempe dans un fluide, refroidissement à l'air, normalisation. La lecture d'un diagramme TRC permet de déterminer, pour une vitesse de refroidissement donnée, la nature et les proportions des constituants finals, ainsi que la dureté attendue. [63] [64] [65] [66]

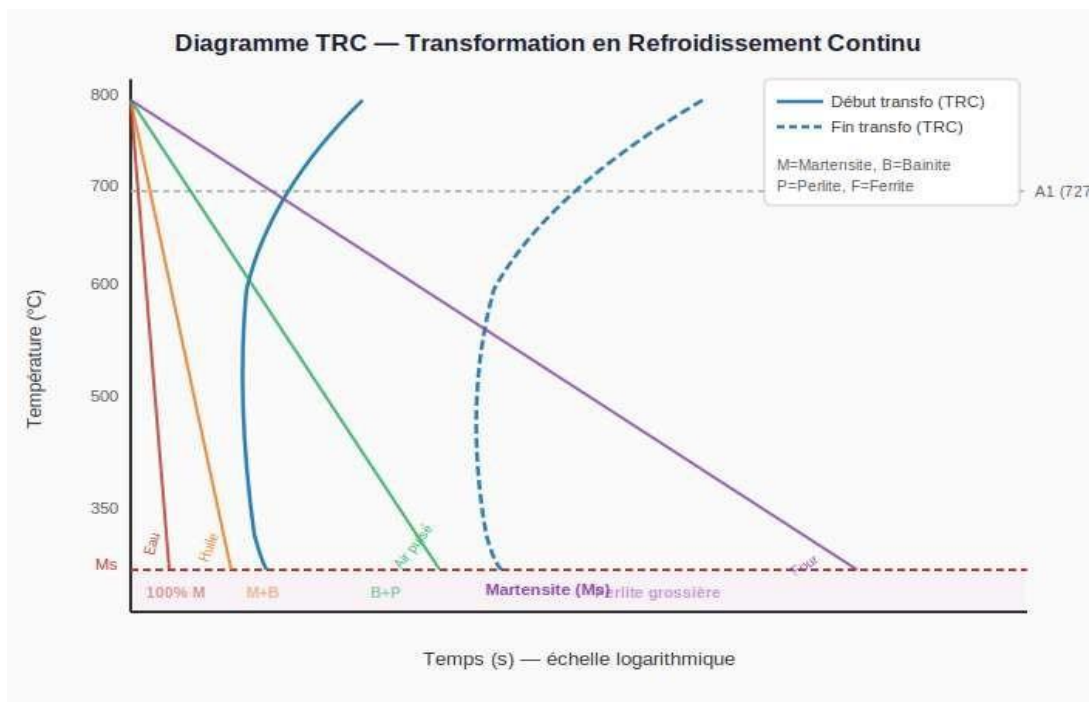


Figure 6: Diagramme TRC schématique.[67]

1.4.3 Influence des éléments d'alliage sur la cinétique

L'ajout d'éléments d'alliage dans un acier (Cr, Ni, Mo, Mn, V, B...) retarde généralement la cinétique de décomposition de l'austénite, c'est-à-dire déplacement des courbes TTT et TRC vers la droite et vers le bas. Cela signifie qu'un acier allié dispose de plus de temps pour atteindre le domaine martensitique, même avec une vitesse de refroidissement modérée — c'est la notion de trempabilité. La trempabilité est souvent quantifiée par l'essai Jominy (trempe par bout) qui mesure la dureté en fonction de la distance au point de trempe. Pour les grosses pièces ou les sections importantes, on choisit des aciers fortement alliés dont les courbes TRC présentent une vitesse critique de trempe très faible, permettant de tremper même les sections internes en utilisant des milieux de refroidissement moins sévères (huile plutôt qu'eau) et en évitant les déformations ou tapures excessives. [68] [69]

1.5 Traitement de surface thermochimiques

Les traitements de surface thermochimiques visent à enrichir la couche superficielle d'un matériau en éléments interstitiels (carbone, azote, carbone + azote) afin d'obtenir une dureté élevée en surface tout en conservant un cœur tenace. Ils apportent de la dureté superficielle, un durcissement en profondeur et des contraintes résiduelles de compression en surface — ces dernières étant particulièrement bénéfiques pour la tenue en fatigue. [70]

1.5.1 La cémentation (carburation)

La cémentation est un traitement thermochimique d'enrichissement superficiel en carbone, réalisé en phase austénique (900–980 °C). Le carbone provient d'une atmosphère gazeuse carburante (cémentation gazeuse, la plus répandue), d'un bain de sels (cémentation liquide) ou d'un plasma (cémentation basse pression). Il diffuse depuis la surface vers le cœur selon la seconde loi de Fick, créant un gradient de teneur en carbone décroissant.

Après cémentation, une trempe transforme la couche enrichie en martensite, installant un gradient de dureté de la surface (très dure, HV ~1000) vers le cœur (relativement mou). La profondeur de la couche peut atteindre 2 mm, selon la température et la durée de traitement. La cémentation s'applique aux aciers bas carbone (0,1 à 0,3 %C), tels que les nuances 20MnCr5, 17CrNiMo6, couramment utilisées pour les engrenages, pignons et arbres de transmission. [71] [72] [73]

1.5.2 La nitruration

La nitruration consiste à enrichir la surface d'un acier en azote, à des températures nettement plus basses que la cementation (480–580 deg C), dans le domaine ferritique. L'azote diffuse et forme des nitrures de fer (Fe_4N , Fe_3N) et des nitrures des éléments d'alliage (Cr, Al, Mo...) qui constituent la couche de diffusion et la couche de combinaison superficielle. La nitruration peut s'effectuer en milieu gazeux (ammoniac), en bain de sels (nitrocarburation) ou par plasma (nitruration ionique).

La couche nitrurée est principalement composée des phases epsilon (Fe_3N) et gamma prime (Fe_4N) et de couches composites. Elle présente une dureté et une résistance à l'usure exceptionnelles, avec une dureté superficielle pouvant atteindre HV 1000-1200. La nitruration ne nécessite pas de trempe complémentaire, ce qui limite les risques de déformation. Elle est particulièrement adaptée aux pièces de précision qui ne doivent pas être rectifiées après traitement. [74] [75] [76]

1.5.3 La carbonitruration

La carbonitruration combine l'apport simultané de carbone et d'azote à la surface de l'acier, généralement à des températures intermédiaires (700–900 deg C). L'ajout d'azote par décomposition de l'ammoniac abaisse la température de traitement, retarde la cinétique de décomposition de l'austénite (favorise la trempabilité) et améliore la résistance à la corrosion. La carbonitruration convient aux aciers au carbone sans éléments d'alliage qui seraient difficilement traitables par cementation seule. [77] [78]

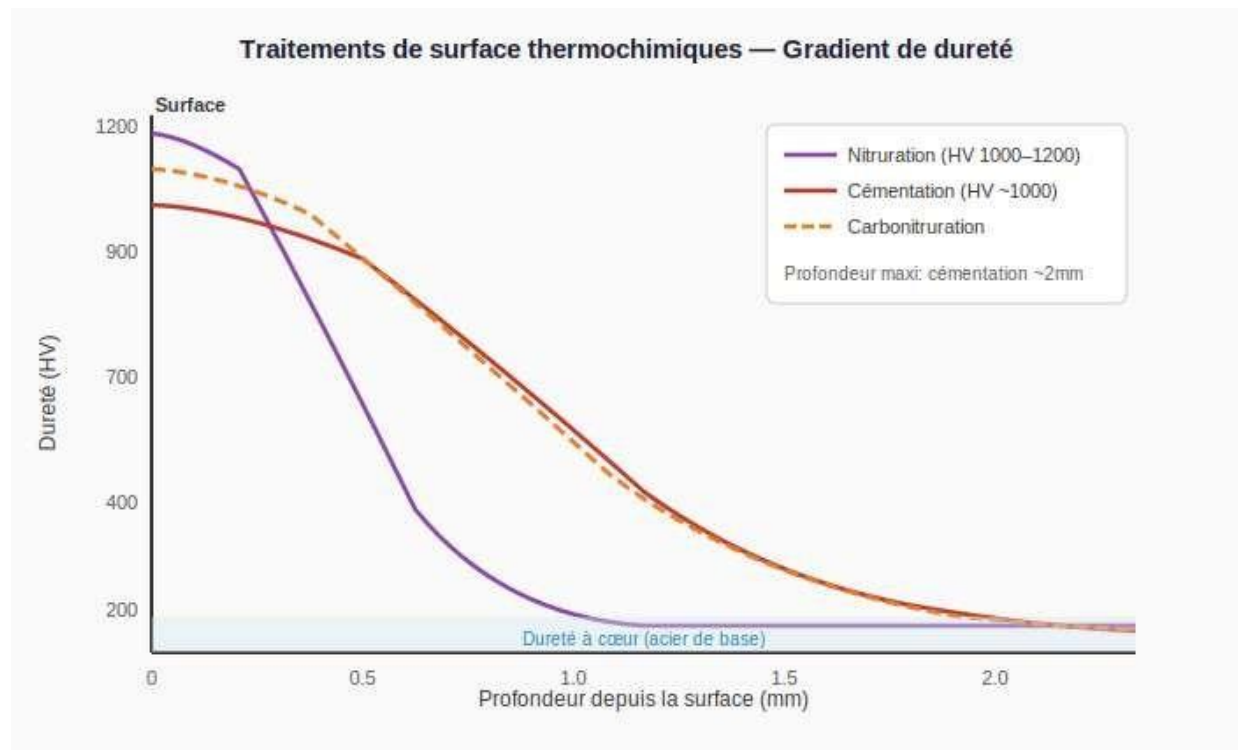


Figure 7: Comparaison des gradients de dureté obtenus par cementation, [79]

CHAPITRE II : Etat de l'Art

II.1 Introduction

Le traitement thermique industriel constitue l'un des procédés fondamentaux de la métallurgie et de la fabrication mécanique. Il regroupe l'ensemble des opérations de chauffage et de refroidissement contrôlés appliqués aux métaux et alliages afin de modifier leurs propriétés mécaniques, structurales ou physico-chimiques. Ce domaine fait appel à trois grandes composantes interdépendantes : les équipements de chauffage (fours industriels), les milieux et méthodes de refroidissement, ainsi que l'instrumentation et les systèmes de mesure associés.

La présente revue documentaire dresse un panorama actualisé des pratiques et équipements en vigueur dans ces trois domaines, en s'appuyant sur des sources industrielles et techniques de référence.

II.2 Fours industriels à atmosphère contrôlée et sous vide

II.2.1 Principes généraux et classification

Un four industriel de traitement thermique est sélectionné en fonction de plusieurs paramètres déterminants : la nature du traitement à effectuer (recuit, cémentation, nitruration, brasage, frittage), le type d'atmosphère requis (neutre, réductrice, carburante, azotée ou mélange), ainsi que les paramètres opératoires tels que la vitesse de chauffe, la température de maintien et le mode de chargement des pièces.

Selon Air Liquide, expert reconnu en gaz industriels et atmosphères de traitement thermique, chaque traitement thermique industriel est réalisé dans un type de four spécifique, adapté au type d'atmosphère — neutre, non décarburante, réactive enrichie en carbone ou en azote — et aux contraintes propres du procédé. [80]

II.2.2 Fours à atmosphère contrôlée

Les fours à atmosphère contrôlée permettent de réaliser des traitements thermiques dans un environnement gazeux précisément défini, évitant les réactions indésirables (oxydation, décarburation) à la surface des pièces. Plusieurs types de gaz peuvent être utilisés selon l'application :

- Azote (N_2) : gaz inerte, utilisé pour les recuits protecteurs et le refroidissement contrôlé ;
- Argon (Ar) : gaz noble, privilégié pour les alliages très sensibles à la contamination ;
- Hydrogène (H_2) : atmosphère réductrice, utilisée pour des frittages de haute pureté ;
- Mélanges CO/ N_2 ou atmosphères endothermiques : pour la cémentation et la carbonitruration.

Les fours à cloche en atmosphère d'azote, par exemple, sont employés pour le traitement thermique de fils machine, avec recirculation de l'atmosphère inerte assurée par un ventilateur intégré. Des fours tubulaires multizone permettent quant à eux de maintenir des profils de température différents selon les zones, avec des capteurs de température indépendants assurant un contrôle fin du procédé. [81]

II.2.3 Fours sous vide

Le four à vide industriel représente un système de traitement thermique opérant dans une chambre hermétique d'où l'air et les gaz sont extraits, éliminant ainsi toute source d'oxydation ou de contamination atmosphérique. ECM Technologies, fabricant français de référence dans ce domaine, décrit ce procédé comme offrant des avantages considérables pour les alliages sensibles à l'oxydation. Les caractéristiques techniques des fours sous vide actuels comprennent :

- Plage de température : de 538°C à 2 482°C (1 000°F à 4 500°F) selon les applications ;
- Éléments chauffants en graphite ou molybdène, garantissant une distribution uniforme de la chaleur ;
- Niveau de vide atteignable : du vide primaire au vide poussé, selon la conception de l'enceinte
- Possibilité d'intégration d'étapes complémentaires : cémentation basse pression, trempe au gaz ou à l'huile.

Parmi les avantages industriels documentés : un traitement de surface de qualité supérieure sans opérations de nettoyage post-traitement, une minimisation des déformations grâce au chauffage uniforme, et une aptitude particulière au traitement des métaux réactifs (titane, zirconium, alliages de superalliages aéronautiques).

Le fabricant Nabertherm propose une gamme complète allant des fours à chambre pour usage courant aux unités spéciales sous vide, avec des fours à convection forcée adaptés aux traitements en atmosphère contrôlée. [82]

II.2.4 Fours continus et fours à passage

Pour les productions en série, les fours continus (à tapis, à chaînes, à plateaux poussants) permettent un traitement thermique en flux régulier, sous air ou atmosphère contrôlée. Ce type d'équipement est particulièrement adapté à la cémentation et à la carbonitruration de pièces mécaniques en grandes séries. [83]

II.3 Méthode de refroidissement - Trempe

II.3.1 Principes de la trempe

Après la phase d'austénitisation (chauffage à une température spécifique pour former de l'austénite), l'étape de trempe consiste à refroidir le métal rapidement et de manière contrôlée afin d'obtenir les structures cristallines souhaitées : martensite (dureté maximale), bainite, ou combinaisons selon les applications. Le choix du milieu de trempe conditionne directement les propriétés mécaniques finales, la précision dimensionnelle et l'intégrité de la pièce.

Les méthodes couramment employées incluent la trempe à liquide unique, la trempe à double liquide, la trempe graduelle (marquensitage), la trempe isotherme (bainitique), ainsi que les trempes localisées par induction ou flamme. [84]

II.3.2 Trempe liquide

Trempe à l'eau et aux solutions salines

L'eau représente le milieu de trempe le plus drastique (vitesse de refroidissement élevée). Elle est utilisée principalement pour les aciers peu alliés nécessitant une trempe sévère. Cependant, le passage à travers la phase vapeur (effet Leidenfrost) peut créer des zones de refroidissement inhomogènes — les « points doux » — susceptibles d'engendrer des contraintes résiduelles et des déformations. [85]

Trempe à l'huile

L'huile de trempe offre un refroidissement plus modéré que l'eau, avec une meilleure régularité. Elle convient aux aciers alliés et à cémentation. Elle nécessite cependant des équipements de sécurité incendie, des systèmes de filtration et de régulation thermique du bain, ainsi que des cycles de nettoyage des pièces après trempe. Le vieillissement de l'huile en service modifie progressivement sa sévérité de trempe, ce qui impose un contrôle régulier. [86]

Trempe en bain de sels fondus

La trempe bainitique ou le marquensitage dans des bains de sels fondus permet un contrôle très précis de la température d'interruption de trempe, notamment pour des applications de haute précision dimensionnelle (outillage, engrenages, roulements). [87]

II.3.3 Trempe aux polymères

Les fluides de trempe à base de polymères constituent une alternative de plus en plus répandue, positionnée entre l'eau (très drastique) et l'huile (modérée). L'Association de Traitement Thermique et de Traitements de Surface (A3TS) identifie deux grandes familles de polymères solubles :

- PAG (Polyalkylène Glycol) : vitesse de refroidissement intermédiaire entre l'eau et l'huile, adapté notamment aux trempes superficielles ;
- PVP (Polyvinylpyrrolidone) : polyvalent, adapté à la fois aux trempes superficielles et massives.

Le mécanisme de fonctionnement repose sur la formation d'une gaine polymère autour de la pièce, qui

se constitue à la surface chaude par inversion de solubilité. Cette pellicule homogène permet d'éviter les points doux associés à la trempe à l'eau pure, et de réduire significativement les gradients thermiques et les tensions résiduelles.

Selon la documentation technique de Condat (gamme THERMASOL), les paramètres ajustables sont la concentration, la température et l'agitation du bain, ce qui offre une grande souplesse pour traiter différentes nuances d'acier avec un seul milieu de trempe. Parmi les avantages pratiques documentés :

- Suppression des équipements de protection incendie liés aux bains d'huile ;
- Réduction du gradient thermique et des déformations ;
- Élimination des points doux par film uniforme ;
- Flexibilité des vitesses de refroidissement selon la concentration.

Les inconvénients à surveiller incluent le risque d'inflammabilité à forte concentration, le vieillissement du bain (nécessitant une surveillance régulière de l'efficacité), et la nécessité d'un traitement en centre agréé en fin de vie. [88]

II.3.4 Trempe au gaz à haute pression

La trempe au gaz à haute pression est une méthode propre et précise, réalisée dans des enceintes ou fours capables de résister à plusieurs dizaines de bars. Elle utilise des gaz neutres (azote, argon) parfois enrichis en hydrogène pour augmenter la capacité calorifique. Air Liquide France Industrie décrit cette solution comme permettant d'atteindre des vitesses de refroidissement élevées tout en s'affranchissant des contraintes des bacs d'huile.

Avantages principaux de la trempe gaz :

- Aucun nettoyage des pièces après trempe (pas de résidu d'huile ou de polymère) ;
- Contrôle précis et reproductible de la vitesse de refroidissement par réglage de la pression et du débit ;
- Conformité facilitée aux normes strictes de l'industrie aéronautique ;
- Possibilité de traitement cryogénique complémentaire (trempe sous zéro) pour éliminer l'austénite résiduelle.

La trempe gaz est particulièrement adaptée aux aciers fortement alliés et aux superalliages, pour lesquels un refroidissement modéré mais homogène suffit à atteindre la structure martensitique ou bainitique souhaitée. [89]

II.4 Instrumentation et capteurs de mesure

II.4.1 Enjeux de la mesure en environnement à haute température

La surveillance thermique précise des fours industriels est indispensable pour garantir la reproductibilité des traitements, la conformité des pièces et la sécurité des installations. Selon Avenir Industrie (2026), dans certaines applications industrielles les températures peuvent dépasser 1 500°C,

et la moindre défaillance de mesure peut entraîner des arrêts de production coûteux ou des incidents de sécurité graves.

La sélection d'un capteur repose sur un « profil d'exposition » défini dès la phase d'ingénierie : nature des fluides, plages de température et de pression, risques d'abrasion, cycles thermiques. Ce profil oriente le choix de la filière de mesure (thermocouple, RTD, infrarouge, fibre optique) et des matériaux de protection (Inconel, Hastelloy, céramique, tantale). [90]

II.4.2 Thermocouples

Le thermocouple reste le capteur de température le plus répandu dans les environnements industriels à haute température. CORREGE (COTEMP Sensing), spécialiste depuis plus de 40 ans en instrumentation industrielle, recense les types principaux utilisés selon les plages de température :

- Types J, K, T, N : jusqu'à 1 000–1 200°C, pour les traitements courants ;
- Types S, R (platine-rhodium) et Type B : jusqu'à 1 700°C, pour les fours de fusion et de frittage haute température ;
- Thermocouples céramiques (gaine alumine ou carbure de silicium) : au-delà de 1 200°C, dans les fours de pyrolyse, incinérateurs et réacteurs de calcination.

Les thermocouples céramiques offrent une excellente stabilité à long terme dans les gaz chauds corrosifs, au prix d'un temps de réponse légèrement plus long que les thermocouples métalliques nus. Dans les fours tubulaires, ils sont généralement montés dans des puits thermométriques céramiques fixés sur la voûte ou insérés à proximité des brûleurs.

Des enregistreurs multivoies modernes (comme la gamme CPS Touch® de Pyrocontrol) permettent de gérer jusqu'à 144 voies d'enregistrement simultanées, avec des entrées multiples (thermocouples, RTD, signaux mA/V/mV) et des interfaces de communication industrielles (Modbus RTU RS485, Profibus, Profinet, EtherNet/IP). [91]

II.4.3 Sondes à résistance RTD (Pt100, Pt1000)

Les sondes RTD (Resistance Temperature Detector) à base de platine offrent une précision supérieure aux thermocouples pour les températures modérées (jusqu'à 600–800°C). Elles sont privilégiées pour les fours de traitement thermique à basse température (revenu, vieillissement) et les enceintes climatiques où la répétabilité est primordiale. Au-delà de 1 200°C, leur dérive s'accélère et elles cèdent la place aux thermocouples céramiques. [92]

II.4.4 Pyromètres infrarouges et imagerie thermique

Dans les situations où le contact physique avec la pièce est impossible ou dangereux (parois revêtues, métaux en fusion, pièces en mouvement rapide), les pyromètres infrarouges et caméras thermiques permettent une mesure sans contact. Selon Avenir Industrie, ces instruments couvrent la plage de - 50°C à plus de 2 000°C, avec la multi-spectralité permettant de corriger l'influence de l'émissivité des

surfaces — principale source d'erreur en thermométrie infrarouge.

IPCOTEC distribue des pyromètres infrarouges pour températures jusqu'à 2 500°C, applicables aux cimenteries, verreries et fours industriels, avec transmission des mesures via sorties analogiques ou protocoles série (RS232/RS485). Parmi les spécificités techniques avancées :

- Longueur d'onde de 3,9 μm pour la mesure dans les fours à gaz : à cette longueur d'onde, les gaz de combustion sont quasi transparents, permettant la mesure directe de la température des pièces en cours de chauffe ;
- Interfaces USB avec logiciels de configuration et d'enregistrement pour le suivi des profils thermiques ;
- Caméras thermiques multi-spectrales pour la cartographie des gradients de température. [93]

II.4.5 Fibres optiques et capteurs distribués

Pour les applications nécessitant une mesure de température répartie le long d'un four ou d'un réacteur, les systèmes à fibre optique distribuée (DTS — Distributed Temperature Sensing) offrent la possibilité d'obtenir un profil thermique continu sur plusieurs dizaines de mètres, avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre et une précision de l'ordre de $\pm 1^\circ\text{C}$. Ces capteurs sont insensibles aux perturbations électromagnétiques et peuvent être utilisés dans des atmosphères explosibles (conformité ATEX). [94]

II.4.6 Intégration dans les systèmes de supervision

La tendance actuelle est à l'intégration des capteurs dans des architectures de supervision (DCS — Distributed Control System, SCADA) permettant :

- La surveillance en temps réel des profils thermiques sur l'ensemble du four ;
- La détection précoce d'anomalies par comparaison des bilans énergétiques mesurés ;
- L'enregistrement des données pour la traçabilité des lots de pièces ;
- La maintenance prédictive basée sur l'analyse des dérives de capteurs.

Des solutions comme la gamme C.A 6500 de Chauvin-Arnoux / Pyrocontrol proposent des enregistreurs multi-entrées avec affichage graphique personnalisable, fonctionnement tactile et accessibilité aux données à distance. [95]

II.5 Conclusion

L'évolution des équipements de traitement thermique industriel s'inscrit dans une double tendance : la recherche de précision et de reproductibilité accrues des procédés, et la réduction de l'empreinte environnementale (suppression des bains d'huile au profit de la trempe gaz ou polymère, optimisation de la consommation énergétique des fours). Les fours sous vide et à atmosphère contrôlée permettent d'atteindre des niveaux de qualité métallurgique inaccessibles avec les fours conventionnels, tandis que l'instrumentation multi-capteurs intégrée dans des systèmes de supervision intelligents garantit la traçabilité et la conformité aux normes les plus exigeantes, notamment dans les secteurs aéronautique,

CHAPITRE III : Méthodes d'optimisation existences

III.1 Introduction

L'optimisation des traitements thermiques constitue un enjeu central de la métallurgie moderne. Trois grandes familles de méthodes sont mobilisées à cet effet : les plans d'expériences, la modélisation numérique par éléments finis, et les approches fondées sur l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle. Ces méthodes, complémentaires, permettent de réduire les coûts d'essais, d'améliorer la prédictibilité des résultats et d'optimiser les paramètres procédés.

III.2 Plans d'expériences appliqués aux traitements thermiques

III.2.1 Principes généraux et objectifs

La planification des expériences (Design of Experiments, DOE) est issue des travaux fondateurs de Fisher (1925). Elle vise à organiser un ensemble d'essais de façon à extraire un maximum d'informations sur l'influence des facteurs étudiés, avec un nombre minimal d'expériences. Dans le domaine des traitements thermiques, les facteurs considérés sont généralement la température d'austénitisation, la durée de maintien, la vitesse de refroidissement (trempe), la température et le temps de revenu.

Les réponses mesurées sont les propriétés mécaniques résultantes : dureté (HRC, HV), résistance à la traction, limite d'élasticité, résilience, ou encore la microstructure obtenue (fraction de martensite, taille de grain). La démarche repose sur une structuration statistique des essais qui permet d'identifier les effets principaux des facteurs et leurs interactions deux à deux, en limitant le nombre total d'expériences. [96][97]

III.2.2 Principaux plans utilisés en métallurgie Plans de Taguchi

Genichi Taguchi, statisticien japonais, a développé un système de matrices orthogonales permettant d'estimer les effets principaux des facteurs sans biais, avec un nombre minimum d'essais. La méthode introduit également la notion de conception robuste, cherchant à minimiser la sensibilité du procédé aux perturbations extérieures (bruits). Dans une application au recuit des alliages métalliques, des essais menés à des températures comprises entre 500 °C et 800 °C ont montré qu'en seulement 16 essais, il est possible d'identifier les paramètres d'entrée minimisant la dureté (objectif : dureté inférieure à 38 HRC), tout en réduisant la consommation d'énergie du four. [96][97]

Méthode des surfaces de réponse (MSR) et plan Box-Behnken

La méthodologie des surfaces de réponse permet de modéliser de manière quadratique la relation entre les facteurs et les réponses, et d'en rechercher l'optimum. Elle se déroule en quatre étapes : audit du projet, stratégie de l'expérimentation, exécution du plan, puis modélisation et analyse des résultats.

Elle s'appuie sur différents types de plans : plans composites centrés (plans CCD), plans de Box-Behnken (applicables à partir de trois facteurs), plans de Doehlert, et plans uniformes. Ces plans permettent une couverture homogène du domaine expérimental et une estimation précise des effets quadratiques, essentiels dès que les relations entre paramètres et réponses ne sont pas linéaires. [98]

Plans de criblage (Plackett-Burman)

En phase préliminaire, lorsque le nombre de facteurs potentiels est élevé, les plans de criblage permettent d'identifier rapidement les facteurs les plus influents. Les plans de Plackett-Burman, par exemple, permettent d'étudier jusqu'à $k-1$ facteurs en k essais (k multiple de 4). Une fois les facteurs significatifs identifiés, une étude plus approfondie par MSR peut être conduite sur ces seuls facteurs. [98]

III.2.3 Exemples d'application aux traitements thermiques

Dans le domaine des traitements de surface, la méthode des plans d'expériences a été appliquée à l'étude quantitative des effets et interactions dans les procédés de traitement thermochimique (cémentation, nitruration). Elle permet notamment de déterminer l'influence respective de la température de nitruration, de la durée du cycle et de la composition atmosphérique sur la profondeur de couche durcie et les contraintes résiduelles de compression générées en surface. Ces paramètres sont critiques dans les secteurs aéronautique et automobile, où les pièces subissent des sollicitations de fatigue et d'usure sévères. [96] [97] [98]

Avantages et limites des plans d'expériences :

- Avantages : réduction significative du nombre d'essais par rapport à un plan complet, prise en compte des interactions entre facteurs, modèle prédictif explicite sous forme d'équation de régression.
- Limites : nécessite de définir a priori le domaine de variation des facteurs, peu adapté aux phénomènes fortement non linéaires hors du domaine étudié, et ne prend pas en compte l'évolution temporelle des microstructures.

III.3 Modélisations numériques par éléments finis

III.3.1 Principe de la simulation thermo-métallo-mécanique

La méthode des éléments finis (MEF) est une approche numérique permettant de résoudre des équations aux dérivées partielles sur des géométries complexes en discrétisant le domaine d'étude en un maillage d'éléments élémentaires. Appliquée aux traitements thermiques, elle permet de simuler simultanément et de manière couplée trois types de phénomènes :

- Le champ thermique : distribution spatio-temporelle de la température au sein de la pièce, calculée par un modèle thermique non linéaire non stationnaire. Ce modèle prend en compte la conduction, la convection et le rayonnement, ainsi que la chaleur latente

dégagée lors des transformations de phases.

- Le champ métallurgique : suivi des transformations de phases (austénite → martensite, bainite, perlite...) en fonction du cycle thermique. Des modèles cinétiques intégrés (équations de Johnson-Mehl-Avrami, modèle de Koistinen-Marburger pour la martensite) permettent de calculer les fractions volumiques des phases en chaque point et à chaque instant.
- Le champ mécanique : calcul des contraintes et déformations résultant des gradients thermiques et des changements de volume associés aux transformations de phases (plasticité de transformation incluse). Le cadre constitutif utilisé est généralement la thermo-élasto-plasticité. [99][100][102]

III.3.2 Prédiction des contraintes résiduelles lors de la trempe

Un apport majeur de la simulation par éléments finis est la prédiction des contraintes résiduelles induites par la trempe. Des travaux portant sur l'acier faiblement allié 36NiCrMo16 ont montré qu'il est possible, via un code de calcul par éléments finis, de simuler la genèse des contraintes résiduelles lors de la trempe continue. La définition d'un coefficient dilatométrique global permet de prendre en compte simultanément la dilatation thermique et les déformations volumiques liées aux transformations de phases dans le cadre d'un calcul thermo-élasto-plastique. Les contraintes calculées ont été confrontées aux mesures expérimentales par la méthode du trou (hole-drilling) et par diffraction des rayons X, avec une bonne concordance.

Les transformations métallurgiques jouent un rôle fondamental dans la génération des contraintes résiduelles, principalement en raison des changements de volume associés aux différences de compacité des phases (austénite cubique faces centrées → martensite cubique centrée). La plasticité de transformation, phénomène lié à l'évolution de la transformation sous contrainte, doit également être intégrée dans le modèle constitutif pour une prédiction précise. [100][101] [102]

III.3.3 Logiciels et domaines d'application

Parmi les codes de calcul par éléments finis les plus utilisés pour la simulation des traitements thermiques, on peut citer ABAQUS (largement utilisé pour les calculs de contraintes résiduelles de soudage et de traitement thermique), SYSWELD (spécialisé dans la simulation du soudage et des traitements thermiques des aciers), et DEFORM (simulation des procédés de mise en forme à chaud). Ces outils sont utilisés par des organismes comme l'IRT M2P (Institut de Recherche Technologique Matériaux, Métallurgie et Procédés), qui y associe des calculs thermochimiques (diffusion du carbone et de l'azote lors de la cémentation et de la nitruration) pour prédire les profils de concentration et optimiser les paramètres du procédé.

Avantages et limites de la modélisation par éléments finis :

- Avantages : prédiction quantitative des champs thermiques, métallurgiques et mécaniques ; possibilité d'étudier des géométries complexes ; réduction du nombre d'essais destructifs.
- Limites : temps de calcul élevé pour les géométries tridimensionnelles et les simulations multipasses ; nécessité de données matériau précises (propriétés thermophysiques et mécaniques en fonction de la température et des phases) ; recherche de paramètres procédés optimaux rapidement coûteuse en temps de calcul en raison du comportement non linéaire du matériau. [100][106]

III.4 Approches fondées sur l'apprentissage automatique et intelligence artificielle

III.4.1 Contexte et motivation

Aucune méthode théorique précise ne permet, à ce jour, de prédire les propriétés mécaniques des aciers à partir de leur seule composition chimique et de leurs paramètres de traitement thermique. Toutes les méthodes disponibles s'appuient sur des statistiques et des essais physiques approfondis. Face au nombre considérable de compositions d'alliages et de combinaisons de paramètres procédés possibles, l'apprentissage automatique (machine learning) offre une solution efficace pour explorer ces espaces de grande dimension en s'appuyant sur des bases de données expérimentales. [104]

III.4.2 Principaux algorithmes et leurs applications

Plusieurs familles d'algorithmes d'apprentissage automatique sont mobilisées dans ce domaine :

- Réseaux de neurones artificiels (ANN) : particulièrement adaptés à la modélisation de relations non linéaires complexes, comme la prédiction de la dureté des aciers maraging en fonction de la composition et du cycle thermique. Ils apprennent à partir de données expérimentales en ajustant itérativement les poids des connexions entre neurones.
- Processus gaussiens (régression par krigeage) : permettent d'estimer non seulement la valeur prédite, mais aussi l'incertitude associée, ce qui est précieux pour guider une stratégie d'exploration expérimentale (apprentissage actif).
- Algorithmes génétiques et optimisation multi-objectif combinatoire : utilisés pour explorer de manière efficace l'espace des compositions et des paramètres procédés afin d'identifier les combinaisons optimales répondant à plusieurs critères simultanés (dureté, résilience, résistance à la corrosion...).
- Forêts aléatoires et méthodes ensemblistes (Random Forest, Gradient Boosting) : robustes face aux données bruitées, utilisées pour la prédiction de propriétés telles que la résistance à la traction, la limite d'élasticité et l'allongement à rupture en fonction de la composition et de la température de traitement. [104] [105]

III.4.3 Application à la nitruration et approches hybrides physique–IA

Un exemple concret d'application a été présenté au congrès de l'A3TS (2023) par l'IRT M2P (Arts et Métiers d'Aix-en-Provence) : la prédiction des paramètres de nitruration gazeuse par association de modélisation phénoménologique et d'intelligence artificielle. La nitruration gazeuse des aciers repose sur la diffusion des atomes d'azote dans une matrice ferritique, induisant la précipitation de nitrures nanométriques d'éléments d'alliage (Cr, V, Al...) qui contribuent au durcissement superficiel. Des modèles hybrides combinent les lois empiriques de diffusion avec des algorithmes d'apprentissage automatique afin d'affiner les prédictions là où les lois physiques seules ne sont pas suffisamment précises.

Cette hybridation physique–IA constitue une direction de recherche particulièrement prometteuse : la science des données, l'apprentissage automatique et les algorithmes d'optimisation, couplés à la modélisation fondée sur des lois physiques, exploitent les avantages respectifs de chaque approche. Les modèles purement empiriques souffrent d'un manque d'extrapolation hors du domaine des données d'entraînement, tandis que les modèles purement physiques peuvent être trop simplifiés ou trop coûteux en temps de calcul. L'hybridation permet de lever en partie ces limitations. [103][106]

III.4.4 Prédiction de microstructure et conception computationnelle d'alliages

Le projet PREDICSTRUCT, initiative du CTIF (Centre Technique des Industries de la Fonderie), illustre la tendance à associer simulation de microstructure et apprentissage automatique. L'objectif est de prédire le comportement de la microstructure des aciers soumis à des contraintes, en identifiant la corrélation entre les paramètres de fabrication et les propriétés mécaniques résultantes. Le projet vise également à intégrer le logiciel Thermo-Calc, qui apporte des données thermodynamiques (diagrammes de phases calculés par la méthode CALPHAD), pour améliorer la précision des prédictions.

La méthode CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams) occupe une place centrale dans la conception computationnelle d'alliages. Elle est combinée à des méthodes d'optimisation multi-objectif (algorithmes génétiques) et à des méthodes de fouille de données (réseaux de neurones, processus gaussiens) pour identifier des compositions et des cycles thermiques répondant simultanément à des critères de performance multiples. Cette démarche est utilisée pour la mise au point d'alliages à hautes performances dans les secteurs aéronautique, nucléaire et automobile.

Avantages et limites des approches IA et apprentissage automatique :

- Avantages : capacité à traiter des espaces de grande dimension, aptitude à modéliser des relations non linéaires complexes, possibilité d'intégrer des données hétérogènes (composition, procédé, propriétés), réduction des coûts et délais de développement.
- Limites : nécessite des bases de données expérimentales larges et de qualité ; risque d'extrapolation erronée hors du domaine des données d'entraînement ; les modèles purement empiriques manquent d'interprétabilité physique (boîte noire). [105]

III.5 Synthèse comparative des trois méthodes

Le tableau suivant résume les caractéristiques, avantages et limitations des trois approches d'optimisation présentées.

Tableau 1: Synthèse comparative des trois méthodes

Critère	Plans d'expériences	Éléments finis (MEF)	IA / Apprentissage automatique
Données requises	Résultats d'essais structurés	Propriétés matériau (T, phases)	Grande base de données
Coût calcul	Faible	Élevé	Moyen à élevé (entraînement)
Prédiction hors domaine	Limitée	Bonne (si modèle validé)	Risquée sans données
Interprétabilité	Bonne (coefficients)	Bonne (physique)	Limitée (boîte noire)
Application typique	Screening, optimisation paramètres	Contraintes résiduelles, trempe	Conception alliage, nitruration

Méthodologie de recherches

Essai de traction simple :

La caractérisation de la résistance mécanique sous sollicitation uniaxiale a été menée sur un banc d'essai de traction universel Zwick/Roell. Le dispositif expérimental repose sur la mise en charge quasi-statique de l'échantillon, fermement immobilisé entre les mors auto-serrants supérieur (solidaire de la traverse mobile) et inférieur (fixe). L'effort de traction est appliqué de manière continue à une vitesse d'extension constante, minimisant ainsi les effets dynamiques afin d'évaluer le comportement purement mécanique du matériau ou de l'interface collée.

Tout au long de l'expérimentation, le capteur de force de haute précision et le système de mesure du

déplacement de la traverse enregistrent en temps réel la réponse de l'éprouvette. Ces données brutes permettent de tracer les lois de comportement (courbes contrainte-déformation) et d'identifier avec rigueur les seuils de transition élastique, la contrainte maximale supportée avant endommagement, ainsi que le mode de rupture (ductile, fragile ou rupture cohésive/adhésive dans le cas d'un joint structural). De plus, la configuration permet l'adjonction d'une enceinte thermique arrière pour analyser l'influence de la température sur la rigidité et la cinétique de rupture des éprouvettes.



Figure 8: Machine d'essais Servohydrauliques

L'éprouvette ASTM D638 Type V (5) est spécifiquement conçue pour les essais de traction sur les matières plastiques rigides ou semi-rigides. Sa particularité réside dans ses dimensions réduites (micro-éprouvette), ce qui la rend idéale lorsque la quantité de matière disponible est limitée ou pour tester des pièces de petite taille (comme des composants imprimés en 3D ou des échantillons de laboratoire).

Dimensions Officielles (ASTM D638 Type V)

Selon la norme ASTM D638, les dimensions standards de l'éprouvette de Type V sont les suivantes

Dimension (mm) Tolérance (mm)

Longueur totale $L = 63,50\text{mm}$

Longueur de la section calibrée (utile) $L_c = 9,53\text{mm}$ Largeur de la section calibrée $W = 3,18\text{mm}$

Longueur de la zone d'évaluation (Gage length) $G = 7,62\text{mm}$

Largeur des extrémités (zone de préhension) $W_o = 9,53\text{mm}$ Distance entre les mors $D = 25,40\text{mm}$

Rayon de congé (courbure) $R = 4,76$ Épaisseur $T = 3,20\text{mm}$

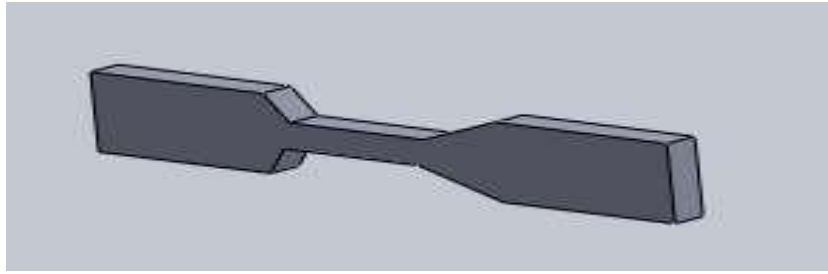


Figure 9:Éprouvette de l'essai traction simple selon la norme ASTM D638 Type5

Traitement par les rayons ultraviolets :

À l'issue du processus d'impression, les éprouvettes subissent une étape cruciale de post-traitement au sein d'une station combinée de lavage et de polymérisation de type Anycubic Wash & Cure 3. Cette opération vise à stabiliser le polymère et à optimiser ses propriétés mécaniques finales (rigidité, résistance à la traction et à l'impact). Dans un premier temps, les pièces subissent un cycle de nettoyage par immersion et agitation afin d'éliminer les résidus de monomères non réagis en surface. En second lieu, les échantillons sont disposés au centre du plateau tournant de la machine pour la phase de post-cuisson (curing).

Le capot de protection anti-UV, qui filtre le rayonnement pour sécuriser l'opérateur, est alors positionné sur sa base. L'appareil est programmé via son panneau de commande numérique pour une exposition continue sous une longueur d'onde UV ciblée. La rotation uniforme à 360 degrés du plateau, associée à la rampe de LED verticale et à la lampe directionnelle FlexiCure, garantit une distribution homogène du flux lumineux sur toutes les faces de l'éprouvette. Ce traitement thermique et photochimique final active la réticulation complète des chaînes moléculaires du matériau, éliminant ainsi les zones de fragilité locales avant la réalisation des essais mécaniques.



Figure 10:Machine de post-traitement

Traitement thermique :

L'utilisation d'un four électrique à convection pour caractériser et modéliser les effets de la température sur les matériaux qu'il s'agisse de polymères, de composites ou d'alliages métalliques constitue une approche méthodologique incontournable tant dans la recherche académique que dans les applications industrielles. Contrairement aux fours statiques conventionnels, qui sont sujets à des gradients thermiques locaux importants dus aux phénomènes de rayonnement et de conduction passive, le four à convection forcée intègre un système de ventilation interne qui pulse l'air chaud de manière continue. Cette dynamique des fluides assure une homogénéité thermique quasi-parfaite au sein de la chambre de calcul et autour de l'échantillon, minimisant ainsi les effets de bord et les écarts de température entre la surface et le cœur de la pièce. Une telle précision est fondamentale pour isoler rigoureusement les variables thermiques lors d'essais de vieillissement accéléré, de traitements de recuit (annealing) visant à relaxer les contraintes résiduelles, ou lors des cycles de post-réticulation des matrices polymères. En garantissant un transfert thermique uniforme et reproductible, ce dispositif permet non seulement de contrôler finement les transitions de phase (telles que la transition vitreuse T_g ou la cristallisation), mais assure également la fiabilité et la répétabilité des propriétés mécaniques finales mesurées lors des essais destructifs ultérieurs.



Figure 11:Four électrique a convection

La courbe de la Figure 12 représente les lois de comportement (courbes contrainte-déformation σ - ϵ) obtenues lors de l'essai de traction simple sur des éprouvettes en PLA soumises à différents types de traitements thermiques[à une température de 70°C] (sans exposition préalable aux UV).

L'analyse de ces courbes permet de dégager plusieurs conclusions majeures sur l'influence du milieu de refroidissement après recuit (annealing) sur les propriétés mécaniques du polymère :

Augmentation de la Contrainte Maximale (σ_{max}) par le traitement thermique

Le traitement thermique suivi d'un refroidissement contrôlé modifie significativement la résistance maximale à la traction du PLA par rapport au matériau témoin (noir : without treatment, = 45 MPa):

Le refroidissement par air (rouge) donne les performances les plus élevées en termes de résistance pure, atteignant une contrainte maximale proche de 58 MPa. Ce refroidissement lent favorise la relaxation des contraintes résiduelles d'impression et augmente potentiellement le taux de cristallinité du PLA, ce qui rigidifie la structure polymérique.

Le refroidissement par huile (bleu) montre également une nette amélioration de la résistance maximale (= 50 MPa) par rapport au témoin.

Le refroidissement par eau (vert) présente une contrainte maximale légèrement inférieure au témoin (= 44 MPa). La trempe thermique brutale dans l'eau fige le matériau dans un état hautement amorphe et peut générer de nouvelles contraintes internes ou des micro-fissures de choc thermique.

1. Modification de la Ductilité et de l'Allongement à la Rupture (ϵ %)

On observe un comportement inversement proportionnel entre la résistance mécanique et la ductilité selon le milieu de trempe:

Le refroidissement par eau (vert), bien qu'il diminue la contrainte maximale, augmente considérablement la ductilité du matériau, avec un allongement à la rupture qui s'étend jusqu'à près de 9,5% (contre environ 3,8% pour le témoin). Le refroidissement ultra-rapide empêche l'organisation des chaînes en sphérolites (cristallites), conservant une matrice amorphe qui s'avère plus étirable et moins fragile sous charge quasi-statique.

Le refroidissement par air (rouge), en revanche, rend le matériau plus rigide mais nettement plus fragile, limitant l'allongement à la rupture à environ 2,8%.

Le refroidissement par huile (bleu) offre un comportement intermédiaire, avec un allongement à la rupture d'environ 6,5%.

2. Évolution du Module d'Élasticité (Rigidité)

La pente de la zone linéaire (élastique) au début de chaque courbe indique la rigidité (module de Young) du matériau :

Le refroidissement par air (rouge) présente la pente la plus raide, confirmant une augmentation significative du module d'élasticité.

Le refroidissement par eau (vert) montre la pente la moins inclinée, traduisant une baisse de rigidité (matériau plus souple).

Le choix du mode de refroidissement après le traitement thermique permet de piloter les propriétés mécaniques du PLA imprimé :

Si l'objectif est d'obtenir une résistance maximale à la charge au détriment de la déformabilité, le refroidissement par air est optimal.

Si l'objectif est d'accroître la capacité de déformation (ductilité) avant rupture, le refroidissement par eau (trempe) s'avère le plus efficace.

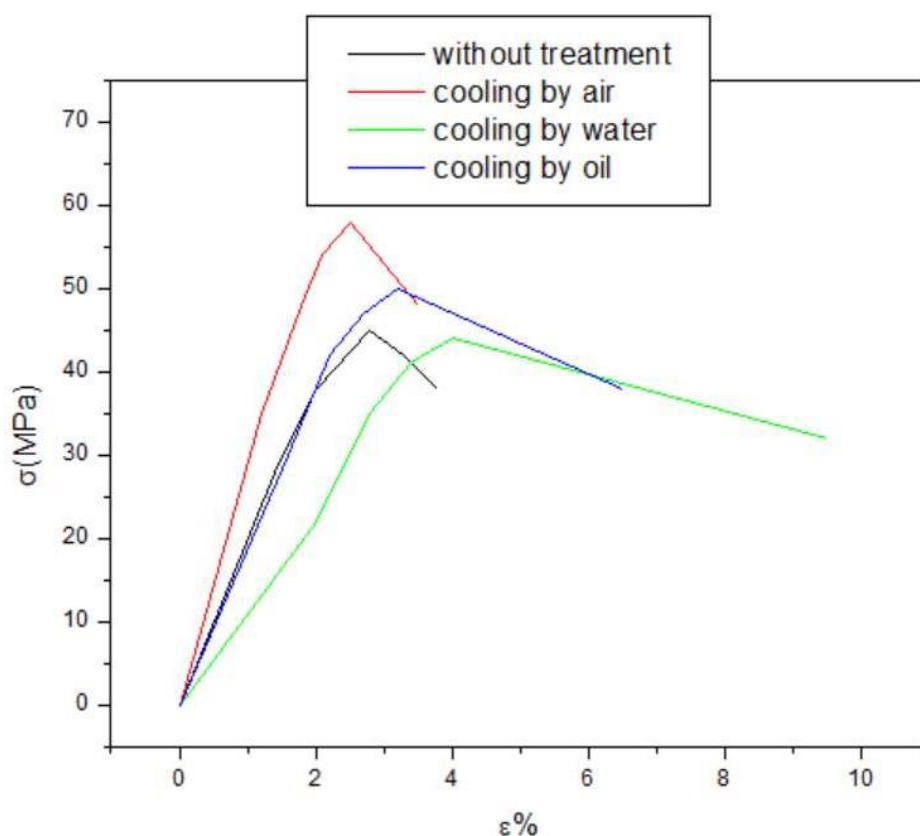


Figure 12: l'effet du traitement thermique[à 70°C] sur des échantillons soumis à une contrainte de traction

La Figure 13 représente les courbes contrainte-déformation (σ - ϵ) obtenues lors de l'essai de traction simple sur des éprouvettes en PLA ayant subi une double sollicitation : d'abord un post-traitement par rayons ultra-violets (UV) (au sein de la station Anycubic Wash & Cure 3), suivi du traitement thermique[à 70°C] avec différents modes de refroidissement.

L'interprétation de cette figure met en évidence l'effet combiné de la dégradation photochimique par les UV et du traitement thermique sur le comportement mécanique du matériau :

1. Chute globale de la Résistance Mécanique (Effet des UV)

En comparant la Figure 13 à la Figure 12, on observe un effondrement généralisé des contraintes

maximales ($\sigma_{\max}$) pour l'ensemble des échantillons:

La résistance maximale du témoin (without treatment) chute de = 45 MPa (Fig. 10) à seulement = 30 MPa (Fig. 13).

Le maximum absolu (refroidissement par air) passe de = 58 MPa (Fig. 10) à = 42 MPa (Fig. 13).
Explication physique : L'exposition prolongée aux rayonnements UV active une photodégradation du PLA. Ce phénomène induit une scission des chaînes macromoléculaires, réduisant la masse molaire moyenne du polymère. La structure ainsi fragilisée présente une résistance nettement amoindrie sous sollicitation uniaxiale.

2. Diminution drastique de la Ductilité (Fragilisation)

L'allongement à la rupture (ε %) subit une réduction spectaculaire sur toutes les courbes: L'allongement maximal, qui atteignait près de 9,5% pour le refroidissement par eau sur la Figure 10, ne dépasse plus 2,5% sur la Figure 13.

L'échantillon refroidi par air rompt de manière extrêmement précoce à un allongement d'environ 1,2%. Cette perte majeure de plasticité confirme que le réseau de polymère, après réticulation poussée ou coupure de chaînes sous UV, devient hautement fragile, limitant toute capacité de déformation macroscopique avant la rupture.

Analyse selon le mode de refroidissement (Après UV)

Bien que le matériau soit globalement dégradé par les UV, la hiérarchie de l'influence des milieux de refroidissement reste visible, mais avec des nuances importantes:

Refroidissement par Air (Rouge) : Il conserve la contrainte maximale la plus élevée (= 42 MPa), mais au prix d'une fragilité extrême (ε = 1,2%). Le recuit thermique compense partiellement la perte de résistance due aux UV en réorganisant les chaînes courtes restantes, augmentant la rigidité (pente élastique la plus raide).

Refroidissement par Eau (Vert) : Contrairement à la Figure 12 où il offrait une ductilité record (9,5%), la trempe à l'eau après exposition aux UV ne permet d'atteindre qu'un allongement de 2,5%. Toutefois, il reste le mode de refroidissement qui préserve le plus de déformabilité par rapport aux autres. Sa contrainte maximale s'établit à = 38 MPa, ce qui est curieusement supérieur au témoin non traité thermiquement (= 30 MPa).

Refroidissement par Huile (Bleu) : Il affiche un comportement atypique avec une zone de déformation linéaire moins rigide (pente plus faible), une contrainte maximale de = 34 MPa, et un étirement allant jusqu'à 3,8%. L'huile semble ici avoir limité la sévérité du choc thermique sur les chaînes déjà fragilisées par les UV, permettant un compromis de déformation légèrement plus étendu. La Figure 13 illustre le vieillissement ou la modification structurale du PLA sous l'action des UV. Bien que le traitement thermique (notamment le refroidissement par air ou par eau) permette de restructurer le

matériau pour maintenir une rigidité et une résistance acceptables, il ne peut pas masquer la perte irréversible de ductilité provoquée par l'irradiation photochimique.

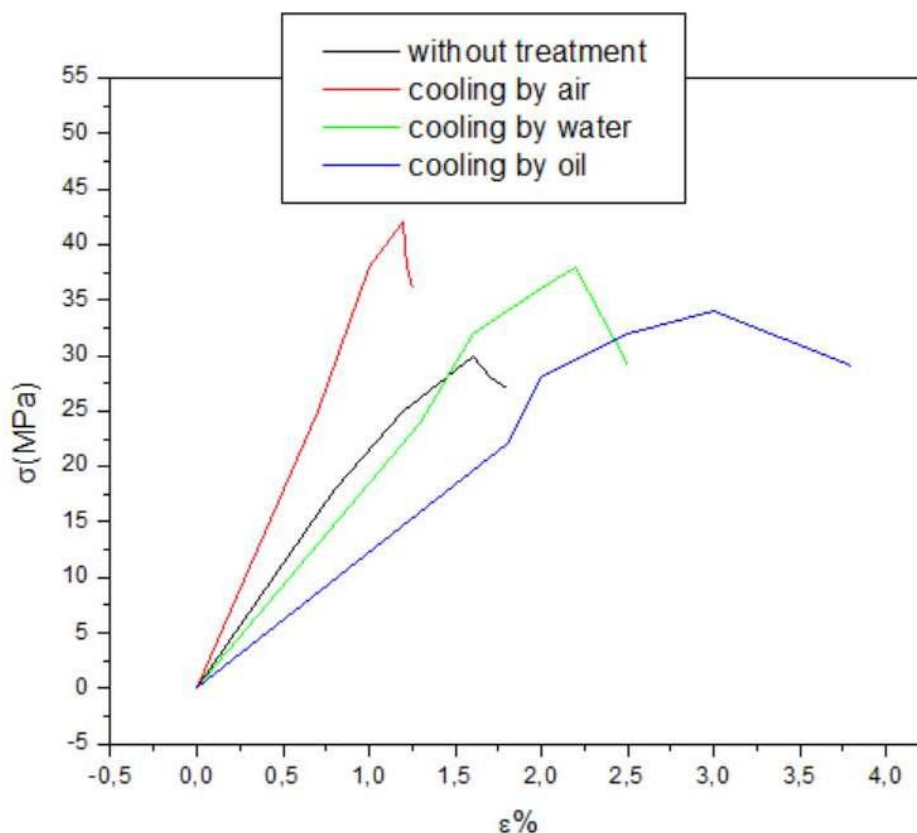


Figure 13: l'effet du traitement thermique [à 70°C] sur des échantillons soumis à une contrainte de traction après l'utilisation du rayon ultra-violet

Essai de la résilience :

L'essai de résilience, principalement réalisé à l'aide d'un mouton-pendule de Charpy (normes ISO 148-1 pour les métaux ou ISO 179 / ASTM D256 pour les polymères et composites), est une méthode de caractérisation mécanique destructive essentielle pour évaluer la fragilité ou la ténacité d'un matériau soumis à un choc à haute vitesse. Cet essai consiste à rompre d'un seul coup une éprouvette, généralement entaillée en V ou en U pour concentrer les contraintes, afin de mesurer l'énergie cinétique absorbée lors de l'impact. En quantifiant cette énergie de rupture (exprimée en Joules par mètre carré, J/m^2 , ou en J/cm^2), l'essai de résilience permet de déterminer la capacité d'une structure à résister à la propagation brutale des fissures sous l'effet de sollicitations dynamiques instantanées. De plus, lorsqu'il est répété à différentes températures, cet essai s'avère crucial pour identifier la température de transition ductile-fragile, un paramètre fondamental pour anticiper les risques de rupture catastrophique en service, notamment pour les structures soudées, les composants aéronautiques ou les polymères soumis à des conditions climatiques sévères.

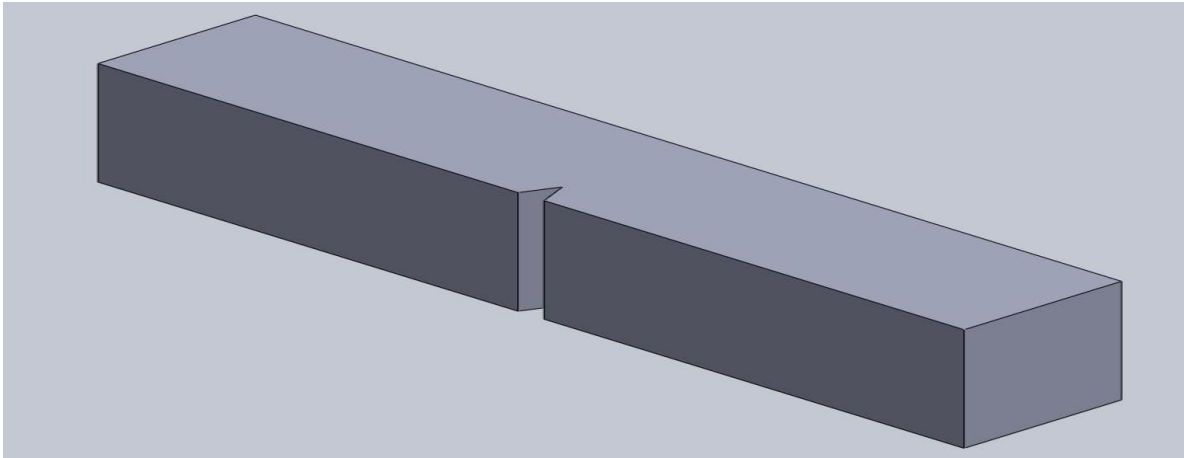


Figure 14:Éprouvette de l’essai charpy

Tableau 3: les valeurs de l’essai de résilience (charpy)

Type du traitement	Valeur de la résilience
Sans traitement	0.14 joule
Refroidissement par l’air	0.1 joule
Refroidissement par l’eau	0.26 joule
Refroidissement par l’huile	0.19 joule

Tableau 4: les valeurs de l’essai de résilience (charpy) après l’utilisation du rayon ultra-violet

Type du traitement	Valeur de la résilience
Sans traitement	0.06 joule
Refroidissement par l’air	0.05 joule
Refroidissement par l’eau	0.14 joule
Refroidissement par l’huile	0.1 joule

Résultats et discussions

La Figure 15 représente le tableau des données expérimentales (entrées et sorties) structuré sous forme d'un plan d'expériences (Design of Experiments - DoE). Ce tableau regroupe 18 essais (Exp No) exécutés dans un ordre aléatoire (Run Order) afin de s'affranchir des biais expérimentaux.

Les Facteurs d'Entrée (Variables indépendantes)

L'étude évalue l'impact de deux paramètres de configuration/traitement sur le matériau (PLA):

Capacité thermique (colonne 5) : Elle varie selon trois niveaux distincts : 1, 2 et 4,18.

Densité (colonne 6) : Elle varie également selon trois niveaux : 0, 10 et 20.

Les Réponses de Sortie (Propriétés mécaniques)

L'effet de ces deux facteurs est mesuré à travers deux caractéristiques mécaniques majeures:

Contrainte maximale (σ_{max} en MPa, colonne 7) : Représente la résistance maximale du PLA lors de l'essai de traction simple. On observe qu'elle varie globalement entre 44 MPa (pour une capacité thermique élevée de 4,18) et près de 59,4 MPa (pour une capacité thermique basse de 1 et une densité de 20).

Résilience (en J/cm² ou unité équivalente, colonne 8) : Représente la capacité du matériau à absorber l'énergie lors d'un choc. Elle varie inversement par rapport à la contrainte, allant de 0,1 (matériau plus fragile) à 0,266 (matériau plus tenace).

Analyse des Tendances Principales (Phénoménologie)

En observant de plus près les combinaisons du tableau, on distingue des comportements bien précis

Effet prédominant de la Capacité Thermique : Lorsque la capacité thermique est au plus bas (1), la contrainte maximale est très élevée (58 à 59,3 MPa), mais la résilience est faible (0,1 à 0,102). Le matériau est rigide et résistant, mais plus fragile.

Lorsque la capacité thermique augmente pour atteindre son maximum (4,18), la contrainte maximale chute significativement à 44 - 45 MPa, tandis que la résilience double pour atteindre son maximum à 0,266. Le matériau devient nettement plus tenace (absorbe mieux les chocs) au détriment de sa résistance pure.

Effet secondaire de la Densité :

À capacité thermique constante (par exemple égale à 1), l'augmentation de la densité de 0 à 20 fait légèrement grimper la contrainte maximale (de 58 MPa à 59,363 MPa). La densité apporte donc un gain de résistance structurelle direct.

De même, à capacité thermique maximale (4,18), passer d'une densité de 0 à 20 fait passer la contrainte de 44 MPa à 45,034 MPa et la résilience de 0,260 à 0,266.

	1	2	3	4	5	6	7	8
	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	capacité thermique	densité	contrainte max	resilience
1	1	N1	15	Incl	1	0	58	0,1
2	2	N2	11	Incl	1	0	58	0,1
3	3	N3	12	Incl	2	0	50	0,19
4	4	N4	10	Incl	4,18	0	44	0,26
5	5	N5	9	Incl	4,18	0	44	0,26
6	6	N6	17	Incl	1	10	58,667	0,101
7	7	N7	4	Incl	2	10	50,575	0,192
8	8	N8	14	Incl	2	10	50,575	0,192
9	9	N9	16	Incl	4,18	10	44,506	0,263
10	10	N10	1	Incl	4,18	10	44,506	0,263
11	11	N11	18	Incl	1	20	59,363	0,102
12	12	N12	8	Incl	1	20	59,363	0,194
13	13	N13	13	Incl	2	20	51,175	0,194
14	14	N14	2	Incl	4,18	20	45,034	0,266
15	15	N15	5	Incl	4,18	20	45,034	0,266
16	16	N16	7	Incl	4,18	20	45,034	0,266
17	17	N17	3	Incl	4,18	20	45,034	0,266
18	18	N18	6	Incl	4,18	20	45,034	0,266

Figure 15: tableau des données d'entrées et de sortie

La Figure 16 présente les résultats de l'optimisation multi-objectifs menée à l'aide d'un algorithme d'optimisation (ici après 5000 itérations). L'objectif principal de cette étape est de résoudre le compromis mis en évidence dans la figure 16 : maximiser simultanément la contrainte maximale et la résilience, qui sont deux propriétés antagonistes.

1. Les Paramètres de Configuration de l'Optimisation (Tableaux Supérieurs)

Tableau des Facteurs (Factors) : Il définit le domaine de recherche de l'algorithme. La capacité thermique est libre d'évoluer entre 1 et 4, et la densité entre 0 et 20.

Tableau des Réponses (Responses) : Il indique les critères imposés. Les deux propriétés ("contrainte max" et "resilience") ont pour objectif d'être maximisées (Maximize) avec un poids égal (Weight = 1). Le programme cherche à s'approcher des cibles idéales (Target) qui sont de 60,1186 MPa pour la contrainte et de 0,274299 pour la résilience.

2. Analyse de la Solution Optimale (Ligne de compromis)

Le tableau inférieur affiche les meilleures solutions trouvées. La première ligne (surlignée en noir) représente le compromis optimal global (l'optimum de Pareto) retenu par l'algorithme:

Capacité thermique optimale = 1,0622 Densité optimale = 20

Pour cette combinaison exacte des facteurs d'entrée, le matériau en PLA atteint les performances prédictives suivantes :

Contrainte maximale = 58,7477 MPa Résilience = 0,1455

3. Discussion Physique et Mécanique du Compromis

L'examen des autres lignes du tableau (itérations secondaires) permet de comprendre la logique de l'algorithme :

Priorité à la résistance (Lignes 1, 3, 6, 7, 8) : L'algorithme converge massivement vers une capacité thermique proche de 1,06 et une densité maximale de 20. Cela permet de préserver une contrainte très élevée (~58,7 MPa) au détriment d'une perte partielle de résilience (qui passe de son maximum potentiel de 0,266 à une valeur intermédiaire de 0,1455).

Option alternative (Ligne 2) : À l'itération 1808, le programme a exploré une configuration inverse : avec une capacité thermique de 4 et une densité de 2,462, la résilience est excellente (0,2598) mais la contrainte chute sévèrement à 44,0195 MPa.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1 capacité thermique	Free		1	4
2 densité	Free		0	20

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 contrainte max	Maximize	1	58,584	60,1186	
2 résilience	Maximize	1	0,257764	0,274299	

Iteration: 5000 Iteration slider: _____

	1	2	3	4	5	6
	capacité thermique	densité	contrainte max	resilience	iter	log(D)
1	1,0622	20	58,7477	0,1455	5000	1,4877
2	4	2,462	44,0195	0,2598	1808	1,7436
3	1,0617	20	58,7519	0,1455	4147	1,4879
4	3,3659	19,9999	45,4819	0,2595	2172	1,6617
5	3,3695	20	45,4751	0,2595	2718	1,6621
6	1,0616	20	58,7531	0,1455	2803	1,4879
7	1,0617	20	58,7519	0,1455	4147	1,4879
8	1,0617	20	58,7519	0,1455	4147	1,4879

Figure 16: la valeur optimale après 5000 itérations des contraintes max et résilience max

	1	2	3	4	5
1	contrainte max	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	47,7803	0,00981441	0	0,0213837
3	cap	-7,13124	0,00462598	3,7398e-033	0,0100791
4	den	0,596125	0,00450726	2,3423e-020	0,00982043
5	cap*cap	3,75669	0,00975954	6,36334e-026	0,0212641
6	den*den	0,013018	0,00845514	0,149587	0,0184221
7	cap*den	-0,0739669	0,00456239	1,593e-009	0,00994055
8					
9	N = 18	Q2 =	1,000	Cond. no. =	6,0500
10	DF = 12	R2 =	1,000	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	1,000	RSD =	0,0153
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 17: formule de la prédiction de la contrainte max

$$\sigma_{\max} = 47.7803 - 7.13124 \cdot \text{cap} + 0.596125 \cdot \text{den} + 3.75669 \cdot \text{cap}^2 + 0.013018 \cdot \text{den}^2 - 0.0739669 \cdot \text{cap} \cdot \text{den}$$

cap : capacité thermique

den : densité du pla en glass

$\sigma_{\max}$: contrainte max du l'essai de traction simple

	1	2	3	4	5
1	resilience	Coeff. SC	Std. Err.	P	Conf. int(±)
2	Constant	0,216285	0,0129661	1,14711e-009	0,0282505
3	cap	0,071684	0,00611149	6,23268e-008	0,0133157
4	den	0,0110251	0,00595465	0,0888494	0,012974
5	cap*cap	-0,0298905	0,0128936	0,0388904	0,0280925
6	den*den	0,00586237	0,0111703	0,609269	0,0243379
7	cap*den	-0,00886816	0,00602748	0,166946	0,0131327
8					
9	N = 18	Q2 =	0,809	Cond. no. =	6,0500
10	DF = 12	R2 =	0,935	Y-miss =	0
11		R2 Adj. =	0,908	RSD =	0,0202
12				Conf. lev. =	0,95

Figure 18: formule de la prédiction de la Résilience

$$R = 47.7803 - 7.13124 \cdot \text{cap} + 0.596125 \cdot \text{den} + 3.75669 \cdot \text{cap}^2 + 0.013018 \cdot \text{den}^2 - 0.0739669 \cdot \text{cap} \cdot \text{den}$$

cap : capacité thermique

den : densité du pla en glass R : Résilience

La Figure 19 représente un graphe en contours 2D (Surface de réponse) qui illustre l'évolution de la contrainte maximale en fonction de deux variables indépendantes : la capacité thermique (en abscisse, axe X) et la densité du PLA (en ordonnée, axe Y).

Structure et Lecture du Graphe

Code couleur (Gradient) : Les variations de la contrainte maximale sont matérialisées par des bandes de couleur. Les zones rouges/orange (à gauche) correspondent aux valeurs de contrainte les plus élevées ($\geq 58\text{MPa}$), tandis que la zone bleue foncée (à droite) correspond à la résistance la plus faible ($43,9\text{MPa}$).

Isolignes (Lignes de niveau) : Les lignes obliques tracent les couples (capacité thermique, densité) qui donnent exactement la même valeur de contrainte (de $58,0$ à $43,9\text{MPa}$ avec un pas régulier).

Analyse des Effets des Facteurs

Effet dominant de la Capacité Thermique (Axe horizontal) : Les lignes de contour sont presque verticales, ce qui démontre graphiquement que la contrainte maximale dépend de manière critique de la capacité thermique.

Lorsque l'on se déplace de la gauche vers la droite (augmentation de la capacité thermique de 1,0 à 4,0), on traverse rapidement toutes les lignes de niveau décroissantes.

La résistance chute de manière quasi linéaire en passant de sa zone maximale de 58MPa à sa valeur minimale de 43,9MPa.

Effet secondaire de la Densité (Axe vertical) : Les lignes de contour présentent une légère inclinaison vers la droite à mesure que l'on monte sur l'axe de la densité (de 0 à 20).

Cette inclinaison signifie qu'à une capacité thermique donnée, si l'on augmente la densité du polymère, la contrainte mécanique maximale augmente légèrement.

Par exemple, pour obtenir une contrainte de 55,9MPa avec une densité de 0, il faut une capacité thermique d'environ 1,2. Si la densité monte à 20, cette même contrainte de 55,9MPa peut être maintenue avec une capacité thermique légèrement supérieure (=1,35).

Ce graphique tridimensionnel projeté confirme visuellement le modèle de prédiction mathématique issu de la régression. Pour maximiser la résistance mécanique (contrainte maximale) de vos éprouvettes en PLA, il faut impérativement se positionner dans le coin supérieur gauche du graphique, caractérisé par:

Une capacité thermique minimale (proche de 1,0).

Une densité maximale (proche de 20).

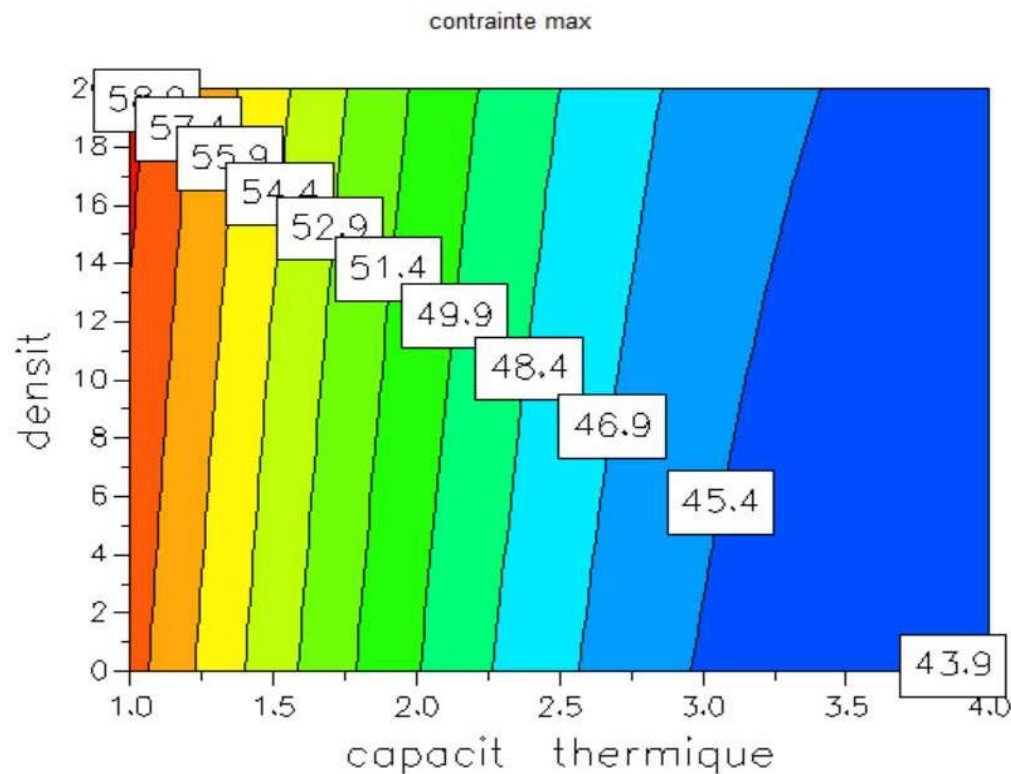


Figure 19: La contrainte max en fonction de la capacité thermique et la densité du pla

La Figure 20 représente également un graphe en contours 2D (Surface de réponse), mais cette fois-ci pour analyser l'évolution de la résilience du PLA en fonction de la capacité thermique (axe X) et de la densité (axe Y).

Ce graphique montre un comportement mécanique diamétralement opposé à celui de la contrainte maximale (Figure 19), confirmant le fort antagonisme entre la résistance et la ténacité du matériau.

Structure et Lecture du Graphe

Code couleur (Gradient) : Les nuances vont du bleu foncé (en bas à gauche), qui représente la zone de plus faible résilience ($0,101 \text{ J/cm}^2$), vers le rouge/orange (à droite), qui identifie la zone de résilience maximale ($\geq 0,254 \text{ J/cm}^2$).

Isolignes (Lignes de niveau) : Les courbes tracent les combinaisons exactes de (capacité thermique, densité) menant à une valeur constante de résilience, s'étalant de $0,101$ à plus de $0,254$.

Analyse des Effets des Facteurs

Effet dominant de la Capacité Thermique (Axe horizontal) : Tout comme pour la contrainte max, la capacité thermique est le facteur le plus influent, mais son effet est positif.

En se déplaçant de gauche à droite (de $1,0$ à $4,0$ en capacité thermique), la résilience augmente de manière spectaculaire. Elle passe d'environ $0,101$ à plus de $0,254$.

Explication physique : Une capacité thermique plus élevée induit généralement un refroidissement plus lent ou une modification structurale macromoléculaire qui confère au PLA une plus grande ductilité. Le polymère devient plus souple et absorbe beaucoup mieux l'énergie des chocs avant la rupture.

Effet de la Densité (Axe vertical) et courbure des contours : contrairement à la contrainte maximale où les lignes étaient presque droites, on observe ici une courbure marquée des isolignes, notamment dans la zone de forte capacité thermique (à droite).

Les lignes s'incurvent vers la droite à mesure que la densité s'élève. Cela indique une interaction non linéaire entre les deux facteurs.

Pour obtenir une résilience très élevée (par exemple $0,254$), une faible densité permet d'atteindre cet objectif avec une capacité thermique d'environ $3,5$. Si la densité augmente jusqu'à 20 , il faut pousser la capacité thermique vers des valeurs encore plus élevées ($= 3,7$ à $4,0$) pour maintenir ce même niveau de résilience.

Ce graphique démontre visuellement que pour maximiser la capacité du PLA à résister aux chocs (résilience maximale), il faut cibler la zone située complètement à droite du domaine expérimental, caractérisée par :

Une capacité thermique maximale (proche de 4,0).

Une densité plutôt faible à modérée pour optimiser l'effet, bien que l'influence de la densité reste secondaire par rapport à l'impact massif de la capacité thermique.

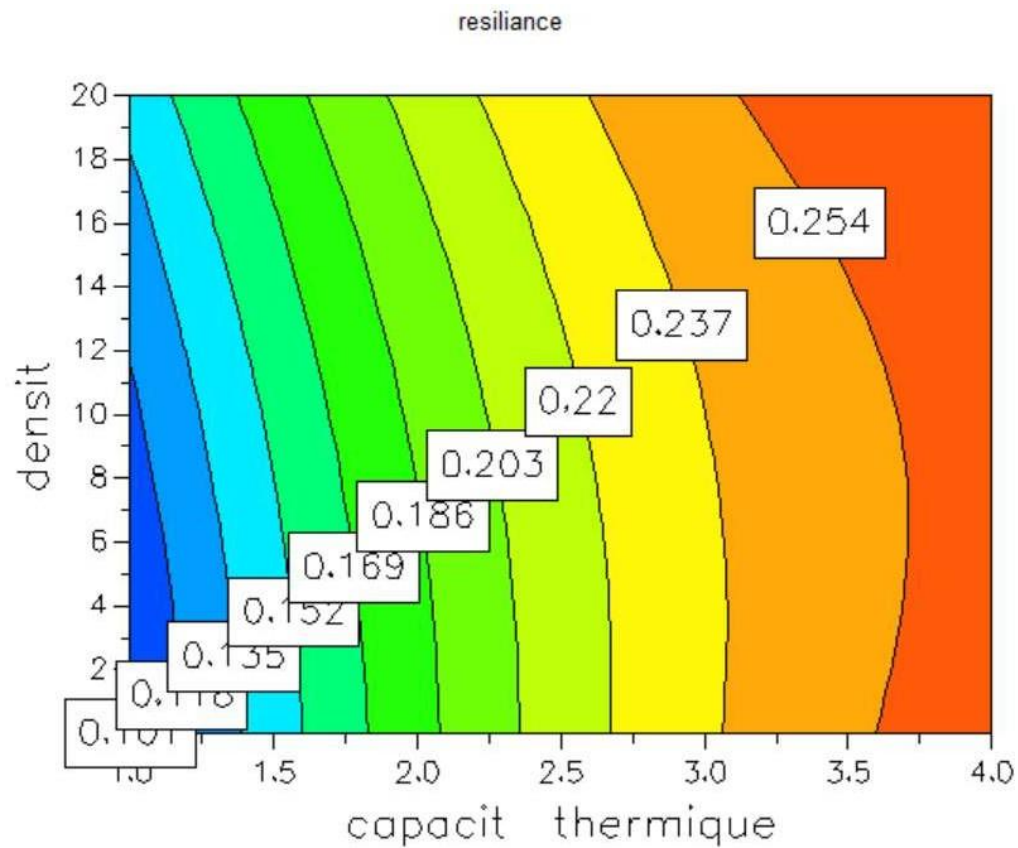


Figure 20: La résilience en fonction de la capacité thermique et la densité du pla

CONCLUSION GENERALE

Arrivé au terme de ce travail de fin d'études, consacré à l'analyse et à l'optimisation du procédé de fabrication par traitement thermique, il convient d'en dégager les principaux enseignements et d'en ouvrir les perspectives industrielles. Ce projet, ancré au cœur des problématiques du Génie Industriel, avait pour ambition de dépasser les approches empiriques traditionnelles afin de proposer une démarche scientifique et technologique intégrée, capable de concilier performance métallurgique, efficience énergétique et maîtrise instrumentale.

En premier lieu, l'étude approfondie des fondements théoriques a mis en exergue la complexité intrinsèque des transformations de phases au sein de la matrice cristalline des aciers. À travers l'analyse des diagrammes thermodynamiques et cinétiques (Fer-Carbone, TTT et TRC), nous avons rappelé que le traitement thermique (qu'il s'agisse de recuit, de trempe ou de revenu) ou thermochimique (comme la nitruration) ne tolère aucune approximation. Chaque microstructure finale et par conséquent chaque gain de dureté, de résilience ou de résistance à la traction est le produit direct d'une cinétique thermique rigoureusement orchestrée.

En second lieu, l'examen minutieux de l'état de l'art technologique a démontré que la réussite de ces transformations repose entièrement sur la performance de l'instrumentation et de la chaîne d'automatisation. La précision des capteurs, la régulation thermique des fours (à atmosphère contrôlée ou sous vide) et la maîtrise des milieux de trempe constituent les véritables verrous industriels. Dans le cadre de notre spécialité en Maintenance de l'automatisme et de l'instrumentation, nous avons mis en lumière le fait que la dérive d'un capteur ou un défaut de régulation thermochimique ne se traduit pas seulement par une panne machine, mais par la mise au rebut directe de pièces à forte valeur ajoutée à cause de l'apparition de contraintes résiduelles, de tapures ou de distorsions géométriques. Le cœur de notre contribution a résidé dans l'évaluation et l'application des méthodes d'optimisation modernes. Face à la multitude de variables interconnectées (température de consigne, vitesse de chauffe, temps de maintien, cinétique de refroidissement), l'utilisation d'outils statistiques tels que les plans d'expériences (DoE) s'est révélée indispensable pour rationaliser le nombre d'essais tout en cartographiant précisément les interactions de cause à effet. De surcroît, l'introduction de la simulation numérique par éléments finis et le potentiel émergent des algorithmes d'apprentissage automatique (IA) ouvrent la voie à une métallurgie computationnelle prédictive. Ces technologies permettent non seulement d'anticiper les propriétés mécaniques finales à partir de bases de données, mais aussi de concevoir des cycles thermiques plus courts, réduisant ainsi drastiquement la consommation d'énergie

et l'empreinte carbone des installations, répondant de ce fait aux exigences contemporaines de la sécurité industrielle et de l'environnement.

Enfin, les résultats expérimentaux et les caractérisations mécaniques (essais de traction, résilience

Charpy) présentés dans ce mémoire viennent corroborer la pertinence de notre démarche d'optimisation. Ils démontrent de manière tangible qu'une gestion rigoureuse et automatisée des paramètres opératoires permet d'atteindre un compromis optimal entre dureté et ténacité, tout en maximisant le rendement de production.

Perspectives

Bien que ce travail apporte des réponses concrètes, il ouvre également des perspectives prometteuses pour des travaux futurs :

Intégration d'un jumeau numérique : Développer, à l'échelle du laboratoire ou du site industriel, un modèle de simulation thermique en temps réel connecté aux capteurs du four (Scada), permettant de corriger instantanément les dérives de température lors du traitement.

Maintenance prédictive de l'instrumentation : Implémenter des algorithmes d'apprentissage supervisé dédiés à la détection précoce du vieillissement des thermocouples et des résistances chauffantes, afin de garantir une atmosphère et une température constantes d'un cycle à l'autre.

Optimisation multi-objectifs par IA : Approfondir le couplage entre les données physiques (CALPHAD) et les réseaux de neurones pour créer un outil d'aide à la décision capable de générer automatiquement le cycle de traitement thermique le plus économique pour une nuance d'acier encore non répertoriée.

En somme, l'optimisation du traitement thermique n'est plus un simple ajustement de paramètres en usine, mais un carrefour multidisciplinaire où la métallurgie physique s'allie à l'automatisme avancée pour propulser l'industrie manufacturière vers l'ère de l'usine 4.0, plus intelligente, plus sûre et plus éco-efficiente.

BIBLIOGRAPHIE

1. Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). *Physical metallurgy principles* (3rd ed.). PWS Publishing.
2. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). Wiley.
3. ASM International. (2004). *Metallurgy for the non-metallurgist*. ASM International.
4. Chaussin, C., & Hilly, G. (1972). *Métallurgie : élaboration des métaux*. Dunod, Paris.
5. Lakhtine, I. (1978). *Métallographie et traitements thermiques des métaux*. Éditions Mir, Moscou.
6. Eckstein, I. (1971). *Werkstoffkunde Stahl und Eisen I*. VEB Deutscher Verlag, Leipzig.
7. Materials Science and Engineering : An Introduction, (chap. 10, p. 303–304)
8. Materials Science and Engineering : An Introduction, (chap. 10, p. 305–315)
9. Materials Science and Engineering : An Introduction, (chap. 10, p. 316)
10. Materials Science and Engineering : An Introduction, (chap.22, p.875 / chap.11 p.425–438)
11. https://www.academia.edu/17753241/Traitement_thermique?sm=b&rhid=39142946607
12. □ **ADEME (Agence de la Transition Écologique)** : Rapports sur l'efficacité énergétique dans l'industrie métallurgique et les fiches techniques sur la récupération de chaleur.
13. □ **CETIM (Centre Technique des Industries Mécaniques)** : Guides pratiques sur l'optimisation énergétique des parcs de fours.
14. □ **Thèses de doctorat** : Rechercher sur *Thèses.fr* avec les mots-clés "Simulation numérique de la trempe" ou "Modélisation des contraintes résiduelles".
15. □ Travaux du **Laboratoire de Science et Génie des Matériaux et de Procédés (LSG2P)** ou du **LEM3** sur les interactions température/phase/mécanique.
16. IEA (2022). *Industrial Heat – Tracking Report*. International Energy Agency. | ADEME (2023). *Efficacité énergétique dans l'industrie*. | AMS 2750E. *Pyrometry*. SAE International.
17. Linseis (2025). *Analyse thermomécanique des métaux — Caractérisation fiable des matériaux pour l'acier et les alliages*. <https://www.linseis.com> | ASM International (2013). *ASM Handbook Vol. 4A: Steel Heat Treating Fundamentals*.
18. : Cours PMP — *Traitement thermique et de surface des aciers*. sf6bde7de.jimcontent.com | Ferros Planes (2025). *Les 7 traitements thermiques de l'acier*. <https://ferrosplanes.com>
19. MFG Shop (2025). *Guide complet des méthodes de traitement thermique*. <https://shop.machinemfg.com>
20. Issuu / UMONS (2024). *Importance de la vitesse de trempe*. | *Technologuepro.com* — *Transformations isothermes des aciers*.
21. C-YCNC (2025). *Analyse des déformations et des fissures des matériaux métalliques*. <https://www.c-ycnc.com>
22. Groupe Thermi-Lyon (2024). *Atmosphère contrôlée*. <https://www.groupe-thermi-lyon.com> | *Techniques de l'Ingénieur M1220*.
23. Montgomery, D.C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley. | IRT M2P (2024). *Simulation et modélisation numérique*. <https://www.irt-m2p.fr>
24. Ferros Planes (2025). *Les 7 traitements thermiques de l'acier*. <https://ferrosplanes.com>

25. Cours Traitements thermiques des aciers, PMP. sf6bde7de.jimcontent.com | Ferros Planes (2025). | Wikipedia — Traitement thermique d'un métal. https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_thermique
26. Myers, R.H., Montgomery, D.C. (2016). Response Surface Methodology. Wiley.
27. Transvalor / SIMHEAT® (2024). Simulation des procédés de traitement thermique. <https://www.transvalor.com/fr/simheat> | IRT M2P (2024). Modélisation de la thermodynamique et de la diffusion en phase dans les fours de cémentation. <https://www.irt-m2p.fr>
28. IRT M2P (2024). Prédiction des phases de l'acier grâce au Machine Learning. <https://www.irt-m2p.fr> | Science.gov — Aciers et traitements thermiques.
29. Montgomery, D.C. (2017). Design and Analysis of Experiments. Wiley. | IRT M2P (2024). Optimisation des paramètres du procédé.
30. Eco Performance Solutions (2025). Fours industriels : optimisation et primes CEE. <https://eco-performance-solutions.fr> | Ferlam Technologies (2025). Optimisation thermique industrielle. <https://www.ferlam-technologies.fr>
31. Eurotherm (2019). Impact de l'augmentation des coûts énergétiques et optimisation énergétique des fours. <https://www.eurotherm.com> | ADEME (2025). Sobriété énergétique — Leviers d'action. <https://agirpoulatransition.ademe.fr>
32. Eco Performance Solutions (2025). Fours industriels : optimisation et primes CEE. | Elmetherm (2025). Four industriel — Guide efficacité énergétique et ROI. <https://www.elmetherm.com>
33. Informa-TECH (2021). Améliorer l'efficacité énergétique des fours industriels. <https://informatech.energir.com> | Ana Pros Indus (2025). Efficacité énergétique : Optimiser la consommation des fours industriels. <https://www.anapro.ma>
34. Ana Pros Indus (2025). Efficacité énergétique des fours industriels. | Bigmedia BPI France (2025). Efficacité énergétique en industrie : enjeux, avantages et solutions. <https://bigmedia.bpifrance.fr>
35. Ferlam Technologies (2025). Optimisation thermique industrielle et réduction des émissions. <https://www.ferlam-technologies.fr> | ADEME (2023).
36. TE Connectivity (2024). Capteurs pour l'Internet Industriel des Objets (IIoT). <https://www.te.com> | Application IoT (2024). Les capteurs intelligents au service de l'Industrie 4.0. <https://www.application-iiot.fr>
37. IFM (2024). Étalonnage des capteurs de température industriels. <https://www.ifm.com> | Groupe Thermi-Lyon (2024). Cémentation gazeuse contrôlée.
38. Application IoT (2024). Les capteurs intelligents au service de l'Industrie 4.0. <https://www.application-iiot.fr> | Eurotherm (2019). Optimisation énergétique des fours.
39. Ana Pros Indus (2025). Efficacité énergétique des fours — IA et jumeaux numériques. | TE Connectivity (2024). IIoT. | Tempcontrolpack (2025). Solutions IoT et analyse prédictive.
40. AMS 2750E (2012). Pyrometry. SAE International. | CQI-9 (2020). Special Process: Heat Treat System Assessment. AIAG. | EN 9100:2018. Quality Management Systems – Aerospace.
41. Eurotherm (2019). Optimisation énergétique et surveillance en ligne. | TE Connectivity (2024). IIoT — Capteurs industriels. | IFM (2024). Capteurs connectés — maintenance conditionnelle.
42. A3TS — FT01 Les fondamentaux de la métallurgie appliquée aux traitements thermiques, a3ts.org, janvier 2025
43. Techniques de l'Ingenieur — Panorama métallurgique des traitements thermiques, M1110
44. Charbonnier — Principes de base des traitements thermiques, thermomecaniques et thermochimiques des aciers, INSA Lyon, 1992 |, A3TS, a3ts.org
45. CTIF MetalBlog — Les mecanismes de la trempe des aciers, metalblog.ctif.com, decembre 2020
46. CTIF MetalBlog — Les mecanismes de la trempe des aciers, 2020
47. Techniques de l'Ingenieur, M1110 — Panorama métallurgique des traitements thermiques

48. *Blessing.ch — Durcissement structural : trempe et revenu, blessing.ch*
49. *Wikipedia FR — Traitement thermique d'un metal, fr.wikipedia.org, 2024*
50. *CTIF MetalBlog — Traitement thermique des alliages d'aluminium, septembre 2023*
51. *CTIF MetalBlog — Traitement thermique des alliages d'aluminium, 2023 | Source [18] : Wikipedia FR*
52. *Charbonnier — Principes de base des traitements thermiques, INSA Lyon, 1992*
53. *ECAM Lyon WAM Didacticiel — Recuit, wam-didacticiel.ecam.fr*
54. *Ferros Planes — Les 7 traitements thermiques de l'acier, ferrosplanes.com, 2025*
55. *CTIF MetalBlog — Les mecanismes de la trempe des aciers, 2020*
56. *ECAM Lyon WAM Didacticiel — TRC & TTT : Facteurs d'influence, wam-didacticiel.ecam.fr*
57. *Wikipedia FR — Traitement thermique d'un metal, 2024*
58. *ECAM Lyon WAM Didacticiel — Revenu, wam-didacticiel.ecam.fr*
59. *Wikipedia FR — Diagramme temps-temperature-transformation, 2025*
60. *ConcepTEK.net — Le diagramme TTT, conceptek.net*
61. *Technologuepro.com — Chapitre 4 : Les transformations a l'etat solide des alliages Fe-C*
62. *Wikipedia FR — Diagramme TTT | Source [14] : Technologuepro.com | Source [13] : Bouville & Ahluwalia, arXiv cond-mat/0605577*
63. *Wikipedia FR — Diagramme TTT, 2025*
64. *ECAM Lyon WAM Didacticiel — Diagramme TRC, wam-didacticiel.ecam.fr*
65. *Scribd — Lecture des diagrammes TRC-TTT*
66. *ConcepTEK.net — Le diagramme TRC*
67. *ECAM Lyon — WAM Didacticiel | Source [11] : ConcepTEK.net | Source [8] : Techniques de l'Ingenieur, TBA1050*
68. *ECAM Lyon WAM Didacticiel — TRC & TTT : Facteurs d'influence*
69. *Techniques de l'Ingenieur — Les traitements thermiques des aciers : Diagrammes TRC et TTT, TBA1050*
70. *TraitementsetMateriaux.fr — Traitements thermiques superficiels : comparaisons et matrices de choix, 2024*
71. *Techniques de l'Ingenieur — Cementation par le carbone et carbonitruration, M1225*
72. *Bodycote — Cementation et carbonitruration, bodycote.com*
73. *Groupe Thermilyon — Cementation ou nitruration : comment choisir ?, 2024*
74. *Simis Manufacturer — Difference entre cementation, nitruration et carbonitruration, 2025*
75. *Wikipedia FR — Traitement thermique superficiel, 2025*
76. *Techniques de l'Ingenieur — Cementation. Carbonitruration : Definitions et principes, M1226*
77. *Slidetodoc — Traitements superficiels : cementation, carbonitruration, nitruration*
78. *Simis Manufacturer — Difference entre cementation, nitruration et carbonitruration, 2025*
79. *TraitementsetMateriaux.fr — Comparaisons et matrices de choix, 2024 | Wikipedia FR | Simis Manufacturer*
80. *Air Liquide — fr.airliquide.com/solutions/traitement-thermique-des-metaux/les-fours-de-traitement-thermique*
81. *Air Liquide & Kintek Solution — fr.airliquide.com ; fr.kindle-tech.com/articles/controlled-atmosphere-furnace*
82. *: ECM Technologies & CNCHVT — ecm-fours-industriels.fr/applications ; cnchvt.com/fr/application/industrial-vacuum-furnace*
83. *ECM Furnaces — ecm-furnaces.com/fours-speciaux/fours-sur-mesure*
84. *Artizono — artizono.com/fr/guide-pas-a-pas-pour-comprendre-la-trempe-dans-le-traitement-thermique*
85. *Artizono — artizono.com/fr/guide-pas-a-pas-pour-comprendre-la-trempe.*
86. *Air Liquide — fr.airliquide.com/solutions/traitement-thermique-des-metaux/comment-choisir-le-bon-fluide-de-trempe*

87. Air Liquide — fr.airliquide.com/solutions/traitement-thermique-des-metaux/quoi-sert-le-traitement-thermique-des-materiaux
88. A3TS & Condat THERMASOL — a3ts.org/fiches-procedes/la-trempe-polymere ; condat.fr/produit/huiles-polymeres-de-trempe
89. Air Liquide — fr.airliquide.com/solutions/traitement-thermique-des-metaux/le-procede-de-trempe-au-gaz
90. Avenir Industrie — avenir-industrie.fr/gestion-thermique-des-process-chimiques-industriels
91. CORREGE/COTEMP Sensing & Pyrocontrôle — correge.fr/thermocouples-principe ; pyrocontrôle.com/fr/applications/metallurgie-fonderie
92. Avenir Industrie — avenir-industrie.fr/gestion-thermique-des-process-chimiques-industriels
93. Avenir Industrie & IPCOTEC — avenir-industrie.fr ; ipcotec.com/instrumentation-diverse
94. Avenir Industrie — avenir-industrie.fr/gestion-thermique-des-process-chimiques-industriels
95. Pyrocontrôle — pyrocontrôle.com/fr/applications/metallurgie-fonderie
96. Taguchi, G. (1986). Introduction to Quality Engineering. Asian Productivity Organization, Tokyo. — Méthode de référence pour les plans d'expériences robustes et l'optimisation des procédés industriels.
97. Pillet, M. (2001). Les plans d'expériences par la méthode Taguchi. Éditions d'Organisation, Paris, 250 p. (Archive ouverte HAL : hal-00470004). — Ouvrage pédagogique de référence en langue française sur la planification des expériences et la conception robuste.
98. Goupy, J. (2006). Les plans d'expériences. Revue MODULAD, numéro 34, pp. 1–114. Disponible en ligne : www.rocq.inria.fr/axis/modulad — Tutoriel complet couvrant les plans de Box-Behnken, de Doehlert, composites centrés et la méthodologie des surfaces de réponse.
99. Dalgic, M. & Löwisch, G. (2006). Hardenability of different bearing steels with reference to calculated and measured hardness profiles. HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 61(1), pp. 29–37. — Application des simulations thermo-métallo-mécaniques à la prédiction des profils de dureté après trempe.
100. Labidi, W. (2019). Application au procédé de soudage et de traitements thermiques — Modélisation des contraintes résiduelles. Mémoire d'ingénieur, Université Annaba, Algérie. Disponible : biblio.univ-annaba.dz — Modélisation par ABAQUS des contraintes résiduelles induites par les cycles thermiques de soudage.
101. Hurel, V. (ETS Montréal, 2020). Optimisation du traitement thermique d'un acier à haute performance. Thèse de maîtrise, École de Technologie Supérieure, Montréal. Disponible : espace.etsmtl.ca/2932/ — Étude combinant dilatométrie, analyse microstructurale et proposition d'un nouveau cycle de traitement thermique.
102. Thèse en cours de soutenance — Prédiction numérique rapide des contraintes résiduelles dans les composants métalliques après traitements thermiques locaux. Theses.fr, réf. s414093. Disponible : theses.fr/s414093 — Développement de métamodèles couplant simulation EF et substituts numériques pour l'optimisation rapide des traitements thermiques de détensionnement.
103. Razafimahefa, P. & al. (2023). Prédiction des paramètres de nitruration : modélisation phénoménologique et intelligence artificielle. Congrès A3TS 2023, IRT M2P / Arts et Métiers d'Aix-en-Provence. Cité dans : Usine Nouvelle, 2 novembre 2023. — Présentation des approches hybrides physique-IA pour l'optimisation des procédés de nitruration gazeuse.
104. Buffat, M. (Université Lyon 1). Prédiction des propriétés mécaniques des aciers par apprentissage automatique. Cours « Intelligence artificielle en mécanique », TP n°3. Disponible : perso.univ-lyon1.fr/marc.buffat — Utilisation d'algorithmes supervisés sur la base de données Kaggle « Propriétés mécaniques des aciers faiblement alliés » pour la prédiction de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité.
105. Techniques de l'Ingénieur (2022). Conception computationnelle d'alliages par intelligence artificielle et thermodynamique. Dossier IN252. Disponible : techniques-ingenieur.fr — Présentation de la combinaison CALPHAD-IA (réseaux de neurones,

algorithmes génétiques, processus gaussiens) pour la conception d'alliages métalliques à hautes performances.

106. IRT M2P (Institut de Recherche Technologique Matériaux, Métallurgie et Procédés). Simulation & Modélisation Numérique. Disponible : irt-m2p.fr/fr/expertise/simulation-modelisation-numerique — Description des activités de simulation numérique des procédés de traitements thermiques, thermochimiques et de surface, incluant les approches par apprentissage automatique pour la prédiction des phases de l'acier