



(Document de pré-jury)

Optimisation de la qualité de préparation des tôles sur la ligne grenaillage-peinture

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Bachelier Automatisation

Matthew SWERTS

3 AU



Responsable en entreprise : Christian MALFLIET

Promoteur EPHEC-Tech : Gaël NGUYEN

Année Académique 2024 – 2025

Sommaire

1 INTRODUCTION 4

1.1 Présentation de NLMK Clabecq	4
1.1.1 Processus de production à NLMK Clabecq	4
1.1.2 Le Processus de Production	4
1.1.3 Laminage à chaud : les équipements clés	4
1.1.4 Laminoir finisseur continu	4
1.1.5 Processus de contrôle qualité et certification	5
1.2 Produits fabriqués à NLMK Clabecq	5
1.2.1 Aciers résistants à l'abrasion - QUARD	5
1.2.2 Aciers à haute limite d'élasticité – QUEND	5
1.2.3 Aciers de construction navale	5
1.2.4 Applications industrielles diverses	5
1.2.5 Innovation et développement de nouveaux produits	5
1.3 Présentation du projet	7
1.3.1 Fonctionnement de la ligne	8
1.3.2 Objectifs	10
1.4 Cahier de charges	11
1.4.1 Objectifs principaux	11
1.4.2 La grenailleuse	11
1.4.3 Le processus actuel	12
1.4.4 Améliorations attendues	13
1.4.5 Contraintes Techniques et Organisationnelles	13
1.4.6 Résultats Attendus et Perspectives d'Amélioration	14
1.4.7 Conclusion	14

2 NOTIONS THÉORIQUES LIÉES AU PROJET 14

2.1 Notion mécanique – RDM	14
2.1.1 Les contraintes mécaniques	14
2.1.2 La déformation des matériaux	15
2.1.3 La rupture des matériaux	15
2.1.4 La science des matériaux appliquée aux tôles utilisées	15
2.1.4.1 Propriétés mécaniques des aciers utilisés	15
2.1.4.2 Les traitements thermiques et leur impact sur la dureté	16
2.1.5 Application des notions théoriques au projet de grenailage	16
2.1.6 Conclusion	16
2.2 Notion d'automatisation (logiciel)	17
2.2.1 STEP 7	17
2.2.1.1 Comparaison avec TIA Portal et Unity PRO XL	17
2.2.2 In Touch : Supervision et HMI	18
2.2.2.1 Connexion avec STEP 7	18
2.2.3 Comparaison des fonctionnalités	18
2.2.4 Conclusion	19

3 PLANIFICATION DU PROJET ET FINALISATION DU TFE	19
4 DÉVELOPPEMENT COMPLET	19
4.1 Situation initiale	19
4.2 Étude théorique	19
4.3 Étude des solutions possibles	19
4.4 Options techniques retenues	19
4.5 Étude budgétaire (optionnel)	19
4.6 Liste du matériel nécessaire (optionnel)	19
4.7 Mise en œuvre de la solution	19
4.8 Documentation de la solution	19
4.9 Retour personnel d'expérience	19
5 CONCLUSION ET PERSPECTIVES FUTURES	19
6 BIBLIOGRAPHIE	20

Tables des illustrations

Figure 1 : Processus complet NLMK Clabecq	6
Figure 2 : Ligne GP NLMK Clabecq / Duferco	8
Figure 3 : Représentation des turbines de la grenailleuse.....	12

1 Introduction

L'automatisation, qu'elle soit industrielle ou domestique, continue son essor énorme dans le monde actuel qui devient de plus en plus technologique au fil des nouvelles découvertes pour « améliorer » notre quotidien.

Ces nouvelles technologies nous permettent de rendre les processus plus fiables, plus robustes et surtout d'être en perpétuelle amélioration afin d'optimiser au maximum les productions, la qualité du produit ou de la prestation attendu par le client.

Ici, nous allons passer au travers des techniques d'automatisation industrielle dans le monde de la sidérurgie, qui, depuis le début, a toujours été un monde compliqué mais grâce à ces nouvelles innovations, est devenu plus accessible.

1.1 Présentation de NLMK Clabecq

1.1.1 Processus de production à NLMK Clabecq

NLMK Clabecq, une division de NLMK Europe, est une usine spécialisée dans la production de plaques d'acier de haute qualité. Le processus de fabrication à l'usine de Clabecq repose sur des technologies avancées, des procédés de fabrication intégrés et un contrôle rigoureux de la qualité. L'usine produit une gamme variée de plaques d'acier, allant des aciers standards aux aciers à haute valeur ajoutée, selon des spécifications techniques strictes. Ce processus se retrouve ci-dessous en Figure 1.

1.1.2 Le Processus de Production

Le processus de production à NLMK Clabecq commence par la fusion de l'acier, suivie d'un laminage à chaud et d'une finition de haute précision. L'acier brut arrive sous forme de brames de plusieurs tonnes et celles-ci sont prêtes à être laminées. Ce procédé se déroule dans un environnement de haute technologie qui garantit des rendements optimaux et des performances constantes.

1.1.3 Laminage à chaud : les équipements clés

L'une des étapes les plus critiques dans la production de plaques d'acier est le laminage à chaud. NLMK Clabecq utilise un train quarto réversible, qui permet d'obtenir des épaisseurs de plaque extrêmement précises, entre 3 et 64 mm. Cette technologie de laminage permet de traiter des brames d'acier de grande dimension, avec un taux de rendement élevé. Le laminoir est équipé de plusieurs lignes de réchauffage et de raffinage, garantissant une parfaite homogénéité de la température, essentielle pour le contrôle de la microstructure de l'acier.

1.1.4 Laminoir finisseur continu

Une fois les plaques formées dans le train quarto, elles passent dans un laminoir finisseur continu à quatre cages indépendantes. Ce processus de finition permet d'obtenir des tolérances strictes en termes de planéité, d'épaisseur et de rugosité de surface. Les cages indépendantes permettent de contrôler précisément la déformation des plaques, optimisant ainsi les propriétés mécaniques et la qualité de la finition.

1.1.5 Processus de contrôle qualité et certification

L'usine de Clabecq est certifiée ISO 9001 pour son système de gestion de la qualité et ISO 14001 pour la gestion environnementale. Ces certifications garantissent que toutes les étapes de production, de la fusion à la finition, respectent les normes internationales. L'usine utilise également des techniques de mesure sophistiquées pour vérifier chaque aspect des produits finis, notamment des tests de traction, de dureté et de planéité.

1.2 Produits fabriqués à NLMK Clabecq

1.2.1 Aciers résistants à l'abrasion - QUARD

Les plaques d'acier résistantes à l'abrasion, sous la marque QUARD, sont fabriquées à partir d'acières spéciaux conçus pour résister à des conditions de travail extrêmement difficiles. Ces plaques sont utilisées dans des applications où les pièces en acier sont soumises à une usure intense, telles que les engins de chantier, les équipements miniers, et les applications industrielles lourdes. Les aciers QUARD sont reconnus pour leur haute résistance à l'abrasion, même dans des environnements de travail agressifs.

1.2.2 Aciers à haute limite d'élasticité – QUEND

Les aciers QUEND sont des alliages haute performance qui combinent une grande résistance à la traction et une flexibilité supérieure. Ils sont utilisés dans des applications qui nécessitent des propriétés mécaniques exceptionnelles. Ces produits sont largement utilisés dans la construction automobile, les structures métalliques de grande envergure et dans des applications exigeant à la fois résistance et élasticité, telles que les structures en acier soumises à des charges dynamiques.

1.2.3 Aciers de construction navale

NLMK Clabecq fabrique également des plaques d'acier pour la construction navale. Ces aciers doivent répondre à des critères rigoureux de résistance à la corrosion et à la fatigue, tout en maintenant une excellente résistance mécanique. Les produits destinés à la construction navale sont certifiés selon des normes internationales, garantissant leur fiabilité pour des applications maritimes de longue durée.

1.2.4 Applications industrielles diverses

Outre les secteurs cités, NLMK Clabecq produit également des plaques d'acier pour une variété d'autres applications industrielles, y compris les équipements lourds, les machines agricoles et les infrastructures ferroviaires. L'usine répond aux besoins spécifiques de chaque client avec des solutions sur mesure en termes de dimensions, de tolérances et de propriétés mécaniques.

1.2.5 Innovation et développement de nouveaux produits

NLMK Clabecq investit continuellement dans la recherche et le développement de nouveaux produits. L'entreprise met en œuvre des technologies de pointe pour améliorer les caractéristiques de ses produits, notamment la résistance à l'usure et à la corrosion. Les recherches récentes se sont concentrées sur les alliages métalliques à haute résistance et sur les traitements thermiques innovants afin d'améliorer encore les propriétés mécaniques de l'acier produit.

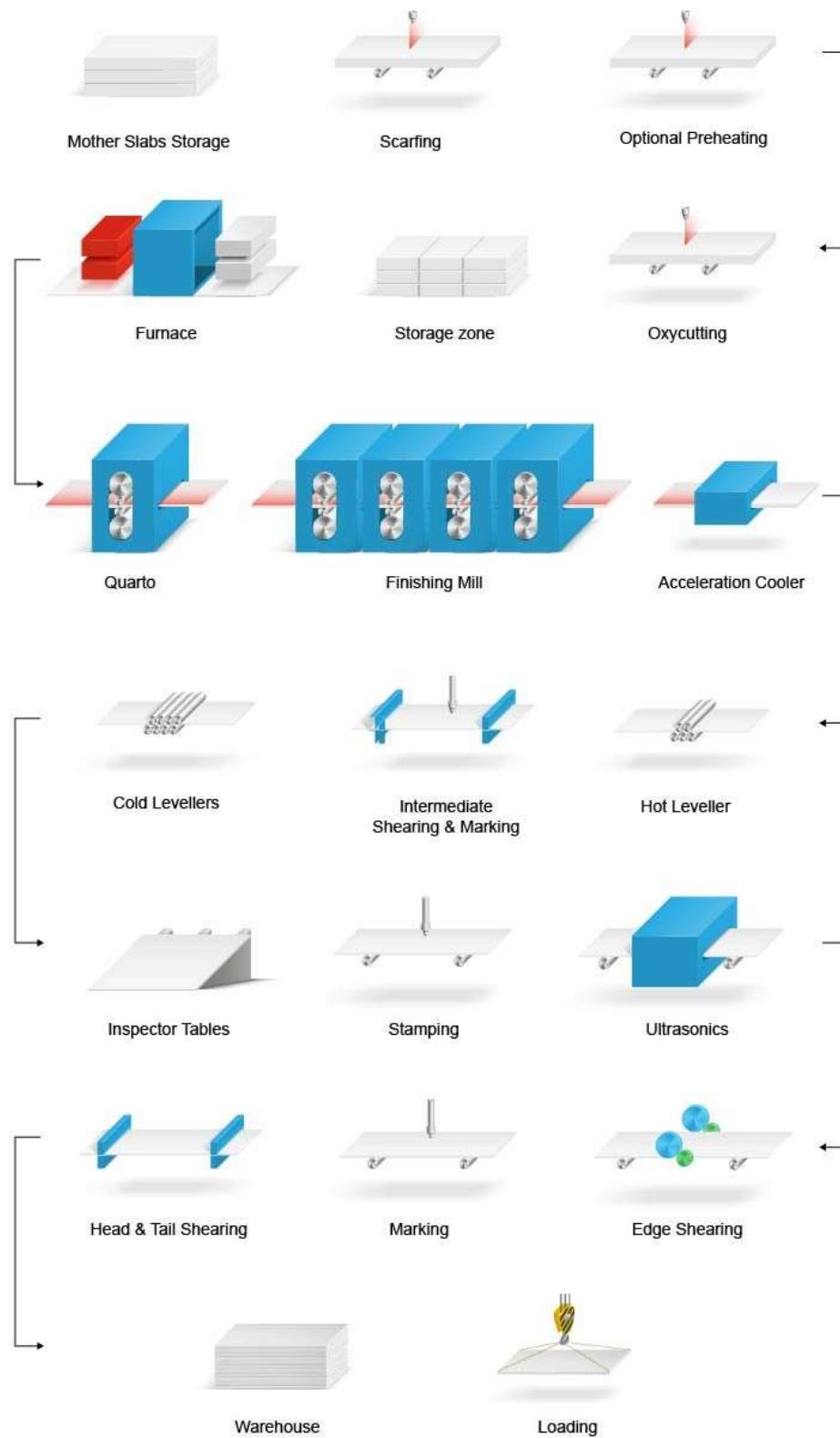


Figure 1 : Processus complet NLMK Clabecq

1.3 Présentation du projet

Ce projet peut être décomposé en plusieurs parties que je vais détailler ci-après depuis le fonctionnement de la ligne grenaillage-peinture (ci-après nommée GP) jusqu'au stockage des tôles. Cette ligne GP est là, comme son nom l'indique, pour préparer les tôles à être peinte selon la demande du client. La préparation passe par un réchauffage des tôles, un grenaillage, un nettoyage, une peinture complète et un marquage contenant toutes les informations nécessaires pour identifier la plaque.

La partie de la ligne qui va nous intéresser ici est celle qui gère la préparation des tôles avant qu'elle ne passe dans la cabine de peinture. L'optimisation et l'amélioration de ce processus sont au centre de l'intérêt afin d'optimiser la production au maximum.

Pour le moment, ce processus se fait sur base de l'épaisseur des tôles ce qui est un peu contraignant quand on sait que NLMK produit des tôles de différents types qui ont une limite d'élasticité différente (QUEND plus élevée que le QUARD (cf. [p.5 1.2](#))). C'est pour cela qu'améliorer la qualité de préparation des tôles sur cette ligne GP par le biais de la dureté des plaques rendrait le grenaillage plus précis selon le type de plaque passant sur cette ligne.

De plus, afin d'augmenter la production de cette ligne de manière significative, la vitesse de convoyage des tôles est très importante. Il faudra donc accélérer les convoyeurs dans chaque partie du système de manière à ce que la qualité du produit fini ne soit pas dégradée à cause de cette accélération.

En revanche, cette vitesse peut créer des collisions entre les tôles présentes sur la ligne, il faudra donc avoir un tracking irréprochable afin d'éviter les trous, les retards, les chevauchements et les collisions.

1.3.1 Fonctionnement de la ligne

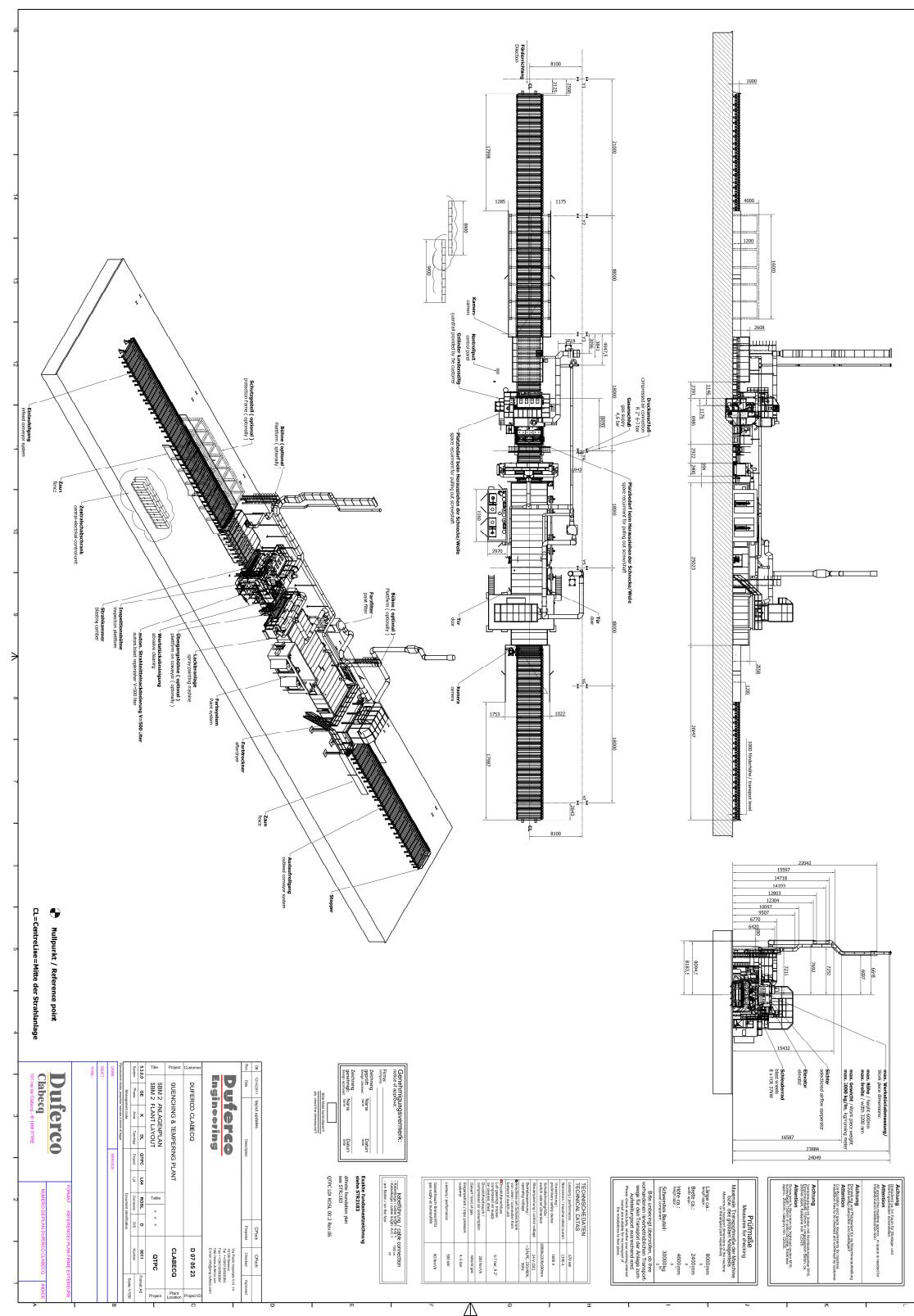


Figure 2 : Ligne GP NLMK Clabecq / Duferco

1. Pour commencer, au début de notre ligne GP se trouve un portique nommée « K3 », ce portique est là pour déposer les tôles sur le début de la ligne dès que son id a été rentré dans le système via l'hmi sur le pupitre opérateur. Ce portique va soit chercher des tôles dans le stock normal ou alors dans le « saddle » qui est un stock des tôles pas conformes (mais toujours bonnes pour la production) qui doivent repasser sur la ligne.
2. Ensuite, la tôle va passer dans un four de préchauffe afin d'augmenter sa température et par conséquent améliorer son état en sortie du processus de préparation avant de passer dans le tunnel de peinture. De plus, cette chaleur va permettre à la plaque de pré-sécher avant le tunnel de séchage principal de la ligne.
3. Après ce four, nous passons au processus de préparation à la peinture ¹: la grenailleuse. Comme son nom l'indique, va permettre de greniller les tôles avec des petites particules de métal de différentes formes afin de faire disparaître toutes les impuretés (calamine, poussières, ...). Cette grenade de forme différente est choisie scrupuleusement car elle va permettre de ne pas faire gondoler la tôle et par conséquent devoir mettre la tôle en « défectueux ». Tout cela est prévu pour avoir une optimisation de la préparation des tôles sur la ligne GP.

Cette machine est divisée en deux parties, une partie grenaiillage comme expliquée ci-dessus et une partie nettoyage qui va permettre de retirer tous les résidus de grenade avec des brosses qui s'adaptent à l'épaisseur de tôles afin d'être au plus proche du métal et d'être le plus efficace possible. De plus, il y'a une aspiration qui récupère aussi les poussières et une soufflerie qui va permettre d'améliorer ce processus de nettoyage et alors le rendre le plus parfait possible pour permettre une peinture irréprochable.
4. Subséquemment, au niveau du traitement des tôles, il reste la peinture et le séchage. La peinture se fait grâce à un robot de peinture qui va faire des allers retours en peignant la tôle. Ces trainées de peinture vont créer des triangles, qui, avec les nombre de passages durant que la tôle avance, vont être si proches que la peinture sera nette et lisse. Pour obtenir ce résultat, le robot adapte ses temps d'arrêts en bout de course afin d'avoir la meilleure couverture possible.

Dans cette usine, la peinture peut être de différentes épaisseurs car on ne sait pas quelles contraintes vont subir les tôles. Elles peuvent être transportées en camion ou alors aller de l'autre côté du globe en bateau et donc subir l'atmosphère maritime durant des semaines (atmosphère salin et humide qui peut détériorer la qualité du métal). La gamme d'épaisseur va de 15 microns à 30 microns.

Suite à cette peinture, la tôle peinte va passer dans un tunnel de séchage afin de finir totalement le processus et aller vers la marqueuse pour recevoir sa « carte d'identité » constituée de toutes les infos nécessaires au premier coup d'œil.
5. Enfin, quand tout ce processus de préparation de peinture et de marquage est fini, la tôle avance vers le portique « K4 » afin d'être envoyée vers un processus de cerclage et elles vont être mise sur palette pour les clients.

¹ Si les tôles sont enregistrées comme « noire », aucun de ces traitements n'est appliqués.

1.3.2 Objectifs

Notre objectif principal est de rendre ce processus plus fiable, avec un meilleur rendement et donc une qualité de tôle supérieure à ce qui sort aujourd’hui de l’usine de Clabecq.

Comment rendre cette machine plus performante qu’aujourd’hui ? nous allons travailler sur la qualité de préparation des tôles et cela passe par un changement drastique de la valeur utilisée dans la grenailleuse. En effet, en ce moment, comme dit précédemment, le grenailage se fait sur base de l’épaisseur de tôle or, nous voulons travailler sur la dureté (en brinell) afin d’avoir un plus grand panel de recettes à utiliser et être beaucoup plus précis sur la qualité des tôles.

Les recettes actuelles agissent sur les plaques 3 à 70 mm d’épaisseur et avec un intervalle de courant injecté dans les turbines qui varie de 25 à 40 Ampères. Notre objectif est donc de changer cette valeur d’épaisseur en valeur de dureté différente selon le type de plaques (QUARD et QUEND).

De plus, dans ce même objectif, en vue de l’amélioration complète de la ligne GP, on va agir sur les vitesses des convoyeurs afin que la production soit significativement améliorée. En revanche, si on augmente la vitesse de passage dans la grenailleuse il faudra que le courant injecté dans les turbines soit assez puissant afin de garder une qualité irréprochable pour les clients, que ça soit au niveau du grenailage ou du nettoyage.

Dans le futur, suite à ces accélérations, un projet envisageable serait de réduire les temps d’arrêt du robot de peinture qui se situe dans le tunnel juste après la grenailleuse. Si nous réduisons ses temps d’arrêt, le robot de peinture passera plus vite au-dessus des tôles et donc, une possibilité pourrait être d’accélérer le convoyeur dans ce tunnel et dès lors continuer cette montée de la production et du rendement.

Comme mentionné, l’intérêt majeur de ce projet est d’améliorer la qualité de préparation, d’augmenter la production et donc d’être plus rentable sur le long terme au fil des améliorations.

1.4 Cahier de charges

1.4.1 Objectifs principaux

L'optimisation des processus industriels est un enjeu majeur dans le domaine de la sidérurgie. Chez NLMK Clabecq, la ligne de grenaillage-peinture (GP) joue un rôle central dans la préparation des tôles avant leur revêtement. Actuellement, la qualité de préparation repose principalement sur l'épaisseur des tôles, un paramètre qui ne prend pas en compte les différences de dureté et de composition des aciers traités.

L'objectif principal de ce projet est d'améliorer la qualité du grenaillage en basant le processus sur la dureté des tôles plutôt que sur leur simple épaisseur. Cette approche permettra un traitement plus adapté et précis, optimisant ainsi l'état de surface et l'adhérence de la peinture. Une tôle bien préparée garantit une meilleure résistance aux conditions environnementales, qu'elle soit destinée à des applications industrielles lourdes ou soumise à des conditions extrêmes comme l'exposition à un environnement maritime.

Un second objectif, tout aussi important, est d'améliorer la productivité de la ligne GP. L'augmentation de la vitesse des convoyeurs doit permettre d'accélérer le flux de production et d'accroître la rentabilité de l'usine. Toutefois, cette augmentation doit être maîtrisée pour éviter les chevauchements, les trous dans la chaîne de production et les risques de collision entre les tôles. L'optimisation du processus devra donc inclure un suivi précis et un ajustement automatique des paramètres en fonction du type de tôle traitée.

1.4.2 La grenailleuse

Dans notre cas, la grenailleuse est de marque Rösler : la Rösler RRB 34/6. C'est une machine de grenaillage à convoyeur à rouleaux, utilisée pour le traitement de surface des tôles. Conçue pour fonctionner en continu, elle permet de nettoyer les surfaces, d'éliminer la calamine, la rouille et les impuretés, tout en préparant les matériaux (propreté et rugosité optimum) pour des traitements ultérieurs, tels que la peinture dans notre cas (le revêtement est une possibilité aussi). Chez NLMK Clabecq, cette machine joue un rôle essentiel dans la qualité des tôles peintes en garantissant une surface homogène et propre (comme un sablage).

Le processus de grenaillage repose sur l'utilisation de 8 turbines (cf. Figure 3) à haute vitesse qui projettent un abrasif métallique (grenailles d'acier) contre la surface des pièces à traiter. Ces turbines sont disposées de manière stratégique afin d'assurer une couverture optimale et uniforme de la surface. Le cycle de grenaillage se déroule en plusieurs étapes :

- Les tôles et profilés sont déposés sur un convoyeur à rouleaux, qui les transporte à travers la machine. La vitesse du convoyeur est un paramètre clé, car elle influence directement l'intensité du grenaillage. Une vitesse trop élevée réduit l'efficacité du traitement, tandis qu'une vitesse trop faible peut entraîner une usure excessive de l'abrasif et des turbines.
- Au cœur du processus, les 8 turbines centrifuges projettent des grenailles à grande vitesse contre la surface des tôles. Ces turbines sont alimentées par un système de recyclage qui récupère et filtre les grenailles usagées. L'optimisation de l'amplitude et de l'angle de projection des turbines est essentielle pour obtenir un traitement homogène.
- Après l'impact, les grenailles tombent dans un système de récupération, où elles passent par un tamis vibrant qui élimine les particules cassées et les impuretés. Un séparateur magnétique trie ensuite les grenailles réutilisables, qui sont renvoyées vers les turbines pour un nouveau cycle. L'usure des grenailles est un paramètre à surveiller, car elle impacte la consommation d'abrasif et la qualité du traitement.

- Pour éviter l'accumulation de poussières métalliques dans la cabine de grenaillage et dans l'environnement de travail, un système d'extraction et de filtration est en place. Ce système capte les fines particules en suspension et les dirige vers un filtre, garantissant ainsi une meilleure visibilité à l'intérieur de la machine et réduisant l'entretien des composants internes.

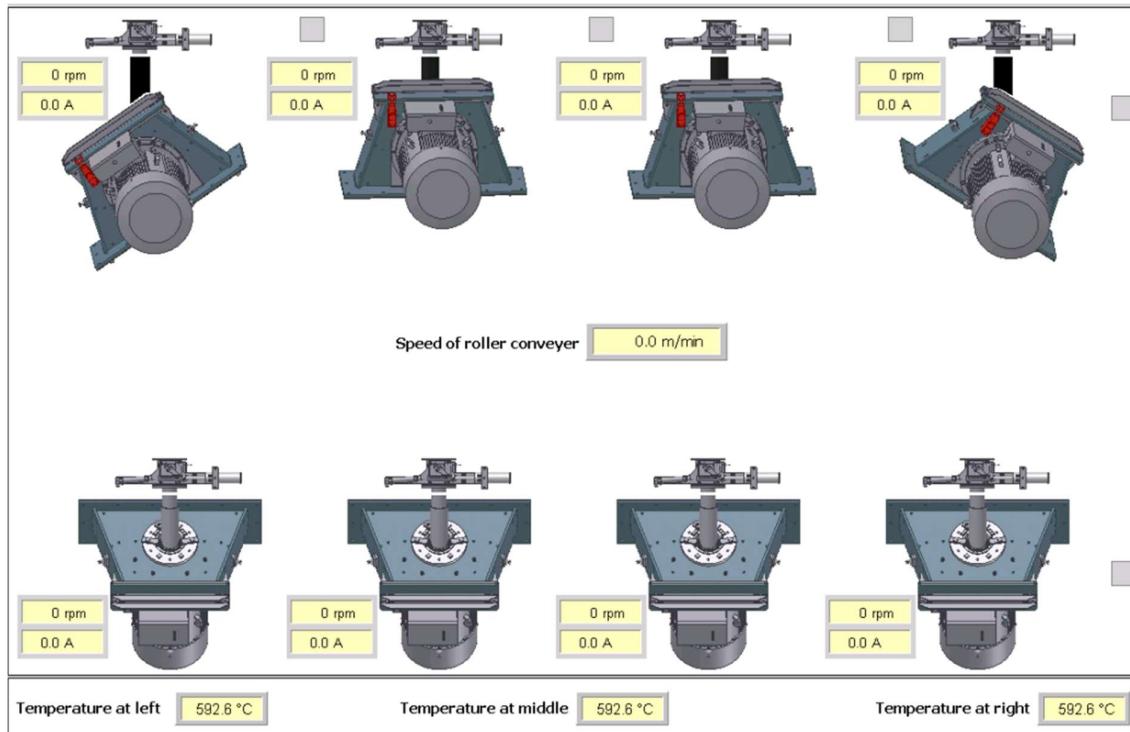


Figure 3 : Représentation des turbines de la grenailleuse

1.4.3 Le processus actuel

En ce moment, le processus de grenaillage n'est pas optimal compte tenu des différents types de tôles qui se trouvent en production ici, à Clabecq. Comme dit précédemment, le processus se base sur l'épaisseur des tôles peu importe la dureté de surface, la limite d'élasticité, ... le processus reste quand même fonctionnel de manière satisfaisante mais on peut toujours l'améliorer.

Passer par l'épaisseur des tôles est une manière simple de faire car on peut facilement définir cette valeur par une simple mesure automatique ou non. De plus, cette valeur d'épaisseur est directement enregistrée sur l'ID de la tôle, ce qui va permettre à l'opérateur de directement, en rentrant le numéro de la tôle sur son pupitre, avoir la bonne valeur et toute la ligne va s'adapter en conséquence.

Il faut aussi prendre en compte que le processus de grenaillage ne s'effectue que sur les tôles destinées à être peintes. Si celles-ci ont été commandées comme « noires », elles vont seulement passer sur cette ligne comme si c'était un simple convoyeur qui avance à sa vitesse maximum. En revanche, si la tôle doit être peinte, elle passera dans tout le processus comme expliqué sous la figure 2.

Au niveau des couleurs, NLMK Clabecq propose à ses clients un panel de 5 couleurs : le brun, le vert, le rouge, le bleu et le gris. Ces couleurs n'ont pas de significations particulières au niveau technique, c'est une simple demande des clients. Toutefois, l'épaisseur de peinture peut aussi servir à protéger les plaques selon le milieu dans lequel elles vont voyager.

1.4.4 Améliorations attendues

Le nouveau système devra intégrer un mode de gestion plus avancé du grenaillage basé sur la dureté des tôles. Cela nécessitera plusieurs améliorations techniques et organisationnelles :

- *Une adaptation automatique des paramètres de grenaillage* : plutôt que de se baser sur l'épaisseur, la machine devra ajuster ses réglages en fonction de la dureté (exprimée en Brinell) des tôles. Cette donnée de dureté sera envoyée depuis les PDI et écrite dans une base de données. Cette valeur sera par la suite récupérée et utilisée à des fins de comparaison pour trouver la bonne recette.
- *Une régulation dynamique du courant injecté dans les turbines* : actuellement réglé en fonction de l'épaisseur, il devra désormais être ajusté en fonction de la dureté pour garantir une efficacité optimale du grenaillage.
- *Une optimisation des convoyeurs* : l'augmentation de la vitesse des convoyeurs devra être synchronisée avec l'intensité du grenaillage pour maintenir une qualité de surface irréprochable.
- *Un système de tracking des tôles améliorées* : pour éviter les chevauchements et collisions, un tracking précis des tôles tout au long de la ligne sera nécessaire (comme d'application actuellement). Basé sur un delta de distance entre la tête et la queue de la tôle, mesuré par les cellules présentes sur la ligne.

1.4.5 Contraintes Techniques et Organisationnelles

L'intégration du nouveau système de gestion du grenaillage devra respecter plusieurs contraintes :

- *Compatibilité avec l'existant* : Le projet devra s'adapter à la ligne GP actuelle, sans nécessiter de modifications majeures qui perturberaient la production.
- *Fiabilité et maintenance* : Le nouveau système devra être robuste et nécessiter un entretien minimal (entretien mécanique comme actuellement) pour ne pas engendrer de surcoût opérationnel.
- *Interface opérateur intuitive* : Une mise à jour de l'interface HMI sera nécessaire pour permettre aux opérateurs de surveiller et d'ajuster les paramètres de recettes en temps réel.
- *Phase de tests et validation* : Avant un déploiement complet, le système devra être testé en conditions réelles pour s'assurer de son efficacité et de sa stabilité pour ne pas perturber le processus actuel.

1.4.6 Résultats Attendus et Perspectives d'Amélioration

L'implémentation de ce projet devrait permettre :

- *Une meilleure qualité de préparation des tôles* : Une surface homogène et optimisée, garantissant une adhérence parfaite de la peinture.
- *Une production plus rapide et rentable* : L'optimisation des convoyeurs et du grenaillage permettra d'accroître le rendement de l'usine.
- *Une gestion plus flexible des tôles* : La possibilité d'adapter précisément les paramètres en fonction des caractéristiques mécaniques de chaque tôle.

À long terme, d'autres améliorations pourront être envisagées, comme l'optimisation des cycles de peinture ou l'intégration de capteurs avancés pour un suivi en temps réel de la qualité des tôles.

1.4.7 Conclusion

L'optimisation du grenaillage représente un levier clé pour améliorer la qualité et la productivité de la ligne GP chez NLMK Clabecq.

En adaptant le processus en fonction de la dureté des tôles, l'usine pourra garantir une meilleure préparation des tôles, tout en accélérant la cadence et les revenus de la production. Ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration continue et ouvre la voie à d'autres évolutions, renforçant la compétitivité et la rentabilité du site sur le long terme.

2 Notions théoriques liées au projet

2.1 Notion mécanique – RDM

La résistance des matériaux est une discipline de la mécanique qui étudie le comportement des solides soumis à différentes charges. Son but est de déterminer comment un matériau réagit aux efforts extérieurs et d'éviter qu'il ne se déforme de manière excessive ou ne se casse.

Dans le cadre du projet d'optimisation du grenaillage des tôles, la RDM permet de comprendre comment les tôles réagissent aux forces appliquées par les turbines de la grenailleuse et pourquoi il est essentiel de choisir des paramètres adaptés en fonction de leur dureté.

2.1.1 Les contraintes mécaniques

Une contrainte est une force exercée par unité de surface sur un matériau. Il en existe plusieurs types :

- *Contrainte normale (σ)* : Elle est perpendiculaire à la surface du matériau et peut être de traction (étirement) ou de compression (écrasement). La formule est : $\sigma = F/A$ où F est la force appliquée et A la surface de la section soumise à la contrainte.
- *Contrainte de cisaillement (τ)* : Elle agit parallèlement à la surface du matériau, comme lorsque l'on tente de découper une feuille de papier en la cisaillant. Elle se calcule de manière similaire : $\tau = F/A$

Dans le projet, ces contraintes sont importantes car la dureté de la tôle influencera la manière dont elle réagit au grenaillage. Une tôle trop fragile pourrait se déformer, tandis qu'une tôle très dure nécessitera une recette avec un courant plus élevé pour être correctement préparée.

2.1.2 La déformation des matériaux

Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, il se déforme. Cette déformation peut être réversible (élastique) ou irréversible (plastique).

- *Déformation élastique* : Lorsque la charge est retirée ou les tensions relâchées, le matériau reprend sa forme initiale. Elle suit la loi de Hooke : $\sigma = E \cdot \epsilon$ où E est le module de Young (propriété du matériau) et ϵ est la déformation relative ($\epsilon = \Delta L/L$).
- *Déformation plastique* : Si la contrainte dépasse une certaine limite (limite d'élasticité), le matériau ne reprend plus sa forme initiale et garde une déformation permanente.

Dans le projet, la dureté des tôles influencera leur capacité à résister aux impacts des particules projetées par la grenailleuse sans subir de déformations permanentes.

2.1.3 La rupture des matériaux

Un matériau peut se rompre sous l'effet de charges excessives. Les modes de rupture varient selon les matériaux :

- *Rupture fragile* : Le matériau casse brusquement sans déformation apparente (ex. : verre, acier trempé).
- *Rupture ductile* : Le matériau se déforme avant de casser (ex. : acier à faible teneur en carbone).

Pour éviter ces phénomènes, il est essentiel d'adapter le processus de grenaillage à la dureté des tôles afin d'éviter tout endommagement indésirable qui mènerait à des pertes.

2.1.4 La science des matériaux appliquée aux tôles utilisées

Dans le projet, deux types d'acières sont principalement utilisés : les aciers QUARD et QUEND. Leur résistance mécanique dépend de leur composition et de leur traitement thermique (nommé Quenching and Tempering chez NLMK) :

2.1.4.1 Propriétés mécaniques des aciers utilisés

Comme expliqué ci-dessus, ces deux types d'acier ont des propriétés bien différentes que nous allons rappeler ici :

- L'acier QUARD est un acier résistant à l'abrasion. Il est conçu pour supporter de fortes sollicitations mécaniques sans s'user prématurément. Son traitement thermique lui confère une dureté élevée, ce qui le rend plus difficile à grenailler (remorque de camion, godet de chantier, ...).
- L'acier QUEND est un acier à haute limite d'élasticité, capable de résister à des charges importantes tout en restant relativement flexible. Il est souvent utilisé dans des structures nécessitant à la fois résistance et déformation contrôlée comme les grues de chantier par exemple.

La dureté de ces aciers est mesurée en Brinell (HB). Un acier à haute dureté nécessite un grenaillage plus puissant pour obtenir un état de surface optimal et donc, par conséquent, une meilleure accroche de la peinture.

2.1.4.2 *Les traitements thermiques et leur impact sur la dureté*

Les aciers utilisés dans l'industrie sidérurgique subissent différents traitements thermiques afin d'améliorer leurs propriétés mécaniques :

- *La trempe* : Un refroidissement rapide qui augmente la dureté et la résistance mécanique de l'acier.
- *Le revenu* : Un réchauffement à température contrôlée qui réduit la fragilité de l'acier tout en conservant une bonne dureté.
- *Le recuit* : Un chauffage suivi d'un refroidissement lent qui assouplit l'acier et améliore son usinabilité.

Ces traitements influencent directement la dureté des tôles, ce qui impose un réglage précis des paramètres de grenaillage pour éviter des erreurs de traitement.

2.1.5 *Application des notions théoriques au projet de grenaillage*

L'objectif du projet est d'améliorer la qualité de préparation des tôles en ajustant le grenaillage en fonction de leur dureté. Actuellement, le processus est basé uniquement sur l'épaisseur des tôles, ce qui ne tient pas compte des variations de dureté et peut entraîner un grenaillage inadapté.

Les principaux enjeux techniques sont les suivants :

- Adapter la puissance du grenaillage : Une tôle trop dure nécessite une énergie plus importante pour obtenir une rugosité optimale, tandis qu'une tôle plus tendre risque d'être endommagée si elle est traitée trop intensément.
- Optimiser la vitesse des convoyeurs : L'augmentation de la vitesse de passage des tôles dans la grenadeuse impose un réglage précis du courant injecté dans les turbines pour maintenir une qualité de traitement optimale.

L'intégration de ces notions théoriques dans le projet permettra d'améliorer la précision du grenaillage et d'optimiser la productivité de l'usine.

2.1.6 Conclusion

La résistance des matériaux et la science des matériaux jouent un rôle essentiel dans l'optimisation du grenaillage des tôles.

Comprendre la dureté des matériaux et leurs propriétés mécaniques permet d'ajuster les paramètres du processus afin d'améliorer la qualité de traitement et d'augmenter la productivité de la ligne GP. En basant le grenaillage sur la dureté plutôt que sur l'épaisseur, il sera possible d'adapter finement chaque traitement en fonction du type de tôle, garantissant ainsi une meilleure performance globale.

2.2 Notion d'automatisation (logiciel)

L'automatisation industrielle repose sur l'utilisation de logiciels spécialisés pour programmer et superviser des systèmes de contrôle. Dans notre cas, Step 7 et InTouch font partie intégrante des outils utilisés dans ce système. Step 7 permet de programmer et configurer les automates Siemens SIMATIC S7, tandis que InTouch est un logiciel SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) destiné à la supervision des processus industriels.

Pour mieux comprendre leur fonctionnement, il est utile d'établir des parallèles avec TIA Portal, (qui est la plateforme d'ingénierie moderne de Siemens) et Unity Pro XL (utilisé pour la programmation des automates Schneider) qui sont des logiciels utilisés en cours.

2.2.1 STEP 7

Step 7 est l'environnement de développement utilisé pour programmer les automates de la gamme Siemens S7-300, S7-400 et S7-1200. Il permet de :

- Configurer le matériel en définissant les entrées/sorties, les cartes d'extension et la communication réseau.
- Écrire le programme de contrôle en utilisant différents langages :
 - LAD (Ladder Diagram) : similaire aux schémas électriques, utilisé pour la logique booléenne (aussi appelé plus communément langage à contact).
 - FBD (Function Block Diagram) : basé sur des blocs fonctionnels interconnectés.
 - STL (Statement List) : langage bas niveau plus proche de l'assembleur, langage se rapprochant le plus du simple code IT.
- Gérer des blocs de données (DB) pour stocker des valeurs utilisées dans le programme.
- Diagnostiquer et superviser le fonctionnement de l'automate grâce à des outils de mise au point.

2.2.1.1 Comparaison avec TIA Portal et Unity PRO XL

TIA Portal est une évolution de Step 7 qui intègre une interface plus intuitive et prend en charge des fonctionnalités avancées comme la simulation intégrée avec PLCSIM et la gestion de projet centralisée. Il permet notamment d'utiliser le langage SCL (Structured Control Language), un langage similaire au ST (Structured Text).

Unity Pro XL, utilisé pour les automates Schneider, offre une approche similaire, avec une prise en charge native du Ladder (LD), du G7 (SFC) et du ST. Il se distingue par une gestion plus avancée du GRAFCET et une programmation plus intuitive en SFC (Sequential Function Chart).

Quelles sont les différences principales ? → Step 7 est plus orienté vers la programmation bas niveau avec STL, tandis que Unity Pro XL privilégie une approche plus modulaire avec ST et SFC.

2.2.2 In Touch : Supervision et HMI

InTouch est un logiciel de supervision SCADA permettant d'afficher et de contrôler un processus industriel en temps réel. Il est utilisé pour :

- Créer des interfaces interactives pour les opérateurs, incluant des boutons, des jauge, des alarmes et des graphiques.
- Superviser les machines et process industriels, en affichant l'état des capteurs et actionneurs.
- Permettre une interaction avec l'automate, en envoyant des commandes via des variables.
- Archiver les données et générer des rapports, utiles pour l'analyse et l'optimisation du processus.

2.2.2.1 Connexion avec STEP 7

InTouch communique avec un automate Siemens via un serveur OPC (OLE for Process Control) ou un driver dédié Siemens S7 Suite. Il peut ainsi lire et écrire des valeurs dans les blocs de données (DB) de l'automate.

Si on veut le comparer à WinCC ou à Vijeo, on peut dire que WinCC est un logiciel similaire à InTouch sauf qu'il est conçu pour fonctionner dans l'interface native de TiaPortal.

Concernant Vijeo, il est utilisé pour la supervision des automates Modicon sous Unity Pro XL et permet une gestion avancée des architectures distribuées.

Au final, InTouch est plus universel et compatible avec plusieurs marques d'automates, tandis que WinCC et Vijeo sont optimisés pour leurs écosystèmes respectifs.

2.2.3 Comparaison des fonctionnalités

Fonctionnalité	Step 7	TIA Portal	Unity Pro XL
Programmation API	S7-300, S7-400	S7-1200, S7-1500	Modicon M340, M580
Langages	LAD, FBD, STL	LAD, FBD, SCL	LD, ST, SFC
Interface	Ancienne génération	Moderne et intuitive	Moderne et optimisée pour ST et SFC
Gestion des bases de données	DB classiques	DB optimisés	Variables globales
Supervision intégrée	Non	WinCC	Vijeo
Fonctionnalité	InTouch	WinCC	Vijeo
Type	SCADA indépendant	SCADA Siemens	SCADA Schneider
Compatibilité	Multi-API	Siemens uniquement	Schneider uniquement
Interface	Personnalisable	Intégrée à TIA Portal	Adaptée aux systèmes distribués

2.2.4 Conclusion

L'utilisation de Step 7 et InTouch en automatisation industrielle permet de programmer un automate Siemens et de superviser son fonctionnement en temps réel. Step 7, bien que plus ancien, reste un standard robuste, tandis qu'InTouch offre une flexibilité élevée pour la supervision.

Cependant, des alternatives modernes comme TIA Portal (Siemens) et Unity Pro XL (Schneider), qui ont été utilisés en cours, offrent des interfaces plus intuitives et des outils avancés comme la simulation et l'intégration SCADA native.

Le choix du logiciel dépendra donc des besoins spécifiques du projet, du matériel utilisé et de l'expérience des ingénieurs en charge de la programmation et de la supervision.

3 Planification du projet et finalisation du TFE

Cf. annexe Diagramme de Gantt

4 Développement complet

- 4.1 Situation initiale
- 4.2 Étude théorique
- 4.3 Étude des solutions possibles
- 4.4 Options techniques retenues
- 4.5 Étude budgétaire (optionnel)
- 4.6 Liste du matériel nécessaire (optionnel)
- 4.7 Mise en œuvre de la solution
- 4.8 Documentation de la solution
- 4.9 Retour personnel d'expérience

5 Conclusion et perspectives futures

6 Bibliographie

- **Malfliet, C.** (2013, 15 novembre). *Modification SBM2 - Gestion des recettes pour turbines et doseurs* [Document interne].
- **Wright, K.** (2010). *Operating instructions: Conservation line for Duferco Clabecq (Part 1)*. Rösler Oberflächentechnik GmbH.
- **Rösler Oberflächentechnik GmbH.** (2010). *Rösler-Filter System RF 200/24 P/s – HP: Maintenance and operation manual*. Duferco Clabecq.
- **Siemens AG.** (2005). *SIMATIC HMI Pupitre opérateur Mobile Panel 177 (WinCC flexible) (7e éd.)*. Siemens AG.
- **Ribas, D.** (s.d.). *Le grenaillage en machine à turbines*. Duferco Clabecq, NLMK.
- **Bensaada, S.** (s.d.). *Résistance des matériaux*. Université Mohamed Khider Biskra. <https://www.univ-biskra.dz/enseignant/bensaada/RDM.pdf>
- **Ranc, N., & Martin, G.** (2023-2024). *Résistance des matériaux : notes de cours*. École Supérieure de Fonderie et de Forge. <https://pimm.artsetmetiers.fr/resistance-des-materiaux-1ere-annee-esff>