



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيات المتقدمة
École Nationale Supérieure des Technologies Avancées



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme
Master

- Filière -
Automatique

- Spécialité -
Automatique et informatique industrielle

**Etude d'un système intelligent de détection des défauts
de bobines d'acier**

Réalisé par

BOUSSAHA Amani

OULEDMERIEM Asma

Soutenu le 22 / 06 / 2025

Membres de Jury :

Prénom Nom	Université / Organisme	Grade	Qualité
M. ZAOUÏ Abdelhalim	ENSTA	Professeur	Président
M. REZOUÏ Amar	ENSTA	Professeur	Examineur
M. ZAOUÏCHE Mohamed	ENSTA	Docteur	Examineur
M. DERMOUÏCHE Reda	ENSTA	MCA	Encadrant
M. SOUAÏDI Hichem	SIDER EL-HADJAR	Ingénieur	Co-encadrant

Étude d'un système intelligent de poursuite des défauts d'acier sur le cylindre au cours de la rectification

Amani Boussaha
Département GEII
ENSTA
Alger, Algérie
a_boussaha@ensta.edu.dz

Asma Ouledmeriem
Département GEII
ENSTA
Alger, Algérie
a_ouledmeriem@ensta.edu.dz

M.Hichem SOUAIDI
SIDER
EL-HADJAR
Annaba, Algérie
Hichem.Souaidi@alsolb-dz.com

M.Reda DERMOUCHE
Département GEII
ENSTA
Alger, Algérie
reda.dermouche@ensta.edu.dz

Résumé—L'intégrité des cylindres de laminoir est un facteur L'état des cylindres de laminoir joue un rôle crucial dans la qualité et l'efficacité des processus de transformation des métaux. Cependant, ces cylindres peuvent présenter des défauts internes ou externes qui sont difficilement détectables sans recourir à des technologies de pointe. Ce projet envisage l'implémentation d'un système intelligent reposant sur les ultrasons multiéléments (PAUT - Phased Array Ultrasonic Testing), apte à identifier en temps réel des anomalies peu profondes, dès 1 mm, pendant le processus de rectification. La solution s'appuie sur une communication efficace entre le capteur PAUT, un automate programmable industriel (API) et une interface utilisateur. Cette configuration optimise l'enlèvement de matière, prolonge la longévité des cylindres et automatise le processus décisionnel. Un exemple concret dans l'industrie chez Tenova Pomini démontre les performances et avantages.

Mots-clés—Phased Array, contrôle non destructif, PAUT, rectification, ultrasons, cylindres de laminoir, détection de défauts, inspection automatisée, surface.

INTRODUCTION

Dans l'industrie sidérurgique, les cylindres de laminoir jouent un rôle essentiel dans la déformation continue du métal. Leur état de surface et leur géométrie influencent directement la qualité du produit final[1]. Cependant, au fil des cycles thermomécaniques, ces cylindres développent des défauts tels que des rayures, fissures ou inclusions[2], nécessitant une rectification périodique.

Les méthodes de rectification traditionnelles ne permettent pas d'adapter dynamiquement la profondeur d'enlèvement à l'état réel du cylindre[3]. En l'absence

de contrôle en ligne, des défauts peuvent être ignorés ou la matière excédentaire peut être supprimée inutilement. L'intégration d'un système de contrôle non destructif par ultrasons, et plus spécifiquement la technologie Phased Array, offre une alternative innovante pour une inspection précise, rapide et automatisée. Combiné à un automate programmable (API) et une interface IHM, ce dispositif constitue un outil puissant pour piloter le processus de rectification de façon intelligente.

Ce travail présente les fondements théoriques de cette approche, les capteurs adaptés, l'architecture automatisée de supervision, ainsi qu'une validation par un cas industriel documenté.

I. CONTRÔLE QUALITÉ DES CYLINDRES EN ACIER

Les cylindres en acier jouent un rôle essentiel dans les procédés de mise en forme tels que le laminage. Leur surface influence directement la qualité du produit fini et la stabilité du processus industriel [4]. Exposés à des sollicitations mécaniques et thermiques, ils développent avec le temps des défauts comme des fissures, des inclusions ou des marques d'usure[5].

Pour garantir leur performance, une rectification périodique est indispensable. Cependant, les méthodes traditionnelles, souvent fixes, peuvent entraîner d'importants enlèvements de matière, diminuant la durée de vie des cylindres. L'absence de surveillance en temps réel laisse place à des défauts internes non révélés, pouvant conduire à des défaillances majeures.

II. DÉFAUTS TYPIQUES DANS LES CYLINDRES EN ACIER

Au cours de l'usage dans les laminoirs, les cylindres en acier subissent des forces mécaniques importantes, des

températures variables , des vibrations et des contacts répétés avec le métal à laminer. Ces conditions engendrent l'apparition de différents défauts, superficiels ou internes, géométriques. Leur détection est d'une grande importance pour la qualité du produit final à éviter les pannes graves [4].

A. Défauts sur les cylindres de travail

1) Ondulations (Waviness)

- **Cause** : Vibrations mécaniques de la machine ou instabilité de la meule.
- **Conséquence** : Surface ondulée affectant la précision dimensionnelle.



Figure 1: illustration réelle de défaut d'ondulation (waviness)

2) Brûlures thermiques

- **Cause** : Surchauffe due à une pression excessive ou à une lubrification insuffisante.
- **Conséquence** : Altération de la dureté superficielle et apparition de zones décolorées.



Figure 2: illustration réelle d'une brûlure thermique

3) Rayures et piqûres

- **Cause** : Présence de particules abrasives ou de copeaux entre la meule et la pièce.
- **Conséquence** : Défauts esthétiques et risques de fissuration.

4) Fissures superficielles

- **Cause** : Fatigue thermique ou mécanique répétée.

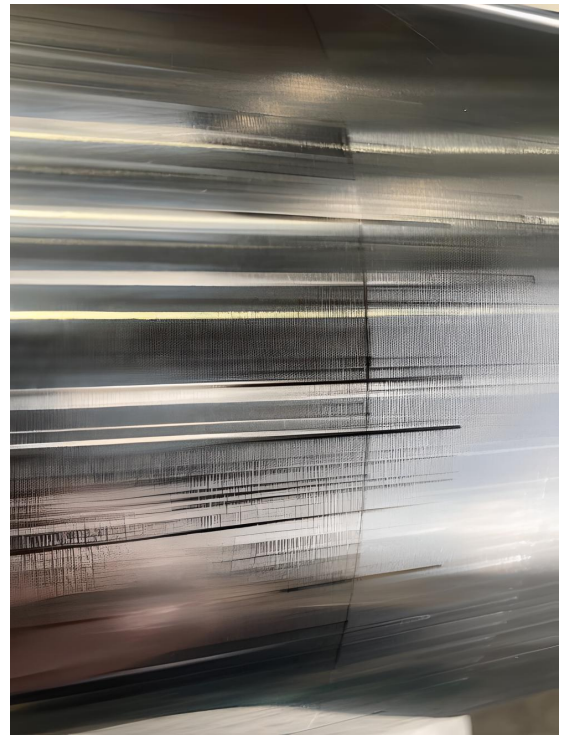


Figure 3: illustrations réelles de rayures et piqûres sur des cylindres

- **Conséquence** : Risque de rupture prématurée du cylindre.

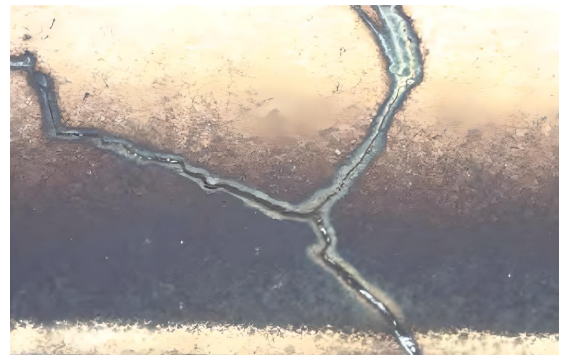


Figure 4: illustrations réelles de micro-fissure superficielles

5) Ovalisation

- **Cause** : Usure inégale ou défauts d'alignement de la machine.
- **Conséquence** : Perte de concentricité affectant la qualité de l'usinage.

B. Défauts sur les cylindres d'appui

1) Piqûres / indentation

- **Cause** : Charges répétées et fatigue de contact.
- **Conséquence** : Altération de la surface du cylindre.

2) Fissuration sous surface



Figure 5: illustrations réelles de marquages par inclusions ou copeaux

- **Cause** : Fatigue à long terme.
- **Conséquence** : Fractures internes difficiles à détecter sans essais non destructifs.

3) Déformation ou flambage

- **Cause** : Contraintes mécaniques excessives.
- **Conséquence** : Modification du comportement élastique du laminé.

4) Marquage par inclusion ou copeaux

- **Cause** : Contact avec des particules étrangères.
- **Conséquence** : Défauts récurrents sur la surface du cylindre.

5) Usure excessive du collet ou du siège de roulement

- **Cause** : Mauvais alignement ou lubrification insuffisante.
- **Conséquence** : Instabilité du cylindre dans le logement.

III. DÉTECTION DES DÉFAUTS SUR LES CYLINDRES DE LAMINOIR

La détection des défauts sur les cylindres de laminage est essentielle pour assurer la qualité du laminage. Les méthodes couramment utilisées incluent :

- **Contrôle non destructif (CND)** : Techniques telles que les ultrasons, les courants de Foucault et la magnétoscopie pour détecter les fissures internes ou de surface.^[6]
- **Analyse vibratoire** : Surveillance des vibrations pour identifier les déséquilibres ou les défauts mécaniques.^[7]
- **Inspection visuelle** : Examen des surfaces pour repérer les rayures, piqûres ou autres anomalies.
- **Mesure de la dureté** : Évaluation de la dureté des cylindres pour détecter les zones d'usure ou de traitement thermique inadéquat.

Ces méthodes permettent d'identifier des défauts tels que les fissures, les piqûres, les rayures, l'ovalisation et les brûlures thermiques.

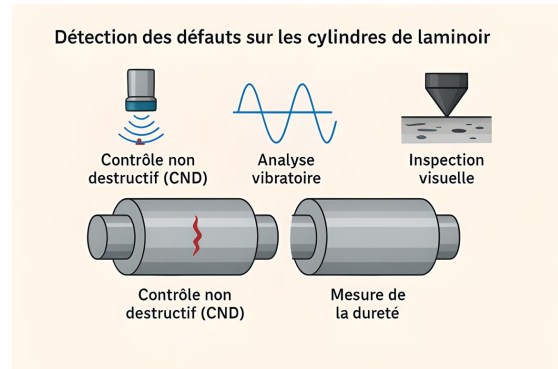


Figure 6: Méthodes de détection des défauts sur les cylindres de laminage

IV. INTRODUCTION AU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND)

Le Contrôle Non Destructif (CND) désigne l'ensemble des techniques utilisées pour inspecter l'intégrité d'un matériau sans l'endommager. Ces méthodes permettent de détecter des défauts internes ou de surface (fissures, inclusions, porosités, corrosion...) tout en maintenant la pièce en état de fonctionnement. Le CND est essentiel dans les secteurs industriels où la qualité, la fiabilité et la sécurité sont critiques, comme la métallurgie, l'aéronautique ou l'énergie^[8].

V. TECHNIQUES DE CONTRÔLE NON DESTRUCTIF (CND)

Le Contrôle Non Destructif regroupe un ensemble de techniques qui permettent d'évaluer l'intégrité d'un composant sans l'endommager. Ces méthodes sont essentielles pour garantir la fiabilité, la sécurité et la conformité des matériaux ou structures dans des secteurs critiques comme la sidérurgie, l'aéronautique, l'énergie ou les transports.

A. Méthode Ultrason Classique (UT conventionnel)

Le contrôle par ultrasons conventionnels est une technique de CND (Contrôle Non Destructif) qui repose sur l'émission d'une onde acoustique à haute fréquence (généralement de 1 à 10 MHz) à l'intérieur d'un matériau à l'aide d'un transducteur monoélément. Cette onde se propage dans le matériau, et lorsqu'elle rencontre une discontinuité (fissure, vide, inclusion), une partie est réfléchi. Le signal réfléchi est capté par le transducteur et converti en signal électrique sous forme d'un A-scan (amplitude vs temps)^[9].

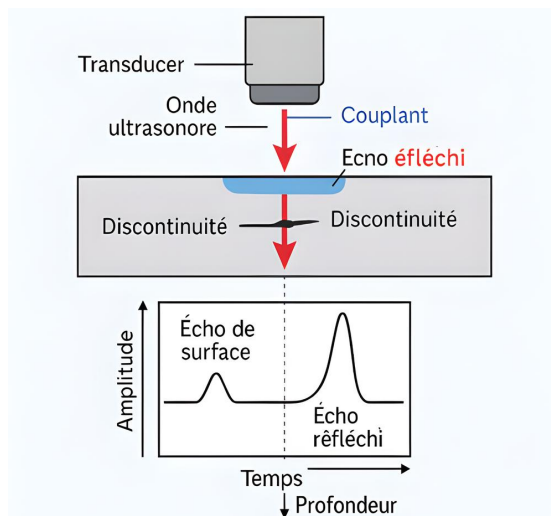


Figure 7: Principe du contrôle ultrasonore classique (UT)

Le contrôle par ultrasons classique, bien que fiable pour les défauts internes profonds, montre plusieurs limites en inspection moderne : résolution faible en surface, pas d'imagerie 2D, forte dépendance à la géométrie du défaut, et besoin de contact avec couplant. Ces inconvénients limitent son usage dans les environnements automatisés ou pour la détection précise de défauts superficiels[9].

B. Méthode Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)

Le Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) est une méthode avancée de contrôle non destructif par ultrasons. Contrairement aux sondes classiques à simple élément, le PAUT repose sur l'utilisation d'un réseau de petits transducteurs piézoélectriques (typiquement entre 16 et 128 éléments), disposés en ligne ou en matrice. Chaque élément peut être excité indépendamment avec un délai spécifique, ce qui permet de contrôler l'orientation, la focalisation et la forme du faisceau ultrasonore de manière électronique.

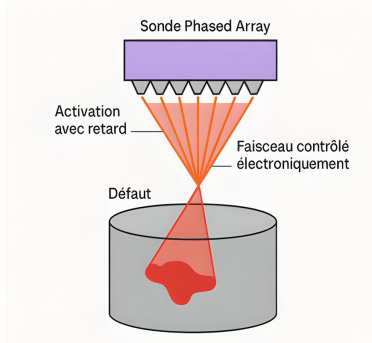


Figure 8: Principe de fonctionnement d'une sonde Phased Array pour la détection de défauts

Fonctionnement du Balayage Électronique en PAUT

Le fonctionnement du balayage électronique en **PAUT** (Phased Array Ultrasonic Testing) repose sur

l'application de *delay laws* (lois de retard) entre les éléments du réseau. Cela permet :

- d'**orienter le faisceau** dans un angle spécifique sans déplacer la sonde (balayage sectoriel)^[10] ;
- de **focaliser les ondes** à différentes profondeurs (focalisation électronique) ;
- de **scanner des volumes entiers** rapidement (plusieurs faisceaux successifs via des lois de focalisation multiples)^[11].

Ce principe repose sur la **construction d'interférences d'ondes**, conformément au principe de *Huygens-Fresnel* : les ondes émises par chaque élément sont décalées en phase afin de générer un faisceau à la fois *orientable* et *focalisable*.

Avantage par rapport à l'UT classique :

Table I: Comparaison entre UT classique et Phased Array

Critère	UT Classique	Phased Array (PAUT)
Orientation du faisceau	Fixe	Dynamique (multi-angle)
Nombre d'éléments	1 seul	16 à 128 (ou plus)
Déplacement mécanique	Nécessaire	Souvent inutile
Zone couverte	Point par point	Balayage sur zone étendue
Imagerie	A-scan (1D)	B-scan, S-scan (2D/3D)

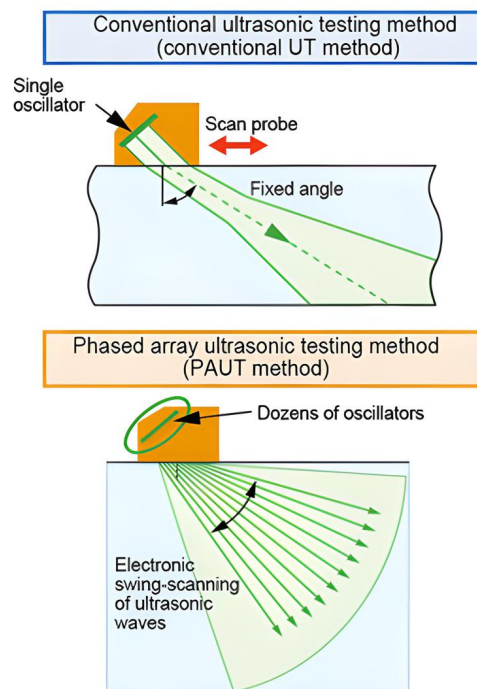


Figure 9: Comparaison entre la méthode de contrôle ultrasonore conventionnelle et la méthode par ultrasons multiéléments (PAUT)

Pour l'inspection de cylindres de laminoir ou de cylindres rectifiés CNC, la méthode **Phased Array** permet de :

- **Détecter** des défauts superficiels ou sous surface dès 1 mm de profondeur.
- **Suivre** les zones critiques d'usure sans arrêt de production.
- **Être intégrée** dans un scanner automatisé rotatif pour inspections rapides sur ligne.

VI. CAPTEURS INDUSTRIELS PHASED ARRAY POUR L'INSPECTION DE SURFACE DES CYLINDRES

La détection de défauts superficiels ou faiblement profonds (proches de 1 mm) sur les cylindres en acier représente un défi majeur dans les environnements industriels. Ces défauts incluent : microfissures, rayures, piqûres, début de corrosion ou zones de fatigue thermique, souvent invisibles à l'œil nu. Les technologies classiques par ultrasons (UT mono-élément) manquent souvent de résolution dans cette plage de profondeur. C'est pourquoi les capteurs Phased Array à haute fréquence sont préférés pour répondre à ces exigences de sensibilité[12].

A. Eddyfi Sharck HR – Sonde haute résolution pour défauts superficiels

La Sharck HR est une sonde Phased Array par courants de Foucault (ECA) développée par Eddyfi Technologies pour la détection rapide et précise des défauts de surface et sous-surface dès 0,25 mm de profondeur, jusqu'à 3 mm, avec une excellente résolution spatiale[13]. Caractéristiques essentielles[13] :

- **Technologie** : ECA haute résolution (TECA™).
- **Défauts détectables** : fissures, piqûres, micro-rayures, SCC (corrosion sous contrainte).
- **Profondeur minimale** : 0,25 mm ; optimale pour 1 mm avec une précision de $\pm 10\%$.
- **Vitesse de scan** : jusqu'à 600 mm/s.
- **Compatible avec** : instruments Reddy®, Ectane2, interface C-scan + encodage intégré.

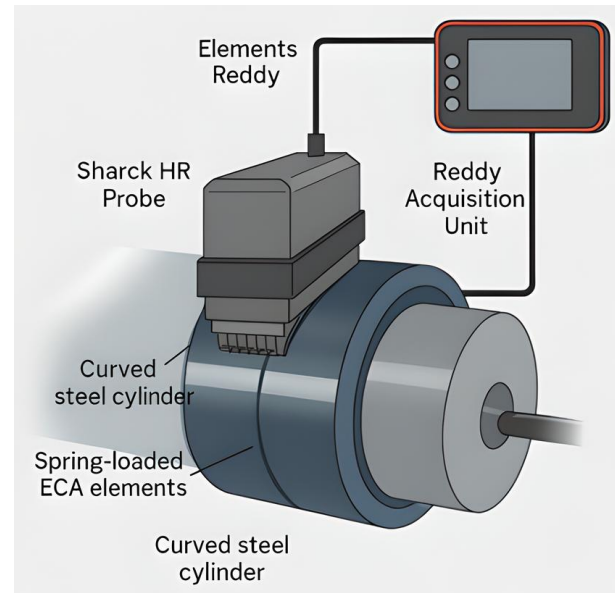


Figure 10: (a) Principe de fonctionnement de la sonde Sharck HR – Détection de défauts par courants de Foucault (ECA)



Figure 11: (b) Vue réelle d'un capteur Eddyfi Sharck HR inspectant une surface courbe

B. Imasonic High-Frequency Phased Array Probes (HA-PA)

Imasonic conçoit des sondes linéaires et matricielles Phased Array haute fréquence (4–10 MHz), idéales pour détecter des défauts fins proches de la surface (environ 1 mm), notamment dans l'aéronautique, l'énergie et l'inspection des cylindres[14].

Caractéristiques principales[14] :

- **Fréquence de fonctionnement** : 4 à 10 MHz (jusqu'à 20 MHz en option)
- **Nombre d'éléments** : typiquement 64 ou 128
- **Pitch** : environ 0,5 mm
- **Bande passante** : >60 %
- **Hauteur** : 10 mm pour une bonne focalisation
- **Construction** : piézocomposite, faible diaphonie (< -30 dB)
- **Câble** : IPEX ou LEMO (Vantage compatible)

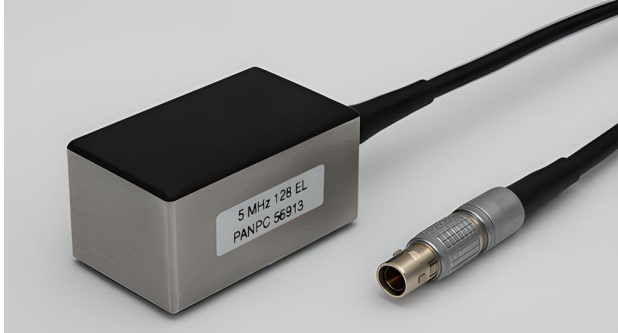


Figure 12: Vue réelle d'une sonde Imasonic haute fréquence en inspection

C. Olympus OmniScan X3 et sonde A31

L'OmniScan X3 d'Olympus est un système portable de contrôle par ultrasons multiéléments, compatible avec la technologie TFM (Total Focusing Method) jusqu'à 1024×1024 pixels[15].

Caractéristiques clés [15]:

- **Écran tactile** : 10,6 WXGA, IP65, anti-chute 1,2 m
- **Stockage** : SSD 1 To, enregistrement jusqu'à 25 Go
- **Connectivité** : USB, HDMI, Ethernet, Wi-Fi, GPS
- **TFM/PA** : 20 kHz, balayages linéaire, sectoriel, compound, TFM
- **Compatibilité** : sondes A31/A32, TOFD, HTHA, etc.

Sonde A31(Weld Series) [16] :

- **Fréquences** : 5, 7.5, 10 MHz
- **Pitch** : 0,30–0,60 mm
- **Ouvertures** : 9,9 à 19,2 mm × 10 mm
- **Utilisation** : inspection de soudures et usinages profonds



Figure 13: Interface de contrôle du système Olympus OmniScan X3 avec visualisation B-scan et S-scan

Table II: Caractéristiques techniques comparées de capteurs industriels

Capteur / Fabricant	Fréquence	Résolution	Plage de détection
Eddyfi Sharck HR	100 kHz	~0,25 mm	0,25–3 mm
Imasonic HF PA Probe	7–15 MHz	~0,5 mm	0,5–10 mm
Olympus A31 / OmniScan X3	5–10 MHz	~1 mm	1–30 mm

VII. CONNEXION DU SYSTÈME ULTRASON PAUT AVEC UN AUTOMATE INDUSTRIEL

Dans les applications industrielles modernes, le contrôle non destructif (CND) par ultrasons Phased Array (PAUT) peut être intégré dans une architecture automatisée pour assurer une inspection fiable des composants critiques.

A. Architecture générale

- **Capteur PAUT** : détection des défauts, imagerie B/S-scan
- **Instrument d'acquisition** : OmniScan X3, Panther, Topaz64...
- **API industriel** : Siemens S7, Schneider Modicon...
- **IHM** : affichage des résultats et interactions opérateur
- **Actionneurs** : moteurs, servomoteurs, vannes...

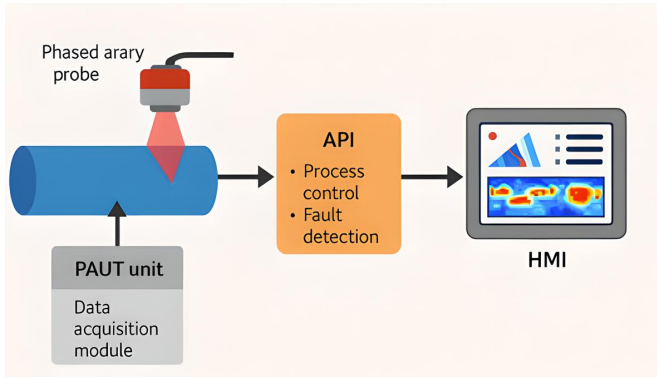


Figure 14: Schéma fonctionnel d'une architecture PAUT-API-HMI

B. Types de signaux échangés

Table III: Signaux échangés entre les composants du système

Signal	Direction	Fonction
Entrée numérique (TOR)	API ← Instrument UT	Détection de défauts (OK/NOK)
Sortie analogique (4–20 mA)	Instrument UT → API	Indication de profondeur ou intensité
Modbus TCP / Profinet	Bi-directionnel	Données numériques + config distante
Déclenchement TTL / Encodeur	Capteur ↔ API	Synchronisation déplacement / vitesse

VIII. EXEMPLE INDUSTRIEL : LIGNE DE RECTIFICATION

Dans une aciérie, une rectifieuse est utilisée pour la remise en état de cylindres de laminage. Afin d'éviter tout enlèvement excessif de matière et de garantir l'intégrité des cylindres, un système de contrôle par ultrasons multiéléments (**PAUT**) est intégré directement à la ligne.

Composants du système :

- **Capteur** : Système PAUT linéaire de 10 MHz avec 64 éléments, adapté à la détection de défauts à faibles profondeurs (1–5 mm).
- **Instrument** : *OmniScan X3* équipé d'un module d'acquisition B-scan et d'un encodeur rotatif.
- **Connexion** : Communication via *Modbus TCP/IP* entre l'*OmniScan* et l'*API Siemens S7-1500*.

Scénario de fonctionnement

leftmargin=1em

- Le capteur balaye le cylindre pendant sa rotation.
- Lorsqu'un défaut de surface (fissure, rayure, piqûre > 1 mm) est détecté, un signal TOR est envoyé à l'API.
- L'API envoie une commande au variateur pour arrêter la rectification ou réduire la vitesse d'avance.

- Simultanément, une alerte s'affiche sur l'IHM avec les coordonnées du défaut.

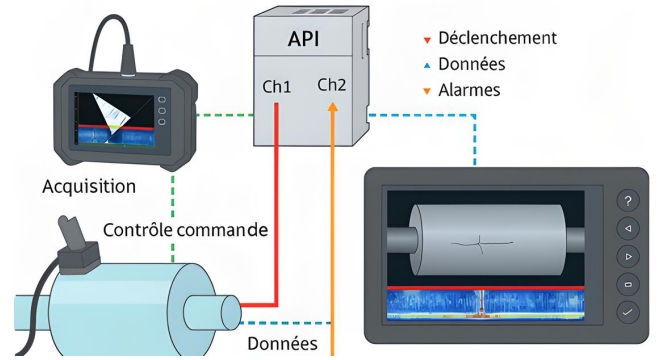


Figure 15: Exemple de B-scan intégré à une IHM avec déclenchement API

IX. INTÉGRATION INDUSTRIELLE DU PAUT CHEZ TENOVA POMINI

L'entreprise Tenova Pomini, filiale du groupe Tenova (Italie), est un leader mondial dans la conception de rectifieuses CNC destinées à la remise en état des cylindres de laminaires utilisés dans les aciéries à chaud et à froid. Dans le cadre de son programme Pomini Digital Factory, l'entreprise a intégré à ses machines un système avancé de contrôle non destructif par ultrasons multiéléments (Phased Array Ultrasonic Testing – PAUT) [17].



Figure 16: Machine de rectification CNC Pomini intégrée avec un système de contrôle PAUT

A. Objectif de l'intégration

La rectification conventionnelle des cylindres ne permettait pas de détecter les défauts internes précoces comme les microfissures, piqûres ou inclusions situées à faible profondeur (entre 1 et 5 mm) sous la surface. Ces défauts pouvaient résister à l'enlèvement de matière, mettant en péril la qualité du laminage ou entraînant la casse des cylindres en cours d'utilisation [17].

L'intégration de la technologie **PAUT** vise donc à [17]:

- Surveiller en continu l'état du cylindre pendant la rectification.

- Optimiser la profondeur d'enlèvement pour ne retirer que ce qui est nécessaire.
- Éviter les défauts récurrents sur les produits laminés.
- Réduire les pertes de matière et améliorer la durée de vie des cylindres.

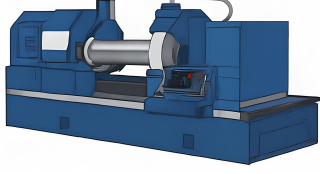


Figure 17: Rectifieuse CNC industrielle pour cylindres de laminaires.

Table IV: Spécifications des composants du système

Composant	Spécifications
Sonde PAUT	64 éléments linéaires, 10 MHz, focalisation dynamique
Instrument UT	Eddyfi Panther, multi-canaux, logiciel UltraVision Touch
API Industriel	Siemens S7-1500, Modbus TCP/IP, gestion temps réel
Capteur encodeur rotatif	Synchronisation de l'angle et de la position sur le cylindre
Interface IHM	Siemens WinCC, affichage des défauts, commandes, rapports

B. Principe de fonctionnement

Fonctionnement [17]:

- 1) Le cylindre est monté sur la rectifieuse *Pomini* et commence sa rotation.
- 2) La sonde **PAUT** balaie axialement le cylindre selon un motif hélicoïdal.
- 3) Les signaux *A-scan* sont traités en *B-scan* / *S-scan* pour générer une image 2D du profil interne.
- 4) En cas de détection d'un défaut :
 - L'instrument *Panther* envoie un signal numérique à l'API.
 - L'API ajuste automatiquement la profondeur de meulage ou interrompt la passe.
 - L'IHM affiche en direct la position, la profondeur et l'intensité du défaut.

C. Résultats et bénéfices industriels

Bénéfices mesurés :

- 30 % de matière enlevée en moins par cylindre grâce à la rectification ciblée.
- Réduction de 20 % du temps de cycle moyen.
- Diminution significative des coûts de non-qualité.
- Garantie de traçabilité complète via les logs d'inspection exportés automatiquement.
- Possibilité de diagnostic à distance et d'optimisation continue grâce au cloud industriel *Tenova*.

CONCLUSION

L'étude démontre l'intérêt d'intégrer une solution basée sur la technologie Phased Array au sein d'un système automatisé pour la surveillance des cylindres de laminoir. Contrairement à l'UT classique, la méthode PAUT permet de détecter de manière fiable des défauts superficiels ou sous la surface avec une résolution accrue. Couplée à un automate industriel, elle offre une inspection continue, une prise de décision rapide et une optimisation de la rectification.

L'exemple industriel chez Tenova Pomini met en évidence des bénéfices concrets : réduction de l'enlèvement de matière, amélioration de la qualité, gain de temps de cycle, et traçabilité des inspections. Cette approche illustre une avancée significative vers des lignes de production plus intelligentes, efficaces et conformes aux exigences de l'industrie 4.0.

REFERENCES

- [1] Techniques de l'ingénieur. Usure des matériaux, 2025.
- [2] Y. Zhang and X. Li. Analysis of precision grinding techniques. *Advanced Materials Research*, 1136:89–93, 2021.
- [3] Techniques de l'ingénieur. Usinage de précision, 2025.
- [4] La rectification, art de la précision – axis3d meca, 2025.
- [5] J. Doe and A. Smith. Precision surface finishing by grinding: Recent advances. *Coatings*, 13(1):175, 2023.
- [6] B. K. Mishra and Others. Some investigations on grinding, 2004.
- [7] Huihui Yuan. Common roll flaw detection methods (linkedin), 2025.
- [8] What is non-destructive testing and why it's essential for modern industries, 2025.
- [9] Understanding ultrasonic testing methods, 2025.
- [10] A. Lamarre. Phased array technology, 1999.
- [11] Common roll flaw detection methods, 2025.
- [12] ScanNDT. Single vs dual vs phased array probes, 2025.
- [13] Eddyfi Technologies. Sharck probes, 2025.
- [14] Imasonic transducer specifications, 2020.
- [15] Olympus Corporation. New phased array probe announced, 2019.
- [16] Eddyfi Technologies. Linear paut probe 32 elements, 2025.
- [17] Tenova. Pomini tenova – industrial grinding systems, 2025.