



PERFORMANCES

Dossier de veille

Septembre 2025



Congrès MATTRIS A3TS

**Part 1 - Fondements et procédés des
traitements thermiques et de surface**

Dijon 2/4 juillet 2025

Réalisé par Jorge Arturo SOTO PUENTE, Romaric
COLLET, Caroline DEPREURAND, Aurore GOIGOUX
et Marc BUVRON.

Introduction & Sommaire

Avec plus de 1000 participants, le congrès MATTRIS (A3TS), organisé à Dijon du 2 au 4 juillet 2025, a réuni la communauté des experts en traitements thermiques et de surface autour des dernières avancées techniques et industrielles. Les échanges ont porté sur les procédés thermiques et thermochimiques, la voie humide et les substitutions réglementaires (Cr VI, PFAS), les post-traitements liés à la fabrication additive et la fonctionnalisation des surfaces, tout en mettant en lumière les apports de la simulation numérique et de l'intelligence artificielle pour l'optimisation et le contrôle. Ce dossier de veille en deux volumes en propose une synthèse : le partie 1 met en perspective les fondements et applications industrielles, tandis que la seconde met en avant les innovations et technologies avancées couvrant à la fois les traitements de surface et les traitements thermiques.

Sommaire

1. [Applications nucléaires](#)
2. [Traitement des pièces forgées](#)
3. [Technologies de traitement thermique](#)
4. [Procédés de traitement thermique et thermochimiques](#)
5. [Fabrication additive](#)



1

Applications nucléaires

Aciers innovants et durables dans les applications nucléaires

Nathalie PAUZE (Industeel)

■ Applications des aciers Industeel dans le nucléaire

- Production d'énergie nucléaire (réacteurs PWR, BWR, SMR...)
- Transport et stockage (conteneurs, blindages, paniers...)
- Physique nucléaire (ITER, CERN, ESS accélérateur source de neutrons...)
- Recyclage du combustible (traitement chimique, aciers résistants aux acides)

■ Aciers inoxydables modifiés

- NUCL 304L (avec azote contrôlé, faible Co, ou soufré pour usinabilité)
- NUCL 347 (avec Nb pour meilleure soudabilité)
- 316L-N / 316LNH / 316H (pour hautes températures et fluage)
- 304LN, 304B4 (blindage neutronique)

■ Aciers duplex et superausténitiques

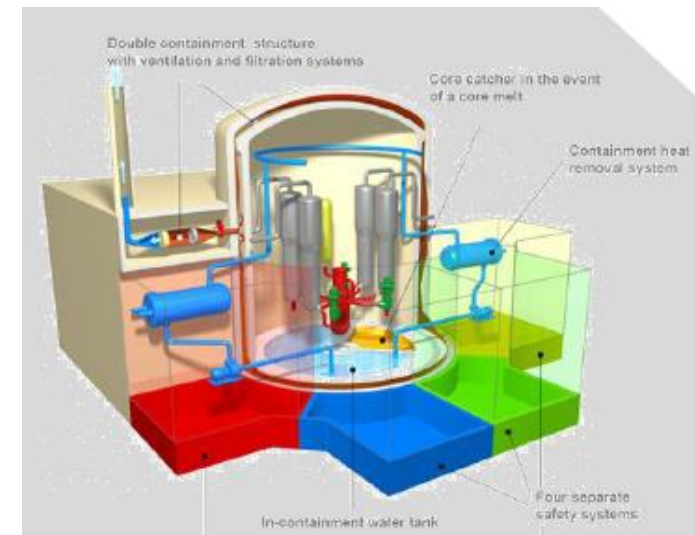
- 2205, 2507 (duplex et superduplex) pour résistance à la corrosion et à la fissuration sous contrainte.
- UR65 (Cr25%, Ni20%) URS1 (Si 4%) aciers austénitiques résistants à l'acide nitrique

■ Aciers martensitiques 405, 410S

■ Plaques revêtues A516Gr70 (acier grain fin pour chaudières P355GH) + 321H



Documents Industeel



Traitements haute température en métallurgie des poudres (procédé MIM)

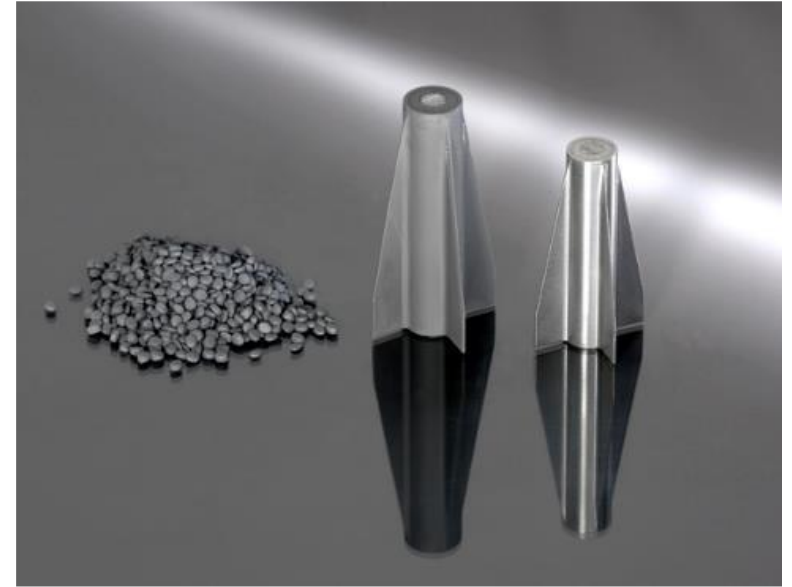
Jean Claude BIHR (Alliance MIM)

■ Le procédé MIM en 9 étapes

- Matières premières : mélange poudre métallique + liant
- Conception : ingénierie des pièces
- Outillage : moules spécifiques
- Injection : moulage par injection
- Délantage : élimination du liant (15% de retrait)
- Frittage (sintering) : consolidation de la pièce
- HIP (Hot Isostatic Pressing) : amélioration de la densité
- Traitement thermique (HT) : ajustement des propriétés mécaniques
- Opérations secondaires : finition, usinage, etc.

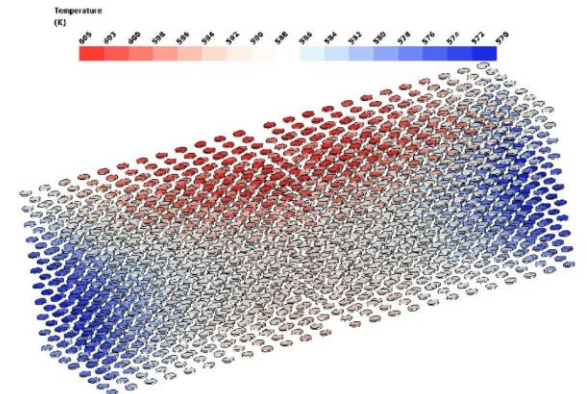
■ La simulation permet une amélioration de la qualité, la reproductibilité et l'efficacité énergétique

- Optimisation de la conception des fours.
- De mieux contrôler la température, la vitesse des gaz, la pression.



Différence de volume avant et après délantage

Documents Alliance MIM



Traitements haute température en métallurgie des poudres (procédé MIM)

■ Comparaison entre 316L et un alliage sans nickel (X15CrMnMoN17-11-3) :

Propriété	316L	Panacea (Ni-free)
Dureté	125 Hv	300 Hv
Résistance à la rupture	550 MPa	1000 MPa
Limite élastique	180 MPa	650 MPa
Allongement à rupture	50 %	35 %
Densité	7,85	7,75

■ Les paramètres de traitement doivent être très bien contrôlés dans le procédé MIM

- La pression de gaz et le débit jouent un grand rôle sur l'homogénéité de température.
- En chaque endroit, la température la nature du gaz et la vitesse des gaz doivent être contrôlés.
- L'atmosphère peut varier à cause des liants.
- La norme AMS 2750 doit être adaptée pour le procédé MIM.

Impact des contraintes thermiques sur la mise en solution et l'hypertrempe de l'acier inoxydable austénitique

Amélie FANICA (Framatome)

- **Composant étudié** : main Coolant Line (MCL) en acier inoxydable austénitique X2CrNi19.10 (type 304L avec azote contrôlé).
- **Problème détecté** : variabilité des propriétés mécaniques, notamment la limite d'élasticité à 0,2 % ($R_{p0,2\%}$) à 350°C, entre deux projets (A et B), malgré un procédé de fabrication similaire. La limite d'élasticité est inférieure au requis dans un cas.
- **Analyse des causes:**
 - Conduite des essais : aucun écart significatif détecté.
 - Élaboration de l'acier : pas de corrélation entre la composition chimique (C, N) et les propriétés mécaniques.
 - Forgeage : paramètres similaires entre les projets, pas de tendance confirmée.
 - Traitement thermique (QHT) : légères variations de température, mais la localisation des échantillons de contrôle est identifiée comme facteur principal.
 - Microstructure : pas de différence significative en ferrite, texture, précipitations, taille de grains. La densité de dislocations est corrélée à la $R_{p0,2\%}$.

Impact des contraintes thermiques sur la mise en solution et l'hypertrempe de l'acier inoxydable austénitique

■ Analyse EBSD

- Des examens EBSD ont révélé une corrélation forte entre la densité de dislocations et la limite d'élasticité
- Les zones proches de la surface présentent une densité plus élevée → écrouissage par contrainte thermique.

■ Simulation numérique:

- La simulation thermohydraulique et thermomécanique du traitement thermique d'hypertrempe met en évidence des contraintes thermiques résiduelles dues à des gradients de température, ce qui entraîne des déformations plastiques localisées.
- La cartographie des déformations plastiques montre une forme en « W » à travers l'épaisseur du composant.

■ Conclusion

- Le phénomène d'écrouissage par contrainte thermique est réel et significatif, bien que peu documenté.
- Il contribue à conférer un supplément de limite d'élasticité qui se rajoute au niveau de base.
- Ce phénomène est particulièrement important pour les aciers inoxydables austénitiques épais, lorsque ce niveau de base est faible.

2

Traitements des pièces forgées

Grades pour pièces de transmission

Thomas PICOT (ArcelorMittal)

■ Contexte

- Les aciers pour engrenages doivent répondre à des contraintes multiples : forgeabilité, usinabilité, trempabilité, résistance à la fatigue.
- Passage du moteur thermique (ICE) au véhicule électrique (EV) :
 - Moins de rapports → plus de cycles sur un même engrenage.
 - Vitesse de rotation plus élevée (jusqu'à 12 000 tr/min).
 - Risque accru d'adoucissement local en surface.

■ Méthodologie expérimentale

- Amélioration de la résistance à l'usure et à la fatigue.
 - Étude sur des aciers 27MnCr5 microalliés au Nb (contrôle de la taille de grain à haute température), avec ajouts de Cr, Si, Mo pour améliorer la résistance au revenu.
 - Deux nuances développées : DEG 1 et DEG 2 (la teneur en Nb est plus élevée dans la nuance DEG2 que dans la nuance DEG1).
 - Procédé : coulée VIM, forgeage, recuit, cémentation (940–1050°C), revenu (300–600°C).

Grades pour pièces de transmission

■ Performances en fatigue

- L'ajout de Nb permet d'augmenter de 14% la tenue fatigue en flexion rotative après cémentation à 1050°C, mais diminue la ténacité.

■ Taille de grain austénitique

- À 1050°C, trop de grains surdimensionnés pour toutes les nuances.
- L'ajout d'éléments pour la résistance au revenu réduit l'effet du Nb/Al sur le contrôle de la taille de grain.

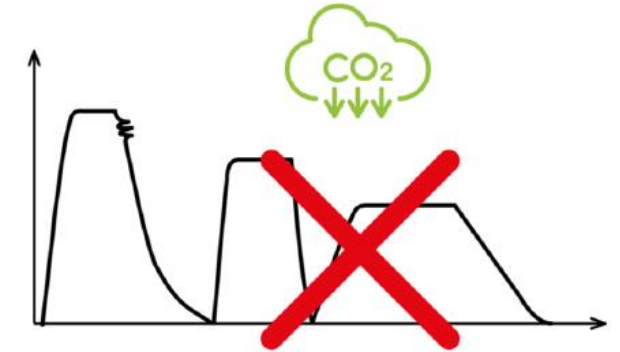
■ Résistance au revenu

- Jusqu'à 400°C : DEG 1 : +50 à +100 HV vs référence. DEG 2 : +100 à +150 HV.
- Au-delà de 500°C : les courbes convergent vers celles des aciers standards.
- Les éléments d'alliage (Cr, Si, Mo) améliorent la résistance au revenu mais affectent le contrôle de la taille de grain.
- Un compromis est nécessaire entre résistance à l'adoucissement et la ténacité.

Aciers pour pièces de forge

■ Impact d'un revenu à 400°C pendant 10 min améliore fortement :

- Limite d'élasticité : +30 %
- Allongement et striction: +15 à +20 %
- Ténacité (CVN): légère amélioration
- Structure plus fine et stabilisation de l'austénite résiduelle.
- Réduction de l'impact CO₂ et du coût matière.



■ Refroidissement contrôlé (interrompu ou ralenti) après forge :

- Permet une transformation directe (bainite + martensite).
- Améliore la ténacité sans traitement thermique complexe.

Exemple : pièce de 70 mm (~45 kg) refroidie à l'air forcé → CVN = 24 J.

■ Les aciers bainitiques ABSBAIN sont une alternative viable aux aciers classiques pour pièces forgées, ils permettent de réduire les émissions de CO₂, les coûts et la complexité des traitements.

■ Importance d'un revenu basse température et du refroidissement contrôlé.

La maîtrise des déformations après traitement thermique des pièces forgées ou laminées.

Marc BUVRON (CETIM)

■ Origine des déformations

- Ségrégations chimiques dans les lingots, billettes et barres laminées sont à l'origine des déformations. Mise en évidence par des études CETIM et analyses chimiques (SEO, carbone/soufre).
- Ségrégation carrée : variations locales de soufre et carbone, difficile à anticiper, impact significatif après trempe.

■ Essais de déformation

- Utilisation d'éprouvettes Navy-C en aciers 100CrMo7-3 et 304L.
- Essais Jominy montrent des dispersions de dureté importantes.
- Trempe gaz : déformations faibles, mais variabilité élevée.
- Trempe huile : déformations 10 fois plus importantes que la trempe gaz.
- Trempe sels secs/humides : déformations 2 à 4 fois plus importantes que la trempe gaz.

■ Simulation numérique

- La modélisation de la déformation des éprouvettes Navy-C a été réalisée avec FORGE et JMatPro.
- Les contraintes résiduelles et les déformations après trempe ont été simulées avec une cohérence avec les mesures expérimentales.

3

Technologies de traitement thermique

Traitement thermique économe en énergie dans un four à charge

Par Dirk Joritz (Ipsen)

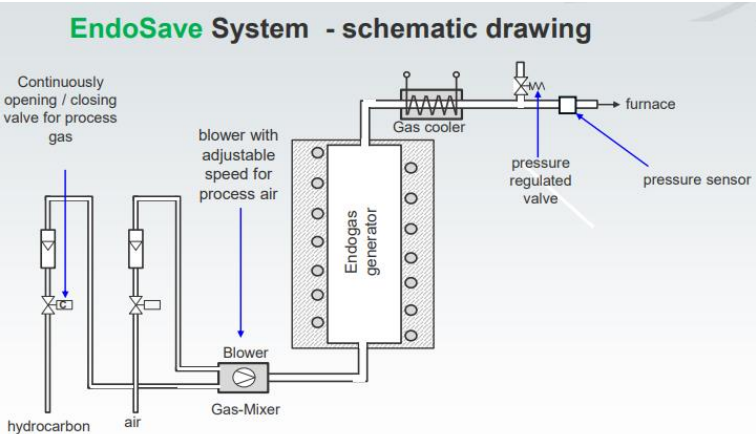
 Objectif

Optimiser l'efficacité énergétique des traitements thermiques en four à charge (batch), en réduisant la consommation de gaz de procédé (endogaz, azote, méthanol) et d'énergie, tout en maintenant la qualité métallurgique.

 Solutions proposées par Ipsen

 EndoSave

- **Production à la demande** d'endogaz : le générateur ajuste le débit en fonction de la pression mesurée dans le réseau.
- Évite la **surproduction** et le **brûlage inutile** de gaz.
- Plage de fonctionnement : **20 à 100 %** de la capacité maximale.



 GreenFlow

- **Régulation intelligente** du débit de gaz vecteur (endogaz ou N₂/CH₃OH) selon :
 - La **pression du four**
 - La **teneur en CO** dans la chambre de chauffe
- Réduction automatique du débit si les seuils de sécurité sont respectés.
- **Équipements nécessaires** : Débitmètres massiques (MFC), Analyseur de gaz Ipsen IGA 5.2, Sonde à oxygène, Capteurs de pression

Ofengröße: Size:	Chargenabmessung: Load Dimension:	Endothermic gas – Demand*		Endosave – Generator G-1000-ENT min. flow rate:
		Standard-Mode:	GreenFlow-Mode:	
M	(WxLxH) 610 x 910 x 760 mm	9,2 m³/h	1,8 m³/h	
L	(WxLxH) 760 x 1.220 x 760 mm	16,6 m³/h	3,3 m³/h	
L(910)	(WxLxH) 760 x 1.220 x 910 mm	18,8 m³/h	3,8 m³/h	
XL	(WxLxH) 910 x 1.220 x 910 mm	21,0 m³/h	4,2 m³/h	
XL(1200)	(WxLxH) 910 x 1.220 x 1.200 mm	24,6 m³/h	5,0 m³/h	
XXL (1300)	(WxLxH) 1.220 x 1.520 x 1.300 mm	37,6 m³/h	7,5 m³/h	

 **Conforme aux exigences CQI-9**



Traitement thermique économe en énergie dans un four à charge

Par Dirk Joritz (Ipsen)

Autres solutions d'économie d'énergie

◆ EcoOil

• Contrôle intelligent de la trempe à l'huile :

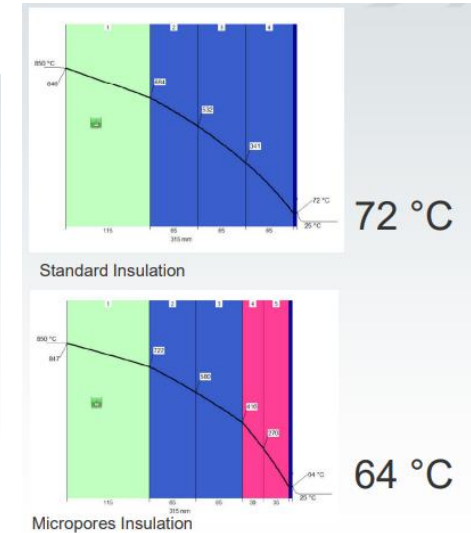
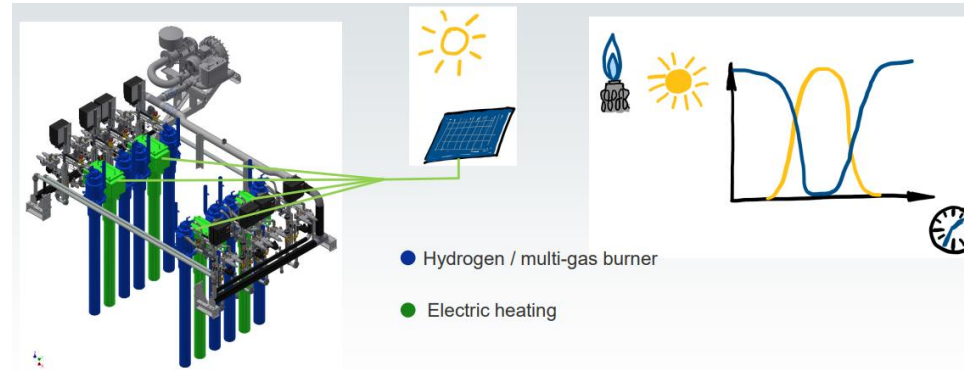
- Réduction du nombre d'agitateurs actifs qui peuvent être mis en veille
- Optimisation du refroidissement post-trempe
- Jusqu'à **75 % d'économie d'énergie**

◆ Isolation améliorée

- Nouvelle conception de porte et isolation microporeuse
- Réduction des pertes thermiques

◆ Chauffage hybride (Recon IV)

- Combinaison **gaz / électrique / hydrogène**
- Réduction des émissions (NOx, CO₂)
- Compatible avec les énergies renouvelables (solaire, H₂ vert)



Conclusion

Ipsen propose une **approche intégrée** combinant :

- **Technologies intelligentes** (EndoSave, GreenFlow)
- **Équipements performants** (analyseurs, MFC, isolation)
- **Flexibilité énergétique** (hybride, H₂-ready)

👉 Objectif : **réduire les coûts, améliorer la durabilité, et rester conforme aux normes industrielles.**

Système hybride ESS de LIVA utilisant VRFB et LFP : une solution éprouvée pour la transition énergétique et la décarbonation industrielle

Par Laurent Blanchet (AMG Engineering, ALD France) et Volker Kölln (LIVA Power Management Systems GmbH)

Contexte et objectifs

- La **Commission de Régulation de l'Énergie (CRE)** souligne, dans le cadre du **PPE3**, l'importance de développer des **flexibilités électriques** pour accompagner la décarbonation.
- Ces flexibilités incluent la modulation de la demande (tarification dynamique), l'ajustement de la production, le développement des interconnexions électriques et le **stockage d'énergie**, notamment par batteries

Solution proposée : LIVA Hybrid-ESS

• **Technologie hybride** combinant :

- **Batteries LFP (Lithium Fer Phosphate)** pour la puissance
- **Batteries à flux redox au vanadium (VRFB)** pour l'énergie

• **Avantages clés :**

- Dimensionnement indépendant de la puissance (1–50+ MW) et de l'énergie (4–100+ MWh)
- **Durée de vie > 20 000 cycles**
- **Décharge complète sans dégradation**
- **Sécurité accrue** : pas de risque d'incendie ou d'explosion
- **Large plage de température de fonctionnement**

Gestion intelligente de l'énergie

- Un **logiciel IA intégré** pilote : la production d'énergie verte, sa distribution et sa conversion en chaleur ou en froid pour les procédés industriels
- Objectif : **remplacer les procédés thermiques au gaz naturel**, notamment dans le **traitement thermique des métaux**

Déploiement international

- Bien que la France soit encore peu équipée en **stockage longue durée (LDES)**, la technologie LIVA est déjà adoptée dans :
 - **Australie, Allemagne, Japon, Canada, USA, Maroc, Chine**, etc.

Conclusion

LIVA propose une solution **fiable, durable, sécurisée et écologique** pour :

- **Stabiliser les réseaux électriques**
- **Décarboner les procédés industriels**, notamment dans la métallurgie
- **Accélérer la transition énergétique** avec une technologie mature et éprouvée

4

Procédés de traitement thermique et thermochimiques

La nitruration profonde des engrenages

Jack A. KALUCKI (Nitrex Metal Inc)

■ La nitruration profonde

- Traitement à basse température (inférieure au revenu de l'acier).
- Pas de déformation des pièces, contrairement à la cémentation.
- Idéal pour engrenages de grande taille (jusqu'à 4,5 m de diamètre, 27t).

■ Avantages mécaniques

- Amélioration de la résistance à l'usure et à la fatigue.
- Comparaison favorable face à la cémentation (endurance en flexion et résistance au grippage).
- Réduction significative de l'usure par glissement.



Exemple de fours de nitruration pour engrenages de grande taille: éoliennes, turbines à vapeur pour centrales nucléaires ou propulsion marine (charge de Φ 4500 mm x 3500 mm de haut, 27 t)



La nitruration profonde des engrenages

■ Contrôle du procédé

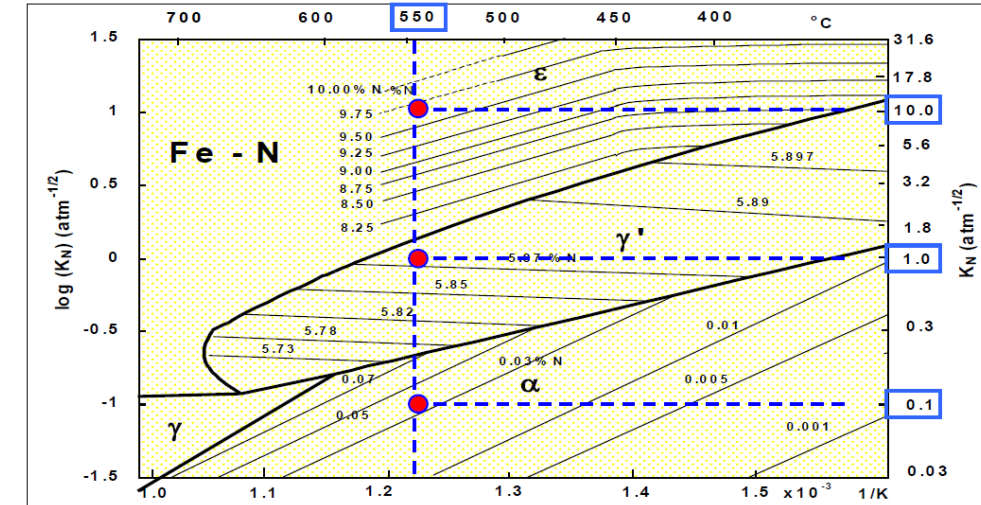
- Utilisation de la norme AMS 2759/10 : nitruration gazeuse contrôlée par le potentiel de nitruration (K_N). Démarrage de la nitruration à K_N 10 puis diminution à K_N 0,6.
- Diagrammes de phase Fe-N et lois de diffusion (loi parabolique : profondeur fonction $\sqrt{\text{temps}}$) pour éviter les porosités et les cheveux d'anges (carbonitrures intergranulaires).

■ Aciers adaptés

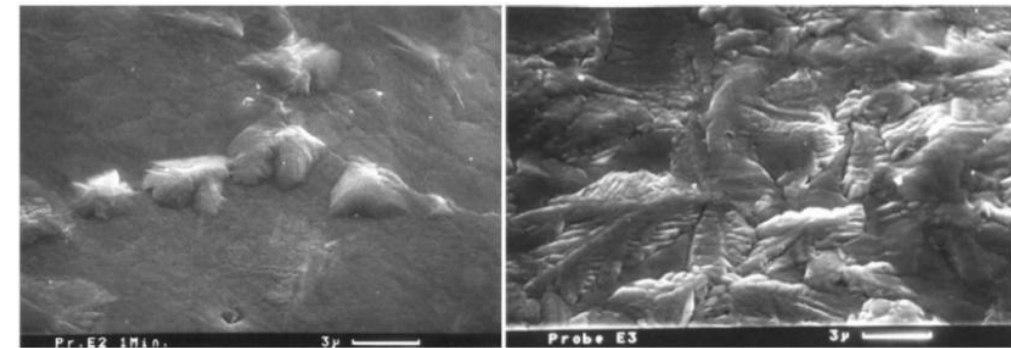
- Exemples : 32CDV13 (33CrMoV12-9), Nitralloy 135M, 42CrMoV12, 30CrMoV9, 30CrMo4, 42CrMo4...
- Dureté de surface atteinte : >70 HRC (jusqu'à 1300 HV1). Les éléments d'additions (Cr, Al, Mo) augmentent la dureté mais freinent la diffusion.

■ Uniformité de la couche nitrurée

- Dépend de l'état de surface, de la propreté, et de la structure du matériau (écrouissage en particulier).
- Importance de la nucléation homogène de la couche blanche.



Fe-N Equilibrium Diagram KN-T (Lehrer)



Nucléation de la couche de combinaison

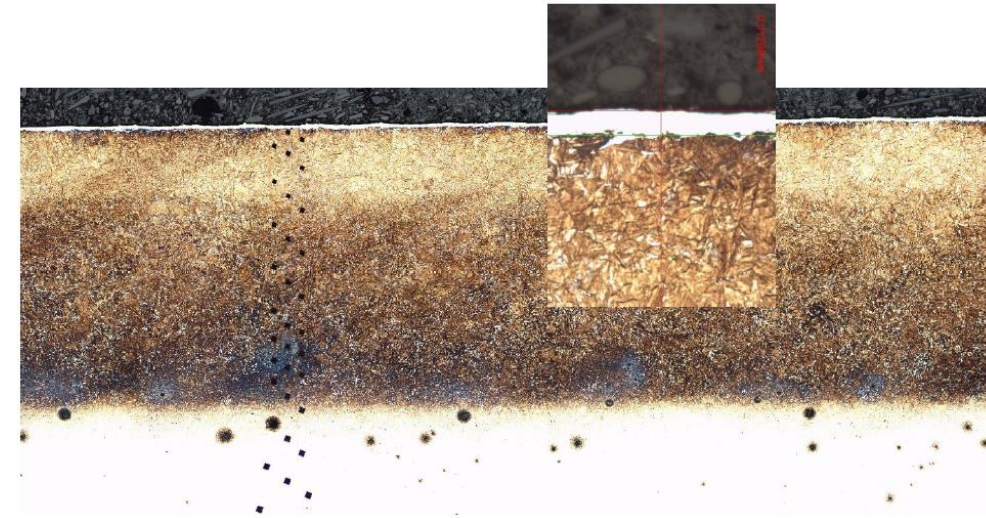
La nitruration profonde des engrenages

■ Résultats expérimentaux

- Profondeur de diffusion atteinte : jusqu'à 1400 μm .
- Dureté > 400 HV sur plus de 1100 μm sur un acier 32CDV13.
- Cycles longs (jusqu'à 330 h), mais optimisés pour faible consommation d'énergie et d'ammoniac ($\text{Kn } 0,6$ la majorité de la durée du traitement de nitruration profonde).

■ La nitruration profonde est un outil essentiel pour les engrenages de grande taille employés dans la production d'énergie car elle permet :

- Une meilleure tenue mécanique.
- Une réduction des dimensions des dentures.
- Une meilleure efficacité énergétique du traitement (grâce à Kn contrôlé).
- Une forte diminution des déformations par rapport à la cémentation.



Métallographie de la structure de zone de diffusion obtenue lors de la nitruration profonde (1100 μm) sur de l'acier 32CDV13 (33CrMoV12-9), Mag. 500 x (détail de la surface : 100 x), attaque au Nital 3%. (source : laboratoire métallurgique de Nitrex Métal Inc.)

Carbonituration basse pression à haute teneur en austénite résiduelle. Méthodologie de mise au point.

David MARECHAL (IRT M2P)

■ Objectifs du projet

- Développer un traitement thermochimique de carbonituration basse pression sur l'acier 23MnCrMo5 pour obtenir ≥ 50 % d'austénite résiduelle après trempe.

■ Méthodologie basée sur une double approche :

- Expérimentale : essais en four ICBP DUO 644 (ECM).
- Simulation numérique : modèles thermodynamiques et diffusion.
- Étapes clés :
 - Localisation du **carbone** et de l'**azote** dans l'austénite.
 - Identification des **flux de matière**.
 - Simulation des **profils de concentration** (carbone, azote).
 - Calcul de la **fraction d'austénite résiduelle** (modèle Koistinen-Marburger).
 - Estimation de la **dureté** (loi des mélanges + modèle Norstrom).

Carbonitruration basse pression à haute teneur en austénite résiduelle. Méthodologie de mise au point.

■ Résultats techniques

■ Conditions optimales :

%C $\approx$ 1 %

%N $\approx$ 0,22 %

Température de traitement : 900–980 °C

Température de trempe : 36 °C

■ Simulation vs. expérimentation :

Diffusion **non couplée** carbone/azote (simplifiée). Validation possible avec **DICTRA** pour diffusion couplée

Utilisation de **Thermo-Calc** (TCFE13) pour prédictions thermodynamiques

Très bon accord sur les profils de concentration, dureté et austénite.

Dureté mesurée : 1200 HV à 40 μ m (simulation : 1191 HV).

■ Procédé ICBP

■ Nitration à 900 °C (66 min)

■ Carburation à 960–980 °C (56 min)

■ Diffusion sous N₂ (6 min)

Caractérisation d'une carbonituration à haute teneur en austénite résiduelle

Marc BUVRON (CETIM)

■ Objectifs du projet

- Développer un traitement thermique innovant sur l'acier 23MnCrMo5 : Carbonituration basse pression suivie d'une trempe gaz à haute teneur en austénite résiduelle stable H_Y.
- Améliorer la résistance à la fatigue, aux impacts répétés, et limiter les déformations.
- Comparer les résultats avec ceux obtenus sur une carbonituration classique.

■ Cycle de traitement

- Carbonituration H_Y : 900–960°C pendant 3h11.
- Revenu : 160°C pendant 1h.
- Grenaillage de précontrainte : pour améliorer les propriétés mécaniques et tribologiques.

■ Caractérisations réalisées

- Microstructure et dureté

Dureté jusqu'à 650 HV à 0,7 mm de profondeur.

Présence de cémentite Fe₃C en faible proportion.

Teneur en carbone plus élevée pour H_Y, mais azote plus faible.

Caractérisation d'une carbonituration à haute teneur en austénite résiduelle

■ Austénite résiduelle (DRX)

Maximum à 0,1 mm de profondeur.

Le grenaillage diminue la teneur en austénite résiduelle.

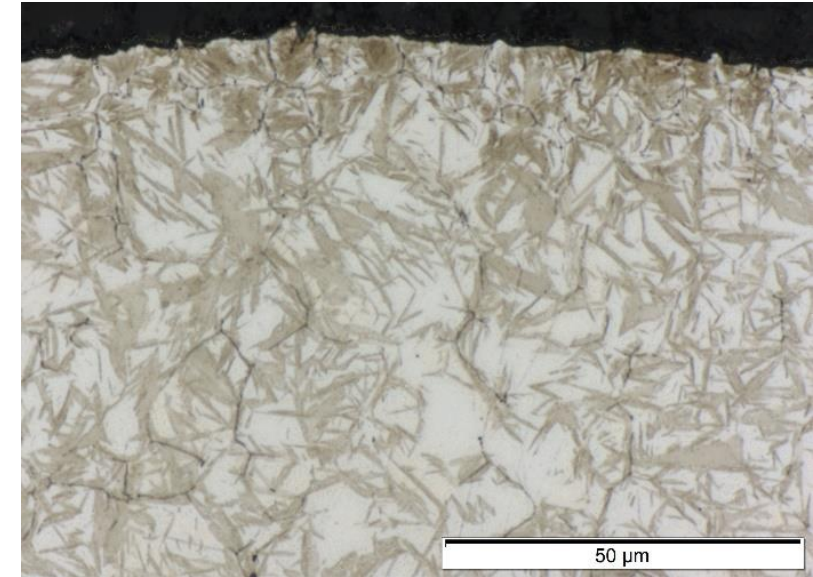
EBSD et MET confirment la présence d'austénite interlatte.

■ Contraintes résiduelles

Jusqu'à 1 GPa en surface après grenaillage.

Profondeur de contraintes plus élevée avec HY (~0,6 mm vs ~0,3 mm).

*Présence de cémentite Fe_3C en faible proportion
(pas de réseau aux joints des grains)*



■ Caractérisation mécanique

Test	Résultat	Gain avec HY
Brügger (flexion par choc)	Fmax = 57,4 kN	+9,3%
Fatigue (flexion 4 points)	Limite = 1775 MPa	+100 MPa
Nanoindentation	Pop-in observé	Transformation austénite → martensite

Caractérisation d'une carbonitruration à haute teneur en austénite résiduelle

■ Stabilité thermique et mécanique

- Transformation partielle de l'austénite au 1er cycle thermique (250°C ou -50°C).
- Stabilité similaire entre les deux traitements après plusieurs cycles.
- Transformation sous fortes contraintes mécaniques.

■ Caractérisation tribologique

Test	Résultat avec HY	Comparaison
Frottement (ASTM G133)	Volume usé ↓	-63%
Cavitation	Vitesse d'érosion ↓	Meilleure tenue dans le temps

■ Conclusions

- La carbonitruration HY améliore la résistance à la fatigue, au choc, à l'usure, à la cavitation, le niveau des contraintes résiduelles et stabilité mécanique.
- Stabilité thermique perfectible (la teneur en azote doit être augmentée).
- Applications : e-mobility, transmission, pièces en limite de performance avec la carbonitruration classique.

Effet de la cémentation à basse température sur l'acier inoxydable austénitique AISI 304 après chargement en hydrogène

Par Susanne Gerritsen et Christophe Le Roy (Bodycote)

Contexte et objectifs

L'étude explore l'impact du carburation basse température (LTC) sur l'acier inoxydable austénitique AISI 304, en particulier après exposition à l'hydrogène. L'objectif est de réduire la fragilisation par l'hydrogène (HE) tout en améliorant les propriétés tribologiques sans compromettre la résistance à la corrosion.

Le Procédé de Carburation Basse Température (LTC)

Température < 500°C

Diffusion interstitielle du carbone dans la matrice austénitique

Formation de **contraintes résiduelles compressives** jusqu'à 40 µm de profondeur

Augmentation de la **dureté superficielle** jusqu'à **1300 HV0.05**

Amélioration de la **résistance à l'usure** et à la **fatigue**

Préservation de la ductilité et de la **topographie de surface**

Méthodologie Expérimentale

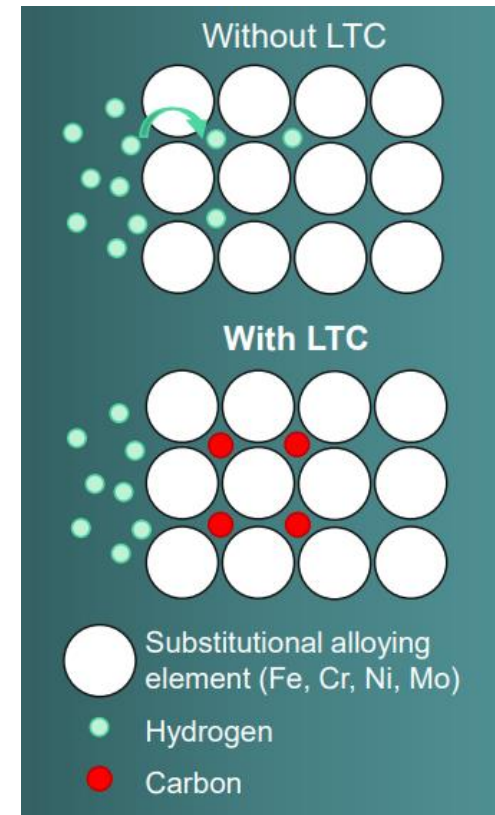
Matériau : AISI 304 (1.4301), états **recuit (SA)** et **écroui (CW)**

Traitements : **sans** et **avec LTC (Kolsterising®)**

Pré-chargement en hydrogène par électrolyse ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Na}_2\text{HAsO}_4$, 80°C, 30 mA/cm²)

Tests :

- **Corrosion** : potentiel en circuit ouvert (OCP), polarisation potentiodynamique
- **Mécanique** : essai de traction à vitesse lente (SSR)
- **Hydrogène** : mesure du H diffusible (méthode au glycérol) et piégé (TGHE)



Effet de la cémentation à basse température sur l'acier inoxydable austénitique AISI 304 après chargement en hydrogène

Par Susanne Gerritsen et Christophe Le Roy (Bodycote)

Résultats Clés

Hydrogène :

Réduction significative du H diffusible après LTC

Le H piégé reste similaire entre les états

Les aciers écrouis non traité montre une **forte absorption** (>50%) due à la martensite induite

Corrosion :

Le H dégrade fortement les propriétés de corrosion

LTC **atténue les effets négatifs** du H, surtout sur les aciers écrouis

Le LTC modifie la morphologie de corrosion (délaminage au lieu de piquûres)

Résistance Mécanique :

LTC augmente $R_{p0.2}$ et R_m , mais réduit la ductilité

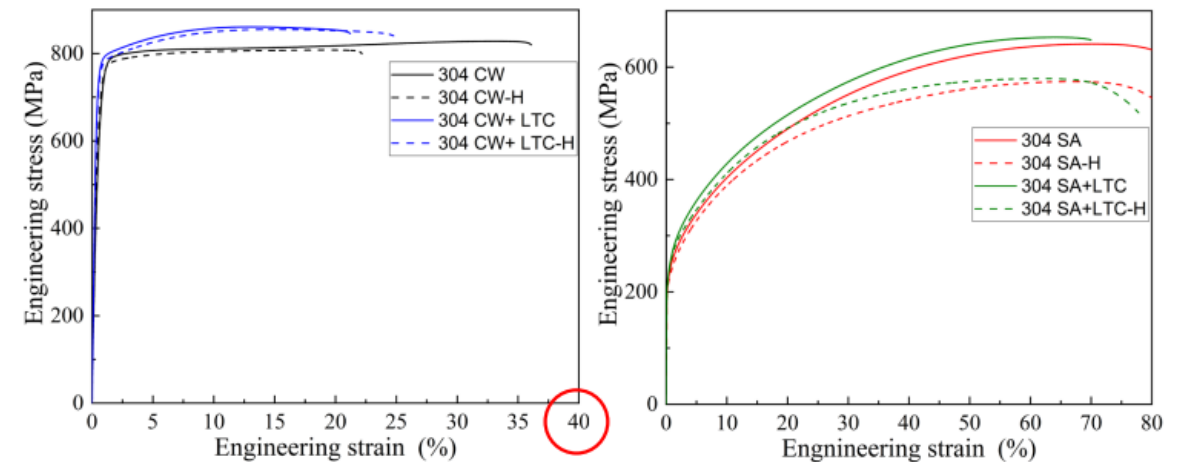
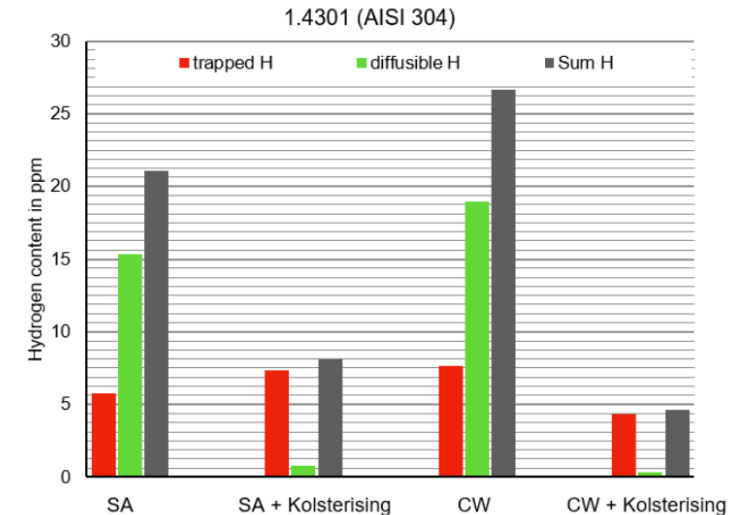
Le H diminue fortement l'allongement (δ), surtout en CW

LTC **réduit la perte d'allongement (E_{loss})** liée à l'absorption d'hydrogène :

- A l'état écroui la perte d'allongement passe de **46.6%** à **11.9%** avec LTC
- A l'état hypereutecté la perte d'allongement passe de **9.5%** à **7.5%** avec LTC

Points à Retenir

- LTC améliore la **résistance à l'usure** et à la **fragilisation par l'hydrogène**
- Effet particulièrement marqué sur les aciers **écrouis**
- **Potentiel élevé** pour les composants en acier inoxydable dans les systèmes à hydrogène



Référencement de la trempe des polymères dans le RCC-M

Par Benoît Lefever (Framatome)



Contexte et objectifs

Le RCC-M est le **code de conception et de fabrication des composants mécaniques** de l'îlot nucléaire des réacteurs à eau pressurisée (PWR). Il encadre le design des équipements, la fourniture des matériaux, la fabrication et les contrôles DT et END.

La Trempe : Objectifs et Contraintes

La trempe vise à obtenir une structure hors équilibre (bainite ou martensite) par :

- **Austénitisation** (chauffage > AC3)
- **Refroidissement rapide**
- Suivi d'un **revenu**

Le **milieu de trempe** doit être adapté selon :

- Le type d'acier
- L'épaisseur et la forme de la pièce
- L'objectif métallurgique (structure visée)
- La limitation des risques (fissures, déformations)

Milieus de Trempe Traditionnels

- **Eau** : rapide, économique, mais risque élevé de fissuration et corrosion
- **Huile** : plus douce, mais inflammable, coûteuse, et polluante
- **Air / Gaz / Sels / Polymères** : utilisés selon les cas spécifiques

Problèmes avec la Trempe à l'Huile

- Risque d'**incendie** (point éclair ~200°C)
- Disparition progressive des capacités industrielles de trempe à l'huile
- **Proposition des fabricants** : remplacer l'huile par **eau + polymère**

Trempe aux Polymères : Avantages et Limites

Avantages :

- Non inflammable
- Pas de nettoyage avant revenu
- Flexibilité du taux de trempe (si bien maîtrisé)

Limites :

- Sensibilité à la température, agitation, concentration, bactéries
- Risques de corrosion
- **Pas de norme existante** → besoin de codification

Référencement de la trempe des polymères dans le RCC-M

Par Benoît Lefever (Framatome)

Codification dans le RCC-M

Un **groupe de travail** a été constitué avec :

- Fournisseurs de polymères, d'équipements, d'aciers
- Experts en traitement thermique
- Objectif : définir des **règles industrielles acceptables**

Une **liste de paramètres à surveiller** a été établie :

- Niveau de liquide
- Température
- Agitation (visuelle et débit)
- pH
- Concentration en polymère
- Pollution bactérienne
- Drasticité du milieu

Fréquences de contrôle : de quotidien à trimestriel selon le paramètre

Modifications du RCC-M

- Section V – F8000** : procédures de traitement thermique
 - Le fabricant doit définir ses propres procédures internes
- Section II – Spécifications d'approvisionnement** :
 - La trempe aux polymères est **ajoutée comme alternative à l'huile**

Conclusion

- Jusqu'à 2024, seuls l'eau et l'huile étaient spécifiés
- Pour **réduire les risques d'incendie**, les fabricants ont proposé l'usage des polymères
- Grâce au soutien de l'A3TS et des industriels, une **spécification a été validée et intégrée au RCC-M édition 2024**
- La qualité et la reproductibilité dépendent d'un **suivi rigoureux des paramètres**

Relever le défi du traitement thermique par trempe à l'air pour les pièces structurelles en aluminium

Par Clara Ghiurca (Hi-Tech Engineering Srl)

Contexte et objectifs

L'utilisation de l'aluminium dans l'industrie automobile a explosé (+800 % en 50 ans), notamment pour des **pièces structurelles**. Cette évolution est motivée par la **réduction du poids** pour améliorer la consommation et les émissions, l'**évolution des technologies de fonderie** (ex. : moulage sous pression) et la nécessité de **maintenir des performances mécaniques élevées**.

🔧 Défis des pièces structurelles en aluminium

- Géométries complexes (nervures, cellules)
- Parois fines et homogènes
- Soumises à des **contraintes mécaniques importantes**
- Risques accrus de **déformation** et de **contraintes résiduelles** après traitement thermique

🔥 Traitement thermique adapté

Le traitement thermique doit être **personnalisé** pour :

- Réduire les déformations
- Minimiser les contraintes internes
- S'adapter à la diversité des pièces et des alliages

👉 Trempe à l'air : une alternative à la trempe à l'eau

Trempe à l'eau	Trempe à l'air
Refroidissement rapide	Refroidissement plus lent
Risque élevé de déformation	Moins de déformation
Moins d'énergie requise	Plus énergivore
Moins adaptée aux grandes séries	Meilleure pour production continue

DEFORMATIONS INDUITES PAR LA TREMPE A L'EAU
Déformation maxi: -3,547 mm

DEFORMATIONS INDUITES PAR LA TREMPE A L'AIR
Déformation maxi: -0,102 mm

Relever le défi du traitement thermique par trempe à l'air pour les pièces structurelles en aluminium

Par Clara Ghiurca (Hi-Tech Engineering Srl)

Facteurs clés pour une trempe à l'air efficace

- **Conception des paniers/racks :**
 - Légers, résistants, modulables, stables
- **Orientation des pièces** pour optimiser la circulation d'air
- **Vitesse et pression de l'air**
- **Contrôle de la température de l'air**
- **Tests en laboratoire** pour valider les configurations

Installations de traitement thermique

Hi-Tech Engineering conçoit des équipements sur mesure :

- **Fours à rouleaux** ou à sole mobile
- **Systèmes de ventilation** performants
- **Automatisation** du chargement/déchargement
- **Contrôle précis** des temps de transfert et de la température

Conclusion

Les défis posés par les nouvelles pièces en aluminium peuvent être relevés grâce à :

- Des **équipements sur mesure**
- Une **programmation adaptable**
- Une **approche intégrée** du traitement thermique

5

Fabrication additive

Impact des procédés de finition sur le comportement en fatigue des pièces issues de fabrication additive

Par A. Renaud et collaborateurs (IRT M2P, HEPIA, HE-Arc)

Contexte et objectifs

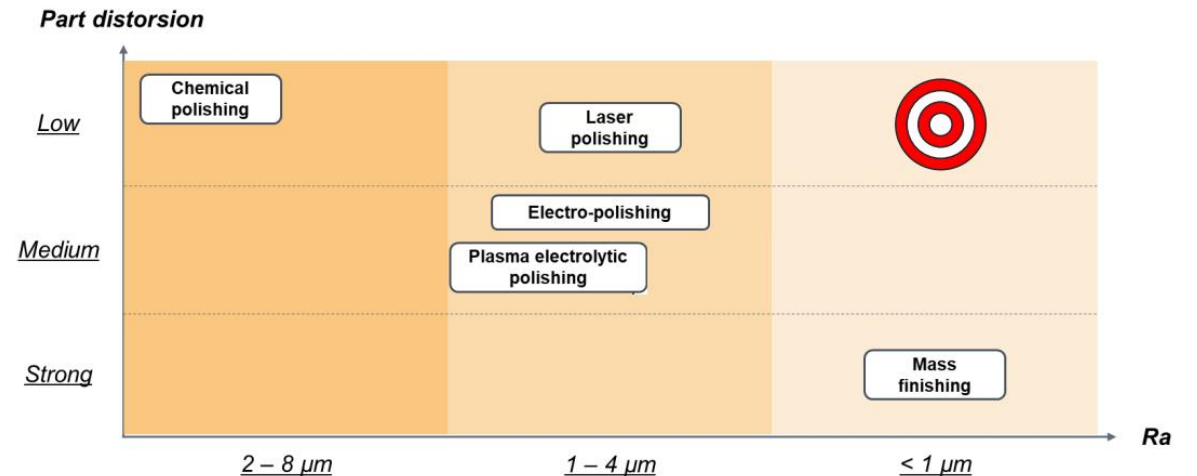
La **fabrication additive métallique (AM)** offre des avantages majeurs : géométries complexes, réduction des coûts et délais. Mais elle présente aussi des **défauts critiques** : qualité de surface médiocre, particules résiduelles et intégrité matière affectée

Objectif : Évaluer l'impact de différents **procédés de finition** sur : la **rugosité** (S_a , S_z), la **distorsion géométrique**, le **comportement en fatigue**, la **microstructure** et les **contraintes résiduelles**

Procédés de finition étudiés

1. Polissage chimique (jusqu'à 700 L)
2. Polissage électrochimique (EP) – 65 L
3. Polissage plasma électrolytique (PeP) – 65 L
4. Tribofinition (mass finishing) – 30 L
5. Polissage laser
6. Usinage (référence)

Résultats : déformation et rugosité



Surface	Sa (µm)	Sz (µm)
As built	6±0,7	68±6
Chemical	4.2±0,6	31±5
Electrochemical polishing	1.0±0,2	12±2
Plasma electrolytic polishing	0.9±0,2	10±3
Mass finishing	1.0±0,1	7±1
Laser polishing	0.4±0,1	7±1
Machining (= comparison)	0.8±0,1	13±4

Impact des procédés de finition sur le comportement en fatigue des pièces issues de fabrication additive

Par A. Renaud et collaborateurs (IRT M2P, HEPIA, HE-Arc)

Résultats – Fatigue (Inconel 718)

- **Usinage** : meilleures performances
- **Tribofinition** : intermédiaire
- **EP, PeP, chimique** : proches du brut
- **Polissage laser** : dégradation du comportement en fatigue

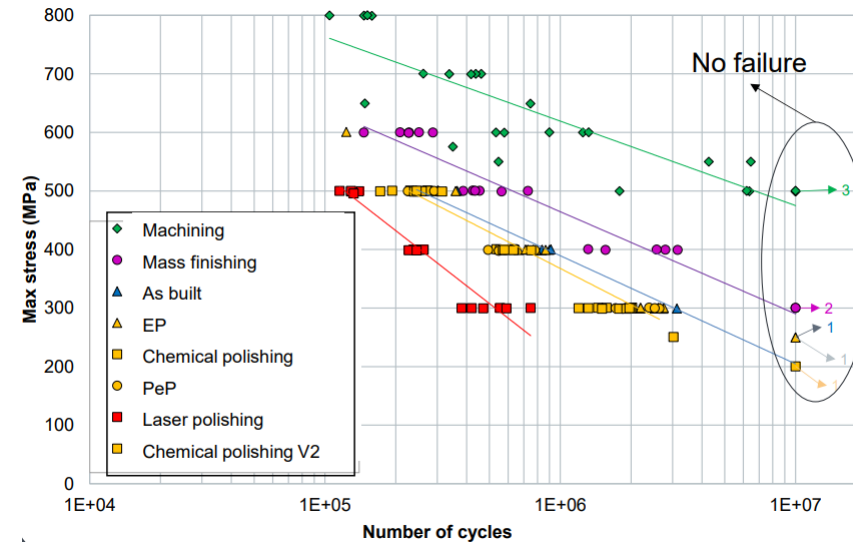
 **Conclusion** : la rugosité seule ne suffit pas à expliquer les performances en fatigue → rôle crucial de la **microstructure** et des **contraintes résiduelles**.

Microdureté

- **Usinage** : légère augmentation en surface
- **Laser** : chute importante de dureté sur 300 μm
- Corrélation avec les observations microstructurales

Microstructure & Contraintes

- **Usinage / tribofinition** : zone affectée $\sim 20 \mu\text{m}$, contraintes résiduelles compressives
- **Laser** : modification cellulaire, zone affectée $\sim 250 \mu\text{m}$, ségrégation Mo/Nb
- **PeP / chimique** : pas d'impact microstructural
- **Contraintes résiduelles** mesurées uniquement pour usinage et tribofinition (DRX)



Conclusion

- Les procédés de finition influencent fortement le comportement en fatigue
- L'effet n'est pas uniquement lié à la rugosité, mais aussi à :
 - La **microstructure**
 - Les **contraintes résiduelles**
 - La **profondeur de la zone affectée**
- **Fenêtre critique** : Sa entre 1 et 6 μm



Vérificateur	Approbateur

CONTACT :

Hasna Ambarki

Hasna.ambarki@cetim.fr

Dossier de veille rédigé par Jorge Arturo SOTO PUENTE, Romaric COLLET, Caroline DEPRE DURAND, Aurore GOIGOUX et Marc BUVRON

À noter : les entreprises citées dans ce document de veille le sont à titre illustratif (ce n'est en aucun cas un « publireportage » ou un outil de promotion de telle ou telle entreprise ou solution de marché).

De la même manière, nous ne cherchons pas l'exhaustivité des informations, mais plutôt à illustrer l'état de l'art et les tendances.

Malgré le soin apporté à la réalisation de cette note, certains liens hypertextes peuvent ne pas fonctionner correctement, notamment en raison de modifications des sites internet ciblés (ex : « page not found ») ou d'options de sécurité de certains viewer de PDF.



Pour un futur industriel
responsable et respectueux
de la planète