



PERFORMANCES

Dossier de veille

Septembre 2025



Congrès MATTRIS A3TS

Part 2 - Innovations et technologies avancées en traitements de surface et thermiques

Dijon 2/4 juillet 2025

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

Introduction & Sommaire

Avec plus de 1000 visiteurs, le congrès MATTRIS (A3TS), organisé à Dijon du 2 au 4 juillet 2025, a rassemblé les experts des traitements thermiques et des traitements de surface autour des dernières avancées techniques et industrielles. Ce second volume du dossier de veille offre une exploration des thématiques clés, incluant les traitements de surface voie humide, les substitutions réglementaires (Cr VI, PFAS), les moyens de caractérisation des couches, les traitements de fonctionnalisation, la simulation numérique et l'utilisation de l'IA. Ce document vise à présenter les avancées attendues et les perspectives discutées lors de l'événement, en s'appuyant sur les contributions des experts présents.

Sommaire

1. [Traitements de surface voie humide](#)
2. [Traitements de surface pour substitution \(Cr VI, PFAS\)](#)
3. [Moyens de caractérisation d'une couche](#)
4. [Traitements de fonctionnalisation d'une surface](#)
5. [Simulation numérique](#)
6. [Utilisation de l'IA](#)



1

Traitements de surface voie humide

Électrodéposition des alliages : les bases, les tendances et l'avenir

Par Jean-Yves HIHN - UTINAM – Univ. Marie et Louis Pasteur

Différences entre métallurgie classique et électrodéposition

- En métallurgie, les alliages se forment à l'équilibre thermodynamique
- En électrodéposition, **aucun équilibre thermodynamique** : les métaux se déposent selon des mécanismes cinétiques (adsorption, germination, croissance) influencés par les potentiels électrochimiques.

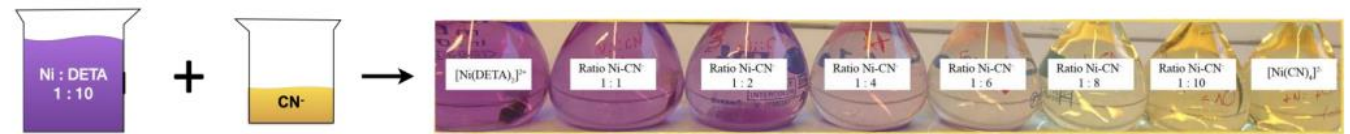
Exemples de systèmes d'alliages électrodéposés

Alliages d'or (18 carats) → co-dépôt Au–Ag–Cu

Utilisation de cyanures pour ajuster les potentiels < 30 mV d'écart.

Alliages Zn–Ni alcalins → Nécessité de **complexer le nickel** avec des amines(ex. DETA, TEA) pour éviter la précipitation d'hydroxydes.

La spectroscopie UV-Vis permet de déterminer les **ratios de complexation** et la **compétition entre ligands** (DETA vs TEA, DETA vs CN^-).



Tendances et perspectives

Nouveaux électrolytes sans cyanure → Développement de bains à base de **citrates** et **5,5-diméthylhydantoïne (DMH)**.

Objectif : co-dépôt Ag–W sans cyanure.

Réduction du tungstate uniquement en présence d'un autre métal.

Mécanisme encore mal compris, mais des hypothèses sont proposées (réduction partielle en oxydes intermédiaires, puis réduction finale).

Revêtements en métal réfractaire et à composition graduée présentant des modifications de microstructure, de composition et de propriétés à la demande grâce à l'électrochimie.

Par Dan HOOKS– Los Alamos National Laboratory

Objectif général

Développer des **revêtements métalliques avancés** (y compris métaux réfractaires) avec un **contrôle précis de la microstructure, des gradients de composition** sur mesure et des **propriétés ajustables**.

Stratégies de dépôt électrochimique

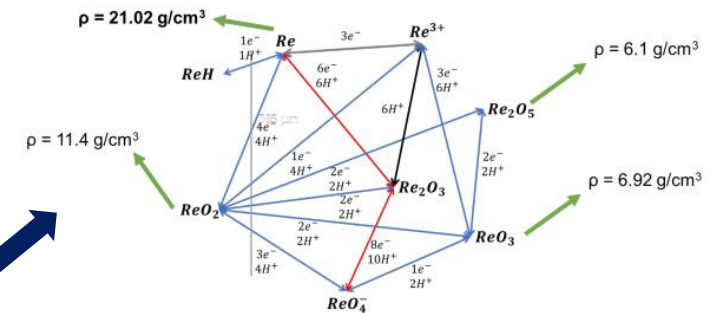
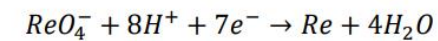
1. **Contrôle par impulsions (pulse plating)** → variation des cycles on/off et de la densité de courant
2. **Dépôts à composition graduée** → Exemple : gradients Co–Re ou Au–Ag

Cas d'étude : dépôt de rhénium (Re)

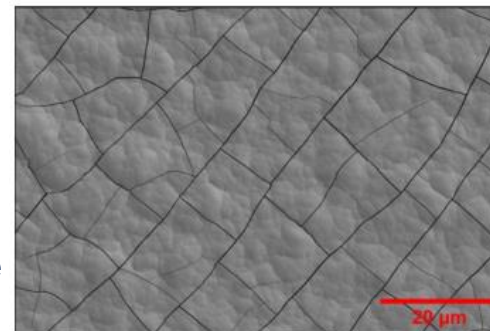
Métal réfractaire ($T_{\text{fusion}} \sim 3000\text{ °C}$), très dense, catalytique → **Impossible à électrodéposer de manière conventionnelle (pas de réaction de réduction directe)**

Solutions innovantes :

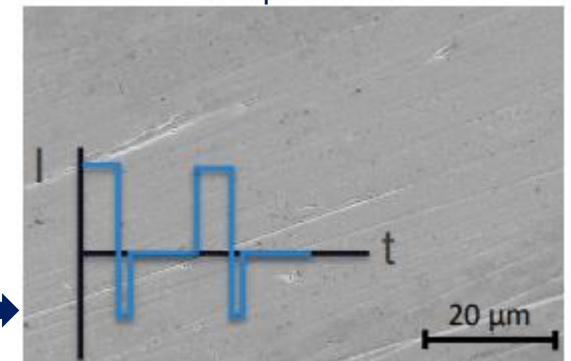
- **Solvants encombrés** : réduisent la génération d' H_2
- **Impulsions électriques** : sélection de voies de réduction spécifiques
- **Acide citrique** : complexant qui stabilise Re et modifie la morphologie



Vitesse de dépôt ~ 24 h / 1 mm



Films métalliques brillants mais fissurés



20 % de polarisation négative → pas de fissures

Elaboration de dépôts de zinc composite à base de particules de PMMA

Par L. CHANTEGREL / J-Y HIHN – Electropoli / UTINAM

Objectif général

Développer une **alternative aux revêtements ZnNi** pour les pièces automobiles, en réponse :

- aux **contraintes réglementaires croissantes** sur les sels de nickel (VLEP : 0,01 mg/m³)
- aux **enjeux environnementaux** (traitement des effluents, exposition opérateurs)

Solution proposée

Revêtement composite à base de **zinc** incorporant des **nanoparticules de PMMA** (polymère) et de **SiO₂**.

Paramètres étudiés : concentration en particules, surfactants, agitation, densité de courant (1–10 A/dm²)

Résultats principaux:

Adhérence avec caoutchouc (ASTM D429)

- ZnNi : ~9 kN vs Zn–PMMA : jusqu'à **12 kN** (+20 %)

Corrosion (ISO 9227 – NSS)

- Jusqu'à **1008 h sans rouille rouge** → comportement sacrificiel confirmé (ZnPMMA > ZnFe > ZnNi)

Conductivité

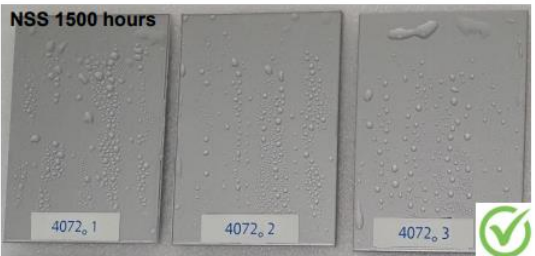
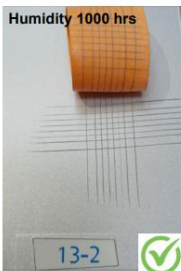
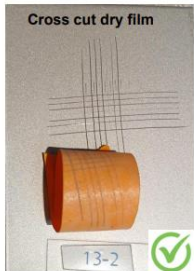
- Résistivité 0,06 mΩ pour un requis inférieur à 3 mΩ

Compatibilité peinture

Essais de compatibilité peinture

Coat	Function	Products
PRIMER (2 component epoxy primer)	Base	Primer 463-12-8
	Hardener	CA 116
Thickness (20-35)	Thinner	C25/90S
TOPCAOT (3 comp. polyurethane finish)	Base	Aerodur Finish SGL Alu
	Hardener	S66/22R
Thickness (40-90)	Thinner	C25/90S

Response	Standard	Résultats
Adhesion	ISO 2409 (cross cut test – dry film)	OK
Corrosion NSS	ISO 9227 (1500 hours)	OK
Humidity test	ISO 2812 (23° +/-2) + cross cut at 1000 hours	OK



Revêtement direct de membranes échangeuses d'anions pour une électrolyse efficace de l'eau

Par Dietmar STORK– Schlötter

Contexte énergétique et environnemental

Le changement climatique impose une **décarbonation rapide**. La **production d'hydrogène par électrolyse de l'eau** est au cœur de cette transition.

Les technologies pour l'électrolyse de l'eau sont :

Technologie	Avantages	Inconvénients
AEL (alcaline)	Procédé mature, haut débit	Peu dynamique
PEM (membrane protonique)	Opération dynamique	Catalyseurs nobles, environnement agressif
AEM (membrane échangeuse d'anions)	Moins exigeante, dynamique	En développement

Défis des membranes AEM

Bonne conductivité ionique (OH^-), stabilité chimique et thermique en milieu alcalin, faible perméabilité à l' H_2 , **sans PFAS**

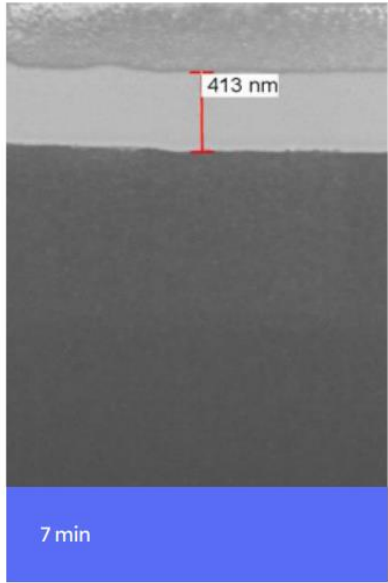
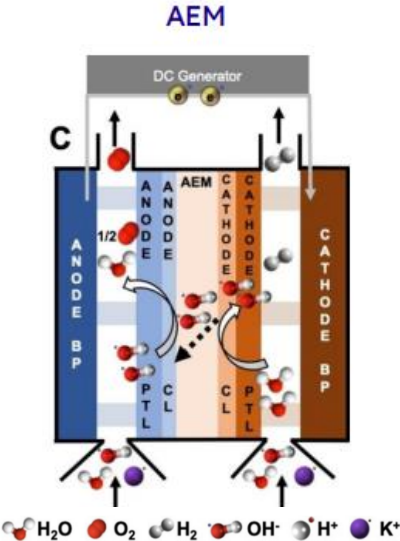
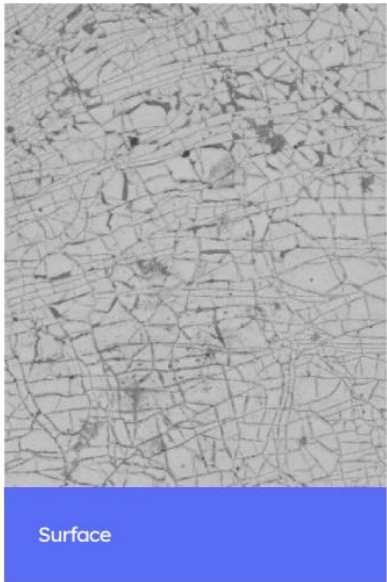
Procédé développé par Schlötter

- **Prétraitement** alcalin spécifique
- **Activation** par un activateur au palladium modifié
- **Réduction** (nucléation Pd)
- **Dépôt autocatalytique** de nickel (Ni-P) double face



Résultats :

- Bonne mouillabilité (angle de contact $\sim 60^\circ$)
- Bonne adhérence sans interverrouillage mécanique (adhésion chimique)
- Surface microfissurée (utile pour l'activité catalytique)
- Epaisseur du revêtement 413 nm/7 min



2

Traitements de surface pour substitution (Cr VI, PFAS)

Procédé de chrome dur trivalent : nouvelle perspective pour répondre à une demande croissante

Par Benjamin ARMAND – Schlötter



Contexte et enjeux

Schlötter développe des alternatives à **base de chrome trivalent (Cr^{3+})**, plus sûres pour l'environnement et les opérateurs.

SLOTOCHROM HC 4000 : première génération

Avantages :

Dureté **750–1000 HV**, vitesse de dépôt élevée : **jusqu'à 1 µm/min**, sans acide borique ni composés fluorés (PFAS)

Limites :

Présence de **carbone** dans la couche 2 à 3 % (additifs organiques) → **contraintes internes élevées** et **macrofissuration**, propriétés tribologiques différentes du Cr^{6+}



SLOTOCHROM HC 4300 : nouvelle génération

Structure quasi exempte de fissures (~ 0,6 % C → contraintes internes réduites)

Dureté : 750–850 HV, jusqu'à 1000 HV après traitement thermique

Très bonne répartition métallique même sur géométries complexes

Coefficient de frottement réduit (~ 0,2 vs bille WC)

Résistance à l'usure équivalente au chrome dur hexavalent (essai Taber)



Résistance à la corrosion > Cr^{6+}



SLOTOCHROM HC 4300 with post treatment SLOTOCHROM DR4170 after 24 h SST 0% RR

Caractérisation des revêtements de chrome dur électrodéposés à partir d'un électrolyte inorganique trivalent

Par R LE BARBENCHON – IRT M2P

Objectif général

Limiter la fissuration du chrome trivalent.

C dans le dépôt car liant organique dans le bain →
Macrofissuration au-delà de 200 °C.

Formulation CrIII IneoChrome

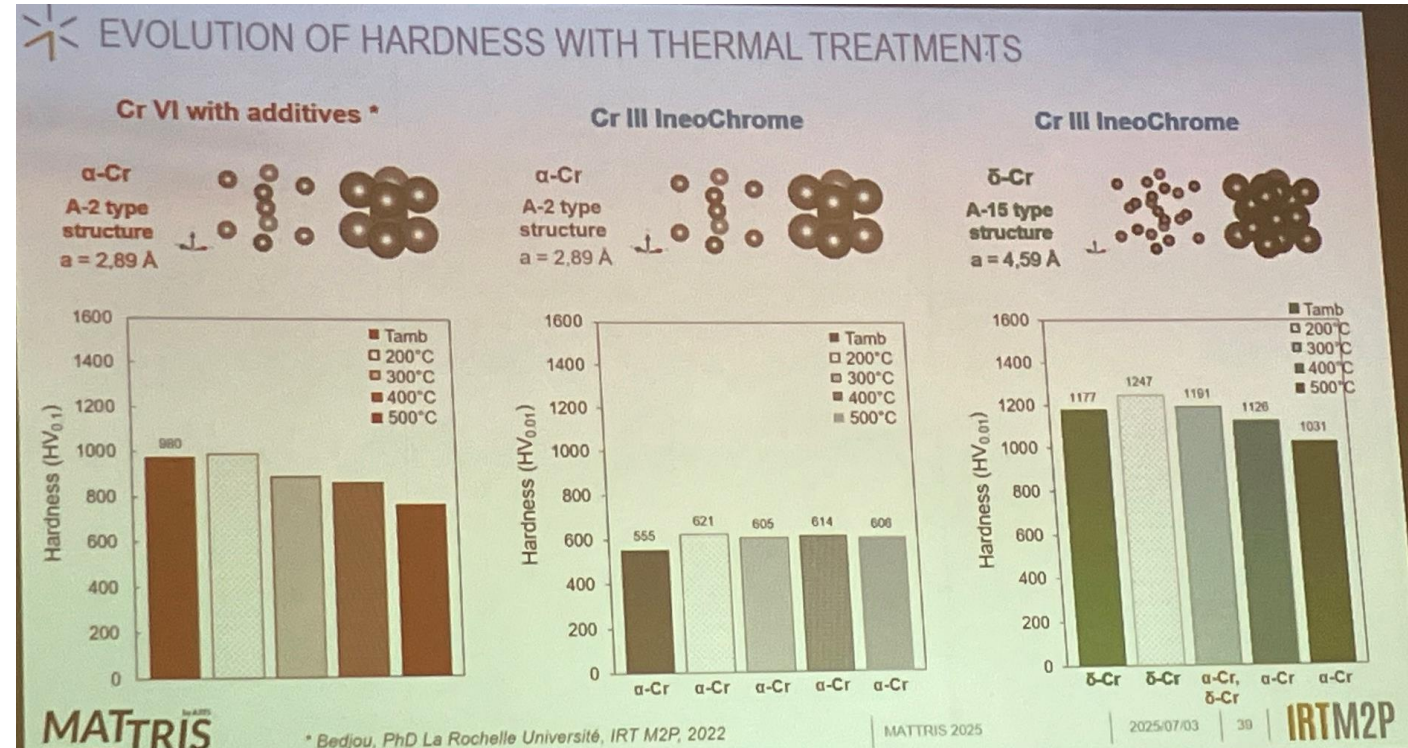
Liant inorganique

Deux types de dépôt peuvent être obtenus:

- Dureté élevée (900 – 1200 HV) → phase métastable δ → fissuration au-delà de 300 °C
- Dureté faible (450 – 650 HV) → phase stable α

Le % d'impuretés en éléments légers a été mesuré pour les dépôts de chrome

- ~ 8 % dans le Cr VI
- Jusqu'à 14 % dans la phase métastable δ du CrIII



La substitution du chromage dur chez SAE : enjeux, opportunités et premiers résultats

Par Jérémie COTINOT – Safran Aircraft Engines

Contexte industriel et environnemental

Le **chromage dur** (CrVI) est historiquement utilisé pour ses propriétés anti-usure, anti-corrosion...

Problème : le CrVI est classé substance « SVHC » (Substance of Very High Concern) par REACH

Applications critiques et fonctions attendues

- Tiges de vérins (étanchéité dynamique, faibles frottements)
- Axes de suspension (résistance à l'usure, la corrosion, le fretting)
- Paliers, bagues, arbres (résistance au cisaillement, anti-grippage)

Alternatives technologiques étudiées

• 1. Voie humide

Nickel chimique (Ni-P) : dépôt autocatalytique, adapté aux géométries complexes, nécessite un traitement thermique → PROTEC GROUP

Chromage trivalent (CrIII) : projet NEPTUNE, deux chimies (organique/inorganique), maturité encore faible → IRT M2P

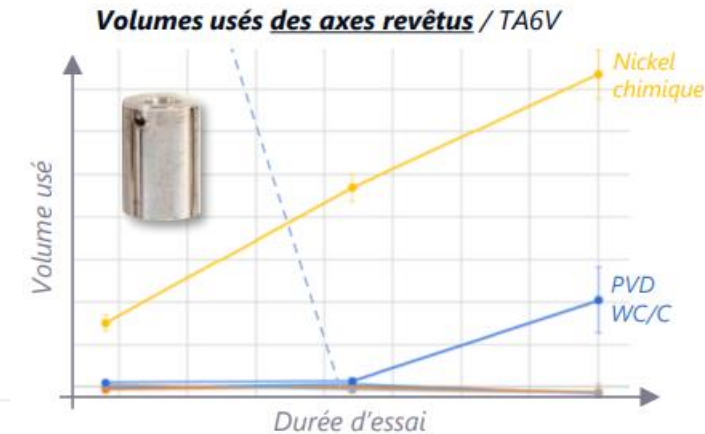
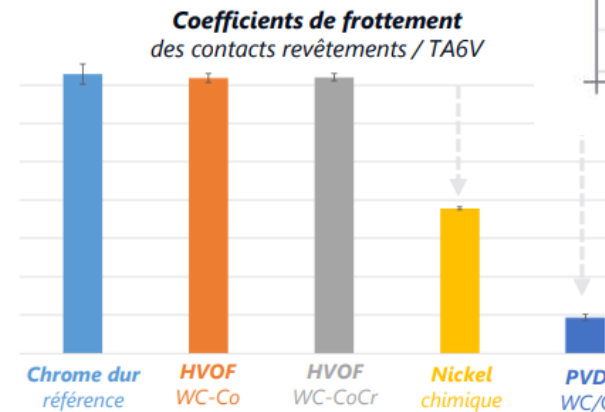
2. Projection thermique

HVOF (WC-Co, WC-CoCr) : très bonne tenue à l'usure, faible friction, déjà industrialisé → BODYCOTE, LINCOTEK

APS (Cr₃C₂-NiCr, NiCrAl) : industrialisé en interne, à maturer pour production neuve.

3. Dépôts minces

PVD / PACVD (WC:C, DLC) : très durs, faibles épaisseurs, nécessitent redesign des pièces → HEF, OERLIKON.



Meilleurs résultats en tribologie avec la technologie HVOF

Conversion au chrome trivalent des alliages d'aluminium : importance de la préparation de surface

Par Salomé PARRIAUX – IRT M2P

Contexte industriel et environnemental

Les procédés de conversion apportent une protection à la corrosion des alliages d'aluminium. Les procédés de conversion au chrome hexavalent sont les traitements de conversion les plus utilisés. En raison de la toxicité du chrome hexavalent, les recherches se sont orientées vers le chrome trivalent comme substituant dans le cadre des procédés de conversion

Propriétés attendues

- Anti-corrosion (les particules intermétalliques présentes dans des alliages d'aluminium constituent des sites actifs pour la corrosion).
- Conservation des propriétés électriques (épaisseur de couche très fine ≈ 100 nm)
- Promouvoir l'adhérence

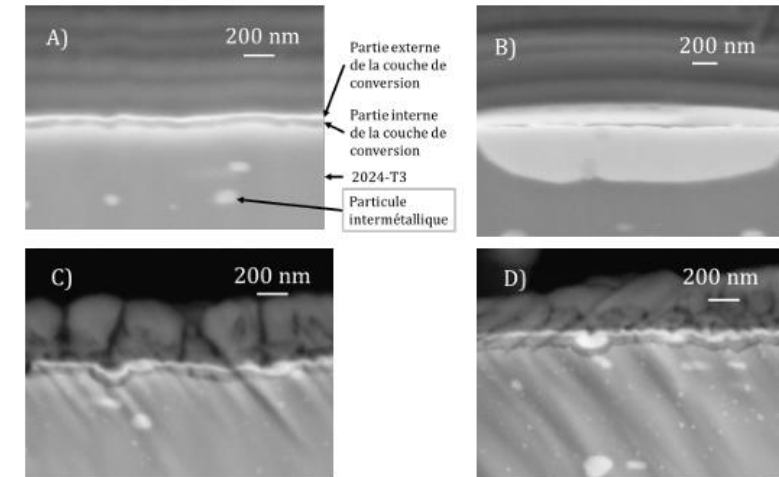
Problèmes expérimentaux :

- Procédé sensible à la nature des alliages.
- Faïençage de la couche si celle-ci est trop épaisse
- Résultats hétérogènes en termes d'adhérence, de recouvrement, de tenues BS...

} Interrogation sur l'effet de la préparation de surface

Observations expérimentales globales

- La nature du décapant influe sur les particules métalliques et in fine sur le développement de la couche de conversion
- Le sablage augmenterait la tenue à la corrosion (pas d'observation de particules insérées dans le matériau !)
- Un décapage sulfo-nitrique entraînerait une diminution des tenues BS
- Un dégraissage entraîne un recouvrement total.



Images MEB des couches de conversion déposées sur le substrat A)-B) poli et C)-D) décapé dans l'acide sulfurique *

* Camille Trinidad. Etude de l'influence du prétraitement de surfaces d'alliages d'aluminium sur les couches de conversion au chrome trivalent. Université Paris sciences et lettres, 2021.

Interdiction potentielle des PFAS : défis et opportunités pour les systèmes de revêtement

Par Sabrina HILBT – Dörken Coatings

Contexte et enjeux

PFAS (substances per- et polyfluoroalkylées) : environ 10 000 composés chimiques, connus pour leur **stabilité extrême** et leur **utilité industrielle** (hydrophobie, résistance chimique, thermique, etc.).

Réglementation européenne (REACH)

Proposition de restriction : tout composé contenant au moins un groupe **-CF₃** ou **-CF₂-** sans H/Cl/Br/I.

Calendrier estimé : Décision attendue fin 2025 / début 2026 puis période de transition de 18 mois

Produits Dörken concernés :

Contiennent des PFAS :

- DELTA-PROTEKT® KL 105, KL 120
- DELTA®-TONE 9000
- DELTA-PROTEKT® VH 301 GZ, 321 GZ, etc.



Nouvelle gamme DÖRKEN® pour les produits 100 % PFAS-free

- BASE 120
- TOP 500 BLACK
- SEAL 711 BLACK

Application tribologique
(test Renault RNES A0006)

DÖRKEN® BASE 120 + DÖRKEN® TOP 500 BLACK coefficient de frottement total (μ_{tot})
(curing temperature 200°C, @ 20 min, coating weight 5g/m²)
 μ_{tot} cible = 0,12-0,18 μ_{tot} mesuré = 0,154 ± 0,7

Corrosion (test brouillard salin ISO 9227)



DÖRKEN® BASE 120 (26 g/m², 240 °C, 30 m)
aucune rouille rouge après 1500 h



Alternatives aux PFAS : solution polyamide par projection thermique

Par Alexandre CASTRO – CITRA

Approche du CITRA

Traitements de surface (projection thermique, voie humide, dépôt sous vide)

Sélection de polymères alternatifs selon :

- Application visée (antiadhérence, résistance chimique, alimentaire...)
- Conditions d'usage (température, substrat, environnement)
- Viabilité économique et technique

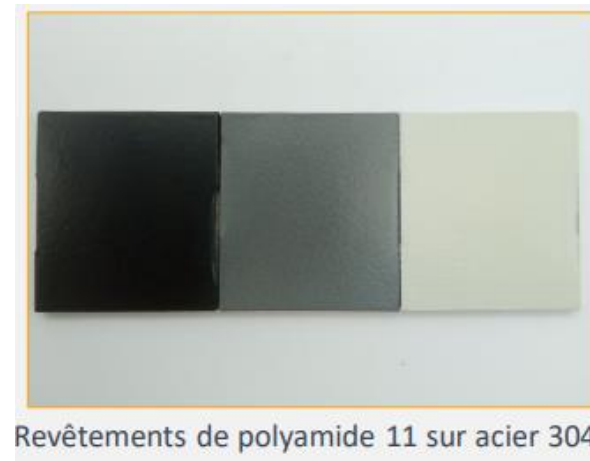
Polymères alternatifs étudiés

Polymère	Temp. d'usage (°C)	Résistance chimique	Friction (μ)	Angle contact eau
PA11	150	Bonne	0.10–0.30	70°–85°
PEEK	260	Excellente	0.20–0.30	80°–95°
PI	300	Très bonne	0.29–0.45	70°–80°
UHMWPE	100	Bonne	0.08–0.15	90°–100°
PAI, PES, PEI, PPS...				

Développements en projection thermique : PA11, PI, PAI, PEEK

•Paramètres liés au procédé :

- Débit de gaz (combustible et gaz porteur), angle et distance d'injection, nombre de passes...



Revêtements de polyamide 11 sur acier 304L

•**Résistance à l'usure** : perte de masse Taber $\approx$ 2,77 mg/1000 cycles

•**Dureté** : 66 Shore D

•**Rugosité faible** : $R_a = 1\mu\text{m}$, $R_t = 9\mu\text{m}$, $R_z = 5\mu\text{m}$

•**Angle de contact à l'eau** : 76°

•**Coefficient de friction** : $\mu \approx 0,33$

•**Résistance diélectrique** : $> 5\text{ kV}$ pour $200\mu\text{m}$

•**Résistance chimique** : [validée acides/bases faibles](#)

•**Corrosion (brouillard salin)** : [> 500 h sans défaut](#)

3

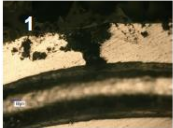
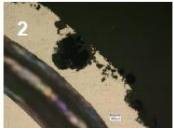
Moyens de caractérisation d'une couche

Méthode d'essai accéléré de corrosion appliqué aux échangeurs de véhicule électrique

Par Christian Casenave – Valeo

Contexte et objectif

Les systèmes pour refroidir la cabine d'un véhicule présente différents *designs* et différentes étapes d'élaboration. La norme pour évaluer la tenue à la corrosion de ce genre d'équipement se nomme SWAAT (ASTM G85-A3) et met en jeu une solution acide et saline. Le temps de formation des mécanismes de corrosion (intergranulaire, caverneuse...) est un indicateur de contrôle. Le résultat de l'essai dépend du matériau et du revêtement. Le problème c'est que cet essai est chronophage (environ 700 heures) et incompatible avec les nécessités industrielles. L'objectif de l'étude consiste à élaborer une méthode rapide qui donne des résultats similaires à l'essai SWAAT.

Rep	Samples	Lifetime in test (hours)	Tube stitching	Leakage area
1	AA 1197 - Al + Cu Si + ZnFlux	12		
2	AA 1197 - Al + Cu AlSi + Zas + flux	20		
3	AA 3102 - Al + Mn Si + ZnFlux	25		
4	AA 3102 - Al + Mn AlSi + Zas + flux	47		

Tenues BS et aspects à l'issue des essais des différents échantillons

Résultats :

- Les auteurs ont mis en place des essais électrochimiques et ils ont optimisés les différents paramètres (la densité de courant est fixe, l'électrolyte est composé d'eau salée, arrêt de l'essai à rupture).
- A l'issu des essais de corrosion par essais électrochimiques, les mécanismes de corrosion engagés sont similaires à ceux observés lors des essais SWAAT (corrosion intergranulaire et corrosion caverneuse)
- Les tendances (classement des pièces) sont similaires en employant l'essai SWAAT et le nouvel essai
- Gain de temps significatif (rapport d'environ 15) pour une méthode qui semble apporter des résultats similaires

Caractérisation micromécanique des matériaux à gradient de propriétés, application à la décarburation, à la couche d'oxyde et à l'écrouissage

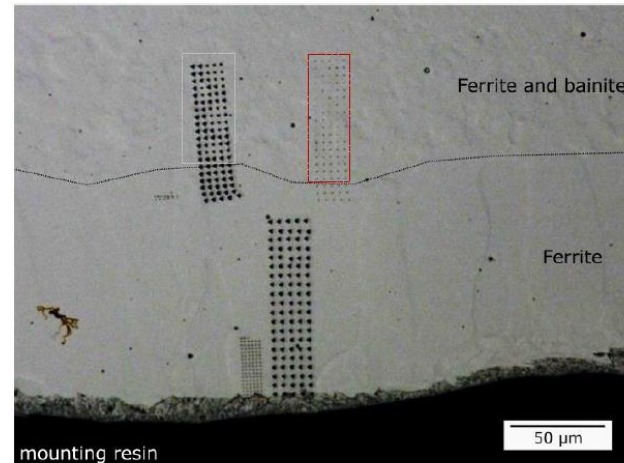
Par Romaric Collet – CETIM

Contexte et objectif

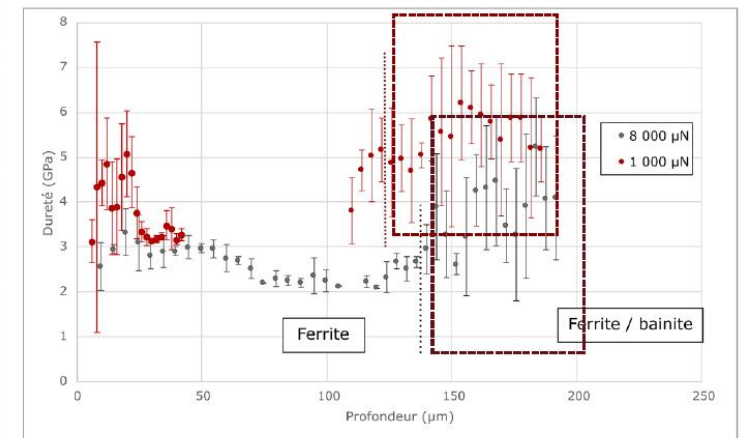
La caractérisation fine des surfaces permet de mieux comprendre les comportements mécaniques, chimiques (...) d'une pièce fonctionnelle. Par sa polyvalence et sa précision, la nano-indentation est un outil de caractérisation mécanique incontournable pour les problématiques de surface. Un acier présentant plusieurs problématiques en surface (couche d'oxyde, écrouissage, décarburation...) a été caractérisé par nano-indentation.

Résultats :

- La nano indentation permet :
 - de caractériser des couches très fines en surface
 - De mettre en exergue une zone écrouie localement et d'évaluer les propriétés mécaniques de la zone écrouie
 - De caractériser la ferrite apparue à l'issue d'une décarburation et les gradients de dureté au sein de la ferrite (modification liée à l'écrouissage et la présence de C en solution solide)
 - D'évaluer la réponse mécanique de différentes phases
- Les auteurs se sont concentrés sur l'évaluation de la dureté mais la nano indentation permet aussi de façon relativement standard l'évaluation de la réponse élastique et le fluage (enfoncement de la pointe à effort constant).
- Il est aussi possible de modifier la pointe (et ainsi les sollicitations mécanique) et les fonctions de charge (...) permettant d'extraire des propriétés diverses (adhérence, limite d'élasticité, ténacité...).



Cross section showing indents marks performed with 1 mN and 8 mN max. load



Hardness profile for tests performed at 1 mN and 8 mN

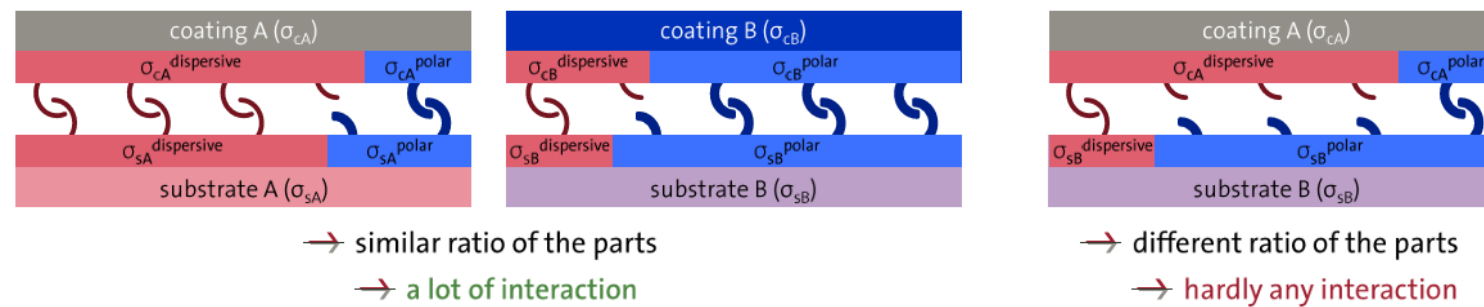
Filiation de dureté issue de cartographie d'essais de nano-indentation réalisés à différents efforts max (1 mN et 8 mN) au niveau de la zone décarburee

Analyse de l'énergie de surface pour des revêtements de haute qualité

Par Véronique Schloupt – Data physics

Contexte

Data physics est une société qui fabrique et fournit des équipements de caractérisation des surfaces.



Observation de l'angle de goutte.

Schéma représentant la capacité d'un substrat à présenter des interactions fortes avec le revêtement ou des interactions faibles au moyen de l'évaluation de l'énergie de surface.

- Pour les procédés de revêtement par voie humide, il faut que la solution interagisse avec la surface. L'évaluation de l'énergie de surface et de la tension de surface permet d'évaluer la compatibilité d'une surface et du traitement
- L'angle de surface est un moyen d'évaluer l'altération des propriétés d'une surface
- L'étude de l'énergie de surface permet d'identifier si les étapes de pré traitement sont adaptées.

4

Traitements et fonctionnalisation d'une surface

Impact de la modification de la surface d'un acier inoxydable sur la résistance à la corrosion

Jorge Arturo SOTO PUENTE - CETIM

■ Méthodes de décapage des soudures sur les aciers inoxydables

■ Trois grandes familles :

Chimiques : HNO_3 + HF, bains sans acide nitrique, électrochimie.

Mécaniques : brossage, microbillage, abrasifs.

Physiques : laser pulsé (Nd:YAG 1064 nm).

■ Comparaison des méthodes

Méthode	Aspect visuel	Rugosité	Résistance à la corrosion
Chimique	+++	++	+++
Mécanique	++ à +++	variable	$\leq$ métal de base
Physique (laser)	+++	++	$>$ métal de base

- Le laser offre une bonne efficacité sans produits chimiques, mais dépend fortement de l'état initial de la surface.

Impact de la modification de la surface d'un acier inoxydable sur la résistance à la corrosion

■ Texturation de surface par laser femtoseconde

- Objectif : améliorer la tenue à la corrosion en modifiant l'extrême surface.
- Paramètres étudiés : fréquence, puissance, nombre de passages, overlap, durée.
- Techniques : LIPS, mode burst, analyse XPS, EBSD, DRX.
- Résultats clés :

Les configurations D''' et F''' offrent les meilleures performances en corrosion.

Le ratio Fe/Cr et l'état d'oxydation de la couche passive sont déterminants.

La rugosité seule ne suffit pas à prédire la résistance à la corrosion.

■ Perspectives

- Étendre les études à des aciers plus riches en Cr comme le 904L.
- Applications envisagées : nettoyage, collage, hydrophobicité, optique, biomimétisme

Amélioration des technologies de revêtement par couche mince pour les applications de stockage d'énergie : quelques études de cas

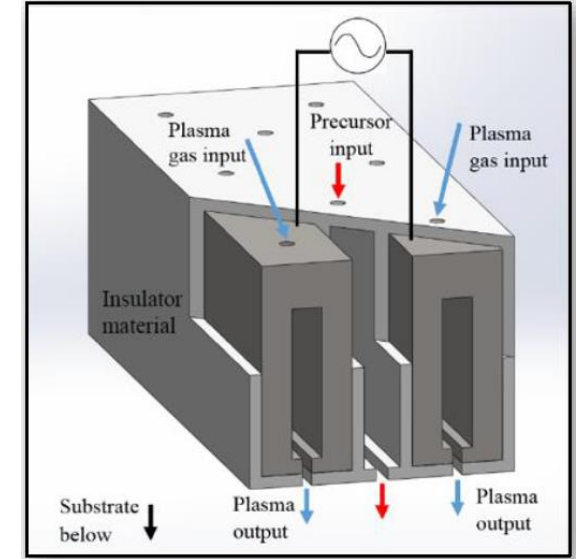
Par Jeroen Schotsaerta et al. – AGC Plasma Technology Solutions

Contexte et objectifs

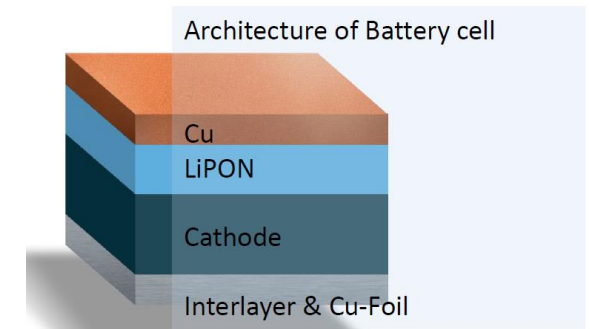
- Expertise d'AGC dans les revêtements sous vide (PVD, PECVD, sputtering) appliqué traditionnellement au verre
- Utilisation de cette expertise pour développer des dépôts innovants pour les batteries

Résultats/Intérêts

- Création d'anodes en silicium par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) :
 - Conversion du silane en silicium amorphe directement sur substrat
 - Intégré dans une ligne roll-to-roll
 - Partenariat industriel avec GDI et Schlenk pour augmenter la capacité de production
- Dépôt de lithium métallique par évaporation thermique :
 - Procédé propre et efficace
 - Alternative au laminage des feuilles de lithium
- Dépôt de LiPON (électrolyte solide) et de matériaux cathodiques par magnetron sputtering :
 - Solution AGC : sputtering DC avec cible dopée pour une production industrielle (habituellement sputtering RF, difficulté de dépôt car le matériau est isolant)
- Dépôt de platine pour électrolyseurs PEM par magnetron sputtering :
 - Réduction du coût de production (par rapport aux dépôts par voie humide) : film de platine ultra-fin et uniforme
 - Bonne adhésion garantie par un nettoyage plasma au préalable et une sous-couche
 - Procédé écologique et modulaire, sans produits chimiques dangereux, alternative au dépôt électrochimique



Création d'anode en silicium par PECVD



Dépôt de LiPON et d'un matériau cathodique par magnetron sputtering : application à une cellule de batterie

Comportement de démouillage des couches d'or électrodéposées sur les revêtements CVD/PVD TiN

Par Lukas Grohmann, Anna-Lena Heß, Prof. Dr. Andreas Bund – Ilmenau University of Technology

Contexte et objectifs

- Le dépôt de nanoparticules d'or est utilisé pour fonctionnaliser des surfaces pour des capteurs, surfaces optiques, catalyses etc.
- Ces travaux explorent le potentiel de l'électrodéposition comme alternative aux procédés PVD/CVD

Démarche

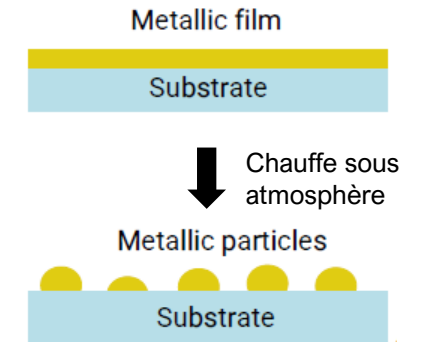
- Dépôt des revêtements (Ni, TiN, puis Au) par dépôt électrolytique ou vapeur sur un acier
- Démouillage (dewetting) effectuée à 600/800°C pendant 10 min. sous atmosphère à l'argon ou à l'azote, étude paramétrique :
 - Densité de courant : 2 ou 4 A/dm²
 - Quantité de charge : 600 ou 1200 As
 - Atmosphère : N₂ ou Ar
 - Température de traitement : 600 °C ou 800 °C

Résultats

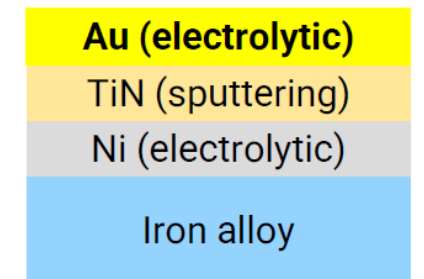
- À 600°C, le démouillage se produit seulement pour la couche d'or <25 µm et sous une atmosphère d'argon
- A 800°C, le démouillage se produit en formant des particules ou des agrégats (étape avant la formation de particules)

Intérêts/Limites

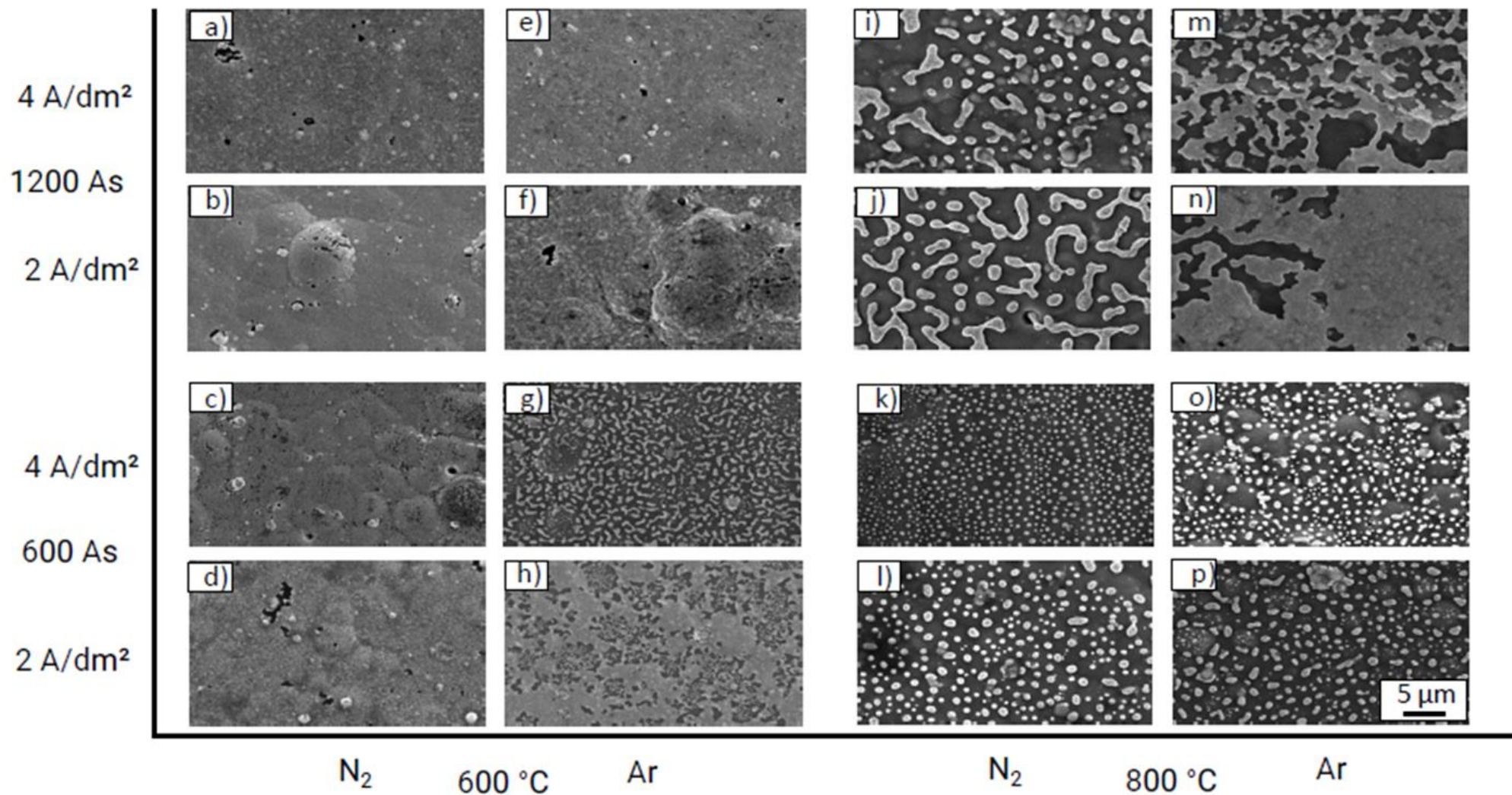
- Nécessité d'étendre cette étude en faisant varier d'autres paramètres : substrat, la topographie de surface, épaisseur du film, atmosphère etc.



Principe de l'opération de dewetting



Détails des couches déposées sur le substrat avec l'opération de dewetting



Morphologie du dépôt (images MEB) après opération de dewetting en fonction du courant, de la température et de l'atmosphère

Comportement à la corrosion de l'acier à haute résistance revêtu de nickel dans différents milieux alcalins

Par Pierre Schutz-Lamartine – Naval Group

Contexte

Les systèmes de refroidissement en acier à haute performance sont protégés de la corrosion au moyen d'un revêtement en Ni-P ou bien en traitant l'eau de refroidissement avec du NaOH (formation d'une couche passive).

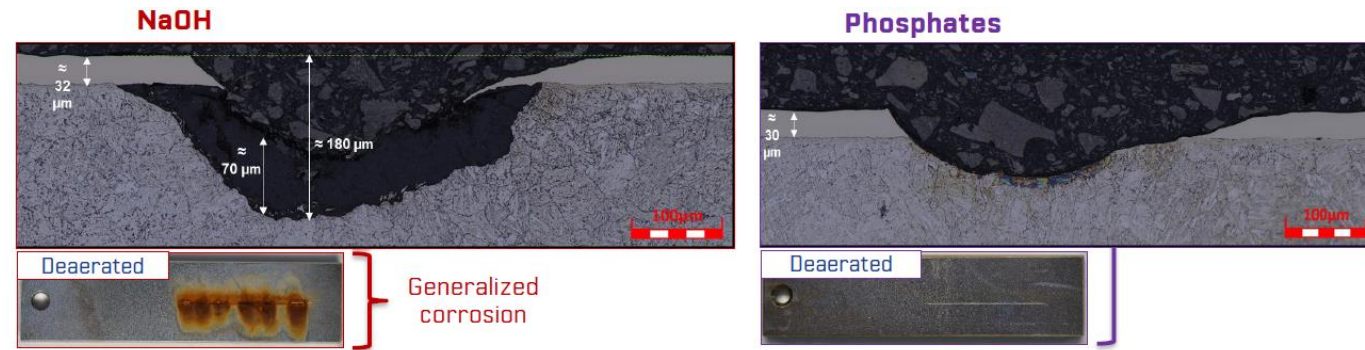
Objectifs : comprendre les mécanismes de corrosion observés et identifier un traitement alternatif de l'eau de refroidissement.

Méthode expérimentale :

- Acier revêtu d'un dépôt de Ni chimique à haut phosphore ($>10\%_{\text{mass.}}$) d'une épaisseur comprise entre 30-35 μm
- 50 % des échantillon ont été rayé. La rayure présente une profondeur d'environ 70 μm .
- Echantillons disposés dans une solution de NaOH ou de phosphates avec 3 différentes expositions à l'oxygène (milieu aéré, confiné, désaéré)
- Suivi du Ph, suivi de la perte de masse et essais électrochimiques...

Conclusions

- Eau traitée NaOH :
 - Le Ph est instable
 - Sans rayure, les cinétiques de corrosion sont lentes
 - Avec une rayure, oxydation généralisée en milieu désaéré et corrosion localisé en milieu aéré
- Eau traitée avec des phosphates :
 - Le Ph est stable sauf pour le milieu aéré
 - Sans rayure, pas de corrosion (ou négligeable)
 - Avec rayures, pas de corrosion (formation d'une couche passive de FePO_4)



Observations micrographiques de la zone rayée et observation de la surface des échantillons revêtus, rayés et immergés dans une solution de NaOH et de phosphates dans un milieu désaéré.

Revêtements Sol-Gel pour utilisation en conditions extrêmes dans le secteur aéronautique

Par Mireille Poelman – Materia Nova

Contexte

L'optimisation des ailes des avions contribue aux objectifs de réduction des émissions de CO₂ (aérodynamisme, diminution de la masse et systèmes de protection durables)

Objectifs : identifier un revêtement durable sur les ailes d'avion qui empêche la corrosion, les salissures par les insectes, l'érosion et la formation de givre.

Procédé : Formulation d'un dépôt sol-gel avec des composées organiques et inorganiques pour satisfaire les exigences techniques (faible épaisseur, bonnes propriétés mécaniques, thermique et chimique, flexibilité de mise en œuvre...). L'aluminium est anodisé puis le colmatage est réalisé avec un sol-gel.

Propriétés testées et méthodes expérimentales

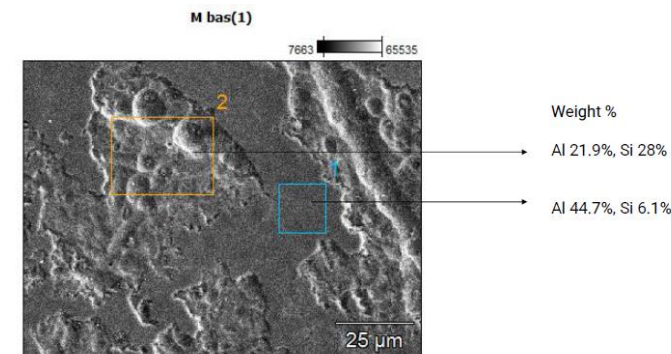
- Évaluation de l'adhérence (*cross cut* et *scratch test*) avant et après immersion dans l'eau. L'exposition à l'eau est un test critique pour les dépôts sol-gel.
- Evaluation de la résistance à l'érosion (projection de sable ASTM D968 et d'eau ISO19392-3)
- Évaluation des propriétés anti-givrante et du caractère anti-salissure.
- Essais dans des conditions réelles (dépôt appliqué sur des ailes d'un avion et observations régulières)

Conclusions

- Le sol gel est une solution polyvalente et adaptable (formulations variés)
- Les procédés industriels actuels sont compatibles
- Les propriétés mécaniques sont bonnes mais doivent être optimisées ainsi que le comportement aux UV et à l'érosion



Photographie des ailes (et évaluation de la mouillabilité) après dépôt, après 1024 heures de vols et après 2185 heures de vol.



Observation micrographique de la surface de l'aile revêtue sol-gel après 2185 heures de vol.

Développement de revêtement PVD pour limiter la diffusion du carbone lors du frittage par SPS d'une poudre de fer

Par Romain Charvet – Université de Bourgogne

Contexte et objectif

Les procédés de frittage mettent en jeu des températures et des pressions élevées nécessitant l'emploi d'outillage en graphite. Lors du frittage de matériaux métalliques, du carbone diffuse dans le matériau métallique altérant potentiellement les propriétés matériaux. L'objectif de ces travaux consiste à identifier un revêtement adapté au procédé et empêchant la diffusion du carbone.

Démarche :

- Calcul thermodynamique par Thermo Calc pour identifier des matériaux adaptés (i.e. barrière au carbone et qui ne forme pas d'intermétallique avec le fer).
- Dépôts de Ti par PVD sur le papier en graphite (Papyex) et mise en forme des poudres
- Etude de la diffusion du carbone au niveau de l'interface et observation de la couche PVD et sa dégradation après essais.
- D'autres éléments peuvent être candidats, mais il convient de s'assurer que la couche est fonctionnelle sans occasionner de difficultés techniques.

Conclusions

- Le dépôt de Ti semble être adapté.
- Plus la couche est épaisse plus la fonction barrière est assurée.
- A terme, l'objectif consiste à revêtir les outillages en carbone qui seront employés pour la fabrication des pièces.

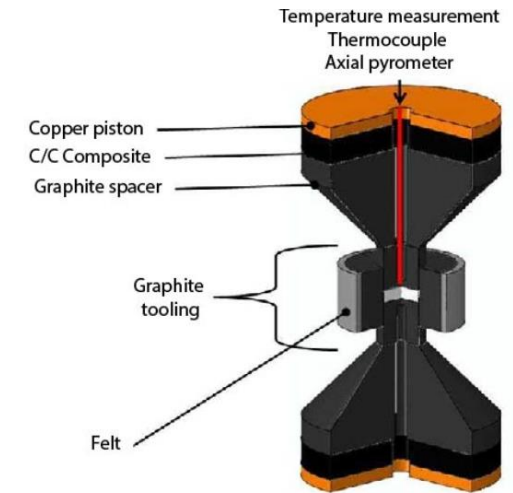
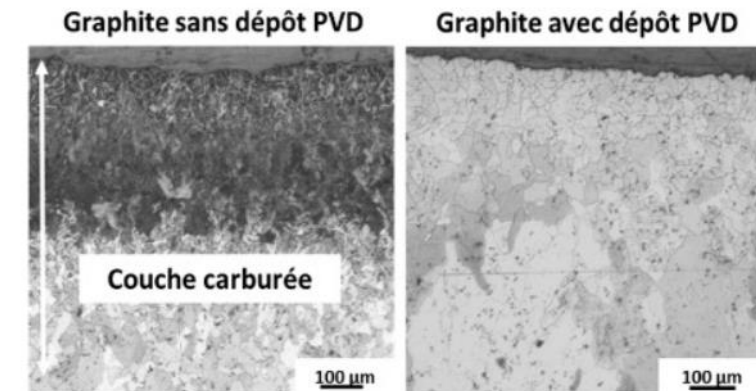


Schéma représentant le procédé de frittage SPS*

<https://sinter-mat.com/societe/procede-frittage-flash-sps/>



M.R. Ardigo-Besnard et al. / Solids 2(4) (2021) 395-406

Coupes micrographiques montrant l'effet du dépôt PVD sur la diffusion du carbone lors du procédé

Diagnostic de la pulvérisation plasma : relation entre le comportement en vol des particules et des propriétés de revêtement.

Par Olivier Gallardo – IRCER & IRT-M2P

Contexte et objectif

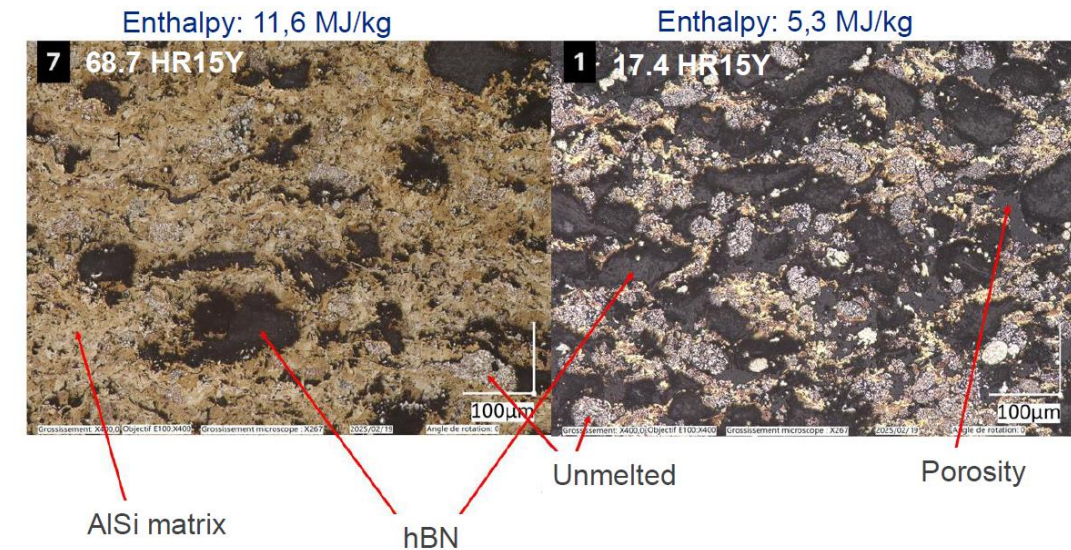
- Comprendre (et optimiser) les mécanismes impliqués lors de la pulvérisation plasma
- Développer une solution alternative à l'abrasable AlSi-hBN (Metco 320NS) (le matériau abrasable permet la conservation de la pièce Voisine. Ce matériau présente plusieurs problématiques (formation de fissures, delamination, transfert...))

Observations :

- Le dépôt de AlSi-hBN est composé de AlSi, de hBN et de pores (l'augmentation de la porosité entraîne la diminution de la dureté).
- Les paramètres du procédés influent sur le comportement en vol des particules :
- L'augmentation du débit du gaz vecteur :
 - Augmente la déviation du jet de particule
 - Augmentation de la vitesse des particules
 - Pénétration plus profonde des particules
- La distance entre le pistolet et le substrat va aussi influencer sur la dispersion des particules, leur vitesse et la température des particules.
- La vitesse des particules et le temps de vol va aussi influencer sur la précision spatiale de l'application du dépôt (étude du cordon)

Conclusions

- Les propriétés des dépôts par pulvérisation plasma vont dépendre de :
 - La vitesse et la température des particules
 - Le temps de vol des particules
 - La distribution granulométrique des particules
 - La trajectoire des particules



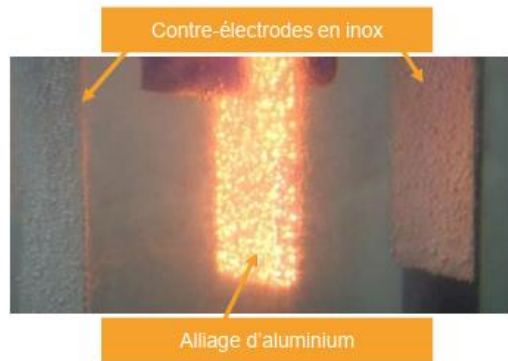
Effet des paramètres de pulvérisation plasma sur la distribution de hBN, de porosité (...) et de la dureté

Procédé d'oxydation micro-arc : une alternative possible pour améliorer les propriétés tribologiques et la résistance à la corrosion des alliages légers

Par Jason Rolet – IRT M2P

Contexte et objectif

L'OMA (oxydation micro-arc) est un procédé chimique et électrochimique par plasma qui combine l'oxydation électrochimique avec un traitement par étincelles haute tension dans un électrolyte généralement alcalin, ce qui entraîne la formation d'un film d'oxyde dur (jusqu'à 2000 HV) et protecteur à la surface du métal.



Photographie présentant le procédé OMA, les contre électrodes et la plaque d'aluminium avec des étincelles.

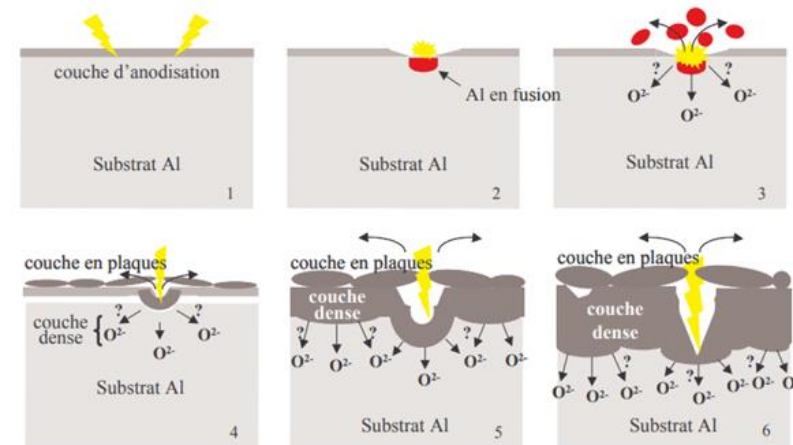


Schéma décrivant les étapes du procédé OMA.

Résultats :

- Les revêtement OAD et OMA présentent des comportements tribologiques différents et l'usure résultante est aussi différente.
- La composition de l'électrolyte exerce une influence directe sur la morphologie des revêtements OMA
- il est possible de coupler le procédé OMA avec un traitement préalable de cold spray ce qui offre des perspectives intéressantes pour améliorer encore les propriétés des revêtements.

Revêtement galvanique composite avec nanoparticules biosourcées

Par Pierre-Antoine Gay - Haute École Arc Ingénierie

Contexte et objectifs

L'argent, bien que conducteur, **présente des limites en résistance à l'usure**. Les revêtements à base de métaux précieux sont **coûteux et instables** en approvisionnement. La demande croissante en connecteurs (automobile, IoT, robotique, 5G) impose des solutions **durables, performantes et économiques**.

Objectif : Développer des **revêtements composites à base d'argent** incorporant des **nanoparticules (NP) biosourcées** (TiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2) pour améliorer les propriétés tribologiques (usure, frottement) des connecteurs électriques, tout en réduisant l'impact environnemental.



Connecteur argenté



Innovation : Nanoparticules biosourcées

- **Synthèse verte** en milieu aqueux, sans réactifs toxiques, à partir d'extraits végétaux (café, menthol).
- **NP obtenues** : TiO_2 (anatase), Al_2O_3 , ZrO_2
- **Caractérisation complète** : BET, MEB/TEM, DLS, DRX, ATG, FTIR
- **Taille des NP** : 20 à 100 nm



Procédé de dépôt

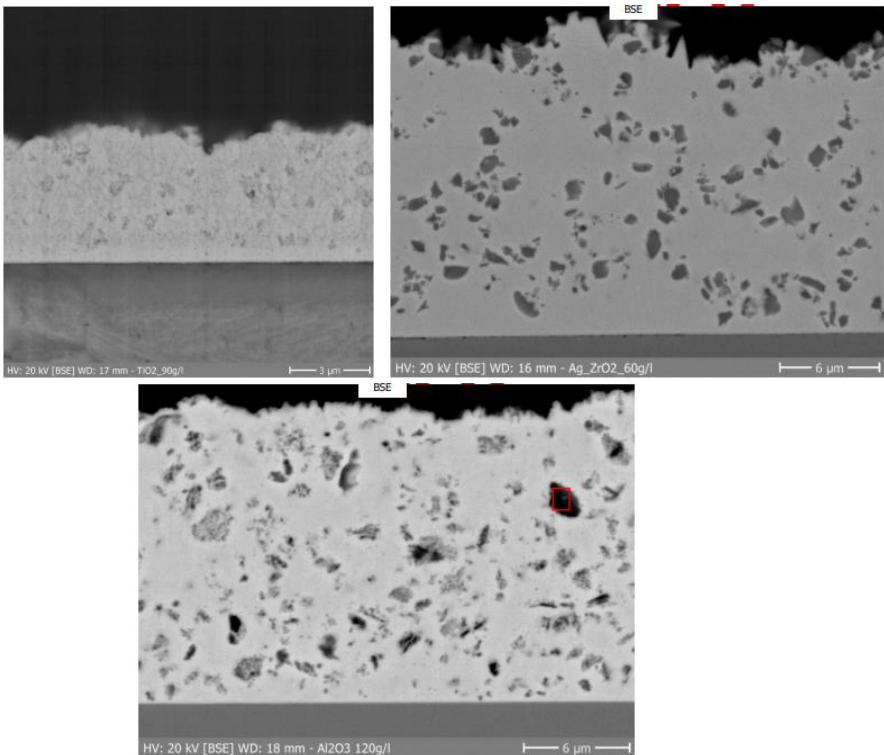
- **Électrodéposition** de revêtements composites Ag-NP sur substrat laiton
- Étude électrochimique (courbes intensité/potentiel) pour chaque type de NP
- Paramètres contrôlés : concentration en NP, agitation, température, temps de dépôt

Revêtement galvanique composite avec nanoparticules biosourcées

Par Pierre-Antoine Gay - Haute École Arc Ingénierie

Caractérisation des revêtements

- **Épaisseur** : jusqu'à 14 µm selon la concentration en NP
- **Morphologie** : bonne dispersion des NP dans la matrice argentée (MEB/EDS)
- **Tribologie** :
 - Coefficient de frottement réduit (jusqu'à 0.15 vs 0.45 pour Ag pur)
 - Usure variable selon la nature des NP



Echantillon	µ final	Profondeur max.	Largeur	USURE Amélioration
Ag pur	0.45	5.67	0.41	
Ag-Al ₂ O ₃	0.15	11.2	0.9	KO
Ag-TiO ₂ 30g/l	0.38	3.32	0.3	41%
Ag-ZrO ₂ 30g/l	0.49	2.03	0.3	64%
Ag-ZrO ₂ 60g/l	0.48	4.27	0.13	25%
Ag-ZrO ₂ 90g/l	0.46	3.78	0.34	33%

Conclusions

- **Faisabilité démontrée** de revêtements composites Ag-NP biosourcées
- **Amélioration tribologique** jusqu'à 64 % selon les NP
- **Perspectives** :
 - Optimisation de la dispersion des NP
 - Réduction des épaisseurs de revêtement
 - Applications dans les **connecteurs haute performance** et les **microtechniques**

5

Simulation numérique

Dépôt électrolytique : modéliser les flux d'hydrogène pour comprendre et optimiser les procédés à l'échelle microscopique et macroscopique

Par B. Fedi, A. Boucher, J. Schoenleber – Hivelix

Contexte et objectifs

- Développement de nouveaux électrolytes engendré par la réglementation REACH
- Optimiser ces nouveaux procédés grâce à la simulation numérique multiphysique : maîtriser la répartition de l'épaisseur, la composition du dépôt et éviter les défauts liés à l'hydrogène

Démarche

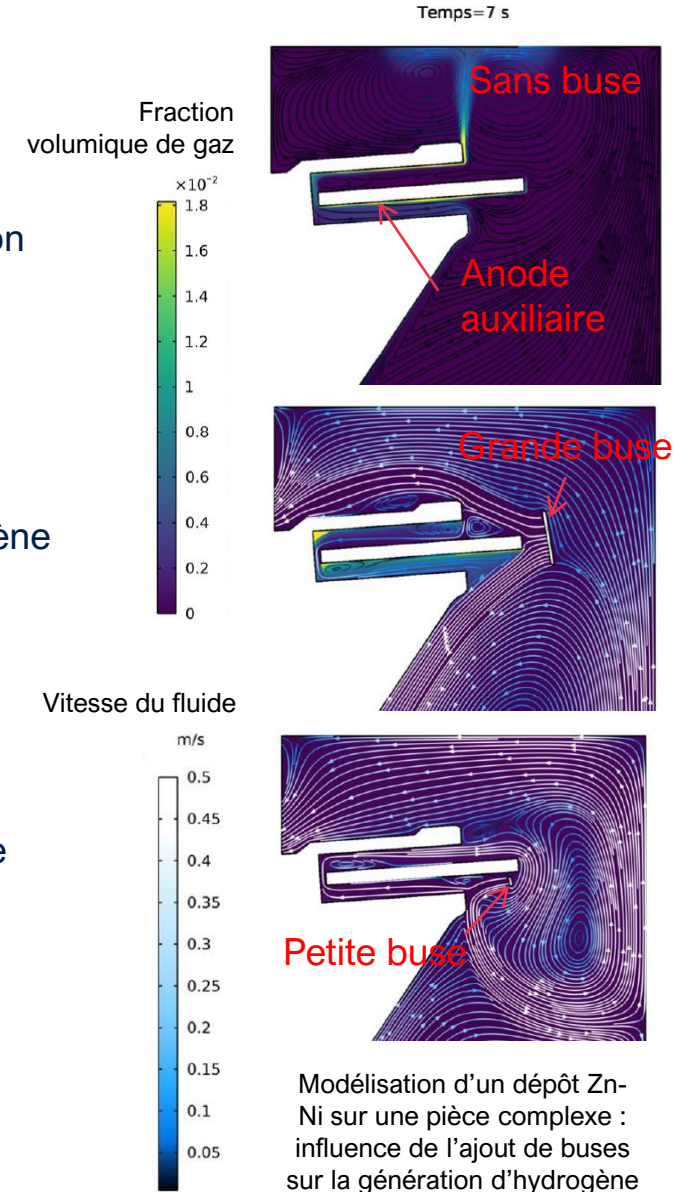
- Modélisation des différentes physiques à l'échelle de la pièce (avec le logiciel Comsol) : Distribution du courant, écoulement du fluide (modèle de turbulence RANS-SST), électrochimie
- Calibration avec de l'expérimental : création d'une cellule pour évaluer la production de bulles d'hydrogène
- Modélisation de la nucléation du dépôt à l'échelle de la microstructure (avec un code Python)

Résultats

- Modélisation à l'échelle de la pièce : identification de zones où la vitesse du fluide est faible pouvant induire une épaisseur de dépôt faible et la création de bulles d'hydrogène
- Bonne corrélation entre l'expérimental et le numérique pour prédire la production de bulles d'hydrogène

Intérêts/Limites

- Réduction du temps et du coût par prototypage virtuel : ajout d'anodes auxiliaires, de masques et d'agitation pour optimiser et réduire l'hétérogénéité de l'épaisseur du dépôt et les non-qualités dues à l'accumulation des bulles d'hydrogène
- Le modèle à l'échelle de la microstructure permettra de prédire la morphologie du dépôt, mais, est en cours de développement (transports des ions, transfert de charge etc. à implémenter)



Simulation des traitements thermo-chimiques pour applications roulements

Par S. Thibault – NTN-Europe

Contexte et objectifs

- Les traitements thermo-chimiques apportent un durcissement et des contraintes résiduelles compressives en surface engendrant une meilleure tenue en fatigue
- Prédiction du profil de dureté et des contraintes résiduelles par simulation grâce à la connaissance des profils carbone et/ou azote

Démarche

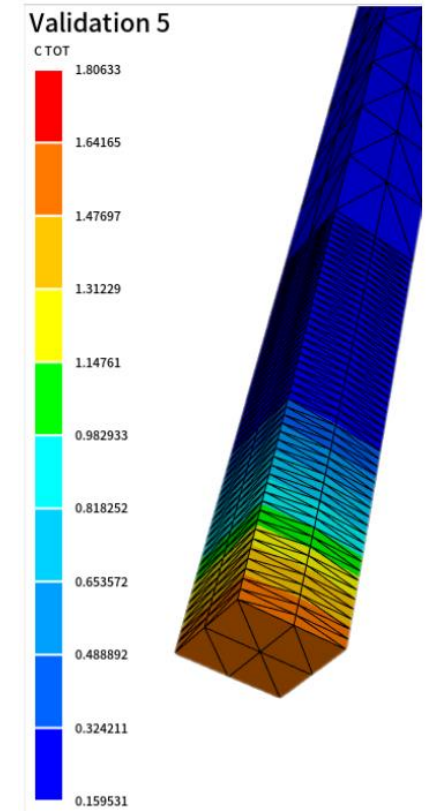
- Simulation de la précipitation et de la dissolution des carbures et nitrures par des calculs thermodynamiques en considérant l'équilibre atteint à chaque pas de temps
- Conditions aux limites (interface gaz/métal) : potentiels carbone ou azote déterminés expérimentalement
- Simulation éléments finis (EF) avec le logiciel Forge : maillage pseudo-1D, couplage avec JMatPro pour obtenir les données matériaux

Résultats

- Prédiction fiable du profil C/N sur 4 configurations différentes (plus de difficultés pour modéliser la carbonitrurations basse pression du 100Cr6)

Intérêts/Limites

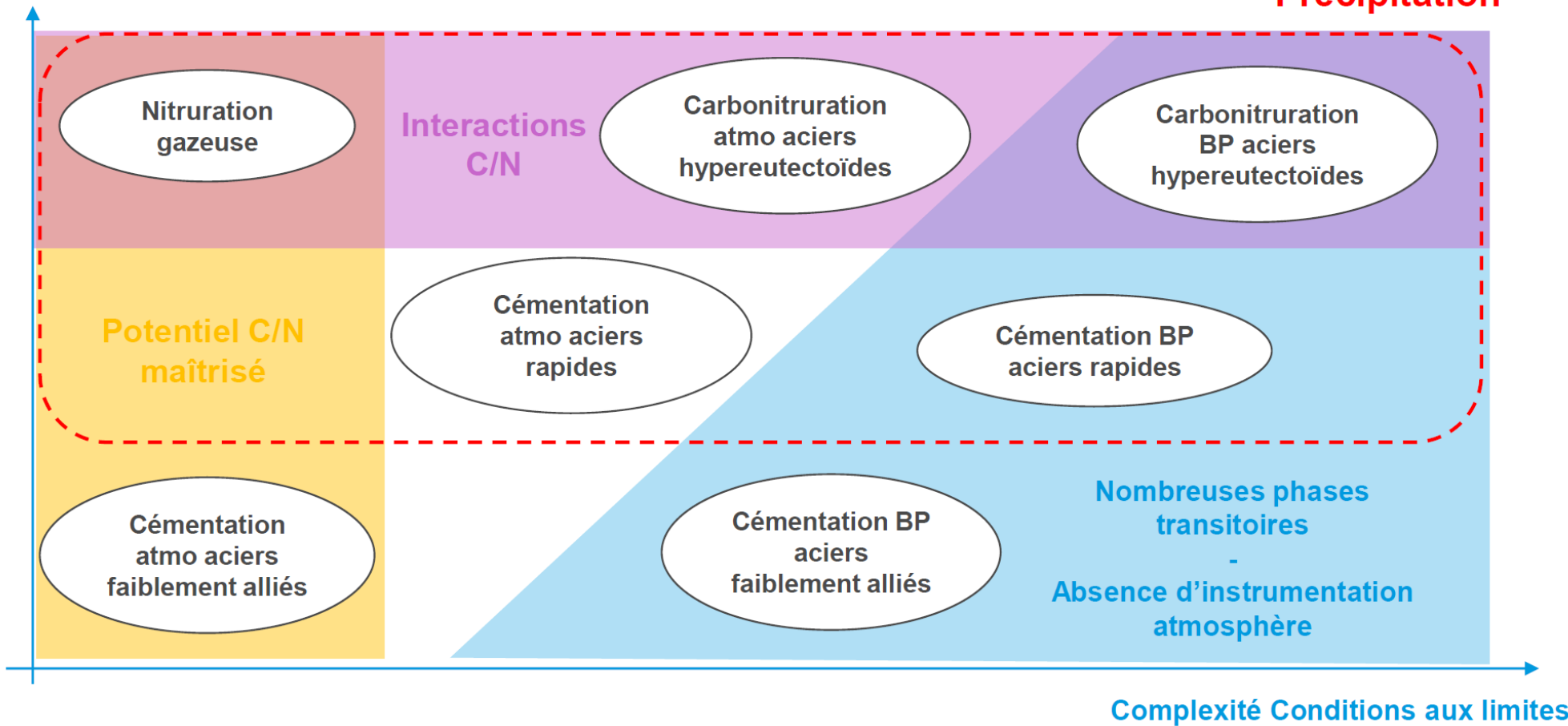
- Optimisation des traitements thermo-chimiques et création de bases de données numériques utilisées pour faire des 'calculettes' (calculs instantanés et simplifiés contre 1min à 1h de temps de simulation)
- Recalage expérimental nécessaire des modèles



Calculs EF pseudo-1D faits avec Forge

Complexité
Métallurgie

Précipitation



Complexité de la prédiction des profils carbone et/ou azote en fonction du traitement
thermochimique et du type d'acier modélisé

Optimisation d'un processus de traitement thermique : couplage de Qobeo® et Forge®

Par S. El Aouad, et al. – SCConsultants – Transvalor S.A. – CETIM

Contexte et objectifs

- Prédiction des hétérogénéités métallurgiques et déformations/contraintes en fonction de l'écoulement du fluide lors de la trempe des pièces
- Réalisation d'une modélisation multiphysique afin de démontrer la faisabilité du couplage entre deux logiciels EF : Qobeo (fluide et thermique) et Forge (thermique, métallurgique et mécanique)

Démarche

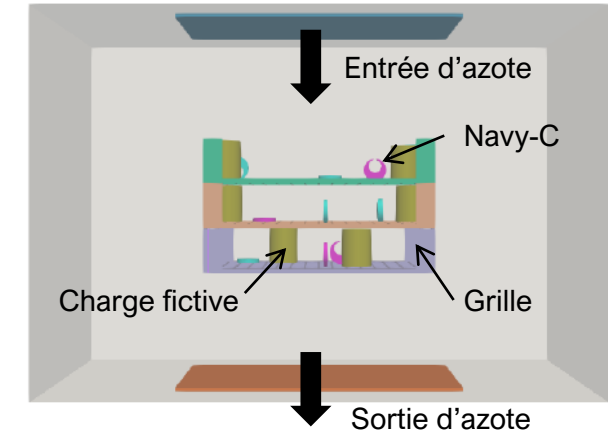
- Sous Qobeo, modélisation d'un four de trempe gaz chargé de Navy-C sur 3 grilles superposées suivant différentes orientations, à proximité ou non d'une charge fictive et avec ou non un obstacle au-dessus
- Utilisation d'un modèle de turbulence Smagorinsky (LES), prise en compte du rayonnement surface à surface (S2S) et de la conduction entre les éprouvettes et les grilles

Résultats (après 19 jours de calcul sur 16 cœurs)

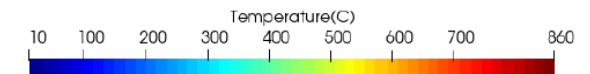
- Le côté de l'éprouvette faisant face à la charge fictive refroidit plus lentement, le contact avec la grille peut induire un flux de chaleur négatif (réchauffement de la pièce)
- Les pièces verticales refroidissent plus lentement que les horizontales, refroidissement plus rapide au niveau de l'ouverture de la Navy-C peu importe son orientation

Intérêts/Limites

- Hétérogénéités de refroidissement identifiées en fonction des différentes configurations testées
- Mais les résultats obtenus doivent encore être exploités sous Forge pour confirmer que les hétérogénéités de refroidissement conduisent à des hétérogénéités en termes de propriétés matériaux
- Faisabilité du couplage entre Qobeo et Forge a été démontré (sous Forge, une simulation réalisée sur une Navy-C en 10min. sur 8 cœurs) : sortie de la fonctionnalité à l'horizon fin 2025/début 2026



Modèle CAO du four de trempe gaz modélisé



Différence de température à 60sec. entre les trois éprouvettes Navy-C de la 2^{ème} grille

Simulation numérique au service de l'industrie

Par M. Cadet, F. Pacquereau, A. Lemarchand - FRAMATOME

Contexte et objectifs

- La trempe est une étape clé de la fabrication des pièces nucléaires mais est peu instrumentée : mesures directes difficiles (pièces massives, milieu trouble), réalisation uniquement de mesures indirectes (température du bain, agitation etc.)
- Simulation numérique utilisée pour maîtriser le processus : assurer un refroidissement rapide et homogène

Démarche

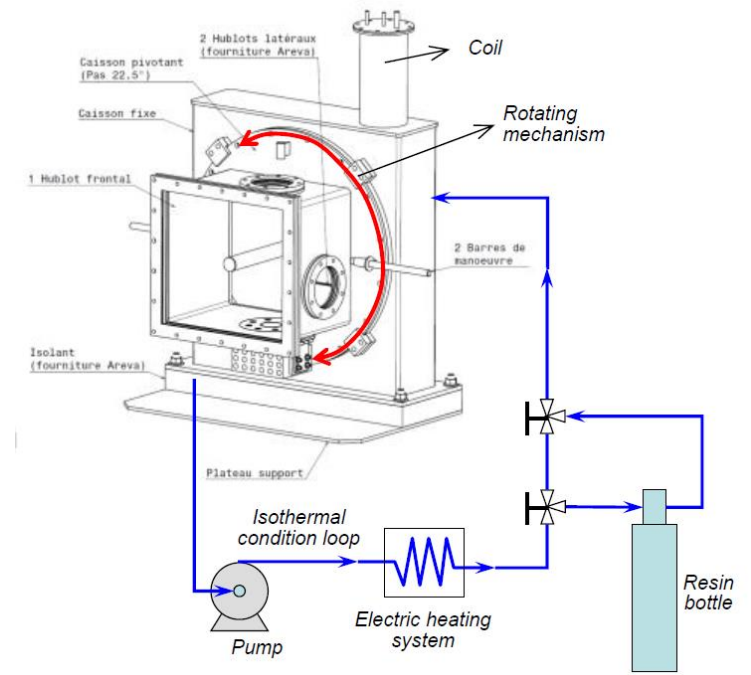
- Intégration des phénomènes physiques de façon progressive dans la modélisation éléments finis, dans l'ordre : thermiques, métallurgiques, chimiques, mécaniques
- Modélisation de l'écoulement du fluide et de ses changements de phases (logiciel StarCCM+)
- Calibration et validation du modèle sur une maquette de laboratoire (influence de l'inclinaison de la surface, vitesse du fluide, rugosité etc.) et sur une pièce sacrificielle à l'échelle 1 instrumentée

Résultats

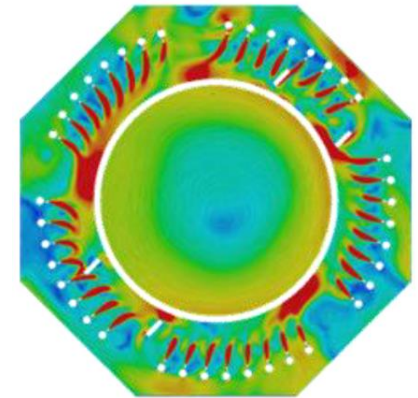
- Très bonne corrélation avec les résultats sur pièce sacrificielle durant le chauffage, le transfert et la trempe (temps de modélisation inférieur à 1 jour)

Intérêts/Limites

- Après calibration (long développement), outil performant pour modéliser la trempe
- En perspectives : création de jumeaux numériques de leurs installations, modélisation de la métallurgie et prédiction des déformations



Maquette de laboratoire utilisée pour calibrer le modèle d'ébullition



Simulation de l'écoulement du fluide dans un bac de trempe (vue de dessus)

Prévision numérique des traitements thermiques de trempe et de revenu par induction des composants en acier 42CrMo4 destinés aux applications éoliennes

Par A. Goñi, et al. – IKERLAN, Mondragon Unibertsitatea (Spain)

Contexte et objectifs

- Le revenu rapide est une alternative prometteuse pour gagner en efficacité énergétique et en productivité pour traiter les pièces durcies par trempe à induction (application à des pièces d'éoliennes en AISI 4140)
- Afin de déterminer le courant et la fréquence optimale de l'inducteur lors du revenu, un modèle éléments finis est développé

Démarche

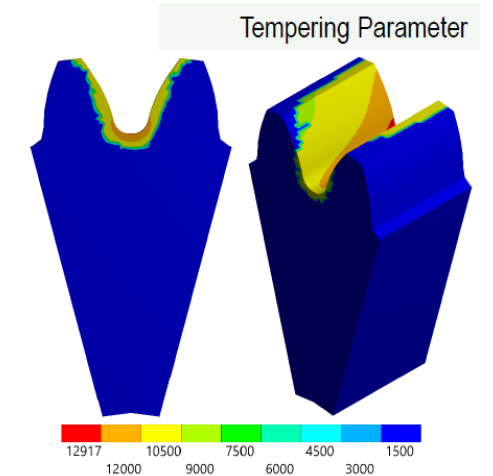
- Simulation multiphysique (avec le logiciel Ansys) : électromagnétisme et thermique, puis métallurgie et propriétés mécaniques en post-processing (couplage unidirectionnel)

Résultats

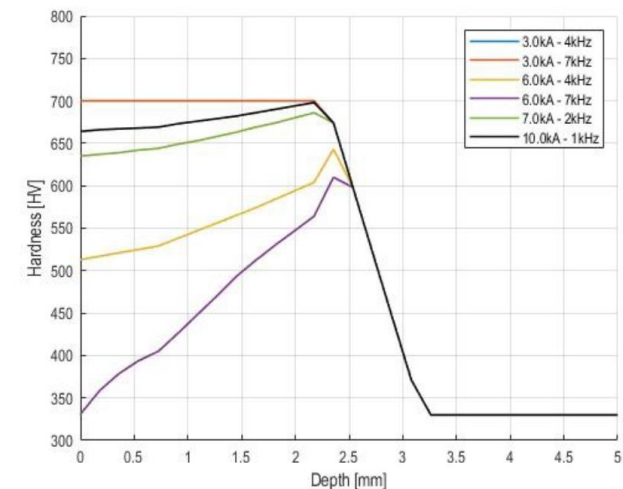
- Durant le revenu, une température plus haute génère un revenu moins uniforme (gradient de température plus important)
- A courant constant, une augmentation de la fréquence génère un revenu moins uniforme
- A fréquence constante, une augmentation du courant génère le même effet

Intérêts/Limites

- Optimisation numérique des paramètres de l'inducteur (courant, fréquence) pour améliorer l'homogénéité du revenu
- Influence du couplage unidirectionnel plutôt que bidirectionnel non connu
- Perspectives : validation expérimentale du modèle de dureté après revenu, de la relaxation des contraintes par rapport au revenu conventionnel, prédiction de la ténacité



Modélisation du revenu rapide d'une dent d'engrenage : détermination du paramètre de revenu (loi d'Hollomon-Jaffe)



Dureté prédite par simulation après revenu rapide en fonction du courant et de la tension appliquée à l'inducteur

Exemples et contributions de la simulation thermomécanique métallurgique dans le domaine de la sous-traitance en traitement thermique

Par B. Stauder - BODYCOTE

Contexte et objectifs

- Utilisation de la simulation éléments finis au sein de Bodycote : pré-évaluation des résultats, optimisation, innovation dans les traitements thermiques

Démarche

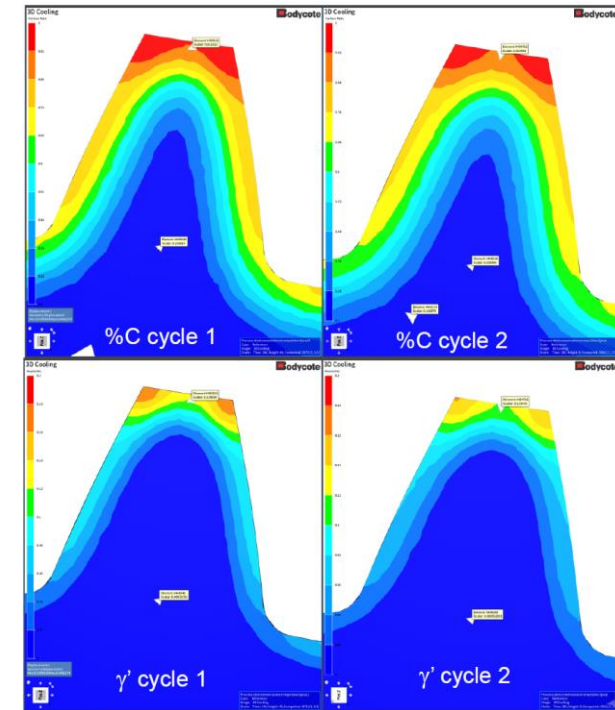
- Simulation de trois cas concrets différents traités avec le logiciel SIMHEAT

Résultats

- Déformation à la trempe d'une Navy-C : après recalage de la température d'austénitisation et du coefficient de transfert, déformation prédite par la simulation du même ordre de grandeur que l'expérimental et cohérents avec une autre solution logicielle (Deform)
- Dureté et taux d'austénite résiduelle après cémentation/trempe d'une couronne dentée :
 - dans le cadre de pièces superposés : baisse de la dureté prédite cohérente avec les résultats expérimentaux
 - Augmentation du temps de diffusion final : permet d'abaisser le taux d'austénite résiduelle
- Flambage d'un axe : pas de flambage pour un matériau homogène, alors qu'un flambage est observé s'il y a des hétérogénéités chimiques non-symétriques (modélisation d'une ségrégation)

Intérêts/Limites

- Prédiction de la déformation, des phases en présence en fonction du matériau, ses hétérogénéités et de son traitement thermique
- Pour de nouveaux matériaux, nécessite une validation ou un recalage avec de l'expérimental, peut être utilisé sinon pour faire du comparatif entre deux conditions de traitement
- Utilisation de SIMHEAT par Bodycote pour la R&D, les gros marchés ou en cas de problèmes ponctuels



Après cémentation et trempe d'un engrenage, taux de carbone et d'austénite résiduelle prédits par la simulation sans (cycle 1) et avec (cycle 2) augmentation du temps de diffusion final

6

Utilisation de l'IA

Prédiction de la profondeur de trempe par induction au moyen de l'IA Deep Learning

Par R. Labroye Schulte, J. Litau – Qualisco

Contexte et objectifs

- Contrôle de la profondeur de trempe par induction destructif, long et coûteux par méthode conventionnelle
- Qualisco proposait jusque-là un CND (contrôle non destructif) basé sur l'analyse des courants de Foucault (CF) qui statuait sur la validité ou non de la profondeur de trempe
- Présentation d'une nouvelle méthode d'analyse des signaux magnétiques, basée sur l'IA, permettant de prédire la profondeur de trempe et la dureté de surface

Démarche

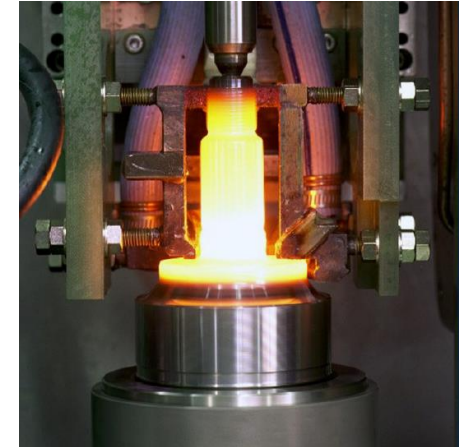
- Utilisation d'un réseau de neurones profonds (Deep Learning) entraîné sur des milliers de données (dureté et CF sur différents lots et références pièces)

Résultats

- Profondeur de trempe estimée à $\pm 75 \mu\text{m}$
- Calibration rapide sur site, seulement 5 pièces sont nécessaires

Intérêts/Limites

- Nouvelles informations accessibles par CND : dureté en surface et profondeur de traitement
- Contrôle très sensible au cas d'étude (géométrie, composition chimique de la pièce), ce qui nécessite une calibration initiale ou en cas de changement
- Pas de vocation à être normalisé comme le contrôle destructif (pas de remplacement complet)



Trempe par induction d'un joint homocinétique



Analyse du signal d'une harmonique

Introduction aux stratégies d'IA pour la prédiction des propriétés de renforcement dans les traitements thermochimiques

Par D Herisson - Safran Tech

L Barrallier - Arts et métiers Sciences et Technologies

Olivier Skiba - IRT M2P

Contexte et objectifs

- La réalisation de traitements superficiels génère une large base de données (avant, pendant et après traitement)
- Evaluation de l'utilisation de l'intelligence artificielle (réseau de neurones) pour prédire et optimiser les propriétés mécaniques des pièces

Démarche

- Base de données provenant d'un modèle analytique décrivant la nitruration (Thibault *et al*, ECHT 2018) :
 - Données d'entrée : temps et température
 - Données de sortie : profil de dureté et contraintes résiduelles

Résultats

- Prédiction améliorée avec un échantillonnage structuré (plutôt qu'aléatoire ou semi-structuré)
- Environ 25 profils suffisent pour atteindre une erreur moyenne < 5% sur la dureté et les contraintes résiduelles

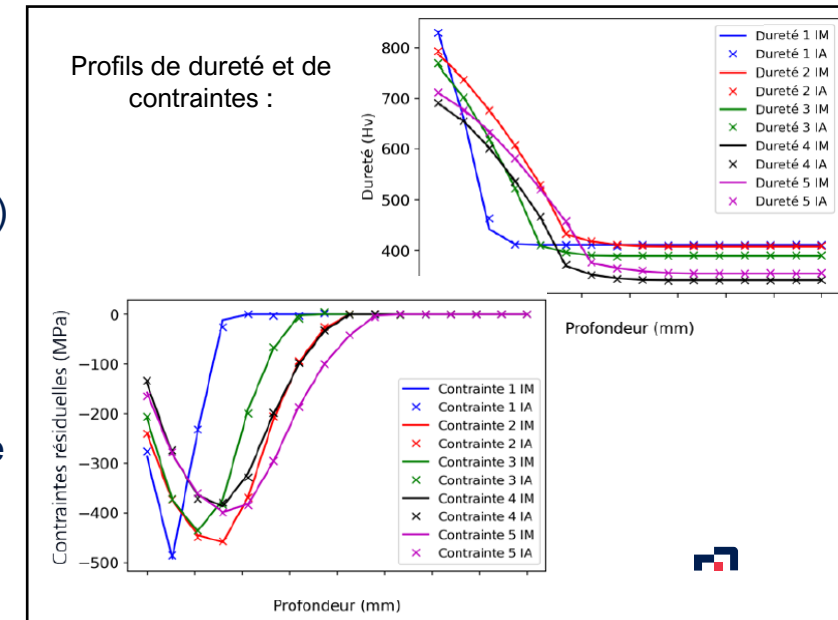
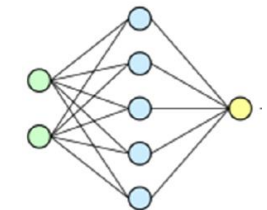
Intérêts/Limites

- Rapidité de création et d'exécution du modèle, réduction du besoin de modélisation physique
- Base de données d'entrée qui reste conséquente et manque d'explicabilité du modèle

Base de données Temps/Température
(~700 données)



Réseau de neurones :





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