

**solutions techniques et R&D pour le collectif et l'industriel**

**8 octobre**

**Toulouse**

**COLLOQUE INNOVATION**  
**CIBE**  
**BOIS-ÉNERGIE**  
16ème édition

En partenariat avec :





*Lowering Costs by Improving Efficiencies in Biomass Fueled Boilers: New Materials and Coatings to Reduce Corrosion*

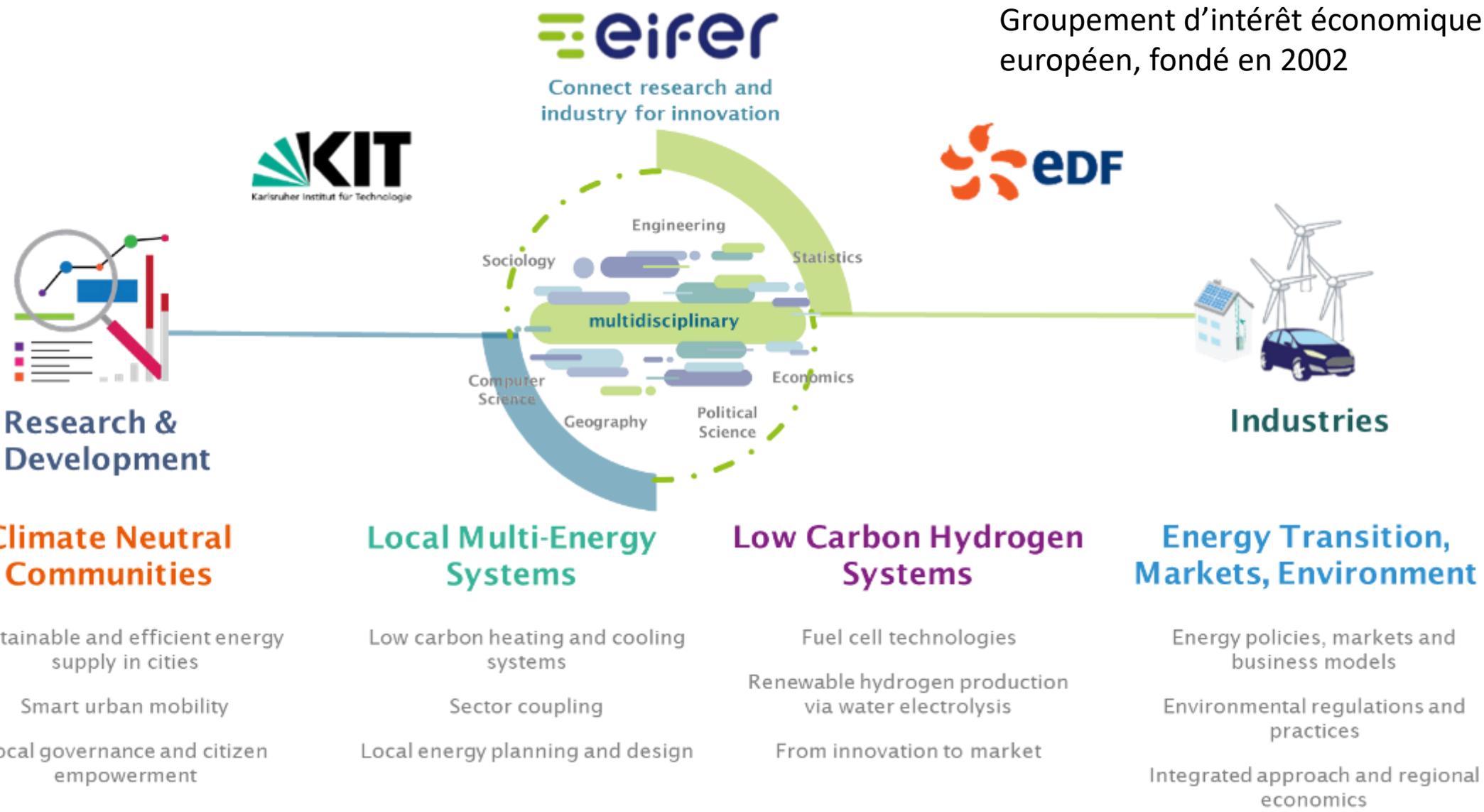
**Colloque du CIBE - 08/10/2024**

**Corrosion dans les grosses chaudières à vapeur biomasse - Projet européen BELENUS**



# EIFER (European Institute for Energy Research)

Groupement d'intérêt économique européen, fondé en 2002





# Problématique de la corrosion dans les chaudières à vapeur



**7% de biomasse**  
chaudière OP-230



**9% de biomasse**  
chaudière OP-430



**13-20% de biomasse**  
chaudière OP-650



**40% de biomasse**  
chaudière OP-380,  
colmatage complet  
de l'échangeur



**60% de biomasse**  
chaudière OP-230,  
dépôts importants  
causant plusieurs  
arrêts en un mois

**Réduire les paramètres de vapeur pour baisser la température et la corrosion des métaux**

**➔ Perte directe de rendement et d'énergie**



## Projet **BELENUS** (Horizon 2020 (LC-SC3-2018-2019-2020))

**Titre : Lowering Costs by Improving Efficiencies in Biomass Fueled Boilers: New Materials and Coatings to Reduce Corrosion**

**Durée : 60 mois (2019 - 2024)**

**Budget : 4,99 M€**

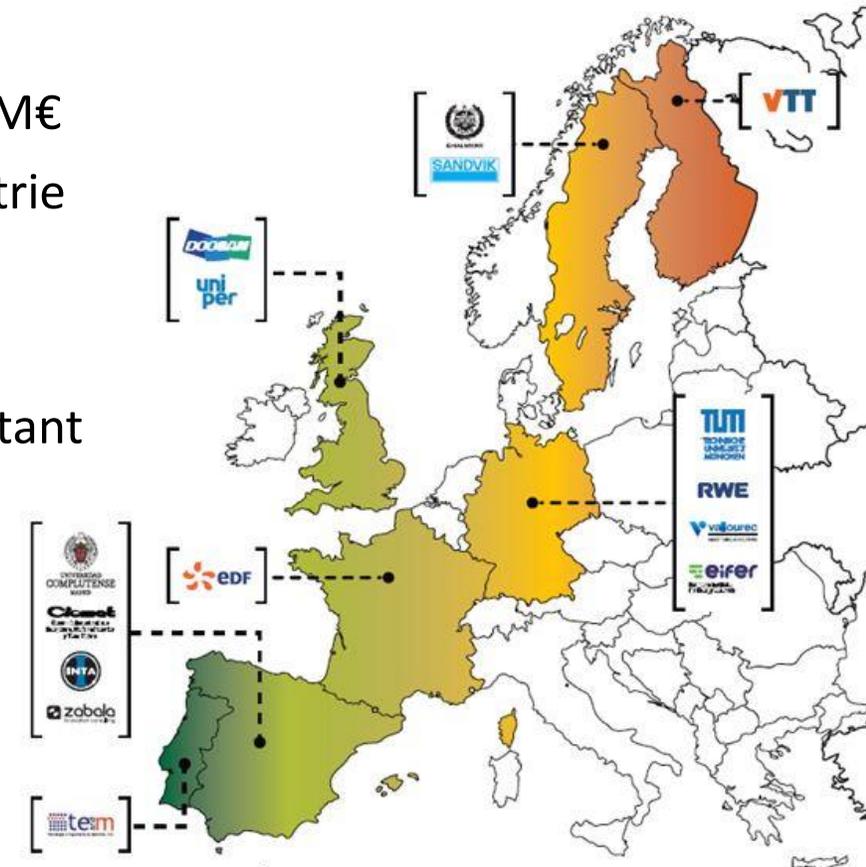
**Consortium : 11 partenaires recherche et industrie**  
(Coordinateur : Universidad Complutense de Madrid)

**Objectifs :**

- Développer de **nouveaux matériaux et revêtements** résistant à la corrosion
- Mettre au point de nouvelles méthodes de **soudure et assemblages**
- Définir un système de **suivi en continu** de la corrosion

→ *Réduire les coûts d'investissement pour la construction de nouvelles centrales électriques*

→ *Maintenir des paramètres de vapeur élevés pour les centrales électriques devant être converties en installations de combustion de biomasse/déchets*





# Matériaux & Revêtements



## Matériaux de revêtements :

- Base : alliages FeCrAl
- FeCr avec différents taux de Cr (élevés)
- Intégration de matériaux mineurs (Si, Zr, Ni ...)

## Mise en œuvre :



**HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) :** pulvérisation à la flamme, utilisé pour déposer des revêtements denses, durs et résistants à l'usure, constitués de poudre



**Laser clad :** technique de fabrication avancée par dépôt d'une couche protectrice ou fonctionnelle sur un substrat à l'aide d'un faisceau laser

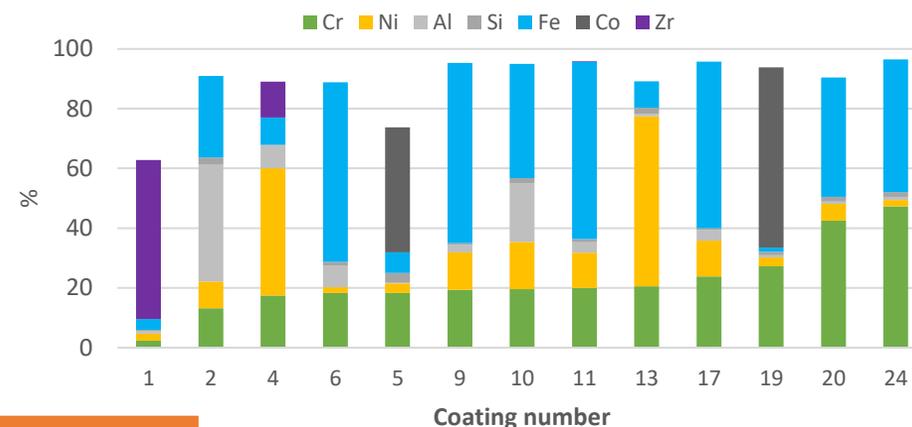


**Slurry :** composé d'une suspension de particules insolubles mélangées à une phase liquide qui sont répandues sur le matériau de base

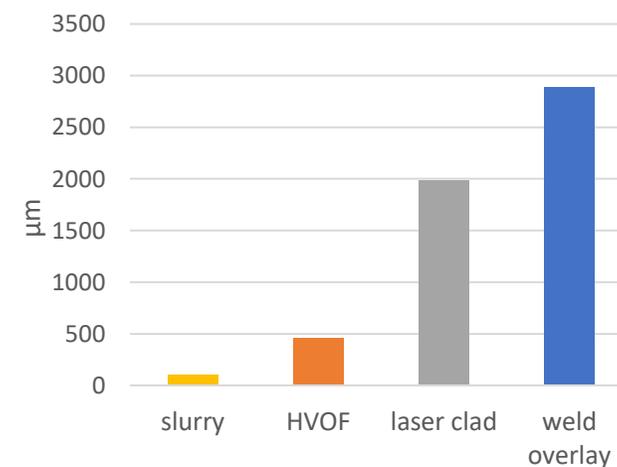


**Weld overlay :** revêtement issu du soudage pour faire fondre un matériau sur la surface d'un autre matériau différent

Exemples de composition des revêtements (éléments principaux)



Epaisseur moyenne de revêtement (µm)





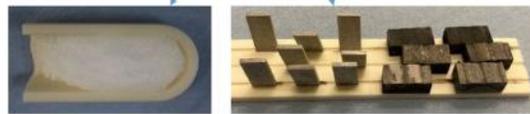
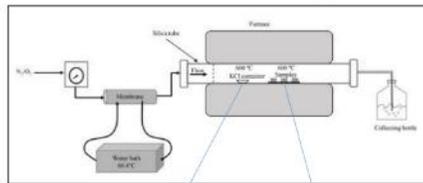
# Tests réalisés dans le projet

## Approche :

- Développement des revêtements et techniques de soudure en laboratoire
- Tests à l'échelle labo, pilote et dans des sites industriels
- Modélisation des performances et évaluation des impacts à long terme

### Laboratoire

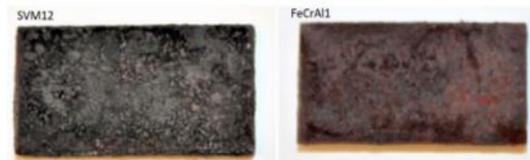
31 coatings/four labs



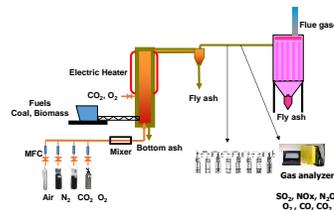
Before Exposure



After Exposure



### Pilote



Before Exposure



After Exposure



### Sites industriels

Sonde de corrosion



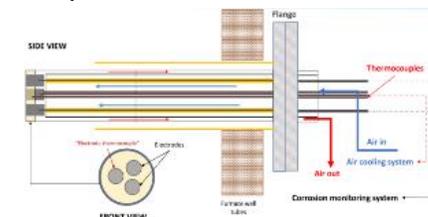
Tube d'essai



Sonde d'érosion



Système de suivi en continu

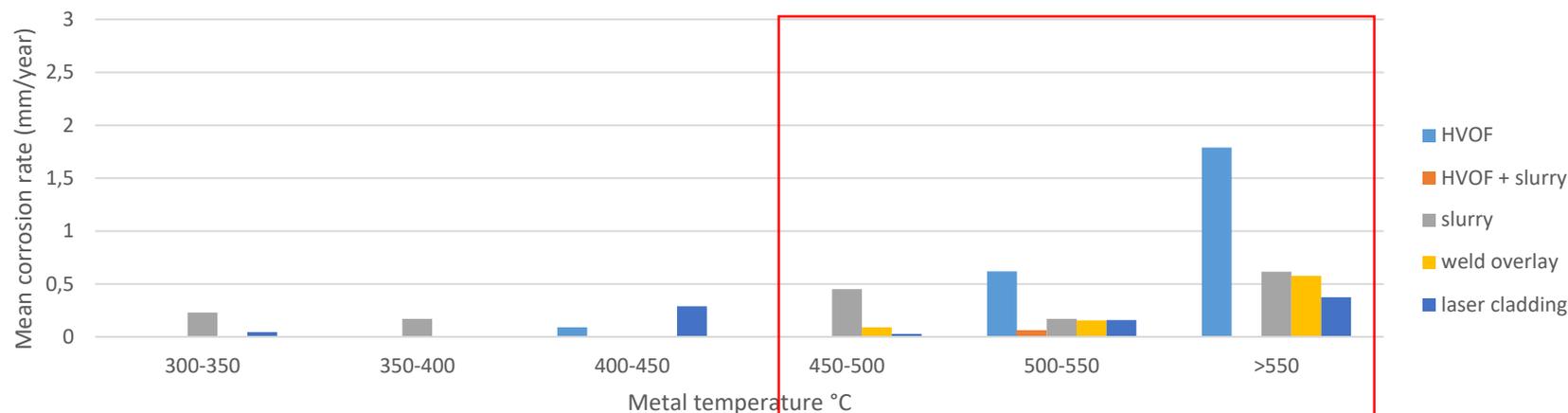




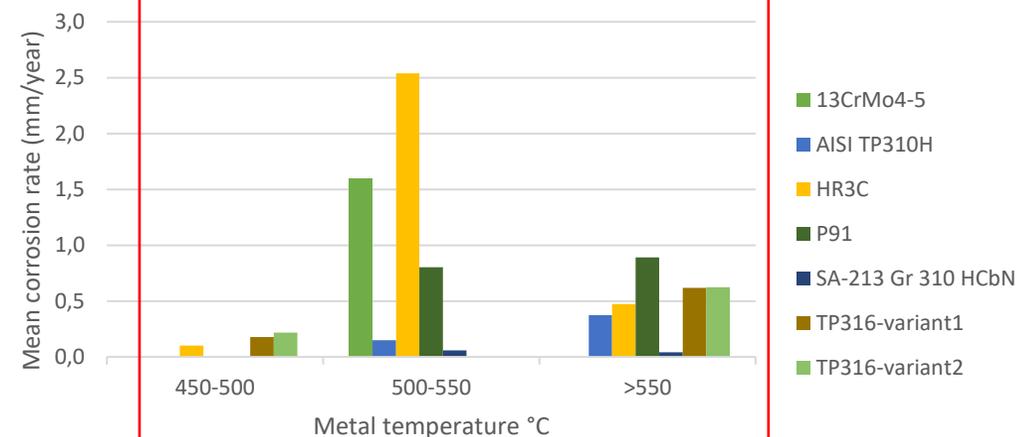
## Exemple d'analyse - Sonde de corrosion



### Revêtements



### Références



→ Résultats variables lors des tests industriels avec une partie des matériaux moins bons que les références (pas le cas en labo ou pilote)

→ Revêtements les plus prometteurs : « laser » et « weld overlay » puis « Slurry » mais nécessitent des recherches supplémentaires pour améliorer leur durabilité (matériaux confidentiels)



# Résultats des tests industriels - Corrosion MOYENNE

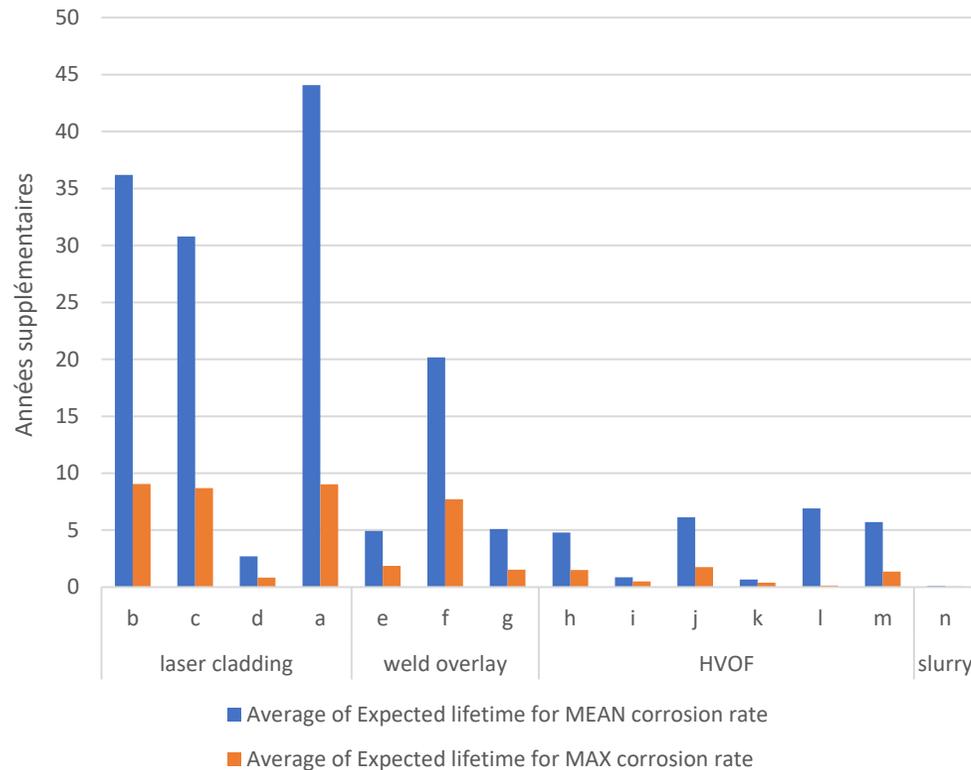
Average corrosion rate (nm/h) for different hosts and temperature ranges (°C)															
Coating	CFB		BFB1		BFB2					BFB3					Average
	500-550	600-650	500-550	600-650	400-450	450-500	500-550	550-600	600-650	400-450	450-500	500-550	550-600	600-650	
<b>HVOF</b>															
Coating 1							88,5							88,5	
Coating 2												3,8		3,8	
Coating 3	110,0	15,8	94,5	167,2			66,2				15,6			78,2	
Coating 4							278,9	66,6		13,3	26,2	0,4		93,0	
Coating 5											8,7			8,7	
Coating 6	69,2	81,7	147,8	2523,0										705,4	
Coating 7							128,6	56,5	12,5	7,4	35,9	89,1	115,0	73,0	
Coating 8												7,5		7,5	
Coating 9												10,2		10,2	
<b>HVOF + slurry</b>														-	
Coating 10												4,2		4,2	
Coating 11												15,5		15,5	
Coating 12												4,4		4,4	
<b>laser clad</b>														-	
Coating 13	1,7	2,5	4,8	8,5								4,2	3,5	4,2	
Coating 14												3,9		3,9	
Coating 15					33,7		156,4	164,0	73,7		3,2	3,9	8,4	70,4	
Coating 16												4,0		4,0	
<b>slurry</b>														-	
Coating 14	0,0	73,2	37,5	1067,1	122,6	93,3		49,4	25,6		19,1	6,1	8,6	140,7	
Coating 15												5,5		5,5	
Coating 16						65,7	32,4	41,4				15,1	11,0	20,4	
<b>weld overlay</b>														-	
Coating 17												11,1		11,1	
Coating 18	85,0	45,0	39,1	0,0				183,0	106,6			7,5	21,6	55,3	
Coating 19								183,2				5,5	14,1	67,6	



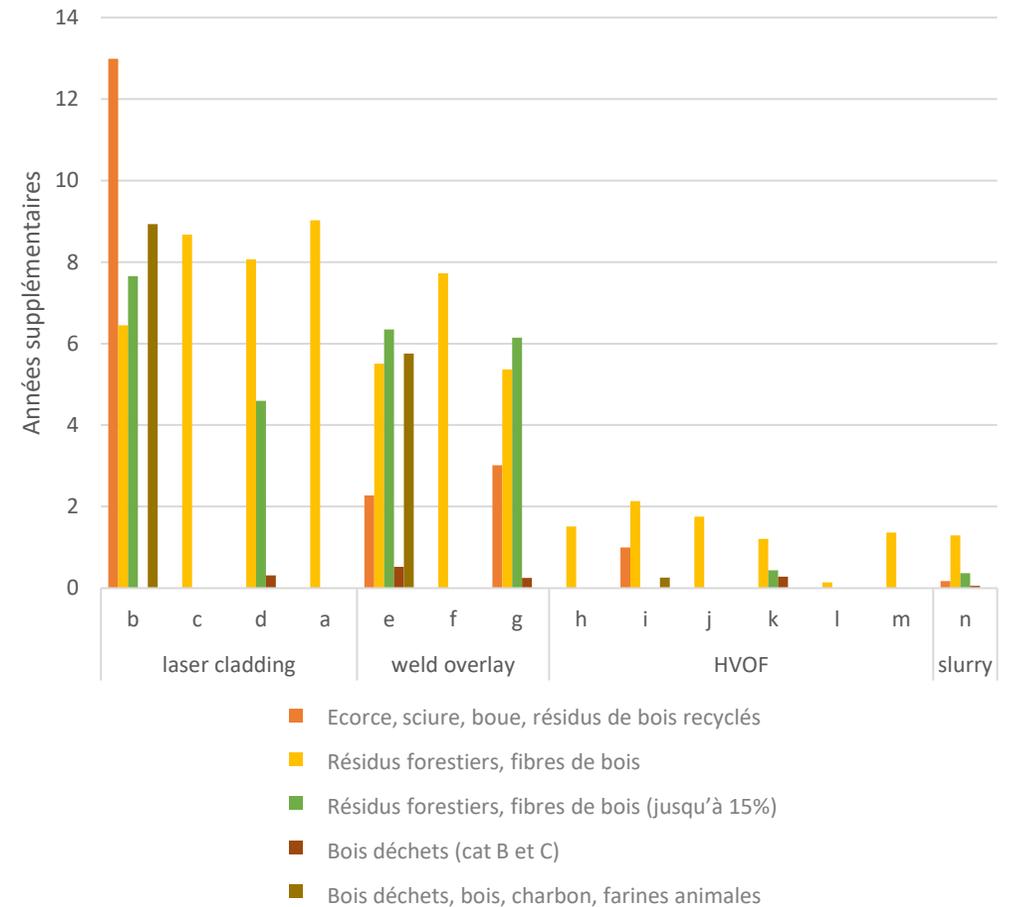


# Effet sur la durée de vie (simulation simplifiée)

Durée de vie estimée supplémentaire pour des taux de corrosion MOYEN et MAX



Impact du combustible sur la durée de vie supplémentaire estimée pour des taux de corrosion MAX





## Conclusions

### Méthodologie de développement :

- Développement en laboratoire et tests pilotes pour présélectionner des matériaux mais pas suffisant pour confirmer les performances
- Température du métal ET température des gaz sont toutes les deux très impactantes
- Nécessité de faire des tests industriels sur différents types de chaudière, niveaux de température (métal et gaz), combustibles
- Performance du tube d'essais >> sonde de corrosion : conditions d'échange plus stable
- Importance de l'érosion qui vient réduire les performances de revêtements qui étaient bons pour la corrosion

### Matériaux et revêtements :

- Pas de revêtement bon pour tous les systèmes de combustion testés et toutes les plages de températures
- Applications par « laser » et « weld overlay » semblent les plus prometteuses avec un impact important sur la durée de vie
- Application « slurry » possible pour des  $T^{\circ} < 550^{\circ}\text{C}$  : pas d'impact sur la durée de vie mais mise en œuvre sur des installations existantes possibles
- Quelques nouveaux alliages présentent des performances intéressantes pour plusieurs systèmes
- Aucun matériau développé n'est performant pour le bois-déchets

**➔ Des pistes très prometteuses mais encore beaucoup de travaux à faire !**



# BELENUS

*Lowering Costs by Improving Efficiencies in Biomass Fueled Boilers: New Materials and Coatings to Reduce Corrosion*



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 815147.

# Problématique de la corrosion dans les chaudières à vapeur



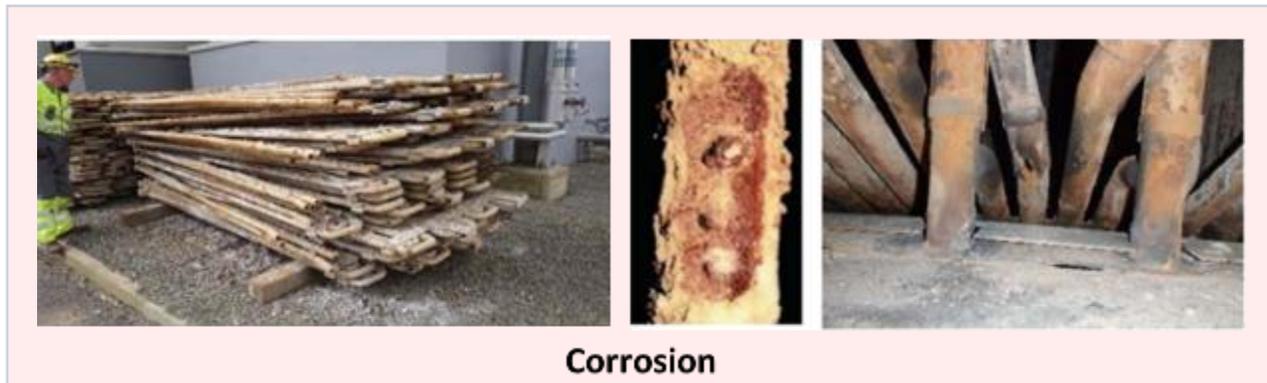
Encrassement, dépôts, corrosion = problèmes courants dans les chaudières biomasse



Fouling



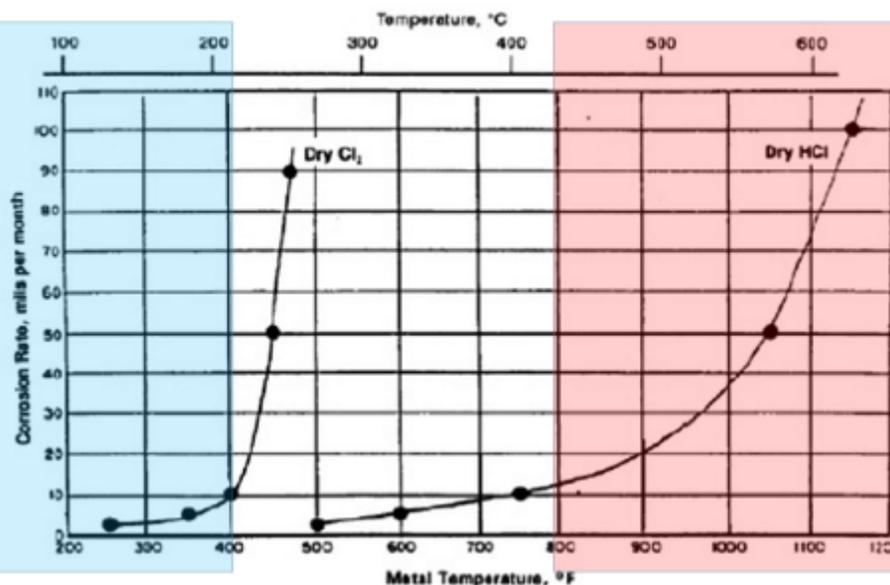
Slagging



Corrosion

Les matériaux et revêtements actuels se corrodent très rapidement à des températures du métal supérieures à 550°C.

**Chaudières à eau :**  
Fonctionnement à des températures basses (température de l'eau chaude maxi 200°C)  
→ Corrosion possible mais à des taux assez faibles



**Chaudières à vapeur:**  
Fonctionnement à des températures élevées (température de la vapeur jusqu'à 550°C)  
→ Risque de corrosion très élevé



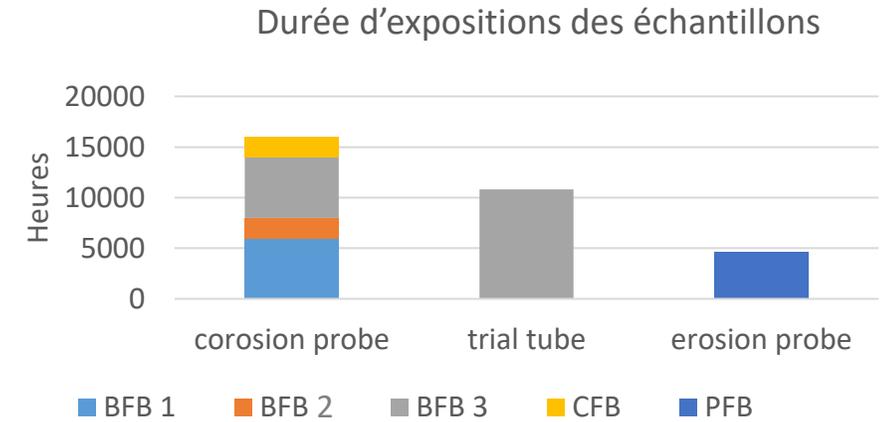


## Technical work packages

001	<b>WP1 - FORESIGHT &amp; DEFINITION OF REQUIREMENTS</b> To coordinate key decision making, including specific biomass and coating selection as well as harmonization of test procedures by creating a unified test protocol.
002	<b>WP2 - BIOMASS CORROSION RESISTANT COATINGS: DEPOSITION AND OPTIMISATION</b> To develop and optimize new biomass corrosion resistant coatings including modified slurry aluminide coatings, thick HVOF and/or HVAF thermal spray, and overlay laser and welding coatings.
003	<b>WP3 - LAB SCALE TESTING, CHARACTERISATION AND MONITORING</b> a) To carry out lab testing under fireside atmospheres as well as steam side conditions at atmospheric and supercritical pressures, also including erosion resistance and mechanical properties. b) To develop a fireside corrosion monitoring system by implementing ceramic-based electrochemical sensors.
004	<b>WP4 - PILOT SCALE TESTING AND CHARACTERISATION</b> a) To characterize the selected biomass types. b) To obtain gas and ashes compositions while burning biomass. c) To test the coating/material systems in 2 biomass pilot plants (0.5 kWth and 10 kWth).
005	<b>WP5 - NEW WELDING AND STRUCTURAL INTEGRITY STRATEGIES: ASSEMBLY OF BOILER STRUCTURES</b> To define and develop innovative welding, bending and joining strategies for coated boiler parts through the study of the influence of these processes in coated boiler structures enabling the generation of assembled structures for further execution of mechanical and corrosion testing.
006	<b>WP6 - MODELLING AND VALIDATION OF MATERIAL LIFE PREDICTION &amp; COST AND LIFE CYCLE ANALYSIS</b> a) To develop a methodology for lifetime prediction; b) To carry cost and life cycle analysis of the best coating-materials systems; c) To calculate the OPEX and CAPEX reduction based on material cost savings and lifetime increase
007	<b>WP7 - TESTING AND MONITORING AT OPERATION PLANT CONDITIONS UNDER SMALL AND MEDIUM-SCALE CHP PARAMETERS</b> To validate BELENUS coating/material and corrosion monitoring systems by testing in operating biomass plants.

## Tests industriels en chiffres :

- 3 systèmes de combustion
- 5 sites d'accueil
- 13 types d'exposition (8 sondes de corrosion, 4 sondes d'érosion, 1 tube d'essai)
- 336 échantillons testés
- 30 000 heures d'exposition

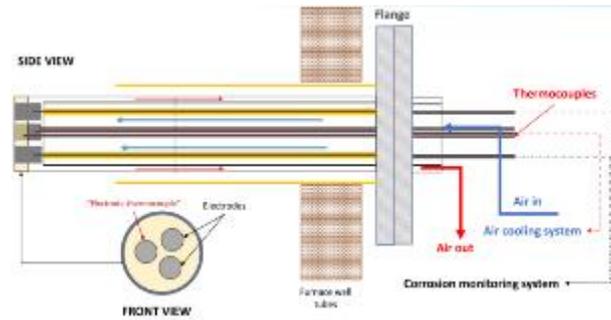
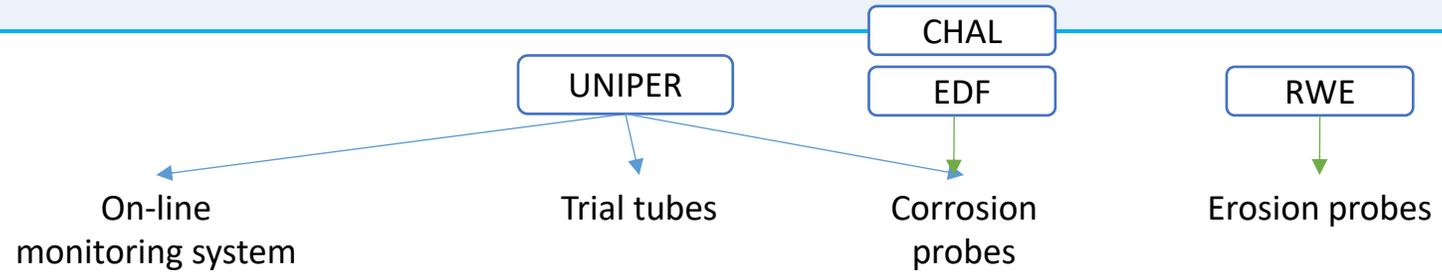


Unité	Pays	Puissance	Technologie	Paramètres vapeur	% biomasse	Combustibles
BFB1	FR	50 MWe 140 MWth	Lit fluidisé bouillonnant (BFB)	119 bar, 520°C	100%	Ecorces, souches et branches (85%) Bois déchets (15%)
BFB2	UK	33 MWe	Lit fluidisé bouillonnant (BFB)	88 bar, 495°C	100%	Bois déchets
BFB3	UK	44 MWe	Lit fluidisé bouillonnant (BFB)	150 bar, 540°C	100%	Résidus forestiers (85%) Fibres de bois (15%)
CFB	FR	72 MWth	Lit fluidisé circulant (CFB)	60 bar, 480°C	Jusqu'à 100%	Bois déchets, bois, charbon, farines animales
PFB	DE	950 MWe	Chaudière à combustible pulvérisé	sortie du surchauffeur : 265 bar, 580 °C sortie du réchauffeur : 60 bar, 600 °C débit vapeur : 740 kg/s	0%	Lignite



# Tests dans des sites industriels

## Types de tests

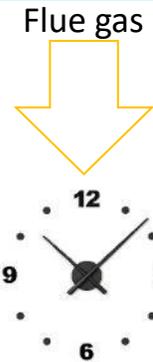
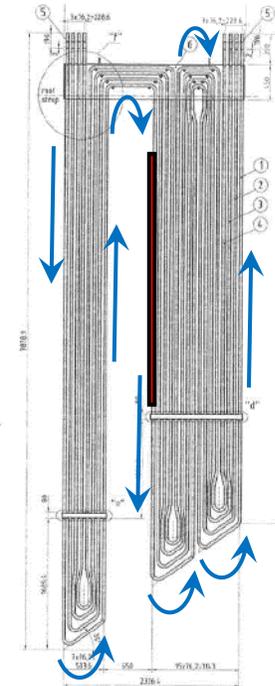


Firing system	BFB	BFB	BFB	PULVERISED
	CFB		CFB	

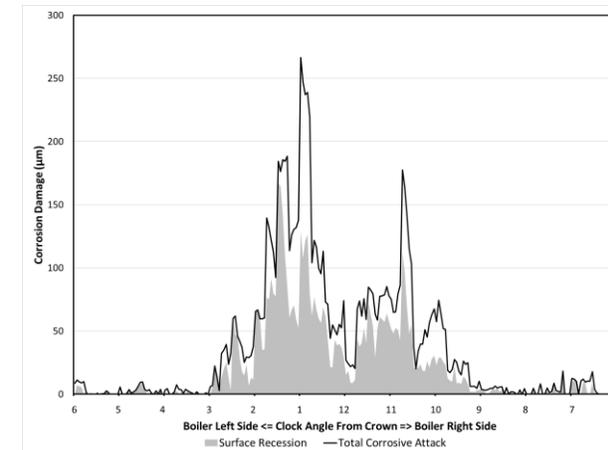


# Tests dans des sites industriels

## Test d'un tube complet dans l'échangeur



Metal loss measurement  
HR3C substrate trial





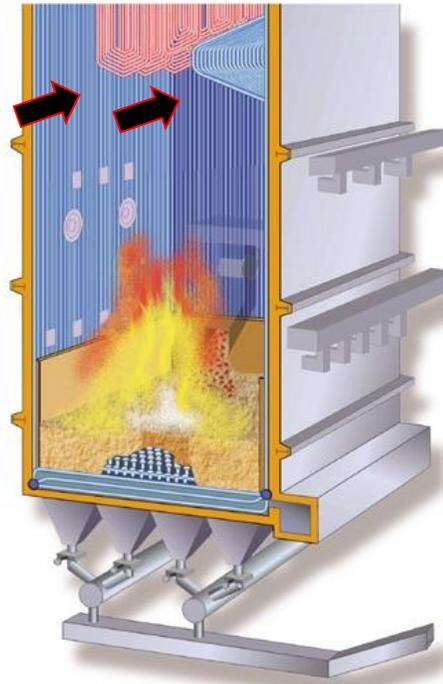
# Tests dans des sites industriels

## Test avec une sonde de corrosion



Revêtements à tester

Références utilisées dans la chaudière

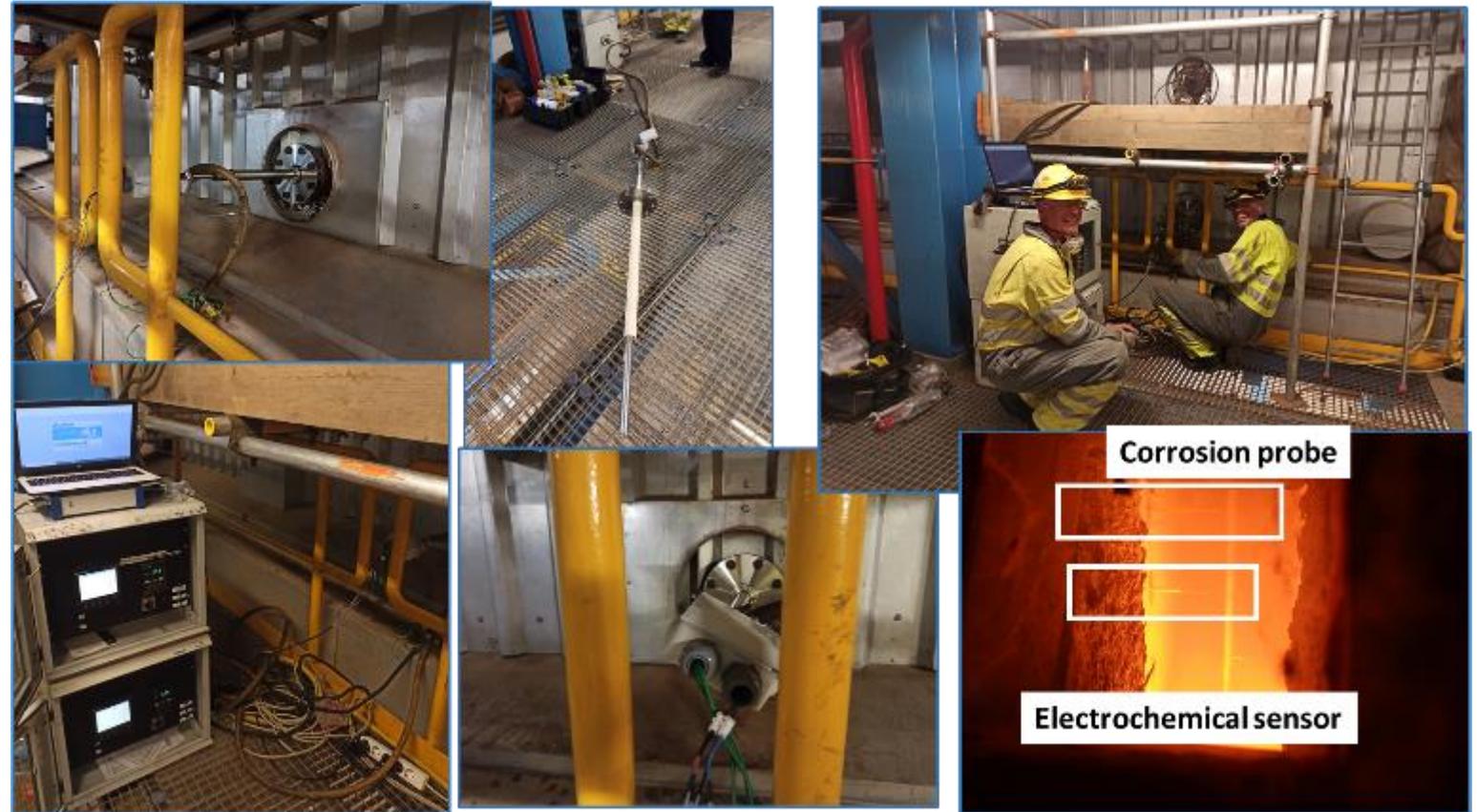




## Tests dans des sites industriels

### Test du système de suivi en continu

- Biomasse: bois déchets
- Durée d'exposition : 1000 h
- Température vapeur :  
First 650 h : 600°C  
Last 350 h : 550°C





# Exemple d'analyse - Sonde de corrosion



Références  
utilisées dans la  
chaudière

Revêtements à  
tester



Sanicro 28



AISI TP310H

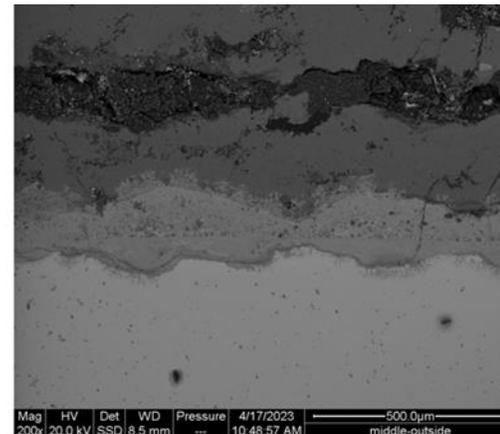
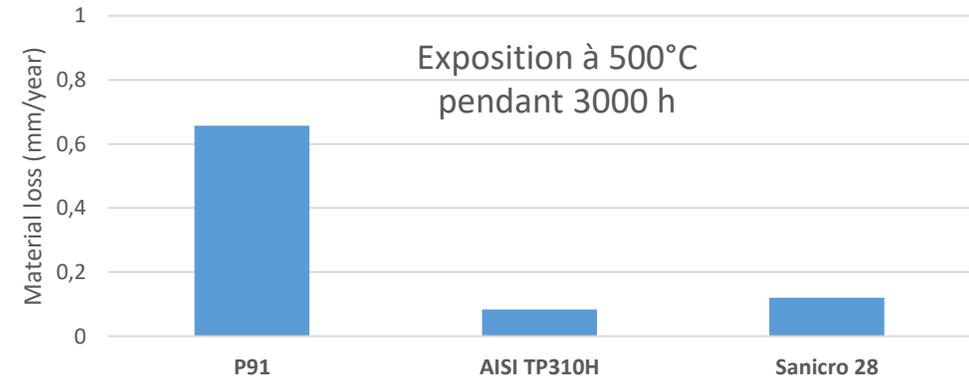


SA-213 Gr 310  
HCbN



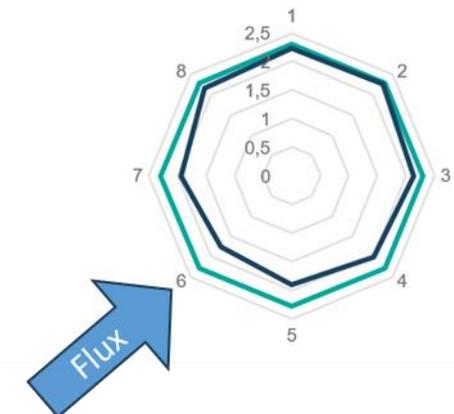
P91

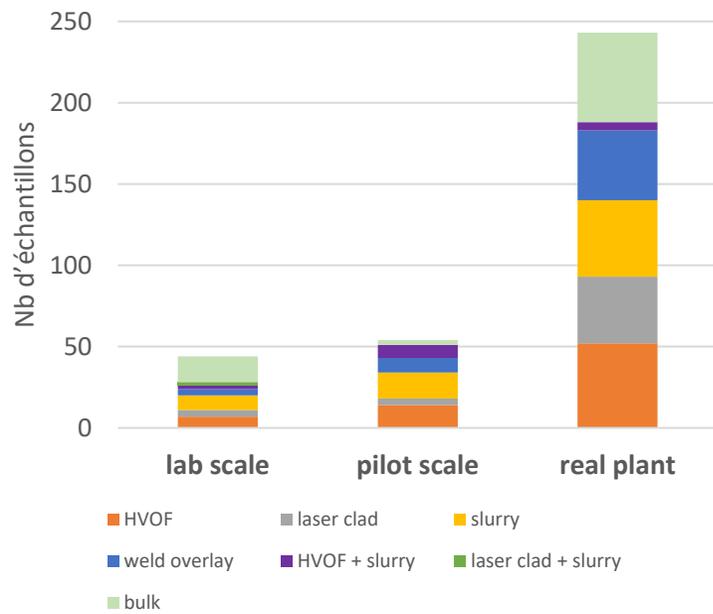
Pertes de matière - Aciers inoxydables



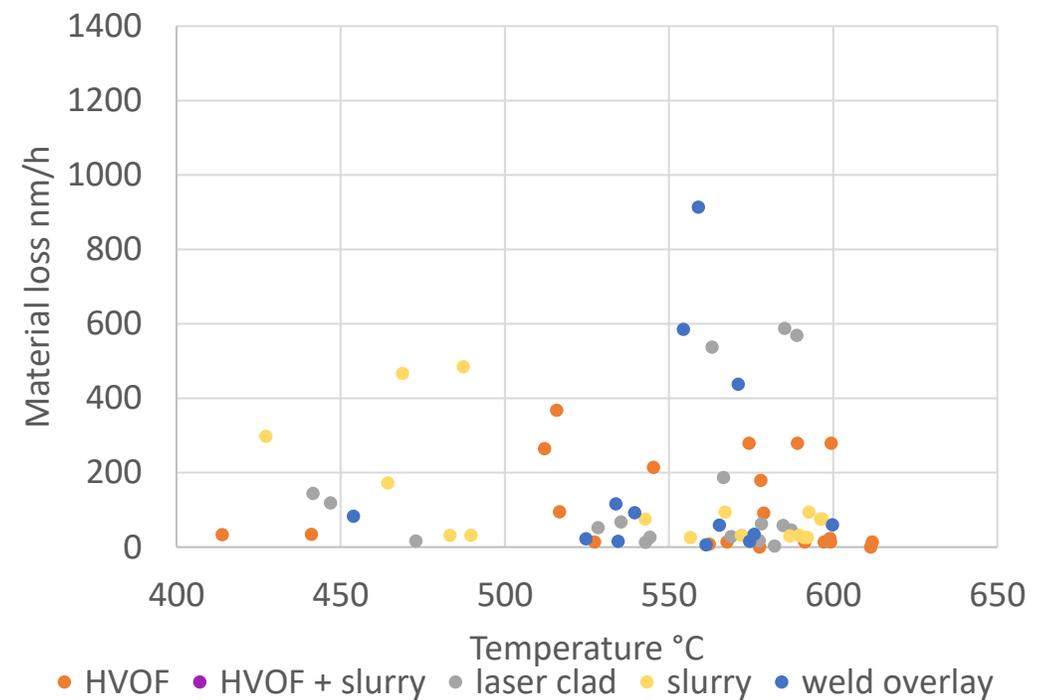
Mag 200x HV Det 20.0 kV WD 8.5 mm Pressure 10.48 57 AM 4/17/2023 500.0um middle-outside

P91 Biomass 500°C 3000h





Average material loss nm/h vs exposure temperature corrosion probes



Sample results for HVOF coating	Average mean corrosion rate (nm/h)
<b>lab scale</b>	<b>29,9</b>
Steam	0,0
Synthetic gases	49,9
<b>pilot scale</b>	<b>19,3</b>
Cofiring	14,3
Eucalyptus	36,1
Industrial Waste Wood	15,0
Wheat Straw	0,0
<b>real plant</b>	<b>170,8</b>
bark, sawdust, sludge, recycled wood residues	69,2
forestry waste and recycled wood fibre	9,2
forestry waste and recycled wood fibre (up to 15%)	10,1
wastewood/mix cat B and C	105,6
Wood chips, Waste wood, Animal flour, Coal	733,1

