DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE PLATEFORME D'ESSAIS DESTINÉE À ÉTUDIER LES PHÉNOMÈNES DE CORROSION CHAUDE

08/07/2021 | Présentation GDR COnCOrD
Tom SANVIEMVONGSAK

IRT M2P
Institut de Recherche Technologique
Matériaux Métallurgie et Procédés

COnCOrD GdR 2081
COuplage méCanique Oxydation Diffusion

M2P : Matériaux* - Métallurgie et Procédés

Missions

- Accélérer la maturation de projets innovants pour les entreprises
- Créer ou mettre à disposition des plateformes technologiques de taille semi-industrielles

Spécificités

- Pilotage par l'industrie qui définit l'offre de technologies
- Soutien des laboratoires académiques
- Fonds publics (PIA) dédié aux partenariats privé/public
- Implication des partenaires dans la réalisation des projets (MAD, S/T)

TRL **



** métaux, alliages, composites, multi-matériaux, …*
*** Echelle de maturation d'une technologie (TRL)*

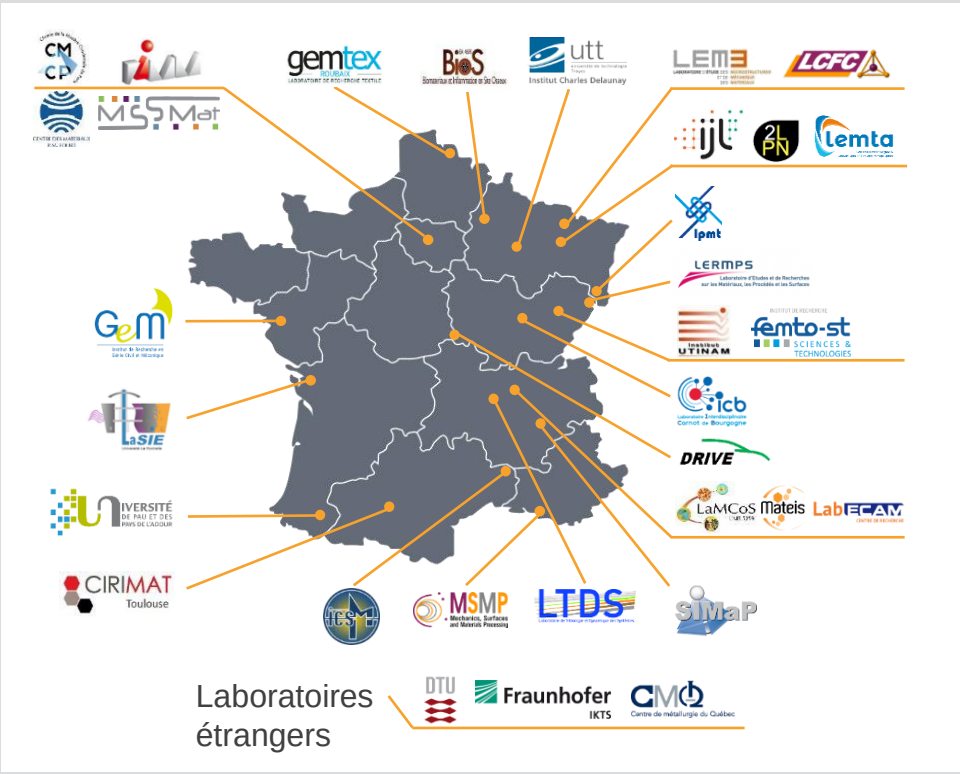
Marchés



120+ industriels nous font confiance :

[…]

32 laboratoires académiques associés à nos projets et accueillants nos doctorants

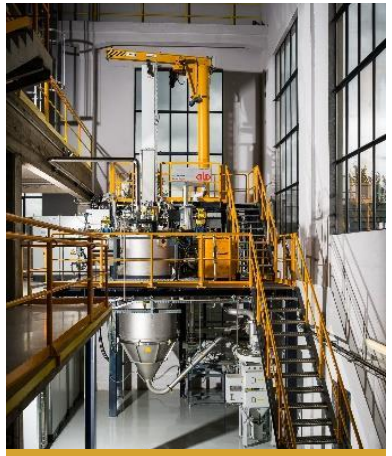


PÔLES D'ACTIVITÉ

ZOOM SUR LES PRINCIPALES PLATEFORMES DE M2P

- Des plateformes flexibles, instrumentées pour des travaux de R&D à échelle industrielle :

ELABORATION


Tour d'atomisation


Creuset froid


VIM

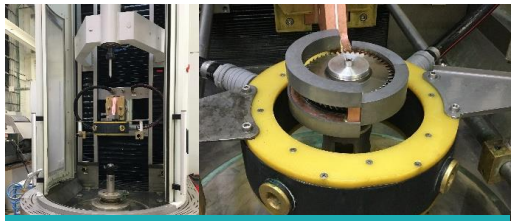

PAM


Trempe

TRAITEMENTS DE SURFACE


Lignes TS


Fours (carbonitruration, nitruration gazeuse/ionique)


Trempe de contour par induction


Grenailleuse

COMPOSITES & ASSEMBLAGE


Préformage


C-RTM SMC


Cellule AFP


Pultrusion


Thermoestamp


C-RTM


Injection


Assemblage

POURQUOI S'ENGAGER AVEC L'IRT M2P

ZOOM SUR L'INGÉNIERIE FINANCIÈRE

Industriel A
+
Industriel B
+
…
+
Industriel N

Min 55%

1

Abondement
PIA
Max 45%

2

3

IRT M2P

Coûts M2P

RH M2P

Plateformes
(% amort)

Frais structure

Ressourcement
scientifique

Formation

Coûts partenaires

RH MAD

S/T & Labo Acad.

Coûts externes

Consommables
S/T & Labo Acad.

- Diminuer les coûts d'investissement
- Mettre en commun des plateformes et des résultats

4

MAD
(max 50 % Contrib. Indus.)

S/T RDI
(max 20% Contrib. Indus.)

MAD : Mise à disposition
S/T : Sous-traitant
RDI : Retour d'investissement

1 Cofinancements industriels facturés par M2P

2 PIA rembourse à M2P une part des dépenses du projet

3 M2P supporte la totalité des coûts du projet (M2P + partenaires + externes)

4 M2P rembourse les dépenses réalisées par les partenaires

Ex. avec 5 partenaires industriels : apport de 11% du budget pour un accès à 100% des résultats

Projet EF_CORRHT

Etude de Faisabilité pour l'élaboration d'une nouvelle plateforme de corrosion à haute température

Projet lancé à l'initiative de Safran : Clara DESGRANGES

Appui scientifique et technique IJL : Michel VILASI

IRT M2P
Institut de Recherche Technologique
Matériaux Métallurgie et Procédés

OBJECTIFS

Projet EF_CORRHT

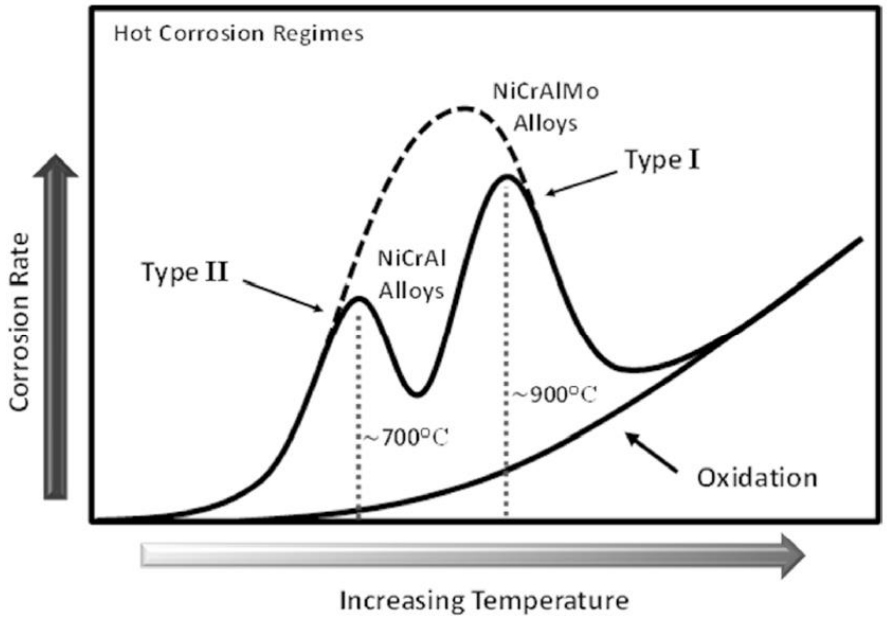
- Etat des lieux des bancs brûleurs et de bancs d'essais destinés à la corrosion chaude
- Identification des besoins non couverts
- Capitalisation des retours d'expérience des industriels et des académiques
- Identification des futurs partenaires
- Rédaction du cahier des charges avec analyses fonctionnelles techniques pour l'élaboration de la plateforme
- Démarcher les potentiels fabricants de bancs d'essais

CONTEXTE

- Les premiers cas de corrosion chaude dans les turbines aéronautiques ont été recensés dans les années 50 [1]. Un phénomène qui touche également les chaudières et les échangeurs.

- Les phénomènes de corrosion chaude ont lieu lorsque des pièces métalliques sont exposées à des **gaz de combustion (soufrés)** mélangés à de la **vapeur saline** ou à des **cendres**.

- Corrosion chaude **type 1** (haute température) and **type 2** (basse température).



Profil des cinétiques de corrosion chaude type I, type II et d'oxydation en fonction de la température des alliages NiCrAl et NiCrAlMo (pic unique) [1]



Exemple d'éprouvette C1023 (NiCrAlMo) corrodée (type 1) 235 h à 900 °C [2]

[1] J Goebel & F Pettit, Metallurgical Transactions, 1970 ; [2] Thèse Sanviemvongsak 2020, INPT

BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

Dans les laboratoires de recherche et les industries**

Atmosphère contrôlée

Brûleur

Four à résistances ou autres

Atmosphère non contrôlée

NPL National Physical Laboratory

nlr

NASA — *Erosion*

INSTITUT P — *Cellule de force*
Micromètre optique
Pas de corrosion chaude

Cranfield University — *Grand volume d'essai*

SYNL — *ATG*

ijl INSTITUT JEAN LAMOUR — *ATG*

OAK RIDGE National Laboratory

PITT | SWANSON ENGINEERING

IMT Mines Albi-Carmaux École Mines-Télécom
CO, CO_2, CH_4, H_2, H_2O
Pas de corrosion chaude

KAUST

VEOLIA

University of Virginia

SAFRAN

BAM

DECHEMA — *Dépôt par immersion*

CIRIMAT Toulouse
O_2, N_2, CO_2, H_2O
Pas de corrosion chaude

ALSTOM

SICCAS — *CMAS, Pyromètre*

LCTS

INSA ROUEN NORMANDIE — *Essais sur composite organique*
Pas de corrosion chaude

ICAR-CM2T Ingénierie Matière

Åbo Akademi University

LaSIE — *Possibilité de dépôt par sublimation*

VOLVO AERO

Southside Thermal Sciences Limited

JÜLICH Forschungszentrum

AVIO

GKN AEROSPACE

ONERA THE FRENCH AEROSPACE LAB

AVIO — *Dépôt par trempage*

Tokyo Metropolitan University

Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

LINKÖPING UNIVERSITY

University of TEHRAN

University of Minnesota

LSU Louisiana State University

MINES ParisTech

DRDO

ALLIANCE SORBONNE UNIVERSITÉ | utc Recherche Roberval

Cas particuliers REP/Sel fondu

WISCONSIN UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

cea

John Cockerill

MSLOOP

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE MADRID

Couplage Méca/Corrosion

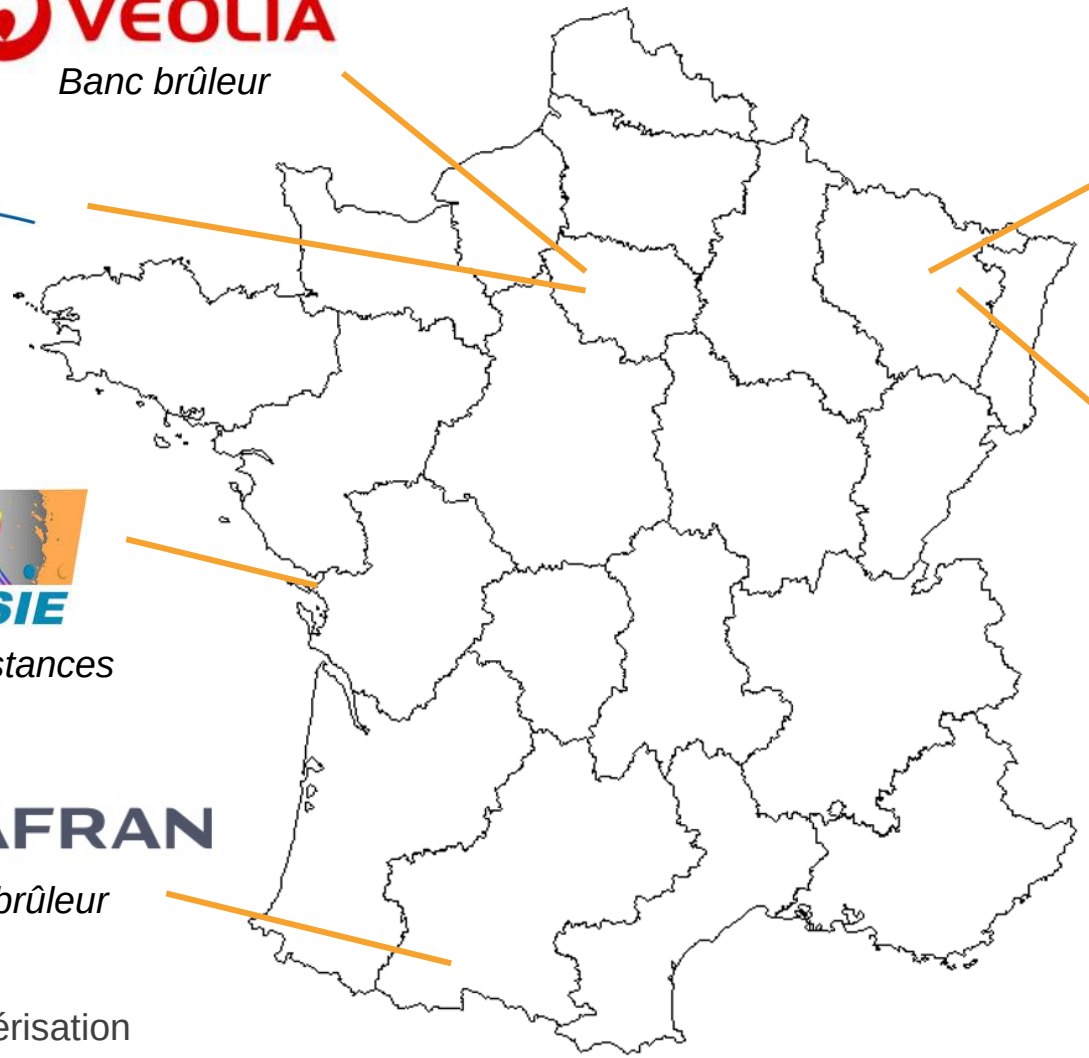
Dépôt en amont par pulvérisation

Gradient d'exposition sur l'épaisseur des ech.

Gradient d'exposition dans l'enceinte du four

**liste non-exhaustive*

BANCS D'ESSAIS DE CORROSION CHAUDE EN FRANCE



VEOLIA
Banc brûleur

ONERA
THE FRENCH AEROSPACE LAB
Four à résistances

INSTITUT JEAN LAMOUR
Four à résistances et ATG

LaSIE
Four à résistances

ICAR-CM2T
Ingénierie Matière
Banc brûleur

SAFRAN
Banc brûleur

Dépôt en amont par pulvérisation

Gradient d'exposition dans l'enceinte du four

Gradient d'exposition sur l'épaisseur de l'échantillon

QUELQUES CHIFFRES

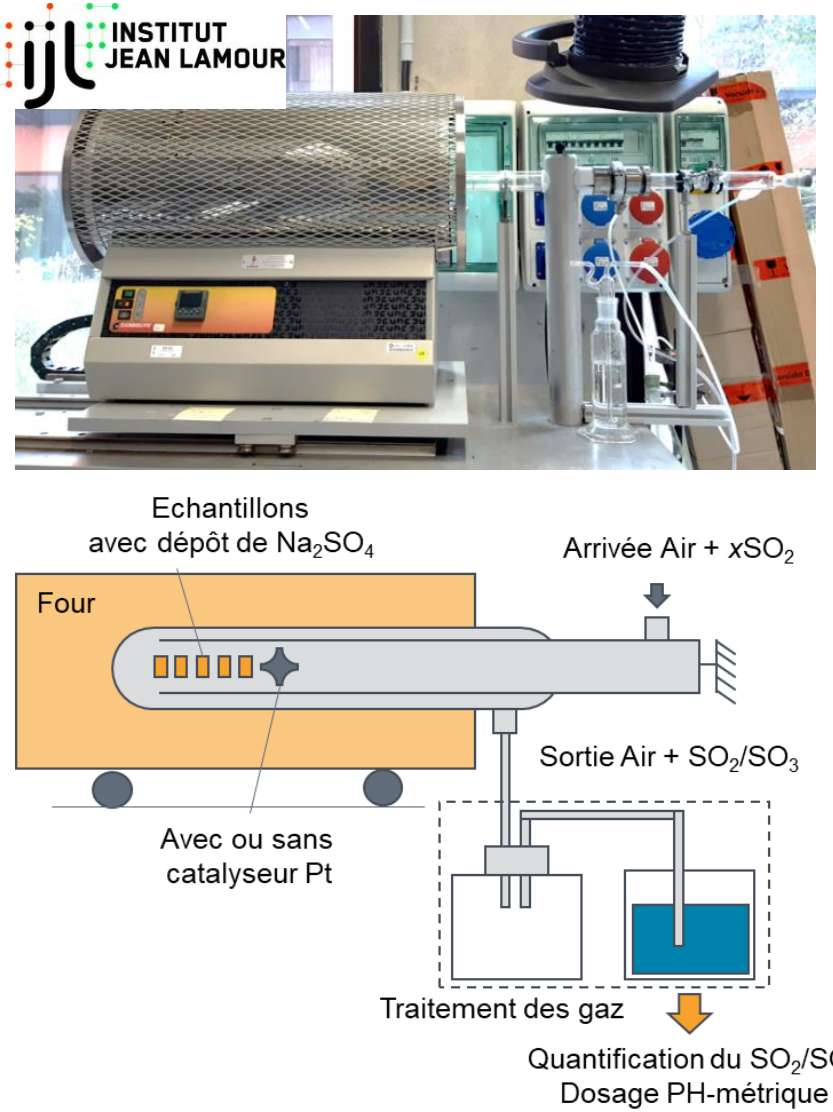
Besoins non couverts :

- L’évaluation des résistances à la corrosion chaude suivant la composition chimique des sels et du milieu gazeux ;
- L’étude des effets de vitesse de gaz/pression/érosion/gradient d’exposition ;
- L’étude des effets de couplage sollicitations mécaniques/corrosion chaude et mécaniques/oxydation à haute température ;
- L’influence de la composition chimique des alliages sur leur résistance à la corrosion chaude ;
- La modélisation des cinétiques de corrosion chaude.

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques



Banc d'essai de corrosion chaude, type four tubulaire de l'IJL-Nancy [1]

[1] Thèse Malacarne 2021, (en cours), Université de Lorraine, Institut Jean Lamour Nancy

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques

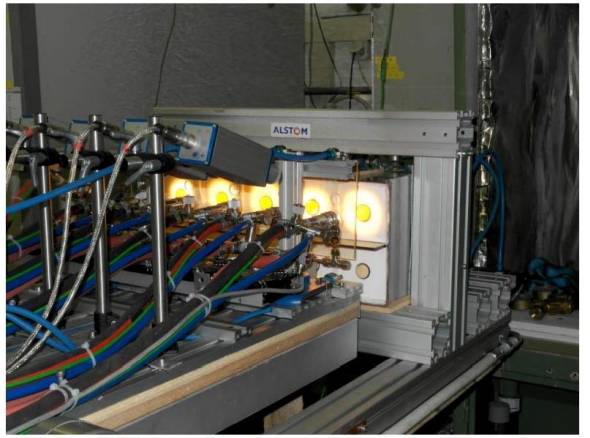


Figure 1. Picture of the burner rig test showing the two rows of 5 samples each

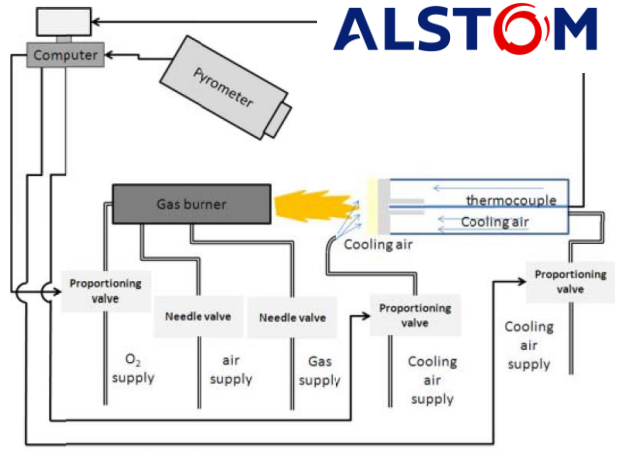
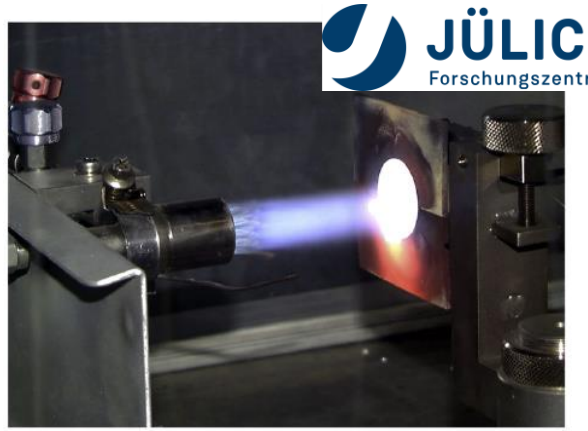


Figure 2. Schematic representation of the active temperature control system of the burner rig test.

Banc brûleurs à gaz d'Alstom [1]



Banc brûleur à gaz de Jülich [2]

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques

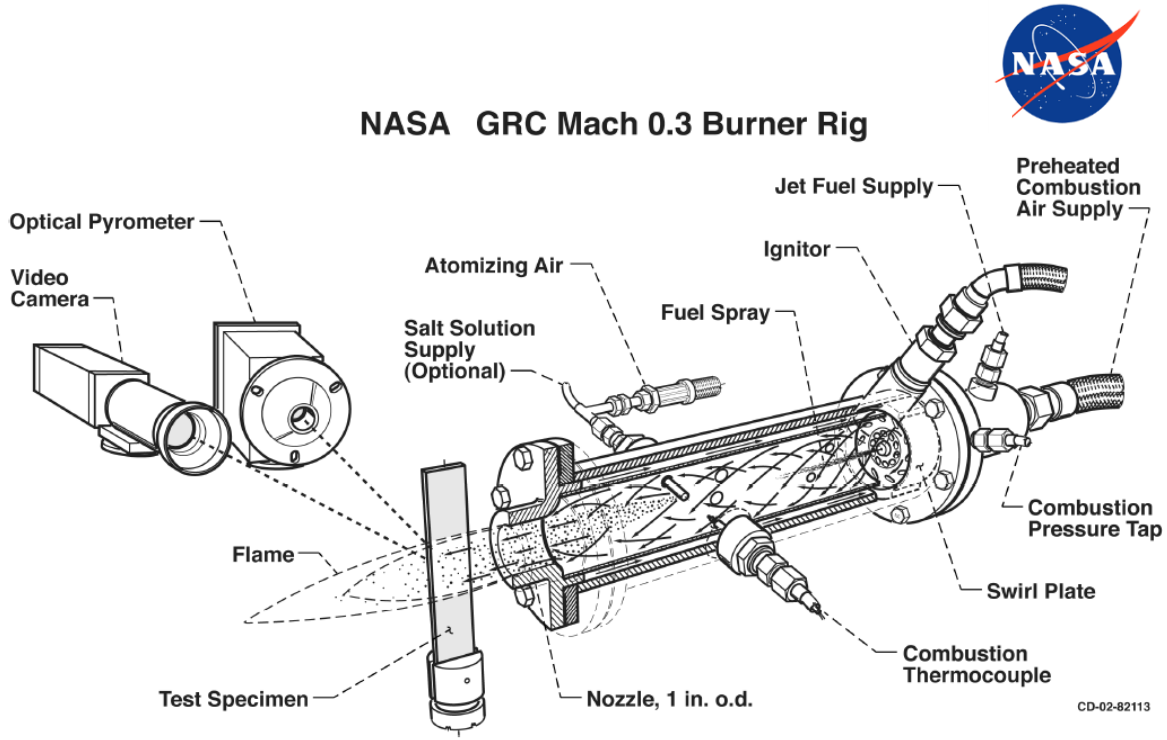


Figure 1.—Mach 0.3 burner rig cross-sectional schematic.

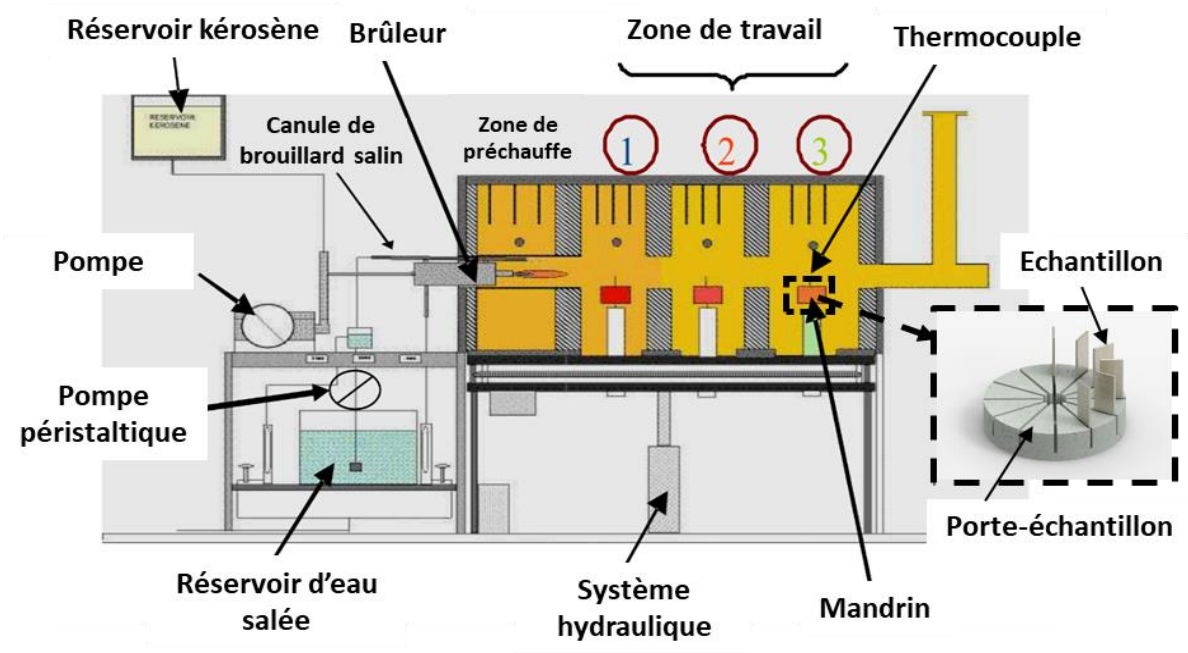
Banc brûleur à grande vitesse de gaz de la NASA : Mach 0,3 soit 100 m/s, 360 km/h (HVBR) [1]

[1] D. Fox et al, NASA report, 2011

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques



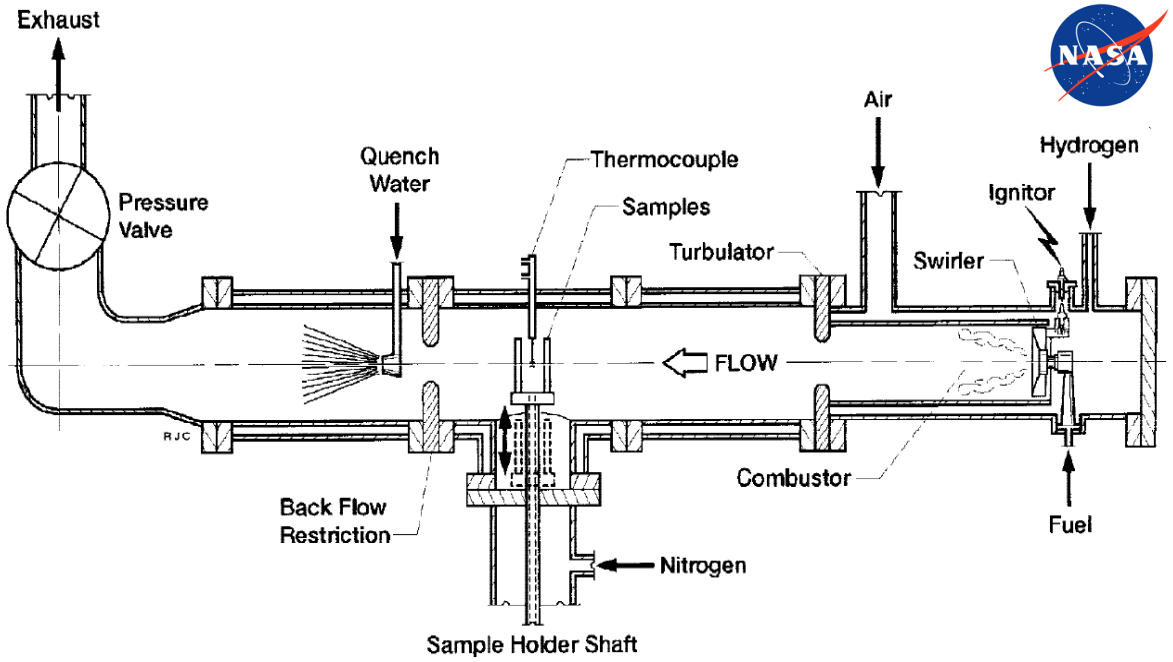
[1] Banc brûleur kérosène 3-zones de Safran Helicopter Engines (Bordes), schéma Safran HE

[1] Thèse Sanviemvongsak 2020, INPT

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques



Banc brûleur à grande pression et grand flux de gaz de la NASA (15 bar max, HPBR) [1]

[1] Smialek, European Ceramic Society, 2017

TYPES DE BANCS DESTINÉS AUX ESSAIS DE CORROSION CHAUDE

Six différents bancs d'essai de corrosion chaude ont été recensés :

- Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée
- Banc brûleur à gaz sans atmosphère contrôlée utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à grand flux de gaz avec injection de produits corrosifs/érosifs utilisé pour des essais de choc et cyclage thermique - *High velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée - *Low velocity burner rig*
- Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – *High pressure burner rig*
- Banc de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive contrôlée et modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques

Sollicitations *dynamiques*

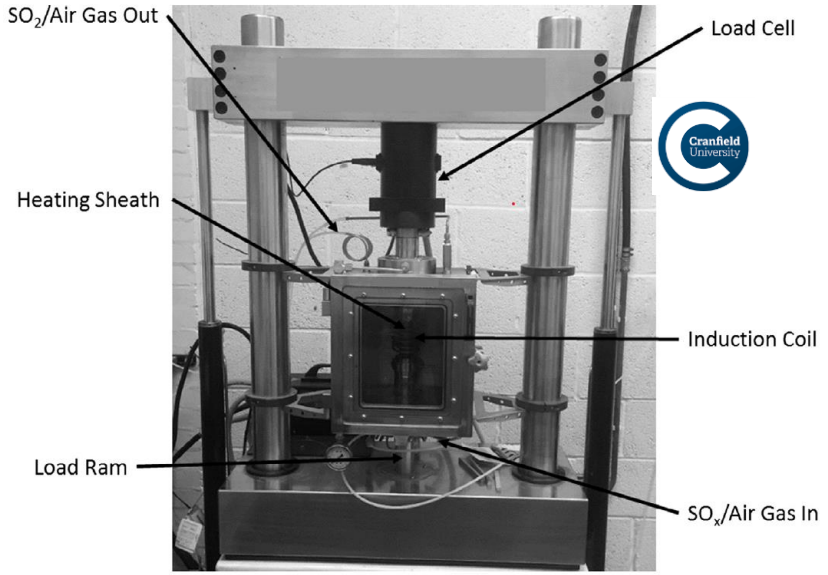
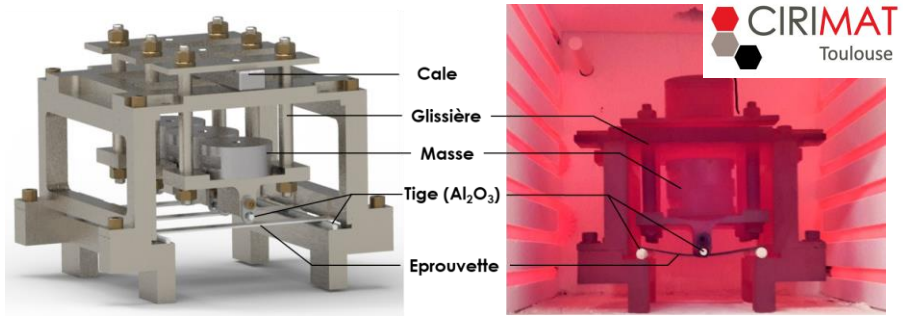


Fig. 1. Cranfield load controlled corrosion fatigue rig.

Cellule de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive (Type 2) [1]

Sollicitations *statiques*



Module de flexion à haute température [2]

[1] Brooking et al, International Journal of Fatigue, 2018 ; [2] Thèse Sanviemvongsak 2020, INPT

BILAN BANC DE CORROSION CHAUDE

	International								France					Objectif
	NASA (US)	NLR (NL)	KAUST-GE (SA-US)	Alstom (CH)	Cranfield (UK)	Jülich (DE)	Virginia (US)	Pittsburg (US)	Safran HE	Institut P'	Veolia	IJL	ICAR-CM2T	IRT-M2P
Banc brûleur	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	**x**
Four à résistance					x		x	x	x			x		**x**
Four à lampe														
Grande vitesse de gaz (> 100 m/s)	x	x		x		x				x				
Faible vitesse de gaz (< 5 m/s)			x		x		x	x	x		x	x	x	**x**
Atmosphère contrôlée	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x		**x**
Atmosphère de corrosion chaude versatile														**x**
Dépôt in-situ d'agents corrosifs issus des combustibles	x	x	x		x		x		x		x		x	**x**
Pression contrôlée (> 5 bar)			x											
Cyclage thermique	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	**x**
Chargement dynamique										x				**x**
Chargement statique					x					x				**x**
Grand volume d'échantillons testés / essai (> 6 échantillons)			x		x		x		x				x	**x**
Gradient d'exposition (épaisseur pièce)	x	x		x		x				x	x			**x**
Choc thermique	x	x		x		x				x				
Intégration de capteurs de suivi (autre que le suivi de température)	x		x			x				x			x	**x**
Coût utilisation (essai et consommable)	+++	+++	+++	+	++	++	++	+	+++	++++		+	+++	**+++**
Coût banc d'essai	++++	++++	++++	++	+++	++	+++	+	+++	++++		+	+++	**++++**
Coût banc d'essai chiffré (€)								≈10k		≈1,5 M		≈10k		**?**

Module 1 : Banc de corrosion chaude

Système de changement de brûleur

Gaz naturel — D — Brûleur GN

Kérosène/Biofuel — D — Brûleur K/B

T **Chambre 1.1 de combustion et de mélange** — *avec résistances*

D

T **Chambre 1.2 Corrosion Type 1 800°C – 900°C** — *avec résistances*

T **Chambre 1.3 Corrosion Type 2 500°C – 700°C** — *avec résistances*

T Système de cyclage thermique hermétique

T Système de cyclage thermique hermétique

Air comprimé — D

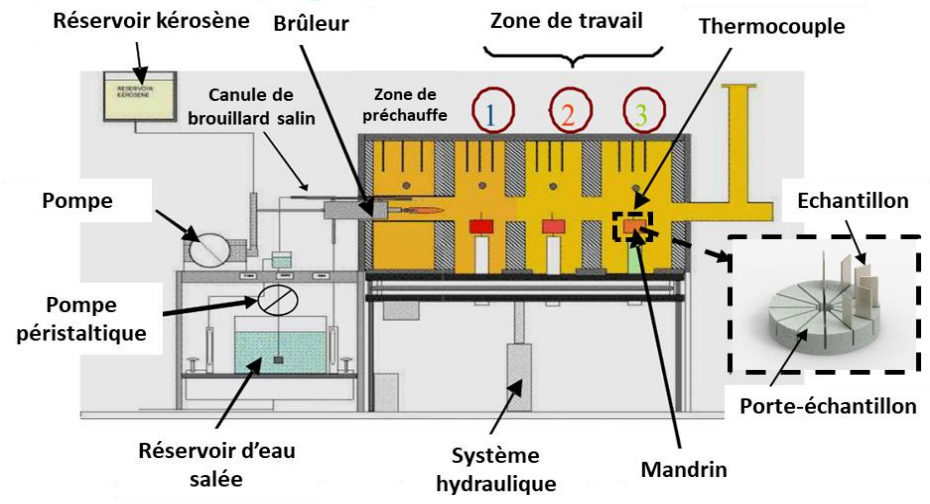
Eau/Lait de chaux — D

Chambre 1.4 de traitement des gaz

- Système de piégeage voie humide
- Système de décantage
- Système de filtrage
- Cheminée

D : Débitmètre
T : Thermocouple
— : Air chaud
— : Air froid

SAFRAN



VEOLIA

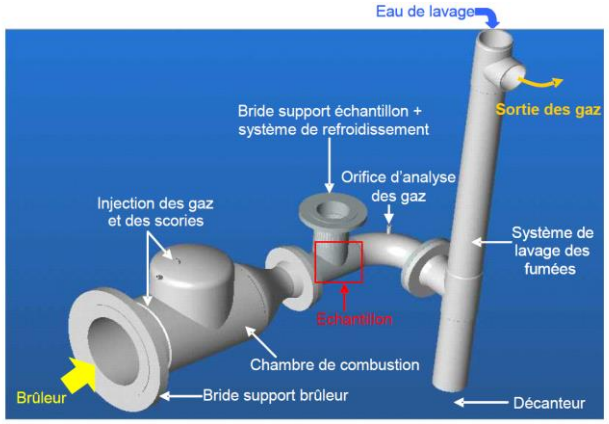


Figure 2 : Schéma du corps du pilote en acier inoxydable 316 L.

Module 1 : Banc de corrosion chaude

Système de changement de brûleur

Gaz naturel — D — Brûleur GN

Kérosène/Biofuel — D — Brûleur K/B

T **Chambre 1.1 de combustion et de mélange** — *avec résistances*

D

T **Chambre 1.2 Corrosion Type 1 800°C – 900°C** — *avec résistances*

T **Chambre 1.3 Corrosion Type 2 500°C – 700°C** — *avec résistances*

T Système de cyclage thermique hermétique

T Système de cyclage thermique hermétique

Eau/Lait de chaux

D

Chambre 1.4 de traitement des gaz

- Système de piégeage voie humide
- Système de décantage
- Système de filtrage
- Cheminée

D

Air comprimé

D : Débitmètre
T : Thermocouple
— : Air chaud
— : Air froid

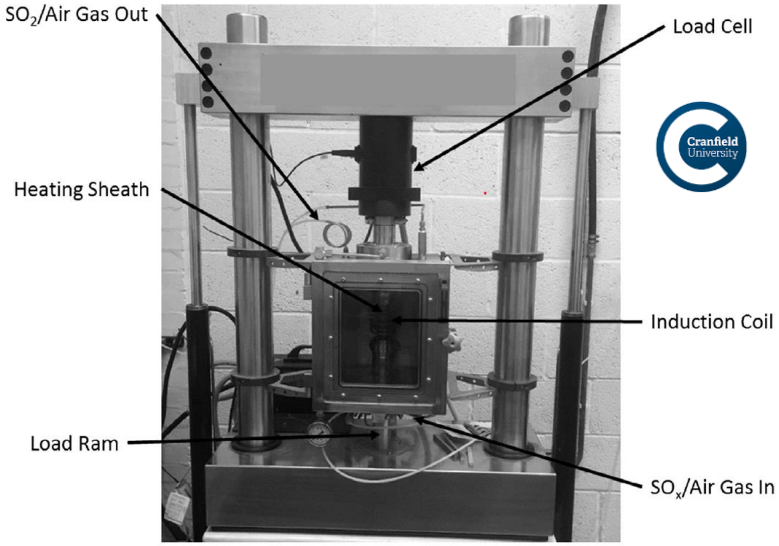


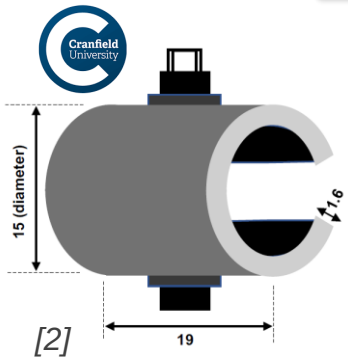
Fig. 1. Cranfield load controlled corrosion fatigue rig. [1]

T **Chambre 2 Fatigue-Corrosion 500°C – 900 °C**

Induction

Système sollicitation mécanique dynamique

Module 2 : Banc de fatigue-corrosion chaude

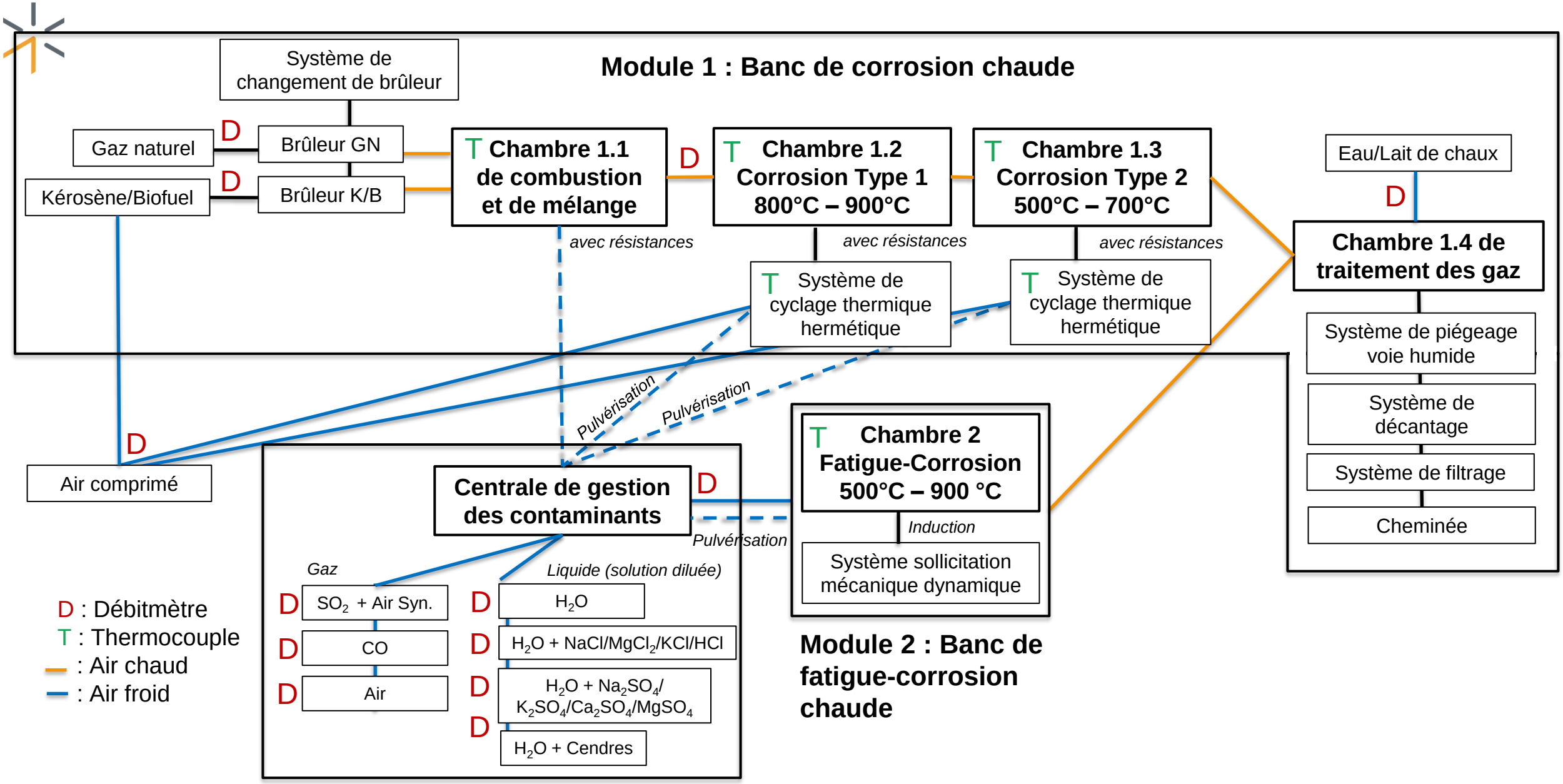


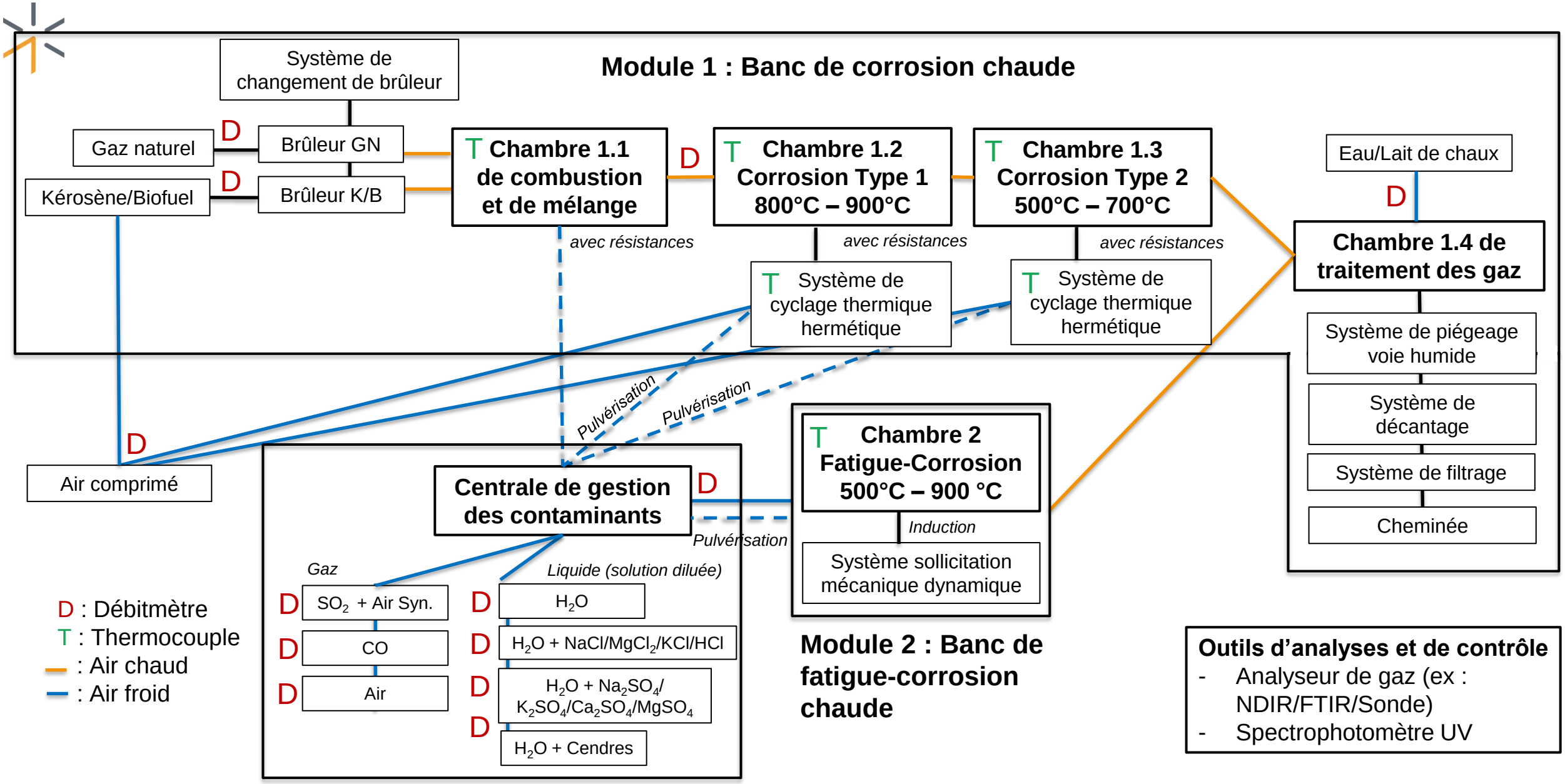
[2]



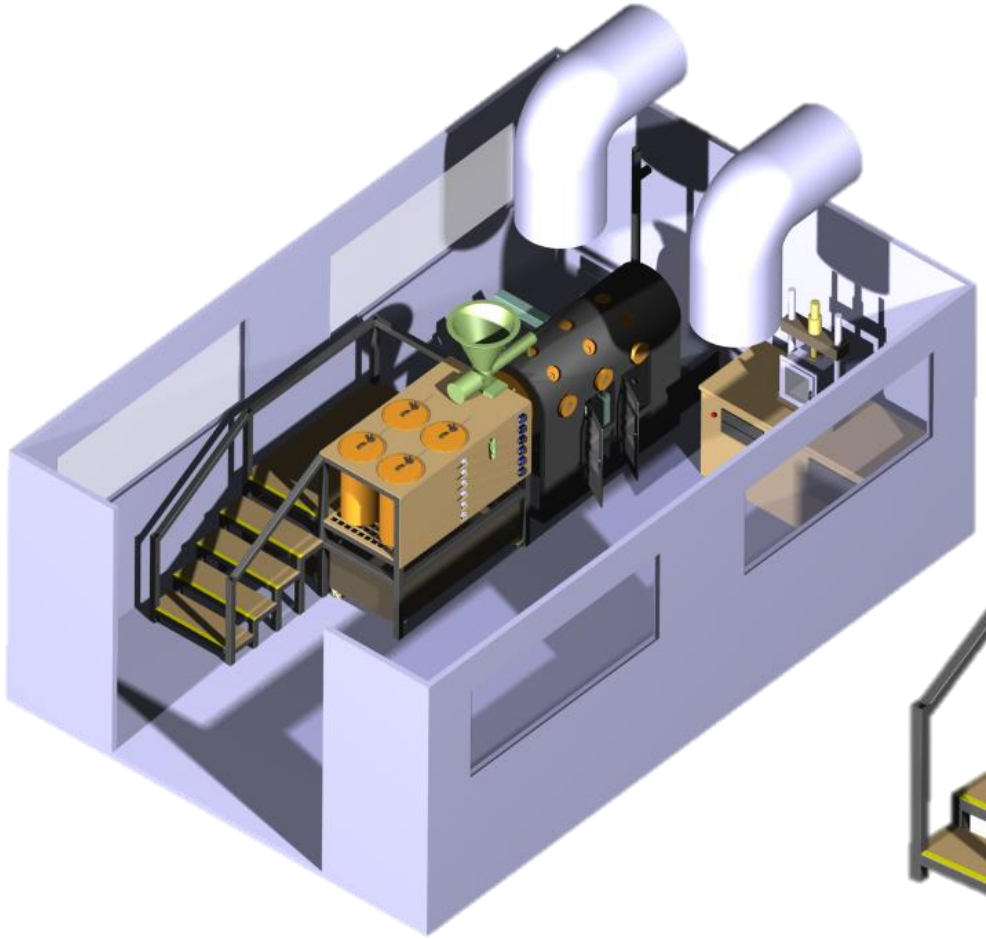
[3]

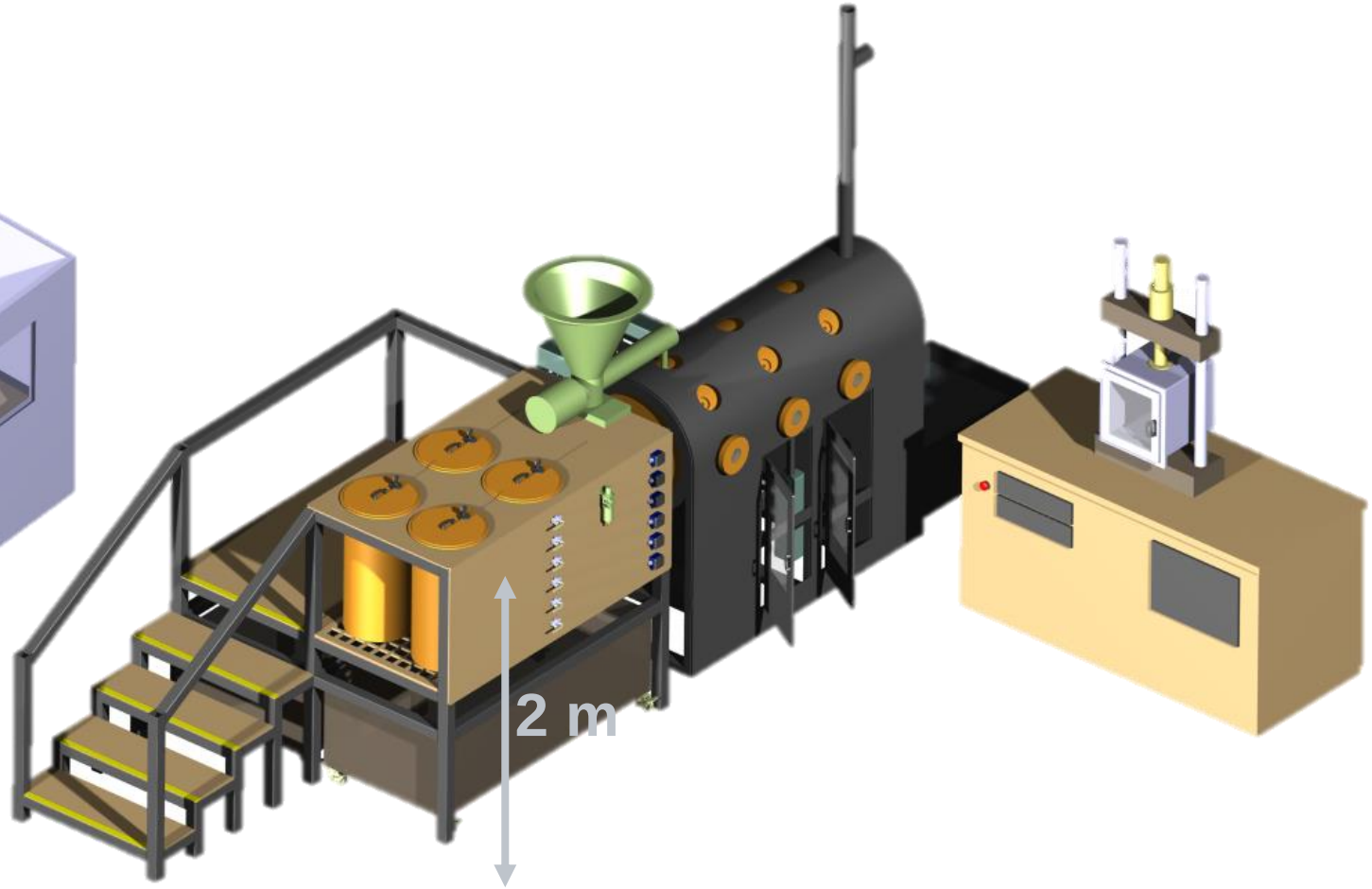
[1] Brooking et al, International Journal of Fatigue, 2018 ; [2] Chapman et al, Oxidation of Metal, 2021; [3] Thèse Sanviemvongsak 2020, INPT


Module 1 : Banc de corrosion chaude
Système de changement de brûleur
Gaz naturel
Kérosène/Biofuel
Brûleur GN
Brûleur K/B
T Chambre 1.1 de combustion et de mélange
T Chambre 1.2 Corrosion Type 1 800°C – 900°C
T Chambre 1.3 Corrosion Type 2 500°C – 700°C
avec résistances
avec résistances
avec résistances
T Système de cyclage thermique hermétique
T Système de cyclage thermique hermétique
Eau/Lait de chaux
Chambre 1.4 de traitement des gaz
Système de piégeage voie humide
Système de décantage
Système de filtrage
Cheminée
Air comprimé
Pulvérisation
Pulvérisation
Centrale de gestion des contaminants
Pulvérisation
T Chambre 2 Fatigue-Corrosion 500°C – 900 °C
Induction
Système sollicitation mécanique dynamique
Gaz
Liquide (solution diluée)
SO2 + Air Syn.
CO
Air
H2O
H2O + NaCl/MgCl2/KCl/HCl
H2O + Na2SO4/ K2SO4/Ca2SO4/MgSO4
H2O + Cendres
D : Débitmètre
T : Thermocouple
: Air chaud
: Air froid
Module 2 : Banc de fatigue-corrosion chaude
Module 3 : Centrale de gestion des contaminants


Module 1 : Banc de corrosion chaude
Système de changement de brûleur
Gaz naturel
Kérosène/Biofuel
Brûleur GN
Brûleur K/B
T Chambre 1.1 de combustion et de mélange
T Chambre 1.2 Corrosion Type 1 800°C – 900°C
T Chambre 1.3 Corrosion Type 2 500°C – 700°C
avec résistances
avec résistances
avec résistances
T Système de cyclage thermique hermétique
T Système de cyclage thermique hermétique
Eau/Lait de chaux
Chambre 1.4 de traitement des gaz
Système de piégeage voie humide
Système de décantage
Système de filtrage
Cheminée
Air comprimé
Pulvérisation
Pulvérisation
Centrale de gestion des contaminants
Pulvérisation
T Chambre 2 Fatigue-Corrosion 500°C – 900 °C
Induction
Système sollicitation mécanique dynamique
Gaz
Liquide (solution diluée)
SO2 + Air Syn.
CO
Air
H2O
H2O + NaCl/MgCl2/KCl/HCl
H2O + Na2SO4/ K2SO4/Ca2SO4/MgSO4
H2O + Cendres
D : Débitmètre
T : Thermocouple
: Air chaud
: Air froid
Module 2 : Banc de fatigue-corrosion chaude
Module 3 : Centrale de gestion des contaminants
Outils d'analyses et de contrôle
- Analyseur de gaz (ex : NDIR/FTIR/Sonde)
- Spectrophotomètre UV

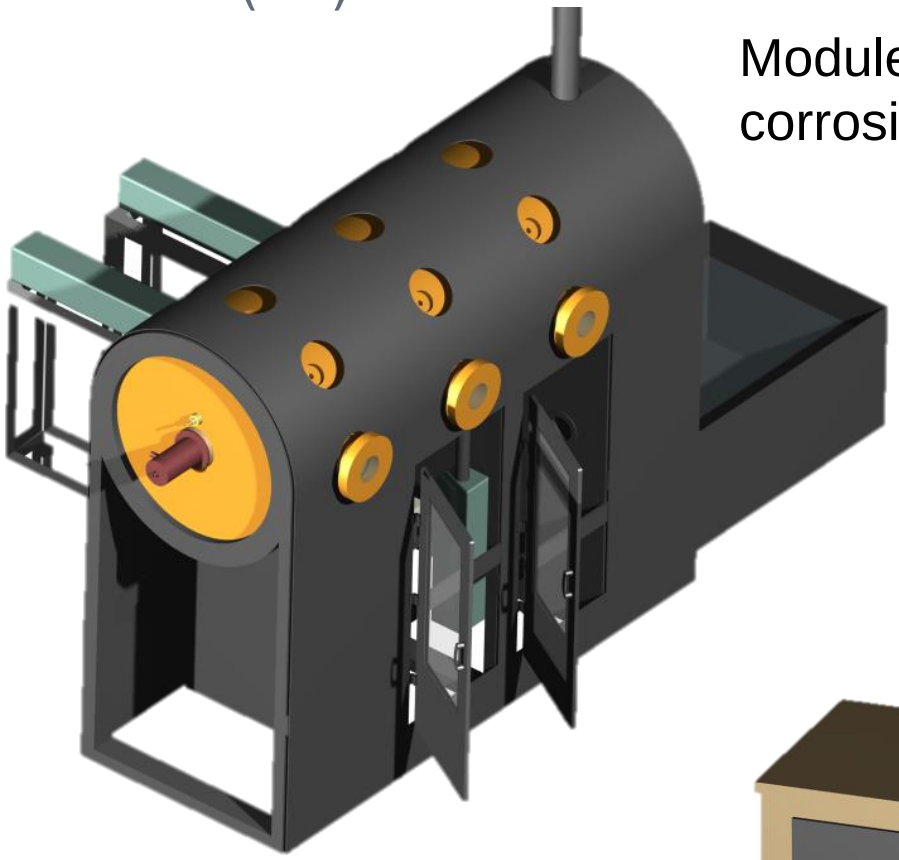
CONCEPT « HOT CORROSION BENCH » (V1)



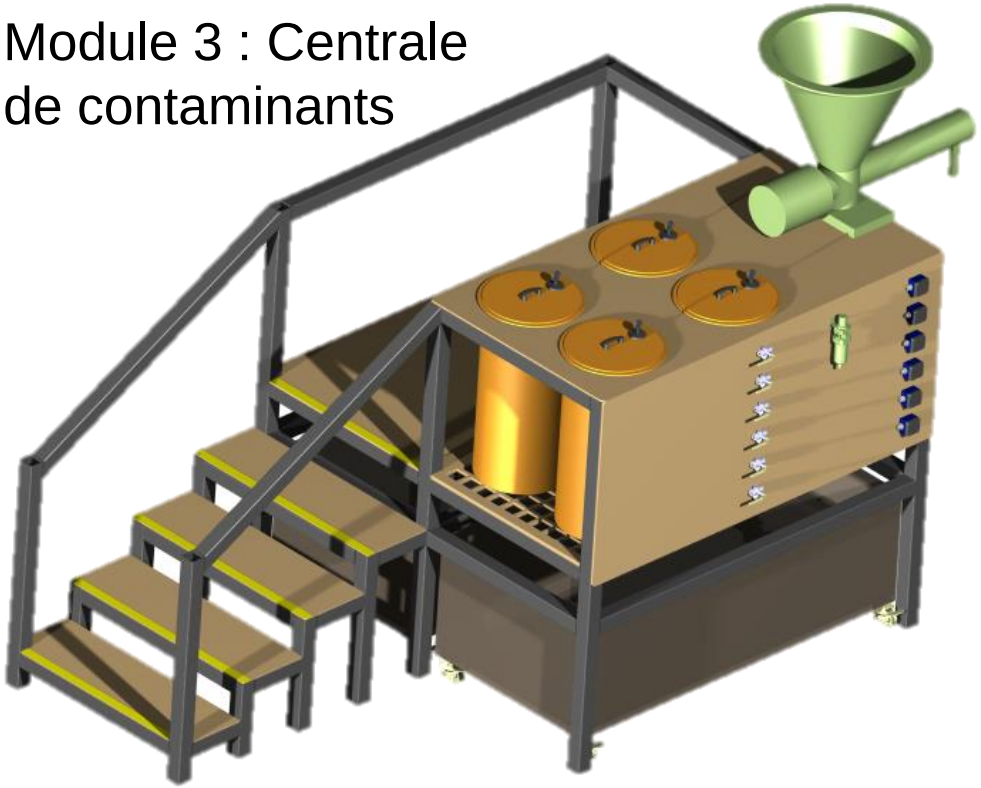


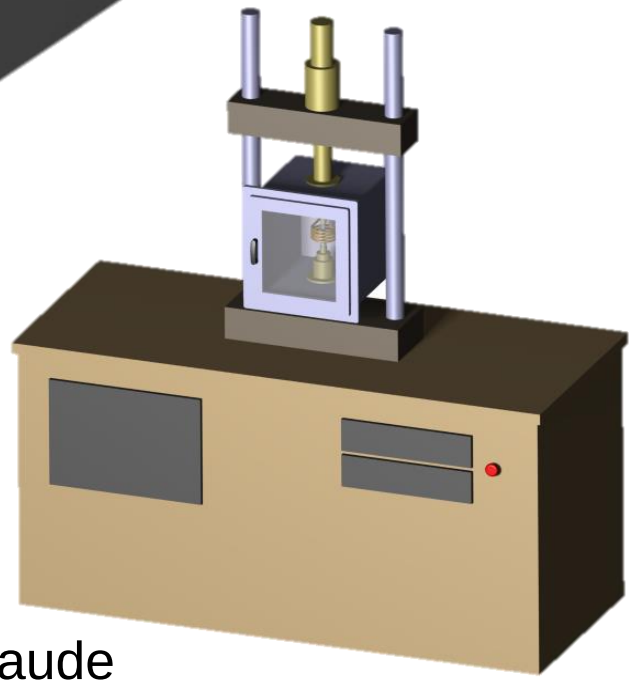
CONCEPT « HOT CORROSION BENCH » (V1)

Module 1 : Banc de corrosion chaude



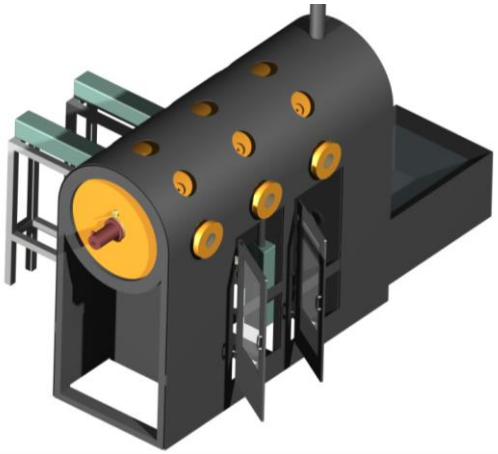
Module 3 : Centrale de contaminants

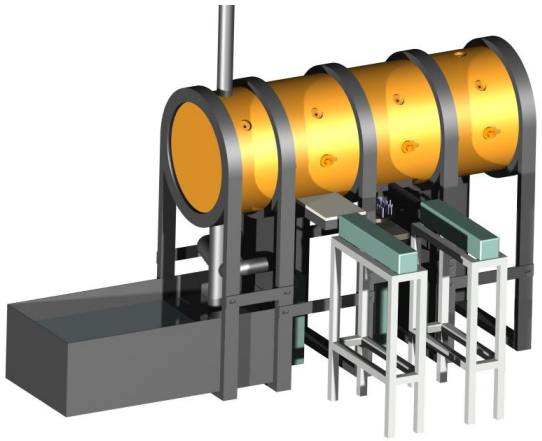


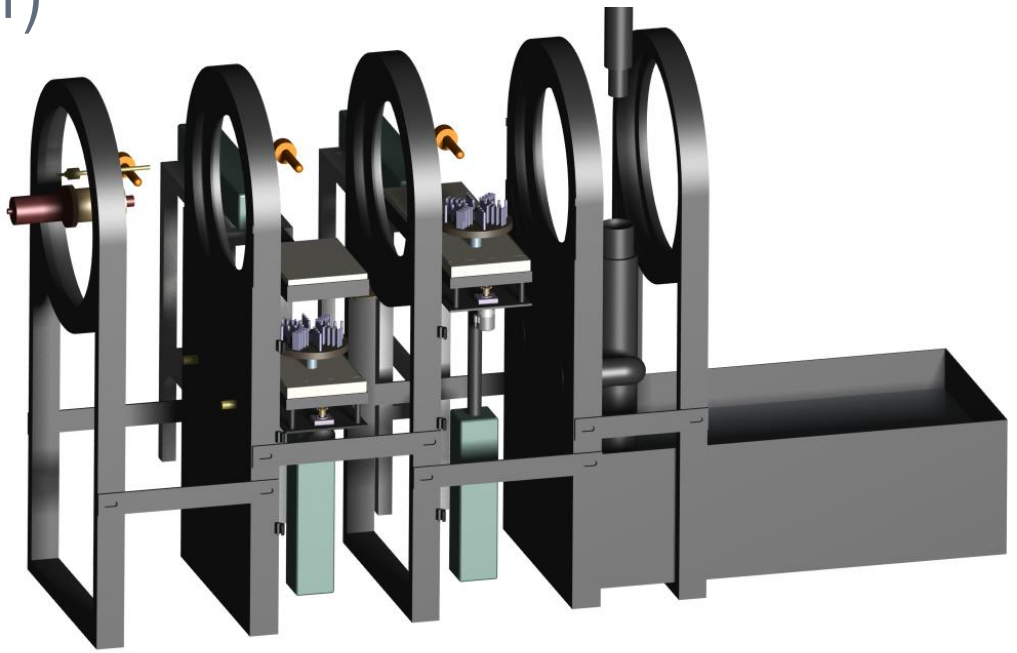


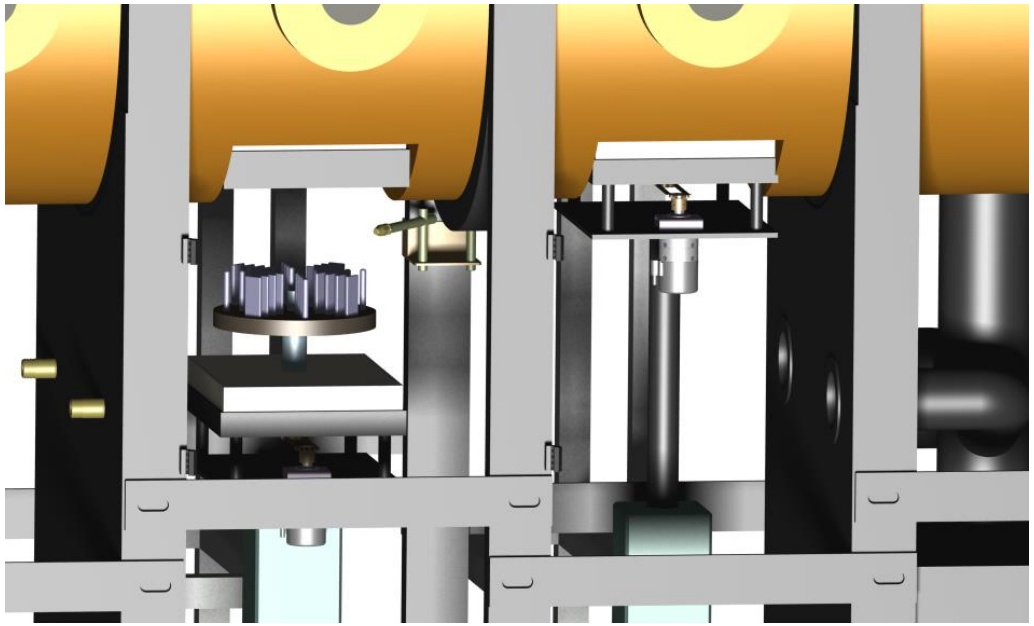
Module 2 : Banc de fatigue-corrosion chaude

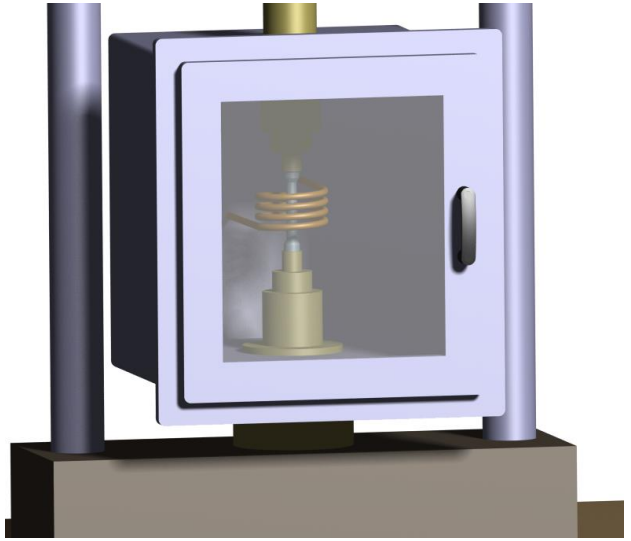
CONCEPT « HOT CORROSION BENCH » (V1)











BILAN

Projet EF_CORRHT

- Etat des lieux des bancs brûleurs et de bancs d'essais destinés à la corrosion chaude ✓
- Identification des besoins actuels non couverts ✓
- Capitalisation des retours d'expérience des industriels et des académiques ✓
- Identification des futurs partenaires et budgétisation ⟳
- Rédaction du cahier des charges avec analyses fonctionnelles techniques pour l'élaboration de la plateforme ⟳
- Démarcher les potentiels fabricants de bancs d'essais

IRT M2P

Institut de Recherche Technologique

Matériaux Métallurgie et Procédés

Merci pour votre attention.

tom.sanviemvongsak@irt-m2p.fr
06 03 53 73 85

irt-m2p.fr

9 EXPERTISES MATÉRIAUX & PROCÉDÉS



POUDRES MÉTALLIQUES



FONDERIE AVANCÉE



ANALYSE DU CYCLE DE VIE & RECYCLAGE



TRAITEMENTS DE SURFACE MÉCANIQUES



TRAITEMENTS & REVÊTEMENTS DE SURFACE



TRAITEMENTS THERMIQUES & THERMOCHIMIQUES



MATÉRIAUX COMPOSITES



ASSEMBLAGES MULTI-MATÉRIAUX



ANALYSES & CARACTÉRISATION