



# CORROSION À CHAUD DES MATÉRIAUX : PLATEFORME REPRÉSENTATIVE DES CONDITIONS INDUSTRIELLES POUR LE DÉVELOPPEMENT DES MATÉRIAUX DU FUTUR

11/05/2023 | Colloque « Les matériaux utilisés en condition extrême »  
Pascal Lamesle – IRT M2P



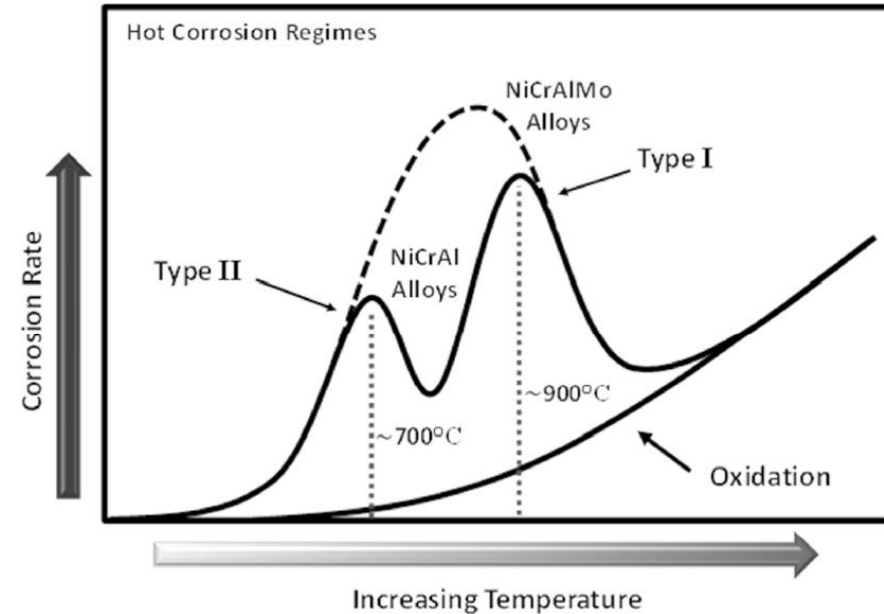
**IRT**  
**M2P**

Institut de Recherche  
Technologique

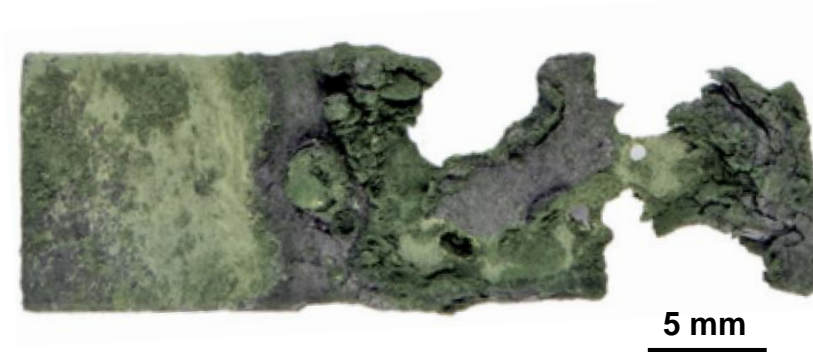
Matériaux Métallurgie  
et Procédés

# UN PEU D'HISTOIRE

- Les premiers cas de corrosion chaude dans les turbines aéronautiques ont été recensés dans les années 50 [1].
- La notion de corrosion chaude, « **hot corrosion** », a commencé à être utilisée dans les années 70 [2].
- 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) [2]

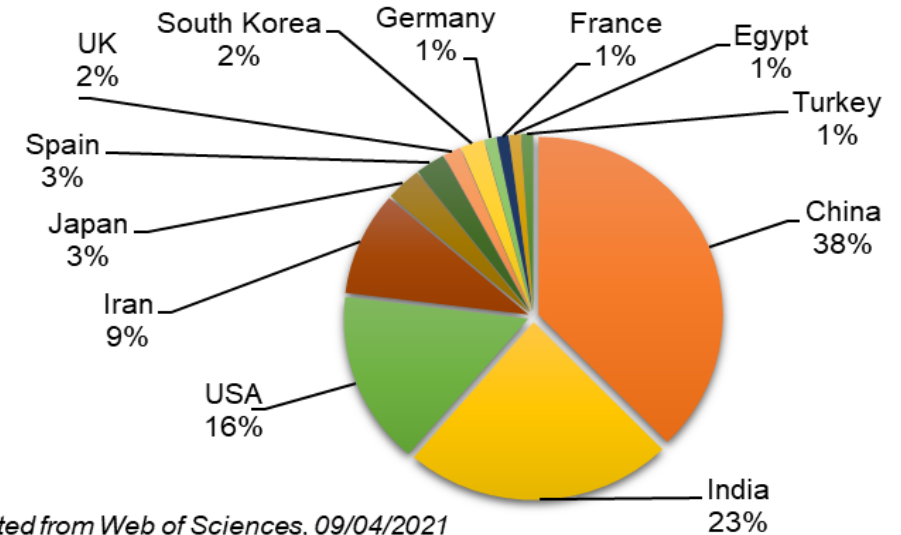


Exemple d'éprouvette C1023 (NiCrAlMo) corrodée (type 1) 235 h à 900 °C [3]

## 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.

## Breakdown of the 200 most cited publications whose title mentions "Hot Corrosion"



Data extracted from Web of Sciences, 09/04/2021

- **Fédération** : Fédérer une « communauté » de recherche industriel et académique autour de problématiques communes : Corrosion, Oxydation et mécanique à haute température.
- **Partage** : Monter des projets qui répondent à des besoins partagés.
- **Innovation** : Développer une plateforme innovante et unique, avec des outils spécifiques, qui répond à des besoins actuels non-couverts.
- **Expertise scientifique** : Mettre en commun l'expertise des partenaires industriels nationaux et des chercheurs académiques reconnus (IJL, EEIGM, CIRIMAT, LASIE, UTC, Mines St Etienne...) ainsi que des centres techniques (CEA, ONERA, ICAR-M2P...) afin d'avoir un rayonnement national et international
- **Data** : Générer une base de données commune autour de la corrosion à haute température et exploiter ces bases de données en Intelligence Artificielle (IA)

## Amélioration de l'existant

- Améliorer la robustesse des modèles d'oxydation haute température
- Augmenter les TRL / être en capacité de tester des éprouvettes plus représentatives (taille et quantité pour analyses statistiques)
- Fiabiliser les référentiels d'essais de corrosion chaude
  - Fiabilise les connaissance du comportement des matériaux clés
  - Augmenter le nombre d'essais et caractérisations associées (pas de moyen connus pour essais accélérés, hors des existants dédiés à la qualification des équipements sortant de production dans des conditions d'utilisation actuelles)

## Besoins non couverts

- Acquérir des connaissances précises des environnements complexes (moteurs aéro, production d'énergie nucléaire et solaire, incinérateur, conversion de la biomasse...)
- Impacts sur les propriétés mécaniques => études couplées de la résistance mécanique et de la résistance chimique
- Besoin d'un outil de développement pour étudier les conditions d'utilisations futures (augmentation des températures d'exploitation, nouvelles atmosphères, nouveaux contaminants (sels fondus), nouvelles conditions de vitesse et de pression, érosion, gradient d'exposition )
- Modélisation des cinétiques de corrosion HT et d'oxydation intergranulaire (actuellement que oxydation uniforme qui ne représente que quelques % des cas de corrosion industrielle) avec effet de la composition des alliages, du mode d'élaboration (Forgeage, FA....)
- Effet des carburants alternatifs
- Développer des solutions innovantes par Design d'Alliages, revêtements
  - Aujourd'hui, le paramètre « corrosion » n'est pas pris en compte dans les approches de design numérique d'alliages => besoin de nombreux essais expérimentaux pour identifier les paramètres pertinents
  - Mettre en évidence l'influence du couplage mécanique / corrosion

## Etude de faisabilité CORRHT

---

*Développement d'une plateforme de corrosion chaude :  
État de l'Art*

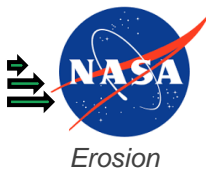
*« Quels moyens d'essais sont disponibles actuellement  
pour réaliser des essais de corrosion chaude ? »*





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

Dans les laboratoires\* de recherche et les industries\*

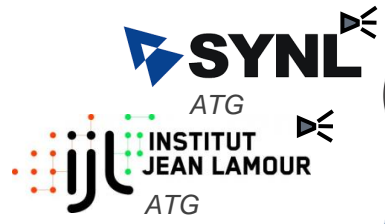


Cellule de force  
Micromètre optique  
Pas de corrosion chaude

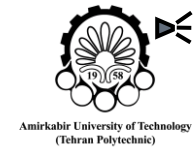
Atmosphère contrôlée



Grand volume d'essai



CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O  
Pas de corrosion chaude



Brûleur



Dépôt par immersion

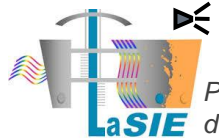


O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O  
Pas de corrosion chaude

Four tubulaire



Essais sur composite organique  
Pas de corrosion chaude



Possibilité de dépôt par sublimation

Cas particuliers REP/Sel fondu



Dépôt par trempage



- Couplage Méca/Corrosion
- Dépôt en amont par pulvérisation
- Gradient d'exposition sur l'épaisseur des ech.
- Gradient d'exposition dans l'enceinte du four

Atmosphère non contrôlée

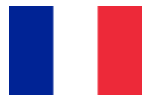
\*liste non-exhaustive





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

Dans les laboratoires\* de recherche et les industries en France



Atmosphère contrôlée

Seules 6 infrastructures possèdent des bancs destinés aux essais de corrosion chaude.

**INSTITUT P**

Cellule de force  
Micromètre optique  
Pas de corrosion chaude

**ijl** INSTITUT JEAN LAMOUR ATG

**VEOLIA**

**IMT Mines Albi-Carmaux**  
Ecole Mines-Télécom

CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O  
Pas de corrosion chaude

**MINES ParisTech**

Four à lampe ou inducteur  
Pas de corrosion chaude

Brûleur

**SAFRAN**

**CIRIMAT**  
Toulouse

O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O  
Pas de corrosion chaude

Four tubulaire

**LCTS**

**INSA ROUEN NORMANDIE**

Essais sur composite organique  
Pas de corrosion chaude

**ICAR-CM2T**  
Ingénierie Matière

**LaSIE**

Possibilité de dépôt par sublimation

Cas particuliers REP/Sel fondu



**ONERA**  
THE FRENCH AEROSPACE LAB

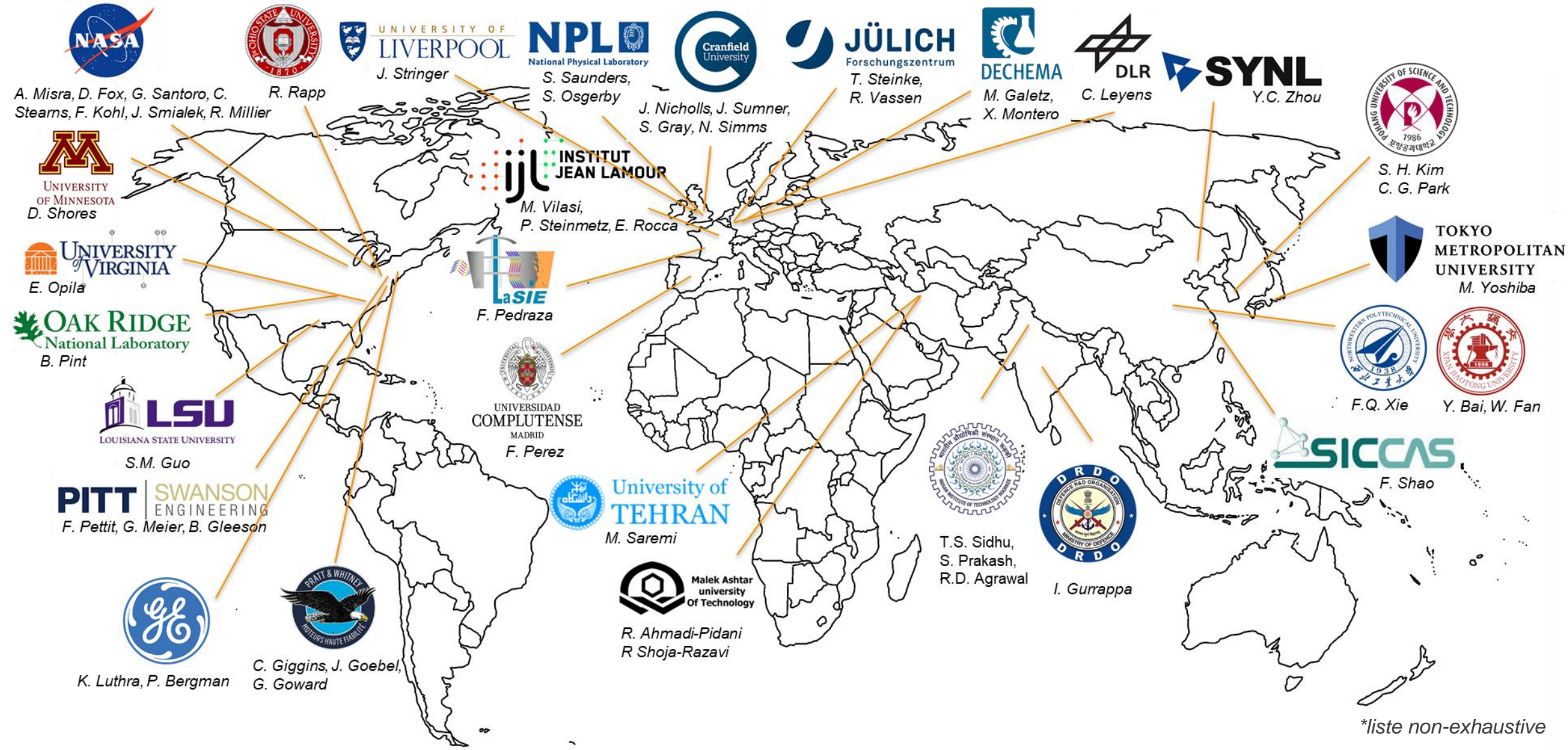
Atmosphère non contrôlée

- 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



# PRINCIPAUX LABORATOIRES DÉDIÉS À LA RECHERCHE SUR LA CORROSION CHAUDE



\*liste non-exhaustive

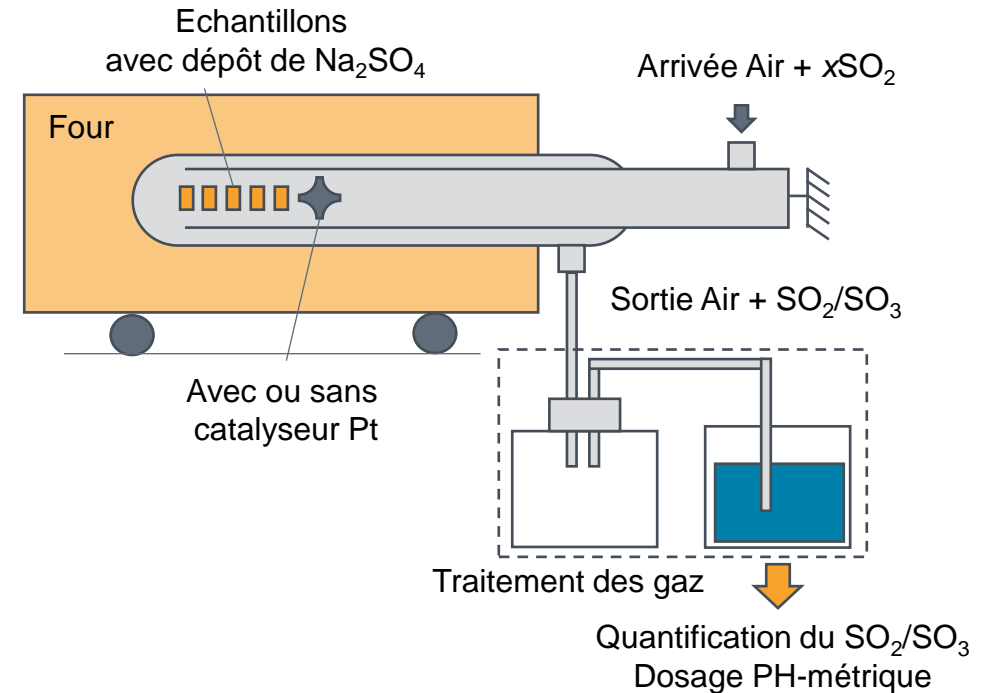
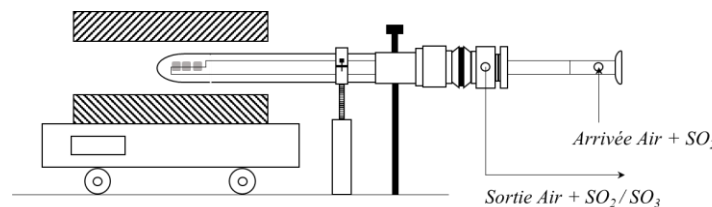
## 1. Four tubulaire avec/sans atmosphère contrôlée

### Avantages

- Peu coûteux et peu contraignant à mettre en place
- Atmosphère contrôlée (Air,  $O_2$  ;  $H_2O$  ;  $SO_2$  ; CO ;  $CO_2$  ;  $N_2$  ; Ar)
- Possibilité de tester avec dépôt corrosif (pulvérisation/immersion/sublimation)
- Possibilité de cyclage thermique (système mécanique)
- Possibilité d'introduire un système de sollicitation mécanique statique

### Inconvénients

- Nécessite un dépôt préalable  
ex :  $NaCl$  ;  $Na_2SO_4$  ;  $K_2SO_4$  ;  $CaSO_4$
- Petits échantillons
- Pas de gradient d'exposition



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





# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

## 2. Banc brûleur à gaz destiné à des essais de cyclage et choc thermique sans atmosphère contrôlée

### Avantages

- Gradient d'exposition (face chauffée/face refroidie)
- Cyclage thermique à grande vitesse de chauffe et grande vitesse de refroidissement
- Possibilité de tester avec dépôt corrosif préalablement déposé
- Peu coûteux et peu contraignant à mettre en place

### Inconvénients

- Nécessite un dépôt préalable
- Atmosphère non contrôlée
- Peu d'échantillons testés par essai
- Forme des échantillons restreinte

ALSTOM



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

Banc brûleurs à gaz d'Alstom [1]

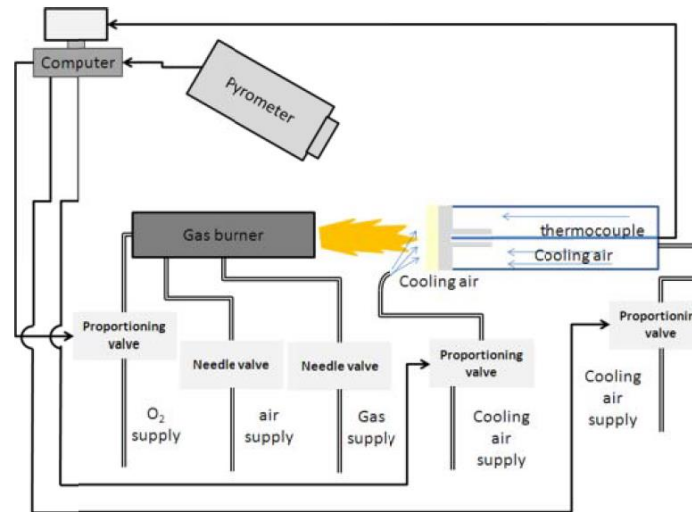
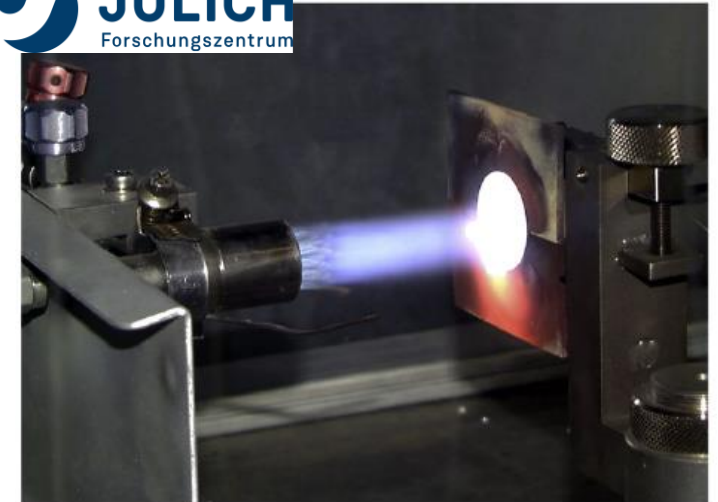


Figure 2. Schematic representation of the active temperature control system of the burner rig test.

JÜLICH  
Forschungszentrum



Banc brûleur à gaz de Jülich [2]



# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

## 3. Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) de cyclage et choc thermique avec injection de produits corrosifs et grande vitesse de gaz - High Velocity Burner Rig

### Avantages

- Maîtrise de l'injection **Fuel / Air / Agent érosif - corrosif**
- Cyclage thermique à grande vitesse de chauffe et de refroidissement
- Possibilité de gradient d'exposition (face chauffée/face refroidie)

### Inconvénients

- Peu d'échantillons testés par essai
- Pas de contrôle de la pression
- Grande consommation de kérosène
- Coût investissement
- Contraintes SSE

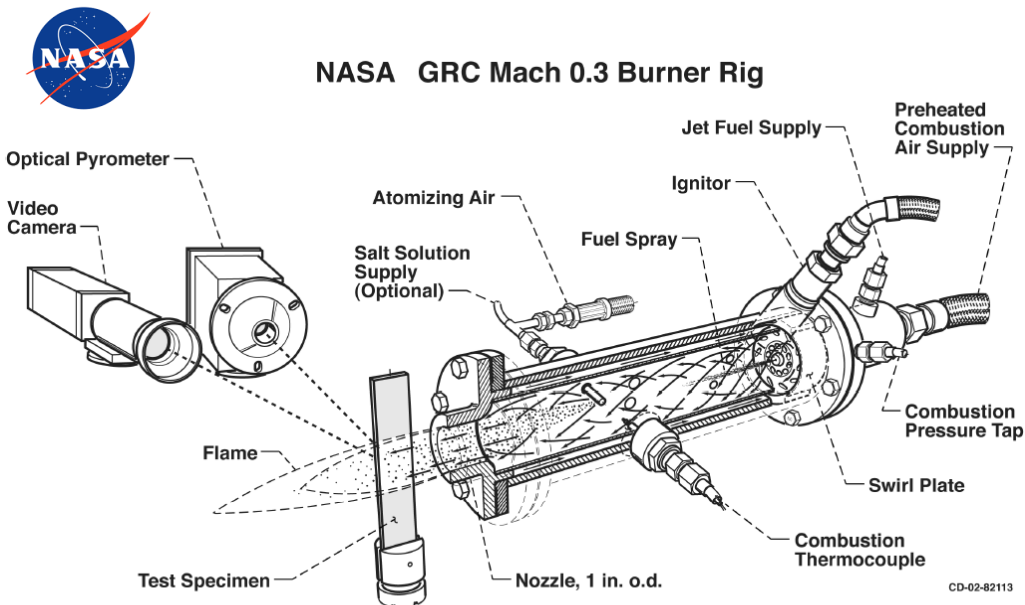
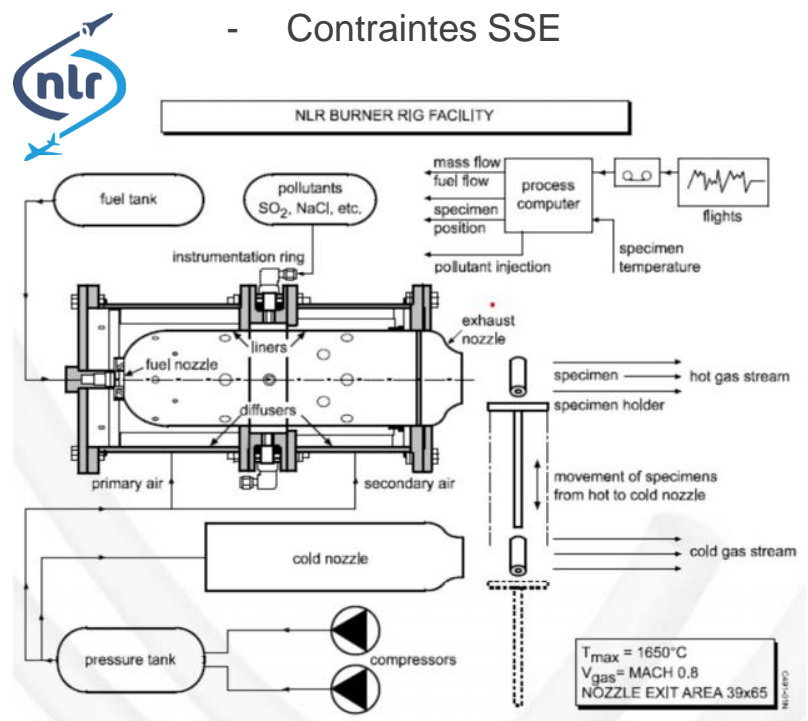
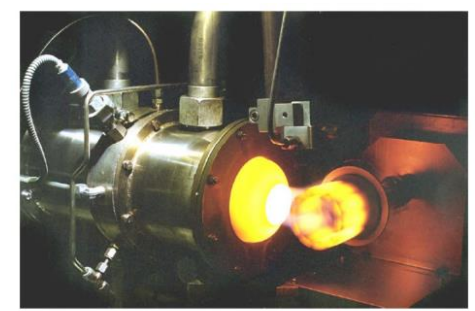


Figure 1.—Mach 0.3 burner rig cross-sectional schematic.

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



Banc brûleur à grande vitesse de gaz de la NLR : Mach 0,8 soit 265 m/s, 955 km/h (HVBR) [2]



[1] D. Fox et al, NASA report, 2011 ; [2] Wanhill et al, High Temperature Technology, 2016

# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

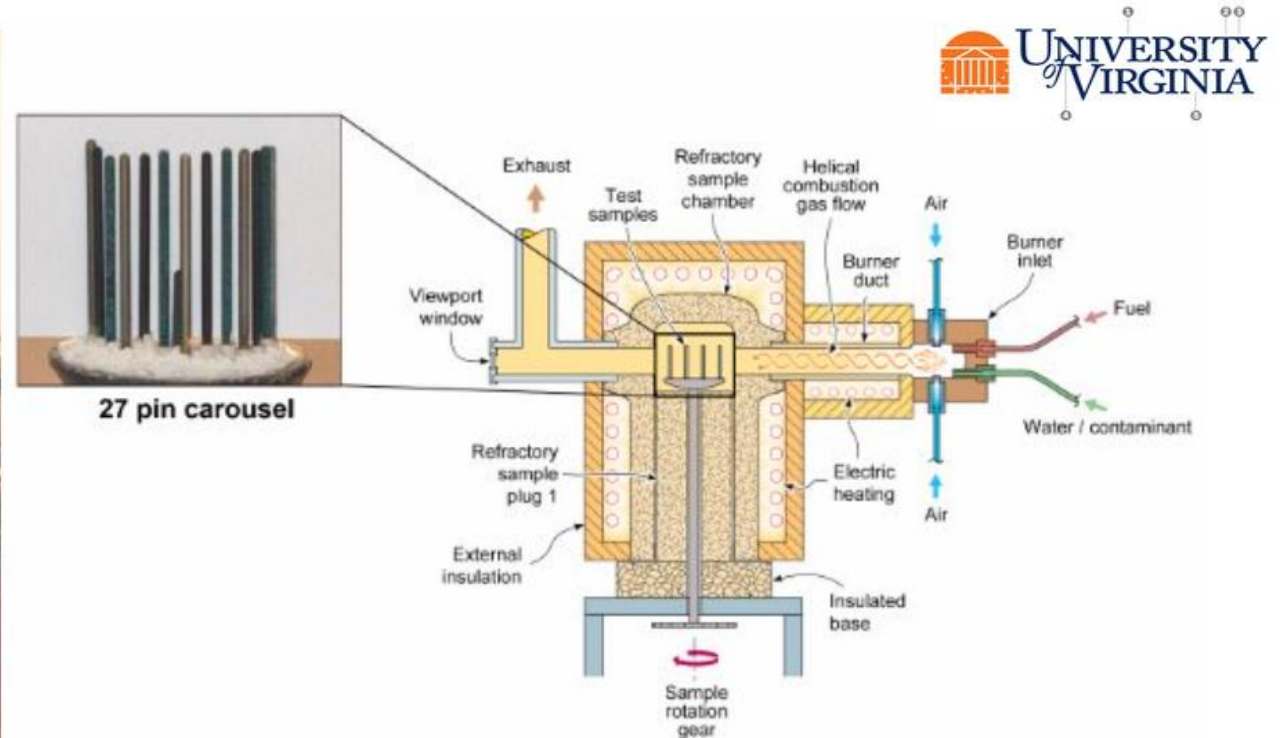
## 4. Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et basse pression sous atmosphère contrôlée – Low Velocity Burner Rig

### Avantages

- Atmosphère contrôlée
- Maîtrise de l'injection **Fuel** / **Air** / **Agent corrosif**
- Système de cyclage thermique
- Possibilité d'introduire un système de sollicitation mécanique statique

### Inconvénients

- Coûts investissement, consommables et entretien
- Pas de contrôle de la pression
- Contraintes SSE



Banc brûleur "Low velocity burner rig" (LVBR) de l'Université de Virginie [1]



# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

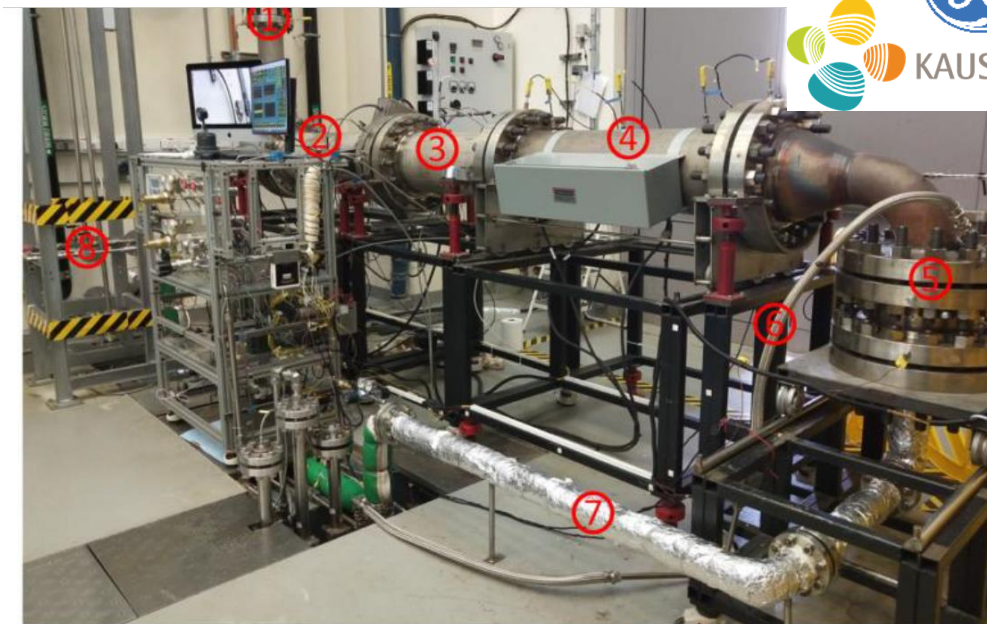
## 5. Banc brûleur à combustible liquide (kérosène ou fioul) à faible flux de gaz et haute pression sous atmosphère contrôlée – High Pressure Burner Rig

### Avantages

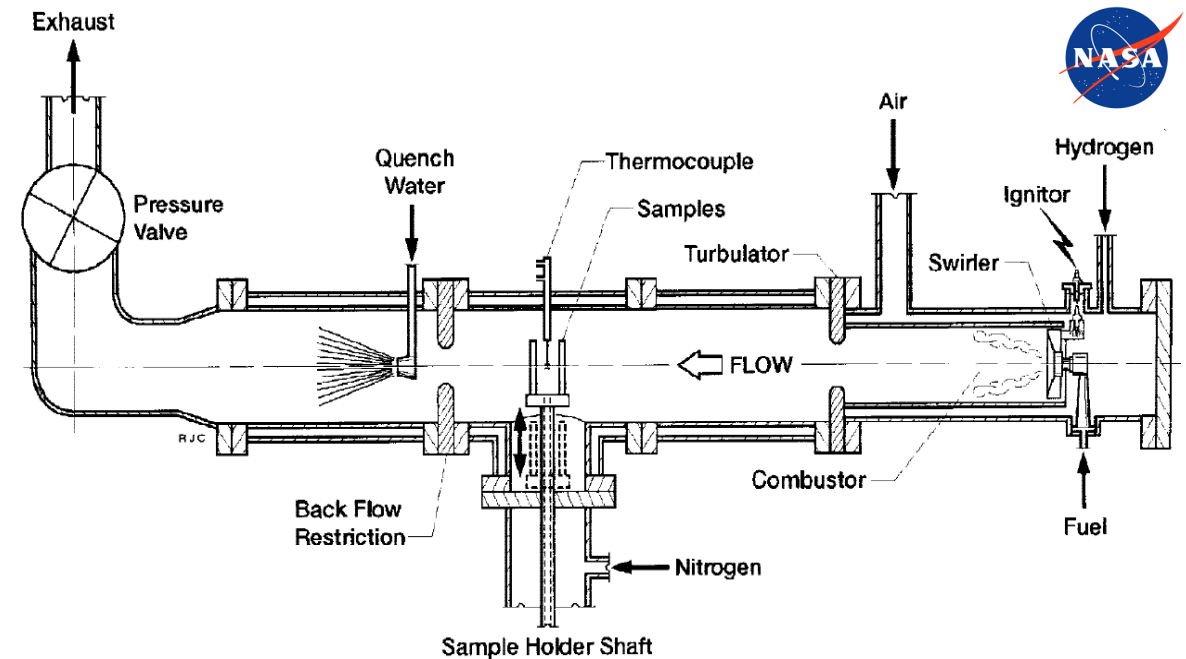
- Contrôle de l'atmosphère et de la pression (jusqu'à 15 bar)
- Possibilité de tester avec dépôt corrosif (pulvérisation)
- Possibilité de système de cyclage thermique
- Possibilité d'introduire un système de sollicitations mécaniques statiques

### Inconvénients

- Coûts d'investissement, des consommables et de
- Contraintes SSE



Banc brûleur fioul à grande pression et faible vitesse de gaz du laboratoire KAUST, codéveloppé avec GE (15 bar max, HPBR) [1]



Banc brûleur à grande pression et grand flux de gaz de la NASA (15 bar max, HPBR) [2]

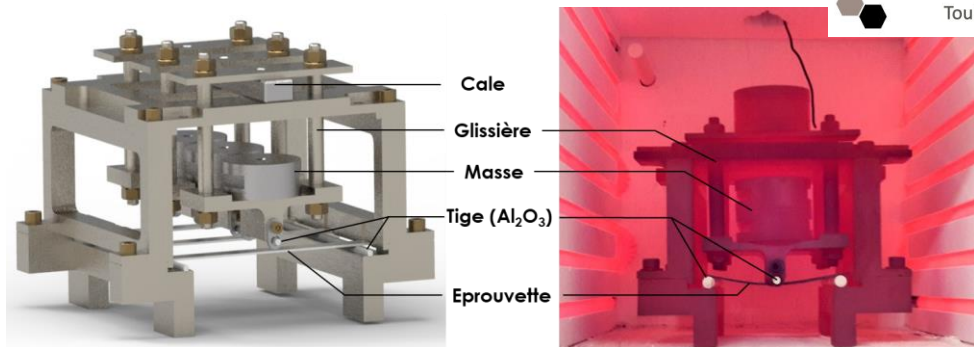




# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

## 6. Modules complémentaires de sollicitations mécaniques statiques et banc de Fatigue-Hot corrosion sous atmosphère contrôlée

### Module complémentaire - Sollicitations statiques



Module de flexion 3/4 pts à haute température [1]

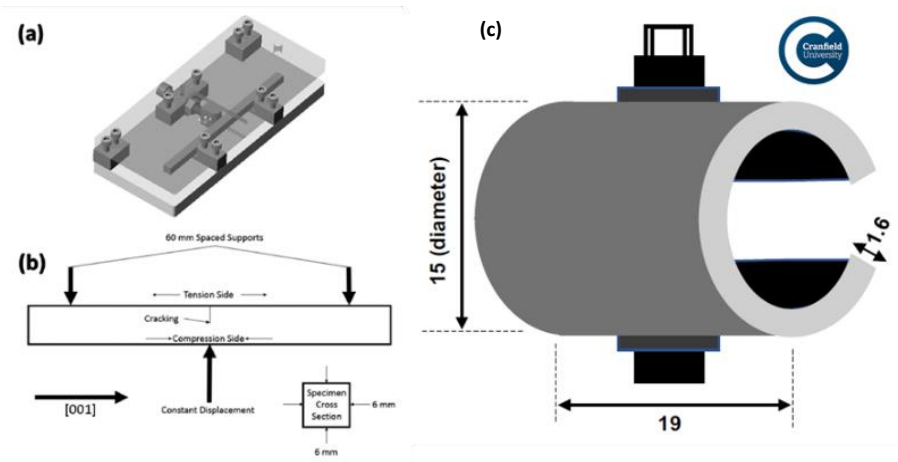


Fig. 1. (a) Specimen and jig mounting geometry (b) Three point bend test jig.

### Module de flexion 3 pts à haute température [2] et éprouvette « C-ring » [3]

[1] Thèse Sanviemvongsak 2020, INPT, 2020 ; [2] Brooking et al, Corrosion Sciences, 2020 ; [3] Champman et al, Oxidation of Metals, 2021 ; [4] Brooking et al, International Journal of Fatigue, 2018

### Sollicitations dynamiques sans banc-brûleur

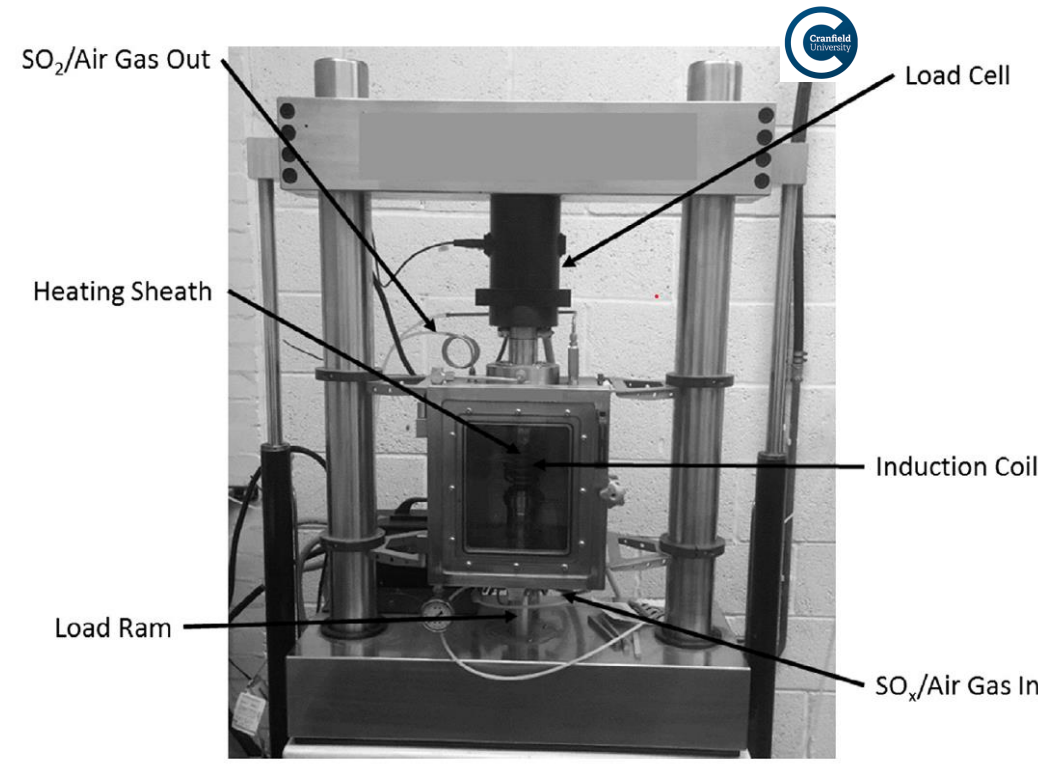


Fig. 1. Cranfield load controlled corrosion fatigue rig.

### Cellule de fatigue à haute température sous atmosphère corrosive (Type 2) [4]



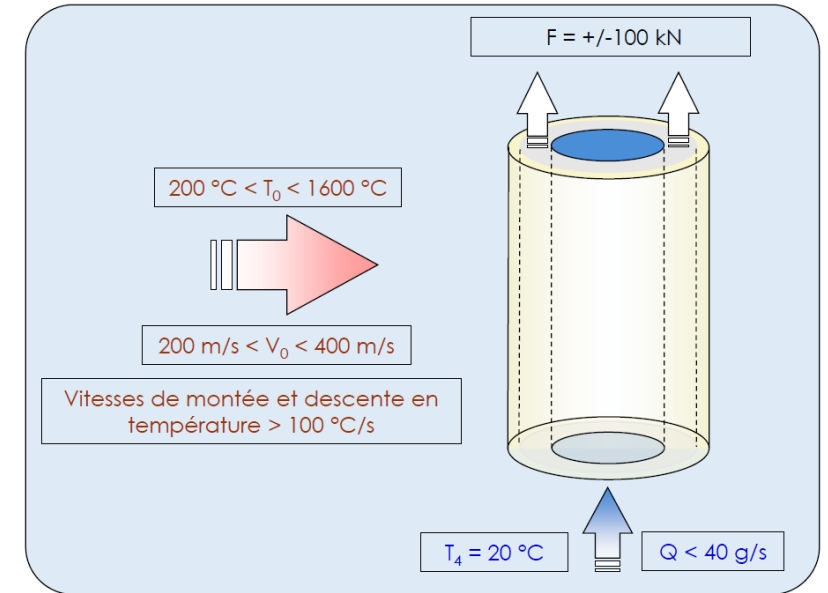
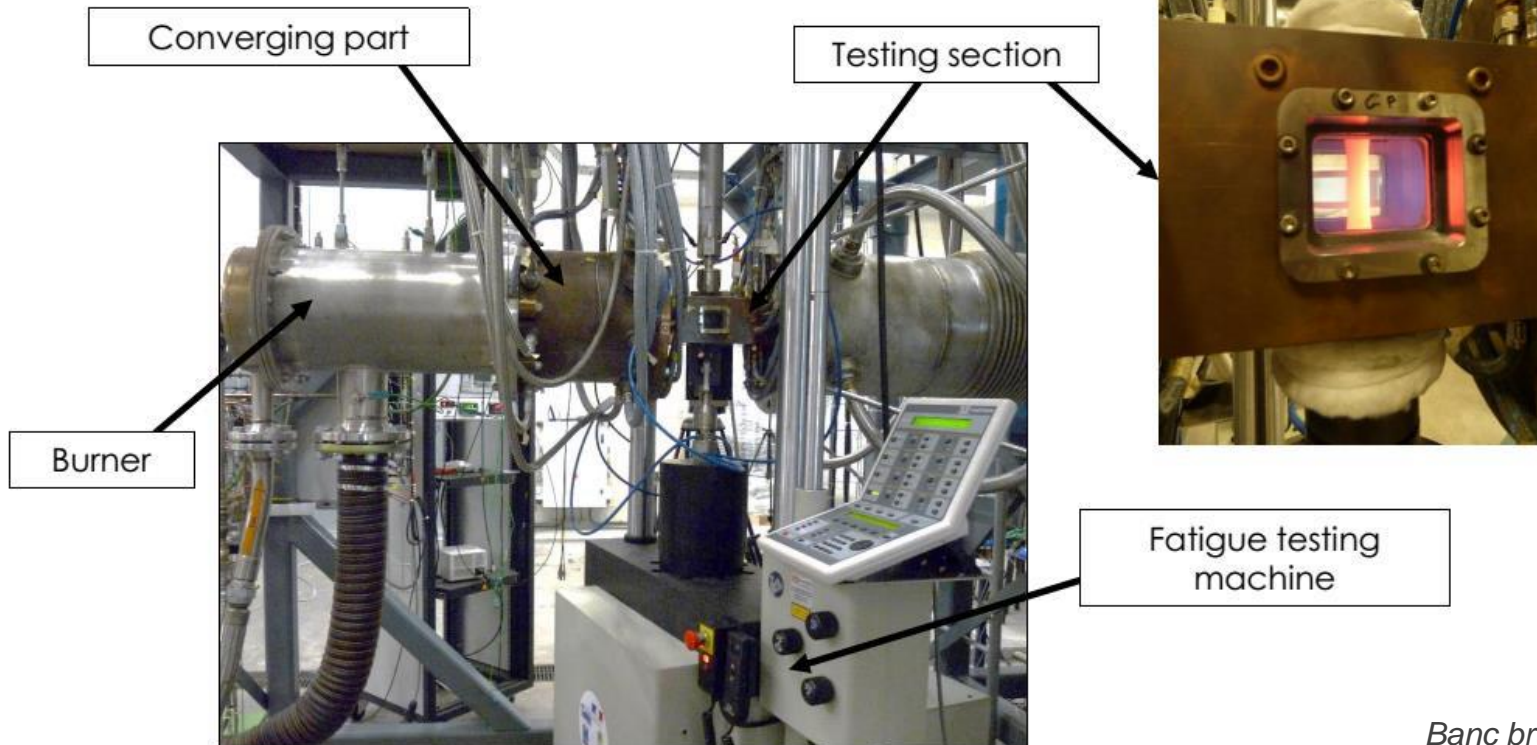
# LES DIFFÉRENTS TYPES DE BANCS BRÛLEURS ou BANCS D'ESSAIS DESTINÉS À LA CORROSION CHAUDE

## Systèmes de sollicitations mécaniques Dynamiques avec Banc brûleur Gaz de ville



Pyromètre  
Débitmètre  
Cellule de force  
Micromètre optique

### Description :



Gradient d'exposition

Banc brûleur MAATRE, Institut P' (Poitiers)



# BILAN BANC DE CORROSION CHAUDE

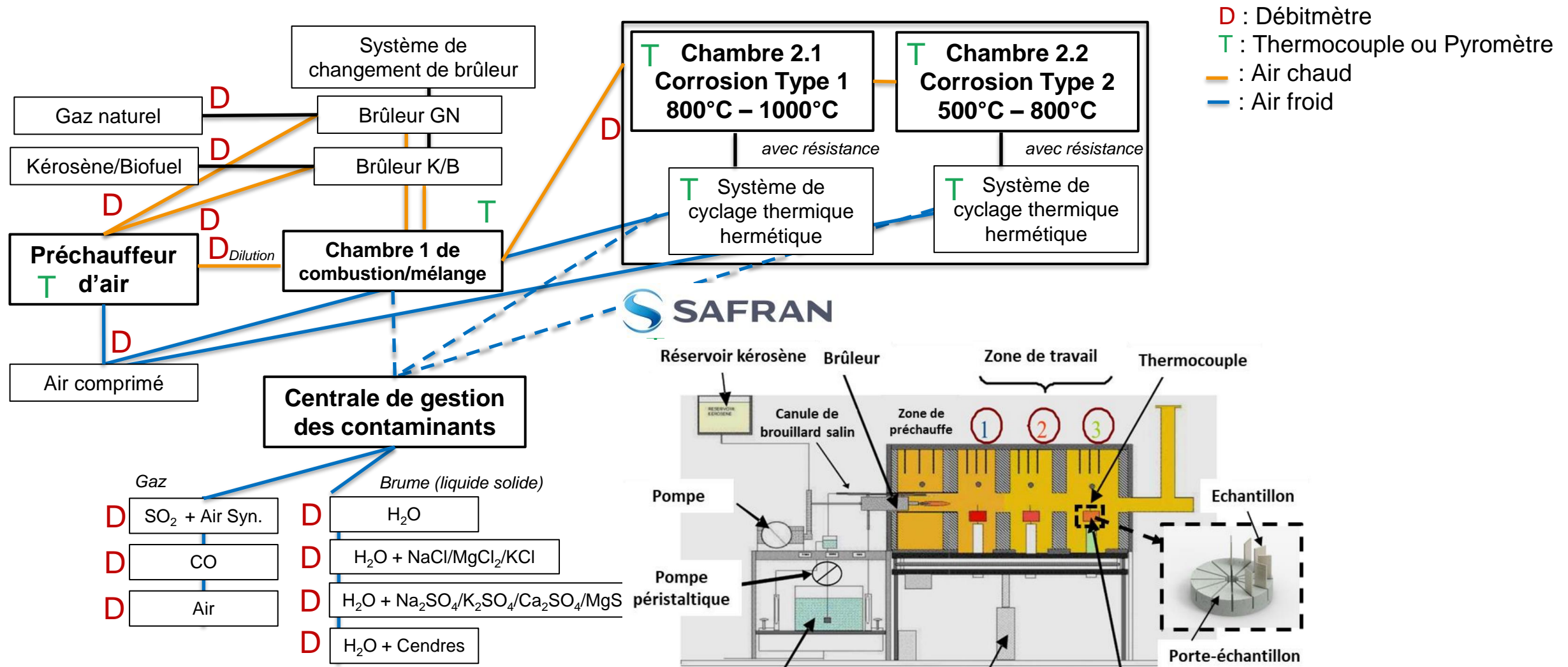
	International								France					Objectif
	NASA (US)	NLR (NL)	KAUST-GE (SA-US)	Alstom (CH)	Cranfield (UK)	Jülich (DE)	Virginia (US)	Pittsburg (US)	Safran HE	Institut P'	Veolia	IJL	ICAR-CM2T	IRT-M2P
Banc brûleur	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x
Four à résistance					x		x	x	x			x		x
Four à lampe														
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			
Choc thermique	x	x		x		x				x				
Intégration de capteurs de suivi (autre que le suivi de température)	x		x			x				x			x	
Coût utilisation (essai et consommable)	+++	+++	+++	+	++	++	++	+	+++	++++		+	+++	++
Coût banc d'essai	++++	++++	++++	++	+++	++	+++	+	+++	++++		+	+++	+++
Coût banc d'essai chiffré (€)								≈10k		≈1,5 M		≈10k		?

# Cahier des charges d'une plateforme complémentaires avec les moyens existants en France

---



# PROPOSITION DE BANC DE CORROSION CHAUDE (V1)







# PROPOSITION DE BANC DE CORROSION CHAUDE (V1)

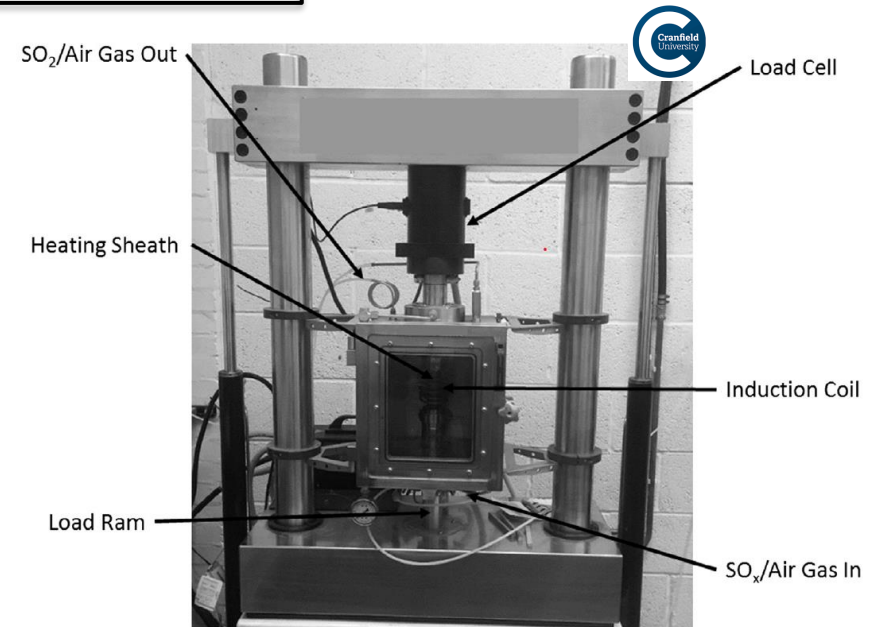
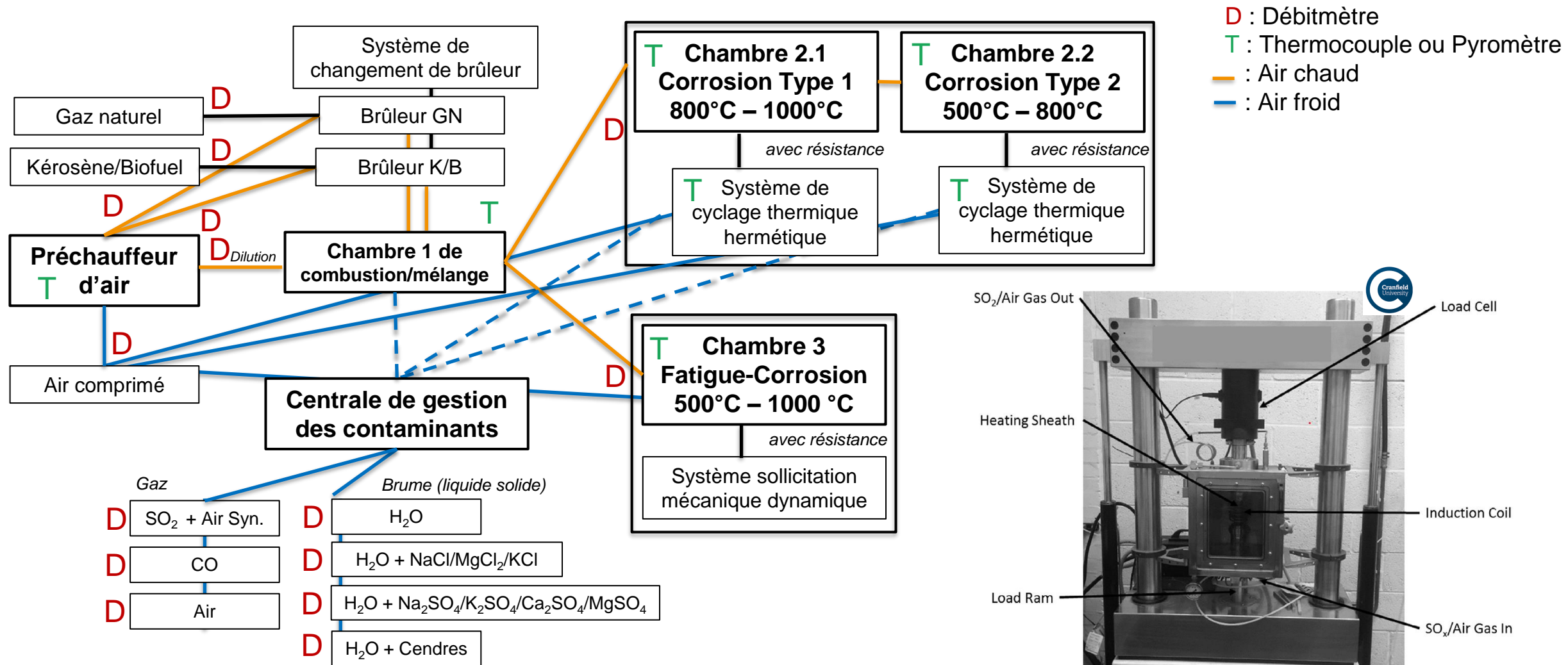
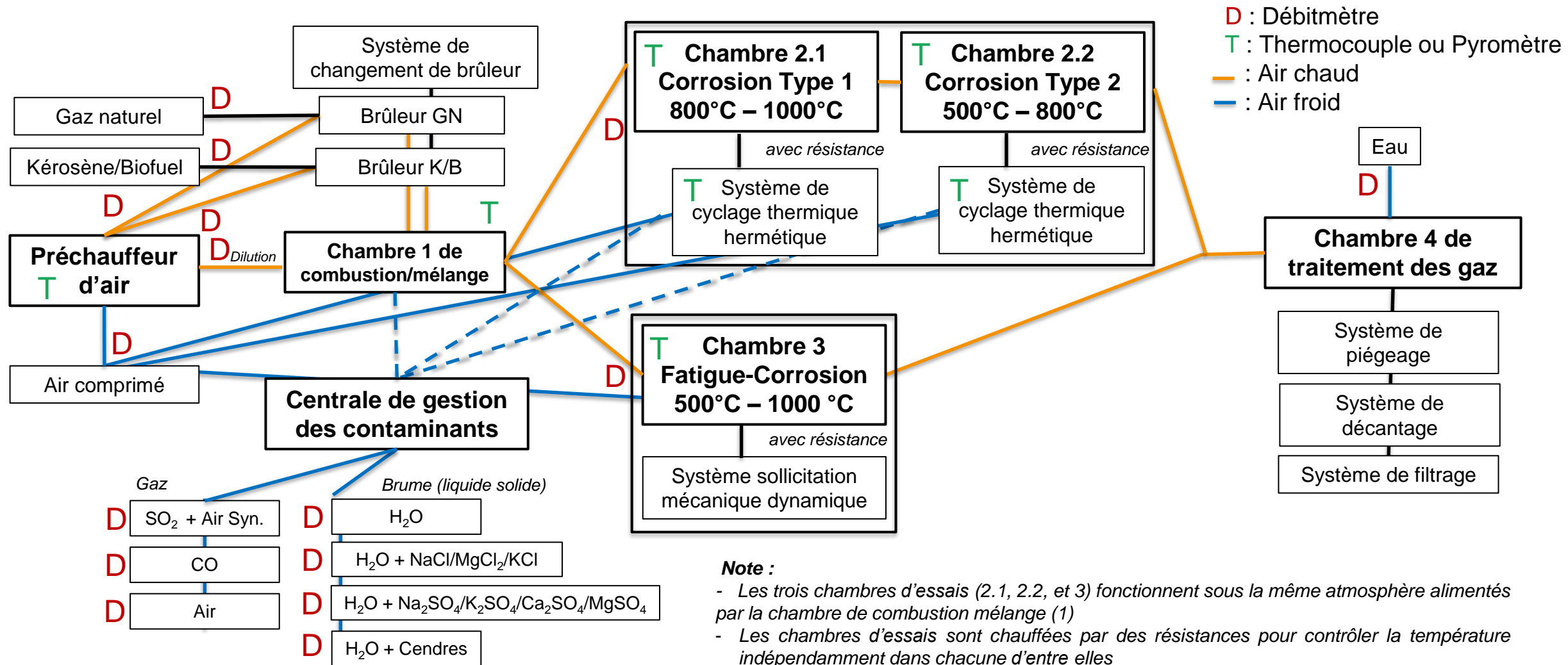


Fig. 1. Cranfield load controlled corrosion fatigue rig.



# PROPOSITION DE BANC DE CORROSION CHAUDE (V1)



**Note :**

- Les trois chambres d'essais (2.1, 2.2, et 3) fonctionnent sous la même atmosphère alimentés par la chambre de combustion mélange (1)
- Les chambres d'essais sont chauffées par des résistances pour contrôler la température indépendamment dans chacune d'entre elles
- Inspiration banc Safran HE pour les chambres 2.1 et 2.2 ; inspiration banc Fatigue-corrosion Cranfield pour la chambre 3



# PLATEFORMES IRT M2P / PARTENAIRES COMPLÉMENTAIRES

IRT M2P



5 kg



350 kg



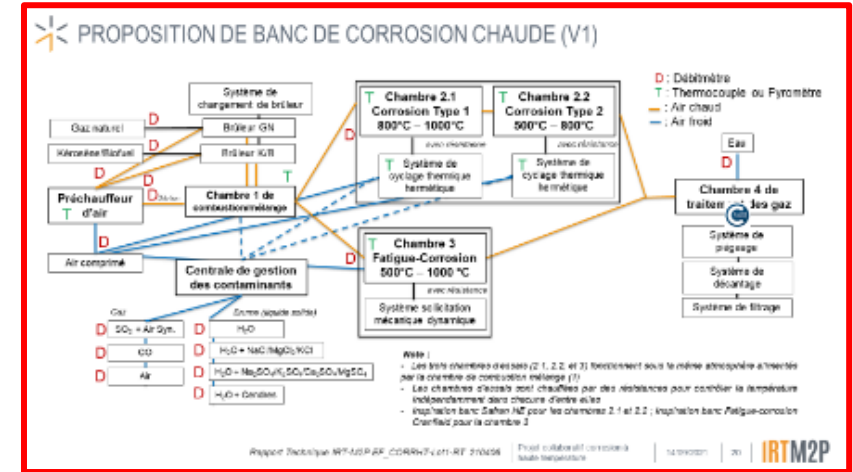
Traitement thermique



Voie liquide



Grenailage

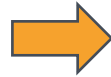


Plateforme corrosion HT IRT M2P

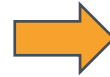
Alliages modèles  
Nouveaux alliages



Traitement thermique  
Forgeage



Traitement de surface



Tests corrosion



Analyses et caractérisation

Partenaires



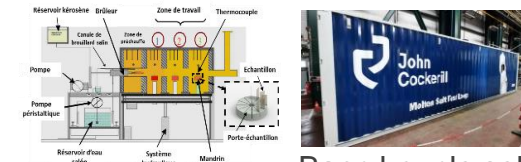
Forgeage  
ENSAM Metz



Halle matériaux  
EEIGM



Pack - Slurry  
EEIGM / IJL



Banc boucle sels  
fondus John Cockerill



Veolia



Banc brûleur  
ICAR-CM2T

## Les projets « corrosion haute température »

---

*COMEHT : CORROSION, OXYDATION ET MÉCANIQUE À HAUTE TEMPÉRATURE*

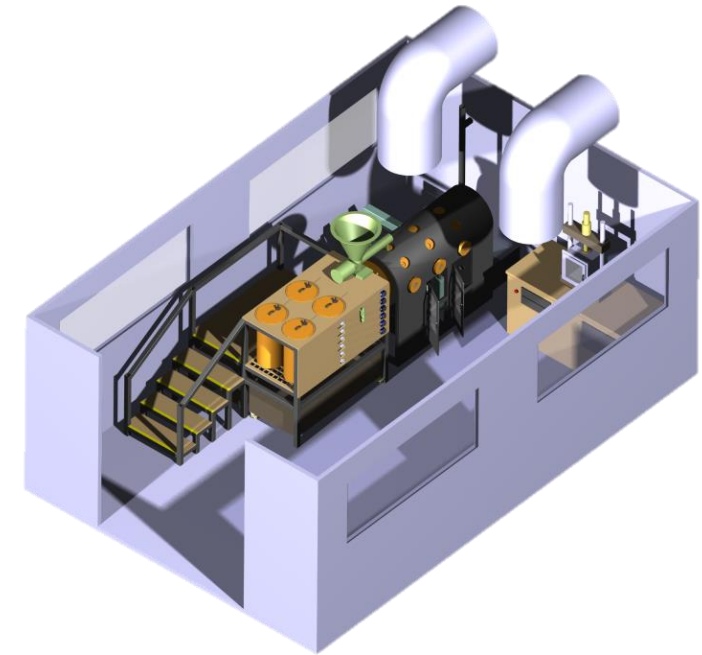
*REVEHT : REVÊTEMENTS HAUTE TEMPERATURE*

• **Objectifs / Enjeux :**

- Développer une nouvelle plateforme innovante de corrosion à haute température
- Fédérer un groupe de recherche industriel et développer des sujets de recherche autour de la Corrosion, l'Oxydation et la Mécanique à Haute Température
- Générer une base de données commune autour de la corrosion à haute température

• **Marchés/Applications :**

- Aéronautique
- Energie
- Métaux, Céramiques et Revêtements

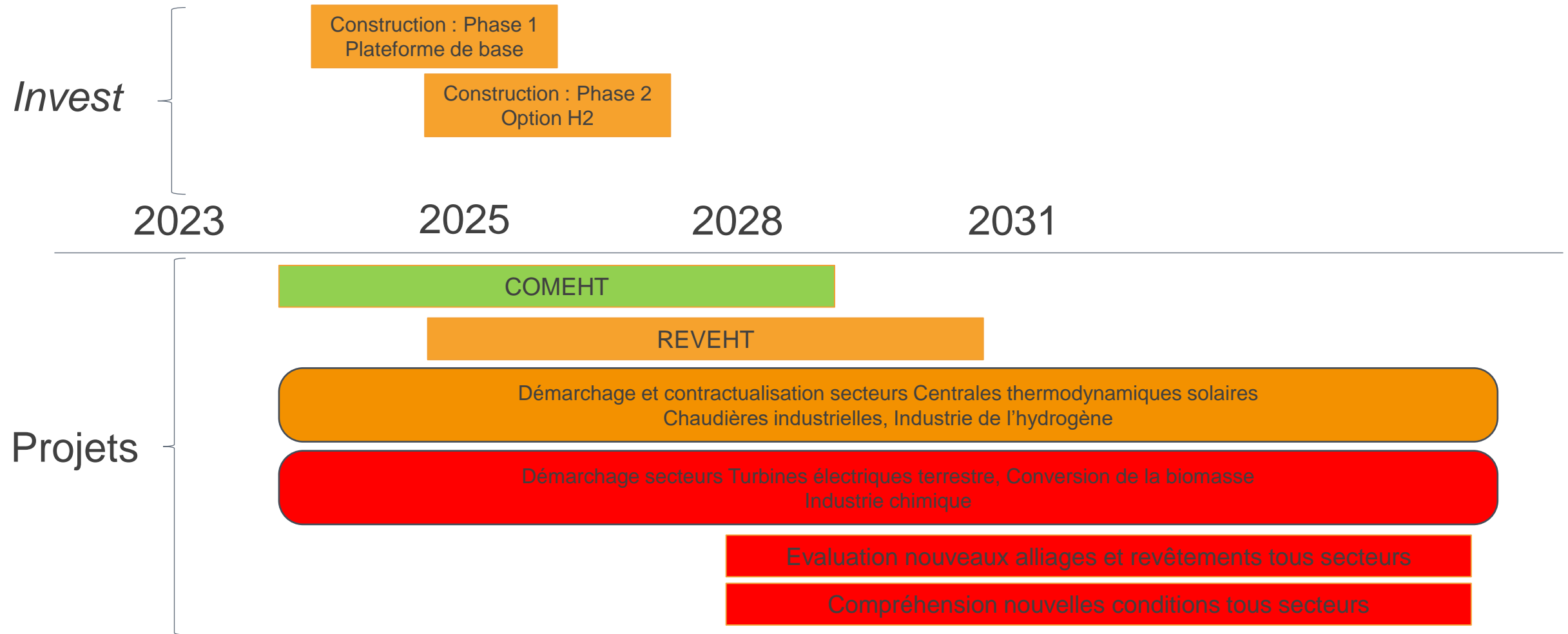


**Innovations du projet**

- Plateforme d'essais unique au monde incluant un banc brûleur et un banc de fatigue-corrosion à chaud
- Première fois en France qu'un tel projet réuni plusieurs industriels autour de problématiques communes liées à la corrosion à haute température

**Verrous à lever**

- Les effets de la corrosion à chaud ou de l'oxydation à haute température sur les propriétés mécaniques
- Les effets de la composition chimique des sels et du milieu gazeux, des vitesses des gaz et des pressions sur la résistance à la corrosion des matériaux



Chef de projet COMEHT :

Raphaël MARIN : [raphael.marin@irt-m2p.fr](mailto:raphael.marin@irt-m2p.fr)

Tel : 06 20 92 40 66

Directeur Scientifique et technique IRT M2P :

Pascal LAMESE : [pascal.lamesle@irt-m2p.fr](mailto:pascal.lamesle@irt-m2p.fr)

Tel : 06 82 51 53 64

Article de synthèse dans les techniques de l'ingénieur :

« Corrosion à chaud des métaux et des métaux et des alliages : Etat de l'art des moyens d'essai », COR 385 2022, Tom SANVIEMVONGSAK, Pascal LAMESLE, Michel VILASI, Clara DESGRANGES





**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](http://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