

Tech Hour

La combustion de l'hydrogène

Le 15/12/2020

TECH HOUR FORMAT & DÉROULÉ

➤ Agenda du Tech Hour – 12h30 à 13h30 :

- Introduction
- Etat des lieux de la technologie et de ses avancées
- Présentations des verrous technologiques



➤ Format et règles de fonctionnement :

- Le Tech Hour se déroule via l'outil de **web-conférence Webex**,
- Les **micros seront coupés** pendant la présentation (*environ 45 min*),
- Vous pouvez poser vos questions par « **chat** », à l'attention de l'organisateur,
- Il n'y a pas de nécessité de connecter sa webcam
 - Nous vous conseillons d'utiliser l'appel directement via le téléphone





TECH HOUR ORGANISATEUR



Normandie AeroEspace, la filière d'excellence en Normandie dans l'aéronautique, le spatial, la défense et la sécurité.



ASTech Paris Region, pôle de compétitivité dans le domaine de l'aéronautique, de l'espace et des systèmes embarqués



Pôle de compétitivité Automobile et Mobilité, Mov'eo accompagne les entreprises au quotidien pour favoriser l'innovation, le financement de projets R&D et le business collaboratifs entre ses membres.



Le syndicat de l'électronique qui regroupe les ex-adhérents du GIXEL, du SITELEC, du SIMTEC et du GFIE.

mardi 15 décembre 2020

Tech Hour
Le sujet du Jour

La combustion de l'hydrogène

L'intervention sera réalisée par

David Honoré

Enseignant-Chercheur
CORIA – CNRS UMR 6614
INSA Rouen Normandie
Membre du Carnot ESP

- Etat des lieux de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique.
- Valorisation énergétique de l'hydrogène en combustion,

La combustion de l'hydrogène

David Honoré

CORIA - CNRS UMR 6614

INSA Rouen Normandie

david.honore@coria.fr

Le CORIA

- **Unité Mixte de Recherche**

CNRS – Université Rouen Normandie – INSA Rouen Normandie

- Membre fondateur de l'institut Carnot ESP et du Labex EMC3
- 180 personnes @ Technopôle du Madrillet



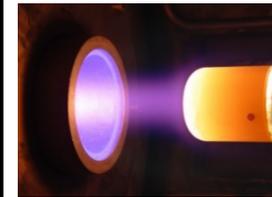
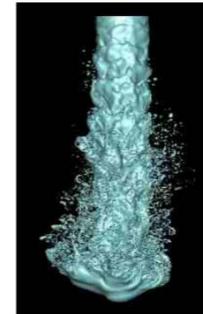
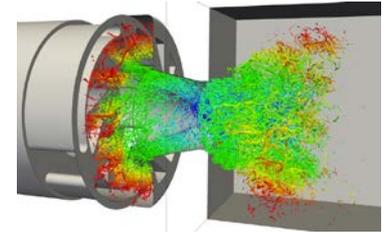
- **Ecoulements Réactifs: combustion et plasmas**
- **Turbulence, Atomisation, Sprays et Chaos**
- **Optique et Lasers**
- **calcul numérique avancé**
- **métrologie laser innovante**
- **analyse physique**

Le CORIA

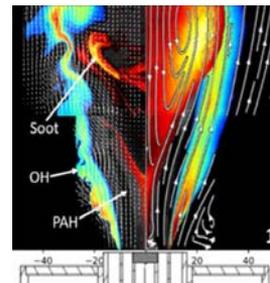
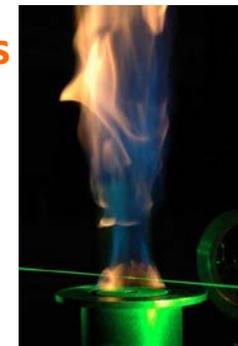
- Au cœur de la Stratégie bas-carbone, des recherches au service de la décarbonation de l'énergie, de la propulsion, et de l'industrie à l'horizon 2050

- Une plateforme de codes de calcul de haute performance

- YALES2, YALES2-AE, YALES2BIO,
- SiTCom-B
- ORCh, Optim. & Reduced Chemistry SMART DENOX
- CHOC-WAVES
- ARCHER
- Développement solveur Zonal Grid (OpenFoam)



- Une plateforme RENADIAG de métrologies lasers avancées (PIV, LIF, SRS, LIBS, LII, ILIDS,...) et de moyens d'essais de combustion et d'injection haute pression, haute température pour la caractérisation in-situ d'écoulements réactifs et/ou multiphasiques par thermométrie, vélocimétrie, granulométrie,...

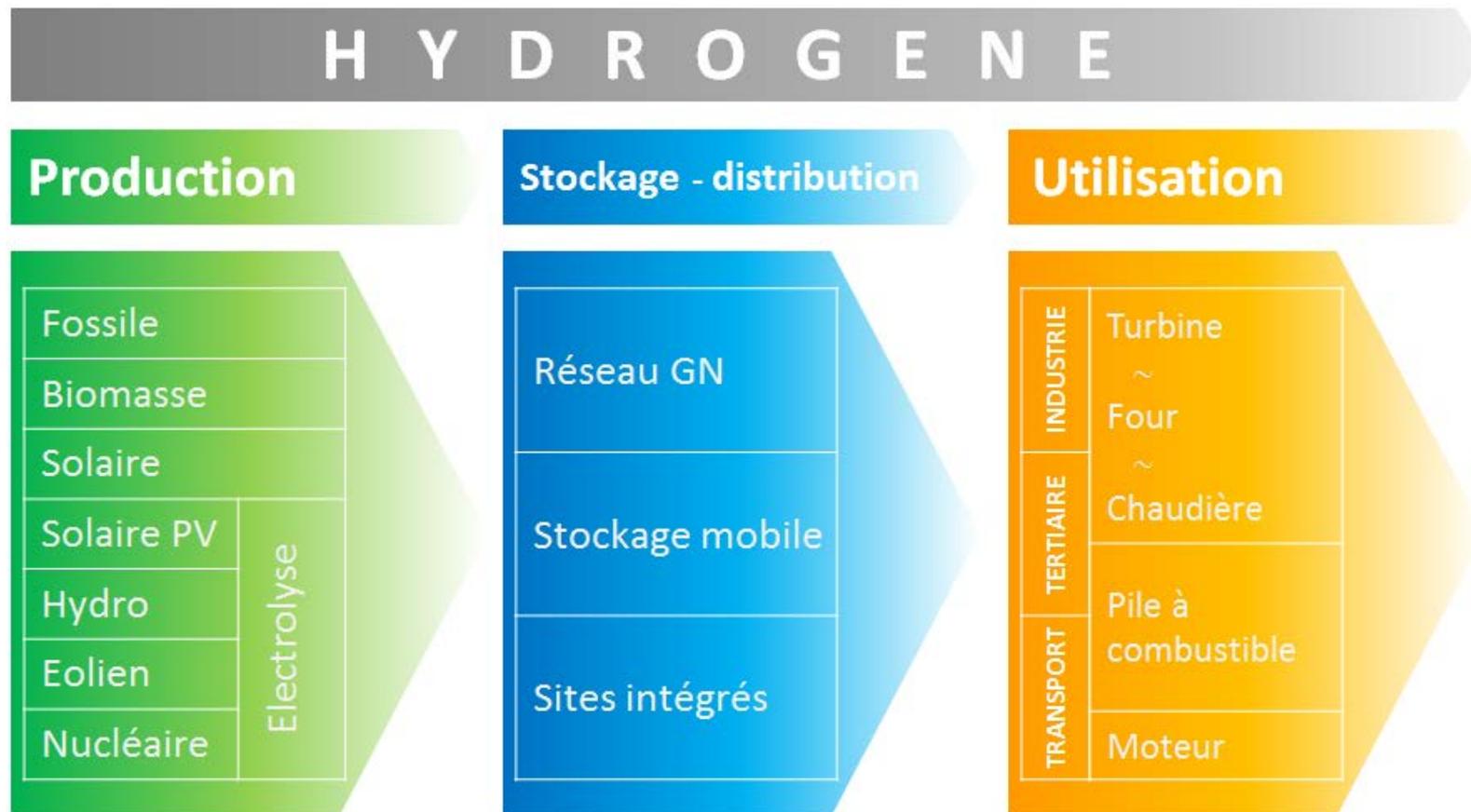


L'Hydrogène dans le contexte énergétique

- Les **enjeux actuels** de l'énergie
 - Augmentation de la demande énergétique mondiale
 - Épuisement des ressources fossiles
 - Réductions des émissions de gaz à effet de serre et des polluants (CO, NOx, particules...)
- Transition énergétique & mix énergétique
 - Un bouquet de solutions
 - Notamment **H₂**
- **Hydrogène**
 - Plus petit élément chimique
 - Plus abondant dans l'univers
 - Mais, molécule di-hydrogène quasi-inexistante sur Terre
- Hydrogène : une solution comme **vecteur énergétique**

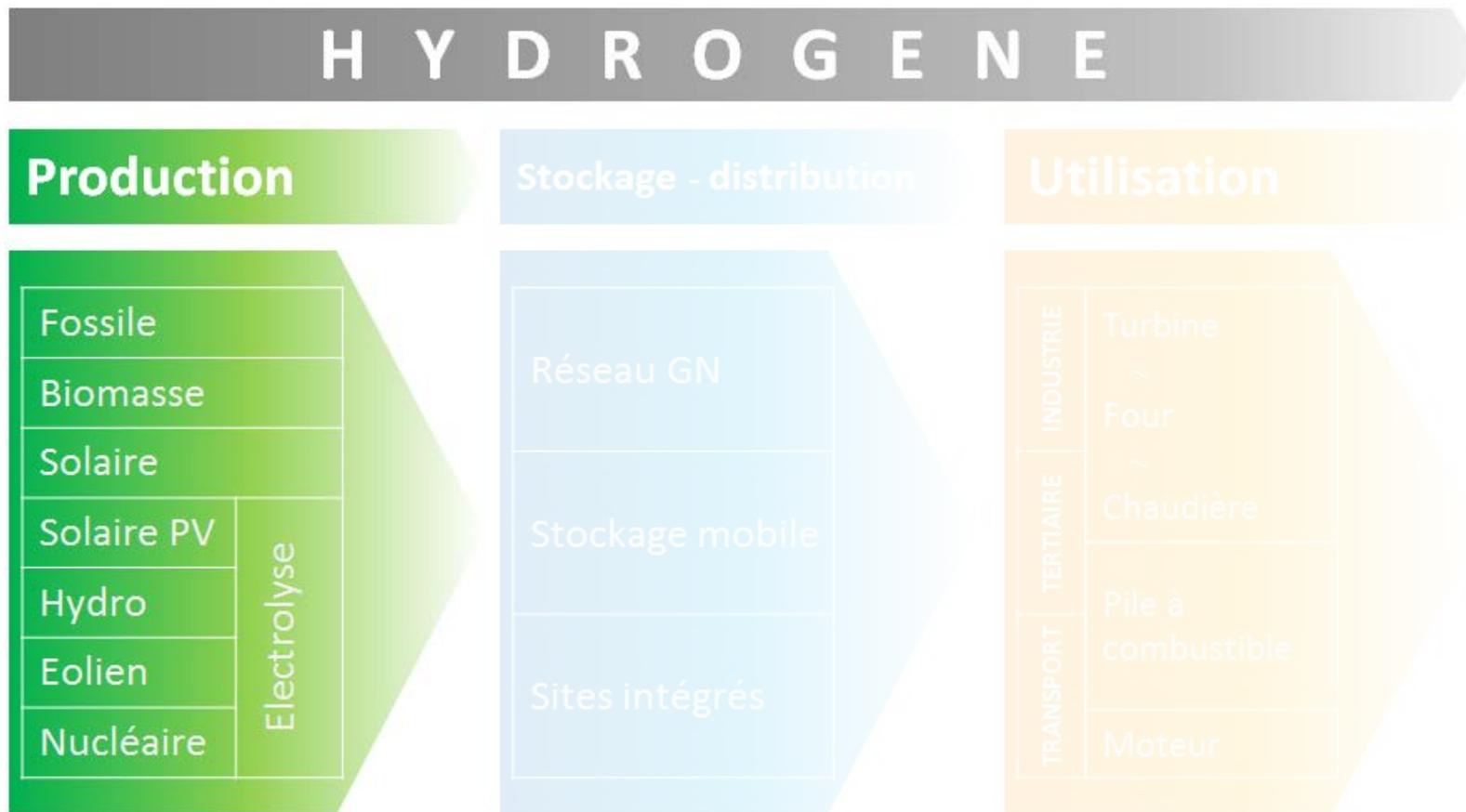
Hydrogène, vecteur énergétique

- Les 3 étapes de la valorisation énergétique de l'hydrogène



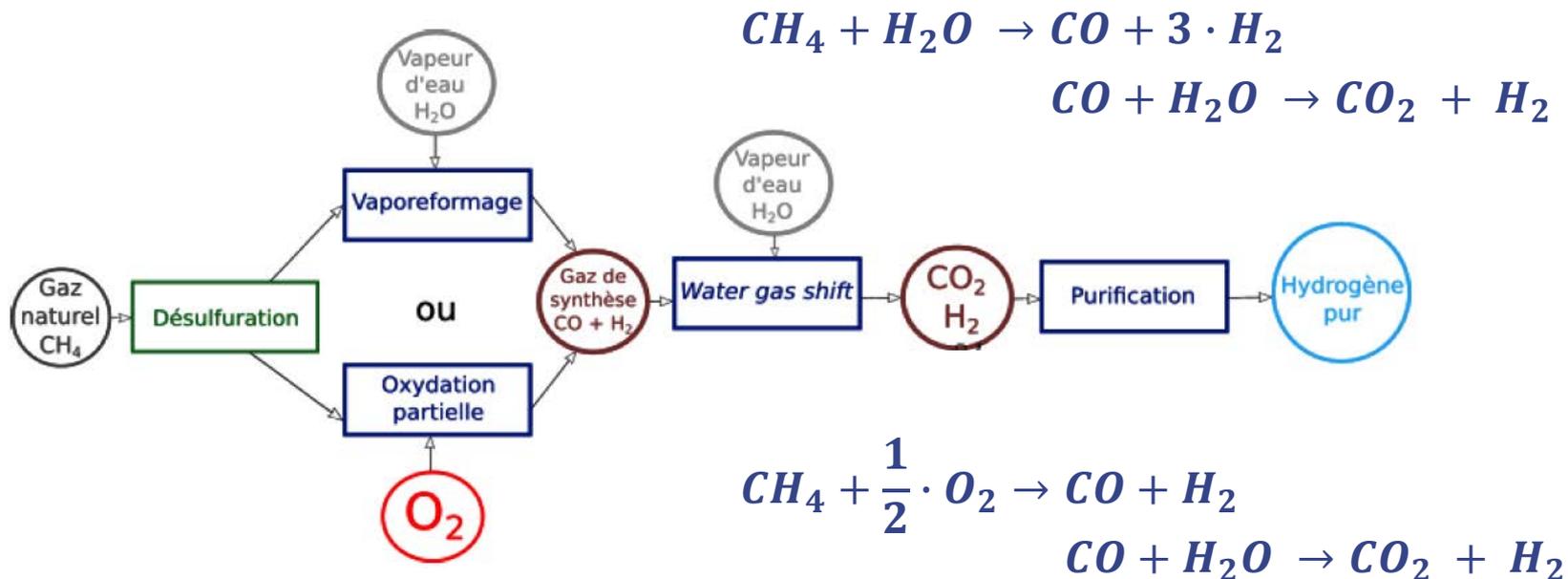
Hydrogène, vecteur énergétique

- Les 3 étapes de la valorisation énergétique de l'hydrogène



Production H₂

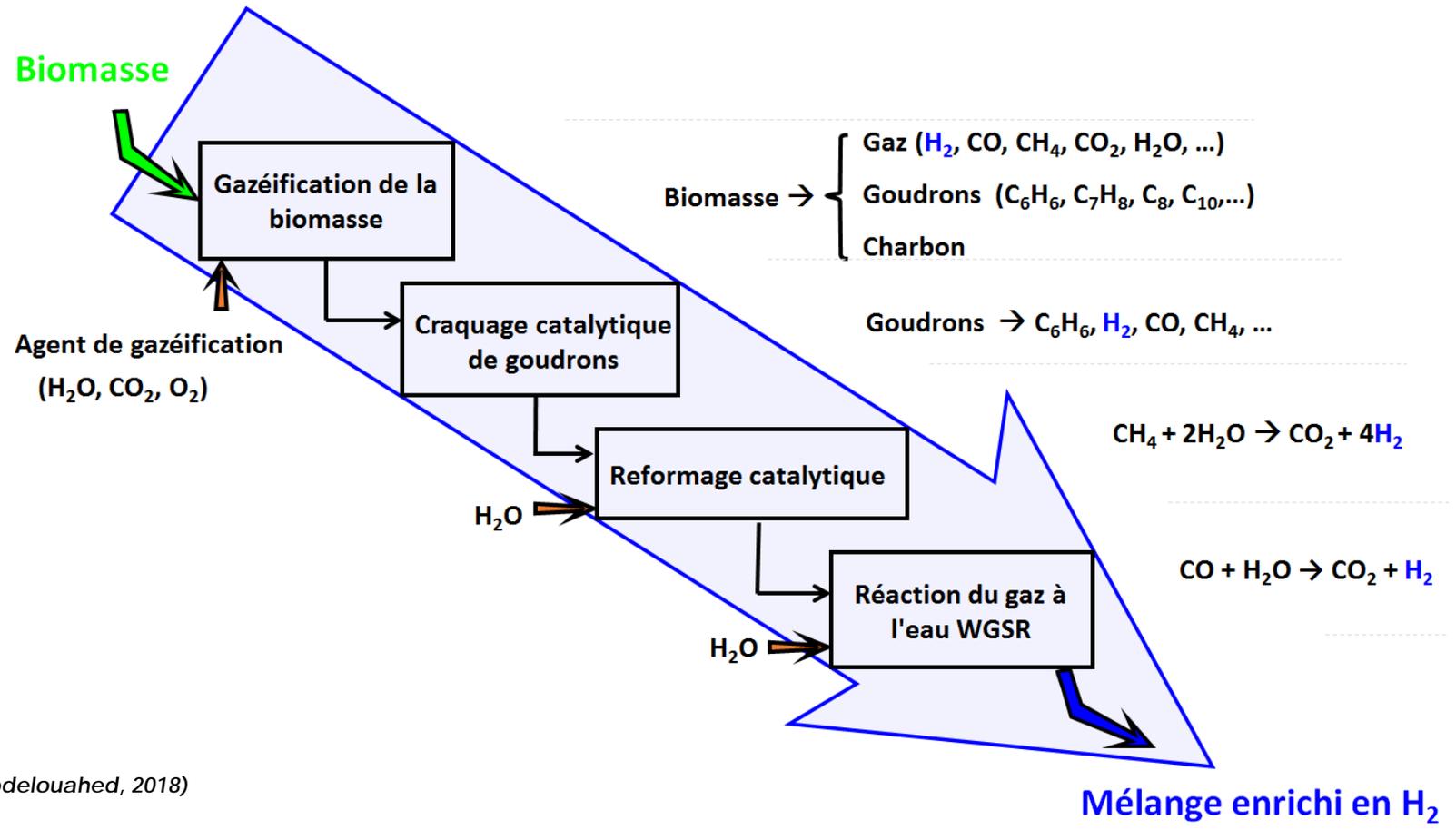
- **Vaporéformage vs. Oxydation partielle de CH₄**



- 2 procédés combinés → reformage autothermique ■ H₂ gris
- Idem pour gazéification du charbon
- Séparation CO₂ / H₂ → CCS (Carbon Capture & Sequestration) ■ H₂ bleu

Production H₂

● Pyrogazéification de biomasse



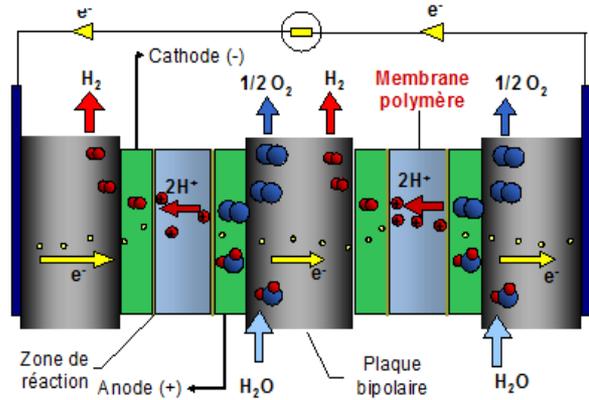
(Abdelouahed, 2018)

■ H₂ vert

Production H₂

● Principe de l'électrolyse de l'eau

(AFHYPAAC, 2015)

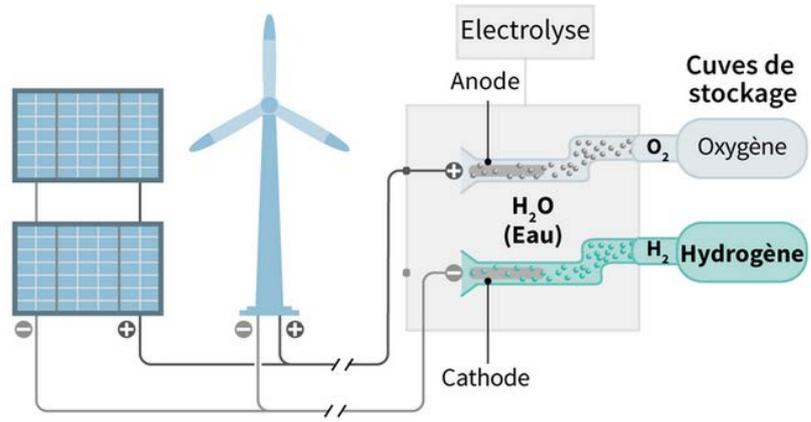


- A l'anode : $2.H_2O \rightarrow O_2 + 4.H^+ + 4.e^-$
- Transfert de H^+ à travers la membrane
- A la cathode : $2.H^+ + 2.e^- \rightarrow H_2$

● Sources d'énergie électrique

- Nucléaire
- EnR : solaire, éolien

(Le Monde, 2019)



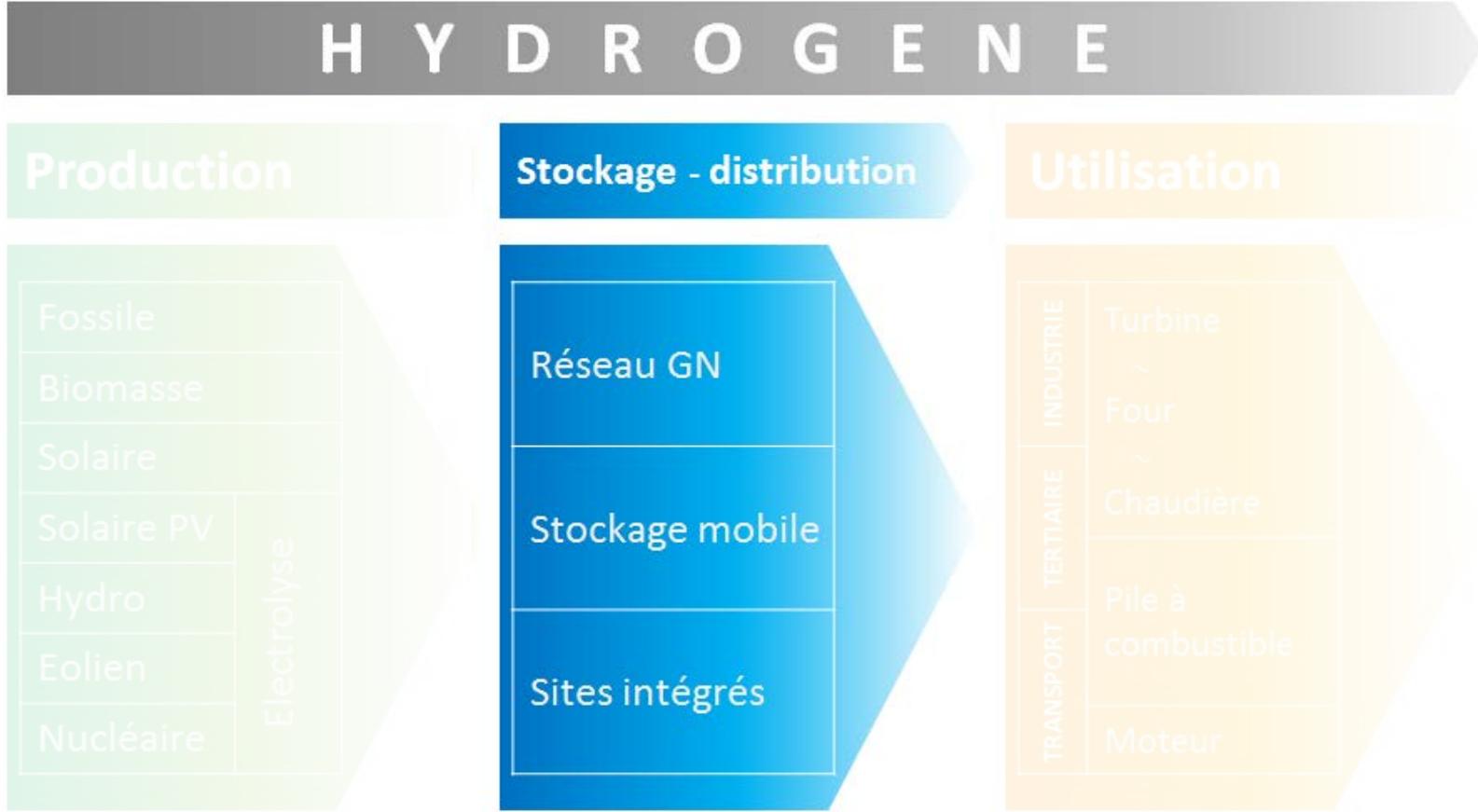
■ Une solution à l'intermittence

■ Moyen d'adaptation production vs. utilisation électricité → **stockage de l'électricité**

■ H₂ vert

Hydrogène, vecteur énergétique

- Les 3 étapes de la valorisation énergétique de l'hydrogène



Stockage H₂ : stockage mobiles

● Stockage **gaz**



- réservoir sous pression
- usage courant
- structure composite jusqu'à 700 bars



● Stockage **solide**

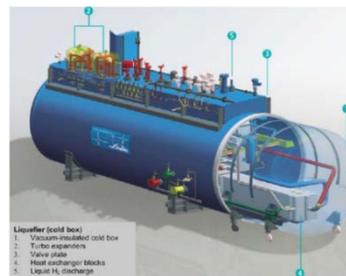
- Galette de magnésium dopé (Ni, V,...)
- Absorption sous pression en hydrures métalliques
- Déshydrogénation à basse pression



(McPhy, 2019)

● Stockage **liquide**

- H₂ cryogénique @ 20K
- domaine spatial
- coût énergétique



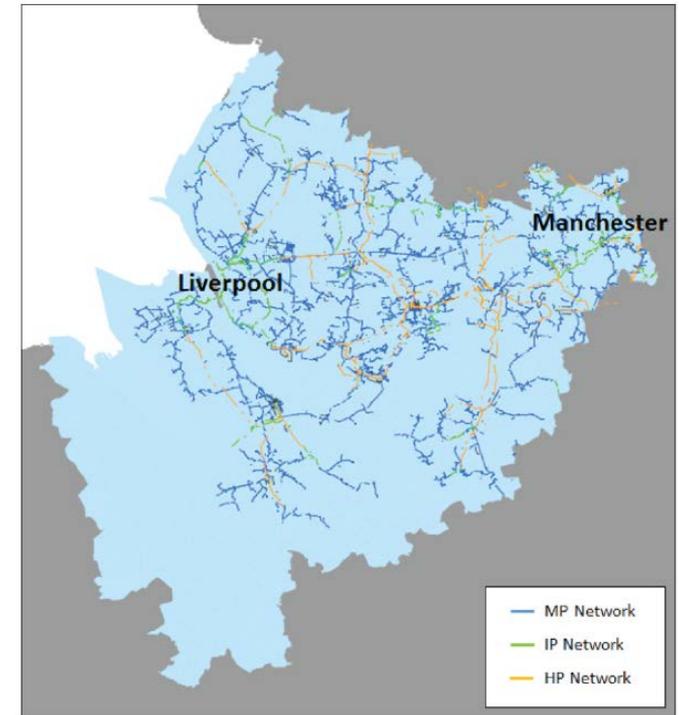
● Stockage **chimique**

- Synthèse réversible d'un composé liquide
 - Ammoniac (NH₃)
 - Méthanol (CH₃OH)
 - ...

Distribution H₂ : sites intégrés

- Sur **site industriel & réseau dédié**
 - Hydrogène est aussi un gaz de process ou un gaz fatal en secteur industriel
 - Réseau dédié et usages démultipliés

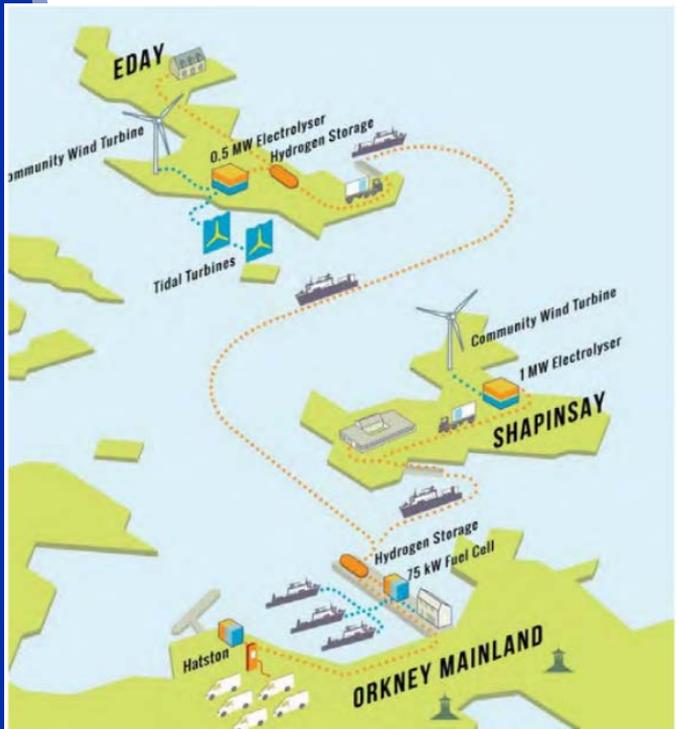
Figure 1.1: L-M Hydrogen Cluster Area and Existing Cadent Gas Network (Caden, 2017)



Distribution H₂ : sites intégrés & ZNI

- **Sur site industriel & réseau dédié**
 - Hydrogène est aussi un gaz de process ou un gaz fatal en secteur industriel
 - Réseau dédié et usages démultipliés

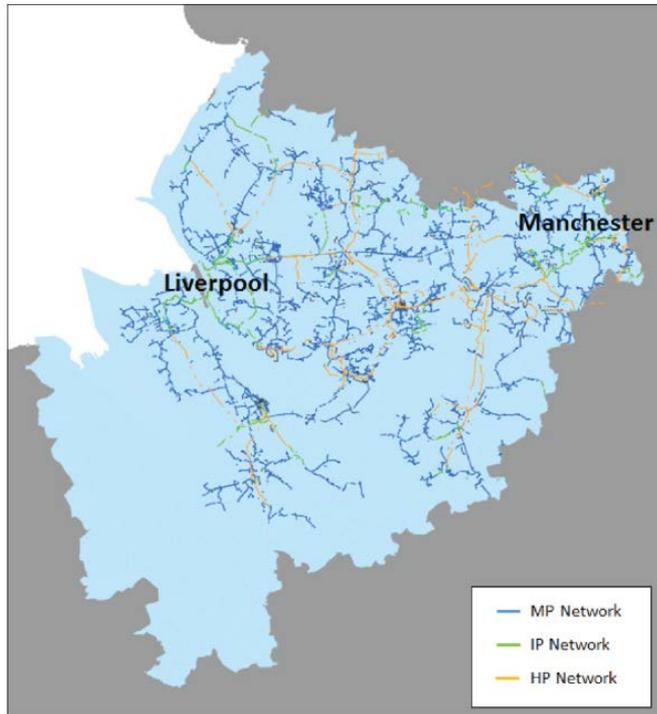
(Lidderdale, 2018)



îles Orcades - Ecosse



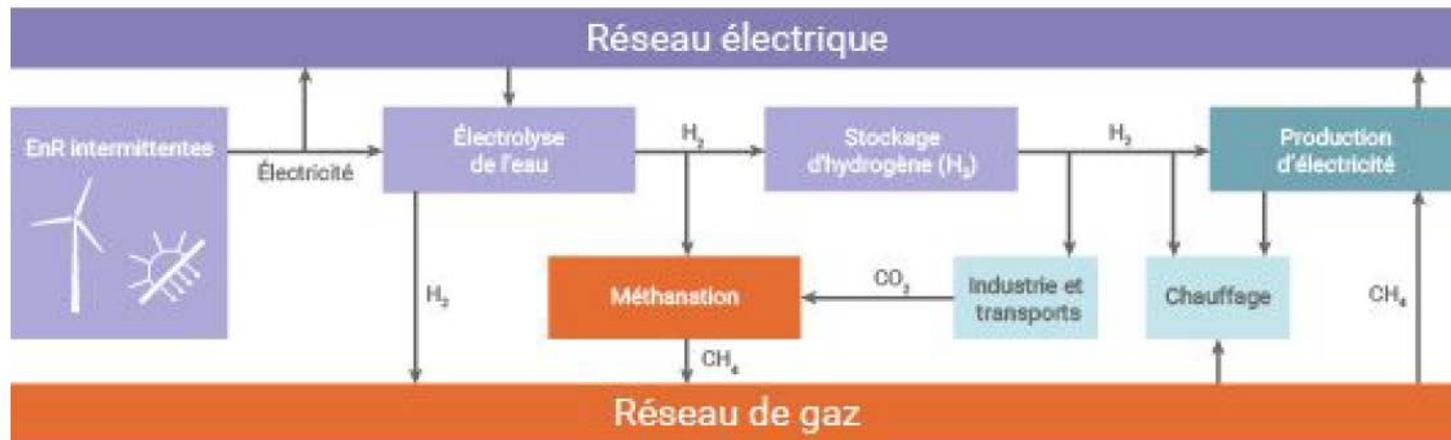
Figure 1.1: L-M Hydrogen Cluster Area and Existing Cadent Gas Network (Caden, 2017)



- **Pour zones non inter-connectées (ZNI)**
 - Production locale par EnR
 - Réseau dédié local

Distribution H₂ dans réseau GN

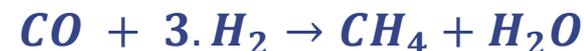
- **Hydrogène** dans le réseau de gaz naturel sans/avec **méthanation**
→ concept de **Power-to-Gas**



- **Injection directe** dans réseau GN

- Limite actuellement considérée = 20% vol. H₂
- Tenue des matériaux du réseau
- Effet de la présence d'hydrogène sur le process énergétique

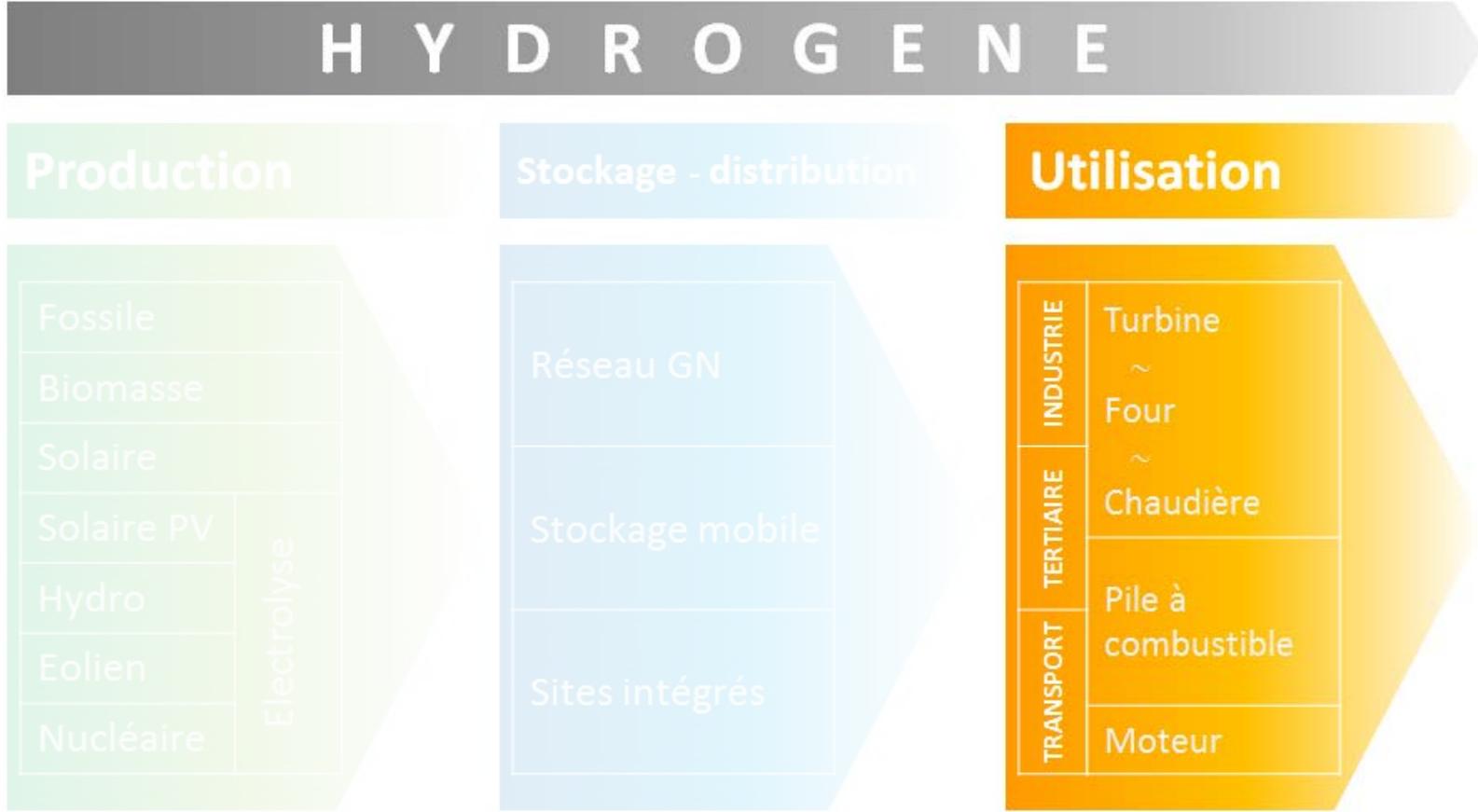
- Conversion H₂ en CH₄ → **méthanation**



- inclus valorisation du CO₂

Hydrogène, vecteur énergétique

- Les 3 étapes de la valorisation énergétique de l'hydrogène



La combustion de l'hydrogène

- **La combustion d'hydrogène**
 - Depuis longtemps dans le spatial
 - ... mais pas exclusivement



(Paubel, 2017)

(BMW, 2007)



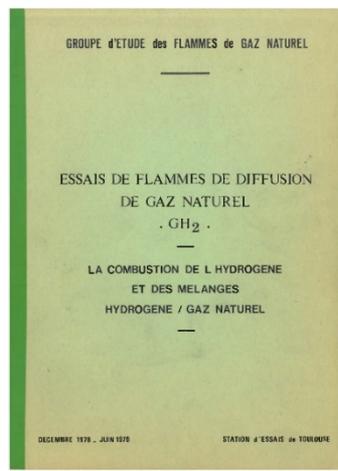
BMW Hydrogen 7 (V12)



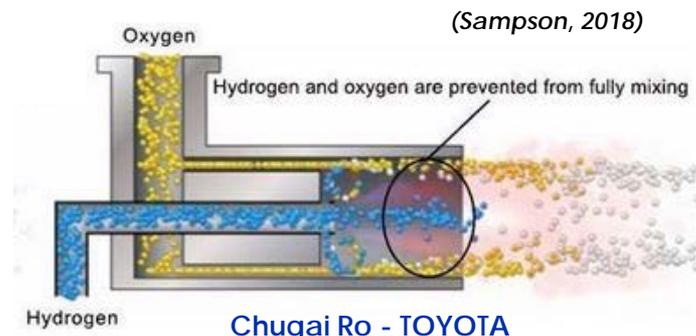
(BDR Thermea - De Dietrich, 2019)



COG 90% / 10% CH₄



(GEFGN, 1979)



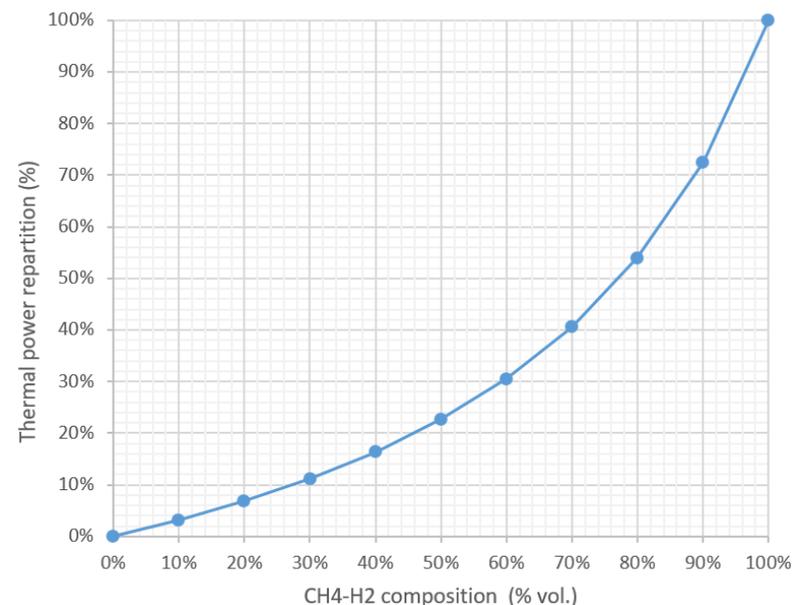
(Sampson, 2018)

Les spécificités de la combustion de l'hydrogène

● Propriétés physico-chimique **hydrogène vs. méthane**

	H ₂	CH ₄
Masse volumique (kg/m ³)	0.08	0.71
Diffusivité massique dans l'air (cm ² /s)	0.61	0.16
Limites inflammabilité dans l'air (% vol)	4 – 75	5 – 15
PCI (MJ/kg)	120	50
PCS (MJ/kg)	142	55
PCI (kWh/m ³)	3.00	9.97
Va (m ³ (n) _{air} / m ³ (n) _{gaz})	2.38	9.52
Température adiab. de flamme Tad (K)	2045	1875
Vitesse laminaire de flamme S _L (cm/s)	230	40

■ Mélange CH₄ – H₂



Les spécificités de la combustion de l'hydrogène

● augmentations de S_L , T_{ad} , délai d'auto-inflammation

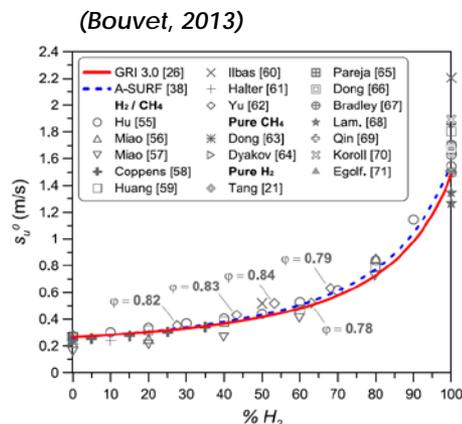
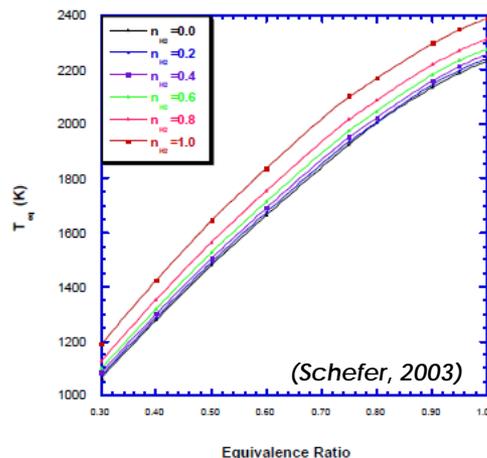
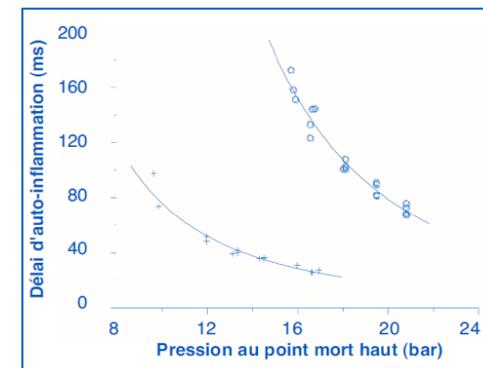


Fig. A1. Calculated adiabatic flame temperatures as a function of equivalence ratio and fuel hydrogen content.



(De Ferrières, 2010)



Évolution du délai d'auto-inflammation d'un mélange gaz naturel/hydrogène 80-20/ O_2/N_2 (croix) et d'un mélange gaz naturel/ O_2/Ar (cercles) en fonction de la pression au point mort haut pour une température en fin de compression de 908 +/- 5 K (gaz naturel/hydrogène) et 920 +/- 5 K (gaz naturel).

- augmentations des limites de stabilité de flamme
- diminution des HC et CO, mais augmentation émissions de NO_x

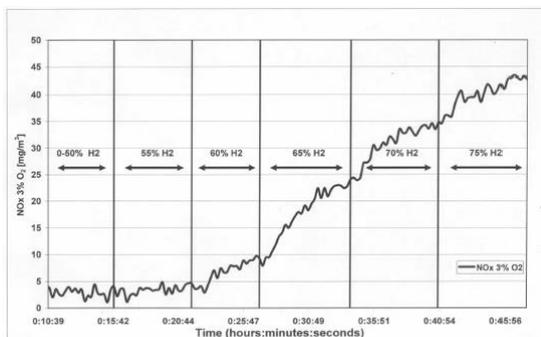
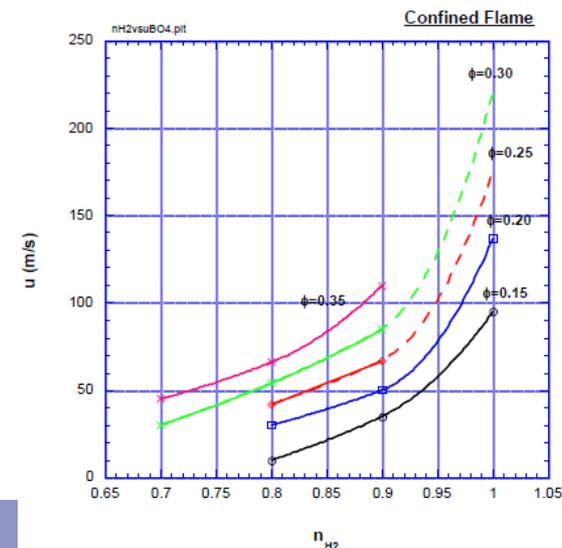


Figure 5: NO_x -emissions of the JDDC burner with increasing H_2 -addition

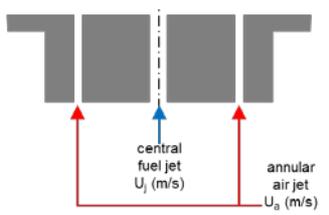
(Schefer, 2003)



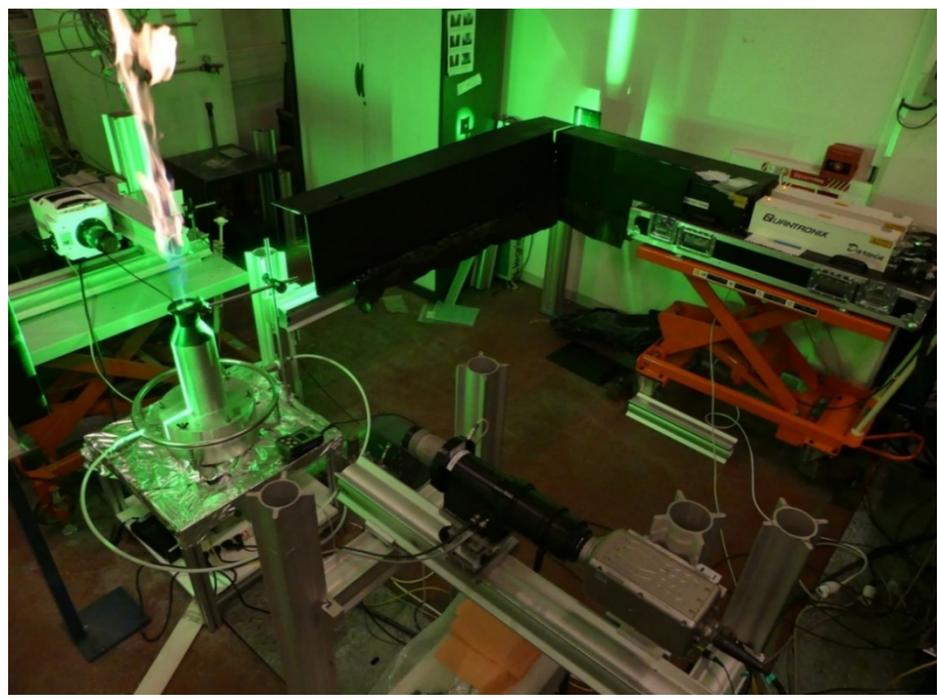
Stabilisation de flamme ($CH_4 - H_2$) par brûleur Bluff-Body

- Brûleur Bluff-Body non-prémélangé (combustible / air)
 - zone de recirculation interne (ZRI)

Flamme CH_4 /air



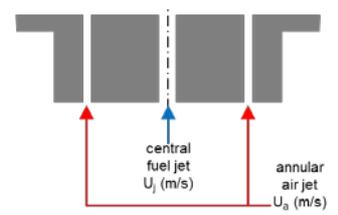
- Couplage de vélocimétrie par images de particules (5 kHz) et imagerie de flamme haute cadence (1 kHz)



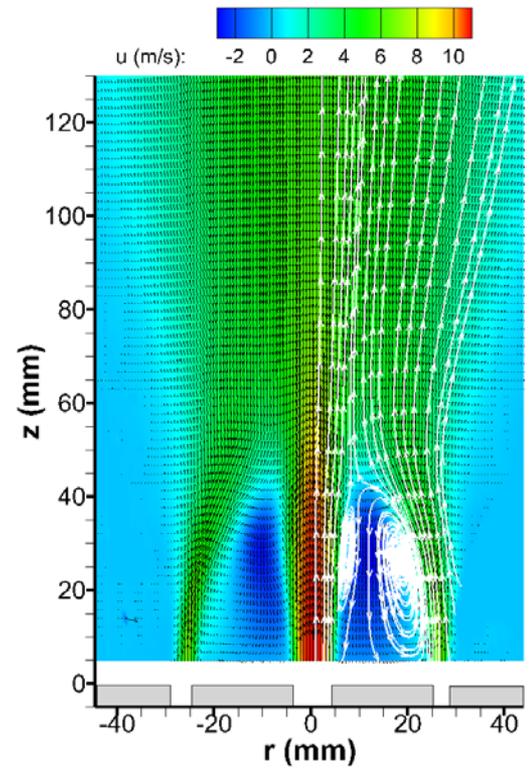
Stabilisation de flamme ($\text{CH}_4 - \text{H}_2$) par brûleur Bluff-Body

- Brûleur Bluff-Body non-prémélangé (combustible / air)
 - zone de recirculation interne (ZRI)

Flamme CH_4/air



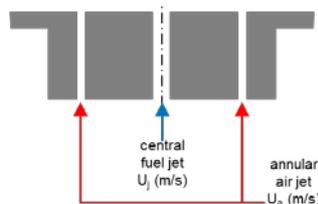
champ moyen de vitesse PIV



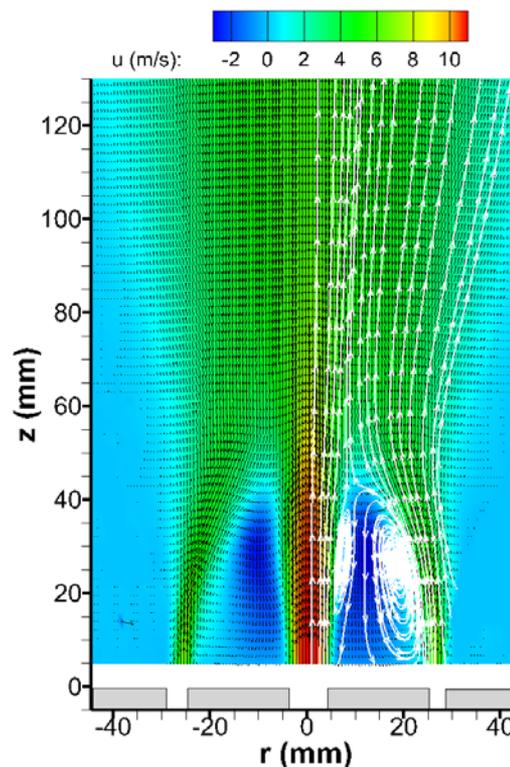
Stabilisation de flamme ($\text{CH}_4 - \text{H}_2$) par brûleur Bluff-Body

- Brûleur Bluff-Body non-prémélangé (combustible / air)
 - zone de recirculation interne (ZRI)

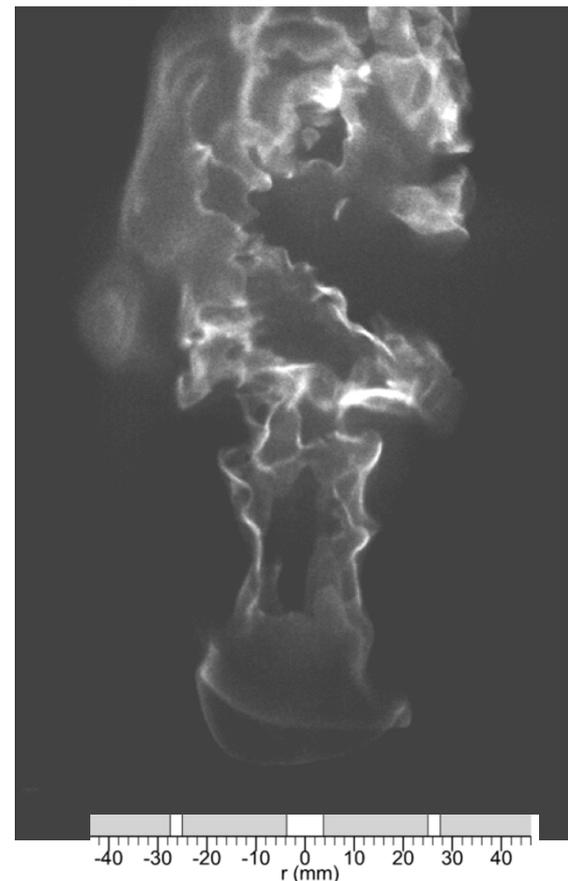
Flamme CH_4/air



champ moyen de vitesse PIV



imagerie de flamme @ 1 kHz

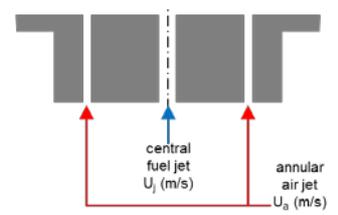


- Stabilisation de flamme contrôlée par éjection périodique depuis la ZRI

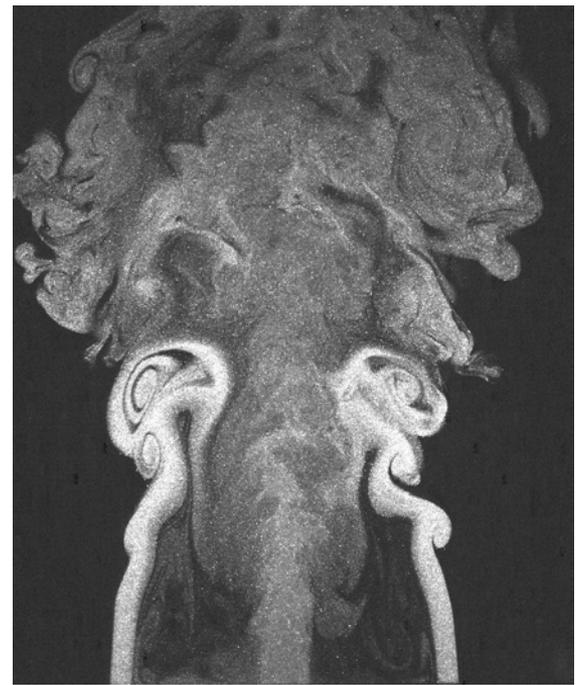
Stabilisation de flamme (CH₄ - H₂) par brûleur Bluff-Body

- Brûleur Bluff-Body non-prémélangé (combustible / air)
 - zone de recirculation interne (ZRI)

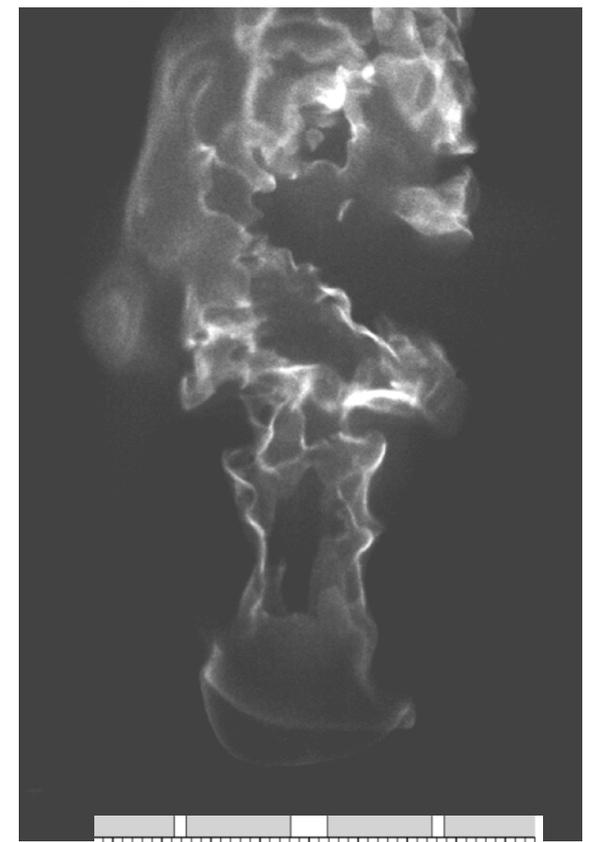
Flamme CH₄/air



images instantanées PIV @ 5 kHz



imagerie de flamme @ 1 kHz



- Stabilisation de flamme contrôlée par éjection périodique depuis la ZRI

- Effet de l'ajout d'hydrogène jusqu'à 100% H_2

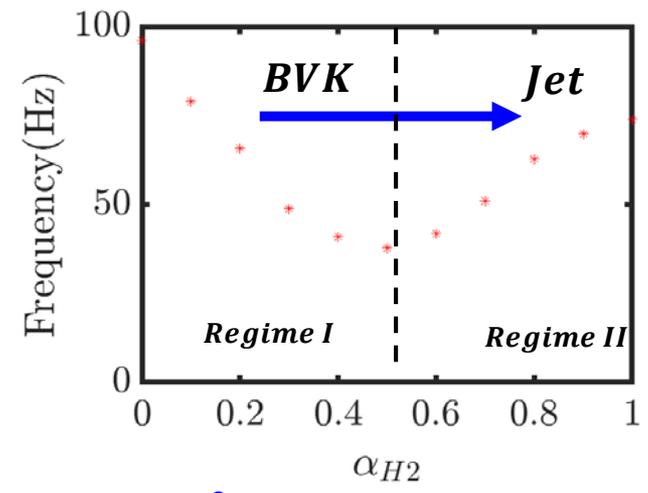
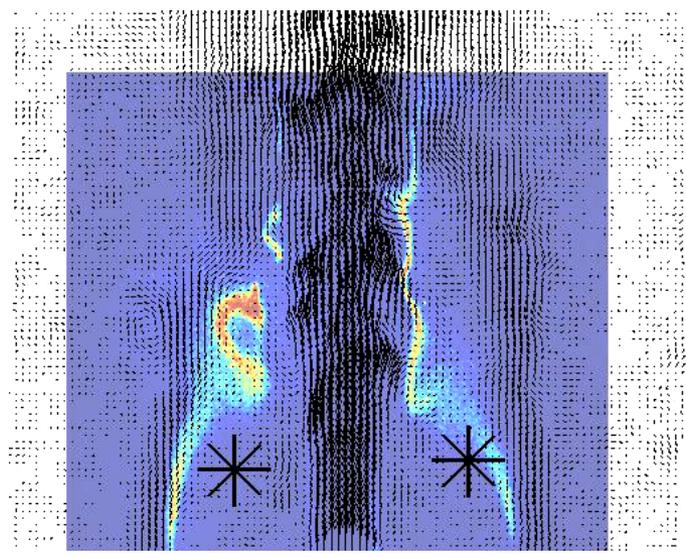


- Modification de la topologie de flamme et des modes de stabilisation

Stabilisation de flamme (CH₄ - H₂) par brûleur Bluff-Body

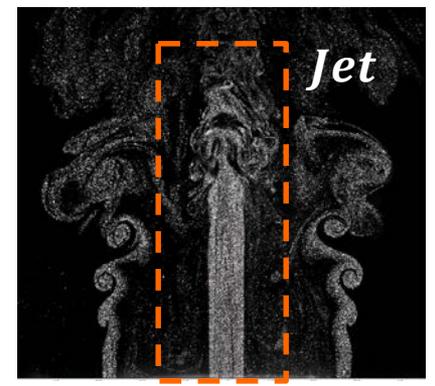
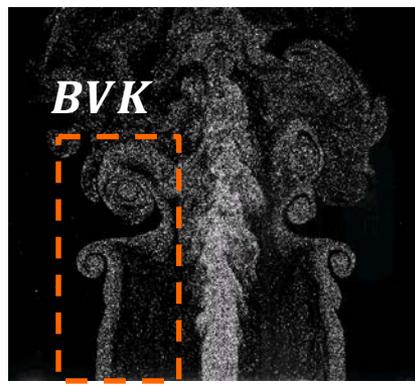


- Effet de l'ajout d'hydrogène jusqu'à 100% H₂
- Diagnostics couplés haute cadence PIV / Fluorescence Induite par Laser OH (@ 5 kHz)



$\alpha_{H_2} \sim 0$

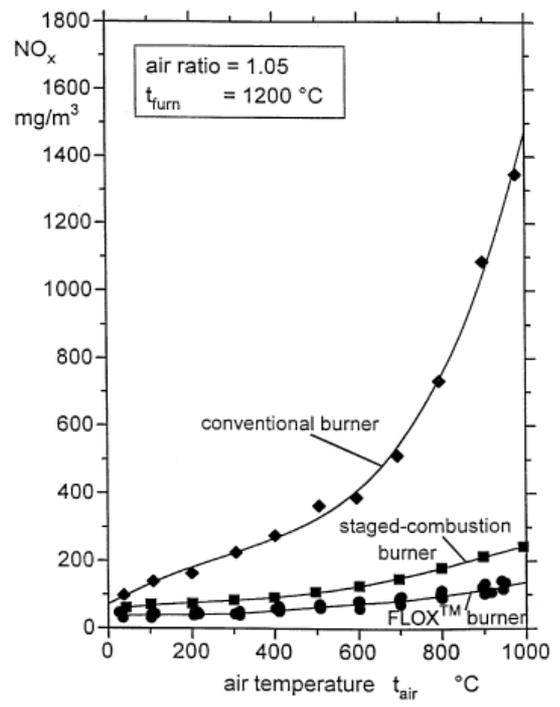
$\alpha_{H_2} \sim 1$



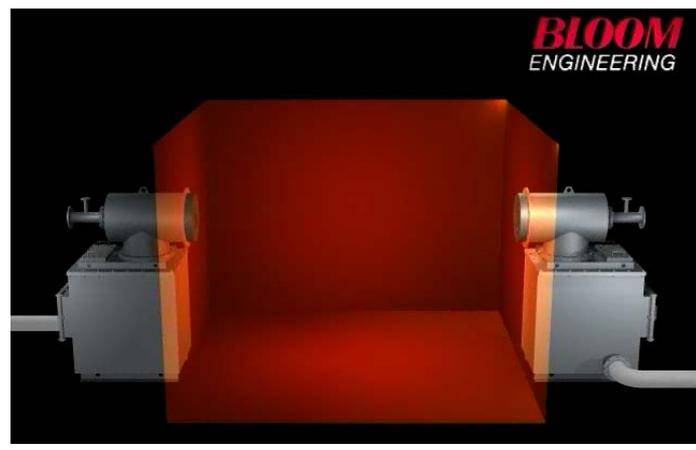
- Variation de la fréquence caractéristique de l'extinction
- Changement de régime de stabilisation à forte teneur en hydrogène

La combustion sans flamme de mélanges CH₄ - H₂

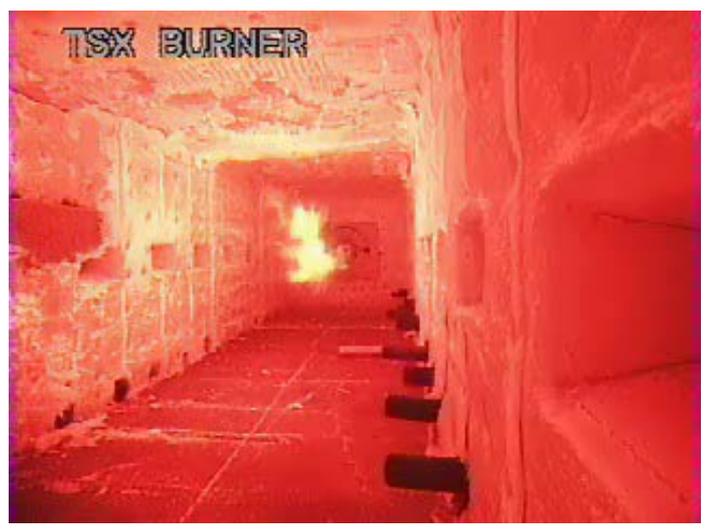
- **La combustion sans flamme** : un nouveau régime de combustion pour certains foyers à haute température



(Flamme, 1998)



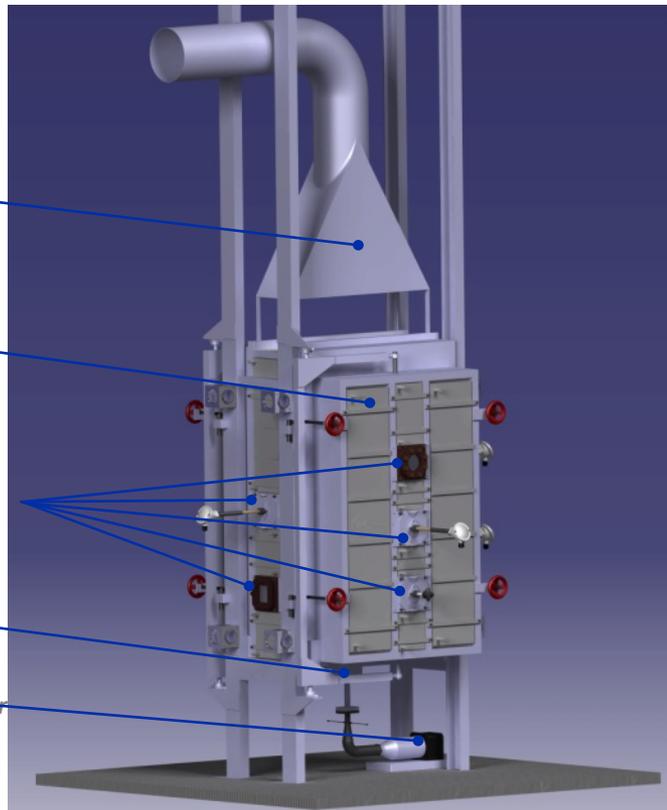
(Bloom, 2007)



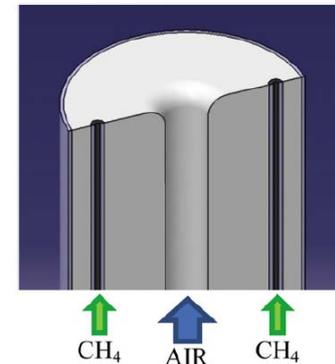
(Fantuzzi, 2009)

La combustion sans flamme de mélanges CH_4 - H_2

- **'FOUR' = Furnace with Optical access and Upstream Recirculation**
 - optical accesses vs. thermal confinement
 - 'natural' flue gas recirculation in the combustion chamber
 - continuous operation 24 h/24 h



- **Burner geometry 20 kW as regenerative burner NFK HRS DL2-5**



- 2 opposite CH_4 injections ($D_0 = 3 \text{ mm}$)
- 1 central air injection ($D_a = 25 \text{ mm}$)
- air preheating ($T_a = 600^\circ \text{C}$)

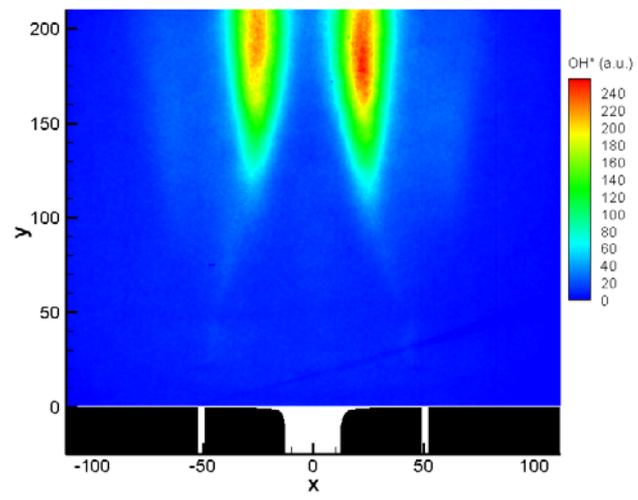
La combustion sans flamme de mélanges CH₄ - H₂

● La combustion sans flamme CH₄ / air

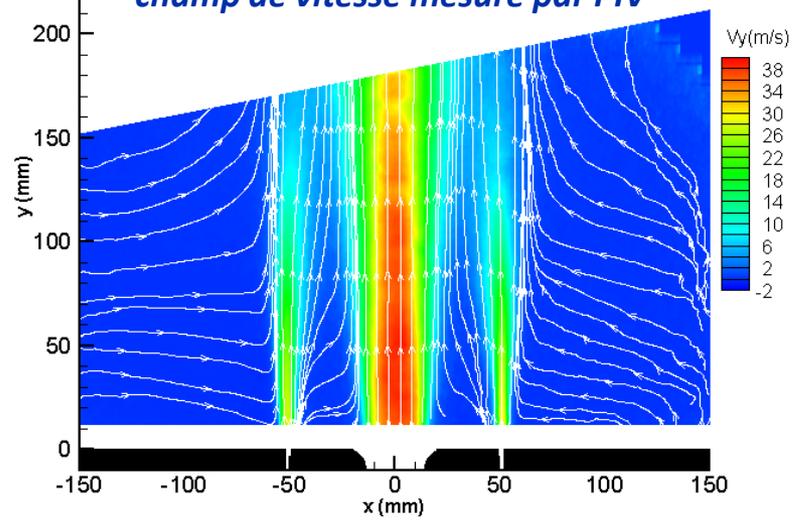
visualisation directe



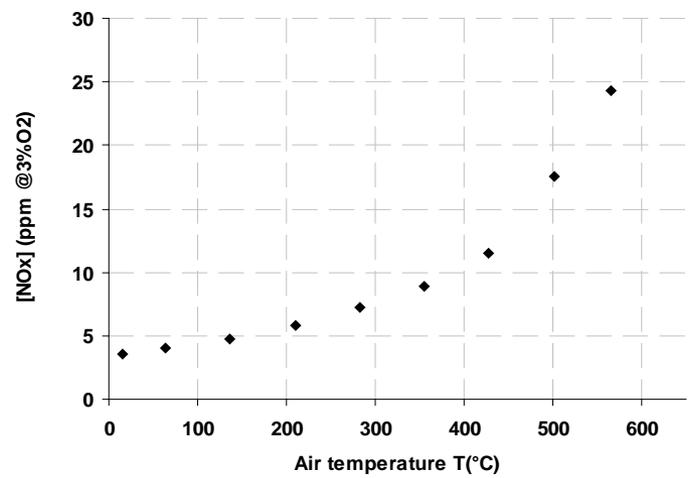
chimiluminescence OH*



champ de vitesse mesuré par PIV



Émissions de NOx

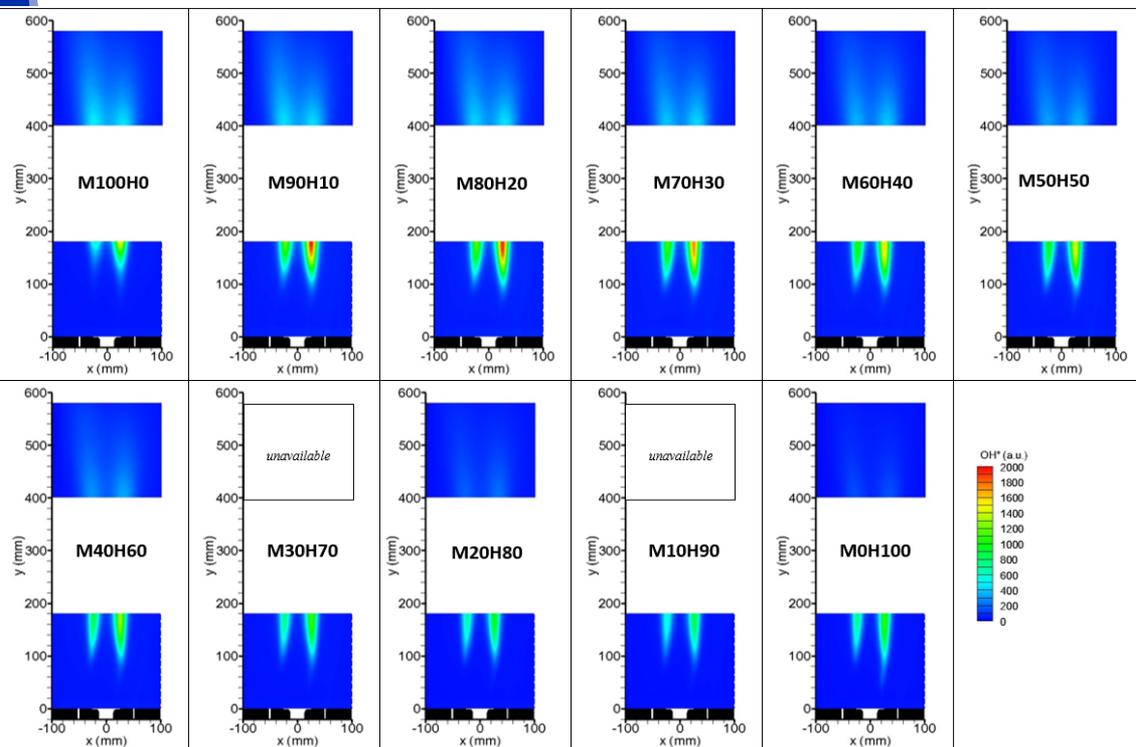




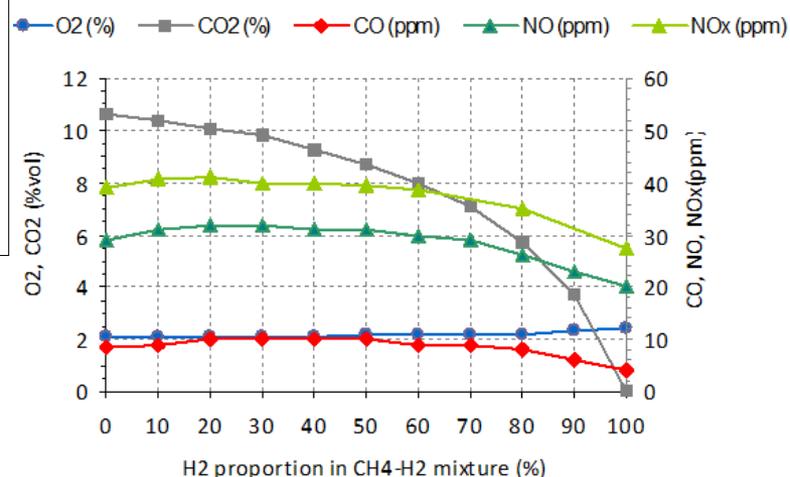
La combustion sans flamme de mélanges CH₄ - H₂

- Expériences avec préchauffage air (P = 20 kW - λ = 1.10 - Ta = 585° C)
 - Toutes proportions de méthane (M100H0) à hydrogène (M0H100)

Imagerie de chimiluminescence OH*



Emissions

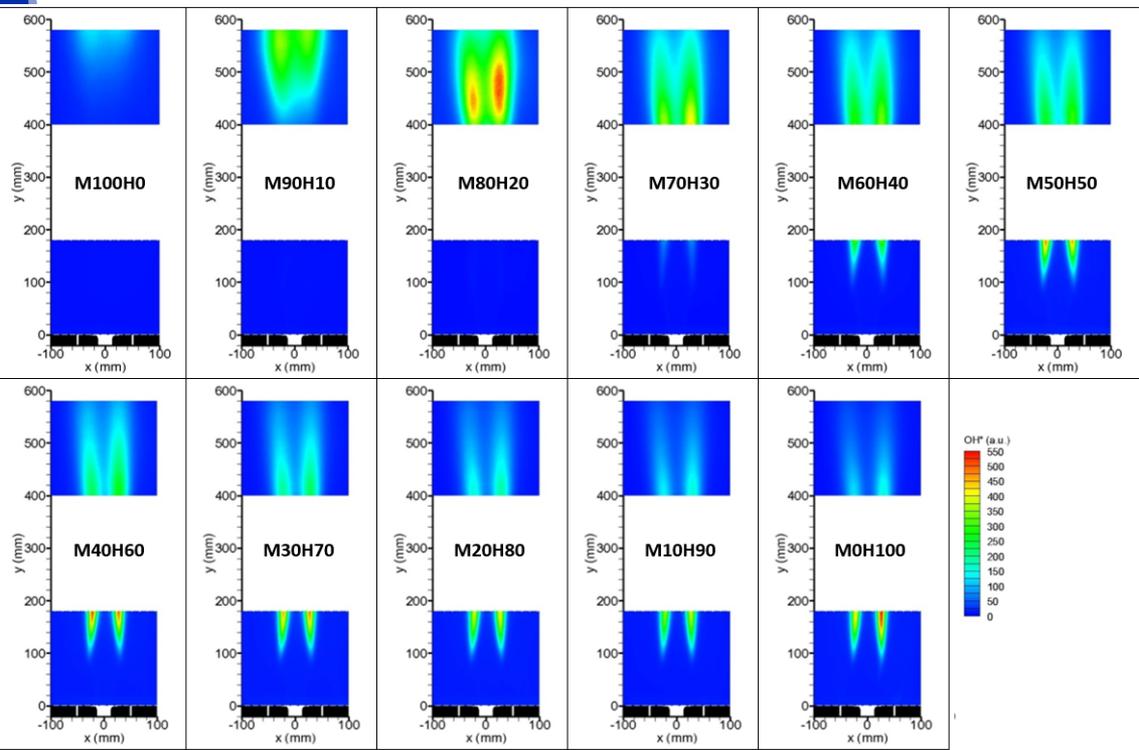


- **combustion sans flamme** atteinte pour tout mélange CH₄/H₂
- **Plus aucune émission de CO₂**
- **diminution** des concentrations de NOx

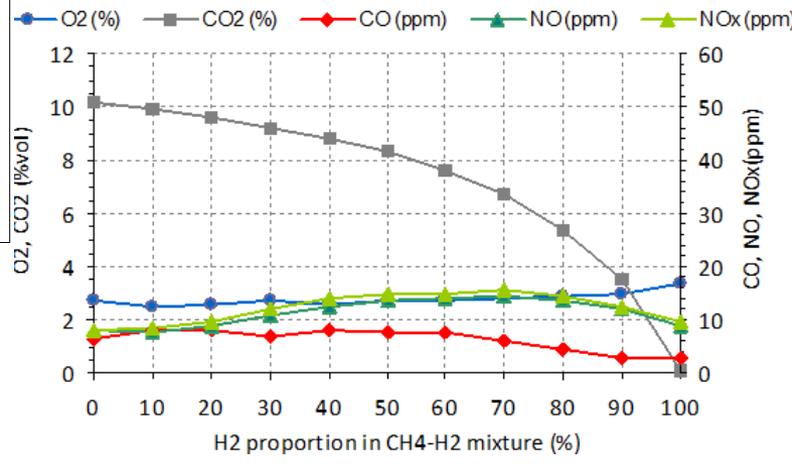
La combustion sans flamme de mélanges CH₄ - H₂

- Expériences sans préchauffage air (P = 20 kW - λ = 1.14 - Ta = 25° C)
 - Toutes proportions de méthane (M100H0) à hydrogène (M0H100)

Imagerie de chimiluminescence OH*



Emissions



- forte modification de la topologie des zones de réaction
- des émissions de NO_x ultra-faibles conservées
- un fonctionnement proche d'un foyer de combustion à 'zéro émission'

La combustion de l'hydrogène

- Un regain d'intérêt pour la **combustion de l'hydrogène** en lien avec le développement des nouvelles voies renouvelables de production de H₂ vert pour des systèmes énergétiques décarbonés
- Des **spécificités** qui restent à caractériser en détail
 - Une morphologie de flamme changée
 - Une stabilisation de flamme turbulente améliorée
 - Des Transferts de chaleur modifiés
 - Des émissions de NO_x qui doivent rester maîtriser
- Un **large champ d'actions de recherche et de potentiels d'applications**



Remerciements

● Au CORIA

- C. Lacour, B. Lecordier, C. Gobin, M. Boukhalfa, A. Cessou
- G. Guiberteau, K. Rajamanickam, N. Valdez, F. Guichard, A. Bâ, S. Juma, X. Paubel, M. Ayoub, B. Taupin, C. Rottier

● Nos partenaires industriels

- Air Liquide : R. Tsiava, X. Paubel, S. Juma, A. Pubill-Melsio
- ENGIE : A. Quinqueneau, T. Laplace, G.A. Grandin



● Avec le soutien de :

- ANR
- ADEME
- Région Normandie
- Union Européenne



La combustion de l'hydrogène

David Honoré

CORIA - CNRS UMR 6614

INSA Rouen Normandie

david.honore@coria.fr

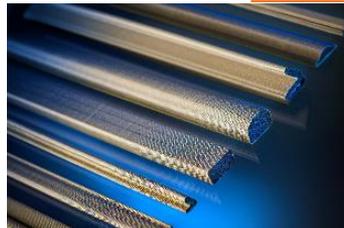
TECH HOUR PROCHAIN SUJET

Mardi 26 janvier 2021

Retenez la date
du prochain
Tech Hour

Les technologies de Cold Spray

L'intervention sera réalisée par
Philippe LEMEILLE
MALLARD - Mécanique Industrielle
177 Route de Lillebonne
76170 Saint-Antoine-la-Forêt



La projection COLD SPRAY est un procédé de métallisation à froid : les poudres métalliques sont projetées à vitesse très élevée par un gaz sous pression (jusqu'à 50 bars et 1100°C) sur la pièce neuve ou à réparer, la force d'impact assurant la qualité du dépôt.



NAE

745 avenue de l'Université
Bâtiment CRIANN
F - 76800 Saint-Etienne du Rouvray
T +33 (0)2 32 80 88 00

www.nae.fr

