

**Programme Interdisciplinaire Énergie 2006-2009
POLYTECH'NANTES, 16—18 Novembre 2009**

S Y N G A S P O U R T U R B I N E S

Iskender GÖKALP • ICARE-CNRS

Institut de Combustion, Aérothermique,
Réactivité et Environnement

45100 Orléans

<http://www.cnrs-orleans.fr/icare/>

M. A. BOUKHALFA • CORIA

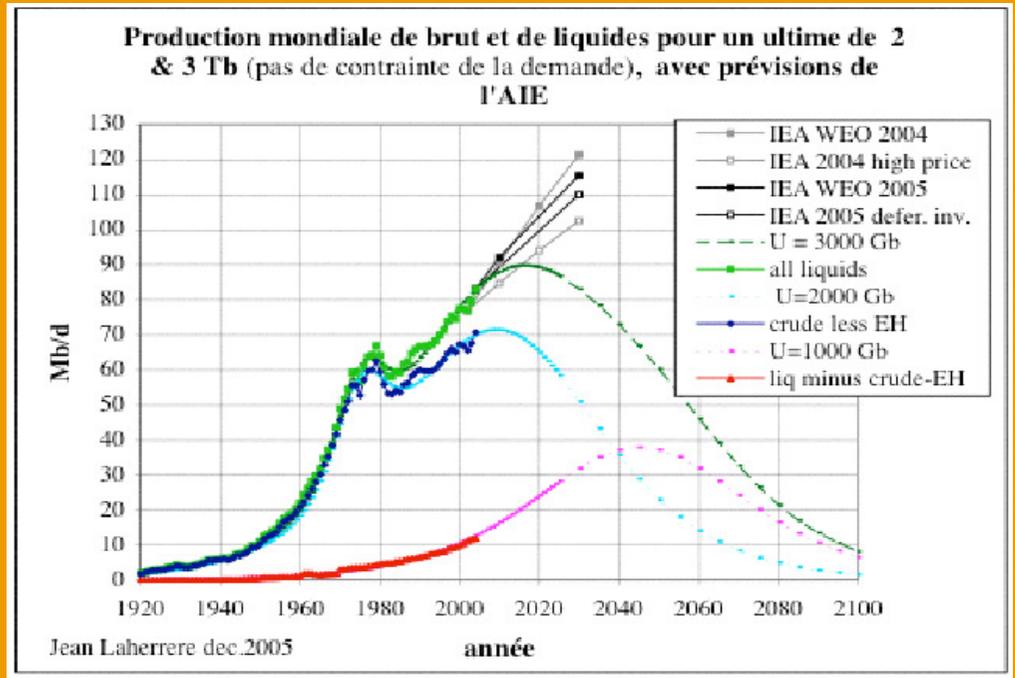
Complexe de Recherche Interprofessionnel en
Aérothermochimie

76801 Saint Étienne de Rouvray

<http://www.coria.fr>



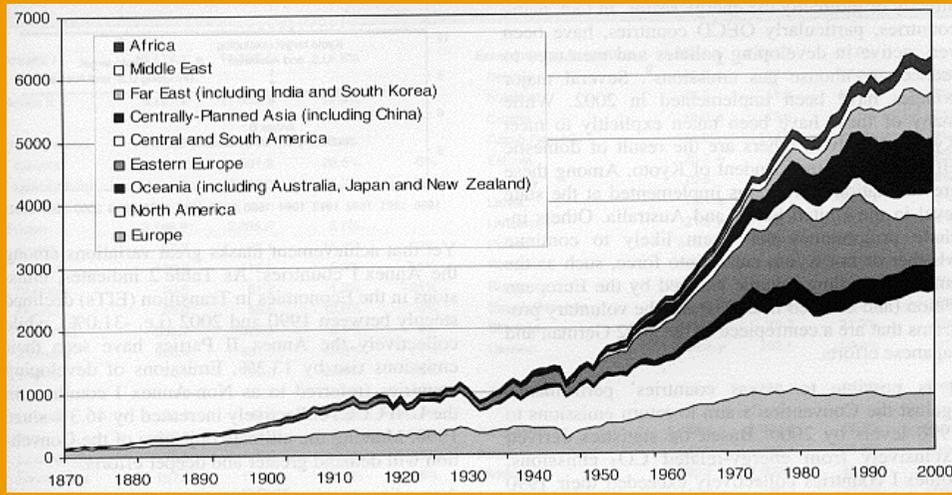
Fossil fuel depletion



GHG emissions increase due to CO2
Global warming, climate change

Millions de tonnes équivalent carbone

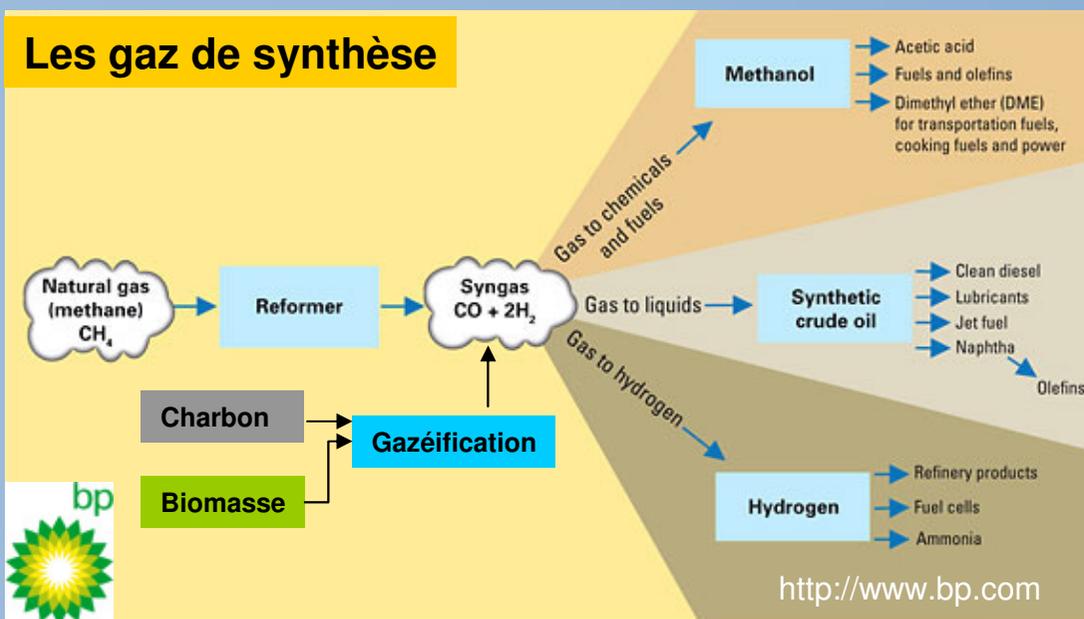
(Source: Marland, G., TA. Boden, and R. J. Andres, 2003. *Global, Regional, and National Fossil Fuel CO2 Emissions*. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., United States)



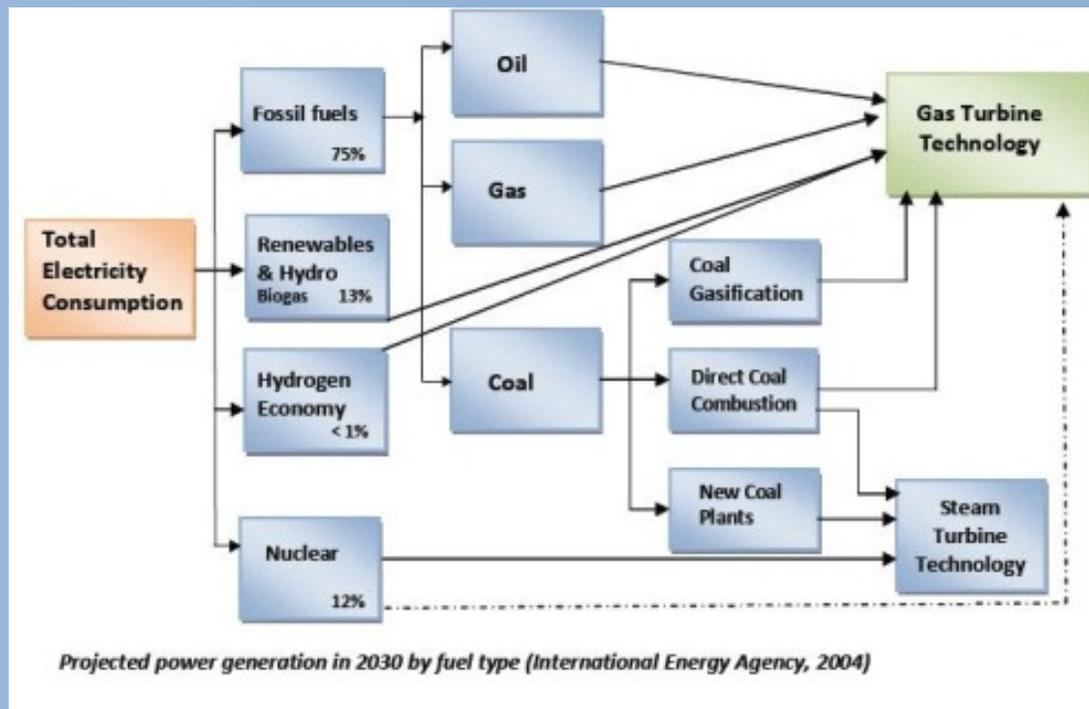
• Objectifs du projet SYNGAS pour turbines

- Pour les décennies à venir, les **combustibles fossiles** continueront à rester les ressources primaires principales pour la production d'énergie, **tout en se raréfiant dans le temps**.
- Il est capital d'une part de retarder leur épuisement et de les convertir en énergie le plus proprement possible vis-à-vis des contraintes environnementales, notamment les émissions de **gaz à effet de serre** (CO_2).
- De **nouveaux combustibles gazeux ou liquides** peuvent être produits par divers procédés : gazéification du charbon, de la biomasse pour l'obtention du syngaz; divers procédés catalytiques pour l'obtention de combustibles liquides à partir du syngaz ou par la liquéfaction directe du charbon ou à partir de la biomasse; méthanisation de la biomasse et divers déchets organiques

Les gaz de synthèse



- Les **nouvelles turbines** à gaz fonctionnant en régime de combustion prémélangée et pauvre en combustible, (réduction de la consommation du combustible, du rejet de CO₂ et des NO_x) continueront aussi à assurer une grande partie de la production d'électricité
- Ces mêmes turbines à gaz devraient aussi pouvoir utiliser **le syngaz** (principalement CO+H₂) comme combustible. En particulier, face à l'inéluctable accroissement de l'utilisation du charbon (et de la lignite), la combustion du syngaz obtenu par la gazéification du charbon (ou sa co-gazéification avec les biomasse) devrait pouvoir **faciliter la capture du CO₂**.



Les objectifs globaux de ce projet sont d'identifier les besoins de recherche pour optimiser la combustion du syngaz dans les turbines à gaz, notamment concernant les aspects suivants:

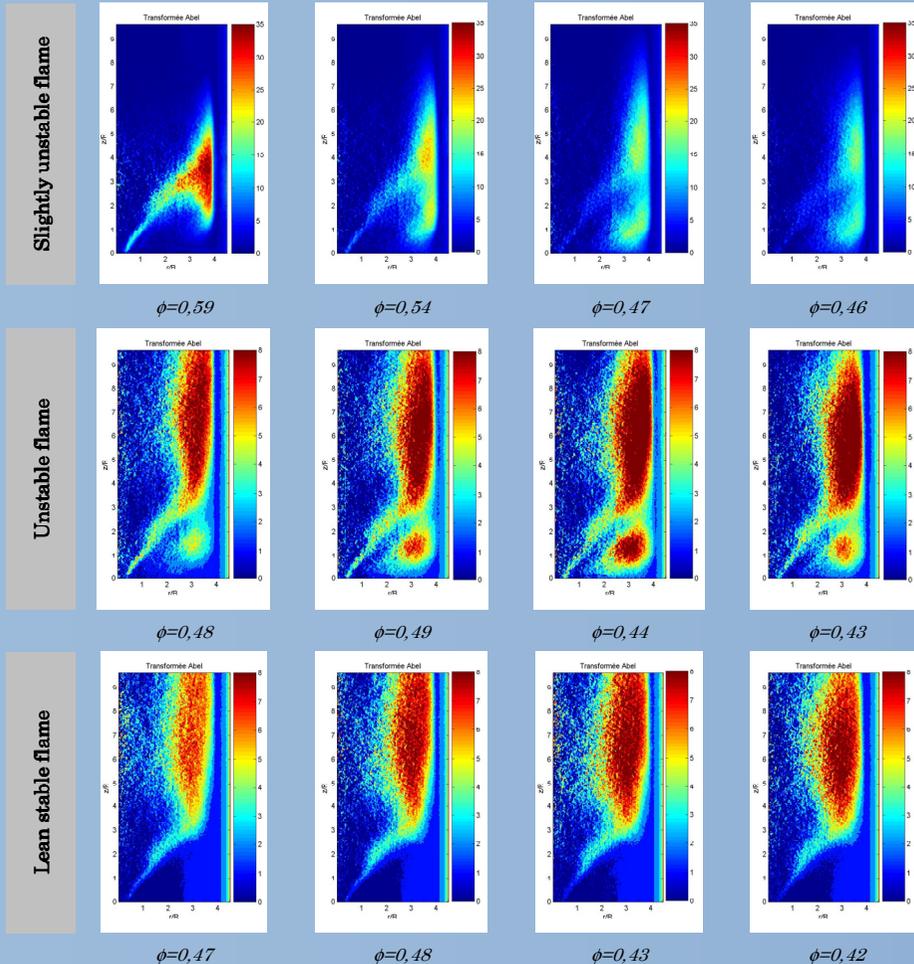
- Combustion stable
- Combustion sans retour de flamme
- Émissions de NO_x < 10 ppm
- Zéro émissions de CO₂



• La combustion stable du syngaz dans les conditions turbines

• La combustion du syngaz dans la turbine doit se dérouler dans les conditions les plus pauvres possibles en combustibles afin de réduire les émissions de NOx sans l'utilisation des technologies humides et aussi sans recourir aux catalyseurs.

• Les techniques les plus appropriées en termes de stabilisation de la flamme et son contrôle actif incluent le contrôle de la flamme par laser et par plasma. D'autant plus qu'il a été identifié que les instabilités de flamme ont un effet promoteur sur le risque de retour de flamme.



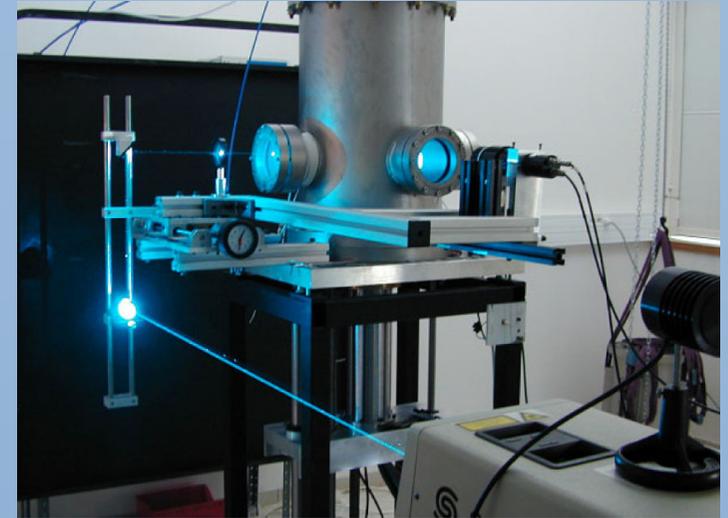
Régimes de stabilités d'une flamme de biogaz à Patm (CORIA, INSA-ROUEN, programme Européen AFTUR



Combustion assistée par plasma ; flamme prémélangée de propane/air de 12 kW (richesse = 0.8) sans et avec plasma. (source : EM2C <http://www.em2c.ecp.fr>)

- Combustion sans retour de flamme

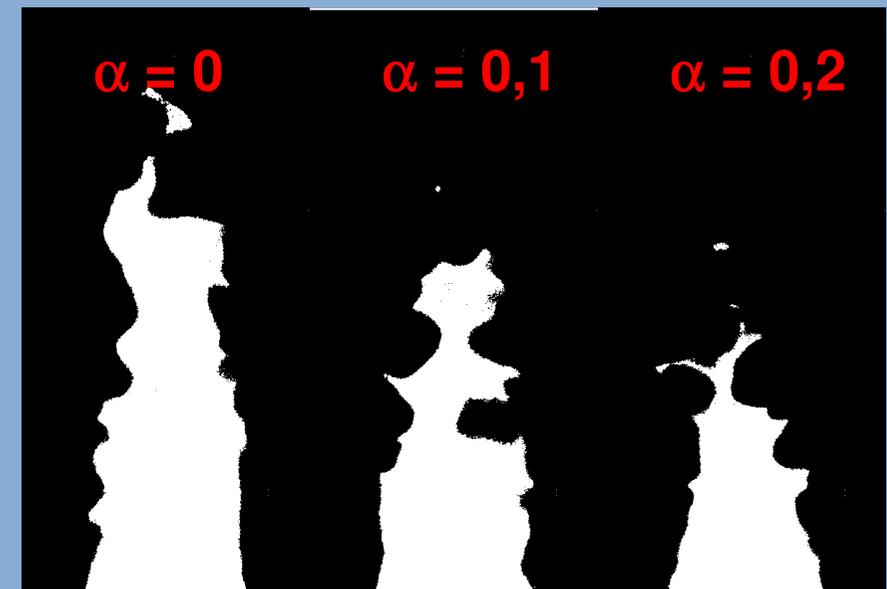
- Le risque de **retour de flamme** en régime prémélangé est important et doit être minimisé et contrôlé. Il est essentiel de concevoir un programme de travail cohérent permettant d'évaluer d'une façon rigoureuse les risques de retour de flamme du **syngaz**.
- Cette tâche nécessite la conception et la réalisation d'un dispositif expérimental original permettant d'approcher les conditions de fonctionnement réel d'une turbine à gaz, notamment en **pression** et en **température**.



*Diagnostic laser sur une flamme d'hydrogène
- air sous pression jusqu'à 1.0 MPa. (ICARE)*

H₂ effect

- Caractériser la **cinétique chimique** et **dynamique** des flammes laminaires et turbulentes de **syngaz**.
- Utiliser les dispositifs expérimentaux et les moyens numériques existants dans les laboratoires français afin de mener des études sur la cinétique et dynamique de flamme à haute pression et température
 - Concevoir le dispositif optimal pour étudier le couplage entre instabilités de flamme et risque de retour de flamme.



• Vitesse de propagation laminaire des mélanges de syngaz et d'air (Thèse de N. Bouvet, ICARE, 2009)

Authors	Set-up	Diagnostic	Composition			E.R.	P [bar]	T [K]	Figure/Page in Ref.	Ref.
			H ₂	CO	Diluent					
Badami & Egerton, 1955	FF	×	5.30 → 18.05	94.70 → 81.95	+ 0.12 % H ₂ O of total volume	0.33 → 0.36	1	Amb.	F12/309	[193]
Schoite & Vaag, 1959	CF	Schlieren (CA)	0.58 → 6.69	99.42 → 93.31	×	1.95	1	Amb.	F1/505	[194]
			0 → 24.42	100 → 75.58	×	2.38	1	Amb.	F2/506	
			0/0.55/3/ 10.5/24.1/43.3 /69.7/100	100/99.45/97/ 89.5/75.9/56.7 /30.3/0	×	Rich side, ≈ 1 → 4.5	1	Amb.	F1/512, T1-F2/513, F3/514	[195]
Yumuk, 1967	HF	×	0/10/25/ 40/ 60/90/100	100/90/75/ 60/40/10/0	×	0.6	1	Amb.	F3/192, F5-F6-F7/193, F8/194	[196]
Günther & Janisch, 1971	CF	Schlieren (CA)	0/10/20/ 40/60/80/100	100/90/80/ 60/40/20/0	×	1.0	1	Amb.	F8/977	[197]
McLenn et al. 1994	OFF	Schlieren	5/50	95/50	×	0.5 → 6.0	1	Amb.	F3-F4/753	[188]
Vagelopoulos & Egolfopoulos 1994	CTF	LDV	12.19 → 29.86	87.81 → 70.14	×	0.39	1	Amb.	F1/1319	[198]
			1.41 → 28.92	98.69 → 71.08	×	0.49				
			1.07 → 28.84	98.93 → 71.16	×	0.6				
Bronu et al. 1996	OFF	Schlieren	5/50/100	95/50/0	×	0.5 → 2.4	1	Amb.	No flame speeds/Markstein lengths results only.	[199]
Hassan et al. 1997	OFF	Shadow	3/5/10/25/50	97/95/90/75/ 50	×	0.6 → 5.0	1	Amb.	F5/244	[187]
			5	95	×	0.6 → 5.0	0.5, 1.0, 2.0, 4.0	Amb.	F6/244	
Huang et al. 2004	CTF	PIV	28	25	47 % N ₂	0.7-1.4	1	Amb.	F13-14/248, F17/250	[83]
Buknute & Moss 2007	CF	Schlieren (FSA)	33	67	×	Limited-Lenn side	1, 3, 5	Amb.	F7-F8/5	[192]
			28.5	1.5	70	Limited	1, 3, 4, 5	Amb.	F9/5	
Serrano et al. 2007	OFF	Schlieren	21	24	55	0.8 → 1.8	1, 2, 5, 5	Amb.	T1/6, F5-F6/8, F7/9	[200]

• Vitesse de propagation laminaire des mélanges de syngaz et d'air (Thèse de N. Bouvet, ICARE, 2009)

Sun et al. 2007	OPF	Schlieren	1/5/25/50	99/95/75/50	×	0.6 → 4.5	1	Amb.	F1/442	[189]
			5/25/50	95/75/50	×	0.6 → 4.5	2	Amb.		
			50	50	×	0.5 → 3.5/4.0	5, 10	Amb.	F2/443 N ₂ of air is replaced with He	
			25	75	×		5, 10, 20			
5	95	×	5, 10, 20, 40							
Natarajan et al. 2007	CF & SPF	Chem. (FSA) & LDV	5/50	95/50	×	0.6 → 1.05	1	Amb.	F3/6	[71, 73, 201, 202]
			5/50/95	95/50/5	0/20, 0/10, 0/20 % CO ₂	0.6 → 1.05	1	Amb.	F5/8, F7-F8/10	
			5/50/95	5/50/955	×	0.6 → 1.05	1	300 → 700	F9/11, F12/13, F13/14	
Prathap et al. 2008	OPF	Shadow	50/40/30/20	50/40/30/20	×/20/40/60	0.6 → 1.8/3.5	1	Amb.	T1 /6, F5/9, T2/6, T3/6, T4/7, F10/12, F12-F13/14	[203]
Burke et al. 2009 (2007)	OPF	Schlieren	50	50	×	0.6 → 4.0	1	Amb.	F11/8 (Ref. 20 [164])	[164, 204]
			25	75	He (Oxidizer O ₂ :He 1:7)	0.8 → 3.5	10, 20	Amb.		
Dong et al. 2009	CF	Direct visualization (FSA)	0/10/20/30/40/50/60/70/80/90/100	100/90/80/70/60/50/40/30/20/10/0	×	0.4/0.6 → 2.2	1	Amb.	F5/1860, F6-F7-F8/1861, F9-F10/F11/1862	[205]
Natarajan et al. 2009 (2008)	CF	Chem. (FSA)	50	50	×	0.6 → 1.0	1	300 → 700	F3 /1264	[191, 206]
			50	50	He (Oxidizer O ₂ :He 1:7)	0.6 → 1.2	10	Amb.	F2 /1263	
			20 → 80 30 → 80	80 → 20 70 → 20	He (Oxidizer O ₂ :He 1:9)	0.6 0.8	15	600 300	F4 /1264 F5/1265	
			50 → 90	50 → 10	He (Oxidizer O ₂ :He 1:9) + 40 % CO ₂ dilution	0.75	15	600	F8/1267	

Table 5.1 Summary of H₂/CO blends laminar flame speeds available in the literature (in "Setup": FF - Flat Flame, CF - Conical Flame, HF - Heat Flux, OPF - Outwardly Propagating Flame, CTF - Counterflow Flames, SPF - Stagnation Plate Flame; in "Diagnostic": CA - Cone Angle, FSA - Flame Surface Area, Chem.: Chemiluminescence, E.R. = Equivalence Ratio).

- Vitesse de propagation laminaire des mélanges de syngaz et d'air (Thèse de N. Bouvet, ICARE, 2009)

Experimental Methodology

Burner Apparatus Modifications

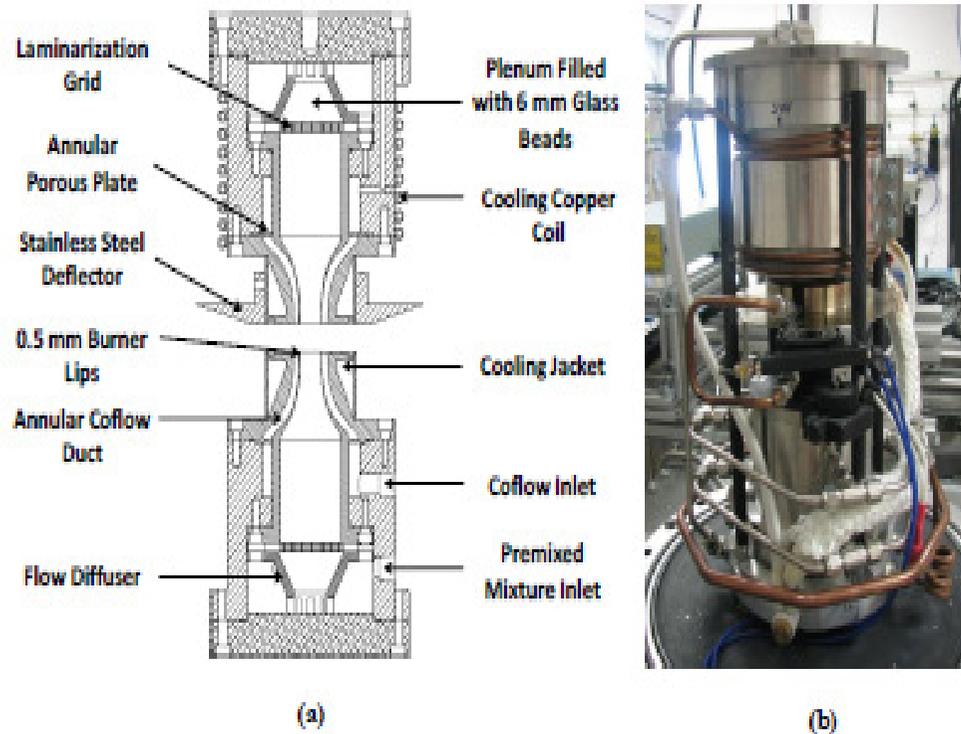


Figure 5.1 Counterflow flame burner apparatus for the syngas flame speed experiments: (a) Schematic of the counterflow burner, (b) Photography of the experimental apparatus.

- Vitesse de propagation laminaire des mélanges de syngaz et d'air (Thèse de N. Bouvet, ICARE, 2009)

Mixture Composition H ₂ /CO %	ER	S_L , cm.s ⁻¹	σ_{Lg} , cm.s ⁻¹	K _{range}	Le_{St}	Le_{CO}	Le_{St} ----- Le
5/95	0.4	8.7	0.2	0.139 - 0.327	0.29	1.09	1.0
	0.6	18.3	0.7	0.082 - 0.128	0.30	1.10	1.0
	0.8	27.0	1.3	0.062 - 0.087	0.30	1.11	1.0
	1.0	41.3	1.2	0.031 - 0.061	0.30	1.11	(1.0)
	1.0	41.8	1.3	0.030 - 0.053	0.30	1.11	(1.0)
	1.5	57.2	0.8	0.028 - 0.040	×	×	1.13
	2.0	62.1	1.9	0.022 - 0.037	×	×	1.14
	2.5	68.6	2.5	0.019 - 0.029	×	×	1.15
	3.0	66.3	2.3	0.020 - 0.028	×	×	1.16
	4.0	51.2	1.4	0.028 - 0.046	×	×	1.17
5.0	32.4	3.7	0.045 - 0.076	×	×	1.18	
10/90	0.4	8.8	0.4	0.142 - 0.267	0.30	1.12	1.0
	0.6	21.9	0.7	0.066 - 0.099	0.31	1.14	1.0
	0.8	33.7	5.0	0.046 - 0.085	0.31	1.16	1.0
	1.0	49.2	4.0	0.029 - 0.043	0.32	1.17	(0.99)
	1.5	66.4	6.2	0.024 - 0.032	×	×	1.21
	2.0	78.0	14.2	0.022 - 0.026	×	×	1.23
	3.0	79.4	13.3	0.022 - 0.028	×	×	1.27
	4.0	64.4	1.7	0.024 - 0.041	×	×	1.29
	5.0	43.8	2.6	0.030 - 0.051	×	×	1.31
	15/85	0.4	11.0	0.6	0.103 - 0.171	0.31	1.15
0.6		33.7	0.7	0.052 - 0.087	0.32	1.18	0.99
0.8		49.4	3.6	0.035 - 0.046	0.32	1.20	0.99
1.0		72.0	2.3	0.017 - 0.027	0.33	1.23	(0.99)
1.0		72.0	2.3	0.017 - 0.027	0.33	1.23	(0.99)
5.0		50.4	2.3	0.026 - 0.067	×	×	1.44
20/80	0.4	12.9	1.8	0.103 - 0.163	0.32	1.17	0.99
	0.6	31.2	5.3	0.048 - 0.090	0.33	1.22	0.99
	0.6	52.4	1.0	0.028 - 0.050	0.34	1.25	0.98
	0.8	56.6	2.0	0.022 - 0.036	0.34	1.25	0.98
	4.0	95.5	8.3	0.018 - 0.023	×	×	1.54
	5.0	58.5	2.4	0.019 - 0.052	×	×	1.58
25/75	0.4	12.8	0.3	0.112 - 0.252	0.32	1.20	0.99
	0.6	32.0	0.8	0.049 - 0.100	0.34	1.25	0.98
	0.8	43.1	4.2	0.051 - 0.071	0.35	1.30	0.98
	4.0	94.4	9.6	0.017 - 0.021	×	×	1.67
	5.0	64.2	4.9	0.029 - 0.040	×	×	1.72
50/50	0.4	16.0	0.7	0.103 - 0.177	0.36	1.34	0.95
	0.6	52.0	2.3	0.027 - 0.038	0.39	1.45	0.92
	0.8	102.4	17.0	0.015 - 0.017	0.42	1.55	0.89

Table S.6 Summary of experimental conditions for syngas/air flames at atmospheric pressure and ambient temperature (ER: Equivalence Ratio, K_r: Karlovitz number, L_e: Lewis number). When ER = 1.0, corresponding L_e numbers are between parenthesis since expression (5-1) should be evaluated for off-stoichiometric conditions.

- Vitesse de propagation laminaire des mélanges de syngaz et d'air (Thèse de N. Bouvet, ICARE, 2009)

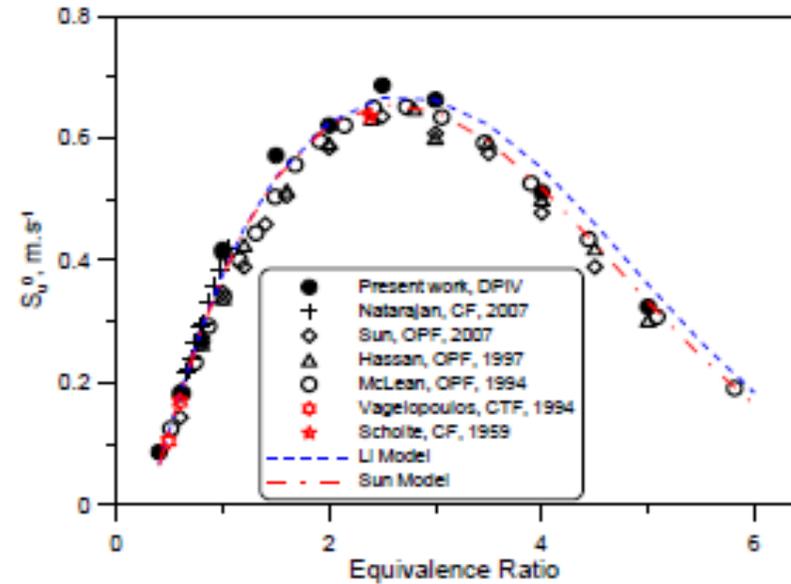
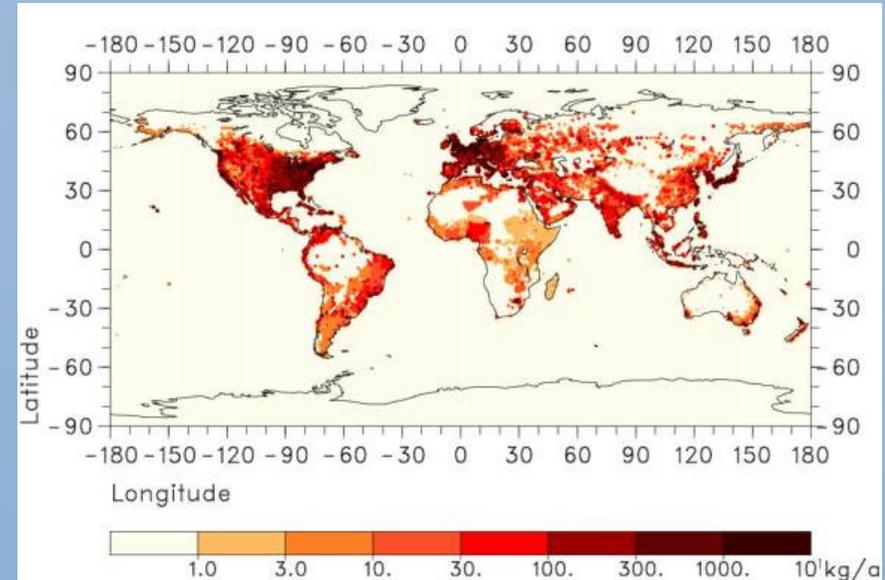


Figure 5.10 Comparison of syngas laminar flames speeds of the 5/95 % H_2/CO blend with available datasets from the literature. Datasets are from Natarajan et al. [71], Sun et al. [189], Hassan et al. [187], Mclean et al. [188], and remote data points of Vagelopoulos et al. [198] and Scholte and Vaag: [194]. Models: Li et al. [214] and Sun et al [189] (CF: Conical Flames, OPF: Outwardly Propagating Flames, CTF: Counterflow Flames).

- Réduire l'émissions de **NO_x** à < 10 ppm nécessite une connaissance avancée de la **cinétique chimique** de la formation des NO_x à haute pression.
- Cette connaissance doit découler des études sur les réactions élémentaires menant à la formation des NO_x à haute pression (établissement de schémas cinétiques détaillés et réduits) dans des flammes à haute pression.



Émissions de NO_x cumulées sur l'année 1996 (source : Global impact of road traffic emissions on tropospheric chemistry, Matthes *et al.* ; <http://ies.jrc.cec.eu.int>)

- Les laboratoires français experts en cinétique chimique de la combustion sont parmi les meilleurs à l'échelle internationale
 - Une démarche cohérente devrait pouvoir émerger pour prédire les émissions de NO_x à haute pression, notamment en fonction de la teneur en H₂ dans le prémélange

Certaines compagnies américaines affichent déjà des émissions de NO_x de l'ordre de 3 ppm dans les turbines à gaz alimentées en syngaz. Il est donc capital de pouvoir mobiliser la recherche française et européenne pour obtenir des résultats identiques.



Générateur de 20 MW fonctionnant au syngas, société américaine Kimberlina (source : <http://www.zero.no>)



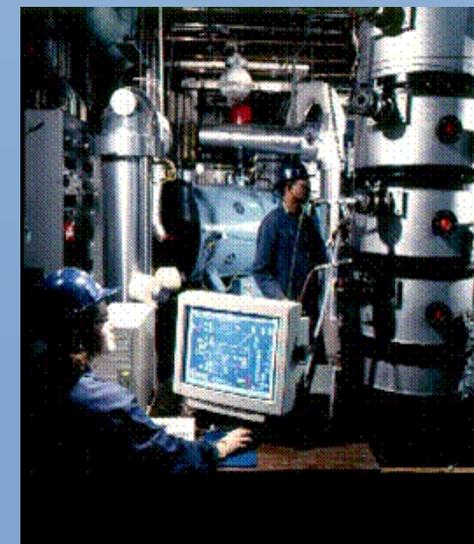
European Technology Platform on Zero Emission
Fossil Fuel Power Plants

<http://www.zero-emissionplatform.eu>

- À partir de 2020, la production d'énergie par combustibles fossiles ne doit pas produire de CO₂ selon les objectifs fixés par la Commission Européenne. Il est capital de proposer la méthodologie et la technologie optimale pour la capture du CO₂ lors de la combustion du syngaz dans les turbines à gaz.

- Trois trajectoires sont envisagées :

- * **capture pré-combustion** (limitée par la non-maturation actuelle de la technologie des turbines alimentées en hydrogène)
- * **capture post-combustion** (nécessite d'augmenter la concentration de CO₂ dans les gaz de combustion, donc de diluer le syngaz avec du CO₂)
- * **oxy-combustion** qui permettrait de solutionner le problème des émissions de NO_x ainsi que de la concentration en CO₂ dans les gaz de combustion (d'où la nécessité de d'étudier l'oxy-combustion du syngaz à haute pression).



Chambre d'oxy-combustion
de 300 IW, CANMET (source :
www.co2captureandstorage.info)

Le projet exploratoire se proposait d'identifier les méthodologies de recherche les plus appropriées pour contribuer à l'optimisation du fonctionnement des turbines à gaz alimentées par du syngaz et ses divers mélanges, et ce dans les conditions de turbines à gaz à très faible émission, c'est-à-dire, hautes pressions, température modérées, conditions de richesse pauvre et modes de combustion facilitant la capture de CO₂.

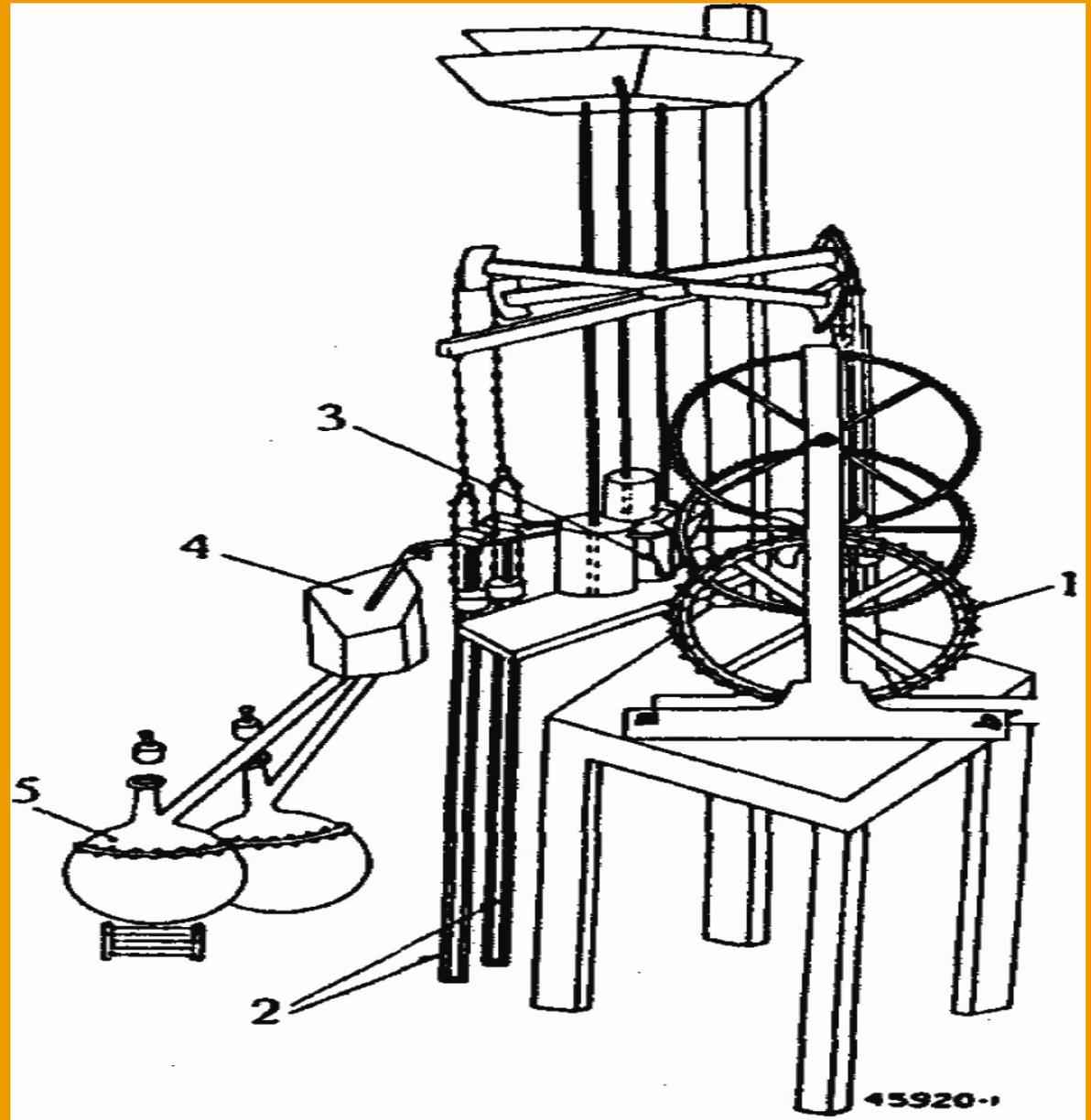
La synthèse effectuée concernait les actions qui devraient y contribuer en termes d'opérations de recherche portant sur les propriétés fondamentales de la combustion, et en se focalisant essentiellement sur leur caractérisation expérimentale. Elle donne des pistes d'actions de recherche qui pourraient être prises en charge par les forces de recherches françaises dans le domaine de la combustion. Ces pistes de recherche sont, en particulier, les suivantes :

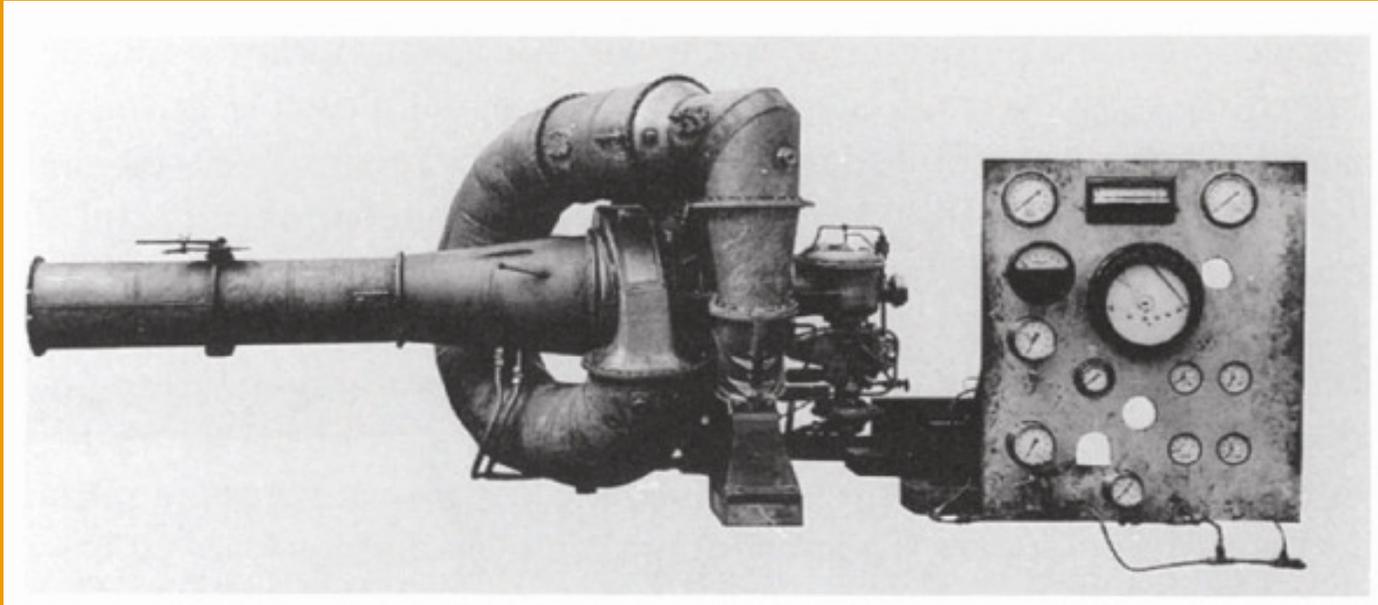
- * Cinétique chimique, auto-inflammation des mélanges de syngaz
- * Emissions issues de la combustion des mélanges de syngaz
- * Vitesses de propagation laminaire des mélanges de syngaz
- * Stabilité et taux de combustion turbulente des flammes de mélanges de syngaz
- * Oxy-combustion des mélanges de syngaz

La synthèse effectuée montre que les forces de recherche françaises en combustion et dans les domaines connexes comme la capture du CO₂, possèdent toutes les expertises nécessaires pour développer des programmes intégrés sur la combustion du syngaz et de ses divers mélanges dans les conditions pertinentes pour des applications turbines à gaz.



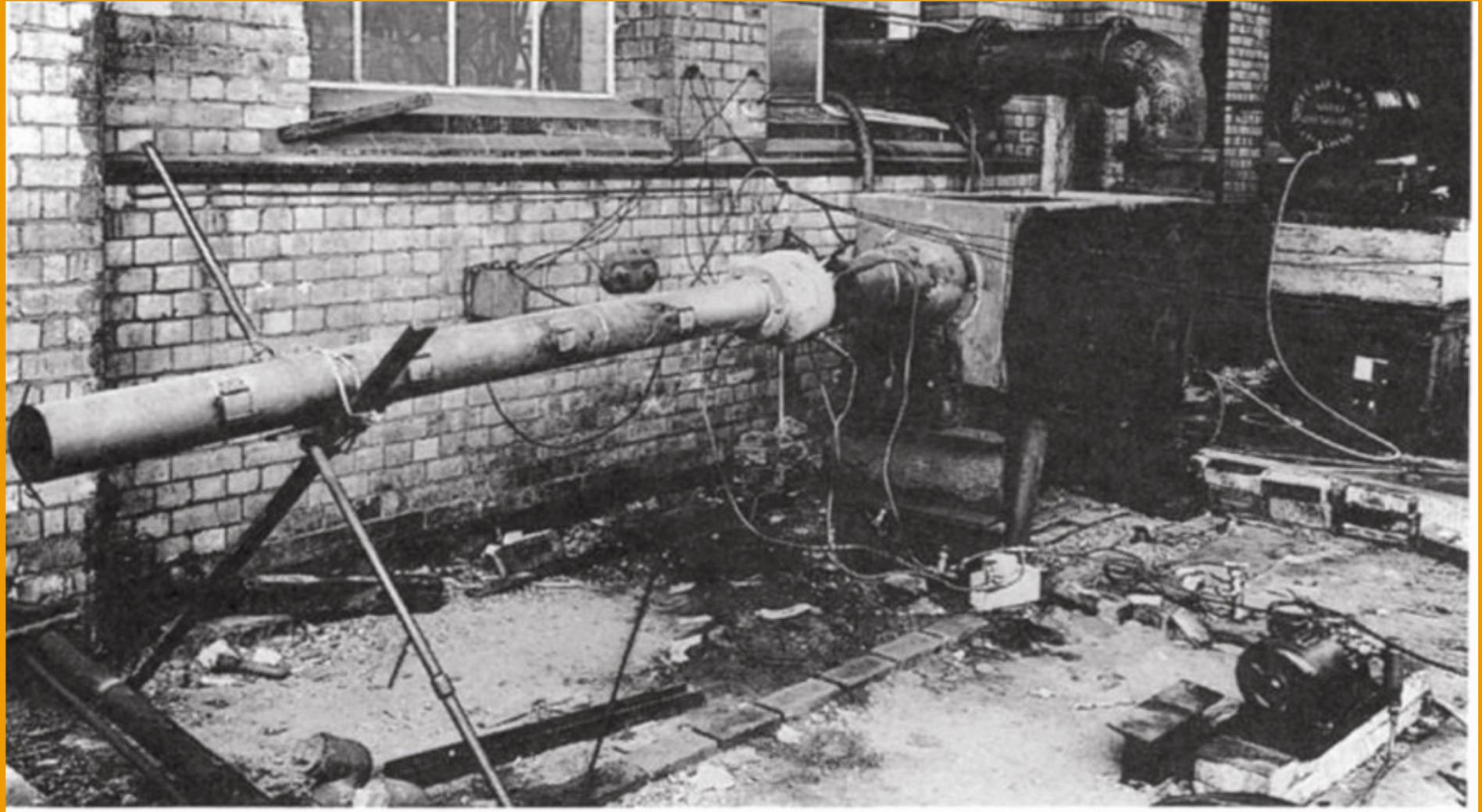
The prehistory of the gas turbine technology starts with the patent issued to **John Barber in England (1791)**, but no working model of it was ever built.





Assembly of the first model of Whittle's experimental engine which run for the first time on 12 April 1937.

The W1 engine had its first run on 12 April 1941 and was first flight tested with The Glouster E28 aircraft on 15 May 1941



Whittle's combustion chamber test rig

