



HAL
open science

Action du champ d'accélération sur les flammes de prémélange méthane/air

D E Premelange, Methane / Air, R. Prud'Homme, D. Durox

► **To cite this version:**

D E Premelange, Methane / Air, R. Prud'Homme, D. Durox. Action du champ d'accélération sur les flammes de prémélange méthane/air. First European Symposium Fluids in Space, Nov 1991, Ajaccio, France. pp.131 - 144. <hal-02910306>

HAL Id: hal-02910306

<https://hal.science/hal-02910306v1>

Submitted on 1 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ACTION DU CHAMP D'ACCELERATION SUR LES FLAMMES DE PREMELANGE METHANE/AIR¹

par

R. PRUD'HOMME, D. DUROX

Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, Meudon, France

1- INTRODUCTION

L'étude du comportement des flammes de prémélange sous l'effet d'accélération supérieure à 1g fait suite naturellement aux *essais menés en vol parabolique et au sol* [1 à 7]. En effet, ces essais ont mis en évidence l'action de la microgravité et ont aussi permis des observations et des mesures à environ 2g pendant les ressources de l'avion qui précèdent chaque trajectoire parabolique. Des mesures précises par anémométrie laser effectuées au sol ont permis d'évaluer les effets de la pression, de la richesse du mélange et de la vitesse débitante sur les fréquences naturelles de vibration des flammes de prémélange air-méthane [5, 6]. Compléter les mesures sur les flammes air-méthane en vérifiant si les lois fréquence-accelération précédemment déterminées expérimentalement et théoriquement restent valables au-delà de 1g, compléter aussi les observations sur le champ d'existence des instabilités cellulaires des flammes de prémélange d'air et de propane [3,4] ont été les deux objectifs principaux des *essais en centrifugeuse* (dans le cadre d'une convention CNES/CNRS) qui ont été concluants pour des accélérations inférieures à 10g. Une expérience de flamme de bougie a également été menée sans que l'objet en soit une analyse précise, cette expérience a néanmoins donné des résultats intéressants concernant l'évolution de la forme et de la taille de flamme en fonction de l'accélération. Notons que les instabilités cellulaires des flammes de propane n'ont pu être obtenues et que seules les oscillations de ces flammes ont été étudiées.

Pour ces expériences, le caisson utilisé était le même qu'en vol parabolique [1, 2] mais le tableau de commande avait été séparé afin d'être disposé dans la nacelle de la centrifugeuse. Les caractéristiques de cette centrifugeuse sont les suivantes : rayon 5 m, accélérations jusqu'à 200 g, volume de la nacelle (non étanche) 1 m.

Il s'agit de la centrifugeuse du LCPC à Nantes (figure 1). Seuls seront examinés et interprétés ici les résultats concernant le prémélange méthane- air.

La figure 2 fournit le schéma du brûleur utilisé, la figure 3 donne une vue de l'installation utilisée en vol parabolique. E. Villermaux, alors stagiaire du contingent, a également participé aux expériences en centrifugeuse.

2- OSCILLATIONS DES FLAMMES DE PREMELANGE

Des *oscillations* sont observées couramment dans les flammes de prémélange. Le sommet d'une flamme de méthane et d'air (figure 4) oscille lui-même à une fréquence de l'ordre de 15 Hz, au sol à la pression atmosphérique et pour une richesse de mélange de 1,6. *Ces oscillations s'évanouissent en microgravité* comme on peut le constater sur la figure 5 où la zone trouble au sommet de la flamme a disparu. Elles sont dues aux forces d'Archimède qui agissent sur les gaz brûlés du fait des différences de température avec l'air ambiant.

Le phénomène observé concerne donc non seulement la flamme, mais aussi le jet gazeux la contenant. C'est donc l'ensemble gaz frais/gaz brûlés qui est siège du phénomène et non la flamme elle-même (la gravité peut difficilement agir efficacement à l'intérieur de la zone de combustion du fait de la faible épaisseur de celle-ci).

¹ Proceedings of the First European Symposium Fluids in Space, Ajaccio, France, 18 – 22 November 1991, ESA SP-353, pp.131-144 (June 1992)

La limite extérieure du jet de gaz brûlés et bien visible à l'oeil nu et l'observation stroboscopique a permis de montrer, en 1987, que la fréquence d'oscillation de ce jet était généralement égale à la fréquence d'oscillation de la flamme [8] et que les deux mouvements étaient "en phase".

Les efforts de recherche ont alors porté sur l'établissement de *la loi reliant la fréquence d'oscillation du phénomène au champ d'accélération*.

Un **raisonnement "aux dimensions"** présenté pour la première fois début 1989 [9] et appliqué ensuite également aux flammes de diffusion [10, 11] a été validé par les résultats expérimentaux en flamme de prémélange et, en ce qui concerne les flammes de diffusion, s'est révélé en accord avec une analyse de perturbations [12].

La validation expérimentale de la loi fréquence/accélération obtenue a été réalisée lors des vols paraboliques de février 1989 [4] en mesurant la fréquence d'oscillation lors des ressources à 1,8g. Améliorer cette validation et trouver une loi plus précise et valable pour un champ d'accélération plus étendu était l'objectif des expériences en centrifugeuse de juillet 1990.

Rappelons succinctement le raisonnement "aux dimensions" utilisé. L'équation de la quantité de mouvement du jet chaud supposé être à la même pression statique que l'air ambiant s'écrit :

$$(1) \quad \frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \vec{g} + \nu \Delta\vec{U}$$

Introduisons L_c , longueur caractéristique.

Si les effets visqueux sont négligeables devant ceux de la pesanteur et de la convection, l'équation (1) permet d'obtenir un temps caractéristique T_a :

$$(2) \quad \frac{1}{T_a} = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{g}{L_c} \right)^{1/2}$$

L'effet de la viscosité sur l'écoulement sera alors défini en ne considérant que la convection et la diffusion. On obtient un temps caractéristique T_v :

$$(3) \quad \frac{1}{T_v} = \frac{\nu}{L_c^2}$$

On remarquera que $T_v^2/T_a^2 = Gr$, nombre de Grashof.

Par combinaison de ces temps caractéristiques on obtient une loi de fréquence pouvant rendre compte de ces effets :

$$(4) \quad F_c = \frac{1}{T_a^m} \frac{1}{T_v^{1-m}} = \frac{Gr^{m-1/2}}{T_a}$$

Pour $m = 1$, les effets visqueux sont négligés :

$$(5) \quad F_c = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{g}{L_c} \right)^{1/2} = \frac{1}{T_a}$$

Cela correspond à la *flamme de prémélange* [4].

Pour $m = 3/2$ on trouve :

$$(6) \quad F_c = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{3/4} g^{3/4} L_c^{1/4} \nu^{-1/2}$$

Cette relation correspond plutôt aux *flammes de diffusion* [12].

Chaque loi est de la forme:

$$(7) \quad F_c \propto g^n$$

mais il reste une indétermination : la longueur caractéristique L_c qui, en principe ne devrait pas dépendre de l'accélération.

D'autre part la loi (5) donnant $n = 1/2$ n'est bien vérifiée que pour des flammes riches de prémélange air-méthane. Dans le cas des flammes de richesse voisines de la stœchiométrie on trouve plutôt $n = 0,45$ dans les expériences.

Il y a place, dans ces considérations, pour d'autres facteurs tels que les effets de diffusion, de transfert thermique caractérisables par les nombres de Schmidt et de Prandtl. On peut envisager aussi le rôle de la vitesse débitante de l'écoulement des gaz frais U_0 faisant intervenir le nombre de Richardson

$$(8) \quad Ri = g \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{L_c}{V_0^2} = \frac{U_c^2}{U_0^2}$$

où $U_c = L_c/Ta$ est la vitesse de convection relative à l'effet direct des forces d'Archimède. Mais une théorie plus fine est nécessaire si l'on veut pouvoir justifier les résultats obtenus. La principale question reste la détermination de la longueur caractéristique L_c .

Pour chaque triplet richesse-vitesse débitante-accélération, les dépouillements manuels ont d'abord porté, sur 18 images successives c'est-à-dire sur une durée de 0,36 sec. Ces premiers dépouillements ont permis d'obtenir la fréquence d'oscillation du jet ainsi que la longueur d'onde λ et la vitesse de propagation C du phénomène. Ces dernières valeurs, moyennées, ont été obtenues sur tracé graphique, en construisant la tangente au point d'inflexion (évalué) à la courbe expérimentale donnant la position du tourbillon en fonction du temps (figure 8). La mesure de la fréquence a ensuite été améliorée en recommençant les dépouillements manuels sur 56 images soit 1,12 sec. Enfin, un dépouillement automatique à l'aide d'un PM visant, sur l'écran TV le mouvement de la limite du jet marqué par une forte variation de luminosité, a permis d'obtenir des valeurs moyennées de la fréquence sur toute la durée de chaque flamme à accélération donnée. Des résultats portant sur la fréquence on déduit, par la méthode des moindres carrés, la pente n de la droite qui, selon la théorie, doit relier les points du diagramme donnant le logarithme de la fréquence d'oscillation en fonction du logarithme de l'accélération à richesse et vitesse débitante données. Le tableau 1 fournit les données de richesse et de vitesse débitante correspondant à chaque cas envisagé ainsi que les lois en puissance déduites des points expérimentaux. L'une des difficultés rencontrées tient au fait qu'aucun réglage (ni vidange) n'est possible dès que la centrifugeuse est "lancée". Une flamme soufflée, par exemple sous l'effet d'une accélération tangentielle, ne peut donc être

rallumée. L'absence de vidange de la chambre en cours d'expérience est la cause de la disparition de l'oxygène de l'air ambiant et de l'accumulation de gaz brûlés. Une étude au sol postérieure a montré que les points de fonctionnement que nous nous étions imposés en centrifugeuse étaient souvent à la limite de la stabilité, près de la courbe de soufflage (figure 9) qui a la même allure que celle obtenue avec le mélange de gaz naturel et d'air [15].

Si l'on admet une loi approximative donnant la fréquence F proportionnelle à la puissance n de l'accélération γ , on constate que la puissance n tend à diminuer de 0,5 à 0,45 lorsque la richesse passe de 1,58 à 1,08, ce qui confirme les résultats obtenus en vol parabolique. La puissance n semble également, à richesse donnée, être sensible à la vitesse débitante et augmente avec celle-ci. Les résultats portant sur la longueur d'onde et la vitesse de propagation de l'instabilité invitent à écrire également des lois en puissances respectives p et q de l'accélération :

$$(9) \quad \begin{aligned} \lambda &\approx \gamma^p \\ C &\approx \gamma^q \end{aligned}$$

Les valeurs $-1/4$ pour p et $+1/4$ pour q peuvent être retenues comme de très grossières approximations (voir tableau 1), si la fréquence est en puissance $1/2$ de l'accélération. Si l'accélération est exprimée en nombre de g et que l'indice (0) est réservé à $1g$, on obtient, à richesse et à vitesse débitante données:

$$\begin{aligned} \lambda^2 F = C^2 / F = \lambda C = \lambda_0 C_0 \\ F^2 / \gamma = F_0^2 / \gamma_0, \quad C^4 / \gamma = C_0^4 / \gamma_0, \quad \lambda^4 / \gamma = \lambda_0^4 / \gamma_0 \end{aligned}$$

avec deux constantes indépendantes λ_0 et F_0 ($C_0 = \lambda_0 F_0$).

La vitesse de propagation C est, dans les cas étudiés, indépendante de la vitesse débitante. En réalité, des "constantes" λ_0 et F_0 doivent intervenir dans une analyse plus fine.

Si l'influence de la richesse est surtout un effet de densité, alors des expériences de simulation peuvent être faites avec des gaz froids comme cela a été fait avec l'hélium, ou avec des mélanges de densité variable. De telles expériences pourraient en tout cas déterminer si oui ou non il s'agit d'un effet de densité ou si la flamme de diffusion joue un rôle important aux richesses élevées. Notons l'existence de simulations numériques mises au point récemment pour les flammes de diffusion [16] qui devraient permettre de déduire des lois de fréquence adéquates et qui, pour l'instant, confirment l'existence de grandes structures tourbillonnaires dans ce cas.

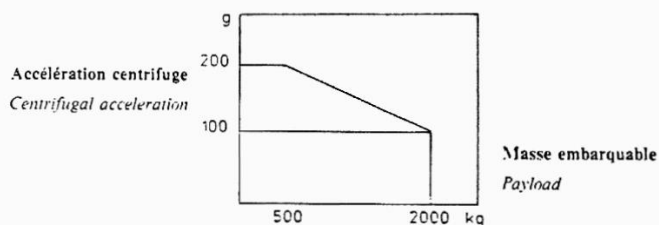
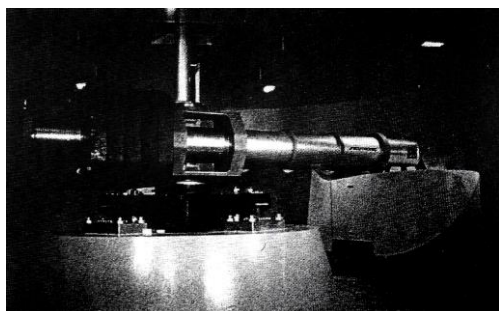
La caméra à 50 Im/sec peut d'autre part être utilement remplacée par une caméra plus rapide. Enfin, des essais au sol plus précis peuvent être développés pour mieux étudier expérimentalement les structures des écoulements par visualisation tomographique et le champ des vitesses par anémométrie laser. Ces essais doivent s'accompagner d'un effort théorique supplémentaire.

REFERENCES

- [1] D. Durox, R. Prud'homme, R. Scouflaire - "Premixed flames in microgravity". Rapport de Contrat CNESIESA, RC 87-10 du Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, juin 1987.
- [2] D. Durox, R. Prud'homme, R. Scouflaire - "Premixed flames in microgravity". in Combustion Experiments during KC-135 Parabolic Flights, ESA SP 1113, pp. 1-9, august 1989.
- [3] D. Durox, R. Prud'homme, R. Scouflaire - "Premixed flames results of February 1989 Campaign in Microgravity". Rapport Final de Contrat CNES (87/CNES/1287 et 88/CNES/1235), RC 89-5 du Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, juin 1989.
- [4] D. Durox, R. Prud'homme - "Behaviour of premixed flames under parabolic flight conditions", Proceedings VII th European Symposium on Material and Fluid Sciences in Microgravity, Oxford, IJK, 10-15 September 1989, ESA SP-295, pp. 461-466, January 1990.
- [5] D. Durox, F. Baillet, P. Scouflaire, R. Prud'homme - "Some effects of gravity on the behaviour of premixed flames", Combustion and Flame, **82**, pp. 66-74, 1990.
- [6] F. Baillet - "Etude expérimentale et modélisation théorique de flammes de prémélange. Application à la flamme soumise à un champ vibratoire", Thèse, Paris VI, pp. 47-54, mars 1989.
- [7] R. Prud'homme, D. Durox - "Premixed flames of methane-air". Parabolic flights ESA campains, Brussels, 19-20 mars 1991.
- [8] R Rolland - "Etude des flammes de prémélange. Phénomène d'oscillations longitudinales et influence de la gravité". Rapport de Stage du DEA de Physique des Liquides, Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, RS 87-16, septembre 1987.
- [9] D. Durox, R. Prud'homme, F. Baillet, G. Bencheikh El Hocine - "Oscillations of premixed flames under the action of gravity". Congrès Commun des Sections Britannique et Française du Combustion Institute, Rouen, 18-21 avril 1989.
- [10] R. Prud'homme - "Flammes de prémélange air-méthane en microgravité éléments théoriques", 33ème Colloque de Métallurgie de l'INSTN. 5ème COMET "Fluides, Matériaux et Microgravité", 18-20 juin 1990.
- [11] R. Prud'homme, D. Durox - "Flammes de prémélange en centrifugeuse". 10ème Congrès Français de Mécanique, Paris, 2-6 sept. 1991.
- [12] J. Buckmaster, N. Peters - 21th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, 1986, 1829-1936.
- [13] E. Villermaux, D. Durox - "Oscillation naturelle des flammes de prémélange: une expérience analogique". 10ème Congrès Français de Mécanique, Paris, 2- 6 sept 1991.
- [14] R. Prud'homme, D. Durox, E. Villermaux, F. Baillet - "Influence d'un champ d'accélération sur les flammes de prémélange". Rapport de Contrat du Laboratoire d'Aérothermique du CNRS, RC 91-7, juillet 1991.
- [15] A. Vantiggelen et al. - "Oxydations et combustions", tome 1, Technip, pp. 407,
- [16] J.L. Ellzey, K.J. Laskey, E.S. Oran - "A study of confined diffusion flames". Combustion and Flame, 84, pp. 249-264, 1991.

| Richesse | Vitesse débitante m/s | Exposant n | Accélération limite en nb de g | Exposant p | Exposant q |
|----------|-----------------------|--------------|--------------------------------|------------|------------|
| 1,56 | 0,91 | 0,58 - 0,51* | 2 | -0,13 | 0,26 |
| 1,59 | 0,72 | 0,56 - 0,53* | 3,4 | -0,25 | 0,32 |
| 1,55 | 0,62 | 0,52 - 0,53* | 4 | | |
| 1,55 | 0,48 | 0,48 - 0,51* | 6,8 | -0,25 | 0,20 |
| 1,57 | 0,43 | 0,43 - 0,51* | 7,5 | -0,13 | 0,30 |
| 1,22 | 1,25 | 0,52 - 0,50* | 2,5 | -0,28 | 0,23 |
| 1,22 | 1,00 | 0,48 - 0,48* | 3,8 | -0,36 | 0,11 |
| 1,08 | 1,55 | 0,53 - 0,49* | 2,3 | 0,03 | 0,58 |
| 1,07 | 1,24 | 0,46 - 0,42* | 3,5 | -0,32 | 0,14 |
| 1,08 | 0,99 | 0,42 - 0,43* | 5 | -0,21 | 0,19 |

Tableau 1 : Valeurs des exposants n, p, q des lois donnant la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de propagation en puissance de l'accélération. (*) : valeurs obtenues par dépouillement automatique.



Domaine d'utilisation de la centrifugeuse du L.C.P.C.

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

DIMENSIONS

| | |
|--|---------|
| Distance axe à plate-forme nacelle | 5.50 m |
| Longueur du rotor | 6.80 m |
| Diamètre salle de centrifugation | 13.50 m |
| Hauteur salle de centrifugation | 3.90 m |
| Nacelle pivotante | |
| • longueur plate-forme | 1,40 m |
| • largeur plate-forme | 1,15 m |
| • hauteur libre | 1,50 m |

PERFORMANCES

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Masse du modèle (max) | 2 000 kg |
| Accélération maximale (à 5 m) | 200 g |
| Balourd admissible | = 100 kN |
| Temps de montée à 200 g | 360 s |

MOTORISATION

| | |
|--|--------|
| Moteur asynchrone bi-vitesses | |
| 1 000 et 1 500 t/min | |
| Puissance nominale | 410 kW |
| Régulation de vitesse par coupleur | |
| et frein électromagnétiques | |
| Rapport de réduction | 7 |

LIAISONS AVEC LE MODELE

| | |
|--|--------|
| Contacts tournants bas niveau | 101 |
| Contacts tournants puissance | 5 |
| Joints hydrauliques | 6 |
| Pression (max) dans joints fluides | 20 MPa |

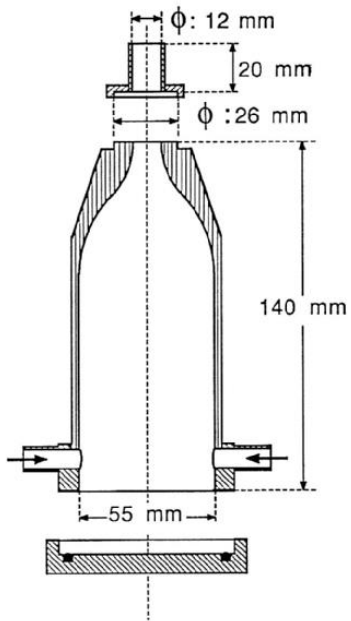


Fig. 2 - Le brûleur

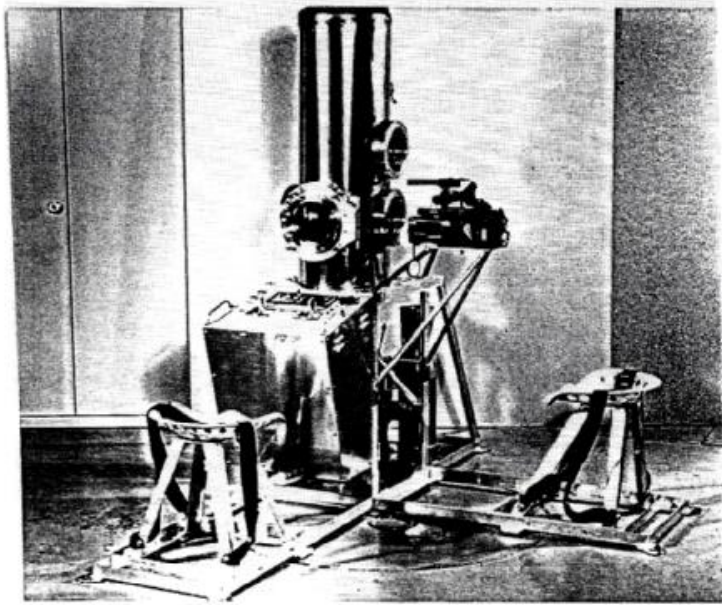


Fig. 3 - L'installation

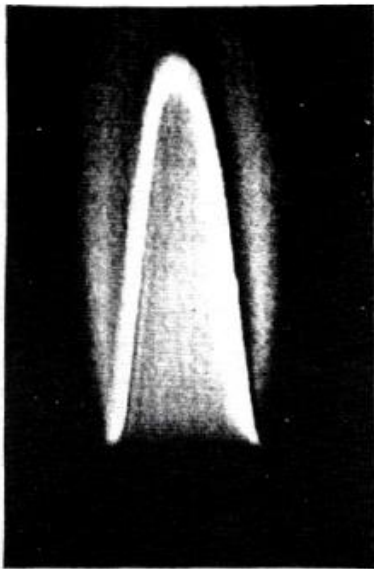


Fig. 4 - La flamme à 1 g

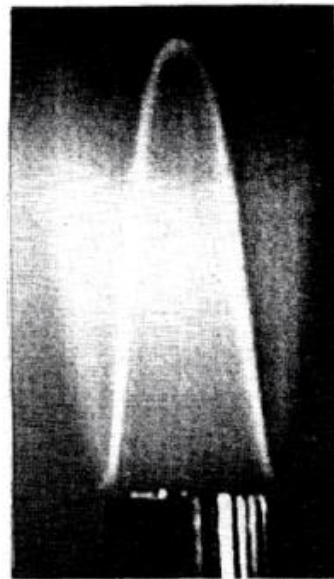


Fig. 5 - La flamme à 0 g

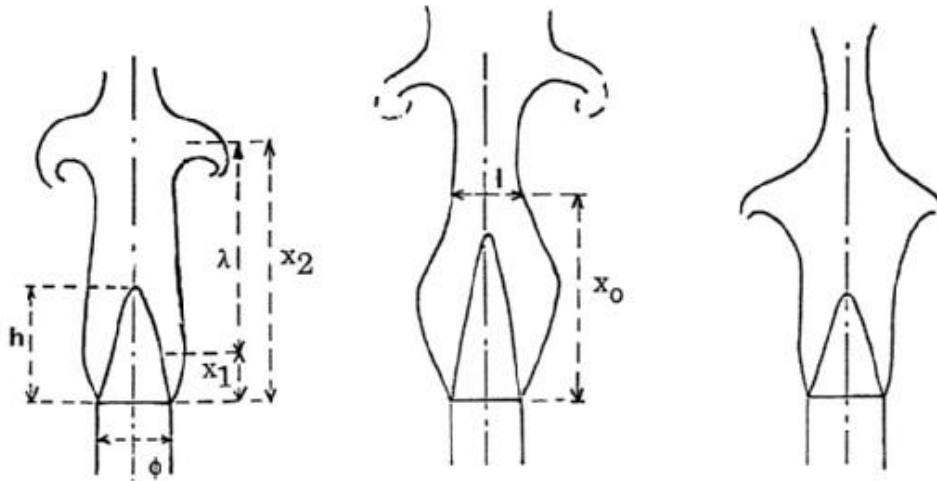


Fig. 6 - Evolution de la flamme, du jet de gaz brûlés et de sa frontière.
 h : hauteur de flamme, ϕ : diamètre du brûleur, l : largeur du jet à une altitude donnée x_0 , x : position de la perturbation, $x_2 - x_1 = \lambda$: longueur d'onde

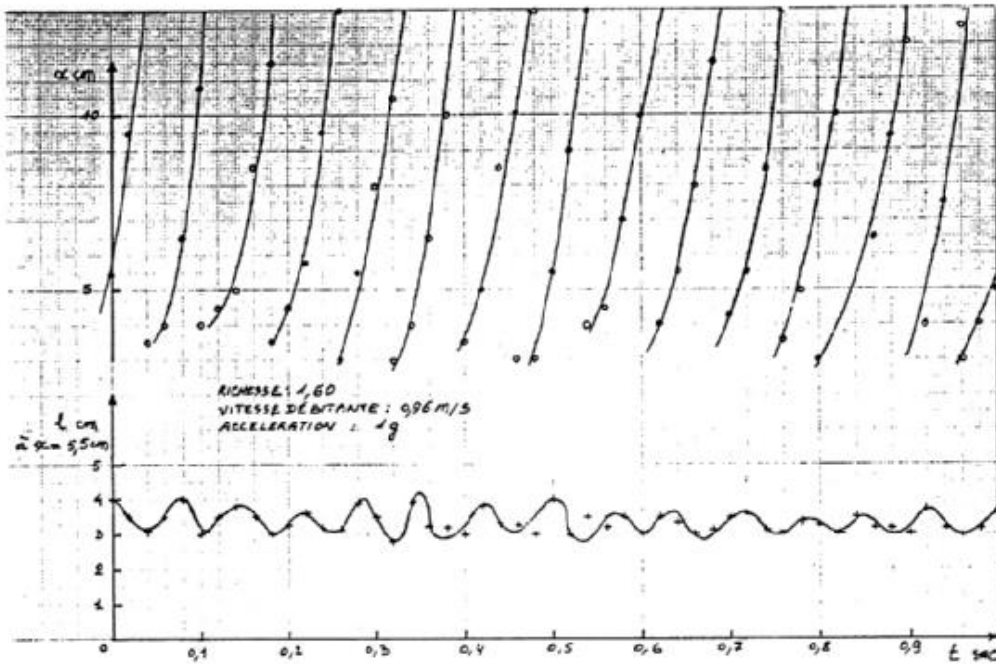


Fig. 7 - Exemple d'évolutions des longueurs l et x sur écran.
 Richesse $\phi = 1,56$; vitesse débitante $U_0 = 0,91 \text{ ms}^{-1}$; accélération $\gamma = 1 \text{ g}$

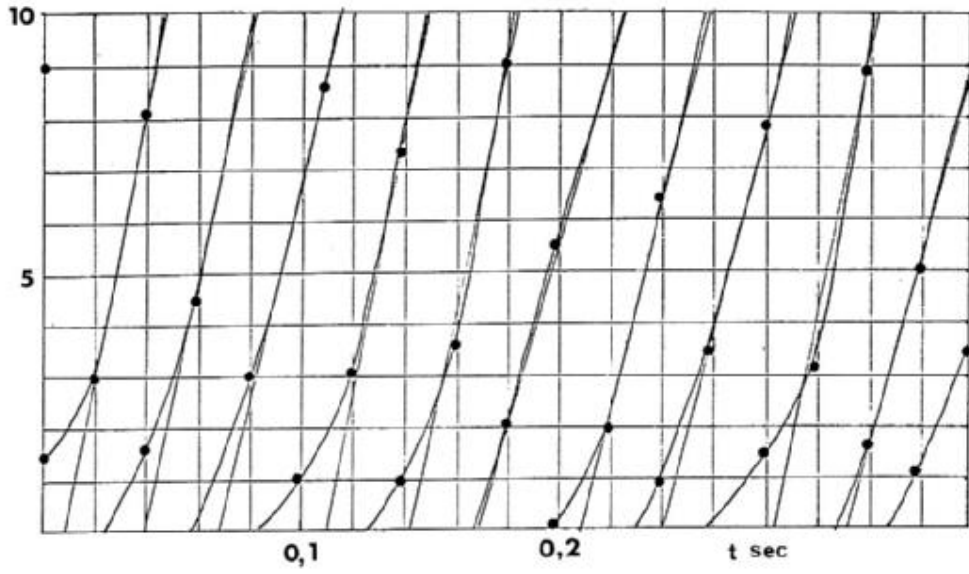


Fig. 8 - Exemple de détermination de F , λ et C sur 18 images. Ici $\varphi = 1,08$, $V = 0,993 \text{ ms}^{-1}$, $\gamma = 2g$. En ordonnée, l'altitude du "tourbillon" sur écran en cm. On trouve sur 0,36 sec 8,3 passages de tourbillons, une longueur d'onde apparente de 2,44 cm et une vitesse de phase apparente de 0,56 m/s d'après le tracé des tangentes

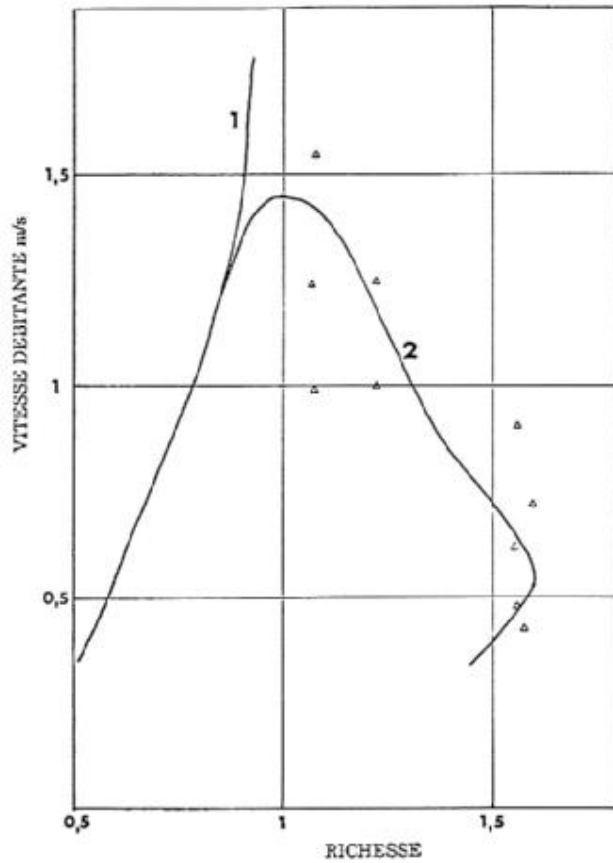
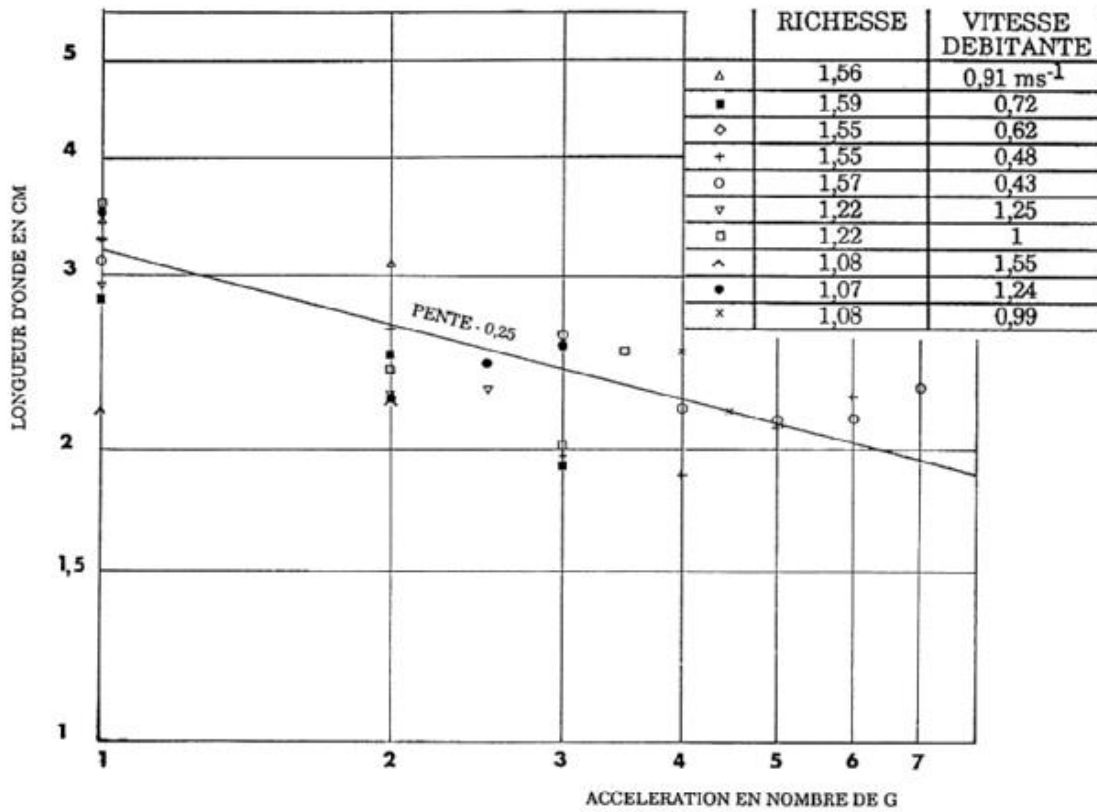
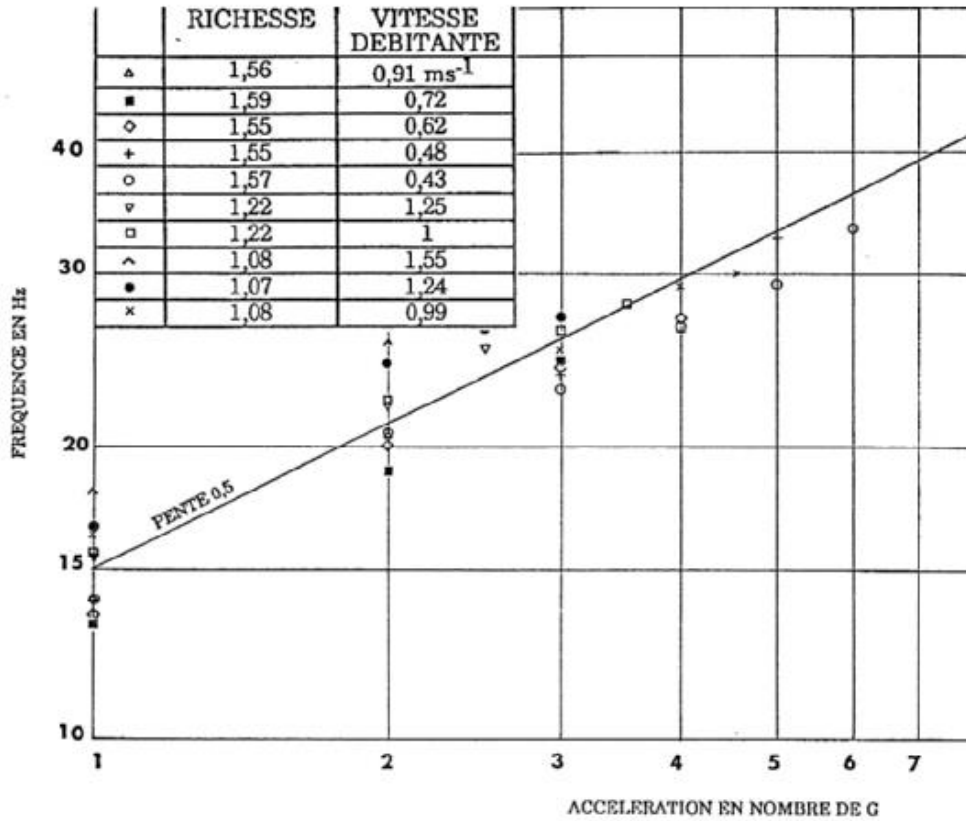


Fig. 9 - Diagramme de stabilité de mélanges de méthane et d'air obtenu en gravité normale. 1 : caisson ouvert ; 2 : caisson fermé ; Δ : points expérimentaux en centrifugeuse



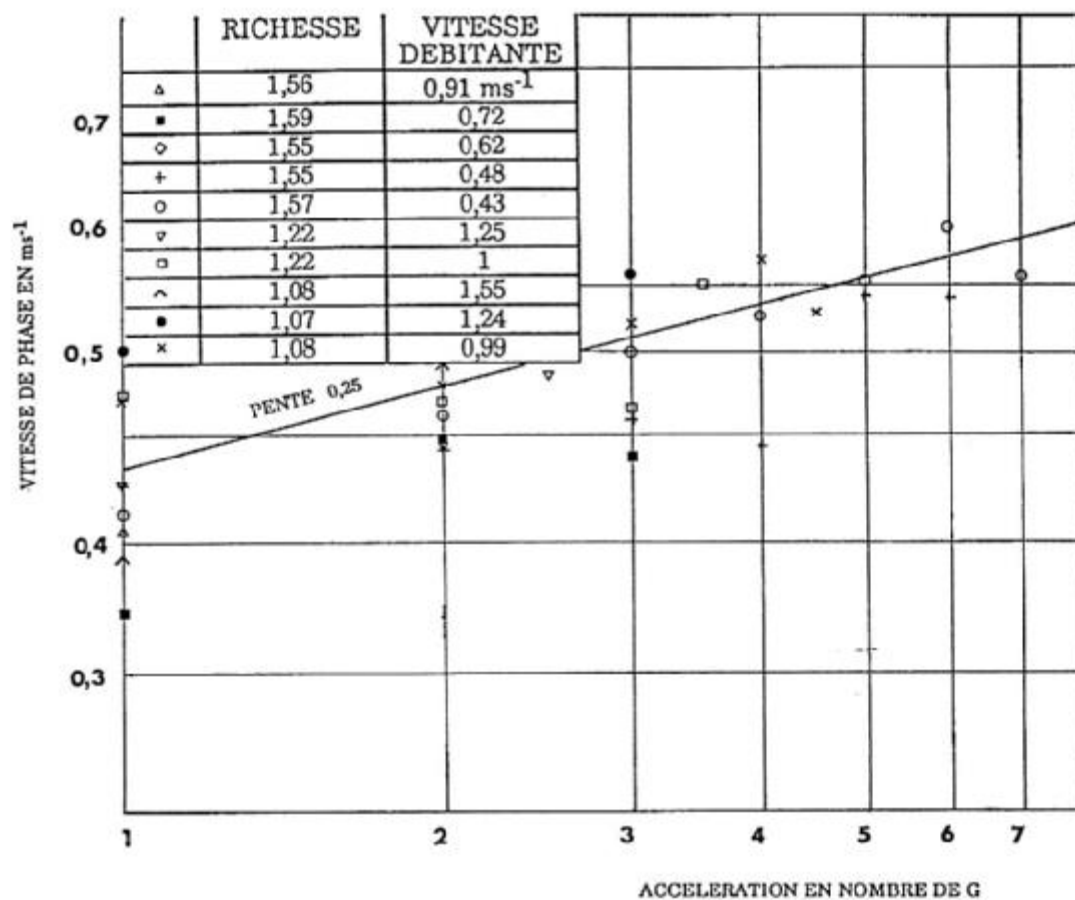


Fig. 12 - Mélange air-méthane, vitesse de propagation des tourbillons en fonction de l'accélération

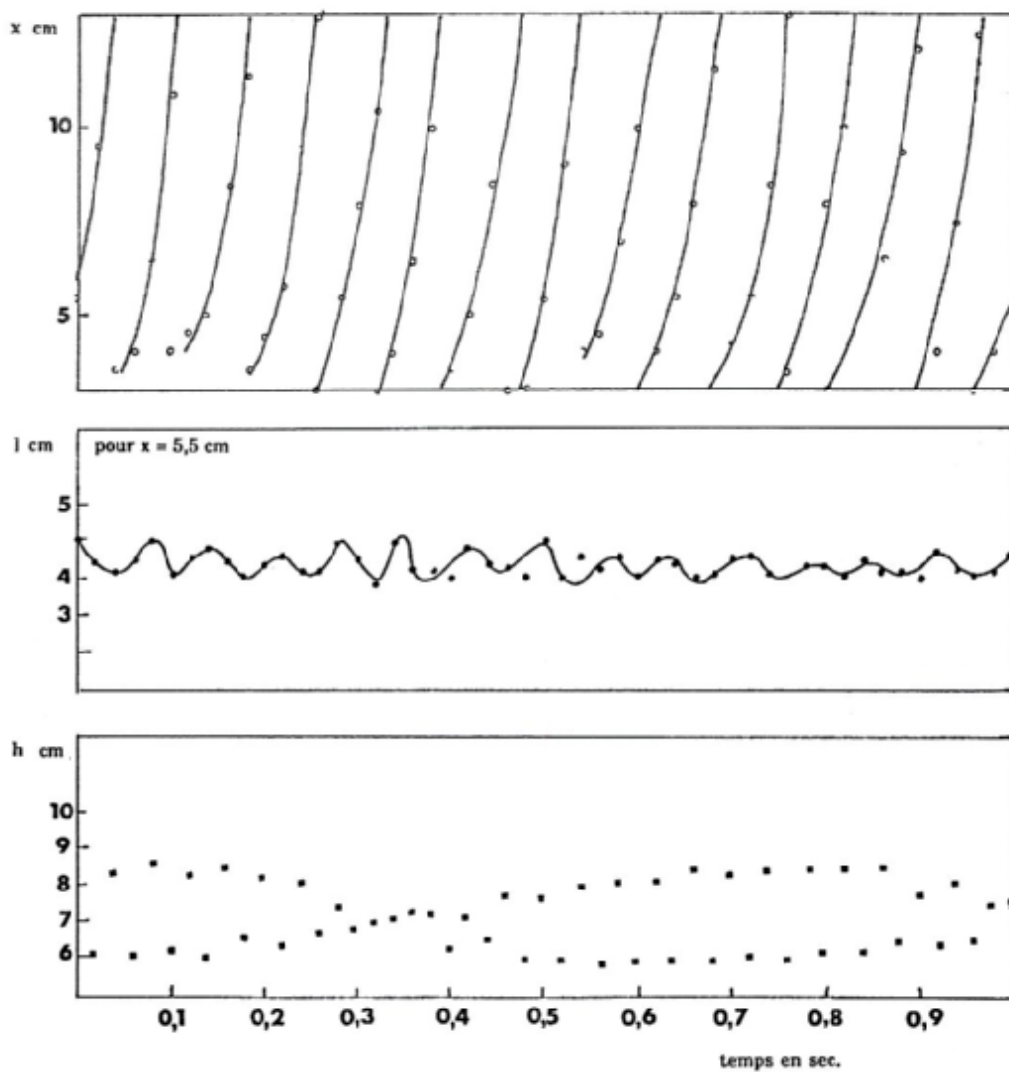


Fig. 13 - Mélange méthane-air. Evolutions comparées de l , x (idem figure. 7) et de la hauteur h de la flamme sur écran.

Richesse : 1,56 ; Vitesse débitante : $0,91 \text{ ms}^{-1}$; Accélération : 1 g